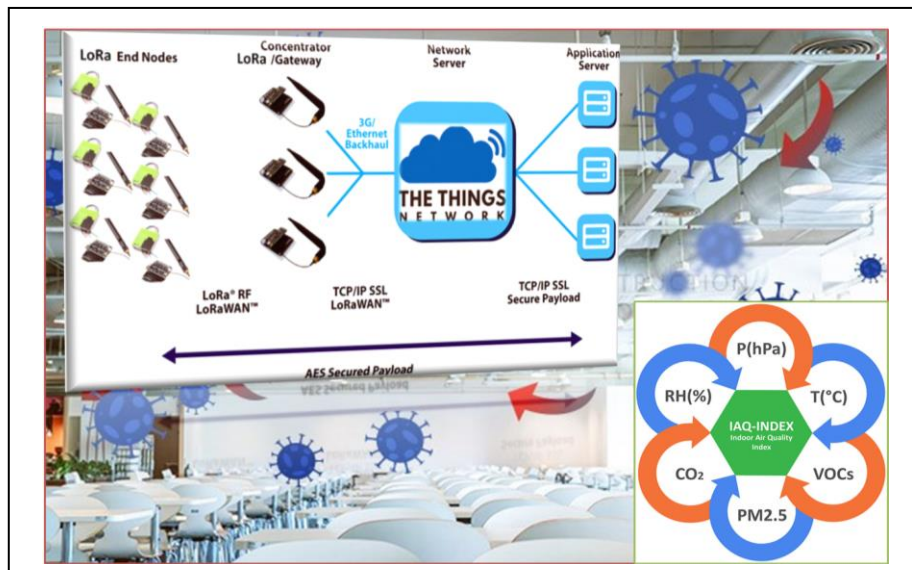


Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΥΦΥΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη ασύρματου δικτύου Έξυπνων αισθητήρων με τη χρήση τεχνολογιών LPWAN, IoT (Διαδικτύου των Αντικειμένων, Internet of Things) για υπηρεσίες «Έξυπνης πόλης»



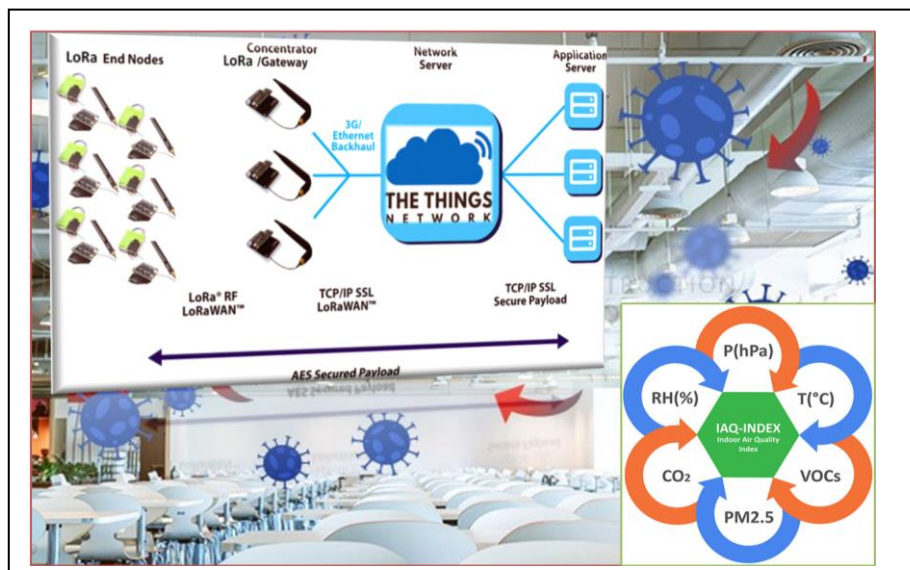
Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Πελαδαρινός Νικόλαος, AM msciot19007

Επιβλέπων: Παπαγέωργας Παναγιώτης, Καθηγητής

Master of Science in
“INTERNET of THINGS AND INTELLIGENT ENVIRONMENTS”

MSc Thesis

Development of a wireless network of Smart Sensors using LPWAN, IoT
(Internet of Things) technologies for "Smart City" services



Student: Peladarinos Nikos, Registration Number msciot19007

MSc Thesis Supervisor: Papageorgas Peter, Professor

ATHENS-EGALEO, JUNE 2021

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Παναγιώτης Παπαγέωργας, Καθηγητής	Διονύσιος Κανδρής, Καθηγητής	Γρηγόριος Κουλούρας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Πελαδαρινός Νικόλαος του Πέτρου, με αριθμό μητρώου msciot19007 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο Δηλών



Πελαδαρινός Νικόλαος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία δύο χρόνια, η πανδημία Covid-19 συνεχίζει να προκαλεί ανασφάλεια σε όλο τον κόσμο. Η μετάδοση και η πρόγνωση των μολύνσεων, επηρεάζονται ενδεχομένως από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε εσωτερικούς χώρους. Ρύποι όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), τα αιωρούμενα σωματίδια ή αλλιώς Particulate Matter (PM) και οι οργανικές πτητικές ενώσεις ή αλλιώς Volatile Organic Compounds (VOC's), σύμφωνα με πρόσφατες επιστημονικές εργασίες συσχετίζονται με σημαντικό κίνδυνο μολύνσεων COVID-19. Τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης (EWS) και το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) οδήγησαν στην ανάπτυξη δικτύων Low Power Wide Area (LPWAN) με βάση αισθητήρες ποιότητας αέρα, που μετρούν τα επίπεδα των ρύπων του αέρα και παρακολουθούν την ποιότητα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (IAQ) σε πραγματικό χρόνο. Στην διπλωματική εργασία αυτή προτείνεται και αξιολογείται η ανάπτυξη ενός Long Range (LoRa) δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους, για μέτρηση και καταγραφή των ρύπων που επηρεάζουν την ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων IAQ σε πραγματικό χρόνο, ειδικά για PM, με επεξεργασία των δεδομένων τους σε πλατφόρμες ανοικτής αρχιτεκτονικής. Η αποτελεσματικότητα τέτοιου ασύρματου δικτύου αξιολογείται με ελεύθερο πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων υπό ενδεικτικές συνθήκες υλοποίησης.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ:

Αερογενείς λοιμώξεις- COVID-19, αισθητήρες ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων IAQ, τεχνολογίες δικτύωσης LPWAN,

ABSTRACT

Until recently the Covid -19 pandemic continues to wreak havoc in many areas of the world, as the infection keeps on spreading via person-to-person contact. Transmission and prognosis of infections are potentially influenced by many factors, including indoor air pollution. Pollutants such as VOC's CO2 and Particulate Matter (PM) according to recent scientific work pose a considerable risk of COVID-19 and generally airborne infections. Early Warning Systems (EWS) and the Internet of Things (IoT) have given rise to the development of Low Power Wide Area Networks (LPWAN) based on dedicated air quality sensors, which measure the levels of air pollutants within premises and monitor the In-door Air pollution Quality (IAQ) in real-time. In this thesis an open-source platform architecture is proposed that presents the development of a Long Range (LoRa) based sensor network for IAQ and PM measurement in particular.

KEYWORDS:

Airborne infections-COVID-19, indoor Air Quality-IAQ, low-Cost Indoor Air-Quality Sensors, LPWAN networking technologies.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί ένα σημαντικότατο ορόσημο στο ταξίδι των ανέμων αναζητήσεών μου κλείνοντας έτσι ακόμη μια γόνιμη σπείρα.

Στην πορεία αυτή στάθηκαν αρωγοί και εμπνευστές οι καθηγητές του Μ.Π.Σ. του Πα.Δ.Α. τους οποίους ευχαριστώ γι' αυτό. Ιδιαίτερα ωστόσο ευχαριστώ από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας τον κ. Παπαγέωργα Παναγιώτη, για την εμπιστοσύνη του, τις πολύτιμες συμβουλές και τις ουσιαστικές παρατηρήσεις του, την συνεργατική του στάση την έμπνευση για αναζήτηση της γνώσης, για την ολοκλήρωση της εργασίας και όχι μόνο.

Ο δρόμος προς την τελική διαμόρφωση της εργασίας ήταν αποτέλεσμα γόνιμης αναζήτησης και έρευνας, πειραμάτων και δοκιμών μέσα από ένθερμη υποστήριξη και καθοδήγηση. Ως ενήλικος εκπαιδευόμενος με πολλά και ανταγωνιστικά μεταξύ τους ενδιαφέροντα και υποχρεώσεις απήλαυσα την έμπρακτη υποστήριξη, αμέριστη συμπαράσταση ιδιαίτερα της συζύγου και του γιου μου που με υπομονή καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου συνετέλεσαν στην επιτυχή ολοκλήρωσή τους, όπως και του ευρύτερου οικογενειακού και φιλικού μου περιβάλλοντος. Τους ευχαριστώ όλους θερμά!

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ I Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας.....	11
I. Το αντικείμενο της εργασίας και οι βασικοί προβληματισμοί	11
I.1. Ιστορική αναδρομή και σύγκριση με υπάρχουσες προτάσεις.....	11
I.2. Κίνητρα και αιτιολόγηση της έρευνας και το πρακτικό πρόβλημα	12
I.3. Στόχοι της έρευνας και το θεωρητικό κενό στην γνώση.....	13
II. Το πρακτικό πρόβλημα η πρόταση αυτής της μελέτης και τα ερευνητικά ερωτήματα. .	14
II.1. Συγκεκριμένα ερευνητικά ερωτήματα	15
III. Η διάρθρωση της εργασίας σε Κεφάλαια	16
1. ΚΕΦ. 1 Ατμοσφαιρική ρύπανση και ποιότητα του αέρα σε κλειστούς χώρους	18
1.1 Μελέτες επιβάρυνσης της Υγείας από ρύπους, από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή	18
1.2 Ρύποι στην ατμόσφαιρα και διάδοση παθογόνων μικροοργανισμών – ιών.....	22
1.2.2 Τα PM προκαλούν βλάβες στα πνευμονικά κύτταρα ενεργοποιώντας φλεγμονές και οξειδωτικό στρες	29
1.2.3 Επιβάρυνση των εσωτερικών χώρων με πτητικές οργανικές ύλες (Volatile Organic Compounds – VOC’s)	30
1.2.4 Επιβάρυνση των εσωτερικών χώρων με Διοξείδιο του Άνθρακα (CO ₂).....	34
1.3 Οδηγίες για την ποιότητα του αέρα εσωτερικών χώρων από τον ΠΟΥ και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.....	36
1.3.1 Μέτρα και οδηγίες για τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.....	39
1.4 Οι αρχές της Ευρωπαϊκής νομοθεσίας για την ποιότητα του αέρα.	45
2. ΚΕΦ. 2 Παρακολούθηση και βελτίωση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων (IAQ) με Αισθητήρες.....	52
2.3 Μετρήσεις των αισθητήρων με σύνδεση σε Arduino MEGA.....	66
2.3.1 Πολυαισθητήρας SVM30 της Sensirion	66
2.3.2 Πολυαισθητήρας SPS30 της Sensirion.....	67
2.3.3 Αισθητήρας Air Quality BME680 της Bosch.....	68
2.3.4 Ο αισθητήρας b5w-ld0101 της OMRON.....	68
3. ΚΕΦ. 3 Σχεδιασμός και υλοποίηση σε πλατφόρμα ανοικτής αρχιτεκτονικής - Open Source Platform.....	70
3.1 Τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας LoRa.....	72
3.2 Κύκλος Εργασίας για χαμηλή κατανάλωση.....	73
3.3 Υλοποίηση του δικτύου LoRaWAN	74
3.4 LoRa Hardware - Πλατφόρμα Lopy4, κόμβος και πύλη LoRa.....	76

3.4.1	Σύνδεση LOPY με Sensirion SPS30.....	77
3.4.2	Προγραμματισμός και παραμετροποίηση του πρώτου Lopy ως LoRa node.....	78
3.4.3	Εγκατάσταση LoRaWAN gateway με το δεύτερο Lopy4	80
4.	ΚΕΦ.4 Επεξεργασία Δεδομένων στο Cloud - TTN	82
4.1	Σύνδεση LoPy4-LoRa node στο TTN.....	82
4.1.1	Λίγα λόγια για τις υπηρεσίες MQTT Broker Cloud.....	83
4.1.2	Υπηρεσίες στο The Things Network (TTN Application) και καταχώρηση των LoRa κόμβων στο TTN	84
4.1.3	Σύνδεση της συσκευής με την βάση δεδομένων του The Things Network	85
4.2	Μεταφορά των μετρήσεων σε βάση δεδομένων	85
4.2.1	Διασύνδεση της βάσης δεδομένων Influx με το TTN μέσω πλατφόρμας Telegraf	86
4.2.2	Βάση Δεδομένων Influx	87
4.2.3	Το περιβάλλον οπτικοποίησης της Grafana	87
4.3	Ασφάλεια και Ιδιωτικότητα	88
4.3.1	Ασφάλεια προώθησης των δεδομένων από τον κόμβο LoRa Lopy node στην πύλη LoRa Gateway	88
5.	ΚΕΦ. 5 Προσομοίωση δικτύου κόμβων αισθητήρων IAQ	90
5.1	Τοποθέτηση πύλης LoRaWAN - Σενάρια	90
5.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	92
6.	ΚΕΦ.6 Συμπεράσματα – Προτάσεις	95
6.1	Ρύποι και υγεία.....	95
6.1.1	Μετρικές σχεδιασμού και στόχοι.....	95
6.1.2	Οι αισθητήρες.....	97
6.1.3	Πλατφόρμες επεξεργασίας υλικού.	98
6.1.4	Διαχείριση δεδομένων	98
6.1.5	Ασφάλεια	98
6.1.6	Ενέργεια.....	99
6.2	Προτάσεις διέξοδοι και προοπτικές.....	99
6.3	Προτάσεις που αφορούν την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων της έρευνας.....	100
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	108
1.	Πλατφόρμα LoPy4	108
2.	Πλατφόρμα Arduino	115
3.	Συνδέσεις των αισθητήρων με το Arduino.....	118
4.	Χαρακτηριστικά και τεχνικές πληροφορίες των Αισθητήρων.....	119

a.	Αισθητήρας SPS30 Sensirion	120
b.	SVM30 Sensirion	121
c.	B5W-LD0101-1/2 Omron	122
5.	Κώδικες προγραμματισμού	124
5.1	LoRa WAN node - Over The Air Authentication OTAA.....	124
5.1.1	Config.py	124
5.1.2	Main.py	124
5.2	Lopy LoRa Wan nano gateway	126
5.2.1	config.py	126
5.2.2	Main.py	127
5.2.3	nanogateway.py	127
5.3	Arduino Sketches για τους αισθητήρες.....	136
5.3.1	Sensor SVM30 : example2_svm30_humidity_updateNikos	136
5.3.2	Sensor SPS30 : Example12_sps30_BasicReadings_any_serial_B	141
5.3.3	Sensor SPS30 : Example2_sps30_BasicReadings_autoclean_B	146
5.3.5	Sensor OMRON B5W : b5w-ld0101_C.....	156

Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας

I. Το αντικείμενο της εργασίας και οι βασικοί προβληματισμοί

Υγεία και ρύπανση του αέρα

Κατά τα τελευταία δύο χρόνια, η **πανδημία Covid-19** συνεχίζει να προκαλεί ανασφάλεια σε όλο τον κόσμο. Η μετάδοση γενικά των αερογενών λοιμώξεων όπως αυτή του CoVid-19, επηρεάζεται ενδεχομένως από πολλούς παράγοντες, ένας εκ των οποίων που αναδεικνύεται τελευταία ιδιαίτερα σημαντικός είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση και δη η επιβάρυνση με ρύπους του αέρα που αναπνέουμε σε εσωτερικούς χώρους.

I.1. Ιστορική αναδρομή και σύγκριση με υπάρχουσες προτάσεις

Οι ρύποι στην ατμόσφαιρα προστίθενται πλέον των φυσικών συστατικών του οξυγόνου και του αζώτου, από τις ποικίλες ανθρώπινες δραστηριότητες, με αποτέλεσμα να επιβαρύνουν δυσμενώς τον αέρα που αναπνέουμε. Όπως προκύπτει από αρκετές και πρόσφατες επιστημονικές εργασίες, οι ρύποι όπως το **διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)**, οι **πτητικές οργανικές ενώσεις** ή αλλιώς **Volatile Organic Compounds (VOC)** που εκλύονται από διαλύτες, χρώματα, οικοδομικά υλικά και άλλα υλικά, τα **αιωρούμενα σωματίδια ή Particulate Matter (PM)**, όπως ορίζονται από τον Αμερικανικό Οργανισμό Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) ήδη από το 1987 [1] τα οποία αποτελούν ένα σύνθετο μείγμα στερεών ή και υγρών σωματιδίων που αιωρούνται στον αέρα σε ποικίλα μεγέθη σχήματα και σύνθεση, όλα τα παραπάνω συσχετίζονται σημαντικά με την μετάδοση αερογενών λοιμώξεων και ειδικότερα αυτής του CoVid-19.

Επιβεβαιώνονται από πρόσφατες έρευνες των τελευταίων δύο χρόνων συμπεράσματα παλαιότερων ερευνητικών εργασιών πως η έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους, μειώνει το **προσδόκιμο ζωής**, εξ αιτίας αυτής προκαλούνται καρδιαγγειακές επιπλοκές και συστημικές φλεγμονές [2], [3], ιδιαίτερα από τους ρύπους PM, επιδεινώνοντας προϋπάρχουσες αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις [4].

Ήδη από την δεκαετία του 80 έγινε αισθητή η ανάγκη για καθορισμό **ασφαλών ορίων** ατμοσφαιρικών ρύπων. Το 1987 το Ευρωπαϊκό παράρτημα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO), εξέδωσε την πρώτη έκθεση με τις επιπτώσεις των ρύπων της ατμόσφαιρας στην δημόσια υγεία ορίζοντας ασφαλή όρια και πρακτικές μείωσης αυτών [5]. Το 2016 δημοσίευσε το πλήρες κείμενο με την αξιολόγηση των αποδεικτικών στοιχείων καθώς και μια σύντομη εισαγωγή σχετικά με τον ρόλο των κατευθυντήριων γραμμών στην προστασία της δημόσιας υγείας, καθώς και τη λογική στην οποία βασίστηκαν οι κατευθυντήριες γραμμές για καθέναν από τους τέσσερις βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους. Σε συνεργασία με την Ευρωπαϊκή επιτροπή ανάλογες οδηγίες εκδόθηκαν και υιοθετήθηκαν από τις

κυβερνήσεις των κρατών το 2005, 2007, 2017 και πρόσφατα το 2020 με ορίζοντα το 2030 για ασφαλή όρια των ρύπων στον αέρα με αναθεωρημένες προτάσεις και βέλτιστες πρακτικές μείωσης αυτών τόσο σε Ευρωπαϊκό επίπεδο όσο και σε παγκόσμια κλίμακα. [5]

Η **ποιότητα του αέρα (Air Quality)** ελέγχεται πλέον συστηματικά με βασικό στόχο τη μείωση των ρύπων κάτω από τα των επιτρεπτά όρια που ορίζουν ο **Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Υγείας** και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα ([air quality](#)) [7]. Το όλο εγχείρημα και οι ρύποι μελετώνται από τον Π.Ο.Υ, τον Ευρωπαϊκό οργανισμό περιβάλλοντος (European Environment Agency), ακόμη και από ιδιωτικούς μη κερδοσκοπικούς οργανισμούς όπως ο AIQCN (aiqcn.org). Ο τελευταίος ξεκίνησε το 2007 με βάση την Κίνα το εγχείρημα World Air Quality Index και επεκτείνεται παγκοσμίως, με νέους βασικούς υποστηρικτές από τη Σιγκαπούρη, την Ινδία, την Αυστραλία, τις ΗΠΑ ακόμη και από την Ελλάδα. Οι τιμές των ρύπων μετρώνται με μετρητικές διατάξεις, διεσπαρμένες σε πόλεις και περιοχές διαφόρων χωρών, αποτυπώνονται σε ιστοσελίδες, καταγράφονται σε βάσεις δεδομένων ελεύθερα προσβάσιμες όπως με τον δυναμικό χάρτη του Ευρωπαϊκός Δείκτης Ποιότητας Αέρα ανά περιοχή [6].

Στην **αγορά διατίθενται συσκευές** για μέτρηση και καταγραφή της ποιότητας του αέρα σύμφωνα με τις παραπάνω δράσεις μόνο που περιορίζονται σε μετρήσεις εξωτερικών χώρων, με αρκετά μεγάλο κόστος με διακριβωμένα και ακριβά εξαρτήματα ή αναλώσιμα [8]. Εκτός όμως από τον έλεγχο της ποιότητας του αέρα των εξωτερικών χώρων γενικά, που έχουμε εστιάσει αρκετές δεκαετίες, προκύπτει πλέον επιτακτικά η ανάγκη της **συστηματικής παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και των εσωτερικών χώρων**. Με γνώμονα την υγεία των διαβιούντων ανθρώπων σε γραφεία, οικίες, σχολικές τάξεις, εργαστήρια, βιοτεχνίες, ξενοδοχεία, τροχόσπιτα, εκτροφεία ζώων, κλινικές νοσοκομεία και αλλού [9], σχεδιάζονται και υλοποιούνται αντίστοιχες διατάξεις ελέγχου της ποιότητας του αέρα των εσωτερικών χώρων (**Indoor Air Quality-IAQ**). Οι ρύποι μετρούνται με κατάλληλους αισθητήρες και μετρητικές διατάξεις υλοποιώντας ενεργητικά συστήματα βελτίωσης του αέρα σε συνδυασμό με συστήματα εξαερισμού και φίλτρων για να βελτιώνεται η ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους για την καλή υγεία των ανθρώπων.

Το τελευταίο διάστημα πωλούνται έτοιμες ενεργές **αυτόνομες διατάξεις ελέγχου IAQ** και καθαρισμού του αέρα γνωστών εταιρειών [10] [11]. Αυτές μετρούν και εμφανίζουν τις τιμές της ποιότητας του αέρα με βάση τα **διεθνώς οριζόμενα επιτρεπτά όρια** των ρύπων, αποστέλλουν τις μετρήσεις τους μέσω ασύρματων επικοινωνιών στους χρήστες είτε ακόμη επενεργούν σε αυτοματοποιημένες εφαρμογές IoT [12] [13], όπως τον έλεγχο εξαερισμού αξιοποιώντας όμως κλειστές πλατφόρμες.

1.2. Κίνητρα και αιτιολόγηση της έρευνας και το πρακτικό πρόβλημα

Γίνεται πλέον αισθητή η **ανάγκη για “έξυπνα” συστήματα ελέγχου ποιότητας του αέρα** εσωτερικών χώρων με δυνατότητες καταγραφής, ελέγχου, ενημέρωσης οπτικοποίησης και ενεργούς παρέμβασης σε πραγματικό χρόνο για την βελτίωση του αέρα αυτού. Ωστόσο αυτές οι εφαρμογές μέχρι τώρα περιορίζουν τον καταναλωτή σε συγκεκριμένα προϊόντα και περιορισμένες λύσεις με μεγάλο λειτουργικό κόστος, κόστος συντήρησης και αρχικής αγοράς. Έτσι χρησιμοποιούνται συνήθως από κοινότητες, ιδρύματα, δήμους και κεντρικές υπηρεσίες σε περιορισμένη κλίμακα.

Για την **μείωση του κόστους** των αισθητήρων, των διατάξεων που διασυνδέονται και διαχειρίζονται τις μετρήσεις των πρώτων όπως και των συστημάτων διαχείρισης ποιότητας αέρα συνολικά έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες σε παγκόσμιο επίπεδο. Πρωτίστως απάντηση στο υψηλό κόστος έδωσαν οι κατασκευαστές αισθητήρων. Αυτοί αναπτύσσουν διαρκώς νέους αισθητήρες κυρίως τύπου MEMS [14], με πολύ ελκυστικά χαρακτηριστικά, όσον αφορά στο χαμηλό κόστος και την ευρεία διαθεσιμότητά τους στην αγορά με σκοπό να εκθρονίσουν τους ακριβούς και δύσχρηστους κλασσικούς χημικούς αισθητήρες.

Επιπλέον λύσεις προτείνονται και με την υλοποίηση διατάξεων στα πλαίσια IoT, σε **πλατφόρμες υλικού ανοικτής αρχιτεκτονικής (Open source Platforms)** όπως Arduino, Raspberry, ESP32 και άλλες. Εδώ προτείνονται εφικτές χαμηλού κόστους και ευέλικτες υλοποιήσεις IoT όπου η επεξεργασία των δεδομένων από τις μετρήσεις γίνεται τοπικά. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι και το Air Quality Monitoring Station του Salman Faris (2020), βασισμένο σε πλατφόρμα Arduino, με οπτική απεικόνιση των τιμών σε LCD οθόνη, χωρίς όμως δυνατότητα μέτρησης PM [15], περιορισμένο στην λογική του πειραματισμού στο εργαστήριο. Άλλο αντίστοιχο παράδειγμα-πρόταση προσιτής και ευέλικτης εφαρμογής IoT έχει δημοσιευθεί στο περιοδικό Sensors MD από τους Sukwon Choi, Nakyoung Kim, Hojung Cha, and Rhan Ha [16]. Σ' αυτή την ποιοτική μελέτη προτείνεται μια προσαρμοσμένη πλατφόρμα με **ασύρματη μεταφορά των δεδομένων** από συνδεδεμένους αισθητήρες του εμπορίου με στόχο την αξιολόγηση ενός ασύρματου κόμβου με αισθητήρες ποιότητας αέρα (Micro Sensor Node for Air Pollutant Monitoring). Πρόκειται για μια πρόταση περιορισμένη σε πλαίσια εξειδικευμένου λογισμικού και σχετικά υψηλής κατανάλωσης, που απέχει αρκετά από μια ανεξάρτητη υλοποίηση.

Διατίθενται στην αγορά συσκευές μέτρησης ποιότητας αέρα υπό της ομπρέλας του συστήματος **έξυπνης διαχείρισης κτιρίων KNX**. Η χρήση τους όμως περιορίζεται στα πλαίσια του δικτύου **KNX Bus** οι οποίες επιπλέον μετρούν κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και λιγότερες τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC) με αρκετά υψηλό κόστος [17].

Διαφαίνεται πλέον επιτακτικά η ανάγκη για υλοποιήσεις άλλου τύπου εκτός από τις ήδη υπάρχουσες.

1.3. Στόχοι της έρευνας και το θεωρητικό κενό στην γνώση.

Απαιτούνται λοιπόν **έξυπνες διατάξεις ελέγχου IAQ** χαμηλού κόστους, με αξιόπιστους και ακριβείς αισθητήρες του εμπορίου, με επεκτασιμότητα και ανοικτή αρχιτεκτονική για ελεύθερη πρόσβαση στα δεδομένα από αντίστοιχες πλατφόρμες ικανές να αναλάβουν την επεξεργασία των δεδομένων αυτών.

Ωστόσο για να γίνουν πράξη τα παραπάνω χρειάζεται να διερευνηθούν τα εξής:

- Το κατά πόσο επηρεάζει η ρύπανση την υγεία του πληθυσμού και ποιες επιπτώσεις επιφέρει η έκθεση σε ρύπους και σε ποιους παρατηρούνται αυτές.
- Έχουμε σαφή εικόνα για την ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους;
- Έχει νόημα να ανιχνεύουμε τα επίπεδα των ρύπων σε εσωτερικούς χώρους;
- Μπορεί μια υλοποίηση ανίχνευσης ρύπων και έγκαιρης προειδοποίησης να λειτουργήσει αξιόπιστα και απρόσκοπτα σε κτίρια όπως κατοικίες, σχολεία, νοσοκομεία κ.λπ.;

- Πόσο μπορούμε να αξιοποιήσουμε και να εμπιστευτούμε την ψηφιακή τεχνολογία και τις ασύρματες επικοινωνίες για να υλοποιήσουμε κατάλληλες υποδομές για την βελτίωση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων;

II. Το πρακτικό πρόβλημα η πρόταση αυτής της μελέτης και τα ερευνητικά ερωτήματα.

Στην παρούσα μελέτη επιχειρείται μια διαφορετική προσέγγιση με στόχους για

- **λειτουργική ευέλικτη και επεκτάσιμη** υλοποίηση χαμηλού κόστους,
- σύμφωνη με τις **προδιαγραφές IAQ** που ορίζονται από τους έγκριτους οργανισμούς,
- διασύνδεση με **υπηρεσίες νέφους**,
- βασισμένη σε **ανεξάρτητες πλατφόρμες** υλοποίησης **ανοικτής αρχιτεκτονικής**,
- με **ανεξάρτητο Hardware Abstraction Layer (HAL)** για απόλυτη διαλειτουργικότητα και **ανεξαρτησία υλισμικού** στην βάση του **MQTT**.

Έτσι θα μπορεί να έχει εικόνα της ποιότητας του αέρα του χώρου του από το κινητό του τηλέφωνο ή τον υπολογιστή του από οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη εφόσον έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο.

Επιπλέον μελετάται η δυνατότητα συνεργασίας

- πλήθους μικρών, **έξυπνων ασύρματων αισθητήρων**,
- **χαμηλής κατανάλωσης** τροφοδοτούμενων ακόμη και με μπαταρία με αυτονομία ετών, που θα μπορούν να διασπαρούν σε σημεία κλειστών χώρων σύμφωνα με τις ανάγκες μέτρησης και καταγραφής των τιμών των ρύπων,
- με **γεωπροσδιορισμό** και
- **χρονική καταγραφή** των δεδομένων.
- Ένα τέτοιο **εύκολα επεκτάσιμο δίκτυο** τύπου **Low Power Wide Area (LPWAN)**,

θα μπορούσε να είναι η λύση για **συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης – Early Warning Systems (EWS)** υποβάθμισης ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων στα πλαίσια του Διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) με βάση αισθητήρες ποιότητας αέρα, που μετρούν τα επίπεδα των ρύπων του αέρα και να παρακολουθούν την ποιότητα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (IAQ) σε πραγματικό χρόνο.

Υπάρχουν και κάποιες προσπάθειες υλοποίησης δικτύων ασύρματων διατάξεων αισθητήρων όπως τεχνολογίας LoRa με κόμβο επεξεργαστική πλατφόρμα LoPy4 με συνδεδεμένους κάποιους αισθητήρες ποιότητας αέρα όπως το **project PyonAir** του πανεπιστημίου του **Southampton** (<https://s-u-pm-sensor.gitbook.io/pyonair/tutorial/deployment>). Όμως ο ασύρματος αυτός κόμβος δεν συνδέεται αποκλειστικά με LoPy LoRa gateway, όπως προτείνεται στην παρούσα μελέτη, αλλά με οποιαδήποτε LoRa gateway του εμπορίου, με δεσμεύσεις και υψηλό κόστος. Άλλες υλοποιήσεις στηρίζονται σε ισχυρές και ενεργειοβόρες πλατφόρμες επεξεργασίας όπως για παράδειγμα το Arduino ή το RaspberryPi οι οποίες λύσεις δυσχεραίνουν την υλοποίηση IoT συστημάτων. Τέτοια παραδείγματα είναι το **project Mysense** (<https://github.com/teusH/MySense>) ενώ της **coreelectronics** (<https://core-electronics.com.au/tutorials/iot-with-lorawan-pycom-the-things-network-and-node-red.html>) αξιοποιεί LoPy4 gateway σε συνδυασμό με πλατφόρμα ελέγχου το Node-Red που όμως απαιτεί ισχυρή επεξεργαστική ισχύ όπως ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής μπορεί να προσφέρει σε εφαρμογές για πειραματισμούς.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία προτείνεται και αξιολογείται η ανάπτυξη ενός LongRange Wide Area Network - LoRaWAN δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης (LPWAN) με την χρήση της **πλατφόρμας LoPy4** της εταιρείας Pycom. Τα LoPy χρησιμοποιούνται εδώ τόσο για την υλοποίηση των ασυρμάτων **LoRaWAN κόμβων** αισθητήρων IAQ, όσο και της **LoRaWAN πύλης (gateway)**. Οι τιμές των αισθητήρων απλά μεταφέρονται μέσω του δικτύου LoRaWAN στον **ανοικτής αρχιτεκτονικής διακομιστή νέφους The Things Network (TTN)**, για την καταχώρηση και καταγραφή των ρύπων που καθορίζουν την ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους (IAQ), σε πραγματικό χρόνο, ειδικά για ρύπους PM. Οι τιμές αυτές με μορφή ψηφιακών δεδομένων παραχωρούνται στη συνέχεια για και **οπτικοποίηση** και επεξεργασία σε **πλατφόρμες ανοικτής αρχιτεκτονικής όπως influxDB και Grafana**.

Εδώ τα δεδομένα των αισθητήρων αποστέλλονται για επεξεργασία απευθείας σε ανοικτές πλατφόρμες νέφους χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερη υπολογιστική ισχύς στο πρώτο επίπεδο της εφαρμογής με πολλά οφέλη.

Με το πρόγραμμα **προσομοίωσης** ανοικτού κώδικα ns-3 αξιολογείται το αξιοποιήσιμο και η αξιοπιστία τέτοιων δικτύων σε ενδεικτικές κτιριακές εγκαταστάσεις.

Απαιτείται η διερεύνηση των παραπάνω όπου ειδικότερα αναφέρονται τα εξής ερευνητικά ερωτήματα:

II.1. Συγκεκριμένα ερευνητικά ερωτήματα

- **« έξυπνο» δίκτυο LPWAN**
 - Μπορεί ένα « έξυπνο» δίκτυο LPWAN αισθητήρων ποιότητας αέρα μέσα σε κλειστούς χώρους να λειτουργήσει ως ασπίδα έναντι των αερογενών μολύνσεων και γενικά να βελτιώσει την υγεία των ανθρώπων;
 - Μπορούν να προστεθούν εύκολα και άλλοι έξυπνοι αισθητήρες ώστε να υλοποιηθεί ένα επεκτάσιμο ασύρματο δίκτυο;
 - Η τεχνολογία LoRa προσφέρεται για μικρού κόστους, ανοικτά, χαμηλής κατανάλωσης ασύρματα δίκτυα LPWAN;
 - Είναι εφικτή η διασπορά πολλών μικρών διατάξεων αισθητήρων σε χώρους για να καλύψουν μεγάλα κτίρια;
- **Αισθητήρες**
 - Υπάρχουν solid state φθηνοί μικροί σε μέγεθος;
 - Διατίθενται ευρέως στην αγορά;
 - Είναι αξιόπιστες οι μετρήσεις τους;
 - Ανταποκρίνονται στα πρότυπα και
 - Είναι αξιόπιστοι,
 - Είναι αξιοποιήσιμες οι μετρήσεις που προκύπτουν από τέτοιους αισθητήρες
 - Χρειάζονται εξειδικευμένο εξοπλισμό για να λειτουργήσουν;
 - Μήπως το λογισμικό που τους συνοδεύει είναι δυσεύρετο, που σε συνδυασμό με τα πρωτόκολλα διασύνδεσης θέτουν περιορισμούς στη χρήση τους και επιβαρύνουν τις διατάξεις με κόστος
- **Πλατφόρμες επεξεργασίας υλικού**
 - Μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα με έτοιμες πλατφόρμες επεξεργασίας δεδομένων όπως το LoPy4;

- Μπορεί να υλοποιηθεί φθηνό custom gateway και node, με την ευρέως διαθέσιμη διάταξη LoPy4 της Pycom;
- Είναι προσιτός ο προγραμματισμός και η παραμετροποίηση της πλατφόρμας LoPy4.
- **Διαχείριση δεδομένων και πλατφόρμες λογισμικού**
 - Μπορούμε να διαχειρισθούμε τα δεδομένα (συλλογή δεδομένων σε βάση, αποθήκευση, καταγραφή, επεξεργασία και οπτικοποίηση) στο cloud χωρίς μεγάλη υπολογιστική ισχύ σε τοπικό επίπεδο;
 - Υπάρχουν εύκολα προσβάσιμες και λειτουργικές πλατφόρμες επεξεργασίας ανοικτής αρχιτεκτονικής;
 - Μπορούν τα δεδομένα των αισθητήρων να μεταδοθούν συνοδεία γεωπροσδιορισμού και χρονικής σήμανσης;
- **Ασφάλεια**
 - Είναι ασφαλής η μεταφορά των δεδομένων από τον χώρο του ασύρματου κόμβου-node στην ασύρματη πύλη-gateway και μετά στο cloud;
- **Ενέργεια**
 - Είναι εφικτή η λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης των ασύρματων κόμβων και μάλιστα για μεγάλα χρονικά διαστήματα;

III. Η διάρθρωση της εργασίας σε Κεφάλαια

3.1 Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ατμοσφαιρική ρύπανση που έχει πλέον φτάσει στα όρια της έκτακτης ανάγκης σε παγκόσμιο επίπεδο σύμφωνα με στατιστικές μελέτες και δεδομένα ερευνών του Παγκοσμίου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ) - World Health Organization (WHO) του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (European Environment Agency- EEA) και της Ευρωπαϊκής επιτροπής. Ανιχνεύεται η σύνδεση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των πολιτών βάσει των οποίων ορίζονται οι στρατηγικοί στόχοι και η πολιτική της Ευρωπαϊκής Επιτροπής που αφορούν τον ατμοσφαιρικό αέρα με ορίζοντα το έτος 2030 και μετουσιώνονται στις αρχές της Ευρωπαϊκής νομοθεσίας για την ποιότητα του αέρα. Συνδέονται οι ρύποι στην ατμόσφαιρα και ειδικά των σωματιδίων PM, με την διάδοση παθογόνων μικροοργανισμών, βακτηριδίων και υιών, όπως του COVID-19.

3.2 Στο δεύτερο κεφάλαιο επιχειρείται η παρακολούθηση και η βελτίωση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων (IAQ) με τεχνητά μέσα, με συγκεκριμένους αισθητήρες και συσκευές επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων των αισθητήρων. Γίνεται ποιοτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των αισθητήρων σε σχέση με τις προδιαγραφές και τα πρότυπα, σύμφωνα με τα οποία κρίνεται κατά πόσο είναι ρεαλιστικά υλοποιήσιμες διατάξεις IAQ με αυτούς και με βάση τα χαρακτηριστικά και το κόστος τους. Επιπλέον τίγονται θέματα πιστοποίησης και ασφάλειας των μετρήσεων ενώ τέλος περιγράφεται η πειραματική διάταξη σύνδεσής τους με την επεξεργαστική πλατφόρμα Arduino MEGA όπου και καταγράφονται ενδεικτικά οι μετρήσεις τους.

3.3 Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η υποδομή των ασύρματων κόμβων που υλοποιούν τους έξυπνους αισθητήρες. Αυτοί μεταφέρουν σε συνθήκες πραγματικού χρόνου τα δεδομένα τους μέσω LPWAN ασύρματης τεχνολογίας LoRa WAN χρησιμοποιώντας υποδομές τεχνολογίας «νέφους» και το κατάλληλο «λογισμικό middleware» προκειμένου να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη επικοινωνία και η πλήρης γραμμικότητα της λειτουργικότητας τόσο των κόμβων όσο και των υπηρεσιών, σε σχέση με

την ανάπτυξη του δικτύου και τον αριθμό των κόμβων. Πρόκειται για σχεδιασμό και υλοποίηση σε Open Source Platform τύπου LoRa node και LoRa gateway

3.4 Στο τέταρτο κεφάλαιο εκδιπλώνονται οι πτυχές των υποδομών της τεχνολογίας νέφους της κοινότητας MQTT Broker –The Things Network με το κατάλληλο λογισμικό υπηρεσιών με το οποίο επιτυγχάνεται η επεξεργασία των δεδομένων στο Cloud. Οι έξυπνες συσκευές των αισθητήρων της μελέτης μας συνδέονται με την ελεύθερη βάση δεδομένων Influx για να αξιοποιηθούν και να οπτικοποιηθούν τα δεδομένα τους κατάλληλα στην επίσης ελεύθερη πλατφόρμα του Grafana.

Επιπλέον τίγονται θέματα ασφαλούς μεταφοράς των δεδομένων καθώς αυτά προωθούνται από τον κόμβο LoRa Lopy node στην πύλη LoRa προς το “νέφος” προσδίδοντας την απαραίτητη εγκυρότητα στα συλλεχθέντα δεδομένα.

3.5 Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο επιχειρείται ένα σύνολο προσομοιώσεων με εργαλεία ανοικτού κώδικα, του υλοποιούμενου ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Επιχειρείται μια ποιοτική αξιολόγηση των συμπερασμάτων της αποτελεσματικότητας και την αξιοπιστίας τέτοιων δικτύων ώστε να δικαιολογούν την υλοποίηση σε πρακτικό επίπεδο.

3.6 Στο έκτο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα συμπεράσματα της ερευνητικής εργασίας και παρουσιάζονται αντίστοιχα προτάσεις βελτίωσης της ποιότητας του αέρα σε κλειστούς χώρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ατμοσφαιρική ρύπανση και ποιότητα του αέρα σε κλειστούς χώρους

Η ατμοσφαιρική ρύπανση πλέον έχει φτάσει στα όρια της έκτακτης ανάγκης σε παγκόσμιο επίπεδο. Η κατάσταση αφορά άμεσα στη δημόσια υγεία και επηρεάζει τους ανθρώπους όλων των ηλικιών σε κάθε σημείο του πλανήτη. Σήμερα, η αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αποτελεί βασική προτεραιότητα των κυβερνήσεων οι οποίες ακολουθούν κατευθυντήριες γραμμές περί της ποιότητας του αέρα και γενικά αρχές και οδηγίες για την βελτίωση της υγείας του πληθυσμού, και ιδιαίτερα των πιο ευάλωτων πολιτών που καθορίζουν τόσο ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) όσο και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (Ε.ΕΠ.). [18]

1.1 Μελέτες επιβάρυνσης της Υγείας από ρύπους, από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας.

Σύμφωνα με αρκετές στατιστικές μελέτες και δεδομένα ερευνών του Παγκοσμίου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ) - World Health Organization (WHO) [19], ο αέρας που αναπνέουμε επιβαρύνεται κατά κόρον με ρύπους από ποικίλες πηγές ρυπογόνων εκπομπών. Τέτοιες είναι τα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης, βιομηχανικές μονάδες, εγκαταστάσεις θέρμανσης ακόμη και διάφορες εμπορικές δραστηριότητες κυρίως σε εξωτερικούς χώρους, καθώς και ο καπνός του τσιγάρου ή ακόμη και οικιακά καύσιμα σε εσωτερικούς χώρους.

Μόνο στην Ευρωπαϊκή Περιφέρεια του ΠΟΥ, έχει διαπιστωθεί με έρευνες πως με την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια μειώνεται κατά ένα έτος σχεδόν το προσδόκιμο ζωής του πληθυσμού κατά μέσον όρο. Αυτό παρατηρείται κυρίως επειδή αυξάνεται ο κίνδυνος εμφάνισης καρδιαγγειακών και αναπνευστικών παθήσεων και καρκίνου του πνεύμονα.

Επιπλέον, σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη που αξιοποιεί δεδομένα από 25 πόλεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης, εκτιμάται ότι στις πιο μολυσμένες πόλεις, το προσδόκιμο ζωής θα μπορούσε να αυξηθεί περίπου για 22 μήνες εάν μειωνόταν η μακροπρόθεσμη συγκέντρωση σωματιδίων PM_{2.5} στα επίπεδα της ετήσιας βάσης του Παγκοσμίου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ).

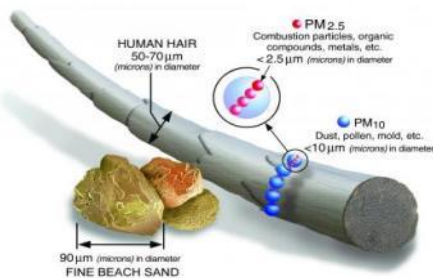
Δεδομένα από το Σύστημα Πληροφοριών του ΠΟΥ (ENHIS), που αφορούν στο Περιβάλλον και την Υγεία που καλύπτουν 357 ευρωπαϊκές πόλεις σε 33 χώρες, δείχνουν ότι το 2009 σχεδόν το 83% του πληθυσμού σε αυτές τις πόλεις εκτέθηκε σε επίπεδα PM₁₀ που



Εικόνα 1 : iStockphoto (WHO)

υπερβαίνουν τις οδηγίες του ΠΟΥ. Παρόλο που στις περισσότερες χώρες την τελευταία δεκαετία τα μέσα επίπεδα PM10 μειώνονται, με αποτέλεσμα να παρατηρείται εμφανής βελτίωση σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια, έστω και με βραδείς ρυθμούς το ποσοστό αυτό παραμένει αρκετά υψηλό, ωστόσο.

Να σημειώσουμε εδώ ότι ο όρος PM2.5 και PM10 αναφέρεται στα μικροσκοπικά στερεά ή



Εικόνα 2: Σύγκριση μεγεθών σωματιδίων PM (Πηγή EPA)

υγρά σωματίδια πλάτους κάτω των 2,5μm, ή μέχρι 10μm αντίστοιχα, συμπεριλαμβανομένων της αιθάλης και των αερολυμάτων που σχηματίζονται από αέριους ρύπους όπως η αμμωνία το διοξείδιο του θείου και τα οξείδια του αζώτου. Το πολύ μικρό μέγεθος ειδικά των PM2.5, τους επιτρέπει να εισέλθουν στις κυψελίδες βαθιά στους πνεύμονες όπου μπορεί να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία [20]

Στις 115 μεγαλύτερες πόλεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), εκτίθενται σε επιβαρυνόμενη από αιωρούμενα σωματίδια ατμόσφαιρα, περίπου 40 εκατομμύρια άνθρωποι. Τα επίπεδα τουλάχιστον ενός ρύπου, υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια που ορίζει ο ΠΟΥ αναφορικά με την ποιότητα του αέρα. Τα παιδιά που ζουν κοντά σε δρόμους με λιγότερη συμφόρηση διατρέχουν τον μισό ποσοστιαία κίνδυνο να εμφανίσουν αναπνευστικά προβλήματα από εκείνα που ζουν κοντά σε δρόμους με κυκλοφορία βαρέων οχημάτων.

Οι έμμεσες επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όπως η κλιματική αλλαγή, γίνονται ολοένα και περισσότερο εμφανείς. Οι μεταφορές που συνεισφέρουν τα μέγιστα στην αλλαγή του κλίματος, είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) ορυκτών καυσίμων.

Η ρύπανση από το όζον προκαλεί αναπνευστικές δυσκολίες, συμπτώματα άσθματος, πνευμονικές και καρδιακές παθήσεις και σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία σχετίζεται με περίπου 21.000 πρόωρους θανάτους ετησίως στην Ευρώπη.

Τα παιδιά και ενήλικες κινδυνεύουν κατά 50% περισσότερο να αναπτύξουν αναπνευστική νόσο εξ' αιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε εσωτερικούς χώρους από βιολογικούς παράγοντες που σχετίζονται με την μούχλα και την υγρασία.

Το παθητικό κάπνισμα προκαλεί σοβαρά προβλήματα υγείας του αναπνευστικού στα παιδιά, όπως άσθμα και μειωμένη πνευμονική λειτουργία. Προκαλεί επίσης πνευμονική νόσο, καρδιαγγειακές παθήσεις, καρκίνο και πρόωρο θάνατο σε ενήλικες.

Πληροφορίες που αφορούν τους ρύπους και τις επιπτώσεις τους στην υγεία μπορούμε να βρούμε είτε στις Οδηγίες για την ποιότητα του αέρα του ΠΟΥ ([Air Quality Guidelines](#)) [21] είτε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος ([European Environment Agency](#)) [22] με πληροφορίες για επιπλέον επιπτώσεις στην ατμοσφαιρική ρύπανση και δεδομένα. Προφανώς και η Ευρωπαϊκή Ένωση επίσης δίνει έμφαση στην ποιότητα του εισπνεόμενου αέρα που είναι απαραίτητος για την υγεία μας και το περιβάλλον μας. Αλλά μέσα από μελέτες και έρευνες διαπιστώνεται και από την πλευρά της Ευρώπης, ότι από την εποχή της βιομηχανικής επανάστασης, έχει επιδεινωθεί σημαντικά η ποιότητα του αέρα που αναπνέουμε, με βασική αιτία τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Η επιβάρυνση τόσο της υγείας των κατοίκων όσο και γενικά του περιβάλλοντος, οφείλεται κατά κόρον στην καύση των ορυκτών καυσίμων και βιομάζας, στην αύξηση της βιομηχανικής και ενεργειακής παραγωγής, καθώς και στην δραματική αύξηση της Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πελαδαρινός Νικόλαος, AM msciot19007 19

κυκλοφορίας στους δρόμους των πόλεων και των αστικών κέντρων. (Πρόγραμμα Καθαρός αέρας Ε.Ε. Clean Air E.C.) [23], (Οδηγία/2013/0918) [24]

Το τίμημα σε ανθρώπινες ζωές λόγω υποβαθμισμένου ποιοτικά αέρα είναι υψηλότερο αυτού που οφείλεται σε τροχαία δυστυχήματα. Έτσι καθίσταται η πρώτιστη περιβαλλοντική αιτία πρόωρων θανάτων στην ΕΕ, με απολογισμό πέραν των 390.000 πρόωρων θανάτων κάθε χρόνο. Επίσης, επηρεάζει την ποιότητα ζωής συνολικά αφού προκαλεί ή επιδεινώνει αναπνευστικά προβλήματα και ιδιαίτερα το άσθμα. Η ατμοσφαιρική ρύπανση οδηγεί σε απώλεια εργάσιμων ημερών, υψηλό κόστος υγειονομικής περίθαλψης, σε ευάλωτες πληθυσμιακά ομάδες όπως τα παιδιά, τους ασθματικούς και τους ηλικιωμένους. Μέσα από μελέτες προκύπτουν διαπιστωμένες βλάβες γενικά των οικοσυστημάτων μέσω της υπερβολικής ρύπανσης του αζώτου, που οδηγεί σε ευτροφισμό, αλλά και της όξινης βροχής

Επιπτώσεις	Επιπτώσεις στην υγεία ¹ (πρόωρη θνησιμότητα αποδιδόμενη στα αιωρούμενα σωματίδια και στο όζον)	Έκταση οικοσυστημάτων υπερβαίνοντα τα όρια ευτροφισμού ²
2010	406.000	62 %

Πίνακας 1 : Οι πιο αξιοσημείωτες επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέχρι το 2010, στην υγεία των πληθυσμών αλλά και στα οικοσυστήματα γενικότερα.

Έστω και με πλήρη συμμόρφωση με την ισχύουσα νομοθεσία στα πλαίσια της ΕΕ αναφορικά στον περιορισμό των ρύπων, οι επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και στο περιβάλλον αναμένονται πολύ δυσόιονες (πίνακας 2). Έως το 2025 προβλέπεται πως μόλις κατά το ένα τρίτο ή και λίγο περισσότερο θα περιοριστούν οι αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, που εκφράζεται ως πρόωρη θνησιμότητα και συνδέεται με τη ρύπανση, ενώ η μεγαλύτερη μείωση θα παρατηρηθεί έως το έτος 2020. Το φαινόμενο του ευτροφισμού από την άλλη αναμένεται να βελτιωθεί μερικώς, αφού προβλέπεται ότι θα συνεχιστεί η υπέρβαση του ορίου των αρνητικών επιπτώσεων στα οικοσυστήματα τουλάχιστον στο μισό των εκτάσεων των οικοσυστημάτων της ΕΕ. Το συνολικό κόστος που αντιστοιχεί στην υγεία και στο περιβάλλον³ που συνδέεται άμεσα με την ρύπανση της ατμόσφαιρας, προβλέπεται υψηλό, με τάσεις περιορισμού κατά 30 % περίπου μέχρι το 2025 και 35 % μέχρι το 2030 υπολογιζόμενο να διαμορφωθεί σε τάξη μεγέθους των 212-740 δισ. ευρώ. [25]

Επιπτώσεις	Επιπτώσεις στην υγεία (πρόωρη θνησιμότητα αποδιδόμενη στα αιωρούμενα σωματίδια και στο όζον)	Έκταση οικοσυστημάτων υπερβαίνοντα τα όρια ευτροφισμού
Μέχρι το 2025	Μείωση κατά 37 %	Μείωση κατά 21 %
Μέχρι το 2030	Μείωση κατά 40 %	Μείωση κατά 22 %

Πίνακας 3 : Αν δεχθούμε ότι θα εφαρμοστούν πλήρως οι οδηγίες της ισχύουσας νομοθεσίας, μέχρι το 2030 αναμένεται η εξέλιξη του πίνακα σε σχέση με τις κυριότερες επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, (περιορισμός των επιπτώσεων συγκριτικά με 2005)

¹ Έκθεση TSAP Baseline που αναφέρεται στην υπόθεση εργασίας περί της θεματικής στρατηγικής αναφορικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση και τις επιπτώσεις της στην υγεία και στο περιβάλλον [122].

² Το ποσοστό των εκτάσεων των οικοσυστημάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση όπου οι υπερβάσεις των κρίσιμων επιπέδων όσον αφορά στον ευτροφισμό εμφανίζονται σημαντικές.

³ Πρόκειται για συνολική εκτίμηση όλων δαπανών που αφορούν την ατμοσφαιρική ρύπανση, που σημαίνει εκτός της εκτίμησης του άμεσου οικονομικού κόστους, όπως οι απώλειες της παραγωγικότητας, στην υγειονομική περίθαλψη ή την υποβάθμιση των καλλιεργειών κ.α., αλλά και χρηματική αντιστοίχιση της υποβαθμισμένης υγείας των πολιτών. Αυτές οι εκτιμήσεις αφορούν κυρίως τον τομέα της υγείας, καθώς επειδή η σύνδεση της κατάστασης των οικοσυστημάτων με την οικονομία εμφανίζει πρακτικές δυσκολίες

Η πολιτική της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και οι νέοι στρατηγικοί στόχοι μέχρι το 2030.

Ο μακροπρόθεσμος στόχος της ΕΕ για τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης συνηγορεί με τις κατευθύνσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ) αναφορικά στην ανθρώπινη υγεία⁴ (τα οποία ενδέχεται να αναπροσαρμοστούν κατάλληλα με την πάροδο του χρόνου) και τα κρίσιμα όρια αντοχής των οικοσυστημάτων⁵. Η νέα στρατηγική αποσκοπεί σε δύο κατευθύνσεις. Πρώτα την πλήρη συμμόρφωση με την υφιστάμενη νομοθεσία το αργότερο μέχρι το 2020, και την χάραξη πορείας με όραμα των μακροπρόθεσμων στόχων της ΕΕ.

Σύμφωνα με τα τελευταία μπορούμε να δούμε στον πίνακα 6 τους νέους στόχους της πολιτικής της Ε.Ε, περί ατμοσφαιρικού αέρα με χρονικό ορίζοντα το 2030. Ο στόχος λαμβάνοντας υπόψη την ισχύουσα νομοθεσία είναι προφανώς η βελτίωση στην υγεία κατά ένα τρίτο ενώ από την πλευρά του ευτροφισμού ο στόχος είναι η μείωσή του κατά το ήμισυ.

Επιπτώσεις	Επιπτώσεις στην υγεία (πρόωρη θνησιμότητα αποδιδόμενη στα αιωρούμενα σωματίδια και στο όζον)	Έκταση οικοσυστημάτων που υπερβαίνει τα όρια ευτροφισμού
2030	-52 %	35 %

Πίνακας 4: Οι νέοι στόχοι των οδηγιών για τον ατμοσφαιρικό αέρα μέχρι το 2030 συγκριτικά με το 2005

Προφανώς η συμμόρφωση για την υλοποίηση του στόχου του 2030 συνεπάγεται και κόστος. Αυτό όμως συνεπάγεται και οφέλη που δικαιολογούν πολλαπλώς το αναμενόμενο κόστος συμμόρφωσης. Πρωταρχικά τα προτεινόμενα μέτρα θα εξασφαλίσουν μακροβιότητα και καλύτερη υγεία για τους πολίτες της ΕΕ μιας και θα μειωθούν άμεσα οι θανατηφόρες νόσοι που προκαλούνται από την ατμοσφαιρική ρύπανση⁶. Δεύτερον, εάν λάβουμε υπόψη και την ελάφρυνση των συστημάτων υγείας τότε βάσει των πιο συντηρητικών προβλέψεων από οικονομικής πλευράς, τα καθαρά οφέλη εκτιμώνται σε περίπου 40 δισεκατομύρια ευρώ ετησίως. Βέβαια στο ποσόν αυτό θα πρέπει να προσθέσουμε και τα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη από την βελτίωση των οικοσυστημάτων, που προφανώς είναι δύσκολο να αποτιμηθούν καθαρά οικονομικά. Τελικά εάν ληφθούν υπόψη η αύξηση της παραγωγικότητας⁷, ο περιορισμός των δαπανών για την υγειονομική περίθαλψη, για αντιμετώπιση ασθενειών που σχετίζονται με τη ρύπανση⁸ τον περιορισμό των απωλειών στις καλλιέργειες και των υποδομών τότε οι όποιες αρνητικές επιπτώσεις στο ΑΕΠ αντισταθμίζονται πλήρως. Αξίζει να σημειωθεί πως ελήφθησαν υπόψη οι όποιες διαφοροποιήσεις των επιπτώσεων μεταξύ των κρατών μελών.

⁴ Για κάποιους δεν έχουν καθοριστεί συγκεκριμένα ασφαλή επίπεδα έκθεσης, όπως για παράδειγμα τα PM, όμως οι κατευθύνσεις του ΠΟΥ προσδιορίζουν ένα βασικό επίπεδο επικινδυνότητας το οποίο αναθεωρείται τακτικά.

⁵ Κρίσιμα όρια όπως μέγιστα επίπεδα αντοχής των οικοσυστημάτων προτού αυτά υποβαθμιστούν.

⁶ Εκτιμάται ότι με τα προτεινόμενα μέτρα θα εξασφαλιστούν συνολικά 500 000 χρόνια ζωής ετησίως.

⁷ Επιπλέον αύξηση 15 εκατομμυρίων ημερών εργασίας ανά έτος, από την βελτίωση της υγείας που σχετίζεται με την ατμοσφαιρική ρύπανση.

⁸ Η επιπλέον μείωση των δαπανών για την υγεία κατ εκτίμηση 650 εκατ. ευρώ ετησίως.

Σύνδεση ατμοσφαιρικής ρύπανσης με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των πολιτών

Σύμφωνα με την μελέτη των Comunian, S.; Dongo, D.; Milani, C.; Palestini, P [Comunian, S.; Dongo, D.; Milani, C.; Palestini, P. [26], πολλές επιδημιολογικές μελέτες έχουν συνδέσει την ατμοσφαιρική ρύπανση με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των πληθυσμών κυρίως επιφέροντας αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα. Η βραχυπρόθεσμη έκθεση σε υψηλότερα από τα καθορισμένα ασφαλή επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, μειώνει το προσδόκιμο ζωής, επιδεινώνοντας προϋπάρχουσες αναπνευστικές και καρδιαγγειακές παθήσεις [4]. Οι καρδιαγγειακές επιπλοκές που προκαλούνται από τα PM αποδίδονται στην εναπόθεση σωματιδίων στους πνεύμονες, με τη μεταφορά τους μέσω του φραγμού αέρα-αίματος σε εξωπνευμονικές θέσεις οδηγώντας κατ' επέκταση σε συστηματικές φλεγμονές [2], [3]. Οι ρυθμοί εναπόθεσης σωματιδίων συνδέονται αυστηρά με το μέγεθος των σωματιδίων αφού τα μικρότερα σωματίδια εναποτίθενται ευκολότερα και πιο αποτελεσματικά. Πολλές μελέτες υπογραμμίζουν επίσης συσχετίσεις μεταξύ της επίδρασης του PM και της ανδρικής υπογονιμότητας [27] καθώς και των νευροεκφυλιστικών ασθενειών [28], [29], [30]

Στη Λομβαρδία της Βόρειας Ιταλίας η παραγωγή πρωτογενών σωματιδίων αποδίδεται στην καύση ντίζελ κατά 15% και κατά 50% στην καύση της στερεάς βιομάζας [31]. Τα καυσαέρια από την καύση ντίζελ συναποτελούν ένα σύνθετο μείγμα στερεών υπολειμμάτων, συμπυκνωμένων (ή υγρών) και αέριων μικροσωματιδιακών αιωρημάτων [32]. Το στερεό μέρος τους αποτελείται από σωματίδια καυσαερίων ντίζελ (Diesel Exhaust Particles - DEP), με βιο-ανθεκτικό πυρήνα διαμέτρου περίπου 10-30 nm [33]. Αυτά τα πρωτογενή σωματίδια, αποτελούμενα από στοιχειακό άνθρακα, μπορούν στη συνέχεια να συσσωματωθούν σε μεγαλύτερα σύνολα αιθάλης με μέσες διαμέτρους 60-100 nm [29]. Η επιφάνεια DEP μπορεί να απορροφήσει περισσότερες από 300 χημικές ενώσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν PAH, αλειφατικούς υδρογονάνθρακες, κινάνες που προκύπτουν από κυκλικούς υδρογονάνθρακες όπως το βενζόλιο ή το ναφθαλίνη, μέταλλα και άλλα [34]. Επιπλέον, από την ατελή καύση της βιομάζας (BB) προέρχονται πλήθη σωματιδίων μερικής οξειδωμένων οργανικών χημικών ενώσεων, πολλές από τις οποίες έχουν συσχετιστεί με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία [31]. Ωστόσο, το DEP έχει αποδειχθεί ότι είναι ακόμη πιο τοξικό από το BB [35] Αυτά τα σωματίδια περιλαμβάνονται στο μέρος των σωματιδίων τύπου PM_{2.5}, με μέγεθος μικρότερο από 0,1 μικρόμετρα, και έτσι μπορούν να ταξινομηθούν ως σωματίδια υπερβολικά πολύ μικρής διαμέτρου (UFP). Τα UFP μπορούν να προσβάλλουν δυσμενέστερα τον ανθρώπινο οργανισμό επιφέροντας χειρότερα και διαφορετικά προβλήματα τοξικότητας σε σύγκριση με εκείνα των μεγαλύτερων σωματιδίων με την ίδια σύνθεση. Αυτά αλληλεπιδρούν με τα κύτταρα του πνεύμονα και έχουν την ικανότητα να μετατοπίζουν το κυψελιδικό επιθηλιακό φράγμα [36]. Ωστόσο, δεν μπορεί να αποκλειστεί ότι η συστηματική τοξικότητα που μπορεί να προκαλείται επίσης από υδατοδιαλυτά συστατικά ή / και βιοχημικούς μεσολαβητές που σχετίζονται με PM ή UFPs που απελευθερώνονται στον πνεύμονα και μετά περνούν στην κυκλοφορία του αίματος

1.2 Ρύποι στην ατμόσφαιρα και διάδοση παθογόνων μικροοργανισμών – ιών.

Τα βασικά αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας είναι 78% άζωτο, 21% οξυγόνο και 1% άλλα αέρια. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες προσθέτουν στον αέρα νέα συστατικά που μπορεί να είναι επιβλαβή για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Αέρια και αιωρούμενα μικροσωματίδια που εκλύονται στην ατμόσφαιρα προφανώς την ρυπαίνουν. Τέτοια αέρια είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το όζον (O₃), το

διοξειδίο του θείου (SO₂), η αμμωνία (NH₃), διάφορες πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC's), καθώς και ορισμένες αέριες μορφές μετάλλων. Αντίθετα, τα αιωρούμενα μικροσωματίδια (PM) αποτελούν ένα μείγμα ενώσεων που μπορούν να ομαδοποιηθούν σε πέντε κύριες κατηγορίες: θειικά, νιτρικά άλατα, στοιχειακός άνθρακας, οργανικός άνθρακας και στερεά εδαφικά υλικά όπως σκόνη και η τέφρα. Ο όρος PM, όπως ορίζεται από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος (EPA), ορίζει το σύνολο των σωματιδίων που διασκορπίζονται στον αέρα για αρκετό χρονικό διάστημα για να διαχυθούν και να μεταφερθούν. Υπάρχουν πολλές πηγές αυτών των σωματιδίων. Τα PM ταξινομούνται ανάλογα με το μέγεθός τους, βάσει της διαμέτρου αυτών, σε PM₁₀ και PM_{2.5} μικρότερης των 10 μικρομέτρων ή 2,5 μικρομέτρων, αντίστοιχα [1]. Τα PM έχουν μέγεθος τέτοιο ώστε να είναι εισπνεύσιμα σωματίδια τα οποία προκαλούν διάφορες βλάβες στην ανθρώπινη υγεία λόγω του μικρού τους μεγέθους. Στη συνέχεια, η τοξικότητά τους αυξάνεται καθώς μπορεί να προσροφήσουν και άλλες ουσίες όπως πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) αλλά και βαρέα μέταλλα. Οι PAH είναι κυκλικοί υδρογονάνθρακες αποτελούμενοι από δύο ή περισσότερους ενωμένους αρωματικούς δακτυλίους. Γενικά οι υδρογονάνθρακες προέρχονται από την καύση των πετρελαιοειδών με μεγαλύτερη συγκέντρωση κατά τη διάρκεια του χειμώνα [37]. Τα μέταλλα, από την άλλη πλευρά, είναι φυσικά συστατικά του φλοιού της γης τα οποία είναι τοξικά και τείνουν να συσσωρεύονται όπως ο υδράργυρος, το χρώμιο, το κάδμιο, το αρσενικό, ο μόλυβδος και το ουράνιο [38]

1.2.1 Μεταφορά παθογόνων ρύπων στον αέρα (Airborne Transmission).

Τα παθογόνα μικρόβια ή ρύποι μπορούν να φτάσουν στον οργανισμό μέσω διαφόρων μηχανισμών μετάδοσης όπως της κατάποση και της αποβολής μέσω γαστρεντερικής οδού, της εισπνοής, της επαφής, όποιας ιατρογενούς μετάδοσης και συνεύρεσης. Η πιο συνηθισμένη μετάδοση γίνεται με αποβολή παθογόνων σταγονιδίων μέσω της αναπνευστικής οδού και η διείσδυσή τους στον δέκτη ξενιστή με την εισπνοή. Τέτοια σταγονίδια σάλιου είναι συνήθως μεγάλα οπότε λόγω του βάρους τους, ταξιδεύουν σε μικρές αποστάσεις προτού πέσουν στο έδαφος. Έτσι η μετάδοση γίνεται με στενή επαφή. Αυτή διαφέρει από αυτή των αερολυμάτων (αεροζόλ), στα οποία εναιωρήματα στερεών ή υγρών σωματιδίων σε μια αέρια φάση με πολύ μικρή διάμετρο, συνήθως μεταξύ 0,001 και 100 μικρομέτρων, που καθιζάνουν αργά και μεταφέρονται εύκολα από ρεύματα αέρα οπότε γίνεται μετάδοση μεγάλων αποστάσεων. Επομένως, μπορούν να μεταφερθούν μικρά υικά σωματίδια στο αερόλυμα, όπως παρατηρήθηκε στην περίπτωση του ιού των πτηνών που βρέθηκε σε μεγάλες συγκεντρώσεις στον αέρα σε μεγάλη απόσταση από το εστίος μόλυνσης [39], μετά από τις καταγίδες σκόνης στην Ασία.

Οι ρύποι στην ατμόσφαιρα έχουν συνδεθεί με την πρόσφατη εν εξελίξει πανδημία του νέου κορονοϊού Sars-Cov-2 (COVID-19) που εμφανίστηκε στα τέλη του 2019 στην πόλη Wuhan της Κίνας.

Προφανώς ο COVID-19, ως ιός Sars-cov-1, μεταδίδεται κυρίως με εισπνοή σταγονιδίων, και με μικρότερο ποσοστό μέσω του στόματος, άμεσης επαφής και εγκυμοσύνης. Όμως ο Zhou Wang [40], [41] και μια επιτροπή εμπειρογνομόνων που αντιμετώπισαν την επιδημία της πνευμονίας του κοροναϊού (COVID-19) στην πόλη Wuhan προτείνει προς επαλήθευση την πιθανότητα αερομεταφερόμενης μετάδοσής του σε μεγάλες αποστάσεις. Ο COVID-19 ως μέλος της μεγάλης οικογένειας αναπνευστικών ιών, των κορονοϊών (CoV), μπορεί να προκαλέσει ήπιες έως σοβαρές ασθένειες, από το κοινό κρυολόγημα έως τα αναπνευστικά σύνδρομα όπως το MERS (αναπνευστικό σύνδρομο Μέσης Ανατολής- Middle East respiratory syndrome) και το SARS (σοβαρό οξύ αναπνευστικό σύνδρομο - severe acute

respiratory syndrome). Το όνομα coronavirus προέρχεται από τις πρωτεΐνες που περιγράφουν ένα σχήμα κορώνας και που υπάρχουν στην επιφάνεια του ιού.

Η εξάπλωση του ιού αναλύθηκε σε κλειστά περιβάλλοντα, όπως σε καμπίνες αεροσκαφών. Παρατηρήθηκε ότι το SARS μεταδίδεται με τρεις τρόπους: εξαπλώνεται κατά 21% με τα αερολύματα σε μεγάλη απόσταση, κατά 29% με στενή επαφή ατόμων (σταγονίδια) και με επαφή επιφανειών κατά 50% (οδός Fomite) [42].

Το Ευρωπαϊκό γραφείο του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, στην αναθεωρημένη έκδοση περί ποιότητας του αέρα σε σχέση με την υγεία των πληθυσμών, όπου συγκεντρώνει τις δημοσιοποιημένες πληροφορίες, αποτελέσματα ερευνών, πολιτικές κ.λπ. από το 1950 [5], επίσης αναφέρει ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση ευθύνεται για μεγάλο κίνδυνο για το περιβάλλον και την υγεία. Ακόμη πιο επιβλαβής για την υγεία είναι η ατμοσφαιρική ρύπανση σε εσωτερικούς χώρους σε μεγάλες αστικές περιοχές. Είναι επομένως απαραίτητο να έχουμε σωστά συστήματα εξαερισμού σε κλειστά περιβάλλοντα, καθώς τα σωματίδια σε αερολύματα μπορούν επίσης να φιλοξενήσουν παθογόνα στοιχεία όπως ιούς και βακτήρια, τα οποία μπορούν έτσι να μεταδοθούν εύκολα.

Μια πρόσφατη ανάλυση που προτάθηκε στο The New England Journal of Medicine από τον van Doremalen και συνεργάτες [43] διερευνά τη σταθερότητα του νέου ιού στο αεροζόλ και στις επιφάνειες συγκρίνοντάς τον με το Sars-Cov-1. Οι επιφάνειες που αναλύονται είναι πλαστικές, ανοξειδωτες, χαλκός και χαρτόνι. Το COVID-19 επιμένει περισσότερο στο πλαστικό και το χάλυβα, ενώ ο χαλκός και το χαρτόνι είναι πιο αφιλόξενοι στον ιό. Από τα ληφθέντα αποτελέσματα, παρατηρείται ότι το COVID-19 παραμένει στο αεροζόλ για 3 ώρες, μειώνοντας αργά τη μολυσματική ικανότητα όπως το Sars-Cov-1. Ο χρόνος ημιζωής των Sars-Cov-2 και Sars-Cov-1 είναι παρόμοιος στο αεροζόλ, με μέσο όρο περίπου 1,1-1,2 ώρες, υποδεικνύοντας ότι οι επιδημιολογικές διαφορές μεταξύ των δύο οφείλονται πιθανώς σε άλλους παράγοντες. Ο ιός επιμένει στις επιφάνειες για ημέρες και στο αεροζόλ για ώρες [43].

Αερισμός σε κλειστούς χώρους, μετάδοση των κορονοϊών από μεταφορά

Πολλές μελέτες υπογραμμίζουν τη σχέση μεταξύ αερομεταφερόμενων μολύνσεων και συστημάτων εξαερισμού σε κτίρια, ιών όπως ιλαράς, πτηνών και SARS. Το SARS εξαπλώθηκε σε 17 μεγάλες πόλεις το 2003. Σε ένα αστικό περιβάλλον, οι περισσότεροι από εμάς δαπανούμε περίπου το 90% του χρόνου μας σε εσωτερικούς χώρους. Ο ανεπαρκής αερισμός, ιδιαίτερα στα νοσοκομεία, αυξάνει την πιθανότητα συλλογής του ιού. Σε ένα κτίριο, ο αέρας κυκλοφορεί από το ένα περιβάλλον στο άλλο με ταραχώδη ροή που ευνοεί τη δημιουργία μικροπεριβαλλόντων στα οποία πολλαπλασιάζονται τα παθογόνα στοιχεία. Οι ιοί μεταφέρονται στα αερολύματα σε αποστάσεις ανάλογα με τον σχεδιασμό των κτιρίων στα οποία κυκλοφορούν. Μια μελέτη πραγματοποιήθηκε σε μια ομάδα κτιρίων κατοικιών στο Χονγκ Κονγκ, στο Amoy Gardens, που κατέγραψε ένα ξέσπασμα SARS το 2003. Οι ερευνητές ανέλυσαν το σύστημα εξαερισμού και τη μετάδοση του ιού στον αέρα, εστιάζοντας στις κατοικίες με τον υψηλότερο αριθμό λοιμώξεων. Αυτή η ανάλυση επιβεβαιώνει περαιτέρω την ανάγκη επανεξέτασης της εσωτερικής ποιότητας του αέρα και των σχεδίων εξαερισμού σε κτίρια, γραφεία, σπίτια, ξενοδοχεία και νοσοκομεία [9].

Ο τρόπος μετάδοσης του Sars-Cov-1 είναι παρόμοιος με του COVID-19, καθώς ο COVID-19 παραμένει στον αέρα όπως και ο πρώτος οπότε βγαίνει αβίαστα το συμπέρασμα ότι μεταφέρεται και σε μεγαλύτερες αποστάσεις από αυτές της λοίμωξης από στενή επαφή. Παρά τις ομοιότητες μεταξύ των νέων και των προηγούμενων ιών, προκύπτουν

ερωτηματικά σχετικά με τα υψηλότερα ποσοστά εξάπλωσης σε ορισμένες περιοχές του νέου κορονοϊού.

Οι ρύποι τύπου PM μεταφέρουν Βακτήρια και Ιούς.

Οι μικροβιακοί παράγοντες μεταφέρονται μέσω του αέρα. Τα φυτά και τα κυτταρικά θραύσματα, τα βακτήρια, οι μύκητες, οι ιοί, τα παράσιτα και οι σπόροι συναποτελούν συστατικά ενός βιοαερολύματος [41]. Το ατμοσφαιρικό PM λοιπόν θα να λειτουργήσει ως φορέας πολλών ιών. Έτσι, το PM μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του ιού που εξαπλώνεται στο αερόλυμα καθώς δημιουργεί ένα μικροπεριβάλλον κατάλληλο για την παραμονή του [44]. Τα PM₁₀ και PM_{2.5} εισπνέονται οπότε εισπνέονται και τα ρυπογόνα σωματίδια, ή και αντίστοιχοι μικροοργανισμοί. Τα σωματίδια θα μπορούσαν επίσης να δράσουν ως φορείς, οι οποίοι έχουν επηρεάζουν τα βακτήρια ποικιλοτρόπως σε προσρόφηση και τοξικότητα [45]. Ορισμένα συστατικά σωματιδίων είναι επίσης θρεπτικά συστατικά για τα βακτήρια και η τοξική επίδραση κυριαρχεί στη μεγάλη ρύπανση. Η ανάλυση των Franzetti et al. [46] της μικροβιακής συγκέντρωσης σε PM₁₀ και PM_{2,5} που πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτικά το χειμώνα και το καλοκαίρι στο Μιλάνο της Ιταλίας έδειξε μεγάλες εποχιακές διακυμάνσεις στις μικροβιακές κοινότητες, με τα βακτήρια που σχετίζονται με τα φυτά να κυριαρχούν το καλοκαίρι και τα βακτήρια που σχηματίζουν σπόρια το χειμώνα. Επιπλέον, η εισπνοή μεταφέρει τα σωματίδια βαθιά στους πνεύμονες, ειδικά εκείνα μικρότερα από 2,5 μικρά (PM_{2,5} και UFPs), και αυτό επιτρέπει στον ιό να αναπτυχθεί μέσα στην αναπνευστική οδό και να προκαλέσει λοιμώξεις.

Στο Πεκίνο της Κίνας, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου με υψηλό επίπεδο αιθαλομίχλης εντοπίστηκαν αρκετές αλληλουχίες διαφόρων παθογόνων μικροοργανισμών συμπεριλαμβανομένων των ιογενών σωματιδίων (0,1% και στα PM₁₀ και PM_{2,5}). Η ποσότητα αυτών των εισπνεόμενων παθογόνων αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης των ρύπων [47].

Ο ιός της γρίπης των πτηνών (H5N1) θα μπορούσε να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις με λεπτή σκόνη κατά τη διάρκεια ασιατικών καταιγίδων [3] και η συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης PM και της εξάπλωσης του ιού έχει παρατηρηθεί στην περίπτωση της εξάπλωσης της ιλαράς στην Κίνα. Μελετήθηκαν συγκεντρώσεις PM_{2.5} σε 21 Κινεζικές πόλεις και κρουσμάτων ιλαράς σε κάθε πόλη ανά ημέρα. Η ανάλυση έδειξε θετική συσχέτιση μεταξύ αυτών των δύο παραγόντων. Η αύξηση των 10 μg / m³ των PM_{2,5} τη ημέρα σχετίστηκε με αξιοσημείωτη εξάπλωση της νόσου [48]. Αντίστοιχα παρατηρήθηκε θετικός συσχετισμός μεταξύ του ιού RSV, που προκαλεί βλάβη στους πνεύμονες και βρογχίτιδα και της συγκέντρωσης PM. Στην πραγματικότητα, η ρύπανση αυξάνει τον κίνδυνο μόλυνσης από RSV [49].

Μια ανάλυση του 2018, που πραγματοποιήθηκε στην κοιλάδα Po στη βόρεια Ιταλία, συσχετίζει τις νοσηλείες και τον αριθμό των νέων περιπτώσεων RSV με συγκέντρωση PM₁₀. Τα δεδομένα για την ανάλυση συλλέχθηκαν από την ARPA (Περιφερειακή Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος) στην περιοχή. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης έδειξαν ότι, κατά την καθορισμένη περίοδο τον υψηλότερο αριθμό νοσηλείας στην πόλη του Μιλάνο, πόλη με την μεγαλύτερη συγκέντρωση ρύπων PM₁₀. Αυτή η μελέτη δείχνει επίσης μια συσχέτιση μεταξύ βραχυπρόθεσμων και μεσοπρόθεσμων εκθέσεων PM₁₀ (συγκεκριμένα, τις δύο εβδομάδες πριν από την εισαγωγή στο νοσοκομείο) και αυξημένου κινδύνου νοσηλείας λόγω βρογχιολίτιδας RSV μεταξύ των βρεφών [50]. Οι ρύποι PM αυξάνουν την διάδοση των μολύνσεων με ποικίλους μηχανισμούς. Ένας από αυτούς θα

μπορούσε να είναι η σύνδεση του ιού με σωματίδια και η μεταφορά του με ευνοηκές κλιματολογικές συνθήκες [48]

Πιθανή συσχέτιση των PM με την εξάπλωση του COVID-19

Σύμφωνα με την μελέτη σε διάφορες περιοχές του κόσμου, των Comunian, S., Dongo, D., Milani, C., Palestini, P. [26], η αυξημένη ατμοσφαιρική ρύπανση από PM συσχετίστηκε με υψηλή και ραγδαία αύξηση της μετάδοσης του COVID-19 στον πληθυσμό. Προς το παρόν, υπάρχουν τρεις παγκόσμιες περιοχές όπου παρατηρήθηκε μόλυνση μεγάλου αριθμού ατόμων από το COVID-19, στην Κίνα, όπου ξεκίνησε η πανδημία, στην Ιταλία και τις ΗΠΑ. Και οι τρεις αυτές χώρες έχουν πολύ υψηλό επίπεδο ατμοσφαιρικών ρύπων.

Η διερεύνηση αυτής της πιθανής συσχέτισης αναλύεται δύο επίπεδα:

- (α) το υψηλό επίπεδο ατμοσφαιρικής ρύπανσης τα τελευταία χρόνια, το οποίο έχει καταστήσει τον πληθυσμό πιο ευαίσθητο στο COVID-19 οπότε ορίζεται ως μακροπρόθεσμη έκθεση και
- (β) την ευαισθησία στον ιό, η οποία συνδέεται με το υψηλό επίπεδο ατμοσφαιρικής ρύπανσης κατά την περίοδο εμφάνισης του ιού οπότε και ορίζεται ως βραχυπρόθεσμη έκθεση.

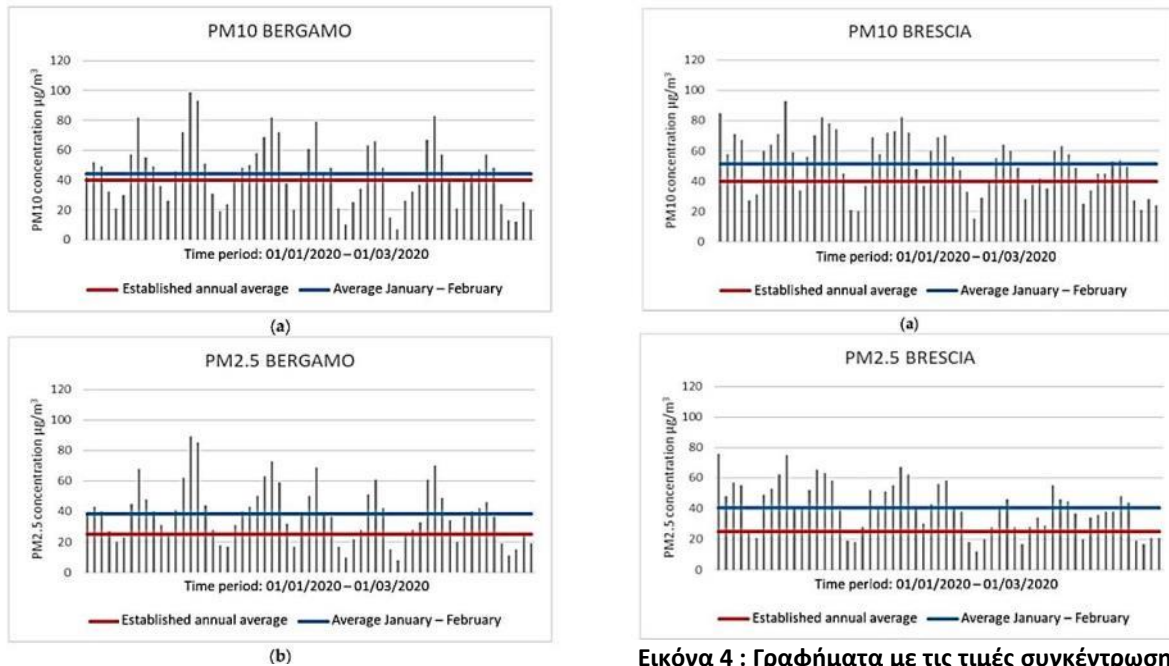
Είναι γνωστό ότι η χρόνια έκθεση σε ατμοσφαιρικά PM συμβάλλει στην αύξηση της νοσηλείας και της θνησιμότητας, κυρίως σε καρδιαγγειακά και αναπνευστικά συστήματα που προκαλούν διάφορες ασθένειες και παθολογίες, συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου [51]. Οι πρόωροι θάνατοι λόγω οξείας αναπνευστικής νόσου από τέτοιους ρύπους εκτιμάται ότι υπερβαίνουν τα δύο εκατομμύρια ετησίως παγκοσμίως [52], [53].

Για να αξιολογήσει την υπόθεση μακροπρόθεσμης έκθεσης, οι Pansini και Fornacca [54] διερεύνησαν τη γεωγραφική επέκταση της λοίμωξης και συσχετίστηκαν με τους ετήσιους δείκτες ποιότητας αέρα που παρατηρήθηκαν από τον δορυφόρο Sentinel-5 σε τροχιά γύρω από την Κίνα, την Ιταλία και τις ΗΠΑ, χρησιμοποιώντας ετήσια μέσα και αναλύθηκε διαφορετικός ρύπος (PM10, PM2,5, διοξείδιο του θείου, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του αζώτου και όζον). Οι συγγραφείς βρήκαν θετικούς σημαντικούς συσχετισμούς μεταξύ των μολύνσεων COVID-19 και των μεταβλητών ποιότητας του αέρα σε κάθε χώρα και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η υψηλότερη θνησιμότητα συσχετίστηκε επίσης με την κακή ποιότητα του αέρα, δηλαδή, με υψηλές τιμές PM2.5, μονοξείδιο του άνθρακα και διοξείδιο του αζώτου

Όσον αφορά την Ιταλία, οι Fattorini και Regoli [55] και Conticini και συνεργάτες [56] κατέληξαν στα ίδια συμπεράσματα. Είναι γνωστό ότι η κατανομή ατμοσφαιρικών ρύπων (PM2.5, PM10, διοξείδιο του αζώτου και όζον) στις ιταλικές περιοχές κατά τα τελευταία τέσσερα χρόνια υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια. Στη Βόρεια Ιταλία, ιδιαίτερα επηρεασμένη από τις μολύνσεις COVID-19, ο πληθυσμός εκτίθεται συνεχώς σε χρόνια υψηλό επίπεδο ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τα πειστικά δεδομένα αυτών των εγγράφων δείχνουν ότι η μακροπρόθεσμη ποιότητα του αέρα σχετίζεται σημαντικά με τις περιπτώσεις COVID-19 σε έως και σε 71 ιταλικές επαρχίες, παρέχοντας περαιτέρω αποδείξεις ότι η μακροχρόνια έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα ευνοϊκό πλαίσιο για τη διάδοση του ιού.

Τέλος, οι Pansini και Fornacca [57], που μελετούν την ποιότητα του αέρα με επίγεια μέσα αλλά και δορυφόρους στην Κίνα, το Ιράν, την Ιταλία, την Ισπανία, τη Γαλλία, τη Γερμανία, το

Ηνωμένο Βασίλειο και τις ΗΠΑ σχετικά με τη μόλυνση COVID-19, βρήκαν στατιστικά σημαντικές θετικές συσχετίσεις μεταξύ του υψηλού επιπέδου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των μολύνσεων COVID-19. Στην Ιταλία, η αντιστοιχία μεταξύ της κακής ποιότητας του αέρα και της εμφάνισης COVID-19 και της επαγόμενης θνησιμότητάς της ήταν ακόμη πιο έντονη.

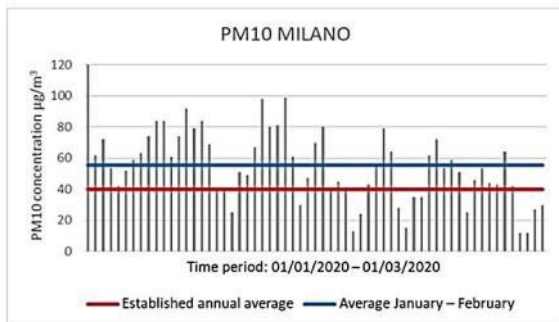


Εικόνα 4 : Γραφήματα με τις τιμές συγκέντρωσης των PM10 (a) και PM2.5 (b) στην πόλη Bergamo. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το επιτρεπτό όριο τιμών ενώ η μπλε την μέση τιμή των αναλύσεων των δεδομένων από ARPA σε διάστημα των δύο μηνών.

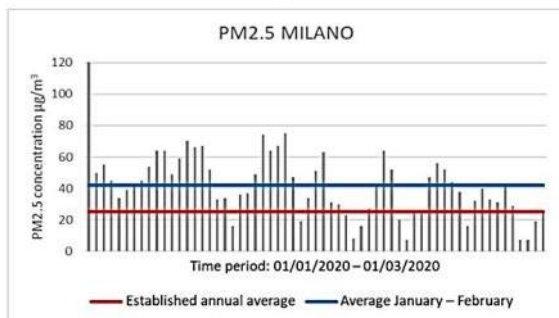
Εικόνα 4 : Γραφήματα με τις τιμές συγκέντρωσης των PM10 (a) και PM2.5 (b) στην πόλη Brescia. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το επιτρεπτό όριο τιμών ενώ η μπλε την μέση τιμή των αναλύσεων των δεδομένων από ARPA σε διάστημα των δύο μηνών

Πρόσφατα, οι Wu et al. [58], για τις Ηνωμένες Πολιτείες που συσχετίζει τη μακροχρόνια έκθεση σε PM_{2,5} και τα ποσοστά θνησιμότητας στο COVID-19. Διαπίστωσαν ότι μια αύξηση 1 μg/m³ στη μακροχρόνια έκθεση σε PM_{2,5} σχετίζεται με αύξηση 15% στο ποσοστό θνησιμότητας COVID-19. Τα αποτελέσματα αυτού του άρθρου υποδηλώνουν ότι η μακροχρόνια έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση αυξάνει την ευπάθεια στην εμφάνιση πιο σοβαρών αποτελεσμάτων COVID-19. Αυτά τα ευρήματα ευθυγραμμίζονται με τη γνωστή σχέση μεταξύ της έκθεσης σε PM_{2,5} και πολλών από τις καρδιαγγειακές και αναπνευστικές λοιμώξεις που αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο θανάτου σε ασθενείς με COVID-19 [58]. Όσον αφορά την επίδραση της βραχυπρόθεσμης έκθεσης PM και της εξάπλωσης ιών στον πληθυσμό, το έγγραφο θέσης που προτείνει η Ιταλική Εταιρεία Από την άλλη μεριά του Ατλαντικού η αρχή Περιβαλλοντικής Ιατρικής της Ιταλίας (SIMA) θεωρεί το PM σημαντικά υπεύθυνο φορέα εξάπλωσης του COVID-19 [59]. Άλλωστε η ευρεία και ταχεία εξάπλωση του ιού COVID-19 στην κοιλάδα του Po, η οποία είναι μια από τις πιο επιβαρυνμένες περιοχές μολυσμένου αέρα στην Ευρώπη, θα μπορούσε να δικαιολογηθεί από τις υψηλές συγκεντρώσεις PM στη Λομβαρδία, πριν από την πανδημία COVID-19 [60].

Για παράδειγμα μία Ιταλική πόλη με τον υψηλότερο αριθμό μολυσμένων, το Μπέργκαμο, παρουσιάζει συγκεντρώσεις PM10 και PM2,5 υψηλότερες από τον επιτρεπόμενο ετήσιο μέσο όρο τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο 2020. Κατά τη διάρκεια αυτών των δύο μηνών, η μονάδα μετρήσεων της πόλης του σταθμού Meucci εντόπισε μια μέση ημερήσια



(a)



(b)

Εικόνα 5 : Γραφήματα με τις τιμές συγκέντρωσης των PM10 (a) και PM2.5 (b) στην πόλη Milano. Η κόκκινη γραμμή δείχνει το επιτρεπτό όριο τιμών ενώ η μπλε την μέση τιμή των αναλύσεων των δεδομένων από ARPA σε διάστημα των δύο μηνών η ημερήσια συγκέντρωση υπερβάνει τη μέση ετήσια επιτρεπόμενη συγκέντρωση (Εικόνα 4).

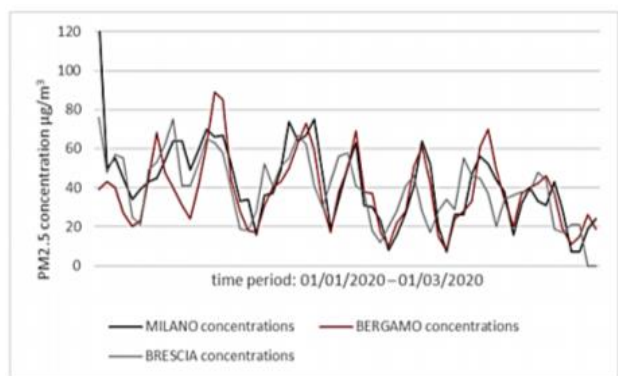
Η ίδια παρατήρηση στο Μιλάνο από τη μονάδα ελέγχου τη περιοχής Città Studi, έδειξε μέση συγκέντρωση 55,59 µg/m³ για PM10 και 42,18 µg/m³ για PM2,5 για τους δύο μήνες. Επιπλέον, στο Μιλάνο, παρατηρήθηκαν 45 και 49 ημέρες (για PM10 και PM2,5, αντίστοιχα) με ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης πάνω από τον επιτρεπόμενο ετήσιο μέσο όρο (Εικόνα 5).

Από την ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από το ARPA

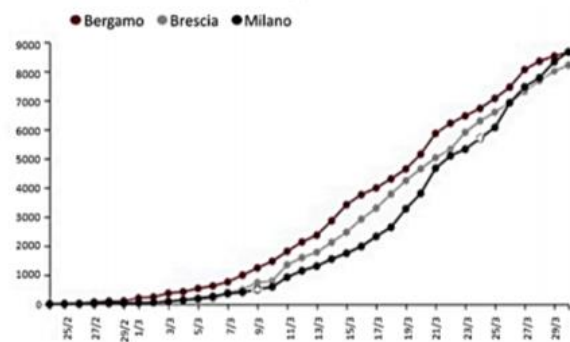
(www.arpalombardia.it/Pages/Aria/qualita-aria.aspx), στην Ιταλική περιοχή του Μιλάνο κατά τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο, στις ίδιες επαρχίες, καταγράφηκε μια υψηλή και ταχεία αύξηση της μετάδοσης του COVID-19 όπως φαίνεται από τα γραφήματα της εικόνας 5 [26].

συγκέντρωση 44,28 µg/m³ για PM10 έναντι του ορίου των 40 µg/m³ και 38,31 µg/m³ για PM2,5, έναντι των 25 µg/m³ και οι δύο τιμές υπερβαίνουν το μέγιστο όριο. (Εικόνα 6)

Αντίστοιχες μετρήσεις και υπερβάσεις παρατηρούνται και στη Μπρέσια, κατά την ίδια περίοδο, 51,49 µg/m³ για PM10 και 40,68 µg/m³ για PM2,5 (Villaggio Sereno), όπου ακόμη χειρότερα για 42 ημέρες τα επίπεδα των PM10 και 46 ημέρες τα PM 2,5



(a)



(b)

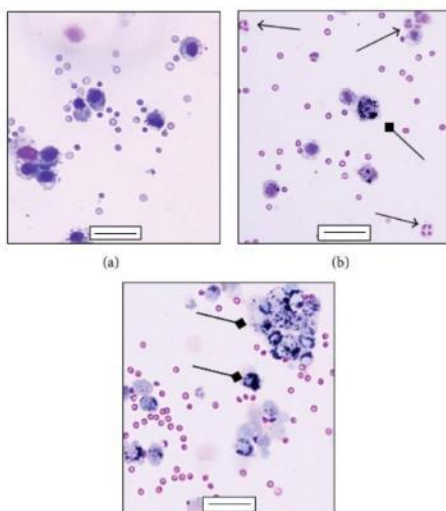
Εικόνα 6 : (a)Γράφημα συγκριτικό μεταξύ συγκεντρώσεων PM2.5 στις πόλεις Bergamo, Brescia, και Milan μεταξύ Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου του 2020. (b) Αυξητική πορεία του COVID-19 στις Bergamo, Brescia, και το Milan από τέλη Φεβρουαρίου μέχρι τέλη Μαρτίου του 2020 (ARPA)

Οι Zhu et al. [61] ανέλυσαν τη σχέση μεταξύ συγκεντρώσεων έξι ημερήσιων μετρούμενων ατμοσφαιρικών ρύπων (PM₁₀, PM_{2,5}, διοξείδιο του θείου, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του αζώτου και όζον) και επιβεβαίωσαν τις περιπτώσεις COVID-19 σε 120 πόλεις στην Κίνα μεταξύ 23 Ιανουαρίου 2020 και 9 Φεβρουαρίου του 2020 (βραχυπρόθεσμη έκθεση). Οι συγγραφείς καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ βραχυπρόθεσμης έκθεσης σε υψηλότερη ατμοσφαιρική ρύπανση και αυξημένου κινδύνου μόλυνσης από COVID-19.

Η υπόθεση ότι η ατμόσφαιρα, πλούσια σε ατμοσφαιρικούς ρύπους, μαζί με ορισμένες κλιματολογικές συνθήκες, μπορεί να προωθήσει μια μακρύτερη μονιμότητα των ιογενών σωματιδίων στον αέρα, ευνοώντας έτσι μια «έμμεση» διάσπαση εκτός από την άμεση (ατομική σε άτομο) διατυπώθηκε σε πρόσφατη επιστολή προς τον συντάκτη του περιοδικού *Infection* [62][47]. Λαμβάνοντας υπόψη μια περίοδο καθυστέρησης λόγω της επώασης περίπου 14 ημερών, παρατηρείται θετικός συσχετισμός μεταξύ της συγκέντρωσης ρύπων PM και των περιστατικών των μολύνσεων (εικόνα 6).

1.2.2 Τα PM προκαλούν βλάβες στα πνευμονικά κύτταρα ενεργοποιώντας φλεγμονές και οξειδωτικό στρες

Πολλές επιδημιολογικές μελέτες έχουν επισημάνει συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων ρύπανσης και της νοσηλείας για πολλούς λόγους, συμπεριλαμβανομένων των αναπνευστικών ασθενειών. Έχει παρατηρηθεί επίσης αύξηση του ποσοστού θνησιμότητας από ιογενείς λοιμώξεις. Έτσι, εκτός από την ανάλυση του ρόλου των PM στη μετάδοση, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πώς η έκθεση σε ρύπους μπορεί να **αυξήσει την**



Εικόνα 7 : Διαφορική χρώση κυττάρων βρογχοκυψελιδικού υγρού ποντικού (Bronchoalveolar lavage-BALF, Βρογχοκυψελιδική έκπλυση) μετά από ενδοτραχειακή ενστάλαξη PM₁. (α) Κυψελιδικά μακροφάγα στο BALF μετά από 24 ωρη συλλογή μετά την ενστάλαξη από πλασματικό υγρό (β) και (γ) εγκόλπωση κυψελιδικών μακροφάγων.

ευαισθησία και τη σοβαρότητα αυτών των ασθενειών. Όπως έχει ήδη αναλυθεί, το PM εισέρχεται στους πνεύμονες επειδή έχει πολύ μικρές διαστάσεις. Η συνεχής και μακροχρόνια εισπνοή αυτών των σωματιδίων μπορεί να προκαλέσει βλάβες στους πνεύμονες αλλά και συστηματική βλάβη [63]. Οι Cui et al. [64], με γνώμονα τον δείκτη ατμοσφαιρικής ρύπανσης (API), έδειξαν ότι η διαρκής έκθεση σε PM αυξάνει το ποσοστό θνησιμότητας του ιού Sars-Cov-1, αφού στις περιοχές όπου ο δείκτης ήταν υψηλός, υπήρχε διπλάσια πιθανότητα θανάτου από τις περιοχές με χαμηλό δείκτη API. Ομοίως, σε περιοχές με μέτριο δείκτη API, υπήρχε πιθανότητα 84% αυξημένου κινδύνου θανάτου από SARS.

Αφού αποδείξει τη θετική συσχέτιση μεταξύ των ιογενών λοιμώξεων στην αναπνευστική οδό και της έκθεσης σε PM, είναι απαραίτητο να αναλυθεί ο μηχανισμός με τον οποίο η έκθεση σε αυτούς τους παράγοντες μπορεί να επηρεάσει την ευαισθησία του ατόμου και την ανοσολογική απόκριση στη λοίμωξη. Καθώς τα κύτταρα της αναπνευστικής οδού είναι ο πρώτος στόχος των MM, καθώς και ο πρώτος στόχος των αναπνευστικών ιών, τα παθογόνα θα εισβάλουν σε ήδη υποβαθμισμένα κύτταρα εάν τα άτομα εκτίθενται σε PM

για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αποδεικνύεται ότι προκαλούνται στους πνεύμονες δύο μηχανισμοί προσβολής μετά την έκθεση σε PM, τόσο στους ανθρώπους όσο και στα πειραματικά μοντέλα [65]:

i. Φλεγμονή: Το PM προκαλεί την ενεργοποίηση της ανοσοαπόκρισης και έτσι το κύτταρο εισέρχεται σε κατάσταση φλεγμονής

ii. Οξειδωτικό στρες: Η έκθεση σε αυτούς τους ρύπους προκαλεί την παραγωγή ελευθέρων ριζών που προκαλούν βλάβη στα κύτταρα

Στην πραγματικότητα, έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχουν πολλοί μηχανισμοί που δρουν στο επίπεδο της μόλυνσης. Σύμφωνα με ορισμένες μελέτες η ρύπανση δυνητικά μειώνει την ικανότητα φαγοκυττάρωσης των μακροφάγων, με αποτέλεσμα την αδυναμία εξουδετέρωσης των ιών [66]

Το PM10 επιφέρει τοξική δράση στο πνευμονικό παρέγχυμα. Η ανάλυση του περιεχομένου του BALf, ενός υγρού που προέκυψε από βρογχοκυψελιδική πλύση ποντικού, έδειξε αύξηση των δεικτών κυτταροτοξικότητας. Το PM περιέχει επίσης μέταλλα με πολύ υψηλή κυτταροτοξικότητα. Η παρατεταμένη ή επίμονη έκθεση σε PM υποτίθεται ότι έχει σοβαρές δυσμενείς επιπτώσεις στην ομοιοσταση των κυττάρων που προκαλείται από μια άμεση αλληλεπίδραση κυττάρων σωματιδίων εντός της περιοχής στην οποία φτάνει το PM (πνεύμονες, μυοκαρδιακούς ή ακόμη και νευρωνικούς ιστούς) ή από την πρόκληση χρόνιου φλεγμονής. σε μια γενική συστηματική φλεγμονή και παρατεταμένη κατάσταση οξειδωτικού στρες [67]

Συνοψίζοντας, η έκθεση σε ρυπογόνους παράγοντες μεταβάλλει την ανοσολογική απόκριση των πνευμονικών κυττάρων και προκαλεί αύξηση του οξειδωτικού και του φλεγμονώδους στρες. Αυτή η κυτταρική κατάσταση διευκολύνει την επίθεση ιών και αυξάνει τη σοβαρότητα των ιογενών λοιμώξεων σε εκτεθειμένα άτομα. Για παράδειγμα, η πνευμονία, συχνά υϊκής προέλευσης, αυξάνεται ως πιθανότητα λόγω υψηλής ρύπανσης από PM10. Μια μελέτη του 1999 διερεύνησε ήδη πώς το PM10 μεταβάλλει την αναπνευστική οδό στις φλεγμονώδεις αντιδράσεις στον συγκυτιακό ιό (RSV), μια συχνή αιτία ιογενούς πνευμονίας σε βρέφη και ηλικιωμένους. Έχει παρατηρηθεί ότι, σε υψηλά επίπεδα PM10, η απόκριση στον ιό μειώνεται επειδή η ανοσοαπόκριση τόσο στον ιό όσο και στο PM10 ταυτόχρονα, είναι λιγότερο αποτελεσματική από την απλή ανοσοαπόκριση που εστιάζεται στην άμυνα έναντι του RSV [59] αποκλειστικά.

1.2.3 Επιβάρυνση των εσωτερικών χώρων με πτητικές οργανικές ύλες (Volatile Organic Compounds – VOC's)

Η ευρεία χρήση νέων προϊόντων και δομικών υλικών στις ημέρες μας έχει οδηγήσει σε αυξημένες συγκεντρώσεις οργανικών ρύπων εσωτερικού χώρου, και συγκεκριμένα πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs). Σήμερα, οι περισσότεροι άνθρωποι περνούν περισσότερο από 20 ώρες την ημέρα σε εσωτερικούς χώρους όπου οι συγκεντρώσεις των VOC's ξεπερνούν στο πενταπλάσιο αρκετές φορές σε συγκέντρωση του εξωτερικού ατμοσφαιρικού αέρα. Οι VOC προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως οικοδομικά υλικά, καπνός τσιγάρου, άτομα και δραστηριότητες και εσωτερικές χημικές αντιδράσεις. Εξαιρετικά υψηλά επίπεδα VOC παρατηρούνται σε νεόδμητα κτίρια ή μετά ανακαινίσεις. Πολλά προϊόντα που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητά μας παράγουν VOC's, όπως αποσμητικά χώρων ή καθαριστικά, οπότε οι άνθρωποι εκθέτουν τον εαυτό τους και άλλους συνανθρώπους σε υψηλά επίπεδα ρύπων που διατηρούνται αρκετά μεγάλα χρονικά διαστήματα μετά το

πέρας των δραστηριοτήτων ή ενεργειών που τους παράγουν. Οι Πτητικές Οργανικές Ενώσεις περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα χημικών ενώσεων, όπου τα πιο συνηθισμένα από αυτά παρατίθενται στον Πίνακα 5 παρακάτω.

Τυπικές πηγές VOC	Ομάδες Χημικών Ενώσεων	Παραδείγματα ενώσεων
Καθαριστικά	Αλειφατικοί υδρογονάν-θρακες, οργανοχλωρίδια	τετραχλωροαιθυλένιο
Διαλύτες	Αλιφατικοί και αρωματικοί υδρογονάνθρακες	Επτάνιο, δεκάνιο, τολουένιο, ξυλένιο
Καλλυντικά	Terpenes, κετόνες	Ευκαλυπτόλη λιμονένιο
Καταναλωτικά προϊόντα	Terpenes, αρωματικοί υδρογονάνθρακες	Limonene, α-Pinene, τολουένιο
Χαλιά και δάπεδα	Εστέρες, αλειφατικοί και αρωματικοί υδρογονάνθρακες	Βουτυλοξικό επτάνιο Butylacetate,
Χρώματα	Αλκοόλες, αλδεΐδες	Ισοβουτανόλη
Ένοικοι εσωτ. χώρων		Ακετόνη, μεθανόλη, αιθανόλη

Πίνακας 6 : Τυπικές Πτητικές Οργανικές Ενώσεις σε εσωτερικούς χώρους-VOC's, Πηγή : Advanced Gas Chromatography [68]

Σύμφωνα με την μελέτη των Carolin Rösch, Tibor Kohajda, Stefan Röder, Martin von Bergen, Uwe Schlink [69], με μετρήσεις των επιπέδων VOC's σε 2.246 διαμερίσματα της Λειψίας στην Γερμανία σε περίοδο 16 μηνών, προσδιορίστηκαν πηγές αλλά και μοτίβα που χαρακτηρίζουν τις αερομεταφερόμενες ΠΟΕ σε διαμερίσματα με ενοίκους. Καταδεικνύεται πως οι εποχιακές διακυμάνσεις προκαλούν υψηλότερα επίπεδα εσωτερικής ρύπανσης που συσσωρεύεται λόγω μειωμένου αερισμού το χειμώνα (Dodson et al., 2008; Matysik et al., 2010). [70] [71]

Επιπλέον, οι τοπικές συνθήκες, όπως οι βιομηχανικές μονάδες και οι πολυσύχναστοι δρόμοι, εντείνουν το πρόβλημα της ρύπανσης στους εσωτερικούς χώρους, καθώς διαφοροποιούνται τα ποσοστά ρύπανσης των σπιτιών σε βιομηχανικά, αστικά και μη αστικά κέντρα περιοχές (Jia et al., 2008b) [72].

Η μελέτη βασίστηκε σε μετρήσεις 60 διαφορετικών VOC's με πολύ μεγάλο πλήθος δειγμάτων (n = 2.242) και δεδομένων ερωτηματολογίων για να συμπεράνουμε αξιόπιστα ότι, η ποιότητα του εσωτερικού αέρα επηρεάζεται συχνά από συνδυασμένες πηγές. Αποκαλύφθηκαν χαρακτηριστικές συνθέσεις VOC σε περιβάλλοντα εσωτερικών χώρων και τονίζει ότι οι συνεχώς επαναλαμβανόμενες δομές δεν είναι μεμονωμένες πηγές, αλλά συνδυασμοί αυτών, τα λεγόμενα μοτίβα. Ερμηνεύοντας αυτές τις πηγές, φαίνεται ότι οι κατοικίες επηρεάζονται έντονα από τον εξαερισμό, τις ανθρώπινες δραστηριότητες, τα έπιπλα, τις φυσικές διεργασίες (όπως η ηλιακή ακτινοβολία) ή οι συνδυασμοί τους. Το πολύ μεγάλο σύνολο δειγμάτων και ο συνδυασμός με ερωτηματολόγια που εφαρμόζονται σε αυτήν την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των ΠΟΕ επιτρέπει τη γενίκευση του αποτελέσματος σε σπίτια σε μεσαίες πόλεις με μικρή βιομηχανική ρύπανση

Γενικά είναι δύσκολο να κατανοήσουμε τον σχηματισμό των VOC's σε εσωτερικούς χώρους και να ανακατασκευαστούν σε συνθήκες πειραματικές. Από τη μία, οι ενώσεις προέρχονται αποκλειστικά από εσωτερικές πηγές (σημείο προέλευσης των αερίων ή άλλων υλικών, το οποίο εμφανίζεται συνεχώς με παρόμοιο τρόπο) και, από την άλλη πλευρά, σχηματίζονται

από μίγματα εσωτερικών και εξωτερικών ρύπων. Στις περισσότερες όμως περιπτώσεις, οι συγκεντρώσεις VOC εσωτερικών χώρων είναι σημαντικά υψηλότερες από αυτές του εξωτερικού περιβάλλοντος (Batterman et al., 2007). [73]

Αυτό επηρεάζεται από τον τύπο και την ηλικία των δομικών υλικών (Missia et al., 2010) [74] τις ατομικές δραστηριότητες, όπως οι ανακαινίσεις, που εντείνουν το πρόβλημα. Ειδικά μετά από ανακαινίσεις τα επίπεδα μετρήθηκαν πολύ αυξημένα τα οποία αμέσως μετά ομαλοποιήθηκαν σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις (Jia et al., 2008a; Herbarth and Matysik, 2010) [72] [71].

Για να κατανοήσουμε την σοβαρότητα της κατάστασης των επιπτώσεων στον αέρα των εσωτερικών χώρων αναφερόμαστε στην έκδοση οδηγιών του ΠΟΥ που συγκεντρώνει τις πιο αντιπροσωπευτικές επιλογές των ρύπων που εντοπίζονται σε κλειστούς χώρους και συνοψίζει τις επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία. [75].

Στο βιβλίο αυτό παρουσιάζονται οι οδηγίες του ΠΟΥ για την προστασία της δημόσιας υγείας από κινδύνους που προκύπτουν από μία σειρά χημικών που συνήθως υπάρχουν στον αέρα των εσωτερικών χώρων. Οι ουσίες που εξετάζονται σε αυτήν την ανασκόπηση, όπως το βενζόλιο, το μονοξειδίο του άνθρακα, η φορμαλδεΐδη, το ναφθαλίνιο, το διοξείδιο του αζώτου, οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες με έμφαση στο βενζο(α)πυρένιο, το ραδόνιο, το τριχλωροαιθυλένιο και το τετραχλωροαιθυλένιο, οφείλουν την εμφάνισή τους σε πηγές που απαντώνται σε εσωτερικούς χώρους και μάλιστα σε ανησυχητικά επίπεδα, καθώς είναι γνωστές οι δυσμενείς επιπτώσεις τους στην υγεία.

Οι οδηγίες του ΠΟΥ απευθύνονται σε επαγγελματίες της δημόσιας υγείας που εμπλέκονται στην πρόληψη κινδύνων για την υγεία από περιβαλλοντικές εκθέσεις, καθώς και σε ειδικούς και αρχές που συμμετέχουν στο σχεδιασμό και τη χρήση κτιρίων, υλικών και προϊόντων εσωτερικού χώρου. Παρέχουν μια επιστημονική βάση των προτύπων ώστε να πλαισιώνονται με νομική υπόσταση.

Ομάδα 1. Ανάπτυξη κατευθυντήριων γραμμών	συνιστάμενων	Ομάδα 2. Με αβέβαια ή απλά ανεπαρκή στοιχεία για οδηγίες
Βενζόλιο		Ακεταλδεΐδη
Μονοξειδίο του άνθρακα		Αμίαντος
Φορμαλδεΐδη		Βιοκτόνα, φυτοφάρμακα
Ναφθαλίνη		Επιβραδυντικά φλόγας
Διοξείδιο του αζώτου		Αιθέρες γλυκόλης
Σωματίδια (PM2.5 και PM10)		Εξάνιο
Ειδικά οι πολυκυκλικοί υδρογονάνθρακες	αρωματικοί	Νιτρικό οξύ
βενζο- [α] -πυρένιο		Οζον
Ραδόνιο		Φθαλικά
Τριχλωροαιθυλένιο		Στυρένιο
Τετραχλωροαιθυλενο Ξυλένια		Τολουΐνη

Πίνακας 7 : Ρύποι που διερευνήθηκαν ως προς την σημαντικότητά τους για να συμπεριληφθούν στις οδηγίες ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων, από την ομάδα εργασίας του ΠΟΥ τον Οκτώβριο του 2006 [21].

Αμέσως πιο κάτω παρουσιάζονται μερικές ενώσεις ή γενικά ρύποι που επιβαρύνουν δυσμενώς την υγεία του ανθρώπινου οργανισμού, σύμφωνα με τον ΠΟΥ και αξίζει να σημειωθούν.

Βενζόλιο

Απαιτούνται οδηγίες για τα επίπεδα έκθεσης στο βενζόλιο, μιας πτητικής οργανικής ένωσης, τόσο για τον αέρα εσωτερικών χώρων, επειδή ο εσωτερικός αέρας είναι μια σημαντική πηγή εισπνεόμενου βενζολίου, όσο και για τον εξωτερικό αέρα.

Παρατηρούνται από μετρήσεις γενικά υψηλότερες συγκεντρώσεις σε εσωτερικού χώρους σε σχέση με αυτές του εξωτερικού αέρα, λόγω της διείσδυσης του βενζολίου στους εσωτερικούς αυτούς χώρους από το εξωτερικό περιβάλλον αλλά και από πολλές άλλες εσωτερικών πηγές αυτού. Συνήθως, οι εσωτερικές συγκεντρώσεις είναι κάτω από τα ελάχιστα επικίνδυνα επίπεδα για την υγεία. Το βενζόλιο είναι γονιδοτοξική και καρκινογόνος ουσία για τον άνθρωπο και δεν συνιστάται ασφαλές επίπεδο έκθεσης. Ο κίνδυνος τοξικότητας από εισπνεόμενο βενζόλιο ταυτίζεται σε έκθεση τόσο σε εσωτερικούς χώρους είτε σε εξωτερικούς χώρους. Επομένως, οι οδηγίες για τον αέρα εσωτερικού χώρου ταυτίζονται με αυτές για τον αέρα του περιβάλλοντος.

Επομένως, από πρακτική άποψη, είναι σκόπιμο να μειωθούν τα επίπεδα έκθεσης σε εσωτερικούς χώρους όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Αυτό θα απαιτήσει τη μείωση ή την εξάλειψη των ανθρώπινων δραστηριοτήτων που απελευθερώνουν βενζόλιο, όπως το κάπνισμα, τη χρήση διαλυτών για διάφορες ερασιτεχνικές δραστηριότητες ή για καθαρισμό, τη χρήση δομικών υλικών με βενζόλιο κ.α. Επιβάλλεται εξαερισμός ανάλογα με τον χώρο κάθε κτιρίου. Σε σύγχρονα κτίρια που βρίσκονται κοντά σε πολλή κίνηση ή άλλες μεγάλες εξωτερικές πηγές βενζολίου, οι είσοδοι για καθαρό αέρα πρέπει να βρίσκονται στην λιγότερο μολυσμένη πλευρά του κτιρίου.

Φορμαλδεΐδη

Άλλη μια πτητική οργανική ένωση που απαντάται συχνά σε σημαντικές συγκεντρώσεις στους εσωτερικούς χώρους, η οποία εισπνεόμενη προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία. Έντονο ερεθισμό των ματιών στους ανθρώπους προκαλεί ακόμη και η συγκέντρωση των $0,36 \text{ mg} / \text{m}^3$ σε διάρκεια τεσσάρων ωρών, συγκέντρωση που θεωρείται η ελάχιστη που έχει αναφερθεί.

Προκαλεί έντονο και συχνό ανοιγοκλείσιμο των ματιών, όπως και ερυθρότητα του βολβού όταν η συγκέντρωσή του ανέλθει στα $0,6 \text{ mg} / \text{m}^3$. Δεν υπάρχει ένδειξη συσσωρευτικής επίδρασης με τον χρόνο και σε παρατεταμένη έκθεση. Η αίσθηση της οσμής ωστόσο μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ορισμένα άτομα να αναφέρουν ερεθισμό του βλενογόνου της όσφρησης ή των ματιών σε συγκεντρώσεις της φορμαλδεΐδης κάτω από $0,1 \text{ mg} / \text{m}^3$. Ωστόσο, αυτό δεν θεωρείται αρνητικό για την υγεία αποτέλεσμα.

Οι εκτιμήσεις των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου, αποδίδουν παρόμοια αποτελέσματα, με τιμές περίπου $0,2 \text{ mg} / \text{m}^3$. Αυτές οι τιμές είναι πάνω από την κατευθυντήρια γραμμή για βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα $0,1 \text{ mg} / \text{m}^3$. Έτσι, η χρήση της βραχυπρόθεσμης (30 λεπτών οδηγίας $0,1 \text{ mg} / \text{m}^3$ θα αποτρέψει επίσης τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία, συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου.

Η χρήση οικοδομικών υλικών και άλλων προϊόντων με χαμηλές εκπομπές και η λιγότερη κατά το δυνατόν έκθεση στον καπνό και σε άλλες εκπομπές καύσης, θα ελαχιστοποιήσει

τον κίνδυνο που σχετίζεται με την έκθεση. Επιπλέον, ο εξαερισμός μπορεί να μειώσει την έκθεση εσωτερικού χώρου σε φορμαλδεΐδη.

Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες - polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)

Ορισμένοι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH) είναι ισχυρά καρκινογόνοι παράγοντες οι οποίοι συνήθως συνδέονται με σωματίδια του αέρα οπότε και εισπνέονται με ότι αυτό συνεπάγεται. Οι PAH εμφανίζονται στον εσωτερικό αέρα ως σύνθετα μείγματα, η σύνθεση των οποίων μπορεί να διαφέρει από τοποθεσία σε τοποθεσία. Τα πειραματικά δεδομένα σχετικά με το μεταβολισμό, την γονιδιακή έκφραση και το DNA υποδηλώνουν ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ PAHs σε μίγματα μπορεί να είναι πολύπλοκες και εξαιρετικά απρόβλεπτες για διάφορες συνθέσεις τους.

Αντί λοιπόν να ερευνηθούν τα ελάχιστα επίπεδα έκθεσης με βάση τα απρόβλεπτα μείγματα PAH, επιλέχθηκε το βενζο[α]πυρένιο (B [a] P) που θεωρητικά ως ένωση μεμονωμένου δείκτη, αντιπροσωπεύει όσο το δυνατό καλύτερα την συμπεριφορά των απροσδιόριστων μιγμάτων PAH. Η τοξικολογία της είναι πιο γνωστή και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως ως δείκτης για έκθεση σε επιδημιολογικές μελέτες. Τα δεδομένα αξιολόγησης της υγείας αναδεικνύουν τον καρκίνο του πνεύμονα ως τον σοβαρότερο κίνδυνο για την υγεία από την έκθεση σε PAH στον εσωτερικό αέρα. Με βάση επιδημιολογικά δεδομένα από μελέτες σε εργαζόμενους σε φούρνους οπτάνθρακα, ο κίνδυνος μονάδας για καρκίνο του πνεύμονα για μείγματα PAH εκτιμάται ότι είναι τα $8,7 \times 10^{-5}$ ανά ng / m^3 B [a] P. Αυτή είναι η οδηγία για τον PAH στον εσωτερικό αέρα. Οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις για έκθεση σε όλη τη ζωή σε B [a] P που αυξάνουν υπερβολικά τον κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου καθόλη την διάρκεια της ζωής του ανθρώπου ανέρχονται στα ποσοστά των 1/10.000, 1/100.000 και 1/1.000.000 δηλαδή περίπου 1,2, 0,12 και 0,012 ng / m^3 , αντίστοιχα

1.2.4 Επιβάρυνση των εσωτερικών χώρων με Διοξείδιο του Άνθρακα (CO₂)

Από έρευνες (Piotr Batoga, Marek Badurab) [76] προκύπτει ότι σε κλειστούς και ιδιαίτερα μικρούς χώρους, όπως τα υπνοδωμάτια των οικιών, η ποιότητα του αέρα είναι κακή όσον αφορά στη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Στις μέρες μας περνάμε τον περισσότερο χρόνο μας στο σπίτι που προορίζεται για ύπνο και ξεκούραση. Ενώ θα πρέπει το περιβάλλον του ύπνου μας να είναι ποιοτικό, δυστυχώς αυτό υποβαθμίζεται ολοένα και περισσότερο από πλευράς ποιότητας του εσωτερικού αέρα κυρίως από την υπερσυγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό συμβαίνει επειδή οι χώροι πλέον σφραγίζονται όσο ποτέ άλλοτε αφού κατασκευάζονται κτίρια υψηλής ενεργειακής απόδοσης με χαμηλές απώλειες θερμότητας.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα παρατηρούμενα επίπεδα CO₂ υπερβαίνουν σημαντικά τα συνιστώμενα πρότυπα υγιεινής, όπως συνέβη και με την μελέτη των Piotr Batoga, Marek Badurab. Κάποιες φορές μάλιστα τα μέγιστα καταγεγραμμένα επίπεδα CO₂ (πάνω από 3800 ppm) ανήλθαν πέρα του 75% του ορίου έκθεσης για 8 ώρες [77], [78].

Υποτίθεται ότι η κακή ποιότητα του αέρα μπορεί να επηρεάσει τη διαδικασία ύπνου και να επιδεινώσει περαιτέρω την υγεία κατά τη διάρκεια της ημέρας ή την αποτελεσματικότητα της εργασίας. Ωστόσο, ο αντίκτυπος της κακής ποιότητας του αέρα για την αποτελεσματικότητα του ύπνου στον άνθρωπο πρέπει να διερευνηθεί με ακρίβεια στο μέλλον. Παρόλο που οι συγκεντρώσεις CO₂ σε εσωτερικούς χώρους θα πρέπει να συνυπολογίζονται και με άλλους ρυπογόνους παράγοντες όπως σε προηγούμενες

παραγράφουν αναλύθηκαν, όπως VOC's και PM, ωστόσο η ανεπαρκής διήθηση των στερεών ρύπων όσο και ο περιορισμένος φυσικός αερισμός, εγείρουν συχνά προβληματισμούς για την αύξηση των περιστατικών του συνδρόμου άρρωστου κτιρίου που σημαίνει για παράδειγμα πονοκεφάλους, κόπωση, ερεθισμένα μάτια, μύτη ή λαιμό [79].

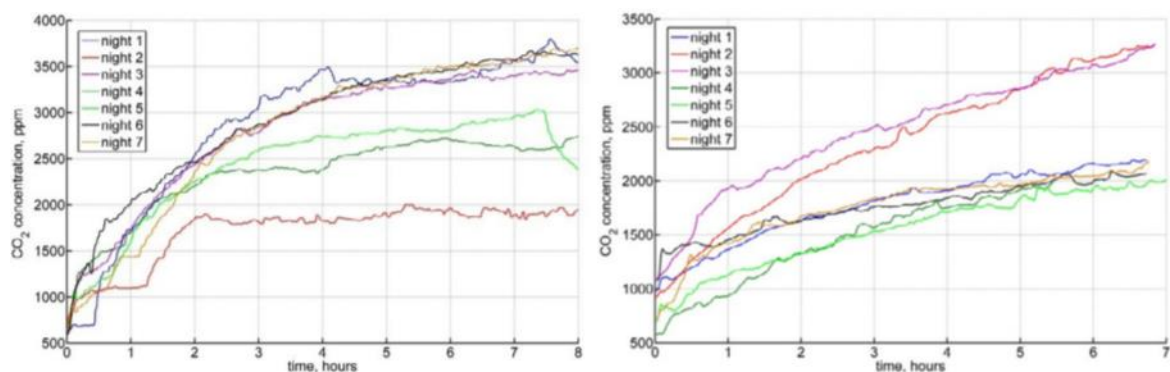
Το πρόβλημα του κακού αερισμού και της χαμηλής ποιότητας του εσωτερικού αέρα εντείνεται προφανώς όταν τα παράθυρα και οι πόρτες μένουν κλειστές κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι συνθήκες σε αυτούς τους χώρους μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία ύπνου και κατ' επέκταση την όλη υγεία των ενοίκων ή την απόδοση στην εργασία κατά την διάρκεια της ημέρας.

Σε ζητήματα που σχετίζονται με την αξιολόγηση του αερισμού στα κτίρια, ένας κοινός δείκτης της ποιότητας του αέρα εσωτερικού χώρου είναι η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα. Η παρουσία αυτού του αερίου στο εσωτερικό περιβάλλον συνδέεται αυστηρά με την αναπνοή και τον ανθρώπινο μεταβολισμό. Σε αυτή τη διαδικασία το οξυγόνο καταναλώνεται και το CO₂ παράγεται με ρυθμούς που εξαρτώνται από το επίπεδο της φυσικής δραστηριότητας, το μέγεθος του σώματος και την διατροφή. Η σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων CO₂ σε εσωτερικούς χώρους και της ποιότητας του αέρα εσωτερικού χώρου προέρχεται από το γεγονός ότι την ίδια στιγμή οι άνθρωποι παράγουν CO₂ και παράγουν βιολογικά απόβλητα που προκαλούν οσμές.

Αρκετά πειράματα έχουν διεξαχθεί κατά την οποία οι άνθρωποι αξιολόγησαν την αποδοχή του εσωτερικού αέρα ως προς την οσμή του σώματος καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι με ανανέωση του εσωτερικού αέρα περίπου 7,5 λίτρα/δευτερόλεπτο με εξωτερικό αέρα ανά άτομο, περιορίζεται σε αποδεκτά επίπεδα η μυρωδιά του ανθρώπινου σώματος όπως παρατηρεί το 80% των ερωτηθέντων επισκεπτών. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι για το ίδιο επίπεδο αποδοχής οσμής σώματος αντιστοιχίζεται σε συγκέντρωση CO₂ περίπου 650-700 ppm πάνω από την συγκέντρωσή του σε εξωτερικό χώρο (350-450 ppm) [80], [81].

Επανερχόμενοι στις μετρήσεις CO₂ σε υπνοδωμάτια παρατηρήθηκε κάτι άλλο ενδιαφέρον όσον αφορά την μεγάλη διαφορά που επιφέρει ο αερισμός του χώρου απλά και μόνο ανοίγοντας σε ανάκληση τα παράθυρα.

Η μετρούμενη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα σε αρκετές νύχτες σε δύο κρεβατοκάμαρες (ένας και δύο κάτοικοι αντίστοιχα) φαίνεται στο σχήμα 7. Η αύξηση του επιπέδου CO₂ κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι έως 3000 ppm (7 φορές περισσότερο από ό, τι στον εξωτερικό αέρα). Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή συγκέντρωσης του CO₂ μπορεί να διαφέρει σημαντικά μεταξύ διαδοχικών διανυκτερεύσεων. Πιθανώς η διαφορά να οφείλεται κυρίως στις καιρικές συνθήκες που επηρεάζουν τη φυσική ροή του αέρα μέσω μικρών κενών γύρω από τα παράθυρα και ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου και την κατεύθυνση που πνέει.



Εικόνα 8 : Δυναμική ανάπτυξη του επιπέδου CO₂ κατά τον ύπνο σε περίοδο μετρήσεων 7 νυχτών.

Αριστερά δύο ατόμων σε δωμάτιο, V=23.6 m³ και δεξιά ενός ατόμου σε δωμάτιο όγκου, V=20.7 m³ ,

Πρέπει να σημειωθεί ότι γενικά το CO₂ δεν θεωρείται επικίνδυνο για την υγεία στις συγκεντρώσεις που εμφανίζονται συνήθως σε μη βιομηχανικά εσωτερικά περιβάλλοντα. Όρια έκθεσης για το CO₂ που καθορίζονται από οργανισμούς που σχετίζονται με την ασφάλεια και την υγεία συνθήκες εργασίας, π.χ. Το Εθνικό Ινστιτούτο για την Ασφάλεια και την Υγεία της Εργασίας (NIOSH) από τις ΗΠΑ, θέτει όριο τα 5000 ppm το έτος με σταθμισμένο μέσο όρο έκθεσης (μέση έκθεση με βάση μια 8ωρη ημέρα και μια 40ωρη εβδομάδα εργασίας) και 30.000 ppm για βραχυπρόθεσμο όριο έκθεσης (μέση σταθμισμένη μέση έκθεση που δεν πρέπει να ξεπεραστεί οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια μιας εργάσιμης ημέρας) [77]. Παρόμοιες τιμές κατωφλίου ορίζονται από τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς (π.χ. [78]). Δεν έχουν παρατηρηθεί παρενέργειες στην υγεία κάτω από το επίπεδο 7000-10000 ppm κατά τη διάρκεια παρατεταμένης έκθεσης σε CO₂ και κάτω από 20 000-30 000 ppm με βραχυπρόθεσμη έκθεση [80].

1.3 Οδηγίες για την ποιότητα του αέρα εσωτερικών χώρων από τον ΠΟΥ και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας λαμβάνοντας υπόψη μελέτες σύμφωνα με τα προηγούμενα, έχει συστήσει πίνακα με ενδεικτικούς ρύπους που απαντώνται ειδικά σε εσωτερικούς χώρους και ενδεικτικές χρονικές περιόδους έκθεσης σε αυτούς. Πέραν αυτών των χρονικών διαστημάτων η έκθεση σε αυτούς τους ρύπους θεωρείται επικίνδυνη για την ανθρώπινη υγεία. (WHO guidelines for indoor air quality) [5]

Για την τυποποίηση των αποτελεσμάτων υπολογίστηκε ένας συντελεστής μονάδας κινδύνου που πρακτικά είναι ο κίνδυνος εμφάνισης νεοπλασιών/καρκίνου κατά την έκθεση του οργανισμού κατά την διάρκεια της ζωής του σε μονάδες συγκέντρωσης των υπό εξέταση χημικών ουσιών. Για τις περισσότερες από τις χημικές ενώσεις ή στοιχεία, υιοθετήθηκε η συγκέντρωση του 1 μg/m³.

Ρύπος	Κρίσιμα συμπεράσματα για τις οδηγίες	Οδηγίες
Βενζόλιο	•Οξεία Λευχαιμία του μυελού των οστών • Γενοτοξικότητα	Αδύνατο να προσδιοριστεί ασφαλές όριο • Κίνδυνος για λευχαιμία 1/10 000, 1/100 000 και 1/1 000 000 με συνολικές συγκεντρώσεις 17, 1.7 και 0.17 μg/m ³ , αντίστοιχα.
Μονοξείδιο του Άνθρακα	Σε οξεία έκθεση ένταση συμπτωμάτων ισχαιμικών καρδιακών επεισοδίων.	15 λεπτά – 100 mg/m ³ 1 ώρα – 35 mg/m ³ 8 ώρες – 10 mg/m ³ 24 ώρες – 7 mg/m ³
Φορμαλδεΰδη	Ερεθισμός αναπνευστικού	0.1 mg/m ³ – 30-λεπτών έκθεση κατά μέσο όρο

Διοξείδιο του Αζώτου	Προβλήματα του αναπνευστικού, βρογχοσυστολή, ερεθισμός των αεροφόρων οδών υποβάθμιση του ανοσοποιητικού	• 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – 1 ωριαίος μέσος όρος • 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – ετήσιος μέσος όρος
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	Καρκίνος του πνεύμονα	Όλες οι συγκεντρώσεις θεωρούνται επικίνδυνες.
Ραδόνιο	Καρκίνος του πνεύμονα με ενδείξεις για καρκίνους σε άλλα σημεία όπως λευχαιμία και εξωθωρακικούς χώρους	Οι συγκεντρώσεις του ραδονίου σχετικά με κινδύνους επιβίωσης σε ποσοστά 1/100 και 1/1000 είναι 67 και 6.7 Bq/m ³ για καπνιστές και 1670 έως 167 Bq/m ³ για μη καπνιστές
Τριχλωροαιθυλένιο	Καρκινογένεση στο ήπαρ, νεφρούς και λέμφωμα-ενδείξεις για γενετοξικότητα	
Τετράχλωροαιθυλένιο	Ενδείξεις καταπόνησης των νεφρών	

Πίνακας 8 : Περίληψη των οδηγιών για την ποιότητα του αέρα εσωτερικού χώρου για επιλεγμένους ρύπους (Πηγή : WHO European Centre for Environment and Health) [75]

Θεωρήθηκε ότι θα μπορούσε γενικά, να οριστεί ένα κατώφλι επίδρασης στην υγεία των μη καρκινογόνων χημικών ουσιών ώστε να προσδιοριστούν οι κατευθυντήριες γραμμές. Στις περιπτώσεις αυτές, υιοθετήθηκε μια τυπική στην τοξικολογική πρακτική. Για τον προσδιορισμό συγκεκριμένης αριθμητικής τιμής αναφοράς, χρησιμοποιήθηκε είτε το χαμηλότερο παρατηρούμενο επίπεδο ανεπιθύμητων επιδράσεων, σύμφωνα με την γενική πρακτική, είτε το επίπεδο ανεπιθύμητων ενεργειών που δεν παρατηρούνται καθόλου ανεπιθύμητες επιδράσεις, όπως συμβαίνει με τους ερεθιστικούς παράγοντες.

Τα προηγούμενα υιοθετήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη σειρά παραγόντων ασφάλειας ή αβεβαιότητας, όπως αναφέρονται και στις εκδοθείσες οδηγίες, που βασίστηκαν σε εκτιμήσεις των συμμετεχόντων επιστημόνων στο έργο, βάσει των διαθέσιμων δεδομένων-στοιχείων των επιπτώσεων που μελετήθηκαν. Για παράδειγμα, κατά τη λήψη κατευθυντήριων γραμμών για το SO₂ και την σωματιδιακή ύλη (PM) (θεωρείται στις οδηγίες ως συνδυασμένη έκθεση), χρησιμοποιήθηκε ένας συντελεστής προστασίας 2 σε σχέση με τη νοσηρότητα και τη θνησιμότητα και παράγοντα προστασίας 1,5 στην περίπτωση υποβάθμισης των δεικτών της λειτουργίας των πνευμόνων. Στον πίνακα 9, συνοψίζονται οι προτεινόμενες τιμές ασφαλούς έκθεσης για 19 ρύπους του ατμοσφαιρικού αέρα, χωρίς καρκινογόνες επιδράσεις εξαιρουμένων των επιδράσεων στις αισθήσεις όπως την όσφρηση.

Ουσίες	Συγκέντρωση στον μέσο σταθμισμένο χρόνο έκθεσης	Μέσος σταθμισμένος χρόνος έκθεσης
Κάδμιο	1–5 ng/m ³ 10–20 ng/m ³	1 έτος (αστικές περιοχές) 1 έτος (προάστια)
Διθειώδης άνθρακας	100 µg/m ³	24 ώρες
CO ₂	100 mg/m ³ b 60 mg/m ³ b 30 mg/m ³ b 10 mg/m ³	15 λεπτά 30 λεπτά 1 ώρα 8 ώρες
1.2-Διχλωροαιθάνιο	0.7 mg/m ³	24 ώρες
Διχλωρομεθάνιο (Μεθυλοχλωρίδιο)	3 mg/m ³	24 ώρες
Φορμαλδεΰδη	100 µg/m ³	30 λεπτά
Υδρόθειο	150 µg/m ³	24 ώρες
Μόλυβδος	0.5–1.0 µg/m ³	1 έτος
Μαγγάνιο	1 µg/m ³	1 έτος
Υδράργυρος	1 µg/m ³ (εσωτ. αέρας)	1 έτος
Μονοξείδιο Αζώτου NO	400 µg/m ³ 150 µg/m ³	1 ώρα 24 ώρες
Όζον O ₃	150–200 µg/m ³ 100–120 µg/m ³	1 ώρα 8 ώρες
Στυρένιο	800 µg/m ³	24 ώρες
Διοξείδιο του Θείου SO ₂	500 µg/m ³ 350 µg/m ³	10 λεπτά 1 ώρα
Θειϊκό οξύ	–e	–
Τετραχλωροαιθυλένιο	5 mg/m ³	24 ώρες
Τολουΐνη	8 mg/m ³	24 ώρες
Τριχλωροαιθυλένιο	1 mg/m ³	24 ώρες
Βανάδιο	1 µg/m ³	24 ώρες

Πίνακας 10 : Τιμές κατευθυντήριων γραμμών για μεμονωμένες ουσίες με βάση άλλες επιπτώσεις εκτός από καρκίνο ή δυσάρεστη οσμή ή άλλη ενόχληση. Πηγή Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) [5]

b Η έκθεση σε αυτές τις συγκεντρώσεις δεν πρέπει να υπερβαίνει τους αναφερόμενους χρόνους και δεν πρέπει να επαναλαμβάνεται εντός 8 ωρών.

c Επειδή επιφέρει αναπνευστικό ερεθισμό, θα ήταν επιθυμητό να υπάρχει μια βραχυπρόθεσμη οδηγία, αλλά η παρούσα βάση δεδομένων δεν επιτρέπει τέτοιες εκτιμήσεις

d Η οδηγία δίνεται για ρύπανση μόνο εσωτερικών χώρων (μέσω εναπόθεσης και εισόδου στην τροφική αλυσίδα) που θα μπορούσαν να επηρεάσουν έμμεσα την ανθρώπινη υγεία

Σημείωση: Όταν τα επίπεδα των ρύπων στον περιβάλλοντα αέρα είναι μικρότερες από τις επιτρεπτές τιμές των οδηγιών, είναι απίθανο να προκληθούν προβλήματα υγείας. Στην περίπτωση αυτή οι τυπικές τιμές των οδηγιών αφορούν μόνο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις απελευθέρωσης στοιχείων ή σε συγκεκριμένα προβλήματα ρύπανσης εσωτερικών χώρων. Πηγή: Ευρωπαϊκό γραφείο ΠΟΥ (1987).

Όσον αφορά την συγκέντρωση του Τα αποτελέσματα των παραπάνω μελετών αποτέλεσαν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των περισσότερων προτύπων εξαερισμού και τις οδηγίες. Για παράδειγμα, το ευρέως αναγνωρισμένο πρότυπο ANSI / ASHRAE 62-2001 ορίζει: «Κριτήρια άνεσης, όσον αφορά τα ανθρώπινα βιορευστά (οσμή) ικανοποιούνται με αερισμό που επιφέρει συγκεντρώσεις CO₂ σε εσωτερικούς χώρους λιγότερο από 700 ppm διαφορά προς τα πάνω σε σύγκριση με από τη συγκέντρωση του εξωτερικού αέρα ». Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα χρησιμοποιείται επίσης στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 13779 για ταξινόμηση της ποιότητας αέρα εσωτερικού χώρου και στο γερμανικό πρότυπο DIN 1946-2, το οποίο δίνει μέγιστη τιμή συγκέντρωσης CO₂ σε το επίπεδο των 1500 ppm αλλά συνιστά τη διατήρηση των συγκεντρώσεων CO₂ σε εσωτερικούς χώρους κάτω από 1000 ppm.

1.3.1 Μέτρα και οδηγίες για τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή

Για να αντιμετωπίσει η Ευρωπαϊκή Ένωση τις δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των πολιτών της από την έκθεσή τους στους ατμοσφαιρικούς ρύπους, έχει αναπτύξει ένα εκτεταμένο σύνολο νομοθετημάτων με πρωταρχικό μέλημα την υγεία τους, που καθορίζουν πρότυπα και στόχους για αριθμούς συγκέντρωσης των ρύπων στον αέρα. Οι στόχοι και τα αντίστοιχα αυτά πρότυπα συνοψίζονται στον αμέσως παρακάτω πίνακα 11. Επειδή οι ρύποι χαρακτηρίζονται από ποικιλία στην φύση τους με ανάλογες επιπτώσεις στην υγεία, οι μέγιστοι ασφαλείς χρόνοι έκθεσης του ανθρώπου σε αυτούς ποικίλουν, επομένως οι τιμές στον πίνακα αναφέρονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους έκθεσης. [82]

Ρύπος	Συγκέντρωση	Μέσος όρος Περίοδος	Νομική Οδηγίες	υπόσταση - Επιτρεπόμενες υπερβάσεις σε ετήσια βάση
Μικροσωματίδια (PM2.5)	25 µg/m ^{3***}	1 έτος	Οριακή τιμή εφαρμόσιμη από 1.1.2010 Οριακή τιμή που πρέπει να τηρηθεί από 1.1.2015	Δεν Διατίθεται
Διοξείδιο του Θείου (SO₂)	350 µg/ m ³	1 ώρα	Οριακή τιμή εφαρμόσιμη από 1.1.2005	24
	125 µg/ m ³	24 ώρες	Οριακή τιμή εφαρμόσιμη από 1.1.2005	3
Διοξείδιο Αζώτου (NO₂)	200 µg/ m ³	1 ώρα	Οριακή τιμή εφαρμόσιμη από 1.1.2010	18
	40 µg/ m ³	1 έτος	Οριακή τιμή εφαρμόσιμη από 1.1.2010*	Δεν Διατίθεται
PM₁₀	50 µg/ m ³	24 ώρες	Οριακή τιμή εφαρμόσιμη από 1.1.2005**	35
	40 µg/ m ³	1 έτος	Οριακή τιμή εφαρμόσιμη από 1.1.2005**	Δεν Διατίθεται
Μόλυβδος (Pb)	0.5 µg/ m ³	1 έτος	Οριακή τιμή εφαρμόσιμη από 1.1.2005 (ή 1.1.2010 σε άμεση	Δεν Διατίθεται

				γεινίαση με συγκεκριμένες, κοινοποιημένες βιομηχανικές πηγές; Και η οριακή τιμή 1.0 µg/ που πρέπει να τηρηθεί από 1.1.2005 έως το 2009)	
Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	10 mg/ m ³	Μέγιστη ημερήσια Μ.Ο. 8 ώρες	Οριακή τιμή εφαρμόσιμη από 1.1.2005	Δεν Διατίθεται	
Βενζόλιο	5 µg/ m ³	1 έτος	Οριακή τιμή που πρέπει να τηρηθεί από 1.1.2010**	Δεν Διατίθεται	
Όζον	120 µg/ m ³	Μέγιστη ημερήσια Μ.Ο. 8 ώρες	Τιμή στόχου που πρέπει να επιτευχθεί στις 1.12.2012	Κατά μέσον όρο 25 ημέρες για 3 έτη	
Αρσενικό (As)	6 ng/ m ³	1 έτος	Τιμή στόχου που πρέπει να επιτευχθεί στις 31.12.2012	Δεν Διατίθεται	
Κάδμιο (Cd)	5 ng/ m ³	1 έτος	Τιμή στόχου που πρέπει να επιτευχθεί στις 31.12.2012	Δεν Διατίθεται	
Νικέλιο (Ni)	20 ng/ m ³	1 έτος	Τιμή στόχου που πρέπει να επιτευχθεί στις 31.12.2012	Δεν Διατίθεται	
Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες	1 ng/ m ³ (εκφραζόμενη ως συγκέντρωση του Benzo(a)pyrene)	1 έτος	Τιμή στόχου που πρέπει να επιτευχθεί στις 31.12.2012	Δεν Διατίθεται	

Πίνακας 11: Ασφαλείς χρόνοι έκθεσης σε χρονικές περιόδους . [82]

* Προβλεπόταν στην οδηγία 2008/50/ΕΕ, η δυνατότητα υποβολής αίτησης κράτους μέλους για παράταση προσαρμογής στα προαπαιτούμενα έως και πέντε έτη (δηλαδή το πολύ έως το 2015) σε μια συγκεκριμένη ζώνη, για να αξιολογηθεί το αίτημα από την Επιτροπή. Σε τέτοιες περιπτώσεις κατά την χρονική περίοδο της παράτασης, οι οριακές τιμές καθορίζονται από την επιβαλλόμενη με επιπλέον ένα μέγιστο περιθώριο ανοχής (48 µg / m³ για την ετήσια οριακή τιμή NO₂).

** * Προβλεπόταν στην οδηγία 2008/50 / ΕΕ, η δυνατότητα υποβολής αίτησης κράτους μέλους για παράταση έως τρία έτη μετά την εναρκτήρια ημερομηνία ισχύος της νέας οδηγίας (δηλ. Μάιος 2011) σε συγκεκριμένη ζώνη. Το αίτημα τότε θα αξιολογείτο από την Επιτροπή. Σε τέτοιες περιπτώσεις κατά την χρονική περίοδο της παράτασης, οι οριακές τιμές καθορίζονται από την επιβαλλόμενη με επιπλέον ένα μέγιστο περιθώριο ανοχής (35 ημέρες στα 75 µg/m³ για την ημερήσια οριακή τιμή PM₁₀, 48 µg/m³ για την ετήσια οριακή τιμή PM₁₀).

*** Πρότυπο που εισήχθη με την οδηγία. Σύμφωνα με το δίκαιο της ΕΕ, κάθε κράτος μέλος δεσμεύεται νομικά να εφαρμόσει μια οριακή τιμή την συγκεκριμένη ημερομηνία, με την επιφύλαξη τυχόν υπέρβασης που επιτρέπεται από τη νομοθεσία. Για να επιτευχθεί μια τιμή-στόχος, κάθε μέλος υποχρεούται να λάβει όλα τα απαραίτητα μέτρα που όμως δεν επιβάλλουν δυσανάλογο κόστος οπότε η εφαρμογή της είναι ελαστική συγκριτικά με μια οριακή τιμή.

Η οδηγία 2008/50 / ΕΚ [83] εισήγαγε πρόσθετους **στόχους για τα αιωρούμενα υλικά μικροσωματίδια PM2,5 που αναφέρονται** στην έκθεση του πληθυσμού σε αυτά. Οι στόχοι αυτοί καθορίζονται σε εθνικό επίπεδο και βασίζονται στον μέσο δείκτη έκθεσης (ΑΕΙ). Πρόκειται για την μέση ετήσια συγκέντρωση PM2,5 περιόδου τριών ετών, κατά μέσο όρο, αναφερόμενοι στους επιλεγμένους σταθμούς παρακολούθησης οικισμών και μεγαλύτερων αστικών περιοχών, σε αστικές τοποθεσίες για την καλύτερη αξιολόγηση της έκθεσης PM2.5 του γενικού πληθυσμού.

Ρύπος	Συγκέντρωση	Μέσος όρος Περιόδου	Νομική υπόσταση - Οδηγίες	Επιτρεπόμενες υπερβάσεις σε ετήσια βάση
PM2.5 Υποχρέωση συγκέντρωσης έκθεσης στους ρύπους	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Βασισμένο σε 3 έτη κατά μέσον όρο	Νομική συμμόρφωση το έτος 2015 (τα έτη 2013,2014,2015)	Δεν υπάρχουν στοιχεία
PM2.5 Στόχος μείωσης στην έκθεση των ρύπων	Ποσοστιαία μείωση* και όλα τα μέτρα με στόχο τα 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ΑΕΙ)	Βασισμένο σε 3 έτη κατά μέσον όρο	Όπου εφικτή η μείωση μέχρι το 2020, βασισμένο στις ενδείξεις έκθεσης μέχρι το 2010	Δεν υπάρχουν στοιχεία

* Ανάλογα με τα επίπεδα ρύπανσης το 2010, ορίζεται με οδηγία η υποχρέωση ποσοστιαίας μείωσης (0,10,15, or 20%). Αν τα επίπεδα των ρύπων το 2010 προβάλλουν πάνω από 22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, τότε πρέπει να ληφθούν όλα τα αναγκαία μέτρα ώστε να μειωθεί η συγκέντρωση κάτω των 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ μέχρι το 2020.

Στην προσπάθειά της η Ευρωπαϊκή Ένωση να αντιμετωπίσει τις δυσμενείς επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης όπως αναλυτικά παρατέθηκαν στα παραπάνω, θέτει συγκεκριμένους στόχους μέσα από ενέργειες και πολιτικές ώστε να επιτύχει επίπεδα ποιότητας αέρα που να μειώνουν δραστικά τις όποιες αρνητικές επιπτώσεις και τους κινδύνους στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Ήδη εδώ και περίπου 50 χρόνια η ΕΕ προσπαθεί να βελτιώσει την ποιότητα του αέρα με τον έλεγχο σε πρώτη φάση των εκπομπών επιβλαβών ουσιών στην ατμόσφαιρα, παράλληλα με την βελτίωση της ποιότητας των καυσίμων και επιβάλλοντας αναγκαία μέτρα και αρχές προστασίας του περιβάλλοντος στους τομείς των μεταφορών και της ενέργειας.

Το πρόγραμμα Καθαρός αέρας Air Quality [7] αποκρυσταλλώνει την πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης περί της ποιότητας του αέρα, όπως προαναφέρθηκε. Ο βασικός στόχος Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πελαδαρινός Νικόλαος, AM msciot19007

είναι πρωτίστως η ανάπτυξη και η εφαρμογή κατάλληλων μέτρων για να βελτιωθεί η ποιότητα του αέρα. Τα βασικότερα μέτρα βασίζονται στην τελευταία έρευνα για τις επιπτώσεις στην ατμοσφαιρική ρύπανση στην υγεία. Αυτά είναι μια σειρά από οδηγίες με πρότυπα ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα ώστε να προστατεύουν τους πληθυσμούς από υπερβολικές συγκεντρώσεις ρύπανσης. Το πρώτο σημαντικό εργαλείο ήταν η οδηγία πλαίσιο για την ποιότητα του αέρα 96/62/Ε.Επ. και οι υποκείμενες αυτής οδηγίες, οι οποίες καθιέρωσαν πρότυπα για μια σειρά ρύπων όπως το όζον, τα σωματίδια (PM10) και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂), για την περίοδο έως το 2004.

Βάσει της Ευρωπαϊκής θεματικής στρατηγικής για την ατμοσφαιρική ρύπανση, με χρονικό ορίζοντα το 2005, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε την ενοποίηση της οδηγίας-πλαίσιου με τις πρώτες τρεις θυγατρικές οδηγίες σε μία ενιαία οδηγία για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα. Αυτή υιοθετήθηκε ως οδηγία πρότυπο με κωδικό 2008/50/Ε.Επ. ενώ παράλληλα συμπεριλαμβάνει και τους στόχους για τα **αιωρούμενα μικροσωματίδια (PM_{2.5})**. Η οδηγία για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα συμπεριλαμβάνοντας την τέταρτη θυγατρική οδηγία 2004/107/Ε.Επ, παρέχει το ισχύον πλαίσιο για τον έλεγχο των συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ΕΕ. Στους στόχους αυτούς έχουν συμπεριληφθεί οι απαιτήσεις της περιβαλλοντικής προστασίας στον τομέα των μεταφορών και της ενέργειας, ο έλεγχος των εκπομπών από κινητές πηγές όπως επίσης και η βελτίωση της ποιότητας των καυσίμων.

Αισίως μετά από αυτά, έχουν τιθασευτεί σημαντικά τα επίπεδα των ατμοσφαιρικών ρύπων όπως το διοξείδιο του θείου, ο μόλυβδος, τα οξειδία του αζώτου, το μονοξείδιο του άνθρακα και το βενζόλιο. Ωστόσο, παρά την μέχρι σήμερα σημειωμένη πρόοδο, πολλά και σοβαρά προβλήματα προκαλούνται ακόμη από την κακή ποιότητα του αέρα που κάλλιστα θα μπορούσαμε να αποφύγουμε. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή για να συνδράμει στην βελτίωση της ποιότητας του αέρα, ενέκρινε το 2013 μια δέσμη μέτρων για τον καθαρό αέρα μέσω του προγράμματος [Clean Air Policy Package](#), [7], για καθαρό αέρα στα πλαίσια της Ευρώπης που θέτει στόχους για το 2020 και το 2030, και συνοδευτικά νομοθετικά μέτρα.

Το 2018, η Επιτροπή υιοθέτησε εκ νέου μια δέσμη μέτρων και οδηγιών με τίτλο «Μια Ευρώπη που προστατεύει τον αέρα της Ευρώπης, όπου συνολικά επιβεβαιώθηκε και ανανεώθηκε το πρόγραμμα «Καθαρός αέρας για την Ευρώπη» του 2013 με στόχο να επιταχυνθεί η πλήρης συμμόρφωση με τα ισχύοντα πρότυπα ποιότητας του αέρα σε όλη την ΕΕ ενώ παράλληλα έθεσε στόχους για το 2020 και το 2030. Οι προσπάθειες λοιπόν της πολιτικής της ΕΕ βασίζονται σε τρεις κύριους πυλώνες.

Ο πρώτος πυλώνας περιλαμβάνει τα πρότυπα ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα που καθορίζονται στις οδηγίες για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα για το τροποσφαιρικό όζον, τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οξειδία του αζώτου, τα επικίνδυνα βαρέα μέταλλα και ορισμένους άλλους ρύπους

Ο δεύτερος πυλώνας αποτελείται από εθνικούς στόχους μείωσης των εκπομπών που καθορίζονται στην οδηγία για τα εθνικά ανώτατα όρια εκπομπών όσον αφορά τους σημαντικότερους διασυννοριακούς ατμοσφαιρικούς ρύπους

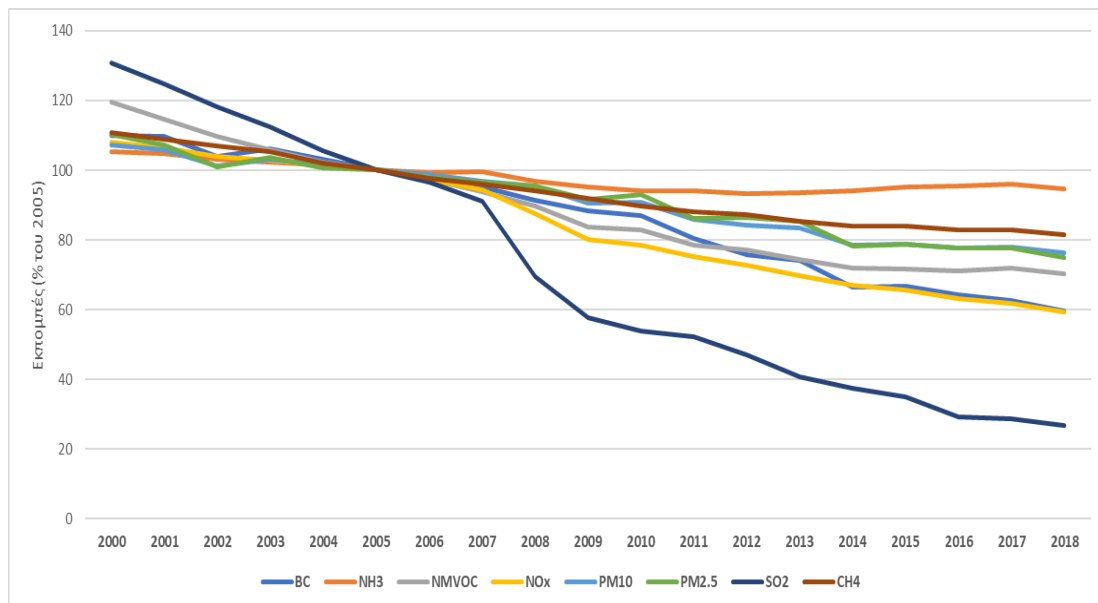
Ο τρίτος πυλώνας περιλαμβάνει πρότυπα εκπομπών για τις κυριότερες πηγές ρύπανσης, από τις εκπομπές των οχημάτων και των πλοίων έως την ενέργεια και τη βιομηχανία

Το πρόγραμμα αυτό με τον τίτλο «καθαρός αέρας για όλους» "[A Europe that protects: Clean air for all](#)" [84], παρέχει συνολικά στους εθνικούς, περιφερειακούς και τοπικούς φορείς πρακτική βοήθεια για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στην Ευρώπη.

Η συνοδεύουσα έκθεση αυτών των δράσεων παρουσιάζει την ανάλυση των προοπτικών για την κατάσταση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση μέχρι το 2030 και μετά. Ενημερώνει την ανάλυση που παρουσιάστηκε στο First Clean Air Outlook που δημοσιεύθηκε το 2018, ιδίως συμπεριλαμβάνοντας τα μέτρα που πρότειναν τα κράτη μέλη στα εθνικά τους προγράμματα ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και σύμφωνα με την έντονη φιλοδοξία αναστροφής της κλιματικής αλλαγής.

Στον επίσημο ιστότοπο του παραπάνω προγράμματος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, μπορούμε να αναζητήσουμε περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις προσπάθειες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη μείωση των ρυπογόνων εκπομπών στον αέρα σε εθνικό επίπεδο ([national air pollution emissions](#)) [85], καθώς και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τις κύριες πηγές ([air pollution from the main sources](#)) [86] με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα ([air quality](#)) [7].

Στα πλαίσια του προγράμματος Καθαρός Αέρας για την Ευρώπη II ("A Clean Air Programme for Europe") [87] η Επιτροπή δημοσιοποίησε τον Νοέμβριο του 2019, τα αποτελέσματα των ελέγχων καταλληλότητας των δύο οδηγιών της ΕΕ για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα⁹. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα, παρόλο που τα πρότυπα ποιότητας του αέρα της Ένωσης λειτούργησαν καθοριστικά ώστε να περιοριστούν οι υπερβάσεις των τιμών των ρύπων και η έκθεση του πληθυσμού σε αυτές, ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις παραμένουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις για την επίτευξη των προτύπων ποιότητας του αέρα.



Εικόνα 9 : Η πορεία εξέλιξης των εκπομπών στην Ευρώπη των 28, από το 2000 έως και το 2018 (% των επιπέδων του 2005) (Πηγή: Ευρωπαϊκή Επιτροπή Υγείας)

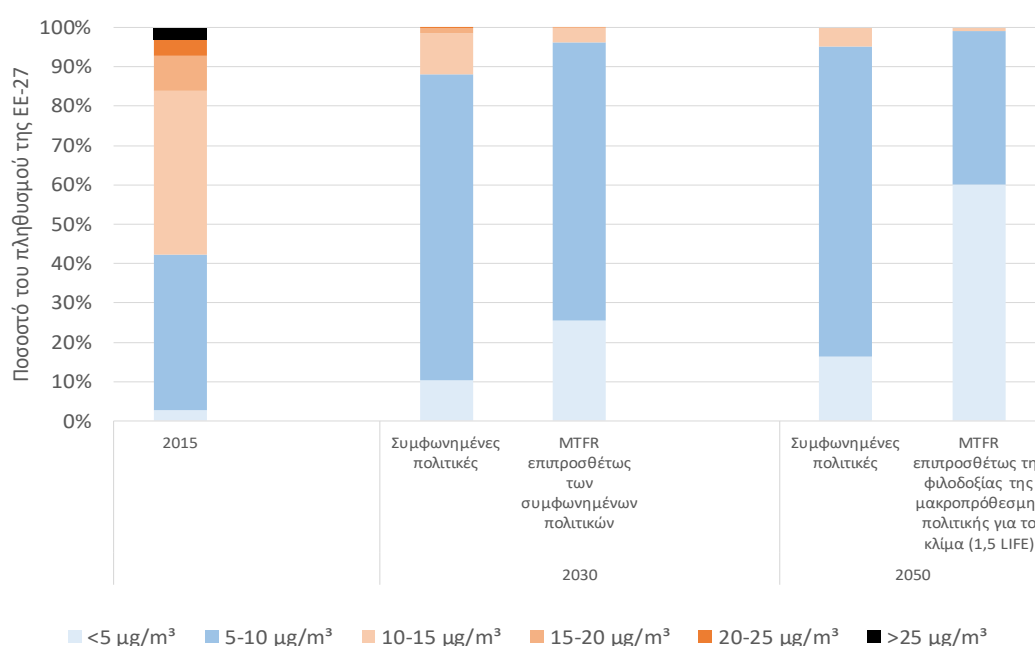
Στο παραπάνω διάγραμμα 10. Προφανώς διαπιστώνει κανείς την εν λόγω πτωτική τάση των τιμών των ρύπων. Αυτή πρέπει να διατηρηθεί με επίμονες προσπάθειες, ιδίως στοχεύοντας στους ρύπους που εμφανίζονται με την μικρότερη μείωση. Για παράδειγμα, οι εκπομπές αμμωνίας μένουν αμετάβλητες από το 2005 ενώ έχουν τελευταία σημειώνονται και αυξήσεις στις τιμές σε κάποια κράτη μέλη. Επιπλέον, από μελέτες της Επιτροπής απορεί το συμπέρασμα ότι τα ισχύοντα πρότυπα ποιότητας του αέρα για αρκετούς ρύπους υστερούν έναντι των συστάσεων του ΠΟΥ¹⁰, ιδιαίτερα μάλιστα αυτών που αφορούν τα αιωρούμενα σωματίδια τύπου PM_{2.5}. Έτσι ακολουθώντας το πλαίσιο της Πράσινης Συμφωνίας της

⁹ SWD(2019) 427 τελικό.

¹⁰ Μέχρι στιγμής ο ΠΟΥ αναθεωρεί τις κατευθυντήριες γραμμές του και η Επιτροπή παρακολουθεί στενά την διαδικασία.

Ευρώπης η Επιτροπή ανακοίνωσε πως θα αξιοποιήσει τους ελέγχους καταλληλότητας για να προχωρήσει σε αναθεώρηση των προτύπων ποιότητας του αέρα με σκοπό να τα ευθυγραμμίσει όσο γίνεται περισσότερο με τις συστάσεις της ΠΟΥ. Η Επιτροπή σκοπεύει να προτείνει την ισχυροποίηση των διατάξεων για τον έλεγχο, την μοντελοποίηση και την εκπόνηση σχεδίων για βελτίωση της ποιότητας του αέρα, ώστε να σταθεί αρωγός των τοπικών αρχών στην επίτευξη καθαρότερου αέρα¹¹.

Στην περίπτωση που όλα τα κράτη μέλη εφάρμοζαν το σύνολο των υφιστάμενων κανόνων που ρυθμίζουν την ατμοσφαιρική ρύπανση, και τα συμφωνηθέντα μέτρα τον Δεκέμβριο του 2018 για τους στόχους του 2030 που αφορούν το κλίμα και την ενέργεια, οι εκπομπές των ρύπων στην ατμόσφαιρα θα μειώνονταν στα επίπεδα των απαιτήσεων της οδηγίας ΕΑΟΕ σε Ευρωπαϊκό επίπεδο του 2030, για όλους τουλάχιστον τους ρύπους εκτός της αμμωνίας. Έτσι όλες οι ζώνες διαχείρισης ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα θα περιόριζαν τις εκπομπές στα 25 μικρογραμμάρια/μ³ PM_{2.5} συγκέντρωσης υποβάθρου¹². Δεκατέσσερις τέτοιες ζώνες παρατηρήθηκαν το 2019 σε τέσσερα κράτη μέλη. [87]



Εικόνα 11 : Αντιστοιχία του πληθυσμού και έκθεσης αυτού σε ρύπους PM_{2.5}, ΕΕ-27 (Πηγή: International Institute for Applied Systems Analysis - IIASA)

Σημείωση: Το ακρωνύμιο MTFR σημαίνει «μέτρα υλοποιήσιμα που στοχεύουν στον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με την μέγιστη τεχνικά απόδοτικότητα» (Maximum Technically Feasible air pollution Reduction measures).

Στην περίπτωση που εφαρμοστούν πλήρως στο σύνολο τους οι συμφωνηθήσες από τα κράτη μέλη¹³ οδηγίες, προβλέπεται πως θα μειωθούν οι πρόωροι θάνατοι, εξ αιτίας των ρύπων PM_{2.5}, περίπου κατά 55 % από το έτος 2005 μέχρι και το 2030. Ουσιαστικά αυτό μεταφράζεται σε μείωση κατά 28 % των πρόωρων θανάτων από το έτος 2020 μέχρι το 2030.

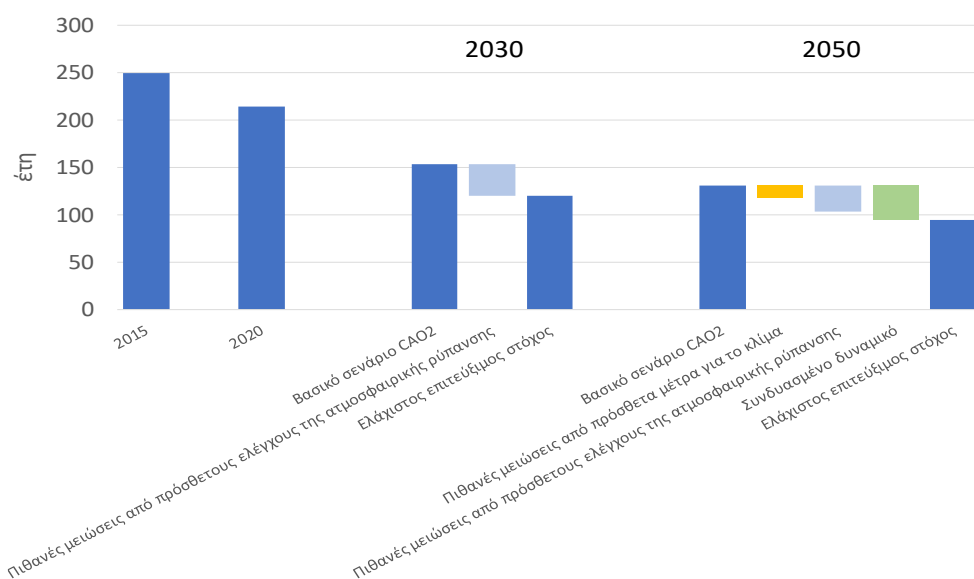
¹¹ Για περισσότερες πληροφορίες, βλ.: <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12677-Revision-of-EU-Ambient-Air-Quality-legislation>

¹² 25 μικρογραμμάρια/μ³ αντιστοιχούν στην οριακή τιμή της οδηγίας για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, η οποία αναφέρεται στη συνολική συγκέντρωση, ενώ τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται εδώ αναφέρονται αποκλειστικά στις συγκεντρώσεις υποβάθρου χωρίς να περιλαμβάνονται εκπομπές σε τοπικά κομβικά σημεία.

¹³ Οι υπολογισμοί έγιναν με την παραδοχή του σταθερού πληθυσμού στα επίπεδα του 2010, ούτως ώστε να διατηρηθεί η συνέπεια με τους προηγούμενους υπολογισμούς όσον αφορά την εν λόγω μεταβολή.

Αν εφαρμοστούν αυστηρά και στο έπακρο οι οδηγίες περιορισμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης¹⁴, θα ήταν δυνατή η μείωση πρόωρων θάνατων μειωθούν τουλάχιστον κατά 44 % από το 2020 μέχρι το 2030. Δυστυχώς όμως ακόμη και έτσι, οι πρόωροι θάνατοι στην ΕΕ από ρύπανση PM_{2.5} θα ανέρχονταν ετησίως τουλάχιστον σε 130 000.

Από την πλευρά του προσδόκιμου ζωής που μειώνεται λόγω της ρύπανσης από PM_{2.5}, συνολικά η κατάσταση παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη (βλ. διάγραμμα 12). Τα μέτρα για το κλίμα οφελούν σημαντικά μα εξίσου σημαντικά οφέλη αναμένονται επιπλέον να προκύψουν από τα μέτρα για καθαρό αέρα. Ωστόσο η εφαρμογή των παραπάνω οδηγιών που ανακοίνωσαν τα κράτη μέλη της ΕΕ τα επιβαρύνει με οικονομικό κόστος περίπου 1,4 δισεκατομμυρίων Ευρώ. Όμως από την άλλη μεριά τα σημαντικά οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή τους στην υγεία μιας και μειώνεται η θνησιμότητα αλλά και η νοσηρότητα, σαφώς και υπερτερούν του οικονομικού κόστους σε όλες τις περιπτώσεις όπως αυτές αναλύθηκαν λεπτομερώς.



Εικόνα 130: Έτη ανθρώπινων ζώων που χάνονται λόγω της έκθεσης σε ρύπους τύπου PM_{2.5} στην Ευρωπαϊκή Ένωση των 27 χωρών (πηγή: IIASA)

Τα μέτρα των Ευρωπαϊκών Προγραμμάτων Ευρωπαϊκής Αντιμετώπισης Ρύπων¹⁵ για την υγεία προσφέρουν οικονομικά οφέλη ύψους 8 έως και 43 δις Ευρώ ετησίως για την ΕΕ¹⁶. Προφανώς λοιπόν αυτά αποτελούν προστιθέμενη αξία για την κοινωνία.

Επομένως για να υλοποιηθούν σύντομα και σύμφωνα με τα πρότυπα οι εξαγγελίες αυτές, τα επίπεδα των ρύπων σε όλη την επικράτεια της ΕΕ καταμετρώνται και να καταγράφονται δυναμικά και ελέγχονται οι τιμές βάσει των οδηγιών, βάσει των ακόλουθων αρχών που έχουν θεσπιστεί:

1.4 Οι αρχές της Ευρωπαϊκής νομοθεσίας για την ποιότητα του αέρα.

Πρώτη Αρχή

¹⁴ Μέγιστο τεχνικώς εφικτό σενάριο.

¹⁵ Με ελλιπή στοιχεία από κάποια ΕΠΕΑΡ στάθηκε αδύνατον να καταρτιστούν μοντέλα για το σύνολο των μέτρων, οπότε διατηρείται μια επιφύλαξη.

¹⁶ Οι ποικίλες μέθοδοι αποτίμησης και η έκταση των επιπτώσεων στην υγεία που συμπεριλήφθηκαν απέδωσαν το εύρος των μετρήσεων.

Σύμφωνα με την πρώτη αρχή όλα τα κράτη μέλη της Ε.Ε. χωρίζουν την επικράτειά τους σε ζώνες ποιότητας αέρα και οικισμούς (Air Quality Zones - [zones and agglomerations](#)) [88].

Οι χάρτες των ζωνών αυτών για το έτος 2014, και οι σχετικοί σταθμοί ελέγχου και μετρήσεων που έχουν αναφέρει δεδομένα στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή για τα έτη 2013 έως 2014 είναι διαθέσιμοι στον παρακάτω πίνακα:

<i>Austria</i>	<i>Estonia</i>	<i>Italy</i>	<i>Portugal</i>
<i>Belgium</i>	<i>Finland</i>	<i>Latvia</i>	<i>Romania</i>
<i>Bulgaria</i>	<i>France</i>	<i>Lithuania</i>	<i>Slovakia</i>
<i>Croatia</i>	<i>Germany</i>	<i>Luxembourg</i>	<i>Slovenia</i>
<i>Cyprus</i>	<i>Greece</i>	<i>Malta</i>	<i>Spain</i>
<i>Czech Republic</i>	<i>Hungary</i>	<i>Netherlands</i>	<i>Sweden</i>
<i>Denmark</i>	<i>Ireland</i>	<i>Poland</i>	<i>United Kingdom</i>

Χάρτες Ζωνών Ποιότητας Αέρα των Χωρών μελών της Ε.Ε.

Περισσότερα στοιχεία και πληροφορίες υπάρχουν στο Ευρωπαϊκό portal με τίτλο **European Air Quality Portal** [89].

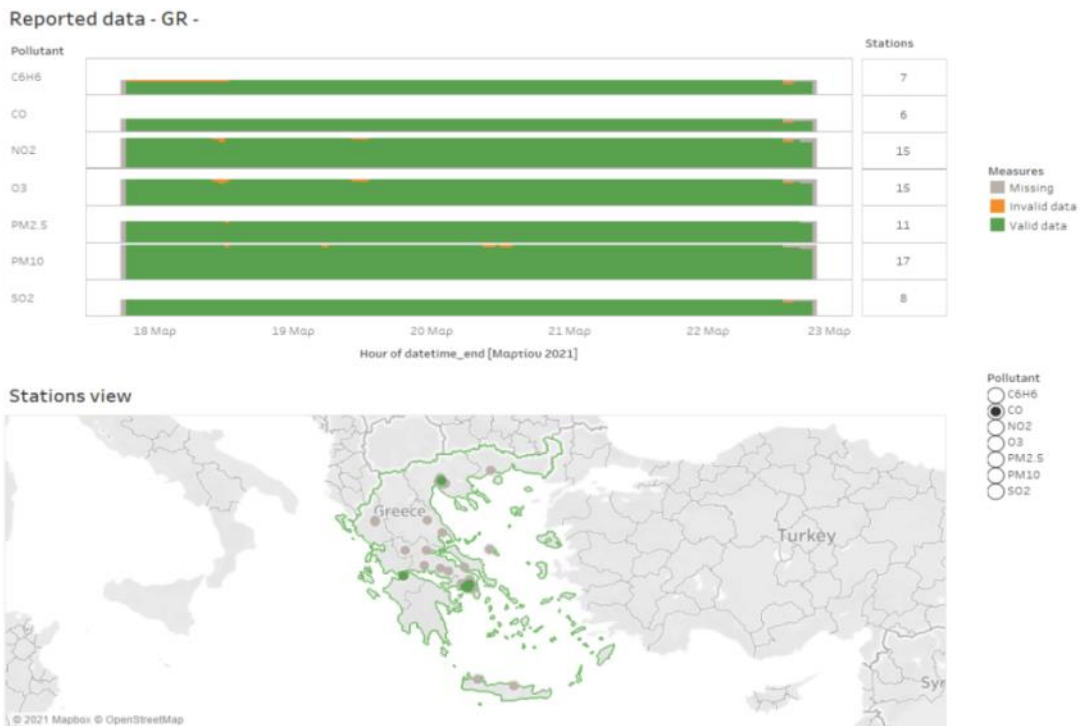
Δεύτερη Αρχή

Στις ζώνες και τους οικισμούς αυτούς, τα κράτη μέλη αξιολογούν τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με μετρήσεις, μοντελοποίηση και άλλες εμπειρικές τεχνικές και να αναφέρουν τα δεδομένα για την ποιότητα του αέρα ([air quality data / online](#)) [90] στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

Η κατανομή αυτή ορίζεται από την νομοθεσία της ΕΕ περί της ποιότητας του αέρα με την υποχρέωση των κρατών μελών να υποβάλλουν εκθέσεις σχετικά με τις ζώνες που ορίζονται βάσει των οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης -Directive 2008/50/EC [91]- και Directive 2004/107/EC [92], για την ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντός τους. Η Ευρωπαϊκή οδηγία 2011/850/EU [93] και συγκεκριμένα στο άρθρο 6 παρέχει πληροφορίες για τις ζώνες και τους οικισμούς που πρέπει να διατίθενται από τα κράτη μέλη.

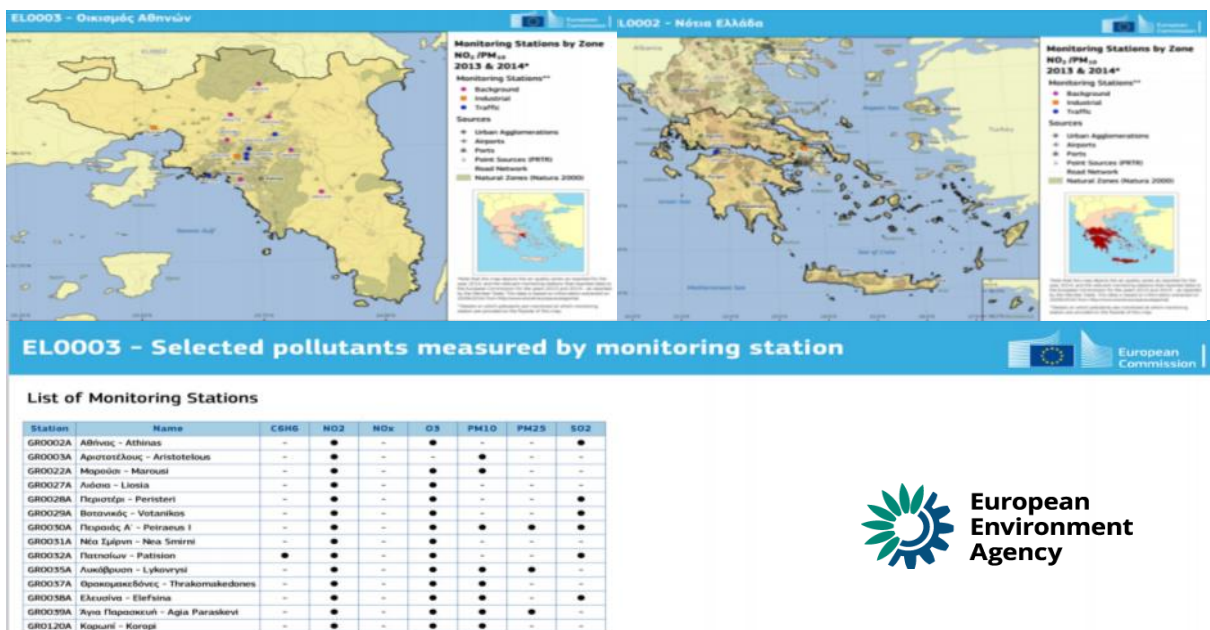
Τρίτη Αρχή

Στην περίπτωση που τα επίπεδα ξεπερνούν τις καθορισμένες οριακές τιμές ή τις τιμές-στόχους (βλ. Πρότυπα ποιότητας αέρα [82]), τα κράτη μέλη οφείλουν να προετοιμάσουν και να υλοποιήσουν ένα σχέδιο ή πρόγραμμα ποιότητας αέρα για να εντοπίσουν τις πηγές αυτών των ρύπων, ώστε να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τις οριακές τιμές, προτού τεθεί επίσημα σε ισχύ η υποχρέωση συμμόρφωσης σε αυτές. Επιπλέον, οφείλουν να ανακοινώνουν και να διαθέτουν τις πληροφορίες για την ποιότητα του αέρα ελεύθερα στο κοινό. Εδώ εμφανίζονται για την Ελληνική επικράτεια οι συγκεντρώσεις των ρύπων σε πλήρη και λεπτομερή καταγραφή στον άξονα του χρόνου.



Εικόνα 11 : EUROPEAN AIR QUALITY PORTAL, UTD DETAILS REPORT [94]

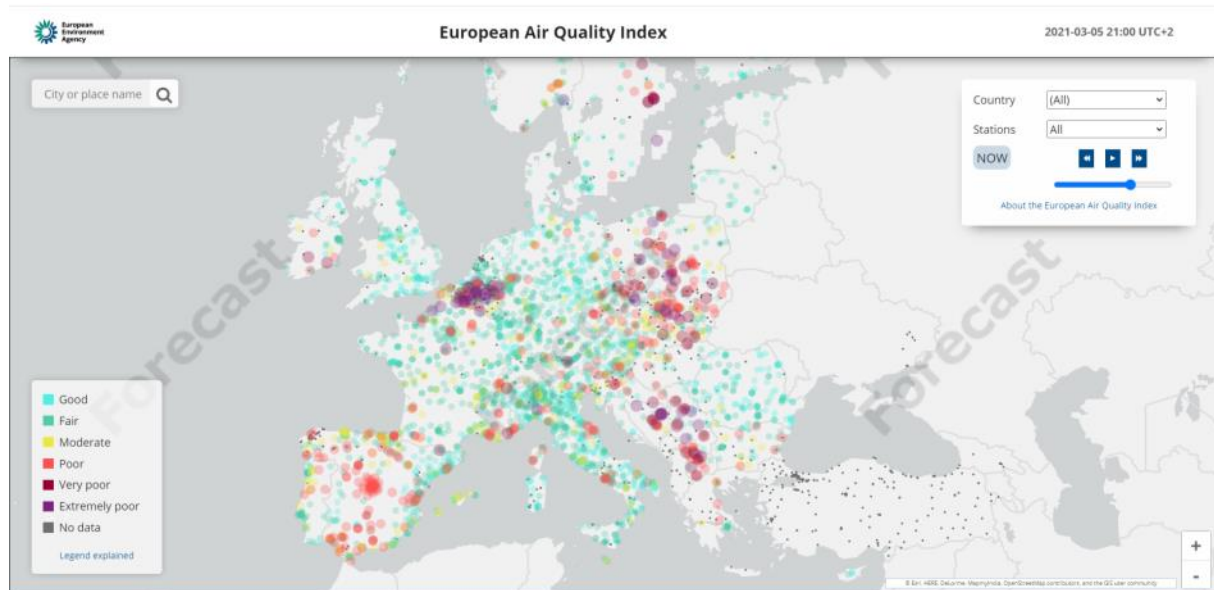
Ειδικότερα για την Ελλάδα όπως και για τις υπόλοιπες Ευρωπαϊκές περιοχές εκδίδονται ετήσιες αναφορές [95] που περιλαμβάνουν τις μετρήσεις και τα συμπεράσματα συμμόρφωσης στα Ευρωπαϊκά δεδομένα των ρύπων όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα.



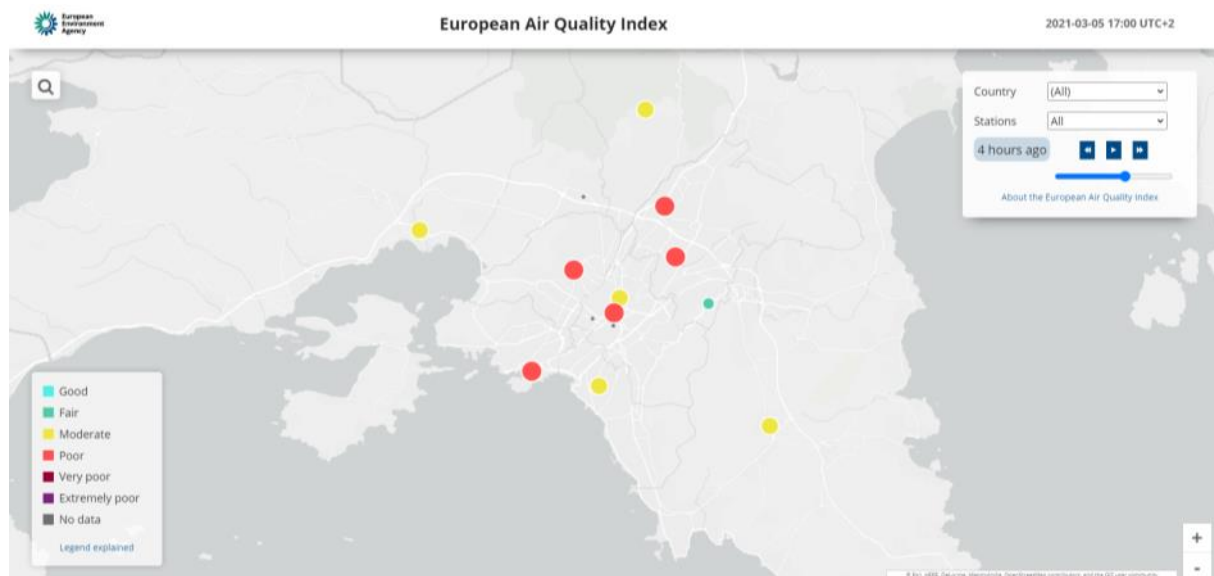
Εικόνα 14 : Δείκτες ρύπανσης στην Νότια Ελλάδα και την Αττική (πηγή - <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/zones.html>)

Ένα Ευρωπαϊκό εργαλείο που αναδεικνύει δυναμικά την καθαρότητα του αέρα που αναπνέουμε αυτή τη στιγμή σε κάθε περιοχή της Ευρώπης, το πώς συγκρίνεται ο αέρας στην πόλη μας με εκείνον μιας γειτονικής πόλης ή περιοχής είναι η διαδικτυακή απεικόνιση του χάρτη Δείκτη ποιότητας αέρα- Air quality index [96]

Ο Ευρωπαϊκός Δείκτης Ποιότητας Αέρα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος είναι ένα δυναμικό και χρήσιμο εργαλείο κατανόησης της ποιότητας του αέρα που αναπνέουμε στην Ευρώπη. Εμφανίζονται τα πιο πρόσφατα δεδομένα για ολόκληρη την Ευρώπη, οπότε μπορεί κανείς να αναζητήσει τρέχουσες πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του αέρα συγκεκριμένων περιοχών και πόλεων.



Εικόνα 15 : Ευρωπαϊκός Δείκτης Ποιότητας Αέρα ανά περιοχή [6]. Οι κύκλοι εμφανίζουν τα σημεία μετρήσεων των ρύπων στην Ευρώπη, με χρώμα αντίστοιχο των τιμών σύμφωνα με το υπόμνημα αριστερά στην εικόνα.



Εικόνα 16 : Ευρωπαϊκός Δείκτης Ποιότητας Αέρα για την Αττική [6]. Ομοίως οι κύκλοι εμφανίζουν τα σημεία μετρήσεων στην Αττική με χρώμα αντίστοιχο των τιμών σύμφωνα με το υπόμνημα αριστερά στην εικόνα.

Επεξήγηση Υπομνήματος

Οι θέσεις των σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εμφανίζονται στον χάρτη με έγχρωμους κύκλους. Το χρώμα αντιστοιχεί στον δείκτη ποιότητας αέρα τη δεδομένη χρονική στιγμή σε κάθε σταθμό. Κάθε σταθμός μέτρησης και καταγραφής εμφανίζεται στον χάρτη με κατάλληλη χρωματική απόδοση ανάλογη με την ποιότητα του αέρα. Τα χρώματα εμφανίζονται με διακυμάνσεις της διαφάνειάς τους:

1. Με **χρώμα συμπαγές και λευκό περίγραμμα (*)** εμφανίζονται οι περιοχές όπου πληρούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις ρύπων που για τον υπολογισμό του δείκτη (ανατρέξτε στην ενότητα Πληροφορίες για λεπτομέρειες).

2. Με **ημιδιαφανές χρώμα** εμφανίζονται οι περιοχές όπου δεν πληρούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις ρύπων υπολογισμού του δείκτη ποιότητας αέρα, οπότε το χρώμα αντιστοιχεί στον δείκτη ποιότητας του αέρα που υπολογίζεται σύμφωνα με τους διαθέσιμους ρύπους.

Οι **γκρίζες** κουκκίδες υποδεικνύουν σταθμούς για τους οποίους υπάρχουν ανεπαρκή δεδομένα για τον υπολογισμό του ευρετηρίου. Τα γραφήματα που εμφανίζονται στην ενότητα "Εμφάνιση λεπτομερειών" όταν κάνετε κλικ σε έναν σταθμό στο χάρτη ακολουθούν το ίδιο συνδυασμό χρωμάτων.

Με την επιλογή "info" εμφανίζονται αρκετές λεπτομέρειες όπως ο αστερίσκος δίπλα σε μια τιμή υποδεικνύει ότι η τιμή έχει γεμίσει κενό.

Το γράφημα πίτας που δείχνει τον αριθμό των ημερών για κάθε επίπεδο ευρετηρίου για τις τελευταίες 365 ημέρες (το υψηλότερο ωριαίο επίπεδο ευρετηρίου σε μια ημέρα καθορίζει το ημερήσιο επίπεδο ευρετηρίου που λαμβάνεται υπόψη). Το γράφημα ΧΥ που παρουσιάζει την εξέλιξη του δείκτη για τους διάφορους ρύπους τις τελευταίες 10 ημέρες, δηλαδή τις συγκεντρώσεις που κανονικοποιούνται στις τιμές της ζώνης σχετικά με τη μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη AQ.

Το επίπεδο του δείκτη που περιγράφει την ποιότητα του αέρα σε κάθε σταθμό παρακολούθησης βασίζεται σε μετρήσεις έως και πέντε βασικών ρύπων από μοντέλα δεδομένων. Ο δείκτης αντιστοιχεί στο φτωχότερο επίπεδο για έναν από τους πέντε ρύπους σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα.

Ρύποι	Ευρετήριο Επιπέδων (βασισμένο στις συγκεντρώσεις των ρύπων σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
	Καλό	Σχετικά καλό	Μεσαίο	Φτωχό	Πολύ φτωχό	Εξαιρετικά φτωχό
Σωματίδια μικρότερα από 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$)	0-10	10-20	20-25	25-50	50-75	75-800
Σωματίδια μικρότερα από 10 μm (PM_{10})	0-20	20-40	40-50	50-100	100-150	150-1200
Διοξείδιο του Αζώτου (NO_2)	0-40	40-90	90-120	120-230	230-340	340-1000
Όζον (O_3)	0-50	50-100	100-130	130-240	240-380	380-800
Διοξείδιο του Θείου (SO_2)	0-100	100-200	200-350	350-500	500-750	750-1250

Πίνακας 12 Κατηγοριοποίηση των επιπέδων των ρύπων σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Πηγή: Ευρωπαϊκή Επιτροπή [6]

Οι συγκεντρώσεις που αναφέρονται στον μικρό πίνακα είναι:

- Οι ωριαίες συγκεντρώσεις για τα NO_2 , O_3 και SO_2

- Βασισμένο σε 24ωρο μέσο λειτουργίας για PM10 και PM2.5

Ομοίως κατηγοριοποιούνται οι οργανικοί ρύποι όπως μπορούμε να δούμε στον παρακάτω πίνακα

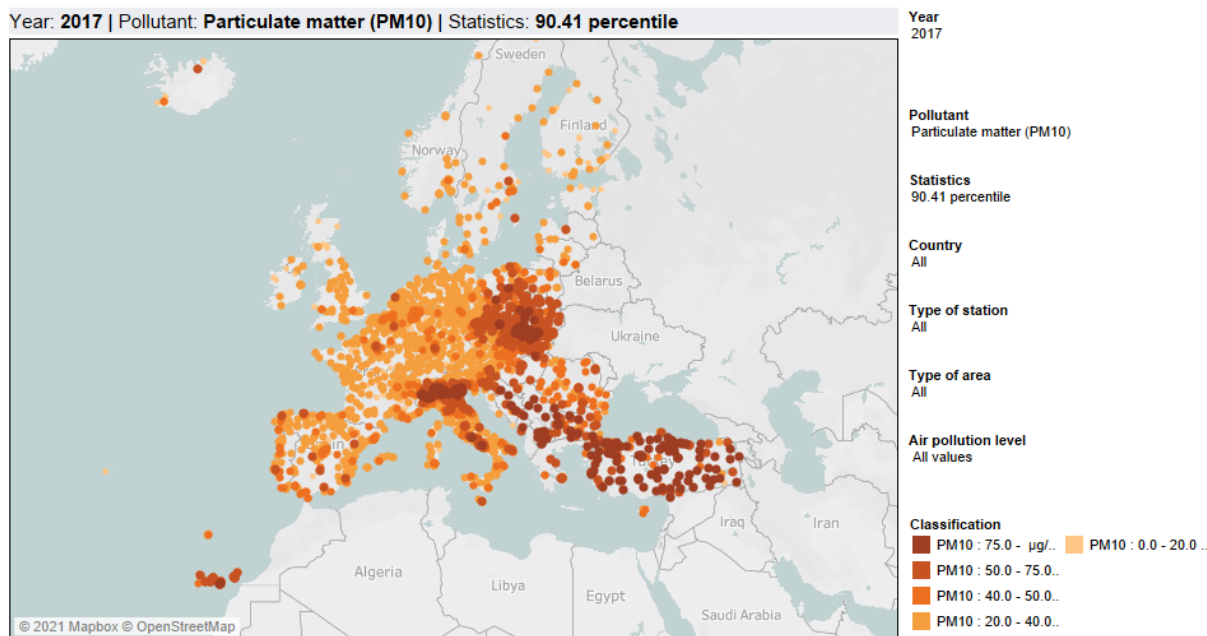
Level	Hygienic Rating	Recommendation	Exposure Limit	TVOC [ppb]
5 Unhealthy	Situation not acceptable	Use only if unavoidable / Intense ventilation necessary	hours	2200 – 5500
4 Poor	Major objections	Intensified ventilation / airing necessary Search for sources	< 1 month	660 – 2200
3 Moderate	Some objections	Intensified ventilation / airing recommended Search for sources	< 12 months	220 – 660
2 Good	No relevant objections	Ventilation / airing recommended	no limit	65 – 220
1 Excellent	No objections	Target value	no limit	0 – 65

Πίνακας 13 :Οδηγίες VOC που εκδόθηκαν από τη Γερμανική Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Περιβάλλοντος [97]

Ένα ακόμη εργαλείο ανάλυσης συγκεντρώσεων ρύπων, με χάρτες των περιοχών της Ευρώπης και αναλυτικότερες πληροφορίες με στατιστικά στοιχεία σχετικά με την ρύπανση του αέρα με στοιχεία, μπορούμε να βρούμε στην ιστοσελίδα Air Quality in Europe/statistics [98]



Air quality statistics



Graph - average for selected sampling points

Εικόνα 17 : Ρύποι στις περιοχές της Ευρώπης- [98]. Οι κύκλοι εμφανίζουν τα σημεία μετρήσεων με χρώμα αντίστοιχο των τιμών σύμφωνα με το υπόμνημα αριστερά στην εικόνα.

Συμπερασματικά - Βασικός στόχος η μείωση θανάτων από την ατμοσφαιρική ρύπανση

Γένται πολύ μεγάλη προσπάθεια να μειωθούν οι οργανικοί και μη ρύποι στην ατμόσφαιρα σε παγκόσμιο επίπεδο αλλά και σε εθνικό. Πλήθος μελετών και ερευνητικών πονημάτων καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι ρύποι υποβαθμίζουν την υγεία των πολιτών και καταφέρνουν καταστροφικά αποτελέσματα στην υγεία των πληθυσμών γενικά και ειδικά. Το αποτέλεσμα αυτό συνδιάζεται και με επιβάρυνση των οικονομιών παγκόσμια αλλά και σε εθνικό επίπεδο.

Η ρύπανση από οργανικές πτητικές ύλες VOC's, αιωρούμενα υλικά σωματίδια και άλλους ρύπους συνδέονται θετικά με την αύξηση των φλεγμονών του αναπνευστικού, την επιδείνωση καρδιακών παθήσεων αλλά και της μεταφοράς ιών όπως του Covid-19 που μένει να μελετηθούν ακόμη περισσότερο ως προς την συσχέτιση των τελευταίων παραγόντων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

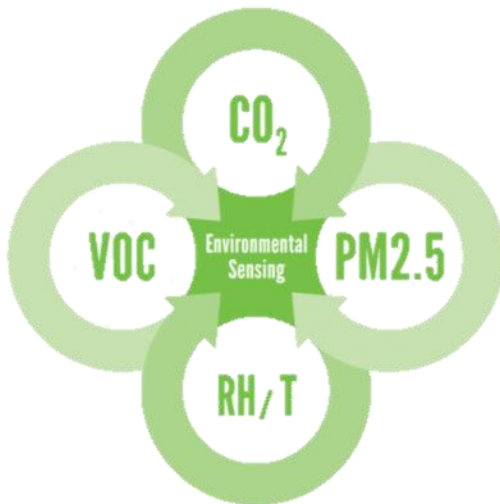
Παρακολούθηση και βελτίωση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων (IAQ) με Αισθητήρες

Το μικροπεριβάλλον όπου ζουν και εργάζονται οι άνθρωποι επηρεάζει την ποιότητα ζωής τους πολύπλευρα όπως διαπιστώνουμε σύμφωνα με τα προηγούμενα. Από την στιγμή λοιπόν που οι ρύποι επιβαρύνουν δυσμενώς αυτό το περιβάλλον, κρίνεται αναγκαία η μέτρηση των κατάλληλων παραμέτρων ποιότητας του αέρα με αντίστοιχους αισθητήρες προκειμένου να βελτιώνονται οι συνθήκες διαβίωσης και η κατάσταση της υγείας των ενοίκων.

Προκύπτει λοιπόν πλέον επιτακτικά η ανάγκη της συστηματικής παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα εκτός των εξωτερικών χώρων, που έχουμε εστιάσει εδώ και δεκαετίες, αλλά και των εσωτερικών χώρων. Έτσι καθίσταται εφικτή η παρέμβαση με έξυπνους τρόπους με εφικτό στόχο την βελτίωση της ποιότητας του αέρα δυναμικά και άμεσα.

Βελτίωση της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων με τεχνητά μέσα.

- Για να περιορίσουμε την επιβάρυνση του εισπνεόμενου αέρα σε επαγγελματικούς χώρους, σε σχολεία, σε οικίες κ.λπ., μπορούμε να παρέμβουμε απευθείας στην πηγή των ρύπων για να περιορίσουμε την παραγωγή τους. Οι οδηγίες των εθνικών ή κυβερνητικών φορέων, του ΠΟΥ ή της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, για τα επιτρεπτά όρια των ρύπων και τις πηγές αυτών βρίσκονται στην διάθεση του κοινού. Έτσι περιορίζοντας για παράδειγμα την χρήση χημικών παρασκευασμάτων που εκλύουν επιβαρυντικούς παράγοντες σε εσωτερικούς χώρους μπορούμε να βελτιώσουμε την ποιότητα του αέρα στους χώρους αυτούς



Εικόνα 18 : Συνολική αίσθηση ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων (Πηγή : Sensirion)

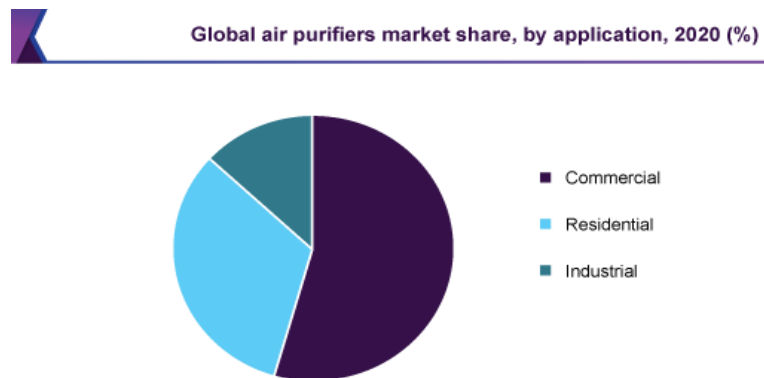
τη μείωση της έκθεσης ενοίκων σε VOC και υπερσυγκέντρωσης αερίου CO₂. Ο αερισμός μπορεί να γίνει είτε με φυσικό μηχανικό τρόπο, με σταθερά ανοιχτά παράθυρα και πόρτες είτε με ένα αυτόματο σύστημα εξαερισμού ελεγχόμενο από τις πραγματικές συνθήκες του χώρου με κατάλληλους αισθητήρες, και κατάλληλο σύστημα αυτομάτου ελέγχου με ενεργοποιητές για να ενεργοποιούν τον τεχνητό εξαερισμό.

- Ένας ακόμη αποτελεσματικός τρόπος βελτίωσης της ποιότητας του αέρα εσωτερικών χώρων είναι ο κλασικός αερισμός. Ο τακτικός αερισμός είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για

- Σε συνδυασμό των προηγούμενων μεθόδων ή και ανεξάρτητα η ποιότητα του αέρα μπορεί να βελτιωθεί αφαιρώντας τους ρύπους με τεχνητούς τρόπους όπως με συσκευές καθαρισμού εξοπλισμένες με κατάλληλα φίλτρα. Αυτός καταδεικνύεται ως ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη μείωση της συγκέντρωσης των VOC στον αέρα εσωτερικού χώρου αλλά και των ρύπων PM, ιδίως σε περιοχές όπου η ανανέωση του εσωτερικού αέρα με εξωτερικό είναι δύσκολος έως ανέφικτος.

Συσκευές ελέγχου και καθαρισμού ατμοσφαιρικού αέρα

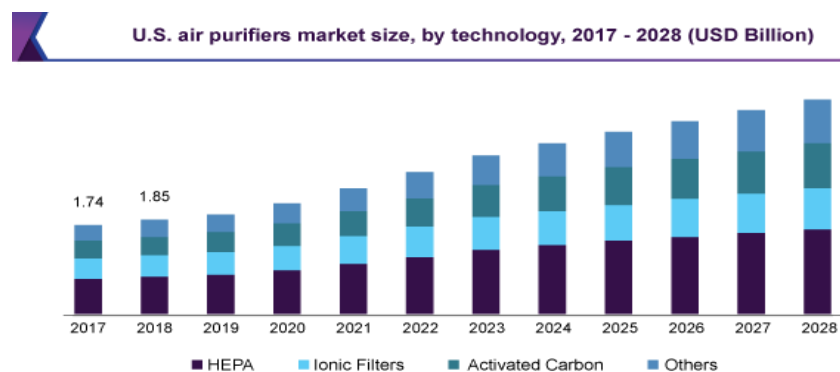
Σύμφωνα με την επίσημη ιστοσελίδα www.grandviewresearch.com [10] το παγκόσμιο μέγεθος της αγοράς καθαριστών αέρα εκτιμήθηκε σε 10,67 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2020 και αναμένεται να επεκταθεί με σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) 10,0% από το 2021 έως το 2028. Η αγορά αναμένεται να καθοδηγείται από την αύξηση των αερομεταφερόμενων ασθενειών και τα ολόένα αυξανόμενα επίπεδα ρύπανσης στις αστικές περιοχές.



Εικόνα 19 : Πηγή www.grandviewresearch.com

Το τμήμα εμπορικών εφαρμογών ηγήθηκε της αγοράς και αντιπροσώπευσε το 54,4% των παγκόσμιων εσόδων το 2020. Οι εμπορικές εφαρμογές καθαριστών αέρα περιλαμβάνουν νοσοκομεία, γραφεία, ξενοδοχεία, εκπαιδευτικά κέντρα, κινηματογράφους, εμπορικά κέντρα, συνεδριακά κέντρα και άλλες ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις. Οι καθαριστές αέρα με ενεργό άνθρακα και HEPA χρησιμοποιούνται σε ξενοδοχεία και εστιατόρια για την απομάκρυνση των αερομεταφερόμενων σωματιδίων, του καπνού και των οσμών, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα του αέρα στις εγκαταστάσεις.

Τα μηχανήματα καθαρισμού αέρα χρησιμοποιούνται σε οδοντιατρικά και ιατρικά εργαστήρια, κτηνιατρικά νοσοκομεία, τροχόσπιτα, εκτροφεία ζώων, κλινικές και νοσοκομεία για την απομάκρυνση αλλεργιογόνων, αερομεταφερόμενων παθογόνων και οσμών από τον αέρα και τη διατήρηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα για ασθενείς καθώς και για εργαζόμενους που εργάζονται σε αυτές τις εγκαταστάσεις. Η ικανότητα των καθαριστών αέρα να περιορίζουν την εξάπλωση μολυσματικών ασθενειών έχει οδηγήσει στην αύξηση της



Εικόνα 20 : Πηγή www.grandviewresearch.com

ζήτησής της κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19 σε διάφορες εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης παγκοσμίως.

Η αυξανόμενη υιοθέτηση του εξοπλισμού ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ειδικά σε αναπτυσσόμενες περιοχές σε ολόκληρο τον κόσμο, αναμένεται να αυξήσει την ζήτηση συστημάτων καθαρισμού αέρα εσωτερικών χώρων με κατάλληλα φίλτρα όπως:

- **Φίλτρα HEPA.** Το ακρωνύμιο HEPA σημαίνει υψηλής απόδοσης αερομεταφερόμενων σωματιδίων (High Efficiency Particulate Air). Επομένως ένα φίλτρο HEPA είναι ένα φίλτρο σωματιδίων υψηλής απόδοσης [99]. Αυτό που τα ξεχωρίζει είναι η αποτελεσματικότητά τους, αφού για να χαρακτηριστεί ένα φίλτρο πραγματικό HEPA πρέπει πρώτα να δοκιμαστεί και να πιστοποιηθεί σύμφωνα με αυστηρές προδιαγραφές. Το Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Επιστημών και Τεχνολογίας των ΗΠΑ, υπαγορεύει ότι ένα φίλτρο HEPA πρέπει να παγιδεύει το 99,97% των σωματιδίων μεγέθους 0,3 μm και μεγαλύτερα. Αυτό είναι απλώς το κατώφλι του μεγέθους που πρέπει να επιτευχθεί για να φέρει το όνομα HEPA ένα τέτοιο φίλτρο αφού πολλά φίλτρα HEPA μπορούν να παγιδεύσουν σωματίδια μικρότερα από 0,3 μικρά.

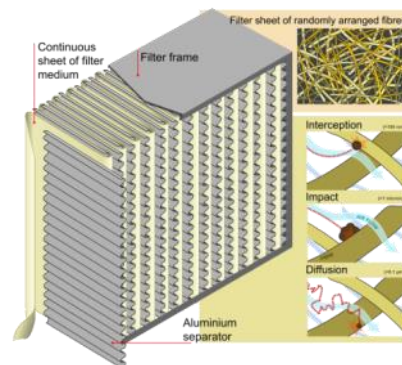
Τεχνικά τα φίλτρα HEPA αποτελούνται από ένα σύνθετο πλέγμα ινών που παγιδεύουν τους ρύπους που κυκλοφορούν στον αέρα.

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα GRV [100] τα φίλτρα **HEPA** καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς μέχρι σήμερα αφού το 39,9% των παγκόσμιων εσόδων από φίλτρα αέρα το 2020 είναι από αυτά. Τα φίλτρα HEPA είναι πολύ αποτελεσματικά στην παγίδευση αερομεταφερόμενων σωματιδίων, όπως γύρη, σκόνη, καπνό και βιο-μολυσματικούς παράγοντες. Η υψηλή ποιότητα και η αξιοπιστία των φίλτρων HEPA για την απομάκρυνση των αερομεταφερόμενων σωματιδίων είναι πιθανό να ωθήσουν τη διείσδυση των προϊόντων στην παγκόσμια αγορά.

- Τα **φίλτρα ενεργού άνθρακα** ή ενεργού ξυλάνθρακα αποτελούνται από μικρά κυβόσχημα τεμάχια άνθρακα ή σε σκόνη ή ακόμη και σε κοκκώδη μορφή, ειδικά επεξεργασμένα με οξυγόνο, ώστε να ανοίξουν οι πόροι των ατόμων άνθρακα. Αυτό βοηθά στην αύξηση της επιφάνειας του άνθρακα και την καθιστά πορώδη, αυξάνοντας έτσι την ικανότητά του να απορροφά αερομεταφερόμενα σωματίδια. Αυτά τα φίλτρα χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση αερίων και οσμών από το μαγείρεμα, τη μούχλα, τα χημικά, τα κατοικίδια ζώα και τον καπνό.

- Φίλτρα **ιονισμού** του αέρα με υψηλή αρνητική τάση, που δεν απαιτούν συχνή αντικατάσταση, αυξάνουν την διείσδυση τους στην αγορά με πρόβλεψη να επεκταθεί με ρυθμό CAGR 8,3% κατά την περίοδο πρόβλεψης. Τα ιοντικά φίλτρα ωστόσο, παράγουν ιονισμένο αέρα μαζί με όζον κατά τη διαδικασία καθαρισμού τα οποία προκαλούν αναπνευστικά προβλήματα, όπως το άσθμα, το οποίο, με τη σειρά του, αναμένεται να περιορίσει την εφαρμογή της τεχνολογίας.

- Άλλες τεχνολογίες καθαρισμού αέρα περιλαμβάνουν υπεριώδη ακτινοβολία UV, φωτοκαταλυτική οξείδωση, οζονισμό, μη θερμικό πλάσμα και ηλεκτροστατικούς ιζηματοποιητές. Με την τεχνολογία της φωτοκαταλυτικής οξείδωσης μετατρέπονται τα λεπτά σωματίδια, με μέγεθος έως και 0,1 μm αλλά και τοξικά αέρια, σε άλλες



Εικόνα 21: HEPA φίλτρα (Πηγή Wikipedia [124])

ασφαλέστερες ενώσεις. Αυτή η τεχνολογία καταστρέφει τις πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC), τα μικρόβια και τις χημικά δραστικές ενώσεις (Chemical Active Compounds -CAC).

2.2. Αισθητήρες-Συσκευές

Για την μέτρηση και την εκτίμηση της ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων απαιτείται η χρήση κατάλληλων αισθητήρων, χαμηλού κόστους, για τη μέτρηση κυρίως της συνολικής συγκέντρωσης πτητικών οργανικών ενώσεων (TVOC), της συγκέντρωσης του CO₂, του CO και της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων (PM) για διαφορετικά μεγέθη, όπως PM2.5 και PM1.0, ίσως και του NO, ή και του όζοντος (O₃).

Στην παγκόσμια αγορά διατίθενται ήδη συσκευές με αισθητήρες που εποπτεύουν την ποιότητα του αέρα κυρίως σε εξωτερικούς χώρους αλλά τελευταία και σε εσωτερικούς χώρους. Αυτές μέχρι στιγμής είτε απλά μετρούν και εμφανίζουν στην οθόνη τους τις τιμές των ρύπων, είτε κάποιες ενεργοποιούν κύκλους καθαρισμού του αέρα τοπικά με βάση συγκεκριμένες πρότυπες ή επιθυμητές τιμές. Υπάρχουν τέτοιες συσκευές που συνδέονται ακόμη και στο διαδίκτυο για να μεταφέρουν τις τιμές τους σε cloud χώρους στα πλαίσια των εφαρμογών IoT. Όμως αυτές, που όπως προειπώθηκε μετρούν κυρίως τον εξωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα, αξιοποιούν κλειστές εφαρμογές, ανεπτυγμένες από τις εταιρείες διάθεσης των προϊόντων αυτών, ενώ κατ' επέκταση χρησιμοποιούν κλειστές ασύρματες πλατφόρμες όπως της κινητής τηλεφωνίας, σε εφαρμογές και πλαίσια υποστήριξης συγκεκριμένων εταιρειών με το αντίστοιχο κόστος (βλέπε εικόνα 26).



Εικόνα 22 : Συσκευή μέτρησης IAQ, Πηγή Libellium, <https://libellium.com/>

Τέτοιου τύπου φορητές συσκευές θα μπορούσαν να πραγματώσουν ένα αισθητηριακό «νέφος», με την συμμετοχή πολλών ατόμων και συσκευών μαζικά σε ποικιλία χώρων όπως



Εικόνα 23 : Ασύρματος Πομπός Air Quality Vaisala AQT410 (Πηγή : <https://www.vaisala.com/en>)

το σπίτι, το αυτοκίνητο, τα δημόσια μέσα μεταφοράς, τους χώρους εργασίας, τους δημόσιους χώρους και τα κατάστημα κ.λπ. για να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς χώρους (IAQ) ενσωματώνοντας κατάλληλους αισθητήρες πολλαπλών παραμέτρων σε συνδυασμό με ανοικτές πλατφόρμες μετάδοσης, συλλογής και έλεγχο των δεδομένων τους με πολύ χαμηλό κόστος. Αν επιπλέον μία τέτοια διάταξη με

κάποιον τρόπο δηλώνει και τα δεδομένα γεωγραφικής θέσης των μετρήσεων, τότε το σύστημα μέτρησης και διαχείρισης των

δεδομένων γίνεται πολύ περισσότερο ευέλικτο και πιο αποτελεσματικό. Η προστιθέμενη αξία αυτών των δεδομένων μπορεί να αποφέρει πολλά οφέλη στους πολίτες, τις κυβερνήσεις και τον επιχειρηματικό τομέα για βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες δράσεις και προγραμματισμό.

Στην μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν πέντε αισθητήρες από διαφορετικές εταιρείες με ευρύ φάσμα μετρούμενων μεγεθών κατάλληλων για τον προσδιορισμό της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Ο Βασικός στόχος είναι να ερευνηθεί κατά πόσο αισθητήρες χαμηλού κόστους από την αγορά μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις αξιόπιστων συστημάτων IAQ με τις προδιαγραφές τους.

2.2.1. Πολυαισθητήρας αερίων, υγρασίας και θερμοκρασίας Sensirion SVM30

Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία Sensirion [101], ο αισθητήρας SVM30 αποτελείται από συνδυασμό πολλαπλών αισθητήρων όπως αερίων, υγρασίας και θερμοκρασίας. Περιλαμβάνει τον αισθητήρα αερίων SGP30 καθώς και έναν αισθητήρα υγρασίας και θερμοκρασίας SHTC1.



Output	<ul style="list-style-type: none"> • Total VOC in ppb • H₂-based CO₂eq in ppm • Relative humidity • Temperature
Supply voltage	4.5-5.5 V
Average current	49 mA
Package	PCB 39 x 15 x 6.5 mm ³
Interface	I ² C 5 V
Indoor Air Quality	
Typ accuracy	15% of measured value
Output range ¹	TVOC: 0 – 60'000 ppb CO ₂ eq: 0 – 60'000 ppm
Sampling rate	1s
Long-term stability	MOXSens® siloxane resistance: typ 1.3% accuracy drift per year in siloxane accelerated lifetime test
Baseline compensation	On-chip baseline compensation algorithm
Humidity compensation	Yes ²
Temperature	
Measurement range	-20 °C – 85 °C
Typ accuracy	± 1 °C
Humidity	
Measurement range	0% – 100% RH
Typ accuracy	± 5% RH

Πίνακας 14: Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα SVM30 από την Sensirion

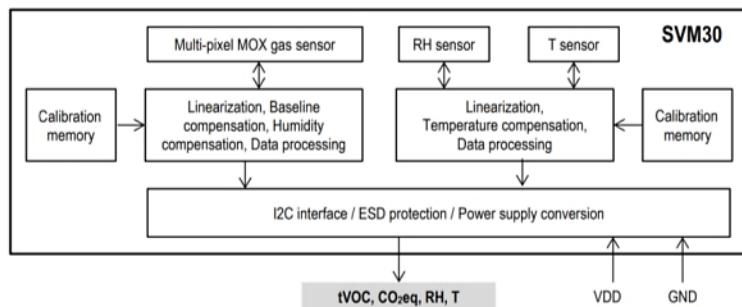
σχετικής υγρασίας (RH) και εύρος μέτρησης θερμοκρασίας από -20 °C έως 85 °C, με τυπική ακρίβεια ± 5% RH και ± 1 °C αντίστοιχα.

Τα υπόλοιπα κυκλώματα των αισθητήρων αερίων, σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας, έχουν σχεδιαστεί με την τεχνολογία CMOSens® της Sensirion. Αυτή η τεχνολογία προσφέρει ένα πλήρες σύστημα αισθητήρων σε ένα μόνο τσιπ Sensor on Chip – SoC), συμπεριλαμβανομένων των στοιχείων ανίχνευσης, της αναλογικής και ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, του μετατροπέα A/D, της βαθμονόμησης και της μνήμης δεδομένων και μιας διεπαφής ψηφιακής επικοινωνίας που υποστηρίζει την τυπική σειριακή επικοινωνία τύπου I²C.

Ο αισθητήρας αερίων SGP30 στο SVM30 συνδυάζει πολλαπλά στοιχεία ανίχνευσης μετάλλων-οξειδίων (MOx) πάνω σε ένα τσιπ, τα λεγόμενα εικονοστοιχεία ή αλλιώς pixels. Με την μέθοδο αυτή είναι εφικτή η μέτρηση ενός συνολικού σήματος VOC (total VOC ή tVOC) και ενός ισοδύναμου σήματος CO₂ (CO₂equivalent ή CO₂eq) με ένα μόνο τσιπ αισθητήρα. Το SVM30 προσφέρει επιπλέον βαθμονομημένα σήματα εξόδου ποιότητας αέρα καθώς και μέτρησης υγρασίας με αντισταθμισμένη διαφορική ευαισθησία. Το αισθητήριο στοιχείο διαθέτει απaráμιλλη στιβαρότητα έναντι της επίδρασης από σιλοξάνες που υπάρχουν σε πραγματικές εφαρμογές, επιτρέποντας μια μοναδική μακροπρόθεσμη σταθερότητα και περιορισμένη αλλοίωση των μετρούμενων τιμών.

Ο αισθητήρας υγρασίας και θερμοκρασίας στο SVM30 καλύπτει εύρος μέτρησης υγρασίας από 0 έως 100%

Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία Sensirion, η σύγχρονη διαδικασία παραγωγής με τις μεθόδους που έχει υιοθετήσει, περιλαμβάνει πλήρη βαθμονόμηση και δοκιμές λειτουργικότητας των αισθητήρων που κατασκευάζονται οπότε εξασφαλίζουν υψηλή αξιοπιστία των μετρήσεων σε βάθος χρόνου πλέον της δεκαετίας.



Εικόνα 25: Διάγραμμα Αισθητήρα SVM30

2.2.2. Αισθητήρας αιωρούμενων υλικών σωματιδίων - Particulate Matter Sensor (particles) για παρακολούθηση και έλεγχο ποιότητας αέρα- Indoor Air Quality (IAQ) **Sensirion SPS30** [



[102]. Πρόκειται για οπτικό αισθητήρα Particulate Matter (PM). Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία οι μετρήσεις γίνονται με λέιζερ. Κατασκευάζεται με τεχνικές τέτοιες ώστε να αντέχει μακροπρόθεσμα σε χημικές αλλοιώσεις από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Αυτή η τεχνολογία, μαζί με

Sensor Specifications	
Mass concentration precision ¹	±10 µg/m ³ @ 0 to 100 µg/m ³ ±10 % @ 100 to 1000 µg/m ³
Mass concentration range	1 to 1000 µg/m ³
Mass concentration resolution	1 µg/m ³
Particle detection size range ²	Mass concentration: PM1.0, PM2.5, PM4 and PM10 Number concentration: PM0.5, PM1.0, PM2.5, PM4 and PM10
Lower limit of detection	0.3 µm
Minimum sampling interval	1 sec (continuous mode)
Lifetime	> 10 years operating continuously 24h/day
Dimensions	40.6 × 40.6 × 12.2 mm ³
Operating temperature range	-10 to +60 °C
Storage temperature range	-40 to +70 °C

Πίνακας 15 : Τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα SPS30 από την Sensirion

υψηλής ποιότητας και αυξημένης αντοχής στον χρόνο εξαρτήματα, επιτρέπει ακριβείς μετρήσεις από την πρώτη στιγμή της λειτουργία του και καθ 'όλη τη διάρκεια ζωής του αισθητήρα με προσδόκιμο λειτουργία πάνω από δέκα χρόνια. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι υπολογισμού και διαπίστευσης στον ίδιο τον αισθητήρα, οι οποίοι σύμφωνα με την Sensirion παρέχουν μεγάλη ακρίβεια ανίχνευσης διαφορετικών τύπων και μεγεθών PM με υψηλή ανάλυση μετρήσεων, ανοίγοντας νέες δυνατότητες για την ανίχνευση διαφόρων ειδών σωματιδίων στο περιβάλλον, σκόνης και άλλων. Η διάταξη είναι μικρή σε μέγεθος οπότε προσφέρεται για ποικίλες εφαρμογές όπως φορητές, επίτοιχες και ολοκληρωμένες συσκευές ανίχνευσης ποιότητας αέρα.

2.2.3. Air Quality αισθητήρας Omron B5W-LD 0101-1 [103]

Πρόκειται για έναν συμπαγή αισθητήρα ποιότητας αέρα που ανιχνεύει αιωρούμενα σωματίδια με διάμετρο από 0,5 µm. Είναι οπτικός ανιχνευτής και χρησιμοποιεί για πηγή φωτισμού ένα LED.



Διαθέτει μια μοναδική δομή διαδρομής ροής αέρα που εξασφαλίζει αποτελεσματικά την απαιτούμενη ροή του για τις μετρήσεις. Είναι σχετικά μικρός σε μέγεθος.

Παρέχει δύο εξόδους με παλμούς που αντιστοιχούν τάσεις που μπορούμε να δούμε στον πίνακα 16.

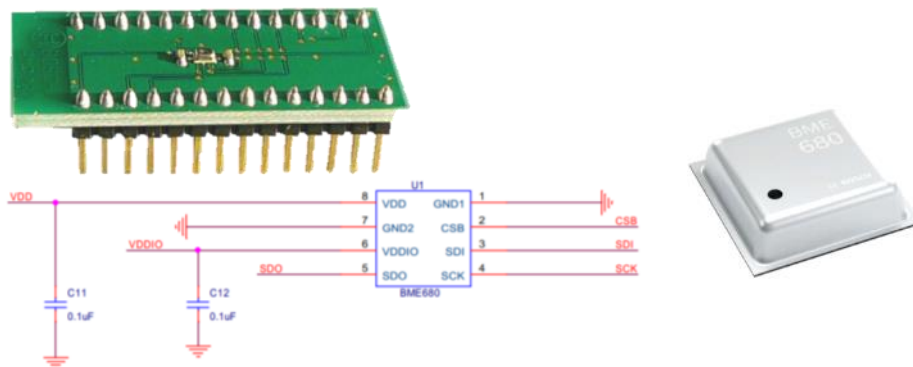
Έξοδος	Ελάχιστο μέγεθος ανιχνεύσιμων σωματιδίων
V (OUT1):	για μεγέθη περίπου 0.5 μm ή μεγαλύτερα και
V (OUT2):	για μεγέθη περίπου 2.5 μm ή μεγαλύτερα.
Συνθήκες μοντέλου ελέγχου σκόνης: TSI DUSTTRAK II MODEL8530 Impactor: 1.0 μm συγκέντρωση σκόνης = 100 μg/m ³ Χρόνος μέτρησης: 20 sec Τάση κατωφλίου: V _{th} =0.5 V Ανιχνεύσιμα αντικείμενα: 0.5 μm Πολυστηρενίου και latex σωματίδια	

Πίνακας 17 : Έξοδοι μετρήσεων αισθητήρα Omron B5W-LD 0101-1

2.2.4. Air Quality Αισθητήρας Bosch BME680 μετρά την συγκέντρωση του CO₂, των VOC, τη σχετική υγρασία, τη βαρομετρική πίεση και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος [104]. Μία κατασκευή τύπου Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) που σημαίνει μικρό μέγεθος και χαμηλή κατανάλωσης.

Εμφανίζει απευθείας την κατηγοριοποιημένη ένδειξη ποιότητας αέρα σε κλίμακα από 1 έως 5, όπως ορίζει και η κατάταξη της Γερμανικής Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος [97].

Το μέγεθός του είναι πολύ περιορισμένο ακριβώς επειδή είναι κατασκευή MEMS



Εικόνα 27: Αισθητήρας BME680 (Πηγή : Bosch)

2.2.5. Ποιοτική αξιολόγηση των αισθητήρων σύμφωνα με τις προδιαγραφές και τα πρότυπα

Ρυθμός ανανέωσης μετρήσεων

Οι ρυθμοί ανανέωσης των μετρήσεων όπως βλέπουμε από τον πίνακα 18, των χαρακτηριστικών των αισθητήρων, είναι πολύ μεγάλοι αφού κατέρχονται σε χρόνους μέχρι και τα 10 sec, με ευστάθεια και ακρίβεια, αφού βέβαια παρέλθει ένα αρχικό διάστημα σταθεροποίησης που δεν είναι μεγαλύτερο των 2 λεπτών.

Οι ρυθμοί αυτοί ανανέωσης ορίζονται σε κύκλους μέτρησης και ανάπαυλας για να δώσουν χρόνο στα κυκλώματα να επεξεργαστούν τις μετρήσεις και να απομονώσουν απότομες διακυμάνσεις των μετρούμενων τιμών. Αυτό προφανώς επιπλέον συμβάλει στο να καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια. Οι ρυθμοί ανανέωσης αναπροσαρμόζονται ανάλογα με τις εξελίξεις στην κατασκευή των αισθητήρων και των τεχνικών που αναπτύσσουν οι κατασκευάστριες εταιρείες.

Στην πράξη ωστόσο δεν επιλέγουμε τόσο μεγάλους ρυθμούς μετρήσεων και αποστολής των δεδομένων στις διατάξεις ελέγχου. Όπως προκύπτει και από την μελέτη της Αμερικανικής Ένωσης Περιβάλλοντος EPA του 2014 σε σύμπραξη με την Ευρωπαϊκή ένωση, που κυκλοφορεί σε έντυπη έκδοση με τίτλο Evaluation of Field-deployed Low Cost PM Sensors (eurora.eu) [105] προτείνονται χρόνοι ανανέωσης των μετρήσεων των 5 λεπτών και άνω. Αυτό προκύπτει από την ενδελεχή έρευνα απόδοσης πλήθους αισθητήρων PM και διατάξεων που τους συνοδεύουν στην πράξη.

Ο χρόνος απόκρισης των 5 λεπτών είναι αρκετός για να έχει ουσιαστικό νόημα η κάθε μέτρηση για τους χειριστές και ενοίκους, απορρίπτοντας τον θόρυβο των διατάξεων και των συστημάτων ελέγχου των δεδομένων που προκύπτουν από τις διατάξεις που συνοδεύουν τους αισθητήρες.

Χαρακτηριστικά Αισθητήρων που κρίνονται σημαντικά για ρεαλιστικές υλοποιήσεις διατάξεων IAQ.

Η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα είναι πιθανότατα το σημαντικότερο μέρος μιας αξιόπιστης, ακριβούς και υλοποιήσιμης εφαρμογής IAQ προσαρμοσμένη βέβαια στους στόχους κάθε υλοποίησης. Ο βασικότερος στόχος που ερευνάται στην παρούσα μελέτη, είναι το κατά πόσο υπάρχουν **αξιόπιστοι και ακριβείς αισθητήρες χαμηλού κόστους**, που διατίθενται **ευρύτατα στο εμπόριο** χωρίς δεσμεύσεις από κλειστά περιβάλλοντα υποστήριξης ή διάθεσης και που παρέχουν ακριβείς μετρήσεις. Στο γεγονός αυτό αποδίδεται τα τελευταία χρόνια η διεύρυνση και ο εμπλουτισμός ολοένα και περισσότερο της αγοράς αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους για τη μέτρηση **αρκετών ρύπων**, άλλοι για εσωτερική χρήση άλλοι για εξωτερική ή και για τα δύο. Τέτοιοι μπορούν να αγοραστούν ακόμη και στο διαδίκτυο, ενώ το κόστος τείνει να μειώνεται ραγδαία. Όταν επιλέγεται ένας αισθητήρας για αγορά, πρέπει να έχουμε κατά νου ότι δεν είναι εξίσου αξιόπιστοι όλοι οι αισθητήρες. Η **ακρίβεια** στις περιοχές μετρήσεων, το **εύρος** των περιοχών αυτών αλλά και **γήρανση** είτε οι **αποκλίσεις** των μετρήσεων από επιδράσεις **περιβαλλοντικών παραγόντων** απαιτούν σπουδή.

Επίσης, ορισμένοι αισθητήρες που μετρούν πολλούς ρύπους είναι αξιόπιστοι για ορισμένους ρύπους αλλά όχι για άλλους. Το μέγεθος και η ευκολία υλοποίησης επίσης είναι παράγοντες που επηρεάζουν την τελική απόφαση επιλογής ενός αισθητήρα.

Οι αισθητήρες στερεάς κατάστασης που αναπτύχθηκαν πρόσφατα δίνουν μετρούμενες τιμές σε σχεδόν πραγματικό χρόνο επί τόπου, οπότε δεν χρειάζεται να μεταφερθούν σε κατάλληλα εξοπλισμένο εργαστήριο. Τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο μπορούν να παρέχουν χρήσιμα στατιστικά δεδομένα μετά από επεξεργασία για την αυτόματη παρακολούθηση δεδομένων.

Όλα τα παραπάνω επηρεάζουν σημαντικά την επιλογή και την υλοποίηση μιας ευέλικτης και αξιόπιστης χαμηλού κόστους συνάμα διάταξης μέτρησης και ελέγχου της ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων (IAQ). Τα σημαντικότερα, από τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων

που δοκιμάστηκαν, σύμφωνα με τους στόχους της μελέτης, εμφανίζονται συνοπτικά στους παρακάτω πίνακες 18 A και 18 B.

Πίνακας 18 A : Συγκεντρωτικός πίνακας κυριότερων χαρακτηριστικών των αισθητήρων που μελετήθηκαν

	Τύπος	Μετρούμενα μεγέθη	Εύρος	Resolution	Accuracy Consistency	Ακρίβεια	Ολίσθηση
1	Sensirion SVM30 Multi-gas Ethanol and H₂, TVCO-CO₂, Ethanol, H₂, humidity and temperature sensor combo module / Sensirion: https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/multi-gas-humidity-and-temperature-module-svm30						
2	multiple metal-oxide sensing elements – the pixels – on one chip	Gas sensing Ethanol, H ₂ , Ethanol Signal H ₂ signal	0 to 1000 ppm For indoor specified range 0.3 to 30 ppm 0.5 to 3 ppm	0.2 % of measured. value	Ethanol - typ.: 15% of meas. value H ₂ - typ.: 10% of meas. value		³ typ.: 1.3% of meas. value
3		Air Quality TVOC signal	0 ppb to 60.000 ppb	0-2008 ppb 1 ppb 2008– 11110 ppb 6 ppb 11110–60.000 ppb 32 ppb			
4		Air Quality CO ₂ eq signal	400 ppm to 60.000 ppm	400– 1479 ppm 1 ppm 1479– 5144 ppm 3 ppm 5144– 17597 ppm 9 ppm 17597– 60000 ppm 31 ppm			
5		humidity meas. range	0 to 100 %RH	Recommended in range 25...75%	±5 %RH		<0.25 %RH/year
6		Temp. meas. range	-20 to 85 °C	Recommended in range 5 ... 55 °C	±1°C		<0.02 °C/Year
7		Renesas ZMOD4410: Gas Sensor Module for TVOC and Indoor Air Quality eCO₂ / Renesas: https://www.renesas.com/us/en/products/sensor-products/gas-sensors/zmod4410-indoor-air-quality-sensor-platform .					
8	Resistor heat - Low rate Minimum 3 sec	TVOC	0 ppm - 1.000.000 ppb For IAQ 160ppm – 1.000ppm	For IAQ 160ppm – 1.000ppm	+ - 25%	± 25% no external calibration ± 15% with external calibration	Durability to Siloxanes Change in sensitivity ± 5%
9		eCO ₂	400ppm – 5000ppm		+ - 25%		
10		Smell / odours	- Sulfur based or organic based-acceptable				

11	BOSCH BME680 -(Shuttle PCB) Gas sensor measuring relative humidity, barometric pressure, ambient temperature and gas (VOC). / Bosch : https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680							
12	direct output of IAQ: Index for Air Quality	Gas (VOC)				Response time (τ 33-63%) Sensor-to-sensor deviation	< 1 s (for new sensors) +/- 15% +/- 15	±4%
13	IAQ index Απευθείας ένδειξη δείκτη IAQ 1-5	Pressure	300...1100 hPa			RMS Noise Sensitivity Error Temp coefficient offset	0.12 Pa (equiv. to 1.7 cm) ± 0.25 % (equiv. to 1m at 400 m height change) ±1.3 Pa/K (equiv. to ±10.9 cm at 1°C temp. change)	
14		Humidity Temperature:	0...100% -40...85°C			± 3 % relative humidity	≤ 1.5 % relative humidity hysteresis	
15	Sensirion SPS30 : Particulate Matter Sensor / Sensirion : https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/particulate-matter-sensors-pm25							
16	Optical Laser light Source	Mass concentration range	1 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM1.0 PM2.5 PM4 PM10	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 0.3 to 1.0 μm 0.3 to 2.5 μm 0.3 to 4.0 μm 0.3 to 10.0 μm		precision ¹ PM1, PM2.5 = ±10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ @ 0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM4, PM10=0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ = ±25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 100-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ±25 % m.v.	0 to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ = ±1.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ / year 100 to 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ = ±1.25 % m.v. / year	
17		Particle detection size range ² Number # concentration	0- 3.000#/cm ³ PM0.5, PM1.0, PM2.5, PM4 PM10	0.3 to 0.5 μm 0.3 to 1.0 μm 0.3 to 2.5 μm 0.3 to 4.0 μm 0.3 to 10.0 μm		0 to 1000 #/cm ³ = ±100 #/cm ³ 1000 to 3000 #/cm ³ = ±10 % m.v	0-1000 #/cm ³ ±12.5 #/cm ³ /year 1000-3000 #/cm ³ ±1.25 % m.v. / year	
18	Omron B5W-LD0101-1/2: Air Quality Sensor / Dust/particulate (Dust monitor Model: TSI DUSTTRAK II MODEL8530) / Omron: http://components.omron.eu/Product-details/B5W-LD0101-1_2							
19	LED light source Light Scattering sensing method	Particle detection size range ² Number # concentration	Vout1 = 0.5 μm -2.5 μm Vout2 = 2.5 μm -	Χωρίς Δεδομένα		Χωρίς Δεδομένα		

¹ Specified for PM2.5 at 25 °C using potassium chloride salt particles and the TSI DustTrek™ DRX Aerosol Monitor 8533 as a reference (Source Omron). Measurement environment Dust monitor Model: TSI DUSTTRAK II MODEL8530 Impactor: 1.0 μm , Calibration factor=1 Air Quality Sensor Threshold voltage: 0.5 V Measurement time: 20 sec Detection object: Smoke of incense Conditions: Ta=25°C, Vcc=5 V, 0 Lx

² PMx πρόκειται για σωματίδια μεγέθους "x" μικρομέτρων (π.χ. PM2.5 = μικρότερα από 2.5 μm).

Ο όρος long-term drift δηλώνει ολίσθηση ή αλλαγή ακρίβειας ανά έτος λειτουργίας.

Πίνακας 18 Β : Συνέχεια του συγκεντρωτικού πίνακα με τα κυριότερα χαρακτηριστικά των αισθητήρων που μελετήθηκαν

	Χαρακτηριστικά Πλεονεκτήματα Μειονεκτήματα	Σύνδεση	Τάση τροφοδοσίας	Καταναλι-σκόμενη ισχύς	Ρυθμός δειγματοληψίας
1	Sensirion SVM30 Multi-gas Ethanol and H₂, TVCO-CO₂, Ethanol, H₂, humidity and temperature sensor combo module Sensirion: https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/multi-gas-humidity-and-temperature-module-svm30/				
2	calibrated air quality output signals, dynamic baseline compensation algorithm - Set and Get Baseline -and on-chip calibration parameters to provide two complementary air quality signals → αυτόνομο	I ² C	5 Volt	245 mw / 49mA	80 msec 14Hz 400 Hz max
3	a CO ₂ equivalent signal (CO ₂ eq) with one single sensor-chip				
4	The sensing element features unmatched robustness against contamination by siloxanes present in real-world applications enabling long-term stability and low drift.				1sec - 1Hz
7	Renesas ZMOD4410: Gas Sensor Module for TVOC and Indoor Air Quality eCO₂ / Renesas: https://www.renesas.com/us/en/products/sensor-products/gas-sensors/zmod4410-indoor-air-quality-sensor-platform				
8	A.I. (Artificial Intelligence) for estimation of TVOC's Stores module configuration and calibration data. Adapts to its environment (with algorithms) in 60min. Alarms. Odours acceptable or not. Estimated levels of TVOC, CO ₂ , CO	I ² C	1.8V - 3.6V	23mW / 16mA max I sleep =450nA	Minimum 3 sec 10sec typical
11	BOSCH BME680 -(Shuttle PCB) Gas sensor measuring relative humidity, barometric pressure, ambient temperature and gas (VOC). / Bosch : https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680				
13		ISP UART	5 V	Sleep mode 3.7μA at 1 Hz humidity, pressure and temperature. 0.09–12 mA for p/h/T/gas	
14					
15	Sensirion SPS30 : Particulate Matter Sensor Sensirion : https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/particulate-matter-sensors-pm25/				
16		I ² C only Mass / UART all	4.5 - 5.5 V	275mW/ 55 mA 1.65mW/330μA idle 0,19mW/ 38μA sleep	1sec - 1Hz sample
18	Omron B5W-LD0101-1/2 : Air Quality Sensor / Dust / particulate (Dust monitor Model: TSI DUSTTRAK II MODEL8530) Omron : http://components.omron.eu/Product-details/B5W-LD0101-1_2				
19	Μειονεκτήματα: Εξωτερική βαθμονόμηση (Calibration) με τάση στο pin 4. Απαιτείται βαθμονόμηση. Ευαίσθητο στην κυμάτωση της τροφοδοσίας Vripple <30mV. Περιορισμένο εύρος.	Pulsed output	5 Volt Vripple <30mV	450mW / 90 mA	10 sec min 20 sec optimum

³ Συνθήκες μετρήσεων: λειτουργία με 250 rpm Decamethylcyclopentasiloxane (D5) για 200 ώρες προσομοιώνοντας 10 έτη λειτουργίας σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου

2.2.6. Γενικές παρατηρήσεις για την χρήση των αισθητήρων που μελετήθηκαν.

Αν μελετήσουμε τους συγκριτικούς πίνακες 18^A και 18B με τις τεχνικές προδιαγραφές κάθε αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη και αξιολογήθηκε σύμφωνα με τους στόχους της μελέτης αυτής, μπορούμε γενικά να επισημάνουμε τα ακόλουθα σημεία:

A. Αισθητήρες για αέρια TVOX-CO₂

a. Sensirion SVM30

Συνδέεται με το ευρέως διαδεδομένο πρωτόκολλο I²C .

Μετρά επιπλέον θερμοκρασία και υγρασία όπως επίσης και CO₂ με μεγάλη ταχύτητα με ολοκληρωμένο αποκλειστικά για τις μετρήσεις αυτές.

Έχει μεγάλο εύρος μετρήσεων και είναι ακριβές στις μετρήσεις του.

Αποθηκεύονται σε μνήμη οι τιμές calibration και baseline που ανακαλούνται κατά το δοκούν μέσα από το bus.

b. Renesas ZMOD4410

Εύκολη σύνδεση με το ευρέως διαδεδομένο πρωτόκολλο I²C.

Είναι πιο 'έξυπνο' μιας και χρησιμοποιεί αλγορίθμους AI για αντιστάθμιση και προσαρμόζεται αυτόματα στις συνθήκες του περιβάλλοντος του, καθώς σε διάστημα μιας ώρας αυτορυθμίζεται στις πρότυπες τιμές (calibration) αναφορικά με τιμές του εξωτερικού χώρου.

Αισθάνεται και διαχωρίζει επικίνδυνες ή ακίνδυνες οσμές όπως όξινες με θείο ή απλές οργανικές αντίστοιχα.

Βγάζει Alarm υπό συνθήκες οσμών.

Δεν χρειάζεται συγκεκριμένη βεβαιωμένη ροή αέρα οπότε καταναλώνει λιγότερη ενέργεια και παραμένει καθαρό από ρύπους που διαφορετικά συσσωρεύονται.

Τοποθετείται εύκολα.

Καταναλώνει μικρά ποσά ενέργειας, απαιτεί μικρή τάση τροφοδοσίας οπότε μπορεί να τροφοδοτηθεί και με μπαταρία, ενώ παράλληλα έχει μικρό μέγεθος, χαρακτηριστικά που το καθιστούν κατάλληλο για φορητές συσκευές.

Αντέχει στην επίδραση σιλοξάνης σε πολύ σκονισμένα και υγρά περιβάλλοντα που σημαίνει μακροχρόνια αξιοπιστία.

Ο ρυθμός των μετρήσεων είναι λίγο πιο αργός αλλά σε λογικά πλαίσια.

c. Bosch BME680

Μετρά επιπλέον θερμοκρασία, υγρασία και ατμοσφαιρική πίεση.

Μεγάλη ακρίβεια και σταθερότητα στον χρόνο.

Απευθείας ένδειξη IAQ σε κλίμακα 1 έως 5 σύμφωνα με τα πρότυπα το ΠΟΥ.

Δεν χρειάζεται βεβιασμένη ροή αέρα οπότε καταναλώνει λιγότερη ενέργεια και παραμένει καθαρό από ρύπους που διαφορετικά συσσωρεύονται.

Καταναλώνει πολύ λιγότερο από όλους τους αισθητήρες, απαιτεί μικρή τάση τροφοδοσίας οπότε μπορεί να τροφοδοτηθεί με μπαταρία, έχει πολύ μικρότερο μέγεθος ως εξάρτημα.

B. Αισθητήρες αιωρούμενων σωματιδίων PM - Particulate Mater

a. Sensirion SPS30

Σύνδεση UART αλλά και I²C ωστόσο με περιορισμένο εύρος μετρήσεων
Μετρά συγκέντρωση μάζας ($\mu\text{gr}/\text{m}^3$) και αριθμό ($\# / \text{cm}^3$) αιωρούμενων σωματιδίων.

Μεγάλο εύρος ανίχνευσης μεγεθών PM1 έως PM10 από 0,3 μm , σε μεγάλο εύρος συγκέντρωσης (0,3 έως και 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) με καλή ακρίβεια και σχετικά μικρό drift ανά έτος.

Μειονέκτημα αποτελεί η ανάγκη για βεβιασμένη κίνηση αέρα με εσωτερικό ανεμιστήρα που καταναλώνει ενέργεια. Κατά συνέπεια απαιτείται mode για καθάρισμα μία φορά την εβδομάδα. Η εταιρεία όμως εγγυάται αξιόπιστη λειτουργία τα 10 έτη, με ολίσθηση στην ακρίβεια των μετρήσεων 1,25% ανά έτος.

b. Omron το B5W-LD0101-1/2

Βγάζει παλμούς όταν ανιχνεύει σωματίδια.

Για την αξιοπιστία την ακρίβεια και το εύρος των ανιχνεύσιμων μεγεθών, το datasheet αναφέρει ελλιπή στοιχεία. Συμπεράσματα για την επακρίβεια μπορούμε να βγάλουμε μόνο από ένα ενδεικτικό διάγραμμα μετρήσεων. Δεν έχουμε συγκεκριμένη αναφορά στο εύρος των μετρήσεων απλά ενδεικτικά αναφέρεται στα μεγέθη από 0,5 μm και μεγαλύτερα των 2,5 μm που προφανώς αναφέρεται στα βασικά σωματίδια PM0.5 – PM2.5.

Καταχωρούνται ενδεικτικές μετρήσεις καπνού και σκόνης.

Απαιτεί βαθμονόμηση με εξωτερική τάση για αντιστοίχιση σε συγκεκριμένη κλίμακα που το καθιστά ευέλικτο σε διαφορετικές συνθήκες μετρήσεων αλλά απαιτεί τακτική διακρίβωση. Είναι ευαίσθητο στην κυμάτωση της τροφοδοσίας σαν αναλογικό κύκλωμα. Έχει σχετικά μεγάλο μέγεθος και κατανάλωση.

Συγκρίνοντας το κόστος των αισθητήριων.

Όπως προκύπτει και από τον πίνακα 20, οι αισθητήρες που αξιολογήθηκαν στην παρούσα μελέτη, ανήκουν στην κατηγορία του χαμηλού κόστους. Συμπεριλαμβάνονται οι διευθύνσεις των ιστοσελίδων που μπορούμε να ανατρέξουμε για όλες τις πληροφορίες που συνοδεύουν τους αισθητήρες από τους κατασκευαστές, όπως και οι αντίστοιχες ιστοσελίδες του εξουσιοδοτημένου παγκόσμια διανομέα ημιαγωγών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων Mouser Electronics που διαθέτει αυτούς προς πώληση. Τέλος στην τελευταία στήλη του πίνακα παρατίθενται οι τιμές των αισθητήρων σε Ευρώ με τις οποίες πωλούνται από τον διανομέα Mouser.

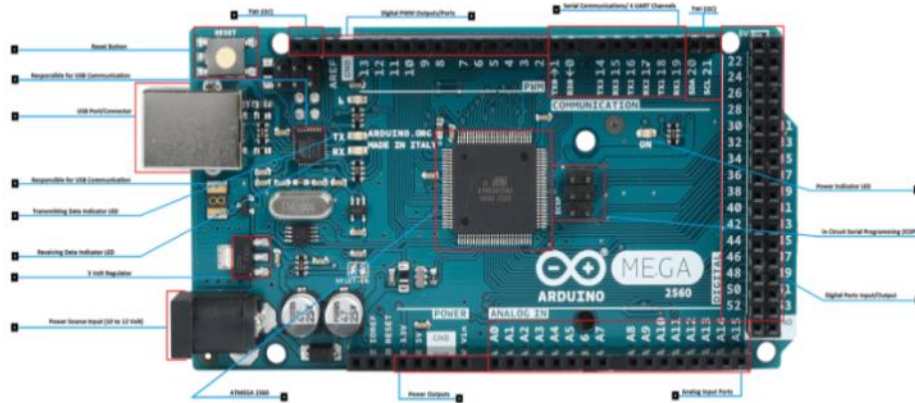
Για περισσότερες πληροφορίες περί των αισθητήρων μπορούμε να ανατρέξουμε στο παράρτημα 4.

Αισθητήρας	Κόστος Ευρώ ανά τεμάχιο
<p>Sensirion SVM30 Multi-gas Ethanol and H₂, TVCO-CO₂, Ethanol, H₂, humidity and temperature sensor combo module Sensirion : https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/multi-gas-humidity-and-temperature-module-svm30/ Mouser : https://gr.mouser.com/ProductDetail/Sensirion/SVM30-J?q=2WXlatMagcE0Sev2WN3Kpw%3D%3D</p>	18.30
<p>Renesas ZMOD4410 : Gas Sensor Module for TVOC and Indoor Air Quality eCO₂ Renesas : https://www.renesas.com/us/en/products/sensor-products/gas-sensors/zmod4410-indoor-air-quality-sensor-platform Mouser : https://gr.mouser.com/ProductDetail/Renesas-IDT/ZMOD4410AI1V?q=%2Fha2pyFadui995aZD0iMr5uthgNKi45pK1VTBB5KbQn7L%252BNTnQpm1w%3D%3D&utm_source=octopart&utm_medium=aggregator&utm_campaign=964-ZMOD4410AI1V&utm_content=Renesas%20Electronics</p>	6,10
<p>BOSCH BME680 - (Shuttle PCB) Gas sensor measuring relative humidity, barometric pressure, ambient temperature and gas (VOC). Bosch : https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680 Mouser : https://gr.mouser.com/ProductDetail/Bosch-Sensortec/BME680-Shuttle-Board?q=HXFqYaX1Q2yR0Gx1P%252BQ4%2FQ%3D%3D</p>	22.02 για Shuttle PCB
<p>Sensirion SPS30 : Particulate Matter Sensor Sensirion : https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/particulate-matter-sensors-pm25/ Mouser : https://gr.mouser.com/ProductDetail/Sensirion/SPS30?q=lc2O%252BfHJPVbEPYORBeZmPA%3D%3D</p>	36.46
<p>Omron B5W-LD0101-1/2 : Air Quality Sensor / Dust / particulate (Dust monitor Model: TSI DUSTTRAK II MODEL8530) Omron : http://components.omron.eu/Product-details/B5W-LD0101-1_2 Mouser : https://gr.mouser.com/ProductDetail/Omron-Electronics/B5W-LD0101-1?q=W0yvOO0ixfFUEOF7HcTlWA%3D%3D</p>	12,57

Πίνακας 19: Ηλεκτρονικές Διευθύνσεις Εταιρειών και του διανομέα Mouser με το Κόστος Αισθητήρων.

2.3 Μετρήσεις των αισθητήρων με σύνδεση σε Arduino MEGA

Με σκοπό να διακριβωθούν οι μετρήσεις ποικιλίας αισθητήρων που εμφανίζονται στον συνοπτικό πίνακα 20 αξιοποιήθηκε η προγραμματιζόμενη πλατφόρμα του Arduino. Η διακρίβωση των αισθητήρων θα γινόταν σε ελεγχόμενες συνθήκες με κατάλληλο εξοπλισμό



Εικόνα 28: Arduino MEGA pinout (CircuitsToday.com)

σε κατάλληλο εργαστήριο ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο αξιόπιστες και ακριβείς είναι οι μετρήσεις των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Λόγω ειδικών συνθηκών

μετατίθεται στο μέλλον η απάντηση στο ερώτημα κατά πόσο μπορούμε να βασιστούμε στις προδιαγραφές των κατασκευαστών για υλοποιήσεις IAQ σε πραγματικές συνθήκες με αισθητήρες της παρούσας εργασίας.

Ωστόσο οι αισθητήρες συνδέθηκαν είτε με I²C bus ή UART, για να αξιοποιηθούν οι μετρήσεις τους ποιοτικά και να αξιολογηθούν σε πρώτο επίπεδο κατά πόσο μπορούν να αξιοποιηθούν στην πράξη. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που παραθέτουν οι κατασκευαστές τους και για το βέλτιστο αποτέλεσμα, συνδέθηκαν απευθείας στις αντίστοιχες σειριακές θύρες μιας πλατφόρμας Arduino MEGA και κατεγράφησαν οι μετρήσεις τους στην σειριακή απεικόνιση του περιβάλλοντος προγραμματισμού και διαχείρισης του Arduino.

Περισσότερες πληροφορίες για την πλατφόρμα του Arduino μπορούμε να αναζητήσουμε στο **Παράρτημα 2**

Συνδέσεις με τους αισθητήρες και η καταγραφή των μετρήσεών τους.

2.3.1 Πολυαισθητήρας SVM30 της Sensirion

Συνδέθηκε με το ψηφιακό bus I²C. Με το πρόγραμμα με τίτλο example2_svm30_humidity_updateNikos (Παράρτημα 5.3.1) (Βασισμένο στο παράδειγμα του αποθετηρίου στην ιστοσελίδα <https://github.com/paulvha/svm30>) εμφάνισε τις μετρήσεις του παρακάτω πίνακα:

CO2 equivalent: 400,	TVOC: 0,
H2_signal: 10488,	Ethanol signal: 14526,
Humidity: 52.80,	Temperature: 25.14,
Absolute humidity: 12.26	CO2 equivalent baseline: 0x0, TVOC baseline : 0x0

2.3.2 Πολυαισθητήρας SPS30 της Sensirion

Συνδέθηκε με το ψηφιακό bus I²C αλλά και με σύνδεση UART ανάλογα με την θέση του Pin 4 του αισθητήρα (περισσότερα στο Παράρτημα 4).

Μετρήσεις με σύνδεση I²C bus συνδέοντας το Pin 4 στο ground:

Εκτελώντας τον κώδικα με τίτλο **Example12_sps30_BasicReadings_any_serial_B** (Παράρτημα 5.3.2) (Βασισμένο στο παράδειγμα του αποθετηρίου Github στην ιστοσελίδα <https://github.com/Sensirion/arduino-sps>) καταγράφονται στην σειριακή θύρα μετρήσεις όπως:

```
Detected SPS30.           -- Αναγνωρίζει τον αισθητήρα SPS30 με
Serial number: 3BD6E439ED5193D8 -- σειριακό αριθμό
Product name: 00080000    -- αριθμό σειράς προϊόντος
Firmware level: 2.2
Library level: 1.4
Measurement started      -- αρχή μετρήσεων
```

!!! Due to I2C buffer size only the SPS30 MASS concentration is available !!!

```
-----Mass ----- Number ----- -Average-
Concentration [µg/m3]   Concentration [#/cm3]   [µm]
P1.0 P2.5  P4.0  P10  P0.5  P1.0  P2.5  P4.0  P10  PartSize
0.99 4.10  6.58  7.07  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
4.52 7.61  9.90  10.36 0.00  0.00  0.00  0.00  0.00  0.00
```

Μετρήσεις με συνδέσεις UART

Παρατηρούμε ότι με την I²C σειριακή σύνδεση δεν καταγράφονται οι συγκεντρώσεις ανά κυβικό εκατοστό, όπως και τα μεγέθη των ανιχνεύσιμων σωματιδίων αφού το μέγεθος του buffer είναι μικρό. Έτσι προτιμούμε την σύνδεση UART που εξασφαλίζει επιπλέον και μεγαλύτερη απόσβεση ηλεκτρομαγνητικού θορύβου στις γραμμές μεταφοράς των σημάτων από τον αισθητήρα στην μετρητική διάταξη. Έτσι έχουμε πιο αναλυτικές αλλά και πιο αξιόπιστες μετρήσεις με μεγαλύτερα μήκη καλωδίων.

Για UART σύνδεση αφήνουμε στον αέρα το pin 4 οπότε και συνδέονται αντίστοιχα τα σειριακά Pin TX: pin3 → RX1: pin19, RX:pin2 → TX1: pin18

Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί ανεμιστήρα για να ωθεί τον αέρα μέσα από το κέλυφός του με αποτέλεσμα να συσσωρεύεται σκόνη που επηρεάζει μακροπρόθεσμα την αξιοπιστία των μετρήσεων. Έτσι εκτελείται ρουτίνα καθαρισμού όπου ενεργοποιείται ο εσωτερικός ανεμιστήρας στο μέγιστο των στροφών του, για να αποβάλει σκόνες και σωματίδια που τυχόν έχουν συσσωρευτεί στο εσωτερικό του αισθητήρα. Η λειτουργία αυτή που ονομάζεται ρουτίνα auto clean, ορίζεται από το πρόγραμμα, εδώ με περίοδο 60480seconds ή αλλιώς μία φορά ανά 7 ημέρες δηλαδή κάθε εβδομάδα.

Έτσι τρέχουμε εκ νέου τον κώδικα κατάλληλο για σύνδεση UART και λειτουργία auto clean, με τίτλο **Example2_sps30_BasicReadings_autoclean_B**, (Παράρτημα 5.3.3.) (βασισμένο στο παράδειγμα του αποθετηρίου Github στην ιστοσελίδα <https://github.com/paulnha/sps30>) για να εμφανιστεί η παρακάτω καταγραφή της σειριακής θύρας:

Trying to connect

18:55:11.324 -> Detected SPS30.

18:55:13.510 -> Serial number: 3BD6E439ED5193D8

18:55:13.612 -> Product name: 00080000

18:55:13.714 -> Firmware level: 2.2

18:55:13.714 -> Hardware level: 7

18:55:13.714 -> SHDLIC protocol: 2.0

18:55:13.714 -> Library level: 1.4

18:55:13.816 -> Current Auto Clean interval: 604800 seconds (7 ημέρες)

18:55:13.816 -> No Auto Clean interval change requested.

18:55:14.941 -> Measurement started

-----Mass-----			----- Number -----				-Average-			
Concentration [μg/m3]			Concentration [#/cm3]				[μm]			
P1.0	P2.5	P4.0	P10	P0.5	P1.0	P2.5	P4.0	P10	Part Size	
4.18	11.34	16.95	18.07	13.16	25.45	32.91	34.43	34.65	1.12	
7.84	8.29	8.29	8.29	54.16	62.36	62.58	62.60	62.62	0.47	
8.16	8.63	8.63	8.63	56.40	64.94	65.16	65.19	65.20	0.44	
8.64	9.14	9.14	9.14	59.71	68.74	68.98	69.01	69.02	0.48	

Στις τελευταίες γραμμές πράγματι εμφανίζονται οι μετρούμενες τιμές των PM ρύπων.

2.3.3 Αισθητήρας Air Quality BME680 της Bosch

Με το πρόγραμμα για Arduino από <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680/#software> (Παράρτημα 5.3.4) και με σύνδεση I²C bus καταγράφηκαν οι μετρήσεις:

BSEC library version 1.4.8.0

Time stamp [ms]	raw temp [°C]	pressure [hPa]	gas [Ohm]	I AQ	Temp [°C]	relative humidity [%]	Static IAQ	CO2 equivalent	breath VOC equivalent
3048	23.32	1004.24	172.04	2	23.26	54.9	25	500	0.50
6048	23.33	1004.26	203.28	2	23.27	54.7	25	500	0.50
12048	23.32	1004.22	245.99	2	23.26	54.5	25	500	0.50
855048	23.31	1003.91	362.92	3	23.25	53.2	30	521	0.54

2.3.4 Ο αισθητήρας b5w-Id0101 της OMRON

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας παράγει θετικό τετραγωνικό παλμό πλάτους 5Volt όταν ανιχνεύσει σωματίδια στον αέρα, και 0Volt όταν δεν ανιχνεύει.

Μετρώντας τον αριθμό των παλμών εντός της περιόδου χρόνου μέτρησης, με συχνότητα δειγματοληψίας 4 KHz ή μεγαλύτερη, προκύπτει η έξοδος μέτρησης του αισθητήρα αντίστοιχη με τον αριθμό των σωματιδίων PM/σκόνης στην ατμόσφαιρα.

Τρέχουμε τον κώδικα με τίτλο **b5w-ld0101_C** (Παράρτημα 5.3.5) (Βασισμένο στο παράδειγμα του αποθετηρίου Github στην ιστοσελίδα <https://github.com/sillevl/mbed-omron-b5w-ld0101>) οπότε προκύπτουν οι μετρήσεις:

Vout1 : 46 [count],	Counts per 20sec_Vout1 : 438 [count],
Vout2 : 0 [count],	Counts per 20sec_Vout2: 0 [count],
Vout1-Vout2 : 46,	Counts per 20sec :438 [count]

Με τάση πόλωσης βαθμονόμησης $V_{TH} = 0.25\text{Volt}$ εμφανίζονται λογικές μετρήσεις.

Συμπερασματικά

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, που παρέχονται από τους κατασκευαστές, η συντριπτική πλειονότητα των αισθητήρων που δοκιμάστηκαν, παρέχουν αξιόπιστες και ακριβείς μετρήσεις για αέρια, PM και άλλων φυσικών τιμών, συνδυάζοντας ακόμη αυτές τις μετρήσεις για να υπολογίσουν απευθείας τον **συντελεστή ποιότητας αέρα IAQ**.

Λαμβάνονται υπόψη σοβαρά την έκθεση σε **χημικές ουσίες**, την **γήρανση** και την εκτροπή της ακρίβειας των μετρήσεων ακόμη και σε συνάρτηση με την έκθεση σε **αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες**.

Το μικρό τους **μέγεθος** με το λιγιστό **βάρος** και το χαμηλό **κόστος** συνδυάζονται εποικοδομητικά για πιο εξελιγμένες συσκευές ελέγχου ποιότητας αέρα, χαμηλού κόστους, αυτόνομες και ελαφριές όπως επιβάλλεται σε εφαρμογές **IoT**.

Τέτοιοι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε φθηνές υποδομές υλοποίησης, με ανεξάρτητες πλατφόρμες χαμηλού κόστους χωρίς οποιεσδήποτε εξαρτήσεις από συγκεκριμένα περιφερειακά υλικά ή διατάξεις και λογισμικές εφαρμογές αφού υιοθετούν την τυποποιημένη συνδεσιμότητα τεχνολογιών όπως **I²C**, **SPI** ή **UART** σε συνδυασμό με τον **μεγάλο ρυθμό** μετρήσεων και της επεξεργασίας αυτών.

Επιγραμματικά παρατίθενται τα βασικά κριτήρια αξιολόγησης των αισθητήρων:

- **Ακρίβεια επακρίβεια και ολίσθηση των μετρήσεων,**
- **αντοχή στην επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων**
- **εύρος τιμών,**
- **τύποι μετρούμενων μεγεθών - ρύπων,**
- **Χαμηλό κόστος,**
- **μικρό μέγεθος και βάρος,**
- **τυποποιημένη συνδεσιμότητα και**
- **ανεξαρτησία από εξειδικευμένο υλικό και λογισμικό για την λειτουργία τους.**

Συνολικά λοιπόν με τέτοιους αισθητήρες στην ελεύθερη αγορά, διαφαίνεται ως εφικτή η υλοποίηση μιας ποικιλίας ευέλικτων και “έξυπνων” συσκευών ελέγχου ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων, προκειμένου να επιτευχθούν οι νέοι στόχοι μειωμένης συγκέντρωσης ρύπων όπως τα PM2.5, PM10, και των TVOC's, σύμφωνα με τις οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής έως το 2030.

Σχεδιασμός και υλοποίηση σε πλατφόρμα ανοικτής αρχιτεκτονικής - Open Source Platform

Επιλογή δικτύωσης LoRaWAN

Για τη ασύρματη μεταφορά των δεδομένων, στη συγκεκριμένη εφαρμογή, επιλέχθηκε η τεχνολογία επικοινωνιών Low Power Wide Area Networks (LPWAN) υλοποίησης LoRa, έναντι άλλων τεχνολογιών όπως το WiFi, το Zigbee ή το BLE μιας που προσφέρει κάποια ιδιαίτερα

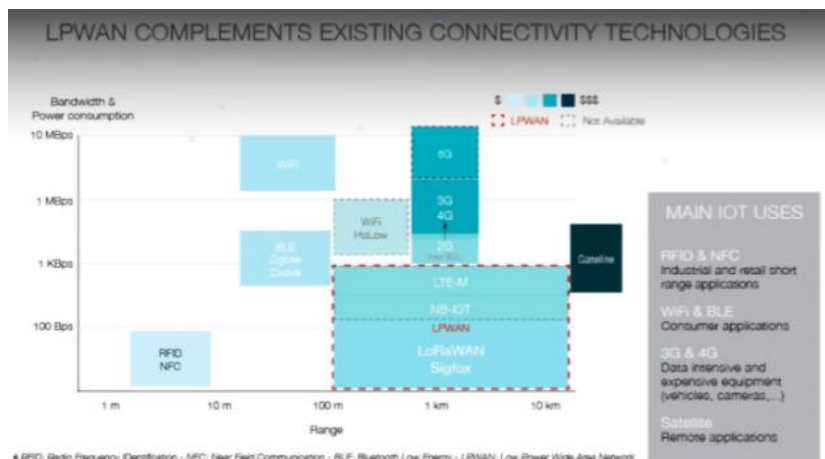
σημαντικά πλεονεκτήματα υπέρ της οποίας συνετέλεσαν ως κριτήρια επιλογής της.

Πρωτίστως το πρωτόκολλο LoRaWAN® είναι ένα ανοιχτό πρότυπο που επιτρέπει την απρόσκοπτη και γρήγορη επεκτασιμότητα και διαλειτουργικότητα ασύρματων συσκευών και δικτύων χωρίς πολύπλοκες απαιτήσεις εγκατάστασης.

Το LoRaWAN™ ορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας και την αρχιτεκτονική του συστήματος για το δίκτυο ενώ το φυσικό επίπεδο LoRa® επιτρέπει τη σύνδεση επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας. Η αρχιτεκτονική του δικτύου LoRaWAN® [106] είναι τοπολογίας αστέρα των αστέρων ή αλλιώς star-of-stars, όπου οι πύλες μεταδίδουν μεταφέρουν τα μηνύματα μεταξύ των κόμβων και του κεντρικού διακομιστή δικτύου, οπότε και λειτουργούν ως μια διαφανή γέφυρα, μετατρέποντας απλώς πακέτα RF σε πακέτα IP και αντίστροφα. Μια συσκευή κόμβος



Εικόνα 25: Τεχνολογίες LPWAN (Πηγή IoT Analytics LPWAN Report) 2018-



Εικόνα 26 : Τεχνολογίες LPWAN σε σχέση με την ισχύ εκπομπής και την απόσταση κάλυψης

συνδέεται ασύρματα με μία ή περισσότερες πύλες διασύνδεσης – gateways σύμφωνα με την τεχνική single-hop που προσφέρει το φυσικό επίπεδο LoRa της ασύρματης επικοινωνίας Long Range.

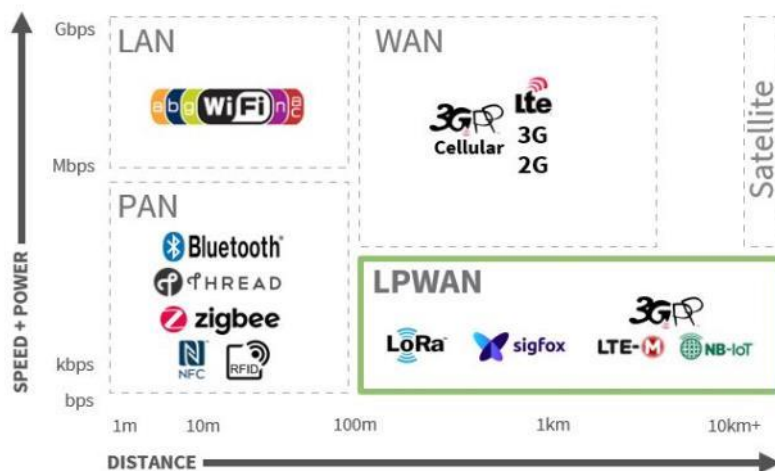
Η ευφυΐα και η πολυπλοκότητα της επεξεργασίας των δεδομένων μεταφέρονται στον διακομιστή του δικτύου. Αυτός που διαχειρίζεται το δίκτυο, επιλέγει τα χρήσιμα λαμβανόμενα πακέτα και απορρίπτει τα περιττά, εκτελεί ελέγχους ασφαλείας, προγραμματίζει επιβεβαιώσεις μέσω της βέλτιστης σύνδεσης με πύλη και εκτελεί πρακτικές προσαρμογής ανάλογα με τις τιμές των δεδομένων κ.λπ.

Το LoRaWAN υποστηρίζεται από μια ευρεία και αναπτυσσόμενη τεχνολογική συμμαχία που αναφέρεται ως LoRa Alliance® [106], η οποία εμφανίζεται ως μια μη κερδοσκοπική σύμπραξη 500 και πλέον εταιρειών ως μέλη της συμμαχίας που συνεισφέρουν και προσφέρουν λύσεις, προϊόντα και υπηρεσίες, προκειμένου να υλοποιήσουν εφαρμογές μεγάλης κλίμακας δικτύων Low Power Wide Area Networks (LPWAN). Αν και το βασικό ηλεκτρονικό υλικό παράγεται και προωθείται από μία εταιρεία, την SEMTECH, η σύμπραξη LoRa Alliance

Local Area Network Short Range Communication	Low Power Wide Area (LPWAN) Internet of Things	Cellular Network Traditional M2M
40%	45%	15%
Well established standards In building	Low power consumption Low cost Positioning	Existing coverage High data rate
Battery Live Provisioning Network cost & dependencies	High data rate Emerging standards	Autonomy Total cost of ownership
Bluetooth 4.0	LoRa	GSM, 3G, H+, 4G

Εικόνα 30: Σύγκριση ασύρματων τεχνολογιών https://loro-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/

υποστηρίζει την ελευθερία υλοποιήσεων ειδικά από ατομικές ή ομαδικές προσπάθειες, της αποκαλούμενης κοινότητας, ενώ καθορίζει κατά αποκλειστικότητα τις προδιαγραφές των LoRaWAN® δικτύων. Σύμφωνα με αυτές προσδιορίζονται κανόνες τυποποίησης και ένα



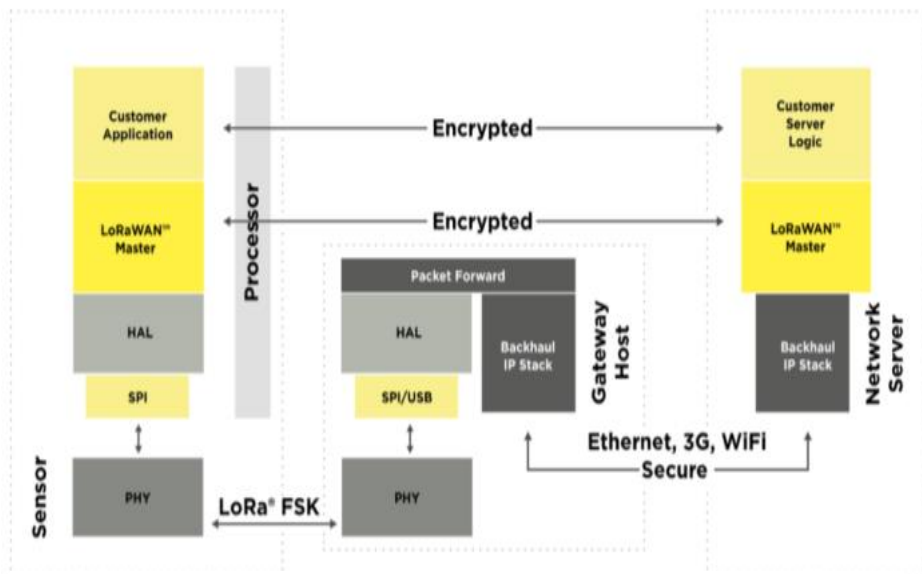
Εικόνα 29 : Διαχείριση ισχύος στο IoT με κυψελοειδή τεχνολογία LPWAN (Πηγή Electronics Specifier)

διαπιστευμένο σύστημα πιστοποίησης για την απαιτούμενη διαλειτουργικότητα στα πλαίσια των δικτύων LPWAN. Το LoRaWAN® χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο MAC (έλεγχο πρόσβασης πολυμέσων) και την αρχιτεκτονική συστήματος για ένα δίκτυο με προδιαγραφές LoRa®. [[106]]

Η τεχνολογία LoRa® συνήθως αξιοποιεί ασύρματες ζώνες με συχνότητες εκπομπής και λήψης λίγο χαμηλότερα του γιγακύκλου, που αποδεικνύονται ιδανική λύση για δημόσια και ιδιωτικά δίκτυα. Μεταδίδονται μικρά πακέτα bit δεδομένων σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, με πολύ χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης με ασύγχρονο τρόπο, άρα και με βαθιά διείσδυση.

Η κατανάλωση ενέργειας διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα οπότε η διάρκεια ζωής των μπαταριών που τροφοδοτούν τους ασύρματους κόμβους με τους αισθητήρες ή τις πύλες, μπορεί να ανέλθει και στα 10 χρόνια.

Το LoRa επιτυγχάνει αμφίδρομη επικοινωνία με προσαρμοστικούς ρυθμούς δεδομένων και πολύ καλή ασφάλεια μετάδοσης από άκρο σε άκρο. Η ασφάλεια εν προκειμένω του διακομιστή δικτύου εγγυάται την αυθεντικότητα των συσκευών



Εικόνα 31: Διάγραμμα διασύνδεσης επιπέδων LoRa stack <https://loralliance.org/about-lorawan/>

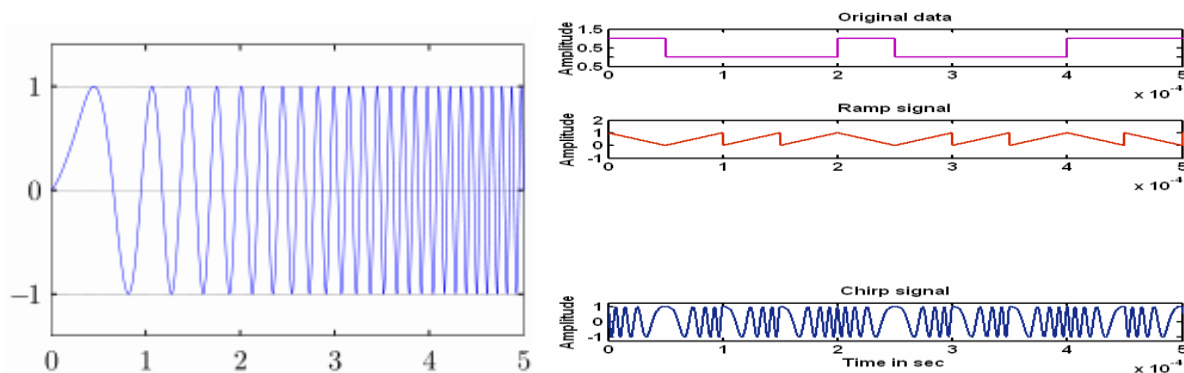
στο δίκτυο και οι εφαρμογές διασφαλίζουν την προστασία των δεδομένων των τελικών χρηστών και την έμπιστη μετάδοσή τους. Εξάλλου το LoRa διαθέτει ενσωματωμένη κρυπτογράφηση AES-128 ως στάνταρ [107], [108].

Οι αισθητήρες μπορούν να επικοινωνούν απευθείας με μια πύλη τοποθετημένη είτε σε εσωτερικούς, είτε σε εξωτερικούς χώρους είτε υπόγεια. Η απόσταση που καλύπτει μια σύζευξη κόμβου και πύλης φτάνει σε ανοιχτές περιοχές ενώ μέχρι και τα 50 χιλιόμετρα ενώ σε αστικά περιβάλλοντα περιορίζεται στα 10 χιλιόμετρα. Έτσι τελικά το κόστος ανάπτυξης και χρήσης τέτοιων ζεύξεων με πύλες και αισθητήρες διατηρείται αισθητά χαμηλό.

3.1 Τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας LoRa

Το LoRa βασίζεται στη διαμόρφωση chirp spread spectrum (CSS). Αυτού του τύπου διαμόρφωση είναι ανθεκτική στο Doppler Effect, περιορίζει την πυκνότητα ροής ισχύος, παρέχει αυξημένη αντίσταση σε φυσικές παρεμβολές και τον θόρυβο και αποτρέπει την ανίχνευση.

Πιο συγκεκριμένα το Chirp spread spectrum (CSS) είναι μια τεχνική διεύρυνσης φάσματος - spread spectrum για την κωδικοποίηση των δεδομένων με παλμούς chirp διαμορφωμένης γραμμικά μεταβαλλόμενης συχνότητας ευρείας ζώνης. Ένα chirp είναι ένα ημιτονοειδές σήμα με αυξανόμενη ή μειούμενη γραμμικά συχνότητα αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου (συχνά με μια πολυωνυμική έκφραση που συσχετίζει τον χρόνο με την συχνότητα).



Εικόνα 32 : Αριστερά φαίνεται το διαμορφωμένο σήμα κατά Chirp. Δεξιά οι κυματομορφές των δεδομένων από το στάδιο της ψηφιακής μορφής μέχρι το διαμορφωμένο σήμα chirp.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται προς σύγκριση τα βασικά χαρακτηριστικά τεχνολογιών ασύρματης εκπομπής βάσει των οποίων έγινε η επιλογή της τεχνολογίας LoRa.

Παράμετροι	LORA/ LORAWAN	MIOTY	SIGFOX	NB-IOT
Εύρος	< 14 km	<15 km	< 17 km	< 22 km
IoT Δίκτυο	Κλειστό Ιδιωτικό αλλά και Ανοικτό Δημόσιο	Κλειστό Ιδιωτικό		Διεθνές LPWAN τυποποιημένο εύρος
Συχνотική περιοχής	Χωρίς Αδειοδότηση	Χωρίς Αδειοδότηση	Χωρίς Αδειοδότηση	Με άδεια
Εύρος Συχνοτήτων	125kHz	2kHz	0.1 kHz	180 kHz
Διαμόρφωση	chirp spread spectrum (CSS) διαμόρφωση	telegram splitting multiple access technology	Ultra-Narrow Band slow modulation rate FSK, BPSK	
Ρυθμός Δεδομένων	< 10 kBbps	< 2.4 kBbps	10 Bps	200 kBbps
Ανοικτό Πρότυπο	Ναι	Όχι	μερικώς	μερικώς
Πεδίο Εφαρμογών	Ευρύτατο	Μικρό	Ευρύ	Ευρύ
Μέσο Latency (sec)	1	5		0,072

Πίνακας 20 : Σύγκριση συστημάτων LPWAN. (Πηγή Test and Measurement of LPWAN and Cellular IoT Networks) [109]

3.2 Κύκλος Εργασίας για χαμηλή κατανάλωση.

Μια βασική παράμετρος περιορισμού της κατανάλωση, κυρίως κατά την εκπομπή, είναι και ο κύκλος εργασίας ή αλλιώς το Duty Cycle. Ο Κύκλος Εργασίας ορίζει το κλάσμα του χρόνου που απασχολείται ένας πόρος όπως ένας πομπός. Όταν μια συσκευή μεταδίδει σε χρόνο 3 μονάδων, σε ένα κανάλι με συνολικός χρόνο μετάδοσης 10 μονάδων χρόνου, αυτή η συσκευή χαρακτηρίζεται με κύκλο λειτουργίας 30%. Όταν αντίστοιχα μια συσκευή μεταδίδει σε 3 κανάλια αντί του ενός και κάθε απασχολεί κάθε μεμονωμένο κανάλι για 3 χρονικές μονάδες ανά 10 μονάδες χρόνου (έτσι 30%) τότε, η

συσκευή εκπέμπει για 9 χρονικές μονάδες κάθε 10 χρονικές μονάδες, οπότε λειτουργεί με κύκλο 90%.



Εικόνα 330: Κανάλια σε διαφορετικές υποζώνες

Στο ευρωπαϊκό πρότυπο συχνοτικής λειτουργίας, έχουμε κανάλια σε διαφορετικές υπό-ζώνες, οπότε ο κύκλος λειτουργίας προσαρμόζεται ανάλογα.

Στην Ευρώπη, οι κύκλοι λειτουργίας ρυθμίζονται από το τμήμα 7.2.3 του προτύπου ETSI EN300.220. Αυτό το πρότυπο ορίζει τις ακόλουθες υπό-ζώνες και τους κύκλους λειτουργίας τους:

g (863.0 – 868.0 MHz) με 1%	g3 (869.4 – 869.65 MHz) με 10%
g1 (868.0 – 868.6 MHz) με 1%	g4 (869.7 – 870.0 MHz) με 1%
g2 (868.7 – 869.2 MHz) με 0.1%	

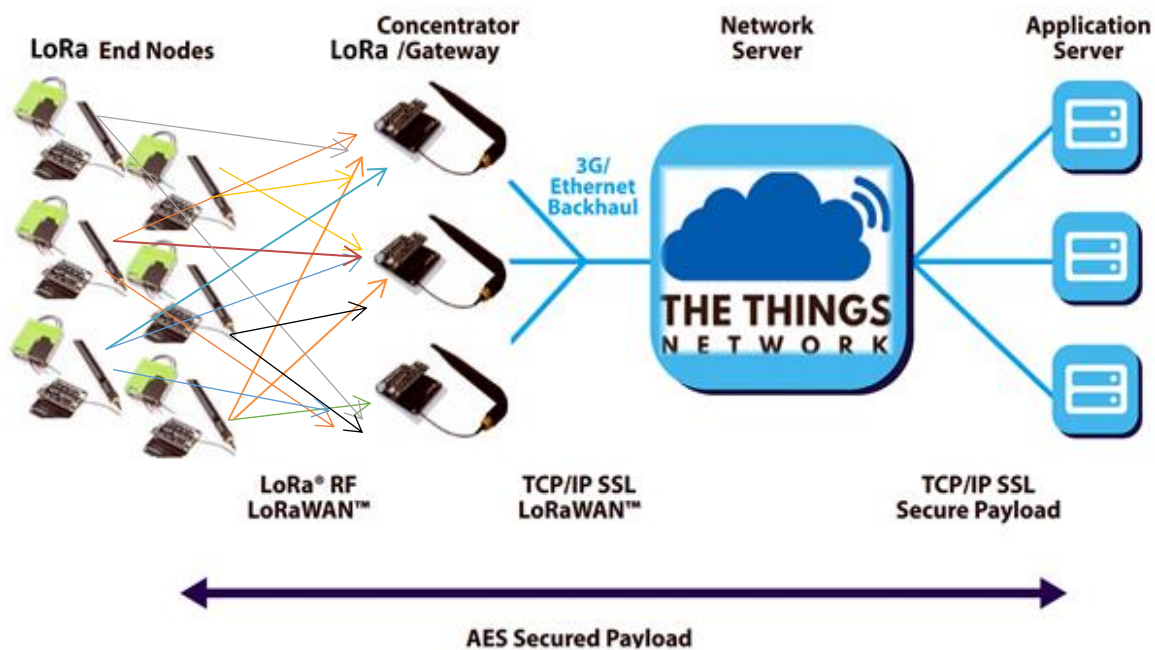
Επιπλέον, η προδιαγραφή LoRaWAN υπαγορεύει κύκλους λειτουργίας για τις συχνότητες σύνδεσης, τις συσκευές συχνοτήτων όλων των δικτύων συμβατών με LoRaWAN που χρησιμοποιούνται για ενεργοποιήσεις μέσω αέρα (OTAA) συσκευών. Στις περισσότερες περιοχές αυτός ο κύκλος εργασιών ορίζεται στο 1% καθώς ισχύουν περιορισμοί ορθής χρήσης για χαμηλή κατανάλωση και ελεύθερο χώρο εκπομπών. Σύμφωνα με την πολιτική ορθής χρήσης στο δίκτυο δημόσιας κοινότητας του The Things Network [110], ο χρόνος λειτουργίας κάθε κόμβου ορίζεται σε 30 δευτερόλεπτα ανά 24ωρο, ανά κόμβο και τα μηνύματα προς τους κόμβους σε 10 μηνύματα το 24ωρο, ανά κόμβο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μπορεί κάθε κόμβος να στείλει 417 τυπικά μηνύματα LoRa σε ένα 24ωρο δηλαδή 1 μήνυμα κάθε 3,5 λεπτά περίπου, ρυθμός πολύ ικανοποιητικός για καταγραφή τιμών ρύπων στην ατμόσφαιρα με τους αισθητήρες και τους αντίστοιχους LoRa κόμβους τους.

Για την ορθή επιλογή των παραπάνω μπορούμε να συμβουλευτούμε το διαδικτυακό εργαλείο LoRaWAN airtime calculator [111]

Οπότε με τα επιλεγμένα όρια κύκλου λειτουργίας για κάθε ασύρματη συσκευή εξασφαλίζεται η απόδοση με την χαμηλή κατανάλωση που υπόσχεται η τεχνολογία LoRa καταδεικνύοντας την τελευταία ως μια πολύ αποδοτική ενεργειακά τεχνολογία χαμηλού κόστους για εφαρμογές IoT όπως της συγκεκριμένης μελέτης.

3.3 Υλοποίηση του δικτύου LoRaWAN

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η σύνδεση των ασύρματων κόμβων με τους αισθητήρες σε δίκτυο για την συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα των εσωτερικών χώρων (IAQ) από πολλά σημεία των εποπτευόμενων χώρων. Ως τέτοιο ασύρματο δίκτυο επελέγη και υλοποιήθηκε, ένα ευρέως πλέον χρησιμοποιούμενο, αξιόπιστο, χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και επεκτάσιμο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που αποτελείται από πύλη και κόμβο LoRa και αισθητήρες ποιότητας αέρα. Το εγχείρημα μπορεί εύκολα να επεκταθεί, σύμφωνα με



Εικόνα 34: Τοπολογία του δικτύου LoRaWAN με κόμβους αισθητήρων και πύλες προς το 'cloud'

τα πρότυπα των μελών της LoRa–Alliance [106] που το έχουν παγιώσει ως παγκόσμιο πρότυπο ασύρματων δικτύων, με επιπλέον κόμβους και πύλες LoRa για λεπτομερέστερη παρακολούθηση και έλεγχο της ποιότητας αέρα σε εσωτερικούς χώρους. Το δίκτυο αυτό χρησιμοποιεί τον διακομιστή νέφους The Things Network (TTN) για την αποθήκευση των δεδομένων από τους αισθητήρες. Ένα σενάριο PHP (Hypertext Pre-processor) μορφοποιεί τα δεδομένα κατάλληλα για να αποθηκευτούν στη βάση δεδομένων Influx και ταυτόχρονα να απεικονιστούν στον διακομιστή της Grafana. Μια εφαρμογή διεπαφής ιστού προσφέρει πρόσβαση και οπτικοποίηση των δεδομένων που είναι αποθηκευμένα στον διακομιστή Grafana, όπως βλέπουμε στο σχήμα της τοπολογίας του δικτύου.



Εικόνα 35: Διαφανής διαδικασία διασύνδεσης υπηρεσιών TTN community (The Things Network)



Εικόνα 33α : Αναπτυξιακή πλακέτα Pycom με το LoPy 4 και δεξιά η υλοποίηση της gateway με το LoPy4

Στα επόμενα σχήματα φαίνεται η πειραματική διάταξη με τον κόμβο (node) και την πύλη (Gateway) LoRaWAN, όπως επίσης και με τους αισθητήρες των περιβαλλοντικών παραμέτρων που αφορούν στην ποιότητα του αέρα. Οι κόμβοι αλλά και οι πύλες υλοποιήθηκαν με την πλατφόρμα LoPy.



Εικόνα 36β : Πειραματική διάταξη LoRaWAN node με συνδεδεμένους αισθητήρες και τη LoRaWAN Gateway σε σύζευξη με τις κεραίες τους.

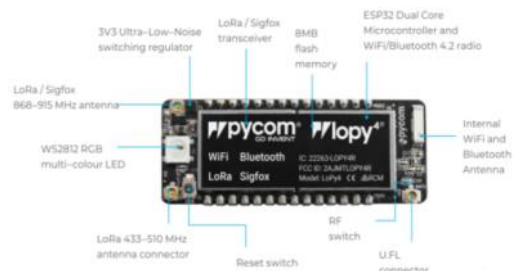
Οπότε γραμμικά η διάταξη ακολουθεί την πορεία από τον αισθητήρα στον κόμβο LoPy στον οποίο συνδέεται ενσύρματα για να μεταφερθούν οι πληροφορίες του τελευταίου ασύρματα με LoRa στην πύλη LoRa υλοποιημένη σε LoPy και στο τέλος τα δεδομένα να ακολουθήσουν τον δρόμο του cloud μέσω Wi-Fi και Internet πορείας.



Εικόνα 37 Πορεία των δεδομένων από τον αισθητήρα στο νέφος (cloud)

3.4 LoRa Hardware - Πλατφόρμα Lopy4, κόμβος και πύλη LoRa

Οι αισθητήρες συνδέονται απευθείας σειριακά με την ευέλικτη πλακέτα-πλατφόρμα ανάπτυξης Lopy4 που προγραμματίζεται με MicroPython και PyMaker για ανάπτυξη εφαρμογών IoT. Σύμφωνα με την κατασκευάστρια εταιρεία [<https://pycom.io/product/lopy4/>] το Lopy4

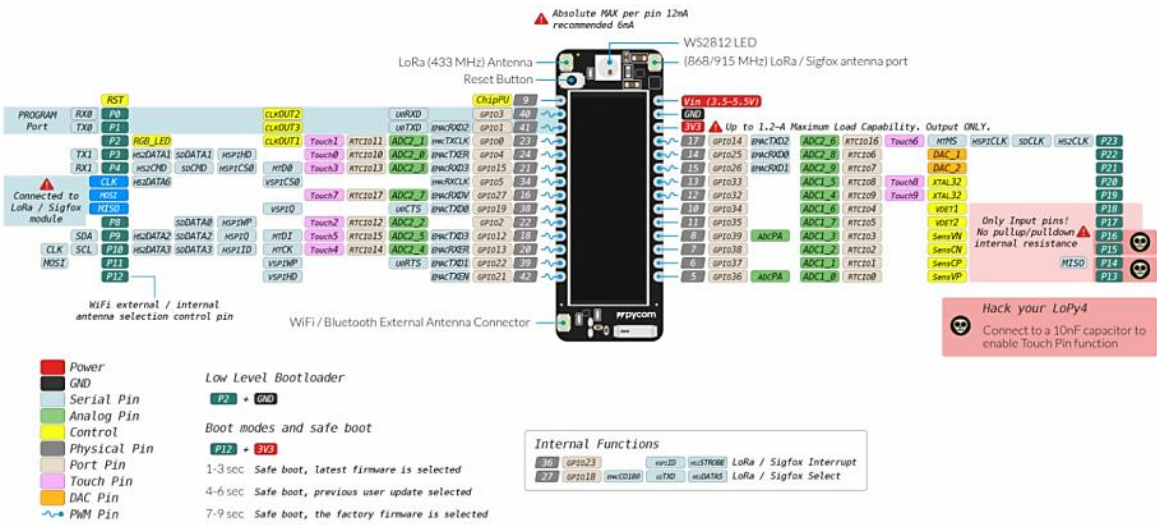


Εικόνα 38: LoPy Βασικά μέρη και συνδέσεις (Pycom)

είναι ένα αυτόνομο τετραπλό ασύρματο αναπτυξιακό module, προγραμματιζόμενο με MicroPython. Λειτουργεί με τις ασύρματες με τεχνολογίες επικοινωνιών χαμηλής ισχύος LoRa, Sigfox, αλλά και Wi-Fi, και Bluetooth. Με το πιο πρόσφατο chipset Espressif ESP32, το Lopy4 μπορεί να λειτουργήσει ως απλή πύλη LoRa nano, αλλά και ως μια διευρυμένη πλατφόρμα ανάπτυξης πολλαπλών φορέων όπως LoRa που υλοποιήθηκε εδώ, αλλά και Sigfox, WiFi και BLE κατάλληλη για όλα τα δίκτυα LoRa και Sigfox σε όλο τον κόσμο. Για ευκολία στις συνδέσεις με τους αισθητήρες προσαρμόστηκε είτε απευθείας σε κλασικό breadboard είτε συνδέθηκε κατευθείαν με τους αισθητήρες.

Προσφέρει με χαμηλό κόστος μεγάλη ευελιξία συνδέσεων και προγραμματισμού προσαρμόσιμο στην εκάστοτε εφαρμογή με εργαλεία ελεύθερα και άμεσα προσβάσιμα από όλους.

Ο αισθητήρας PM της Sensirion με τύπο SPS30, συνδέθηκε απευθείας σε μία σειριακή UART πύλη ενός LoPy4 που λειτουργήσε ως LoRa node για την μελέτη.



Εικόνα 39 : LoPy συνδεσμολογίες (Πηγή: Pycom)

Για τον προγραμματισμό του LoRa node αλλά και της LoRa Πύλης αναζητήθηκαν κώδικες προγραμματισμού από πηγές της ίδιας της εταιρείας Pycom της Sensirion ή του github ώστε με τις απαραίτητες παρεμβάσεις να συλλέξει τα δεδομένα του αισθητήρα και να τα αποστείλει στο LoRaWAN σύμφωνα με τις προδιαγραφές του έργου.

Περισσότερες πληροφορίες για την πλατφόρμα του LoPy4 και τον προγραμματισμό της μπορούμε να αναζητήσουμε στο **Παράρτημα 1**

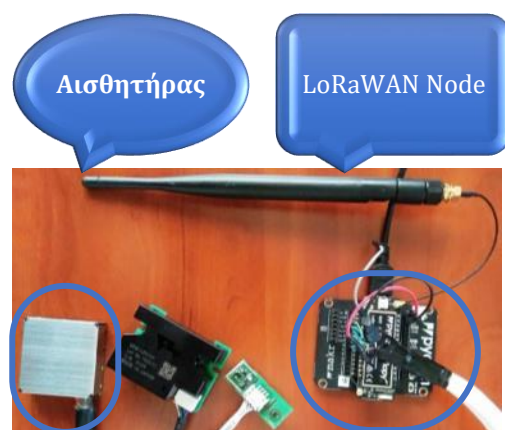
3.4.1 Σύνδεση LOPY με Sensirion SPS30

Ο αισθητήρας PM στην πειραματική μας διάταξη συνδέεται στον LoRa κόμβο, που υλοποιείται με το LoPY4, ενσύρματα με UART.

Το πρόγραμμα Python Sensirion SPS30 mater sensor (πηγή :Sensirion), προσαρμοσμένο στις ανάγκες της πειραματικής διάταξης διαβάζει γραμμές από την σειριακή θύρα UART του αισθητήρα Sensirion serial port και τις μετατρέπει σε αντικείμενο που περιέχει τα δεδομένα. Απόσπασμα του κώδικα μπορούμε να δούμε παρακάτω:

```

if len(line) < 46:
    raise SensirionException("Data too short to parse")
self.timestamp = timestamp_template.format(*time.gmtime())
self.pm1 = round(struct.unpack('>f', line[5:9])[0], 1)
--τιμή PM 1µm
    
```



Εικόνα 37: Πειραματική διάταξη κόμβου

Το ίδιο επαναλαμβάνεται και για τις υπόλοιπες τιμές PM με μεταβλητή self.pm25 που μετρά την συγκέντρωση των σωματιδίων PM μεγέθους μέχρι 2.5μm οπότε για τις υπόλοιπες μετρούμενες τιμές αντίστοιχα έχουμε τις μεταβλητές:

self.pm4- 4μm, self.pm10- 10μm, self.n05- 0.5μm, self.n1- 1μm, self.n25- 2.5μm, self.n4- 4μm, self.n10- 10μm και self.tps – συνολική συγκέντρωση PM

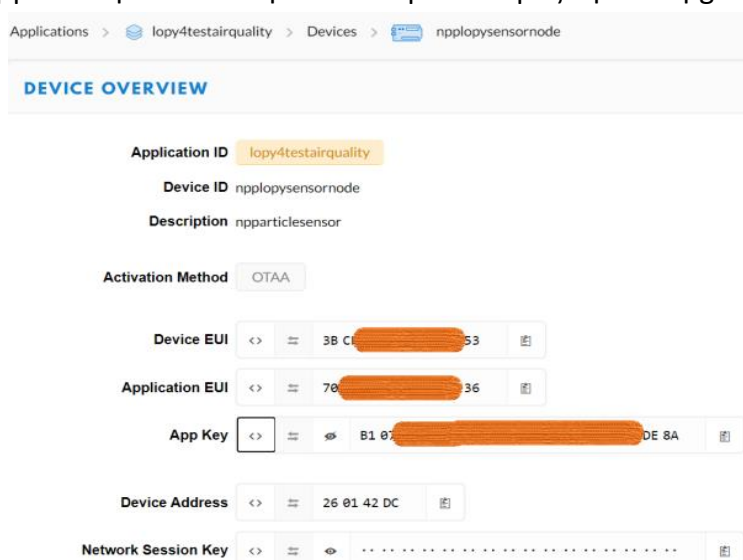
Για να επιστρέψει τις τιμές στο κυρίως πρόγραμμα με την μορφή string ώστε αυτά να αποσταλούν στην LoRa πύλη προς το cloud

```
def __str__(self):          -- επιστρέφει τις τιμές από τον αισθητήρα στο Lory
    return(
        "%s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s" %
        (self.timestamp, self.pm1, self.pm25,          -- με χρονοπροσδιορισμό
         self.pm1, self.pm25,
         self.pm4, self.pm10, self.n05,
         self.n1, self.n25, self.n4,
         self.n10, self.tps))
```

3.4.2 Προγραμματισμός και παραμετροποίηση του πρώτου Lory ως LoRa node

Το πρώτο Lory module αναλαμβάνει την αποστολή των δεδομένων προς την πύλη gateway

με επικοινωνία LoRa. Η συχνότητα λειτουργίας του ορίζεται προγραμματιστικά για την Ευρωπαϊκή επικράτεια στα 868MHz και ο τύπος DR = 5 για spreading factor 5 για την αποστολή τουλάχιστον ανά 3,5 λεπτά πακέτων ψηφιακών δεδομένων LoRa σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Για την ασφαλή σύνδεση με την gateway συμπεριλαμβάνεται στην επικοινωνία αυτή και ο μοναδικός κωδικός της gateway ID που επίσης εγγράφεται στο πρόγραμμα μαζί με την ηλεκτρονική διεύθυνση και την θύρα του δρομολογητή του TTN, στο Config αρχείο του προγράμματος, με τον ίδιο τρόπο όπως ακριβώς και για το gateway Lory.



Εικόνα 40: TTN κονσόλα με τα στοιχεία ταυτοποίησης συσκευής –Device (TTN)

Όσον αφορά στο main αρχείο του προγράμματος που συνοδεύει την εφαρμογή LoRa node του Lory, ορίζονται προς χρήση τα πρώτα τρία (0,1,2), από τα συνολικά 16 κανάλια εκπομπής της Ευρωπαϊκής περιοχής (eu.) LoRa στα 868MHz, με συγκεκριμένο socket πλαίσιο εκπομπής και ρυθμό μετάδοσης.

Για την ασφαλή επικοινωνία των κόμβων με την cloud εφαρμογή TTN, μέσω της πύλης (gateway, επιλέχθηκε η ασφαλής σύνδεση Over The Air Authentication (OTAA). Για τον λόγο αυτό ορίστηκαν από την κονσόλα του TTN (εικόνα 38) τρία επιπλέον στοιχεία ταυτοποίησης

της εφαρμογής με το Lory node κατά την εγκατάσταση της συσκευής στην κονσόλα του TTN τα οποία είναι τα εξής:

- Dev EUI - της συσκευής
- App EUI – της εφαρμογής
- App Key – κλειδί της εφαρμογής

Αυτούσια αυτά ενσωματώνονται λοιπόν στο main.py αρχείο της ρυθον όπως μπορούμε να δούμε αναλυτικά και στον αλγόριθμο παρακάτω.

Το αρχείο Main για LoRa WAN node

Ο προγραμματισμός του LoPy4 ως LoRa node γίνεται σχετικά εύκολα με αναφορές σε λογισμικό από την κατασκευάστρια εταιρεία Pycom [112] ή και στο αποθετήριο github (https://github.com/paulnha/SPS30_lora) για δωρεάν υλοποιήσεις από την ανοικτή κοινότητα εφαρμογών προγραμματισμού. Ο πλήρης κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα 5.1.2

```
lora = LoRa(mode=LoRa.LORAWAN, region=LoRa.EU868) -- παράμετροι εκπομπής
# Ορίζονται οι παράμετροι αυθεντικοποίησης της σύνδεσης της συσκευής με την cloud
πλατφόρμα του TTN
dev_eui = binascii.unhexlify('3baf81gh68c82453')
app_eui = binascii.unhexlify('71B3A57ED0048A36')
app_key = binascii.unhexlify('B107A237B31BF26A4DF55822FBDGHE8A')
```

Ορίζονται τα τρία κανάλια LoRa

```
lora.add_channel(0, frequency=config.LORA_FREQUENCY, dr_min=0, dr_max=5)
lora.add_channel(1, frequency=config.LORA_FREQUENCY, dr_min=0, dr_max=5)
lora.add_channel(2, frequency=config.LORA_FREQUENCY, dr_min=0, dr_max=5)
# join a network using OTAA -- Σύνδεση στο δίκτυο με OTAA
lora.join(activation=LoRa.OTAA, auth=(dev_eui, app_eui, app_key), timeout=0,
dr=config.LORA_NODE_DR)
# remove all the non-default channels – αφαιρούνται τα υπόλοιπα αναξιοπώτητα κανάλια
for i in range(3, 16):
    lora.remove_channel(i)
```

Το αρχείο Config για LoRa WAN node συνοδεύει το αρχείο main.py της ρυθον με επιπλέον ευθμίσεις για την σύνδεση στο δίκτυο LoRa (Παράρτημα 5.1.1).

```
"""" LoPy LoRaWAN Nano Gateway configuration options """"
GATEWAY_ID = "9ced511ed6f134B6" -- ο μοναδικός κωδικός αριθμός αυθεντικοποίησης της
gateway
SERVER = 'router.eu.thethings.network' -- TTN router με θύρα 1700
PORT = 1700
NTP = "europe.pool.ntp.org" -- pool.ntp.org είναι ο Ευρωπαϊκός server χρονισμού
WIFI_SSID = 'nikospeladarinosSSID' -- σύνδεση στο τοπικό δίκτυο μέσω WiFi Μόνο για
WIFI_PASS = '#####' αναβάθμιση On air του λογισμικού ή firmware
απευθείας από την Pycom
# for EU868 -- Ευρωπαϊκή συχνότητα επικοινωνίας LoRa
LORA_FREQUENCY = 868100000
LORA_GW_DR = "SF7BW125" # DR_5
LORA_NODE_DR = 5
```

3.4.3 Εγκατάσταση LoRaWAN gateway με το δεύτερο LoPy4

Το δεύτερο LoPy4 αναλαμβάνει τον ρόλο της πύλης που συνδέει την πλευρά του LoRa με την πλευρά του cloud μέσω Wi-Fi και Ethernet με τα ισχύοντα πρωτόκολλα διασύνδεσης στον χώρο του διαδικτύου. Ουσιαστικά αποστέλλει τα δεδομένα από τους αισθητήρες στον εξυπηρετητή TTN. Το LoPy4 με το χαμηλό του κόστος και μικρό του μέγεθος διαφαίνεται ως μια πολύ αποδοτική λύση έναντι έτοιμων εμπορικά διαθέσιμων συσκευών. Επομένως το πρώτο αρχείο που εκτελείται αμέσως μετά την ενεργοποίηση του LoPy είναι το αρχείο `main` το οποίο στην ουσία ορίζει τις παραμέτρους σύνδεσης της gateway με την συσκευή node και την υπηρεσία cloud TTN.

Ο προγραμματισμός του γίνεται επίσης σχετικά εύκολα με αναφορές σε λογισμικό από την κατασκευάστρια εταιρεία Pycom [113] ή και στο αποθετήριο github για δωρεάν υλοποιήσεις από την ανοικτή κοινότητα εφαρμογών προγραμματισμού, όπως και προηγούμενα.

Παρατίθενται παρακάτω ενδεικτικά προς επεξήγηση μερικές γραμμές του κώδικα που συνοδεύει τις λειτουργίες της LoRa Gateway υλοποιημένη στο LoPy4 που καθ' ολοκληρία υπάρχει στο παράρτημα 5.2.

```
s.send( b'PKT #' + bytes([i])) -- αποστέλλεται το πακέτο LoRa
rx = s.recv( 256 )           -- Το μέγεθος του buffer size των 256 είναι ο μέγιστος;
                             αριθμό των bytes σε μια λήψη.
```

Το ουσιαστικό περιεχόμενο των δεδομένων –Payload των πακέτων που αποστέλλονται, σύμφωνα με το LoRa-MAC protocol definition, περιλαμβάνει τις τιμές των αισθητήρων με δύο δεκαδικά ψηφία μέχρι το όριο των 20 bit. Συγκεκριμένα στην εφαρμογή μας αποστέλλονται 10 τιμές PM από τον αισθητήρα SPS30 της Sensirion.

Το αρχείο `Main.py` για LoRa WAN gateway (παράρτημα 5.2.2)

Η πύλη LoRa συνδέεται με ασφάλεια

- με τον κόμβο LoRa που υλοποιήθηκε με το πρώτο LoPy4
- με το router προς το νέφος του περιβάλλοντος TTN μέσω Wi-Fi και
- με το περιβάλλον του TTN με τα παρακάτω διαπιστευτήρια

Μέσα από το `main.py` αρχείο καλείται το αρχείο `config.py`, όπου ορίζονται οι παράμετροι σύνδεσης της πύλης LoRa gateway με το TTN και δηλώνονται κυρίως μεταξύ άλλων τα εξής :

- Η ταυτότητα της πύλης : `GATEWAY_ID`
- Η διεύθυνση του TTN server : `SERVER`



Εικόνα 41 Η Gateway στο Cloud περιβάλλον του TTN.

Αυτά δημιουργούνται στην κονσόλα του TTN μόλις δημιουργήσουμε την εικονική συσκευή LoRa gateway στο cloud του TTN οπότε και ενσωματώνονται στον κώδικα απόσπασμα του οποίου μπορούμε να δούμε ευθύς παρακάτω:

```
import config                                     --καλεί το αρχείο config.py
from nanogateway import NanoGateway
if __name__ == '__main__':
    nanogw = NanoGateway(
        id=config.GATEWAY_ID,                       -- ορίζει το μοναδικό ID της gateway
        frequency=config.LORA_FREQUENCY,           -- ορίζει το συχνοτικό φάσμα LoRa της gateway
        datarate=config.LORA_GW_DR,
        ssid=config.WIFI_SSID,                     -- σύνδεση στο LAN μέσω WiFi
        password=config.WIFI_PASS,
        server=config.SERVER,
        port=config.PORT,
        ntp_server=config.NTP,
        ntp_period=config.NTP_PERIOD_S
```

Το αρχείο Config.py για LoRa WAN gateway (Παράρτημα 5.2.1)

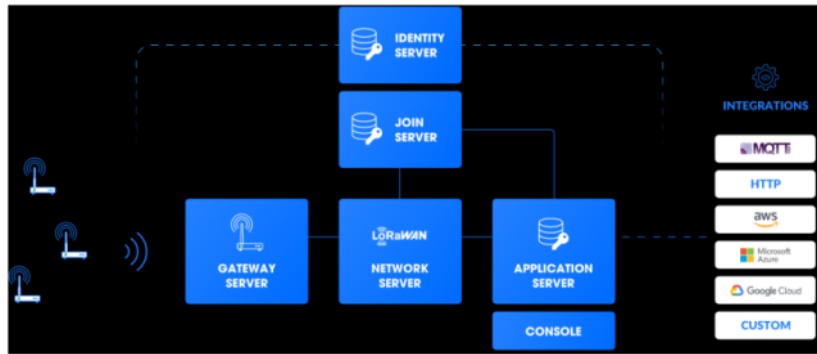
```
""" LoPy LoRaWAN Nano Gateway configuration options """
GATEWAY_ID = "9ced511ed6f134B6"                 -- ο μοναδικός κωδικός αριθμός πιστοποίησης της
                                                gateway
SERVER = 'router.eu.thethings.network'         -- TTN server με θύρα 1700
PORT = 1700
NTP = "europe.pool.ntp.org"                   -- pool.ntp.org είναι ο Ευρωπαϊκός server χρονισμού
NTP_PERIOD_S = 3600
# for EU868                                    -- Ευρωπαϊκή συχνότητα επικοινωνίας LoRa 868MHz
LORA_FREQUENCY = 868100000
LORA_NODE_DR = 5
```

Μέχρι το βήμα αυτό ολοκληρώνεται η πειραματική διάταξη της εικόνας 37 με επιτυχία όπως φαίνεται και από τις καταγραφές του περιβάλλοντος TTN. Έτσι λοιπόν τα δεδομένα των μετρήσεων από τον αισθητήρα μπορούν να μεταφερθούν από το LoRa node υλοποιημένο με το πρώτο LoPy4 μέσω LoRa, στο δεύτερο LoPy4, που λειτουργεί ως πύλη (gateway), προς το cloud για να εμφανιστούν οι μετρούμενες τιμές στην πλατφόρμα του περιβάλλοντος TTN προς αξιοποίηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Επεξεργασία Δεδομένων στο Cloud - TTN

Σε αναζήτηση ενός Δικτύου που να προσφέρει ανοιχτές και αποκεντρωμένες πύλες, ή αλλιώς υποδομές διασύνδεσης, προς το Διαδίκτυο των πραγμάτων για συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων από ενεργούς κόμβους συλλογής δεδομένων αισθητήρων, επιλέχθηκε η πλατφόρμα του The Things Network ή αλλιώς TTN. Η ελεύθερη έκδοση του TTN προσφέρεται δωρεάν για λελογισμένη με κάποιους περιορισμούς. Το The Things Network υποστηρίζει την τεχνολογία LoRaWAN για μεγάλη εμβέλεια (~ 5 έως 15km), με χαμηλή ισχύ για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας με προφανές όφελος την μεγάλη επάρκεια ενέργειας και αυτονομία με μπαταρία, μηνών έως και ετών. Ωστόσο η επικοινωνία με αυτούς τους όρους παραμένει χαμηλού εύρους ζώνης δηλαδή υποστηρίζει 51 bytes



Εικόνα 42: TTN πλατφόρμα νέφους –cloud platform (πηγή:TTN)

ανά μήνυμα. Σύμφωνα με τις εξαγγελίες της κοινότητας που υποστηρίζει το όλο εγχείρημα του TTN, σχεδιάζεται υποστήριξη πολλών δικτύων Broadcast / Mesh ή και άλλων δικτύων στο άμεσο μέλλον.

4.1 Σύνδεση LoPy4-LoRa node στο TTN.

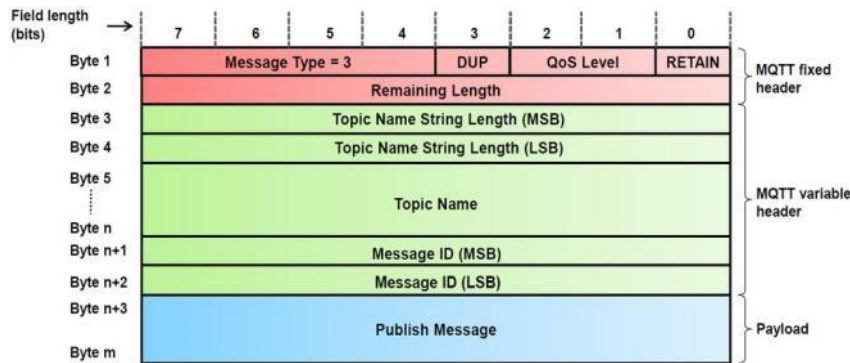
Συνολικά το TTN είναι ένας broker που ακολουθεί όλη την φιλοσοφία του Publish και Request μηνυμάτων MQTT, σε καθορισμένα topics. Ως topic εδώ χρησιμοποιούμε το όνομα της συσκευής που συνδέεται σε αυτό. Για να επικοινωνήσει ο κόμβος LoPy4-LoRa που συνδέεται με τον αισθητήρα ποιότητας αέρα (IAQ) της υλοποίησής μας, με το The Things Network, καταχωρήθηκε στην κονσόλα του TTN ως συσκευή (Device). Αυτή στο διαδίκτυο έχει διεύθυνση <https://console.thethingsnetwork.org/>. Επομένως συσκευή μας δημιουργήθηκε εικονικά και παραμετροποιήθηκε στο cloud, στην πλατφόρμα του TTN για να λειτουργεί ως συσκευή LoRa node Device. Αυτή αρχικά ορίστηκε ως υπηρεσία (application) εντός της πλατφόρμας στο πρώτο πεδίο των μεταβλητών που την καθορίζουν.

Η υλοποίηση LoRaWAN δικτύου με το LoPy4 στηρίχθηκε στην λογική του χαμηλού κόστους και της ανοικτής επιλογής από το γενικό φάσμα προϊόντων διαθέσιμων στην ανοικτή αγορά, που υποστηρίζει το The Things Network υποστηρίζει. Διαφορετικά μπορούμε να προμηθευτούμε έτοιμες δοκιμασμένες και πιστοποιημένες πύλες (gateways), από εταιρείες ή ακόμη και από τους υπεύθυνους του υλικού του TTN ή από τους χρήστες, όπως το The

Things Node ή το Uno. Αυτές διατίθενται μέσω του site και συγκεκριμένα από την σελίδα του Hardware.

4.1.1 Λίγα λόγια για τις υπηρεσίες MQTT Broker Cloud.

Για την συγκεκριμένη εφαρμογή IoT με αισθητήρες χαμηλής ισχύος, το MQTT αξιολογήθηκε αρχικά ως ιδανική λύση. Πρόκειται άλλωστε για ένα ελαφρύ πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων, στην αρχιτεκτονική λογισμικού δημοσίευσης (Publish) / εγγραφής (Subscribe) σε θέματα μηνυμάτων (Topics) που προσφέρει ευκολία και ασφάλεια σύνδεσης για μεγάλο αριθμό σεναρίων, όπου πολλοί πελάτες συνδέονται μέσω μεσίτη (Broker) και εγγράφονται σε θέματα topics που τους ενδιαφέρουν. Από την άλλη πλευρά, οι πελάτες συνδέονται επίσης με τον broker και δημοσιεύουν μηνύματα στα αντίστοιχα θέματα.

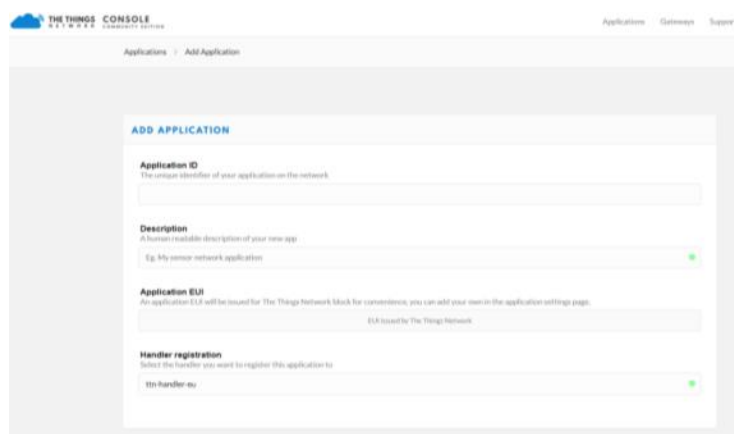


Εικόνα 43: Δομή μηνύματος MQTT

Οι εκδότες-publishers, δεν προγραμματίζουν τα μηνύματά τους να αποσταλούν απευθείας σε συγκεκριμένους αποδέκτες, που ονομάζονται συνδρομητές-subscribers, αλλά αντ' αυτού κατηγοριοποιούν τα δημοσιευμένα μηνύματα σε τάξεις χωρίς να γνωρίζουν ποιοι συνδρομητές λαμβάνουν τα μηνύματα αυτά και αν υπάρχουν καν τέτοιοι. Ομοίως, οι συνδρομητές απευθύνονται σε μία ή περισσότερες ομάδες και λαμβάνουν μόνο εκείνα τα μηνύματα που τους αφορούν, ενώ αγνοούν τους οι εκδότες και αν ακόμη υπάρχουν τέτοιοι.

Έτσι πολλοί κόμβοι με αισθητήρες εγγράφονται στα ίδια θέματα και συμμετέχουν ελεύθερα στην ανταλλαγή των πληροφοριών. Κατ' επέκταση οι LoPy κόμβοι-πελάτες που περνούν από εγγεγραμμένα μηνύματα με τιμές ρύπων στην προκειμένη περίπτωση, σε μια βάση δεδομένων ή ακόμα και ένα απλό αρχείο κειμένου, τότε είναι αρκετά απλό να προσθέσουμε νέους αισθητήρες ή άλλα δεδομένα εισόδου σε μια βάση δεδομένων ή άλλες περιοχές cloud και ούτω καθεξής.

Έτσι, μπορούν να δημοσιεύσουν πολλοί κόμβοι με αισθητήρες σε ένα συγκεκριμένο θέμα τις πληροφορίες των φυσικών παραμέτρων που ανιχνεύουν, συμπεριλαμβανομένου του ονόματός τους και άλλων πληροφοριών που συνοδεύουν τα δεδομένα τους όπως η χρονική στιγμή που λαμβάνονται οι μετρήσεις και ο γεωπροσδιορισμός, όπως ακριβώς απαιτείται και σε μια εφαρμογή



Εικόνα 44 : Ορισμός Εφαρμογής - Application

ανίχνευσης ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων. Έτσι υλοποιείται το σύνολο του LPWAN δικτύου αισθητήρων IAQ.

4.1.2 Υπηρεσίες στο The Things Network (TTN Application) και καταχώρηση των LoRa κόμβων στο TTN

Αφού το TTN είναι μια πλατφόρμα επεξεργασίας δεδομένων τύπου MQTT, κάθε συσκευή κόμβος LoRa4 στεγάζεται ψηφιακά στην καρτέλα applications ως εφαρμογή – (application) με μοναδικές πληροφορίες παραμετροποίησης όπως:

Application ID με το όνομα που ακολουθεί την εφαρμογής μας.

Description- Περιγραφή ως μια χαρακτηριστική φράση που περιγράφει κάπως το πλαίσιο της εφαρμογής μας άρα και τη συσκευή μας.

Application EUI ως ένα μοναδικό αναγνωριστικό για κάθε συσκευή που αποδίδει αυτόματα η πλατφόρμα και ακολουθεί ως μοναδική ταυτότητα τη εφαρμογή στο ασύρματο δίκτυο.

Ως δικτυακός διαχειριστής της εφαρμογής μας, ή αλλιώς Handler registration τέλος, επιλέγουμε για την υλοποίηση τους δικτύου μας την περιοχή της Ευρώπης ttn-handler-eu από τον πίνακα επιλογών για τις διάφορες περιοχές της υφηλίου:

- digitalcatapult-uk-handler *ttn.thingsconnected.net*
- meshed-handler *thethings.meshed.com.au*
- switch-handler *ttn.opennetworkinfrastructure.org*
- ttn-handler-asia-s *asia-se.thethings.network*
- ttn-handler-brazil *brazil.thethings.network*
- ttn-handler-eu *eu.thethings.network*
- ttn-handler-us-wes *us-west.thethings.network*

Ωστόσο ο κάθε κόμβος της υλοποίησής μας για να συνδεθεί με την πλατφόρμα του TTN και να στέλνει τα δεδομένα του σ' αυτήν καταχωρείται στην πλατφόρμα ως συσκευή μέσα στην καρτέλα των συσκευών – Devices (Register Device). Έτσι πλέον είναι καθορισμένη μοναδικά με τα εξής στοιχεία χαρακτηριστικά :

○ Το μοναδικό όνομα της συσκευής **Device ID** που παραμένει αμετάβλητο στην πλατφόρμα.

○ Ο μοναδικός αναγνωριστικός HEX αριθμός **Device EUI** κατά αντιστοιχία του αριθμού EUI.

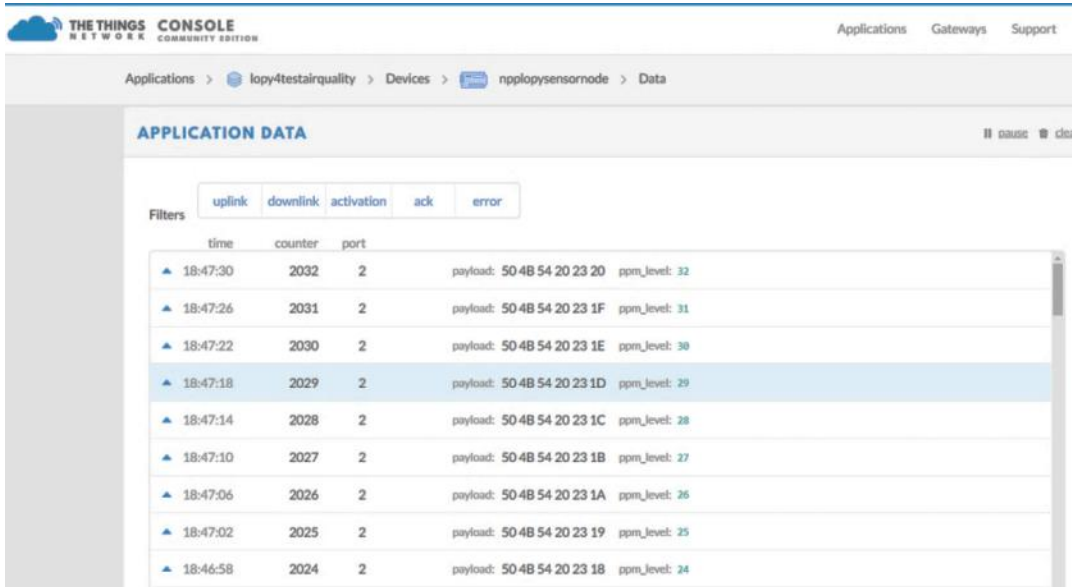
○ Ο μοναδικός αναγνωριστικός αριθμός **App EUI** που συνδέει την συσκευή με την περιβάλλουσα αυτής εφαρμογή.

○ Το αναγνωριστικό κλειδί της εφαρμογής **App Key** για την ασφαλή ασύρματη επικοινωνία της συσκευής με το cloud.

Εικόνα 45: Καταχώρηση Συσκευής στο TTN

4.1.3 Σύνδεση της συσκευής με την βάση δεδομένων του The Things Network

Ο σκοπός βέβαια του εγχειρήματος είναι να συνδεθεί η συσκευή μας με την cloud πλατφόρμα, όπου θα μεταφέρονται όλες οι τιμές των δεδομένων από τις μετρήσεις των ρύπων. Αυτές οι τιμές αποστέλλονται όσο τα δύο LoPy4 επικοινωνούν. Συγκεκριμένα συνδέοντας τον αισθητήρα PM της Sensirion στον LoRa κόμβο αποστέλλονται string πληροφορίες προς την cloud πλατφόρμα με τις τιμές των ρύπων αλλά και επιπλέον στοιχεία όπως για παράδειγμα τη χρονική στιγμή της καταγραφής τους, τη μορφή του περιεχομένου τους και άλλα.



time	counter	port	payload	ppm_level
18:47:30	2032	2	payload: 50 4B 54 20 23 20	ppm_level: 32
18:47:26	2031	2	payload: 50 4B 54 20 23 1F	ppm_level: 31
18:47:22	2030	2	payload: 50 4B 54 20 23 1E	ppm_level: 30
18:47:18	2029	2	payload: 50 4B 54 20 23 1D	ppm_level: 29
18:47:14	2028	2	payload: 50 4B 54 20 23 1C	ppm_level: 28
18:47:10	2027	2	payload: 50 4B 54 20 23 1B	ppm_level: 27
18:47:06	2026	2	payload: 50 4B 54 20 23 1A	ppm_level: 26
18:47:02	2025	2	payload: 50 4B 54 20 23 19	ppm_level: 25
18:46:58	2024	2	payload: 50 4B 54 20 23 18	ppm_level: 24

Εικόνα 46: Λήψη δεδομένων με LoRa στο cloud ειδικά για LoRa consoles - MQTT Broker “The Things Network”

Από τις καταγραφές των δεδομένων στο TTN παρατηρούμε ότι:

- Οι τιμές ppm του αισθητήρα αποστέλλονται με ρυθμό 10sec από το πρώτο LoPy4 (LoRa node) στο LoPy4 gateway με LoRa.
- Τα δεδομένα με WiFi οδεύουν στο διαδίκτυο με κωδικούς ασφαλείας, για να συγκεντρωθούν στο cloud σε κατάλληλο MQTT Broker ελεύθερου περιβάλλοντος LoRa consoles, με όνομα “The Things Network ή αλλιώς TTN.
- Τα δεδομένα συλλέγονται στην πλατφόρμα του TTN με Χρονικό αλλά και Γεωγραφικό προσδιορισμό.
- Η μορφή τους είναι αρχικά HEX όπου με κατάλληλο κώδικα JSON (JavaScript Object Notation) μετατρέπονται σε αναγνωρίσιμη δεκαδική τιμή με όνομα : **ppm level**.

Εδώ προκύπτει μια πρόκληση με την μορφή των δεδομένων όσον αφορά στην κωδικοποίηση των τιμών στο επίπεδο του sensor node για να ομαδοποιούνται, να συμπιέζονται και να αποστέλλονται σε κατάλληλη κωδικοποιημένη μορφή στο TTN ώστε να είναι αναγνώσιμα στο επίπεδο του frontend πράγμα που χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

4.2 Μεταφορά των μετρήσεων σε βάση δεδομένων

Με την απλή μορφή της καταγραφής των δεδομένων, μπορούμε να αποφανθούμε σχετικά με την εξέλιξη των φυσικών φαινομένων που καταγράφουν. Για να αξιοποιήσουμε περαιτέρω τα δεδομένα ώστε να προσδώσουν επιπλέον συγκριτικά οφέλη αξιοποίησης

όπως στατιστικές αναλύσεις, γραφήματα εξέλιξης των φαινομένων και άλλα, οι μετρούμενες τιμές μεταφέρονται σε ευέλικτες βάσεις δεδομένων όπως την influx.

4.2.1 Διασύνδεση της βάσης δεδομένων Influx με το TTN μέσω πλατφόρμας Telegraf

Η μεταφορά των καταγεγραμμένων μετρήσεων από το cloud της TTN πλατφόρμας στην βάση δεδομένων Influx περνά από ένα ενδιάμεσο στάδιο διασύνδεσης του TTN με την εφαρμογή telegraf. Η τελευταία συνδέεται ως εξωτερική εφαρμογή και αντλεί τα δεδομένα από το TTN με ασφάλεια.

Για να υλοποιηθεί η ασφαλής σύνδεση με το TTN απαιτούνται τα εξής διαπιστευτήρια που μπορούμε να δούμε στην εικόνα 58:

- Το όνομα και η διεύθυνση του broker στον οποίο αποθηκεύονται τα δεδομένα
- ένα Username που δεν είναι άλλο από το application ID και
- ένα Password που είναι το application access key



Τα στοιχεία των διαπιστευτηρίων εμφανίζονται στο TTN ακριβώς για την σύνδεση της εφαρμογής με άλλη πλατφόρμα με ασφάλεια. Το default access key κλειδί παράγεται μοναδικά για κάθε συσκευή στο TTN.

Τα δεδομένα αντλούνται από την

Εικόνα 47: Διαπιστευτήρια σύνδεσης του TTN με την εφαρμογή telegraf πλατφόρμα TTN προς το Plugin του Telegraf ώστε να αναζητά το URL του TTN με τα κατάλληλα διαπιστευτήρια, για να αποθηκευτούν τελικά στην βάση δεδομένων Influx. Για να συμβεί αυτό, παραμετροποιήθηκε η είσοδος της βάσης με το Input plugin της telegraf, για MQTT, σε περιβάλλον Ubuntu Linux, σε συγκεκριμένο topic,.

Πιο συγκεκριμένα στον φάκελο διαμόρφωσης του Telegraf (telegraf.conf) συμπληρώθηκε κατάλληλος κώδικας απόσπασμα του οποίου παρατίθεται αμέσως παρακάτω:

```
[[inputs.mqtt_consumer]]
servers = [ "tcp://eu.thethings.network:1883" ] ## servers = ["eu.thethings.network:1883"]
qos = 0 -- ποιότητα της υπηρεσίας βασική
topics = [ "sensors/#", ] -- το topic σύνδεσης MQTT
client_id = "ttn" -- κλειδιά ασφαλείας
username = "lory4testairquality"
password = "ttn-account-v2.1xbuq3mk7E5Unz-XXY4Oq8ZlI3Ac3sAaKfY0b8cCk"
data_format = "json" -- σε JavaScript Object Notation
```

Κατά την φάση της δοκιμής ο κώδικας τρέχει μέσα από terminal για να ενσωματωθεί στο τέλος στο config.conf του προγράμματος telegraf. Το αποτέλεσμα είναι όπως στην παρακάτω εικόνα.

```

nikos@ubuntu:/etc/telegraf$ telegraf --config /etc/telegraf/sensorsconf2.conf
2020-12-21T14:36:19Z I! Starting Telegraf 1.16.3
2020-12-21T14:36:19Z I! Loaded inputs: cpu disk diskio mem mqtt_consumer net processes swap system
2020-12-21T14:36:19Z I! Loaded aggregators:
2020-12-21T14:36:19Z I! Loaded processors:
2020-12-21T14:36:19Z I! Loaded outputs: influxdb v2
2020-12-21T14:36:19Z I! Tags enabled: host=ubuntu
2020-12-21T14:36:19Z I! [agent] Config: Interval:10s, Quiet:false, Hostname:"ubuntu", Flush Interval:10s
2020-12-21T14:36:20Z I! [inputs.mqtt_consumer] Connected [tcp://eu.thethings.network:1883]
^C2020-12-21T17:04:04Z I! [agent] Hang on, flushing any cached metrics before shutdown

```

Εικόνα 48 : Δοκιμή προσθήκης στο config αρχείου του telegraf - Περιβάλλον Atom.

4.2.2 Βάση Δεδομένων Influx

Μετά τη σύνδεση του TTN με το βασικό προγραμματιστικό εργαλείο Telegraf της βάσης δεδομένων InfluxDB, τα δεδομένα οδεύουν προς το InfluxDB instance αφού οριστούν οι παράμετροι εξόδου των δεδομένων της βάσης στο output plugin όπως φαίνεται στο παρακάτω απόσπασμα του κώδικα:

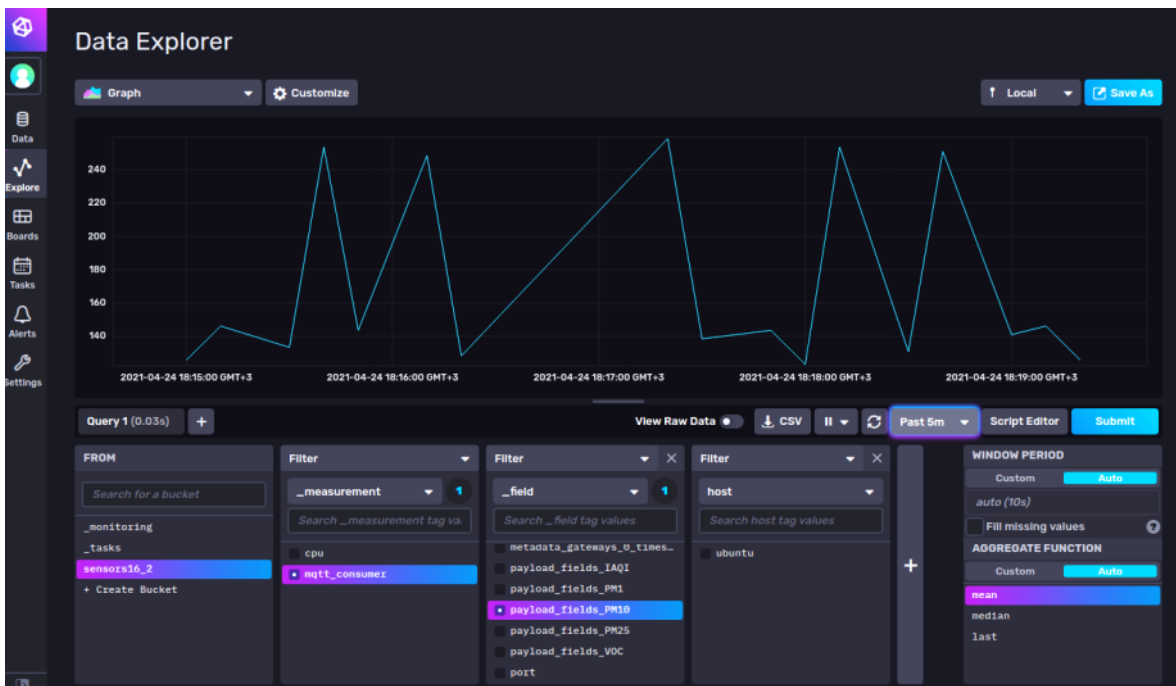
Output plugin

```

[[outputs.influxdb_v2]]
  urls = [ "http://localhost:8086" ]      -- urls για πρόσβαση από browser.
  token = "$INFLUX_TOKEN"              -- Token για διακρίβωση πρόσβασης.
  organization = "nikpelasensors"
  bucket = "sensorsbucket"             -- η βάση δεδομένων που εγγράφονται τα δεδομένα
  ## inputs from MQTT and TTN

```

Έτσι πλέον οι τιμές των ρύπων ως δεδομένα εμφανίζονται πλέον σε γραφήματα του περιβάλλοντος της influxdb, με καθορισμένη χρονοσειρά όπως στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 49: Τα δεδομένα με χρονική καταγραφή 5 λεπτών, στην βάση Influx με τον κώδικα JSON. Στο κάτω μέρος παρουσιάζονται τα πεδία αυτά των μετρούμενων μεγεθών που καταγράφονται στην βάση δεδομένων και επιλέγονται για να εμφανιστούν στο γράφημα.

4.2.3 Το περιβάλλον οπτικοποίησης της Grafana

Για ακόμη μεγαλύτερη ευελιξία επεξεργασίας οπτικοποίησης και προσπέλασης των τιμών που καταγράφονται από τους αισθητήρες επιλέχθηκε η σύνδεση της βάσης δεδομένων

influxDB με την API πλατφόρμα Grafana. Το Grafana ως μια ανοικτή και ευέλικτη διαδικτυακή εφαρμογή πολλαπλών πλατφορμών ανάλυσης και διαδραστικής οπτικοποίησης, μπορεί να εμφανίσει παραστατικά γραφήματα των δεδομένων που αποστέλλουν οι αισθητήρες σε ποικιλία μορφών, για την επεξεργασία τους αλλά και επιπλέον προσφέρει συνθήκες ειδοποιήσεων ιστού ως ευέλικτη πλατφόρμα API. Με κατάλληλο κώδικα και παραμετροποιήσεις του περιβάλλοντος της InfluxDB και του Grafana οπτικοποιούνται οι τιμές των ρύπων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες, όπως φαίνεται στην εικόνα 49.



Εικόνα 50: Τα δεδομένα σε γράφημα του Grafana. Αριστερά απεικονίζονται βάσει χρόνου οι τιμές των ρύπων PM2,5 και PM10 σε διάστημα πέντε λεπτών, όπου εμφανίζονται οι τρέχουσες, οι μέγιστες, οι ελάχιστες τιμές, η μέση τιμή των μετρήσεων και δεξιά οι τρέχουσες τιμές σε μορφή αναλογικού μετρητή με χρωματική απόδοση του εύρους των ζωνών μέτρησης.

4.3 Ασφάλεια και Ιδιωτικότητα

Η μετάδοση των δεδομένων από τον κόμβο με τον αισθητήρα ποιότητας αέρα μέχρι και τις εφαρμογές νέφους επεξεργασίας των δεδομένων, εξασφαλίζεται σε κάθε στάδιο σύζευξης.

4.3.1 Ασφάλεια προώθησης των δεδομένων από τον κόμβο LoRa Lopy node στην πύλη LoRa Gateway

Ως πιο αποτελεσματικό τρόπο πιστοποίησης της σύνδεσης των δύο LoRa συσκευών επιλέχθηκε η OTAA-Over The Air Authentication. Οι συσκευές που συνδέονται με πιστοποίηση OTAA εφοδιάζονται με κλειδιά ρίζας ή αλλιώς root keys. Στην ενεργοποίηση OTAA η συσκευή εκτελεί μια διαδικασία σύνδεσης με το δίκτυο LoRaWAN, όπου της ανατίθεται μια δυναμική διεύθυνση DevAddr, και ενεργοποιούνται κλειδιά ρίζας (root keys) για να αναδειχθούν τα κλειδιά συνεδρίας (session keys). Επομένως η διεύθυνση DevAddr και τα κλειδιά σύνδεσης ή αλλιώς συνεδρίας, αλλάζουν σε κάθε ενεργή σύνδεση, οπότε οι τερματικές συσκευές διαπραγματεύονται εκ νέου τους απαραίτητες πλαισίων και τα κλειδιά λειτουργίας σε κάθε νέα σύζευξη. Αντίθετα, με την διαδικασία ABP - Activation by Personalization, κατά την καταχώρηση μιας συσκευής στο The Things Stack, απαιτούνται κάθε φορά η μετάδοση στοιχείων όπως η καθυστέρηση RX1, του RX1 Data Rate Offset, του RX2 Data Rate Index, η συχνότητα RX2 και ένας κατάλογος με τις

προκαθορισμένες εργοστασιακές συχνότητες. Αν κάποια από αυτές τις πληροφορίες προσδιοριστεί λανθασμένα τότε πιθανότατα να αποτύχει η αποστολή είτε από είτε προς την πλατφόρμα. Ενώ αντίθετα με OTAA. Ως εκ τούτου, η διάρκεια ζωής μιας συσκευής OTAA δεν εξαρτάται από το εύρος του μετρητή πλαισίου [114] οπότε επιλέγεται ως μια ευέλικτη και αξιόπιστη λύση.

Ασφάλεια και ιδιωτικότητα δικτύου με το TTN [115]

Το The Things Network επιλέχθηκε γιατί είναι ένα πολύ ασφαλές δημόσιο δίκτυο που υποστηρίζει πραγματική κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο. Έτσι εξασφαλίζεται μια κρίσιμη παράμετρος των IoT επικοινωνιών της κακόβουλης ανίχνευσης των δεδομένων στο ενδιάμεσο των ζεύξεων (man-in-the-middle) όπου για επιπλέον ασφάλεια υποστηρίζει διαφορετικά κλειδιά κρυπτογράφησης των 128-bit για κάθε συνδεδεμένη συσκευή.

Η αποστολή και λήψη δεδομένων με LoRaWAN προσφέρει τελικά υψηλό επίπεδο ασφαλείας καθώς σύμφωνα με τα πρότυπα του LoRa, χρησιμοποιούνται έλεγχοι ακεραιότητας μηνυμάτων των 128 bit και το ωφέλιμο φορτίο των μηνυμάτων μεταξύ κάθε node και της συσκευής διασύνδεσης, κρυπτογραφείται πλήρως. Η κρυπτογράφηση υλοποιείται σύμφωνα με τα πρότυπο Advanced Encryption Standard (AES) [116] ορισμένο από το National Institute of Standards and Technology (NIST) των Ηνωμένων Πολιτειών το 2001 [117]. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να επιλέξουμε και να χρησιμοποιήσουμε τον δικό μας ιδιωτικό χειριστή με πραγματική κρυπτογράφηση από άκρο σε άκρο. Αυτή η επιλογή είναι πολύ αξιόπιστη αφού τα δεδομένα επικοινωνίας του δρομολογητή και του Broker δρομολογούνται βάσει των δημόσιων μεταδεδομένων (public metadata) αποκλείοντας οποιαδήποτε προσπάθεια αποκρυπτογράφησης του πραγματικού ωφέλιμου φορτίου.

Οι χρήστες χρησιμοποιούν το The Things Network μέσω προσωπικού λογαριασμού που αποθηκεύεται στον διακομιστή των λογαριασμών. Αυτοί οι λογαριασμοί αναγνωρίζονται από μοναδικό όνομα χρήστη ή μια διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και προστατεύονται από έναν κωδικό πρόσβασης.

Οι χρήστες δημιουργούν εφαρμογές και μπορούν να εξουσιοδοτήσουν την πρόσβαση άλλων εφαρμογών σε άλλους χρήστες. Οι αιτήσεις αναγνωρίζονται από ένα μοναδικό αναγνωριστικό εφαρμογής. Κάθε εφαρμογή έχει ένα ή περισσότερα κλειδιά πρόσβασης στα δεδομένα της εφαρμογής ή και για τη διαχείριση των συσκευών.

Αν προσθέσουμε και τα διαπιστευτήρια όπως `client_id`, `username`, `password` κ.λπ. που απαιτούνται σε κάθε στάδιο προώθησης των δεδομένων, όπως αναλύθηκε παραπάνω, από το TTN στο Telegraf, μετά στην βάση δεδομένων της Influx και τέλος στο Grafana, τότε πράγματι η επιλογή αυτής της διαδρομής είναι αξιόπιστη και αποτελεσματική.

Προσομοίωση δικτύου κόμβων αισθητήρων IAQ

Η προσομοίωση ενός δικτύου ασύρματων κόμβων IAQ, που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια θα μπορούσε σε πρώτη φάση να μας προσφέρει αξιοποιήσιμα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία τέτοιων δικτύων.

Ένα ελεύθερο λογισμικό προσομοίωσης δικτύου διακριτών συμβάντων για συστήματα Διαδικτύου είναι το ns-3. Πρόκειται για ελεύθερο λογισμικό σε περιβάλλον Linux, με άδεια χρήσης GNU GPLv2 η οποία διατίθεται ελεύθερα στο κοινό κυρίως για ερευνητική και



εκπαιδευτική χρήση και ανάπτυξη [https://www.nsnam.org/about/].

Εικόνα 51: Λογισμικό προσομοίωσης

Πιο συγκεκριμένα προσομοιώθηκε ασύρματο δίκτυο κόμβων αισθητήρων IAQ με LoRa, κάνοντας χρήση της λειτουργικής μονάδας ανοιχτού κώδικα LoRaWAN (https://apps.nsnam.org/app/lorawan/) για το NS3 σε γλώσσα C++. Εξετάστηκαν τρεις παραπλήσιες περιπτώσεις διάταξης των κόμβων στον χώρο, δηλαδή σενάρια ώστε να αξιολογηθεί το ποσοστό απωλειών πακέτων ή αλλιώς το Packet Delivery Ratio (PDR) κατά την μετάδοση των δεδομένων. Έτσι βγαίνουν συμπεράσματα του κατά πόσο είναι εφικτή η λειτουργία μιας τοπολογίας αστέρα τύπου LoRaWAN με ασύρματους αισθητήρες εσωτερικών χώρων σε πραγματικές κτιριακές κατασκευές.

5.1 Τοποθέτηση πύλης LoRaWAN - Σενάρια

Ως βάση του σεναρίου επελέγη μια συνηθισμένη περίπτωση 7όροφου κτιρίου από σκυρόδεμα, χωρίς μεταλλική ή πλαστική ενδιάμεση εγκατάσταση ή μηχανική κατασκευή ή άλλο εμπόδιο στο κτίριο, με διαστάσεις 100m X 100m x 21m και ύψος κάθε ορόφου τα 3m. Τέτοιο κτίριο θα μπορούσε να στεγάζει ένα νοσοκομείο, μία δημόσια υπηρεσία κ.λπ. στο οποίο θα μπορούσαν ενδεχομένως να εγκατασταθούν οι κόμβοι IAQ προκειμένου να αξιολογείται η ποιότητα του αέρα IAQ σε κάθε δωμάτιο. Με την παραδοχή των 100 δωματίων, ανά όροφο, κάθε δωμάτιο θα έχει διαστάσεις 10m X 10m X 3m. Κάθε δωμάτιο στο κτίριο έχει άνοιγμα πόρτας σε διάδρομο και παράθυρα στους εξωτερικούς τοίχους ή και στα ενδιάμεσα χωρίσματα με ελαφρά πετάσματα διαπερατά από ραδιοκύματα.

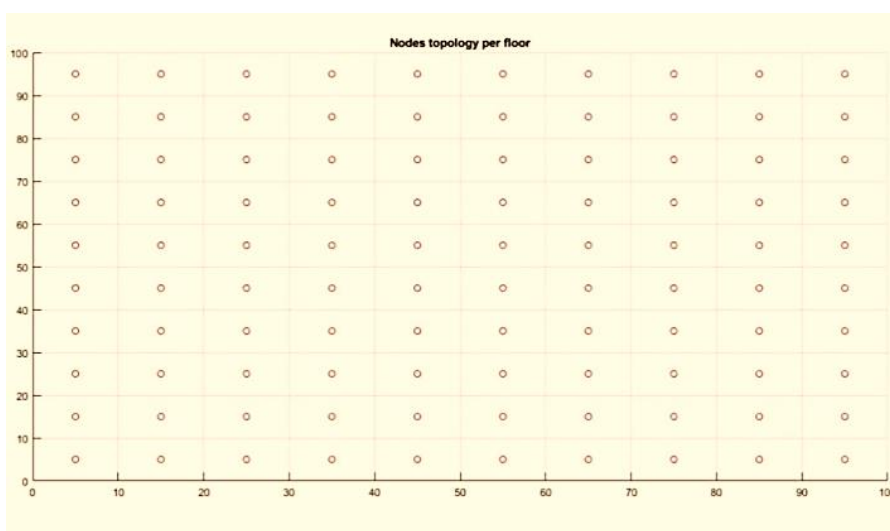
Στο κέντρο κάθε δωματίου τοποθετείται ένας κόμβος IAQ, σε ύψος από το δάπεδο τα 1,2 μέτρα, οπότε συνολικά ο αριθμός των εγκατεστημένων κόμβων στο κτίριο ανέρχεται στον αριθμό των 700. Στην εικόνα 51 απεικονίζεται η τοπολογία κάθε κόμβου IAQ ανά όροφο, ενώ στην εικόνα 52 η τοπολογία και των 700 κόμβων IAQ που εγκαταστάθηκαν στο κτίριο φαίνεται σε τρεις διαστάσεις.

Στη συνέχεια, κάθε κόμβος IAQ προγραμματίστηκε για ρυθμό δειγματοληψίας ενός αισθητήρα ανά 5 λεπτά. Ως ωφέλιμο φορτίο του κόμβου λαμβάνεται ένα μήνυμα μήκους 20 bytes για κάθε αισθητήρα, που περιέχει τον αριθμό του δωματίου και την τιμή που

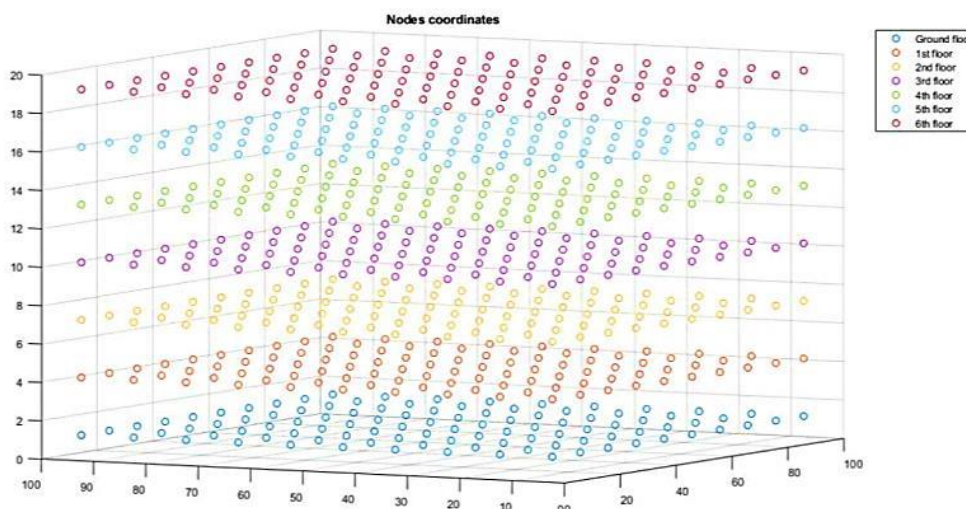
λαμβάνεται από τον αισθητήρα με ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων. Για παράδειγμα, για λήψη τιμής PM_{2,5} ίση με 33,67 μg/m³ στην αίθουσα 39, το μήνυμα ωφέλιμου φορτίου θα ήταν:

« Node:039,Val:0033.67 »

Προκειμένου να ακολουθήσουμε τους κανονισμούς της ΕU για τα LoRaWAN¹⁷ όσον αφορά στην επιλογή του συντελεστή Spreading Factor του κόμβου με βάση το ωφέλιμο φορτίο, το μέγεθος της κεφαλίδας του και τα μέγιστα επιτρεπόμενα μηνύματα ανά ημέρα για αυτό το ωφέλιμο φορτίο, αξιοποιήθηκε ένας διαδικτυακός Airtime Calculator (<https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/eu868/20>). Σύμφωνα με αυτό με συχνότητα μετάδοσης τα 5 λεπτά οι μεταδόσεις ανά 24 ώρες ανέρχονται σε 288 οπότε στους κόμβους μας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε Spreading Factor 7, καθώς επιτρέπονται έως και 417 μεταδόσεις με μήκος 20 bytes συμπεριλαμβανομένης της επικεφαλίδας των 13bytes για κάθε μήνυμα ανά ημέρα. Ενώ με Spreading Factor 8 επιτρέπονται έως και 224 μεταδόσεις ανά ημέρα για το ίδιο ωφέλιμο φορτίο και κεφαλίδα και κάθε Spreading Factor μετά από αυτό ακόμη λιγότερο. Το εύρος ζώνης ορίστηκε στα 125 KHz.



Εικόνα 52: Τοπολογία IAQ κόμβων ανά όροφο (κάτοψη του κτιρίου)



Εικόνα 53: Τοπολογία όλων των εγκατεστημένων IAQ κόμβων στο κτίριο.

¹⁷ <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/regional-parameters/>

Κατά την διαδικασία προσομοίωσης αξιοποιήθηκαν 3 διαφορετικά σενάρια με βάση 3 διαφορετικές θέσης εγκατάστασης της πύλης –gateway, προκειμένου να καταλήξουμε στην περίπτωση με τον υψηλότερο συντελεστή Παράδοσης Πακέτων - Packet Delivery Ratio (PDR) με τις λιγότερες δυνατές απώλειες αυτών.

- Στο πρώτο σενάριο η πύλη εγκαθίσταται εντός του κτιρίου, ακριβώς στο κέντρο του.
- Στο δεύτερο σενάριο η πύλη εγκαθίσταται στην οροφή του κτιρίου, σε συντεταγμένες 50,50 όπως βλέπουμε στην εικόνα 51, ενώ
- στο τρίτο και τελευταίο σενάριο η πύλη εγκαθίσταται στην οροφή ενός γειτονικού κτηρίου, στις αντίστοιχες 50,50 συντεταγμένες της τοπολογίας, που χωρίζεται από το κεντρικό κτήριο από δρόμο 7,5 μέτρων πλάτους.

Κάθε σενάριο προσομοιώνει τη συμπεριφορά του δικτύου σε διάρκεια 24 ωρών.

5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η προσομοίωση επιστρέφει το συνολικό ποσό των πακέτων που αποστέλλονται στο δίκτυο από κάθε κόμβο στην πύλη-gateway ή στις πύλες, (εάν έχουν εγκατασταθεί περισσότερες από μία), τον αριθμό των πακέτων που λαμβάνονται επιτυχώς, αλλά και :

- i. το ποσοστό των πακέτων που έχουν υποστεί παρεμβολή θορύβου,
- ii. το ποσοστό των πακέτων που χάθηκαν επειδή δεν υπήρχαν διαθέσιμες συνδέσεις με την πύλη λόγω “απασχολημένης” πύλης με άλλη σύνδεση και
- iii. ο αριθμός των πακέτων που χάθηκαν από την πύλη επειδή το σήμα τους ήταν κάτω από την ελάχιστη ευαισθησία λήψης της.

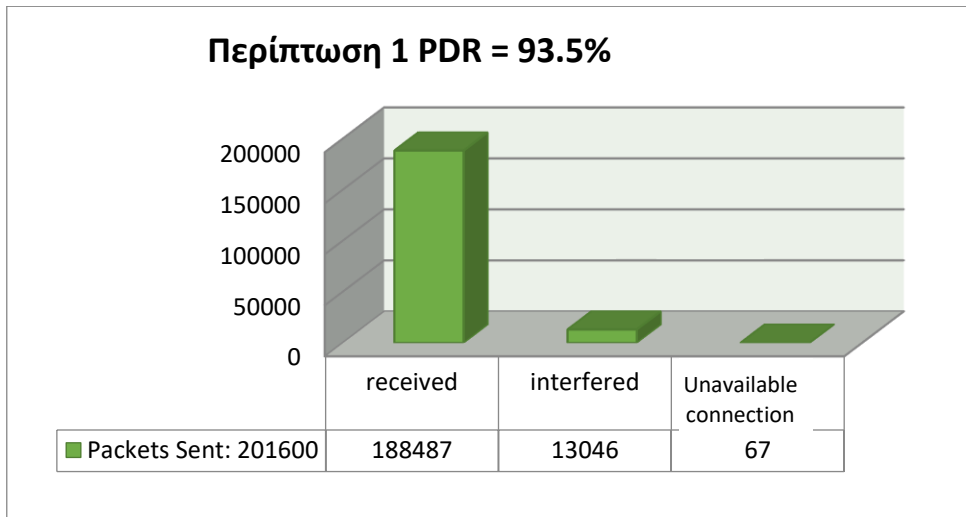
Μπορούμε να υπολογίσουμε την αναλογία παράδοσης πακέτων διαιρώντας τον αριθμό των πακέτων που ελήφθησαν επιτυχώς με το συνολικό ποσό των πακέτων που στάλθηκαν:

$$PDR = \frac{\text{Πακέτα που ελήφθησαν}}{\text{Πακέτα που στάλθηκαν}}$$

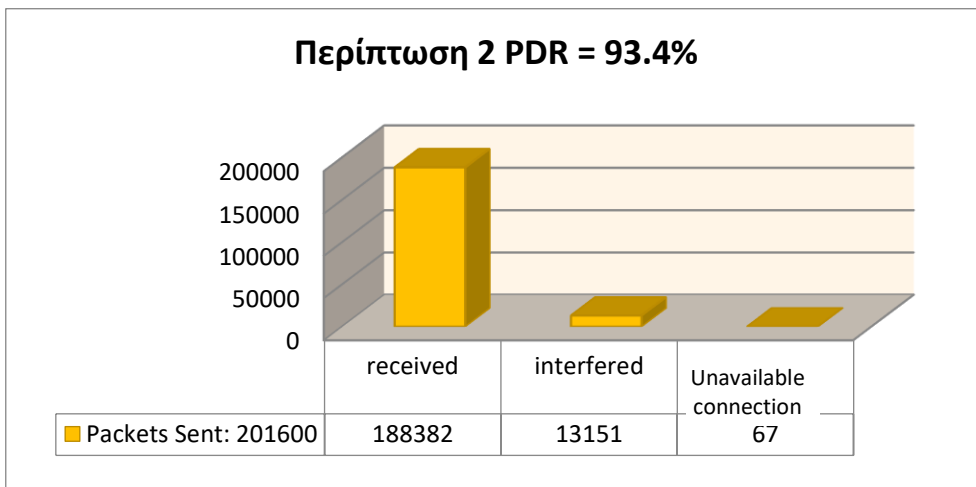
Για το πρώτο σενάριο, όπου η πύλη εγκαταστάθηκε στο γεωμετρικό κέντρο του κτιρίου, επιτύχαμε PDR ίσο με 93,5% όπως φαίνεται στην εικόνα 53 παρατηρούμε ότι το 6,5% όλων των μεταδόσεων υπόκεινται σε παρεμβολές και χάνονται, μόνο 67 από το σύνολο των 201600 μηνυμάτων χάνονται εξ’ αιτίας “απασχολημένης” πύλης μετάδοσης ενώ παρατηρούνται μηδενικές απώλειες από χαμηλή ευαισθησία.

Για το δεύτερο σενάριο, όπου η πύλη εγκαταστάθηκε στην οροφή του κτιρίου, το PDR που επιτεύχθηκε ήταν ίσο με 93,4%, όπως φαίνεται στην εικόνα 54. Εδώ, παρατηρείται απώλεια 6,5% λόγω παρεμβολών στη μετάδοση, όπου 67 από το σύνολο των 201600 μηνυμάτων του χάθηκαν και πάλι χάνονται εξ’ αιτίας “απασχολημένης” πύλης μετάδοσης ενώ και πάλι παρατηρούνται μηδενικές απώλειες από χαμηλή ευαισθησία.

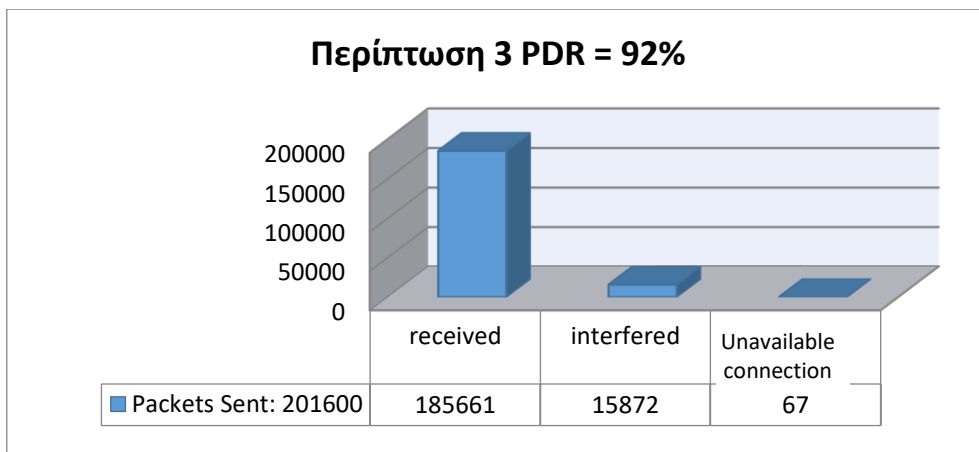
Τέλος, για το τρίτο και τελευταίο σενάριο με την πύλη στην οροφή γειτονικού κτηρίου, επιτεύχθηκε PDR ίσο με 92% όπως φαίνεται στην εικόνα 55. Παρατηρείται εδώ απώλεια πακέτων κατά 8% λόγω παρεμβολών, όπου 67 πακέτα χάθηκαν εντελώς χάνονται εξ’ αιτίας “απασχολημένης” πύλης μετάδοσης.



Εικόνα 54: Περίπτωση 1 – Η πύλη εγκατεστημένη στο κέντρο του κτιρίου



Εικόνα 54: Περίπτωση 2 - Η πύλη εγκατεστημένη στο δώμα του κτιρίου



Εικόνα 55: Περίπτωση 3 - Η πύλη εγκατεστημένη στο δώμα γειτονικού κτιρίου

Όπως μπορούμε να δούμε από τα παραπάνω αποτελέσματα, η πιο αξιόπιστη τοπολογία επιτυγχάνεται με την πύλη στο γεωμετρικό κέντρο του κτιρίου. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί απλά παρατηρώντας την τοπολογία των κόμβων και πύλης στην προσομοίωση, καθώς τα πακέτα σε αυτή την περίπτωση-σενάριο χρειάζονται να διεισδύσουν μέσα από λιγότερους τοίχους ή πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος για να φτάσουν στην πύλη από ό, τι στα άλλα

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πελαδαρινός Νικόλαος, AM msciot19007 93

δύο σενάρια. Επομένως μια τέτοια διάταξη κρίνεται επαρκώς αξιόπιστη αρκεί να τοποθετηθεί η πύλη στο γεωμετρικό κέντρο του κτιρίου για να καλύπτει όλους τους ασύρματους κόμβους αξιόπιστα με τις ελάχιστες απώλειες δεδομένων.

Αν τώρα λάβουμε υπόψη μας μεταλλικά ή ξύλινα ή πλαστικά, εμπόδια στην διάδοση των σημάτων υλικά που προφανώς αυτά θα συμβάλουν επιπλέον σε περισσότερες απώλειες λόγω διάδοσης, μπορούμε όμως να υποθέσουμε ότι σε κάθε περίπτωση η εγκατάσταση της πύλης στο γεωμετρικό κέντρο του κτιρίου θα έχει ως αποτέλεσμα τις λιγότερες απώλειες των πακέτων στο δίκτυο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Πλήθος λοιπόν από στοιχεία μελετών και ερευνητικών πονημάτων καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι **οι ρύποι απειλούν την υγεία των πολιτών** καθώς επιφέρουν καταστροφικά αποτελέσματα στην υγεία των πληθυσμών γενικά και ειδικά..

6.1 Ρύποι και υγεία

Ειδικά οι οργανικές πτητικές ύλες VOC's και τα αιωρούμενα υλικά σωματίδια τύπου PM, αυξάνουν τις φλεγμονές του αναπνευστικού, επιδεινώνουν καρδιακές παθήσεις συμβάλλουν κατά πολύ στην διάδοση παθογόνων μικροοργανισμών και ιών και στην εξάπλωση αερογενών λοιμώξεων όπως συγκεκριμένα του **Covid-19**. Είναι προφανές πώς στους κλειστούς χώρους που διαβιώνουν οι άνθρωποι τις περισσότερες ώρες της ημέρας πλέον, οι κίνδυνοι για την υγεία εντείνονται. Έτσι ορίζονται οδηγίες με στόχους για τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και στους εσωτερικούς χώρους, τόσο από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας όσο και από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Υγείας και λαμβάνονται μέτρα από όλες τις κυβερνήσεις των κρατών μελών της παγκόσμιας κοινότητας προς την κατεύθυνση αυτή.

Στην μελέτη αυτή ερευνήθηκε το κατά πόσο ένα « έξυπνο» **δίκτυο LPWAN** αισθητήρων ποιότητας αέρα **IAQ**, με **υποδομή πλατφόρμας IoT**, μέσα σε κλειστούς χώρους μπορεί να λειτουργήσει αποτελεσματικά ως ασπίδα έναντι των αερογενών μολύνσεων και γενικά να βελτιώσει την υγεία των ανθρώπων. Φάνηκε πως ένα τέτοιο έξυπνο, επεκτάσιμο και οικονομικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ποιότητας αέρα που ανιχνεύει τους ρύπους σε πραγματικό χρόνο, καταγράφει τις τιμές τους τις οποίες αξιοποιεί ποικιλοτρόπως για ενημέρωση, στατιστική ανάλυση, και κατάλληλη δράση ανάλογα με προγραμματισμένες λειτουργίες, μπορεί κατ' επέκταση να συμβάλλει ενεργά και αποτελεσματικά στον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στους εσωτερικούς χώρους.

Αποδεικνύεται ότι τέτοια δίκτυα διαχείρισης ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων είναι σε θέση να παρακολουθούν την ποιότητα του αέρα σε κτίρια με μεγάλη επιτυχία, όπως προκύπτει και από την προσομοίωση της παρούσας εργασίας. Έτσι με αυτά μπορεί να περιοριστεί η **διασπορά αερογενών λοιμώξεων** όπως του COVID-19 και γενικά να περιοριστούν οι πνευμονικές λοιμώξεις, οι χρόνιες αποφρακτικές πνευμονοπάθειες, οι καρδιαγγειακές παθήσεις και άλλες δυσάρεστες συνέπειες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης όπως προτείνεται και ορίζεται από τις οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας και της Ευρωπαϊκής επιτροπής για καθαρό αέρα με χρονικό ορίζοντα το 2030.

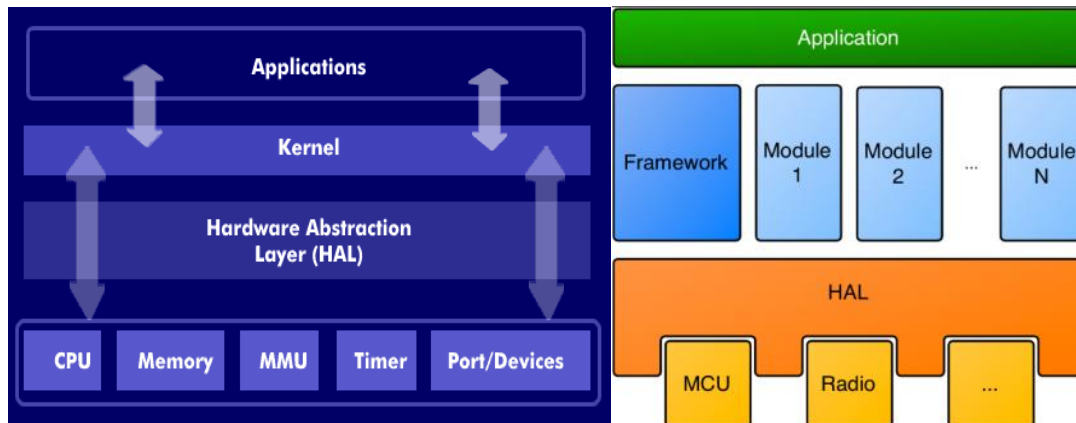
6.1.1 Μετρικές σχεδιασμού και στόχοι.

Η προτεινόμενη πλατφόρμα και αρχιτεκτονική υλοποίησης σχεδιάστηκε με κατάλληλες μετρικές σχεδιασμού (metrics) και στόχους (specifications) όπως:

Ανοιχτή αρχιτεκτονική για ελεύθερη πρόσβαση από την επιστημονική κοινότητα, ή αλλιώς Open source platform και

Ευρεία διαθεσιμότητα των υλικών και των εξαρτημάτων σε συνδυασμό με το χαμηλό τους κόστος.

Το διακύβευμα σε μια υλοποίηση ανοικτής αρχιτεκτονικής έγκειται στην αποδέσμευση του υλικού από το λογισμικό στο επίπεδο της εφαρμογής. Τα επίπεδα αφαίρεσης Hardware Abstraction Layer (HAL) υποστήριξης υλικού Board Support Package (BSP) για την αφαίρεση εξαρτήσεων υλικού, υλοποιούνται έτσι ώστε όλες οι συσκευές μιας συγκεκριμένης κατηγορίας των συσκευών υλικού να έχουν πρόσβαση μέσω πανομοιότυπων διεπαφών, ανεξάρτητα από την διεπαφή κάθε υλικού. Βάσει αυτών επιλέχθηκε η τεχνολογία LoRa, αντίστοιχοι αισθητήρες και πλατφόρμες υλισμικού.



Εικόνα 566: Γραφική απεικόνιση της αποδέσμευση του υλικού από το λογισμικό του επιπέδου της εφαρμογής.

Με την επιλογή έξυπνου δικτύου **LoRaWAN** τύπου LPWAN και τεχνολογίας **LoRa** επιτυγχάνονται τελικά τα εξής.

- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος, μεγάλη εμβέλεια, ευελιξία δικτύωσης με πολλά sensor nodes.
- Πράγματι η τεχνολογία LoRa προσφέρεται για μικρού κόστους, ανοικτής αρχιτεκτονικής, ευέλικτα και χαμηλής κατανάλωσης ασύρματα δίκτυα διατάξεων/κόμβων αισθητήρων.
- Το δίκτυο είναι επεκτάσιμο επειδή
 - μπορούν σε αυτά εύκολα να προστεθούν και άλλοι έξυπνοι αισθητήρες
 - Επιπλέον με την υιοθέτηση των πρωτοκόλλων PUB / SUB (MQTT) και την τεχνική **publish–subscribe** παρέχεται μεγαλύτερη επεκτασιμότητα και πιο δυναμική τοπολογία δικτύου με ελευθερία σύνδεσης πολλών ανεξάρτητων κόμβων, αφού η πολυπλοκότητα μετακινείται στα ανώτερα επίπεδα του νέφους, με αποτέλεσμα ασύρματους κόμβους χαμηλού κόστους.
- Είναι λοιπόν εφικτή η διασπορά πολλών μικρών διατάξεων αισθητήρων σε χώρους για να καλύψουν μεγάλα κτίρια.

6.1.2 Οι αισθητήρες

- Ανεξαρτησία από δυσεύρετο εξειδικευμένο υλικό και λογισμικό.

Η επιλογή και αξιολόγηση των αισθητήρων βασίστηκε επίσης στην ανεξαρτησία από δυσεύρετο εξειδικευμένο υλικό και λογισμικό, που θέτουν περιορισμούς στη λειτουργία και την χρήση των αισθητηριακών διατάξεων που μοιραία επιβαρύνουν αυτές με κόστος.

Επομένως οι αισθητήρες που μελετήθηκαν δεν χρειάζονται εξειδικευμένο εξοπλισμό για να λειτουργήσουν

- Τυπική συνδεσιμότητα.

Όλοι οι αισθητήρες που μελετήθηκαν μπορούν να συνδεθούν με τυπικές και διαδεδομένες τεχνολογίες σειριακής συνδεσιμότητας όπως I²C, SPI ή UART.

- Συνδυάζονται εύκολα λοιπόν με έτοιμες πλατφόρμες επεξεργασίας δεδομένων όπως το LoPy4.
- Ταχύτητα μετρήσεων και επεξεργασίας των τιμών.

Η ταχύτητα της επεξεργασίας τους υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις δικτύου αισθητήρων για λεπτομερή καταγραφή τιμών ποιότητα αέρα εσωτερικών χώρων κτιριακών εγκαταστάσεων. Όλοι οι αισθητήρες μπορούν να ανταποκριθούν θαυμάσια στον ρυθμό της ανά πέντε λεπτά της ώρας μετάδοσης των τιμών τους στο δίκτυο.

- Εύρος μετρήσεων, μετρούμενα μεγέθη, ακρίβεια και αξιοπιστία

Όπως μπορούμε να δούμε και από τους πίνακες 18 έως 20, οι αισθητήρες τελικά διαθέτουν αρκετά διευρυμένη ποικιλία μετρούμενων ρύπων με μεγάλο εύρος τιμών.

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που παρέχονται από τους κατασκευαστές, η συντριπτική πλειονότητα των αισθητήρων που δοκιμάστηκαν, πράγματι παρέχουν αξιόπιστες και ακριβείς μετρήσεις για αέρια, PM και άλλες φυσικές τιμές, συνδυάζοντας ακόμη και αυτές τις μετρήσεις για τον άμεσο υπολογισμό του παράγοντα ποιότητας αέρα IAQ.

Εμφανίζουν μικρές αποκλίσεις των μετρήσεων ενώ κάποιοι αντισταθμίζουν τους παράγοντες γήρανσης με έξυπνους αλγόριθμους. Η έκθεση σε αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες, σε χημικές ουσίες, η γήρανση και η απόκλιση της ακρίβειας της μέτρησης λαμβάνονται σοβαρά υπόψη. Η αντοχή τους στην επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων.

- Διαθεσιμότητα στην αγορά, φυσικά χαρακτηριστικά και κόστος

Αισθητήρες IAQ πλέον διατίθενται ευρέως ολόένα και περισσότεροι στην αγορά, μορφής στερεάς κατάστασης. Το μικρό τους μέγεθος με χαμηλό βάρος και χαμηλό κόστος συνδυάζονται εποικοδομητικά για πιο προηγμένες, χαμηλού κόστους, αυτόνομες και ελαφριές συσκευές ελέγχου ποιότητας αέρα, όπως απαιτείται στις εφαρμογές IoT.

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

Η χαμηλή κατανάλωση σε συνδυασμό με την χαμηλή τάση τροφοδοσίας είναι το στοίχημα όλων των κατασκευαστών που εγγυάται ακόμη και λειτουργία με μπαταρίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

- Οι προδιαγραφές των αισθητήρων ανταποκρίνονται στα πρότυπα και τα όρια των IAQ index του ΠΟΥ και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής υγείας.

6.1.3 Πλατφόρμες επεξεργασίας υλικού.

- Υλοποιήθηκε και λειτούργησε απρόσκοπτα με πολύ καλά αποτελέσματα ένας συνδυασμός sensor node και gateway απλά και μόνο με χρήση δύο διατάξεων της πλατφόρμας LoPy4 της εταιρείας Pycom. Παρατηρήθηκε

- ευστάθεια συστήματος στον χρόνο χωρίς επανεκκινήσεις και
- μικρό επικοινωνιακό φορτίο.

- Λειτούργησαν τα τρία κανάλια των διαθέσιμων 8(+2) των προδιαγραφών LoRa χωρίς όμως να περιοριστεί η λειτουργικότητα του συνδυασμού λόγω περιορισμένου εύρους περιεχομένου των πακέτων LoRa.

- Αυτά είναι υλικά ευρέως διαθέσιμα στην αγορά σε προσιτή σε τιμή πολύ χαμηλότερα από έτοιμες εμπορικές εφαρμογές LoRa gateway's.

- Ο προγραμματισμός και η παραμετροποίηση της πλατφόρμας LoPy4 είναι προσιτός στην βάση της ανοικτής αρχιτεκτονικής και υποστηρίζεται από την ανοικτή κοινότητα.

- Η κατανάλωση ενέργειας παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα τέτοια που θα μπορούσε να υποστηριχθεί ακόμη και από μπαταρίες με μεγάλη αυτονομία.

- Πράγματι με τις διατάξεις LoPy4 τα δεδομένα δρομολογούνται απευθείας σε πλατφόρμες cloud για επεξεργασία, με δυνατότητα μεγάλης διασποράς πολλών μικρών διατάξεων αισθητήρων σε μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα.

- Με την προσομοίωση διαπιστώθηκε η αξιοπιστία τέτοιου δικτύου αρκεί η gateway να τοποθετηθεί στο γεωμετρικό κέντρο του κτιρίου ή στην χειρότερη περίπτωση στο δώμα. Έτσι οι απώλειες των πακέτων προς το cloud μένουν σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

6.1.4 Διαχείριση δεδομένων

- Τα δεδομένα των ασύρματων κόμβων συλλέγονται σε βάση δεδομένων, αποθηκεύονται, καταγράφονται περνούν από επεξεργασία και οπτικοποιούνται στο cloud χωρίς υπολογιστική ισχύ στο σημείο ελέγχου.

- Τελικά τα δεδομένα των αισθητήρων συνοδεύονται και από πληροφορίες γεωπροσδιορισμού και χρονικής σήμανσης που ορίζονται πάλι στις πλατφόρμες και διακομιστές του cloud όπως το TTN.

- Έτσι το payload παραμένει μικρό αφού το timestamp δεν αποστέλλεται.
- Είναι αξιοποιήσιμες οι μετρήσεις που προκύπτουν από τέτοιους αισθητήρες όπως είδαμε από τα γραφήματα της βάσης δεδομένων Influxdb και το περιβάλλον του Grafana.

6.1.5 Ασφάλεια

- Διαπιστώνεται πως η μεταφορά των δεδομένων από τον χώρο του ασύρματου κόμβου μέσω gateway και μετά στο cloud είναι ασφαλής.

- Τα σχήματα LoRaWAN εξασφαλίζουν κρυπτογράφηση ασφαλείας AES128 bit από άκρο σε άκρο, οπότε και διασφαλίζουν και βελτιώνουν με κάθε τρόπο, τη μετάδοση των δεδομένων στο σύνολό τους.
- Άλλωστε σε κάθε βήμα αποστολής των δεδομένων αυτά προστατεύονται με ποικίλες τεχνικές.

6.1.6 Ενέργεια

Τόσο οι αισθητήρες, όσο και τα LoPy σχεδιάστηκαν για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Είναι εφικτή η χρήση μπαταριών για την τροφοδοσία των ασύρματων κόμβων και μάλιστα για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Επιπλέον η επεξεργασία των δεδομένων δεν γίνεται τοπικά αλλά στο cloud οπότε οι καταναλώσεις παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα

Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή έλεγχου IAQ που μελετάται υποστηρίζει κτιριακές εγκαταστάσεις με διαρκή τροφοδοσία από το δίκτυο οπότε η αυτονομία με μπαταρίες δεν είναι κρίσιμη αλλά ένα δυνητικό πλεονέκτημα στα πλαίσια της εξοικονόμησης ενέργειας..

6.2 Προτάσεις διέξοδοι και προοπτικές

Όπως αναλύθηκε αρκετά διεξοδικά οι μετρούμενες τιμές των ασύρματων αισθητήρων που μεταφέρονται στις πλατφόρμες για επεξεργασία εμφανίζονται σε πολύ απλή μορφή και απομονωμένες ανά τιμή. Εδώ προκύπτει μια πρόκληση με την μορφή των δεδομένων όσον αφορά στην κωδικοποίηση των τιμών τους, στο επίπεδο του sensor node για να ομαδοποιούνται, να συμπιέζονται και να αποστέλλονται αποδοτικότερα σε κατάλληλη κωδικοποιημένη μορφή στο TTN ώστε να είναι ορθά αναγνώσιμα στο επίπεδο του frontend και ακόμη πιο μικρά σε μέγεθος για μικρό payload στο δίκτυο.

Υπάρχουν έτοιμες cloud πλατφόρμες με διαθέσιμες Διεπαφές Προγραμματισμού Εφαρμογών ή αλλιώς στα αγγλικά Application Programming Interface (API) με προκαθορισμένα δομικά στοιχεία που μετατρέπουν και μορφοποιούν κατάλληλα τέτοια δεδομένα για να είναι εύκολα διαχειρίσιμα από αρκετές εφαρμογές. Τέτοιες είναι το Azure που υποστηρίζει η Microsoft, το Smartbear, το Google Cloud Platform και άλλες.

Δυστυχώς όμως αυτές οι υπηρεσίες επιβαρύνουν με κόστος τους χρήστες και τους δεσμεύουν στα πλαίσια της κλειστής αρχιτεκτονικής τους. Επομένως στα πλαίσια της ανοικτής αρχιτεκτονικής απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση .

Η συμπεριφορά των αισθητήρων όσον αφορά στην αξιοπιστία των μετρήσεων και την αντοχή τους στον χρόνο ή σε εχθρικά περιβάλλοντα δεν διαπιστώθηκε με ερευνητικές πρακτικές. Λόγω των συνθηκών (εγκλεισμός λόγω CoVid-19) στάθηκε αδύνατη η διακρίβωση των αισθητήρων σε κατάλληλο εργαστήριο, με κατάλληλο εξοπλισμό ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο αξιόπιστες και ακριβείς είναι οι μετρήσεις των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Αυτό θα ήταν ωφέλιμο να γίνει μελλοντικά ώστε να διαπιστωθεί το κατά πόσο ακριβώς μπορούμε να εμπιστευθούμε υλοποιήσεις IAQ με αισθητήρες χαμηλού κόστους σε πραγματικές συνθήκες.

Τέλος Θέματα ασφάλειας και πιστοποίησης των μετρήσεων με τεχνολογία BLOCKCHAIN θα ήταν χρήσιμο να μελετηθούν μελλοντικά για μεγαλύτερα επίπεδα ασφάλειας ως Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πελαδαρινός Νικόλαος, AM msciot19007

εναλλακτική λύση ακόμη και με χρήση νέων τεχνολογιών όπως NB-IOT, με ενσωματωμένα μεγαλύτερα επίπεδα ασφάλειας.

6.3 Προτάσεις που αφορούν την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων της έρευνας.

Ένας βασικό στόχος της παρούσας μελέτης και έρευνας ήταν η ανάπτυξη ενός σταθερού, ασφαλούς, χαμηλής κατανάλωσης και ισχύος, επεκτάσιμου ασύρματου δικτύου LoRaWAN, για την παρακολούθηση IAQ, ενημέρωση και ανατροφοδότηση σε πραγματικό χρόνο.

Μέσα από την πρόταση ενός τέτοιου υλοποιήσιμου έξυπνου ασύρματου δικτύου αισθητήρων με υποδομή πλατφόρμας IoT, για σκοπούς διαχείρισης ποιότητας αέρα εσωτερικών χώρων προκύπτει αβίαστα η ιδέα της παρακολούθηση της ποιότητας αέρα σε κλειστούς χώρους όπως:

- Υγειονομικού ενδιαφέροντος όπως ιατρεία, αναρρωτήρια, αίθουσες αναμονής νοσοκομείων, δωμάτια ασθενών και χειρουργεία. Σε τέτοιους χώρους ο κίνδυνος μετάδοσης λοιμώξεων είναι ιδιαίτερα αυξημένος όπως επίσης απαιτούνται αυξημένα επίπεδα εγρήγορσης και συγκέντρωσης και αποδοτικότητας από τους επαγγελματίες του χώρου για να προσθέσουμε την καλή διάθεση που χρειάζονται όλοι μα ιδιαίτερα οι ασθενείς που εξασφαλίζει ο καθαρός αέρας σε κλειστούς χώρους.

- Τα σχολεία και τα πανεπιστήμια που συγκεντρώνουν μεγάλο αριθμό ατόμων σε κλειστές αίθουσες από διαφορετικά περιβάλλοντα επίσης είναι εστίες μετάδοσης αερογενών λοιμώξεων. Μα για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα μπορούσαν να εξασφαλίζουν με τέτοια δίκτυα IAQ καθαρό αέρα στις αίθουσες διδασκαλίας τα αμφιθέατρα ή τα γραφεία.

- Αντίστοιχα οφέλη μπορούν να αποκομίσουν οι επαγγελματικοί χώροι, οι βιοτεχνίες, οι βιομηχανίες και οι κατοικίες που στεγάζουν σε κλειστούς χώρους τις περισσότερες ώρες του 24ώρου ανθρώπους με κίνδυνο εξάπλωσης μολύνσεων στον αέρα και πτώση της αποδοτικότητάς τους.

- Με την πάροδο του χρόνου, τα αθροιστικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσθήκη αναλυτικών στοιχείων στα κτίρια που σχετίζονται με τον ατμοσφαιρικό αέρα, στα πλαίσια του Building Information Modelling (BIM) και Building Management System (BMS). Έτσι θα ανέρχεται η προστιθέμενη αξία του ακινήτου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ

Βιβλιογραφία – Πηγές στην ελληνική γλώσσα

- 123 Α. Φελλόπουλος Αναστάσιος και Σπύρου Μαρία με επιβλέποντα τον Δρ. Σταύρο Βολογιαννίδη, «πτυχιακή εργασία που αφορά την κατασκευή ενός τρίτροχου κινούμενου ρομπότ με πλατφόρμα Arduino,» ΤΕΙ Σεργίων.

Βιβλιογραφία – Πηγές σε ξένες γλώσσες

- [1] E.P.A., «Particulate Matter (PM) Pollution,» (accessed on 22 May 2020). [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM> (accessed on 22 May 2020).
- [2] N. Bai, M. Khazaei, S. van Eeden και I. Laher, «Bai, N.; Khazaei, M.; van Eeden, S.F.; Laher, I. The pharmacology of particulate matter air pollution-induced cardiovascular dysfunction.,» *Pharmacol.* , pp. 113, 16–29 [CrossRef] [PubMed], 2007.
- [3] C. Tseng, J. Wang και M. Chao, «Causation by Diesel Exhaust Particles of Endothelial Dysfunctions in Cytotoxicity, Pro-inflammation, Permeability, and Apoptosis Induced by ROS Generation.,» *Cardiovasc. Toxicol.* , pp. 17, 384–392. [CrossRef] [PubMed] , 2017, .
- [4] F. Cassee, N. Mills και D. Newby, «Cassee, F.R.; Mills, N.L.; Newby, D.E. Cardiovascular Effects of Inhaled Ultrafine and Nano-Sized Particles;» *John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2011.* .
- [5] WHO, «Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future,» σε *ISBN 978 92 890 5230 6*, Copenhagen, 2017.
- [6] eea.europa.eu, «European Air Quality Index /Viewer,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://airindex.eea.europa.eu/Map/AQI/Viewer/>.
- [7] ec.europa.eu, «environment/air/quality/index,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/index.htm>.
- [8] london.gov.uk, «air_quality_monitoring_guidance_january_2018,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.london.gov.uk/sites/default/files/air_quality_monitoring_guidance_january_2018.pdf.
- [9] Y. Li, S. Duan, I. Yu και T. Wong, «Multi-zone modeling of probable SARS virus transmission by airflow between flats in Block E, Amoy Gardens.,» *Indoor Air* , pp. 15, 96–111. [CrossRef] , 2005.
- [10] grandviewresearch.com, «Air Purifier Market Size, Share & Trends Analysis Report By Technology (HEPA, Activated Carbon, Ionic Filters), By Application (Commercial, Residential, Industrial), By Region, And Segment Forecasts, 2021 – 2028 <https://www.grandviewresearch.com/industry>,» grandviewresearch, 2021 – 2028 . [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry>.
- [11] «Philips,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.philips.com.au/c-m-ho/air-purifier-and-air-humidifier>.
- [12] Libelium, «Libelium IoT solutions,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.libelium.com/> .
- [13] vaisala, «Air Quality Vaisala AQT410,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.vaisala.com/en>.
- [14] Bosch-sensortec, «bosch-sensortec.com/,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.bosch-sensortec.com/>.
- [15] S. faris. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.hackster.io/Salmanfarisvp/air-quality-monitoring-station-with-wio-terminal-6ef85f> .
- [16] S. K. N. C. H. & H. Choi, «Micro sensor node for air pollutant monitoring: hardware and software issues.,» *Sensors (Basel, Switzerland)*,, pp. 9(10), 7970–7987. <https://doi.org/10.3390/s91007970>.
- [17] C. B. a. S. A. Moraru, «Ensuring Comfort in Office Buildings: Designing a KNX Monitoring and Control

- System,» *2011 Seventh International Conference on Intelligent Environments*, pp. 222-229, doi: 10.1109, 2011.29..
- [18] WHO, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.who.int/ceh/publications/air-pollution-child-health/en/> (accessed on 22 May 2020).].
- [19] WHO, «Data and statistics, online,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/data-and-statistics>.
- [20] ECEU, «Towards Cleaner Air Scientific Assessment Report 2016,» 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://unece.org/environment-policy/publications/towards-cleaner-air-scientific-assessment-report-2016>.
- [21] WHO, «Air Quality Guidelines,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2017/evolution-of-who-air-quality-guidelines-past,-present-and-future-2017>.
- [22] E. E. Agency, «Themes-air,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eea.europa.eu/themes/air>.
- [23] E. E. Committee, «Πρόγραμμα Καθαρός αέρας - Clean Air E.C., "A Clean Air Programme for Europe",» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://ec.europa.eu/environment/air/index_en.htm.
- [24] CELEX_52013DC0918_EL_8, «* COM/2013/0918 final *,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52013DC0918>.
- [25] K. A. γ. τ. Ευρώπη, «CELEX_52013DC0918_EL_TXT /* COM/2013/0918 final,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52013DC0918>.
- [26] S. Comunian, D. Dongo, C. Milani, P. J. S. Palestini, D. Dongo, C. Milani και P. Palestini, «Comunian, S.; Dongo, DAir Pollution and COVID-19: The Role of Particulate Matter in the Spread and Increase of COVID-19's Morbidity and Mortality. *Int. J. Environ. Res. Public*,» [Ηλεκτρονικό].
- [27] J. Carre, N. Gatimel, J. Moreau, J. Parinaud και R. Leandri, « Does air pollution play a role in infertility?: A systematic review.,» *Environ. Health* , pp. 16, 82. [CrossRef] [PubMed] , 2017.
- [28] M. Chin-Chan, J. Navarro-Yepes και B. E. p. a. r. f. f. n. d. A. a. P. d. F. C. N. 2. 9. 1. [Quintanilla-Vega, «. Environmental pollutants as risk factors for neurodegenerative disorders: Alzheimer and Parkinson diseases.,» . *Front. Cell Neurosci.*, pp. 9, 124. [CrossRef] , 2015.
- [29] C. Milani, P. Corsetto, F. Farina, L. Botto, E. Lonati, L. Massimino, A. Rizzo, A. Bulbarelli και P. Palestini, «Early evidence of stress in immortalized neurons exposed to diesel particles: The role of lipid reshaping behind oxidative stress and and inflammation.,» *Toxicology*, pp. 409, 63–72. [CrossRef] , 2018.
- [30] C. Milani, F. Farina, L. Botto, L. Massimino, E. Lonati, E. Donzelli, E. Ballarini, L. Crippa, P. Marmiroli, A. Bulbarelli και e. al., «Systemic Exposure to Air Pollution Induces Oxidative Stress and Inflammation in Mouse Brain, Contributing to Neurodegeneration Onset.,» *Int. J. Mol. Sci.* , pp. 21, 3699. [CrossRef] , 2018.
- [31] L. Naeher, M. Brauer, M. Lipsett, J. Zelikoff, C. Simpson, J. Koenig και K. Smith, «Woodsmoke health effects: A review.,» *Inhal. Toxicol.* , pp. 19, 67–106. [CrossRef] , 2007.
- [32] S. Steiner, C. Bisig, A. Petri-Fink και B. Rothen-Rutishauser, «Diesel exhaust: Current knowledge of adverse effects and underlying cellular mechanisms.,» *Arch. Toxicol.*, pp. 90, 1541–1553. [CrossRef] [PubMed], 2016.
- [33] A. Liati και P. Eggenschwiler, «Characterization of particulate matter deposited in diesel particulate filters: Visual and analytical approach in macro-, micro-and nano-scales.,» *Combust. Flame*, pp. 157, 1658–1670. [CrossRef] , 2010.
- [34] P. Jones και T. Higgenbottam, «Quantifying of severity of exacerbations in chronic obstructive pulmonary disease: Adaptations to the definition to allow quantification.,» *Proc. Am. Thorac. Soc.* , pp. 4, 597–601. [CrossRef] [PubMed] , 2007.
- [35] F. Farina, E. Lonati, C. Milani, L. Massimino, E. Ballarini, E. Donzelli, L. Crippa, P. Marmiroli, L. Botto, P. Corsetto και e. al., « In Vivo Comparative Study on Acute and Sub-acute Biological Effects Induced by Ultrafine Particles of Different Anthropogenic Sources in BALB/c Mice.,» *Int. J. Mol. Sci.*, pp. 20, 2805.

- [CrossRef] [PubMed] , 2019.
- [36] S. Lu, W. Zhang, R. Zhang, P. Liu, Q. Wang, Y. Shang, M. Wu, K. Donaldson και Q. Wang, «Comparison of cellular toxicity caused by ambient ultrafine particles and engineered metal oxide nanoparticles.,» *Part. Fibre Toxicol.* , pp. 12, 1–12. [CrossRef] [Pub, 2015.
- [37] P. Mantecca, M. Gualtieri, E. Longhin, G. Bestetti, P. Palestini, E. Bolzacchini και M. Camatini, «Adverse biological effects of Milan urban PM looking for suitable molecular markers of exposure.,» *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* , pp. 18, 635–641. [CrossRef] , 2018.
- [38] K. Kim, E. Kabir και S. Kabir, «A review on the human health impact of airborne particulate matter.,» *Environ. Int.* , pp. 74, 136–143. [CrossRef] [PubMed] , 2015.
- [39] P. Chen, F. Tsai, C. Lin, C. Yang, C. Chan, C. Young και C. Lee, « Ambient influenza and avian influenza virus during dust storm days and background days.,» *Environ. Health Perspect.*, pp. 118, 1211–1216. [CrossRef] [PubMed] , 2010.
- [40] W. Zhou, «The Coronavirus Prevention Handbook: 101 Science-Based Tips That Could Save Your Life. Skyhorse: 2020.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.overdrive.com/media/5308082/the-coronavirus-prevention-handbook> . [Πρόσβαση (accessed on 22 May 2020)].
- [41] F. Zhou, T. Yu, R. Du, G. Fan, Y. Liu, Z. Liu, J. Xiang, Y. Wang, B. Song, X. Gu και e. al., «Clinical course and risk factors for mortality of adult inpatients with COVID-19 in Wuhan, China: A retrospective cohort study.,» *Lancet*, pp. 395, 1054–1062., 2020.
- [42] H. Lei, Y. Li, S. Xiao, C. Lin, S. Norris, D. Wei, Z. Hu και S. Ji, «Routes of transmission of influenza A H1N1, SARS CoV, and norovirus in air cabin: Comparative analyses. *Indoor Air*,» , pp. 28, 394–403. [CrossRef] [PubMed] , 2018.
- [43] N. van Doremalen, T. Bushmaker, D. Morris, M. Holbrook, A. Gamble, B. Williamson, A. Tamin και J. Harcourt, «Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1.,» *N. Engl. J. Med.*, 2020.
- [44] L. Setti, F. Passarini, G. de Gennaro, A. Di Gilio, J. Palmisani, P. Buono, G. Fornari, M. Perrone, A. Piazzalunga, P. Barbieri και e. al., «Evaluation of the Potential Relationship between Particulate Matter (PM) Pollution and COVID-19 Infection Spread in Italy.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.simaonlus.it/wpsima/wp-content/uploads/2020/03/COVID_19_position-paper_ENG.pdf . [Πρόσβαση (accessed on 22 May 2020).].
- [45] M. Wei, H. Liu, J. Chen, C. Xu, J. Li, P. Xu και Z. Sun, «Effects of aerosol pollution on PM2.5-associated bacteria in typical inland and coastal cities of northern China during the winter heating season.,» *Environ. Pollut.* , pp. 262, 114188. [CrossRef], 2020.
- [46] A. Franzetti, I. Gandolfi, E. Gaspari, R. Ambrosini και G. Bestetti, «Seasonal variability of bacteria in fine and coarse urban air particulate matter.,» *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, pp. 90, 745–753. [CrossRef] , 2011.
- [47] C. Cao, W. Jiang, B. Wang, J. Fang, J. Lang, G. Tian, J. Jiang και T. Zhu, «Inhalable microorganisms in Beijing’s PM2.5 and PM10 pollutants during a severe smog event.,» *Sci. Environ. Sci. Technol.*, pp. 48, 1499–1507. [CrossRef] , 2014.
- [48] G. Chen, W. Zhang, S. Li, G. Williams, C. Liu, G. Morgan, J. Jaakkola και Y. Guo, «Is short-term exposure to ambient fine particles associated with measles incidence in China? A multi-city study.,» *Environ. Res.* , pp. 156, 306–311. [CrossRef] , 2017.
- [49] Q. Ye, J. Fu, J. Mao και S. Shang, «Haze is a risk factor contributing to the rapid spread of respiratory syncytial virus in children.,» *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, pp. 23, 20178–20185. [CrossRef] , 2016.
- [50] M. Carugno, F. Dentali, G. Mathieu, A. Fontanella, J. Mariani, L. Bordini, G. Milani, D. Consonni, M. Bonzini, V. Bollati και e. al., «PM10 exposure is associated with increased hospitalizations for respiratory syncytial virus bronchiolitis among infants in Lombardy,» *Environ. Res.*, pp. 166, 452–457. [CrossRef] [PubMed] , 2018.
- [51] M. Kampa και E. Castanas, « Human health effects of air pollution.,» *Environ. Pollut.* , pp. 151, 362–367. [CrossRef] [PubMed] , 2008.

- [52] e. publications, «EEA Air Quality in Europe. Report Number 10/2019.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>. [Πρόσβαση accessed on 22 May 2020].
- [53] Q. Di, Y. Wang, A. Zanobetti, Y. Wang, P. Koutrakis, C. Choirat, F. Dominici και J. Schwartz, «Air Pollution and Mortality in the Medicare Population.,» *N. Engl. J. Med.*, pp. 376, 2513–2522. [CrossRef] [PubMed], 2017.
- [54] R. Pansini και D. Fornacca, «Initial evidence of higher morbidity and mortality due to SARS-CoV-2 in regions with lower air quality. medRxiv 2020.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.04.20053595v2>. [Πρόσβαση (accessed on 22 May 2020)].
- [55] D. Fattorini και Regoli, « Role of the chronic air pollution levels in the COVID-19 outbreak risk in Italy.,» *Environ. Pollut.*, pp. 264, 114732. [CrossRef], 2020.
- [56] E. Conticini, B. Frediani και D. Caro, « Environ. Pollut.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: Conticini, E.; Frediani, B.; Caro, D. Can Atmospheric Pollution Be Considered a Co-Factor in Extremely High Level of SARS-CoV-2 Lethality in Northern Italy? *Environ. Pollut.* 2020. Available online: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7128509/>. (. [Πρόσβαση accessed on May 2020].
- [57] R. Pansini και D. Fornacca, « Higher Virulence of COVID-19 in the Air-Polluted Regions of Eight Severely Affected Countries. medRxiv 2020.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.30.20086496v1>. [Πρόσβαση (accessed on 20 May 2020)].
- [58] X. Wu, R. Nethery, M. Sabath, D. Braun και F. Dominici, «Exposure to Air Pollution and COVID-19 Mortality in the United States.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://projects.iq.harvard.edu/covid-pm..> [Πρόσβαση (accessed on 22 May 2020)].
- [59] L. Setti, F. Passarini, G. de Gennaro, A. Di Gilio, J. Palmisani, P. Buono, G. Fornari, M. Perrone, A. Piazzalunga, P. Barbieri και e. al., «Evaluation of the Potential Relationship between Particulate Matter (PM) Pollution and COVID-19 Infection Spread in Italy.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.simaonlus.it/wpsima/wp-content/uploads/2020/03/COVID_19_position-paper_ENG.pdf. [Πρόσβαση (accessed on 22 May 2020)].
- [60] ESA, «Coronavirus Lockdown Leading to Drop in Pollution across Europe.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel5P/Coronavirus_lockdown_leading_to_drop_in_pollution_across_Europe. [Πρόσβαση (accessed on 22 May 2020)].
- [61] Y. Zhu, J. Xie, F. Huang και L. Cao, «Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: Evidence from China.,» *Sci. Total Environ.*, pp. 727, 138704. [CrossRef] [PubMed].
- [62] A. Frontera, C. Martin, K. Vlachos και G. Sgubin, « Regional air pollution persistence links to COVID-19 infection zoning. J. Infect.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7151372>. [Πρόσβαση (accessed on 20 May 2020)].
- [63] J. Ciencewicki και I. Jaspers, «Air pollution and respiratory viral infection.,» *Inhal. Toxicol.*, pp. 19, 1135–1146. [CrossRef], 2007.
- [64] Y. Cui, Z. Zhang, J. Froines, J. Zhao, H. Wang, S. Yu και R. Detels, «Air pollution and case fatality of SARS in the People’s Republic of China: An ecologic study.,» *Environ. Health*, pp. 2, 15. [CrossRef], 2003.
- [65] P. Mantecca, G. Sancini, E. Moschini, F. Farina, M. Gualtieri, A. Rohr, G. Miserocchi, P. Palestini και M. Camatini, « Lung toxicity induced by intratracheal instillation of size-fractionated tire particles.,» *Toxicol. Lett.*, pp. Mantecca, P.; Sancini, G.; Moschini, E.; Farina, F.; Gualtieri, M.; Rohr, A.; Miserocchi, G.; Palestini, P.; Camatini, M. Lung toxicity induced by intratracheal instillation of size-fractionated tire particles. *Toxicol. Lett.* 2009, 189, 206–214. [CrossRef, 2009.
- [66] P. Kaan και R. Hegele, «Interaction between respiratory syncytial virus and particulate matter in guinea pig alveolar macrophages.,» *Am. J. Respir. Cell Mol. Biol.*, pp. 28, 697–704. [CrossRef], 2003.
- [67] S. Becker και J. Soukup, «Exposure to urban air particulates alters the macrophage-mediated inflammatory response to respiratory viral infection.,» *J. Toxicol. Environ. Health A*, pp. 57, 445–457,

- 1999.
- [68] K. e. al., «Advanced Gas Chromatography - Progress in Agricultural, Biomedical and Industrial Applications,» 2012, pp. Chap. 9 in Mass Spectrometry,.
- [69] T. K. 2. S. R. 4. ,. M. v. B. 2. U. S. 1. Carolin Rösch 1, «Relationship between sources and patterns of VOCs in indoor air,» *Atmospheric Pollution Research* 5 129T137, 2014.
- [70] R. L. J. S. J. S. J. B. D. Dodson, « Influence of basements, garages, and common hallways on indoor residential volatile organic compound concentrations.,» *Atmospheric Environment* 42,, p. 1569–1581 , 2008.
- [71] S. R. A. S. U. Matysik, «Spatial and temporal variation of outdoor and indoor exposure of volatile organic compounds in Greater Cairo.,» *Atmospheric Pollution Research* 1, p. 94–101., 2010.
- [72] B. S. G. C. C., «VOCs in industrial, urban and suburban neighborhoods, Part 1: Indoor and outdoor concentrations, variation, and risk drivers.,» *Atmospheric Environment* 42, p. 2083–2100, 2008b.
- [73] S. J. C. H. G. Batterman, « Migration of volatile organic compounds from attached garages to residences: A major exposure source.,» *Environmental Research* 104,, p. 224–240., 2007.
- [74] D. D. E. M. N. T. E. B. J. Missia, « Indoor exposure from building materials: A field study,» *Atmospheric Environment* 44,, p. 4388–4395..
- [75] B. O. W. R. O. f. E. c. t. d. o. t. W. g. The WHO European Centre for Environment and Health, «WHOair qualitye94535.pdf,» σε *Selected pollutants*, ISBN 978 92 890 0213 4.
- [76] M. B. Piotr Batoga, «Dynamic of Changes in Carbon Dioxide Concentration in Bedrooms,» *Procedia Engineering* 57 , p. 175 – 182, 2013.
- [77] N. I. f. O. S. a. H. (. 1994., « Documentation for Immediately Dangerous To Life or Health Concentrations (IDLHs): Carbon dioxide.,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/12438>. [Πρόσβαση 8 February 2013 2013].
- [78] M. o. L. a. S. P. Poland, «Decree of Ministry of Labour and Social Policy dated 29th November 2002 for highest permissible concentrations and intensities of harmful substances,» *Journal of Laws* 217, p. 1833 , 2002.
- [79] M. F. W. D. J. Apte, « Associations Between Indoor CO2 Concentrations and Sick Building Syndrome Symptoms in US Office Buildings: An Analysis of the 1994-1996 BASE Study Data, Indoor Air 10,» *Indoor Air* 10(4), pp. 246-257., pp. pp. 246-257., 2000.
- [80] A. D. 2. A. S. o. T. a. Materials, «Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation.,» West Conshohocken: American Society of Testing and Materials, West Conshohocken.
- [81] S. P. A. Emmerich, « State-of-the-Art Review of CO2 Demand Controlled Ventilation Technology and Application,» National Institute of Standards and Technology, 2001.
- [82] ec.europa.eu, «Air quality standards,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>.
- [83] ec.europa.eu, «Directive 2008/50/EC,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/directive.htm> .
- [84] europa.eu/legal-content, «"A Europe that protects: Clean air for all',» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?qid=1526552009832&uri=COM:2018:330:FIN>.
- [85] ec.europa.eu, «national air pollution emissions,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ec.europa.eu/environment/air/reduction/index.htm>.
- [86] ec.europa.eu/environment, «Air pollution from the main sources,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ec.europa.eu/environment/air/reduction/legislation.htm>.
- [87] eur-lex.europa.eu/legal-content, «"A Clean Air Programme for Europe" [Second Clean Air Outlook],» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2021%3A3%3AFIN>.

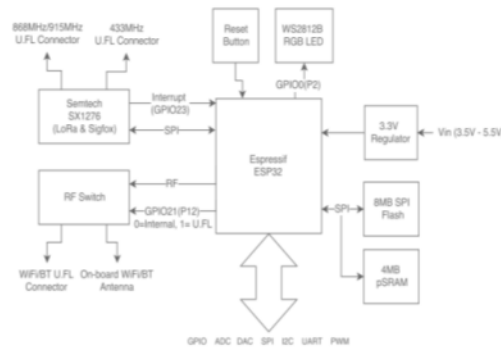
- [88] ec.europa.eu/environment/air/quality/zones, «zones and agglomerations,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/zones.htm>.
- [89] [eea.europa.eu](https://aqportal.discomap.eea.europa.eu/), «European Air Quality Portal,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://aqportal.discomap.eea.europa.eu/>.
- [90] [ec.europa.eu/environment/air/quality](https://ec.europa.eu/environment/air/quality/data_reporting.htm), «air quality data / online,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://ec.europa.eu/environment/air/quality/data_reporting.htm.
- [91] [eur-lex.europa.eu/legal-content](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:32008L0050), «Directive 2008/50/EC,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:32008L0050>.
- [92] [eur-lex.europa.eu](https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:023:0003:0016:EN:PDF), «Directive 2004/107/EC,» [Ηλεκτρονικό]. Available: Directive 2004/107/EC[<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:023:0003:0016:EN:PDF>].
- [93] [eur-lex.europa.eu](https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:335:0086:0106:EN:PDF), «Η Ευρωπαϊκή οδηγία 2011/850/EU,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:335:0086:0106:EN:PDF>.
- [94] [eea.europa.eu/products](https://aqportal.discomap.eea.europa.eu/products/submission-monitoring/utd-details/utd-details-report/?txCountryCode=GR), «EUROPEAN AIR QUALITY PORTAL, UTD DETAILS REPORT,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://aqportal.discomap.eea.europa.eu/products/submission-monitoring/utd-details/utd-details-report/?txCountryCode=GR>.
- [95] [ec.europa.eu/environment/air/pdf](https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/quality_by_country/EL_AirQualityZones_Current_opt.pdf), «07 EL_AirQualityZones_Current_opt.pdf,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/quality_by_country/EL_AirQualityZones_Current_opt.pdf.
- [96] [eea.europa.eu](https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index), «European Air Quality Index,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-index>.
- [97] B. -. Gesundheitsforsch, «Gesundheitsschutz 2007, 50:990–1005: Beurteilung von Innenraumluftkontaminationen mittels Referenz- und Richtwerten,» 2007.
- [98] [eea.europa.eu](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-quality-statistics), «Air Quality in Europe /air-quality-statistics,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-quality-statistics>.
- [99] M. W., «HEPA FILTERS Melvin W. First Harvard School of Public Health, Boston, Massachusetts,» *Journal of the American Biological Safety Association*, pp. pp. 33-42, 1998.
- [100] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/air-purifier-market>.
- [101] Sensirion, «multi-gas-humidity-and-temperature-module-svm30,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/multi-gas-humidity-and-temperature-module-svm30/>.
- [102] Sensirion, «environmental-sensors/particulate-matter-sensors-pm25,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/particulate-matter-sensors-pm25/>.
- [103] Omron, «components.omron,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://components.omron.com/product-detail?partNumber=B5W-LD0101-1%2F2>.
- [104] bosch, «bosch-sensortec,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/gas-sensors/bme680>.
- [105] [db-airmontech.jrc.ec.europa.eu](https://db-airmontech.jrc.ec.europa.eu/download/PMSENSOREVALUATIONREPORTEPA-600-R-14-464.PDF), «PMSENSOREVALUATIONREPORTEPA-600-R-14-464.PDF,» 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://db-airmontech.jrc.ec.europa.eu/download/PMSENSOREVALUATIONREPORTEPA-600-R-14-464.PDF>.
- [106] <https://lora-alliance.org/>.
- [107] <https://www.loriot.io/>.
- [108] <https://www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-homes>.
- [109] A. Jubin Sebastian E, «Test and Measurement of LPWAN and Cellular IoT Networks in a Unified Testbed,» *Institute of Reliable Embedded Systems and Communication Electronics (ivESK) Offenburg University of Applied Scie*, pp. Test and Measurement of LPWAN and Cellular IoT Networks in a Unified Testbed Jubin Sebastian E, Axel Sikora, Manuel Schappacher, Zubair Amjad Institute of Reliable Embedded Systems and Communication Electronics (ivESK) Offenburg University of Applied Scie.

- [110] thethingsnetwork.org, «lorawan - duty-cycle.html#maximum-duty-cycle],» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle.html#maximum-duty-cycle>].
- [111] L. Alliance, «LoRaWAN airtime calculator,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://avbentem.github.io/airtime-calculator/ttn/eu868/20>.
- [112] Pycom, «<https://docs.pycom.io/tutorials/networks/lora/lorawan-otaa/>».
- [113] Pycom, «<https://docs.pycom.io/tutorials/networks/lora/lorawan-nano-gateway/>».
- [114] thethingsindustries.com, « <https://www.thethingsindustries.com/docs/devices/abp-vs-otaa>».
- [115] «thethingsnetwork.org,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/network/security.html>.
- [116] J. D. a. V. Rijmen, « "AES Proposal: Rijndael" (PDF). Archived from the original (PDF) on February 3, 2007.,» 1999.
- [117] «"Announcing the ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES)" (PDF),» United States National Institute of Standards and Technology (NIST),, November 26, 2001.
- [118] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://atom.io/>.
- [119] microchip.com, «microchip.com/downloads,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega640-1280-1281-2560-2561-Datasheet-DS40002211A.pdf>.
- [120] arduino, «content.arduino.cc,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://content.arduino.cc/assets/Pinout-Mega2560rev3_latest.pdf.
- [121] microchip, «microchip.com/wwwproducts/en/ATmega2560,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega2560>.
- [122] T. Baseline, « Health and Environmental Impacts (Σενάριο αναφοράς στη θεματική στρατηγική για την ατμοσφαιρική ρύπανση: επιπτώσεις στην υγεία και στο περιβάλλον),» [Ηλεκτρονικό]. Available:) http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/tsap_impacts.pdf.
- [123] Α. Φελλόπουλος Αναστάσιος και Σπύρου Μαρία με επιβλέποντα τον Δρ. Σταύρο Βολογιαννίδη, «πτυχιακή εργασία που αφορά την κατασκευή ενός τρίτροχου κινούμενου ρομπότ με πλατφόρμα Arduino,» ΤΕΙ Σερρών .
- [124] Wikipedia. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/HEPA>.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

1. Πλατφόρμα LoPy4

Το LoPy4 μπορεί να λειτουργήσει και ως μια απλή πύλη LoRa nano, αλλά και ως μια διευρυμένη πλατφόρμα ανάπτυξης πολλαπλών φορέων (LoRa, Sigfox, WiFi και BLE) κατάλληλη για όλα τα δίκτυα LoRa και Sigfox σε όλο τον κόσμο. Είναι προγραμματιζόμενο

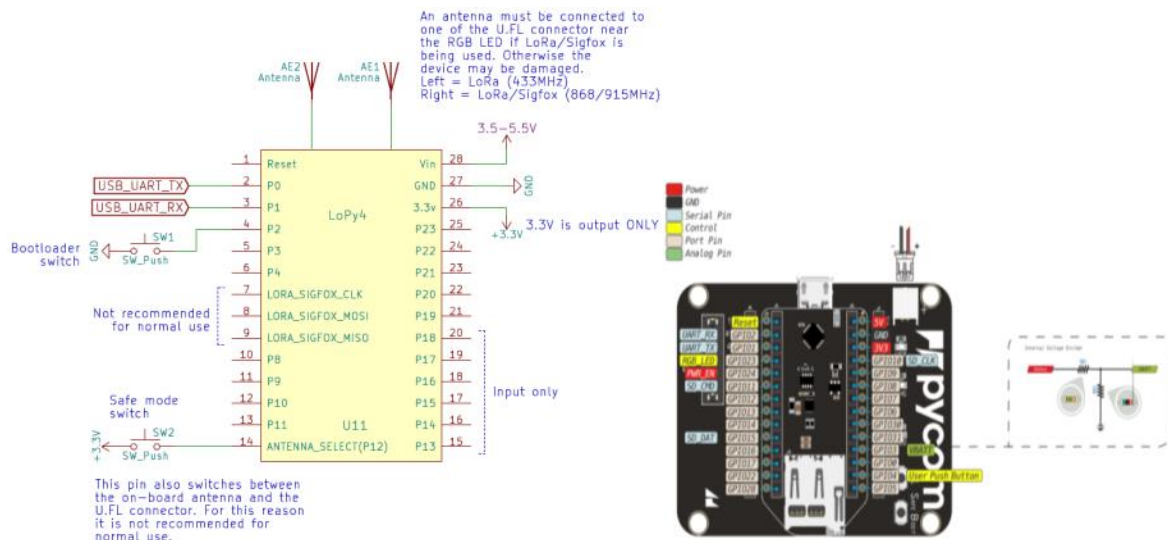


με τα πρόσθετα MicroPython και PyMakr για τυποποιημένη ανάπτυξη εφαρμογών IoT, εύκολο προγραμματισμό και επιπλέον ανθεκτικότητα με ανακατεύθυνση δικτύου. Μπορούμε επίσης να διαμορφώσουμε το LoPy4 σε απλή λειτουργία LoRa για να αποστέλλονται πακέτα απευθείας μεταξύ μονάδων LoPy4. Όπως φαίνεται από τις προδιαγραφές του ταιριάζει ως ευέλικτη λύση που συνδυάζει την ταχύτητα, την απλότητα και την ευχρηστία για ανάπτυξη και πρόσβαση σε νέα

Εικόνα 57 : LoPy Δομικό διάγραμμα

δίκτυα LPWAN που αναπτύσσονται σε όλη την Ευρώπη, ΗΠΑ, Αφρική και Ινδία. Το LoPy4 έχει πιστοποίηση CE, FCC, LoRaWAN και Sigfox. Προσαρμόζεται απευθείας σε κλασικό breadboard οπότε προσφέρεται για την εύκολη σύνδεση των αισθητήρων που χειριζόμαστε στην παρούσα μελέτη.

Προσφέρει με χαμηλό κόστος μεγάλη ευελιξία συνδέσεων και προγραμματισμού προσαρμόσιμο στην εκάστοτε εφαρμογή με εργαλεία ελεύθερα και άμεσα προσβάσιμα από όλους.



Εικόνα 58 : LoPy Σχηματικό διάγραμμα και η αναπτυξιακή πλακέτα συνδέσεων προγραμματισμού

LoPy4 Χαρακτηριστικά (Features) (Πηγή : Pycom)

- Powerful CPU, BLE and state of the art WiFi radio
- Can also double up as Nano LoRa gateway
- **MicroPython** enabled
- Fits in a standard breadboard (with headers)
- Ultra-low power usage: a fraction compared to other connected micro controllers

Processing

- **Espressif ESP32** chipset
- Dual processor WiFi radio System on chip
- Network processor handles the WiFi connectivity and the IPv6 stack
- Main processor is entirely free to run the user application
- An extra ULP-coprocessor that can monitor GPIOs, the ADC channels and control most of the internal peripherals during deep-sleep mode while only consuming 25uA

Interfaces

- 2 x UART, SPI, 2 x I2C, I2S, micro SD card
- Analog channels: 8_12 bit ADCs
- Timers: 4_16 bit with PWM and input capture
- DMA on all peripherals
- GPIO: Up to 24

Security & Certifications

- SSL/TLS support
- WPA Enterprise security
- FCC 2AJMTLOPY4R and CE 0700

Memory

- RAM: 4MB
- External flash: 8MB
- Hardware floating point acceleration
- Python multi-threading

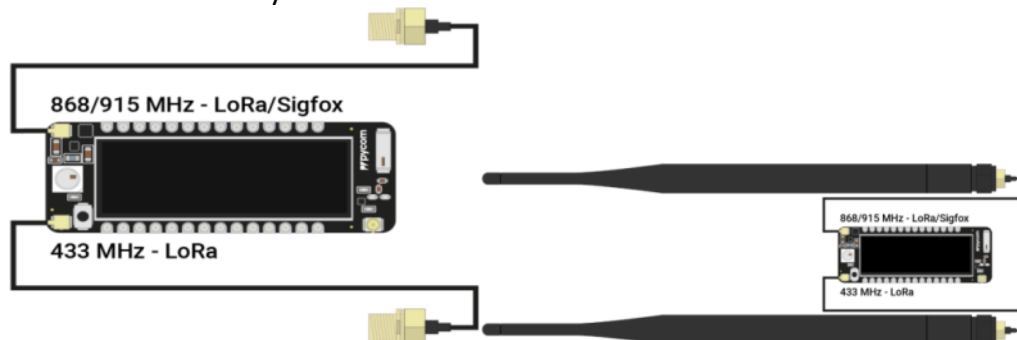
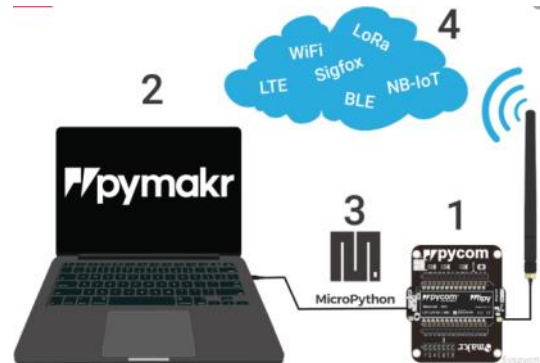
Hash / encryption

- SHA, MD5, DES, AES

RTC Running at 32KHz

Power

- Input: 3.3V 5.5V
- 3v3 output capable of sourcing up to 400mA
- WiFi: 12mA in active mode, 5uA in standby
- LoRa: 15mA in active mode, 1-uA in standby
- Sigfox (Europe): 12mA in Rx mode, 42mA in Tx mode and 0.5uA in standby
- Sigfox (Australia, New Zealand and South America): 12mA in Rx mode, 120 mA in Tx mode and 0.5uA in standby



Εικόνα 59 : Σύνδεση κεραιών για LoRa Sigfox

Sigfox Operating Frequencies

- RCZ1 – 868MHz (Europe)
- RCZ2 – 902MHz (US, Canada and Mexico)

- RCZ3 – (Japan and Korea)
- RCZ4 – 920-922MHz (ANZ, Latin America and S-E Asia)

Sigfox Specification

- Class 0 device. Maximum Tx power:
- 14dBm (Europe)
- 20dBm (America)
- 20dBm (Australia and New Zealand)
- Node range: Up to 50km
- Sigfox certified

LoRa Specification

- Semtech LoRa transceiver SX1276
- LoRaWAN stack
- Class A and C devices

LoRa Operating Frequencies

- 868 MHz (Europe) at 14dBm maximum
- 915 MHz (North and South America, Australia and New Zealand) at 20dBm maximum
- 433 MHz (Europe) at 10dBm maximum
- 470 – 510 MHz (China) at 14dBm maximum

LoRa Range Specification

- Node range: Up to 40km
- Nano-gateway: Up to 22km and capacity: Up to 100 nodes

WiFi 802.11b/g/n 16mbps

Bluetooth Low energy and classic

Η καρδιά που βασίζεται το LoPy είναι το ESP3, ένα πλούσιο ολοκληρωμένο σύστημα On Chip (SoC) με ενσωματωμένους διακόπτες κεραίας, RF balun, ενισχυτή ισχύος με ρυθμιζόμενη ισχύ εξόδου για βελτιστοποιημένη αντιστάθμιση μεταξύ του εύρους επικοινωνίας, του ρυθμού δεδομένων και της κατανάλωσης ισχύος, ενισχυτή λήψης χαμηλού θορύβου, φίλτρα και μονάδες διαχείρισης ισχύος με πολλαπλές λειτουργίες και δυναμική διαχείριση ισχύος για περιορισμό κατανάλωσης με την μέγιστη εμβέλεια σε κάθε συνθήκη. Το ESP32 προσθέτει ανεκτίμητη λειτουργικότητα και ευελιξία σε εφαρμογές IoT με ελάχιστες απαιτήσεις Printed Circuit Board (PCB)



CPU

- Xtensa® dual-core 32-bit LX6 microprocessor(s), up to 600 DMIPS
- Hardware floating point acceleration
- Python multi-threading
- An extra ULP-coprocessor that can monitor GPIOs, the ADC channels and control most of the internal peripherals during deep-sleep mode while only consuming ~25uA.

Memory

- RAM: 520KB + 4MB
- External flash: 8MB

LoRa Range Specification

- Node range: Up to 40km
- Nano-gateway: Up to 22km (Capacity up to 100 nodes)

Sigfox

- Class 0 device. Maximum Tx power:
- +14dBm(Europe)
- +20dBm (America)
- +20dBm (Australia and New Zealand)
- Node range: Up to 50km RTC
- Running at 150kHz internal RC oscillator for the RTC. Fo better accuracy/

WiFi– 802.11b/g/n 16mbps	stability you can connect a 32.768 kHz crystal (or TCXO)
Bluetooth– Low energy and classic	externally on pins P19 and P20 (or P19 for a TXCO)
LoRa	Peripheral Count Pins
Semtech LoRa transceiver SX1276	Security
– LoRaWAN 1.0.2 stack - Class A and C devices	– SSL/TLS support
LoRa Operating Frequencies	– WPA Enterprise security
868 MHz (Europe) at 14dBm maximum	Hash / encryption
915 MHz (North and South America, Australia and New Zealand) at 20dBm max	– SHA, MD5, DES, AES
433 MHz (Europe) at 10dBm max	
470 – 510 MHz (China) at 14dBm max	

Πίνακας 21 : Γενικά Χαρακτηριστικά LoPy4 (Πηγή : Pycom <https://docs.pycom.io/index.html>)

Πομποδέκτης LoRa Semtech SX1276

Με πυρήνα Core™ 137MHz μέχρι 1020MHz, μεγάλης εμβέλειας χαμηλής κατανάλωσης.



Οι πομποδέκτες SX1276 / 77/78/79 διαθέτει LoRa® μόντεμ μεγάλης εμβέλειας για επικοινωνία εξαιρετικά μεγάλης εμβέλειας, διευρυμένου φάσματος και υψηλή απόσβεση παρασιτικών σημάτων με πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

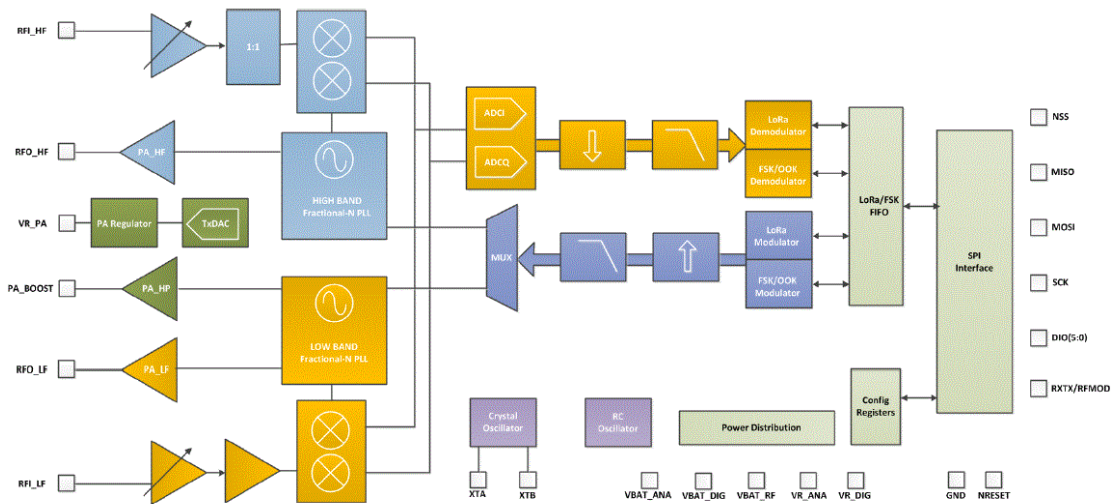
Χρησιμοποιεί την κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τεχνική διαμόρφωσης LoRa της Semtech, επιτυγχάνοντας ευαισθησία μεγαλύτερη από -148dBm με χαμηλού κόστους κρύσταλλο και υλικά. Χαρακτηρίζεται από μεγάλη ευαισθησία ενώ ενσωματώνει ενισχυτή ισχύος με απολαβή +20dBm, για να χρησιμοποιηθεί σε κάθε απαιτητική εφαρμογή μεγάλου εύρους και αξιοπιστίας. Η τεχνολογία LoRa παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο στην απόρριψη ανεπιθύμητων πλευρικών συχνοτήτων όσο και μεγάλη επιλεκτικότητα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές διαμόρφωσης.

Χαρακτηριστικά

- LoRa Modem με μέγιστη απολαβή σύνδεσης 168dB και Υψηλή ευαισθησία: έως -148dBm
- + 20dBm - Σταθερή έξοδος RF 100 mW.
- PA υψηλής απόδοσης + 14dBm
- Προγραμματιζόμενος ρυθμός μετάδοσης bit έως 300kbps
- Ανθεκτικό RF front end: IIP3 = -11dBm
- Χαμηλό ρεύμα RX 9,9mA, 200 nA διατήρηση καταχωρητή
- Πλήρως ενσωματωμένος συνθετητής με ανάλυση 61Hz
- Διαμόρφωση FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa και OOK.
- Ενσωματωμένος συγχρονιστής bit για ανάκτηση ρολογιού
- RSSI δυναμικής περιοχής των 127dB
- Αυτόματη ανίχνευση RF και CAD με εξαιρετικά γρήγορο AFC
- Μηχανή πακέτων έως 256 bytes με CRC
- Ενσωματωμένος αισθητήρας θερμοκρασίας και ένδειξη χαμηλής μπαταρίας

Εφαρμογές

Αυτοματοποιημένες μετρητικές διατάξεις, κτιριακοί αυτοματισμοί, ασύρματα συστήματα Ασφαλείας, βιομηχανικός έλεγχος και εποπτεία, συστήματα άρδευσης μεγάλου εύρους.



Εικόνα 60 : Semtech LoRa transceiver SX1276 (Πηγή : Semtech)

Τροφοδοσία

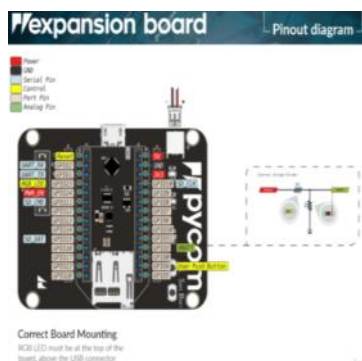
Το LoPy4 τυπικά τροφοδοτείται με 3.3Volt dc. Ωστόσο ενσωματώνει σταθεροποιητή τάσης στην πλακέτα του οπότε ενώ τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή με 3.5V έως 5.5V στο pin VIN, υποβιβάζει την τάση αυτή στα 3.3V. Να σημειωθεί εδώ ότι το Pin εξόδου των 3.3 V πρέπει να χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο για να τροφοδοτήσει άλλες διατάξεις και ποτέ ως είσοδος τάσης τροφοδοσίας. Μια τέτοια σύνδεση θα καταστρέψει τον σταθεροποιητή τάσης της πλακέτας του LoPy4

Mode	Avg Units	WiFi AP	- 104 - mA
Idle (no radios)	35.4 - mA	WiFi client	- 99.0 - mA
LoRa Transmit	- 108 - mA	Bluetooth	- 97.5 - mA
Sigfox Transmit	- 91.6 - mA	Deep sleep	- 18.5 - μA

Πίνακας 22 : Κατανάλωση ισχύος ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας

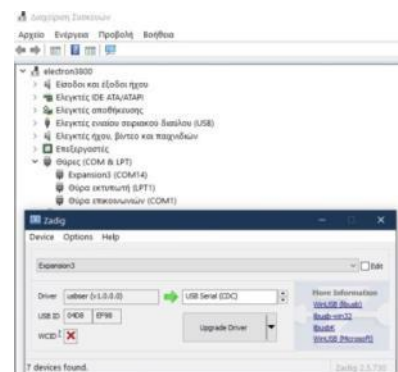
Βήματα εγκατάστασης Lopy

Αναπτυξιακό PCB Pycom makr, και LoPy4



Εικόνα 62 : Αναπτυξιακού PCB Pycom

Για να συνδέσουμε το Lopy με τον υπολογιστή εγκαθιστούμε καταρχήν το αναπτυξιακό πλακετάκι Pycom makr στον υπολογιστή μας με τους κατάλληλους οδηγούς (drivers) όπως θα δούμε παρακάτω.



Εικόνα 61 :Θύρες εγκατάστασης

α. Εγκατάσταση των USB Drivers του αναπτυξιακού PCB Pycom , στον Η/Υ.

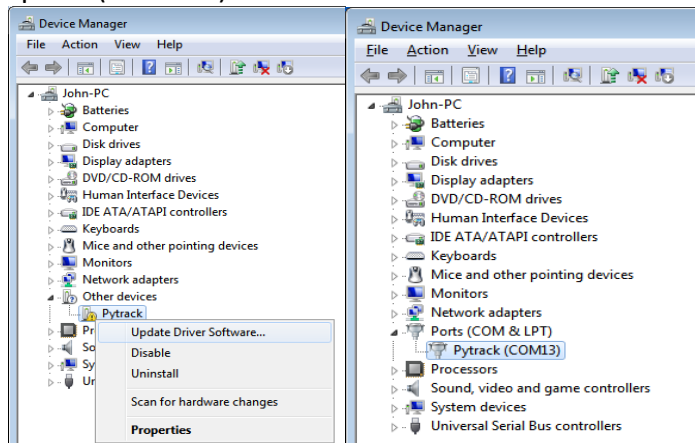
Συνδέουμε σε USB θύρα του Η/Υ το Pycom makr χωρίς το

Lory Module.

Στα Win 8, 10 αναγνωρίζεται αυτόματα οπότε και εμφανίζεται στο πεδίο του συστήματος του πίνακα ελέγχου, στις θύρες COM & LPT με το όνομα Expansion3 (COM xx) , όπου xx ο αριθμός της θύρας που του αποδίδεται από τα Windows. Στο παράδειγμα της εικόνας 1, η εγκατάσταση έγινε στην θύρα COM 14. Στα win 7 κατεβάζουμε τους drivers pycom.inf από το Link

<https://docs.pycom.io/pytrackpysense/installation/drivers/>

Στον πίνακα ελέγχου εντοπίζουμε την εγκατάσταση Pytrack για να αναβαθμίσουμε το πρόγραμμα εγκατάστασης με αυτό που κατεβάσαμε προηγουμένως με τον κλασικό τρόπο (Εικόνα 2).



Εικόνα 63 Update Driver Software στα Win7 και δεξιά το αποτέλεσμα

Για να λειτουργήσει σωστά το PCB απαιτείται η επιπλέον επέμβαση στο πρόγραμμα οδήγησης της σειριακής θύρας με το πρόγραμμα Zadig (σχήμα 1).¹⁸

b. Αναβάθμιση firmware του Lory Module

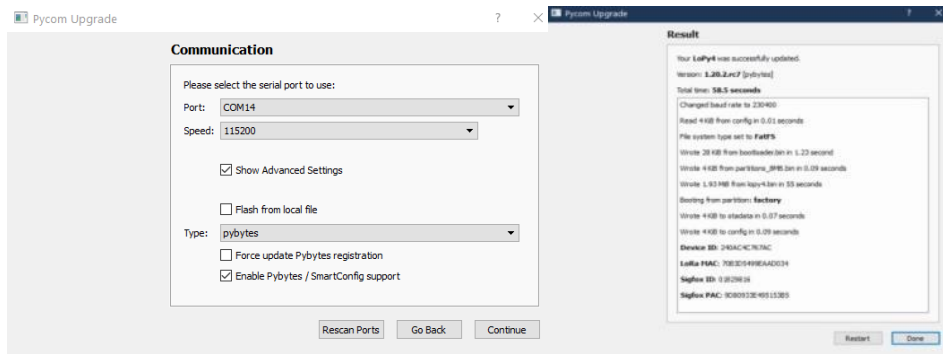
Αφού αποσυνδέσουμε το expansion board από την USB θύρα του υπολογιστή μας τοποθετούμε πάνω το Lory4 και επανασυνδέουμε στην USB του υπολογιστή.

Προσοχή !!! Προτού λειτουργήσουμε το Lory να συνδέσουμε την κεραία στην κατάλληλη υποδοχή SMA για εκπομπή LoRa 868MHz.

Προχωρούμε σε αναβάθμιση του πιο πρόσφατου firmware του Lory - Update Firmware. Κατεβάζουμε το εκτελέσιμο αρχείο αναβάθμισης firmware pycom_firmware_update και το εγκαθιστούμε (Εικόνα 7). Το βρίσκουμε στο Link <https://docs.pycom.io/gettingstarted/installation/firmwaretool/>.

Το τελευταίο λειτουργικό firmware είναι το 1.20.2.r2

¹⁸ Να επιλέξουμε την προβολή όλων των σειριακών θυρών και να επέμβουμε αποκλειστικά στην Expansion3, αντικαθιστώντας το πρόγραμμα οδήγησης usbser (ή οποιοδήποτε εγκαταστάθηκε αυτόματα) με το USB Serial (CDC).



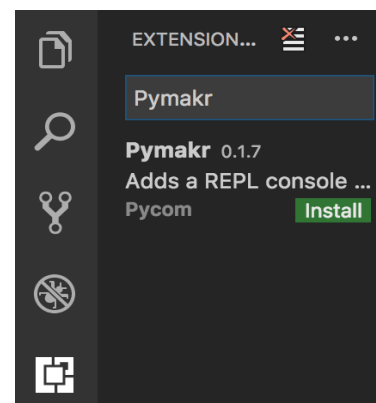
Εικόνα 64 : LoPy4 firmware update και δεξιά το αποτέλεσμα

Προγραμματιστικά περιβάλλοντα – εφαρμογές

Για να αξιοποιήσουμε προγραμματιστικά το LoPy4 εγκαθιστούμε είτε το περιβάλλον Atom ή το Visual Studio Code και με την εξής σειρά

α. Περιβάλλον Visual Studio

- Κατεβάζουμε και εγκαθιστούμε την τελευταία έκδοση του VCode από την διεύθυνση <https://code.visualstudio.com/>
- Επίσης κατεβάζουμε και εγκαθιστούμε την τελευταία LTS version – node-v14 από την διεύθυνση <https://nodejs.org/en/>
- Εκτελούμε το Visual Studio και εγκαθιστούμε ως extension το Pymakr VSCode μέσα από τα Extensions για να εμφανιστεί η πλατφόρμα προγραμματισμού των LoPy εντός του προγραμματιστικού περιβάλλοντος του VCode.

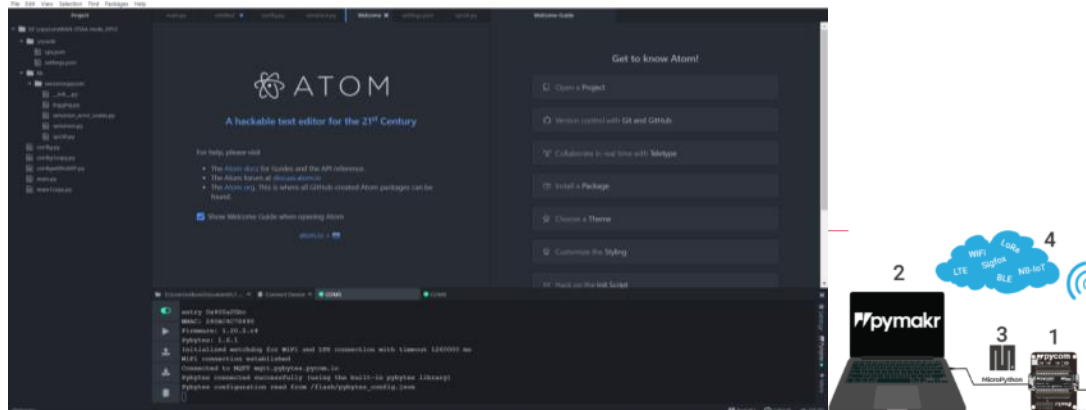


Εικόνα 65 Εγκατάσταση Pymakr extension

Έτσι έχουμε έτοιμο το περιβάλλον για να προγραμματίσουμε το LoPy. Μόνο δύο τελευταία βήματα μένουν για να ελέγξουμε την σύνδεση του LoPy μας με το Vstudio. Συνδέουμε το LoPy μας μέσω του expansion board στον υπολογιστή και:

- Κάτω δεξιά στην κονσόλα του Visual Code Window, πατάμε All commands και Pymakr>Extra>List Serial Ports.
- Pymakr>Extra>Get Firmware Version.

Θα εμφανιστούν οι συνδεδεμένες συσκευές LoPy και το Firmware του λογισμικού τους.



Εικόνα 66 : Περιβάλλον προγραμματισμού ATOM με το πακέτο Pymakr της Pycom

Το περιβάλλον του Atom [118] προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα για τον προγραμματισμό και διαχείριση των LoPy αφού :

- Είναι ανοικτή πλατφόρμα προγραμματισμού σε Python με επιπλέον εγκατεστημένα πακέτα από ανεξάρτητους προγραμματιστές ανάπτυξης
- Εγκαθίσταται το πακέτο της Pycom με το όνομα PyMaker με έτοιμα εργαλεία για τα LoPy. Με το πακέτο αυτό μπορούμε να
 - ο Αναβαθμίσουμε απευθείας το Firmware των συσκευών online
 - ο Καταγράψουμε την εκτέλεση του κώδικα και τα δεδομένα των LoPy
 - ο Να συνδεθούν απευθείας στον MQTT pybytes Broker της Pycom.

Ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου στον πυρήνα της εργαλειοθήκης κάθε προγραμματιστή, που συνεργάζεται εύκολα με περιβάλλοντα όπως το Git και το GitHub απευθείας από το Atom με το πακέτο GitHub. Το πακέτο GitHub βρίσκεται ήδη ενσωματωμένο στο Atom. Μπορούμε να δουλέψουμε παράλληλα παράθυρα κώδικα, να δημιουργήσουμε νέους κλάδους, να επιλύσουμε διενέξεις και άλλα μέσα από τον επεξεργαστή αυτό.

Python και Micro Python λίγα λόγια

Η Python είναι ένας διερμηνευτής μιας αντικειμενοστραφούς γλώσσας προγραμματισμού υψηλού επιπέδου με δυναμική σημασιολογία. Η απλή και εύχρηστη σύνταξη της γλώσσας αυτής με έμφαση στην αναγνωσιμότητα και περιορίζει το κόστος συντήρησης του προγράμματος. Ο διερμηνέας Python με μια ευρεία τυπική βιβλιοθήκη που την συνοδεύει, διατίθενται σε πηγαίο κώδικα ή σε δυαδική μορφή ελεύθερα και δωρεάν για ελεύθερη διανομή σε όλες τις μεγάλες πλατφόρμες.

Το MicroPython με την σειρά της είναι ένας προσαρμοσμένος διερμηνευτής της γλώσσας προγραμματισμού Python, ανοιχτού κώδικα προσαρμοσμένος για μικρά Ενσωματωμένα Συστήματα (embedded systems). Με την MicroPython μπορούμε να γράψουμε απλό και ξεκάθαρο κώδικα Python για τον έλεγχο του υλικού χωρίς να ανατρέχουμε σε σύνθετες γλώσσες χαμηλού επιπέδου όπως την C ή την C ++ (αυτή που χρησιμοποιεί για προγραμματισμό το Arduino).

Με τα προγραμματιστικά περιβάλλοντα αυτά τις προσθήκες της γλώσσας python και των εργαλείων PyMaker της Pycom, είμαστε πλέον έτοιμοι να δουλέψουμε τις εφαρμογές μας¹⁹.

Πηγές προγραμμάτων:

LoRa WAN node - Over The Air Authentication OTAA, Lopy LoRa Wan nano gateway

βασισμένα στα παραδείγματα της **Pycom Limited**.

<https://github.com/teusH/MySense/tree/master/PyCom>

<https://github.com/paulvha/sps30>

2. Πλατφόρμα Arduino

Η προγραμματιζόμενη πλατφόρμα Arduino στηρίζεται στην ευφυΐα των μικροελεγκτής της εταιρείας ATMEL. Ο συγκεκριμένος τύπος της πλατφόρμας Arduino Mega ενσωματώνει τον μικροεπεξεργαστή [ATmega2560](#). [119] Η εταιρεία εξαγοράστηκε από την Microchip το 2016 και έκτοτε υποστηρίζει την πλατφόρμα με τα Arduino πλήρως. Πρόκειται για επεξεργαστή αρχιτεκτονικής των 8 bit με συχνότητα ρολογιού τα 16 MHz. Το σημαντικό του

¹⁹ Σημείωση: Κάθε αλλαγή που επιφέρουμε στο πρόγραμμα που θα εκτελεί το Lopy, πρώτα αποθηκεύεται στον υπολογιστή μας και μετά το περνάμε ή αλλιώς το 'ανεβάζουμε-upload' στο Lopy. Γενικά upload γίνεται μόνο σε όποιο αρχείο έχει αποθηκευτεί –save.

πλεονέκτημα εγγυάται στο γεγονός ότι περιέχει πλήθος προγραμματιζόμενων εισόδων και εξόδων και μάλιστα αναλογικών. Έτσι είναι δυνατή η σύνδεση πολλών περιφερειακών συσκευών ή κυκλωμάτων όπως αισθητήρες (υπερήχων, αερίων, θερμοκρασίας, επιτάχυνσης κ.α.), ενεργοποιητές (ρελέ, τρανζίστορ, Triac κ.α.) και ενδεικτικά ή οθόνες (LCD, Led, e-ink, OLED κ.α.) για ευέλικτα και πολυπαραμετροποιημένα ολοκληρωμένα συστήματα αυτοματισμών.

Χαρακτηριστικά της αναπτυξιακής πλατφόρμας-πλακέτας Arduino Mega 2560 [120]

Η αναπτυξιακή πλακέτα Arduino Mega 2560 [120] είναι εξοπλισμένη με 54 ψηφιακές προγραμματιζόμενες ως έξοδοι ή εισοδοι πύλες, εκ των οποίων οι 15 μπορούν να υλοποιήσουν σήματα PWM και 16 αναλογικές εξόδους εξασφαλίζουν μεγάλη συνδεσιμότητα και ευελιξία στην λειτουργία του συστήματος.

Microcontroller	ATmega2560
Τάση λειτουργίας	5V
Ενδεδειγμένη τάση Τροφοδοσίας)	7-12V
Ψηφιακά I/O ακροδέκτες	54 (of which 15 provide PWM output)
Αναλογικά ακροδέκτες Εισόδου	16
DC ρεύμα ανά I/O ακροδέκτης	20 mA
DC ρεύμα για τροφ. 3.3V Pin	50 mA
Μνήμη Flash	256 KB όπου τα 8 KB για το bootloader
S.R.A.M.	8 KB
E.E.P.R.O.M.	4 KB
Ταχύτητα Clock	16 MHz
Ενσωματωμένο LED	Συνδέεται στο Pin 13

Πίνακας 23 : Χαρακτηριστικά Arduino Mega [75]

Λειτουργούν με τάση 5Volt και δυνατότητα οδήγησης φορτίου μέχρι και 20 mA (5V ή 50mA (3,3V). Περιλαμβάνει όλα όσα χρειάζονται για την υποστήριξη του μικροελεγκτή. Το μόνο που χρειάζεται να λειτουργήσει είναι μια σύνδεση με έναν υπολογιστή με καλώδιο USB ή απλή τροφοδοσία με τροφοδοτικό DC ή μπαταρία για να ξεκινήσουμε. Επιπλέον παρατηρούμε τα εξής:

-Εξωτερικές Διακοπές: 2 και 3. Σε περίπτωση που ανιχνευθεί παλμός χαμηλής τάσης οι ακροδέκτες αυτοί μπορούν να ενεργοποιήσουν διακοπές. Με την συνάρτηση attach Interrupt(), η ενεργοποίηση των διακοπών γίνεται με λογικό 0 ή 1.

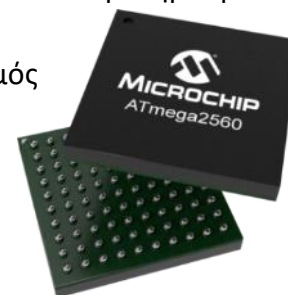
-Αναλογικές εισοδοι : pins A0 έως και A15.

-PWM: 2 - 13, ακροδέκτες. Παρέχουν έξοδο 8-bit PWM με analog Write ().

-LED: 13. Στον ακροδέκτη 13 συνδέεται ενσωματωμένο LED. Με τιμή HIGH του ακροδέκτη ανάβει το LED ενώ σβήνει με τιμή LOW.

Ο μικροελεγκτής του Arduino MEGA, ATMEGA 2560 [121]

Ο μικροελεγκτής της Microchip 8-bit AVR® RISC, επιτυγχάνει υψηλή απόδοση με χαμηλή κατανάλωση, και συνδυάζει μνήμη flash 256 KB ISP, 8 KB SRAM, 4 KB EEPROM, 86 γραμμές I



Εικόνα 67: Μικροελεγκτής ATmega2560

/ Ο γενικής χρήσης, 32 καταχωρητές γενικής χρήσης, PWM, τέσσερις USART, δισύρματη σειριακή διεπαφή με προσανατολισμό byte, μετατροπέας A-D 10-bit 16 καναλιών και διεπαφή JTAG για εντοπισμό σφαλμάτων on-chip. Η συσκευή επιτυγχάνει απόδοση 16 MIPS στα 16 MHz και λειτουργεί μεταξύ 4,5-5,5 volt.

Όνομα	Τιμή
Τύπος Μνήμης Προγράμματος	Flash
Μέγεθος Μνήμης Προγράμματος (KB)	256
Ταχύτητα CPU (MIPS/DMIPS)	16
SRAM (B)	8,192
Δεδομένα EEPROM/HEF (bytes)	4096
Ψηφιακά Περιφερειακά Επικοινωνίας	4-UART, 5-SPI, 1-I2C
Capture/Compare/PWM Περιφερειακά	4 Input Capture, 4 CCP, 16 PWM
Χρονιστές - Timers	2 x 8-bit, 4 x 16-bit
Αριθμός Συγκριτών	1
Εύρος Τάσης Λειτουργίας (V)	1.8 to 5.5
Αριθμός ακροδεκτών	100

Πίνακας 24 : Χαρακτηριστικά του επεξεργαστή ATMEGA 2560 [76] του Arduino MEGA

Τροφοδοσία

Η πλακέτα τροφοδοτείται με τάση 6 έως 20 Volts DC από εξωτερικό τροφοδοτικό, με ενδεδειγμένες τιμές μεταξύ 9 και 12 Volt DC που σταθεροποιούνται με το ενσωματωμένο ολοκληρωμένο σταθεροποιητή τάσης στα 5Volt Dc και 3.3 Volt Dc. Όμως τροφοδοτείται και από την σειριακή σύνδεση USB με ρεύμα 20mA αν τροφοδοτείται μόνο η πλακέτα του Arduino χωρίς επιπλέον φορτία στις εξόδους του, όπως Led.

Παρέχονται επιπλέον ακροδέκτες τροφοδοσίας ως εξής:

VIN. Ακροδέκτης για μη σταθεροποιημένη τάση από ανεξάρτητη εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.

5V. Ακροδέκτης σταθεροποιημένης τάσης 5Volt.

3V3. Με μέγιστη τιμή ρεύματος τα 50mA.

GND. Γειωμένες ακίδες

Σειριακή επικοινωνία-Θύρες

Με την ενσωματωμένη θύρα USB στην πλακέτα ανάπτυξης του Arduino, μεταφέρονται τα δεδομένα από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, το πρόγραμμα στον επεξεργαστή του ή απλά διασυνδέονται αναπτύγματα μεταξύ τους ή άλλες σειριακές συσκευές. Το βασικότερο πλεονέκτημα της σειριακής σύνδεσης ωστόσο, εκτός από την μεταφορά του προγράμματος από τον υπολογιστή στον μικροεπεξεργαστή, είναι και η οπτικοποίηση των δεδομένων κατά την λειτουργία της πλατφόρμας αφού αυτή προγραμματίζεται και τεθεί σε κανονική λειτουργία.

Η ενσωματωμένη σειριακή καταγραφή του προγραμματιστικού περιβάλλοντος του Arduino επικοινωνεί με την πλακέτα του Arduino. Με την επιλογή Serial Monitor στην γραμμή εργαλείων και κατάλληλη ταχύτητα χρησιμοποιείται η εντολή σειριακής κλήση Serial.begin().

Διαθέτει επιπλέον τις εξής σειριακές θύρες

-Σειριακή επικοινωνία 4 πύλες UART: στις πύλες/ακίδες 0, 13, 15, 17 (RX) για τα σήματα λήψης και αντίστοιχα 1, 14, 16, 18 (TX) για τα σήματα εκπομπής TTL.

-SPI: στις πύλες SDA (20) και SCL (21) όπου μπορούμε να συνδέσουμε συσκευές με πρωτόκολλο επικοινωνίας I²C.

Βασικές μνήμες

Τρεις είναι οι τύποι των μνημών που ενσωματώνουν οι πλατφόρμες Arduino:

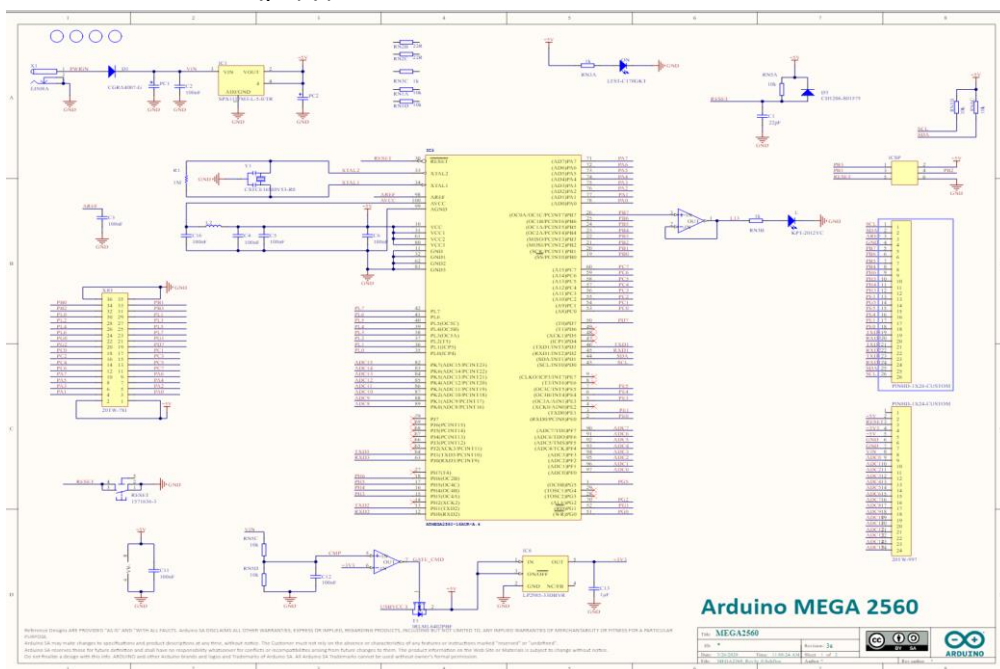
-Flash memory (256 Kbytes) που εγγράφεται το πρόγραμμα που πρόκειται να εκτελεστεί καθώς, ο φορτωτής εκκίνησης ο οποίος διευκολύνει την διαδικασία του προγραμματισμού της πλατφόρμας.

-SRAM memory (8 Kbytes) για την προσωρινή αποθήκευση των στατικών και των μεταβλητών δεδομένων του εκτελέσιμου προγράμματος.

-EEPROM μνήμη (1 Kbytes) όπου αποθηκεύονται οι προσωρινές τιμές των μεταβλητών, ρυθμίσεις και λειτουργικές παράμετροι ώστε να διατηρούνται όταν παύει να τροφοδοτείται με τάση η πλακέτα. Ακόμη, στις μνήμες Flash και EEPROM διατηρούνται τα δεδομένα τους ακόμη και αν αφαιρεθεί η τάση τροφοδοσίας της πλακέτας ή αποσυνδεθεί αυτή από τον υπολογιστή. Στην μνήμη SRAM αποθηκεύονται οι προσωρινές τιμές των δεδομένων κατά την εκτέλεση των προγραμμάτων.

Γλώσσα Προγραμματισμού [123]

Το περιβάλλον ανάπτυξης και προγραμματισμού βασίζεται στις ανοικτού κώδικα (open source) γλώσσες Processing και την Wiring. Η τελευταία ουσιαστικά πρόκειται για μια εκδοχή της γλώσσας προγραμματισμού C++. Το περιβάλλον ανάπτυξης διατίθεται δωρεάν από την ιστοσελίδα υποστήριξης Arduino



Εικόνα 68 Arduino Mega 2560 Schematic (Πηγή : <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>)

3. Συνδέσεις των αισθητήρων με το Arduino.

SPS30					
sensor pins	1 Vcc	2	3	4 select	5 GND

plug cabel colours	Grey	Yellow	Red	White	shield
UART * ²⁰		RX	TX	for UART nc	
Arduino pins		TX1 pin18	RX pin19		
UTP cables to Arduino/Lopy	Brown	Blue - Blue/Wht to Gnd	Green - Green/Wht to Gnd	Orange	Brown /White
UTP cables to Lopy		P3 ή P1	P4 ή P0		
SVM30					
sensor pins	1	2	3	4	
I ² C bus	SCL	GND	Vcc	SDA	
Arduino pins	SCL pin21			SDA pin20	
UTP cables to Arduino	Blue - Blue/Wht to Gnd	Brown/White	Brown	Green - Green/Wht to Gnd	
OMRON					
sensor pins	1 Vcc	2 V ₁ out	3 GND	4 Vthreshold	5 V ₂ out
cabel colour		Violet		White	Black
UART σύνδεση		RX	TX		
Arduino pins		TX2 pin16	RX2 pin17	PWM out pin2	
UTP cables to Arduino	Brown	Green - Green/Wht to Gnd	Brown/White	Orange	Blue - Blue/Wht to Gnd

Οι συνδέσεις των αισθητήρων με τον Arduino και με το LoPy4 έγιναν με καλώδια UTP cat5e για αξιόπιστη σύνδεση και μεταφορά των ψηφιακών δεδομένων με ελαχιστοποίηση των παρεμβολών, και του θορύβου. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές των αισθητήρων η χωρητικότητα των γραμμών μεταφοράς των 52pf/m, υπερκαλύπτει το όριο των 400pf για το I²C bus, που μάλιστα συνδέεται μόνο το SVM30, ενώ για τις συνδέσεις UART των υπολοίπων είναι απόλυτα μέσα στα ασφαλή όρια αξιόπιστης μετάδοσης. Τα σήματα RX, TX SDA, SCLK οδηγούνται με συνεστραμμένους αγωγούς με Ground για περιορισμό του θορύβου και της διαφωνίας (crosstalk).

4. Χαρακτηριστικά και τεχνικές πληροφορίες των Αισθητήρων

²⁰ FSCL = 100KHz με τερματισμό 400pf το μέγιστο και συχνότητα δειγματοληψίας 1Hz
Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πελαδαρινός Νικόλαος, AM msciot19007

a. Αισθητήρας SPS30 Sensirion

Datasheet SPS30

Particulate Matter Sensor for Air Quality Monitoring and Control

- Unique long-term stability
- Advanced particle size binning
- Superior precision in mass concentration and number concentration sensing
- Small, ultra-slim package
- Fully calibrated digital output



Product Summary

The SPS30 Particulate Matter (PM) sensor is a technological breakthrough in optical PM sensors. Its measurement principle is based on laser scattering and makes use of Sensirion's innovative contamination-resistance technology. This technology, together with high-quality and long-lasting components, enables precise measurements from its first operation and throughout its lifetime of more than ten years. In addition, Sensirion's advanced algorithms provide superior precision for different PM types and higher-resolution particle size binning, opening up new possibilities for the detection of different sorts of environmental dust and other particles. With dimensions of only 41 x 41 x 12 mm³, it is also the perfect solution for applications where size is of paramount importance, such as wall-mounted or compact air quality devices.

1 Particulate Matter Sensor Specifications

1.1 Specification Overview

Parameter	Conditions	Value	Units
Mass concentration range	-	0 to 1000	µg/m ³
Mass concentration size range	PM1.0	0.3 to 1.0	µm
	PM2.5	0.3 to 2.5	µm
	PM4	0.3 to 4.0	µm
	PM10	0.3 to 10.0	µm
Mass concentration precision ^{1,2} for PM1 and PM2.5 ³	0 to 100 µg/m ³	±10	µg/m ³
	100 to 1000 µg/m ³	±10	% m.v.
Mass concentration precision ^{1,2} for PM4, PM10 ⁴	0 to 100 µg/m ³	±25	µg/m ³
	100 to 1000 µg/m ³	±25	% m.v.
Maximum long-term mass concentration precision limit drift	0 to 100 µg/m ³	±1.25	µg/m ³ / year
	100 to 1000 µg/m ³	±1.25	% m.v. / year
Number concentration range	-	0 to 3000	#/cm ³
	PM0.5	0.3 to 0.5	µm
	PM1.0	0.3 to 1.0	µm
	PM2.5	0.3 to 2.5	µm
	PM4	0.3 to 4.0	µm
Number concentration precision ^{1,2} for PM0.5, PM1 and PM2.5 ³	0 to 1000 #/cm ³	±10	#/cm ³
	1000 to 3000 #/cm ³	±10	% m.v.
	0 to 1000 #/cm ³	±250	#/cm ³
	1000 to 3000 #/cm ³	±25	% m.v.
Maximum long-term number concentration precision limit drift ⁵	0 to 1000 #/cm ³	±12.5	#/cm ³ / year
	1000 to 3000 #/cm ³	±12.5	% m.v. / year
Sampling interval	-	±10 04	s
Typical start-up time ⁶	number concentration	200 - 3000 #/cm ³	8 s
	concentration	100 - 200 #/cm ³	16 s
		50 - 100 #/cm ³	30 s
Sensor output characteristics	PM2.5 mass concentration	Calibrated to TSI DustTrak™ DRX 8533 Ambient Mode	
	PM2.5 number concentration	Calibrated to TSI OPS 3330	
Lifetime ⁷	24 h/day operation	> 10	years
Acoustic emission level	0.2 m	max.	25 dB(A) / year
Long term acoustic emission level drift	0.2 m	max.	+0.5 dB(A) / year
Additional T-dependent mass and number concentration precision limit drift ⁸	temperature difference to 25°C	typ.	±0.5 % m.v. / °C
Weight	-	26.3 ±0.3	g

¹ Also referred to as "between-parts variation" or "device-to-device variation".

² For further details, please refer to the document "Sensirion Particulate Matter Sensor Specification Statement".

³ Verification Aerosol for PM2.5 is a 3% atomized KCl solution. Deviation to reference instrument is verified in end tests for every sensor after calibration.

⁴ PM4 and PM10 output values are calculated based on distribution profile of all measured particles.

⁵ Time after starting Measurement-Mode, until a stable measurement is obtained.

⁶ Lifetime is based on mean time-to-failure (MTTF) calculation. Lifetime might vary depending on different operating conditions.

4.3 Measurement Output Formats

The measurement results can be read with the "Read Measured Values" command. The returned data structure depends on the selected output format. The output format must be specified when stating the measurement with the "Start Measurement" command.

IEEE754 float values

Byte #	I2C	Datatype	Description
0.3	0.5	big-endian float IEEE754	Mass Concentration PM1.0 [µg/m ³]
4.7	6.11		Mass Concentration PM2.5 [µg/m ³]
8.11	12.17		Mass Concentration PM4.0 [µg/m ³]
12.15	18.23		Mass Concentration PM10 [µg/m ³]
16.19	24.29		Number Concentration PM0.5 [# /cm ³]
20.23	30.35		Number Concentration PM1.0 [# /cm ³]
24.27	36.41		Number Concentration PM2.5 [# /cm ³]
28.31	42.47		Number Concentration PM4.0 [# /cm ³]
32.35	48.53		Number Concentration PM10 [# /cm ³]
36.39	54.59		Typical Particle Size ⁹ [µm]

Unsigned 16-bit integer values⁸

Byte #	I2C	Datatype	Description
0.1	0.2	big-endian unsigned 16-bit integer	Mass Concentration PM1.0 [µg/m ³]
2.3	3.5		Mass Concentration PM2.5 [µg/m ³]
4.5	6.8		Mass Concentration PM4.0 [µg/m ³]
6.7	9.11		Mass Concentration PM10 [µg/m ³]
8.9	12.14		Number Concentration PM0.5 [# /cm ³]
10.11	15.17		Number Concentration PM1.0 [# /cm ³]
12.13	18.20		Number Concentration PM2.5 [# /cm ³]
14.15	21.23		Number Concentration PM4.0 [# /cm ³]
16.17	24.26		Number Concentration PM10 [# /cm ³]
18.19	27.29		Typical Particle Size ⁹ [µm]

⁸ The typical particle size (TPS) gives an indication on the average particle diameter in the sample aerosol. Each output correlates with the weighted average of the number concentration bins measured with a TSI 3330 optical particle sizer. Consequently, lighter aerosols will have smaller TPS values than heavier aerosols.

⁹ Requires at least firmware version 2.0

b. SVM30 Sensirion

SENSIRION
THE SENSOR COMPANY

Datasheet SVM30

Multi-gas, humidity and temperature sensor combo module

- Measures indoor air quality parameters total VOC (tVOC), CO₂-equivalent (CO₂eq), relative humidity RH and temperature T
- Automatic baseline compensation and humidity compensation of MOX gas sensor
- Outstanding long-term stability and reliability
- Fully factory calibrated and tested
- Digital I2C interface
- 5V supply voltage
- Dimensions: 39 x 15 x 6.5 mm



Product Summary

The SVM30 is a Multi-gas, humidity and temperature sensor combo module containing an SGP30 gas sensor as well as an SHTC1 humidity and temperature sensor.

The SGP30 gas sensor on the SVM30 combines multiple metal-oxide sensing elements – the pixels – on one chip, thereby offering the possibility to measure a total VOC signal (tVOC) and a CO₂ equivalent signal (CO₂eq) with one single sensor-chip. The SVM30 further offers calibrated air quality output signals as well as compensation of humidity cross-sensitivity. The sensing element features an unmatched robustness against contamination by siloxanes present in real-world applications enabling a unique long-term stability and low drift.

The humidity and temperature sensor on SVM30 covers a humidity measurement range of 0 to 100 %RH and a temperature measurement range of -20 to 85 °C with a typical accuracy of ±5 %RH and ±1 °C.

The gas and RH/T sensor components are designed with Sensirion's CMOSens® technology. This technology offers a complete sensor system on a single chip, including the sensing elements, analog and digital signal processing, A/D converter, calibration and data memory and a digital communication interface supporting I2C standard mode. Sensirion's state-of-the-art production process, including full calibration and testing of the sensors, guarantees high reproducibility and reliability.

Parameter	Signal	Value	Comments
Output range	TVOC signal	0 ppb to 60000 ppb	Maximum possible output range. The gas sensing performance is specified for the measurement range as defined in Table 1
	CO ₂ eq signal	400 ppm to 60000 ppm	
Resolution	TVOC signal	0 ppb - 2008 ppb	1 ppb
		2008 ppb – 11110 ppb	6 ppb
		11110 ppb – 60000 ppb	32 ppb
	CO ₂ eq signal	400 ppm – 1479 ppm	1 ppm
		1479 ppm – 5144 ppm	3 ppm
		5144 ppm – 17597 ppm	9 ppm
Sampling rate	TVOC signal	1 Hz	The on-chip baseline compensation algorithm has been optimized for this sampling rate. The sensor shows best performance when used with this sampling rate.
	CO ₂ eq signal	1 Hz	


Εικόνα 69 : Προδιαγραφές μετρήσεων ποιότητας αέρα -Air Quality Specifications (Sensirion)

The values listed in **Table 1** are valid at 25°C, 50% RH and typical VDD.

Parameter	Signal	Values	Comments
Measurement range ¹	Ethanol signal	0 ppm to 1000 ppm	
	H ₂ signal	0 ppm to 1000 ppm	
Specified measurement range	Ethanol signal	0.3 ppm to 30 ppm	The specifications below are defined for this measurement range ² . The specified measurement range covers the gas concentrations expected in indoor air quality applications.
	H ₂ signal	0.5 ppm to 3 ppm	
Accuracy ^{3,4}	Ethanol signal	see Figure 1 typ.: 15% of meas. value	Accuracy of the concentration <i>c</i> determined by $\ln\left(\frac{c}{c_{ref}}\right) = \frac{(s_{ref} - s_{out})}{a}$ <i>a</i> = 512 <i>S_{out}</i> : EthOH/H ₂ signal output at concentration <i>c</i> <i>S_{ref}</i> : EthOH/H ₂ signal output at 0.5 ppm H ₂
	H ₂ signal	see Figure 2 typ.: 10% of meas. value	
Sensitivity	Ethanol signal	-1.0	Sensitivity <i>n</i> is defined by $\frac{s_{ref} - s_{out}}{512} = -n \cdot \ln\left(\frac{c}{c_{ref}}\right)$ The typical numerical value of <i>n</i> is <i>n</i> = -1 for both, the Ethanol and H ₂ signal. The sensitivity is understood as an average value over the specified measurement range as determined by a least square fit.
	H ₂ signal	-1.0	
Sensitivity tolerance ³	Ethanol signal	typ. tolerance: ±7% rel. error max. tolerance: ±14% rel. error	
	H ₂ signal	typ. tolerance: ±7% rel. error max. tolerance: ±14% rel. error	
Long-term drift ^{3,5}	Ethanol signal	see Figure 3 typ.: 1.3% of meas. value	Change of accuracy over time: Siloxane accelerated lifetime test ⁶
	H ₂ signal	see Figure 4 typ.: 1.3% of meas. value	
Resolution	Ethanol signal	0.2 % of meas. value	Resolution of Ethanol and H ₂ signal outputs in relative change of the measured concentration
	H ₂ signal		
Sampling frequency	Ethanol signal	Max. 40 Hz	Compare with minimum measurement duration in Table 13
	H ₂ signal		

Εικόνα 70: Gas sensing performance (Sensirion)

c. B5W-LD0101-1/2 Omron



Air Quality Sensor
B5W-LD0101-1/2

Highly Sensitive and Compact Air Quality Sensor

- Detection of particles down to 0.5 µm in diameter is possible while using an LED light source
- Features a unique flow path structure that efficiently sucks in air
- Small in size thanks to its compact optical system

ROHS Compliant

Be sure to read Safety Precautions on page 4.

Model Number Structure

B5W- L D 01 01 - □

(1) Standard type
L: Optical sensor
(2) Sensor type
D: Air Quality sensor

(3) Structure
01: Basic structure
(4) Function
01: Basic function

(5) Packing state
1: Individual
2: Carton

Ordering Information

Appearance	Sensing method	Connecting method	Output type	Model	Packing state
	Light scattering	Connector	Pulse output (Built-in pull-up resistor 3 kΩ)	B5W-LD0101-1	Individual
	Light scattering	Connector	Pulse output (Built-in pull-up resistor 3 kΩ)	B5W-LD0101-2	Tray

Ratings, Characteristics and Exterior Specifications

Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	V _{CC}	5.5	V
Input threshold voltage	V _I	5.5	V
Operating temperature	T _{OP}	0 to 45	°C
Storage temperature	T _{STG}	-25 to 85	°C

Electrical Characteristics (Ta=25°C, V_{CC}=5 V, 0 Lx)

Parameter	Characteristics value			Unit	Remarks
	MIN	TYP	MAX		
V _{CC}	4.5	5	5.5	V	Ripple voltage range 20 mV or less (Ripple recommended)
V _I	0	—	3.5	V	
V (IOUT1) V (IOUT2) H level output	4.5	—	—	V	Pulse output when particles are detected
V (IOUT1) V (IOUT2) Low level output	—	—	0.7	V	Pulse output when particles are not detected
Supply current	—	—	20	mA	LED-ON

Ensure there is no noise below 300 Hz.
Confirm the allowable ripple voltage value using an actual machine.

Detection Characteristics (Ta=25°C, V_{CC}=5 V, 0 Lx)

Parameter	Characteristics value			Unit	Remarks
	MIN	TYP	MAX		
V (IOUT1) Number of detections	PN1	—	300	count	Model of dust monitor: T30 DUSTTRAK II MOORESCO Impactor: 1.0 µm Dust concentration: 10 µg/m ³ Measurement time: 20 sec Threshold voltage: V _I ±0.5 V
V (IOUT2) Number of detections	PN2	0	—	count	Detection object: 0.5 µm Polystyrene latex particles

Minimum detectable particle
V (IOUT1): Approx. 0.5 µm or larger
V (IOUT2): Approx. 2.5 µm or larger

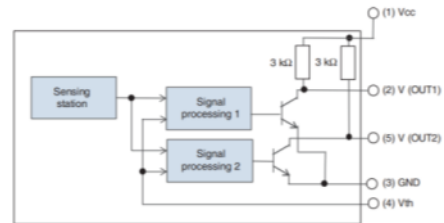
Εικόνα 71 : Omron αισθητήρα χαρακτηριστικά

Ο συγκεκριμένος αισθητήρας παράγει θετικό τετραγωνικό παλμό πλάτους 5Volt όταν ανιχνεύσει σωματίδια στον αέρα, και 0Volt όταν δεν ανιχνεύει.

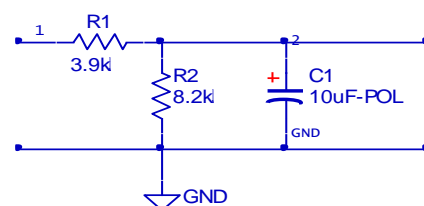


Εικόνα 72 : Παλμοί Εξόδου αισθητήρα (Omron)

- Μετρώντας τον αριθμό των παλμών εντός της περιόδου χρόνου μέτρησης προκύπτει η έξοδος μέτρηση του αισθητήρα.
- Το ελάχιστο πλάτος κάθε παλμού είναι 0,5 msec.
- Χρησιμοποιούμε συχνότητα δειγματοληψίας 4 KHz ή μεγαλύτερη
- Χρειάζεται βαθμονόμηση με τάση πόλωσης στο Pin2 όπου χρησιμοποιούμε
 - κύκλωμα διαιρέτη τάσης ώστε για κάθε ενδεχόμενο η τάση να φτάνει τη μέγιστη τιμή των 3,3Volt.
 - διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) από ψηφιακή έξοδο του Arduino και αφού αυτή ολοκληρωθεί με το φίλτρο του διπλανού σχήματος:



Εικόνα 73: Μπλοκ διάγραμμα του αισθητήρα OMRON



Εικόνα 74 :Κύκλωμα ολοκλήρωσης για την πόλωση του Αισθητήρα Omron

d. BME 680 Bosch

BOSCH BME680 Technical data	
Package dimensions	8-Pin LGA with metal 3.0 x 3.0 x 0.93 mm ³
Operation range (full accuracy)	Πίεση: 300...1100 hPa Υγρασία 0...100% Θερμοκρασία: -40...85°C
Supply voltage VDDIO	1.2 ... 3.6 V
Supply voltage VDD	1.71 ... 3.6 V
Interface	I ² C and SPI
Average current consumption (1Hz data refresh rate))	2.1 μA at 1 Hz υγρασία και θερμοκρασία 3.1 μA at 1 Hz πίεση και θερμοκρασία
Average current consumption in sleep mode	3.7 μA at 1 Hz υγρασία, πίεση και θερμοκρασία 0.09–12 mA for p/h/T/gas ανάλογα με την λειτουργία
Gas sensor	
Response time (τ 33-63%)	< 1 s (για καινούργιους αισθητήρες)
Sensor-to-sensor deviation	+/- 15% +/- 15
Power consumption	< 0.1 mA in ultra-low power mode
Output data processing	direct output of IAQ: Index for Air Quality
Humidity sensor	
Response time (τ0-63%)	8 s
Accuracy tolerance	± 3 % relative humidity

Hysteresis	≤ 1.5 % relative humidity
Pressure sensor	0.12 Pa (equiv. to 1.7 cm)
RMS Noise	± 0.25 % (equiv. to 1 m at 400 m height change)
Sensitivity Error	±1.3 Pa/K (equiv. to ±10.9 cm at 1°C temperature change)
Temperature coefficient offset	

5. Κώδικες προγραμματισμού

5.1 LoRa WAN node - Over The Air Authentication OTAA

5.1.1 Config.py

```
#!/usr/bin/env python
# Copyright (c) 2019, Pycom Limited.
# This software is licensed under the GNU GPL version 3 or any later version, with permitted
# additional terms. For more information see the Pycom License v1.0 document supplied
# with this file, or available at https://www.pycom.io/opensource/licensing
#
""" LoPy LoRaWAN Nano Gateway configuration options """
import machine
import ubinascii
GATEWAY_ID = "9ced515fd6f13199"
SERVER = 'router.eu.thethings.network'
PORT = 1700
NTP = "europe.pool.ntp.org" # pool.ntp.org is the server name
NTP_PERIOD_S = 3600

WIFI_SSID = 'VODAFONE_8734'
WIFI_PASS = 'nucgspchaudh8fa4rp'

# for EU868
LORA_FREQUENCY = 868100000
LORA_GW_DR = "SF7BW125" # DR_5
LORA_NODE_DR = 5
```

5.1.2 Main.py

```
""" OTAA Node example compatible with the LoPy Nano Gateway """
from network import LoRa
import socket
import binascii
import struct
import time
import config
import math
```

```

# initialize LoRa in LORAWAN mode.
# Please pick the region that matches where you are using the device:
# Asia = LoRa.AS923
# Australia = LoRa.AU915
# Europe = LoRa.EU868
# United States = LoRa.US915
lora = LoRa(mode=LoRa.LORAWAN, region=LoRa.EU868)
# create an OTA authentication params
dev_eui = binascii.unhexlify('3bcf81ba57c58453')
app_eui = binascii.unhexlify('70B3D63ED0031A26')
app_key = binascii.unhexlify('B107A593B31BF13B4DF55461FB0EDE8A')

# set the 3 default channels to the same frequency (must be before sending the OTAA join
request)
lora.add_channel(0, frequency=config.LORA_FREQUENCY, dr_min=0, dr_max=5)
lora.add_channel(1, frequency=config.LORA_FREQUENCY, dr_min=0, dr_max=5)
lora.add_channel(2, frequency=config.LORA_FREQUENCY, dr_min=0, dr_max=5)

# join a network using OTAA
lora.join(activation=LoRa.OTAA, auth=(dev_eui, app_eui, app_key), timeout=0,
dr=config.LORA_NODE_DR)

# wait until the module has joined the network
while not lora.has_joined():
    time.sleep(2.5)
    print('Not joined yet...')
# remove all the non-default channels
for i in range(3, 16):
    lora.remove_channel(i)

# create a LoRa socket
s = socket.socket(socket.AF_LORA, socket.SOCK_RAW)
# set the LoRaWAN data rate
s.setsockopt(socket.SOL_LORA, socket.SO_DR, config.LORA_NODE_DR)

# make the socket non-blocking
s.setblocking(False)

time.sleep(5.0)

for i in range (5): # loop times

    for j in range (200): # sinus wave
        sinusj = int(100 * math.sin(j)) + 100
        print(sinusj)
        pkt = b'PKT #' + bytes([sinusj])
        print('loop times=', i+1, 'sinus ' 'Data Sending:', pkt)

```

```

s.send(pkt)
time.sleep(4)
rx, port = s.recvfrom(256)
if rx:
    print('Received: {}, on port: {}'.format(rx, port))
    time.sleep(6)

for j in range (200): # ramp up
    pkt = b'PKT #' + bytes([j])
    print('loop times=', i+1, 'ramp up ' 'Data Sending:', pkt)
    s.send(pkt)
    time.sleep(4)
    rx, port = s.recvfrom(256)
    if rx:
        print('Received: {}, on port: {}'.format(rx, port))
        time.sleep(6)
for j in range (200): # ramp down
    print('loop times=', i+1, 'ramp down ' 'Data Sending:', pkt)
    pkt = b'PKT #' + bytes([200-j])
    print('Sending:', pkt)
    s.send(pkt)
    time.sleep(4)
    rx, port = s.recvfrom(256)
    if rx:
        print('Received: {}, on port: {}'.format(rx, port))
        time.sleep(6)

```

5.2 Lopy LoRa Wan nano gateway

5.2.1 config.py

```

""" LoPy LoRaWAN Nano Gateway configuration options """
import machine
import ubinascii
GATEWAY_ID = "9ced511ed6f134B6"
SERVER = 'router.eu.thethings.network'
PORT = 1700

NTP = "europe.pool.ntp.org" # pool.ntp.org is the server name
NTP_PERIOD_S = 3600
WIFI_SSID = 'nikospeladarinosSSID'
WIFI_PASS = '#####'

# for EU868
LORA_FREQUENCY = 868100000
LORA_GW_DR = "SF7BW125" # DR_5
LORA_NODE_DR = 5

```

```

Main.py
#!/usr/bin/env python
#
# Copyright (c) 2019, Pycom Limited.
#
# This software is licensed under the GNU GPL version 3 or any
# later version, with permitted additional terms. For more information
# see the Pycom Licence v1.0 document supplied with this file, or
# available at https://www.pycom.io/opensource/licensing
#

```

5.2.2 **Main.py**

```

""" LoPy LoRaWAN Nano Gateway example usage """
import config
from nanogateway import NanoGateway
if __name__ == '__main__':
    nanogw = NanoGateway(
        id=config.GATEWAY_ID,
        frequency=config.LORA_FREQUENCY,
        datarate=config.LORA_GW_DR,
        ssid=config.WIFI_SSID,
        password=config.WIFI_PASS,
        server=config.SERVER,
        port=config.PORT,
        ntp_server=config.NTP,
        ntp_period=config.NTP_PERIOD_S
    )
    nanogw.start()
    nanogw._log('You may now press ENTER to enter the REPL')
    input()

```

5.2.3 **nanogateway.py**

```

#!/usr/bin/env python
#
# Copyright (c) 2019, Pycom Limited.
#
# This software is licensed under the GNU GPL version 3 or any
# later version, with permitted additional terms. For more information
# see the Pycom Licence v1.0 document supplied with this file, or
# available at https://www.pycom.io/opensource/licensing
#
""" LoPy LoRaWAN Nano Gateway. Can be used for both EU868 and US915. """
import errno
import machine
import ubinascii
import ujson
import uos

```

```

import usocket
import utime
import _thread
from micropython import const
from network import LoRa
from network import WLAN
from machine import Timer

PROTOCOL_VERSION = const(2)
PUSH_DATA = const(0)
PUSH_ACK = const(1)
PULL_DATA = const(2)
PULL_ACK = const(4)
PULL_RESP = const(3)
TX_ERR_NONE = 'NONE'
TX_ERR_TOO_LATE = 'TOO_LATE'
TX_ERR_TOO_EARLY = 'TOO_EARLY'
TX_ERR_COLLISION_PACKET = 'COLLISION_PACKET'
TX_ERR_COLLISION_BEACON = 'COLLISION_BEACON'
TX_ERR_TX_FREQ = 'TX_FREQ'
TX_ERR_TX_POWER = 'TX_POWER'
TX_ERR_GPS_UNLOCKED = 'GPS_UNLOCKED'

UDP_THREAD_CYCLE_MS = const(20)
STAT_PK = {
    'stat': {
        'time': "",
        'lati': 0,
        'long': 0,
        'alti': 0,
        'rxnb': 0,
        'rxok': 0,
        'rxfw': 0,
        'ackr': 100.0,
        'dwnb': 0,
        'txnb': 0
    }
}
RX_PK = {
    'rxpk': [{
        'time': "",
        'tmst': 0,
        'chan': 0,
        'rfch': 0,
        'freq': 0,
        'stat': 1,
        'modu': 'LORA',

```



```

'datr': '',
'codr': '4/5',
'rssi': 0,
'lsnr': 0,
'size': 0,
'data': ''
}}
}
TX_ACK_PK = {
'txpk_ack': {
'error': ''
}
}
}
class NanoGateway:
    """
    Nano gateway class, set up by default for use with TTN, but can be configured
    for any other network supporting the Semtech Packet Forwarder.
    Only required configuration is wifi_ssid and wifi_password which are used for
    connecting to the Internet.
    """
    def __init__(self, id, frequency, datarate, ssid, password, server, port,
ntp_server='pool.ntp.org', ntp_period=3600):
        self.id = id
        self.server = server
        self.port = port
        self.frequency = frequency
        self.datarate = datarate
        self.ssid = ssid
        self.password = password
        self.ntp_server = ntp_server
        self.ntp_period = ntp_period

        self.server_ip = None
        self.rxnb = 0
        self.rxok = 0
        self.rxfw = 0
        self.dwnb = 0
        self.txnb = 0
        self.sf = self._dr_to_sf(self.datarate)
        self.bw = self._dr_to_bw(self.datarate)
        self.stat_alarm = None
        self.pull_alarm = None
        self.uplink_alarm = None

        self.wlan = None
        self.sock = None
        self.udp_stop = False

```

```

self.udp_lock = _thread.allocate_lock()
self.lora = None
self.lora_sock = None

self.rtc = machine.RTC()

def start(self):
    """
    Starts the LoRaWAN nano gateway.
    """
    self._log('Starting LoRaWAN nano gateway with id: {}'.format(self.id))

    # setup WiFi as a station and connect
    self.wlan = WLAN(mode=WLAN.STA)
    self._connect_to_wifi()

    # get a time sync
    self._log('Syncing time with {} ...'.format(self.ntp_server))
    self.rtc.ntp_sync(self.ntp_server, update_period=self.ntp_period)
    while not self.rtc.synced():
        utime.sleep_ms(50)
    self._log("RTC NTP sync complete")
    # get the server IP and create an UDP socket
    self.server_ip = usocket.getaddrinfo(self.server, self.port)[0][-1]
    self._log('Opening UDP socket to {} ({}), port {}...'.format(self.server, self.server_ip[0],
self.server_ip[1]))
    self.sock = usocket.socket(usocket.AF_INET, usocket.SOCK_DGRAM,
usocket.IPPROTO_UDP)
    self.sock.setsockopt(usocket.SOL_SOCKET, usocket.SO_REUSEADDR, 1)
    self.sock.setblocking(False)
    # push the first time immediatelly
    self._push_data(self._make_stat_packet())
    # create the alarms
    self.stat_alarm = Timer.Alarm(handler=lambda t:
self._push_data(self._make_stat_packet()), s=60, periodic=True)
    self.pull_alarm = Timer.Alarm(handler=lambda u: self._pull_data(), s=25, periodic=True)
    # start the UDP receive thread
    self.udp_stop = False
    _thread.start_new_thread(self._udp_thread, ())

    # initialize the LoRa radio in LORA mode
    self._log('Setting up the LoRa radio at {} Mhz using {}'.format(
self._freq_to_float(self.frequency), self.datarate))
    self.lora = LoRa(
        mode=LoRa.LORA,
        frequency=self.frequency,
        bandwidth=self.bw,

```

```

        sf=self.sf,
        preamble=8,
        coding_rate=LoRa.CODING_4_5,
        tx_iq=True
    )
    # create a raw LoRa socket
    self.lora_sock = usocket.socket(usocket.AF_LORA, usocket.SOCK_RAW)
    self.lora_sock.setblocking(False)
    self.lora_tx_done = False

    self.lora.callback(trigger=(LoRa.RX_PACKET_EVENT | LoRa.TX_PACKET_EVENT),
handler=self._lora_cb)
    self._log('LoRaWAN nano gateway online')

def stop(self):
    """
    Stops the LoRaWAN nano gateway.
    """
    self._log('Stopping...')
    # send the LoRa radio to sleep
    self.lora.callback(trigger=None, handler=None)
    self.lora.power_mode(LoRa.SLEEP)

    # stop the NTP sync
    self.rtc.ntp_sync(None)
    # cancel all the alarms
    self.stat_alarm.cancel()
    self.pull_alarm.cancel()

    # signal the UDP thread to stop
    self.udp_stop = True
    while self.udp_stop:
        utime.sleep_ms(50)
    # disable WLAN
    self.wlan.disconnect()
    self.wlan.deinit()
def _connect_to_wifi(self):
    self.wlan.connect(self.ssid, auth=(None, self.password))
    while not self.wlan.isconnected():
        utime.sleep_ms(50)
    self._log('WiFi connected to: {}'.format(self.ssid))
def _dr_to_sf(self, dr):
    sf = dr[2:4]
    if sf[1] not in '0123456789':
        sf = sf[:1]
    return int(sf)
def _dr_to_bw(self, dr):

```

```

bw = dr[-5:]
if bw == 'BW125':
    return LoRa.BW_125KHZ
elif bw == 'BW250':
    return LoRa.BW_250KHZ
else:
    return LoRa.BW_500KHZ
def _sf_bw_to_dr(self, sf, bw):
    dr = 'SF' + str(sf)
    if bw == LoRa.BW_125KHZ:
        return dr + 'BW125'
    elif bw == LoRa.BW_250KHZ:
        return dr + 'BW250'
    else:
        return dr + 'BW500'
def _lora_cb(self, lora):
    """
    LoRa radio events callback handler.
    """
    events = lora.events()
    if events & LoRa.RX_PACKET_EVENT:
        self.rxnb += 1
        self.rxok += 1
        rx_data = self.lora_sock.recv(256)
        stats = lora.stats()
        packet = self._make_node_packet(rx_data, self.rtc.now(), stats.rx_timestamp,
stats.sfrx, self.bw, stats.rssi, stats.snr)
        packet = self.frequency_rounding_fix(packet, self.frequency)
        self._push_data(packet)
        self._log('Received packet: {}', packet)
        self.rxfw += 1
    if events & LoRa.TX_PACKET_EVENT:
        self.txnb += 1
        lora.init(
            mode=LoRa.LORA,
            frequency=self.frequency,
            bandwidth=self.bw,
            sf=self.sf,
            preamble=8,
            coding_rate=LoRa.CODING_4_5,
            tx_iq=True
        )
def _freq_to_float(self, frequency):
    """
    MicroPython has some inprecision when doing large float division.
    To counter this, this method first does integer division until we
    reach the decimal breaking point. This doesn't completely eliminate

```

the issue in all cases, but it does help for a number of commonly used frequencies.

```
"""
```

```
divider = 6
while divider > 0 and frequency % 10 == 0:
    frequency = frequency // 10
    divider -= 1
if divider > 0:
    frequency = frequency / (10 ** divider)
return frequency
```

```
def frequency_rounding_fix(self, packet, frequency):
    freq = str(frequency)[0:3] + '.' + str(frequency)[3]
```

```
    start = packet.find("freq\\":")
    end = packet.find(",", start)
    packet = packet[:start + 7] + freq + packet[end:]
    return packet
```

```
def _make_stat_packet(self):
    now = self.rtc.now()
    STAT_PK["stat"]["time"] = "%d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d GMT" % (now[0], now[1],
now[2], now[3], now[4], now[5])
    STAT_PK["stat"]["rxnb"] = self.rxnb
    STAT_PK["stat"]["rxok"] = self.rxok
    STAT_PK["stat"]["rxfw"] = self.rxfw
    STAT_PK["stat"]["dwnb"] = self.dwnb
    STAT_PK["stat"]["txnb"] = self.txnb
    return ujson.dumps(STAT_PK)
```

```
def _make_node_packet(self, rx_data, rx_time, tmst, sf, bw, rssi, snr):
    RX_PK["rxpk"][0]["time"] = "%d-%02d-%02dT%02d:%02d:%02d.%dZ" % (rx_time[0],
rx_time[1], rx_time[2], rx_time[3], rx_time[4], rx_time[5], rx_time[6])
    RX_PK["rxpk"][0]["tmst"] = tmst
    RX_PK["rxpk"][0]["freq"] = self._freq_to_float(self.frequency)
    RX_PK["rxpk"][0]["datr"] = self._sf_bw_to_dr(sf, bw)
    RX_PK["rxpk"][0]["rssi"] = rssi
    RX_PK["rxpk"][0]["lsnr"] = snr
    RX_PK["rxpk"][0]["data"] = ubinascii.b2a_base64(rx_data)[: -1]
    RX_PK["rxpk"][0]["size"] = len(rx_data)
    return ujson.dumps(RX_PK)
```

```
def _push_data(self, data):
    token = uos.urandom(2)
    packet = bytes([PROTOCOL_VERSION]) + token + bytes([PUSH_DATA]) +
ubinascii.unhexlify(self.id) + data
    with self.udp_lock:
```

```

    try:
        self.sock.sendto(packet, self.server_ip)
    except Exception as ex:
        self._log('Failed to push uplink packet to server: {}'.format(ex))
def _pull_data(self):
    token = uos.urandom(2)
    packet = bytes([PROTOCOL_VERSION]) + token + bytes([PULL_DATA]) +
    ubinascii.unhexlify(self.id)
    with self.udp_lock:
        try:
            self.sock.sendto(packet, self.server_ip)
        except Exception as ex:
            self._log('Failed to pull downlink packets from server: {}'.format(ex))

def _ack_pull_rsp(self, token, error):
    TX_ACK_PK["txpk_ack"]["error"] = error
    resp = ujson.dumps(TX_ACK_PK)
    packet = bytes([PROTOCOL_VERSION]) + token + bytes([PULL_ACK]) +
    ubinascii.unhexlify(self.id) + resp
    with self.udp_lock:
        try:
            self.sock.sendto(packet, self.server_ip)
        except Exception as ex:
            self._log('PULL RSP ACK exception: {}'.format(ex))

def _send_down_link(self, data, tmst, datarate, frequency):
    """
    Transmits a downlink message over LoRa.
    """
    self.lora.init(
        mode=LoRa.LORA,
        frequency=frequency,
        bandwidth=self._dr_to_bw(datarate),
        sf=self._dr_to_sf(datarate),
        preamble=8,
        coding_rate=LoRa.CODING_4_5,
        tx_iq=True
    )
    #while utime.ticks_cpu() < tmst:
    #    pass
    self.lora_sock.send(data)
    self._log(
        'Sent downlink packet scheduled on {:.3f}, at {:.3f} Mhz using {}: {}'.format(
            tmst / 1000000,
            self._freq_to_float(frequency),
            datarate,
            data
        )
    )

```

```

)
def _send_down_link_class_c(self, data, datarate, frequency):
    self.lora.init(
        mode=LoRa.LORA,
        frequency=frequency,
        bandwidth=self._dr_to_bw(datarate),
        sf=self._dr_to_sf(datarate),
        preamble=8,
        coding_rate=LoRa.CODING_4_5,
        tx_iq=True,
        device_class=LoRa.CLASS_C
    )
    self.lora_sock.send(data)
    self._log(
        'Sent downlink packet scheduled on {:.3f}, at {:.3f} Mhz using {}: {}'.format(
            utime.time(),
            self._freq_to_float(frequency),
            datarate,
            data
        )
    )
def _udp_thread(self):
    """
    UDP thread, reads data from the server and handles it.
    """
    while not self.udp_stop:
        try:
            data, src = self.sock.recvfrom(1024)
            _token = data[1:3]
            _type = data[3]
            if _type == PUSH_ACK:
                self._log("Push ack")
            elif _type == PULL_ACK:
                self._log("Pull ack")
            elif _type == PULL_RESP:
                self.dwnb += 1
                ack_error = TX_ERR_NONE
                tx_pk = ujson.loads(data[4:])
                if "tmst" in data:
                    tmst = tx_pk["txpk"]["tmst"]
                    t_us = tmst - utime.ticks_cpu() - 15000
                    if t_us < 0:
                        t_us += 0xFFFFFFFF
                    if t_us < 20000000:
                        self.uplink_alarm = Timer.Alarm(
                            handler=lambda x: self._send_down_link(
                                ubinascii.a2b_base64(tx_pk["txpk"]["data"]),
                                tx_pk["txpk"]["tmst"] - 50, tx_pk["txpk"]["datr"],

```

```

        int(tx_pk["txpk"]["freq"] * 1000) * 1000
    ),
    us=t_us
)
else:
    ack_error = TX_ERR_TOO_LATE
    self._log('Downlink timestamp error!, t_us: {}'.format(t_us))
else:
    self.uplink_alarm = Timer.Alarm(
        handler=lambda x: self._send_down_link_class_c(
            ubinascii.a2b_base64(tx_pk["txpk"]["data"]),
            tx_pk["txpk"]["data"],
            int(tx_pk["txpk"]["freq"] * 1000) * 1000
        ),
        us=50
    )
    self._ack_pull_rsp(_token, ack_error)
    self._log("Pull rsp")
except usocket.timeout:
    pass
except OSError as ex:
    if ex.args[0] != errno.EAGAIN:
        self._log('UDP recv OSError Exception: {}'.format(ex))
except Exception as ex:
    self._log('UDP recv Exception: {}'.format(ex))

# wait before trying to receive again
utime.sleep_ms(UDP_THREAD_CYCLE_MS)
# we are to close the socket
self.sock.close()
self.udp_stop = False
self._log('UDP thread stopped')

def _log(self, message, *args):
    """
    Outputs a log message to stdout.
    """
    print('{: >10.3f} {}'.format(
        utime.ticks_ms() / 1000,
        str(message).format(*args)
    ))

```

5.3 Arduino Sketches για τους αισθητήρες

5.3.1 Sensor SVM30 : example2_svm30_humidity_updateNikos

* /* example2 update regular humidity on SGP30 program and continued read information from SVM30


```

* By: paulvha@hotmail.com
* Date: September 20, 2019
* Version: 1.0
* Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy
* of this software and associated documentation files (the "Software"), to deal
* in the Software without restriction, including without limitation the rights
* to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or sell
* copies of the Software, and to permit persons to whom the Software is
* furnished to do so, subject to the following conditions:
*
* The above copyright notice and this permission notice shall be included in
* all copies or substantial portions of the Software.
* THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR
* IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY,
* FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT SHALL THE
* AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER
* LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE, ARISING FROM,
* OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN
* THE SOFTWARE.

```

```

* connected to MEGA2560
* SVM30      MEGA2560
* 1. SDL -----  SDL
* 2. GND -----  GND
* 3. VCC -----  +5V
* 4. SDA -----  SDA

```

```

*/
/////////////////////////////////////////////////////////////////
/* define driver debug
* false : no messages
* true : display driver debug messages
*/////////////////////////////////////////////////////////////////
#define DEBUG false
/////////////////////////////////////////////////////////////////
/* define number of seconds between display results
*/////////////////////////////////////////////////////////////////
#define DELAY 10
/////////////////////////////////////////////////////////////////
////////// NO CHANGES BEYOND THIS POINT NEEDED //////////
/////////////////////////////////////////////////////////////////
// function prototypes (sometimes the pre-processor does not create prototypes themself
on ESPxx)
void read_id();
void read_featureSet();
void Errorloop(char *mess);
void read_values();
void read_baseline();

```

```

void KeepTrigger(uint8_t del);
void update_humidity();

#include <svm30.h>
// create instance
SVM30 svm;
// store values
struct svm_values v;

void setup() {

  Serial.begin(115200);
  Serial.println(F("Hi there, this is example 2.\nConstant update of the absolute humidity
while reading information from the SVM30"));

  // enable debug messages
  svm.EnableDebugging(DEBUG);

  svm.begin();
  Serial.print(F("Driver version : "));
  Serial.println(svm.GetDriverVersion());

  // try to detect SVM30 sensors
  if (svm.probe() == false) Errorloop("could not detect SVM30 sensors");
  else Serial.println(F("SVM30 detected"));

  // read and display the ID
  read_id();
  // read SGP30 feature set
  read_featureSet();
}
void loop() {
  // read measurement values
  read_values();
  // read SGP30 baseline
  read_baseline();
  // update humidity based
  update_humidity();
  // wait x seconds
  KeepTrigger(DELAY);
}
/*
 * @brief : keep triggering SGP30 while waiting
 *
 * @param del : number of seconds to wait
 *
 * source datasheet SVM30:

```

```

* The on-chip baseline compensation algorithm has been optimized
* for 1HZ sampling rate. The sensor shows best performance when
* used with this sampling rate.
*
*/
void KeepTrigger(uint8_t del)
{
    uint8_t w_seconds = del;
    unsigned long startMillis;
    if (w_seconds == 0) w_seconds = 1;
    while (w_seconds--)
    {
        startMillis = millis();
        if (!svm.TriggerSGP30())
            Errorloop("Error during trigger waiting");

        // this gives 1Hz /1000ms (aboutisch)
        while(millis() - startMillis < 1000);
    }
}

/*
* @brief : read and display the values from the SVM30
*
*/
void read_values() {

    if (!svm.GetValues(&v))
        Errorloop("Error during reading values");
    Serial.print(F("CO2 equivalent : "));
    Serial.print(v.CO2eq);
    Serial.print(F(", TVOC : "));
    Serial.print(v.TVOC);
    Serial.print(F(", H2_signal : "));
    Serial.print(v.H2_signal);
    Serial.print(F(", Ethanol_signal : "));
    Serial.print(v.Ethanol_signal);
    Serial.print(F(", temperature : "));
    Serial.print((float) v.temperature/1000);
    Serial.print(F(", Humidity : "));
    Serial.print((float) v.humidity/1000);
    Serial.print(F(", absolute humidity : "));
    Serial.print(v.absolute_hum);
}
/*
* @brief: update absolute humidity on the SGP30 based on the earlier reading of
temperature and humidity

```

```

* from the SHTC1
*/
void update_humidity() {
    Serial.print(F("update humidity..."));

    if ( ! svm.SetHumidity(v.absolute_hum))
        Errorloop("could not update humidity on the SGP30");
    // give time to settle (max 10 according to datasheet)
    delay(10);
    Serial.println(F("done"));
}
/*
* @brief: read and display the id of the SGP30 and SHTC1 sensors
*/
void read_id() {
    uint16_t buf[3]; // SGP30 is 3 words, SHTC1 is 1 word
    char id[15];
    if ( ! svm.GetId(SGP30, buf))
        Errorloop("could not read SGP30 id");
    Serial.print(F("\nSGP30 id : "));
    sprintf(id, "%04x %04x %04x", buf[0], buf[1], buf[2]);
    Serial.println(id);

    if (svm.GetId(SHTC1, buf) == false)
        Errorloop("could not read SHTC1 id");
    Serial.print(F("SHTC1 id : "));
    // only bit 5:0 matter (source: datasheet)
    sprintf(id, "%04x", buf[0] & 0x3f);
    Serial.println(id);
}
/*
* @brief: read and display the product feature set of the SGP30 sensor
*/
void read_featureSet(){
    char buf[2];
    if ( ! svm.GetFeatureSet(buf))
        Errorloop("could not read SGP30 feature set");
    Serial.print(F("\nSGP30 product type : "));
    Serial.print((buf[0] & 0xf0), HEX);
    Serial.print(F(", Product version : "));
    Serial.println(buf[1], HEX);
    Serial.println();
}
/*
* @brief: read the baselines of the SGP30 sensor
* see example3 for extended information about baselines
*/

```

```

void read_baseline(){
  uint16_t baseline;
  if (! svm.GetBaseline_CO2(&baseline))
    Errorloop("could not read SGP30 CO2 baseline");
  Serial.print(F(" CO2 equivalent baseline : 0x"));
  Serial.print(baseline, HEX);
  if (! svm.GetBaseline_TVOC(&baseline))
    Errorloop("could not read SGP30 TVOC baseline");
  Serial.print(F(", TVOC baseline : 0x"));
  Serial.println(baseline, HEX);
}
/**
 * @brief : continued loop after fatal error
 * @param mess : message to display
 */
void Errorloop(char *mess)
{
  Serial.println(mess);
  Serial.println(F("Program on hold"));
  for(;;) delay(100000);
}

```

5.3.2 Sensor SPS30 : Example12_sps30_BasicReadings_any_serial_B

```

/* Copyright (c) January 2019, version 1.0 Paul van Haastrecht
 * Version 1.1 Paul van Haastrecht
 * - Changed the I2C information / setup.
 * Version 1.1.1 Paul van Haastrecht / March 2020
 * - Fixed compile errors and warnings.
 * Version 1.1.2 Paul van Haastrecht / March 2020
 * - added versions level to GetDeviceInfo()
 * Version 1.4.2 Paul van Haastrecht / May 2020
 * - demonstrate any serial channel selection
 * ===== Highlevel description =====
 * This basic reading example sketch will connect to an SPS30 for getting data and
 * display the available data. You can select any serial port.
 * ===== Hardware connections =====
 * ## UART UART UART UART UART UART UART UART UART UART UART UART UART##
 * //////////////////////////////////////
 * Successfully tested on ATMEGA2560, Due
 * Used Serial2. No need to set/change RX or TX pin
 * SPS30 pin ATMEGA
 * 1 VCC ----- 5V
 * 2 RX ----- TX2 pin 16
 * 3 TX ----- RX2 pin 17
 * 4 Select (NOT CONNECTED)
 * 5 GND ----- GND
 * Also tested on Serial1 and Serial3 successfully

```

```

* ===== Disclaimer =====
* This program is distributed in the hope that it will be useful,
* but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
* MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
* GNU General Public License for more details.
*
* You should have received a copy of the GNU General Public License
* along with this program. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
=====
* NO support, delivered as is, have fun, good luck !!
*/
#include "sps30.h"
////////////////////////////////////
// define serial communication channel to use for SPS30
////////////////////////////////////
#define SP30_COMMS Serial1
////////////////////////////////////
/* define driver debug
* 0 : no messages
* 1 : request sending and receiving
* 2 : request sending and receiving + show protocol errors */
////////////////////////////////////
#define DEBUG 0
////////////////////////////////////
///// NORMALLY NO CHANGES BEYOND THIS POINT NEEDED /////
// BUT IF YOU NEED TO SET DIFFERENT PINS FOR SERIAL PORT //
// AS IS THE CASE FOR ESP32 SERIAL1
// CHANGE LINE 130: SP30_COMMS.begin(115200); //
////////////////////////////////////
// function prototypes (sometimes the pre-processor does not create prototypes themself
on ESPxx)
void serialTrigger(char * mess);
void ErrtoMess(char *mess, uint8_t r);
void Errorloop(char *mess, uint8_t r);
void GetDeviceInfo();
bool read_all();
// create constructor
SPS30 sps30;
void setup() {

    Serial.begin(115200);

    // serialTrigger((char *) "SPS30-Example12: Basic reading with any serial channel select.
press <enter> to start");

    // set driver debug level
    sps30.EnableDebugging(DEBUG);

```

```

Serial.println(F("Trying to connect.));
// Initialize communication port
// FOR ESP32 SERIAL1 CHANGE THIS TO : E.G. RX-PIN 25, TX-PIN 26
// SP30_COMMS.begin(115200, SERIAL_8N1, 25, 26);

SP30_COMMS.begin(115200);

// Initialize SPS30 library
if (! sps30.begin(&SP30_COMMS))
    Errorloop((char *) "Could not set serial communication channel.", 0);

// check for SPS30 connection
if (! sps30.probe()) Errorloop((char *) "could not probe / connect with SPS30.", 0);
else Serial.println(F("Detected SPS30.));

// reset SPS30 connection
if (! sps30.reset()) Errorloop((char *) "could not reset.", 0);

// read device info
GetDeviceInfo();

// start measurement
if (sps30.start()) Serial.println(F("Measurement started));
else Errorloop((char *) "Could NOT start measurement", 0);
// serialTrigger((char *) "Hit <enter> to continue reading.));
}
void loop() {
    read_all();
    delay(3000);
}
/**
 * @brief : read and display device info
 */
void GetDeviceInfo()
{
    char buf[32];
    uint8_t ret;
    SPS30_version v;
    //try to read serial number
    ret = sps30.GetSerialNumber(buf, 32);
    if (ret == ERR_OK) {
        Serial.print(F("Serial number : "));
        if(strlen(buf) > 0) Serial.println(buf);
        else Serial.println(F("not available"));
    }
    else

```

```

    ErrtoMess((char *) "could not get serial number", ret);
// try to get product name
ret = sps30.GetProductName(buf, 32);
if (ret == ERR_OK) {
    Serial.print(F("Product name :"));
    if(strlen(buf) > 0) Serial.println(buf);
    else Serial.println(F("not available"));
}
else
    ErrtoMess((char *) "could not get product name.", ret);
// try to get version info
ret = sps30.GetVersion(&v);
if (ret != ERR_OK) {
    Serial.println(F("Can not read version info"));
    return;
}
Serial.print(F("Firmware level: ")); Serial.print(v.major);
Serial.print("."); Serial.println(v.minor);
Serial.print(F("Hardware level: ")); Serial.println(v.HW_version);
Serial.print(F("SHDLC protocol: ")); Serial.print(v.SHDLC_major);
Serial.print("."); Serial.println(v.SHDLC_minor);
Serial.print(F("Library level : ")); Serial.print(v.DRV_major);
Serial.print("."); Serial.println(v.DRV_minor);
}
/**
 * @brief : read and display all values
 */
bool read_all()
{
    static bool header = true;
    uint8_t ret, error_cnt = 0;
    struct sps_values val;
    // loop to get data
    do {
        ret = sps30.GetValues(&val);
        // data might not have been ready
        if (ret == ERR_DATALENGTH){
            if (error_cnt++ > 3) {
                ErrtoMess((char *) "Error during reading values: ",ret);
                return(false);
            }
            delay(1000);
        }
        // if other error
        else if(ret != ERR_OK) {
            ErrtoMess((char *) "Error during reading values: ",ret);
            return(false);
        }
    }

```



```

    }
} while (ret != ERR_OK);
// only print header first time
if (header) {
    Serial.println(F("-----Mass -----      ----- Number -----      -Average-"));
    Serial.println(F("  Concentration [µg/m3]      Concentration [#/cm3]      [µm]"));
    Serial.println(F("P1.0\tP2.5\tP4.0\tP10\tP0.5\tP1.0\tP2.5\tP4.0\tP10\tPartSize\n"));
    header = false;
}
Serial.print(val.MassPM1);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.MassPM2);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.MassPM4);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.MassPM10);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.NumPM0);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.NumPM1);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.NumPM2);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.NumPM4);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.NumPM10);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.PartSize);
Serial.print(F("\n"));
return(true);
}
/**
 * @brief : continued loop after fatal error
 * @param mess : message to display
 * @param r : error code
 *
 * if r is zero, it will only display the message
 */
void Errorloop(char *mess, uint8_t r)
{
    if (r) ErrtoMess(mess, r);
    else Serial.println(mess);
    Serial.println(F("Program on hold"));
    for(;;) delay(100000);
}
/**
 * @brief : display error message

```

```

* @param mess : message to display
* @param r : error code
*
*/
void ErrtoMess(char *mess, uint8_t r)
{
  char buf[80];
  Serial.print(mess);
  sps30.GetErrDescription(r, buf, 80);
  Serial.println(buf);
}
/**
* serialTrigger prints repeated message, then waits for enter
* to come in from the serial port.
*/
void serialTrigger(char * mess)
{
  Serial.println();
  while (!Serial.available()) {
    Serial.println(mess);
    delay(2000);
  }
  while (Serial.available())
    Serial.read();
}

```

5.3.3 Sensor SPS30 : Example2_sps30_BasicReadings_autoclean_B

```

/* Copyright (c) January 2019, version 1.0 Paul van Haastrecht
* Version 1.1 Paul van Haastrecht
* - Changed the I2C information / setup.
* Version 1.1.1 Paul van Haastrecht / March 2020
* - Fixed compile errors and warnings.
* Version 1.1.2 Paul van Haastrecht / March 2020
* - added versions level to GetDeviceInfo()
* Version 1.1.3 Paul van Haastrecht / July 2020
* - added embedded support for Arduino Due
* ===== Highlevel description =====
* This basic reading sketch will connect to an SPS-30 for getting data, able to
* get and set AutoCleanInterval as well as start fan-cleaning manually
* ===== Hardware connections =====
* ## UART UART UART UART UART UART UART UART UART UART UART UART UART ##
* //////////////////////////////////////
* Successfully tested on ATMEGA2560 / Arduino Due
* Used SerialPort2. No need to set/change RX or TX pin
* SPS30 pin ATMEGA
* 1 VCC ----- 5V
* 2 RX ----- TX2 pin 16

```

```

* 3 TX ----- RX2 pin 17
* 4 Select (NOT CONNECTED)
* 5 GND ----- GND
* Also tested on SerialPort1 and Serialport3 successfully
* //////////////////////////////////////
* ## I2C I2C I2C I2C I2C I2C I2C I2C I2C I2C I2C I2C I2C I2C I2C I2C ##
* //////////////////////////////////////
* NOTE 1:
* Depending on the Wire / I2C buffer size we might not be able to read all the values.
* The buffer size needed is at least 60 while on many boards this is set to 32. The driver
* will determine the buffer size and if less than 64 only the MASS values are returned.
* You can manually edit the Wire.h of your board to increase (if you memory is larg
enough)
* One can check the expected number of bytes with the I2C_expect() call as in this example
* see detail document.
* NOTE 2:
* As documented in the datasheet, make sure to use external 10K pull-up resistor on
* both the SDA and SCL lines. Otherwise the communication with the sensor will fail
random.
* .....
* Successfully tested on ATMEGA2560 / Arduino Due
* SPS30 pin ATMEGA
* 1 VCC ----- 5V
* 2 SDA ----- SDA
* 3 SCL ----- SCL
* 4 Select ----- GND (select I2c)
* 5 GND ----- GND
** ===== PARAMETERS
* From line 148 there are configuration parameters for the program
* ===== SOFTWARE
* ===== Disclaimer =====
* This program is distributed in the hope that it will be useful,
* but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
* MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
* GNU General Public License for more details.
* You should have received a copy of the GNU General Public License
* along with this program. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
=====
* NO support, delivered as is, have fun, good luck !!
*/
#include "sps30.h"
////////////////////////////////////
/*define communication channel to use for SPS30
valid options:
* I2C_COMMS use I2C communication
* SOFTWARE_SERIAL Arduino variants and ESP8266 (NOTE)
* SERIALPORT ONLY IF there is NO monitor attached

```

```

* SERIALPORT1      Arduino MEGA2560, Due. Sparkfun ESP32 Thing : MUST define new
pins as defaults are used for flash memory)
* SERIALPORT2      Arduino MEGA2560, Due and ESP32
* SERIALPORT3      Arduino MEGA2560 Due only for now
* NOTE: Softserial has been left in as an option, but as the SPS30 is only
* working on 115K the connection will probably NOT work on any device.*/
////////////////////////////////////
#define SP30_COMMS SERIALPORT1
////////////////////////////////////
/* define RX and TX pin for softserial and Serial1 on ESP32
* can be set to zero if not applicable / needed */
////////////////////////////////////
#define TX_PIN 26
#define RX_PIN 25
////////////////////////////////////
/* define new AUTO Clean interval
* Will be remembered after power off
*
* default is 604800 seconds
* 0 = disable Auto Clean
* -1 = do not change current setting */
////////////////////////////////////
#define AUTOCLEANINTERVAL -1
////////////////////////////////////
/* Perform a clean NOW ?
* 1 = yes
* 0 = NO */
////////////////////////////////////
#define PERFORMCLEANNOW 0
////////////////////////////////////
/* define driver debug
* 0 : no messages
* 1 : request sending and receiving
* 2 : request sending and receiving + show protocol errors */
////////////////////////////////////
#define DEBUG 0
////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
// function prototypes (sometimes the pre-processor does not create prototypes themself
on ESPxx)
void serialTrigger(char * mess);
void ErrtoMess(char *mess, uint8_t r);
void Errorloop(char *mess, uint8_t r);
void GetDeviceInfo();
bool read_all();
void SetAutoClean();

```

```

// create constructor
SPS30 sps30;
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  serialTrigger((char *) "SPS30-Example2: Basic reading + clean. press <enter> to start");
  Serial.println(F("Trying to connect"));
  // set driver debug level
  sps30.EnableDebugging(DEBUG);
  // set pins to use for softserial and Serial1 on ESP32
  if (TX_PIN != 0 && RX_PIN != 0) sps30.SetSerialPin(RX_PIN, TX_PIN);
  // Begin communication channel;
  if (! sps30.begin(SP30_COMMS))
    Errorloop((char *) "could not initialize communication channel.", 0);
  // check for SPS30 connection
  if (! sps30.probe()) Errorloop((char *) "could not probe / connect with SPS30.", 0);
  else Serial.println(F("Detected SPS30."));
  // reset SPS30 connection
  if (! sps30.reset()) Errorloop((char *) "could not reset.", 0);
  // read device info
  GetDeviceInfo();
  // do Auto Clean interval
  SetAutoClean();
  // start measurement
  if (sps30.start() == true) Serial.println(F("Measurement started"));
  else Errorloop((char *) "Could NOT start measurement", 0);
  // clean now requested
  if (PERFORMCLEANNOW) {
    // clean now
    if (sps30.clean() == true)
      Serial.println(F("fan-cleaning manually started"));
    else
      Serial.println(F("Could NOT manually start fan-cleaning"));
  }
  serialTrigger((char *) "Hit <enter> to continue reading");
  if (SP30_COMMS == I2C_COMMS) {
    if (sps30.I2C_expect() == 4)
      Serial.println(F(" !!! Due to I2C buffersize only the SPS30 MASS concentration is available
!!! \n"));
  }
}
void loop() {
  read_all();
  delay(3000);
}
/**
 * @brief: read and display device info

```

```

*/
void GetDeviceInfo()
{
    char buf[32];
    uint8_t ret;
    SPS30_version v;
    //try to read serial number
    ret = sps30.GetSerialNumber(buf, 32);
    if (ret == ERR_OK) {
        Serial.print(F("Serial number : "));
        if(strlen(buf) > 0) Serial.println(buf);
        else Serial.println(F("not available"));
    }
    else
        ErrtoMess((char *) "could not get serial number.", ret);

    // try to get product name
    ret = sps30.GetProductName(buf, 32);
    if (ret == ERR_OK) {
        Serial.print(F("Product name : "));
        if(strlen(buf) > 0) Serial.println(buf);
        else Serial.println(F("not available"));
    }
    else
        ErrtoMess((char *) "could not get product name.", ret);
    // try to get version info
    ret = sps30.GetVersion(&v);
    if (ret != ERR_OK) {
        Serial.println(F("Can not read version info"));
        return;
    }
    Serial.print(F("Firmware level: ")); Serial.print(v.major);
    Serial.print("."); Serial.println(v.minor);
    if (SP30_COMMS != I2C_COMMS) {
        Serial.print(F("Hardware level: ")); Serial.println(v.HW_version);

        Serial.print(F("SHDLC protocol: ")); Serial.print(v.SHDLC_major);
        Serial.print("."); Serial.println(v.SHDLC_minor);
    }
    Serial.print(F("Library level : ")); Serial.print(v.DRV_major);
    Serial.print("."); Serial.println(v.DRV_minor);
}
/**
 * @brief: Get & Set new Auto Clean Interval
 *
 */
void SetAutoClean()

```

```

{
  uint32_t interval;
  uint8_t ret;
  // try to get interval
  ret = sps30.GetAutoCleanInt(&interval);
  if (ret == ERR_OK) {
    Serial.print(F("Current Auto Clean interval: "));
    Serial.print(interval);
    Serial.println(F(" seconds"));
  }
  else
    ErrtoMess((char *) "could not get clean interval.", ret);
  // only if requested
  if (AUTOCLEANINTERVAL == -1) {
    Serial.println(F("No Auto Clean interval change requested."));
    return;
  }
  // try to set interval
  interval = AUTOCLEANINTERVAL;
  ret = sps30.SetAutoCleanInt(interval);
  if (ret == ERR_OK) {
    Serial.print(F("Auto Clean interval now set : "));
    Serial.print(interval);
    Serial.println(F(" seconds"));
  }
  else
    ErrtoMess((char *) "could not set clean interval.", ret);

  // try to get interval
  ret = sps30.GetAutoCleanInt(&interval);
  if (ret == ERR_OK) {
    Serial.print(F("Current Auto Clean interval: "));
    Serial.print(interval);
    Serial.println(F(" seconds"));
  }
  else
    ErrtoMess((char *) "could not get clean interval.", ret);
}
/**
 * @brief: read and display all values
 */
bool read_all()
{
  static bool header = true;
  uint8_t ret, error_cnt = 0;
  struct sps_values val;
  // loop to get data

```

```

do {
    ret = sps30.GetValues(&val);
    // data might not have been ready
    if (ret == ERR_DATALENGTH){
        if (error_cnt++ > 3) {
            ErrtoMess((char *) "Error during reading values: ",ret);
            return(false);
        }
        delay(1000);
    }
    // if other error
    else if(ret != ERR_OK) {
        ErrtoMess((char *) "Error during reading values: ",ret);
        return(false);
    }
} while (ret != ERR_OK);
// only print header first time
if (header) {
    Serial.println(F("-----Mass -----      ----- Number -----      -Average-"));
    Serial.println(F("  Concentration [μg/m3]      Concentration [#/cm3]      [μm]"));
    Serial.println(F("P1.0\tP2.5\tP4.0\tP10\tP0.5\tP1.0\tP2.5\tP4.0\tP10\tPartSize\n"));
    header = false;
}
Serial.print(val.MassPM1);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.MassPM2);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.MassPM4);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.MassPM10);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.NumPM0);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.NumPM1);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.NumPM2);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.NumPM4);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.NumPM10);
Serial.print(F("\t"));
Serial.print(val.PartSize);
Serial.print(F("\n"));
return(true);
}
/**
 * @brief : continued loop after fatal error

```



```

* @param mess : message to display
* @param r : error code
*
* if r is zero, it will only display the message
*/
void Errorloop(char *mess, uint8_t r)
{
  if (r) ErrtoMess(mess, r);
  else Serial.println(mess);
  Serial.println(F("Program on hold"));
  for(;;) delay(100000);
}
/**
* @brief : display error message
* @param mess : message to display
* @param r : error code
*
*/
void ErrtoMess(char *mess, uint8_t r)
{
  char buf[80];
  Serial.print(mess);
  sps30.GetErrDescription(r, buf, 80);
  Serial.println(buf);
}
/**
* serialTrigger prints repeated message, then waits for enter
* to come in from the serial port.
*/
void serialTrigger(char * mess)
{
  Serial.println();
  while (!Serial.available())
  {
    Serial.println(mess);
    delay(2000);
  }
  while (Serial.available())
    Serial.read();
}

```

5.3.4. BME680 Bosch: bsec

```

#include "bsec.h"
// Helper functions declarations
void checklaqSensorStatus(void);
void errLeds(void);
// Create an object of the class Bsec

```

```

Bsec iaqSensor;
String output;
// Entry point for the example
void setup(void)
{
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin();
  iaqSensor.begin(BME680_I2C_ADDR_PRIMARY, Wire);
  output = "\nBSEC library version " + String(iaqSensor.version.major) + "." +
String(iaqSensor.version.minor) + "." + String(iaqSensor.version.major_bugfix) + "." +
String(iaqSensor.version.minor_bugfix);
  Serial.println(output);
  checkIaqSensorStatus();

  bsec_virtual_sensor_t sensorList[10] = {
    BSEC_OUTPUT_RAW_TEMPERATURE,
    BSEC_OUTPUT_RAW_PRESSURE,
    BSEC_OUTPUT_RAW_HUMIDITY,
    BSEC_OUTPUT_RAW_GAS,
    BSEC_OUTPUT_IAQ,
    BSEC_OUTPUT_STATIC_IAQ,
    BSEC_OUTPUT_CO2_EQUIVALENT,
    BSEC_OUTPUT_BREATH_VOC_EQUIVALENT,
    BSEC_OUTPUT_SENSOR_HEAT_COMPENSATED_TEMPERATURE,
    BSEC_OUTPUT_SENSOR_HEAT_COMPENSATED_HUMIDITY,
  };
  iaqSensor.updateSubscription(sensorList, 10, BSEC_SAMPLE_RATE_LP);
  checkIaqSensorStatus();
  // Print the header
  output = "Timestamp [ms], raw temperature [°C], pressure [hPa], raw relative humidity [%],
gas [Ohm], IAQ, IAQ accuracy, temperature [°C], relative humidity [%], Static IAQ, CO2
equivalent, breath VOC equivalent";
  Serial.println(output);
}
// Function that is looped forever
void loop(void)
{
  unsigned long time_trigger = millis();
  if (iaqSensor.run()) { // If new data is available
    output = String(time_trigger);

```

```

output += ", " + String(iaqSensor.rawTemperature);
output += ", " + String(iaqSensor.pressure);
output += ", " + String(iaqSensor.rawHumidity);
output += ", " + String(iaqSensor.gasResistance);
output += ", " + String(iaqSensor.iaq);
output += ", " + String(iaqSensor.iaqAccuracy);
output += ", " + String(iaqSensor.temperature);
output += ", " + String(iaqSensor.humidity);
output += ", " + String(iaqSensor.staticIaq);
output += ", " + String(iaqSensor.co2Equivalent);
output += ", " + String(iaqSensor.breathVocEquivalent);
Serial.println(output);
} else {
    checkIaqSensorStatus();
}
}

// Helper function definitions
void checkIaqSensorStatus(void)
{
    if (iaqSensor.status != BSEC_OK) {
        if (iaqSensor.status < BSEC_OK) {
            output = "BSEC error code : " + String(iaqSensor.status);
            Serial.println(output);
            for (;;)
                errLeds(); /* Halt in case of failure */
        } else {
            output = "BSEC warning code : " + String(iaqSensor.status);
            Serial.println(output);
        }
    }
    if (iaqSensor.bme680Status != BME680_OK) {
        if (iaqSensor.bme680Status < BME680_OK) {
            output = "BME680 error code : " + String(iaqSensor.bme680Status);
            Serial.println(output);
            for (;;)
                errLeds(); /* Halt in case of failure */
        } else {
            output = "BME680 warning code : " + String(iaqSensor.bme680Status);

```

```

    Serial.println(output);
  }
}
void errLeds(void)
{
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
  delay(100);
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
  delay(100);
}

```

5.3.5 Sensor OMRON B5W : b5w-ld0101_C

```

/*
MIT License
Copyright (c) 2019, 2018 - present OMRON Corporation
All rights reserved. Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a
copy of this software and associated documentation files (the "Software"),
to deal in the Software without restriction, including without limitation
the rights to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense,
and/or sell copies of the Software, and to permit persons to whom the
Software is furnished to do so, subject to the following conditions:

```

The above copyright notice and this permission notice shall be included in all copies or substantial portions of the Software.

THE SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS", WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT SHALL THE AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE, ARISING FROM, OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN THE SOFTWARE.

```

*/
#include <Arduino.h>
/* defines */
// #if defined(ARDUINO_FEATHER_ESP32)
#define PIN_VOUT1 16
#define PIN_VOUT2 17
#define PIN_VTH 2
#define analogWriteResolution
// #else
// #define PIN_VOUT1 13
// #define PIN_VOUT2 14
// #define PIN_VTH 15

```

```

// #define PIN_EN    A3
// #endif
static int counts_idx = 0;
static int counts20sec_vout1 = 0;
static int counts20sec_vout2 = 0;
/** <!-- setup {{{1 -->
    1. initialize a Serial port for output.
    2. initialize GPIO pins.
*/
void setup() {
    Serial.begin(115200); // Serial baudrate = 115200bps
    pinMode(PIN_VOUT1, INPUT);
    pinMode(PIN_VOUT2, INPUT);
    // setup B5W Threshold Voltage to 0.5[V]
    pinMode(PIN_VTH, OUTPUT);
    #if defined(ARDUINO_FEATHER_ESP32)
        digitalWrite(PIN_VTH, 0.5 / (3.3 / 256));
    #else
        analogWriteResolution(10);
        analogWrite(PIN_VTH, 0.5 / (3.3 / 1024));
        // analogWrite(PIN_VTH, 128);
    #endif
}
/** <!-- loop - dust sensor {{{1 -->
    1. read and convert sensor.
    2. output results, format is: [count]
*/
void loop() {
    // VOUT1/2 sampling in 2sec.
    uint8_t prv_gpio1 = LOW;
    uint8_t prv_gpio2 = LOW;
    int now = millis(), prev = now;
    int counts_vout1 = 0;
    int counts_vout2 = 0;
    while (now - prev < 2000) { // Measurement interval = 2000 [msec]
        delayMicroseconds(400); // Sampling period about 400 [usec]
        uint8_t cur_gpio1 = digitalRead(PIN_VOUT1);
        uint8_t cur_gpio2 = digitalRead(PIN_VOUT2);
        if (cur_gpio1 == HIGH && prv_gpio1 == LOW) {
            counts_vout1++;
        }
        if (cur_gpio2 == HIGH && prv_gpio2 == LOW) {
            counts_vout2++;
        }
        prv_gpio1 = cur_gpio1;
        prv_gpio2 = cur_gpio2;
        now = millis();
    }
}

```

```

}
// output 2sec counts, just for debug.
Serial.print("Vout1 : ");
Serial.print(counts_vout1);
Serial.print(" [count], Vout2 : ");
Serial.print(counts_vout2);
Serial.print(" [count], Vout1-Vout2 : ");
Serial.print(counts_vout1 - counts_vout2 );

// summarize and output 20sec counts
// Serial.print(", Counts per 20sec_Vout1 : ");
if (counts_idx < 9) { // summarize, output empty data.
  // Serial.print("----[count],",
    // "Counts per 20sec_Vout2 :-----[count],",
    // "Counts per 20sec :-----");
  counts20sec_vout1 += counts_vout1;
  counts20sec_vout2 += counts_vout2;
  counts_idx++;
} else { // output 20sec counts.
  Serial.print(", Counts per 20sec_Vout1 : ");
  Serial.print(counts20sec_vout1);
  Serial.print(" [count], Counts per 20sec_Vout2: ");
  Serial.print(counts20sec_vout2);
  Serial.print(" [count], Counts per 20sec :");
  Serial.print(counts20sec_vout1 - counts20sec_vout2);
  counts_idx = counts20sec_vout1 = counts20sec_vout2 = 0;
}
Serial.println(" [count]");
}
// vi: ft=arduino:fdm=marker:et:sw=4:tw=80

```