



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ»

### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ:** Αισθητήρες μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων χαμηλού κόστους: τρόποι εφαρμογής.

Low-cost Sensors to measure atmospheric pollutants: ways of application

Αυλογιάρης Αθανάσιος/Avlogiaris Athanasios  
Α.Μ.: 222

Επιβλέπων καθηγητής: Σέμπος Ιωάννης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Αισθητήρες μέτρησης ατμοσφαιρικών ρύπων χαμηλού κόστους: τρόποι εφαρμογής.

Επιβλέπων καθηγητής: ΣΕΜΠΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Η Τριμελής Επιτροπή

ΒΑΡΕΛΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΣΕΜΠΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΑΝΔΡΕΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

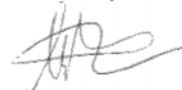
### ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αυλογιάρης Αθανάσιος του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου 222 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Εφαρμοσμένες πολιτικές και τεχνικές προστασίας περιβάλλοντος» του Τμήματος Μεταπτυχιακών σπουδών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής 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 πτυχίου μου».

Ο Δηλών



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	6
Abstract.....	7
1.Ατμοσφαιρική ρύπανση .....	8
1.1.Αιθαλομίχλη.....	9
1.2. Βασικότεροι Ατμοσφαιρικοί ρύποι .....	9
1.3. Πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης .....	12
1.4. Συνέπειες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία .....	12
1.5. Συνέπειες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο περιβάλλον .....	14
2.Δείκτες ατμοσφαιρικής ρύπανσης .....	15
2.1.Περιβαλλοντικός δείκτης.....	16
2.1.1.Ο Τοπικός Δείκτης Ρύπανσης (RPI).....	16
2.1.2.Ο Ημερήσιος Δείκτης Ποιότητας Αέρα (DAQx) .....	16
2.1.3.Ο Δείκτης Ρύπανσης PSI (Pollutants Standard Index) .....	16
2.1.4. Ο Δείκτης Ποιότητας Αέρα AQI (Air Quality Index) .....	18
2.1.5. Ο Δείκτης ατμοσφαιρικής ρύπανσης BAPI .....	19
2.1.6. Ο Ινδικός Δείκτης Ποιότητας του Αέρα (IND-AQI).....	20
2.1.7. Ο Δείκτης Ρύπανσης του Αέρα (Air Pollution Index-API) .....	20
2.1.8. Ο Ευρωπαϊκός Τοπικός Δείκτης Ρύπανσης (European Regional Pollution Index-ERPI) .....	21
2.Πολιτικές της Ευρώπης για την Ατμοσφαιρική ρύπανση.....	22
2.1.Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (ΕΟΠ) και ατμοσφαιρική ρύπανση .....	22
2.2.Ευρωπαϊκή Ένωση και ατμοσφαιρική ρύπανση .....	23
3. Νομοθεσία στην Ελλάδα και Ατμοσφαιρική ρύπανση .....	24
3.1. Εθνικό Πρόγραμμα Ελέγχου Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης.....	27
4.Παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης .....	28
4.1 Χαρτογράφηση της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης.....	29
4.2 Μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	29
4.3 Γιατί μετράμε την ατμοσφαιρική ρύπανση;.....	30
4.4. Τρόποι μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης .....	30
4.4.1. Σταθεροί Αυτοματοποιημένοι Σταθμοί Παρακολούθησης.....	31
4.4.2 Δορυφόροι.....	31
4.4.3. Κινητά Όργανα Μετρήσεων .....	32
4.4.4. Παθητικοί συλλέκτες .....	33
4.4.5. Αισθητήρες ποιότητας του αέρα.....	33
5. Όργανα μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	33
5.1. Βαθμονόμηση αυτόματων οργάνων .....	34
5.2. Αισθητήρες χαμηλού κόστους.....	35
5.2.1. Επιδράσεις στην ποιότητα μιας συσκευής αισθητήρα .....	37
5.2.2. Τα θεμέλια των σύγχρονων αισθητήρων .....	38
5.2.3. Τύποι αισθητήρων .....	38
5.2.4. Οι αισθητήρες και η διαδικασία της μέτρησης.....	41
6. Αισθητήρες χαμηλού κόστους για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	49
6.1.Ορισμοί .....	49
6.2.Αισθητήρες αερίων.....	50
6.3.Αισθητήρες σωματιδίων.....	51

6.4.Εφαρμογές συστημάτων αισθητήρων χαμηλού κόστους.....	51
7. Δημιουργία δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης .....	58
7.1. Χρήση ενέργειας και επιλογή τοποθεσίας .....	61
7.2. Συνδεσιμότητα.....	62
7.3. Αναφορά δεδομένων.....	64
7.4. Διαχείριση των αισθητήρων.....	64
7.5. Σχεδιάζοντας το δίκτυο αισθητήρων ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους.....	65
7.6. Επιλογή τεχνολογίας.....	66
7.7.Τοποθέτηση και εγκατάσταση μετρητών ποιότητας αέρα.....	66
7.8. Συντήρηση αισθητήρα χαμηλού κόστους .....	67
8.Εφαρμογές-καλές πρακτικές της χρήσης αισθητήρων χαμηλού κόστους για την μέτρηση των ατμοσφαιρικών ρύπων σε πόλεις .....	68
9. Δημιουργία δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε Δήμο .....	75
10.Συμπεράσματα.....	83
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84

## Περίληψη

Η ατμοσφαιρική ρύπανση και οι δυσμενείς συνέπειές της στην υγεία και στην οικονομία αποτελεί ζήτημα μείζονος σημασίας, παγκοσμίως. Στο πλαίσιο παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της επακόλουθης λήψης αποφάσεων και πολιτικών, έχουν δημιουργηθεί ποικίλοι δείκτες αναφορικά με την ποιότητα του αέρα και τις ενδεχόμενες συνέπειές του στην υγεία των πολιτών. Τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ελλάδα, προκειμένου να διασφαλιστεί η ανθρώπινη υγεία και το οικοσύστημα, γενικότερα, κρίνεται επιτακτική η μείωση των εκπομπών ρύπων και η εφαρμογή αποτελεσματικότερων μέτρων σε εθνικό και τοπικό επίπεδο. Συνεπώς, η παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι ζωτικής σημασίας όχι μόνο για τους πολίτες, προειδοποιώντας τους για τους κινδύνους στην υγεία από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, αλλά και για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, βοηθώντας τους στη σύνταξη κανονισμών και νόμων που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση αυτών των κινδύνων για την υγεία. Στην παρούσα μελέτη περιγράφεται η παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω της χρήσης αισθητήρων χαμηλού κόστους, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί, καθώς επίσης και η δημιουργία δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα σε Δήμο.

## **Abstract**

Air pollution and its effects on the health and the economy is an issue of high priority, worldwide. In the context of monitoring air pollution and relevant decisions and policies, many indicators have been developed regarding the air quality and the possible effects on the health. Both in Europe and in Greece, to ensure human health and the ecosystem, in general, it is particularly important to reduce pollution emissions and implement the most effective measures at national and local level. Therefore, the monitoring of air pollution is important for citizens, making them aware of the health risks caused by air pollutants, and for policy makers, as well, helping them plan and develop laws and regulations on minimizing health risks. In the present study, the monitoring of atmospheric pollution with low-cost sensors, their advantages, limitations and the development of a low-cost sensors' network to monitor air quality in a municipality are described.

## 1.Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι η μόλυνση του περιβάλλοντος (εσωτερικού ή εξωτερικού) από κάποιον φυσικό, χημικό ή βιολογικό παράγοντα που μεταβάλλει τα φυσικά στοιχεία της ατμόσφαιρας [1]. Συγκεκριμένα, πρόκειται για την παρουσία θορύβου, ουσιών ή ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα σε ποσότητα, διάρκεια ή συγκέντρωση τέτοια, που να προκληθούν, εν δυνάμει, δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, στην διατήρηση των ζωντανών οργανισμών και των οικοσυστημάτων. Υπό ειδικές συνθήκες, μάλιστα, τα υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορεί να προκαλέσουν ακατάλληλες συνθήκες διαβίωσης. Όταν συμβαίνει αυτό, αναφέρεται η έννοια του «Νέφους», το οποίο παρουσιάζεται ως εξής:

A) *Νέφος καπνομίχλης*: προκαλείται λόγω υψηλής συγκέντρωσης ρύπων (μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου και αιωρούμενα σωματίδια), σε συνδυασμό με χαμηλή θερμοκρασία και υψηλό επίπεδο υγρασίας.

B) *Φωτοχημικό νέφος*: προκαλείται λόγω υψηλών θερμοκρασιών με ηλιοφάνεια σε μεγάλη ένταση και διάρκεια, χαμηλών επιπέδων υγρασίας και μεγάλης συγκέντρωσης υδρογονανθράκων, οξειδίων του αζώτου και των δευτερογενών προϊόντων τους [2].

Η ατμοσφαιρική ρύπανση, όπως προαναφέρθηκε, αφορά στη μόλυνση του αέρα, σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο. Οι βασικοί επιβλαβείς ρύποι για την υγεία περιλαμβάνουν τα σωματίδια (PM<sub>2,5</sub> και PM<sub>10</sub>), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το όζον (O<sub>3</sub>), τον μαύρο άνθρακα (BC), το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) και τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>). Η ατμοσφαιρική ρύπανση, συχνά, δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι εφόσον το μέγεθος των ρύπων είναι μικρότερο από ό,τι μπορεί το ανθρώπινο μάτι να ανιχνεύσει. Μπορούν, όμως, οι ρύποι να γίνουν ορατοί μέσω ορισμένων συνθηκών π.χ. καπνός αιθάλης από την ανοιχτή καύση υπολειμμάτων καλλιεργειών ή άλλων αποβλήτων, από την καύση ξύλων, άνθρακα, βενζίνης και καυσίμου για μαγείρεμα και θέρμανση, μεταφορά ή παραγωγή ενέργειας. Το γεγονός ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση δεν είναι ορατή δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχει [1]. Τα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης, οι οικιακές συσκευές καύσης, οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις και οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Το όζον, το μονοξείδιο του άνθρακα, τα σωματίδια, το διοξείδιο του αζώτου και το διοξείδιο του θείου αποτελούν επικίνδυνους ρύπους για τη δημόσια υγεία, καθιστώντας την ποιότητα της ατμόσφαιρας σημαντική πηγή νοσηρότητας και θνησιμότητας. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας σχεδόν όλος ο παγκόσμιος πληθυσμός (99%) αναπνέει αέρα, του οποίου η ποιότητα υπερβαίνει τα επιθυμητά όρια, καθώς περιέχει υψηλά επίπεδα ρύπων, με τις χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος να υποφέρουν από την υψηλότερη έκθεση.

Η ποιότητα του αέρα, παγκοσμίως, είναι συνυφασμένη με τα οικοσυστήματα και το κλίμα του πλανήτη. Συνεπώς, οι πολιτικές που σχεδιάζονται για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης παρέχουν μια στρατηγική για την προστασία της υγείας και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, στοχεύοντας στον περιορισμό των ασθενειών



που αποδίδονται στην ατμοσφαιρική ρύπανση και συμβάλλοντας στον βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο μετριασμό της κλιματικής αλλαγής [1].

## 1.1. Αιθαλομίχλη

Η αιθαλομίχλη αφορά στην *ατμοσφαιρική ρύπανση* που προκαλείται λόγω υψηλής συγκέντρωσης ρύπων (π.χ. αιωρούμενων σωματιδίων -κυρίως αιθάλης-, μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου), σε συνδυασμό με χαμηλή θερμοκρασία και υψηλό επίπεδο υγρασίας. Προέρχεται από τον αγγλικό όρο SMOG (SMOke και foG). Τα αιωρούμενα σωματίδια είναι μικρά κομμάτια στερεής ή υγρής ύλης, που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, όπως είναι η σκόνη, ο καπνός (αιθάλη), διάφορα μέταλλα κλπ. Τα μικρά σωματίδια, μαύρου χρώματος, αποτελούνται από άνθρακα και προερχόμενα από ατελείς καύσεις αναφέρονται ως καπνός (αιθάλη). Η δημιουργία αιθαλομίχλης προκαλείται λόγω αυξημένων εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων σε συνδυασμό με ειδικές τοπογραφικές και μετεωρολογικές συνθήκες, που εμποδίζουν τη φυσική διάχυση της ρύπανσης, με αποτέλεσμα οι ρύποι να εγκλωβίζονται σε μια περιοχή. Πηγές εκπομπής αιωρούμενων σωματιδίων είναι οι καύσεις π.χ. για παραγωγή ενέργειας ή για θέρμανση, οι βιομηχανικές δραστηριότητες, η κυκλοφορία οχημάτων και μεταφορικών μέσων [3].

## 1.2. Βασικότεροι Ατμοσφαιρικοί ρύποι

Ο ρύπος αναφέρεται σε κάθε ουσία (χημικά, σωματίδια, βιολογικό υλικό) που απελευθερώνεται στον αέρα, κυρίως, λόγω ανθρωπογενούς δραστηριότητας με πιθανές επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία και στο οικοσύστημα.

Πρωτογενείς Ρύποι: εκπέμπονται άμεσα από τις πηγές ρύπανσης. Βασικοί πρωτογενείς ρύποι είναι:

- Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)
- Αιωρούμενα σωματίδια
- Διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>)
- Υδρογονάνθρακες και άλλες πτητικές ουσίες
- Μονοξείδιο και Διοξείδιο του αζώτου (NO, NO<sub>2</sub>)

Δευτερογενείς Ρύποι: προκαλούνται ως αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων με τη συμμετοχή πρωτογενών ρύπων (πχ. O<sub>3</sub>) [6].

**Διοξείδιο του Άνθρακα CO<sub>2</sub>**: είναι άοσμο και άχρωμο αέριο. Φυσική πηγή CO<sub>2</sub> αποτελεί η σήψη των φυτών. Ανθρωπογενή πηγή CO<sub>2</sub> αποτελεί η αναπνοή και η καύση πρώτων υλών για παραγωγή ενέργειας, εκπέμπεται από τις εξατμίσεις κάθε είδους οχημάτων και μηχανών όταν συντελείται η καύση της καύσιμης ύλης, ενώ συνδέεται με την κλιματική αλλαγή [5].

Πηγές: εκπέμπεται, κυρίως, από τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα. Υψηλές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> συνήθως βρίσκονται σε χώρους στάθμευσης, σε δρόμους κυκλοφοριακής αιχμής ή σε ελλιπώς αεριζόμενες υπόγειες διαβάσεις.

Επιδράσεις: κυρίως στο καρδιαγγειακό και νευρικό σύστημα, μειώνοντας την ικανότητα του αίματος να μεταφέρει οξυγόνο σε βασικούς ιστούς του οργανισμού. Χαμηλές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> επηρεάζουν, δυσμενώς, άτομα με καρδιακά προβλήματα, ενώ μειώνει τις σωματικές επιδόσεις σε νεαρά και υγιή άτομα. Υψηλότερες συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> προκαλούν κόπωση, ζαλάδα και πονοκέφαλο [4].

**Διοξείδιο του Αζώτου NO<sub>2</sub>**: είναι αέριο, καφέ χρώματος με ιδιάζουσα οσμή. Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αέρια του θερμοκηπίου, καθώς συμβάλλει στο σχηματισμό του επιφανειακού όζοντος και της ομίχλης [5].

Πηγές: εκπέμπεται από τις καύσεις στις οδικές μεταφορές αλλά και από βιομηχανικούς καυστήρες ή σταθμούς παραγωγής ηλεκτρισμού με τη συμβολή χημικών αντιδράσεων, που ενισχύονται με την ηλιακή ακτινοβολία.

Επιδράσεις: επιβαρύνει τη χλωρίδα, καθώς αποτελεί τον κύριο ρύπο του νέφους και της όξινης βροχής. Σε υψηλές συγκεντρώσεις επιδρά, δυσμενώς, στην υγεία, προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα.

**OZON (O<sub>3</sub>)**: πρόκειται για άχρωμο αέριο. Αποτελεί το βασικό στοιχείο του φωτοχημικού νέφους. Στην στρατόσφαιρα (ανώτερη ατμόσφαιρα), το όζον έχει ευεργετικό ρόλο, καθώς προστατεύει από τις βλαβερές ακτίνες του ήλιου.

Πηγές: Το όζον εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα, ως αποτέλεσμα χημικών αντιδράσεων μεταξύ οξυγόνου, οξειδίων του αζώτου και πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) σε συνδυασμό με την ηλιακή ακτινοβολία, κυρίως, όταν έχει ζεστό καιρό. Πηγές ρύπων είναι τα εργοστάσια, τα οχήματα, τα χημικά διαλυτικά, οι χωματερές, τα πρατήρια βενζίνης, αγροτικός εξοπλισμός, κ.λπ.

Επιδράσεις: σε μεγάλες συγκεντρώσεις προκαλεί σοβαρά προβλήματα στην υγεία (διαταραχή της αναπνευστικής λειτουργίας, άσθμα, αίσθημα ξηρότητας στο λαιμό, βήχα, πόνο στο στήθος, φλεγμονή στους πνεύμονες και ευαισθησία σε μολύνσεις του αναπνευστικού). Προκαλεί, επίσης, δυσμενείς επιδράσεις στα φυτά, καθώς μειώνει την αγροτική παραγωγή και είναι βλαβερό για τη δασική βλάστηση [4].

**Σωματίδια**: Είναι στερεά ή υγρά υλικά που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Πηγές: παραγωγή γύψου, τσιμέντου, βιομηχανικές δραστηριότητες, χυτήρια μεταλλείων, μηχανές αυτοκινήτων, πυρκαγιές, σκόνη από απογυμνωμένο έδαφος, αγροτικές δραστηριότητες, οικοδομικές κατασκευές.

Επιδράσεις: προκαλούν μείωση της ορατότητας, αναπνευστικού τύπου ασθένειες και πρόωρο θάνατο. Τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι και τα άτομα που πάσχουν από άσθμα αποτελούν πληθυσμό υψηλού κινδύνου. Οι επιδράσεις τους εξαρτώνται τόσο από το μέγεθός τους (όσο μικρότερα είναι τόσο πιο επικίνδυνα) όσο και από τη χημική τους σύσταση [4].

**Διοξείδιο του Θείου (SO<sub>2</sub>)**: πρόκειται για άχρωμο και άοσμο αέριο με έντονη δυσάρεστη μυρωδιά, όταν βρίσκεται σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις. Αποτελεί βασικό ρύπο του νέφους.

Πηγές: βιομηχανίες, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, κεντρική θέρμανση, χημικές βιομηχανίες, διυλιστήρια πετρελαίου, χαρτοβιομηχανίες.

Επιδράσεις: επηρεάζει άτομα με αναπνευστικά προβλήματα και μειώνει την ορατότητα. Προκαλεί ζημιά σε βλάστηση και μέταλλα, ενώ αυξάνει την οξύτητα λιμνών και ποταμών.

**Μόλυβδος (Pb):** Ο μόλυβδος και οι ενώσεις του είναι επιβλαβείς είτε με απευθείας εισπνοή (σκόνες, βαφές) είτε μέσω της κατάποσης δόσης μόλυβδου (από το έδαφος και τη σκόνη) από μικρά παιδιά που βάζουν τα χέρια στο στόμα.

Πηγές: χρήση καυσίμων με μόλυβδο, οδικές μεταφορές, εργοστάσια μπαταριών, βαριά βιομηχανία, χρήση γαιανθράκων, καύση απορριμμάτων, χυτήρια.

Επιδράσεις: στην πνευματική ανάπτυξη και δραστηριότητα, στη χημική σύσταση του αίματος, στη λειτουργία των νεφρών. Εξαιτίας της μεγαλύτερης ευαισθησίας των νεανικών ιστών και οργάνων στο μόλυβδο τα νεαρά άτομα διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο στην υγεία τους.

**Τοξικοί Αέριοι Ρύποι:** περιλαμβάνονται ο αμιάντος, το αρσενικό και το βενζόλιο.

Πηγές: εκπομπές από καύσιμα οχημάτων, χημικές βιομηχανίες, οικοδομικά υλικά, βιομηχανικές δραστηριότητες.

Επιδράσεις: προκαλούν αναπνευστικά προβλήματα, καρκίνο, στέρωση, γενετικές ανωμαλίες, σοβαρές κακώσεις λόγω τεχνολογικού/χημικού ατυχήματος και θάνατο.

**Ρύποι που προκαλούν μείωση του όζοντος:** πρόκειται για χημικές, ψυκτικές ουσίες (τετραχλωριούχος άνθρακας, χλωροφθοριομένοι υδρογονάνθρακες (CFCs), μεθυλικό χλωροφόρμιο) σε βιομηχανικές δραστηριότητες. Αιωρούνται στην ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα και, βαθμιαία, καταστρέφουν το όζον, το οποίο εμποδίζει τη βλαβερή υπεριώδη (UV) ακτινοβολία να φθάσει στη Γη.

Πηγές: καθαριστήρια, οικιακές και βιομηχανικές συσκευές κλιματισμού, υλικά για την κατάσβεση πυρκαγιών, προϊόντα από αφρώδες πλαστικό.

Επιδράσεις: η αυξημένη έκθεση στην UV ακτινοβολία προκαλεί καρκίνο του δέρματος, καταρράκτη στους οφθαλμούς, εξασθένηση του ανοσοποιητικού συστήματος, καθώς και δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον.

**Αέρια του Θερμοκηπίου:** πρόκειται για αέρια (μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου), που συγκεντρώνονται στην ατμόσφαιρα και προκαλούν μεταβολές στις κλιματολογικές συνθήκες, παγκοσμίως. Είναι το λεγόμενο "φαινόμενο του θερμοκηπίου".

Πηγές: η κατανάλωση καυσίμων για τις μεταφορές και την παραγωγή ενέργειας. Τα ανθρακωρυχεία, οι χωματερές, οι ορυζώνες, τα μηρυκαστικά ζώα, απελευθερώνουν μεθάνιο. Βιομηχανικές δραστηριότητες (π.χ. παραγωγή νάιλον) απελευθερώνουν οξείδια του αζώτου.

Επιδράσεις: αύξηση της συχνότητας και της σφοδρότητας των καταιγίδων και άλλων ακραίων καιρικών φαινομένων, αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη, αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας, λιώσιμο των πολικών πάγων [4].

### **1.3. Πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης**

#### Φυσικές πηγές

- Ηφαίστεια (αιωρούμενα σωματίδια, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>), ηφαιστειογενείς εκρήξεις, κο-νιοτόξ, εκνέφωση θαλάσσιου άλατος [6]
- Πυρκαγιές (αιωρούμενα σωματίδια, CO)
- Ωκεανοί και θαλάσσιες εκτάσεις (NaCl και θειικά άλατα)
- Αποσύνθεση φυτών και ζώων (υδρογονάνθρακες, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>)
- Αποσάθρωση εδάφους (αιωρούμενα σωματίδια)
- Φυτά και δέντρα (υδρογονάνθρακες)

#### Ανθρωπογενείς πηγές

- Μέσα μεταφοράς (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, VOCs)
- Θέρμανση – Ψύξη κτιρίων
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, VOCs, σωματίδια: τέ-φρα, βαριά μέταλλα)
- Διαχείριση αποβλήτων/απορρίμματα (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, σωματίδια)
- Βιομηχανική δραστηριότητα και κατασκευαστικά έργα (πλήθος αερίων ρύπων, σωματίδια, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC, VOCs, σκόνη)
- καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- βιομηχανικές διεργασίες και χρήση διαλυτών (σε βιομηχανίες χημικών και ορυ-κτών)
- γεωργία
- εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων από εργοστάσια

### **1.4. Συνέπειες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία**

Η ατμοσφαιρική ρύπανση επιδρά δυσμενώς στην υγεία και στο οικοσύστημα. Τις τε-λευταίες δεκαετίες, οι εκπομπές πολλών ατμοσφαιρικών ρύπων, στη Ευρώπη, έχουν ελαττωθεί σημαντικά, ώστε να επιτευχθεί βελτίωση στην ποιότητα του ατμοσφαιρι-κού αέρα. Οι συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων (το όζον, το διοξείδιο του αζώτου και τα αιωρούμενα σωματίδια) ωστόσο, παραμένουν σε υπερβολικά υψηλά επίπεδα, κυρίως, στις πυκνοκατοικημένες πόλεις της Ευρώπης, εγκυμονώντας σοβαρούς κιν-δύνους για την υγεία. Πολλές χώρες έχουν υπερβεί ένα ή περισσότερα από τα όρια εκπομπών ρύπων, συνεπώς, το ζήτημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης παραμένει ση-μαντικό [6].

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί παγκόσμιο πρόβλημα. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που εκπέμπονται σε μία περιοχή και συγκεντρώνονται στην ατμόσφαιρα, μπορεί να επιδεινώσουν την ποιότητα του αέρα σε μια άλλη περιοχή. Τα αστικά περιβάλλοντα

με υψηλό βαθμό εκβιομηχάνισης είναι μολυσμένα με επικίνδυνες χημικές ουσίες και ατμοσφαιρικούς ρύπους. Αυτοί οι ρύποι μπορεί να έχουν καταστροφικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, προκαλώντας τόσο οξείες όσο και χρόνιες ασθένειες όπως λοιμώξεις του αναπνευστικού, καρκίνος του πνεύμονα και καρδιακές παθήσεις [7]. Η έκθεση σε σωματίδια (PMs) έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει τον κίνδυνο πολλών συνδρόμων, συμπεριλαμβανομένης της διαταραχής ελλειμματικής προσοχής και υπερκινητικότητας, του αυτισμού, της απώλειας γνωστικής λειτουργίας, του άγχους, του άσθματος, της χρόνιας αποφρακτικής πνευμονοπάθειας, της υπέρτασης και του εγκεφαλικού [8].

Στην Ευρώπη, περίπου το 90% του αστικού πληθυσμού εκτίθεται σε επικίνδυνες, για την υγεία, συγκεντρώσεις ρύπων, που υπερβαίνουν τα όρια ποιότητας του αέρα. Οι τρεις πιο επιβλαβείς για την υγεία ρύποι περιλαμβάνουν το διοξείδιο του αζώτου, το όζον και τα αιωρούμενα σωματίδια. Η μακροχρόνια έκθεση στους ρύπους αυτούς ενδέχεται να προκαλέσει προσβολή του αναπνευστικού συστήματος έως και πρόωρο θάνατο. Έχει υπολογισθεί ότι τα λεπτόκοκκα αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ2.5) μειώνουν το προσδόκιμο ζωής κατά οκτώ μήνες. Ειδικά, σε ορισμένες αστικές περιοχές της κεντρικής και νότιας Ευρώπης, το βενζο-α-πυρένιο, που είναι καρκινογόνος ρύπος, προκαλεί ανησυχία, καθώς φαίνεται να υπερβαίνει το όριο που έχει τεθεί για την προστασία της υγείας [6].

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος παρουσιάζει επικαιροποιημένες εκτιμήσεις αναφορικά με το πώς το διοξείδιο του αζώτου, τα λεπτά αιωρούμενα σωματίδια και το όζον, επηρεάζουν την υγεία των Ευρωπαίων. Αξιολογούνται, επίσης, τα οφέλη από τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, βάσει των ορίων που συνιστά ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, καθώς και η πρόοδος αναφορικά με την επίτευξη του στόχου (που αφορά στη μείωση του αριθμού των πρόωρων θανάτων λόγω έκθεσης σε λεπτά αιωρούμενα σωματίδια κατά περισσότερο από 55% έως το 2030) του σχεδίου δράσης της ΕΕ, στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας. Ο αριθμός των θανάτων αυτών, φαίνεται ότι έχει μειωθεί κατά το ένα τρίτο περίπου από το 2005 έως το 2019, σύμφωνα με ανάλυση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος.

- Για το 2019, σύμφωνα με τις τελευταίες εκτιμήσεις του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, στην Ευρώπη περίπου 307.000 άνθρωποι πέθαναν πρόωρα λόγω της έκθεσης σε λεπτά αιωρούμενα σωματίδια<sup>1</sup>. Εάν τα κράτη μέλη της ΕΕ είχαν συμμορφωθεί με τις συστάσεις του ΠΟΥ για την ποιότητα του αέρα, τουλάχιστον το 58% ή 178.000 θάνατοι θα είχαν αποφευχθεί.
- Το 2019, η ποιότητα του αέρα στην Ευρώπη ήταν καλύτερη, συγκριτικά με το 2018, με αποτέλεσμα να υπάρχουν λιγότερες αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία. Φαίνεται ότι για να επιτευχθεί μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης απαιτείται μακροπρόθεσμη στρατηγική, που καθοδηγείται από πολιτικές που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών ρύπων και στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

Στην Ευρώπη, η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί τον μεγαλύτερο περιβαλλοντικό κίνδυνο για την υγεία, αφού είναι σημαντική αιτία ασθενειών και πρόωρων θανάτων.

<sup>1</sup> <https://www.eea.europa.eu/el/highlights/me-katharotero-aera-tha-mporoysan/#fn1>

Οι συνηθέστερες αιτίες πρόωρων θανάτων λόγω ατμοσφαιρικής ρύπανσης περιλαμβάνουν τα εγκεφαλικά επεισόδια και τις καρδιαγγειακές παθήσεις και ακολουθούν οι πνευμονοπάθειες και ο καρκίνος του πνεύμονα. Οι οδηγίες της ΕΕ για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα θέτουν όρια για τους βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, λαμβάνοντας υπόψη τις κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ του 2005. Οι συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές βασίζονται στη συστημική ανασκόπηση των βέλτιστων διαθέσιμων επιστημονικών στοιχείων, που σχετίζονται με τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία ακόμη και σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις από ό,τι θεωρούνταν στο παρελθόν. Ένα σημαντικό βήμα για την επίτευξη καθαρότερου αέρα στην Ευρώπη αποτελούν τα όρια της ΕΕ για την ποιότητα του αέρα, ως βασικό εργαλείο πολιτικής, καθώς και η προσαρμογή των ορίων αυτών με τις συστάσεις του ΠΟΥ σε συνδυασμό με βελτιωμένες πολιτικές για τη μείωση της ρύπανσης.

Οι επιπτώσεις των σωματιδίων στην υγεία εξαρτώνται από το επίπεδο έκθεσης (συνήθως εκφράζεται σε  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) και τη διάρκεια της έκθεσης (η οποία μπορεί να είναι είτε βραχυπρόθεσμη π.χ. 8 ή 24 ώρες ή μακροπρόθεσμη π.χ. ετήσια). Η ατομική ευαισθησία ως προς τις επιπτώσεις των σωματιδίων στην υγεία μπορεί να ποικίλλει.

- Βραχυπρόθεσμη έκθεση σε σωματίδια (ή PM) είναι πιθανό να προκαλέσει οξείες αντιδράσεις όπως ερεθισμό στα μάτια, μύτη και λαιμό, βήχα, συριγμό και αυξημένη συχνότητα των οξέων λοιμώξεων του κατώτερου αναπνευστικού, στους πνεύμονες.
- Πιο παρατεταμένη και συνεχής έκθεση σε υψηλά ή χαμηλότερα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορεί επίσης να οδηγήσει σε αυξημένο κίνδυνο λοιμώξεων του αναπνευστικού, έξαρση άσθματος, βρογχίτιδας ή σοβαρές χρόνιες επιπτώσεις, όπως μειωμένη πνευμονική λειτουργία, ισχαιμική καρδιακή ανεπάρκεια, εγκεφαλικό, καρκίνο του πνεύμονα και πρόωρο θάνατο. Τέτοια συμπτώματα προκαλούν ιδιαίτερη ανησυχία σε αγροτικές και αστικές περιοχές όπου η χρήση ξύλου, γεωργικά απόβλητα και κοπριά ζώων χρησιμοποιείται για μαγείρεμα, θέρμανση και φωτισμό και η έκθεση μπορεί να είναι μεγάλη και παρατεταμένη για μεγάλα χρονικά διαστήματα [1].

### **1.5. Συνέπειες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο περιβάλλον**

Η ατμοσφαιρική ρύπανση καταστρέφει το περιβάλλον.

- Τα ευαίσθητα οικοσυστήματα, σε πολλές περιοχές της Ευρώπης, επιβαρύνονται από όξινες συγκεντρώσεις αζωτούχων ενώσεων και πλεονάζοντος θείου.
- Ο ευτροφισμός που οφείλεται στην απόρριψη πλεοναζόντων θρεπτικών στοιχείων, μειώθηκε ελάχιστα. Αντίστοιχα, η έκταση των ευπαθών οικοσυστημάτων που επιβαρύνονταν από το πλεονάζον ατμοσφαιρικό άζωτο μειώθηκε ελάχιστα μεταξύ 1990 και 2010.
- Οι ζημιές στις καλλιέργειες, κυρίως στη νότια, κεντρική και ανατολική Ευρώπη, οφείλονται στην έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος, το οποίο υπερβαίνει τον μακροπρόθεσμο στόχο της ΕΕ για την προστασία της βλάστησης.

Είναι σημαντικό, ωστόσο, ότι η μείωση των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, δεν βελτιώνει, κατ' ανάγκη, την ποιότητα του αέρα της Ευρώπης επειδή:

- δεν φαίνεται να υπάρχει σαφής αιτιώδης σχέση μεταξύ μείωσης των εκπομπών ρύπων και χαμηλότερης συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών ρύπων
- παρατηρείται ολοένα αυξανόμενη μεταφορά ατμοσφαιρικών ρύπων από χώρες του βόρειου ημισφαιρίου σε χώρες της Ευρώπης

Ως εκ τούτου, κρίνεται επιβεβλημένο να γίνουν στοχευμένες δράσεις μείωσης των εκπομπών ρύπων για την προστασία της υγείας και του περιβάλλοντος στην Ευρώπη [6].

## 2. Δείκτες ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Η ατμοσφαιρική ρύπανση και οι δυσμενείς συνέπειές της στην υγεία και στην οικονομία αποτελεί ζήτημα μείζονος σημασίας, παγκοσμίως. Στο πλαίσιο παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της επακόλουθης λήψης αποφάσεων και πολιτικών, έχουν δημιουργηθεί ποικίλοι δείκτες αναφορικά με την ποιότητα του αέρα και τις ενδεχόμενες συνέπειές του στην υγεία των πολιτών [9]. Ως *Δείκτες Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΔΑΡ)* νοούνται οι αριθμητικές τιμές βάσει αλγορίθμων, σύμφωνα με τους οποίους, πραγματοποιείται μια καλύτερη εκτίμηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας και, ακολούθως, των ενδεχόμενων δυσμενών συνεπειών της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία του πληθυσμού [10]. Χρησιμοποιούνται, παγκοσμίως, γιατί έχουν τη δυνατότητα να δώσουν μια σαφή εικόνα, πρακτικά και ολοκληρωμένα, για την ποιότητα του αέρα, σε καθημερινή βάση, σε σύγκριση με την χρήση των τιμών συγκέντρωσης αέριων ρύπων, προκειμένου να προσδιοριστεί η ποιότητα του αέρα [11].

Η υποκειμενικότητα, ωστόσο, στη χρήση των ΔΑΡ, δεδομένου ότι διαφορετικοί ΔΑΡ έχουν αναπτυχθεί σε διαφορετικές χώρες ή έχουν προσαρμοστεί στις εκάστοτε ανάγκες μιας χώρας, αποτελεί ζήτημα προς επίλυση, καθώς, για παράδειγμα, υπάρχουν χώρες με δικούς τους ΔΑΡ βάσει των εθνικών τους ορίων στις τιμές της ατμοσφαιρικής ρύπανσης [10]. Ένα άλλο πρόβλημα που προκύπτει με τη χρήση των ΔΑΡ είναι ότι δεν μπορούν να συγκριθούν οι τιμές διαφορετικών ΔΑΡ για την εκτίμηση της ποιότητας του αέρα, καθώς οι δείκτες αυτοί μπορεί να προκύπτουν είτε από παρόμοιους είτε από διαφορετικούς αλγόριθμους [11]. Για παράδειγμα, για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> και PM<sub>10</sub>, που παρουσιάζουν ίδιες τιμές, στη διάρκεια μιας ημέρας σε μια συγκεκριμένη περιοχή, δίδεται διαφορετική ερμηνεία σχετικά με την ποιότητα του αέρα, και των επιπτώσεών της στην υγεία των κατοίκων. Ακολούθως, λαμβάνονται και διαφορετικά μέτρα για την προστασία της δημόσιας υγείας [11].

## 2.1. Περιβαλλοντικός δείκτης

Αποτελεί κατηγοριοποίηση ενός συνόλου περιβαλλοντικών παραμέτρων, είτε αριθμητικά ή περιγραφικά. Στόχο αποτελεί η δυνατότητα εξαγωγής χρήσιμων πληροφοριών για όσους εμπλέκονται στην αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα και στη λήψη των βέλτιστων μέτρων και πολιτικών.

- Η ανάπτυξη περιβαλλοντικών δεικτών, παγκοσμίως, καθιστά δυνατή την εκτίμηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας σε μια περιοχή με απλό και κατανοητό, για τους πολίτες, τρόπο.
- Η σύγκριση της ποιότητας της ατμόσφαιρας διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών μπορεί να καταστεί εφικτή με την χρήση περιβαλλοντικών δεικτών.

### 2.1.1. Ο Τοπικός Δείκτης Ρύπανσης (RPI)

Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται δυο φορές/ημέρα και χρησιμοποιείται στο ανατολικό, βόρειο και νότιο Sydney, και με βάση τον δείκτη αυτόν ενημερώνεται το κοινό για την ποιότητα του αέρα. Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιείται από τις 15:00μμ μιας ημέρας έως τις 06:00πμ της επόμενης ημέρας και η δεύτερη μέτρηση γίνεται από τις 06:00 π.μ., μέχρι τις 15:00 μμ. της ίδιας ημέρας, οπότε εξάγονται και οι αντίστοιχες αναφορές ποιότητας του αέρα, που αφορούν στις μετρήσεις των συγκεντρώσεων του όζοντος και του διοξειδίου του αζώτου. Για κάθε περιοχή, η τιμή του δείκτη RPI υπολογίζεται με βάση τις τιμές κάθε ρύπου χωριστά, και η μεγαλύτερη τιμή που προκύπτει αποτελεί την τιμή RPI για κάθε περιοχή. Ο δείκτης αυτός κατηγοριοποιείται ως χαμηλός, μέτριος και υψηλός, που σημαίνει αντίστοιχα καλή, μέτρια και κακή ποιότητα ατμοσφαιρικού αέρα [10].

### 2.1.2. Ο Ημερήσιος Δείκτης Ποιότητας Αέρα (DAQx)

Πρόκειται για έναν νέο δείκτη, που μετριέται σε ημερήσια βάση, πρόσφατα αναπτυγμένο και αξιολογημένο (Ινστιτούτο Μετεωρολογίας Πανεπιστημίου Freiburg, Γερμανία, σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Έρευνας και Πληροφόρησης Επικίνδυνων Ουσιών) [12],[13]. Βάσει των ρύπων NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> και PM<sub>10</sub> υπολογίζονται οι τιμές του δείκτη αυτού, ο οποίος αναφέρεται, συνήθως, με τα αρχικά DAQx (Daily Air Quality index). Καθημερινά, για καθένα από τους ανωτέρω ρύπους, υπολογίζεται η μέγιστη τιμή του δείκτη. Η μεγαλύτερη από τις επιμέρους τιμές κάθε ρύπου, χωριστά, αποτελεί την ημερήσια τιμή του δείκτη DAQx.

### 2.1.3. Ο Δείκτης Ρύπανσης PSI (Pollutants Standard Index)

Πρόκειται για έναν περιβαλλοντικό δείκτη εκτίμησης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα μιας περιοχής [14], [15], [16], ο οποίος προέκυψε, τη δεκαετία του '70, από



την τραγική αύξηση ασθενών με αναπνευστικά προβλήματα. Προτάθηκε από την Αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (U.S.E.P.A.) [17, 18] με σκοπό την τυποποίηση των εκθέσεων, αναφορικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση. Πρόκειται για σύνθετο δείκτη που υπολογίζεται από τις τιμές συγκέντρωσης πέντε (5) ρύπων: του όζοντος (O<sub>3</sub>), του διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>), του διοξειδίου του θείου (SO<sub>2</sub>), του μονοξειδίου του άνθρακα (CO), και των αιωρούμενων σωματιδίων (TSP), μετατρέποντας τις τιμές των ανωτέρω ρύπων σε απλές αριθμητικές τιμές, κυμαινόμενες μεταξύ 0 και 500. Ακολούθως, οι τιμές αυτές αντιστοιχίζονται σε κατηγορίες ποιότητας της ατμόσφαιρας. Η ημερήσια τιμή του δείκτη PSI αναφέρεται στη μέγιστη τιμή των ανωτέρω πέντε υποδεικτών, δηλ.:  $PSI = \max(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5)$  όπου με βάση τις μέσες 24ωρες τιμές συγκέντρωσης:

I<sub>1</sub> είναι ο δείκτης των αιωρούμενων μικροσωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 10μm

I<sub>2</sub> είναι ο δείκτης του διοξειδίου του θείου,

I<sub>3</sub> είναι ο δείκτης μονοξειδίου του άνθρακα με βάση τις 8ωρες τιμές συγκέντρωσης

I<sub>4</sub> είναι ο δείκτης όζοντος

I<sub>5</sub> είναι ο δείκτης διοξειδίου του αζώτου [19].

Οι τιμές του δείκτη PSI προσδιορίζουν την ποιότητα της ατμόσφαιρας με πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία, σύμφωνα με τον παρακάτω Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Κλίμακα συσχέτισης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα με πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία της υπό μελέτη περιοχής [19].

Τιμή PSI	Κατηγορία ποιότητας αέρα	Πιθανές επιπτώσεις στην δημόσια υγεία
0-50	Καλή	Καμία για το συνολικό πληθυσμό
51-100	Μέτρια	Μερικές ή και καμία
101-200	Ανθυγιεινή	Ελαφρά επιδείνωση συμπτωμάτων στις πιο ευάλωτες κατηγορίες
201-300	Πολύ ανθυγιεινή	Σημαντική επιδείνωση σε άτομα με καρδιακά ή αναπνευστικά προβλήματα υγείας). Εκτεταμένα συμπτώματα στην υγεία του πληθυσμού
>300	Επικίνδυνη	Πρώρη εμφάνιση ορισμένων ασθενειών-αύξηση επιδείνωσης συμπτωμάτων – μείωση ορίων αντοχής υγιών ανθρώπων. Όπου PSI>400, ενδέχεται να προκληθούν πρόωροι θάνατοι από ασθένειες και κυρίως σε ηλικιωμένα άτομα

## 2.1.4. Ο Δείκτης Ποιότητας Αέρα AQI (Air Quality Index)

Σε αυτό το δείκτη εισάγεται μια πρόσθετη κατηγορία «ανθυγιεινή ποιότητα αέρα για ευαίσθητες ομάδες», καθώς και επιμέρους δείκτες PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub>. Σκοπός της δημιουργίας του δείκτη αυτού είναι η συμβολή του στην κατανόηση των ενδεχόμενων δυσμενών συνεπειών της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη δημόσια υγεία, σε τοπικό επίπεδο. Ως εκ τούτου, χωρίζεται σε έξι κατηγορίες ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα (Πίνακας 2), με διαφορετικά χρώματα, που αντιστοιχούν σε ενδεχόμενες επιπτώσεις στην υγεία [17].

Πίνακας 2. Κατηγορίες τιμών του δείκτη AQI και πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία [17]

Τιμές Δείκτη AQI	Κατηγορία ποιότητας αέρα	Πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία
0-50	Καλή	Καμία ενόχληση δεν παρατηρείται ακόμα και σε ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού
51-100	Μέτρια	Μερικές ή καθόλου ενοχλήσεις σε ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού χωρίς την ανάγκη λήψης μέτρων
101-150	Ανθυγιεινή για ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού	Σοβαρά προβλήματα σε ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού. Ανάγκη λήψης μέτρων για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
151-200	Ανθυγιεινή	Επικίνδυνα συμπτώματα για την υγεία του ευάλωτου πληθυσμού.
201-300	Πολύ Ανθυγιεινή	Επικίνδυνα συμπτώματα για την υγεία του συνολικού πληθυσμού
301-500	Επικίνδυνη	Σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία του συνόλου του πληθυσμού με ανάγκη λήψης άμεσων μέτρων

### 2.1.5. Ο Δείκτης ατμοσφαιρικής ρύπανσης ΒΑΡΙ

Ο δείκτης αυτός βασίστηκε σε πλήθος μελετών αναφορικά με τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στη δημόσια υγεία και χρησιμοποιείται στον δήμο του Bristol στη Μεγάλη Βρετανία [20]. Οι τιμές του δείκτη ΒΑΡΙ καθώς και ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα με τις αντίστοιχες πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία περιγράφονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Τιμές του δείκτη ΒΑΡΙ και χαρακτηρισμός της ποιότητας του αέρα με τις πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία [20]

Τιμές Δείκτη ΒΑΡΙ	Κατηγορία ποιότητας αέρα	Πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία
1-3	Καλή	Καμία ενόχληση δεν παρατηρείται ακόμα και σε ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού
4-6	Μέτρια	Λίγες ενοχλήσεις σε ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού χωρίς την ανάγκη λήψης μέτρων
7-9	Κακή	Σοβαρά προβλήματα σε ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού. Ανάγκη λήψης μέτρων για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης
10	Πολύ κακή	Επικίνδυνα συμπτώματα για την υγεία του πληθυσμού. Ανάγκη επιβολής άμεσων μέτρων για την προστασία της υγείας του πληθυσμού

Η υψηλότερη συγκέντρωση των παρακάτω πέντε ρύπων:

- Διοξείδιο του θείου
- Διοξείδιο του Αζώτου
- Όζον
- Αιωρούμενα Σωματίδια ΑΣ<sub>2,5</sub>
- Αιωρούμενα Σωματίδια ΑΣ<sub>10</sub>

αποτελούν τον συνολικό δείκτη ατμοσφαιρικής ρύπανσης ΒΑΡΙ μιας περιοχής [21].

### 2.1.6. Ο Ινδικός Δείκτης Ποιότητας του Αέρα (IND-AQI)

Ο δείκτης αυτός βασίζεται στο ίδιο περίπου σκεπτικό με τον Αμερικανικό δείκτη ποιότητας του αέρα AQI, που προαναφέρθηκε. Προέκυψε από τη χρηματοδότηση ενός προγράμματος, το οποίο υλοποιήθηκε από το Κέντρο Ελέγχου Ρύπανσης στο Νέο Δελχί της Ινδίας, σε μια προσπάθεια αποτύπωσης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Για τον προσδιορισμό της ημερήσιας καταγραφής του δείκτη IND-AQI, είναι απαραίτητο να καταγράφονται οι τιμές συγκέντρωσης, τουλάχιστον, τριών από τους πέντε υπό μελέτη ρύπους: NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> και PM<sub>10</sub>, από το Εθνικό Πρόγραμμα Παρακολούθησης της Ποιότητας του Ατμοσφαιρικού Αέρα της Ινδίας. Πρόκειται, κατά βάση, για έναν δείκτη ατμοσφαιρικής ρύπανσης, συνδεδεμένο με πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Στον Πίνακα 4 εμφανίζονται οι τιμές του δείκτη με την αντίστοιχη κατηγορία ποιότητας του αέρα.

Πίνακας 4. Τιμές του δείκτη IND-AQI και χαρακτηρισμός της ποιότητας του αέρα [10]

Τιμές Δείκτη IND-AQI	Κατηγορία ποιότητας αέρα
0-100	Καλή
101-200	Μέτρια
201-300	Κακή
301-400	Πολύ κακή
401-500	Επικίνδυνη

### 2.1.7. Ο Δείκτης Ρύπανσης του Αέρα (Air Pollution Index-API)

Ο δείκτης αυτός στοχεύει στην παρακολούθηση και καταγραφή της ποιότητας του αέρα, ενημερώνοντας, παράλληλα, τους σχεδιαστές πολιτικών και τους κατοίκους, για την κατάλληλη λήψη μέτρων. Προέκυψε, το 1995, από το Τμήμα Προστασίας Περιβάλλοντος στο Hong Kong. Ο δείκτης API λαμβάνει τιμές συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών ρύπων NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> και εισπνεόμενων αιωρούμενων σωματιδίων, που κυμαίνονται από 0 έως 500 [22]. Στον Πίνακα 5, βάσει των τιμών του δείκτη API, περιγράφονται οι πέντε κατηγορίες ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα με τις πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία.

Πίνακας 5. Κατηγορίες τιμών του δείκτη API και πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία [22].

Τιμή API	Κατηγορία ποιότητας αέρα	Πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία
0-25	Καλή	Κανένα πρόβλημα για τη δημόσια υγεία

26-50	Μέτρια	Χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα στο σύνολο του πληθυσμού
51-100	Κακή	Ελάχιστοι άνθρωποι εμφανίζουν προβλήματα και ιδιαίτερα αυτοί που είναι εκτεθειμένοι σε τέτοια ποιότητα αέρα για μεγάλα χρονικά διαστήματα
101-200	Πολύ κακή	Άνθρωποι με καρδιακά και αναπνευστικά προβλήματα θα παρουσιάζουν επιδείνωση της υγείας τους. Συμπτώματα δυσφορίας θα εμφανίσουν ακόμα και άνθρωποι χωρίς προβλήματα υγείας στο παρελθόν.
201-500	Επικίνδυνη	Άνθρωποι με καρδιακά και αναπνευστικά προβλήματα θα παρουσιάζουν σοβαρή επιδείνωση της υγείας τους. Συμπτώματα έντονης δυσφορίας θα εμφανίσουν ακόμα και άνθρωποι χωρίς προβλήματα υγείας στο παρελθόν

### 2.1.8. Ο Ευρωπαϊκός Τοπικός Δείκτης Ρύπανσης (European Regional Pollution Index-ERPI)

Πρόκειται για έναν δείκτη, ως παραλλαγή του αυστραλιανού τοπικού δείκτη ρύπανσης (RPI) που προαναφέρθηκε, προσαρμοσμένο στα ευρωπαϊκά όρια της ατμοσφαιρικής ρύπανσης [11]. Παράλληλα, προέκυψε από τη σύγκριση των τιμών του με τις αντίστοιχες τιμές του ευρωπαϊκού δείκτη DAQx, ώστε ο χαρακτηρισμός της ποιότητας του αέρα να είναι πιο αναλυτικός. Για κάθε ατμοσφαιρικό ρύπο: NO<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub>, υπολογίζεται, ανά ώρα, χωριστά η τιμή του δείκτη ERPI. Για τους ρύπους: CO και O<sub>3</sub> ο υπολογισμός του δείκτη γίνεται, ανά ώρα, αλλά βάσει της μέσης τιμής του κυλιόμενου οκταώρου. Για τα σωματίδια (PM<sub>10</sub>), ο υπολογισμός γίνεται με βάση την μέση ημερήσια τιμή συγκέντρωσής τους. Έτσι, για τους ρύπους NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> και O<sub>3</sub>, υπολογίζονται τέσσερις τιμές του δείκτη ERPI, κάθε ώρα της ημέρας. Η μεγαλύτερη τιμή από αυτές, αποτελεί την ημερήσια τιμή του δείκτη ERPI, για τους ρύπους NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> και O<sub>3</sub>. Επιπλέον, στο τέλος της ημέρας, με βάση τη μέση ημερήσια τιμή συγκέντρωσης των PM<sub>10</sub>, υπολογίζεται και η τιμή του δείκτη ERPI για τους ρύπους PM<sub>10</sub>. Η συνολική ημερήσια τιμή του δείκτη ERPI είναι η μεγαλύτερη μεταξύ των δύο αυτών τιμών για μια συγκεκριμένη περιοχή [11].

Άλλοι, συχνά αναφερόμενοι, δείκτες ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι ο δείκτης Atmo (Atmo-Index), που αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος στη Γαλλία και ο δείκτης IQA που και έχει επηρεαστεί από τον Αμερικανικό δείκτη ποιότητας του αέρα (Air Quality Index-AQI) και χρησιμοποιείται σε περιοχές της βόρειας Ιταλίας [11].

## 2. Πολιτικές της Ευρώπης για την Ατμοσφαιρική ρύπανση

### 2.1. Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (ΕΟΠ) και ατμοσφαιρική ρύπανση

Αποτελεί το κέντρο δεδομένων για την ατμοσφαιρική ρύπανση στην Ευρώπη. Βασίζεται στην εφαρμογή της νομοθεσίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) αναφορικά με τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων και την ποιότητα του αέρα. Συνδράμει, επίσης, στην αξιολόγηση των πολιτικών της ΕΕ για την πρόληψη και αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και στο σχεδιασμό και την υλοποίηση μακροπρόθεσμων στρατηγικών για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στην Ευρώπη. Πιο συγκεκριμένα, ο ΕΟΠ δραστηριοποιείται στη(ν):

- δημοσιοποίηση δεδομένων για την ατμοσφαιρική ρύπανση,
- αξιολόγηση και τεκμηρίωση των ορίων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς και των σχετικών πολιτικών και μέτρων στην Ευρώπη,
- διερεύνηση ενδεχόμενων συσχετίσεων μεταξύ της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των πολιτικών αναφορικά με την ενέργεια, την κλιματική αλλαγή, τη βιομηχανική δραστηριότητα και τις μεταφορές [6].

Ο ευρωπαϊκός δείκτης ποιότητας αέρα αποτελεί τη νέα ηλεκτρονική υπηρεσία του ΕΟΠ και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Βάσει των μετρήσεων σε περισσότερους από 2.000 σταθμούς παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, παρέχει πληροφορίες για την υφιστάμενη ποιότητα του αέρα στην Ευρώπη τόσο σε βραχυπρόθεσμη όσο και σε μακροπρόθεσμη βάση (ετησίως). Τα στοιχεία του δείκτη αποτυπώνουν την βραχυπρόθεσμη (ωριαίως/ημερησίως) ποιότητα του αέρα και όχι την μακροπρόθεσμη (ετήσια) κατάσταση της ποιότητας του αέρα, η οποία ενδέχεται να διαφέρει σημαντικά [23].

Ο δείκτης αυτός προκύπτει μέσω ενός διαδραστικού χάρτη, στον οποίο εμφανίζεται, η κατά τόπους, ποιότητα του αέρα, όπως αυτή παρακολουθείται από σταθμούς μέτρησης, βάσει των μετρήσεων σε πέντε βασικούς, επιβαρυντικούς για την υγεία και το περιβάλλον, ρύπους: όζον ( $O_3$ ), διοξείδιο του αζώτου ( $NO_2$ ), διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ) και αιωρούμενα σωματίδια ( $AS_{2,5}$  και  $AS_{10}$ ). Μέσω του διαδραστικού χάρτη οι χρήστες μπορούν να αναζητήσουν οποιαδήποτε ευρωπαϊκή πόλη και να ενημερωθούν για τις μετρήσεις ανά ρύπο, καθώς και για τη συνολική ποιότητα του αέρα. Ο δείκτης εμφανίζει τη συνολική μέτρηση, για οποιονδήποτε από τους πέντε ρύπους, σε κάθε σταθμό παρακολούθησης, όπου η χειρότερη μέτρηση επισημαίνεται στο χάρτη με μια χρωματιστή κουκίδα.

Τα επικαιροποιημένα ενημερωτικά δελτία ανά χώρα, που δημοσιεύονται από τον ΕΟΠ, παρέχουν ετήσιο απολογισμό αναφορικά με την κατάσταση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των επιπτώσεών της στα κράτη-μέλη της ΕΕ. Παρέχουν πλήρη ενημέρωση σχετικά με τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων και την ποιότητα του αέρα, ανά χώρα, και συμπληρώνουν την ετήσια έκθεση του ΕΟΠ. Σύμφωνα με την πρόσφατη

ετήσια έκθεση για την ποιότητα του αέρα, οι περισσότεροι άνθρωποι, στην ΕΕ, συνεχίζουν να εκτίθενται σε επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, τα οποία χαρακτηρίζονται ως επιβλαβή από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας. Εκτιμάται, μάλιστα, ότι, το 2014, τα λεπτά σωματίδια (ΑΣ<sub>2,5</sub>), ως οι πλέον επιβλαβείς ρύποι, προκάλεσαν πρόωρο θάνατο σε 400.000 Ευρωπαίους. Παράλληλα, η ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλεί σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις, αυξάνοντας το κόστος ιατρικής περίθαλψης και μειώνοντας την παραγωγικότητα των εργαζομένων, ενώ προκαλεί καταστροφή του εδάφους, των καλλιεργειών, των δασών, των ποταμών και των λιμνών. Φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων στην Ευρώπη προέρχονται από τις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τις οδικές μεταφορές, τη βιομηχανία, τη γεωργία και τα νοικοκυριά.

## **2.2.Ευρωπαϊκή Ένωση και ατμοσφαιρική ρύπανση**

Για την προστασία της υγείας και των οικοσυστημάτων, γενικότερα, κρίνεται επιτακτική η εξάλειψη των πηγών που εκπέμπουν ρύπους, καθώς και η εφαρμογή των βέλτιστων μέτρων σε τοπικό και εθνικό επίπεδο (Οδηγία 2008/50/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 2008 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερου αέρα για την Ευρώπη). Ως εκ των ανωτέρω, κρίνεται σκόπιμη η αποφυγή, η πρόληψη ή η μείωση των εκπομπών επικίνδυνων ατμοσφαιρικών ρύπων, θέτοντας στόχους που λαμβάνουν υπόψη τα πρότυπα και τις κατευθυντήριες γραμμές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας.

Η θέσπιση κοινών κριτηρίων εκτίμησης αναφορικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα διευκολύνει την κοινή προσέγγιση όσον αφορά τον τρόπο εκτίμησης της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Στην εκτίμηση αυτή, το μέγεθος των πληθυσμών και των οικοσυστημάτων που εκτίθενται στη ρύπανση, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Συνεπώς, σε κάθε κράτος, η ταξινόμηση του εδάφους σε ζώνες ή οικισμούς που αποτυπώνουν την πυκνότητα του πληθυσμού, κρίνεται αναγκαία. Ακολούθως, μέσω τεχνικών ανάπτυξης μοντέλων, μπορεί να δοθεί η δυνατότητα ερμηνείας της ποιότητας του αέρα κάθε περιοχής ως προς τη γεωγραφική κατανομή της συγκέντρωσης ρύπων, ως βάση για τον υπολογισμό της συνολικής έκθεσης του πληθυσμού που ζει στην περιοχή, σε ρύπους. Η χρήση τυποποιημένων τεχνικών μέτρησης και κοινών κριτηρίων ως προς τον αριθμό και την τοποθεσία των σταθμών μέτρησης για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα, προϋποθέτουν τη σύγκριση των μετρήσεων, μεταξύ των χωρών της ΕΕ, καθώς και την αντιπροσωπευτικότητά τους. Επιπλέον, ο καθορισμός κριτηρίων για τη χρήση και την ακρίβεια των τεχνικών αυτών, κρίνεται αναγκαίος για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Όπου η ποιότητα του αέρα είναι ήδη καλή, θα πρέπει να διατηρείται ως έχει ή να βελτιώνεται. Σε περίπτωση που οι στόχοι για την ποιότητα του αέρα, βάσει των ορίων που θέτει η παρούσα οδηγία, δεν επιτυγχάνονται, τα κράτη θα πρέπει να αναλαμβάνουν δράση, ώστε να συμμορφωθούν προς τις οριακές τιμές και τα κρίσιμα επίπεδα και,

εφόσον είναι εφικτό, να προσεγγίσουν τις τιμές-στόχους αλλά και να θέσουν μακροπρόθεσμους στόχους. Οι υφιστάμενες τιμές-στόχοι που έχουν τεθεί για την προστασία της υγείας, και των οικοσυστημάτων από τις επιβλαβείς επιπτώσεις της έκθεσης στο όζον, κρίνεται επιβεβλημένο να μείνουν αμετάβλητες. Για παράδειγμα, ο καθορισμός κρίσιμων τιμών/ορίων συναγερμού και οι εκστρατείες ενημέρωσης για το όζον, θα συνδράμουν στη διασφάλιση της προστασίας της δημόσιας υγείας όλου του πληθυσμού καθώς και των ευπαθών ομάδων, από την έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις όζοντος. Οποιαδήποτε υπέρβαση των ορίων συναγερμού θα συνεπάγεται πληροφόρηση των πολιτών αναφορικά με τους κινδύνους από την έκθεση στο όζον και την εφαρμογή βραχυπρόθεσμων μέτρων για μείωση των επιπέδων του όζοντος [24]. Ως μακροπρόθεσμος στόχος της ΕΕ τίθεται η επίτευξη των επιπέδων ποιότητας του αέρα που δεν έχουν κινδύνους για την υγεία και το περιβάλλον. Μέσω της νομοθεσίας, των πολιτικών για μείωση των εκπομπών ρύπων και της έκθεσης σε αυτούς, του καθορισμού ορίων και τιμών-στόχων στην ποιότητα του αέρα, των δράσεων συνεργασίας με φορείς που εμπλέκονται στην ατμοσφαιρική ρύπανση, με περιφερειακές, εθνικές και διεθνείς αρχές και μη κυβερνητικούς οργανισμούς, καθώς και μέσω ερευνών, η ΕΕ αναλαμβάνει δράσεις, πολυεπίπεδα, για τη μείωση της έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Μια δέσμη μέτρων για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την ποιότητα του καθαρού αέρα, εγκρίθηκε, το 2013, από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή [6].

### **3. Νομοθεσία στην Ελλάδα και Ατμοσφαιρική ρύπανση**

Ο κύριος ρόλος σε θέματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης ανήκει στο Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, καθώς και στις υπηρεσίες των Περιφερειών, που είναι αρμόδιες για θέματα περιβαλλοντικής πολιτικής και ποιότητας περιβάλλοντος (άρθρο 186, παράγραφος ΣΤ, του Ν. 3852/2010). Οι Διευθύνσεις Πολιτικής Προστασίας έχουν υποστηρικτικό ρόλο, όπως προκύπτει από το ισχύον θεσμικό πλαίσιο.

Οι παρακάτω σχετικές, με την ατμοσφαιρική ρύπανση, έννοιες ορίζονται εκ νέου (ΚΥΑ ΗΠ.14122/549/Ε.103/2011) ως εξής:

*Οριακή Τιμή:* καθορίζεται βάσει επιστημονικών γνώσεων και πρέπει να επιτευχθεί εντός δεδομένης προθεσμίας χωρίς υπερβάσεις, για την αποφυγή, πρόληψη ή μείωση των επιβλαβών επιπτώσεων στην υγεία και στο περιβάλλον.

*Κρίσιμο Επίπεδο:* καθορίζεται βάσει επιστημονικών γνώσεων, και η υπέρβασή του είναι πιθανό να συνεπάγεται άμεσες αρνητικές επιπτώσεις στα φυσικά οικοσυστήματα, όχι όμως και στον άνθρωπο.

*Περιθώριο Ανοχής:* το ποσοστό της οριακής τιμής, για το οποίο η υπέρβαση επιτρέπεται βάσει των όρων της ΚΥΑ ΗΠ.14122/549/Ε.103/2011.

*Σχέδια για την ποιότητα του αέρα:* ορίζουν μέτρα για να επιτευχθούν οι οριακές τιμές ή οι τιμές-στόχοι.



*Όριο Συναγερμού:* αφορά στο επίπεδο πέραν του οποίου τίθεται κίνδυνος για την υγεία του πληθυσμού, κατόπιν σύντομης έκθεσης και πρέπει να ληφθούν άμεσα μέτρα.

*Όριο Ενημέρωσης:* αφορά στο επίπεδο πέραν του οποίου η βραχύχρονη έκθεση εγκυμονεί κινδύνους για την υγεία, ειδικά για ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού και χρειάζεται άμεση και κατάλληλη πληροφόρηση.

Το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), τα συναρμόδια Υπουργεία και οι αρμόδιες υπηρεσίες για θέματα περιβαλλοντικής πολιτικής και ποιότητας περιβάλλοντος των Περιφερειών, εμπλέκονται στα κατωτέρω:

- Για την αποφυγή, πρόληψη, ή μείωση των επιβλαβών επιπτώσεων στην υγεία και στο περιβάλλον, χρειάζεται να προσδιοριστούν και να καθοριστούν στόχοι για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα
- Επί τη βάση κοινών μεθόδων και κριτηρίων χρειάζεται να εκτιμηθεί η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα
- Για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την μακροπρόθεσμη παρακολούθηση τάσεων και κατάλληλων εθνικών και τοπικών μέτρων, χρειάζεται να συγκεντρωθούν πληροφορίες για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα
- Ενημέρωση του κοινού μέσω της διασφάλισης κατάλληλων πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα του αέρα
- Βελτίωση της ποιότητας του αέρα, εάν οι τιμές είναι ενδεικτικές υψηλής συγκέντρωσης ρύπων και διατήρηση της ποιότητας του αέρα, όταν το επίπεδο της βρίσκεται εντός των αποδεκτού εύρους τιμών
- Για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, προκρίνεται περισσότερη συνεργασία με τα κράτη-μέλη της ΕΕ.
- Σε οποιαδήποτε υπέρβαση του ορίου ενημέρωσης ή των ορίων συναγερμού, οι αρμόδιες υπηρεσίες των Περιφερειών οφείλουν να μεριμνούν για την ενημέρωση του κοινού μέσω του ραδιοφώνου, της τηλεόρασης, των εφημερίδων ή του διαδικτύου. Το ΥΠΕΝ έχει την αρμοδιότητα για την Περιφέρεια Αττικής.

Κατά την υπέρβαση των οριακών τιμών, τίθενται σε εφαρμογή δύο είδη σχεδίων:

A) Τα σχέδια για την ποιότητα του αέρα, που υλοποιούνται σε περίπτωση που σε συγκεκριμένους οικισμούς, οι ρύποι υπερβαίνουν την οριακή τιμή, τιμή-στόχο και το περιθώριο ανοχής. Εκπονούνται από το ΥΠΕΝ, τα κατά περίπτωση συναρμόδια Υπουργεία και τις αρμόδιες υπηρεσίες των Περιφερειών.

B) Τα σχέδια βραχυπρόθεσμης δράσης, εφαρμόζονται σε περίπτωση που, σε έναν οικισμό, οι ρύποι υπερβαίνουν τα όρια συναγερμού και προβλέπουν τη λήψη βέλτιστων μέτρων για τη διακοπή ή τον έλεγχο των δραστηριοτήτων (π.χ. μέτρα σχετικά με εργασίες κατασκευών, ελλιμενισμένα πλοία, κυκλοφορία μηχανοκίνητων οχημάτων, οικιακή θέρμανση, χρήση βιομηχανικών εγκαταστάσεων ή προϊόντων) εξαιτίας των οποίων υπάρχει υπέρβαση των οριακών τιμών, των τιμών-στόχο ή του ορίου συ-

ναγερμού. Το σχέδιο αυτό μπορεί να προβλέπει και ειδικές δράσεις για την προστασία της υγείας ευπαθών ομάδων του πληθυσμού. Εκπονούνται από αρμόδιες υπηρεσίες των Περιφερειών.

Άλλες αρμοδιότητες του ΥΠΕΝ, των αρμόδιων υπηρεσιών των Περιφερειών και του Υπουργείου Υγείας & Κοινωνικής Αλληλεγγύης με τις υπηρεσίες Δημόσιας Υγείας της Περιφέρειας περιλαμβάνουν την έγκαιρη και κατάλληλη ενημέρωση του πληθυσμού και των σχετικών οργανώσεων (π.χ. περιβαλλοντικές οργανώσεις, οργανώσεις καταναλωτών, οργανώσεις που εκπροσωπούν τα δικαιώματα ευπαθών ομάδων, αρμόδιοι φορείς για την υγεία κ.α.) αναφορικά με την ποιότητα και τα σχέδια του ατμοσφαιρικού αέρα, ενδεχόμενες αποφάσεις μη τήρησης ορίων, τυχόν απαλλαγές από τη συμμόρφωση σε ορισμένες οριακές τιμές.

Επιπλέον, υπάρχουν Κοινές Υπουργικές Αποφάσεις (ΚΥΑ) που αφορούν:

- στα όρια των συγκεντρώσεων αρσενικού, καδμίου, υδραργύρου, νικελίου και πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (ΚΥΑ 22306/1075/Ε103/2007)
- στα έκτακτα μέτρα, στην περιοχή της πρωτεύουσας, και στα στάδια ενεργειών σε περίπτωση ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με τροποποίηση των οριακών τιμών των ρύπων: διοξείδιο του θείου, διοξείδιο του αζώτου, καπνός, μονοξείδιο του άνθρακα και όζον (ΚΥΑ 11824/1993).

Σε περίπτωση ατμοσφαιρικής ρύπανσης ακολουθούνται τα εξής στάδια:

- i. Στάδιο προειδοποίησης
- ii. Στάδιο εφαρμογής έκτακτων μέτρων α' βαθμίδας
- iii. Στάδιο εφαρμογής έκτακτων μέτρων β' βαθμίδας

Η έναρξη και η λήξη των ανωτέρω σταδίων ορίζεται με ανακοίνωση του ΥΠΕΝ και η διάρκεια ισχύος τους συναρτάται με τις τιμές ρύπανσης, τη δραστηριότητα των πηγών εκπομπής των ρύπων και τις μετεωρολογικές συνθήκες.

Σε καθένα από τα παραπάνω στάδια λαμβάνονται αντίστοιχα μέτρα, ως εξής:

- Στο Στάδιο προειδοποίησης ενημερώνονται οι αρμόδιες, για τη λήψη μέτρων στα επόμενα στάδια, κρατικές αρχές, ώστε να βρίσκονται σε ετοιμότητα. Απαγορεύεται η χρήση φωτιάς σε εξωτερικό χώρο, καθώς και η λειτουργία εστιών καύσεως και αποτεφρωτικών κλιβάνων και γίνονται συστάσεις στον πληθυσμό αναφορικά με το είδος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- Στο Στάδιο εφαρμογής έκτακτων μέτρων α' βαθμίδας περιλαμβάνονται μέτρα για τον περιορισμό της κυκλοφορίας μηχανοκίνητων οχημάτων, της βιομηχανικής/βιοτεχνικής δραστηριότητας και της χρήσης εστιών καύσης σε κτίρια.

- Στο Στάδιο εφαρμογής έκτακτων μέτρων β' βαθμίδας περιλαμβάνονται μέτρα για τον περιορισμό της κυκλοφορίας των οχημάτων, μέτρα περιορισμού στη της βιομηχανικής δραστηριότητας, της κεντρικής θέρμανσης [25].

Βάσει των ορίων ποιότητας της ατμόσφαιρας της ΕΕ, ισχύουν, στην Ελλάδα, νομοθετημένα όρια και στόχοι αναφορικά με: το διοξείδιο του θείου, τα αιωρούμενα σωματίδια ( $AS_{10}$  και  $AS_{2,5}$ ), το διοξείδιο του αζώτου, το όζον, το μονοξείδιο του άνθρακα, το βενζόλιο, τον μόλυβδο, το αρσενικό, το κάδμιο, το νικέλιο και το βενζο(α)πυρένιο.

Για παράδειγμα:

- Οδηγία 2008/50/ΕΚ για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη (ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/Ε103, ΦΕΚ 488Β/30.3.11).
- Οδηγία 2004/107/ΕΚ σχετικά με το αρσενικό, το κάδμιο, τον υδράργυρο, το νικέλιο και τους πολυκυκλικούς υδρογονάνθρακες στον ατμοσφαιρικό αέρα (ΚΥΑ ΗΠ 22306/1075/Ε103, ΦΕΚ 920Β/8.6.07).
- Οδηγία 2015/1480/ΕΚ για την τροποποίηση ορισμένων παραρτημάτων των οδηγιών του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου 2004/107/ΕΚ και 2008/50/ΕΚ, οι οποίες ορίζουν τους κανόνες σχετικά με τις μεθόδους αναφοράς, την επικύρωση των δεδομένων και την τοποθεσία των σημείων δειγματοληψίας για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα (ΚΥΑ 174505/607, ΦΕΚ 1311Β/13.4.17).
- ΚΥΑ 70601 (ΦΕΚ 3272Β/23.12.13), Βραχυπρόθεσμα σχέδια δράσης για την αντιμετώπιση ατμοσφαιρικής ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια.
- Κ.Υ.Α 11824 (ΦΕΚ 369Β/24.5.93), Έκτακτα μέτρα για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή της πρωτεύουσας, όπως ισχύει κατόπιν τροποποίησής της με την ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/Ε103, ΦΕΚ 488Β/30.3.11 [26].

### **3.1. Εθνικό Πρόγραμμα Ελέγχου Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης**

Για να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά η υψηλή συγκέντρωση νέφους πρέπει να γίνει γνωστό με ποιόν τρόπο προκαλείται, από ποια στοιχεία συντίθεται, ποιες οι επιπτώσεις στο οικοσύστημα, και ποιοι είναι οι τρόποι δράσης από την πολιτεία και την κοινωνία για την αντιμετώπισή του. Χρειάζεται, αρχικά να προσδιοριστεί το επίπεδο συγκέντρωσης των ρύπων και, κατόπιν, να εκτιμηθεί και να αντιμετωπιστεί το χαμηλό επίπεδο ποιότητας του αέρα. Προς αυτή την κατεύθυνση και κατ' εφαρμογή των Οδηγιών της ΕΕ, το 2001, το ΥΠΕΚΑ ανέπτυξε το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ).

Άλλωστε, υπάρχει υποχρέωση της χώρας μας για κατάρτιση, θέσπιση και εφαρμογή Εθνικού Προγράμματος Ελέγχου της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΠΕΑΡ) από την Κοινοτική Οδηγία (ΕΕ) 2016/2284 (NECD), που αναφέρεται στη μείωση των εθνικών εκπομπών ορισμένων ατμοσφαιρικών ρύπων. Το ΕΠΕΑΡ, στοχεύοντας να συμμορφωθεί στις εθνικές δεσμεύσεις για τη μείωση των εκπομπών ρύπων (από το 2020 έως το 2029 και από το 2030 και μετά), περιλαμβάνει εθνικές πολιτικές και μέτρα βασισμένα κυρίως στο θεσμοθετημένο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), για το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), τις πτητικές οργανικές ενώσεις εκτός του μεθανίου (NMVOC), την αμμωνία (NH<sub>3</sub>) και τα αιωρούμενα σωματίδια (PM<sub>2,5</sub>) [36].

Παράλληλα, ολοκληρώθηκε το ερευνητικό έργο EMISSION<sup>2</sup> στο οποίο συμμετείχε το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, το Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής και άλλοι σχετικοί φορείς. Το έργο αυτό αφορά στη δημιουργία πλατφόρμας για την καταγραφή και παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε αστικό περιβάλλον, με τη χρήση ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται παρακολούθηση των αέριων ρύπων καθώς και των σωματιδίων, που έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία, και που παρατηρούνται σε υψηλά επίπεδα ή υπερβαίνουν τις οριακές τιμές συγκέντρωσης στην περιοχή της Αθήνας. Για το σκοπό αυτό, χρειάστηκε να συμπληρωθεί και να ενισχυθεί το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ), με την τοποθέτηση νέων σταθμών που θα μετρούσαν τη ρύπανση του αέρα, σε περιοχές, εντός Αττικής, που δεν καλύπτονταν από το υφιστάμενο δίκτυο. Το εν λόγω έργο συνέβαλε στην κάλυψη των ελλείψεων, σε ήδη υφιστάμενες υποδομές μέτρησης, ως προς την ενημέρωση του κοινού σε πραγματικό χρόνο. Αξιοποιήθηκαν τεχνολογίες αιχμής όπως ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, δίκτυα δεδομένων, βάσεις δεδομένων, γεωγραφικά πληροφοριακά συστήματα (GIS), εφαρμογές έξυπνων κινητών και εφαρμογές διαδικτύου, διαδικασίες βαθμονόμησης ατμοσφαιρικών παραμέτρων, τεχνικές αναλυτικής χαρτογράφησης μέσω Web, τεχνικές πρόβλεψης φαινομένων.

#### **4. Παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης**

Η παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι ζωτικής σημασίας όχι μόνο για τους πολίτες, προειδοποιώντας τους για τους κινδύνους στην υγεία από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, αλλά και για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, βοηθώντας τους στη σύνταξη κανονισμών και νόμων που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση αυτών των κινδύνων για την υγεία [27]. Για παράδειγμα, η εισπνεόμενη δόση των σωματιδίων (PMs) μπορεί να υπολογιστεί και έτσι να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις τους στην

---

<sup>2</sup> <https://startupper.gr/news/82577/emission-platforma-parakolouthisis-atmosfairikis-rypansis-apo-space-hellas/>

υγεία. Μελέτες καταδεικνύουν πώς η μεταβλητότητα του καρδιακού ρυθμού συνδέεται με την εισπνεόμενη δόση PM στους πνεύμονες των ανθρώπων [28]. Ομοίως, το PM<sub>2.5</sub>, το οποίο εισπνέεται, σχετίζεται με υψηλή αρτηριακή πίεση [29]. Επιπλέον, ο υπολογισμός της εισπνεόμενης δόσης PM βοηθά επίσης στην αξιολόγηση των καρδιαγγειακών επιδράσεων. Επί του παρόντος, η παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης βασίζεται κυρίως σε ακριβούς σταθμούς υψηλής ποιότητας. Αυτοί οι σταθμοί παράγουν μόνο συγκεντρωτικές πληροφορίες σχετικά με τους ατμοσφαιρικούς ρύπους και δεν είναι σε θέση να καταγράψουν διακυμάνσεις κατά την έκθεση του ατόμου στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Εναλλακτικά, μελετώνται φορητά συστήματα παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, τα οποία καταγράφουν μεμονωμένα επίπεδα έκθεσης σε ατμοσφαιρικούς ρύπους κατά τις καθημερινές δραστηριότητες σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους [27].

Η συστηματική παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης απαιτείται προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα του αέρα, με στόχο την προστασία της υγείας και του περιβάλλοντος [5].

#### **4.1 Χαρτογράφηση της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης**

Πέραν της αξιολόγησης της ποιότητας του αέρα από το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ), πραγματοποιείται εκτίμηση της ποιότητας του αέρα, σε όλη τη χώρα, στο πλαίσιο του έργου «Επικαιροποίηση της χαρτογραφικής απεικόνισης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μέσω της καταγραφής ατμοσφαιρικών εκπομπών των πηγών και ανάπτυξης κατάλληλου υπολογιστικού εργαλείου», που εντάσσεται στο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Περιβάλλον & Αειφόρος Ανάπτυξη» του Εταιρικού Συμφώνου για το Πλαίσιο Ανάπτυξης (ΕΣΠΑ). Ειδικότερα, έχει γίνει απογραφή των εκπομπών των ατμοσφαιρικών ρύπων για όλη τη χώρα με ανάλυση 2km x 2km και έχει γίνει υπολογισμός των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων με την ίδια χωρική ανάλυση, μέσω τεχνικών προσομοίωσης (CAMx) [30].

#### **4.2 Μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης**

Αφορά στη διαδικασία λήψης και μέτρησης των αέριων συστατικών και των σωματιδίων (PM<sub>2.5</sub> και PM<sub>10</sub>) της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Σήμερα, η μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι αρκετά αυτοματοποιημένη, με διαφορετικούς τρόπους μέτρησης και διαφορετικές συσκευές και τεχνικές σε σύγκριση με τα παλαιότερα χρόνια, όπου για να μετρηθεί η σκόνη χρησιμοποιούνταν μετρητές αποθέσεως (συλλέκτες σκόνης) και για να μετρηθεί η όξινη βροχή, χρησιμοποιούνταν βροχόμετρα. Ως Οι τεχνικές μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, σήμερα, μπορεί να χρησιμοποιούνται απλοί απορροφητικοί δοκιμαστικοί σωλήνες (ή σωλήνες διάχυσης) αλλά και εξαιρετικά πολύπλοκοι φυσικοί και χημικοί αισθητήρες που δίδουν μετρήσεις για την

αέρια ρύπανση, στο εδώ και τώρα, και χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθούν δείκτες ποιότητας του αέρα.

### **4.3 Γιατί μετράμε την ατμοσφαιρική ρύπανση;**

Η ποιότητα του αέρα αποτελεί ζήτημα υψηλής προτεραιότητας για τη διαβίωση των έμβιων οργανισμών, έχοντας άμεση επίδραση (βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη) στην υγεία, αλλά και στην επιβίωση της χλωρίδας και της πανίδας. Επιπλέον, ο μολυσμένος αέρας φαίνεται να αυξάνει τη διαδικασία της υπερθέρμανσης του πλανήτη και να συμβάλει, σημαντικά, στην κλιματική αλλαγή. Οι πληροφορίες από τις μετρήσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης χρησιμοποιούνται, λοιπόν, ώστε να κατανοηθούν οι επιπτώσεις του μολυσμένου αέρα στην υγεία των ατόμων που ζουν σε επιβαρυσμένες περιοχές. Η ποιότητα του αέρα, σε ωριαία και καθημερινή βάση, μετριέται, παγκοσμίως, με αυτοματοποιημένες οθόνες παροχής δεδομένων, που χρησιμοποιούνται είτε για να αξιολογηθεί η πρόοδος του Σχεδίου Δράσης για την Ποιότητα του Αέρα, είτε για να αξιολογηθεί ο αντίκτυπος της λειτουργίας ενός σουπερ-μάρκετ, το οποίο προσεγγίζουν πολλά μηχανοκίνητα οχήματα, στην ποιότητα του αέρα. Επιπλέον των ανωτέρω, βάσει του επιπέδου ρύπανσης του αέρα, έχουν αναπτυχθεί δείκτες ποιότητας αέρα (AQIs) με στόχο την παρακολούθηση και την καθημερινή αναφορά σχετικά με την ποιότητα του αέρα, σε πραγματικό χρόνο.

### **4.4. Τρόποι μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης**

Κατανοώντας και αξιολογώντας τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης με τη χρήση έγκαιρων δεδομένων, τεχνικών ακριβείας, προτύπων και πολιτικών, αναπτύσσονται στρατηγικές ελέγχου και αξιολογούνται μοντέλα και έρευνες για τον μετριασμό των δυσμενών επιπτώσεων των ρύπων και τη διατήρηση ενός βιώσιμου περιβάλλοντος. Πώς, όμως, θα συλλεγούν τα δεδομένα κατά την μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης; Παρατίθενται οι εξής τρεις τρόποι μέτρησης:

- Σταθεροί Αυτοματοποιημένοι Σταθμοί Παρακολούθησης
- Δορυφόροι
- Κινητά όργανα μέτρησης

#### 4.4.1. Σταθεροί Αυτοματοποιημένοι Σταθμοί Παρακολούθησης

Η αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα πραγματοποιείται, κυρίως, από σταθμούς παρακολούθησης υψηλής τεχνολογίας. Πρόκειται για μεγάλες, κρατικές αυτόματες μηχανές παρακολούθησης τοποθετημένες σε περιοχές με υψηλότερη συγκέντρωση αερίων ρύπων, όπου η έκθεση σε αυτούς είναι πιο πιθανή. Αυτοί οι σταθμοί παρακολούθησης έχουν υψηλό κόστος, που τους περιορίζει σε λίγους μόνο ανά πόλη και βρίσκονται, κυρίως, σε πυκνοκατοικημένες περιοχές ή κοντά σε κέντρα πόλεων, αφήνοντας, ωστόσο, ακάλυπτες μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Ως αποτέλεσμα, οι διαθέσιμες πληροφορίες για την ποιότητα του αέρα είναι χονδροειδείς. Πράγματι, οι περιοχές που βρίσκονται μακριά από αυτούς τους σταθμούς παρακολούθησης ενδέχεται να έχουν χαμηλότερη ακρίβεια στις αναφερόμενες τιμές, καθώς τα δεδομένα επεκτείνονται σε μια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή [27]. Αυτοί οι σταθμοί λειτουργούν, σε όλες τις χώρες, κατ' εφαρμογή των οδηγιών του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, καθώς μετρούν τους βασικούς ρύπους που επιβαρύνουν την υγεία. Τα δεδομένα των σταθμών παρακολούθησης που αφορούν στους ατμοσφαιρικούς ρύπους λαμβάνονται και παρουσιάζονται ως Δείκτης Ποιότητας του Αέρα (AQI).

Τα πλεονεκτήματα των σταθερών αυτοματοποιημένων σταθμών μέτρησης είναι τα εξής:

- Διενεργούν εξαιρετικά ακριβείς μετρήσεις
- Παρέχουν εξαιρετικά αξιόπιστα δεδομένα
- Λειτουργούν συνέχεια, σε καθημερινή βάση

Τα μειονεκτήματα των σταθερών αυτοματοποιημένων σταθμών μέτρησης είναι τα εξής:

- Είναι ακριβοί στην αγορά και ρύθμισή τους
- Απαιτούν τακτική συντήρηση για την διασφάλιση της επαρκούς λειτουργίας που προϋποθέτει σημαντικό αριθμό και υποστήριξη από προσωπικό.
- Έχουν αυξημένο λειτουργικό κόστος.

#### 4.4.2 Δορυφόροι

Η μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από το διάστημα αποτελεί, σε παγκόσμια κλίμακα, μια τεχνολογική και επιστημονική πρόκληση. Με την αξιοποίηση της επιστήμης του διαστήματος και τη χρήση δορυφόρων σε τροχιά γύρω από τη γη, μπορεί να δοθεί μια λεπτομερής εικόνα των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Ειδικότερα, οι δορυφόροι μπορούν να μετρήσουν τη σωματιδιακή ρύπανση, το όζον, το μονοξείδιο του άνθρακα και άλλους σημαντικούς ρύπους. Η μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

μέσω απεικόνισής της από διαστημικούς δορυφόρους μπορεί να είναι πολύ ακριβής. Δυο επιτεύγματα δορυφορικών συστημάτων παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι το Joint Polar Satellite System (JPSS) που παρέχει πολύ υψηλή ανάλυση της ποιότητας του αέρα, μία φορά την ημέρα και το Geostationary Operational Environmental Satellites-R (GOES-R) που είναι ικανό να μετράει τις συγκεντρώσεις ρύπανσης σε διαστήματα πέντε λεπτών. Λειτουργούν, και τα δυο, από την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (NOAA) στις ΗΠΑ.

Τα πλεονεκτήματα των δορυφόρων συνοψίζονται στα εξής:

- Καλύπτουν όλη τη γη, παρέχοντας δωρεάν πρόσβαση σε τεχνικά δεδομένα. Το sentinel-5P, για παράδειγμα, χαρτογραφεί τη γη καθημερινά και συνεισφέρει στην Υπηρεσία Παρακολούθησης της Ατμόσφαιρας Copernicus (CAMS), που παρέχει πληροφορίες για την ατμοσφαιρική ρύπανση, παγκοσμίως, την υγεία, την ηλιακή ενέργεια, τα αέρια θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή.

*Μειονεκτήματα των δορυφόρων*

- Παρέχουν χαμηλό επίπεδο ανάλυσης
- Η μετάδοση δεδομένων παρουσιάζει χρονική καθυστέρηση

#### **4.4.3. Κινητά Όργανα Μετρήσεων**

Η ανάπτυξη ασύρματων αισθητήρων σε οχήματα δημόσιας μεταφοράς όπως λεωφορεία, τραμ και τρένα για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα έχει ως αποτέλεσμα μια ευρύτερη χωρική κάλυψη [31]. Μηχανοκίνητα οχήματα (φορτηγά, αεροπλάνα), εξοπλισμένα με τα κατάλληλα όργανα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν την ατμοσφαιρική ρύπανση. Πρόκειται για ένα οικονομικά αποδοτικό και ευέλικτο μέσο Σε σύγκριση με τους αυτοματοποιημένους σταθμούς παρακολούθησης, είναι ένα ευέλικτο και οικονομικά αποδοτικό μέσο για να μετρηθεί η ατμοσφαιρική ρύπανση, κατάλληλο για οικισμούς και αγροτικές περιοχές που δεν αντέχουν την οικονομική επιβάρυνση των σταθερών αυτοματοποιημένων σταθμών παρακολούθησης. Ωστόσο, οι μετρήσεις των κινητών οργάνων μέτρησης περιορίζονται στις τοποθεσίες, τις οποίες μπορούν να διασχίζουν τα οχήματα [32,33].

Το πλεονέκτημα του κινητού οργάνου μέτρησης είναι ότι η μέτρηση που διενεργεί, είναι ακριβής με την προϋπόθεση ότι ένας έμπειρος περιβαλλοντολόγος το χειρίζεται σωστά. Τα μειονεκτήματα του κινητού οργάνου μέτρησης είναι τα εξής:

- Δεν λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές ρύπων από αυτά
- Έχουν μεγάλο κόστος αγοράς και μεγάλο κόστος συντήρησης



- Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται εξαρτώνται από τη διάρκεια και τη συχνότητα της εργασίας του χειριστή, επομένως η ρύπανση που υπάρχει εκτός των ωρών εργασίας του, δεν μπορεί να μετρηθεί
- Τα αεροπλάνα, ως κινητά όργανα μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, παρουσιάζουν χαμηλή ανάλυση στη μετάδοση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

#### **4.4.4. Παθητικοί συλλέκτες**

Οι παθητικοί συλλέκτες είναι φορητές, μη ηλεκτροκίνητες, και οικονομικά προσιτές συσκευές για τη μέτρηση των ατμοσφαιρικών ρύπων. Σε μια χρονική περίοδο, κυμαινόμενη από 8 ώρες έως ένα μήνα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιορίσουν τη συγκέντρωση βασικών ρύπων στην ατμόσφαιρα.

#### **4.4.5. Αισθητήρες ποιότητας του αέρα**

Οι αισθητήρες ποιότητας του αέρα έχουν χαμηλό κόστος και είναι εύκολοι στη χρήση, αφού μπορούν να εγκατασταθούν σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Σήμερα, όλοι οι αισθητήρες διαθέτουν δυνατότητες cloud και έξυπνες δυνατότητες, ώστε η παρακολούθηση των επιπέδων ρύπων σε οποιαδήποτε συσκευή με δυνατότητα Wi-Fi, να καθίσταται εύκολη υπόθεση. Το μειονέκτημά τους είναι ότι σε περίπτωση που δεν λειτουργούν σωστά, λόγω γήρανσης και απόκλισης των τιμών (drift), είναι πιθανό να δίνουν μη αξιόπιστα δεδομένα, τα οποία, ωστόσο, μπορούν να μετριάσουν με τακτική βαθμονόμηση και αυτοματοποιημένους ελέγχους αξιοπιστίας.

### **5. Όργανα μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης**

Τα δεδομένα των μετρήσεων στην ατμόσφαιρα παρέχονται αναλυτικά, με στόχο την ελεύθερη πρόσβαση του πληθυσμού, φορέων και οργανώσεων σε πληροφορίες σχετικές με το περιβάλλον.

#### *Σταθμοί μέτρησης*

Όπως προαναφέρθηκε, το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) εγκαταστάθηκε το 2001, επεκτείνοντας και αναβαθμίζοντας το τότε υπάρχον δίκτυο. Επιπλέον, λειτουργεί το δίκτυο σταθμών μέτρησης στην περιοχή της Αττικής και ένας σταθμός στην Αλίαρτο Βοιωτίας για τις ανάγκες του Προγράμματος Διασυννοριακής Μεταφοράς της Ρύπανσης από το ΥΠΕΝ. Στις υπόλοιπες περιοχές, τους σταθμούς λειτουργούν οι περιφερειακές διοικήσεις [36].

### Μετρούμενοι ρύποι

Σε συνεχή, καθημερινή βάση πραγματοποιείται η μέτρηση των αέριων ρύπων. Ο χρόνος απόκρισης των αυτόματων αναλυτών είναι μια τιμή περίπου για κάθε λεπτό. Κάθε ώρα υπολογίζονται οι μέσες τιμές ρύπανσης με τη χρήση ενός μικροεπεξεργαστή, που είναι συνδεδεμένος με τους αυτόματους αναλυτές και βρίσκεται σε κάθε αυτόματο σταθμό. Η μεταβίβαση των τιμών αυτών σε κεντρικό υπολογιστή καθιστά δυνατή τη διαρκή παρακολούθηση των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης της περιοχής. Στον Πίνακα 6 περιγράφονται οι μετρούμενοι ρύποι και οι αντίστοιχες μέθοδοι μέτρησης.

Πίνακας 6. Μετρούμενοι ρύποι και μέθοδοι μέτρησης

Ρύπος	Μέθοδος μέτρησης
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	Απορρόφηση στο υπέρυθρο (NDIR)
Οξειδία του αζώτου (NO,NO <sub>2</sub> )	Χημειοφωταύγεια
Όζον (O <sub>3</sub> )	Απορρόφηση στο υπεριώδες
Διοξείδιο του θείου (SO <sub>2</sub> )	Φθορισμομετρία
Αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ <sub>10</sub> -ΑΣ <sub>2,5</sub> )	Απορρόφηση β ακτινοβολίας (εκτός από την Ελευσίνα όπου χρησιμοποιείται η σταθμική)
Βενζόλιο (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	Αέρια χρωματογραφία (GC)
Βαρέα Μέταλλα	Ατομική Απορρόφηση

### 5.1. Βαθμονόμηση αυτόματων οργάνων

Οι αυτόματοι αναλυτές βαθμονομούνται επιτόπου, κάθε μήνα, και μετά από κάθε επισκευή, με δυναμική αραίωση και πραγματοποιούνται ενδιάμεσοι έλεγχοι, σύμφωνα με τα σχετικά τεχνικά πρότυπα EN. Η επιτόπια βαθμονόμηση των αναλυτών όζοντος στους σταθμούς πραγματοποιείται με μεταφερόμενο φωτόμετρο Β' βαθμίδας το οποίο έχει βαθμονομηθεί από το φωτόμετρο στο Εργαστήριο, ενώ χρησιμοποιούνται φιάλες αέριου αζώτου και δείγμα συγκέντρωσης αιωρούμενων σωματι-

δίων [36]. Το Εθνικό Εργαστήριο Αναφοράς για την Ποιότητα της Ατμόσφαιρας ελέγχει, ετησίως, τα ροόμετρα των συστημάτων βαθμονόμησης με τα οποία εφαρμόζεται η δυναμική αραίωση. Σύμφωνα με τα τεχνικά πρότυπα EN, πραγματοποιείται στους αναλυτές, μεταξύ άλλων, έλεγχος γραμμικότητας, ολίσθησης στο μηδέν και επανάληψης. Το Εργαστήριο είναι διαπιστευμένο, κατά EN ISO 17025, για τη διακρίβωση ροομέτρων ως προς τη ροή αέρα, τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης αερίων σε μείγματα με τη μέθοδο στατικής αραίωσης και τον έλεγχο αναλυτών όζοντος με χρήση φωτομέτρου Α΄ βαθμίδας [36].

## 5.2. Αισθητήρες χαμηλού κόστους

Ο αισθητήρας είναι μια συσκευή που ανιχνεύει και αποκρίνεται σε κάποιο είδος περιβαλλοντικού ερεθίσματος, όπως είναι το φως, η θερμότητα, η κίνηση, η υγρασία, η πίεση ή οποιοδήποτε πλήθος άλλων περιβαλλοντικών φαινομένων. Το αποτέλεσμα είναι γενικά ένα σήμα που μετατρέπεται σε μια αναγνώσιμη από τον άνθρωπο οθόνη στη θέση του αισθητήρα ή μεταδίδεται ηλεκτρονικά μέσω ενός δικτύου για ανάγνωση ή περαιτέρω επεξεργασία. Οι αισθητήρες καθιστούν δυνατή τη δημιουργία ενός συστήματος για τη συλλογή και την επεξεργασία δεδομένων σχετικά με ένα συγκεκριμένο περιβάλλον, ώστε να μπορεί να παρακολουθείται, να είναι διαχειρίσιμο και να ελέγχεται πιο εύκολα και αποτελεσματικά. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε σπίτια, στην ύπαιθρο, σε αυτοκίνητα, σε αεροπλάνα, σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και σε άλλα περιβάλλοντα. Οι αισθητήρες γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ του φυσικού και του τεχνολογικού κόσμου, λειτουργώντας ως μάτια και αυτιά για μια υπολογιστική υποδομή που αναλύει και ενεργεί με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται από αυτούς<sup>3</sup>.

Ο όρος ανιχνευτής χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει έναν αισθητήρα, αν και στην πραγματικότητα ο αισθητήρας είναι απλώς ένα μέρος ενός συστήματος ανίχνευσης. Ένα σύστημα ανίχνευσης, θα ανιχνεύσει μια παρουσία, υποδεικνύοντας την ύπαρξη ενός ερεθίσματος χωρίς να παρέχει ένα ποσοτικό αποτέλεσμα μέτρησης. Συνήθως παρέχουν μια έξοδο με τη μορφή συναγεμίων, στροβοσκοπικών ή άλλων στοιχείων ένδειξης. Παραδείγματα περιλαμβάνουν ανιχνευτές καπνού (εικόνα), ανιχνευτές μετάλλων, ανιχνευτές αερίων και ούτω καθεξής<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup> <https://www.techtarget.com/whatis/definition/sensor>

<sup>4</sup> <https://www.cedengineering.com/userfiles/An%20Introduction%20to%20Modern%20Sensor%20%20Technology%20R1.pdf>



- Ένας μετατροπέας μπορεί να θεωρηθεί ως αισθητήρας όταν χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μιας δεδομένης φυσικής ποσότητας. Αλλά ο μετατροπέας μπορεί επίσης να είναι ενεργοποιητής, όταν η ηλεκτρική είσοδος μετατρέπεται σε μηχανική δράση.
- Ένας ενεργοποιητής θεωρείται μετατροπέας και είναι βασικά το αντίθετο από έναν αισθητήρα, (καθώς μετατρέπει ένα ηλεκτρικό σήμα σε μια μη ηλεκτρική μορφή ενέργειας).
- Ένας μετατροπέας μετατρέπει μια μορφή ενέργειας σε μια άλλη, ενώ ο αισθητήρας μετατρέπει οποιοδήποτε τύπο ενέργειας σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο δεν συνεπάγεται πάντα μια πράξη μεταγωγής.

### 5.2.1. Επιδράσεις στην ποιότητα μιας συσκευής αισθητήρα

Υπάρχουν ορισμένες εσωτερικές και εξωτερικές ιδιότητες και συνθήκες μιας συσκευής ανίχνευσης που διακρίνουν έναν καλό αισθητήρα από έναν αισθητήρα χαμηλότερης ποιότητας.

Πολλά από αυτά που επηρεάζουν την ποιότητα του αισθητήρα, εσωτερικά, βασίζονται:

- στο επίπεδο διασφάλισης ποιότητας του κατασκευαστή
- στο σχεδιασμό του αισθητήρα
- στις χρησιμοποιούμενες διαδικασίες παραγωγής
- στα χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή της συσκευής

Το περιβάλλον στο οποίο είναι εγκατεστημένος ένας αισθητήρας μπορεί να έχει εξωτερικό αντίκτυπο στη μακροπρόθεσμη ποιότητα της συσκευής, καθώς και στις συνθήκες υπό τις οποίες χρησιμοποιείται. Επιπλέον, ένας καλός αισθητήρας θα πρέπει να έχει ελάχιστη απαίτηση ισχύος για να λειτουργήσει. Η απαίτηση ισχύος του αισθητήρα διαφέρει, ανάλογα με το αν ο αισθητήρας είναι:

- Παθητικός - ένας αυτοσχέδιος τύπος
- Ενεργητικός - απαιτεί εξωτερική πηγή διέγερσης για να λειτουργεί

Ένας καλός αισθητήρας έχει *υψηλή ανάλυση* (δηλ. - ανιχνεύει μικρότερες αυξήσεις αλλαγής). Η ανάλυση του αισθητήρα είναι ένα χαρακτηριστικό της συσκευής που αναφέρεται στη μικρότερη αύξηση της αλλαγής της εισόδου που μπορεί να ανιχνεύσει η συσκευή ανίχνευσης. Όσο μικρότερη είναι η αύξηση της αλλαγής που μπορεί να ανιχνευθεί, τόσο καλύτερη θα είναι η συσκευή αισθητήρα.

Η *γραμμικότητα* ενός αισθητήρα είναι ένα άλλο θετικό χαρακτηριστικό μιας συσκευής αισθητήρα που περιγράφει το μέγεθος της απόκλισης (ή μη γραμμικότητας) που εμφανίζει η καμπύλη εξόδου του αισθητήρα, από μια θεωρητική ευθεία γραμμή. Αυτή η γραμμικότητα αναλύεται σε όλη την έκταση του εύρους λειτουργίας του αισθητήρα. Η τιμή σφάλματος γραμμικότητας καθορίζεται συνήθως ως ποσοστό του εύρους λειτουργίας.

Ένας καλός αισθητήρας θα ασκήσει *ελάχιστη επιρροή στο αντικείμενο*, φυσική ποσότητα ή ιδιότητα υπό μέτρηση, που σημαίνει ότι η λειτουργία μιας συσκευής ανίχνευσης δεν πρέπει να αλλάξει την κατάσταση της ιδιότητας, του συμβάντος ή της συνθήκης που μετριέται. Οι επιδράσεις από έναν αισθητήρα μπορεί να περιλαμβάνουν ακουστικές δονήσεις ή θερμική μεταφορά στο μετρητή.

Ένας καλός αισθητήρας θα πρέπει να είναι πολύ *ευαίσθητος* στη μετρούμενη ιδιότητα, ενώ δεν θα πρέπει να είναι ευαίσθητος σε άλλες μη μετρούμενες ιδιότητες.

### 5.2.2. Τα θεμέλια των σύγχρονων αισθητήρων

Πολλές από τις βασικές αρχές που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες για τη δημιουργία μιας μέτρησης βασίζονται σε θεμελιώδεις φυσικές συνθήκες που έχουν παρατηρηθεί από τους επιστήμονες πολύ πριν από τον 20ο αιώνα.

Μεγάλο μέρος των γνώσεων της σύγχρονης τεχνολογίας αισθητήρων προήλθε από αρχές που αναπτύχθηκαν για τις συσκευές και τις έννοιες των μετατροπών που βασίζονται σε αναλογικά στοιχεία. Σύγχρονες συσκευές είναι οι:

- MEMS ή μικροηλεκτρομηχανικοί αισθητήρες
- Έξυπνοι αισθητήρες
- Ασύρματοι αισθητήρες
- Νανο-αισθητήρες και νανο-γεννήτριες
- Άλλες επαναστατικές μικροτεχνολογίες [37]

### 5.2.3. Τύποι αισθητήρων<sup>5</sup>

Οι αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με πολλούς τρόπους. Μια κοινή προσέγγιση είναι να ταξινομηθούν ως *ενεργητικοί* ή *παθητικοί*.

Ένας *ενεργητικός αισθητήρας* είναι αυτός που απαιτεί μια εξωτερική πηγή ενέργειας για να μπορεί να ανταποκρίνεται στο ερέθισμα του περιβάλλοντος και να παράγει αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε δορυφόρους καιρού, συχνά, απαιτούν κάποια πηγή ενέργειας για την παροχή μετεωρολογικών δεδομένων σχετικά με την ατμόσφαιρα της Γης.

Ένας *παθητικός αισθητήρας* δεν απαιτεί εξωτερική πηγή ενέργειας για να ανιχνεύσει το ερέθισμα του περιβάλλοντος. Βασίζεται στο ίδιο το περιβάλλον για τη δύναμή του, χρησιμοποιώντας πηγές όπως το φως ή η θερμική ενέργεια. Ένα καλό παράδειγμα είναι το γυάλινο θερμομέτρο με βάση τον υδράργυρο. Ο υδράργυρος διαστέλλεται και συστέλλεται ως απόκριση στις κυμαινόμενες θερμοκρασίες, με αποτέλεσμα το επίπεδο να είναι υψηλότερο ή χαμηλότερο στον γυάλινο σωλήνα. Οι εξωτερικές σημάνσεις παρέχουν ένα αναγνώσιμο από τον άνθρωπο μετρητή για την προβολή της

---

<sup>5</sup> <https://www.techtargget.com/whatis/definition/sensor>

θερμοκρασίας. Ορισμένοι τύποι αισθητήρων, όπως οι αισθητήρες σεισμικού και υπέρυθρου φωτός, είναι διαθέσιμοι τόσο σε ενεργητική όσο και σε παθητική μορφή. Το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσεται ο αισθητήρας, συνήθως, καθορίζει ποιος τύπος είναι ο καταλληλότερος για την εφαρμογή.

Άλλος τρόπος ταξινόμησης των αισθητήρων αφορά στο αν είναι *αναλογικοί* ή *ψηφιακοί*, με βάση τον τύπο εξόδου που παράγουν οι αισθητήρες.

Οι *αναλογικοί αισθητήρες* μετατρέπουν την περιβαλλοντική είσοδο σε αναλογικά σήματα εξόδου, τα οποία είναι συνεχή και ποικίλα. Τα θερμοστοιχεία που χρησιμοποιούνται σε θερμοσίφωνες ζεστού νερού αερίου προσφέρουν ένα καλό παράδειγμα αναλογικών αισθητήρων. Η πιλοτική λυχνία του θερμοσίφωνα θερμαίνει συνεχώς το θερμοστοιχείο. Εάν η ενδεικτική λυχνία σβήσει, το θερμοστοιχείο ψύχεται, στέλνοντας ένα διαφορετικό αναλογικό σήμα που υποδεικνύει ότι το αέριο πρέπει να διακοπεί.

Σε αντίθεση με τους αναλογικούς αισθητήρες, οι *ψηφιακοί αισθητήρες* μετατρέπουν την είσοδο του περιβάλλοντος σε διακριτά ψηφιακά σήματα που μεταδίδονται σε δυαδική μορφή (1s και 0s). Οι ψηφιακοί αισθητήρες έχουν γίνει αρκετά διαδεδομένοι σε όλες τις βιομηχανίες, αντικαθιστώντας τους αναλογικούς αισθητήρες σε πολλές περιπτώσεις. Για παράδειγμα, οι ψηφιακοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται πλέον για τη μέτρηση της υγρασίας, της θερμοκρασίας, της ατμοσφαιρικής πίεσης, της ποιότητας του αέρα και πολλών άλλων τύπων περιβαλλοντικών φαινομένων. Όπως συμβαίνει με τους ενεργούς και τους παθητικούς αισθητήρες, ορισμένοι τύποι αισθητήρων -- όπως θερμικοί αισθητήρες ή αισθητήρες πίεσης -- είναι διαθέσιμοι τόσο σε αναλογική όσο και σε ψηφιακή μορφή. Και σε αυτήν την περίπτωση, το περιβάλλον στο οποίο θα λειτουργεί ο αισθητήρας καθορίζει, συνήθως, ποια είναι η καλύτερη επιλογή.

Οι αισθητήρες κατηγοριοποιούνται, επίσης, συνήθως ανάλογα με τον τύπο των περιβαλλοντικών παραγόντων που παρακολουθούν. Ακολουθούν μερικά κοινά παραδείγματα:

**Επιταχυνσιόμετρο.** Αυτός ο τύπος αισθητήρα ανιχνεύει αλλαγές στην βαρυτική επιτάχυνση, καθιστώντας δυνατή τη μέτρηση της κλίσης, των κραδασμών και, φυσικά, της επιτάχυνσης. Οι αισθητήρες επιταχυνσιομέτρου χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, από ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης έως επαγγελματικά αθλήματα μέχρι την αεροδιαστημική και την αεροπορία.

**Χημική ουσία.** Οι χημικοί αισθητήρες ανιχνεύουν μια συγκεκριμένη χημική ουσία μέσα σε ένα μέσο (αέριο, υγρό ή στερεό). Ένας χημικός αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση των επιπέδων θρεπτικών συστατικών του εδάφους σε ένα χωράφι, του καπνού ή του μονοξειδίου του άνθρακα σε ένα δωμάτιο, των επιπέδων pH σε ένα σώμα νερού, της ποσότητας αλκοόλ στην αναπνοή του ατόμου ή σε οποιαδήποτε άλλα σενάρια. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας οξυγόνου στο σύστημα ελέγχου εκπομπών ενός αυτοκινήτου θα παρακολουθεί την αναλογία βενζίνης προς οξυγόνο, συνήθως μέσω μιας χημικής αντίδρασης που δημιουργεί τάση. Ένας

υπολογιστής στο χώρο του κινητήρα διαβάζει την τάση και, εάν το μείγμα δεν είναι βέλτιστο, προσαρμόζει ξανά την αναλογία.

Υγρασία. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν το επίπεδο των υδρατμών στον αέρα για να καθορίσουν τη σχετική υγρασία. Οι αισθητήρες υγρασίας, συχνά, περιλαμβάνουν μετρήσεις θερμοκρασίας επειδή το επίπεδο υγρασίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα. Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών και ρυθμίσεων, όπως η γεωργία, η μεταποίηση, τα κέντρα δεδομένων, η μετεωρολογία και η θέρμανση, ο εξαερισμός και ο κλιματισμός (HVAC).

Επίπεδο. Ένας αισθητήρας στάθμης μπορεί να προσδιορίσει τη στάθμη μιας φυσικής ουσίας όπως νερό, καύσιμο, ψυκτικό υγρό, κόκκος, λίπασμα ή απόβλητα. Οι αυτοκινητιστές, για παράδειγμα, βασίζονται στους αισθητήρες στάθμης αερίου που διαθέτουν για να διασφαλίσουν ότι δεν θα κολλήσουν στην άκρη του δρόμου. Οι αισθητήρες στάθμης χρησιμοποιούνται επίσης σε συστήματα προειδοποίησης για τσουνάμι.

Κίνηση. Οι ανιχνευτές κίνησης μπορούν να ανιχνεύσουν τη φυσική κίνηση σε έναν καθορισμένο χώρο (το πεδίο ανίχνευσης) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο φώτων, καμερών, πυλών στάθμευσης, βρύσες νερού, συστημάτων ασφαλείας, αυτόματων ανοιγμάτων θυρών και πολλών άλλων συστημάτων. Οι αισθητήρες συνήθως εκπέμπουν κάποιο είδος ενέργειας -όπως μικροκύματα, υπερηχητικά κύματα ή δέσμες φωτός- και μπορούν να ανιχνεύσουν πότε η ροή της ενέργειας διακόπτεται από κάτι που εισέρχεται στην πορεία του.

Οπτικός. Οι οπτικοί αισθητήρες, που ονομάζονται επίσης φωτοαισθητήρες, μπορούν να ανιχνεύσουν κύματα φωτός σε διαφορετικά σημεία του φάσματος φωτός, συμπεριλαμβανομένου του υπεριώδους φωτός, του ορατού φωτός και του υπέρυθρου φωτός. Οι οπτικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται εκτενώς σε smartphone, ρομποτική, συσκευές αναπαραγωγής Blu-ray, συστήματα οικιακής ασφάλειας, ιατρικές συσκευές και ένα ευρύ φάσμα άλλων συστημάτων.

Πίεση. Αυτοί οι αισθητήρες ανιχνεύουν την πίεση ενός υγρού ή αερίου και χρησιμοποιούνται εκτενώς σε μηχανήματα, αυτοκίνητα, αεροσκάφη, συστήματα HVAC και άλλα περιβάλλοντα. Παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στη μετεωρολογία μετρώντας την ατμοσφαιρική πίεση. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες πίεσης για την παρακολούθηση της ροής αερίων ή υγρών, συχνά έτσι ώστε να μπορεί να ρυθμιστεί η ροή.

Εγγύτητα. Οι αισθητήρες εγγύτητας ανιχνεύουν την παρουσία ενός αντικειμένου ή καθορίζουν την απόσταση μεταξύ των αντικειμένων. Η παρακολούθηση της προσέγγισης χρησιμοποιείται σε ανελκυστήρες, γραμμές συναρμολόγησης, χώρους στάθμευσης, καταστήματα λιανικής, αυτοκίνητα, ρομποτική και πολλά άλλα περιβάλλοντα.



Θερμοκρασία. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να αναγνωρίσουν τη θερμοκρασία ενός μέσου στόχου, είτε αερίου, υγρού είτε αέρα. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα συσκευών και περιβαλλόντων, όπως συσκευές, μηχανήματα, αεροσκάφη, αυτοκίνητα, υπολογιστές, θερμοκήπια, αγροκτήματα, θερμοστάτες και πολλές άλλες συσκευές.

Αφή. Οι συσκευές ανίχνευσης αφής ανιχνεύουν τη φυσική επαφή σε μια επιτηρούμενη επιφάνεια. Οι αισθητήρες αφής χρησιμοποιούνται εκτενώς σε ηλεκτρονικές συσκευές για την υποστήριξη τεχνολογιών trackpad και οθονών αφής. Χρησιμοποιούνται επίσης σε πολλά άλλα συστήματα, όπως ανελκυστήρες, ρομποτική και διανομείς σαπουνιού.

Τα παραπάνω είναι μόνο μερικοί από τους διάφορους τύπους αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε περιβάλλοντα και εντός συσκευών. Ωστόσο, καμία από αυτές τις κατηγορίες δεν είναι απόλυτη. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας στάθμης που παρακολουθεί τη στάθμη ενός υλικού μπορεί επίσης να θεωρηθεί οπτικός αισθητήρας ή αισθητήρας πίεσης. Υπάρχουν επίσης πολλοί άλλοι τύποι αισθητήρων, όπως αυτοί που μπορούν να ανιχνεύσουν φορτίο, καταπόνηση, χρώμα, ήχο και μια ποικιλία άλλων συνθηκών. Οι αισθητήρες έχουν γίνει τόσο συνηθισμένοι, στην πραγματικότητα, που συχνά η χρήση τους ελάχιστα παρατηρείται.

#### **5.2.4. Οι αισθητήρες και η διαδικασία της μέτρησης**

Ένας αισθητήρας είναι το μέρος ενός οργάνου μέτρησης που εκτελεί τη μέτρηση ενός φυσικού ερεθίσματος. Το όργανο μέτρησης είναι ολόκληρη η συσκευή που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μιας φυσικής ποσότητας από το αρχικό στάδιο εισόδου έως την τελική έξοδο. Μια μέτρηση είναι η πράξη της φυσικής ποσοτικοποίησης μιας συνθήκης ερεθίσματος ή ενός γεγονότος που συμβαίνει στον πραγματικό κόσμο.

Η τιμή μέτρησης μπορεί να βασίζεται σε μια τυποποιημένη μονάδα μέτρησης ή σε μια τιμή χωρίς διάσταση.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2., το βασικό συστατικό μέτρησης είναι η συσκευή αισθητήρα.

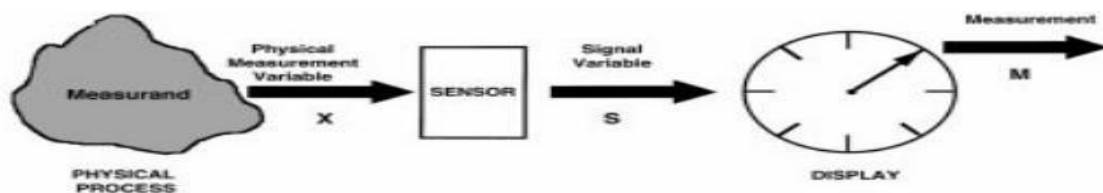
1) Είσοδος αισθητήρα (Input): η φυσική τιμή ή μέτρο ( $X$ ) που παρατηρείται από τη συσκευή αισθητήρα

2) Έξοδος αισθητήρα (Output) - Ο αισθητήρας παράγει μια έξοδο μεταβλητού σήματος ( $S$ ) που είναι συνήθως ηλεκτρική

3) Προετοιμασία σήματος: Το σήμα μεταδίδεται και ρυθμίζεται εάν χρειάζεται (ενισχύεται, μετατρέπεται, φιλτράρεται κ.λπ.)

4) Λήψη ή επαναδρομολόγηση σήματος: λαμβάνεται από μια ενδιαμέση συσκευή (ελεγκτής, επεξεργαστής, δρομολογητής) ή συσκευή εξόδου (HMI, οθόνη, μετρητής, επιλογέας κ.λπ.)

5) Ένδειξη μέτρησης: η μέτρηση εμφανίζεται στη συνέχεια από τη συσκευή εξόδου.



Σχήμα 2. Μοντέλο μέτρησης αισθητήρα

Ο σκοπός ενός αισθητήρα είναι να μετρήσει ένα συγκεκριμένο ερέθισμα. Αυτή η μέτρηση που εισάγεται στο σύστημα μέτρησης ονομάζεται μέτρο (measurand). Ένας αισθητήρας παράγει ένα «μετρήσιμο» σήμα ως απόκριση σε ένα φυσικό, χημικό ή βιολογικό «ερέθισμα».

#### Τα σήματα σε ένα σύστημα μέτρησης

Τα σήματα είναι μεταδόσεις που αποστέλλονται μεταξύ ενός αισθητήρα και της συσκευής λήψης για παροχή ή λήψη δεδομένων, που μπορεί να είναι βίντεο, ήχος ή κάποια άλλη μορφή κωδικοποιημένων δεδομένων. Τα σήματα είναι φορείς, που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πληροφοριών μεταξύ μιας πηγής εισόδου και εξόδου. Συνήθως, τα σήματα μεταδίδονται μέσω αναλογικής καλωδίωσης ή καλωδίωσης

οπτικών ινών, αν και μπορούν να μεταδοθούν μέσω ασύρματων μέσων, όπως τα κύματα ραδιοσυχνότητας (RF). Τα ψηφιακά σήματα, συνήθως, αποστέλλονται σε έναν επεξεργαστή υπολογιστή που μπορεί να εμφανίσει, να αποθηκεύσει ή να μεταδώσει τα δεδομένα ως έξοδο σε άλλο σύστημα, το οποίο θα χρησιμοποιήσει τη μέτρηση.



Σχήμα 3. Παράδειγμα ψηφιακού σήματος

### Κατηγορίες σημάτων

- Σήματα συνεχούς (όταν ορίζεται για όλες τις χρονικές στιγμές) και διακριτού χρόνου (όταν ορίζεται μόνο σε διακριτές χρονικές στιγμές)
- Αιτιοκρατικά και μη αιτιοκρατικά σήματα. Αιτιοκρατικό σήμα: ένα σήμα θεωρείται αιτιοκρατικό εάν δεν υπάρχει αβεβαιότητα ως προς την τιμή του σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή είναι ένα σήμα που μπορεί να οριστεί με ακρίβεια από έναν μαθηματικό τύπο. Μη αιτιοκρατικό (τυχαίο) σήμα: ένα σήμα δεν είναι αιτιοκρατικό εάν υπάρχει αβεβαιότητα ως προς την τιμή του σε δεδομένη χρονική στιγμή. Τα μη αιτιοκρατικά σήματα είναι τυχαία στη φύση τους, επομένως είναι γνωστά ως τυχαία σήματα. Τα τυχαία σήματα δεν μπορούν να περιγραφούν με μαθηματική εξίσωση και μοντελοποιούνται σε πιθανολογικούς όρους.
- Άρτια και περιττά σήματα: Ένα σήμα λέγεται άρτιο όταν ικανοποιεί τη συνθήκη  $x(t) = x(-t)$ . Περιττά σήματα: Ένα σήμα λέγεται περιττό όταν ικανοποιεί τη συνθήκη  $x(t) = -x(-t)$
- Περιοδικά και μη περιοδικά σήματα: είναι αυτά που επαναλαμβάνονται -ή δεν επαναλαμβάνονται, αντίστοιχα- για κάθε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.
- Σήματα ενέργειας και ισχύος: ένα σήμα ενεργειακό έχει πεπερασμένη ενέργεια. Ένα σήμα ισχύος έχει πεπερασμένη ισχύ. Ένα σήμα δεν μπορεί να είναι και ενέργεια και ισχύς ταυτόχρονα, και ένα σήμα μπορεί να μην είναι ούτε ενέργεια ούτε ισχύς.

- Πραγματικά και φανταστικά σήματα: Ένα σήμα λέγεται ότι είναι πραγματικό όταν ικανοποιεί τη συνθήκη  $x(t) = x^*(t)$ . Ένα σήμα λέγεται περιττό όταν ικανοποιεί τη συνθήκη  $x(t) = -x^*(t)$ .

### Τύποι ηλεκτρικών σημάτων και μεταβλητές σήματος

Οι τύποι ηλεκτρικών σημάτων περιλαμβάνουν: χαμηλή τάση, ρεύμα και συχνότητα.

Μερικές από τις μεταβλητές σήματος που εξάγονται από συσκευές αισθητήρων είναι:

- Δύναμη
- Μήκος
- Θερμοκρασία
- Επιτάχυνση
- Ταχύτητα
- Πίεση
- Συχνότητα
- Χωρητικότητα
- Αντίσταση
- Χρόνος
- Τάση
- Μετατόπιση
- Ρεύμα

### Μέσα μετάδοσης σημάτων

Περιλαμβάνουν:

- Μηχανολογικά
- Αρμονικά
- Φως (οπτικές ίνες)

- Θερμικά
- Μαγνητικά
- Ηλεκτρολογικά
- Χημικά
- Ακτινοβολία

#### Προετοιμασία και επεξεργασία του σήματος εισόδου

Το σήμα εξόδου ενός αισθητήρα, συνήθως, δεν έχει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά για μετάδοση ή άλλες μορφές επεξεργασίας. Μπορεί να μην έχει το επαρκές πλάτος, την ισχύ, το επίπεδο ή εύρος ζώνης που απαιτείται ή μπορεί να έχει ανεπιθύμητο θόρυβο ή άλλες παρεμβολές που παραμορφώνουν ή συγκαλύπτουν τα επιθυμητά δεδομένα. Η ρύθμιση του σήματος τροποποιεί το σήμα του αισθητήρα ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του δέκτη στον οποίο είναι συνδεδεμένο. Οι προδιαγραφές του ρυθμιστή σήματος που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα μέτρησης, έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις ανάγκες του σήματος αλλά και του δέκτη.

#### Ενίσχυση του σήματος

Εάν η έξοδος σήματος από τον αισθητήρα είναι ανεπαρκής, είναι συχνά απαραίτητο να ενισχυθεί το σήμα εξόδου, χρησιμοποιώντας ενισχυτές σήματος. Ένας ενισχυτής χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ισχύ από ένα τροφοδοτικό για να αυξήσει το πλάτος του σήματος. Ο βαθμός ενίσχυσης του σήματος που παρέχεται μετριέται από το κέρδος του, το οποίο είναι ο λόγος της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου.

#### Φιλτράρισμα του σήματος

Τα σήματα μπορούν να φιλτραριστούν για να μπλοκάρουν ή να μειώσουν τις εισόδους παρεμβολής ή τροποποίησης. Μερικοί από τους τύπους φιλτραρίσματος που χρησιμοποιούνται είναι:

- Οι χαμηλές συχνότητες φιλτράρουν τις υψηλές συχνότητες και «περνούν» τις χαμηλές συχνότητες
- υψηλές συχνότητες - λειτουργεί αντίστροφα, φιλτράροντας τις χαμηλές συχνότητες και «περνούν» τις υψηλές συχνότητες
- band pass - συνδυάζοντας φίλτρα χαμηλής διέλευσης και υψηλής διέλευσης μαζί, μπορεί να δημιουργηθεί ένα band pass φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευση σημάτων μεταξύ δύο προκαθορισμένων συχνοτήτων ταλάντωσης
- Απόρριψη ζώνης - το φίλτρο απόρριψης ζώνης επιτρέπει τη διέλευση ορισμένων συχνοτήτων, αλλά απορρίπτει άλλες. Ονομάζονται, επίσης, φίλτρα εξάλειψης ζώνης, διακοπής ζώνης ή φίλτρα αποκοπής.

### Μετατροπή του αναλογικού σε ψηφιακό σήμα

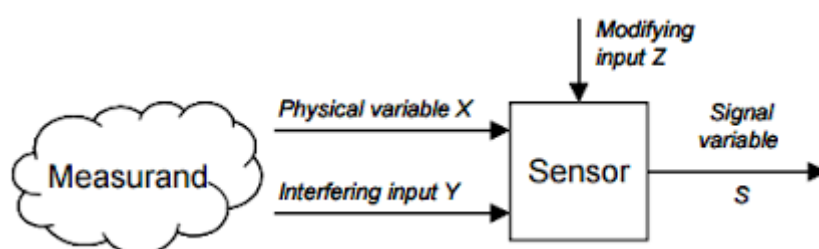
Συχνά, είναι απαραίτητο να μετατραπεί η έξοδος ψηφιακού σήματος σε αναλογικό ή το αντίστροφο, προκειμένου να συνδεθεί σωστά με τη συσκευή λήψης. Αυτή η μετατροπή σήματος εκτελείται από έναν αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα (ή ADC). Υπάρχουν επίσης μετατροπείς ψηφιακού σήματος σε αναλογικό που χρησιμοποιούνται για τον ίδιο σκοπό.

Άλλες μεθόδους επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιούνται σε σήματα αισθητήρων περιλαμβάνουν:

- τη Συμπίεση
- τη Διαμόρφωση
- την Κλιμάκωση

### Τροποποίηση και παρεμβολή του μετρήσιμου στοιχείου

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η έξοδος ενός αισθητήρα επηρεάζεται από φυσικές μεταβλητές διαφορετικές από το επιδιωκόμενο μετρήσιμο στοιχείο (Σχήμα 4). Οποιαδήποτε είσοδος εκτός από αυτή της επιθυμητής μέτρησης, θεωρείται ανεπιθύμητη είσοδος ή διαταραχή. Αυτές οι εισόδους ταξινομούνται ως τροποποιητικές ή παρεμβατικές. Η τροποποίηση των εισόδων αλλάζει τη συμπεριφορά του αισθητήρα ή του συστήματος μέτρησης, τροποποιώντας έτσι τη σχέση εισόδου/εξόδου και τη βαθμονόμηση της συσκευής. Ένα τυπικό παράδειγμα μιας τροποποιητικής εισόδου είναι η θερμοκρασία. Εξαιτίας αυτού, πολλές συσκευές βαθμονομούνται σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες. Άλλα κοινά παραδείγματα είναι: η ατμοσφαιρική πίεση, η υγρασία και οι παρεμβολές μαγνητικού πεδίου.



Σχήμα 4. Τροποποίηση και παρεμβολή του μετρήσιμου στοιχείου

Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για διόρθωση στην τροποποίηση ή παρεμβολή του μετρήσιμου στοιχείου.

Η χρήση αντίθετων εισροών: Με αυτή τη μέθοδο, εισάγονται πρόσθετες παρεμβολές ή τροποποιητικές εισόδους για να ακυρωθούν σκόπιμα οι ανεπιθύμητες συνέπειες των άλλων πηγών εισόδου παρεμβολής.

*Η χρήση του φιλτραρίσματος σήματος:* Αυτή η μέθοδος εισάγει στοιχεία στο όργανο μέτρησης για να αποκλείσει ή να ελαχιστοποιήσει τις εισόδους παρεμβολής ή τροποποίησης, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

*Η χρήση υπολογισμένων διορθώσεων εξόδου:* Αυτή η μέθοδος μετρά ή εκτιμά τα μεγέθη των εισόδων παρεμβολής ή τροποποίησης και αφαιρεί από το σήμα για να ληφθεί η επιθυμητή έξοδος.

*Η χρήση ανατροφοδότησης υψηλού κέρδους:* Αναφέρεται σε μια ενίσχυση του σήματος σε συστήματα ανοικτού ή κλειστού βρόχου.

### Συσκευές εξόδου σήματος

Το σήμα από τον αισθητήρα μπορεί να εξαχθεί με διάφορους τρόπους: ως οθόνη, εγγραφή ή ως δευτερεύον σήμα σε άλλη συσκευή ή σύστημα. Υπάρχουν πολλοί τύποι συσκευών που χρησιμοποιούνται για την εμφάνιση μιας εξόδου, από ένα συνηθισμένο μετρητή κλήσης ή μια κλίμακα, έως μια σύνθετη οθόνη αφής υπολογιστή. Το σήμα μπορεί επίσης να ανακατευθυνθεί σε ένα μεγαλύτερο σύστημα δικτύου όπως ένα σύστημα ελέγχου SCADA (Σχήμα 5).



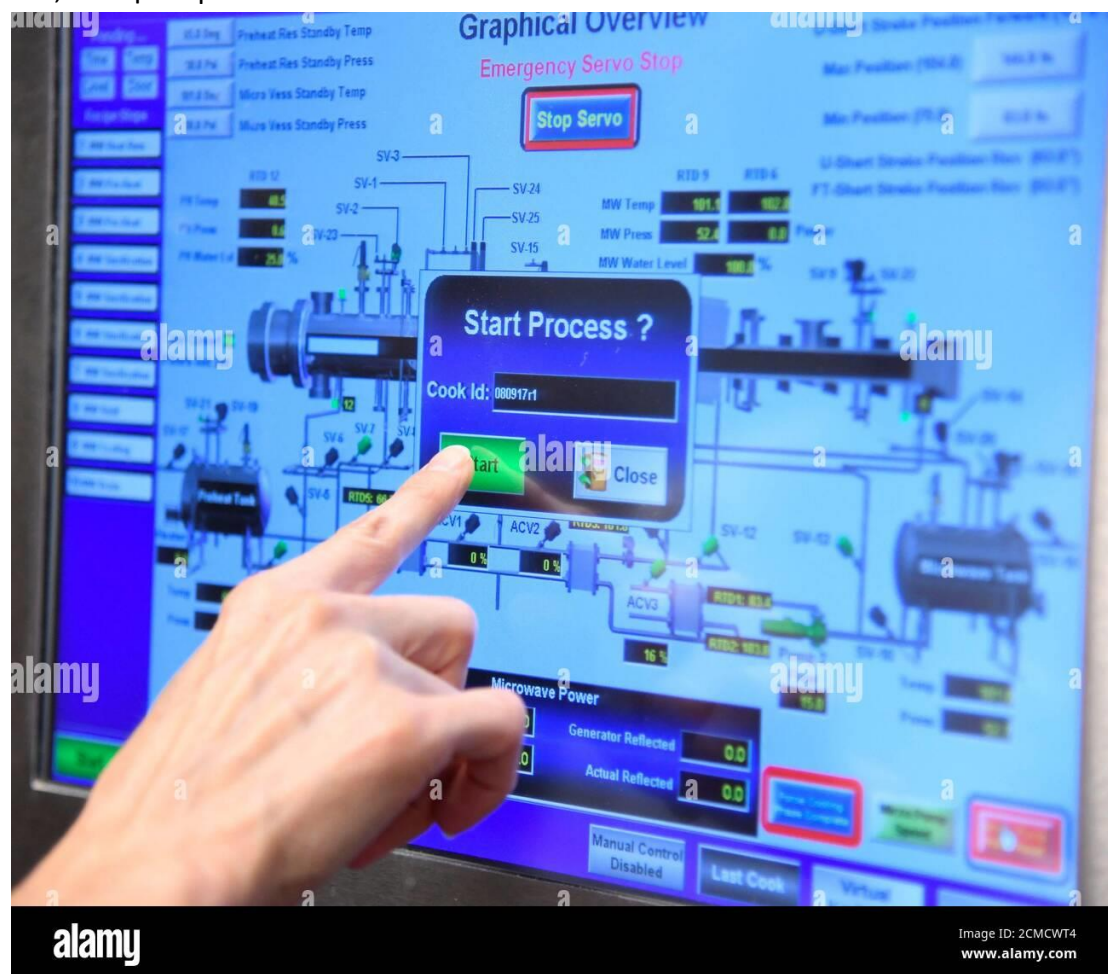
Σχήμα 5. Παράδειγμα συστήματος SCADA

SCADA σημαίνει Εποπτικός Έλεγχος και Απόκτηση Δεδομένων (Supervisory Control and Data Acquisition). Πρόκειται για μια αρχιτεκτονική συστήματος ελέγχου που χρησιμοποιεί υπολογιστές, δικτυωμένες επικοινωνίες δεδομένων και γραφικές διεπαφές χρήστη για διαχείριση εποπτείας διεργασιών υψηλού επιπέδου. Χρησιμοποιεί επίσης άλλες περιφερειακές συσκευές, όπως προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (Programmable Logic Controller- PLC) και διακριτούς ελεγκτές (PID) για διασύνδεση

με τη μονάδα επεξεργασίας ή το μηχάνημα. Οι συσκευές αισθητήρων βρίσκονται στο επίκεντρο αυτής της διεπαφής μεταξύ μηχανημάτων και δικτύου ελέγχου.

### Διεπαφή ανθρώπου - μηχανής (Human Machine Interface-HMI)

Πρόκειται για έναν τύπο συσκευής προβολής εξόδου/αποτελεσμάτων με οθόνη αφής (Σχήμα 6). Συνήθως χρησιμοποιείται για την απευθείας εμφάνιση ενός ψηφιακού μιμητικού διαγράμματος του συστήματος που παρακολουθείται ή ελέγχεται. Χρησιμοποιείται κάθε φορά που παρακολουθείται κάποιος τύπος διαδικασίας ελέγχου, όπως μια μονάδα παραγωγής ενέργειας, μια βιομηχανική ή αυτοματοποιημένη διαδικασία, ένα ηλεκτρικό δίκτυο κ.λπ.



Σχήμα 6. Παράδειγμα συστήματος HMI

### Ψηφιακές ενδείξεις

Ένας άλλος τύπος οθόνης είναι η ψηφιακή ένδειξη ή μετρητής. Αυτές είναι συνήθως συσκευές αριθμητικής απεικόνισης για την έξοδο μεγεθών μέτρησης.

### Ψηφιακοί μετρητές

Ένα ψηφιακό πολύμετρο λαμβάνει δείγματα της ποσότητας που μετριέται και στη συνέχεια εξάγει το σήμα σε διακριτά σταδιακά βήματα, σε σύγκριση με το αναλογικό πολύμετρο που παρέχει μια συνεχή τιμή εξόδου.

### Έξυπνοι μετρητές και AMI



Οι έξυπνοι μετρητές καταγράφουν συνήθως την κατανάλωση ενέργειας και στη συνέχεια μεταδίδουν την ένδειξη μέσω αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ του μετρητή και του κεντρικού συστήματος. Το Advanced Metering Infrastructure (AMI) διαφέρει από το Automatic Meter Reading (AMR) στο ότι έχει αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του μετρητή και του προμηθευτή ρεύματος. Οι επικοινωνίες από το μετρητή προς το δίκτυο μπορεί να είναι ασύρματες ή μέσω σταθερών ενσύρματων συνδέσεων, όπως η τροφοδοσία γραμμής ρεύματος (PLC) [37].

## **6. Αισθητήρες χαμηλού κόστους για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης**

### **6.1.Ορισμοί**

Πριν συζητηθούν οι διαφορετικές προσεγγίσεις αισθητήρων που είναι διαθέσιμες επί του παρόντος για την παρακολούθηση των ατμοσφαιρικών ρύπων, είναι απαραίτητο να συζητηθεί η ορολογία. Διαφορετικές μελέτες στη μέτρηση των ατμοσφαιρικών ρύπων χρησιμοποιούν διαφορετικούς όρους όπως αισθητήρας, συσκευή ανίχνευσης, κόμβος, πλατφόρμα κ.λπ. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται η ακόλουθη ορολογία:

*Αισθητήρας:* το βασικό συστατικό της τεχνολογίας που κάνει πραγματικά την αναλυτική μέτρηση [38,39]. Οι συγκεντρώσεις αερίων ή σωματιδίων, συνήθως, παρακολουθούνται ως ηλεκτρικά σήματα. Οι αρχές μέτρησης ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο του ρύπου: Παραδείγματα περιλαμβάνουν αισθητήρες θερμοκρασίας και πίεσης, ηλεκτροχημικούς αισθητήρες, αισθητήρες μεταλλικών οξειδίων ή οπτικούς αισθητήρες σκέδασης φωτός.

*Σύστημα αισθητήρων:* ο συνδυασμός ενός ή περισσότερων αισθητήρων (για μεμονωμένους ή πολλαπλούς ρύπους) με μια πηγή ενέργειας (εσωτερική ή εξωτερική), ένα περίβλημα και προαιρετικά έναν επεξεργαστή για τη μετατροπή ηλεκτρικών σημάτων σε μονάδες συγκέντρωσης και συστήματα αποθήκευσης και μετάδοσης δεδομένων [38,39]. Τα συστήματα αισθητήρων μπορούν, επομένως, να χρησιμοποιηθούν ως αυτόνομες μονάδες για την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων ρύπων. Μπορούν να αναπτυχθούν μεμονωμένα ή σε ομάδες.

*Όργανο αναφοράς:* όργανα που είναι πιστοποιημένα από επίσημο ρυθμιστικό φορέα και τα οποία χρησιμοποιούνται για σκοπούς συμμόρφωσης με τους κανονισμούς σε δίκτυα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα.

*Διαδικτυακή πλατφόρμα:* διαδικτυακή αποθήκη συλλογής, αποθήκευσης και (προαιρετικά) επεξεργασίας δεδομένων, στην οποία μεταδίδονται δεδομένα όταν οι αισθητήρες έχουν δυνατότητες μετάδοσης δεδομένων.

## 6.2. Αισθητήρες αερίων

Οι δύο κύριοι τύποι αισθητήρων αερίων είναι οι αισθητήρες οξειδίου μετάλλου και οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες [40].

Οι αισθητήρες οξειδίου μετάλλου είναι ευαίσθητοι σε συγκεντρώσεις ρύπων με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα της μεταλλικής τους επιφάνειας. Στον καθαρό αέρα, τα ηλεκτρόνια δότη στο μέταλλο (π.χ. διοξείδιο του κασσιτέρου) έλκονται προς το οξυγόνο στην επιφάνεια του υλικού αίσθησης, εμποδίζοντας τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Παρουσία συγκεντρώσεων ρύπων (π.χ. αναγωγικών αερίων), η επιφανειακή πυκνότητα του προσροφημένου οξυγόνου μειώνεται, καθώς αντιδρά με τα αναγωγικά αέρια. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται στη μεταλλική επιφάνεια, επιτρέποντας στο ρεύμα να ρέει ελεύθερα μέσω του αισθητήρα. Αυτό το ρεύμα, μετρούμενο από τον αισθητήρα, είναι ανάλογο με τη συγκέντρωση ρύπων. Οι κύριοι περιορισμοί αυτών των αισθητήρων είναι ότι η απόκρισή τους είναι περιορισμένη σε υψηλές συγκεντρώσεις (π.χ. αισθητήρες όζοντος) και έχει αποδειχθεί ότι έχουν παρεμβολές με άλλα αέρια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα [41].

*Πλεονεκτήματα:* Μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τους ηλεκτροχημικούς αισθητήρες (βλ. παρακάτω). Έχουν υψηλή ευαισθησία, λιγότερο κόστος, φορητό και ενσωματωμένη επικοινωνία Internet με δεδομένα υψηλής ανάλυσης.

*Μειονεκτήματα:* Η θέρμανση της επιφάνειας μεταλλικού οξειδίου αποτελεί περιορισμό σε αυτούς τους αισθητήρες. Η προθέρμανση απαιτεί υψηλή λειτουργική ισχύ που καθιστά τον αισθητήρα ακριβό όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας. Τα υψηλότερα επίπεδα υγρασίας μπορούν να μειώσουν την ευαισθησία της επιφάνειας του μεταλλικού οξειδίου, καθιστώντας τον αισθητήρα λιγότερο ακριβή σε σύγκριση με τον ηλεκτροχημικό σε υψηλότερα επίπεδα υγρασίας. Επιπλέον, παρατηρείται απόκλιση στην απόδοση του αισθητήρα λόγω της απώλειας ευαισθησίας της επιφάνειας του μεταλλικού οξειδίου με το πέρασμα του χρόνου [42].

- Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες αποτελούνται από ηλεκτρόδια ευγενούς μετάλλου σε έναν ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως ένα υδατικό διάλυμα ισχυρών ανόργανων οξέων. Όταν ένα αναγωγικό αέριο (π.χ. μονοξείδιο του άνθρακα) διαχέεται στο ηλεκτρόδιο αίσθησης, οξειδώνεται, προκαλώντας μετατόπιση του δυναμικού του ηλεκτροδίου αίσθησης. Αυτό δημιουργεί ένα μικρό ρεύμα ανάλογο με τη συγκέντρωση του αερίου. Στην απλούστερη μορφή του, ένας ηλεκτροχημικός αισθητήρας αποτελείται από ένα φράγμα διάχυσης, ένα αισθητήριο ηλεκτρόδιο (μερικές φορές ονομάζεται ηλεκτρόδιο εργασίας, ηλεκτρόδιο μέτρησης ή άνοδος), ένα αντίθετο ηλεκτρόδιο (μερικές φορές ονομάζεται κάθοδος) και έναν ηλεκτρολύτη. Αυτοί οι αισθητήρες έχει αποδειχθεί ότι έχουν παρεμβολές στη σχετική υγρασία και θερμοκρασία, απαιτώντας πρόσθετες μετρήσεις για να ληφθούν αξιόπιστα αποτελέσματα [43]. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι έχουν παρεμβολές με άλλα αέρια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.

*Πλεονεκτήματα:* καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια από τους αισθητήρες οξειδίου του μετάλλου, έχουν υψηλή ευαισθησία, είναι λιγότερο επηρεασμένοι από υψηλότερες

τιμές υγρασίας (σε σύγκριση με τους αισθητήρες οξειδίου του μετάλλου), έχουν συμπαγές, φορητό και ενσωματωμένη μέσω ίντερνετ επικοινωνία μετάδοσης δεδομένων.

*Μειονεκτήματα:* έχουν μικρότερο χρόνο λειτουργίας από τους ηλεκτροχημικούς λόγω της υποβάθμισης της απόδοσης του ηλεκτρολύτη με την πάροδο του χρόνου.

Έχουν υψηλότερο χρόνο απόκρισης σε σύγκριση με τους αισθητήρες μεταλλικών οξειδίων. Για να ληφθεί η αντίστοιχη έξοδος στην εφαρμοζόμενη είσοδο, υφίστανται χημικές αντιδράσεις που προκαλούν καθυστέρηση στο χρόνο απόκρισης [42].

### **6.3.Αισθητήρες σωματιδίων**

Οι αισθητήρες σωματιδίων βασίζονται συνήθως σε οπτικές μετρήσεις, συνήθως στη σκέδαση φωτός. Αντίθετα, τα όργανα αναφοράς βασίζονται στη βαρυμετρία σωματιδίων. Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων σωματιδίων βασίζεται σε μια πηγή φωτός (LED, λέιζερ) η οποία εκπέμπεται στα σωματίδια που εισάγονται στην οθόνη από μια μικρή αντλία ή μια επαγόμενη θερμική κλίση. Το φως που διαχέεται από τα σωματίδια παρακολουθείται χρησιμοποιώντας μια συσκευή ανίχνευσης φωτογραφιών. Η συγκέντρωση των σωματιδίων είναι ανάλογη με την ένταση του σκεδαζόμενου φωτός. Η πραγματική μέτρηση πραγματοποιείται συνήθως από:

- Νεφελομετρία, η οποία μετρά τη σκέδαση φωτός σωματιδίων του συνολικού αερολύματος,
- Καταμέτρηση οπτικών σωματιδίων, η οποία ανιχνεύει το μέγεθος και τον αριθμό των μεμονωμένων σωματιδίων.

Καμία από αυτές τις τεχνικές δεν μετράει τη μάζα των σωματιδίων άμεσα και υποθέτει μια ορισμένη πυκνότητα σωματιδίων για να μετατρέψει τον αριθμό των σωματιδίων σε συγκεντρώσεις μάζας σωματιδίων (στην περίπτωση των οπτικών μετρητών) ή πρέπει να συγκριθεί με ένα όργανο αναφοράς (στην περίπτωση των νεφελομέτρων). Τα μεγέθη σωματιδίων που ανιχνεύονται εξαρτώνται από τις συγκεκριμένες συσκευές αισθητήρων σωματιδίων και θα πρέπει να τονιστεί ότι καμία από τις επί του παρόντος διαθέσιμες συσκευές δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσει εξαιρετικά λεπτά σωματίδια (διάμετρος 300 nm). Οι αισθητήρες χαμηλού κόστους για σωματίδια (PM) υποφέρουν από παρεμβολές στη σχετική υγρασία. Καθώς δεν διαθέτουν κανένα σύστημα για να στεγνώσουν τα σωματίδια, όταν η σχετική υγρασία είναι υψηλή (πάνω από 80-90%) το σύστημα αισθητήρων μετρά, επίσης, τα σταγονίδια νερού υπερεκτιμώντας έτσι τη μάζα των σωματιδίων [44].

### **6.4.Εφαρμογές συστημάτων αισθητήρων χαμηλού κόστους**

Τα συστήματα αισθητήρων έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές, οι οποίες ποικίλλουν από την ευαισθητοποίηση, την επιστήμη των πολιτών, την παρακολούθηση και χαρτογράφηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την

παρακολούθηση της προσωπικής έκθεσης σε ρύπους (Πίνακας 7). Ωστόσο, τα συστήματα αισθητήρων χαμηλού κόστους έχουν υψηλότερη αβεβαιότητα και χαμηλότερη ακρίβεια από τα όργανα αναφοράς. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί αυτός ο τύπος τεχνολογίας πρέπει οι μετρήσεις να συμμορφώνονται με τα επίπεδα αβεβαιότητας που ορίζονται στην οδηγία της ΕΕ για την ποιότητα του αέρα [45]. Οι πιθανές χρήσεις των δεδομένων αισθητήρων εξαρτώνται από την απαιτούμενη ποιότητα δεδομένων και ως εκ τούτου, κάθε εφαρμογή τους έχει διαφορετικές απαιτήσεις και περιορισμούς. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της προσωπικής έκθεσης σε ρύπους θα πρέπει να παρουσιάζουν χαμηλή παρέμβαση με άλλες περιβαλλοντικές μεταβλητές (όπως η υγρασία) και να καταγράφουν γρήγορες χρονικές διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις ρύπων, δεδομένου ότι η έκθεση ποικίλλει γρήγορα, καθώς το άτομο μετακινείται από το ένα μικροπεριβάλλον στο άλλο [39] από εσωτερικούς χώρους σε εξωτερικούς. Απαιτείται μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας ή πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο για την ασφαλή αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων ατμοσφαιρικής μόλυνσης, που δεν θα περιορίζεται από την έλλειψη ηλεκτρικής παροχής. Επιπλέον χρησιμοποιούμε ίδιους αισθητήρες και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των τιμών που μας δίνουν για τυχόν αποκλίσεις μεταξύ των αισθητήρων.

Πίνακας 7. Παραδείγματα σκοπών για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα <sup>6</sup>

Σκοπός αξιολόγησης	Υπεύθυνος για την αξιολόγηση	Μέθοδος για την αξιολόγηση	Στόχοι ποιότητας δεδομένων <sup>7</sup>
Παρακολούθηση/κανονιστική συμμόρφωση	Τοπικές και εθνικές κυβερνήσεις ή Δήμοι, φορείς υπεύθυνοι για δραστηριότητες που απαιτούν συμμόρφωση με τη νομοθεσία για την ποιότητα του αέρα (π.χ. κατασκευή κτιρίων ή οδικές μεταφορές)	Αναφορά ή ισοδύναμη μέθοδος	Προδιαγράφονται στη νομοθεσία
Παρακολούθηση πολιτικών ή τάσεων, μελέτες λογοδοσίας	Αρχές	Αναφορά ή ισοδύναμη μέθοδος	Ορίζονται με βάση το μέγεθος της αλλαγής που αναμένεται ή υποτίθεται
Εκτιμήσεις επιβάρυνσης ασθενειών/	Διεθνείς οργανισμοί (π.χ. Π.Ο.Υ)	Κατά προτίμηση μέθοδος αναφοράς ή ισοδύναμη, αλλά	Η καθοδήγηση παρέχεται από τους συγγραφείς

<sup>6</sup> [https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-acm-report-no-2018-21-low-cost-sensor-systems-for-air-quality-assessment-possibilities-and-challenges/@@download/file/EIO-NET\\_%20Low%20Cost%20Sensors.pdf](https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-acm-report-no-2018-21-low-cost-sensor-systems-for-air-quality-assessment-possibilities-and-challenges/@@download/file/EIO-NET_%20Low%20Cost%20Sensors.pdf)

<sup>7</sup> Οι στόχοι ποιότητας δεδομένων είναι ποιοτικές και ποσοτικές δηλώσεις της ποιότητας των δεδομένων που απαιτούνται για την υποστήριξη συγκεκριμένων αποφάσεων ή ρυθμιστικών ενεργειών

υγείας και περιβάλλοντος		ενδέχεται να περιλαμβάνονται οποιοσδήποτε μετρήσεις για τη βελτίωση της κάλυψης	
Ατμοσφαιρική έρευνα	Ερευνητής, επιστήμονας	Ερευνητικά όργανα, συχνά αναφοράς ή ισοδύναμης ή μεγαλύτερης ακρίβειας	Με βάση τους στόχους και την υπόθεση της μελέτης
Εκτίμηση έκθεσης/έρευνα υγείας και δημόσιας υγείας	Υπεύθυνη υγειονομική αρχή	Αναφορά ή ισοδύναμη μέθοδος σε συνδυασμό με τεκμηριωμένα μοντέλα	Με βάση τους στόχους και την υπόθεση της μελέτης
Εκτίμηση έκθεσης/έρευνα υγείας και δημόσιας υγείας	Ερευνητής, επιστήμονας	Ερευνητικά όργανα και μοντέλα	Με βάση τους στόχους και την υπόθεση της μελέτης
Ενημέρωση του κοινού	Τοπικές και εθνικές κυβερνήσεις, δήμοι, υγειονομικές αρχές	Αναφορά ή ισοδύναμη μέθοδο	Με βάση την παρακολούθηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα και τις δυνατότητες των διαθέσιμων συστημάτων μοντελοποίησης
Ενημέρωση του κοινού	Εκτός από τις αρχές (ομάδες συμφερόντων, άλλα ενδιαφερόμενα μέρη)	Συχνά δεν παρέχονται πληροφορίες	Εξαρτώνται από την περίπτωση χρήσης, συχνά είναι άγνωστοι
Κοινωνία των Πολιτών	Ιδιοκτήτης π.χ. ΜΚΟ, ομάδα πολιτών, σχολεία	Όλες διαθέσιμες, αυτοσχέδιες ή διαθέσιμες στο εμπόριο	Εξαρτάται από την περίπτωση χρήσης, συχνά άγνωστοι
Εξατομικευμένες πληροφορίες	Πολίτες, ιδιώτες	Όλες διαθέσιμες, αυτοσχέδιες ή διαθέσιμες στο εμπόριο	Καμία απαίτηση, συχνά άγνωστοι
Συμβολή στο Έξυπνες Πόλεις»	Οποιαδήποτε οντότητα	Οποιαδήποτε μέθοδος	Καμία απαίτηση, συχνά άγνωστοι

Με τις τεχνολογικές εξελίξεις στους τομείς της ηλεκτρονικής μηχανικής και των ασύρματων δικτύων, έχουν αναπτυχθεί αισθητήρες ποιότητας αέρα «χαμηλού κόστους» για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα [46]. Μελέτες έχουν δείξει διάφορες εφαρμογές αλλά και περιορισμούς των αισθητήρων αέρα χαμηλού κόστους, όπως η βελτίωση της ανάλυσης των καλύψεων συγκέντρωσης ρύπων [47,48] η ανίχνευση εκπομπών δασικών πυρκαγιών [49,50] και η ταξινόμηση των πηγών εκπομπών σε περιβάλλον αεροδρομίου [51]. Μελέτες έχουν, επίσης, εντοπίσει ότι οι αισθητήρες χαμηλού κόστους έχουν περιορισμένη ικανότητα ανίχνευσης εκπομπών εξαιρετικά λε-

πτών σωματιδίων από οικιακές πηγές [52]. Ο Οργανισμός Περιβαλλοντικής Προστασίας των Ηνωμένων Εθνών (UN EPA) [53] και η Περιφέρεια Διαχείρισης Ποιότητας Αέρα της Νότιας Ακτής (South Coast AQMD) έχουν ερευνήσει τόσο την ακρίβεια όσο και τη χρησιμότητα των αισθητήρων χαμηλού κόστους. Το South Coast AQMD Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC) έχει αναπτύξει πρωτόκολλα δοκιμών αισθητήρων φυσικού περιβάλλοντος (πεδίου) και ελεγχόμενου περιβάλλοντος (εργαστηρίου) [54,55] και διεξήγαγε μια εκτενή αξιολόγηση από δεκάδες εμπορικά διαθέσιμους αισθητήρες ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, διαπιστώνοντας ότι αρκετοί αισθητήρες χαμηλού κόστους έχουν καλή απόδοση και στις δύο συνθήκες [56,57].

Για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν όχι μόνο σταθεροί αισθητήρες, αλλά και αισθητήρες τοποθετημένοι σε κινούμενα αντικείμενα, δηλαδή κινητοί αισθητήρες. Πολλές μελέτες για το θέμα της σύγχρονης παρακολούθησης στις μεγαλουπόλεις είναι αφιερωμένες στη χρήση ειδικών δικτύων ad hoc οχημάτων (VANETs) για τη συλλογή δεδομένων [58,59]. Στην περίπτωση αυτή, οι κόμβοι του ασύρματου δικτύου είναι αισθητήρες που τοποθετούνται σε οχήματα (αυτοκίνητα, λεωφορεία), που κινούνται στην πόλη και μετρούν περιοδικά την περιεκτικότητα σε ρύπους στον αέρα. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τέτοιους κινητούς αισθητήρες συμπληρώνουν τις μετρήσεις στατικών αισθητήρων και σταθμών παρακολούθησης. Κύριος σκοπός μιας μελέτης ήταν να προσδιοριστεί η παρουσία σωματιδίων στον αέρα [59]. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με συσκευές που τοποθετήθηκαν σε οροφές αυτοκινήτων. Τα δεδομένα που ελήφθησαν αναλύθηκαν για τον προσδιορισμό των ζωνών με υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων. Οι συγγραφείς σημείωσαν ότι η αποτελεσματικότητα της χρήσης κινητών αισθητήρων ήταν υψηλότερη σε σύγκριση με τη χρήση γνωστών μετρητών αερολυμάτων (π.χ. μετρητής ελαφρών οπτικών αερολυμάτων). Χάρη στον μεγάλο αριθμό μετρήσεων που μπορούν να ληφθούν με κινητούς αισθητήρες, κατέστη δυνατή η δημιουργία ακριβών χαρτών για περιοχές με υψηλή συγκέντρωση  $PM_{2.5}$ . Τέτοιοι ακριβείς χάρτες μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την απαίτηση από τις αρμόδιες υπηρεσίες να ανταποκρίνονται ενεργά στο ενδεχόμενο ατμοσφαιρικής ρύπανσης και να λαμβάνουν έγκαιρες αποφάσεις [59].

Σε άλλο σύστημα παρακολούθησης τοποθετούνται πολλαπλοί αισθητήρες σε λεωφορεία δημόσιων συγκοινωνιών. Οι αισθητήρες λειτουργούν ως κινητά κέντρα συλλογής δεδομένων και παρακολουθούν την ποιότητα του αέρα σε εξωτερικούς χώρους και οχήματα. Η καινοτομία αυτής της προσέγγισης έγκειται στο γεγονός ότι το σύστημα παρέχει πρόσθετους εφεδρικούς κόμβους ως μέρος του δικτύου αισθητήρων, αυξάνοντας, έτσι, την ανοχή σφαλμάτων ολόκληρου του συστήματος [60].

Άλλες εργασίες περιέγραψαν προβλήματα που προκύπτουν κατά την παρακολούθηση της ατμόσφαιρας μιας αστικής περιοχής, χρησιμοποιώντας κινητές συσκευές [61]. Για παράδειγμα, είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα χρονοδιάγραμμα για τη συλλογή δεδομένων, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Τα ακόλουθα προβλήματα είναι επίσης σχετικά: τοποθέτηση σταθμών βάσης για τη συλλογή δεδομένων από κινητές συσκευές, εγκατάσταση αισθητήρων για

χρήση στο σύστημα δημόσιων μεταφορών, διόρθωση των ληφθέντων δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη τις καιρικές συνθήκες. Για προβλήματα όπου η συλλογή δεδομένων κινητής τηλεφωνίας είναι προτιμότερη από τη χρήση σταθερών αισθητήρων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κινητοί δέκτες που καλύπτουν ολόκληρο το δίκτυο αισθητήρων και συλλέγουν συσσωρευμένα δεδομένα από αυτούς, ωστόσο, προκύπτει το πρόβλημα των βέλτιστων διαδρομών για τους κινητούς δέκτες [61].

Για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με αισθητήρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κινούμενα άτομα και αντικείμενα π.χ. πεζοί, αυτοκίνητα και μέσα μαζικής μεταφοράς. Μελέτες περιέγραψαν ένα εναέριο σύστημα που αποτελείται από μη στελεχωμένα εναέρια οχήματα (UAV), συσκευές παρακολούθησης καυσαερίων και κινητά τερματικά ελέγχου. Κάθε συσκευή είναι εξοπλισμένη με μονάδα συλλογής αερίων και αισθητήρες για τον προσδιορισμό σε πραγματικό χρόνο της παρουσίας επιβλαβών ρύπων στον αέρα. Οι συγγραφείς σημείωσαν ότι με τη βοήθεια UAV, είναι δυνατό να ληφθούν δεδομένα για την ανάλυση της κατάστασης του αέρα ακόμη και σε δυσπρόσιτες περιοχές -για παράδειγμα, παρακολούθηση επιβλαβών εκπομπών από πλοία κατά τη διάρκεια της ναυσιπλοΐας [62].

Οι κινητοί κόμβοι αισθητήρων μπορούν να λαμβάνουν μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία, μειώνοντας έτσι την απαίτηση μεγάλου αριθμού κόμβων για παρακολούθηση εκτεταμένων περιοχών. Ωστόσο, για λόγους ακρίβειας, είναι απαραίτητο να συλλέγονται δεδομένα όσο το δυνατόν συχνότερα, οπότε προκύπτει το πρόβλημα της εξισορρόπησης της ακρίβειας παρακολούθησης με το κόστος επικοινωνίας: πώς να ρυθμιστεί ένα χρονοδιάγραμμα για τη μετάδοση δεδομένων από κινητούς κόμβους, προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα παρακολούθησης με ταυτόχρονη μείωση του κόστους επικοινωνίας [63]. Για παράδειγμα, σε μια περιοχή όπου υπάρχουν πολλά οχήματα με αισθητήρες, μπορεί να μειωθεί η συχνότητα μετάδοσης δεδομένων από ορισμένους κόμβους για να αποφευχθούν πιθανές επικαλύψεις. Από την άλλη πλευρά, σε περιοχές όπου η συγκέντρωση επιβλαβών ουσιών αλλάζει δραματικά, το σύστημα μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να αυξάνει τη συχνότητα ανίχνευσης για να βελτιωθεί η ακρίβεια της παρακολούθησης.

Για την επίλυση προβλημάτων παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, συμπεριλαμβανομένης της θεωρίας πιθανοτήτων και των στατιστικών μεθόδων [64,65]. Χρησιμοποιούνται, συνήθως, για τη διερεύνηση της θέσης και της αναγνώρισης των πηγών εκπομπών ρύπων (για παράδειγμα, οι συναρτήσεις πιθανοτήτων υπό όρους χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση της πηγής). Μια μελέτη παρουσίασε τη χρήση στατιστικών μεθόδων για την παρακολούθηση μιας περιοχής, χρησιμοποιώντας κινητούς κόμβους. Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι τα αποτελέσματα της παρακολούθησης του αέρα είναι αναξιόπιστα λόγω των αβεβαιοτήτων των μετρήσεων, της χωρικής μεταβλητότητας και των χρονικών διακυμάνσεων στις συγκεντρώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης [66].

Για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται προέρχονται από διάφορους τύπους αισθητήρων σε συστήματα παρακολούθησης. Η ποιότητα των δεδομένων που λαμβάνονται από αυτά τα συστήματα εξαρτάται

από τους αισθητήρες και τις παραμέτρους τους. Όπως προαναφέρθηκε, οι πιο δημοφιλείς τύποι αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους είναι οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες και οι αισθητήρες οξειδίου μετάλλου, οι ανιχνευτές φωτοϊονισμού και οι μετρητές οπτικών σωματιδίων. Υπάρχουν πολλές εταιρείες στον κόσμο που παράγουν φθηνούς αισθητήρες για τη μέτρηση της παρουσίας ατμοσφαιρικών αερολυμάτων. Ωστόσο, η ποιότητα των δεδομένων που λαμβάνονται από τέτοιους φθηνούς αισθητήρες είναι συχνά αμφισβητήσιμη. Η ποιότητα των δεδομένων επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τη συγκέντρωση των ρύπων και την ώρα της ημέρας που γίνονται οι μετρήσεις [67].

Η αύξηση της εμπορικής διαθεσιμότητας στην τεχνολογία των μικροαισθητήρων συμβάλλει στην ταχεία υιοθέτηση αισθητήρων χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα τόσο από επιστημονικές πρωτοβουλίες πολιτών όσο και από δημόσιες αρχές [68]. Γενικά, οι δημόσιες αρχές θέλουν να αυξήσουν την συχνότητα της παρακολούθησης και των μετρήσεων και επιθυμούν να βασίζονται σε αισθητήρες χαμηλού κόστους επειδή δεν μπορούν να αντέξουν οικονομικά τη χρήση επαρκούς αριθμού σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα (AQMS) [69]. Οι αισθητήρες χαμηλού κόστους μπορούν να παρέχουν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο με χαμηλότερο κόστος, επιτρέποντας μεγαλύτερη χωρική κάλυψη από τις τρέχουσες μεθόδους αναφοράς για τις μετρήσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων. Επιπρόσθετα, η παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με μεθόδους μέτρησης αναφοράς απαιτεί ειδικευμένους χειριστές για τη συντήρηση και τη βαθμονόμηση των συσκευών μέτρησης. Αντίθετα, αναμένεται ότι οι αισθητήρες χαμηλού κόστους μπορούν να λειτουργούν χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, δίνοντας τη δυνατότητα σε ανειδίκευτους χρήστες να παρακολουθούν την ατμοσφαιρική ρύπανση χωρίς την ανάγκη πρόσθετων τεχνικών γνώσεων. Πολλά ινστιτούτα που είναι αρμόδια για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα για ρυθμιστικούς σκοπούς, καθώς και τοπικές αρχές, εξετάζουν το ενδεχόμενο να συμπεριλάβουν αισθητήρες χαμηλού κόστους στις συνήθεις μεθόδους των μετρήσεών τους για να συμπληρώσουν την παρακολούθηση με μετρήσεις αναφοράς. Ωστόσο, η έλλειψη εξαντλητικών και προσβάσιμων πληροφοριών για τη σύγκριση της απόδοσης αισθητήρων χαμηλού κόστους και το μεγάλο εύρος της εμπορικής προσφοράς καθιστούν δύσκολη την επιλογή των καταλληλότερων αισθητήρων χαμηλού κόστους με σκοπό την παρακολούθηση [70].

Για την ταξινόμηση και την κατανόηση της ανάπτυξης αισθητήρων, θα πρέπει να γίνει διάκριση μεταξύ των μοναδικών ανιχνευτών αισθητήρων που παράγονται από Κατασκευαστές Γνήσιου Εξοπλισμού (αισθητήρες OEM (original equipment manufacture)) και Συστήματα Αισθητήρων (SSys), τα οποία περιλαμβάνουν αισθητήρες OEM μαζί με ένα προστατευτικό κουτί, σύστημα δειγματοληψίας, σύστημα ισχύος, ηλεκτρονικό υλικό και λογισμικό για λήψη δεδομένων, μετατροπή αναλογικού σε ψηφιακό, επεξεργασία δεδομένων και μεταφορά δεδομένων [18]. Οι OEM και τα SSys αναφέρονται ως αισθητήρες χαμηλού κόστους. Τα SSys είναι έτοιμα προς χρήση συστήματα εκτός συσκευασίας, ενώ οι χρήστες των OEM πρέπει να προσθέσουν στοιχεία υλικού και λογισμικού για προστασία από μετεωρολογικές συνθήκες, αποθήκευση δεδομένων, προώθηση δεδομένων, διαλειτουργικότητα δεδομένων και, γενικά, βαθμονόμηση



των αισθητήρων χαμηλού κόστους. Μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις έχουν διαθέσει SSys που μπορούν να αναπτυχθούν και από πολίτες για να παρακολουθούν την ποιότητα του αέρα σε ένα επιλεγμένο περιβάλλον [70].

Υπάρχει σημαντικός αριθμός επιτόπιων ερευνών για τη μέτρηση αξιοπιστίας των αισθητήρων χαμηλού κόστους και έχουν γίνει βαθμονομήσεις πεδίου για τη διόρθωση των μετρήσεών τους. Ωστόσο, δεν είναι πάντα δυνατό να φανεί το μοναδικό αποτέλεσμα κάθε συμμεταβλητής που μπορεί να επηρεάσει τη σωστή λειτουργία των αισθητήρων χαμηλού κόστους. Αν και αυτό είναι δυνατό να φανεί μόνο σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, θα μπορούσε να ξεπεραστεί με την ταυτόχρονη τοποθέτηση συστάδων αισθητήρων σε θέσεις αναφοράς για την παροχή βαθμονόμησης εκτός εργαστηριακών συνθηκών. Η έννοια της σύγκρισης δοκιμών πεδίου των αισθητήρων χαμηλού κόστους από διαφορετικές μελέτες μπορεί να είναι δύσκολη και μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα, λόγω της έλλειψης ομοιομορφίας στις μετρήσεις που αντιπροσωπεύουν την ποιότητα των δεδομένων μεταξύ των μελετών, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη σύγκρισή τους. Επιπλέον, πολλά πρωτόκολλα έχουν αναπτυχθεί από ερευνητικά ιδρύματα σε όλο τον κόσμο ή βρίσκονται επί του παρόντος υπό τυποποίηση (CEN/TC 264 Ποιότητα αέρα—Αξιολόγηση απόδοσης αισθητήρων ποιότητας αέρα—Μέρος 1: Αέριοι ρύποι στον ατμοσφαιρικό αέρα και Μέρος 2: Αξιολόγηση απόδοσης αισθητήρων για τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων σωματιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα. WK64899 Τυπική μέθοδος δοκιμής για την αξιολόγηση απόδοσης αισθητήρων ποιότητας αέρα περιβάλλοντος και άλλων οργάνων που βασίζονται σε αισθητήρες. US-EPA: Παράμετροι απόδοσης σχεδίου και πρωτόκολλα δοκιμής για αισθητήρες αέρα όζοντος και παράμετροι απόδοσης σχεδίου και πρωτόκολλα δοκιμής αισθητήρων αέρα για λεπτά σωματίδια) από εθνικά ινστιτούτα τυποποίησης ή έχουν δημοσιευτεί πολύ πρόσφατα. Αυτά τα πρωτόκολλα θέτουν διαφορετικές απαιτήσεις, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας δεδομένων αισθητήρα, των επιπέδων και της διάρκειας των δοκιμών, της εποχικότητας των δοκιμών, του μέσου όρου του χρόνου αισθητήρων και του τύπου των μετρήσεων αναφοράς με τις οποίες συγκρίνονται τα δεδομένα του αισθητήρα. Ελλείπει διεθνώς αποδεκτού τυποποιημένου πρωτοκόλλου για τη δοκιμή των αισθητήρων χαμηλού κόστους [71], υπάρχει έλλειψη εναρμόνισης των δοκιμών που διεξάγονται. Κατά συνέπεια, οι συνθήκες των δοκιμών και οι μετρήσεις που αναφέρονται είναι γενικά διαφορετικές, καθιστώντας δύσκολη τη σύγκριση της απόδοσης του αισθητήρα χαμηλού κόστους σε διαφορετικές μελέτες αξιολόγησης. Η τυποποίηση ενός πρωτοκόλλου για την αξιολόγηση του αισθητήρα σε διεθνές επίπεδο είναι σε προτεραιότητα, ενώ οι ασκήσεις διασύνδεσης, όπου οι αισθητήρες συγκεντρώνονται στους ίδιους χώρους δοκιμών την ίδια χρονική στιγμή είναι απαραίτητες [70].

## 7. Δημιουργία δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Οι συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων, συμπεριλαμβανομένων των  $PM_{2.5}$  μπορούν να παρουσιάσουν σημαντική χωροχρονική μεταβλητότητα ανάλογα με τις τοπικές πηγές ρύπων και τα χαρακτηριστικά της δόμησης του περιβάλλοντος. Αυτές οι μεταβολές ενδέχεται να μην καταγράφονται καλά από το υπάρχον καθεστώς παρακολούθησης [72]. Η βελτίωση της κατανόησης αυτών των μεταβολών αναμένεται να βελτιώσει την ικανότητα για αναγνώριση και μείωση της έκθεσης του πληθυσμού στην ατμοσφαιρική ρύπανση [73]. Επιπλέον, η αύξηση της χωροχρονικής ανάλυσης των μετρήσεων μπορεί να υποστηρίξει μια βελτιωμένη μοντελοποίηση και χαρτογράφηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης [74], η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τη σειρά της για την πρόβλεψη συγκεντρώσεων σε περιοχές, όπου δεν υπάρχει καθόλου παρακολούθηση ή υπάρχει περιορισμένη παρακολούθηση. Ως εκ τούτου, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για νέους, χαμηλού κόστους τρόπους μέτρησης των  $PM_{2.5}$  για την επίτευξη αυτών των στόχων. Ένα βασικό στοιχείο για τα δίκτυα αισθητήρων χαμηλού κόστους είναι ότι οι αισθητήρες είναι καλά βαθμονομημένοι και η προγνωστική τους απόδοση είναι καλά χαρακτηρισμένη αν και δεν θα επιτύχουν την ίδια ακρίβεια με τα αντίστοιχα όργανα αναφοράς [75].

Πριν την δημιουργία του δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους χρειάζεται να γίνει αξιολόγησή τους. Προκρίνεται, μάλλον η αξιολόγηση χαμηλού κόστους αισθητήρων  $PM_{2.5}$ , με την μέθοδο της συν-τοποθέτησης σε κρατικό σταθμό μέτρησης (με εγκεκριμένο όργανο με Ομοσπονδιακή Μέθοδο Αναφοράς Federal Reference Method (FRM) ή Ομοσπονδιακή Ισοδύναμη Μέθοδο Federal Equivalent Method (FEM) (έναντι της εργαστηριακής αξιολόγησης) [76], λόγω του μειωμένου κόστους. Ο Οργανισμός Περιβαλλοντικής Προστασίας των Ην. Εθνών (UN EP) United Nations Environment Program συνιστά τη δοκιμή τουλάχιστον τριών (3) αισθητήρων ταυτόχρονα για τουλάχιστον 30 ημέρες. Κατά τη διάρκεια των 30 ημερών, θα πρέπει να υπάρχει ένα όριο πληρότητας δεδομένων κατά 75%. Συνιστάται επίσης οι συγκεντρώσεις να υπερβαίνουν τα  $25 \mu g m^{-3}$  για τουλάχιστον μία ημέρα κατά τη διάρκεια της συν-τοποθέτησης. Οι βαθμονομήσεις πεδίου μπορούν να πραγματοποιηθούν σε συνεργασία με έναν τοπικό δήμο που λειτουργεί έναν ρυθμιστικό σταθμό παρακολούθησης. Ο εντοπισμός των σταθμών αναφοράς μπορεί να διευκολυνθεί με τη χρήση χάρτη των σταθμών στην υπό μελέτη περιοχή. Πολλοί δήμοι μπορεί να επιτρέψουν τη συν-τοποθέτηση των αισθητήρων δωρεάν (ή ως υποστήριξη σε είδος σε περίπτωση επιχορήγησης) ή μπορεί να ζητηθεί άλλη συμφωνία παροχής υπηρεσιών, η επεξεργασία της οποίας μπορεί να χρειαστεί χρόνο. Στην περίπτωση συνεργασίας με δήμο, συνιστάται να ξεκινήσει αυτή η δέσμευση όσο το δυνατόν νωρίτερα (ιδανικά 3–6 μήνες νωρίτερα) για να ελαχιστοποιηθούν οι καθυστερήσεις. Για αυτόν τον τύπο συνεργασίας, το κόστος υλικών μπορεί να περιοριστεί σε τυχόν προμήθειες που θα χρειαστούν για την τοποθέτηση των αισθητήρων (π.χ. καλώδια επέκτασης κ.λπ.) [75].

Ο στόχος για το χρόνο σύνδεσης ενός αισθητήρα χαμηλού κόστους θα πρέπει να είναι το 75% του συνολικού χρόνου τοποθέτησής του [76]. Συνιστάται, επίσης, να εξεταστεί

το ενδεχόμενο ενός συστήματος με επιλογές αποθήκευσης τόσο βάσει του νέφους (cloud) όσο και τοπικής αποθήκευσης (π.χ. συνδεσιμότητα κινητής τηλεφωνίας που δημοσιεύει δεδομένα σε διακομιστή web καθώς και δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας κάρτας SD), καθώς ορισμένες τοποθεσίες ενδέχεται να έχουν κακή κάλυψη δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Συγκεκριμένα παραδείγματα τοποθεσιών όπου η συνδεσιμότητα κινητής τηλεφωνίας μπορεί να είναι κακή περιλαμβάνουν υπόγεια, τοποθεσίες που εμποδίζονται από δέντρα και αγροτικές τοποθεσίες. Επιπλέον, δεν είναι ασυνήθιστο οι αισθητήρες χαμηλού κόστους να διαθέτουν εσωτερικά παλαιότερη τεχνολογία μόντεμ (π.χ. 3G), η οποία μπορεί επίσης να οδηγήσει σε φτωχότερο σήμα. Η απόκλιση (drift) στους χαμηλού κόστους αισθητήρες σωματιδίων (PM) πιστεύεται γενικά ότι προκύπτει είτε από την υποβάθμιση των ηλεκτρικών εξαρτημάτων εντός του αισθητήρα είτε από τη συσσώρευση σκόνης στον αισθητήρα. Προτείνεται οι αισθητήρες να κοιτούν προς τα κάτω, προκειμένου για τη μείωση της συσσώρευσης σκόνης μέσα στους αισθητήρες. [77]

Η EPA (United States Environmental Protection Agency) συνιστά δοκιμή 60 ημερών [76]. Εάν είναι δυνατές εργαστηριακές/«βελτιωμένες» δοκιμές, η EPA (United States Environmental Protection Agency) συνιστά τη διεξαγωγή δύο σειρών δοκιμών υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης με διαφορά 60 ημερών. Κατά τη διάρκεια του διαστήματος των 60 ημερών, οι αισθητήρες θα πρέπει να λειτουργούν σε εξωτερικούς χώρους μετρώντας τον αέρα του περιβάλλοντος. Εάν δεν είναι δυνατή η εργαστηριακή αξιολόγηση, μπορεί να εξεταστεί το ενδεχόμενο σύγκρισης/συμφωνίας με την παρακολούθηση με μέθοδο που υπάγεται στις FRM ή FEM μέσω συν-εγκατάστασης, χρησιμοποιώντας μεγαλύτερο χρόνο συν-εγκατάστασης (60 ημέρες) ή μέσω συν-εγκατάστασης πριν και μετά από 60 ημέρες λειτουργίας. Εάν υπάρχει σημαντική απόκλιση, αυτό θα αντικατοπτρίζεται στην αλλαγή των τάσεων πριν και μετά την εγκατάσταση. Μπορεί, επίσης, να εξεταστεί το ενδεχόμενο να σχεδιαστεί η συμφωνία μεταξύ αισθητήρων και της παρακολούθησης με μέθοδο που υπάγεται στις FRM/FEM και να κωδικοποιηθούν έγχρωμα τα σημεία δεδομένων ανά χρόνο για να αξιολογηθεί η απόκλιση ή να σχεδιαστούν οι τυπικές συγκεντρώσεις σε συνάρτηση με το χρόνο [75].

Για τις μετρήσεις απόδοσης, η EPA συνιστά τη σύγκριση των μέσων όρων 24 ωρών και 1 ώρας με την παρακολούθηση με μέθοδο που υπάγεται στις FRM/FEM [76]. Δίνει, επιπλέον, έμφαση στους μέσους όρους των 24 ωρών, καθώς η παρακολούθηση με μέθοδο που υπάγεται στις FRM/FEM αναμένεται να είναι περίπου οι ίδιες για έναν μέσο όρο 24 ωρών, ενώ για τους ωριαίους μέσους όρους μπορεί να υπάρχει μεγαλύτερη μεταβλητότητα των οργάνων αναφοράς. Ουσιαστικά, η αξιολόγηση των μετρήσεων απόδοσης σε μέσο όρο 24 ωρών επεκτείνει την καταλληλότητα της παρακολούθησης αναφοράς και στις μεθόδους FRM και FEM και ως εκ τούτου δημιουργεί περισσότερες επιλογές συν-εγκατάστασης. Ωστόσο, τα περισσότερα δεδομένα αισθητήρων θα χρησιμοποιηθούν σε ανάλυση 1 ώρας ή πιο γρήγορα, επομένως, συνιστάται επίσης να αξιολογηθούν σε καθορισμένες χρονικές αναλύσεις [75].

Κατά την επιλογή ενός ελάχιστου διαστήματος αναφοράς δεδομένων για αισθητήρες χαμηλού κόστους, υπάρχει γενικά μια αντιστάθμιση μεταξύ της ανάλυσης χρόνου και

του θορύβου και σφάλματος (δηλαδή, τα δεδομένα σε ταχύτερα διαστήματα είναι πιο θορυβώδη και/ή λιγότερο ακριβή). Για τη μείωση του θορύβου του σήματος του οργάνου, μια κοινή προσέγγιση εφαρμόζει έναν κινητό μέσο όρο. Μια επιλογή είναι ο υπολογισμός του αθροίσματος των απόλυτων διαφορών (SAD) μεταξύ του εξομαλυνθέντος σήματος (S) και του πρωτογενούς σήματος (R). Θα πρέπει πάντα να υπάρχει ένας ελάχιστος μέσος όρος των δεδομένων σε κινητούς μέσους όρους 5 λεπτών [75].

Οποιοσδήποτε περιβαλλοντικές συνθήκες επηρεάζουν τις ιδιότητες ενός αερολύματος, μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια του αισθητήρα. Ένας από τους πιο συχνά παρατηρούμενους παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια του αισθητήρα PM χαμηλού κόστους είναι η σχετική υγρασία (RH) [78]. Εάν ένα σωματίδιο είναι υγροσκοπικό, θα απορροφήσει περισσότερο νερό όταν υπάρχει υγρασία. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μεγαλύτερα σωματίδια, τα οποία διασκορπίζουν περισσότερο φως και μπορούν να οδηγήσουν σε υπερεκτιμημένες συγκεντρώσεις μάζας. Αυτή η πρόσληψη νερού μπορεί να αλλάξει τον δείκτη διάθλασης και την πυκνότητα του αερολύματος, καθιστώντας τις διορθώσεις πιο περίπλοκες [78]. Για να αποφευχθούν αυτά τα ζητήματα στις μεθόδους παρακολούθησης FRM/FEM, η EPA απαιτεί ρύθμιση δειγμάτων σε εύρος υγρασίας 30%–40%. Δεδομένου ότι η συντριπτική πλειονότητα των χαμηλού κόστους αισθητήρων PM δεν περιλαμβάνει καμία ρύθμιση δειγμάτων, αυτή είναι μια κύρια πηγή σφάλματος μέτρησης για αισθητήρες PM χαμηλού κόστους. Για να εξηγηθεί αυτό, πολλές βαθμονομήσεις αισθητήρων χαμηλού κόστους PM περιλαμβάνουν παραμέτρους που επηρεάζουν την πρόσληψη νερού (π.χ. υγρασία, θερμοκρασία, σημείο δρόσου) στα μοντέλα βαθμονόμησής τους [75]. Η μονάδα όζοντος με δυνατότητα FEM παρέχει ακριβείς μετρήσεις του όζοντος στον αέρα σε ένα ευρύ φάσμα που εκτείνεται από μέρη ανά δισεκατομμύριο κατ' όγκο έως ένα ανώτατο όριο 100 μερών ανά εκατομμύριο [34,35].

Άλλες ιδιότητες αερολύματος που μπορεί να διαφέρουν κατά τη βαθμονόμηση του αισθητήρα και επηρεάζουν την ακρίβεια περιλαμβάνουν τον δείκτη διάθλασης (RI) του αερολύματος (που θα επηρεάσει τις οπτικές ιδιότητες) και την κατανομή μεγέθους του αερολύματος [78]. Τα κύρια συμπεράσματα είναι ότι εάν βαθμονομηθεί ο αισθητήρας με έναν τύπο πηγής που έχει ουσιαστικά διαφορετικό RI από το περιβάλλον δειγματοληψίας, μπορεί να γίνει σημαντική υπερεκτίμηση της μάζας PM εάν το RI του αερολύματος, που λαμβάνεται δείγμα υπερβαίνει το υλικό βαθμονόμησης και αντίστροφα. Αυτό το φαινόμενο βρέθηκε να είναι πιο έντονο στους μετρητές οπτικών σωματιδίων (OPC) παρά στα νεφελόμετρα. Αντίθετα, τα νεφελόμετρα χαμηλού κόστους τείνουν να αποτυγχάνουν εάν η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων αλλάξει δραστικά κατά τη δειγματοληψία, δεδομένου ότι βαθμονομούνται σε μία κατανομή μεγέθους [75].

Κατά την επιλογή του πού και πώς θα εγκατασταθούν χαμηλού κόστους αισθητήρες PM, υπάρχουν ορισμένα ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν, όπως: ποιο είναι το περιβάλλον μέτρησης (εσωτερικός χώρος, εξωτερικός ή και τα δύο). Να γίνει στατική ή φορητή παρακολούθηση; Ενδιαφέρει η παρακολούθηση της περιοχής ή η προσωπική έκθεση σε ρύπους; Μετά τη λήψη αυτών των βασικών αποφάσεων, υπάρχουν

ορισμένα βασικά ζητήματα για την ανάπτυξη ενός δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους, όπως η παροχή ισχύος, η πυκνότητα αισθητήρα, η συνδεσιμότητα, η διαχείριση δεδομένων, η πρόσβαση και η διαχείριση αισθητήρων.

## 7.1. Χρήση ενέργειας και επιλογή τοποθεσίας

Υπάρχουν πολλά ζητήματα για την επιλογή τοποθέτησης των αισθητήρων χαμηλού κόστους. Για τη στατική τοποθέτηση, υπάρχουν πρακτικά ζητήματα, όπως η πρόσβαση σε πρίζες ηλεκτρικής ενέργειας, οι κατάλληλες δομές τοποθέτησης (π.χ. πόλοι φωτισμού) και η ασφάλεια του αισθητήρα. Γενικά, οι αισθητήρες με μπαταρίες και ηλιακούς συλλέκτες παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία στην τοποθέτηση οργάνων σε εξωτερικούς χώρους, καθώς η πρόσβαση σε ηλεκτρικές πρίζες μπορεί, συχνά, να είναι περιοριστικός παράγοντας. Εάν η επιλογή αφορά σε ηλιακά πάνελ, θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι έχουν το κατάλληλο μέγεθος και βρίσκονται στην κατάλληλη τοποθεσία, ώστε να διατηρούν τη φόρτιση σε ελάχιστες συνθήκες ηλιακού φωτός. Σε εσωτερικούς χώρους, είναι γενικά ασφαλές να υπάρχει διαθέσιμη ενσύρματη/plug-in πρόσβαση, εκτός εάν η παρακολούθηση γίνεται σε απομακρυσμένη τοποθεσία με περιορισμένη πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου. Για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα από φορητές συσκευές (π.χ. φορητές συσκευές τοποθετημένες σε ποδήλατα ή οχήματα), οι επαναφορτιζόμενες μονάδες με μπαταρίες είναι οι καλύτερες [75].

Άλλα ζητήματα περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό των στόχων. Εάν οι στόχοι είναι να παρακολουθηθούν γνωστές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οι αισθητήρες θα μπορούσαν να τοποθετηθούν, ακολουθώντας την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου που διέρχεται από τη γνωστή θέση πηγής. Εάν ο στόχος είναι η παρακολούθηση της έκθεσης του πληθυσμού σε ρύπους, οι τοποθεσίες των αισθητήρων μπορούν να επιλεγούν, ώστε να τοποθετούνται κοντά σε ευάλωτους πληθυσμούς (π.χ. παιδικούς σταθμούς, εγκαταστάσεις φροντίδας ηλικιωμένων, σχολεία) ή να τοποθετηθούν σε γνωστά σημεία συγκέντρωσης (π.χ. πάρκα). Εάν ο στόχος είναι η παρακολούθηση της περιοχής, τότε οι αισθητήρες θα πρέπει να τοποθετηθούν, ώστε να καλύπτουν τη γεωγραφική περιοχή ενδιαφέροντος, καθώς και να ληφθούν υπόψη χαρακτηριστικά χρήσης γης όπως η πυκνότητα των οχημάτων, η εμπορικότητα της περιοχής και η πυκνότητα του πληθυσμού. Ένας κοινός παρονομαστής σε όλες τις περιπτώσεις είναι η πρόσβαση σε σύνολα δεδομένων, που χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση αυτών των επιλογών. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει ιστορικά μετεωρολογικά δεδομένα (για την επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου), γεωχωρικά δεδομένα (για χαρακτηριστικά χρήσης γης) και δεδομένα απογραφής. Οι περισσότερες πανεπιστημιακές βιβλιοθήκες διατηρούν γεωχωρικές βάσεις δεδομένων, όπως και οι περισσότεροι δήμοι [75].

Ενώ πολλές αποφάσεις για την τοποθέτηση αισθητήρων χαμηλού κόστους PM λαμβάνονται, μέσω στρατολόγησης ειδικών, επιστημόνων, πολιτών/πληθυσμού, υπάρχουν επίσης μαθηματικές μέθοδοι που βοηθούν στη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης του αισθητήρα. Μια τεχνική που αυξάνει σε δημοτικότητα είναι η κατασκευή ενός μοντέλου Gaussian Process (GP) των συγκεντρώσεων ατμοσφαιρικών ρύπων με

βάση τα υπάρχοντα δεδομένα παρακολούθησης και στη συνέχεια η χρήση του μοντέλου GP για την ενημέρωση της επιλογής της νέας τοποθεσίας. Αυτό γίνεται παίρνοντας τον πίνακα συνδιακύμανσης από το μοντέλο GP και συνδυάζοντάς τον με τον αριθμό των διαθέσιμων αισθητήρων για τοποθέτηση, τις συντεταγμένες για υποψήφιες θέσεις και τις συντεταγμένες για ακατάλληλες τοποθεσίες (π.χ. πάνω από το νερό). Ο αλγόριθμος προτείνει την τοποθέτηση αισθητήρων σε τοποθεσίες που μειώνουν σημαντικά τη συλλογική μεταγενέστερη αβεβαιότητα του GP. Αναφέρεται ως αλγόριθμος Βέλτιστου Πειραματικού Σχεδιασμού (OED) [79].

## 7.2. Συνδεσιμότητα

Εάν πρόκειται να τοποθετηθεί μεγάλος αριθμός αισθητήρων (π.χ. 100), προκύπτουν ερωτήματα σχετικά με τη συνδεσιμότητα δικτύου επικοινωνίας και τη διαχείριση μεγάλου αριθμού συνδέσεων [80]. Σημαντικά ζητήματα κατά την επιλογή ενός χαμηλού κόστους αισθητήρα PM είναι το μόντεμ με το οποίο είναι εξοπλισμένος ο αισθητήρας (π.χ. LTE-4G, NB-IoT) και εάν μπορεί να αναβαθμιστεί σε ένα μόντεμ 5G που μπορεί να παρέχει τη χαμηλή καθυστέρηση που απαιτείται για να επεξεργαστεί τα μεγάλα ποσά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η εφαρμογή του 5G θα επέτρεπε, επίσης, τη χρήση υπολογιστών αιχμής, που θα μπορούσαν να επιτρέψουν την εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο πολύπλοκων αλγορίθμων βαθμονόμησης, να υποστηρίξουν υπολογισμούς για ταχύτερη λήψη αποφάσεων ή να επικοινωνήσουν τους κινδύνους σε πραγματικό χρόνο σε άτομα που βρίσκονται κοντά [81]. Αντίθετα, για τοποθετήσεις που είναι είτε σε μεγάλο βαθμό εσωτερικές είτε σε στατικές τοποθεσίες με αξιόπιστη πρόσβαση στο διαδίκτυο (π.χ. σχολεία), μπορεί να προτιμάται ένας αισθητήρας που βασίζεται σε Wi-Fi. Αυτό μπορεί να εξαλείψει δύο προκλήσεις της συνδεσιμότητας κυψελοειδούς δικτύου: α) ανεπαρκές σήμα σε ορισμένες εσωτερικές τοποθεσίες (π.χ. κοντά σε τσιμέντο ή τούβλο) και β) δυσκολία πρόσβασης σε κάρτες SIM και σχέδια δεδομένων για τους αισθητήρες (εκτός εάν περιλαμβάνονται στον αισθητήρα) [75].

Η πρόσβαση στα δεδομένα του αισθητήρα ή η παροχή πρόσβασης αισθητήρα σε άλλους είναι ένα άλλο βασικό στοιχείο. Ενώ ορισμένοι κατασκευαστές αισθητήρων χαμηλού κόστους παρέχουν πρόσβαση και ανάλυση δεδομένων σε χαμηλού κόστους αισθητήρες PM μέσω πληρωμένων ιδιωτικών πυλών web, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο λογισμικού ως υπηρεσία (SaaS), άλλοι παρέχουν κλειδιά δημόσιας πρόσβασης και διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογής (API) (π.χ. PurpleAir, Air Quality Egg). Τα χαμηλού κόστους δεδομένα PM μπορούν να θεωρηθούν ανοιχτή πρόσβαση μόνο όταν τα δεδομένα είναι διαθέσιμα μέσω ενός σταθερού και συνεπούς API. Η αξία των δεδομένων ανοιχτής πρόσβασης έγκειται στο ότι επιτρέπει στους ερευνητές και τους επιστήμονες δεδομένων να αναπτύσσουν προσαρμοσμένες εφαρμογές για την εμφάνιση και την αναφορά δεδομένων με τους δικούς τους χρήσιμους ή/και ουσιαστικούς τρόπους [82].



### 7.3. Αναφορά δεδομένων

Κατά την αποθήκευση και την κοινή χρήση δεδομένων ποιότητας αέρα από αισθητήρες PM χαμηλού κόστους, η επιλογή δημόσιας έναντι ιδιωτικής αναφοράς δεδομένων εξαρτάται από το ερευνητικό ερώτημα (δηλαδή, εάν κάποια δεδομένα είναι ευαίσθητα, μπορεί να προτιμάται η προστασία με κωδικό πρόσβασης). Ο κίνδυνος ενός συγκεκριμένου έργου ή προϊόντος μπορεί να είναι υψηλότερος με μια δημόσια διεπαφή, καθώς άλλοι μπορεί να αντλήσουν χρήσιμες πληροφορίες από τα δεδομένα σας πέρα από τον αρχικό σκοπό συλλογής τους. Εάν, παρολαυτά, επιλεγεί η δημόσια εφαρμογή αναφοράς δεδομένων, συνιστάται η πηγή και ο τύπος των δεδομένων που εμφανίζονται να είναι άμεσα εμφανείς για να ελαχιστοποιηθεί η σύγχυση εάν υπάρχει αναντιστοιχία ή ανακρίβεια στο δεδομένα του αισθητήρα. Μπορεί, επίσης, να εξεταστεί το ενδεχόμενο να φιλοξενηθούν τα δεδομένα των αισθητήρων PM σε μια υπάρχουσα εφαρμογή, όπως το OpenAQ που δέχεται πλέον δεδομένα αισθητήρα χαμηλού κόστους [83]. Για να είναι τα δεδομένα συμβατά με μια εξωτερική εφαρμογή, όπως το OpenAQ, χρειάζεται να μορφοποιηθούν τα δεδομένα σύμφωνα με τα πρότυπα του OpenAQ. Αυτά τα πρότυπα απαιτούν μια μορφή JSON με συγκεκριμένες μονάδες για ρύπους. Επίσης, απαιτούν οι ημερομηνίες να αποθηκεύονται ως ημερομηνία Javascript, που περιέχει τόσο την τοπική ώρα όσο και την Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα (UTC) [82].

### 7.4. Διαχείριση των αισθητήρων

Μόλις καθοριστούν οι θέσεις και τοποθετηθούν οι αισθητήρες, τίθεται επίσης το ζήτημα της διαχείρισης των αισθητήρων. Στην ιδανική περίπτωση, αυτή η ερώτηση θα πρέπει να αντιμετωπιστεί πριν από την ανάπτυξη του δικτύου. Συνήθως απαιτείται εμπειρογνωμοσύνη σε βάθος για τη διαχείριση δικτύων αισθητήρων, την ερμηνεία των δεδομένων και τον εντοπισμό σχετικών προβλημάτων μέτρησης [84]. Ως εκ τούτου, θα πρέπει κανείς να σχεδιάζει όχι μόνο την ανάπτυξη ενός δικτύου αισθητήρων αλλά και τη διεξαγωγή συνεχούς συντήρησης. Για έργα που βασίζονται στην κοινότητα, αυτό συνεπάγεται την περιγραφή σαφών πλαισίων διαχείρισης με τη βοήθεια τυχόν εθελοντών (θα αναμένεται από αυτούς να ελέγξουν τους δικούς τους αισθητήρες; Πώς θα έρθετε σε επαφή εάν ένας αισθητήρας χρειάζεται αντικατάσταση;). Οι συμπράξεις έρευνας-κοινότητας συνεπάγονται επίσης, διαφάνεια ως προς τον χρόνο που μπορεί να χρειαστεί για την επεξεργασία και την αναφορά δεδομένων (συνήθως 12–18 μήνες για το τυπικό έργο που καθοδηγείται από μεταπτυχιακούς φοιτητές). Εάν οι εργασίες διασφάλιση ποιότητας και ελέγχου ποιότητας QA/QC (Quality Assurance /Quality Control) μπορούν να αυτοματοποιηθούν μέσω προγραμματισμένων σεναρίων (λήψη δεδομένων, έλεγχος ότι οι οθόνες είναι online), συνιστάται ανεπιφύλακτα.



Δεδομένου ότι οι χαμηλού κόστους αισθητήρες (PM) των αιωρούμενων σωματιδίων είναι ευαίσθητοι στη γήρανση και την απόκλιση (η ισχύς λέιζερ θα μειωθεί με την πάροδο του χρόνου, η σκόνη μπορεί να συσσωρευτεί στις επιφάνειες των αισθητήρων) και η μετεωρολογία μπορεί να αλλάξει εποχιακά (επηρεάζοντας παραμέτρους όπως η κυρίαρχη πηγή αερολύματος και η υγρασκοπικότητα σωματιδίων), συνιστάται τέτοιες αξιολογήσεις να επαναλαμβάνονται 2-4 φορές το χρόνο (ιδανικά, εποχιακά). Αυτό θα βοηθήσει στον εντοπισμό αισθητήρων που πρέπει να αντικατασταθούν και θα βοηθήσει στην παρακολούθηση της μακροπρόθεσμης υποβάθμισης των αισθητήρων. Οι επαναλαμβανόμενες αξιολογήσεις μπορεί να εξετάσουν μικρότερες χρονικές περιόδους συν-εγκατάστασης, αφού έχει καθοριστεί η βασική απόδοση (2-3 εβδομάδες, 2-4 φορές το χρόνο πέρα από την αρχική αξιολόγηση απόδοσης). Επιπλέον, εάν οι αισθητήρες εκτίθενται σε υψηλές συγκεντρώσεις για παρατεταμένες χρονικές περιόδους (π.χ. εάν χρησιμοποιούνται κοντά στην πηγή και εκτίθενται σε υψηλές συγκεντρώσεις καπνού), συνιστάται νέα αξιολόγηση απόδοσης και βαθμολόγηση, λόγω πιθανής επιταχυνόμενης γήρανσης των αισθητήρων [75].

## **7.5. Σχεδιάζοντας το δίκτυο αισθητήρων ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους<sup>8</sup>**

Επειδή οι αισθητήρες χαμηλού κόστους διαφέρουν σημαντικά από τον σταθερό σταθμό αναφοράς, όσον αφορά τόσο τις λειτουργικές απαιτήσεις όσο και τα αποτελέσματα δεδομένων, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η ήδη υπάρχουσα υποδομή. Αυτό θα βοηθήσει να προσδιοριστεί ποια τεχνολογία και σχεδιασμός δικτύου συμπληρώνουν καλύτερα τα συστήματα που είναι διαθέσιμα σε μια δεδομένη πόλη ή περιβάλλον.

Στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού ενός δικτύου παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, ξεκινάμε κοιτάζοντας την υπάρχουσα υποδομή και ρωτώντας: «Ποιες ερωτήσεις πρέπει να απαντηθούν που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με την υπάρχουσα υποδομή;» Αυτό θα βοηθήσει να σκεφτούμε τους στόχους παρακολούθησης του αέρα και να καθοριστεί ο εξοπλισμός που απαιτείται για την αντιμετώπιση αυτών των στόχων. Θα πρέπει, επίσης, να σημειωθεί το επίπεδο τεχνικών γνώσεων που απαιτούνται για την εγκατάσταση και λειτουργία των αισθητήρων, καθώς και πώς θα αποτραπούν οι βανδαλισμοί και η κλοπή των συστημάτων παρακολούθησης των αισθητήρων ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι αισθητήρες ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους διαφέρουν ως προς το επίπεδο ανθεκτικότητάς τους στις καιρικές και άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες, επομένως, οι ανάγκες και οι συνθήκες που ισχύουν στο συγκεκριμένο αστικό περιβάλλον θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν επιλεγεί η τεχνολογία.

---

<sup>8</sup> <https://www.clarity.io/blog/best-practices-when-deploying-low-cost-air-sensors-in-the-urban-environment>

Τέλος, ως εξεταστεί ο διαθέσιμος προϋπολογισμός για την υλοποίηση ενός δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους. Η χρηματοδότηση ενός δικτύου αισθητήρων ποιότητας αέρα μπορεί να απαιτεί ορισμένες προσαρμογές στους προγραμματισμένους προϋπολογισμούς —ή την αναζήτηση εξωτερικών πηγών χρηματοδότησης—αλλά το χαμηλό αρχικό και λειτουργικό κόστος που σχετίζεται με αισθητήρες χαμηλού κόστους τους καθιστά κατάλληλους για την έναρξη ενός νέου προγράμματος παρακολούθησης αέρα ή τη συμπλήρωση ενός υπάρχοντος.

## **7.6. Επιλογή τεχνολογίας**

Η επιλογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας αισθητήρων ποιότητας αέρα που θα χρησιμοποιηθεί είναι ένα κρίσιμο βήμα για τον σχεδιασμό ενός δικτύου που θα ταιριάζει σωστά σε ένα δεδομένο αστικό περιβάλλον. Οι διαχειριστές ποιότητας του αέρα θα πρέπει να καθορίσουν ποιους ρύπους επιθυμούν να παρακολουθούν και την ακρίβεια των μετρήσεων που απαιτούνται για την επίτευξη των στόχων παρακολούθησης για να καταλήξουν σε μια σύντομη λίστα δυνητικού εξοπλισμού προς χρήση. Τα πρωτόκολλα δοκιμών απόδοσης (USEPA), οι μετρήσεις και οι τιμές στόχοι για αισθητήρες αέρα περιγράφουν λεπτομερώς τον τρόπο διεξαγωγής εργαστηριακών και επιτόπιων δοκιμών του εξοπλισμού αισθητήρων αέρα για τον προσδιορισμό της ποιότητας των δεδομένων που παράγουν οι αισθητήρες χαμηλού κόστους.

Στη συνέχεια, θα πρέπει να εξετάσουν εάν επιθυμούν απλώς να αγοράσουν τον εξοπλισμό ή να συνεργαστούν με έναν πάροχο παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα που μπορεί να χρησιμεύσει ως συνεργάτης σε όλο τον κύκλο ζωής του δικτύου. Για παράδειγμα, οι διαχειριστές ποιότητας του αέρα ή οι κοινοτικές ομάδες που επιθυμούν να δημιουργήσουν ένα δίκτυο παρακολούθησης θα πρέπει επίσης να δώσουν προσοχή στο ποιος είναι υπεύθυνος για τη βαθμονόμηση δεδομένων. Αυτό είναι ένα ζωτικό μέρος της απόκτησης χρήσιμων πληροφοριών από δεδομένα αισθητήρα αέρα, αλλά απαιτεί αρκετή τεχνική εξειδίκευση.

## **7.7. Τοποθέτηση και εγκατάσταση μετρητών ποιότητας αέρα**

Η απόφαση για το πού θα τοποθετηθούν αισθητήρες ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους σε ένα αστικό περιβάλλον είναι ένας συνδυασμός τεχνικών και πρακτικών εκτιμήσεων. Αυτό επιστρέφει στη διασφάλιση ότι το δίκτυο έχει σχεδιαστεί έχοντας κατά νου τους στόχους του προγράμματος παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Για παράδειγμα, για να δούμε πώς η ατμοσφαιρική ρύπανση επηρεάζει τα παιδιά, μια πόλη μπορεί να επιλέξει να τοποθετήσει το δίκτυό της στα σχολεία.

Είτε ο στόχος είναι να μετρηθεί μια συγκεκριμένη πηγή ρύπων, μια συγκεκριμένη τοποθεσία ή η γενική ατμοσφαιρική ρύπανση στην κοινότητα θα επηρεάσει τις αποφάσεις χωροθέτησης, όπως και το επίπεδο χωρικής και χρονικής ανάλυσης που απαιτείται. Ο εκ των προτέρων καθορισμός στόχων απόδοσης μπορεί να βοηθήσει στην αποσαφήνιση αυτών των στόχων.

Όπου και αν βρίσκονται οι αισθητήρες χαμηλού κόστους, είναι σημαντικό να εξασφαλιστούν έγκαιρα οι άδειες τοποθέτησης και η πρόσβαση στην τοποθεσία για εγκατάσταση και συντήρηση. Ένα πλεονέκτημα των αισθητήρων χαμηλού κόστους είναι ότι μπορούν να τοποθετηθούν σχεδόν οπουδήποτε, διευκολύνοντας την εύρεση της κατάλληλης τοποθεσίας και την απόκτηση άδειας. Είναι σημαντικό να προσδιοριστεί πού και πώς θα τοποθετηθούν οι συσκευές. Ανάλογα με το τι είναι διαθέσιμο στο δεδομένο περιβάλλον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στύλος, φράχτης, κιγκλίδωμα ή βάση τοίχου. Προτείνεται:

- Τουλάχιστον 6 πόδια, 2 μέτρα μακριά από προφανείς πηγές ρύπανσης όπως εξαερισμός, γεννήτρια ή ψησταριά
- Η είσοδος/έξοδος αέρα είναι ανεμπόδιση και έχει επαρκή ροή αέρα\
- Σε ύψος 10 έως 16 πόδια, 3μέτρα έως 6 μέτρα από το επίπεδο του δρόμου εάν μετριέται η έκθεση του γενικού πληθυσμού ή υψηλότερο εάν μετριέται η ποιότητα του αέρα της περιοχής
- Σε ασφαλή τοποθεσία
- Με πρόσβαση στο φως του ήλιου, εάν λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια

#### Σχεδιασμός συν-εγκατάστασης

Η συν-εγκατάσταση ενός αισθητήρα χαμηλού κόστους με έναν σταθμό αναφοράς στην ίδια περιοχή, όπου θα πραγματοποιηθεί η παρακολούθηση είναι ένα ουσιαστικό βήμα για να καταστεί δυνατή η αποτελεσματική βαθμονόμηση δεδομένων από το δίκτυο. Το αποτέλεσμα θα είναι ένα σύνολο χρονικά αντιστοιχισμένων δεδομένων τόσο από την οθόνη αναφοράς όσο και από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους, τα οποία θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός μοντέλου βαθμονόμησης, που θα είναι βελτιστοποιημένο για τις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

### **7.8. Συντήρηση αισθητήρα χαμηλού κόστους**

Επειδή οι διαφορετικοί τύποι αισθητήρων διαφέρουν ως προς το επίπεδο συντήρησης που απαιτείται, αυτός είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ενός δικτύου παρακολούθησης. Οι αισθητήρες που απαιτούν σύνδεση στο Διαδίκτυο ή ηλεκτρική σύνδεση ενδέχεται να απαιτούν περισσότερη συντήρηση και αυτοί που πρέπει να βαθμονομηθούν ή να προσαρμοστούν τείνουν να επιφέρουν μεγαλύτερο λειτουργικό κόστος. Οι αυτόματες συσκευές και το μοντέλο της βαθμονόμησης εξ αποστάσεως, συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους που σχετίζεται με ένα δίκτυο αισθητήρων χαμηλού κόστους. Ενώ η συλλογή δεδομένων είναι το πρώτο βήμα για να γίνουν γνωστές οι πληροφορίες σχετικά με τις τάσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε ένα δεδομένο περιβάλλον, τα δεδομένα από μόνα τους δεν θα δημιουργήσουν ώθηση για αλλαγή. Η αποτελεσματική επικοινωνία των ευρημάτων και του τι σημαίνουν για την κοινότητα είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Οι διαχειριστές του δικτύου θα πρέπει να καθορίσουν τον βαθμό στον οποίο οι κάτοικοι της κοινότητας θα

έχουν πρόσβαση στα δεδομένα—όπως αν τα δεδομένα θα είναι δημόσια διαθέσιμα σε έναν ιστότοπο ή μια εφαρμογή—και πώς θα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών των δεδομένων. Θα είχε νόημα η δημοσίευση μιας ετήσιας ή τριμηνιαίας έκθεσης που θα περιλαμβάνει δεδομένα από το δίκτυο; Ποιο θα ήταν το κοινό για την έκθεση;

Όταν κοινοποιούνται αποτελεσματικά, τα δεδομένα για την ποιότητα του αέρα μπορούν να επηρεάσουν τις ενέργειες μιας πόλης για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Για παράδειγμα, ένας διευθυντής μπορεί να αποφασίσει να προσθέσει περισσότερους αισθητήρες αέρα σε περιοχές με υψηλές ενδείξεις για να διερευνήσει περαιτέρω τις τοπικές τάσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης ή να πιέσει για πολιτικές που θα έλεγχαν καλύτερα τις πηγές ρύπανσης σε αυτήν την περιοχή. Τα δεδομένα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα μπορούν, επίσης, να λειτουργήσουν ως αποδεικτικά στοιχεία για αλλαγές τοπικών, πολιτειακών ή εθνικών πολιτικών ή άλλες πρωτοβουλίες μείωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

## **8.Εφαρμογές-καλές πρακτικές της χρήσης αισθητήρων χαμηλού κόστους για την μέτρηση των ατμοσφαιρικών ρύπων σε πόλεις<sup>9</sup>**

Η ατμοσφαιρική ρύπανση οδηγεί σε πρόωρο θάνατο και αυξημένες ασθένειες, ενώ επηρεάζει τις οικονομίες και μειώνει τις ευκαιρίες για ευημερία των πολιτών. Οι πιο ευάλωτες και περιθωριοποιημένες κοινότητες των πόλεων κινδυνεύουν περισσότερο. Η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα αποτελεί βασικό εργαλείο μιας πόλης για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Ορισμένες πόλεις έχουν πρόσβαση σε δεδομένα από οθόνες αναφοράς – οι οποίες είναι εξαιρετικά ακριβείς αλλά δαπανηρές. Άλλες πόλεις έχουν ελάχιστες έως καθόλου πληροφορίες για την ποιότητα του αέρα.

Πρόσφατες, πιο προσιτές τεχνολογίες παρακολούθησης έχουν δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα. Διάφορες πόλεις χρησιμοποιούν αισθητήρες ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την ανάπτυξη δράσεων για τον καθαρισμό του αέρα. Η νέα έκθεση παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα της *C40 Cities* επισημαίνει 11 πόλεις που έχουν αναπτύξει αυτούς τους αισθητήρες: Αντίς Αμπέμπα, Νταρ ες Σαλάμ, Ντένβερ, Λίμα, Λισαβόνα, Λονδίνο, Λος Άντζελες, Βομβάη, Παρίσι, Πόρτλαντ και Κεζόν Σίτι. Οι πόλεις αυτές υπογραμμίζουν τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούν αισθητήρες ποιότητας αέρα χαμηλότερου κόστους για την επίτευξη μιας σειράς στόχων, όπως:

- Κατανόηση του κινδύνου ρύπανσης και των επιπέδων ποιότητας του αέρα στο πλαίσιο των τοπικών και διεθνών προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών που βασίζονται στην υγεία

---

<sup>9</sup> <https://www.cleanairfund.org/news-item/4-ways-cities-are-using-low-cost-sensors-to-improve-air-quality/>

- Χαρτογράφηση χώρων ρύπανσης και τοποθεσίες με υψηλή έκθεση σε ρύπους
- Εντοπισμός πηγών ρύπανσης
- Διεύρυνση της ευαισθητοποίησης και δημιουργία στοιχείων για την υποστήριξη δράσεων για καθαρό αέρα
- Αύξηση της ποιότητας, της προσβασιμότητας και της σαφήνειας των δεδομένων για την πόλη καθώς και των πληροφοριών που δίνονται μέσω πλατφόρμας
- Αποκάλυψη των επιπτώσεων σε περιθωριοποιημένους/ευάλωτους πληθυσμούς
- Ενημέρωση για τη λήψη αποφάσεων και τη χάραξη πολιτικής
- Παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας της πολιτικής και επιβολή κανονισμών

Ακολουθούν τέσσερις τρόποι, με τους οποίους οι πόλεις χρησιμοποιούν αισθητήρες ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους για να επιτύχουν μια σειρά στόχων:

*A) Κατανόηση του κινδύνου ρύπανσης και των επιπέδων ποιότητας του αέρα για την τήρηση των προτύπων υγείας*

Μέχρι στιγμής, 48 δήμαρχοι έχουν δεσμευτεί, στη Διακήρυξη C40 Clean Air Cities, να καθορίσουν βασικά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης και να θέσουν φιλόδοξους στόχους που πληρούν ή υπερβαίνουν τις εθνικές δεσμεύσεις – σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές για την ποιότητα του αέρα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ). Οι δήμαρχοι έχουν, επίσης, δεσμευτεί να εφαρμόσουν νέες πολιτικές και προγράμματα για την αντιμετώπιση των βασικών αιτιών των εκπομπών ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Οι κατευθυντήριες γραμμές για την ποιότητα του αέρα του ΠΟΥ βασίζονται σε παγκόσμια επιστημονικά στοιχεία. Κατά τη διαμόρφωση των στόχων πολιτικής, οι κυβερνήσεις θα πρέπει να εξετάζουν προσεκτικά τις τοπικές συνθήκες πριν υιοθετήσουν αυτές τις κατευθυντήριες γραμμές.

Οι αισθητήρες ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους μπορούν να παρέχουν τα τοπικά βασικά στοιχεία ότι οι πόλεις πρέπει να υποστηρίξουν τη μείωση των εκπομπών. Τα βασικά αποτελέσματα παρέχουν πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παρεμβάσεις με στόχο τον καθαρό αέρα. Αυτές οι παρεμβάσεις μπορούν, στη συνέχεια, να ενσωματωθούν στο σχέδιο διαχείρισης της ποιότητας του αέρα της πόλης για να βοηθήσουν την πόλη να ανταποκριθεί στις κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ για την ποιότητα του αέρα.

*B) Διεύρυνση της ευαισθητοποίησης του κοινού*

Πολλές πόλεις χρησιμοποιούν δεδομένα που συλλέγονται από δίκτυα παρακολούθησης αισθητήρων για να ευαισθητοποιήσουν το κοινό σχετικά με τους κινδύνους της έκθεσης στη ρύπανση. Δημιουργώντας ένα δίκτυο αισθητήρων ποιότητας αέρα, οι πόλεις μπορούν να κάνουν τα δεδομένα ποιότητας του αέρα εύκολα προσβάσιμα

στους κατοίκους. Για παράδειγμα, στην πιλοτική μελέτη Breathe London χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα σε περιοχές χαμηλής εκπομπής ρύπων και σε σχολικούς δρόμους του Λονδίνου. Οι αισθητήρες εντόπισαν μεταβαλλόμενα επίπεδα ρύπων σε τοποθεσίες πολύ μακριά από το κέντρο συγκέντρωσής δεδομένων παρέχοντας νέες πληροφορίες για την τοπική ποιότητα του αέρα και τη δυνατότητα για βραχυπρόθεσμη αλλαγή στην ποιότητα του αέρα. Αυτά τα δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης δημοσιεύονται σε ιστότοπο για να παρέχουν στους Λονδρέζους μια εικόνα σε πραγματικό χρόνο των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης στους δρόμους. Οργανισμοί, επιχειρήσεις και κάτοικοι μπορούν να τοποθετήσουν έναν αισθητήρα στην τοποθεσία που προτιμούν (με χρέωση). Ομάδες στην κοινότητα μπορούν να υποβάλουν αίτηση για να τοποθετήσουν έναν δωρεάν αισθητήρα σε τοποθεσία της επιλογής τους.

#### *Γ) Αποκάλυψη των επιπτώσεων στα κοινωνικώς αποκλεισμένα άτομα*

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να βοηθήσουν στην αξιολόγηση της έκθεσης και του κινδύνου από την ατμοσφαιρική ρύπανση μεταξύ των ευάλωτων και περιθωριοποιημένων κοινοτήτων. Οι αισθητήρες παρέχουν σημαντικές πληροφορίες που μπορούν να βοηθήσουν τις κυβερνήσεις να προωθήσουν λύσεις για τον μετριασμό των ανισοτήτων και την προστασία αυτών των κοινοτήτων. Το δίκτυο αισθητήρων του Λος Άντζελες σχεδιάστηκε για να ενδυναμώνει τους κατοίκους μειονεκτικών κοινοτήτων με δεδομένα μέσω συνεργατικών προσεγγίσεων. Η πόλη του Λος Άντζελες και οι 30+ κοινοτικές ομάδες σε συνεργασία με τις κοινότητες Watts Rising δημιούργησαν ένα τοπικό δίκτυο παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα για να παρέχουν πληροφορίες και γνώσεις σχετικά με την ποιότητα του αέρα μιας γειτονιάς. Η πόλη εγκατέστησε αισθητήρες κοντά σε πάρκα και σχολεία και πραγματοποίησε πρωτοβουλίες προσέγγισης της κοινότητας. Ευάλωτοι πληθυσμοί, συμπεριλαμβανομένων παιδιών και ηλικιωμένων, ασχολήθηκαν και εκπαιδεύτηκαν για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα. Τον Οκτώβριο του 2020, ξεκίνησε η πύλη δεδομένων παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα Watts Rising για τους κατοίκους. Πραγματοποιούνται περιοδικές συναντήσεις της κοινότητας για να επιτραπεί στα μέλη της κοινότητας να κάνουν ερωτήσεις σχετικά με τα δεδομένα.

#### *Δ) Αύξηση της πρόσβασης σε πλατφόρμες δεδομένων και πληροφοριών σε επίπεδο πόλης.*

Η ταχέως αναπτυσσόμενη αγορά αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους παρουσιάζει πολύτιμες ευκαιρίες για νέες εργασίες για την ποιότητα του αέρα στην πόλη. Αλλά το προσωπικό της πόλης πρέπει να περιηγηθεί σε πολλές επιλογές σχετικά με την επιλογή αισθητήρων, την εγκατάσταση δικτύου και τη διαχείριση δεδομένων. Όταν υπάρχει σαφής επικοινωνία και συνεργασία μεταξύ πόλεων και παρόχων τεχνολογίας, οι νέες τεχνολογίες αισθητήρων και οι πλατφόρμες διαχείρισης δεδομένων μπορούν πιο αποτελεσματικά να βοηθήσουν στην επίλυση προβλημάτων ποιότητας του αέρα στις πόλεις. Τον Οκτώβριο του 2020, η Επιτροπή Περιβαλλοντικής Προστασίας & Πράσινης Ανάπτυξης της Αντίς Αμπέμπα (AAEPGDC) και η C40 συμφώνησαν ότι η πόλη θα μπορούσε να προωθήσει ουσιαστικά τις προσπάθειές της για

την ποιότητα του αέρα αποκτώντας και λειτουργώντας τη δική της παρακολούθηση αναφοράς. Η C40 και η Industrial Economics εκπαίδευσαν το προσωπικό της πόλης σχετικά με τη συντήρηση και τη λειτουργία της παρακολούθησης ρύπων, καθώς και ένα σύστημα διαχείρισης δεδομένων για δημόσια κοινή χρήση πληροφοριών για την ποιότητα του αέρα. Υπάρχει τώρα μια νεοσυσταθείσα ομάδα της AAEPGDC που είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και την επεξεργασία δεδομένων ποιότητας του αέρα προς χρήση του κοινού. Η τοποθεσία της παρακολούθησης ρύπων προετοιμάζεται για μελλοντικές μελέτες συν-τοποθέτησης (collocation) αισθητήρων.

Οι ακόλουθες συστάσεις αφορούν σε βελτιώσεις της τεχνολογίας των αισθητήρων για τη μέτρηση των ατμοσφαιρικών ρύπων στην πόλη<sup>10</sup>

*1. Σαφή πρωτόκολλα για συν-τοποθέτηση και συχνότητα βαθμονόμησης:* Οι πόλεις θέλουν να μπορούν να συγκρίνουν εύκολα την απόδοση του αισθητήρα με την παρακολούθηση των τιμών αναφοράς. Για να βελτιωθεί η απόδοση των αισθητήρων ζητούνται δημοσιευμένες πληροφορίες σχετικά με την ακρίβεια των αισθητήρων, που συμπεριλαμβάνουν τακτικά ενημερωμένα αποτελέσματα μελετών βαθμονόμησης, διαδικασίες για συν-τοποθέτηση αισθητήρων και προσαρμογή των μετρήσεων από τους αισθητήρες.

*2. Πρόσφατα και αξιόπιστα δεδομένα για την ακρίβεια του αισθητήρα σε τοπικές συνθήκες:* Η υψηλή υγρασία, η σκόνη και τα υψηλά επίπεδα PM<sub>2,5</sub> μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση του αισθητήρα. Οι πόλεις ζητούν σαφείς, διαφανείς οδηγίες χρησιμότητας υπό ποικίλες συνθήκες λειτουργίας (δηλαδή πιο λεπτομερή φύλλα προδιαγραφών). Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα αισθητήρων στην αγορά και πολλοί αισθητήρες διαθέτουν περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα των δεδομένων υπό διάφορες συνθήκες. Χωρίς συγκεκριμένες πληροφορίες για μια σειρά διαφορετικών συνθηκών, υπάρχει η ανησυχία ότι ορισμένοι αισθητήρες μπορεί να μην είναι αρκετά αξιόπιστοι ή ακριβείς για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα.

*3. Λύσεις για τις διακοπές του ενεργειακού εφοδιασμού και τις ειδικές συνθήκες της πόλης:* Η διακοπτόμενη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και η υψηλή υγρασία είναι μεταξύ των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι πόλεις στην ανάπτυξη αισθητήρων. Οι πόλεις θέλουν, ιδανικά, συστήματα αισθητήρων με ενσωματωμένους ηλιακούς συλλέκτες ή μπαταρίες που διαρκούν τουλάχιστον δύο εβδομάδες για ευκολία στη χρήση. Ένας ενσωματωμένος τρόπος αφύγρανσης θα μπορούσε να βοηθήσει στην άμβλυνση των προκλήσεων υγρασίας.

---

<sup>10</sup> [file:///C:/Users/%CE%9C%CE%95%CE%9B%CE%99%CE%9D%CE%91/Downloads/C40%20Cities%20\(2022\)%20Sensing%20Change.pdf](file:///C:/Users/%CE%9C%CE%95%CE%9B%CE%99%CE%9D%CE%91/Downloads/C40%20Cities%20(2022)%20Sensing%20Change.pdf)

4. *Εκτίμηση της διάρκειας ζωής των αισθητήρων*: Η σαφής πληροφόρηση σχετικά με τη διάρκεια ζωής των αισθητήρων θα βοηθήσει τις πόλεις να διαχειριστούν τις προσδοκίες τους και να προετοιμάσουν σωστά τον προϋπολογισμό τους για το σχετικό έργο. Οι πόλεις ζητούν από τους κατασκευαστές αισθητήρων να δίνουν σαφή πληροφόρηση σχετικά με τη διάρκεια ζωής των αισθητήρων, ποιοι τύποι συνθηκών μπορούν να οδηγήσουν σε φθορά των αισθητήρων, το κόστος των ανταλλακτικών κ.α.

5. *Επικαιροποίηση πληροφοριών*: Η τεχνολογία αισθητήρων χαμηλού κόστους εξελίσσεται ταχέως. Θα ήταν ευπρόσδεκτη η εκ των προτέρων επικοινωνία με τους κατασκευαστές για το εάν υπάρχει νεότερη έκδοση αισθητήρων ή τροποποίηση ενός υπάρχοντος προϊόντος αισθητήρα ή του συστήματος διαχείρισης δεδομένων.

6. *Παροχή εκπαίδευσης για την αύξηση των ικανοτήτων του προσωπικού της κοινότητας*: Οι κατασκευαστές αισθητήρων και άλλοι ενδιαφερόμενοι φορείς μπορούν να παρέχουν εξατομικευμένη και ολοκληρωμένη εκπαίδευση στο προσωπικό της πόλης. Η ανάπτυξη ικανοτήτων δίνει στις πόλεις την ευκαιρία και την ελευθερία να συνεργάζονται με κατασκευαστές, αντί να βασίζονται στους κατασκευαστές για τη διαχείριση των δικτύων αισθητήρων των πόλεων.

7. *Πρόβλεψη και μείωση των ηλεκτρονικών αποβλήτων από αισθητήρες*: Οι πόλεις πρέπει να προβλέπουν το ζήτημα της μείωσης των αποβλήτων από αισθητήρες. Οι κατασκευαστές μπορούν να σχεδιάζουν τρόπους μετριασμού των αποβλήτων, κατασκευάζοντας αρθρωτά εξαρτήματα ή επαναχρησιμοποιώντας εξωτερικά εξαρτήματα περιβλήματος, όπου είναι δυνατόν. Η ενσωμάτωση εξαρτημάτων για την επίτευξη της μέγιστης λειτουργίας με έναν ελάχιστο αριθμό αισθητήρων θα μειώσει, επίσης, τα απόβλητα.

8. *Υποστήριξη με τον αντίστοιχο προϋπολογισμό*: Οι πόλεις ζητούν εκπαίδευση και υποστήριξη από τους κατασκευαστές αισθητήρων και άλλους σχετικούς φορείς για τον καλύτερο σχεδιασμό δειγματοληπτικών έργων με επαρκείς και συνεχείς πόρους. Οι επιλογές αισθητήρων για τις πόλεις επηρεάζονται από τις ικανότητες του πληθυσμού για διαχείριση των αισθητήρων. Πόλεις χαμηλής ικανότητας στη διαχείριση των αισθητήρων τους επιλέγουν κατά προτίμηση εταιρείες αισθητήρων που προσφέρουν πρόσβαση σε μια ομάδα τεχνικής υποστήριξης.

9. *Καθοδήγηση σχετικά με την κοινή χρήση δεδομένων και τις πλατφόρμες διαχείρισης δεδομένων*: Οι πόλεις ζητούν λεπτομερή καθοδήγηση σχετικά με το λογισμικό διαχείρισης δεδομένων και επικοινωνιών. Συχνά χρειάζονται μια πλατφόρμα που να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φορείς της πόλης, ερευνητικά ιδρύματα και άλλες υπηρεσίες. Σε ορισμένες πόλεις, οι κρατικές ή ομοσπονδιακές κυβερνητικές υπηρεσίες παρέχουν πλατφόρμες κοινής χρήσης για δεδομένα οθονών αναφοράς στην ποιότητα του αέρα, αλλά όχι για δεδομένα αισθητήρων χαμηλότερου κόστους, καθώς μπορεί να είναι δύσκολο να μοιραστούν πληροφορίες για τους αισθητήρες με το ευρύ



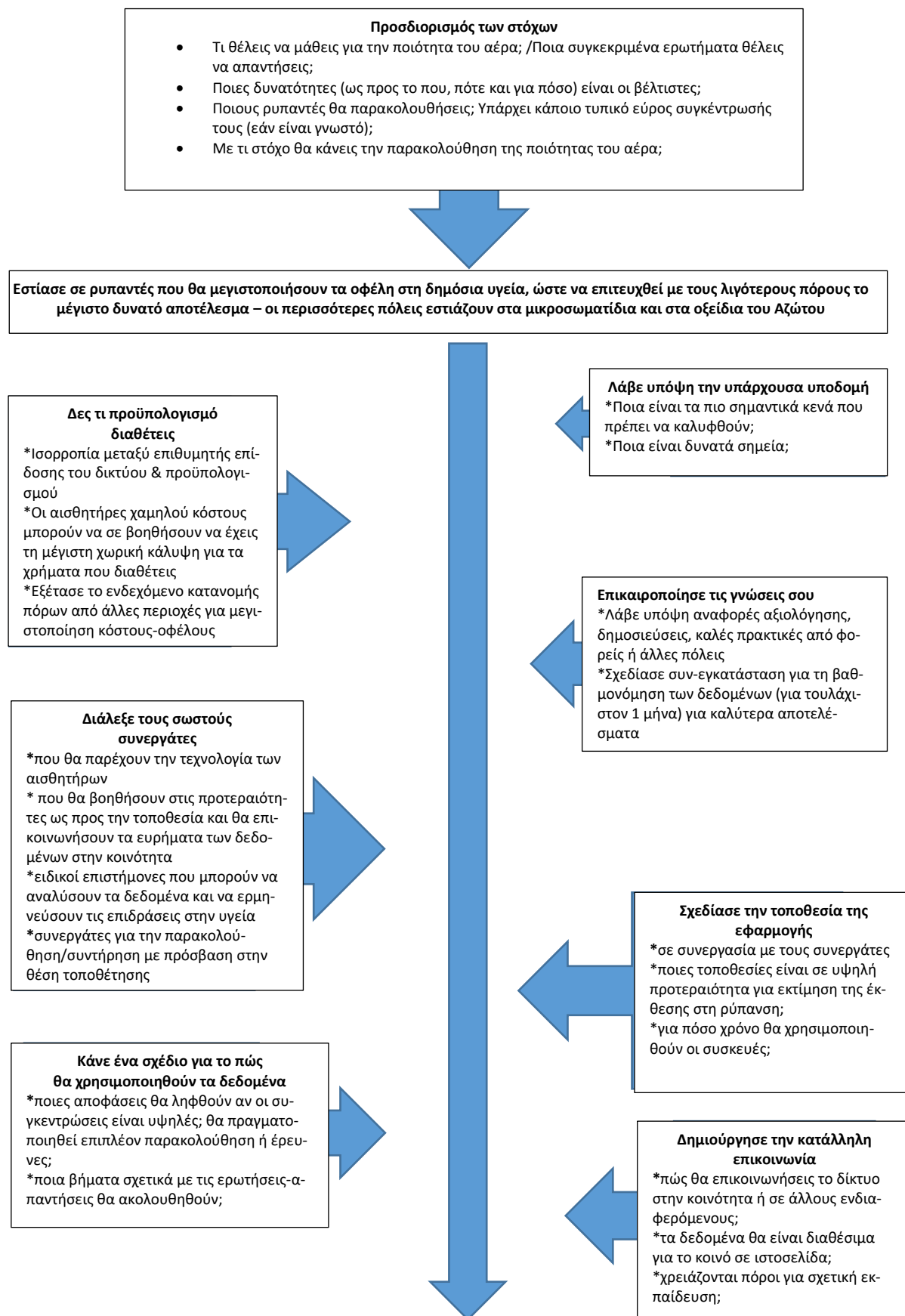
κοινό. Συνεπώς, οι πόλεις πρέπει να αναπτύξουν πλατφόρμες δεδομένων από αισθητήρες με άλλους εταίρους, όπως τοπικά πανεπιστήμια, για να ενσωματώσουν ανόμοια δεδομένα και να ομαλοποιήσουν τις πληροφορίες και τα μηνύματα. Απαιτείται αυξημένη καθοδήγηση σχετικά με το ποια είναι η καταλληλότερη προσέγγιση για την χρήση της πλατφόρμας δεδομένων: πρέπει οι πόλεις να κατέχουν την πλατφόρμα, αλλά να μοιράζονται τα ακατέργαστα δεδομένα και να επιτρέψουν σε άλλους να δημιουργήσουν εφαρμογές, παρέχοντας την κατάλληλη πληροφόρηση, ή μπορούν οι κατασκευαστές αισθητήρων να υποστηρίξουν τις πόλεις ως προς την εναρμόνιση των πρωτοκόλλων δεδομένων, ώστε τα δεδομένα από πολλές εταιρείες/προϊόντα να μπορούν να μεταδοθούν και να οπτικοποιηθούν σε μια ενιαία πλατφόρμα δεδομένων; Αντιμετωπίζοντας τις ανησυχίες και τις επιθυμίες της πόλης – γύρω από ζητήματα που αφορούν στο σχεδιασμό αισθητήρων και τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, το κόστος, τη μακροζωία, τον μετριασμό των απορριμμάτων, τη διαχείριση δεδομένων και την εκπαίδευση – οι κατασκευαστές αισθητήρων έχουν την ευκαιρία να βοηθήσουν τις πόλεις να κατανοήσουν καλύτερα την ποιότητα του αέρα τους.

#### Ευκαιρίες και περιορισμοί

Οι ειδικοί στο πεδίο γνωρίζουν πολύ καλά τόσο τις ευκαιρίες όσο και τους περιορισμούς που σχετίζονται με τους αισθητήρες. Μέσα από συζητήσεις με τις πόλεις σχετικά με το τι θα ενθάρρυνε την περαιτέρω υιοθέτηση νέων τεχνολογιών παρακολούθησης, προέκυψαν βασικά θέματα και συστάσεις για την ευρύτερη κοινότητα παρακολούθησης:

- Σαφή πρωτόκολλα σχετικά με τις μεθόδους συν-τοποθέτησης (με όργανο αναφοράς) και τη συχνότητα των μελετών συν-τοποθέτησης
- Πρόσφατα και αξιόπιστα δεδομένα για την ακρίβεια των αισθητήρων, υπό τοπικές συνθήκες, και αξιόπιστες πληροφορίες για τη διάρκεια ζωής των αισθητήρων
- Λύσεις για τις διακοπές του ενεργειακού εφοδιασμού και τις ειδικές συνθήκες της πόλης
- Επικαιροποιημένη πληροφόρηση για τους αισθητήρες
- Εκπαίδευση για τη δημιουργία ικανοτήτων του προσωπικού της πόλης στην ανάπτυξη αισθητήρων και στην ανάλυση δεδομένων.
- Λύσεις που προβλέπουν και μειώνουν τα ηλεκτρονικά απόβλητα από αισθητήρες
- Υποστήριξη με προϋπολογισμό σε επίπεδο έργου
- Καθοδήγηση σχετικά με τις πλατφόρμες κοινής χρήσης και διαχείρισης δεδομένων.

Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν κατά τον σχεδιασμό δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους.



Διάγραμμα 1. Επισκόπηση των βημάτων που πρέπει να ακολουθηθούν κατά το σχεδιασμό αισθητήρων χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

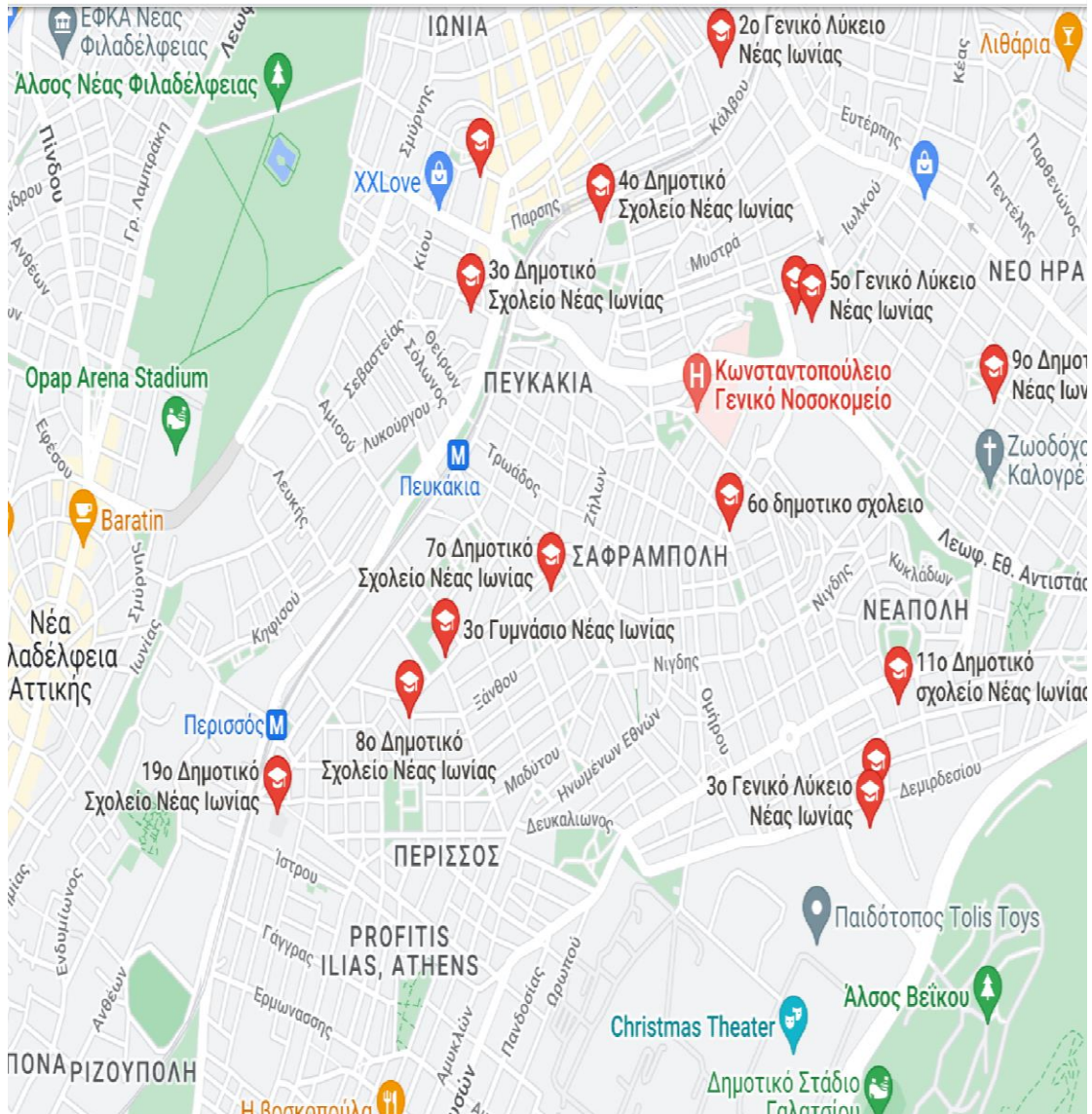
## 9. Δημιουργία δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε Δήμο

Η καλή ποιότητα του αέρα στις αστικές περιοχές είναι απαραίτητη για την ανθρώπινη ευημερία. Από το 2008, όταν η Ευρωπαϊκή Ένωση κυκλοφόρησε την Οδηγία 2008/50/EC για την ποιότητα του αέρα, η οποία θεσπίζει πρότυπα και στόχους με βάση την υγεία για τους ρύπους που υπάρχουν στον αέρα, η αξιολόγηση της ποιότητας του εξωτερικού αέρα αποτελεί αντικείμενο των δήμων. Η αξιολόγηση και η πρόβλεψη της ποιότητας του αέρα είναι ένα κρίσιμο μέρος των στρατηγικών που εφαρμόζονται, προκειμένου να ληφθούν μέτρα για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και την αποφυγή της κακής ποιότητας του αέρα για τους πολίτες [85]. Αυτό υπογραμμίζει τη σημασία της συνεχούς παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, η οποία, συνήθως, επιτυγχάνεται μέσω της ανάπτυξης δικτύων αισθητήρων για την ποιότητα του αέρα. Η ποιότητα του αέρα που επηρεάζει το άτομο εξαρτάται από τοπικά φαινόμενα όπως ο καιρός, ο άνεμος, η διάταξη της πόλης και οι πηγές ρύπανσης, γεγονός που κάνει το θέμα ενδιαφέρον για ένα δίκτυο αισθητήρων που αναπτύσσεται σε μια πόλη με στόχο τη συλλογή δεδομένων και τη χρήση τους για μοντέλα πρόβλεψης [86,87]. Πρέπει να επιτευχθεί ισορροπία κατά την ανάπτυξη τέτοιων δικτύων, όσον αφορά την κάλυψη μιας περιοχής έναντι του κόστους εγκατάστασης. Όπως έχει προαναφερθεί, ένας ογκώδης, βιομηχανικός τύπος αισθητήρα είναι πιο ακριβής αλλά πιο δαπανηρός, τόσο στην ανάπτυξη όσο και στη συντήρηση, ενώ οι αισθητήρες χαμηλότερου κόστους μειώνουν κατά πολύ τα έξοδα εγκατάστασης αλλά δίνουν χαμηλότερης ποιότητας δεδομένα. Ωστόσο, η ερευνητική κοινότητα εργάζεται προς την κατεύθυνση μεθόδων για τη βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων που εισέρχονται από αισθητήρες χαμηλού κόστους, ώστε να πληρούν τις ελάχιστες απαιτήσεις για δημόσια αξιολόγηση των επιπέδων ποιότητας του αέρα [88].

Η παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορεί να είναι αρκετά δαπανηρή με κόστος που περιλαμβάνει, για παράδειγμα, αισθητήρες ποιότητας αέρα, διαδικασίες βαθμονόμησης, επικοινωνία μετρήσεων. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, ένα δίκτυο αισθητήρων χαμηλού κόστους αναπτύχθηκε στο Δήμο Τρόντχαϊμ, στη Νορβηγία για να συμπληρώσει το (πολύ μικρότερο) δίκτυο βιομηχανικών αισθητήρων που ήταν προηγουμένως διαθέσιμοι. Οι αισθητήρες χαμηλού κόστους μειώνουν δραστικά το κόστος εγκατάστασης τέτοιων δικτύων, αλλά εις βάρος των, συχνά, λανθασμένων μετρήσεων και, συχνά, απαιτείται πρόσθετη επεξεργασία για να διασφαλιστούν αξιόπιστα δεδομένα. Διαπιστώθηκε ότι οι αισθητήρες έτειναν να υποτιμούν τα επίπεδα ρύπανσης, σε σύγκριση με τους βιομηχανικούς αισθητήρες αναφοράς, σε μέρη όπου βρίσκονται και οι δύο τύποι αισθητήρων. Ωστόσο, φάνηκε ότι οι διαδικασίες που βασίζονται στη μηχανική μάθηση (machine learning) έχουν τη δυνατότητα να βαθμονομούν τα εισερχόμενα δεδομένα από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους, με υψηλή αύξηση της συσχέτισης μετά τη βαθμονόμηση και ανιχνεύουν τις επιδράσεις εξωτερικών χαρακτηριστικών όπως η υγρασία και άλλες μετεωρολογικές επιρροές στην έξοδο των αισθητήρων [89].

Η βαθμονόμηση των δεδομένων ρύπανσης δεν αποτελεί αυτοσκοπό, αλλά ένα μέσο για την παραγωγή ουσιαστικών πληροφοριών σε υπηρεσίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον δήμο και τους πολίτες για υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων. Επιπλέον, έγιναν αρχικά βήματα προς την ανάπτυξη μιας εφαρμογής για κινητά που μπορεί να χρησιμοποιεί δεδομένα από το δίκτυο αισθητήρων, σε συνδυασμό με ορισμένες τεχνικές οπτικοποίησης για την ευαισθητοποίηση των πολιτών και την προώθηση πιο υγιεινών τρόπων ζωής. Η μεταφορά μοντέλων βαθμονόμησης μεταξύ αισθητήρων είναι εφικτή, αλλά η αξιολόγηση μιας τέτοιας διαδικασίας χρειάζεται έναν αισθητήρα αναφοράς ως στόχο. Μια δυνατότητα είναι η συν-τοποθέτηση όλων των αισθητήρων με αισθητήρες αναφοράς, η συλλογή δεδομένων, η βαθμονόμησή τους και στη συνέχεια η τοποθέτησή τους στις τελικές θέσεις, αλλά μια πιο αυτόματη λύση θα διευκόλυνε και θα επιτάχυνε τη διαδικασία ανάπτυξης. Επιπλέον, μέθοδοι τοποθέτησης αισθητήρων [31] μπορούν να διερευνηθούν προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο αριθμός των αισθητήρων που απαιτούνται για την κάλυψη της τοποθεσίας, όπου αναπτύσσονται τέτοιοι αισθητήρες. Η δημιουργία δικτύων αισθητήρων χαμηλού κόστους μπορεί να συμβάλει σε μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο της ποιότητας του αέρα, αλλά και να επιτρέψει τη χρήση μεθόδων μηχανικής εκμάθησης για τη διασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων και την πρόβλεψη της ποιότητας του αέρα για τις επόμενες 24 έως 48 ώρες [89].

Η ποιότητα του αέρα στο Δήμο Ν. Ιωνίας Αττικής δεν έχει μελετηθεί. Στόχο αποτελεί η γνώση της ποιότητας του αέρα σε συγκεκριμένα σημεία του δήμου που συχνάζουν παιδιά, ευπαθή άτομα (ασθενείς), αθλητές, πώς η ποιότητα του αέρα μπορεί να επηρεάσει την υγεία των κατοίκων και ποιες προστατευτικές ενέργειες για την υγεία χρειάζεται να ληφθούν.



**Τοποθεσία:** Βάσει του προαναφερόμενου στόχου σχετικά με τη δημιουργία δικτύου αισθητήρων για την παρακολούθηση των ατμοσφαιρικών ρύπων, χρειάζεται να συλλεχθεί δείγμα ποιότητας αέρα αντιπροσωπευτικό της περιοχής και της έκθεσης του πληθυσμού. Είναι σκόπιμο να αποφευχθούν κτίρια, δέντρα ή φράχτες που μπορεί να εμποδίσουν την ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα και να προκαλέσουν μεροληπτικές μη αξιόπιστες μετρήσεις ρύπων ή για ορισμένους ρύπους οι κατασκευές αυτές μπορεί να φιλτράρουν τον ρύπο που μας ενδιαφέρει, οπότε οι αισθητήρες κοντά σε αυτές τις κατασκευές ενδέχεται να αναφέρουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις ρύπων από ό,τι στη γύρω περιοχή. Σίγουρα οι αισθητήρες δεν πρέπει να τοποθετηθούν κοντά σε συγκεκριμένη πηγή ρύπων π.χ. ψησταριά ή καμινάδα, που μπορεί να απελευθερώνουν σύντομες αλλά υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων και μπορεί να επηρεάσουν μια συγκεκριμένη τοποθεσία ή μια μικρή περιοχή κατά διαστήματα, αλλά μπορούν να περιπλέξουν τη μέτρηση και την ερμηνεία των τοπικών συνθηκών ποιότητας του αέρα και να μην είναι αντιπροσωπευτική ολόκληρης της περιοχής. Αντίθετα, οι αισθητήρες θα πρέπει να τοποθετηθούν σε θέσεις που είναι εκτεθειμένες στον αέρα για να κατα-

γράψουν την επίδραση πολλών πιθανών πηγών ρύπων στην ατμόσφαιρα. Επίσης, υπάρχουν μέρη όπου οι συγκεντρώσεις ρύπων είναι χαμηλότερες λόγω χημικών αντιδράσεων (π.χ. το όζον που αντιδρά με τη βλάστηση) ή εναπόθεσης (π.χ. φιλτράρισμα σωματιδίων από δέντρα). Επιπλέον, οι αισθητήρες δεν θα τοποθετηθούν κοντά σε γραμμές υψηλής τάσης, που μπορεί να δημιουργήσουν ηλεκτρονικές παρεμβολές. Οι αισθητήρες πρέπει να έχουν ελεύθερη ροή αέρα για τη μέτρηση των ρύπων. Ο οδηγός χρήσης ή το εγχειρίδιο του αισθητήρα μπορεί να περιγράφει πού εισέρχεται και εξέρχεται αέρας από τον αισθητήρα και αυτά τα ανοίγματα δεν πρέπει να φράσσονται, έστω και μερικώς.

Το νέο δίκτυο μπορεί να αποτελείται από συνολικά 20 νέους αισθητήρες, τοποθετημένους σε στρατηγικά σημεία, όπως γυμνάσια και δημοτικά του δήμου, στο νοσοκομείο Αγ. Όλγα, στο ανοικτό γυμναστήριο, στο άλσος Βεϊκου καθώς και στην πολυσύχναστη, μεγάλης κυκλοφορίας Λ. Ηρακλείου. Ο σχεδιασμός και η επιλογή των συγκεκριμένων χώρων για την τοποθέτηση των αισθητήρων μπορεί να γίνει σε συνεργασία με το δήμο, προκειμένου να υπάρχουν λιγότεροι υλικοτεχνικοί περιορισμοί στην τοποθέτησή τους. Προκειμένου να είναι σε θέση να ληφθούν συγκρίσιμα και αξιόπιστα δεδομένα από τους αισθητήρες, θα πρέπει να διερευνηθεί που είναι τοποθετημένοι οι πλησιέστεροι σταθμοί αναφοράς, εάν υπάρχουν. Τα μελλοντικά σχέδια μπορεί να περιλαμβάνουν κινητούς αισθητήρες, που θα τοποθετηθούν στην κορυφή των αστικών λεωφορείων.

Οι επιλεγμένοι αισθητήρες θα ανιχνεύουν χημικούς ρύπους οξειδία του αζώτου (NO, NO<sub>2</sub>) μονοξείδιο, διοξείδιο του αζώτου, όζον (O<sub>3</sub>) και σωματίδια (PM<sub>2,5</sub> και PM<sub>10</sub>). Εκτός από τους κύριους ρύπους, οι αισθητήρες μπορεί να ανιχνεύουν, επίσης, τα επίπεδα υγρασίας και θερμοκρασίας και να αξιολογηθεί πως επηρεάζονται οι μετρήσεις από τις κλιματολογικές συνθήκες, επιτρέποντας τη δημιουργία μοντέλων σε διασταυρούμενες ευαισθησίες μεταξύ μετρήσεων και καιρικών συνθηκών. Σε αυτό το σημείο εγείρονται προβληματισμοί που αφορούν στις προκλήσεις που συναντώνται όταν τίθενται σε λειτουργία αισθητήρες σε δύσκολες συνθήκες. Μεταξύ άλλων, τα περιβλήματα που χρησιμοποιούνται για την πρόληψη της υγρασίας αποτελούν πρόβλημα για την επίτευξη της απαιτούμενης ροής αέρα. Αυτό μπορεί να λυθεί με την κατανάλωση περισσότερης ενέργειας (μεγαλύτερος χρόνος ενεργοποίησης του ανεμιστήρα), γεγονός που δημιουργεί νέο πρόβλημα εάν η συσκευή δεν έχει σταθερή σύνδεση ρεύματος. Ένα άλλο παράδειγμα προκλήσεων σε δύσκολες συνθήκες είναι η ανάγκη να τοποθετηθούν οι αισθητήρες μακριά από ανθρώπους και, ενδεχομένως, σε μη βέλτιστες θέσεις για τις μετρήσεις της ποιότητας του αέρα, καθώς μπορεί να υπάρχουν τεράστιες διακυμάνσεις ανάμεσα στο επίπεδο του δρόμου και σε έναν υψηλό τοίχο κτιρίου<sup>11</sup>.

**Είδος αισθητήρα:** Ως προς την επιλογή των αισθητήρων χρειάζεται να ληφθεί υπόψη ότι οι αισθητήρες οξειδίου του μετάλλου έχουν μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας

---

<sup>11</sup> [https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/guide-siting-and-installing-air-sensors#where\\_in\\_comm](https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/guide-siting-and-installing-air-sensors#where_in_comm)

από τους ηλεκτροχημικούς. Ωστόσο, μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Ταυτόχρονα, οι αισθητήρες οξειδίου του μετάλλου έχουν υψηλότερο χρόνο απόκρισης σε σύγκριση με τους ηλεκτροχημικούς. Οι αισθητήρες σωματιδίων δεν είναι κατάλληλοι για σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 0,3 μm. Περαιτέρω, συνιστάται ένα ισχυρό περίβλημα στους αισθητήρες προκειμένου να αποφευχθεί η καταστροφή των εσωτερικών εξαρτημάτων λόγω ακραίων περιβαλλοντικών συνθηκών όπως ισχυρός άνεμος και καταιγίδες. Μόλις ολοκληρωθεί η περίοδος ζωής (συνήθως ένα με ενάμιση χρόνο), ο αισθητήρας πρέπει να αντικατασταθεί με νέο. Τίθεται το ερώτημα εάν ο αισθητήρας μπορεί να λειτουργήσει μέχρι την ολοκλήρωση της λειτουργικής διάρκειας ζωής ή πρέπει να τον αντικαταστήσουμε πριν από αυτό, πώς μπορούμε να ελέγξουμε τη φθίνουσα φύση της απόδοσης του αισθητήρα; Ο κύριος λόγος για την απόκλιση (drift) στην απόκριση του αισθητήρα είναι η υποβάθμιση του αισθητηρίου υλικού ή του μηχανισμού αίσθησης. Η αναγνώριση ασυνήθιστων αποκλίσεων στην έξοδο του αισθητήρα σηματοδοτεί την αντικατάσταση του αισθητήρα πριν από το τέλος της διάρκειας ζωής του. Οι τιμές του αισθητήρα σε σύγκριση με τις τιμές των οργάνων αναφοράς και τις συνεχείς ακραίες τιμές βοηθά επίσης στην αναγνώριση της απαίτησης αντικατάστασης αισθητήρα.

**Ισχύς:** Η υποδομή που απαιτείται για την τοποθέτηση, την τροφοδοσία, τη λειτουργία και την ασφάλεια του δικτύου των αισθητήρων θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από τη μάρκα/μοντέλο των αισθητήρων και τα χαρακτηριστικά τους. Σε συνεργασία με τον δήμο μπορούν να προσδιοριστούν οι περιοχές που θα τοποθετηθούν οι αισθητήρες του δικτύου, οι οποίες πρέπει να διαθέτουν την απαραίτητη υποδομή (συνδεδεσιμότητα (π.χ. WiFi για επικοινωνία δεδομένων) για τη λειτουργία των αισθητήρων, τον εξοπλισμό τοποθέτησης και την ασφάλεια, καθώς μπορεί να είναι δαπανηρή και χρονοβόρα η παροχή ρεύματος σε τοποθεσία που δεν διαθέτει την υπάρχουσα υποδομή. Μπορεί να χρειαστούν καλώδια προέκτασης για τη βέλτιστη τοποθέτηση του αισθητήρα. Οι αισθητήρες σκόπιο θα ήταν να έχουν ηλιακούς συλλέκτες, σε περίπτωση διακοπών ρεύματος, καθώς οι περιοχές που αντιμετωπίζουν διακοπή ρεύματος μπορεί να επωφεληθούν από την ηλιακή ενέργεια. Χρειάζεται βεβαίως, να ληφθεί υπόψη ότι τα ηλιακά πάνελ για να είναι επαρκή πρέπει η τοποθεσία να έχει αρκετό ήλιο και ότι θα χρειάζονται περιοδική συντήρηση για την απομάκρυνση της σκόνης.

**Επικοινωνία:** Οι αισθητήρες μπορούν να επικοινωνούν τα δεδομένα σε μια διεπαφή (interface) που βασίζεται σε νέφος (cloud) χρησιμοποιώντας μια ποικιλία τεχνολογιών (π.χ. κινητή τηλεφωνίας, WiFi). Χρήσιμο είναι να μελετηθεί το εγχειρίδιο χρήσης και λειτουργίας των επιλεγμένων αισθητήρων από τον κατασκευαστή για να κατανοηθούν συγκεκριμένες απαιτήσεις, όπως περιορισμοί του δικτύου (π.χ. 2G, 5G), περιορισμοί του παρόχου, εμβέλεια/κάλυψη περιοχής (εθνική και διεθνής) και ανάγκες ισχύος του σήματος.

**Ασφάλεια:** Επειδή οι αισθητήρες και ο περιφερειακός εξοπλισμός τους (όπως τα ηλιακά πάνελ) ενδέχεται να υπόκεινται σε παραβιάσεις και κλοπές, κρίνεται σκόπιμη

η τοποθέτηση των αισθητήρων σε ασφαλή μέρη, όπως τοποθέτηση ενός αισθητήρα ψηλά, μακριά από χέρια, σε δυσδιάκριτη τοποθεσία ή πίσω από μια κλειδωμένη πύλη ή φράχτη με ελεύθερη ροή αέρα. Επίσης, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η φυσική ασφάλεια του χρήστη όταν επισκέπτεται τους αισθητήρες, όταν π.χ. χρειάζεται να ανεβεί μια σκάλα ή σκαλοπάτι για εγκατάσταση ή συντήρηση. Συχνά, οι χρήστες αισθητήρων ενδιαφέρονται να κατανοήσουν την έκθεση ενός ατόμου στην ατμοσφαιρική ρύπανση και αυτό μετριέται καλύτερα τοποθετώντας τον αισθητήρα κοντά στο σημείο όπου ένα άτομο μπορεί να αναπνεύσει. Οι χρήστες μπορεί να επιθυμούν να εγκαταστήσουν έναν αισθητήρα σε ελαφρώς ανυψωμένη θέση (πάνω από 2 μέτρα) για να παρέχουν πρόσθετη ασφάλεια ή σε ελαφρώς χαμηλότερες θέσεις για εύκολη πρόσβαση. Οι αισθητήρες θα πρέπει να τοποθετηθούν τουλάχιστον 1 μέτρο πάνω από το έδαφος για να προστατεύουν τον αισθητήρα από πιτσίλισμα νερού και άλλες επιπτώσεις στο έδαφος.

**Πρόσβαση:** Αν και εύκολοι στη χρήση, οι αισθητήρες αέρα γενικά δεν είναι κάτι που απλώς τοποθετούνται και μετά ξεχνιούνται. Θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα πρόσβασης στην εγκατάσταση για τον περιοδικό έλεγχο των αισθητήρων.

Μετά την τοποθέτηση των αισθητήρων, το επόμενο ερώτημα που τίθεται είναι: "Πώς πρέπει να ρυθμιστούν οι αισθητήρες για να ληφθούν ακριβείς και αντιπροσωπευτικές μετρήσεις;" Μια καλή ιδέα να ληφθούν και να ελεγχθούν ορισμένα δεδομένα για να προσδιοριστεί, κατόπιν, εάν το επιλεγμένο μέρος είναι αντιπροσωπευτικό των τοπικών συνθηκών ή μπορεί να επηρεαστεί από πηγή ρύπων ή άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες. Μερικές προτάσεις περιλαμβάνουν:

A) Δημιουργία και έλεγχο μιας χρονικής σειράς δεδομένων (συγκέντρωση έναντι χρόνου) χρησιμοποιώντας την υψηλότερη δυνατή ανάλυση χρόνου (χωρίς μέσο όρο δεδομένων). Σε αυτήν την περίπτωση, εάν το γράφημα δείχνει αιχμές, αυτό μπορεί να είναι ενδεικτικό μιας ρυπογόνου πηγής όπως το κάπνισμα ή το μαγείρεμα. Εάν οι αιχμές είναι συνεχείς στο γράφημα, αυτό θα μπορούσε να είναι ενδεικτικό μιας κυκλικής λειτουργίας όπως το σβήσιμο και το άνοιγμα ενός ανεμιστήρα κλιματισμού. Αιχμές μπορεί επίσης να προκληθούν από διακυμάνσεις στην παροχή ρεύματος στον αισθητήρα.

B) Υπολογισμός του μέσου όρου των δεδομένων σε ωριαίους ή ημερήσιους μέσους όρους και σύγκρισή τους με έναν κοντινό σταθμό αναφοράς ή με τους άλλους αισθητήρες. Συμφωνούν οι μακροπρόθεσμες τάσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης; Ορισμένοι αισθητήρες μπορεί να μην αναφέρουν ακριβείς συγκεντρώσεις, επομένως, όταν γίνει αυτή η σύγκριση, είναι πιο σημαντικό να προσδιοριστεί εάν η συγκέντρωση του αισθητήρα αυξάνεται και μειώνεται ταυτόχρονα με τους σταθμούς αναφοράς. Εάν όχι, ο αισθητήρας μπορεί να έχει επηρεαστεί από ρυπογόνο πηγή ή κοντινά κτίρια.

Γ) Μπορεί να χρειαστεί να μετακινηθεί ο αισθητήρας σας εάν η ανασκόπηση των δεδομένων υποδηλώσει ότι κάποιο από αυτά τα σενάρια επηρεάζει τις μετρήσεις. Ίσως χρειαστεί να επαναληφθεί αυτή η διαδικασία περιοδικά, επειδή τα μέρη ενδέχεται



να αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου (π.χ. αλλάζουν τα μοτίβα κυκλοφορίας των οχημάτων ή μεγαλώνουν δέντρα).

Η βαθμονόμηση και η αξιολόγηση είναι τα πιο σημαντικά βήματα για τη δημιουργία δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους. Η απόδοση του αισθητήρα εξαρτάται από τη θέση του και την εφαρμογή. Ως εκ τούτου, οι χρήστες πρέπει να εντοπίσουν τις πιθανές πηγές σφάλματος στην εφαρμογή του και να τις αντιμετωπίσουν με βαθμονόμηση και συχνή αναβαθμονόμηση. Η αξιολόγηση της απόδοσης των αισθητήρων και των μοντέλων βαθμονόμησης είναι αναπόφευκτη για την επίτευξη υψηλότερης ακρίβειας. Η τοποθέτηση ενός καθολικού μοντέλου βαθμονόμησης δεν είναι δυνατή λόγω της ετερογένειας στις περιβαλλοντικές συνθήκες και τους αισθητήρες. Η βαθμονόμηση σε τακτά χρονικά διαστήματα αντιμετωπίζει την απόκλιση του αισθητήρα με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, η τακτική βαθμονόμηση σε απομακρυσμένες περιοχές είναι δύσκολη. Οι μέθοδοι της απομακρυσμένης βαθμονόμησης μπορεί να είναι ένας άλλος πιθανός τομέας για τη μείωση της κουραστικής διαδικασίας της εκ νέου βαθμονόμησης.

Πριν επιλέξουμε οποιονδήποτε αισθητήρα, πρέπει να λάβουμε υπόψη διάφορα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την απόδοση του αισθητήρα: χρόνος απόκρισης, όριο ανίχνευσης, επαναληψιμότητα (ικανότητα να δίνεται η ίδια έξοδος υπό ίδιες συνθήκες), αναπαραγωγικότητα (ικανότητα παραγωγής ίδιας εξόδου σε μη ταυτόσημες συνθήκες), περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ευαισθησία σε άλλους ρύπους (διασταυρούμενη ευαισθησία) είναι σημαντικά χαρακτηριστικά οποιουδήποτε αισθητήρα. Επιπλέον, η θερμοκρασία και η υγρασία μπορούν επίσης να επηρεάσουν την απόδοση του αισθητήρα.

Για την ακρίβεια και αξιοπιστία των δεδομένων των αισθητήρων, σκόπιμο κρίνεται να ακολουθηθούν πιο αυστηρά κριτήρια τοποθέτησης των αισθητήρων. Αυτά αφορούν στην συν-τοποθέτηση και λειτουργία των αισθητήρων με σταθμό αναφοράς την ίδια στιγμή και στην ίδια τοποθεσία υπό πραγματικές συνθήκες για την καθορισμένη περίοδο αξιολόγησης, προκειμένου να αξιολογηθεί η ακρίβεια των αισθητήρων συγκρίνοντας τα δύο σύνολα δεδομένων (αισθητήρας έναντι σταθμού αναφοράς). Επειδή τα σύνολα δεδομένων θα συγκριθούν, είναι σημαντικό οι συσκευές να μετρούν τις ίδιες ακριβώς συνθήκες. Επομένως, θα πρέπει να τοποθετούνται κοντά (σε απόσταση 20 μέτρων το ένα από το άλλο σε εξωτερικούς χώρους). Επιπλέον, η αξιολόγηση μπορεί να γίνει με αξιολόγηση του αισθητήρα έναντι του ίδιου τύπου αισθητήρα για ακρίβεια (αισθητήρας έναντι αισθητήρα) και σύγκριση της απόδοσης διαφορετικών μαθηματικών μοντέλων για την οριστικοποίηση ενός καλύτερου (μοντέλο έναντι μοντέλου).

**Φωτογραφίες:** Οι φωτογραφίες μπορεί να βοηθήσουν με την ερμηνεία των δεδομένων αργότερα και εστιάζουν σε κοντινά χαρακτηριστικά που μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις των αισθητήρων, όπως κοντινά κτίρια, δρόμοι ή τοπία. Αυτές οι φωτογραφίες θα πρέπει επίσης να αποτυπώνουν την τυπική χρήση της περιοχής όπου τοποθετούνται οι αισθητήρες.

**Πρόσθετη τεκμηρίωση:** Εκτός από τις τυπικές σημειώσεις που καλό είναι να κρατηθούν για την τεκμηρίωση της τοποθέτησης του αισθητήρα (π.χ. τοποθεσία, ύψος, ημερομηνία εγκατάστασης), ίσως φανεί χρήσιμο να καταγραφούν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο χρήσης της περιοχής. Προσωρινές δραστηριότητες (π.χ. οδικές εργασίες, κατασκευαστικές δραστηριότητες) μπορεί να επηρεάσουν την περιοχή και να επηρεάσουν την ερμηνεία των δεδομένων, επομένως, σχετικές σημειώσεις κρίνονται χρήσιμες όσο χρησιμοποιούνται οι αισθητήρες.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8749853/>

## 10. Συμπεράσματα<sup>13</sup>

Για μια επιτυχημένη χρήση δικτύου αισθητήρων χαμηλού κόστους, πρέπει να κατανοηθεί ότι ένα μεμονωμένο σύστημα αισθητήρων (μία συσκευή παρακολούθησης) δεν είναι ισοδύναμο με τη παρακολούθηση αναφοράς (προς το παρόν). Τα δεδομένα, ωστόσο, από ένα σύστημα αισθητήρων χαμηλού κόστους, όταν χρησιμοποιούνται π.χ. σε διαδικασίες στατιστικής ή μηχανικής μάθησης, επιτρέπουν την παροχή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο για την ενημέρωση του κοινού, καθώς και να συμβάλλει στις εκτιμήσεις των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία ή στην επικύρωση των εκτιμήσεων σχετικά με τις εκπομπές ρύπων.

Από τεχνικής πλευράς, για να λειτουργήσει ένα δίκτυο αισθητήρων, πρέπει να συνδεθούν δύο είδη υποδομών:

1. Υποδομή του δικτύου των αισθητήρων:
  - Ετερογενή συστήματα αισθητήρων (π.χ. σταθερά/κινητά)
  - Υποδομή Τεχνολογίας της Πληροφορίας & Επικοινωνίας για συλλογή δεδομένων
2. Υποδομή της επεξεργασίας δεδομένων
  - Βαθμονόμηση και διόρθωση στο πεδίο
  - Συνδεσιμότητα με άλλα συστήματα/εφαρμογές
  - Πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο

Οι παραπάνω υποδομές συνεπάγονται σημαντικά λειτουργικά κόστη και, ως εκ τούτου, απαιτούν χρηματοδότηση, οργανωμένη συνεργασία με κατάλληλους εταίρους για δράσεις σχεδιασμού και διάχυσης καθώς και τεχνική επάρκεια.

---

<sup>13</sup> <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-acm-report-no-2018-21-low-cost-sensor-systems-for-air-quality-assessment-possibilities-and-challenges>

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. WHO (2022). Air pollution [https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1)
2. Περιφέρεια Κ. Μακεδονίας, 2022. Ποιότητα ατμόσφαιρας, <https://www.pkm.gov.gr/default.aspx?lang=el-GR&page=507> Διαθέσιμο στις 20/11/2022.
3. Υπουργείο Ενέργειας - ΥΠΕΝ (2022α). Αιθαλομίχλη. <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/aithalomichli/> Διαθέσιμο στις 20/11/2022.
4. Κέντρο Προστασίας Καταναλωτών-ΚΕ.Π.ΚΑ (2020). Ατμοσφαιρική ρύπανση <https://www.kepka.org/mainmenu-27/mainmenu-48/mainmenu-213/198-->
5. Αργυρίου Α. Ατμοσφαιρική ρύπανση <https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/MED1178/%CE%91%CE%A1%CE%93%CE%A5%CE%A1%CE%99%CE%9F%CE%A5%CE%91%CF%84%CE%BC%CE%BF%CF%83%CF%86%CE%B1%CE%B9%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20%CE%A1%CF%8D%CF%80%CE%B1%CE%BD%CF%83%CE%B7.pdf> Διαθέσιμο στις 20/11/2022.
6. Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (2020). Ατμοσφαιρική ρύπανση. <https://www.eea.europa.eu/el/themes/air/intro> Διαθέσιμο στις 20/11/2022.
7. Jiang, X.Q., Mei, X.D. & Feng, D. (2016). Air pollution and chronic airway diseases: What should people know and do? *Journal of Thoracic Disease*, 8 (1), p.31.
8. [40] Thompson, J.E. (2018). Airborne particulate matter: Human exposure and health effects. *Journal of Occupational and Environ-Mental Medicine*, 60 (5), pp. 392-423.
9. Μουστρής, Κ. Τεχνολογία περιβαλλοντικών μετρήσεων: Δείκτες ατμοσφαιρικής ρύπανσης <http://eclass.teipir.gr/openececlass/modules/document/file.php/MECH111/7%CE%B7%20%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1%20-%20%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1%20%CE%A0%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%B2%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%BF%CE%BD%CF%84%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD%20%CE%9C%CE%B5%CF%84%CF%81%CE%AE%CF%83%CE%B5%CF%89%CE%BD.pdf> Διαθέσιμο στις 23/11/2022.
10. Basis for Indian Air Quality Index (IND-AQI) <http://home.iitk.ac.in> Διαθέσιμο στις 20/11/2022.
11. Μουστρής Κ. (2009). Πρόγνωση ποιότητας της ατμόσφαιρας στην ευρύτερη περιοχή Αθηνών με τη χρήση νευρωνικών δικτύων. Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ.
12. Mayer H., Kalberlah F., & Ahrens D. (2002a). *TLQ-Am impact related air quality index obtained on a daily basis*. Proceedings of the fourth Symposium on the Urban Environment, Norfolk, VA (USA), pp 80-81.
13. Mayer H., Kalberlah F., Ahrens D., & Reuter U. (2002b). *Analysis of indices for the assessment of the air* (in German). *Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft* 62, pp 177-183.
14. Ott W.R., Thom, W.R. (1976). A critical review of air pollution index systems in the United States and Canada. *J Air Pollut Control Assoc*, 26, 460-70.
15. Ott, W.R. and Hunt, W. F. Jr. (1976). A quantitative evaluation of the pollutant standards index. *J. Air Poll. Control Assoc.* 26, 1050-1054.
16. Thom, G.C. and Ott, W.R. (1976). A proposed uniform air pollution index. *Atmos. Environ.* 10, 261-264.
17. United States Environmental Protection Agency (1999). *Guideline for reporting of daily air quality-Air Quality Index*. EPA-454/R-99-010, EPA, North Carolina.

18. Cheng Wan-Li, Chen Yu-Song, Zhang Jun Feng, Lyons T.J., Pai Joy-Lynn and Chang Shiang-Hung (2007). Comparison of the Revised Air Quality Index with the PSI and AQI indices. *Science of The Total Environment* 382, 2-3, pp191-198.
19. Boubel R.W., Fox D. L., Turner D.B. and Stern A.C. (1994). *Fundamentals of Air Pollution*. Academic Press, San Diego.
20. Bristol City Council Air Quality. *Local Air Quality and Emissions*. Available at: <http://www.bristol.airqualitydata.com>
21. Παν/μιο Δ. Μακεδονίας (2022). Δείκτες για την αποτίμηση της ποιότητας του αέρα [https://www.airlab.edu.gr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=74&Itemid=104&lang=el](https://www.airlab.edu.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=74&Itemid=104&lang=el) Διαθέσιμο στις 20/11/2022.
22. Hong-Kong Medical Association. Department of Health and Environmental Protection. *Guidance for Physicians on Roadside Air Pollution Index*. Available at: <http://www.info.gov.hk>
23. Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (2017). *Ευρωπαϊκός δείκτης ποιότητας αέρα* <https://www.eea.europa.eu/el/highlights/eyropaikos-deiktis-poiotitas-aera-amesa> Διαθέσιμο στις 20/11/2022.
24. ΟΔΗΓΙΑ 2008/50/ΕΚ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 21ης Μαΐου 2008 για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=sv> Διαθέσιμο στις 20/11/2022.
25. Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας (2013). *Ισχύον θεσμικό πλαίσιο όσον αφορά την ατμοσφαιρική ρύπανση* [https://www.civilprotection.gr/sites/default/gscp\\_uploads/media/PlaisioAtmRipansi\\_el\\_GR.pdf](https://www.civilprotection.gr/sites/default/gscp_uploads/media/PlaisioAtmRipansi_el_GR.pdf).
26. Υπουργείο Ενέργειας - ΥΠΕΝ (2022β). *Νομοθεσία*. <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tisatmosfairas/nomothesia/>
27. Pranvera Kortoçia Naser Hossein MotlaghacMartha, Arbayani ZaidanbcdPak, Lun-FungbcSamuVarjonena Andrew Rebeiro-Hargravea Jarkko V.Niemie Petteri Nurmiataraq Husseinbf Tuukka Petäjäbd Markku Kulmalabd SasuTarkoma (2022), Air pollution exposure monitoring using portable low-cost air quality sensors, *Smart Health*, 23, 100241.
28. Nyhan, M., McNabola, A., Misstear, B. (2014). Comparison of particulate matter dose and acute heart rate variability response in cyclists, pedestrians, bus and train passengers. *The Science of the Total Environment*, 468, pp. 821-831.
29. W. Yin, J. Hou, T. Xu, J. Cheng, X. Wang, S. Jiao, L. Wang, C. Huang, Y. Zhang, J. Yuan (2017). Association of individual-level concentrations and human respiratory tract deposited doses of fine particulate matter with alternation in blood pressure. *Environmental Pollution*, 230, pp. 621-631.
30. Υπουργείο Ενέργειας – ΥΠΕΝ (2022γ). *Χαρτογράφηση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης* <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/chartografisi-atmosfairikis-rypansis/> Διαθέσιμο στις 20/11/2022.
31. N.H. Motlagh, M.A. Zaidan, P.L. Fung, E. Lagerspetz, K. Aula, S. Varjonen, M. Siekinen, A. Rebeiro-Hargrave, T. Petäjä, Y. Matsumi, *et al.* (2021). *Transit pollution exposure monitoring using low-cost wearable sensors*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 98, p. 102981.
32. Y. Gao, W. Dong, K. Guo, X. Liu, Y. Chen, X. Liu, J. Bu, C. Chen (2016). *Mosaic: A low-cost mobile sensing system for urban air quality monitoring* IEEE INFOCOM 2016-the 35th annual IEEE international conference on computer communications, IEEE, pp. 1-9.

33. Saha, M. Shinde, S. Thadeshwar (2017). *IoT based air quality monitoring system using wireless sensors deployed in public bus services*. Proceedings of the second international conference on internet of things, Data and Cloud Computing, pp. 1-6.
34. Environment Go: 3 τρόποι μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης <https://environmentgo.com/el/%CF%84%CF%81%CF%8C%CF%80%CE%BF%CE%B9%CE%BC%CE%AD%CF%84%CF%81%CE%B7%CF%83%CE%B7%CF%82%CF%84%CE%B7%CF%82%CE%B1%CF%84%CE%BC%CE%BF%CF%83%CF%86%CE%B1%CE%B9%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82%CF%81%CF%8D%CF%80%CE%B1%CE%BD%CF%83%CE%B7%CF%82/>
- 35.[18] How to measure air quality <https://www.breeze-technologies.de/blog/how-to-measure-air-quality/> Διαθέσιμο στις 29/11/2022.
36. Υπουργείο Ενέργειας (2022β). *Δεδομένα Μετρήσεων Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης* <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/dedomena-metriseon-atmosfairikis-rypansis/> Διαθέσιμο στις 29/11/2022.
37. Parnell, D. (2019). *An introduction to Modern Sensor Technology*, <https://www.cedengi-neering.com/userfiles/An%20Introduction%20to%20Modern%20Sensor%20%20Technology%20R1.pdf> Διαθέσιμο στις 29/11/2022.
38. CEN (2018) WG42. CEN/TC 264/WG42. [https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=CEN-WEB:7:0:::FSP\\_ORG\\_ID:2012773&cs=1FD71819F2\\_5D74834BB38751B78ACE16D](https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=CEN-WEB:7:0:::FSP_ORG_ID:2012773&cs=1FD71819F2_5D74834BB38751B78ACE16D) Διαθέσιμο στις 18/10/2022.
39. WMO (2018). *Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications*, World Meteorological Organization, Genève. [http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw\\_home\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_home_en.html) Διαθέσιμο στις 29/11/2022.
40. Baron, R., Saffell, J. (2017). Amperometric Gas Sensors as a Low-Cost Emerging Technology Platform for Air Quality Monitoring Applications: A Review, *ACS Sensors* 2, 1553–1566.
41. Rai, A. C., et al. (2017). End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring, *Sci. Total Environ.* 607, 691–705.
42. Narayana MV, Jalihal D, Nagendra SMS. (2022). Establishing A Sustainable Low-Cost Air Quality Monitoring Setup: A Survey of the State-of-the-Art. *Sensors*, 22(1), 394.
43. Wei, P., et al. (2018). Impact Analysis of Temperature and Humidity Conditions on Electrochemical Sensor Response in Ambient Air Quality Monitoring, *Sensors*, 18, 59.
44. Wang, Y., et al. (2015). Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement, *Aerosol Science and Technology*, 49:11, 1063-1077.
45. EC, 2008, Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Off. J. Eur. Union, L 152, 1-44. <http://eur-EionetReport-ETC/ACM2018/2149lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:en:PDF> Διαθέσιμο στις 29/11/2022.
- 46.E.G. Snyder, T.H. Watkins, P.A. Solomon, E.D. Thoma, R.W. Williams, G.S.W. Hagler, D. Shelow, D.A. Hindin, V.J. Kilaru, P.W. Preuss (2013). The changing paradigm of air pollution monitoring, *Environ. Sci. Technol.*, 47 (20), pp. 11369-11377.
47. F.E. Ahangar, F.R. Freedman, A. Venkatram (2019). Using low-cost air quality sensor networks to improve the spatial and temporal resolution of concentration maps, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16 (7), p. 1252
- 48.K.E. Kelly, W.W. Xing, T. Sayahi, L. Mitchell, T. Becnel, P.-E. Gaillardon, M. Meyer, R.T. Whitaker (2021). Community-based measurements reveal unseen differences during air pollution episodes, *Environ. Sci. Technol.*, 55 (1) (2021), pp. 120-128.

49. A.L. Holder, A.K. Mebust, L.A. Maghran, M.R. McGown, K.E. Stewart, D.M. Valano, R.A. Elleman, K.R. Baker (2020). Field evaluation of low-cost particulate matter sensors for measuring wildfire smoke. *Sensors*, 20 (17), p. 4796.
50. A.P. Kaduwela, A.P. Kaduwela, E. Jrade, M. Brusseau, S. Morris, J. Morris, V. Risk (2019). Development of a low-cost air sensor package and indoor air quality monitoring in a California middle school: detection of a distant wildfire, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 69 (9), pp. 1015-1022.
51. O.A.M. Popoola, D. Caruthers, C. Lad, V.B. Bright, M.I. Mead, M.E.J. Stettler, J.R. Saffell, R.L. Jones (2018). Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings, *Atmos. Environ.*, 194, pp. 58-70.
52. Z. Wang, W.W. Delp, B.C. Singer (2020). Performance of low-cost indoor air quality monitors for PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> from residential sources *Build. Environ.*, 171.
53. K.K. Barkjohn, B. Gantt, A.L. Clements (2020). Development and application of a United States wide correction for PM<sub>2.5</sub> data collected with the PurpleAir sensor, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 2020, pp. 1-34
54. [31] A. Polidori, V. Papapostolou, H. Zhang (2016). *Laboratory evaluation of low-cost air quality sensors*, South Coast Air Quality Management District AQ-SPEC (2016) [aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/protocols/sensors-lab-testing-protocol6087afefc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf](http://aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/protocols/sensors-lab-testing-protocol6087afefc2b66f27bf6fff00004a91a9.pdf) Διαθέσιμο στις 29/11/2022.
55. A. Polidori, V. Papapostolou, B. Feenstra, H. Zhang (2017). *Field evaluation of low-cost air quality sensors*, South Coast Air Quality Management District AQ-SPEC <http://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/protocols/sensors-field-testing-protocol.pdf> Διαθέσιμο στις 29/11/2022.
56. B. Feenstra, V. Papapostolou, S. Hashemnasab, H. Zhang, B.D. Boghossian, D. Cocker, A. Polidori (2019). Performance evaluation of twelve low-cost PM<sub>2.5</sub> sensors at an ambient air monitoring site, *Atmos. Environ.*, 216, Article 116946.
57. *South coast AQMD air quality sensor performance evaluation center: summary tables and reports* (2021) <http://www.aqmd.gov/aq-spec/evaluations/summary-pm> Διαθέσιμο στις 29/11/2022.
58. Kaivonen, S.; Ngai, E. (2019). Real-time air pollution monitoring with sensors on city bus. *Digit. Commun. Netw.*, 6, 23–30.
59. Renard, J.-B.; Marchand, C. (2021). High Resolution Mapping of PM<sub>2.5</sub> Concentrations in Paris (France) Using Mobile Pollutrack Sensors Network in 2020. *Atmosphere*, 12, 529.
60. Liu, L.; Duan, J.; Xiao, Z.; Wang, C.; Li, X. (2017). *A fault-tolerant Mobile Sensing Information Gathering Center (MSIGC) using public transport buses to instrument a smart city*. In Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT), Chengdu, China, pp. 233–238
61. Shakhov, V.; Sokolova, O. (2021). *On Modeling Air Pollution Detection with Internet of Vehicles*. In Proceedings of the 15th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM), Seoul, Korea, 4–6 January, pp. 1–3.
62. Zhou, F.; Gu, J.; Chen, W.; Ni, X. (2019). Measurement of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> in Ship Plumes Using Rotary Unmanned Aerial System. *Atmosphere*, 10, 657.
63. Hasenfratz, D. (2015). *Enabling Large-Scale Urban Air Quality Monitoring with Mobile Sensor Nodes*. Ph.D. Thesis, ETH-Zurich, Zurich, Switzerland.

64. Masiol, M.; Squizzato, S.; Cheng, M.D.; Rich, D.Q.; Hopke, P.K. (2019). Differential Probability Functions for Investigating Long-term Changes in Local and Regional Air Pollution Sources. *Aerosol Air Qual. Res.*, *19*, 724–736.
65. Padilla, L.E.; Ma, G.Q.; Peters, D.; Dupuy-Todd, M.; Forsyth, E.; Stidworthy, A.; Mills, J.; Bell, S.; Hayward, I.; Coppin, G.; et al. (2022). New methods to derive street-scale spatial patterns of air pollution from mobile monitoring. *Atmos. Environ.*, *270*, 118851.
66. Whitehill, A.R.; Lunden, M.; Kaushik, S.; Solomon, P. (2020). Uncertainty in collocated mobile measurements of air quality. *Atmos. Environ.*, *7*.
67. Shakhov, V., Materukhin, A., Sokolova, O., Insoo, K. (2022). Optimizing Urban Air Pollution Detection Systems. *Sensors*, *22*(13), 4767.
68. Kumar, P.; Morawska, L.; Martani, C.; Biskos, G.; Neophytou, M.; Di Sabatino, S.; Bell, M.; Norford, L.; Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environ. Int.* *75*, 199–205.
69. 2008/50/EC: *Directive of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe*. Available online: [http://eurlex.europa.eu/Rsult.do?RechType=RECH\\_celex&lang=en&code=32008L0050](http://eurlex.europa.eu/Rsult.do?RechType=RECH_celex&lang=en&code=32008L0050) Διαθέσιμο στις 29/11/2022.
70. Karagulian, F., Barbieri M., Kotsev A., Spinelle L., Gerboles M., Lagler F., Redon N., Crunaire S and Borowiak, A. (2019). Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring. *Atmosphere*, *10*, 506.
71. Williams, R.; Duvall, R.; Kilaru, V.; Hagler, G.; Hassinger, L.; Benedict, K.; Rice, J.; Kaufman, A.; Judge, R.; Pierce, G.; et al. (2019). Deliberating performance targets workshop: Potential paths for emerging PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> air sensor progress. *Atmos. Environ.*, *2*, 100031.
72. Apte J.S., Messier K.P., Gani S., Brauer M., Kirchstetter T.W., Lunden M.M., Marshall J.D., Portier C.J., Vermeulen R.C.H., Hamburg S.P. (2017). High-resolution air pollution mapping with google street view cars: Exploiting big data. *Environmental Science and Technology*, *51* (12), pp. 6999-7008.
73. Zimmerman N., Li H., Ellis A., Haurlyliuk A., Robison E., Gu P., Shah R., Ye Q., Snell L., Subramanian R., Robinson A., Apte J., Presto A. Improving correlations between land use and air pollutant concentrations using wavelet analysis: Insights from a low-cost sensor network. *Aerosol and Air Quality Research*, *20* (2).
74. Jain S., Presto A.A., Zimmerman N. (2021). Spatial modeling of daily PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, and CO concentrations measured by a low-cost sensor network: Comparison of linear, machine learning, and hybrid land use models, *Environmental Science and Technology*, *10*, 1021.
75. Zimmerman, N. (2022). Tutorial: Guidelines for implementing low-cost sensor networks for aerosol monitoring, *Journal of Aerosol Science*, 159.
76. Duvall R., Clements A., Hagler G., Kamal A., Kilaru V.J., Goodman L., Frederick S., Jonhson Barkjon K., VonWold I., Greene D., Dye T. (2021). *Performance testing protocols, metrics, and target values for fine particulate matter air sensors: Use in ambient, outdoor, fixed site, non-regulatory supplemental and informational monitoring applications: Technical Report*. U.S. EPA Office of Research and Development, Washington, D.C. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_Report.cfm](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm)? Διαθέσιμο στις 29/11/2022.
77. Bulot F.M.J., Johnston S.J., Basford P.J., Easton N.H.C., Apetroaie-Cristea M., Foster G.L., Morris A.K.R., Cox S.J., Loxham M. (2019). Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment. *Scientific Reports*, *9* (1), p. 7497.



78. Hagan D.H., Kroll J.H. (2020). Assessing the accuracy of low-cost optical particle sensors using a physics-based approach. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13 (11), pp. 6343-6355.
79. Krause A., Singh A., Guestrin C. (2008). Near-optimal sensor placements in Gaussian processes: Theory, efficient algorithms and empirical studies. *Journal of Machine Learning Research*, 9 (8) (2008), pp. 235-284.
80. Motlagh N.H., Lagerspetz E., Nurmi P., Li X., Varjonen S., Mineaud J., Siekkinen M., Rebeiro-Hargrave A., Hu sein T., Petaja T., Kulmala M., Tarkoma S. (2020). Toward massive scale air quality monitoring, *IEEE Communications Magazine*, 58 (2), pp. 54-59.
81. Han Y., Park B., Jeong J. (2019). A novel architecture of air pollution measurement platform using 5G and blockchain for industrial IoT applications. *Procedia Computer Science*, 155 (2019), pp. 728-733.
82. Feenstra B., Collier-Oxandale A., Papapostolou V., Cocker D., Polidori A. (2020). The Air Sensor open-source R-package and Data Viewer web application for interpreting community data collected by low-cost sensor networks. *Environmental Modelling & Software*, 134.
83. OpenAQ (2020) <https://openaq.org/#/map>
84. Morawska L., Thai P.K., Liu X., Asumadu-Sakyi A., Ayoko G., Bartonova A., Bedini A., Chai F., Christensen B., Dunbabin M., Gao J., Hagler G.S., Jayaratne R., Kumar P., Lau A.K., Louie P.K., Mazaheri M., Ning Z., Motta N., ..., Williams R. (2020). Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone? *Environment International*, 116, 286-299.
85. Bai, L.; Wang, J.; Ma, X.; Lu, H. (2018). Air Pollution Forecasts: An Overview. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 15, 780.
86. Castell, N.; Schneider, P.; Grossberndt, S.; Fredriksen, M.; Sousa-Santos, G.; Vogt, M.; Bartonova, A. (2018). Localized real-time information on outdoor air quality at kindergartens in Oslo, Norway using low-cost sensor nodes. *Environ. Res.*, 165, 410–419
87. Pope, F.D.; Gatari, M.; Ng'ang'a, D.; Poynter, A.; Blake, R. (2018). Airborne particulate matter monitoring in Kenya using calibrated low-cost sensors. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 15403–15418.
88. Castell, N.; Dauge, F.R.; Schneider, P.; Vogt, M.; Lerner, U.; Fishbain, B.; Broday, D.; Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environ. Int.*, 99, 293–302.
89. Veiga, T., Ellingsen A.M., Papastergiopoulos, C., Tzovaras, D., Kalamaras, I., Bach, K., Votis, K. Akselsen, S. (2021). From a Low-Cost Air Quality Sensor Network to Decision Support Services: Steps towards Data Calibration and Service Development, *Sensors*, 21(9), 3190.