



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων
με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων**

Ιωάννης Ε. Χρηστάκης

ΑΙΓΑΛΕΩ

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

**SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

PROGRAM OF DOCTORAL STUDIES

PhD THESIS

**Systems for measuring and monitoring environmental pollutants
using Internet of Things technology**

Ioannis E. Christakis

ATHENS-EGALEO

APRIL 2024

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση
τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Ιωάννης Ε. Χρηστάκης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: **Ηλίας Σταύρακας**, Καθηγητής Τμήμα Ηλεκτρολόγων &
Ηλεκτρονικών Μηχ., ΠαΔΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ:

Ηλίας Σταύρακας, Καθηγητής, Τμ. ΗΗΜ, ΠαΔΑ

Οδυσσέας Τσακίριδης, Επίκουρος Καθηγητής, Τμ. ΗΗΜ, ΠαΔΑ

Γεώργιος Χλούπης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμ. ΜΤΓ, ΠαΔΑ

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ηλίας Σταύρακας,
Καθηγητής ΠαΔΑ

Οδυσσέας Τσακίριδης,
Επίκουρος Καθηγητής ΠαΔΑ

Γεώργιος Χλούπης,
Αναπληρωτής Καθηγητής ΠαΔΑ

Μαρία Ραγκούση,
Καθηγήτρια ΠαΔΑ

Διονύσιος Κανδρής,
Καθηγητής ΠαΔΑ

Δήμος Τριάντης,
Ομότιμος Καθηγητής ΠαΔΑ

Χρήστος Τσώνος,
Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Ημερομηνία εξέτασης 10/04/2024

PhD THESIS

Systems for measuring and monitoring environmental pollutants using Internet of Things technology

Ioannis E. Christakis

SUPERVISOR: Ilias Stavrakas, Professor UniWA

THREE-MEMBER ADVISORY COMMITTEE:

Ilias Stavrakas, Professor UniWA

Odysseas Tsakiridis, Assistant professor UniWA

George Hloupis, Associate professor UniWA

SEVEN-MEMBER EXAMINATION COMMITTEE

**Ilias Stavrakas,
Professor UniWA**

**Odysseas Tsakiridis,
Assistant Professor UniWA**

**George Hloupis,
Associate Professor UniWA**

**Maria Rangoussi,
Professor UniWA**

**Dionisis Kandris,
Professor UniWA**

**Dimos Triantis,
Emeritus Professor UniWA**

**Christos Tsonos,
Professor University of Thessaly**

Examination Date 10/04/2024

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Ιωάννης Χρηστάκης,

Απρίλιος, 2024

Η παρούσα διδακτορική διατριβή καλύπτεται από τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons «Αναφορά Δημιουργού Μη Εμπορική Χρήση Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 Διεθνές» (CC BY-NC-ND 4.0). Συνεπώς, το έργο είναι ελεύθερο για διανομή (αναπαραγωγή, διανομή και παρουσίαση του έργου στο κοινό), υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

α. Αναφορά δημιουργού: Ο χρήστης θα πρέπει να κάνει αναφορά στο έργο με τον τρόπο που έχει οριστεί από το δημιουργό ή τον χορηγούντα την άδεια.

β. Μη εμπορική χρήση: Ο χρήστης δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει το έργο αυτό για εμπορικούς σκοπούς.

γ. Όχι Παράγωγα Έργα: Ο Χρήστης δεν μπορεί να αλλοιώσει, να τροποποιήσει ή να δημιουργήσει νέο υλικό που να αξιοποιεί το συγκεκριμένο έργο (πάνω από το έργο αυτό).

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

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

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ιωάννης Χρηστάκης του Ευαγγέλου, υποψήφιος διδάκτορας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας και δικαιούχος των πνευματικών δικαιωμάτων επί της διατριβής και δεν προσβάλω τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων. Για τη συγγραφή της διδακτορικής μου διατριβής δεν χρησιμοποίησα ολόκληρο ή μέρος έργου άλλου δημιουργού ή τις ιδέες και αντιλήψεις άλλου δημιουργού χωρίς να γίνεται αναφορά στην πηγή προέλευσης (βιβλίο, άρθρο από εφημερίδα ή περιοδικό, ιστοσελίδα κ.λπ.). 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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στόχος αυτής της διατριβής είναι η αξιολόγηση των αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους και η δυνατότητα εφαρμογής και αξιοποίησής τους σε μετρητικά συστήματα IoT για την ανάπτυξη δικτύου παρακολούθησης ποιότητας αέρα, μεγάλης χωρικής κάλυψης. Η ποιότητα του αέρα, ιδιαίτερα στις μεγάλες πόλεις, επηρεάζει άμεσα τόσο την υγεία όσο και τον τρόπο ζωής των πολιτών. Κυβερνητικοί φορείς και ερευνητικά κέντρα μελετούν και παρακολουθούν την ποιότητα του αέρα, με εξοπλισμό πολύ υψηλού κόστους πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα έναν μικρό αριθμό εγκατεστημένων συστημάτων παρακολούθησης ποιότητας αέρα αναδεικνύοντας το πρόβλημα της χωρικής κάλυψης σε μεγάλες περιοχές. Τα τελευταία χρόνια η εξέλιξη της τεχνολογίας είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να εξάγουν αξιόπιστα δεδομένα μετά από την εφαρμογή συγκεκριμένων μεθόδων διόρθωσης και βελτιστοποίησης των μετρήσεων. Κατ' επέκταση οι αισθητήρες ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διατάξεις IoT, για την ανάπτυξη πυκνού δικτύου.

Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν σταθμοί παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, οι οποίοι περιλαμβάνουν μονάδα μικροεπεξεργαστή, αισθητήρες αερίων ρύπων, διοξειδίου του αζώτου και όζοντος, αισθητήρα μικροσωματιδίων και βαρομετρικό αισθητήρα, ενώ η διασύνδεση με το διαδίκτυο γίνεται μέσω ασυρμάτου δικτύου ή δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Τα δεδομένα των μετρήσεων αποστέλλονται από κάθε σταθμό και αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων, ενώ για την οπτικοποίηση των μετρήσεων έχει αναπτυχθεί ένας εξυπηρετητής εφαρμογής οπτικοποίησης δεδομένων. Η βαθμονόμηση των σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους έγινε με την μέθοδο συντοποθέτησης τους δίπλα σε επίσημα όργανα μετρήσεων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως αναφοράς, στις εγκαταστάσεις του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

Αρχικά μελετήθηκε η συμπεριφορά των αισθητήρων χαμηλού κόστους, ανά κατηγορία αισθητήρα, πράγμα το οποίο έδειξε ομογένεια ως προς τις μετρήσεις με πολύ υψηλό συντελεστή συσχέτισης. Στη συνέχεια κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης των μετρήσεων σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία συνάρτησης βαθμονόμησης με χρήση δυο διορθωτικών συντελεστών. Η συνάρτηση βαθμονόμησης επιβεβαιώθηκε καθώς η εφαρμογή της σε όλους τους αισθητήρες αερίων ρύπων, διοξειδίου του αζώτου και όζοντος, παρουσίασε εξαιρετικά αποτελέσματα βελτίωσης μετρήσεων, έως και 25%. Συνάρτηση βαθμονόμησης εφαρμόστηκε και στους αισθητήρες μικροσωματιδίων, στην οποία συμβάλουν τόσο η θερμοκρασία όσο και η υγρασία περιβάλλοντος ως διορθωτικοί συντελεστές. Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης αποκαλύφθηκε ότι και η βαρομετρική πίεση του περιβάλλοντος ως συντελεστής διόρθωσης συμβάλει στη διόρθωση των μετρήσεων. Καθώς οι αισθητήρες αερίων ρύπων έχουν διάρκεια ζωής μέχρι δυο έτη αντικείμενο μελέτης αποτέλεσε και η διερεύνηση της συμπεριφοράς τους κατά το χρόνο λειτουργίας τους. Η έρευνα αυτή έδειξε ότι οι μετρήσεις επηρεάζονται κατά τη γήρανση των αισθητήρων, και η διόρθωσή τους είναι θεραπεύσιμη, με την μεταβολή των συντελεστών μέσω μιας εξίσωσης που τροποποιεί τους συντελεστές βαθμονόμησης κατά τον χρόνο λειτουργίας του αισθητήρα.

Για την βελτιστοποίηση των μετρήσεων, μοντέλα απλής γραμμικής παλινδρόμησης και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης εφαρμόστηκαν τόσο στις μετρήσεις αισθητήρων αερίων ρύπων όσο και στις μετρήσεις αισθητήρων μικροσωματιδίων, χαμηλού κόστους, με συντελεστές που εξαρτώνται από τις βαρομετρικές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία, βαρομετρική πίεση). Τα αποτελέσματα ανέδειξαν την σημαντικότητα των βαρομετρικών συνθηκών ως προς τη διόρθωση των μετρήσεων. Μοντέλα φίλτρων πεπερασμένης κρουστικής απόκριση (F.I.R) και Kalman, εφαρμόστηκαν ως εκτιμητές, στις μετρήσεις. Τα αποτελέσματα ήταν εξαιρετικά καθώς εμφάνισαν βελτίωση των μετρήσεων για το φίλτρο F.I.R ως και 25%, ενώ για το φίλτρο Kalman έως και

40%. Επιπρόσθετα διερευνήθηκε ο προσδιορισμός των ορίων ασφαλούς μεταβολής για τη βελτιστοποίηση των μετρήσεων σε χαμηλού κόστους ηλεκτροχημικούς αισθητήρες ποιότητας αέρα, με την εφαρμογή τόσο του μέσου όρου όσο και του διάμεσου της διακύμανσης μεταξύ των μετρήσεων από αισθητήρες χαμηλού κόστους και των μετρήσεων αναφοράς. Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου εμφάνισαν βελτίωση των μετρήσεων σε ικανοποιητικό βαθμό. Τέλος, η εφαρμογή της μεθόδου μη γραμμικής παλινδρόμησης έγινε στα δεδομένα από αισθητήρες χαμηλού κόστους και αναφοράς. Η μέθοδος αυτή ανέδειξε μια πολυωνυμική συνάρτηση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση των μετρήσεων από αισθητήρες χαμηλού κόστους.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Διασυνδεδεμένα ηλεκτρονικά συστήματα μετρήσεων

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, Διαδίκτυο των Πραγμάτων, έξυπνες πόλεις, παρακολούθηση περιβάλλοντος, μόλυνση αέρα, παρακολούθηση ποιότητας αέρα, γήρανση αισθητήρων, ηλεκτροχημικοί αισθητήρες αερίων ρύπων, μετρήσεις συγκέντρωσης O₃, μετρήσεις συγκέντρωσης NO₂, μετρήσεις συγκέντρωσης μικροσωματιδίων PM_{2.5}, Συστήματα ανίχνευσης χαμηλού κόστους, λογισμικό ανοικτού κώδικα, βαθμονόμηση αισθητήρων, φίλτρα F.I.R., φίλτρα Kalman .

ABSTRACT

The objective of this thesis is to evaluate low-cost air quality sensors and the feasibility of their application and utilization in IoT metering systems for the development of a large spatial coverage air quality monitoring network. Air quality, particularly in large cities, has a direct impact on both the health and lifestyle of citizens. Government agencies and research centers study and monitor air quality, using very expensive equipment, which results in a small number of installed air quality monitoring systems, highlighting the problem of spatial coverage in large areas. In recent years, advances in technology have resulted in the development of low-cost air quality sensors. According to the results of this thesis, these sensors can extract reliable data after applying specific methods of correction and optimization of measurements. By extension, low-cost air quality sensors can be used in IoT devices to deploy dense network.

For this purpose, low-cost air quality monitoring stations were constructed, which include a microprocessor unit, gas pollutant, nitrogen dioxide and ozone sensors, a microparticle sensor and a barometric sensor, while the interface with the Internet is provided via a wireless or mobile network. The measurement data are sent from each station and stored in a database, and a data visualization application server has been developed for the visualization of the measurements. The calibration of the low-cost air quality monitoring stations was performed by the method of short-circuiting them next to official measurement instruments, which were used as reference, at the facilities of the National Observatory of Athens.

First, the behavior of low-cost sensors was studied, by sensor category, which showed homogeneity in terms of measurements with a very high correlation coefficient. Then in the process of calibrating the measurements against the reference measurements, it was deemed necessary to create a calibration function using two correction factors. The calibration function was confirmed as its application to all the gas pollutant, nitrogen dioxide and ozone sensors showed excellent measurement improvement results, up to 25%. A calibration function was also applied to the microparticle sensors, to which both temperature and ambient humidity contribute as correction factors. During the calibration process it was revealed that the barometric pressure of the environment as a correction factor also contributes to the correction of the measurements. As the pollutant gas sensors have a lifetime of up to two years, the investigation of their behavior during the operating time was also the subject of the study. This research has shown that the measurements are affected during the ageing of the sensors, and their correction is curable by varying the coefficients through an equation that modifies the calibration coefficients during the sensor's operating time.

To optimize the measurements, simple linear regression and multiple linear regression models were applied to both the gaseous pollutant sensor measurements and the low-cost microparticle sensor measurements, with coefficients depending on the barometric conditions (temperature, humidity, and barometric pressure). The results showed the importance of the barometric conditions in correcting the measurements. Finite impulse response (F.I.R.) and Kalman filter models were applied as estimators, to the measurements. The results were excellent as they showed an improvement of up to 25% for the F.I.R filter and up to 40% for the Kalman filter. In addition, the determination of safe variation limits for optimizing measurements on low-cost electrochemical air quality sensors was investigated by applying both the mean and median of the variance between measurements from low-cost sensors and reference measurements. The results of this method showed an improvement of the measurements to a satisfactory degree. Finally, the non-linear regression method was applied to the data from low-cost and reference sensors. This method revealed a polynomial function which can be used to optimize the measurements from low cost sensors.

SUBJECT AREA: Interconnected electronic measurement systems

KEYWORDS: Wireless sensor networks, IoT, smart cities, environmental monitoring, air pollution, air quality monitoring, sensor aging, electrochemical gas sensors, O₃ measurements, NO₂ measurements, PM_{2.5} measurements, Low-cost sensing systems, Open source, sensor calibration, F.I.R. filters, Kalman filters.

Στη σύζυγό μου Μαρίνα και στο παιδί μου Ευάγγελο.

Στην αδερφή μου Μαρία Στέλλα που με κάνει να αισθάνομαι υπερήφανος γι' αυτήν.

Στους γονείς μου...

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω τους καθηγητές της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, κ. Σταύρακα, κ. Χλούπη και κ. Τσακιρίδη για την πολύτιμη συμβολή τους στην ολοκλήρωση αυτής της διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες στους καθηγητές κ. Κανδρή, κ. Ζέρβα, κα. Σαρρή, και κα. Πάσιου για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Ευχαριστώ τους φίλους Σπύρο, Θεόδωρο και Νίκο για τις ατέλειωτες συζητήσεις βοήθειας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου καθώς στάθηκε με υπομονή, συνοδοιπόρος σε αυτό το δύσκολο αλλά συνάμα υπέροχο ταξίδι ...

Ιωάννης Ε. Χρηστάκης, 2024

ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

A. Δημοσιεύσεις σε περιοδικά αναγνωρισμένου κύρους.

1. **Ioannis Christakis**, Elena Sarri, Odysseas Tsakiridis, Ilias Stavrakas, Identification of the Safe Variation Limits for the Optimization of the Measurements in **Low-Cost Electrochemical Air Quality Sensors**, **Electrochem 2023,5 (1), 1-28**.
2. **Ioannis Christakis**, Odysseas Tsakiridis, Dionisis Kandris, Ilias Stavrakas, A Kalman Filter Scheme for the Optimization of Low-Cost Gas Sensor Measurements, , **Electronics 2024,13 (1), 25**.
3. **Ioannis Christakis**, Odysseas Tsakiridis, Dionisis Kandris, Ilias Stavrakas, Air Pollution Monitoring via Wireless Sensor Networks: The Investigation and Correction of the Aging Behavior of Electrochemical Gaseous Pollutant Sensors, **Electronics 2023,12 (8), 1842**.
4. **Ioannis Christakis**, Elena Sarri, Odysseas Tsakiridis, Ilias Stavrakas, Investigation of LASSO Regression Method as a Correction Measurements' Factor for Low-Cost Air Quality Sensors. **Signals 2024, 5, 60-86**.

B. Δημοσιεύσεις σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων.

1. **Ioannis Christakis**, Odysseas Tsakiridis, Ermioni D. Pasiou, Ilias Stavrakas, Low-cost gas sensor measurements optimization using Kalman filter approach, **39th Danubia-Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics, 26-29 Sept, 2023, Siofok, Hungary. ISBN: 978-963-421-927-9**.
2. **Ioannis Christakis**, Konstantinos Moutzouris, Odysseas Tsakiridis, Ilias Stavrakas, Barometric Pressure as a correction factor for low-cost particulate matter sensors, **2022, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1123 (1), 012068**.
3. **Ioannis Christakis**, Georgios Hloupis, Odysseas Tsakiridis, Ilias Stavrakas, Integrated open source air quality monitoring platform, IEEE, **2022, 11th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)**.
4. **Ioannis Christakis**, George Hloupis, Odysseas Tsakiridis, Panagiota Syropoulou, Nikolaos Papadakis, Ilias Stavrakas, Performance comparison of low-cost gas and particles sensors, **2021, Proceedings of the Eighth International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning & Economics**.
5. **Ioannis Christakis**, Panagiota Syropoulou, Nikolaos Papadakis, Ilias Stavrakas, On the correction of low-cost NO₂, O₃ and PM sensors, **2021, Proceedings of the Eighth International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning & Economics**.

6. **Ioannis Christakis**, George Hloupis, Ilias Stavrakas, Odysseas Tsakiridis, Low cost sensor implementation and evaluation for measuring NO₂ and O₃ pollutants, IEEE, **2020, 9th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)**.
7. Theologos Migos, **Ioannis Christakis**, Konstantinos Moutzouris, Ilias Stavrakas, On the evaluation of low-cost PM sensors for air quality estimation, IEEE, **2019, 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST)**.
8. N. Papadakis I Zyrichidou, P. Syropoulou, S. Tekes, G. Grivas, I. Stavroulas, E. Athanasopoulou, E. Gerasopoulos, **I. Christakis**, T. Migos, I. Stavrakas, G. Hloupis, O. Tsakiridis, K. Ioannidis. City-Wide Air Quality Measurement System Based on IoT Network, **2020, 12th International Conference on Air Quality – Science and Application, Thessaloniki, Greece**.
9. **Ioannis Christakis**, Odysseas Tsakiridis, Ilias Stavrakas, Optimization of low cost gas sensor measurements using FIR filter approach. **2022, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	25
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	39
ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ.....	43
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	45
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	47
1.1 Ιστορική Αναδρομή	47
1.2 Σκοπός και Στόχοι της Διδακτορικής Διατριβής	48
1.3 Ένταξη του προβλήματος ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα στο θέμα της Διδακτορικής Διατριβής.....	49
1.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	52
1.5 Συνεισφορά της διατριβής.....	58
2. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ	61
2.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία για την ποιότητα αέρα	61
2.2 Αέριοι ρύποι (NO ₂ , O ₃ , PM).....	63
2.3 Όρια αέριων ρύπων (NO ₂ , O ₃ , PM)	65
3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΩΝ.....	67
3.1 Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων	68
3.2 Κατηγορίες Αισθητήρων	69
3.2.1 Αισθητήρες οξειδίου μετάλλου στερεάς κατάστασης (Metal Oxide Semiconductor - MOS)	70
3.2.2 Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες (Electrochemical Sensors - EC)	72
3.2.3 Αισθητήρες υπέρυθρων χωρίς διασπορά (Non-dispersive Infrared - NDIR).....	74
3.2.4 Αισθητήρες ανίχνευσης φωτοϊοντισμού (Photo-ionisation Detectors - PID).....	74
3.3 Μελέτες αξιολόγησης απόδοσης αισθητήρων	75

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΡΥΠΙΩΝ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΙΚΡΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ, ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	77
4.1 Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες.....	77
4.2 Αισθητήρες μικροσωματιδίων.....	78
5. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	81
5.1 Υλισμικό.....	82
5.1.1 Μικροελεγκτής (CPU).....	82
5.1.2 Αισθητήρες.....	83
5.1.3 Περιφερειακές μονάδες.....	89
5.2 Κατασκευή σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους.....	93
5.2.1 Κατασκευή πλακέτας επέκτασης.....	93
5.2.2 Κατασκευή διάταξης αεραγωγού.....	96
5.2.3 Σύνθεση κατασκευής.....	97
5.3 Λογισμικό.....	98
Ροή λειτουργίας σταθμού μέτρησης.....	99
5.3.1 Συνοπτική δομή λειτουργίας προγράμματος.....	99
5.3.2 Σύνταξη και διαμόρφωση του πακέτου δεδομένων για αποστολή στο δίκτυο σε μορφή json-string....	101
5.4 Εγκατάσταση σταθμών μέτρησης χαμηλού κόστους στο πεδίο και λήψη μετρήσεων.....	102
5.4.1 Σημεία εγκατάστασης σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα, χαμηλού κόστους.....	103
5.5 Πληροφοριακό σύστημα λήψης μετρήσεων.....	104
5.6 Δοκιμές επιβεβαίωσης ορθής λειτουργίας των σταθμών.....	106
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ, ΑΠΟ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	107
6.1 Έλεγχος αξιοπιστίας αισθητήρων χαμηλού κόστους.....	107
6.2 Βελτιστοποίηση μετρήσεων.....	113
6.3 Συναρτήσεις βαθμονόμησης, συντελεστές διόρθωσης, αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους	

6.3.1	Διορθωτικοί συντελεστές αισθητήρων αέριων ρύπων, χαμηλού κόστους.....	115
6.3.2	Διορθωτικοί συντελεστές αισθητήρων συγκέντρωσης μικροσωματιδίων, χαμηλού κόστους.....	116
6.3.3	Αποτελέσματα διόρθωσης	119
6.4	Διερεύνηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραμέτρων στην αξιοπιστία των μετρήσεων.....	127
6.4.1	Εισαγωγή στη μέθοδο	127
6.4.2	Αποτελέσματα εφαρμογής των μεθόδων LR και MLR	128
6.5	Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων με εφαρμογή φίλτρου F.I.R.....	134
6.5.1	Θεωρητικό υπόβαθρο μεθόδου	134
6.5.2	Εφαρμογή FIR στα δεδομένα.....	137
6.6	Βελτιστοποίηση μετρήσεων με εφαρμογή φίλτρου KALMAN.....	140
6.6.1	Θεωρητικό υπόβαθρο μεθόδου	143
6.6.2	Εφαρμογή φίλτρου Kalman στα δεδομένα	146
6.7	Προσδιορισμός των ορίων ασφαλούς διακύμανσης για τη βελτιστοποίηση των μετρήσεων σε χαμηλού κόστους ηλεκτροχημικούς αισθητήρες ποιότητας αέρα.....	155
6.7.1	Γραμμική Παλινδρόμηση (LR).....	163
6.7.2	Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (MLR)	166
6.8	Προσέγγιση μη γραμμικής παλινδρόμησης ως συντελεστής διόρθωσης των μετρήσεων ηλεκτροχημικών αισθητήρων ποιότητας του αέρα χαμηλού κόστους.	171
6.8.1	Εισαγωγή στη μέθοδο	171
6.8.2	Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου	172
6.8.3	Μελέτη εβδομαδιαίας και μηνιαίας συσχέτισης των μετρήσεων O ₃ μεταξύ των τριών σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους.....	173
6.8.4	Μελέτη εβδομαδιαίας και μηνιαίας συσχέτισης των μετρήσεων NO ₂ μεταξύ των τριών σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους.....	179
6.9	Γήρανση αισθητήρων χαμηλού κόστους	186
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.	199
7.1	Συμπεράσματα.....	199
7.2	Θέματα για περαιτέρω έρευνα.....	203
7.2.1	Εναλλακτικοί τρόποι μετάδοσης πληροφορίας.....	205
8.	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	207

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1 Αισθητήρας αερίου ρύπου τεχνολογίας MOS [163]	71
Σχήμα 3.2 Αισθητήρες αερίων ρύπων ηλεκτροχημικής τεχνολογίας [177]	73
Σχήμα 3.3 Αισθητήρας αερίου ρύπου τεχνολογίας NDIR [178]	74
Σχήμα 3.4 Αισθητήρες αερίων ρύπων τεχνολογίας PID [180]	75
Σχήμα 4.1: Δομή ηλεκτροχημικού αισθητήρα, χαμηλού κόστους [75].....	78
Σχήμα 4.2: Δομή οπτικού αισθητήρα μικροσωματιδίων, χαμηλού κόστους [190].	79
Σχήμα 5.1: Block διάγραμμα συστήματος μέτρησης.....	81
Σχήμα 5.2: Αναπτυξιακή πλατφόρμα STM Nucleo F091RC. [191].....	83
Σχήμα 5.3: Αισθητήρας Όζοντος Alphasense OX-B431 [192].	84
Σχήμα 5.4: Πλακέτα υποστήριξης ISB, Alphasense [193].	84
Σχήμα 5.5: Απόκριση εξόδου αισθητήρα όζοντος OX-B431, Alphasense [192]......	85
Σχήμα 5.6: Αισθητήρας Διοξειδίου του Αζώτου, Alphasense NO2-B43F [194].	86
Σχήμα 5.7: Πλακέτα υποστήριξης ISB, Alphasense [193].	86
Σχήμα 5.8: Απόκριση εξόδου αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου NO2-B43F, Alphasense [194].	86
Σχήμα 5.9: Αισθητήρας μικροσωματιδίων (PMS5003) [195].	87
Σχήμα 5.10: Βαρομετρικός αισθητήρας (BME280) [196].....	88
Σχήμα 5.11: Υποδοχέας microSD [197].	89
Σχήμα 5.12: Διάταξη Wi-Fi (ESP8266) [198]......	90
Σχήμα 5.13: SIM808 GPS/GPRS Module [199]......	91
Σχήμα 5.14: Μονάδα GPS [200]......	92
Σχήμα 5.15: Διάταξη αδιάληπτης παροχής ενέργειας [201]......	93
Σχήμα 5.16: Διάγραμμα ροής αδιάληπτης παροχής ενέργειας.	93
Σχήμα 5.17: Δυο όψεις του αναπτυξιακού συστήματος NUCLEO / F091RC [191]......	94
Σχήμα 5.18: Πλακέτα επέκτασης.	94
Σχήμα 5.19 Κάτω όψη πλακέτας επέκτασης.....	95

Σχήμα 5.20: Επάνω όψη πλακέτας επέκτασης.....	95
Σχήμα 5.21 Διάγραμμα συνδέσεων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας.....	96
Σχήμα 5.22: Ολοκληρωμένη διάταξη σταθμού.	96
Σχήμα 5.23: Διάταξη όδευσης αέρα και θέσεις αισθητήρων.....	97
Σχήμα 5.24: Το εσωτερικό ενός συναρμολογημένου πλήρους σταθμού, μετά την τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων.	98
Σχήμα 5.25: Δομή λειτουργίας του προγράμματος.	100
Σχήμα 5.26: Χάρτης εγκατεστημένων σταθμών στην περιοχή της Αττικής	103
Σχήμα 5.27: Node 15, ΠαΔΑ – Πανεπιστημιούπολη Αρχαίου Ελαιώνα.	104
Σχήμα 5.28: Node 17, ΠαΔΑ – Πανεπιστημιούπολη Άλσους Αιγιάλεω.....	104
Σχήμα 5.29: Node 20, Γέρακας Αττικής, Οδός Μιαούλη 28.....	104
Σχήμα 5.30: Node 22. Βριλήσσια, Οδός Ηλείας 22.....	104
Σχήμα 5.31: Node 16. Παράσχου 32, Γκύζη.	104
Σχήμα 5.32: Node 21. Βαλτετσίου 11, Πεύκη.....	104
Σχήμα 5.33 Δομή πληροφοριακού συστήματος	105
Σχήμα 5.34: Διεπαφή Grafana, με τους εννέα ενεργούς σταθμούς και τη γεωγραφική τους θέση.	105
Σχήμα 6.1: Εγκατάσταση σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.....	108
Σχήμα 6.2: Χρονοσειρά δεδομένων από τους αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO ₂) και της μέσης τιμής.	109
Σχήμα 6.3: Βαθμός συσχέτισης κάθε αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO ₂) με την μέση τιμή.	110
Σχήμα 6.4: Συσχέτιση μεταξύ τεσσάρων αισθητήρων διοξειδίου του αζώτου (NO ₂) χαμηλού κόστους, (σταθμοί μέτρησης 1, 2, 3, 4).	110
Σχήμα 6.5: Χρονοσειρά δεδομένων από τους αισθητήρες όζοντος (O ₃) και της μέσης τιμής. ..	111
Σχήμα 6.6: Βαθμός συσχέτισης κάθε αισθητήρα όζοντος (O ₃) με την μέση τιμή.....	111

Σχήμα 6.7: Συσχέτιση μεταξύ τριών αισθητήρων όζοντος (O_3) χαμηλού κόστους (σταθμοί μέτρησης 1, 3, 4).....	111
Σχήμα 6.8: Θηκόγραμμα (boxplot) τιμών αισθητήρων διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και όζοντος (O_3).....	112
Σχήμα 6.9: Χρονοσειρά πρωτογενών δεδομένων από τους τρεις αισθητήρες μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$), χαμηλού κόστους.....	112
Σχήμα 6.10: Βαθμός συσχέτισης, πρωτογενών δεδομένων, κάθε αισθητήρα μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$) με την μέση τιμή.....	113
Σχήμα 6.11: Συσχέτιση, πρωτογενών δεδομένων, μεταξύ τριών αισθητήρων μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$) χαμηλού κόστους, (σταθμοί μέτρησης 1, 2, 3).....	113
Σχήμα 6.12: Χάρτης τοποθέτησης σταθμών μέτρησης και αναφοράς.....	114
Σχήμα 6.13: Χρονοσειρά πρωτογενών τιμών από αισθητήρες μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$), χαμηλού κόστους.....	118
Σχήμα 6.14: Συσχέτιση τιμών μεταξύ αισθητήρων μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$) χαμηλού κόστους.....	118
Σχήμα 6.15: Χρονοσειρά πρωτογενών τιμών από αισθητήρες μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$), χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.....	118
Σχήμα 6.16: Συσχέτιση πρωτογενών τιμών μεταξύ αισθητήρων μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$) χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.....	118
Σχήμα 6.17: Χρονοσειρά διορθωμένων (υγρασία, θερμοκρασία) τιμών από αισθητήρες μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$), χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.....	118
Σχήμα 6.18: Συσχέτιση διορθωμένων (υγρασία, θερμοκρασία) τιμών μεταξύ αισθητήρων μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$) χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.....	118
Σχήμα 6.19: Χρονοσειρά διορθωμένων (βαρομετρική πίεση, υγρασία, θερμοκρασία) τιμών από αισθητήρες μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$), χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.....	119
Σχήμα 6.20: Συσχέτιση διορθωμένων (βαρομετρική πίεση, υγρασία, θερμοκρασία) τιμών μεταξύ αισθητήρων μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$) χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.....	119
Σχήμα 6.21: Χρονοσειρά τιμών συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO_2) μεταξύ των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους.....	120

Σχήμα 6.22: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης του κάθε αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO ₂) με τη μέση τιμή.	120
Σχήμα 6.23: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης μεταξύ αισθητήρων διοξειδίου του αζώτου (NO ₂).	120
Σχήμα 6.24: Χρονοσειρά τιμών συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO ₂) των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους και αναφοράς.....	121
Σχήμα 6.25: Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των τιμών κάθε αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO ₂) χαμηλού κόστους και αναφοράς.	121
Σχήμα 6.26: Χρονοσειρά τιμών συγκέντρωσης όζοντος (O ₃) μεταξύ των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους.	122
Σχήμα 6.27: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης του κάθε αισθητήρα όζοντος (O ₃) με τη μέση τιμή.	122
Σχήμα 6.28: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης μεταξύ αισθητήρων όζοντος (O ₃).	122
Σχήμα 6.29: Χρονοσειρά τιμών συγκέντρωσης όζοντος (O ₃) των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους και αναφοράς.	123
Σχήμα 6.30: Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των τιμών κάθε αισθητήρα όζοντος (O ₃) χαμηλού κόστους και αναφοράς.	123
Σχήμα 6.31: Χρονοσειρά διορθωμένων δεδομένων από τους τρεις αισθητήρες μικροσωματιδίων (PM _{2.5}), χαμηλού κόστους.....	124
Σχήμα 6.32: Βαθμός συσχέτισης, διορθωμένων δεδομένων, κάθε αισθητήρα μικροσωματιδίων (PM _{2.5}) με την μέση τιμή.....	124
Σχήμα 6.33: Συσχέτιση, διορθωμένων δεδομένων, μεταξύ τριών αισθητήρων μικροσωματιδίων (PM _{2.5}) χαμηλού κόστους, (σταθμοί μέτρησης 1, 2, 3).....	124
Σχήμα 6.34: Χρονοσειρά μεταξύ διορθωμένων δεδομένων από τους τρεις αισθητήρες μικροσωματιδίων (PM _{2.5}), χαμηλού κόστους και αναφοράς.	125
Σχήμα 6.35: Συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων δεδομένων κάθε αισθητήρα μικροσωματιδίων (PM _{2.5}) χαμηλού κόστους και αναφοράς (σταθμοί μέτρησης 1, 2, 3).....	125
Σχήμα 6.36: Θηκόγραμμα πρωτόγεννων και διορθωμένων τιμών μικροσωματιδίων (PM _{2.5}). 125	
Σχήμα 6.37: Χρονοσειρές τιμών διοξειδίου του αζώτου (NO ₂), του αισθητήρα χαμηλού κόστους και αναφοράς.	129

Σχήμα 6.38: Χρονοσειρές τιμών όζοντος (O_3), του αισθητήρα χαμηλού κόστους και αναφοράς.	129
Σχήμα 6.39: Χρονοσειρές των τιμών συγκέντρωσης σωματιδίων ($PM_{2.5}$) του αισθητήρα χαμηλού κόστους και αναφοράς.	130
Σχήμα 6.40: Χρονοσειρά συγκέντρωσης (NO_2) διορθωμένων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους ($N1$, $N2$) και τιμών αναφοράς.....	138
Σχήμα 6.41: Συσχέτιση συγκέντρωσης (NO_2) διορθωμένων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους ($N1$, $N2$) και τιμών αναφοράς.	138
Σχήμα 6.42: Χρονοσειρά συγκέντρωσης (O_3) διορθωμένων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους ($N1$, $N2$) και τιμών αναφοράς.	138
Σχήμα 6.43: Συσχέτιση συγκέντρωσης (O_3) διορθωμένων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους ($N1$, $N2$) και τιμών αναφοράς.	138
Σχήμα 6.44: Χρονοσειρά συγκέντρωσης (NO_2) προβλέψιμων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους ($N1$, $N2$) και τιμών αναφοράς.....	139
Σχήμα 6.45: Συσχέτιση συγκέντρωσης (NO_2) προβλέψιμων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους ($N1$, $N2$) και τιμών αναφοράς.	139
Σχήμα 6.46: Χρονοσειρά συγκέντρωσης (O_3) προβλέψιμων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους ($N1$, $N2$) και τιμών αναφοράς.	139
Σχήμα 6.47: Συσχέτιση συγκέντρωσης (O_3) προβλέψιμων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους ($N1$, $N2$) και τιμών αναφοράς.	139
Σχήμα 6.48: Node1, NO_2 , χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.....	147
Σχήμα 6.49: Node1, NO_2 , συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.	147
Σχήμα 6.50: Node1, NO_2 , χρονοσειρά προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	147
Σχήμα 6.51: Node1, NO_2 , συσχέτιση μεταξύ προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	147
Σχήμα 6.52: Node1, O_3 , χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.....	148
Σχήμα 6.53: Node1, O_3 , συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.	148
Σχήμα 6.54: Node1, O_3 , χρονοσειρά προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	148
Σχήμα 6.55: Node1, O_3 , συσχέτιση μεταξύ προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	148
Σχήμα 6.56: Node2, NO_2 , χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.....	149

Σχήμα 6.57: Node2, NO ₂ , συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.	149
Σχήμα 6.58: Node2, NO ₂ , χρονοσειρά προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	149
Σχήμα 6.59: Node2, NO ₂ , συσχέτιση μεταξύ προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	149
Σχήμα 6.60: Node2, O ₃ , χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.	149
Σχήμα 6.61: Node2, O ₃ , συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.	149
Σχήμα 6.62: Node2, O ₃ , χρονοσειρά προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	150
Σχήμα 6.63: Node2, O ₃ , συσχέτιση μεταξύ προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	150
Σχήμα 6.64: Node3, NO ₂ , χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.	150
Σχήμα 6.65: Node3, NO ₂ , συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.	150
Σχήμα 6.66: Node3, NO ₂ , χρονοσειρά προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	150
Σχήμα 6.67: Node3, NO ₂ , συσχέτιση μεταξύ προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	150
Σχήμα 6.68: Node3, O ₃ , χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.	151
Σχήμα 6.69: Node3, O ₃ , συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.	151
Σχήμα 6.70: Node3, O ₃ , χρονοσειρά προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	151
Σχήμα 6.71: Node3, O ₃ , συσχέτιση μεταξύ προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.	151
Σχήμα 6.72: Διακύμανση τιμών των συντελεστών φίλτρου Kalman για τους αισθητήρες NO ₂	152
Σχήμα 6.73: Διακύμανση τιμών των συντελεστών φίλτρου Kalman για τους αισθητήρες O ₃ . .	152
Σχήμα 6.74: Χρονοσειρές συγκέντρωσης NO ₂ , μη διορθωμένων μετρήσεων από τρεις αισθητήρες χαμηλού κόστους και μετρήσεων αναφοράς.	156
Σχήμα 6.75: Συσχέτιση NO ₂ μη διορθωμένων τιμών Node 1 με τιμές αναφοράς.	157
Σχήμα 6.76: Συσχέτιση NO ₂ μη διορθωμένων τιμών Node 2 με τιμές αναφοράς.	157
Σχήμα 6.77: Συσχέτιση NO ₂ μη διορθωμένων τιμών Node 3 με τιμές αναφοράς.	157
Σχήμα 6.78: Χρονοσειρές συγκέντρωσης O ₃ , μη διορθωμένων μετρήσεων από τρεις αισθητήρες χαμηλού κόστους και μετρήσεων αναφοράς.	157
Σχήμα 6.79: Συσχέτιση O ₃ μη διορθωμένων τιμών Node 1 με τιμές αναφοράς.	157
Σχήμα 6.80: Συσχέτιση O ₃ μη διορθωμένων τιμών Node 2 με τιμές αναφοράς.	157

Σχήμα 6.81: Συσχέτιση O_3 μη διορθωμένων τιμών Node 3 με τιμές αναφοράς.....	157
Σχήμα 6.82: Συνολική διακύμανση μετρήσεων τριών αισθητήρων NO_2 χαμηλού κόστους, ως προς τις μετρήσεις αναφοράς, για τις μεθόδους μέσου όρου και διάμεσου.	158
Σχήμα 6.83: Διακύμανση της ποσοστιαίας μεταβολής, με τη μέθοδο μέσου όρου, των μετρήσεων για κάθε αισθητήρα NO_2 χαμηλού κόστους σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.....	158
Σχήμα 6.84: Διακύμανση της ποσοστιαίας μεταβολής, με τη μέθοδο διάμεσου, των μετρήσεων για κάθε αισθητήρα NO_2 χαμηλού κόστους σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.....	158
Σχήμα 6.85: Συνολική διακύμανση μετρήσεων τριών αισθητήρων O_3 χαμηλού κόστους, ως προς τις μετρήσεις αναφοράς, για τις μεθόδους μέσου όρου και διάμεσου.	158
Σχήμα 6.86: Διακύμανση της ποσοστιαίας μεταβολής, με τη μέθοδο μέσου όρου, των μετρήσεων για κάθε αισθητήρα O_3 χαμηλού κόστους σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.....	158
Σχήμα 6.87: Διακύμανση της ποσοστιαίας μεταβολής, με τη μέθοδο διάμεσου, των μετρήσεων για κάθε αισθητήρα O_3 χαμηλού κόστους σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.....	158
Σχήμα 6.88: Κατανομή ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων κάθε αισθητήρα NO_2 ως προς τις τιμές αναφοράς με την μέθοδο μέσου όρου.....	159
Σχήμα 6.89: Κατανομή ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων κάθε αισθητήρα NO_2 ως προς τις τιμές αναφοράς με την μέθοδο διάμεσου.....	159
Σχήμα 6.90: Κατανομή ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων κάθε αισθητήρα O_3 ως προς τις τιμές αναφοράς με την μέθοδο μέσου όρου.....	159
Σχήμα 6.91: Κατανομή ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων κάθε αισθητήρα O_3 ως προς τις τιμές αναφοράς με την μέθοδο διάμεσου.....	159
Σχήμα 6.92: Διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα NO_2 , με τη διακύμανση μέσου όρου, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.....	160
Σχήμα 6.93: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO_2 του σταθμού 1.	160
Σχήμα 6.94: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO_2 του σταθμού 2.	160
Σχήμα 6.95: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO_2 του σταθμού 3.	160

Σχήμα 6.96: Διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα NO ₂ , με τη διακύμανση διάμεσου, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.	161
Σχήμα 6.97: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO ₂ του σταθμού 1.....	161
Σχήμα 6.98: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO ₂ του σταθμού 2.....	161
Σχήμα 6.99: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO ₂ του σταθμού 3.....	161
Σχήμα 6.100: Διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα O ₃ , με τη διακύμανση μέσου όρου, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.	162
Σχήμα 6.101: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O ₃ του σταθμού 1.....	162
Σχήμα 6.102: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O ₃ του σταθμού 2.....	162
Σχήμα 6.103: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O ₃ του σταθμού 3.....	162
Σχήμα 6.104: Διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα O ₃ , με τη διακύμανση διάμεσου, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.	162
Σχήμα 6.105: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O ₃ του σταθμού 1.....	163
Σχήμα 6.106: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O ₃ του σταθμού 2.....	163
Σχήμα 6.107: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O ₃ του σταθμού 3.....	163
Σχήμα 6.108: Χρονοσειρές μετρήσεων της συγκέντρωσης O ₃ από σταθμούς παρακολούθησης χαμηλού κόστους και όργανα αναφοράς.	173
Σχήμα 6.109: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων O ₃ του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.....	173
Σχήμα 6.110: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων O ₃ του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.....	173

Σχήμα 6.111: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων O ₃ του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.....	174
Σχήμα 6.112: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων O ₃ του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.....	174
Σχήμα 6.113: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων O ₃ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.....	174
Σχήμα 6.114: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων O ₃ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.....	174
Σχήμα 6.115: Χρονοσειρές των μετρήσεων της συγκέντρωσης O ₃ του μέσου όρου των τριών κόμβων (N1, N2, N3) των σταθμών παρακολούθησης χαμηλού κόστους και των οργάνων αναφοράς.....	175
Σχήμα 6.116: Διάγραμμα διασποράς των μετρήσεων O ₃ της γραμμικής παλινδρόμησης των μετρήσεων μέσου όρου (N1, N2, N3).....	175
Σχήμα 6.117: Διάγραμμα διασποράς των μετρήσεων O ₃ της μη γραμμικής (πολυωνυμική συνάρτηση 2ου βαθμού) παλινδρόμησης των μετρήσεων μέσου όρου (N1, N2, N3).	175
Σχήμα 6.118: Χρονοσειρές μη διορθωμένων και διορθωμένων με NLR, μετρήσεων τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους O ₃ σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, της δεύτερης εβδομάδας.	176
Σχήμα 6.119: Διαγράμματα διασποράς των μετρήσεων O ₃ (μη διορθωμένων - αναφοράς) κάθε εβδομάδας για κάθε αισθητήρα, πριν από την εφαρμογή της μη γραμμικής παλινδρόμησης (NLR)	177
Σχήμα 6.120: Διαγράμματα διασποράς των μετρήσεων O ₃ (διορθωμένων - αναφοράς) κάθε εβδομάδας για κάθε αισθητήρα, μετά την εφαρμογή μη γραμμικής παλινδρόμησης (NLR).....	177
Σχήμα 6.121: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων O ₃ του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.....	178
Σχήμα 6.122: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων O ₃ του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.....	178
Σχήμα 6.123: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων O ₃ του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.....	178
Σχήμα 6.124: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων O ₃ του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.....	178

Σχήμα 6.125: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων O_3 του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.....	179
Σχήμα 6.126: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων O_3 του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.....	179
Σχήμα 6.127: Χρονοσειρές μετρήσεων της συγκέντρωσης NO_2 από σταθμούς παρακολούθησης χαμηλού κόστους και όργανα αναφοράς.	179
Σχήμα 6.128: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων NO_2 του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.....	180
Σχήμα 6.129: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων NO_2 του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.	180
Σχήμα 6.130: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων NO_2 του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.....	180
Σχήμα 6.131: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων NO_2 του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.	180
Σχήμα 6.132: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων NO_2 του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.....	180
Σχήμα 6.133: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων NO_2 του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.	180
Σχήμα 6.134: Χρονοσειρές των μετρήσεων της συγκέντρωσης NO_2 του μέσου όρου των τριών κόμβων (N1, N2, N3) των σταθμών παρακολούθησης χαμηλού κόστους και των οργάνων αναφοράς.....	181
Σχήμα 6.135: Διάγραμμα διασποράς των μετρήσεων NO_2 της γραμμικής παλινδρόμησης των μετρήσεων μέσου όρου (N1, N2, N3).....	181
Σχήμα 6.136: Διάγραμμα διασποράς των μετρήσεων NO_2 της μη γραμμικής (πολυωνυμική συνάρτηση 2ου βαθμού) παλινδρόμησης των μετρήσεων μέσου όρου (N1, N2, N3).	181
Σχήμα 6.137: Χρονοσειρές μη διορθωμένων και διορθωμένων με NLR, μετρήσεων τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους NO_2 σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, της δεύτερης εβδομάδας.	182

Σχήμα 6.138: Διαγράμματα διασποράς των μετρήσεων NO ₂ (μη διορθωμένων - αναφοράς) κάθε εβδομάδας για κάθε αισθητήρα, πριν από την εφαρμογή της μη γραμμικής παλινδρόμησης (NLR).	183
Σχήμα 6.139: Διαγράμματα διασποράς των μετρήσεων NO ₂ (διορθωμένων - αναφοράς) κάθε εβδομάδας για κάθε αισθητήρα, μετά την εφαρμογή μη γραμμικής παλινδρόμησης (NLR).	183
Σχήμα 6.140: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων NO ₂ του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.	184
Σχήμα 6.141: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων NO ₂ του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.	184
Σχήμα 6.142: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων NO ₂ του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.	184
Σχήμα 6.143: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων NO ₂ του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.	184
Σχήμα 6.144: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων NO ₂ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.	185
Σχήμα 6.145: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων NO ₂ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.	185
Σχήμα 6.146: Χρονοσειρές συγκέντρωσης NO ₂ από αισθητήρες χαμηλού κόστους και αναφοράς (14 Απριλίου έως 10 Μαΐου 2021).	188
Σχήμα 6.147: Χρονοσειρές συγκέντρωσης O ₃ από αισθητήρες χαμηλού κόστους και αναφοράς (14 Απριλίου έως 10 Μαΐου 2021).	188
Σχήμα 6.148: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO ₂) μεταξύ N1 & N2.	189
Σχήμα 6.149: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO ₂) μεταξύ N2 & N3.	189
Σχήμα 6.150: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO ₂) μεταξύ N1 & N3.	189
Σχήμα 6.151: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης όζοντος (O ₃) μεταξύ N1 & N2.	189
Σχήμα 6.152: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης όζοντος (O ₃) μεταξύ N2 & N3.	189
Σχήμα 6.153: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης όζοντος (O ₃) μεταξύ N1 & N3.	189

Σχήμα 6.154: Διακύμανση συντελεστή C1 κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα NO ₂ , χαμηλού κόστους.....	192
Σχήμα 6.155: Διακύμανση συντελεστή C2a κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα NO ₂ , χαμηλού κόστους.....	192
Σχήμα 6.156: Διακύμανση συντελεστή C2b κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα NO ₂ , χαμηλού κόστους.....	192
Σχήμα 6.157: Διακύμανση συντελεστή C2c κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα NO ₂ , χαμηλού κόστους.....	192
Σχήμα 6.158: Διακύμανση συντελεστή C1 κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα O ₃ , χαμηλού κόστους.....	192
Σχήμα 6.159: Διακύμανση συντελεστή C2 κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα O ₃ , χαμηλού κόστους.....	192
Σχήμα 6.160: Διακύμανση των αισθητήρων O ₃ με χρήση των συντελεστών που υπολογίστηκαν για τον Ιούλιο του 2021 και εφαρμόστηκαν τον Οκτώβριο του 2021.....	194
Σχήμα 6.161: Διακύμανση αισθητήρων O ₃ με χρήση των συντελεστών που υπολογίστηκαν για τον Οκτώβριο του 2021 και εφαρμόστηκαν τον Οκτώβριο του 2021.....	194
Σχήμα 6.162: Διακύμανση αισθητήρων NO ₂ με χρήση των συντελεστών που υπολογίστηκαν για τον Ιούλιο του 2021 και εφαρμόστηκαν τον Οκτώβριο του 2021.....	194
Σχήμα 6.163: Διακύμανση αισθητήρων NO ₂ με χρήση των συντελεστών που υπολογίστηκαν για τον Οκτώβριο του 2021 και εφαρμόστηκαν τον Οκτώβριο του 2021.....	194
Σχήμα 6.164: Διακύμανση του NO ₂ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Α.....	195
Σχήμα 6.165: Διακύμανση του O ₃ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Α.....	195
Σχήμα 6.166: Διακύμανση του NO ₂ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Β.....	195
Σχήμα 6.167: Διακύμανση του O ₃ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Β.....	195
Σχήμα 6.168: Διακύμανση του NO ₂ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Γ.....	196

Σχήμα 6.169: Διακύμανση του O ₃ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Γ.	196
Σχήμα 6.170: Διακύμανση του NO ₂ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Δ.	196
Σχήμα 6.171: Διακύμανση του O ₃ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Δ.	196
Σχήμα 7.1: Σταθμός παρακολούθησης ποιότητας αέρα με αισθητήρες αερίων ρύπων SpecSensor	204
Σχήμα 7.2: Απόκριση συγκέντρωσης μικροσωματιδίων (PM2.5).....	204
Σχήμα 7.3: Απόκριση συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO ₂).....	204
Σχήμα 7.4: Απόκριση συγκέντρωσης όζοντος (O ₃)	204
Σχήμα 7.5: Σταθμός παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους (LoRa).....	205
Σχήμα 7.6: Πληροφοριακό σύστημα απεικόνισης και αποθήκευσης δεδομένων (Cayenne)	205

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Όρια αέριων ρύπων NO ₂ , O ₃ , PM _{2.5} και PM ₁₀ , Ευρωπαϊκής Ένωσης και Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας.....	65
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά ηλεκτροχημικού αισθητήρα όζοντος (O ₃), χαμηλού κόστους, Alphasense OX-B431.....	83
Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά ηλεκτροχημικού αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO ₂), χαμηλού κόστους, Alphasense NO2-B43F.....	85
Πίνακας 5.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα μικροσωματιδίων (PMS5003).	87
Πίνακας 5.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά βαρομετρικού αισθητήρα (BME280).....	88
Πίνακας 5.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά ESP8266.....	90
Πίνακας 5.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά SIM808.	91
Πίνακας 5.7: Διασύνδεση μονάδων πλακέτας επέκτασης.	95
Πίνακας 5.8: Πακέτο δεδομένων json και το πλήθος των bytes που απαιτείται.	101
Πίνακας 5.9: Σημεία εγκατάστασης σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα, χαμηλού κόστους.....	103
Πίνακας 6.1 Τιμές συντελεστή θερμοκρασίας nT	109
Πίνακας 6.2: Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών (βαρομετρική πίεση, υγρασία, θερμοκρασία), μικροσωματιδίων (PM _{2.5}), σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3.....	126
Πίνακας 6.3: Μικροσωματίδια (PM _{2.5}) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2 (πρωτογενείς και διορθωμένες τιμές).....	129
Πίνακας 6.4: Διοξείδιο του αζώτου (NO ₂) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και πρωτογενών τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους N1, N2, N3.....	130
Πίνακας 6.5: Όζον (O ₃) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και πρωτογενών τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	130
Πίνακας 6.6: Διοξείδιο του άζωτου (NO ₂) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών (θερμοκρασία), σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3.....	131
Πίνακας 6.7: Όζον (O ₃) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών (θερμοκρασία), σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	131

Πίνακας 6.8: Μικροσωματίδια (PM _{2.5}) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).	131
Πίνακας 6.9: Μικροσωματίδια (PM _{2.5}) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).	132
Πίνακας 6.10: Διοξείδιο του αζώτου (NO ₂) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).	132
Πίνακας 6.11: Διοξείδιο του αζώτου (NO ₂) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).	132
Πίνακας 6.12: Όζον (O ₃) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).	133
Πίνακας 6.13: Όζον (O ₃) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).	133
Πίνακας 6.14: Μικροσωματίδια (PM _{2.5}) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών (θερμοκρασία, υγρασία), σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2.	133
Πίνακας 6.15: RMSE Διορθωμένων τιμών – τιμών αναφοράς και προβλέψιμων τιμών - τιμών αναφοράς.....	140
Πίνακας 6.16: Τιμές συντελεστών Kalman (A, B, C, D) για κάθε αισθητήρα αερίου.....	151
Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα MAD, διορθωμένων τιμών - τιμών αναφοράς και προβλεπόμενων τιμών - τιμών αναφοράς κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.....	152
Πίνακας 6.18: Αποτελέσματα MSE, διορθωμένων τιμών - τιμών αναφοράς και προβλεπόμενων τιμών - τιμών αναφοράς κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.....	152
Πίνακας 6.19: Αποτελέσματα MAPE, διορθωμένων τιμών - τιμών αναφοράς και προβλεπόμενων τιμών - τιμών αναφοράς κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.....	152
Πίνακας 6.20: Αποτελέσματα RMSE, διορθωμένων τιμών - τιμών αναφοράς και προβλεπόμενων τιμών - τιμών αναφοράς κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.....	152
Πίνακας 6.21: NO ₂ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των μη διορθωμένων τιμών από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	163
Πίνακας 6.22: NO ₂ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και του μέσου όρου και διάμεσου των μη διορθωμένων τιμών από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	163

Πίνακας 6.23: NO ₂ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με τη διακύμανση μέσου όρου, των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	164
Πίνακας 6.24: NO ₂ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με τη διακύμανση διάμεσου, των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	164
Πίνακας 6.25: O ₃ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των μη διορθωμένων τιμών από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	164
Πίνακας 6.26: O ₃ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και του μέσου όρου και διάμεσου των μη διορθωμένων τιμών από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	165
Πίνακας 6.27: O ₃ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με τη διακύμανση μέσου όρου, των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	165
Πίνακας 6.28: O ₃ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με τη διακύμανση διάμεσου, των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	165
Πίνακας 6.29: NO ₂ MLR μεταξύ των τιμών αναφοράς και της επίδρασης της ποσοστιαίας μεταβολής του μέσου όρου και του διάμεσου στις μη διορθωμένες τιμές από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	166
Πίνακας 6.30: MLR NO ₂ , μεταξύ τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών με τη διακύμανση μέσου όρου (N1, N2, N3).	167
Πίνακας 6.31: MLR NO ₂ , μεταξύ τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών με τη διακύμανση διάμεσου (N1, N2, N3).	167
Πίνακας 6.32: O ₃ MLR μεταξύ των τιμών αναφοράς και της επίδρασης της ποσοστιαίας μεταβολής του μέσου όρου και του διάμεσου στις μη διορθωμένες τιμές από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.	167
Πίνακας 6.33: MLR O ₃ , μεταξύ τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών με τη διακύμανση μέσου όρου (N1, N2, N3).	168
Πίνακας 6.34: MLR O ₃ , μεταξύ τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών με τη διακύμανση διάμεσου (N1, N2, N3).	168
Πίνακας 6.35: MAD μεταξύ, μη διορθωμένων τιμών, διορθωμένων τιμών με διακύμανση μέσου όρου, διορθωμένων τιμών με διακύμανση διάμεσου, σε κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.	169
Πίνακας 6.36: MSE μεταξύ, μη διορθωμένων τιμών, διορθωμένων τιμών με διακύμανση μέσου όρου, διορθωμένων τιμών με διακύμανση διάμεσου, σε κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.	169

Πίνακας 6.37: MAPE μεταξύ, μη διορθωμένων τιμών, διορθωμένων τιμών με διακύμανση μέσου όρου, διορθωμένων τιμών με διακύμανση διάμεσου, σε κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους....	170
Πίνακας 6.38: RMSE μεταξύ, μη διορθωμένων τιμών, διορθωμένων τιμών με διακύμανση μέσου όρου, διορθωμένων τιμών με διακύμανση διάμεσου, σε κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους....	170
Πίνακας 6.39: Μηνιαία αξιολόγηση των μετρήσεων O ₃ μέσω των μεθόδων RMSE, MAD, MAE.	185
Πίνακας 6.40: Μηνιαία αξιολόγηση των μετρήσεων NO ₂ μέσω των μεθόδων RMSE, MAD, MAE.	185
Πίνακας 6.41: Συντελεστές C1 & C2 για αισθητήρες αερίων NO ₂ και O ₃ και για τους τρεις σταθμούς χαμηλού κόστους σε όλη την υπό μελέτη χρονική περίοδο.	190
Πίνακας 6.42: Σύνοψη των αποτελεσμάτων συσχέτισης μεταξύ του οργάνου αναφοράς και των αισθητήρων χαμηλού κόστους ενώ οι συντελεστές C1 και C2 διατηρούνται σταθεροί και ίσοι με αυτούς που υπολογίστηκαν κατά την εγκατάσταση του σταθμού.....	191
Πίνακας 6.43: Σύνοψη των αποτελεσμάτων συσχέτισης μεταξύ του οργάνου αναφοράς και των αισθητήρων χαμηλού κόστους, ενώ οι συντελεστές C1 και C2 υπολογίζονται εκ νέου ανάλογα με τις συναρτήσεις γήρανσης (Εξισώσεις 10 και 11).	191
Πίνακας 6.44: Ετήσια κλιματολογική έκθεση για το 2021 (meteo.gr).....	193
Πίνακας 7.1: Τιμές συντελεστή συσχέτισης (R ²) ανά μέθοδο βελτίωσης.....	202

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Calibration	Βαθμονόμηση
Concentration	Συγκέντρωση
Counter electrode	Ηλεκτρόδιο μέτρησης
Database	Βάση δεδομένων
Drift	Ολίσθηση
Finite	Πεπερασμένη
Impulse	Κρουστική
Interface	Διεπαφή
Microparticles	Μικροσωματίδια
Nitrogen dioxide	Διοξείδιο του αζώτου
Ozone	Όζον
Reference electrode	Ηλεκτρόδιο αναφοράς
Reliability	Αξιοπιστία
Responce	Απόκριση
Sensor	Αισθητήρας
Sensitivity	Ευαισθησία
Variation	Μεταβολή
Working electrode	Ηλεκτρόδιο εργασίας

ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΑΕΠ	Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΚ	Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο
ΚΥΑ	Κοινή Υπουργική Απόφαση
ΠΑΑ	Πρόγραμμα Αγροτικής Ανάπτυξης
ΠΟΥ	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
ΦΕΚ	Φύλλα Εφημερίδας της Κυβέρνησης
ACF	Autocorrelation Function
ADC	Analog-to-Digital Converter
ΑΕ	Auxiliary Electrode
API	Application Programming Interface
AR	AutoRegressive
ARMA	AutoRegressive Moving-Average
CE	Counter Electrode
CPU	Central Processing Unit
DB	DataBase
EC	Electrochemical Sensors
EGD	European Green Deal
EU	European Union
FIR	Finite Impulse Response
GPIO	General-Purpose Input/Output
GPRS	General Packet Radio Services
GPS	Global Positioning System
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
I ² C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Eenvironment
ISB	Individual Sensor Boards
JSON	JavaScript Object Notation
LoRa	Long Range
LR	Linear Regression
MA	Moving Average

MAD	Mean Absolute Deviation
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MLR	Multiple Linear Regression
MOS	Metal Oxide Semiconductor
MSE	Mean Squared Error
NDIR	Non-dispersive Infrared
NLR	Non Linear Regression
NO ₂	Nitrogen dioxide
O ₃	Ozone
OTAP	Over the Air Programming
PID	Photo-Ionisation Detectors
PM	Particulate Matter
PPB	Parts Per Billion
PPM	Parts Per Million
PVC	PolyVinyl Chloride
RE	Reference Electrode
RMSE	Root Mean Square Error
RTC	Real-Time Clock
SPI	Serial Peripheral Interface
TCP	Transmission Control Protocol
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
UPS	Uninterruptible Power Supply
USART	Universal Synchronous and Asynchronous Receiver-Transmitter
WE	Working Electrode
WI-FI	Wireless Fidelity
WSN	Wireless Sensor Network

1. Εισαγωγή

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ποιότητα του αέρα και η βιομηχανοποίηση σε αστικά κέντρα είναι ένα σημαντικό θέμα που έχει εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου. Η ποιότητα του αέρα στα αστικά κέντρα, πριν την βιομηχανική επανάσταση, δεν αποτέλεσε πρόβλημα και άρα αντικείμενο μελέτης και διερεύνησης, καθώς η οικονομία βασιζόταν στην πρωτογενή παραγωγή, όπως την γεωργία και σε χειροτεχνίες, με αποτέλεσμα την περιορισμένη εκπομπή αέριων ρύπων. Η αύξηση της παγκόσμιας βιομηχανοποίησης επιδείνωσε σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα του αέρα και ανέδειξε ένα νέο πρόβλημα, τις επιπτώσεις και τις αιτίες, του οποίου ο άνθρωπος έπρεπε να αντιμετωπίσει.

Κατά την βιομηχανική επανάσταση τον 18^ο και 19^ο αιώνα, η χρήση των μηχανών γίνεται εντατική, τόσο για την παραγωγή προϊόντων, όσο και για την βελτίωση της ποιότητας ζωής (πηγές θέρμανσης κατοικιών, μετακίνηση, παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, κλπ.), με αποτέλεσμα την αυξημένη ανάγκη ενεργειακών πόρων, όπως άνθρακας και πετρέλαιο. Η αστυφιλία είχε ως αποτέλεσμα την συγκέντρωση πληθυσμού και τη δημιουργία μεγάλων αστικών κέντρων στα οποία αναπτύχθηκαν βιομηχανικές μονάδες προκαλώντας ραγδαία αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μεγάλες ευρωπαϊκές πόλεις, όπως το Λονδίνο το Μάντσεστερ, κατά τον 19^ο αιώνα παρουσίασαν σημαντική αύξηση ρύπανσης του αέρα, καθώς τα παράγωγα της καύσης του άνθρακα ήταν τοξικά και επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία.

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, με την περαιτέρω ανάπτυξη της βιομηχανίας και τους υψηλούς ρυθμούς παραγωγής, εντάθηκε η ζήτηση ενέργειας, με αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών αέριων ρύπων και τη δημιουργία αιθαλομίχλης ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Η ανάπτυξη της βιομηχανίας του αυτοκινήτου αποτέλεσε έναν ακόμη καθοριστικό παράγοντα αύξησης των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων. Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα εμφανίζονται περιβαλλοντικοί νόμοι και κανονισμοί με στόχο την προστασία της ποιότητας του αέρα, περιορίζοντας τις εκπομπές ρύπων από την βιομηχανία.

Μετά τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο, δόθηκε περαιτέρω προσοχή στην ποιότητα του αέρα, με χρήση καυσίμων χαμηλότερων εκπομπών και περιβαλλοντικών νόμων και κανονισμών στοχεύοντας στον έλεγχο των εκπομπών αέριων ρύπων για την προστασία του περιβάλλοντος. Το πρώτο παγκόσμιο συνέδριο για το περιβάλλον (Διάσκεψη της Στοκχόλμης) πραγματοποιήθηκε στην Στοκχόλμη το 1972 αναδεικνύοντας την ανάγκη για

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

μια παγκόσμια κίνηση για την προστασία του περιβάλλοντος. Στα τέλη της ίδιας δεκαετίας η ανησυχία για την ποιότητα του αέρα αναδεικνύει τις επιπτώσεις στην αλλαγή του κλίματος (φαινόμενο θερμοκηπίου).

Κατά τις δεκαετίες 1980 και 1990 παρουσιάζεται αύξηση της έρευνας και της ανάπτυξης εναλλακτικών πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και αιολική ενέργεια, με στόχο την βελτίωση του περιβάλλοντος και κατά συνέπεια της ποιότητας αέρα. Η πρόκληση στις μέρες μας είναι η εύρεση της ισορροπίας μεταξύ της βιομηχανικής ανάπτυξης και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, καθώς ουσιαστικά ζητήματα αποτελούν η χρήση καθαρών τεχνολογιών και η ανάπτυξη βιώσιμων πρακτικών. Αυτό αποτελεί τον πυλώνα για ένα ασφαλές και υγιές περιβάλλον στο μέλλον, συνδυάζοντας τις ανάγκες για ενέργεια και την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση.

Η ψηφιακή επανάσταση και η εξέλιξη της τεχνολογίας επιτρέπει την ανάπτυξη καθαρών τεχνολογιών, την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα με πιο ακριβείς μεθόδους και τη χρήση δεδομένων για τη λήψη αποφάσεων με στόχο τη μείωση της ρύπανσης. Αυτό αντικατοπτρίζει τη σταδιακή συνειδητοποίηση της ανθρωπότητας σχετικά με τις επιπτώσεις των βιομηχανικών δραστηριοτήτων στο περιβάλλον, καθώς και τις προσπάθειες για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων.

“We are living on this planet as if we had another one to go to.” Terri Swearingen, 1997

1.2 Σκοπός και Στόχοι της Διδακτορικής Διατριβής

Ο σκοπός της διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση της αξιοπιστίας των αισθητήρων χαμηλού κόστους για την μελέτη αερίων ρύπων και η ανάπτυξη εργαλείων βελτίωσης της ποιότητας των δεδομένων που αυτοί παράγουν. Για αυτό το σκοπό σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν σταθμοί παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους ενσωματώνοντας ηλεκτροχημικούς αισθητήρες αερίων ρύπων όζοντος (O_3), διοξειδίου του αζώτου (NO_2), και οπτικό αισθητήρα μικροσωματιδίων. Συμπληρωματικά οι σταθμοί παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους περιλαμβάνουν βαρομετρικό αισθητήρα, ενώ η μετάδοση των δεδομένων (μετρήσεων) γίνεται μέσω τεχνολογιών ασυρμάτων δικτύων. Οι σταθμοί παρακολούθησης ποιότητας αέρα συντοποθετήθηκαν με διακριβωμένα όργανα αναφοράς στις εγκαταστάσεις του Εθνικού Αστεροσκοπείου

Αθηνών και σε μικρή απόσταση από τις μετρητικές διατάξεις του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Για τους αισθητήρες μικροσωματιδίων χαμηλού κόστους, μελετήθηκε και επιχειρήθηκε ο εντοπισμός διορθωτικών συντελεστών των μετρήσεων χρησιμοποιώντας την θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του περιβάλλοντος, ενώ αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η συγκέντρωση μικροσωματιδίων επηρεάζεται από την βαρομετρική πίεση. Για τους αισθητήρες αερίων ρύπων κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης, προέκυψε μια συνάρτηση, ενώ παράλληλα μελετήθηκε και ο συντελεστής γήρανσης των αισθητήρων κατά το χρόνο λειτουργίας τους. Διαπιστώθηκε ότι η αλλοίωση των μετρήσεων λόγω γήρανσης είναι θεραπεύσιμη.

Στόχους της παρούσας διατριβής αποτέλεσαν οι τρόποι βελτιστοποίησης των μετρήσεων των αισθητήρων χαμηλού κόστους, από τις παραμένουσες αποκλίσεις που εμφανίζουν μετά την βαθμονόμησή τους σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς. Για την επίτευξη των στόχων εφαρμόστηκαν μοντέλα βελτιστοποίησης των μετρήσεων

(α) με εφαρμογή φίλτρου Kalman,

(β) με εφαρμογή φίλτρου πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (Finite Impulse Response - FIR),

(γ) με βάση την ποσοστιαία διακύμανση των μετρήσεων,

(δ) με μη γραμμική παλινδρόμηση.

1.3 Ένταξη του προβλήματος ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα στο θέμα της Διδακτορικής Διατριβής

Ο αέρας αποτελεί αγαθό για όλη την ανθρωπότητα. Μετά την δεύτερη βιομηχανική επανάσταση και την ανακάλυψη του ηλεκτρισμού και του πετρελαίου εμφανίζεται η ανάπτυξη της βιομηχανίας και των εργαλειομηχανών σε όλες τις γραμμές παραγωγής προϊόντων όπως σίδηρο για τη δημιουργία του σιδηρόδρομου, του αυτοκίνητου, των κινητήρων κλπ. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει παγκόσμια ανησυχία και προβληματισμός για τον αντίκτυπο της ποιότητας του αέρα στην ποιότητα ζωής και την ανθρώπινη υγεία ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, που ζουν και εργάζονται άνθρωποι [1], [2]. Αυτό το φαινόμενο έχει αναδείξει στην επιστημονική κοινότητα το καινούριο πεδίο έρευνας της παρακολούθησης της ποιότητας αέρα ανά γεωγραφική περιοχή, για την βελτίωση του τρόπου ζωής των πολιτών γενικότερα.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Ιδιαίτερα στις μεγάλες πόλεις πέραν της ανάπτυξης της βιομηχανίας άλλοι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα αέρα, είναι τα αυτοκίνητα, τα μέσα μαζικής μεταφοράς, αλλά και τα συστήματα θέρμανσης. Παγκόσμια, γίνεται προσπάθεια από κυβερνητικούς φορείς και οικολογικές οργανώσεις σχετικά με την μείωση των αερίων ρύπων και την ευαισθητοποίηση και ενημέρωση των πολιτών για την εφαρμογή μέτρων με στόχο την βελτίωση της ποιότητας αέρα της περιοχής που ζουν και εργάζονται.

Η καύση του πετρελαίου, των παραγώγων του, του ξύλου και γενικότερα της βιομάζας, σε μη ιδανικές συνθήκες, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ρύπων όπως μονοξειδίο και διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου, διοξείδιο του θείου, όζοντος και μικροσωματιδίων. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση ιδιαίτερη σημασία δίδεται στα μικροσωματίδια, στο όζον και στο διοξείδιο του αζώτου στην επιφάνεια του εδάφους, μιας και αυτά εμφανίζουν ιδιαίτερα επιβαρυντικό παράγοντα για τους έμβιους οργανισμούς [3]. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας η μόλυνση του αέρα προκαλεί ετησίως επτά (7) εκατομμύρια πρόωρους θανάτους παγκοσμίως. Η κακή ποιότητα αέρα είναι η αιτία νευρολογικών ασθενειών [4] και αναπνευστικών προβλημάτων που εμφανίζουν επιδείνωση από την παρουσία ρύπων όπως τα οξείδια του αζώτου [5]. Αυξημένες συγκεντρώσεις όζοντος σχετίζονται άμεσα με ορισμένες ψυχικές ασθένειες [6]. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον αντίκτυπο των αυξημένων συγκεντρώσεων των μικροσωματιδίων [7]. Τα μικροσωματίδια (Particulate matters - PM) έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία [8] [9] [10] [11] [12], και ιδιαίτερα σε ασθενείς με άσθμα, και στην αύξηση του καρκίνου του πνεύμονα και των καρδιαγγειακών προβλημάτων. Μικροσωματίδια με διάμετρο έως 10 μικρόμετρα (PM10) μπορούν να διεισδύσουν στα βρογχόλια των πνευμόνων, ενώ τα μικροσωματίδια με διάμετρο έως 2.5 μικρόμετρα (PM2.5) αποτελούν μεγαλύτερο κίνδυνο για την υγεία καθώς μπορούν να διεισδύσουν στους πνεύμονες και να εισέλθουν στην κυκλοφορία του αίματος [13]. Ο Διεθνής Οργανισμός Έρευνας για τον Καρκίνο (International Agency for Research on Cancer - IARC) κατέληξε στο συμπέρασμα το 2013, ότι τα μικροσωματίδια είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία νεοπλασιών [14].

Οι εκπομπές αερίων ρύπων συνδέονται άμεσα με τις ανθρώπινες κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες, και αυτό αποδεικνύεται από μια πρόσφατη μελέτη [15] μετά την εφαρμογή των περιορισμών μετακίνησης κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19 στις ΗΠΑ, όπου οι συγκεντρώσεις διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και μικροσωματιδίων (PM2.5) μειώθηκαν σημαντικά κατά τη διάρκεια εφαρμογής των περιοριστικών μέτρων

(περισσότερο από 25% για το NO₂). Αντίστοιχα, μειώσεις στις εκπομπές NO_x τουλάχιστον 15% εντοπίστηκαν μέσω παρατηρήσεων από δορυφόρο στην Κίνα, όπου οι μεγαλύτερες μειώσεις (έως και 50%) σημειώθηκαν σε μεγάλες πόλεις. Μετά το lockdown, παρατηρήθηκε ήπια ανάκαμψη των επιπέδων ρύπανσης [16]. Οι κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν στην ποιότητα αέρα είναι οι μεταφορές, από ξηρά [17], αέρα [18] και θάλασσα [19], όπως και η βιομηχανική ανάπτυξη, ιδιαίτερα σε μεγαλουπόλεις [20] [21].

Παγκοσμίως κυβερνητικοί οργανισμοί και επίσημα ερευνητικά κέντρα έχουν την ευθύνη για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα στην επικράτεια κάθε χώρας. Η χρήση συμβατικών σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα, βασίζεται σε πολύ ακριβά, αξιόπιστα και πολύπλοκα συστήματα αισθητήρων, με αποτέλεσμα τον περιορισμένο αριθμό σχετικών εγκαταστάσεων ανά πόλη - περιοχή, λόγω του υψηλού κόστους και της ανάγκης συντήρησης και υποστήριξης από εξειδικευμένο προσωπικό [22]. Επιπλέον, η χρήση τους είναι οικονομικά απαγορευτική για τον εντοπισμό των εστιών ρύπανσης σε μια περιοχή και την αποτύπωση της χωροχρονικής μεταβολής τους. Επιπλέον των σταθερών σημείων, υπάρχουν και κινητοί σταθμοί, με την ίδια τεχνολογία. Τέτοιοι σταθμοί είναι ακόμα λιγότεροι διαθέσιμοι, λόγω του υψηλού λειτουργικού τους κόστους, αφού απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό για τον χειρισμό τους και αντίστοιχα μέσα μεταφοράς. Ωστόσο, ο αριθμός των σταθερών και κινητών σταθμών συνήθως δεν επαρκεί για τη δημιουργία χάρτη απεικόνισης ποιότητας του αέρα με υψηλό επίπεδο ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο. Η βελτίωση της χωρικής και χρονικής ανάλυσης για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μιας περιοχής, είναι στις μέρες μας μία από τις αναδυόμενες επιστημονικές προκλήσεις. Ως συμπλήρωμα των (διακριβωμένων) σταθμών μέτρησης αναφοράς, τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί συστήματα αισθητήρων χαμηλού κόστους, που μπορούν να τοποθετηθούν σε πολλά σημεία, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο πιο λεπτομερή χαρτογράφηση της ρύπανσης του αέρα μιας περιοχής στην οποία διακριβωμένοι σταθμοί παρακολούθησης ποιότητας αέρα δεν υπάρχουν [23]. Με την ανάπτυξη αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, πολλές έρευνες έχουν επικεντρωθεί στην επίτευξη υψηλής ακρίβειας και αξιοπιστίας των λαμβανομένων μετρήσεων [24] [25]. Τέτοιος εξοπλισμός χαμηλού κόστους έχει αξιολογηθεί σύμφωνα με την απόδοσή του σε διαφορετικά περιβάλλοντα, εποχές και μετεωρολογικές συνθήκες [26] [27]. Τα κρίσιμα ζητήματα που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές είναι κυρίως, οι μέθοδοι διόρθωσης [28] και η μακροπρόθεσμη σταθερότητα στην αξιοπιστία των μετρήσεων [29].

1.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το πρόβλημα που καλείται να προσεγγίσει η διδακτορική διατριβή αποτελεί πεδίο ενδιαφέροντος για την παγκόσμια κοινότητα και ο στόχος αυτός επιχειρείται πολυδιάστατα. Ειδικότερα, διατίθενται σημαντικά ποσά για την χρηματοδότηση σχετικών ερευνητικών έργων, ερευνητικές ομάδες πανεπιστήμιων και ερευνητικών κέντρων μελετούν τη συμπεριφορά συστημάτων χαμηλού κόστους τόσο σε επίπεδο εργαστηριακών μετρήσεων όσο και μετρήσεων πεδίου. Παράλληλα, γίνεται έντονη ερευνητική προσπάθεια για την καταγραφή των αδυναμιών τέτοιων συστημάτων αλλά και την βελτίωση της απόδοσής τους, με εργαλεία ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και μηχανικής μάθησης. Αναφορικά με τα χρηματοδοτούμενα έργα, τέσσερις είναι οι βασικοί άξονες:

- Αναφορές σε έργα (project)
- Αναφορές μετρήσεων εργαστηρίου
- Αναφορές μετρήσεων πεδίου
- Αναφορές αξιολόγησης

Σήμερα υπάρχει μια αυξανόμενη τάση παγκοσμίως, στη συλλογή δεδομένων για την ποιότητα του αέρα χρησιμοποιώντας μη διακριβωμένους σταθμούς παρακολούθησης. Δεν υπάρχει ακόμη νομοθεσία σχετικά με τον τρόπο χρήσης αυτών των δεδομένων [23]. Υπάρχει ένα σύνολο έργων που αναφέρονται στην ποιότητα αέρα. Τα συστήματα ηλεκτροχημικών αισθητήρων χαμηλού κόστους μπορούν να παρέχουν αξιόπιστες μετρήσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης υπό πραγματικές συγκεντρώσεις περιβάλλοντος, σύμφωνα με το σύστημα ARISense [30]. Τα συγκριτικά αποτελέσματα αισθητήρων χαμηλού κόστους δείχνουν ότι μια παρόμοια λύση μπορεί να υιοθετηθεί για την αύξηση της πυκνότητας των υπαρχόντων σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα για την ποιότητα ζωής [31]. Το έργο Mosaic [32] όπως περιγράφεται, είναι ένα χαμηλού κόστους κινητό σύστημα ανίχνευσης σχεδιασμένο για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα. Στόχος ήταν η ανάπτυξη αισθητήρων ποιότητας αέρα στα κινούμενα αστικά λεωφορεία προκειμένου να αυξηθεί η κάλυψη του συστήματος. Το έργο CAIRSENSE [33] χρησιμοποιεί ηλεκτροχημικούς αισθητήρες για πέντε διαφορετικούς τύπους αερίου και αισθητήρες PM. Χρησιμοποιεί τοπολογία που είναι βασισμένη σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (Wireless Sensor Network - WSN) κατά την οποία ένας σταθμός βάσης εξυπηρετεί τέσσερις κόμβους μέτρησης αξιοποιώντας το πρωτόκολλο Xbee. Ο σχεδιασμός και η εφαρμογή συστημάτων παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, για την

επίτευξη εύκολα προσβάσιμων αποτελεσμάτων παρακολούθησης, μπορεί να είναι μια πιθανή λύση σχεδιασμένη για να βοηθήσει τις υπάρχουσες ανεπαρκείς μεθόδους χωρικής κάλυψης. Αναφορικά με τις μετρήσεις εργαστήριου, οι ερευνητές [34] παρουσιάζουν, σύμφωνα με τα αποτελέσματα, την αξιολόγηση ηλεκτροχημικών αισθητήρων, σε εργαστηριακό περιβάλλον και στο πεδίο. Στην εργασία [35] παρατηρήθηκε η υψηλή γραμμικότητα της συγκέντρωσης αερίου που μετρήθηκε από την τάση εξόδου του αισθητήρα σε σχέση με τα περιβαλλοντικά όργανα αναφοράς. Σε μια άλλη εργασία [36] εξηγούνται αναλυτικά σημαντικές λεπτομέρειες σχετικά με την επιλογή αισθητήρων και την αρχιτεκτονική του συστήματος.

Οι αισθητήρες αερίων χαμηλού κόστους θα πρέπει πρώτα να βαθμονομηθούν πριν χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις ποιότητας αέρα [37]. Η βαθμονόμηση σε εργαστηριακό περιβάλλον σε σχέση με την βαθμονόμηση στο πεδίο παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα, επομένως η βαθμονόμηση των αισθητήρων, αερίων ρύπων χαμηλού κόστους, γίνεται με την τοποθέτησή τους δίπλα σε όργανα αναφοράς, παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, για μια χρονική περίοδο μετρήσεων. Έτσι, η έξοδος του αισθητήρα και άλλες σχετικές περιβαλλοντικές μεταβλητές (π.χ. θερμοκρασία και σχετική υγρασία) σχετίζονται με τις πραγματικές τιμές συγκέντρωσης, όπως εμφανίζονται σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, σε παραμετρική παλινδρόμηση [33] [38] [39] και μοντέλα μη παραμετρικής παλινδρόμησης [30] [40] ή χρησιμοποιώντας τεχνικές μηχανικής μάθησης [41] [42]. Αναφορικά με τις μετρήσεις πεδίου, η δημιουργία μιας μαθηματικής σχέσης κατά την διόρθωση τιμών σε σχέση με τις τιμές αναφοράς αποτελεί ένα μοντέλο βαθμονόμησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων του αισθητήρα σε μέτρηση συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού ρύπου. Μια τέτοια προσέγγιση βαθμονόμησης αισθητήρα λειτουργεί γενικά καλά, για την πραγματοποίηση της απαιτείται η συντοποθέτηση των αισθητήρων χαμηλού κόστους δίπλα σε όργανα αναφοράς αν και υπάρχει ένα σύνολο άλλων παραμέτρων που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Πρώτον για την επίτευξη ενός ισχυρού μοντέλου βαθμονόμησης, είναι σημαντικό κατά τις συντοποθετημένες μετρήσεις να λαμβάνονται όλες οι περιβαλλοντικές συνθήκες και το πλήρες εύρος της συγκέντρωσης του μετρούμενου ρύπου, που ενδεχομένως θα λάβει ο αισθητήρας σε μια μεταγενέστερη μέτρηση, κατά το χρόνο λειτουργίας του [37]. Αυτή η απαίτηση μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω της επιλογής ενός κατάλληλου σταθμού αναφοράς και μιας μεγάλης σχετικά διάρκειας μετρήσεων κατά την συντοποθέσια [43], η οποία μπορεί να έρχεται σε αντίθεση με τη σχετικά μικρή διάρκεια ζωής των αισθητήρων

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους. Δεύτερον, δεν είναι σαφές για πόσο χρόνο μπορεί να εφαρμοστεί ένα μοντέλο βαθμονόμησης αισθητήρα που προέρχεται από μετρήσεις συντοποθεσίας και πόσο συχνά χρειάζεται να γίνεται επαναβαθμονόμηση του αισθητήρα.

Αναφορικά με τις αξιολογήσεις των μετρήσεων από αισθητήρες χαμηλού κόστους, πολλές ερευνητικές ομάδες προτείνουν διαφορετικά συστήματα μέτρησης της ποιότητας του αέρα [44] [45] [46]. Η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα κερδίζει την προσοχή σε αυτό που είναι γνωστό ως επιστήμη των πολιτών και αυτός είναι ο λόγος που όλο και περισσότεροι άνθρωποι συμμετέχουν ενεργά. Συγκριτικά αποτελέσματα [47] αισθητήρων χαμηλού κόστους δείχνουν ότι μια παρόμοια λύση μπορεί να υιοθετηθεί για την αύξηση της πυκνότητας των υπαρχόντων σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα για την ποιότητα ζωής σε μια αστική περιοχή.

Σχετικά με την βαθμονόμησή αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, πολλές ερευνητικές εργασίες αναφέρουν ότι η βαθμονόμηση τους μπορεί να γίνει με την συν εγκατάσταση τους δίπλα σε όργανα αναφοράς. Σε συστήματα IoT, η ερευνητική ομάδα [48] τοποθέτησε μια σειρά από τέσσερις ηλεκτροχημικούς αισθητήρες χαμηλού κόστους, και χρησιμοποιώντας μεθόδους βαθμονόμησης γραμμικής παλινδρόμησης, πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και μηχανικής μάθησης, το αποτέλεσμα της εφαρμογής των προαναφερομένων μεθόδων παρουσίασε εξαιρετική απόκριση των μετρήσεων. Σε μια άλλη εργασία [34], διερευνήθηκε η διαφορά μεταξύ πειραμάτων σε εργαστηριακό περιβάλλον και σε περιβάλλον πεδίου, για δύο διαφορετικούς τύπους ηλεκτροχημικών αισθητήρων αέριων ρύπων χαμηλού κόστους (όζοντος και διοξειδίου του αζώτου). Σε μια άλλη περίπτωση, ερευνητές μελέτησαν τη συσχέτιση δεδομένων μεταξύ δύο οπτικών αισθητήρων συγκέντρωσης σωματιδίων χαμηλού κόστους, σε σχέση με δεδομένα αναφοράς [49]. Η εργασία [50] αναφέρεται στη συμπεριφορά τριών αισθητήρων μικροσωματιδίων και ενός οργάνου αναφοράς σε εργαστηριακό περιβάλλον. Μια άλλη εργασία [51] παρουσιάζει την μελέτη μεγάλου αριθμού αισθητήρων χαμηλού κόστους από διαφορετικούς κατασκευαστές, σε ταυτόχρονη αξιολόγηση. Με τη ραγδαία ανάπτυξη αισθητήρων χαμηλού κόστους τα τελευταία χρόνια, πλήθος πολιτών που ενδιαφέρονται για την ποιότητα του αέρα της περιοχής τους, στρέφονται στην αγορά αισθητήρων χαμηλού κόστους. Επίσης, πολλές ερευνητικές εργασίες καταδεικνύουν την ανάπτυξη σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα με αισθητήρες χαμηλού κόστους [52] [53] [54] [55]. Συνάγεται ευθέως το συμπέρασμα ότι είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την αξιοπιστία των μετρήσεων ενός αισθητήρα χαμηλού κόστους. Επιστημονικές εργασίες [56] [57] [58]

έχουν αναφέρει διορθωτικές εξισώσεις σχετικά με τη μετρούμενη ποσότητα συγκέντρωσης, σχετικά με την ποιότητα του αέρα, για τα σωματίδια ή τους αέριους ρύπους. Οι συγκεντρώσεις PM_{2.5} επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, όπως η γεωγραφική θέση, οι εκπομπές ρύπων και οι μετεωρολογικές συνθήκες [59] [60] [61]. Οι μετεωρολογικοί παράγοντες σχετίζονται άμεσα με τη μεταφορά και τη συσσώρευση PM_{2.5} [62] [63]. Ορισμένες εργασίες αναφέρονται στη γεωγραφία του εδάφους της περιοχής σε σχέση με μετεωρολογικά δεδομένα όπως θερμοκρασία, υγρασία, βαρομετρική πίεση, κατεύθυνση ανέμου, ταχύτητα ανέμου. Σε άλλα υπάρχει διορθωτικός συντελεστής που αφορά μόνο τη θερμοκρασία και την υγρασία. Η μελέτη για τις χωρικές και χρονικές αλλαγές των συγκεντρώσεων μικροσωματιδίων (PM_{2.5}) δεν αφορά μόνο την τρέχουσα ρύπανση, αλλά σχετίζεται άμεσα με την πρόληψη της ρύπανσης από μικροσωματίδια (PM_{2.5}) [64] [65].

Οι χαμηλού κόστους αισθητήρες ατμοσφαιρικής ρύπανσης βασίζονται σε τεχνολογίες που υπόσχονται αυξανόμενες τάσεις κατασκευής διατάξεων χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσονται ραγδαία στην ανάλυση χωρικών και χρονικών δεδομένων, δίνοντας έτσι απαντήσεις σε επιστημονικά ερωτήματα και σε εφαρμογές τελικού χρήστη. Για το λόγο αυτό, ερευνητικές ομάδες και κυβερνητικοί οργανισμοί που ενδιαφέρονται για την ποιότητα του αέρα εστιάζουν στην ανάπτυξη των δικών τους προγραμμάτων για την αξιολόγηση και τη χρήση αισθητήρων χαμηλού κόστους [22]. Οι χαμηλού κόστους τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα έχουν επίσης αναγνωριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση καθώς έχουν προταθεί να συμπεριληφθούν στην οδηγία, ως μετρητικά συστήματα ποιότητας αέρα [66]. Η ερευνητική ομάδα στην εργασία [36] περιγράφει τον ρόλο των αισθητήρων χαμηλού κόστους ως το μέλλον της παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Πολλές ερευνητικές εργασίες αναφέρονται στην ανάπτυξη και εφαρμογή χαμηλού κόστους συστημάτων παρακολούθησης ποιότητας του αέρα, όπως και στην υλοποίηση χωρικών δικτύων κάλυψης [23] [67] [68] [69] [70] [46]. Αυτά τα άρθρα αναφέρονται σε χαρακτηρισμό και περιγραφή μιας συγκεκριμένης ομάδας αισθητήρων παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, όπως για την παρακολούθηση της συγκέντρωσης μικροσωματιδίων (PM) [68] [71] και για αέριους ρύπους [70] [72]. Σε άλλες ερευνητικές εργασίες αναφέρεται η ευπάθεια που εμφανίζουν οι αισθητήρες χαμηλού κόστους στις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η υγρασία και η θερμοκρασία [73] [74] καθώς έχουν δημοσιευθεί εξισώσεις διόρθωσης [56] [75] για κάθε κατηγορία αισθητήρων.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Μια τεχνική φίλτραρίσματος Kalman (KFT) [76] εισήχθη για την πρόβλεψη της ροής της κυκλοφορίας με περιορισμένα δεδομένα εισόδου. Το αποτέλεσμα τεκμηρίωσε την καταλληλότητα της δεδομένης πρόβλεψης ακόμη και με περιορισμένα δεδομένα. Στην εργασία [77] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την πρόβλεψη της κατάστασης μιας μπαταρίας, χρησιμοποιώντας ένα εκτεταμένο φίλτρο Kalman (EKF). Σε αυτή την περίπτωση, το εκτεταμένο μοντέλο φίλτρου Kalman εισήγαγε μια ιδέα για τη βελτίωση της ακρίβειας. Μια άλλη εργασία [78] παρουσιάζει τη μελέτη εφαρμογής του φίλτρου Fuzzy Kalman. Το φίλτρο Fuzzy Kalman είναι ένας συνδυασμός του φίλτρου Kalman με την ασαφή θεωρία. Αυτή η μεθοδολογία παρουσιάζει την εκτίμηση της μεταβλητής κατάστασης του μη ισοθερμικού αντιδραστήρα συνεχούς ανάδευσης (Continuous Stirred Tank Reactor - CSTR). Στην εργασία [79] ένα γραμμικό δυναμικό φίλτρο Kalman προτείνεται για την πρόβλεψη της ηλιακής ενέργειας και της φωτοβολταϊκής παραγωγής, εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο Expectation-Maximization (EM) και τον αλγόριθμο αυτοπαλινδρόμησης (AR), σύμφωνα με μοντέλα αρχικοποίησης και πιθανοτήτων. Επιπλέον, η μελέτη [80] της εφαρμογής του φίλτρου Kalman, ανέπτυξε ένα εκτεταμένο φίλτρο Kalman για την εκτίμηση της μέτρησης του μη γραμμικού μοντέλου ενός τρισδιάστατου συστήματος παρακολούθησης ραντάρ. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η υπόθεση που έγινε κατά τη σύνθεση του φίλτρου, εμφανίζει ικανοποιητικό αποτέλεσμα, στον υπολογισμό της μέτρησης που δεν είναι γραμμικός.

Στην Ευρώπη, οι χαμηλού κόστους τεχνολογίες για την παρακολούθηση του αέρα έχουν αναγνωριστεί και έχουν προταθεί ώστε να συμπεριληφθούν στην οδηγία για την ποιότητα του αέρα στα κράτη – μέλη της ευρωπαϊκής ένωσης. Υπάρχει ένας εκτενής όγκος έρευνας σε αυτόν τον τομέα ο οποίος παρέχει πολύτιμες γνώσεις. Η ερευνητική ομάδα [36] περιγράφει τον ρόλο των αισθητήρων χαμηλού κόστους στο μέλλον, για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα. Πολλές εργασίες ερευνητικών ομάδων αναφέρουν την ανάπτυξη εφαρμογών για την ποιότητα αέρα, καθώς παρουσιάζουν, τα συστήματα παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, και των δικτύων που έχουν υλοποιήσει [23], [46] [67], [68], [70].

Η εργασία [81] παρουσιάζει τα αποτελέσματα της μη γραμμικής παλινδρόμησης σε δεδομένα μικροσωματιδίων χαμηλού κόστους από αισθητήρες, εφαρμόζοντας πιθανοτικά gradient boosted decision trees (GBDT) με αποτέλεσμα την άμεση βαθμονόμηση των ακατέργαστων δεδομένων πεδίου των αισθητήρων PM2.5. Η χρήση πιθανοτικού GBDT βελτιώνει τις ακρίβειες και την κατανομή των σημείων σε σύγκριση με το γραμμικό

μοντέλο. Στην ερευνητική εργασία [82] η εφαρμογή μοντέλων βαθμονόμησης με τη χρήση μη γραμμικών αλγορίθμων ενίσχυσης μηχανικής μάθησης, συγκεκριμένα του Stochastic Gradient Boosting Regressor, απέδωσε καλύτερα αποτελέσματα από τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και τις προσεγγίσεις γραμμικής παλινδρόμησης.

Πολλές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί από ερευνητικές ομάδες για τη βαθμονόμηση των αισθητήρων ποιότητας του αέρα όπως, γραμμική παλινδρόμηση (LR), η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (MLR), τυχαίο δάσος (RF), τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN), μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης (SVM), παλινδρόμηση διανυσμάτων υποστήριξης (SVR) [52]. Οι μέθοδοι LR και MLR είναι συνήθως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για τη βαθμονόμηση στα δεδομένα από αισθητήρες χαμηλού κόστους, σε αυτές τις μεθόδους χρησιμοποιούνται συμμετρικές μεταβλητές κατά τη βαθμονόμηση για τη βελτίωση των μετρήσεων. Ωστόσο, η LR παρουσιάζει χαμηλότερο βαθμό συσχέτισης R^2 και θα πρέπει να αποφεύγεται η εφαρμογή της σε αισθητήρες αερίων [83] [84]. Οι μέθοδοι RF, ANN, SVM, SVR, είναι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης με επίβλεψη (supervised learning) και παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση του συντελεστή συσχέτισης R^2 , αλλά το μειονέκτημα είναι ότι στους περισσότερους αισθητήρες η εφαρμογή αυτών των μεθόδων απαιτεί μεγάλο όγκο δεδομένων για την εκπαίδευση κάθε μοντέλου [85] [86].

Η ανάπτυξη και εγκατάσταση συσκευών χαμηλού κόστους γίνεται όλο και πιο σημαντική [70] ως μερική λύση στο πρόβλημα της συμπληρωματικής κάλυψης μιας περιοχής. Αυτές οι συσκευές δεν στοχεύουν να αντικαταστήσουν τα εμπορικά επιστημονικά όργανα, αλλά να αποτελέσουν μια πρόσθετη πηγή πληροφοριών για την ποιότητα του αέρα [87] υπό τον όρο ότι τα αποτελέσματά τους είναι αξιόπιστα. Τέτοια συστήματα ανίχνευσης έχουν δοκιμαστεί από πολλές ερευνητικές ομάδες [30] [88] [74] [89] [90]. Εμπορικά, διατίθενται πολλοί διαφορετικοί τύποι αισθητήρων αερίου χαμηλού κόστους [91]. Οι πιο συνηθισμένοι είναι οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες καθώς μπορούν να μετρήσουν τις συγκεντρώσεις πολλών αερίων. Επίσης, οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες παρουσιάζουν καλή ευαισθησία και γρήγορο χρόνο απόκρισης [92]. Η χρήση ηλεκτροχημικών αισθητήρων για μετρήσεις αέρα περιβάλλοντος απαιτεί χαμηλότερο εύρος μετρήσεων συγκέντρωσης σε σχέση με την ανίχνευση διαρροών σε μια βιομηχανική περιοχή και αυτές οι μετρήσεις πρέπει να είναι ακριβείς [93]. Για την ανάλυση χαμηλότερων συγκεντρώσεων, πρέπει να υπάρχει ένα μοντέλο που θα περιλαμβάνει εξωγενείς παράγοντες όπως θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, που επηρεάζουν το ηλεκτρόδιο εργασίας ενός ηλεκτροχημικού αισθητήρα [94], ώστε οι εξαγόμενες τιμές να είναι ακριβείς.

Ερευνητικές μελέτες έδειξαν ότι τα δεδομένα παρακολούθησης ποιότητας αέρα, από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους έχουν, σε πολλές περιπτώσεις, χαμηλή αξιοπιστία σε σύγκριση με τα όργανα αναφοράς [92] [95] [52] [96] [97] [41]. Αυτές οι μελέτες έχουν δείξει ότι οι αισθητήρες χαμηλού κόστους επηρεάζονται από περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία του αέρα, η σχετική υγρασία και από παρεμβολές με άλλα αέρια (διασταυρούμενη ευαισθησία), αλλά και από τα στοιχεία της κατασκευής του αισθητήρα όπως ο χρόνος θέρμανσης, το κέρδος και η αρχική βαθμονόμηση κατασκευαστή [98] [99]. Από πολλές ερευνητικές ομάδες προτείνεται ως μέθοδος αξιολόγησης των αισθητήρων χαμηλού κόστους, η τοποθέτησή τους στο πεδίο δίπλα σε όργανα αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο τα δεδομένα των αισθητήρων χαμηλού κόστους μπορούν να συγκριθούν και να βαθμονομηθούν σε σχέση με τα δεδομένα που λαμβάνονται από τα όργανα αναφοράς [100] [101] [40] [39] [102]. Η μέθοδος αυτή οδηγεί σε πιο ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα, επειδή λαμβάνονται υπόψη οι περιβαλλοντικές παράμετροι όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, σε αντίθεση με την αντίστοιχη διαδικασία που διεξάγεται σε εργαστηριακό περιβάλλον. Η αρχή λειτουργίας ενός ηλεκτροχημικού αισθητήρα περιγράφεται ως μια χημική αντίδραση μεταξύ ενός ηλεκτροδίου σε ένα υγρό (καταλύτη) μέσα στον αισθητήρα και του περιβαλλοντικού αέρα [103]. Το μειονέκτημα είναι ότι απαιτείται επαναβαθμονόμηση του αισθητήρα σε τακτά χρονικά διαστήματα όταν είναι εγκατεστημένος στο περιβάλλον (πεδίο), όπως και ότι οι αισθητήρες πρέπει να αντικαθίστανται σε διαστήματα 1-2 ετών λόγω της φθοράς των χημικών στοιχείων τους [104].

Τέλος, η περιορισμένη δυνατότητα μεταφοράς ενός σταθμού μέτρησης με συγκεκριμένο μοντέλο βαθμονόμησης σε νέα τοποθεσία μπορεί να είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Αυτό σημαίνει ότι η μετεγκατάσταση των βαθμονομημένων αισθητήρων μπορεί να οδηγήσει σε ποιότητα λαμβανομένων δεδομένων που διαφέρουν από αυτά κατά τη συντοποθεσία [41].

1.5 Συνεισφορά της διατριβής

Η συνεισφορά της παρούσας διατριβής στην επιστημονική γνώση, και ιδιαίτερα στον τομέα της μηχανικής, περιλαμβάνει:

(α) την σχεδίαση και ανάπτυξη συστήματος βασισμένου σε ελεύθερο και ανοικτό υλισμικό και λογισμικό παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους,

(β) τη μεθοδολογία βαθμονόμησης τόσο των ηλεκτροχημικών αισθητήρων αέριων ρύπων όσο και των οπτικής τεχνολογίας αισθητήρων μικροσωματιδίων, με εφαρμογή εξισώσεων διόρθωσης.

Για την επίτευξη του (β) στη συγκεκριμένη διατριβή επιλέχθηκε η συντοποθέτηση των διατάξεων που δημιουργήθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής κοντά σε πιστοποιημένα όργανα μετρήσεων στην περιφέρεια της Αττικής. Ο λόγος για την επιλογή αυτή είναι ότι εξασφαλίζεται με τον τρόπο αυτό η αξιοποίηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων οι οποίες δεν είναι δυνατό να αξιοποιηθούν στο αποστειρωμένο περιβάλλον μιας εργαστηριακής υποδομής, αλλά είναι απαραίτητες για τη διόρθωση των αρχικών μετρήσεων (raw data) από τους χαμηλού κόστους αισθητήρες. Επιπλέον, στόχο της έρευνας αποτέλεσε η μοντελοποίηση της γήρανσης και η χρήση μοντέλων για διόρθωση των μετρήσεων από γηράσκοντες αισθητήρες. Συγκεκριμένα, έγινε αναφορά στη μελέτη συμπεριφοράς και διόρθωσης μετρήσεων κατά την γήρανση (διάρκεια ζωής) κατά τη λειτουργία των αισθητήρων με αποτέλεσμα την ποσοτικοποίηση της επίδρασης του χρόνου λειτουργίας στην αξιοπιστία των μετρήσεων των ηλεκτροχημικών αισθητήρων αέριων ρύπων. Επιπρόσθετα, μοντέλα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος εφαρμόστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής για την διόρθωση των αρχικών μετρήσεων, με στόχο την απόκτηση αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα απλής παλινδρόμησης (LR) και πολλαπλής παλινδρόμησης (MLR), αυτοπαλινδρόμησης (AR), κινούμενου μέσου όρου (MA), αυτοπαλινδρόμησης - κινούμενου μέσου όρου (ARMA), καθώς και μοντέλα εκτίμησης όπως φίλτρα, πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (F.I.R) και φίλτρα Kalman.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

2. Ατμοσφαιρική ρύπανση

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτενής αναφορά σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση, επεξηγώντας την εννοιολογική σημασία, το υφιστάμενο νομικό καθεστώς, τα διατυπωμένα όρια των κύριων ρύπων και τις επιπτώσεις στον άνθρωπο και το οικοσύστημα γενικότερα. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην ευρωπαϊκή νομοθεσία, όπως και στη νομοθεσία που έχει θεσμοθετηθεί στη χώρα μας, καθώς η Ελλάδα αποτελεί κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Επίσης ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στους αέριους ρύπους διοξειδίου του αζώτου, όζοντος, και των μικροσωματιδίων.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αφορά στην παρουσία επιβλαβών ουσιών στον αέρα του περιβάλλοντος. Αυτές οι ουσίες μπορεί να είναι φυσικές, όπως η γύρη και η σκόνη, ή ανθρωπογενείς, όπως ο καπνός από εργοστάσια, τα καυσαέρια των οχημάτων, οι εκπομπές από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, κ.λπ. Η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, επίσης βλάπτει το περιβάλλον, τις καλλιέργειες και τα δάση, μολύνει πηγές νερού και προκαλεί όξινη βροχή. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, κυβερνήσεις και οργανισμοί σε όλο τον κόσμο λαμβάνουν μέτρα για τη μείωση των εκπομπών ρύπων. Σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας αναφέρει ότι «περιορίζεται σε καταστάσεις στις οποίες η εξωτερική περιβαλλοντική ατμόσφαιρα περιέχει υλικά σε συγκέντρωση η οποία είναι επιβλαβής για τους ανθρώπους και το γύρω περιβάλλον τους». Οι αέριοι ρύποι, μπορεί να είναι είτε ορατοί είτε μη ορατοί λόγω του μεγέθους τους. Η ρύπανση μπορεί να είναι πρωτογενής, η οποία δημιουργείται από την ίδια την πηγή (οχήματα, πηγές θέρμανσης, καύση ξύλου), είτε δευτερογενής η οποία δημιουργείται από την αλληλεπίδραση των πρωτογενών ρύπων στον αέρα με άλλα στοιχεία. Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα σημαντικό παγκόσμιο πρόβλημα που απαιτεί μια πολύπλευρη προσέγγιση για την αντιμετώπιση, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης των εκπομπών και παράλληλα την προώθηση της καθαρής ενέργειας και την εφαρμογή πολιτικών και πρακτικών για την ενθάρρυνση της αειφόρου ανάπτυξης.

2.1 Ευρωπαϊκή νομοθεσία για την ποιότητα αέρα

Η εκβιομηχανοποίηση και η αστικοποίηση αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα σήμερα, ως προς την ατμοσφαιρική ρύπανση [105]. Τις τελευταίες δεκαετίες, στην Ευρώπη [106], έχουν μειωθεί οι εκπομπές αερίων ρύπων, πράγμα που οδήγησε στη βελτίωση της ποιότητας αέρα. Παρόλα αυτά, οι συγκεντρώσεις αερίων ρύπων παραμένουν

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

σε υψηλά επίπεδα οπότε το πρόβλημα της περιβαλλοντικής ρύπανσης του αέρα παραμένει ενεργό. Οι υπερβάσεις των ορίων των προτύπων ποιότητας αέρα παρατηρείται κυρίως σε μεγάλες πόλεις, με βασικότερους, ως προς την επικινδυνότητα ρύπων, για την ανθρώπινη υγεία, τα μικροσωματίδια, το διοξείδιο του αζώτου και το όζον. Η έκθεση του ανθρώπου για μεγάλη χρονική διάρκεια ή σε μεγάλη συγκέντρωση των προαναφερόμενων ρύπων, αποτελεί επιβαρυντικό παράγοντα για την υγεία. Συνδέεται στενά με ένα ευρύ φάσμα χρόνιων ασθενειών, συμπεριλαμβανομένων των καρδιαγγειακών παθήσεων [107] [108] [109], των πνευμονικών παθήσεων [110] [111] [112] [113], πολλών τύπων καρκίνου [109] [114] [115] [116]. Επιπλέον διερευνάται η επίδραση σε καταστάσεις που επηρεάζουν τις γνωστικές ικανότητες και το κεντρικό νευρικό σύστημα [117] [118] [119]. Ο οικονομικός αντίκτυπος των παραπάνω είναι επίσης υπολογίσιμος αφού παγκοσμίως, εκτιμάται ότι οι πολίτες δαπανούν το 2-5% του συνολικού ΑΕΠ για τη θεραπεία ασθενειών που συνδέονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση [120]. Η ατμοσφαιρική ρύπανση επιδεινώνεται από την συνεχώς αυξητική τάση αστικοποίησης, εκτιμώντας ότι το 96% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε περιοχές όπου υπερβαίνει τα ασφαλή όρια [121]. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, περίπου το 90% των ευρωπαϊκών πολιτών που ζει σε μεγάλες πόλεις εκτίθεται, σε εκτός ορίων συγκεντρώσεις ρύπων. Η βελτίωση της ποιότητας του αέρα δεν επιτυγχάνεται μόνο με τη μείωση των ανθρωπογενών εκπομπών ρύπων τοπικά, αφού δεν παρατηρείται γραμμική σχέση μεταξύ της μείωσης εκπομπών και της αντίστοιχης δραστηριότητας. Αυτό αποδίδεται στη μεταφορά ρύπων σε μεγάλες αποστάσεις, που μπορεί να έχει διαστάσεις από χώρα σε χώρα. Πάρα ταύτα η απαίτηση συγκεκριμένης προσπάθειας με στόχο την μείωση των εκπομπών για την προστασία της ανθρώπινης υγείας αποτελεί για όλους κοινή μέριμνα.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση [122] έχει θέσει σε ισχύ μακροπρόθεσμα σχέδια για την μείωση των επιπέδων της αέριας ρύπανσης, με στόχο να εξαλειφθούν οι επιπτώσεις και οι κίνδυνοι τόσο στην ανθρώπινη υγεία όσο και στο περιβάλλον. Ειδικότερα η ΕΕ εφαρμόζει νομοθεσία, σε συνεργασία με τομείς που ευθύνονται για την ατμοσφαιρική ρύπανση, όπως και με οργανισμούς περιβάλλοντος κάθε χώρας, καθώς και σε ερευνητικό επίπεδο μέσω πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων. Στόχος της ΕΕ είναι η μείωση της αέριας ρύπανσης με την μείωση των εκπομπών και ο καθορισμός ορίων για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας αέρα.

Η Ελλάδα αποτελεί χώρα μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας [123] ισχύουν τα νομοθετημένα όρια ποιότητας αέρα, όπως

έχουν καθιερωθεί σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Τα νομοθετημένα όρια και οι στόχοι αφορούν τους ρύπους διοξείδιο του θείου, αιωρούμενα σωματίδια (PM10 και PM2.5), διοξείδιο του αζώτου, όζον, μονοξείδιο του άνθρακα, βενζόλιο, μόλυβδος, αρσενικό, κάδμιο, νικέλιο και βενζο(a)πυρένιο.

Η νομοθεσία που εφαρμόζεται στη χώρα μας για την ποιότητα του αέρα είναι:

- Οδηγία 2008/50/EK για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη (ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/E103, ΦΕΚ 488B/30.3.11) [124].
- Οδηγία 2004/107/EK σχετικά με το αρσενικό, το κάδμιο, τον υδράργυρο, το νικέλιο και τους πολυκυκλικούς υδρογονάνθρακες στον ατμοσφαιρικό αέρα (ΚΥΑ ΗΠ 22306/1075/E103, ΦΕΚ 920B/8.6.07) [125].
- Οδηγία 2015/1480/EK για την τροποποίηση ορισμένων παραρτημάτων των οδηγιών του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου 2004/107/EK και 2008/50/EK, 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 1311B/13.4.17) [126].
- ΚΥΑ 70601 (ΦΕΚ 3272B/23.12.13), Βραχυπρόθεσμα σχέδια δράσης για την αντιμετώπιση ατμοσφαιρικής ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια [127].
- ΚΥΑ 11824 (ΦΕΚ 369B/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/E103, ΦΕΚ 488B/30.3.11 [128].

2.2 Αέριοι ρύποι (NO₂, O₃, PM)

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει κάνει μια κεντρική προσπάθεια [106] να αντιστοιχίσει τους κυριότερους ρύπους με συγκεκριμένες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Στη συνέχεια καταγράφονται και ομαδοποιούνται οι αντίστοιχοι κίνδυνοι για τους ρύπους που καταγράφουν τα συστήματα που σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Το όζον (O₃), ως ρύπος, δημιουργείται από τη χημική αντίδραση μεταξύ διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) κατά την έκθεση στο ηλιακό φως. Μπορεί να επιβαρύνει το περιβάλλον τόσο σε θερμές όσο και σε ψυχρές κλιματολογικές συνθήκες [129]. Οι πηγές του όζοντος προέρχονται από την εκπομπή χημικών διαλυτών,

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

ηλεκτρικών εκκενώσεων υψηλής τάσης (σπινθηρισμός), και ατμών βενζίνης. Μπορεί να προκαλέσει φλεγμονή των πνευμόνων όπως και στένωση των αεραγωγών [130]. Τα άτομα με υποκείμενα νοσήματα, τα παιδιά και οι ηλικιωμένοι αποτελούν ομάδες επικινδυνότητας για τον ρύπο αυτό [131].

Το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) είναι ένα εξαιρετικά αντιδραστικό αέριο που σχετίζεται με την ανάπτυξη του όζοντος (O_3) και των μικροσωματιδίων. Στον αέρα, το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), προέρχεται κυρίως από την καύση. Μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα και φλεγμονή των αεραγωγών. Οι ασθματικοί, τα παιδιά και οι μεγαλύτεροι ενήλικες αποτελούν ομάδες υψηλότερου κινδύνου από αυτόν τον ρύπο [132].

Τα μικροσωματίδια (PM) αποτελούνται από ένα μείγμα από στερεά και υγρά σωματίδια τα οποία ενσωματώνονται στον αέρα, και περιλαμβάνουν οξέα, οργανικές χημικές ουσίες, αιθάλης, μετάλλων, εδάφους και σκόνης. Τα μικροσωματίδια κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το μέγεθός τους (διάμετρος μικροσωματιδίου). Ειδικότερα ονομάζονται PM10 με διάμετρο από 2.5 μm έως 10 μm , PM2.5 με διάμετρο κάτω από 2.5 μm και PM1.0 με διάμετρο κάτω από 1 μm [133]. Τα PM10 εισέρχονται στον ανθρώπινο οργανισμό και επηρεάζουν τη ρινική και στοματική κοιλότητα, τον φάρυγγα, τον λάρυγγα και την άνω τραχεία. Τα PM2.5 είναι λεπτά εισπνεόμενα σωματίδια που σχηματίζουν ιζήματα στην επιφάνεια των επιθηλιακών κυττάρων στα βρογχίδια και τις κυψελίδες του πνεύμονα. Τα PM1.0 μπορούν να εισέλθουν στο αίμα και στα εσωτερικά όργανα, συμπεριλαμβανομένης της καρδιάς και του εγκεφάλου [134] [135]. Τα PM2.5 και τα PM1.0 μπορούν να οδηγήσουν σε πνευμονική μόλυνση και να προκαλέσουν αγγειακή και ενδοθηλιακή δυσλειτουργία, αρρυθμίες της καρδιάς ενώ επηρεάζουν και την πήξη του αίματος [136]. Τα μικροσωματίδια (PM) εκτιμάται ότι προκαλούν 3,3 εκατομμύρια θανάτους ετησίως παγκοσμίως [137]. Τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι, τα άτομα με καρδιακές ασθένειες και πνευμονοπάθειες είναι ομάδες υψηλού κινδύνου για ρύπους PM [132].

Η Ευρωπαϊκή Ένωση [138], έχει θέσει μακροπρόθεσμους στόχους μέχρι το 2050, για μηδενική ρύπανση. Επίσης αναθεωρεί τα συγκεκριμένα πρότυπα σύμφωνα, με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal – EGD), ώστε να συμβαδίζει περισσότερο με τις συστάσεις του ΠΟΥ. Η υλοποίηση των μακροπρόθεσμων στόχων βασίζεται σε τρεις άξονες.

- Πρότυπα ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα,
- Μείωση των εκπομπών ατμοσφαιρικής ρύπανσης

- Πρότυπα εκπομπών για βασικές πηγές ρύπανσης.

Τέλος, έχει θέσει ως στόχο τη βελτίωση της συνολικής νομοθεσίας της ΕΕ για καθαρό αέρα, με βάση τα διδάγματα που έχουν αντληθεί από παλαιότερες αξιολογήσεις ποιότητας αέρα των ευρωπαϊκών πόλεων.

2.3 Όρια αέριων ρύπων (NO₂, O₃, PM)

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει, σύμφωνα με την οδηγία ΠΑΑ [124] του 2008, οριακές τιμές συγκέντρωσης των προαναφερόμενων ρύπων, αντίστοιχα ο ΠΟΥ έχει εκδώσει κατευθυντήριες γραμμές [139] σχετικά με τα όρια της αέριας ρύπανσης σε σχέση με τις επιπτώσεις που έχουν στην υγεία.

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τα όρια, όπως έχουν τεθεί από την Ε.Ε. και τον ΠΟΥ, για τους αέριους ρύπους NO₂, O₃, PM_{2.5} και PM₁₀.

Πίνακας 2.1: Όρια αέριων ρύπων NO₂, O₃, PM_{2.5} και PM₁₀, Ευρωπαϊκής Ένωσης και Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας

Ρύπος	Περίοδος	Κατευθυντήριες γραμμές Π.Ο.Υ μg/m ³	Οριακές τιμές οδηγίας ΠΑΑ της Ε.Ε. μg/m ³	Αριθ. φορών ετησίως επιτρεπόμενης υπέρβασης των προτύπων της Ε.Ε.
NO ₂	1 έτος	40	40	-
	1 ώρα	200	200	18
O ₃	8 ώρες	100	120	25
PM ₁₀	1 έτος	20	40	-
	24 ώρες	50	50	35
PM _{2.5}	1 έτος	10	25	-
	24 ώρες	25	-	-

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

3. Τεχνολογίες αισθητήρων αερίων ρύπων

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στους αισθητήρες αερίων ρύπων, αναλύοντας τα βασικά χαρακτηριστικά τους, τις κατηγορίες αισθητήρων που υπάρχουν σύμφωνα με την τεχνολογία κατασκευής και την αξιολόγησή τους σύμφωνα με τις επιδόσεις τους. Ένας αισθητήρας αερίου ρύπου είναι μια συσκευή που ανιχνεύει την παρουσία συγκεκριμένου αερίου ρύπου στο περιβάλλον. Λειτουργεί μετρώντας τη συγκέντρωση μορίων αερίου στον αέρα ή άλλο μέσο και μετατρέπει τη μέτρηση σε ηλεκτρικό σήμα. Ένας αισθητήρας αποτελείται από την ενεργό επιφάνεια, τον μετατροπέα σήματος, και ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα. Η μέτρηση συγκέντρωσης του αερίου στόχου επιτυγχάνεται από μια σειρά διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση του αερίου στόχου και της ενεργού επιφάνειας του αισθητήρα. Οι μορφές αλληλεπίδρασης μεταξύ ενεργού επιφάνειας και αερίου στόχου δύναται να γίνονται μέσω χημικής ή και ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων αερίων που μπορούν να ανιχνεύσουν όζον, μονοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υδρογόνο, διοξείδιο του αζώτου, κ.α. Μερικοί αισθητήρες έχουν σχεδιαστεί ώστε να είναι ικανοί να ανιχνεύσουν ένα συγκεκριμένο αέριο, ενώ άλλοι μπορούν να ανιχνεύσουν πολλαπλά αέρια (cross sensitive). Οι αισθητήρες αερίων ρύπων χρησιμοποιούνται συνήθως σε βιομηχανικές και εμπορικές εγκαταστάσεις για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και την ανίχνευση διαρροών αερίου, οι οποίες μπορεί να αποτελούν κίνδυνο για την ασφάλεια. Χρησιμοποιούνται επίσης σε κατοικίες για την ανίχνευση του μονοξειδίου του άνθρακα, το οποίο είναι άχρωμο και άοσμο αέριο που είναι θανατηφόρο σε υψηλές συγκεντρώσεις. Οι αισθητήρες αερίων ρύπων βασίζονται σε διάφορες τεχνολογίες, και συμπεριλαμβάνουν τους ηλεκτροχημικούς, τους υπέρυθρους και τους αισθητήρες ημιαγωγών. Κάθε τεχνολογία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της όσον αφορά την ακρίβεια, την ευαισθησία, τον χρόνο απόκρισης και το κόστος. Οι αισθητήρες αερίων παίζουν κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση ενός ασφαλούς και υγιούς περιβάλλοντος και η χρήση τους είναι πιθανό να γίνεται όλο και πιο σημαντική καθώς συνεχίζουμε να αντιμετωπίζουμε προκλήσεις που σχετίζονται με την ποιότητα του αέρα και την κλιματική αλλαγή. Η πρόοδος στην τεχνολογία αισθητήρων, όπως το μικρό μέγεθος και οι διεπαφές τους, έχουν κάνει τους αισθητήρες αερίων περισσότερο προσβάσιμους και προσιτούς, επιτρέποντας την ενσωμάτωσή τους σε διάφορες συσκευές και συστήματα.

3.1 Βασικά χαρακτηριστικά αισθητήρων

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων τα οποία αποτελούν κριτήριο για την αξιοπιστία τους, ανάλογα με την απόδοση τους, την σταθερότητα λειτουργίας τους και την ταχύτητα απόκρισης τους, κατά την διέγερση τους από το ερέθισμα σύμφωνα με το οποίο αντιδρούν. Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα είναι:

1. Ευαισθησία: Η σχέση της αλλαγής εξόδου προς την αλλαγή εισόδου, είναι ίση με τη διαφορά των τιμών της εξόδου προς τη διαφορά των αντίστοιχων τιμών εισόδου.
2. Επιλεκτικότητα: είναι η διακριτική ικανότητα που εμφανίζει ένας αισθητήρας, ώστε να μετρά, από ένα σύνολο ρύπων, μόνο έναν αέριο ρύπο στο περιβάλλον.
3. Επαναληψιμότητα: η οποία εκφράζει και την αξιοπιστία ενός αισθητήρα, είναι το κατά πόσο ένας αισθητήρας μπορεί να εμφανίζει την ίδια απόκριση τιμών σε σταθερή συγκέντρωση ενός αερίου για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.
4. Χρόνος απόκρισης: είναι η χρονική διάρκεια που απαιτείται από έναν αισθητήρα, από την ώρα αντίληψης (είσοδος) έως την ώρα απόκρισης (έξοδος) στην παρουσία ενός αερίου. Οι χρόνοι αυτοί είναι συνήθως μερικά δευτερόλεπτα.
5. Κατώφλι ανίχνευσης: ορίζεται ως η ελάχιστη τιμή του μετρούμενου μεγέθους, ως ερέθισμα εισόδου, που μπορεί να ανιχνεύσει ένας αισθητήρας και να ανταποκριθεί σε αυτό.
6. Εύρος ανίχνευσης: ορίζεται το εύρος τιμών εξόδου του αισθητήρα, ξεκινώντας από το όριο ανίχνευσης έως την υψηλότερη τιμή συγκέντρωσης αερίου που μετρά ο αισθητήρας,
7. Γραμμικότητα: εμφανίζει το βαθμό συσχέτισης μεταξύ των τιμών εισόδου και εξόδου ενός αισθητήρα, με στόχο το διάγραμμα συσχέτισης να εμφανίζεται ως ευθεία γραμμή.
8. Χρόνος λειτουργίας: είναι ο αναμενόμενος χρόνος λειτουργίας ενός αισθητήρα και δίνεται από τον κατασκευαστή. Εκφράζεται συνήθως σε έτη λειτουργίας.

Σημειώνεται ότι η μελέτη της γήρανσης και η διόρθωση των τιμών μέτρησης που οφείλονται σε αυτή αποτελεί μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση αισθητήρων χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση της ποιότητας αέρα έχει αυξηθεί, δημιουργώντας ερευνητικά ερωτήματα με βασικότερο την αξιοπιστία τους. Τα κύρια σημεία που αφορούν τους αισθητήρες χαμηλού κόστους και αποτελούν αντικείμενο ερευνητικής προσπάθειας [52] [140] [69] [141] [142] είναι:

- Χαμηλότερη ακρίβεια από τα όργανα αναφοράς.
- Ανάγκη, για συχνές και ειδικές, ανάλογα τη θέση τοποθέτησης βαθμονομήσεις.
- Υψηλή ευαισθησία σε ατμοσφαιρικές μεταβολές (ειδικά υγρασία και θερμοκρασία).
- Διασταυρούμενη ευαισθησία σε άλλα αέρια (cross-sensitivity).
- Αργή απόκριση σε απότομες μεταβαλλόμενες συγκεντρώσεις ρύπων.
- Μετατόπιση και υποβάθμιση των μετρήσεων.

Ωστόσο, για την παρακολούθηση της ποιότητας αέρα, μια υψηλή δειγματοληψία, τόσο χωρικά όσο και χρονικά, είναι απαραίτητη για τη λήψη αντιπροσωπευτικών πληροφοριών για τις συνθήκες ποιότητας του αέρα. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης χρησιμοποιούν γενικά πολύ ακριβό, πολύπλοκο, σταθερό εξοπλισμό, ο οποίος περιορίζει τη συλλογή δεδομένων [143]. Ως εκ τούτου, για την παρακολούθηση του επιπέδου ρύπανσης σε μια συγκεκριμένη περιοχή, οι σταθμοί ποιότητας αέρα τοποθετούνται γενικά σε λίγα αριθμητικά σημεία όπου αναμένεται η υψηλότερη συγκέντρωση, δηλαδή κοντά σε περιοχές εκπομπών ρύπων, όπως περιοχές με εργοστάσια, βιομηχανικές ζώνες, μεγάλους δρόμους υψηλής κίνησης, μαζί με ορισμένα σημεία παρακολούθησης για συγκεντρώσεις υποβάθρου, από μικρές και κατανεμημένες πηγές ρύπανσης. Από την άλλη πλευρά, λόγω του ότι είναι οικονομικά προσιτοί, έχουν μικρό μέγεθος και χαμηλή κατανάλωση ισχύος, οι αισθητήρες χαμηλού κόστους επιτρέπουν την εγκατάσταση πυκνότερων δικτύων παρακολούθησης ποιότητας αέρα, διευρύνοντας με αυτό τον τρόπο την ενσωμάτωση των περιορισμένων πληροφοριών σχετικά με τη χωρική κατανομή των ατμοσφαιρικών ρύπων που παρέχονται από τα επίσημα όργανα [102] [144] [145] [146] [93] [147].

3.2 Κατηγορίες Αισθητήρων

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, έχουν αναπτυχθεί σε εργαστήρια [36] [148] αισθητήρες ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα συλλογής και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, χωρικά και χρονικά [149].

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Ερευνητικές μελέτες [149] [150] [151] έχουν παρουσιάσει ότι οι αισθητήρες ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους έχουν τη δυνατότητα να εξάγουν μόνο ποιοτική πληροφορία τόσο σε επιστημονικό και ερευνητικό επίπεδο όσο και στο πλαίσιο της ανάπτυξης ερασιτεχνικών συστημάτων από μη εξειδικευμένο προσωπικό. Παραμένει βέβαια η διαφοροποίηση [152] [153] [154] [155] που εμφανίζουν σε σχέση με τα εμπορικά όργανα και αυτό λόγω της δομής και της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται στους αισθητήρες χαμηλού κόστους, όπως και της διασταύρωσης και επαλήθευσης των δεδομένων.

Οι αισθητήρες αερίων ρύπων χαμηλού κόστους κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες, σύμφωνα με την τεχνολογία ανίχνευσης που χρησιμοποιούν [156] [152]

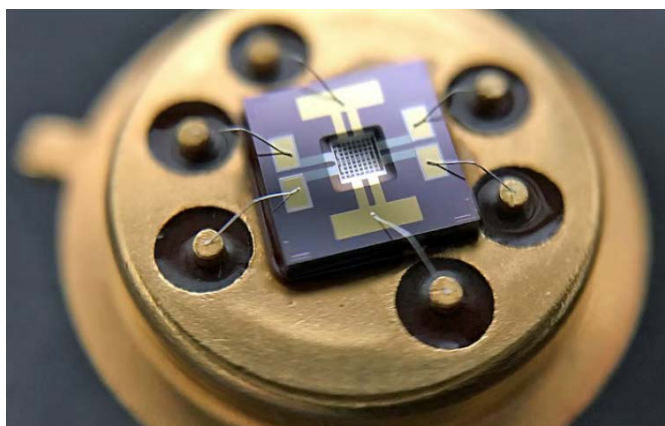
- Αισθητήρες ημιαγωγού-οξειδίου-μετάλλου (Metal-Oxide-Semiconductor - MOS),
- Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες (Electrochemical Sensors - EC),
- Αισθητήρες υπερύθρων χωρίς διασπορά (Non-dispersive Infrared - NDIR)
- Αισθητήρες ανίχνευσης φωτοϊοντισμού (Photo-ionisation Detectors - PID).

Παρακάτω ακολουθεί περιγραφή των βασικών ιδιοτήτων αυτών των τεχνολογιών. Οι κατηγορίες των αισθητήρων MOS και EC αποτελούν την οικονομικότερη λύση. Οι κατηγορίες NDIR και PID έχουν υψηλότερο κόστος. Σημειώνεται ότι υπάρχουν και άλλες τεχνολογίες ανίχνευσης συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών ρύπων με πολύ υψηλότερο κόστος, πράγμα που τις καθιστά απαγορευτικές για συστήματα χαμηλού κόστους.

3.2.1 Αισθητήρες οξειδίου μετάλλου στερεάς κατάστασης (Metal Oxide Semiconductor - MOS)

Οι αισθητήρες MOS είναι μια δημοφιλής τεχνολογία αισθητήρων για την παρακολούθηση των συγκεντρώσεων πολλών αέριων ρύπων, όπως υδρογονάνθρακες χωρίς μεθάνιο (NMHC), CO, CO₂, NO₂, NO_x και O₃ [102] [144] [157] [158] [159] [44] [160] [161]. Στο Σχήμα 3.1 παροσιάζεται ένας αισθητήρας αερίου ρύπου τεχνολογίας MOS. Οι αισθητήρες MOS αποτελούνται από ένα θερμαντικό στοιχείο και ένα στοιχείο ανίχνευσης ημιαγωγού-οξειδίου-μετάλλου. Το θερμαντικό στοιχείο θερμαίνει την επιφάνεια του αισθητηρίου στοιχείου στους 300°–500°C, το οποίο στη συνέχεια είναι σε θέση να ανιχνεύσει αέρια μέσω μιας χημικής αντίδρασης που συμβαίνει στην επιφάνειά του. Αυτή η αντίδραση προκαλεί μια αλλαγή στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του αισθητηρίου στοιχείου, η οποία

μπορεί να παρακολουθηθεί χρησιμοποιώντας ένα εξωτερικό κύκλωμα για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του αερίου που ανιχνεύτηκε [162].



Σχήμα 3.1 Αισθητήρας αερίου ρύπου τεχνολογίας MOS [163]

Οι αισθητήρες MOS είναι πολύ χαμηλού κόστους και συμπαγείς. Επιπλέον, έχουν υψηλή ευαισθησία που μπορεί να φτάσει τα λίγα ppb (parts per billion) για ορισμένα αέρια. Οι αισθητήρες MOS έχουν επίσης μικρό χρόνο απόκρισης, δηλαδή μπορούν να παράγουν δεδομένα σε υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας. Οι αισθητήρες MOS έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και ανθεκτικότητα σε ακραίες καιρικές συνθήκες (υψηλή θερμοκρασία και υγρασία), με μεγάλο χρόνο ζωής και αργή αλλά συνεχή γήρανση.

Η ευαισθησία των αισθητήρων MOS επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και άλλα αέρια. Σύμφωνα με αυτό, η λήψη θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας είναι αναγκαία κατά τη βαθμονόμηση αυτών των αισθητήρων. Επιπλέον, έχουν χαμηλή ακρίβεια και υπόκεινται σε μετατόπιση των μετρήσεων [164], κάτι που απαιτεί συχνά επαναβαθμονόμηση ώστε να παρέχουν αξιόπιστες μετρήσεις [165] [166]. Η ολίσθηση (Drift) έχει ως συνέπεια την μειωμένη ακρίβεια μέτρησης, και αποτέλεσμα τη μείωση της αγωγιμότητας του αισθητηρίου στοιχείου με την πάροδο του χρόνου [167]. Η απόκριση των αισθητήρων MOS εξαρτάται επίσης από την υγρασία, με την υψηλότερη υγρασία να οδηγεί σε υψηλότερο σφάλμα μέτρησης [168]. Τέλος, οι αισθητήρες MOS εμφανίζουν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας λόγω του ότι χρησιμοποιούν ηλεκτρικό θερμαντικό στοιχείο, από την κατασκευή τους.

Εξαιτίας των παραπάνω οι αισθητήρες MOS είναι καταλληλότεροι για χρήση όπου υπάρχει παροχή ρεύματος. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι κατά την εφαρμογή αισθητήρων MOS για την παρακολούθηση της συγκέντρωσης O_3 , οι Hasenfratz et al. [169] χρησιμοποίησαν αισθητήρα MOS με ξεχωριστή μπαταρία και μετέφεραν δεδομένα μέσω ενός smartphone.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Οι συγγραφείς αξιολόγησαν την κατανάλωση ισχύος του αισθητήρα, η οποία είχε ως αποτέλεσμα έναν εκτιμώμενο χρόνο λειτουργίας 50 ωρών. Σε άλλη ερευνητική εργασία (Burgues et al. [170]) αναφέρεται ότι η απενεργοποίηση των θερμαντικών στοιχείων για κάποιο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια η ενεργοποίησή τους για χρονικές περιόδους και όχι συνέχεια, μπορεί να μειώσει την κατανάλωση των αισθητήρων έως και 90%. Ωστόσο, η εξοικονόμηση ενέργειας συνεπάγεται επιβάρυνση στην ακρίβεια μέτρησης, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο κύκλος λειτουργίας των αισθητήρων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την κατασκευή μοντέλων βαθμονόμησης. Συγκεκριμένα, δύο αισθητήρες MOS με παρόμοιες προδιαγραφές αλλά διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας είναι πιθανό να έχουν διαφορετική ακρίβεια μέτρησης πράγμα που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης. Μια άλλη εναλλακτική λύση είναι ο σχεδιασμός του κύκλου λειτουργίας για τη μεγιστοποίηση της ποιότητας μέτρησης. Για παράδειγμα, εάν συλλέγονται πολλαπλές μετρήσεις στον ίδιο κύκλο και οι πρώτες μετρήσεις απορριφθούν, τότε οι μετρήσεις που προκύπτουν είναι πιο ακριβείς από ό,τι όταν συλλέγεται μόνο μία μέτρηση σε κάθε κύκλο. Πρόσφατα, σημειώθηκαν πρόοδοι στη σύνθεση υλικών των αισθητήρων MOS που μπορούν να διασφαλίσουν ότι η ευαισθησία παραμένει υψηλή ακόμη και όταν αυξάνεται η υγρασία του αέρα [171]. Αυτά τα υλικά δεν είναι ακόμη διαθέσιμα σε μαζικές ποσότητες, και επομένως δεν χρησιμοποιούνται από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους που υπάρχουν αυτή τη στιγμή.

3.2.2 Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες (Electrochemical Sensors - EC)

Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες (EC) μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή συστημάτων χαμηλού κόστους με στόχο την παρακολούθηση συγκεντρώσεων αερίων ρύπων. Αντίστοιχοι αισθητήρες έχουν χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις συγκέντρωσης αερίων ρύπων CO, NO, NO₂, O₃ και SO₂ [102] [144] [172] [173] [174] [175] [176]. Στο Σχήμα 3.2 παροσιάζονται αισθητήρες αερίων ρύπων ηλεκτροχημικής τεχνολογίας. Αυτοί οι αισθητήρες ανιχνεύουν αέρια με χημικές αντιδράσεις οξειδωσης-αναγωγής, χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια που διαχωρίζονται μέσω μιας ηλεκτρολυτικής ουσίας, όπως το θειικό οξύ. Το ένα ηλεκτρόδιο (Working Electrode – WE) έρχεται σε επαφή τόσο με τον ηλεκτρολύτη όσο και με τον αέρα του περιβάλλοντος, μέσω μιας πορώδους μεμβράνης. Η αντίδραση παράγει ένα ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ των ηλεκτροδίων, το οποίο μπορεί να μετρηθεί από τις εξωτερικές ακίδες του αισθητήρα.



Σχήμα 3.2 Αισθητήρες αερίων ρύπων ηλεκτροχημικής τεχνολογίας [177]

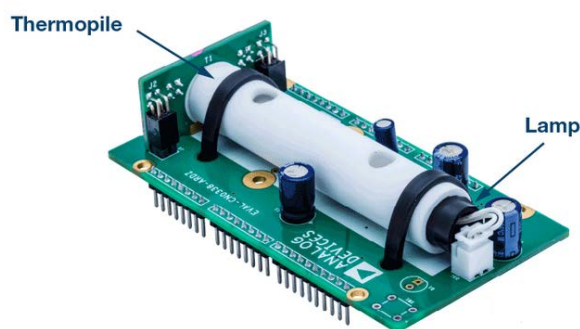
Όπως και οι αισθητήρες MOS, έτσι και οι αισθητήρες EC είναι φθηνοί, και έχουν υψηλή ευαισθησία (σε επίπεδα ppb για ορισμένα αέρια). Σε σύγκριση με τους αισθητήρες MOS, οι αισθητήρες EC έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος. Η ευαισθησία τους επηρεάζεται λιγότερο από τη θερμοκρασία και την υγρασία σε σχέση με τους αισθητήρες MOS. Κύρια αδυναμία των αισθητήρων EC είναι η ταχύτητα της χημικής αντίδρασης η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας. Το εύρος δυνατότητας μέτρησης των αισθητήρων εξαρτάται επίσης από τα χαρακτηριστικά των χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στον αισθητήρα και τείνει να είναι μικρότερο από ό,τι στους αισθητήρες MOS. Οι αισθητήρες EC έχουν επίσης μικρότερη διάρκεια ζωής από τους αισθητήρες MOS, με τη συνολική διάρκεια να εξαρτάται από την ποσότητα της ρύπανσης στην οποία εκτίθενται. Ένας ηλεκτροχημικός αισθητήρας Alphasense NO₂ που χρησιμοποιείται από τους Castell et al. [1] έχει διάρκεια ζωής 2-5 χρόνια, ενώ οι αισθητήρες MOS μπορούν να διαρκέσουν 10 χρόνια ή και περισσότερο όπως αναφέρεται στην εργασία [167] όπου χρησιμοποίησαν αισθητήρες MOS για μια περίοδο 7 ετών. Οι αισθητήρες EC είναι επίσης λιγότερο ανθεκτικοί στις καιρικές συνθήκες από τους αισθητήρες MOS. Ένας συνδυασμός χαμηλής υγρασίας και υψηλής θερμοκρασίας είναι ιδιαίτερα επικίνδυνος για τους αισθητήρες αυτούς. Οι αισθητήρες EC παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφόρων ρύπων (cross-sensitivity), παρόλο που είναι λιγότερο ευαίσθητοι από τους αισθητήρες MOS [152].

Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες είναι κατάλληλοι για εφαρμογές χαμηλού κόστους, καθώς είναι οικονομικά προσιτοί και η απόδοσή τους επηρεάζεται λιγότερο από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας από τους αισθητήρες MOS. Η ακρίβεια των ηλεκτροχημικών αισθητήρων είναι καλή, εφόσον οι καιρικές συνθήκες εμπίπτουν στο εύρος λειτουργίας τους.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

3.2.3 Αισθητήρες υπέρυθρων χωρίς διασπορά (Non-dispersive Infrared - NDIR)

Στο Σχήμα 3.3 παροσιάζεται ένας αισθητήρας αερίου ρύπου τεχνολογίας NDIR. Οι αισθητήρες NDIR αποτελούνται από μια πηγή υπέρυθρου φωτός, έναν θάλαμο δειγματοληψίας, ένα οπτικό φίλτρο και έναν ανιχνευτή. Όταν ένα αέριο διέρχεται από τον θάλαμο, το φως που εκπέμπεται από την υπέρυθη πηγή ταξιδεύει μέσα από αυτόν και ορισμένες συχνότητες απορροφώνται ανάλογα με το αέριο. Το υπόλοιπο φως χτυπά το οπτικό φίλτρο και τον ανιχνευτή, ο οποίος εξάγει τις συχνότητες μέσω ηλεκτρικού ρεύματος. Οι αισθητήρες NDIR έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως για την ανίχνευση συγκεντρώσεων CO₂ [161] [102] [144] [176]. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση και άλλων αερίων αλλάζοντας το μήκος κύματος της πηγής φωτός του.



Σχήμα 3.3 Αισθητήρας αερίου ρύπου τεχνολογίας NDIR [178]

Για τη λειτουργία τους απαιτούν λίγη ενέργεια και έχουν μικρές διαστάσεις. Όσο ο διάυλος διάδοσης του φωτός παραμένει ελεύθερος από υπολείμματα η αξιοπιστία των μετρήσεων παραμένει σταθερή. Το βασικότερο πρόβλημα για τις εφαρμογές αυτών των αισθητήρων είναι ότι έχουν υψηλά όρια ανίχνευσης, δηλαδή δεν μπορούν να μετρήσουν μικρές συγκεντρώσεις ρύπων και είναι ευαίσθητοι σε φασματικές παρεμβολές από διαφορετικά αέρια καθώς και από νερό [152], επίσης υπόκεινται σε μετατόπιση [179] και κοστίζουν πολύ περισσότερο από τους αισθητήρες MOS και EC. Ακόμη και αν ληφθούν υπόψη τα μειονεκτήματα, η μεγάλη διάρκεια ζωής των αισθητήρων NDIR τους καθιστά μια καλή επιλογή για μακροχρόνιες εγκαταστάσεις μετρήσεων σε ξηρές περιοχές. Το υψηλό κόστος και το υψηλό όριο ανίχνευσης τους καθιστούν κατάλληλους μόνο για συγκεκριμένες εφαρμογές και συνθήκες λειτουργίας.

3.2.4 Αισθητήρες ανίχνευσης φωτοϊοντισμού (Photo-ionisation Detectors - PID)

Οι αισθητήρες PID λειτουργούν χρησιμοποιώντας φωτόνια UV υψηλής ενέργειας. Κατά τη διαδικασία αυτή οι ενώσεις ιονίζονται καθώς απορροφούν τα φωτόνια UV και αυτό έχει

ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος που μπορεί να συλληφθεί από έναν ανιχνευτή μέσα στον αισθητήρα. Όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του μετρούμενου συστατικού στην ένωση, τόσο περισσότερα ιόντα παράγονται και τόσο μεγαλύτερο είναι το παραγόμενο ρεύμα στον αισθητήρα.



Σχήμα 3.4 Αισθητήρες αερίων ρύπων τεχνολογίας PID [180]

Οι ανιχνευτές φωτοϊοντισμού (PIDs) είναι πολύ ευαίσθητοι και έχουν μικρό χρόνο απόκρισης. Είναι μικροί σε μέγεθος και βάρος και έχουν χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις [181] [182]. Οι PID επηρεάζουν όλα τα μόρια των οποίων το δυναμικό ιοντισμού είναι χαμηλότερο από το υπεριώδες φως που τα επηρεάζει, πράγμα που σημαίνει ότι τα PID δεν είναι ειδικά για έναν συγκεκριμένο ρύπο [182]. Οι PID είναι ευαίσθητοι σε υψηλά επίπεδα υγρασίας ή υδρατμούς. Δεν είναι πολύ χαμηλού κόστους, ακόμη και αν είναι προσιτοί σε σύγκριση με σταθμούς παρακολούθησης ποιότητας αέρα υψηλής τεχνολογίας [183]. Οι PID υπόκεινται επίσης σε μετατόπιση και πρέπει να επαναβαθμονομούνται τουλάχιστον μία φορά το μήνα.

3.3 Μελέτες αξιολόγησης απόδοσης αισθητήρων

Οι Spinelle et al. [102] [144] μελετώντας την απόδοση των αισθητήρων MOS και EC σχετικά με την ανίχνευση συγκέντρωσης των αερίων O₃, NO, NO₂ κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στις εξόδους των αισθητήρων μεταξύ των δύο τεχνολογιών. Στο σύνολο, αξιολογήθηκαν δεκαπέντε μοντέλα αισθητήρων για πέντε είδη αερίων ρύπων. Η μελέτη περιλάμβανε πέντε μήνες δεδομένων καθώς ο χρόνος ζωής των ηλεκτροχημικών αισθητήρων είναι δυο χρόνια, δεν ελήφθησαν υπόψη τα αποτελέσματα αυτών των αισθητήρων κατά την γήρανση. Η φορητότητα συσκευών ποιότητας αέρα και κατ' επέκταση των αισθητήρων έχει αναφερθεί σε πολλές μελέτες [184] [32] [169]. Έχει αναφερθεί η αξιολόγηση συστήματος μέτρησης ποιότητας αέρα χρησιμοποιώντας σταθερές και κινητές διατάξεις αισθητήρων [184], όπου συμβατοί

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

αισθητήρες αναπτύχθηκαν ως κινητοί κόμβοι και εμφάνισαν ικανοποιητική λειτουργία κατά τη μετακίνησή τους στο περιβάλλον. Οι Hasenfratz et al. [169] προσομοίωσαν την κινητικότητα πραγματοποιώντας πειράματα σε ένα δωμάτιο με σταθερή συγκέντρωση O_3 και τεχνητό άνεμο, με χρήση ανεμιστήρα. Διαπιστώθηκε ότι, όταν η συγκέντρωση O_3 είναι χαμηλή, ο άνεμος δεν επηρεάζει πολύ τις μετρήσεις. Ωστόσο, όταν η συγκέντρωση O_3 είναι υψηλή, το φαινόμενο ανέμου οδηγεί σε μετατόπιση των μετρήσεων. Ως εκ τούτου, συνίσταται η προστασία του αισθητήρα από τον άνεμο.

4. Περιγραφή λειτουργίας ηλεκτροχημικών αισθητήρων αέριων ρύπων και αισθητήρων μικροσωματιδίων, χαμηλού κόστους.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στην αρχή λειτουργίας των ηλεκτροχημικών αισθητήρων και των αισθητήρων μικροσωματιδίων που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

4.1 Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες

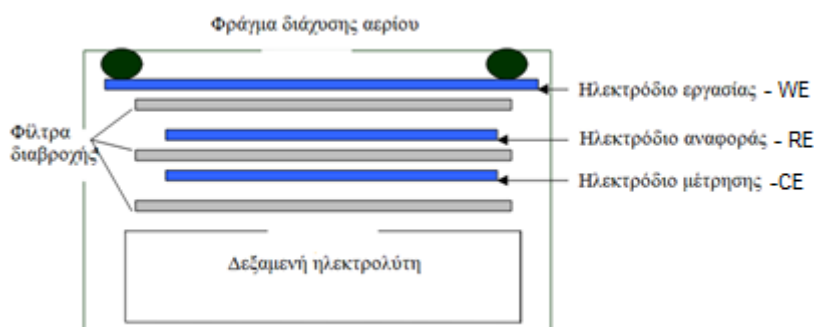
Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες χαμηλού κόστους που χρησιμοποιούνται και αξιολογούνται σε πολλές ερευνητικές εργασίες είναι χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και χαμηλού κόστους. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται σε μεθοδολογίες αμπερομετρικών αισθητήρων που έχουν σχεδιαστεί για την ανίχνευση επιλεγμένων αερίων σε επίπεδο parts per billion (ppb) στο περιβάλλον. Η αρχή της αμπερομετρίας σε ηλεκτροχημικούς αισθητήρες βασίζεται στην μέτρηση του παραγόμενου ή καταναλισκόμενου ρεύματος από την χημική αντίδραση στην ενεργό επιφάνεια του αισθητήρα. Αυτή η κατηγορία αισθητήρων αποτελείται από ηλεκτροχημικές κυψέλες που λειτουργούν σε διάταξη αμπερομετρικής λειτουργίας. Δηλαδή, παράγουν ένα ρεύμα που είναι ανάλογο με τον όγκο του προς μέτρηση αέριου ρύπου (στόχου).

Κάθε αισθητήρας [75] [185] περιέχει ένα στοιχείο που ενσωματώνει τρία ηλεκτρόδια τα οποία χωρίζονται από φίλτρα διαβροχής. Το υλικό των ηλεκτροδίων αποτελείται από μέταλλο ή κράμα μετάλλου. Διαβροχή είναι η ικανότητα της διατήρησης επαφής μεταξύ ενός υγρού με μια στερεά επιφάνεια, λόγω μοριακών αλληλεπιδράσεων. Αυτά τα φίλτρα είναι υδρόφιλοι διαχωριστές που επιτρέπουν την ιοντική επαφή μεταξύ των ηλεκτροδίων επιτρέποντας τη μεταφορά του ηλεκτρολύτη μέσω τριχοειδούς διαφράγματος. Τα τρία ηλεκτρόδια φέρουν το όνομα Working Electrode (WE), Counter Electrode (CE) και Reference Electrode (RE) (Σχήμα 4.1). Το WE χρησιμοποιείται για οξειδοαναγωγική αντίδραση, σύμφωνα με το επιλεγμένο είδος αερίου προς μέτρηση. Είναι επικαλυμμένο με έναν καταλύτη ώστε να διευκολύνει την αντίδραση με το είδος αερίου στόχου, το οποίο εισέρχεται στον αισθητήρα με διάχυση. Το ηλεκτρικό φορτίο που δημιουργείται από την χημική αντίδραση στην επιφάνεια του WE εξισορροπείται από μια αντίστοιχη στο ηλεκτρόδιο CE, σχηματίζοντας έτσι ένα οξειδοαναγωγικό ζεύγος χημικών αντιδράσεων. Οι αισθητήρες είναι σχεδιασμένοι έτσι ώστε ο ρυθμός διάχυσης του αερίου στόχου στο ηλεκτρόδιο του αισθητήρα να είναι πολύ πιο αργός από τον ρυθμό αντίδρασης του αερίου

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

στόχου στο ηλεκτρόδιο. Κατά συνέπεια, η έξοδος ρεύματος από τον αισθητήρα είναι ευθέως ανάλογη με τη συγκέντρωση του αερίου στόχου [186].

Κατά τη λειτουργία, το WE διατηρείται σε ένα σταθερό δυναμικό ενώ το δυναμικό του CE μπορεί να μεταβάλλεται (δηλαδή δεν έχει σταθερό δυναμικό). Στον καθαρό (μηδενικός ρύπος) αέρα, το CE έχει το ίδιο δυναμικό με το WE, αλλά παρουσία αερίου ρύπου, αλλάζει δυναμικό καθώς δημιουργεί ένα ρεύμα εξισορρόπησης για να αντισταθμίσει το ρεύμα που παράγεται στο WE. Το δυναμικό του WE διατηρείται σε μια καθορισμένη τιμή κατά τη λειτουργία χρησιμοποιώντας ένα τρίτο ηλεκτρόδιο RE, το οποίο διατηρείται σε σταθερό δυναμικό. Η εκμετάλλευση της τεχνολογίας τριών ηλεκτροδίων σημαίνει ότι η ευαισθησία του αισθητήρα είναι σταθερή, διασφαλίζοντας έτσι τη γραμμικότητα του αισθητήρα σε όλο το εύρος χρήσης. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ του WE και του CE δημιουργεί τότε ένα ηλεκτρικό ρεύμα που είναι το σήμα εξόδου του αισθητήρα. Το ρεύμα που παράγεται από αυτούς τους τύπους ηλεκτροχημικών αισθητήρων είναι τυπικά στην περιοχή nA ανά ppm του αισθητήρα αερίου και μετράται χρησιμοποιώντας κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα σε ποτενσιομετρική διάταξη [187].



Σχήμα 4.1: Δομή ηλεκτροχημικού αισθητήρα, χαμηλού κόστους [75]

4.2 Αισθητήρες μικροσωματιδίων

Η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα μικροσωματιδίων, χαμηλού κόστους, βασίζεται στην σκέδαση του φωτός (Σχήμα 4.2). Αυτός ο αισθητήρας απαιτεί σταθερή ροή αέρα οπότε για να το εξασφαλίσει χρησιμοποιεί έναν ανεμιστήρα στην κοιλότητα μέτρησης σκέδασης φωτός, μέσω της εισόδου του. Μια δέσμη φωτός (laser), μήκους κύματος 650 nm, εκπέμπεται στην περιοχή ανίχνευσης για να στοχεύσει σωματίδια εντός της κοιλότητας μέτρησης. Το φως διασκορπίζεται καθώς χτυπά τα σωματίδια. Ένας ανιχνευτής φωτός, είναι τοποθετημένος απέναντι από την πηγή φωτεινής εκπομπής. Το σκεδαζόμενο φως που λαμβάνεται από τον ανιχνευτή φωτός στέλνεται ως παλμός ηλεκτρικού σήματος στον ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή. Ο αριθμός και η ένταση των ηλεκτρικών σημάτων που

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

ανιχνεύονται από τον μικροεπεξεργαστή στη συνέχεια μετατρέπονται σε αριθμό και μάζα σωματιδίων αντίστοιχα με βάση τη θεωρία (Gustav Mie) MIE [188]. Η θεωρία MIE είναι μια πλήρης μαθηματική-φυσική θεωρία της σκέδασης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από ομοιογενή σφαιρικά σωματίδια, που αναπτύχθηκε από τον Gustav Mie το 1908 [189].



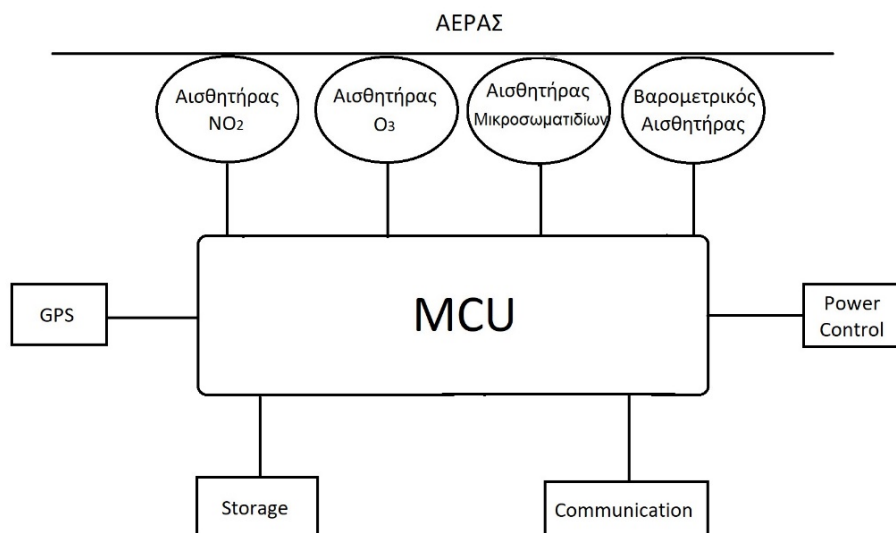
Σχήμα 4.2: Δομή οπτικού αισθητήρα μικροσωματιδίων, χαμηλού κόστους [190].

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

5. Κατασκευή και εγκατάσταση σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η κατασκευή ενός σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, γίνεται αναλυτική περιγραφή τόσο του υλισμικού όσο και του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε. Ο σταθμός μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα πλήρες σύστημα χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για τη μέτρηση της ρύπανσης του αέρα. Συνδυάζει δύο ηλεκτροχημικούς αισθητήρες για τη μέτρηση αερίων ρύπων (NO_2 και O_3), έναν οπτικό αισθητήρα (laser) για τη μέτρηση της συγκέντρωσης μικροσωματιδίων ($\text{PM}_{2.5}$), μια μονάδα GPS για τον εντοπισμό της θέσης εγκατάστασης του σταθμού αλλά και για την χρονοσήμανση των δεδομένων, μια μονάδα διασύνδεσης μέσω ασυρμάτου δικτύου ή δικτύου κινητής τηλεφωνίας (Wi-Fi / GPRS) για τη μεταφορά δεδομένων, έναν βαρομετρικό αισθητήρα και ορισμένα άλλα περιφερειακά (κάρτα SD, UPS, μπαταρία) τα οποία είναι όλα συνδεδεμένα σε μονάδα μικροελεγκτή, υψηλής επεξεργαστικής ισχύος (microcontroller unit, MCU), καθιστώντας τον σταθμό ένα πλήρες σύστημα παρακολούθησης αέρα που χρησιμοποιεί νέες τεχνολογίες όπως Internet of Things (IoT) και Over The Air Programming (OTAP).

Το block διάγραμμα στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζει τη δομή του συστήματος μέτρησης με τα βασικά του υποσυστήματα. Ο προγραμματισμός αλλά και η διαχείριση και παρακολούθηση του συστήματος γίνεται από την κεντρική επεξεργαστική μονάδα.



Σχήμα 5.1: Block διάγραμμα συστήματος μέτρησης

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

5.1 Υλισμικό

Σε αυτή την ενότητα γίνεται αναλυτική περιγραφή των υλικών και των χαρακτηριστικών τους που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους.

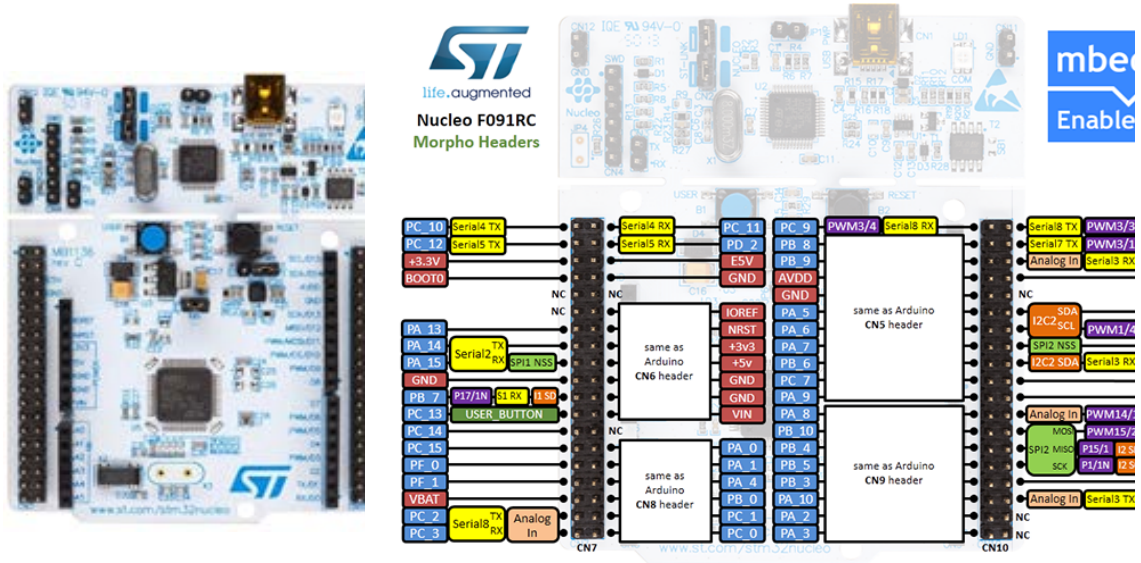
5.1.1 Μικροελεγκτής (CPU)

Η επιλογή για τη μονάδα κεντρικού επεξεργαστή (CPU) του συστήματος ατμοσφαιρικής ρύπανσης χαμηλού κόστους, έγινε αφού ελήφθησαν υπόψη βασικοί παράγοντες, σχετικά με τη λειτουργία του σταθμού και κυρίως, το χαμηλό κόστος. Οι ανάγκες ενός τέτοιου συστήματος, του οποίου η λειτουργία αποσκοπεί στις άμεσες μετρήσεις ποιότητας του αέρα και την αποστολή αυτών των δεδομένων στον κεντρικό εξυπηρετητή για την ενημέρωση του κοινού, είναι:

- Υψηλή επεξεργαστική ισχύς,
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας,
- Επαρκής αριθμός θυρών για τα περιφερειακά (δηλ. αισθητήρες, μονάδα Wi- Fi / GPRS, GPS κ.α.),
- Υψηλή ανάλυση δειγματοληψίας στις αναλογικές θύρες
- Επαρκής μνήμη RAM
- Υποστήριξη απομακρυσμένου προγραμματισμού over the air programming (OTAP).

Βασικός παράγοντας, εκτός των προαναφερόμενων τεχνικών προδιαγραφών, για την επιλογή της CPU αποτέλεσε το χαμηλό κόστος. Μια καλή επιλογή που ικανοποιεί τις ανάγκες του συστήματος είναι ο μικροελεγκτής STM32 Nucleo μοντέλο F091RC (Σχήμα 5.2). Σύμφωνα με τον κατασκευαστή [191] αυτός ο μικροελεγκτής αποτελείται από: STM32F091RCT6 in LQFP64 package, ARM®32-bit Cortex®-M0 CPU, 48 MHz max CPU frequency, VDD from 2.0 V to 3.6 V, 256 KB Flash, 32 KB SRAM, GPIO (51) with external interrupt capability, 12-bit ADC with 16 channels, 12-bit DAC with 2 channels, RTC, Timers (9), I2C (2), USART (8), SPI (2), CAN, HDMI CEC.

Ο συγκεκριμένος μικροεπεξεργαστής ικανοποιεί τις ανάγκες υλοποίησης του σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, καθώς τα πρωτόκολλα επικοινωνίας ως προς τη διασύνδεση των μονάδων που χρησιμοποιήθηκαν είναι, 1 x SPI, 4 x channel ADC 12-bit, 4 x USART, 1 x I2C.



Σχήμα 5.2: Αναπτυξιακή πλατφόρμα STM Nucleo F091RC. [191]

5.1.2 Αισθητήρες

Σύμφωνα με τις μετρήσεις που θα γίνονται από το σταθμό παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, απαιτείται ένα σύνολο αισθητήρων, οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

- (1) αισθητήρας όζοντος (O₃),
- (2) αισθητήρας διοξειδίου του αζώτου (NO₂),
- (3) αισθητήρας μικροσωματιδίων (PM)
- (4) βαρομετρικός αισθητήρας.

5.1.2.1 Αισθητήρας όζοντος (O₃)

Ο επιλεγμένος αισθητήρας για το όζον (O₃) είναι ο Alphasense OX-B431 [192]. Είναι ηλεκτροχημικός αισθητήρας με τέσσερα ηλεκτρόδια και συνοδεύεται από πλακέτα υποστήριξης (Individual Sensor Board – ISB). Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει τα κύρια χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά ηλεκτροχημικού αισθητήρα όζοντος (O₃), χαμηλού κόστους, Alphasense OX-B431.

Performance		
Sensitivity	ppm at 1ppm O ₃	-225 to -750
Response time	t90 (s) from zero to 1ppm O ₃	< 80
Range	ppm O ₃ limit of performance warranty	20
Linearity	ppm error at full scale, linear at zero and 20ppm O ₃	< ±0.5
Lifetime		

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Zero drift	ppb equivalent change/year in lab air	0 to 20
Sensitivity drift	% change/year in lab air, monthly test	< -20 to -40
Operating life	months until 50% original signal (24 month warranted)	> 24
Environmental		
Sensitivity @ -20°C	(% output @ -20°C/output @ 20°C) @ 2ppm O ₃	70 to 90
Sensitivity @ 40°C	(% output @ 40°C/output @ 20°C) @ 2ppm O ₃	95 to 125
Zero @ -20°C	nA	0 to 25
Zero @ 40°C	nA	5 to 100
Cross Sensitivity		
NO	sensitivity % measured gas @ 5ppm NO	< 5
Key specifications		
Temperature range	°C	-30 to 40
Humidity range	% rh continuous	15 to 85

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται ο αισθητήρας όζοντος (O₃) και στο Σχήμα 5.4 η πλακέτα υποστήριξης (ISB) του αισθητήρα.

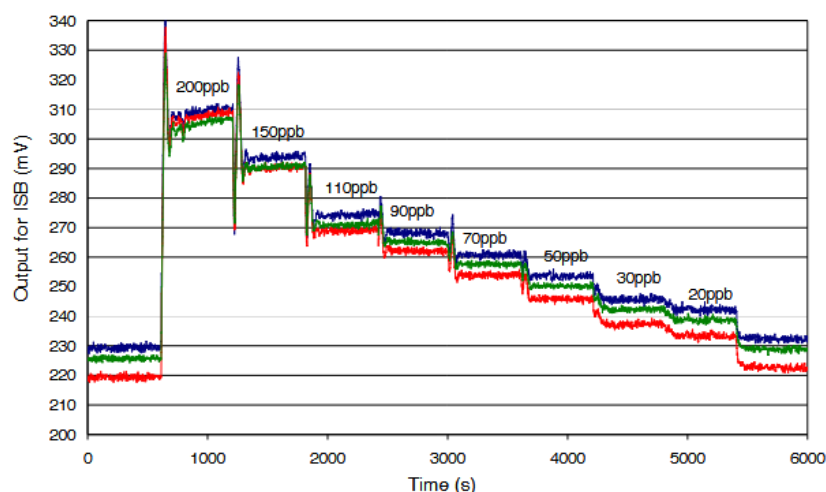


Σχήμα 5.3: Αισθητήρας Όζοντος Alphasense OX-B431 [192].



Σχήμα 5.4: Πλακέτα υποστήριξης ISB, Alphasense [193].

Σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του αισθητήρα όζοντος OX-B431, στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η απόκριση εξόδου από 200ppb σε 0 ppb συγκέντρωσης όζοντος, τριών τέτοιων αισθητήρων ως προς το χρόνο. Σύμφωνα με το γράφημα, οι μετρήσεις των αισθητήρων όζοντος μεταξύ τους, εμφανίζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε σταθερή συγκέντρωση αερίου ρύπου με σφάλμα 3%.



Σχήμα 5.5: Απόκριση εξόδου αισθητήρα όζοντος OX-B431, Alphasense [192].

5.1.2.2 Αισθητήρας διοξειδίου του αζώτου (NO₂)

Ο επιλεγμένος αισθητήρας για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) είναι ο Alphasense NO₂-B43F [194]. Είναι ηλεκτροχημικός αισθητήρας με τέσσερα ηλεκτρόδια και συνοδεύεται από πλακέτα υποστήριξης (Individual Sensor Board – ISB). Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει τα κύρια χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά ηλεκτροχημικού αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO₂), χαμηλού κόστους, Alphasense NO₂-B43F.

Performance		
Sensitivity	ppm at 1ppm NO ₂	-200 to -650
Response time	t ₉₀ (s) from zero to 1ppm NO ₂	< 80
Range	ppm NO ₂ limit of performance warranty	20
Linearity	ppm error at full scale, linear at zero and 20ppm NO ₂	< ±0.5
Lifetime		
Zero drift	ppb equivalent change/year in lab air	0 to 20
Sensitivity drift	% change/year in lab air, monthly test	< -20 to -40
Operating life	months until 50% original signal (24 month warranted)	> 24
Environmental		
Sensitivity @ -20°C	(% output @ -20°C/output @ 20°C) @ 2ppm NO ₂	70 to 90
Sensitivity @ 40°C	(% output @ 40°C/output @ 20°C) @ 2ppm NO ₂	95 to 125
Zero @ -20°C	nA	0 to 25
Zero @ 40°C	nA	5 to 100
Cross Sensitivity		
O ₃	Filter capacity (ppm.hr) @ 0.5ppm O ₃	< -80
NO	sensitivity % measured gas @ 5ppm NO	< 5
Key specifications		
Temperature range	°C	-30 to 40
Humidity range	% rh continuous	15 to 85

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται ο αισθητήρας διοξειδίου του αζώτου (NO_2) ενώ στο Σχήμα 5.7 η πλακέτα υποστήριξης (ISB) του αισθητήρα.

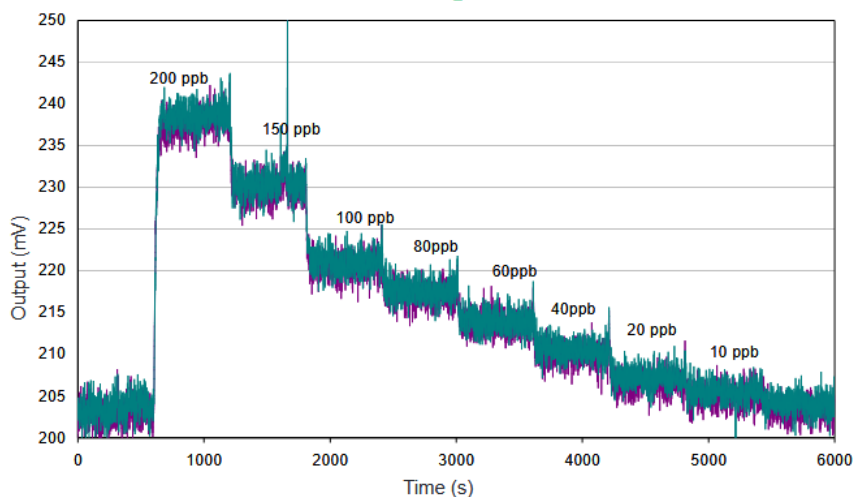


Σχήμα 5.6: Αισθητήρας Διοξειδίου του Αζώτου, Alphasense NO2-B43F [194].



Σχήμα 5.7: Πλακέτα υποστήριξης ISB, Alphasense [193].

Σύμφωνα με το τεχνικό φυλλάδιο του αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου NO2-B43F, στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η απόκριση εξόδου από 200ppb σε 0 ppb συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου, τριών τέτοιων αισθητήρων ως προς το χρόνο. Σύμφωνα με το γράφημα, οι μετρήσεις των αισθητήρων διοξειδίου του αζώτου μεταξύ τους, εμφανίζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε σταθερή συγκέντρωση αερίου ρύπου με σφάλμα 4%.



Σχήμα 5.8: Απόκριση εξόδου αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου NO2-B43F, Alphasense [194].

5.1.2.3 Πλακέτα υποστήριξης ηλεκτροχημικών αισθητήρων Alphasense

Η πλακέτα υποστήριξης (Individual Sensor Board - ISB) [193] έχει σχεδιαστεί για χρήση με την οικογένεια αισθητήρων αερίου τεσσάρων ηλεκτροδίων της Alphasense B4. Στην πραγματικότητα είναι ένας ποτενσιοστάτης που παρέχει μια έξοδο τάσης δύο καναλιών. Είναι ένα σύστημα χαμηλού θορύβου το οποίο παρέχει τάση πόλωσης στους αισθητήρες καθώς επίσης μπορεί να μετρήσει τόσο τα οξειδωτικά (CO , H_2S , SO_2 και NO) όσο και τα αναγωγικά (O_3 και NO_2) αέρια. Το ISB έχει κατασκευαστεί για συγκεκριμένους αισθητήρες όπως: NO , NO_2 , O_3 και $\text{CO} / \text{H}_2\text{S} / \text{SO}_2$. Είναι σχεδιασμένο για εφαρμογές χαμηλής ισχύος, και λειτουργεί με συνεχή τάση (DC) 3,5V έως 6,4V και με ρεύμα μόλις 1 mA

5.1.2.4 Αισθητήρας μικροσωματιδίων (PM)

Για την λήψη μετρήσεων αιωρούμενων μικροσωματιδίων στον αέρα, ο επιλεγμένος αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο PMS5003 της Plantower [195], είναι ένας χαμηλού κόστους ψηφιακός αισθητήρας, που μπορεί να ανιχνεύσει και να μετρήσει, με ακρίβεια, σωματίδια στον αέρα και να παρέχει τα αποτελέσματα μέσω μιας ψηφιακής θύρας επικοινωνίας (σειριακή διεπαφή RS232). Λόγω της διασυνδεσιμότητας του, ο αισθητήρας αυτός μπορεί να λειτουργήσει σε κυκλώματα που σχετίζονται με τη μέτρηση της συγκέντρωσης μικροσωματιδίων στον αέρα ή οποιονδήποτε άλλο περιβαλλοντικό εξοπλισμό μέτρησης. Η λειτουργία του βασίζεται στη μέθοδο που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.2. Οι μετρήσεις των μικροσωματιδίων, PM1.0, PM2.5 και PM10, λαμβάνονται μέσω της ψηφιακής θύρας επικοινωνίας. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται ο αισθητήρας μικροσωματιδίων PMS5003. Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα.



Σχήμα 5.9: Αισθητήρας μικροσωματιδίων (PMS5003) [195].

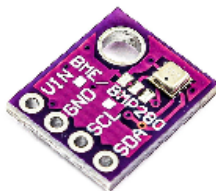
Πίνακας 5.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα μικροσωματιδίων (PMS5003).

Parameter Index unit	Index	Unit
Range of measurement	0.3~1.0 ; 1.0~2.5 ; 2.5~10	Micrometer (μm)
Counting Efficiency	50%@0.3μm 98%@>=0.5μm	
Effective Range (PM2.5 Standard)	0 ~ 500	μg/m ³
Maximum Range (PM2.5 standard) *	≥1000	μg/m ³
Resolution	1	μg/m ³
Maximum Consistency Error (PM2.5 standard data)*	±10%@100~500μ g/m ³ ±10%@100~500μ g/m ³	
Single Response Time	<1	Second (s)
Total Response Time	≤10	Second (s)
Interface Level	L <0.8 @3.3 H >2.7@3.3)	Volt (V)
Working Temperature Range	10~+60	°C
Working Humidity Range 0	0~99%	
MTTF	≥3	Year (Y)

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

5.1.2.5 Βαρομετρικός αισθητήρας

Για την μέτρηση των βαρομετρικών συνθηκών της περιοχής που θα είναι εγκατεστημένος ο σταθμός απαιτείται η χρήση βαρομετρικού αισθητήρα. Ο βαρομετρικός αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο BME280 της Bosch [196], και είναι κατάλληλος ειδικά για κινητές εφαρμογές λόγω του μικρού του μεγέθους και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Η έξοδος του αισθητήρα λαμβάνεται με χρήση ψηφιακού πρωτοκόλλου επικοινωνίας (I²C ή SPI) Το μέγεθός του είναι 2,5mm x 2,5mm x 0,93mm και η κατανάλωσή του μόλις 3,6 μ A @ 1Hz. Ο BME280 περιλαμβάνει έναν συνδυασμό αισθητήρων υψηλής ακρίβειας και γραμμικότητας για την ατμοσφαιρική πίεση, την υγρασία και τη θερμοκρασία, καθώς εμφανίζει πολύ γρήγορο χρόνο απόκρισης και υψηλή ακρίβεια και ένα ευρύ φάσμα λειτουργίας. Το Σχήμα 5.10 παρουσιάζει τον βαρομετρικό αισθητήρα BME280, και ο Πίνακας 5.4 τα τεχνικά χαρακτηριστικά του.



Σχήμα 5.10: Βαρομετρικός αισθητήρας (BME280) [196].

Πίνακας 5.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά βαρομετρικού αισθητήρα (BME280).

Parameter	Index	Unit
Operation range:		
Pressure	300...1100	hPa
Temperature	-40...85	°C
Interface	I ² C and SPI	
Average current consumption:	1.8 μ A@ 1Hz (H,T) 2.8 μ A@ 1Hz (P,T) 3.68 μ A@ 1Hz (H,T,P)	
Average current consumption in sleep mode	0.1 μ A	μ A
Humidity sensor Response time	1	Second (s)
Humidity sensor accuracy tolerance	\pm 3%	relative humidity
Sensitivity error	\pm 0.25 % (equiv. to 1 m at 400 m height change)	

5.1.3 Περιφερειακές μονάδες

Για την λειτουργία και υποστήριξη του σταθμού μέτρησης σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν και άλλες υποστηρικτικές μονάδες ώστε να επιτυγχάνονται όλες εκείνες οι συνθήκες που απαιτούνται για την λήψη όσο το δυνατό πιο αξιόπιστων δεδομένων αλλά και την δυνατότητα ελέγχου του σταθμού. Η μετάδοση των δεδομένων γίνεται είτε μέσω ασυρμάτου δικτύου είτε μέσω δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο σταθμός πρέπει να είναι πάντα σε λειτουργία, μια διάταξη mini UPS σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ώστε ο σταθμός να μπορεί να βρίσκεται συνεχώς σε κατάσταση λειτουργίας. Για την εξασφάλιση της αποστολής των δεδομένων, ακόμη και σε περιπτώσεις διακοπής δικτύου, μια κάρτα μνήμης (micro SD) χρησιμοποιήθηκε ως αποθηκευτικός χώρος. Δεδομένου ότι κατά την αποστολή των μετρήσεων θα πρέπει να υπάρχει η γεωγραφική θέση τοποθέτησης του σταθμού αλλά και χρονοσήμανση στα δεδομένα, η χρήση διάταξης γεοεντοπισμού (GPS) κρίθηκε απαραίτητη. Στη συνέχεια παρατίθενται τα τέσσερα περιφερειακά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του σταθμού μέτρησης, με κύριο γνώμονα το χαμηλό κόστος και την αξιοπιστία λειτουργίας τους.

5.1.3.1 Αποθηκευτικός χώρος (Κάρτα microSD)

Έχει χρησιμοποιηθεί κάρτα microSD για την αποθήκευση των δεδομένων, σε περιπτώσεις αστοχίας μετάδοσης μέσω δικτύου. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα δεδομένα αποθηκεύονται στην κάρτα SD και αφού αποκατασταθεί η επικοινωνία, τα δεδομένα που έχουν αποθηκευτεί στην κάρτα SD, αποστέλλονται στον διακομιστή. Η σύνδεση της κάρτας SD με τον μικροελεγκτή γίνεται με πρωτόκολλο SPI. Ο υποδοχέας microSD card παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11: Υποδοχέας microSD [197].

5.1.3.2 Μετάδοση δεδομένων στον διακομιστή

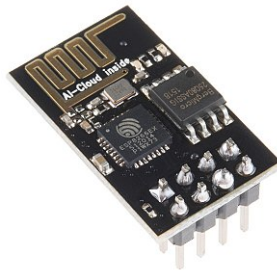
Η μετάδοση δεδομένων από τους σταθμούς μέτρησης προς το διακομιστή υλοποιείται μέσω δύο εναλλακτικών τρόπων: α) με χρήση τεχνολογίας ασύρματου δικτύου Wi-Fi (802.11b,g), και β) με χρήση δικτύου κινητής τηλεφωνίας GPRS (2G). Το πρωτόκολλο

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

μεταφοράς έχει σχεδιαστεί ώστε να περιλαμβάνει όσο το δυνατό λιγότερα δεδομένα ώστε να μπορεί αυτή να επιτευχθεί με χαμηλές ταχύτητες και αντίστοιχα μικρό όγκο δεδομένων.

5.1.3.2.1 Μέσω ασύρματου δικτύου δεδομένων Wi-Fi (802.11b,g)

Σε σημεία (π.χ. δημόσια κτήρια) στα οποία διατίθεται ασύρματο δίκτυο και υποδομή διασύνδεσης (xDSL κύκλωμα) στο διαδίκτυο, είναι δυνατή η αποστολή δεδομένων στον κεντρικό εξυπηρετητή μέσω διάταξης Wi-Fi (μοντέλο ESP8266), το οποίο διαθέτει διεπαφή I²C (Σχήμα 5.12), και βρίσκεται συνδεδεμένο στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας (MCU) Nucleo STM32 F091RC.



Σχήμα 5.12: Διάταξη Wi-Fi (ESP8266) [198].

Ο Πίνακας 5.5 παρουσιάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μοντέλου ESP8266.

Πίνακας 5.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά ESP8266.

Processor:	L106 32-bit RISC microprocessor core based on the TensilicaXtensa Diamond Standard 106Micro running at 80 MHz
Memory:	32 KiB instruction RAM 32 KiB instruction cache RAM 80 KiB user-data RAM 16 KiB ETS system-data RAM
External QSPI flash	up to 16 MiB is supported (512 KiB to 4 MiB typically included)
IEEE 802.11 b/g/n Wi-Fi	Integrated TR switch, balun, LNA, power amplifier and matching network WEP or WPA/WPA2 authentication, or open networks
GPIO	16 GPIO pins
Communication	SPI I ² C (software implementation) I ² S interfaces with DMA (sharing pins with GPIO) UART on dedicated pins, plus a transmit-only UART can be enabled on GPIO2

5.1.3.2.2 Μετάδοση μέσω δικτύου κινητής τηλεφωνίας GPRS (2G)

Σε σημεία όπου δεν υπάρχει πρόσβαση Wi-Fi (802.11b,g) έγινε η επιλογή χρήσης του δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μονάδα SIM808 της SIMCOM (Σχήμα 5.13). Αποτελεί μια λειτουργική μονάδα GSM και GPS. Υποστηρίζει δίκτυο Quad-Band GSM / GPRS και συνδυάζει τεχνολογία GPS για τον εντοπισμό θέσης. Έχει χαμηλή κατανάλωση ρεύματος σε λειτουργία αναμονής (δες πίνακα τεχνικών χαρακτηριστικών) και διαθέτει ενσωματωμένο κύκλωμα φόρτισης για μπαταρίες ιόντων λιθίου. Για την άμεση ανταπόκριση του εντοπισμού θέσης, διαθέτει υψηλή ευαισθησία λήψης GPS με 22 κανάλια παρακολούθησης και 66 κανάλια λήψης. Εκτός αυτού, υποστηρίζει επίσης και παγκόσμιο σύστημα στιγματοθέτησης (A-GPS). Η μονάδα ελέγχεται από εντολές AT μέσω UART και υποστηρίζει δυναμικά τάσης 3,3V και 5V.



Σχήμα 5.13: SIM808 GPS/GPRS Module [199].

Ο Πίνακας 5.6 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά του μοντέλου SIM808.

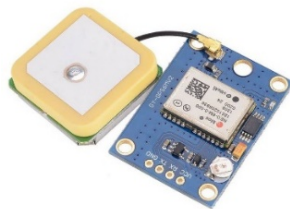
Πίνακας 5.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά SIM808.

Quad-band 850/900/1800/1900MHz
GPRS multi-slot class12 connectivity: max. 85.6kbps(down-load/up-load)
GPRS mobile station class B
Controlled by AT Command (3GPP TS 27.007, 27.005 and SIMCOM enhanced AT Commands)
Supports charging control for Li-Ion battery
Supports Real Time Clock
Supply voltage range 3.4V ~ 4.4V
Integrated GPS/CNSS and supports A-GPS
Supports 3.0V to 5.0V logic level
Low power consumption, 1mA in sleep mode
Supports GPS NMEA protocol
Standard SIM Card

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

5.1.3.3 Παγκόσμιο Σύστημα Στιγματοθέτησης (Global Positioning System - GPS)

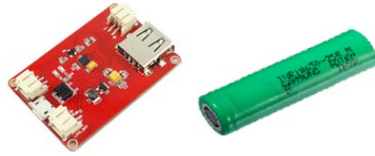
Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί ως μέθοδος μεταφοράς δεδομένων η χρήση Wi-Fi, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δεν χρησιμοποιείται η SIM808 που έχει ενσωματωμένο σύστημα εντοπισμού, τότε απαιτείται το u-blox NEO-6 (GPS). Ως περιφερειακό, η μονάδα παγκόσμιου συστήματος στιγματοθέτησης (GPS) χρησιμοποιείται για την παροχή της γεωγραφικής θέσης εγκατάστασης του σταθμού καθώς και τη λήψη της ώρας και της ημερομηνίας, για την χρονοσήμανση κατά την αποστολή των δεδομένων στον διακομιστή. Η διασύνδεση της μονάδας GPS γίνεται με χρήση σειριακού πρωτοκόλλου επικοινωνίας (RS232). Η μονάδα GPS παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.14.



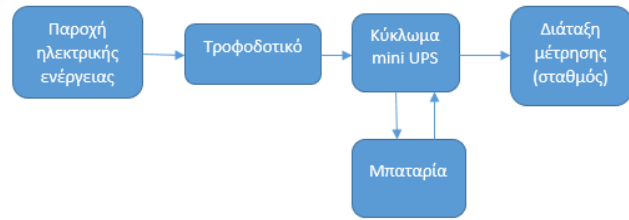
Σχήμα 5.14: Μονάδα GPS [200].

5.1.3.4 Αδιάλειπτη παροχή ενέργειας (Uninterruptible Power Supply – UPS)

Για τις περιπτώσεις διακοπής παροχής ενέργειας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε κύκλωμα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας (miniUPS). Το κύκλωμα miniUPS δέχεται ως είσοδο παροχή 5V, ή είσοδο παροχής μέσω ηλιακού πάνελ, διαθέτει κύκλωμα φόρτισης μπαταρίας και ως έξοδο παρέχει 5V. Κατά τη λειτουργία, με διαθέσιμη εξωτερική παροχή το κύκλωμα τροφοδοτεί την διάταξη μέτρησης (σταθμός) και ταυτόχρονα φορτίζει την μπαταρία. Σε περίπτωση διακοπής της εξωτερικής παροχής, το ίδιο τροφοδοτεί τη διάταξη μέτρησης μέσω της μπαταρίας, μετατρέποντας την τάση της μπαταρίας σε κατάλληλη στάθμη. Η χωρητικότητα της μπαταρίας υπολογίζεται σε σχέση με τη συνολική κατανάλωση ενέργειας της διάταξης μέτρησης, ώστε να λειτουργεί για τουλάχιστον 8 ώρες. Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζεται η διάταξη αδιάλειπτης παροχής ενέργειας, ενώ στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της λειτουργίας της διάταξης.



Σχήμα 5.15: Διάταξη αδιάληπτης παροχής ενέργειας [201].



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα ροής αδιάληπτης παροχής ενέργειας.

5.2 Κατασκευή σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους

Η κατασκευή του σταθμού μέτρησης είναι μια σύνθετη διαδικασία, καθώς ένα σύνολο προδιαγραφών πρέπει να πληρούνται και να λειτουργεί αρμονικά και αξιόπιστα ένα σύνολο υποσυστημάτων (μονάδα επεξεργασίας, βοηθητικές πλακέτες διασύνδεσης περιφερικών αισθητήρων, μπαταρία, κεραία GPS, αεραγωγός, κλπ.) ενώ παράλληλα πρέπει να διασφαλίζεται η λειτουργία σε εξωτερικό χώρο εξασφαλίζοντας προστασία από τις καιρικές συνθήκες ή άλλους παράγοντες, φροντίζοντας ταυτόχρονα τη σταθερή ροή αέρα για την εξασφάλιση των συνθηκών μέτρησης.

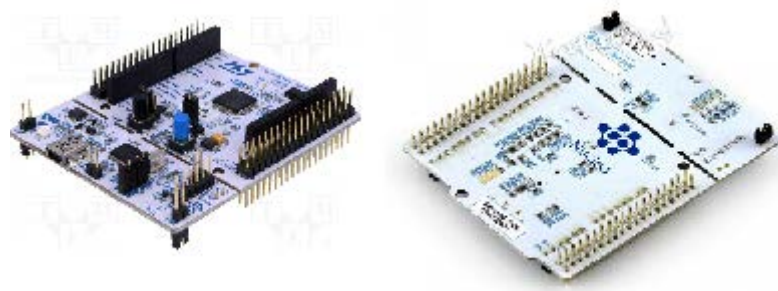
Η διαδικασία της κατασκευής περιλαμβάνει τρεις φάσεις, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικότερα στις επόμενες υποενότητες:

- α) Την κατασκευή πλακέτας επέκτασης.
- β) Την κατασκευή της διάταξης αεραγωγού.
- γ) Την ενσωμάτωση όλων των υποσυστημάτων σε κατάλληλες συνθήκες εξωτερικού χώρου για προστασία.

5.2.1 Κατασκευή πλακέτας επέκτασης

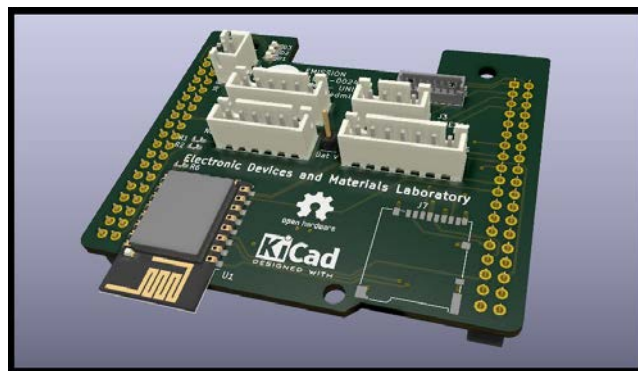
Για να είναι δυνατή η αξιόπιστη διασύνδεση όλων των υποσυστημάτων σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε σχετική πλακέτα διασύνδεσης. Ως βάση για την κατασκευή πλακέτας επέκτασης για την διασύνδεση των υποσυστημάτων επιλέχθηκε η αναπτυξιακή πλακέτα NUCLEO-F091RC, η οποία παρέχει αμφίπλευρα ακροδέκτες (pins) αναλογικών, ψηφιακών θυρών για τη λήψη σημάτων και τροφοδοσίας (Σχήμα 5.17).

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



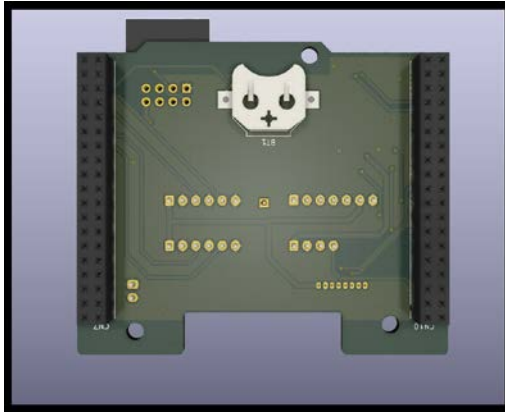
Σχήμα 5.17: Δοο όψεις του αναπτυξιακού συστήματος NUCLEO / F091RC [191].

Ο σχεδιασμός της πλακέτας επέκτασης επιτρέπει τη δυναμική αξιοποίηση του χώρου, καθώς διάφορες λειτουργίες μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτήν, και βρίσκεται τοποθετημένη στην άνω πλευρά της πλακέτας του μικροελεγκτή. Η πλακέτα επέκτασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.18. Η κατασκευή της είναι open hardware με άδεια CERN Open Hardware License 1.2

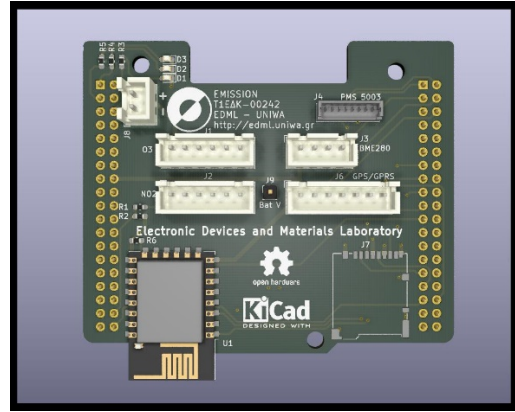


Σχήμα 5.18: Πλακέτα επέκτασης.

Η κάτω όψη της πλακέτας επέκτασης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.19, περιλαμβάνει τις διεπαφές διασύνδεσης με τον μικροελεγκτή και υποδοχή μικρής μπαταρίας (slim) για την υποστήριξη του ρολογιού πραγματικού χρόνου (RTC). Η επάνω όψη της πλακέτας επέκτασης (Σχήμα 5.20) περιλαμβάνει όλες τις διασυνδέσεις των περιφερειακών μονάδων.



Σχήμα 5.19 Κάτω όψη πλακέτας επέκτασης.



Σχήμα 5.20: Επάνω όψη πλακέτας επέκτασης.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.7) παρουσιάζονται οι διασυνδέσεις ανά περιφερειακή μονάδα – αισθητήρα καθώς και το πρωτόκολλο σύνδεσης.

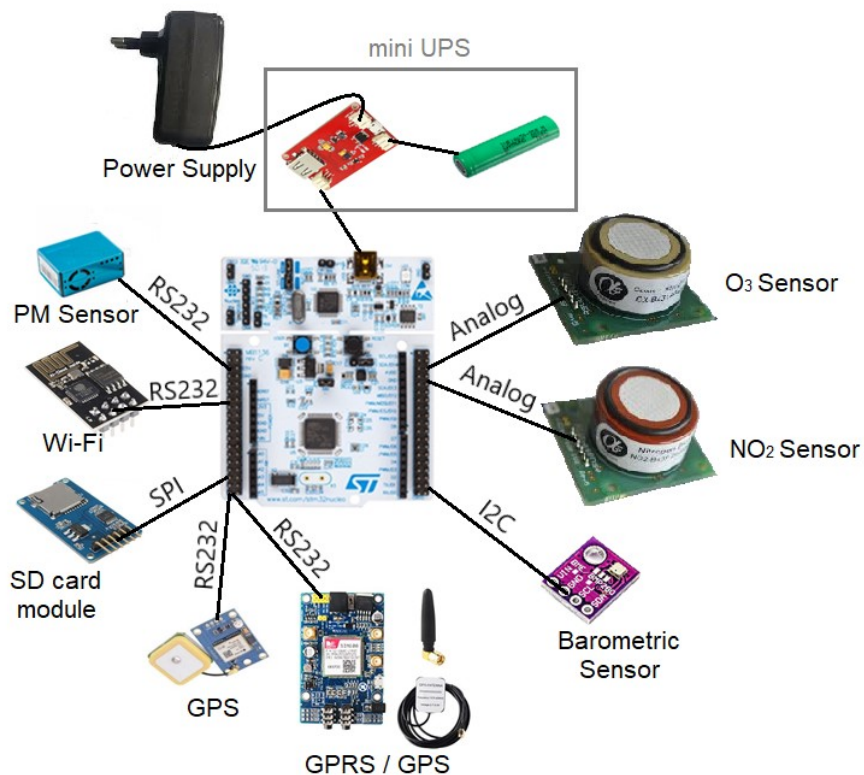
Πίνακας 5.7: Διασύνδεση μονάδων πλακέτας επέκτασης

Διασύνδεση	Μονάδα	Πρωτόκολλο σύνδεσης
J1	Αισθητήρας Όζοντος	Αναλογικά
J2	Αισθητήρας Διοξειδίου του Αζώτου	Αναλογικά
J3	Βαρομετρικός Αισθητήρας	I2C
J4	Αισθητήρας Μικροσωματιδίων	uart
J6	Μονάδα GPS / GPRS	uart
J7	Μονάδα SD card	SPI
J8	Τροφοδοσία	Αναλογικά
J9	Μέτρηση τάσης Μπαταρίας	Αναλογικά
U1	Μονάδα WiFi	uart

Στο Σχήμα 5.21 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα διασύνδεσης των αισθητήρων και των περιφερειακών με τον μικροελεγκτή καθώς και το πρωτόκολλο επικοινωνίας τους. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται και η διάταξη mini UPS.

Στο Σχήμα 5.22 παρουσιάζεται η διάταξη του σταθμού ολοκληρωμένη: Διακρίνεται η βασική πλακέτα του μικροελεγκτή με την πλακέτα επέκτασης, διασύνδεσης των περιφερειακών. Η συγκεκριμένη διάταξη συνδέεται με το διαδίκτυο μέσω Wi-Fi.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



Σχήμα 5.21 Διάγραμμα συνδέσεων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας

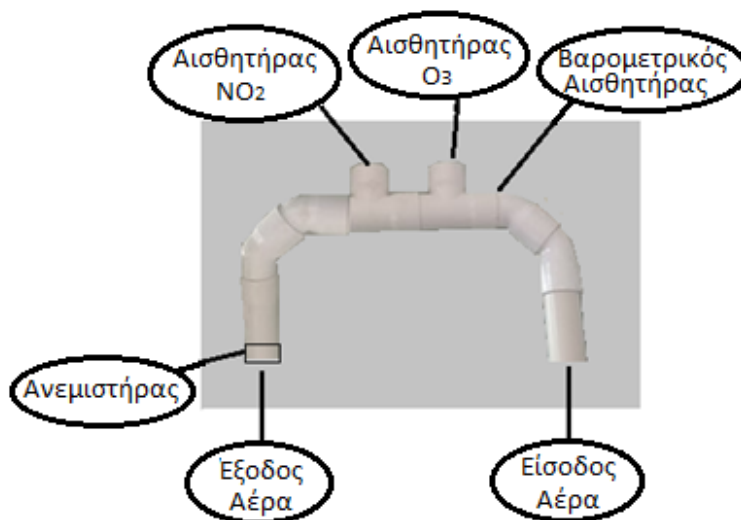


Σχήμα 5.22: Ολοκληρωμένη διάταξη σταθμού.

5.2.2 Κατασκευή διάταξης αεραγωγού

Η βασική απαίτηση για τον σχεδιασμό του αεραγωγού, του σταθμού, είναι η ανάγκη σταθερής ροής αέρα. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία προτείνεται ως πρακτική λύση, για

την επίτευξη του σκοπού αυτού, η χρήση σωλήνων PVC. Στο Σχήμα 5.23 αποτυπώνεται το πρότυπο αεραγωγού βασισμένο σε σωλήνα PVC. [30].



Σχήμα 5.23: Διάταξη όδευσης αέρα και θέσεις αισθητήρων.

Τη διάταξη συμπληρώνει ένας μικρός σε διαστάσεις χαμηλόστροφος ανεμιστήρας, ροής με παροχή περίπου 1lt/min, ο οποίος ελέγχεται από κύκλωμα παλμοτροφοδοτικού μικρής κατανάλωσης.

Η διάταξη εκτός του ηλιακού συλλέκτη, όπου αυτός χρησιμοποιείται, τοποθετείται σε κλειστό IP55 κουτί με διαστάσεις 21cm x 14cm x 8cm.

5.2.3 Σύνθεση κατασκευής

Μετά την τοποθέτηση των αισθητήρων στις αναμονές του σωλήνα διέλευσης αέρα, του βαρομετρικού αισθητήρα και των λοιπών περιφερειακών, τοποθετούνται επίσης: (α) η πλακέτα επέκτασης για την διασύνδεση των μονάδων (επάνω στην πλακέτα του μικροελεγκτή) και (β) η μονάδα GPS / GPRS (επάνω από την πλακέτα τροφοδοτικού). Ολοκληρωμένο το εσωτερικό ενός σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους (με μονάδα GPRS) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.24.



Σχήμα 5.24: Το εσωτερικό ενός συναρμολογημένου πλήρους σταθμού, μετά την τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων.

5.3 Λογισμικό

Έχει επιλεγεί η χρήση πλατφόρμας ανοιχτού λογισμικού, STM32CubeIDE και Eclipse με OpenOCD, για την ανάπτυξη του κώδικα των σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι το λογισμικό που αναπτύχθηκε περιγράφεται από του όρους των αδειών GPL v3. Ο σκελετός του λογισμικού περιλαμβάνει τις βασικές ρυθμίσεις για τον χρονισμό των υπομονάδων των σταθμών όπως για τα συστήματα επικοινωνίας και τις θύρες εισόδου εξόδου. Τα κύρια σημεία του λογισμικού και οι βιβλιοθήκες υποστήριξης του μικροελεγκτή αναπτύχθηκαν στο λογισμικό STM32CubeMX. Μετά το στάδιο αυτό αναπτύχθηκαν σε λογισμικό οι λειτουργίες του σταθμού μέτρησης. Παράλληλα με όλα τα παραπάνω δημιουργήθηκε και αρχείο make ώστε να είναι δυνατή η μεταγλώττιση του προγράμματος με τη χρήση GCC. Η επιλογή αυτή διευκολύνει και την αυτόματη δημιουργία αρχείων υλικού (firmware) μέσω διαδικασιών συνεχούς ανάπτυξης (Continuous Integration) στο αποθετήριο του κώδικα, που φιλοξενείται στην πλατφόρμα GitLab (open access).

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος (όταν ένας σταθμός ενεργοποιείται και εντάσσεται στο δίκτυο) εκτελούνται οι παρακάτω διεργασίες ώστε να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία τόσο στην αποστολή δεδομένων όσο και η πιστότητα τους:

1. Χρονίζονται ο επεξεργαστής και οι υπομονάδες του.
2. Χρονίζονται και ρυθμίζονται οι σειριακοί δίαυλοι σύγχρονης επικοινωνίας (μέγεθος διαύλου, ταχύτητα, stop/parity bits κ.α.)
3. Ρυθμίζεται το αναλογικό σύστημα μέτρησης (ADC) σε σχέση με την ακρίβεια, τον χρόνο δειγματοληψίας κ.α.
4. Ενσωματώνονται οι απαραίτητες βιβλιοθήκες που έχουν υλοποιηθεί και παρέχονται από την ST για το συγκεκριμένο μικροελεγκτή (μΕ) ώστε να εξυπηρετούν τις ανάγκες ανάπτυξης.
5. Καθορίζονται οι παράμετροι που βοηθούν στον περιορισμό κατανάλωσης ενέργειας απομονώνοντας τα συστήματα που δεν χρησιμοποιούνται.

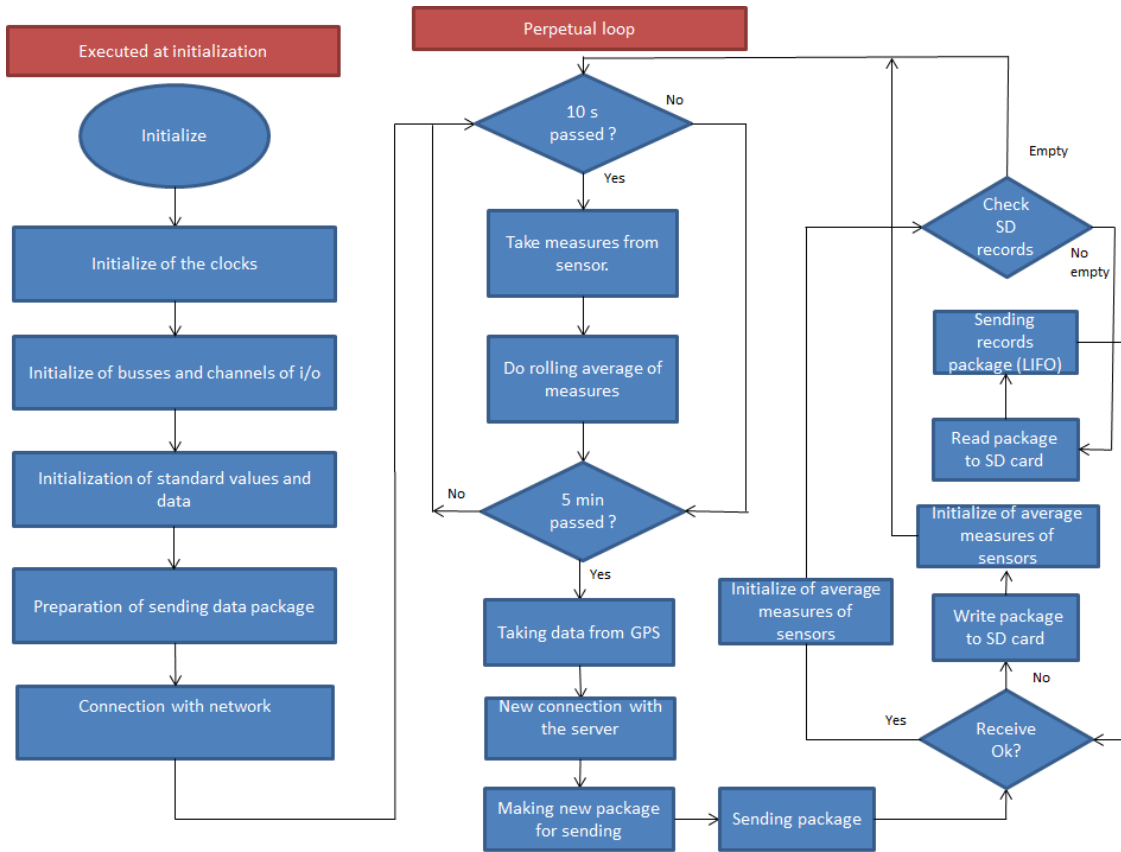
Ροή λειτουργίας σταθμού μέτρησης

Ο αλγόριθμος λειτουργίας του λογισμικού εκτελείται σε δύο επίπεδα. Ειδικότερα:

- Αρχικοποίηση του συστήματος.
- Βρόχος επανάληψης

5.3.1 Συνοπτική δομή λειτουργίας προγράμματος

Το Σχήμα 5.25 παρουσιάζει τη δομή της λειτουργίας του λογισμικού του σταθμού μέτρησης.



Σχήμα 5.25: Δομή λειτουργίας του προγράμματος.

Κατά την έναρξη:

Αρχικοποίηση του συστήματος

1. Μηδενίζονται όλες οι μεταβλητές αποθήκευσης μετρήσεων και δεδομένων.
2. Κατασκευάζεται η δομή του πακέτου αποστολής δεδομένων και καθορίζεται τηλεπικοινωνιακό κανάλι.
3. Δημιουργούνται οι απαραίτητες συνθήκες σύνδεσης με το διαδίκτυο.

Όλα τα προηγούμενα αφορούν την αρχικοποίηση του συστήματος. Στη συνέχεια ακολουθεί ο βρόχος επανάληψης. Ειδικότερα:

1. Κάθε δέκα δευτερόλεπτα και για διάρκεια πέντε λεπτών λαμβάνονται τιμές από όλους τους αισθητήρες,
2. Με την ολοκλήρωση των πέντε λεπτών υπολογίζεται η μέση τιμή των μετρήσεων για κάθε αισθητήρα,
3. Λαμβάνεται από το GPS η θέση του σταθμού και η χρονοσήμανση,
4. Τέλος γίνεται σύνδεση με τον σταθμό λήψης σημάτων (Server) και αποστέλλονται τα δεδομένα.

Ο αναλυτικός κώδικας για τη λειτουργία του σταθμού βρίσκεται στην αντίστοιχη ιστοσελίδα του GitLab (<https://gitlab.com/uniwa-edml/Emission>) και προστατεύεται από άδεια GNU GPLv3.

5.3.2 Σύνταξη και διαμόρφωση του πακέτου δεδομένων για αποστολή στο δίκτυο σε μορφή json-string

Η δομή για την αποστολή δεδομένων γίνεται με JSON string, χρησιμοποιώντας το TCP ως πρωτόκολλο επικοινωνίας. Το πακέτο δεδομένων JSON που διαμορφώνεται έχει την ακόλουθη μορφή.

```
{ "datetime": "YYYY-MM-DD hh:mm:ss", "lon": xx.xxxx , //float, "lat": xx.xxxx , //float,
  "node_Id": "xxx", "temp": "valueT", "hum": "valueH", "press": "valueP",
  "cPM1": "conPM1", "cPM25": "conPM25", "cPM10": "conPM10",
  "pPM0_3": "valuePM03", "pPM0_5": "valuePM05", "pPM1": "valuePM1",
  "pPM2_5": "valuePM25", "pPM5": "valuePM5", "pPM10": "valuePM10",
  "O3m": "valueO3m", "O3a": "valueO3a", "NO2m": "valueNO2m", "NO2a": "valueNO2a",
  "vbat": "valuePOW", "ver": "valueVER", "uptime": "value-uptime", "time_valid": "value-
  time_valid", "location_valid": "value-location_GPS", "location_id": "value-place_ID" }
```

Ο Πίνακας 5.8 παρουσιάζει το πακέτο δεδομένων json και το πλήθος των bytes που δεσμεύεται σύμφωνα με τον σχεδιασμό.

Πίνακας 5.8: Πακέτο δεδομένων json και το πλήθος των bytes που απαιτείται.

Μεταβλητή	Bytes
"datetime": "YYYY-MM-DD hh:mm:ss",	34
"lon": xx.xxxx , //float	19
"lat": xx.xxxx , //float	19
"node_Id": "xxx",	18
"temp": "valueT",	16
"hum": "valueH",	15
"press": "valueP",	20
"cPM1": "conPM1",	15
"cPM25": "conPM25",	16
"cPM10": "conPM10",	16
"pPM0_3": "valuePM03",	17
"pPM0_5": "valuePM05",	17
"pPM1": "valuePM1",	15
"pPM2_5": "valuePM25",	17
"pPM5": "valuePM5",	15
"pPM10": "valuePM10",	16

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

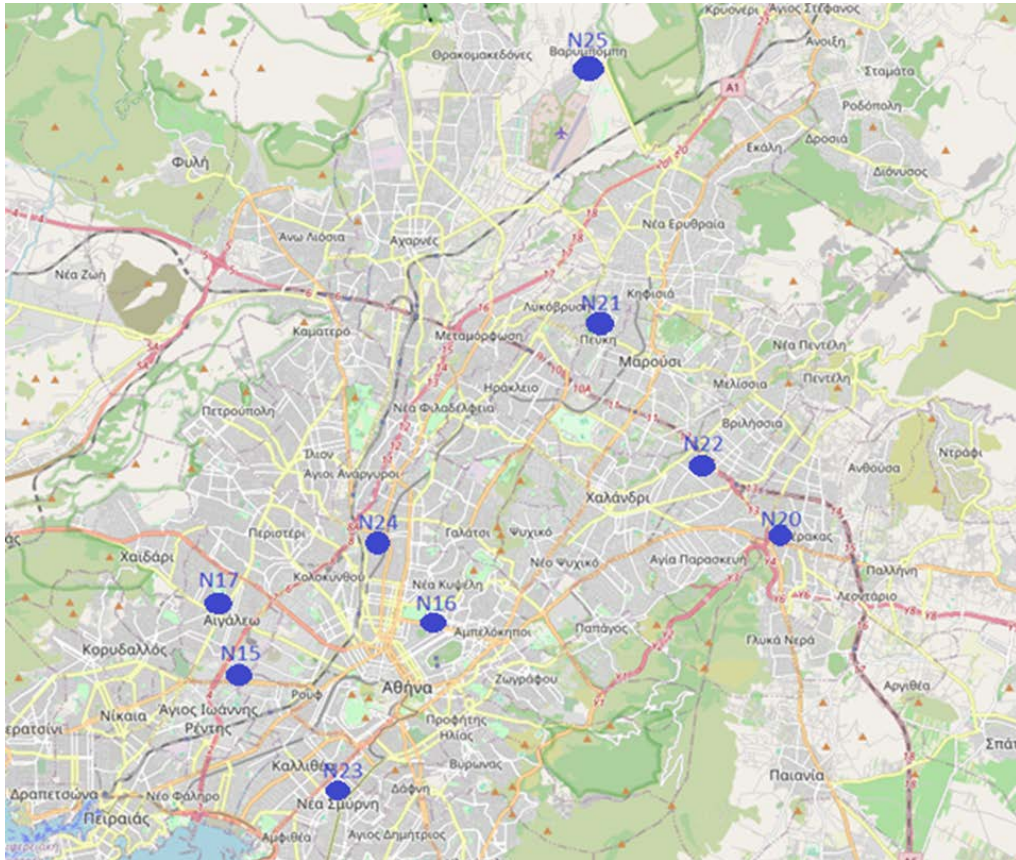
"O3m": "valueO3m",	13
"O3a": "valueO3a",	13
"NO2m": "valueNO2m",	14
"NO2a": "valueNO2a",	14
"vbat": "valuePOW",	15
"ver": "valueVER",	13
"uptime": "value-uptime",	10
"time_valid": "value-time_valid",	5
"location_valid": "value-location_GPS",	5
"location_id": "value-place_ID",	5

Το σύνολο των δεδομένων καθαρής πληροφορίας που αποστέλλονται με το json πακέτο είναι 393 bytes.

5.4 Εγκατάσταση σταθμών μέτρησης χαμηλού κόστους στο πεδίο και λήψη μετρήσεων

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής των σταθμών μέτρησης και την περίοδο βαθμονόμησής τους στις εγκαταστάσεις του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και σε απόσταση 1Km από τις εγκαταστάσεις του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, έχουν εγκατασταθεί στο σύνολο εννέα (9) σταθμοί παρακολούθησης ποιότητας αέρα στην περιοχή της Αττικής στα σημεία που εμφανίζονται στον χάρτη στο Σχήμα 5.26.

Με δεδομένο ότι η ακτίνα κάλυψης, ενός σταθμού, κυμαίνεται από δυο ως τρία χιλιόμετρα, η εγκατάσταση εννέα σταθμών είναι ικανοποιητική για την παρακολούθηση της ποιότητας αέρα σε μια περιοχή όπως η Αττική.



Σχήμα 5.26: Χάρτης εγκατεστημένων σταθμών στην περιοχή της Αττικής

5.4.1 Σημεία εγκατάστασης σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα, χαμηλού κόστους

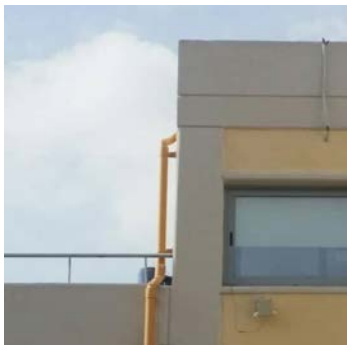
Η εγκατάσταση των εννέα σταθμών εμφανίζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.9), όπως και τα σημεία (γεωγραφική θέση) που είναι τοποθετημένοι.

Πίνακας 5.9: Σημεία εγκατάστασης σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα, χαμηλού κόστους.

Node ID	Τοποθεσία εγκατάστασης (Διεύθυνση)	Ύψος από το έδαφος (m)
N15	Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής – Πανεπιστημιούπολη Αρχαίου Ελαιώνα	4
N16	Παράσχου 32, Γκύζη	6
N17	Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής – Πανεπιστημιούπολη Άλσους Αιγάλεω	4
N20	Γέρακας Αττικής, Οδός Μιαούλη 28	7
N21	Βαλτετσίου 11, Πεύκη	6
N22	Βριλήσσια, Οδός Ηλείας	6
N23	Νέα Σμύρνη, Οδός Θράκης	4
N24	Πατήσια, Οδός Παπαναστασίου Αλεξάνδρου	6
N25	Βαρυμπόμπη, Οδός Ακακίας	6

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω, από το Σχήμα 5.27 έως και το Σχήμα 5.32 οι θέσεις εγκατάστασης – τοποθέτησης των σταθμών.



Σχήμα 5.27: Node 15, ΠαΔΑ – Πανεπιστημιούπολη Αρχαίου Ελαιώνα.



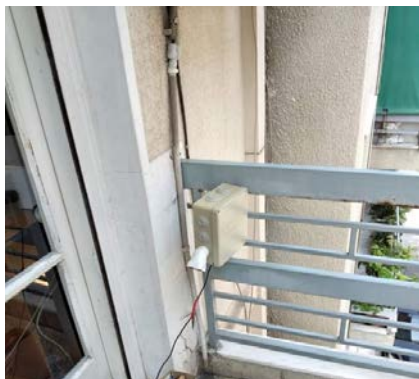
Σχήμα 5.28: Node 17, ΠαΔΑ – Πανεπιστημιούπολη Άλσους Αιγάλεω.



Σχήμα 5.29: Node 20, Γέρακας Αττικής, Οδός Μιαούλη 28



Σχήμα 5.30: Node 22. Βριλήσσια, Οδός Ηλείας 22.



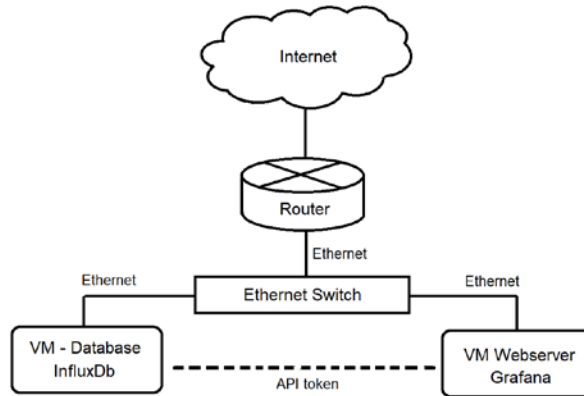
Σχήμα 5.31: Node 16. Παράσχου 32, Γκύζη.



Σχήμα 5.32: Node 21. Βαλτετσίου 11, Πεύκη.

5.5 Πληροφοριακό σύστημα λήψης μετρήσεων

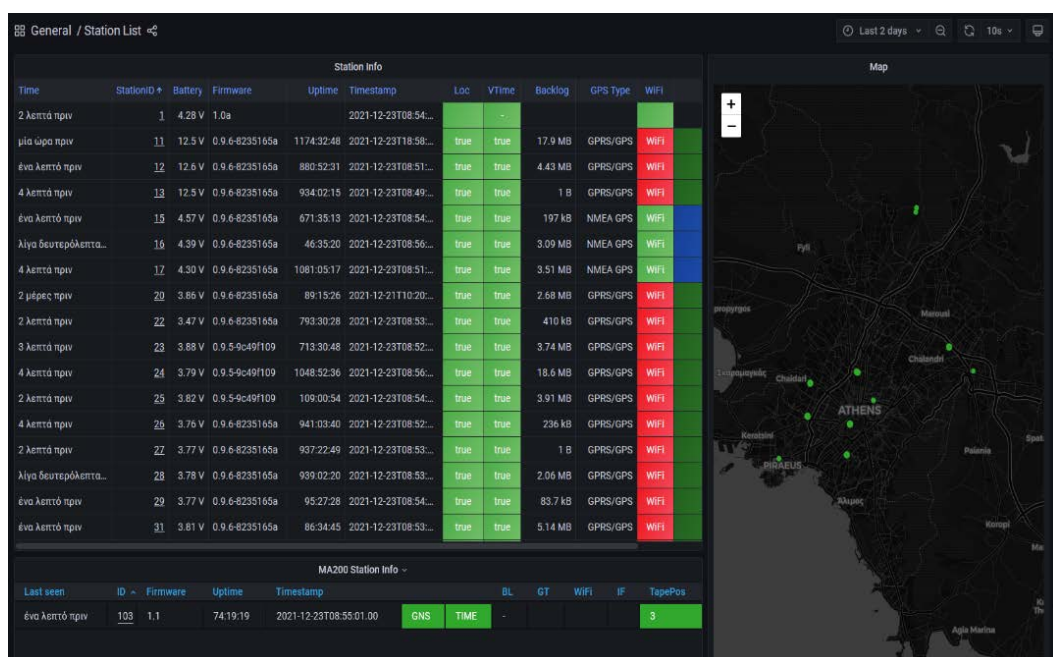
Η λήψη των μετρήσεων από τους σταθμούς παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους γίνεται σε ένα πληροφοριακό σύστημα, το οποίο είναι βασισμένο σε λειτουργικό σύστημα Linux. Το Σχήμα 5.33 παρουσιάζει τη δομή του πληροφοριακού συστήματος καθώς και τον τρόπο διασύνδεσης και επικοινωνίας.



Σχήμα 5.33 Δομή πληροφοριακού συστήματος

Η βάση δεδομένων είναι η InfluxdB και το περιβάλλον απεικόνισης το λογισμικό ανοικτού κώδικα Grafana που βρίσκεται εγκατεστημένο σε εικονική μηχανή στο κέντρο διαχείρισης δικτύου του ΠαΔΑ. Η λειτουργία του είναι να επεξεργάζεται την λαμβανόμενη πληροφορία από τον κάθε σταθμό μέτρησης και να την αποθηκεύει σε μια βάση δεδομένων, στη συνέχεια να οπτικοποιεί τα δεδομένα σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη. Με αυτό τον τρόπο υπάρχουν και διατίθενται ελεύθερα και άμεσα οι μετρήσεις από τους αισθητήρες ποιότητας αέρα. Επιπλέον δίνεται η πληροφορία διαθεσιμότητας των σταθμών, η θέση που είναι εγκατεστημένοι, κλπ. Στο πληροφοριακό σύστημα τα δυο λογισμικά που έχουν χρησιμοποιεί είναι ανοικτού κώδικα και η μεταξύ τους επικοινωνία γίνεται με API token.

Στο Σχήμα 5.34 εμφανίζεται η διεπαφή με τον χρήστη, του λογισμικού Grafana με τους ενεργούς σταθμούς και την θέση που βρίσκονται στον χάρτη.



Σχήμα 5.34: Διεπαφή Grafana, με τους εννέα ενεργούς σταθμούς και τη γεωγραφική τους θέση.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Τα χαρακτηριστικά των εικονικών μηχανών (virtual machines) που φιλοξενούν τη βάση δεδομένων (influxdB), και το λογισμικό απεικόνισης (Grafana), αποτελούνται από πόρους που περιλαμβάνουν 2 CPU, 2GB RAM, 20GB storage.

5.6 Δοκιμές επιβεβαίωσης ορθής λειτουργίας των σταθμών

Μετά την υλοποίηση των σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, για ένα χρονικό διάστημα δύο εβδομάδων έγιναν μια σειρά από δοκιμές. Οι δοκιμές περιλάμβαναν μια σειρά από βήματα επαλήθευσης της αξιοπιστίας του συστήματος για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας κάθε σταθμού όπως,

- (1) Αξιοπιστία διασυνδέσεων των περιφερειακών και των αισθητήρων.
- (2) Αξιοπιστία παροχής ενέργειας (UPS) με εσκεμμένη διακοπή παροχής ενέργειας (ρευματολήπτη).
- (3) Αξιοπιστία κατά την αποθήκευση δεδομένων στην κάρτα micro SD με εσκεμμένη διακοπή τηλεπικοινωνιακού δικτύου.
- (4) Αξιοπιστία κατά την αποστολή δεδομένων από την κάρτα micro SD μετά την αποκατάσταση σύνδεσης τηλεπικοινωνιακού δικτύου.
- (5) Αξιοπιστία ρολογιού κατά τη συλλογή των μετρήσεων.
- (6) Αξιοπιστία ρολογιού κατά τη αποστολή των μετρήσεων.
- (7) Αξιοπιστία κατά την απομακρυσμένη αναβάθμιση λογισμικού.

6. Πειραματικά αποτελέσματα μετρήσεων ποιότητας αέρα, από αισθητήρες χαμηλού κόστους

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική παρουσίαση των ερευνητικών ευρημάτων της διδακτορικής διατριβής. Συγκεκριμένα αφού έχουν εξασφαλιστεί τόσο η συνεχής, απρόσκοπτη και αξιόπιστη λειτουργία των σταθμών και η συνεχής καταγραφή και μεταφορά των δεδομένων έγινε προσπάθεια προσέγγισης των ερευνητικών ερωτημάτων που αποτελούν το βασικό αντικείμενο της διατριβής. Η επιλογή της θέσης των σταθμών (κοντά σε πιστοποιημένα όργανα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας) έγινε ώστε να γίνει η βαθμονόμηση και διόρθωση σε συνθήκες πεδίου, όπως περιγράφεται σε προηγούμενα κεφάλαια. Το διάστημα συλλογής δεδομένων μετά την κατασκευή των σταθμών εντοπίζεται από το 2019 έως το 2023. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε έχει δυο διακριτά βήματα.

- (1) Στην πρώτη φάση έγινε η διόρθωση των λαμβανομένων τιμών
- (2) Στην δεύτερη φάση έγινε βελτιστοποίηση των διορθωμένων τιμών ώστε να προσεγγίζουν τις αντίστοιχες τιμές των οργάνων αναφοράς.

6.1 Έλεγχος αξιοπιστίας αισθητήρων χαμηλού κόστους.

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται η ανάλυση των πρωτογενών και των διορθωμένων δεδομένων από τους σταθμούς παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, όπως και η αξιολόγηση του βαθμού συσχέτισής τους. Αναλυτικότερα εξετάζονται οι αισθητήρες αερίων, όζοντος (O_3), διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και μικροσωματιδίων $PM_{2.5}$. Σημαντικό σημείο αποτέλεσε η μελέτη της ακρίβειας των αισθητήρων με τελικό στόχο την εφαρμογή σταθερών συντελεστών διόρθωσης κάθε αισθητήρα. Τέσσερις σταθμοί παρακολούθησης αέρα χαμηλού κόστους εγκαταστάθηκαν (Σχήμα 6.1) στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Ως πρώτο βήμα ήταν απαραίτητο να διορθωθούν οι τιμές που καταγράφονται από τους αισθητήρες NO_2 , O_3 , PM με βάση τις οδηγίες των κατασκευαστών και την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Αυτό έγινε ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία. Για τους αισθητήρες NO_2 και O_3 της εταιρείας Alphasense (NO_2 -B43F, O_3 -B431) και με βάση τις οδηγίες του κατασκευαστή (<https://zueriluft.ch/makezurich/AAN803.pdf>), χρησιμοποιήθηκαν τόσο οι βαρομετρικές συνθήκες όσο και οι οδηγίες για κανονικοποίηση των τιμών. Μελετήθηκαν οι ενδεδειγμένες συναρτήσεις διόρθωσης και επιλέχθηκε η καταλληλότερη που προσεγγίζει τα δεδομένα των πιστοποιημένων οργάνων. Τα

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής παρουσιάζονται στην παράγραφο 6.2, καθώς και στις αντίστοιχες δημοσιεύσεις που έγιναν στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής [202].

Για τον αισθητήρα PM (Plantower - PMS5003) εφαρμόστηκαν οι συναρτήσεις διόρθωσης όπως αυτές καταγράφονται βιβλιογραφικά, χρησιμοποιώντας τις βαρομετρικές συνθήκες υγρασίας, θερμοκρασίας και πίεσης. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας περιγράφονται στην παράγραφο 6.2 και στις σχετικές δημοσιεύσεις της διδακτορικής διατριβής [203], [204].



Σχήμα 6.1: Εγκατάσταση σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών.

Κατά το στάδιο αυτό, δεδομένα συλλέχθηκαν από τους σταθμούς παρακολούθησης χαμηλού κόστους. Τα δεδομένα για το όζον και το διοξείδιο του αζώτου συλλέχθηκαν από 18 έως 26 Σεπτεμβρίου 2020 και τα δεδομένα συγκέντρωσης μικροσωματιδίων συλλέχθηκαν από 1 έως 12 Οκτωβρίου 2020. Για να είναι δυνατός ο έλεγχος αξιοπιστίας των δεδομένων που προκύπτουν από τους αισθητήρες αερίων NO_2 και O_3 ήταν απαραίτητο να προηγηθεί η διόρθωση τιμών όπως προτείνεται από την κατασκευάστρια εταιρία. Στο σχετικό έντυπο εφαρμογής περιγράφεται αυτή η διαδικασία και προτείνεται η επιλογή της κατάλληλης εξίσωσης από μια σειρά προτεινόμενων. Μετά από διαδοχικούς ελέγχους των μετρήσεων από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους σε σχέση με τις μετρήσεις των οργάνων αναφοράς επιλέχθηκε να γίνει ο υπολογισμός με βάση την εξίσωση (1).

$$WE_c = (WE_u - WE_e) - n_T * (AE_u - AE_e) \quad (1)$$

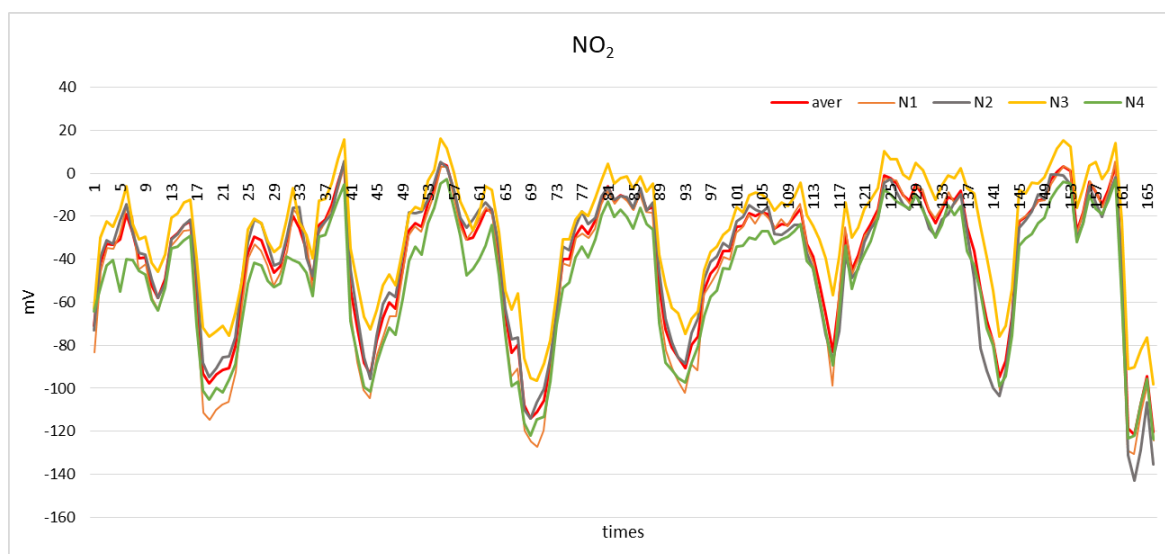
Όπου WE_c είναι η διορθωμένη τιμή του ηλεκτροδίου εργασίας, WE_u είναι η τιμή ανάγνωσης του ηλεκτροδίου εργασίας, AE_u είναι η τιμή ανάγνωσης βοηθητικού ηλεκτροδίου, n_T είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας, WE_e είναι η μηδενική τιμή

ηλεκτρονικού ηλεκτροδίου εργασίας, AE_e είναι η μηδενική τιμή του βοηθητικού ηλεκτρονικού ηλεκτροδίου. Όλες οι προαναφερόμενες τιμές εκφράζονται σε mV. Όσον αφορά τον συντελεστή θερμοκρασίας n_T η τιμή του δίνεται από τον κατασκευαστή. Ο Πίνακας 6.1 παρουσιάζει τις τιμές του n_T για τους αισθητήρες O_3 (OX-B431) και NO_2 (NO2-B43F).

Πίνακας 6.1 Τιμές συντελεστή θερμοκρασίας n_T

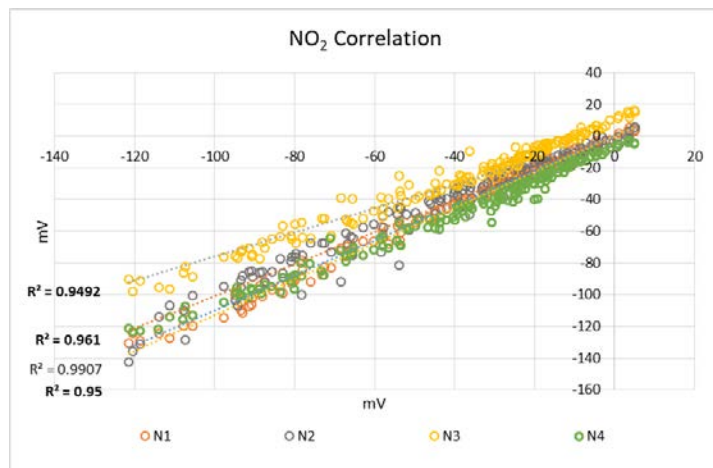
Sensor	Temperature (°C)								
	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
OX-B431	0.9	0.9	1	1.3	1.5	1.7	2	2.5	3.7
NO2-B43F	1.3	1.3	1.3	1.3	1	0.6	0.4	0.2	-1.5

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν την ομοιογένεια της εξόδου κάθε αισθητήρα εκφρασμένη σε mV. Το Σχήμα 6.2 παρουσιάζει τη χρονοσειρά (σε ώρες) των τιμών εξόδου των αισθητήρων, διορθωμένη με τη θερμοκρασία, μεταξύ τεσσάρων αισθητήρων διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και του μέσου όρου τους. Είναι εμφανές ότι μετά την εφαρμογή της εξίσωσης 1 από τις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή προκύπτουν και αρνητικές τιμές. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη καθορισμού παραμέτρων κλιμάκωσης των τιμών. Σημειώνεται ότι αυτή η παρατήρηση είναι αναμενόμενη σύμφωνα με τον κατασκευαστή και αντιμετωπίζεται ακριβώς με συναρτήσεις κλιμάκωσης. Το Σχήμα 6.3 παρουσιάζει τις τιμές συσχέτισης μεταξύ του μέσου όρου όλων των αισθητήρων και κάθε αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO_2).



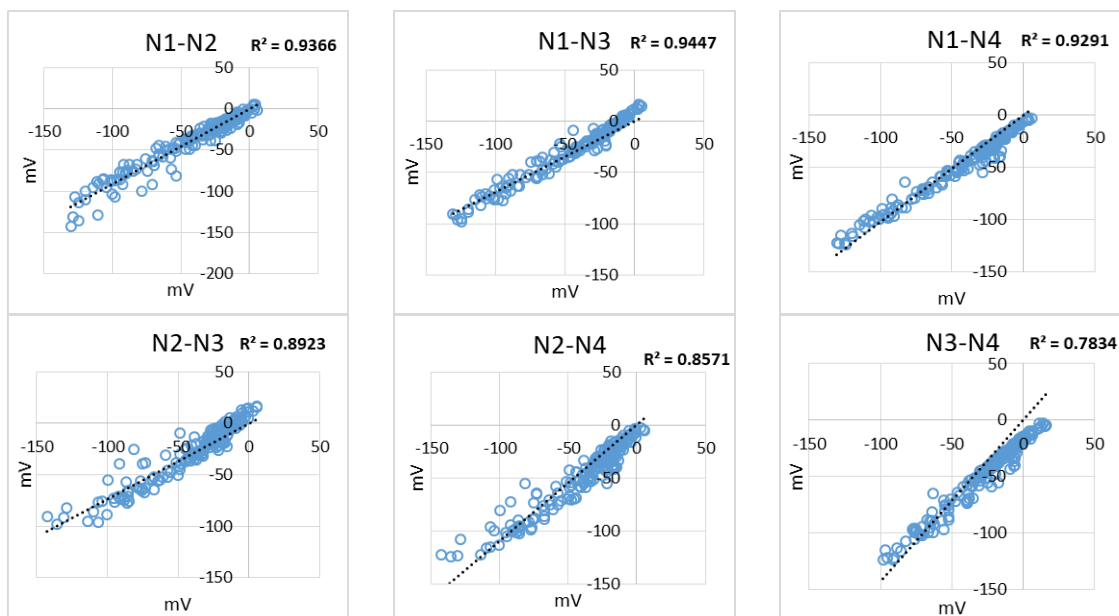
Σχήμα 6.2: Χρονοσειρά δεδομένων από τους αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και της μέσης τιμής.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



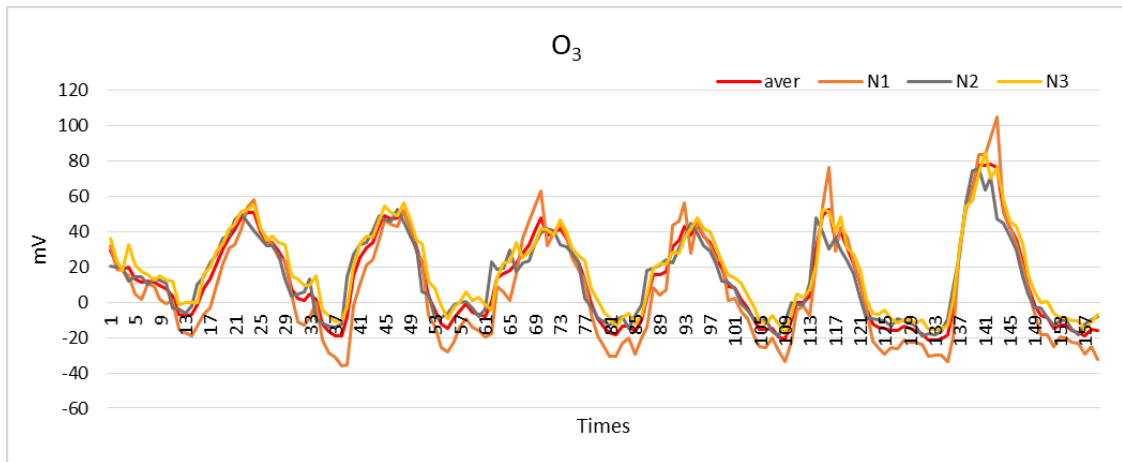
Σχήμα 6.3: Βαθμός συσχέτισης κάθε αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO_2) με την μέση τιμή.

Το Σχήμα 6.4 παρουσιάζει τις τιμές συσχέτισης (R^2) μεταξύ των αισθητήρων διοξειδίου του αζώτου (NO_2) των σταθμών μέτρησης 1, 2, 3, 4.

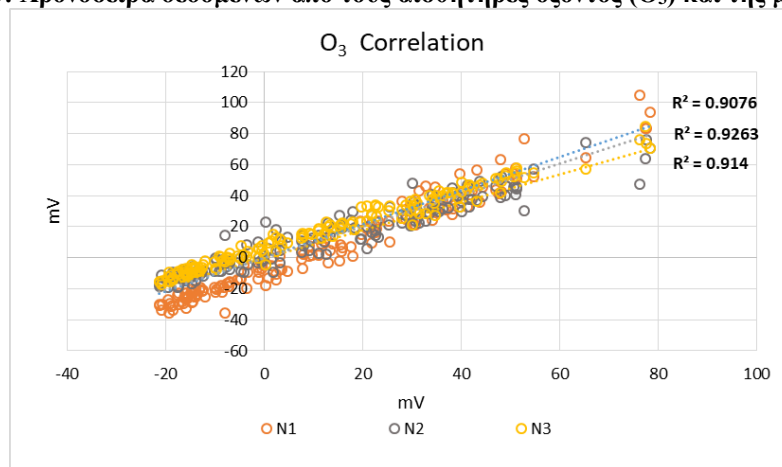


Σχήμα 6.4: Συσχέτιση μεταξύ τεσσάρων αισθητήρων διοξειδίου του αζώτου (NO_2) χαμηλού κόστους, (σταθμοί μέτρησης 1, 2, 3, 4).

Το Σχήμα 6.5 παρουσιάζει τη χρονοσειρά των τιμών εξόδου των αισθητήρων, διορθωμένη με τη θερμοκρασία, μεταξύ των τριών αισθητήρων όζοντος (O_3) και το Σχήμα 6.6 παρουσιάζει τις τιμές συσχέτισης (R^2) μεταξύ των τιμών, του μέσου όρου και μεμονωμένα κάθε αισθητήρα όζοντος (O_3).

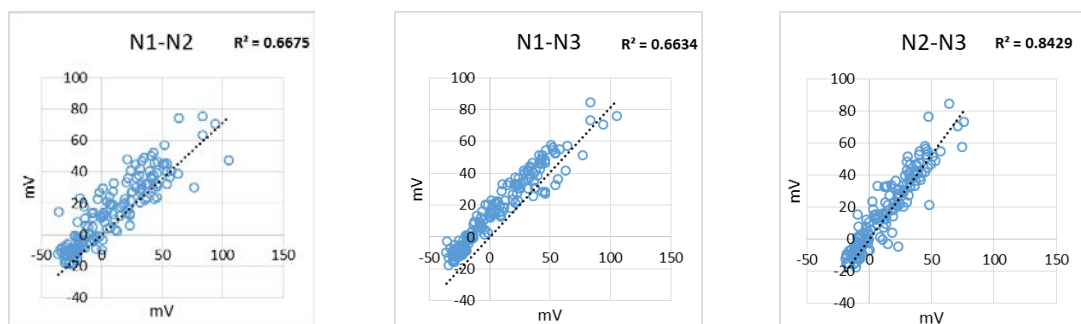


Σχήμα 6.5: Χρονοσειρά δεδομένων από τους αισθητήρες όζοντος (O_3) και της μέσης τιμής.



Σχήμα 6.6: Βαθμός συσχέτισης κάθε αισθητήρα όζοντος (O_3) με την μέση τιμή.

Το Σχήμα 6.7 εμφανίζει τις τιμές συσχέτισης (R^2) για το όζον (O_3) μεταξύ των τριών αισθητήρων (κόμβοι 1, 3, 4).



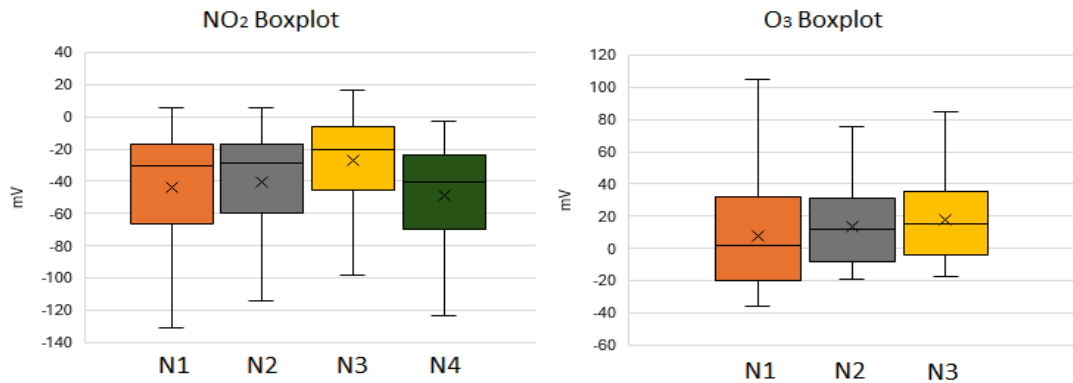
Σχήμα 6.7: Συσχέτιση μεταξύ τριών αισθητήρων όζοντος (O_3) χαμηλού κόστους (σταθμοί μέτρησης 1, 3, 4).

Με στόχο την διόρθωση των τιμών (leveling, scaling) κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα ώστε να προσεγγιστούν οι σχετικοί δείκτες. Ένα θηκόγραμμα (boxplot) εμφανίζει την κατανομή δεδομένων με βάση μια σύνοψη πέντε σταδίων (ελάχιστο, πρώτο τεταρτημόριο, διάμεσος, τρίτο τεταρτημόριο και μέγιστο). Επίσης εμφανίζει τις ακραίες

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

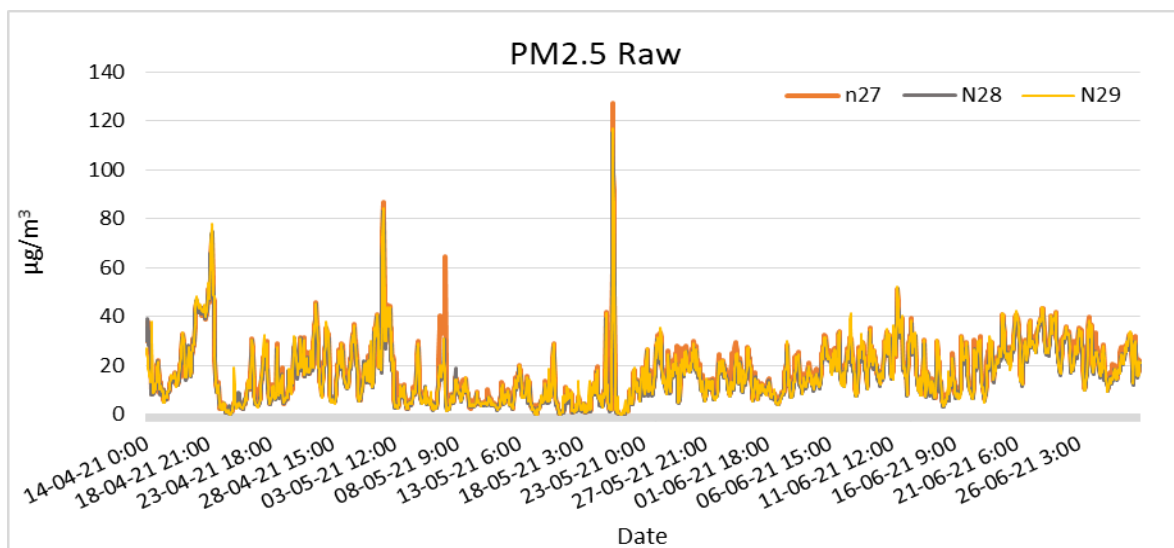
τιμές και ποιες είναι οι αξίες τους, όπως και εάν οι τιμές είναι συμμετρικές, πόσο σφιχτά είναι ομαδοποιημένες όπως και πόσο στρεβλές είναι.

Το Σχήμα 6.8 παρουσιάζει τα θηκογράμματα των τιμών, τόσο για τους τέσσερις αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO_2), όσο και για τους τρεις αισθητήρες του όζοντος (O_3).

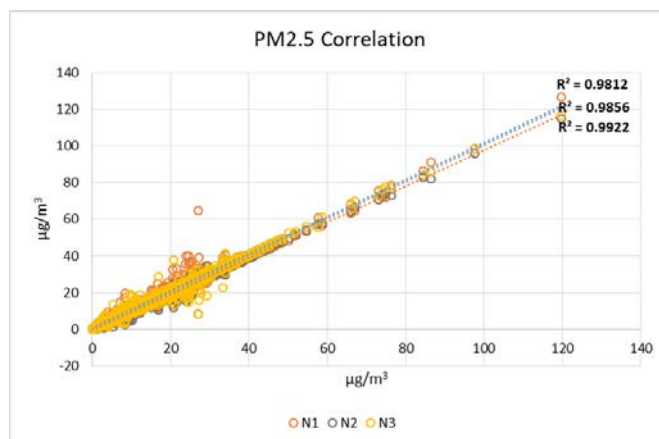


Σχήμα 6.8: Θηκόγραμμα (boxplot) τιμών αισθητήρων διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και όζοντος (O_3).

Σημαντικό θέμα της έρευνας αποτελεί και η μελέτη της συγκέντρωσης μικροσωματιδίων. Αυτή η μελέτη αναφέρεται σε συγκέντρωση μικροσωματιδίων $\text{PM}_{2.5}$. Το Σχήμα 6.9 παρουσιάζει τα πρωτογενή δεδομένα ($\text{PM}_{2.5}$), από τρεις αισθητήρες. Το Σχήμα 6.10 παρουσιάζει τη συσχέτιση (R^2) μεταξύ του κάθε αισθητήρα με την μέση τιμή.

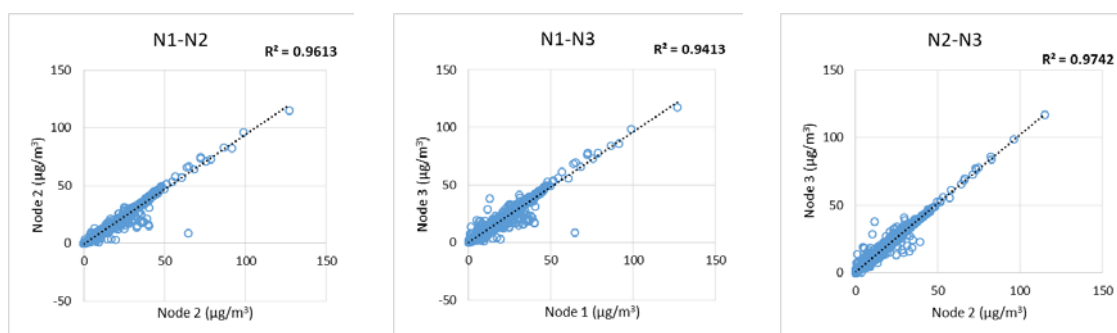


Σχήμα 6.9: Χρονοσειρά πρωτογενών δεδομένων από τους τρεις αισθητήρες μικροσωματιδίων ($\text{PM}_{2.5}$), χαμηλού κόστους.



Σχήμα 6.10: Βαθμός συσχέτισης, πρωτογενών δεδομένων, κάθε αισθητήρα μικροσωματιδίων (PM2.5) με την μέση τιμή.

Στο Σχήμα 6.11 εμφανίζονται οι τιμές συσχέτισης (R^2) πρωτογενών τιμών, για τα μικροσωματίδια (PM2.5) μεταξύ των τριών αισθητήρων, των σταθμών μέτρησης (nodes) 1, 2, 3.



Σχήμα 6.11: Συσχέτιση, πρωτογενών δεδομένων, μεταξύ τριών αισθητήρων μικροσωματιδίων (PM2.5) χαμηλού κόστους, (σταθμοί μέτρησης 1, 2, 3).

Μεταξύ των τριών αισθητήρων του κάθε μετρούμενου μεγέθους, ο συσχετισμός (R^2), του διοξειδίου του αζώτου (NO_2) παρουσίασε τιμή σε από 78% έως 94%, για το όζον (O_3) παρουσίασε τιμή συσχέτισης από 66% έως 84% και για τα μικροσωματίδια (PM2.5) παρουσίασε τιμές συσχέτισης μεταξύ 94% και 97%.

6.2 Βελτιστοποίηση μετρήσεων

Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας μελετήθηκαν οι παραμένουσες αποκλίσεις των τιμών που προέρχονται από τα συστήματα μέτρησης σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που λαμβάνονταν από τα όργανα αναφοράς.

Έγινε μια προσπάθεια εφαρμόζοντας τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας σήματος να διερευνηθούν οι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν αυτές τις αποκλίσεις. Τα αποτελέσματα της προσπάθειας αυτής αποτυπώνονται στην παράγραφο 6.4 με την εφαρμογή γραμμικής και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Επιχειρήθηκε η εφαρμογή

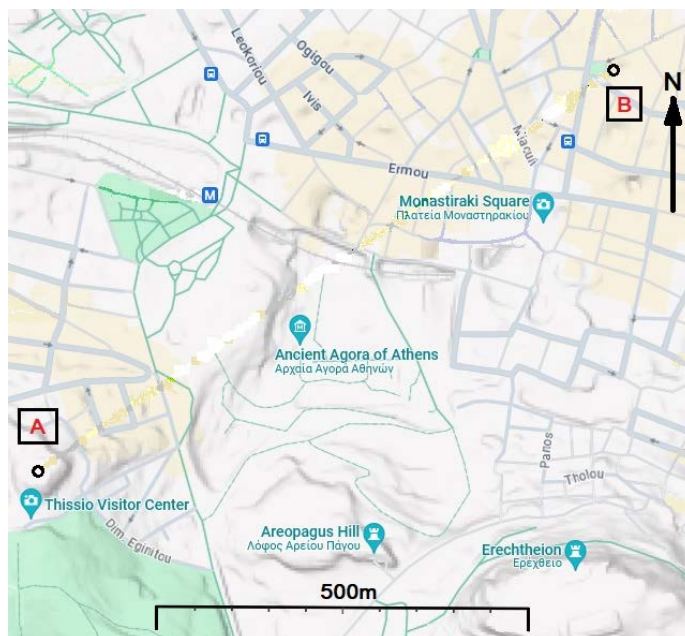
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

σειράς τεχνικών για την διόρθωση και βελτιστοποίηση των τελικών δεδομένων των αέριων ρύπων δεδομένου ότι για τις μετρήσεις από τους αισθητήρες PM δεν απαιτείται περαιτέρω βελτίωση, εφαρμόζοντας τις τεχνικές:

- Φίλτρου πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (F.I.R)
- Φίλτρου Kalman
- Ασφαλούς ποσοστιαίας διακύμανσης
- Προσέγγισης μη γραμμικής παλινδρόμησης

Το θεωρητικό υπόβαθρο της κάθε μιας από τις παραπάνω τεχνικές παρουσιάζεται συνοπτικά στις αντίστοιχες παραγράφους. Τα ερευνητικά ευρήματα αποτυπώνονται στις παραγράφους 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, και έχουν δημοσιευτεί στα άρθρα [205], [206], [207] της διδακτορικής διατριβής.

Το Σχήμα 6.12 παρουσιάζει στο χάρτη τη θέση των σταθμών μέτρησης δίπλα στα όργανα αναφοράς στις εγκαταστάσεις του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (Α), σε σχέση με τα όργανα αναφοράς του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Β), και πριν αυτοί τοποθετηθούν στις διεσπαρμένες θέσεις που βρίσκονται σήμερα (Σχήμα 5.26). Δυο από το σύνολο των κατασκευασμένων σταθμών βρίσκονται ακόμα στις θέσεις αναφοράς ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της ανάγκης επαναβαθμονόμησης.



Σχήμα 6.12: Χάρτης τοποθέτησης σταθμών μέτρησης και αναφοράς

6.3 Συναρτήσεις βαθμονόμησης, συντελεστές διόρθωσης, αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους

Σε αυτή την παράγραφο διερευνάται ο τρόπος βαθμονόμησης αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, τόσο των ηλεκτροχημικών αισθητήρων αέριων ρύπων, όσο και των αισθητήρων μικροσωματιδίων οπτικής τεχνολογίας. Παρουσιάζεται η μεθοδολογία και η εφαρμογή συντελεστών διόρθωσης στα πρωτογενή δεδομένα των αισθητήρων, με στόχο την διόρθωση των μετρήσεων σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς. Τα αποτελέσματα που εμφανίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο εκφράζονται, για τους αισθητήρες αέριων ρύπων υπό μορφή τάσης (mVolt), ενώ για τους αισθητήρες μικροσωματιδίων σε συγκέντρωση ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

6.3.1 Διορθωτικοί συντελεστές αισθητήρων αέριων ρύπων, χαμηλού κόστους

Σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή [208] πρέπει να σχεδιαστεί και να ακολουθηθεί μεθοδολογία βαθμονόμησης με χρήση διορθωτικών συντελεστών κλιμάκωσης, πέραν της διόρθωσης με την θερμοκρασία όπως περιγράφεται στην εξίσωση (1), προκειμένου να επιτευχθεί η διόρθωση των μετρήσεων, σε σχέση με τις μετρήσεις από τα όργανα αναφοράς. Το αποτέλεσμα της εξίσωσης (1) εκφράζεται σε mVolt, η συγκέντρωση του αερίου ρύπου (ppb) προκύπτει από την διαίρεση του αποτελέσματος της εξίσωσης (1) με την ευαισθησία (sensitivity) του εκάστοτε αισθητήρα (εξίσωση 2), η οποία δίδεται από την κατασκευάστρια εταιρία (Alphasense). Ο τρόπος μετατροπής της συγκέντρωσης του αερίου ρύπου από ppb σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ παρουσιάζεται στην εξίσωση 3.

$$GAS_{Concentration}(ppb) = \frac{WE_c}{SensorSensitivity} \quad (2)$$

$$GAS_{Concentration}\left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = GAS_{Concentration}(ppb) * (12.187) * \frac{(M)}{(273.15 + ^\circ C)} \quad (3)$$

όπου M, το μοριακό βάρος του αερίου ρύπου, σε ατμοσφαιρική πίεση 1 atm.

Γενικότερα η μετατροπή αυτή επιτυγχάνεται με το γινόμενο της συγκέντρωσης ppb με τον συντελεστή του εκάστοτε αερίου για την μετατροπή του σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ενδεικτικά οι συντελεστές μετατροπής συγκέντρωσης από ppb σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ είναι, για το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) $1\text{ppb} = 1.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$, και για το όζον (O_3) $1\text{ppb} = 2.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, σε περιβαλλοντικές συνθήκες, ατμοσφαιρικής πίεσης 1 atm, και θερμοκρασία 25°C .

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Ο γενικός κανόνας κλιμάκωσης που εφαρμόστηκε επαναλαμβανόμενα σε πειράματα μετρήσεων, για την διόρθωση των μετρούμενων τιμών, παρουσίασε εξαιρετικά αποτελέσματα και περιγράφεται στην εξίσωση 4.

$$GAS_{Corrected-Concentration} = \frac{(GAS_{concentration}+C1)}{C2} \quad (4)$$

όπου, το $GAS_{Corrected-Concentration}$ είναι η διορθωμένη τιμή συγκέντρωσης αερίου ρύπου, το $GAS_{concentration}$ είναι η βαθμονομημένη τιμή συγκέντρωσης αερίου ρύπου μετά την εφαρμογή της εξίσωσης 1, ενώ οι C1 και C2 είναι συντελεστές που υπολογίζονται για κάθε αισθητήρα, διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και όζοντος (O_3), ξεχωριστά μετά από μια περίοδο λειτουργίας στο πεδίο δίπλα στα μετρητικά όργανα αναφοράς. Πρέπει να σημειωθεί ότι για το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) ο διορθωτικός συντελεστής C2 παίρνει τρεις διακριτές τιμές ανάλογα με το επίπεδο συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO_2). Ακολουθώντας τη διαδικασία της διόρθωσης, οι τρεις συντελεστές υπολογίζονται ως C2a όταν το $NO_2 < 3$, C2b όταν $3 \leq NO_2 \leq 30$ και C2c όταν το $NO_2 > 30$.

6.3.2 Διορθωτικοί συντελεστές αισθητήρων συγκέντρωσης μικροσωματιδίων, χαμηλού κόστους

Οι συγκεντρώσεις των μικροσωματιδίων επηρεάζονται από την υγρασία (RH) και τη θερμοκρασία (T) του περιβάλλοντος, στην ερευνητική μελέτη [56] προτείνεται ένας τύπος διόρθωσης των συγκεντρώσεων σωματιδίων με τις ακόλουθες εξισώσεις (5), (6)

$$PM_{RH\ Corrected} = \frac{Raw\ sensor}{0.025 * RH\% + 0.17} \quad (5)$$

$$PM_{T_RH\ Corrected} = \frac{PM_{RH\ Corrected}}{-0.0007 * T + 0.9918} \quad (6)$$

Η εξίσωση 5 περιγράφει τη διόρθωση που απαιτείται, για το επίπεδο των πρωτογενών τιμών του αισθητήρα PM, σε σχέση με την κατάσταση υγρασίας στο πεδίο μέτρησης, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική υγρασία (RH%) του περιβάλλοντος όπως μετρήθηκε από τον βαρομετρικό αισθητήρα. Η εξίσωση 6 περιγράφει την αντίστοιχη διόρθωση, λαμβάνοντας υπόψη το αποτέλεσμα της εξίσωσης (5), σε σχέση με την θερμοκρασία (T) περιβάλλοντος, στη θέση εγκατάστασης του σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους.

Επιπλέον μελετήθηκε η επίδραση της βαρομετρικής πίεσης στην ακρίβεια αισθητήρων μικροσωματιδίων (PM) χαμηλού κόστους. Η προτεινόμενη διόρθωση με βάση τη χρονική διακύμανση της βαρομετρικής πίεσης εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση 7 [204].

$$PM_{Pres_Corrected} = \frac{Raw_Press(hPa) \times Raw_sensor}{(1013.25hPa)} \quad (7)$$

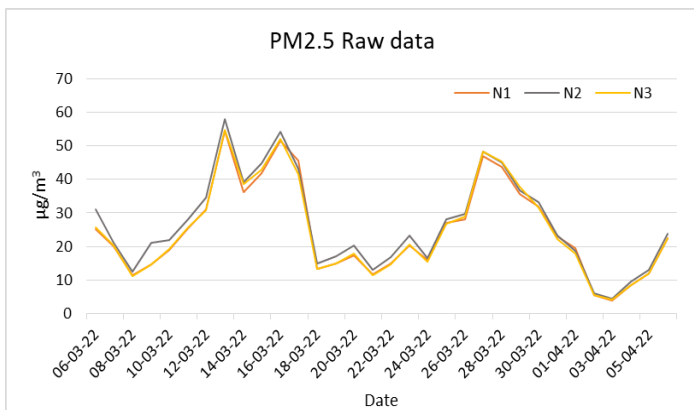
Όπου $PM_{Pres_Corrected}$ αντιστοιχεί στη διορθωμένη συγκέντρωση PM χρησιμοποιώντας τη βαρομετρική πίεση. Το Raw_Press(hPa) αντιστοιχεί στην τρέχουσα βαρομετρική πίεση σε hPa που συλλέγεται από αισθητήρα βαρομετρικής πίεσης (BME280) ενώ ως Raw_sensor είναι οι τιμές PM που συλλέγονται από τον αισθητήρα μικροσωματιδίων PM, χαμηλού κόστους. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η διόρθωση της βαρομετρικής πίεσης (εξίσωση 7) εφαρμόζεται ως το πρώτο βήμα της διαδικασίας διόρθωσης και τα αποτελέσματα στη συνέχεια διορθώνονται με την εξίσωση 5 και 6 διαδοχικά για τη διόρθωση των τιμών συγκέντρωσης PMs, χρησιμοποιώντας την υγρασία και τη θερμοκρασία αντίστοιχα.

Σχετικά με τη συγκέντρωση σωματιδίων PM_{2.5}, το Σχήμα 6.13 δείχνει τις χρονοσειρές των πρωτογενών τιμών μεταξύ των αισθητήρων χαμηλού κόστους PM_{2.5} και το Σχήμα 6.14 δείχνει τη συσχέτιση των πρωτογενών τιμών μεταξύ των αισθητήρων χαμηλού κόστους. Το Σχήμα 6.15 παρουσιάζει τη χρονοσειρά πρωτογενών τιμών PM_{2.5} αισθητήρων χαμηλού κόστους και αναφοράς, και το Σχήμα 6.16 παρουσιάζει τη συσχέτιση μεταξύ των πρωτογενών τιμών των αισθητήρων και της αναφοράς.

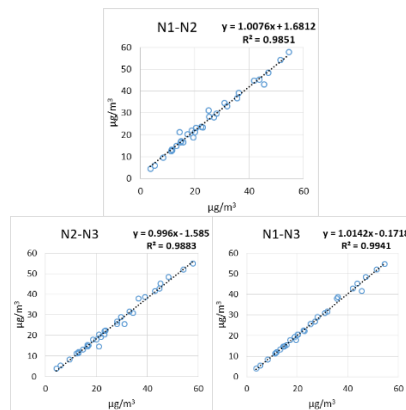
Το Σχήμα 6.17 παρουσιάζει τις χρονοσειρές των χαμηλού κόστους διορθωμένων τιμών PM_{2.5} με υγρασία και θερμοκρασία, και των τιμών αναφοράς, και το Σχήμα 6.18 παρουσιάζει τη συσχέτιση μεταξύ χαμηλού κόστους διορθωμένων τιμών PM_{2.5} με υγρασία και θερμοκρασία και των τιμών αναφοράς.

Το Σχήμα 6.19 παρουσιάζει τις χρονοσειρές των χαμηλού κόστους διορθωμένων τιμών PM_{2.5} με βαρομετρική πίεση, υγρασία και θερμοκρασία και των τιμών αναφοράς, και το Σχήμα 6.20 παρουσιάζει τη συσχέτιση μεταξύ των χαμηλού κόστους διορθωμένων τιμών PM_{2.5} με βαρομετρική πίεση, υγρασία και θερμοκρασία και των τιμών αναφοράς.

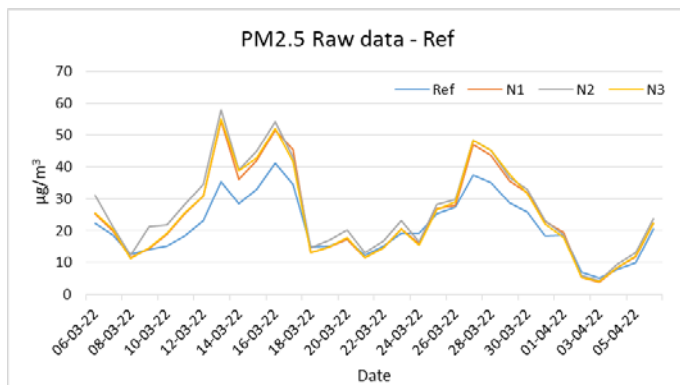
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



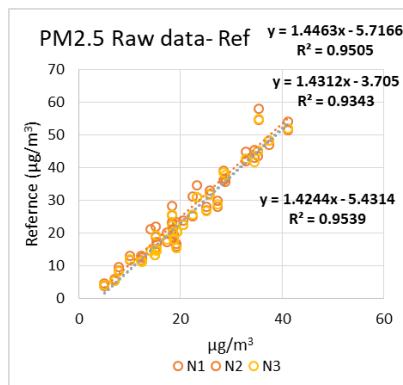
Σχήμα 6.13: Χρονοσειρά πρωτογενών τιμών από αισθητήρες μικροσωματιδίων (PM2.5), χαμηλού κόστους.



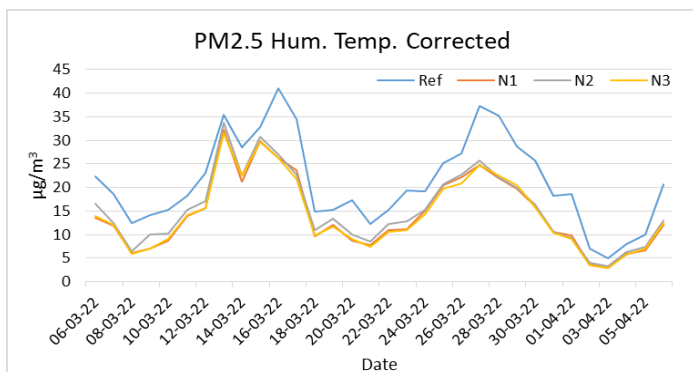
Σχήμα 6.14: Συσχέτιση τιμών μεταξύ αισθητήρων μικροσωματιδίων (PM2.5) χαμηλού κόστους.



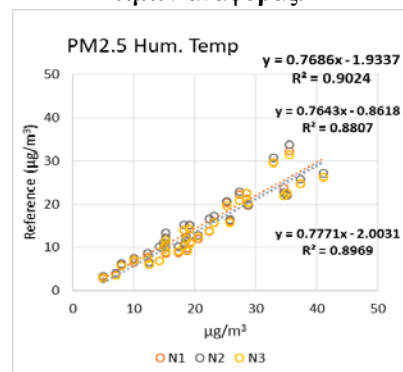
Σχήμα 6.15: Χρονοσειρά πρωτογενών τιμών από αισθητήρες μικροσωματιδίων (PM2.5), χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.



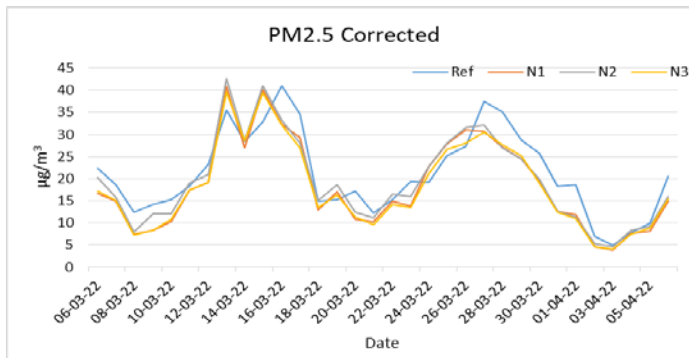
Σχήμα 6.16: Συσχέτιση πρωτογενών τιμών μεταξύ αισθητήρων μικροσωματιδίων (PM2.5) χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.



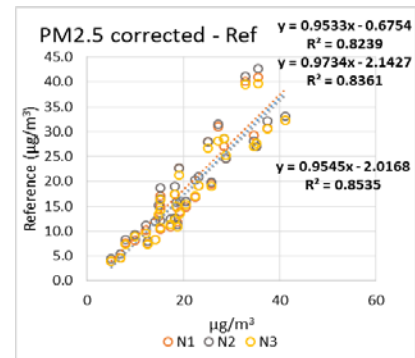
Σχήμα 6.17: Χρονοσειρά διορθωμένων (υγρασία, θερμοκρασία) τιμών από αισθητήρες μικροσωματιδίων (PM2.5), χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.18: Συσχέτιση διορθωμένων (υγρασία, θερμοκρασία) τιμών μεταξύ αισθητήρων μικροσωματιδίων (PM2.5) χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.19: Χρονοσειρά διορθωμένων (βαρομετρική πίεση, υγρασία, θερμοκρασία) τιμών από αισθητήρες μικροσωματιδίων (PM2.5), χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.



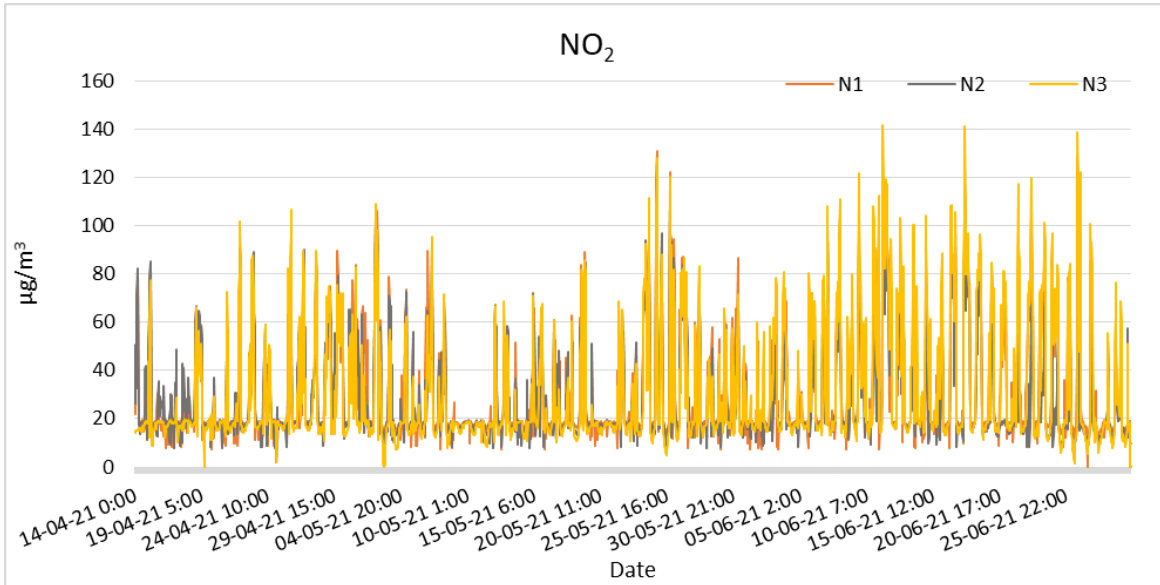
Σχήμα 6.20: Συσχέτιση διορθωμένων (βαρομετρική πίεση, υγρασία, θερμοκρασία) τιμών μεταξύ αισθητήρων μικροσωματιδίων (PM2.5) χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς.

6.3.3 Αποτελέσματα διόρθωσης

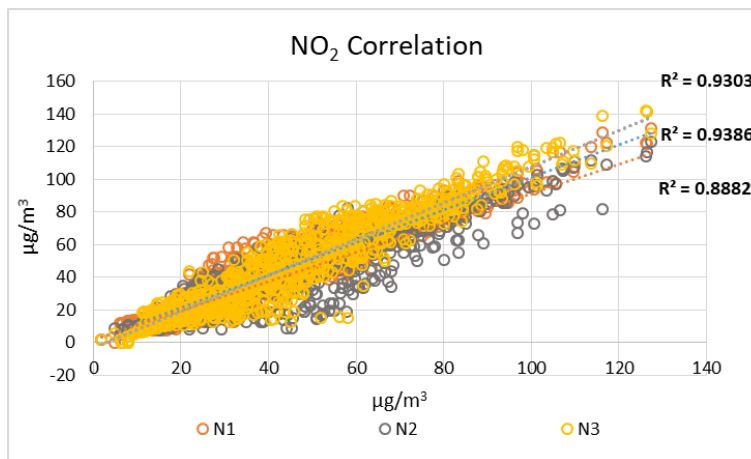
Τα αποτελέσματα που παρατίθενται παρακάτω αφορούν τις διορθωμένες τιμές τόσο για την συγκέντρωση μικροσωματιδίων (PM), όσο και για τους αέριους ρύπους (NO₂ και O₃) και είναι εκφρασμένα σε µg/m³, γίνεται αναφορά σε δεδομένα από τρεις σταθμούς μέτρησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, για την χρονική περίοδο 14-4-2021 έως 29-6-2021.

Οι τιμές που παρουσιάζονται είναι διορθωμένες σύμφωνα με τις εξισώσεις 1, 2, 3, 4. Το Σχήμα 6.21 παρουσιάζει τη χρονοσειρά συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO₂) μεταξύ των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους, ενώ το Σχήμα 6.22 παρουσιάζει την συσχέτιση των τιμών συγκέντρωσης του κάθε αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO₂) με τη μέση τιμή. Το Σχήμα 6.23 παρουσιάζει το βαθμό συσχέτισης μεταξύ των αισθητήρων διοξειδίου του αζώτου (NO₂), χαμηλού κόστους.

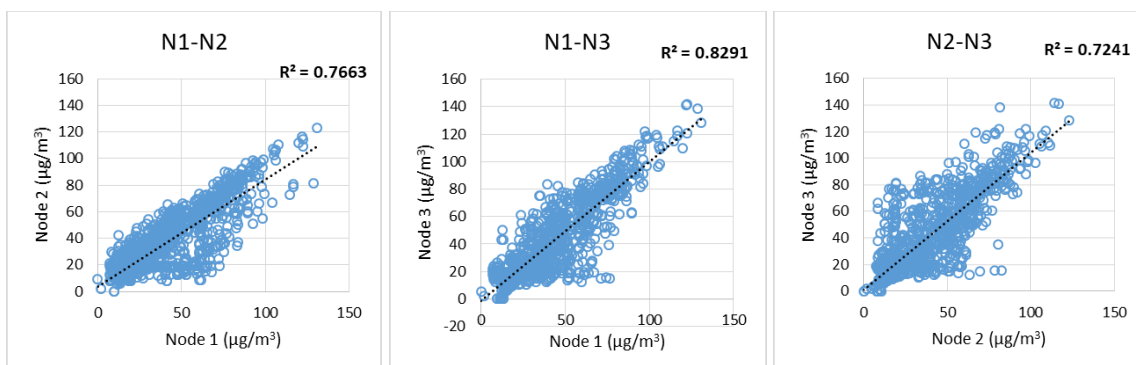
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



Σχήμα 6.21: Χρονοσειρά τιμών συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO₂) μεταξύ των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους.



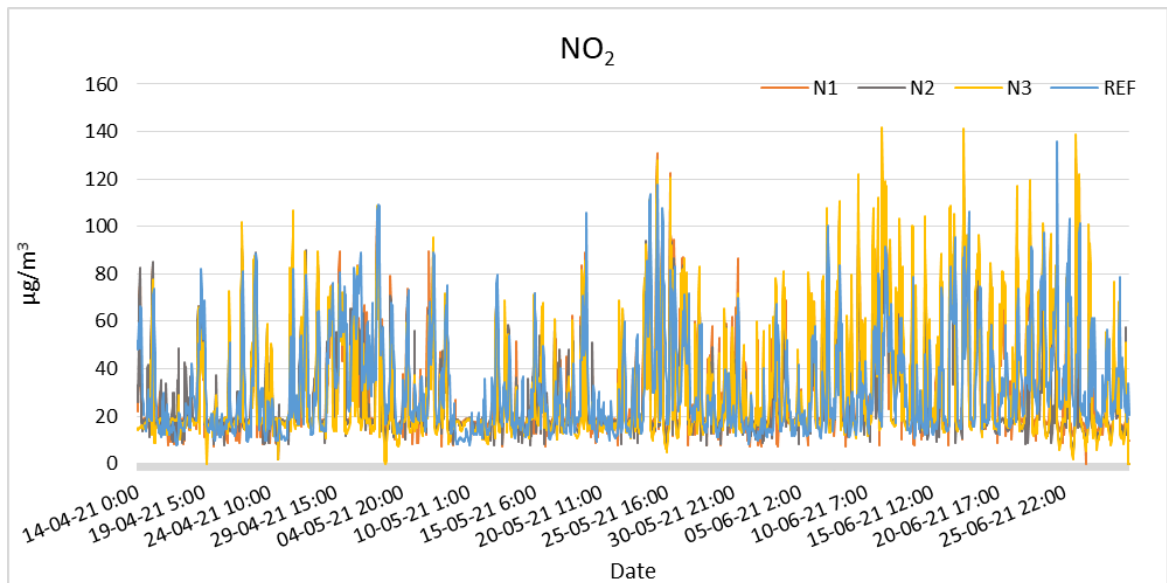
Σχήμα 6.22: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης του κάθε αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO₂) με τη μέση τιμή.



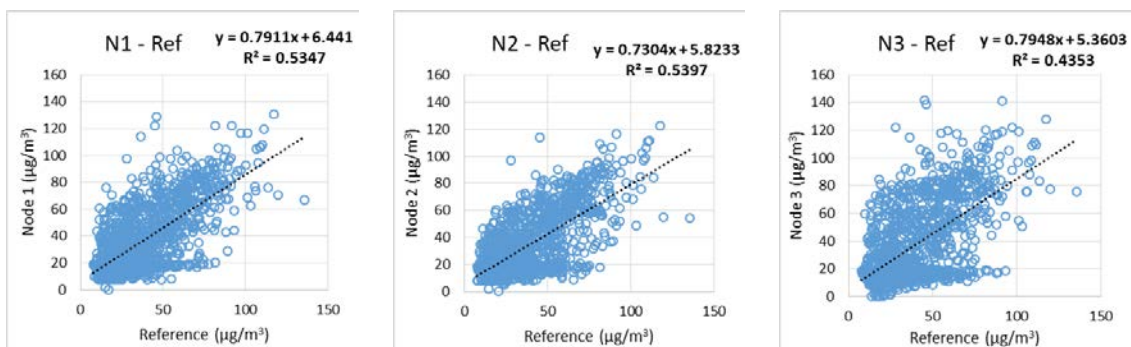
Σχήμα 6.23: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης μεταξύ αισθητήρων διοξειδίου του αζώτου (NO₂).

Συγκριτικά με τα δεδομένα αναφοράς συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO₂), το Σχήμα 6.24 παρουσιάζει την χρονοσειρά συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO₂) των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους και αναφοράς, ενώ το Σχήμα 6.25 παρουσιάζει το

βαθμό συσχέτισης μεταξύ των τιμών κάθε αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO_2) χαμηλού κόστους και αναφοράς.



Σχήμα 6.24: Χρονοσειρά τιμών συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO_2) των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους και αναφοράς.

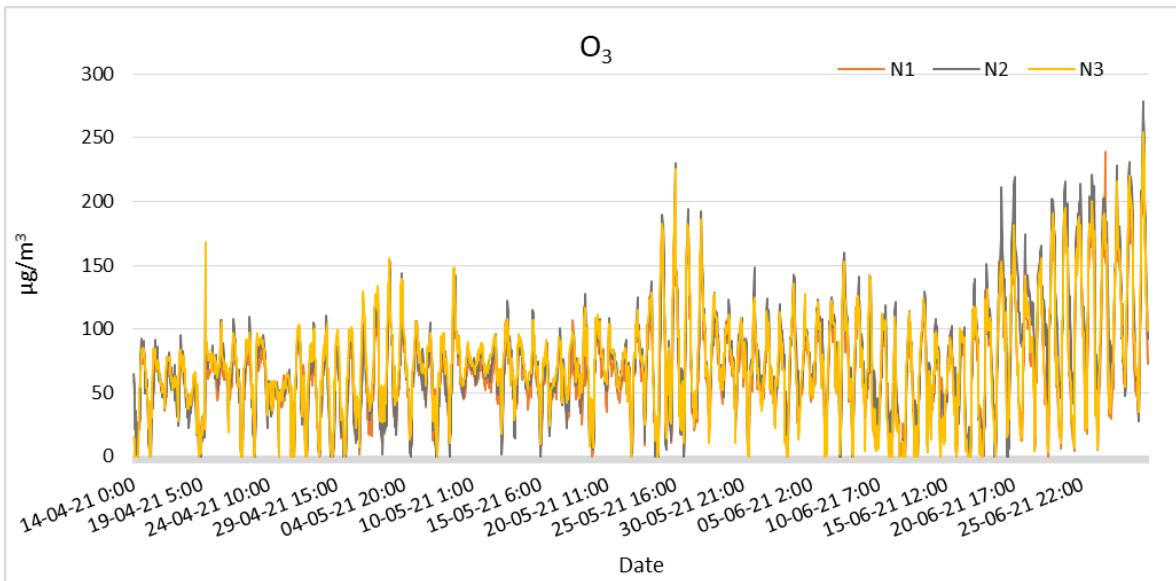


Σχήμα 6.25: Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των τιμών κάθε αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO_2) χαμηλού κόστους και αναφοράς.

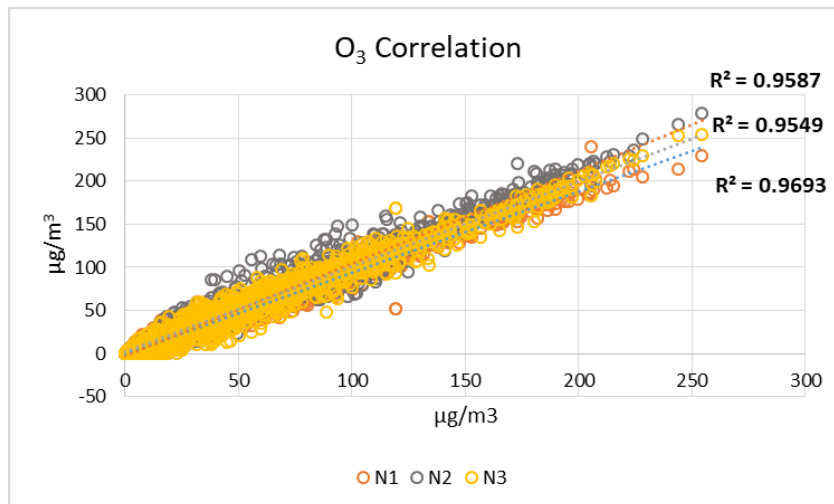
Παρατηρείται ότι παρά το γεγονός της καλής συσχέτισης μεταξύ των αισθητήρων NO_2 χαμηλού κόστους η σύγκριση με τα αντίστοιχα δεδομένα των σταθμών αναφοράς δεν δίνει το ίδιο καλά αποτελέσματα.

Αντίστοιχα για το όζον (O_3), το Σχήμα 6.26 παρουσιάζει τη χρονοσειρά συγκέντρωσης όζοντος (O_3) μεταξύ των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους, ενώ το Σχήμα 6.27 παρουσιάζει την συσχέτιση των τιμών συγκέντρωσης του κάθε αισθητήρα όζοντος (O_3) με τη μέση τιμή. Το Σχήμα 6.28 παρουσιάζει το βαθμό συσχέτισης μεταξύ των αισθητήρων όζοντος (O_3), χαμηλού κόστους.

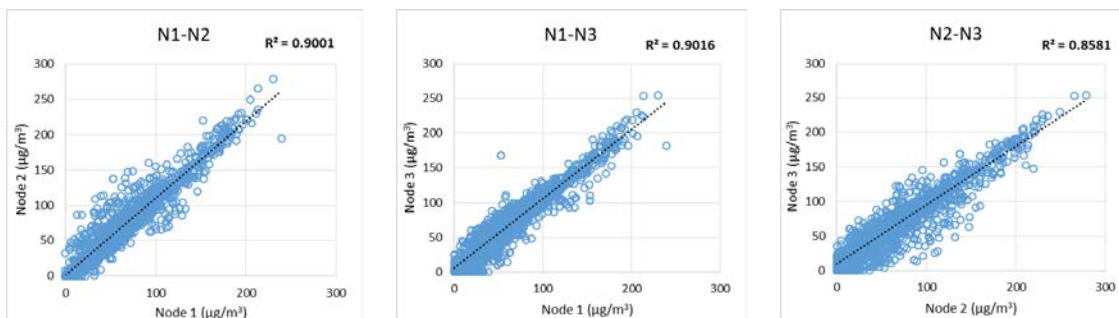
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



Σχήμα 6.26: Χρονοσειρά τιμών συγκέντρωσης όζοντος (O₃) μεταξύ των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους.

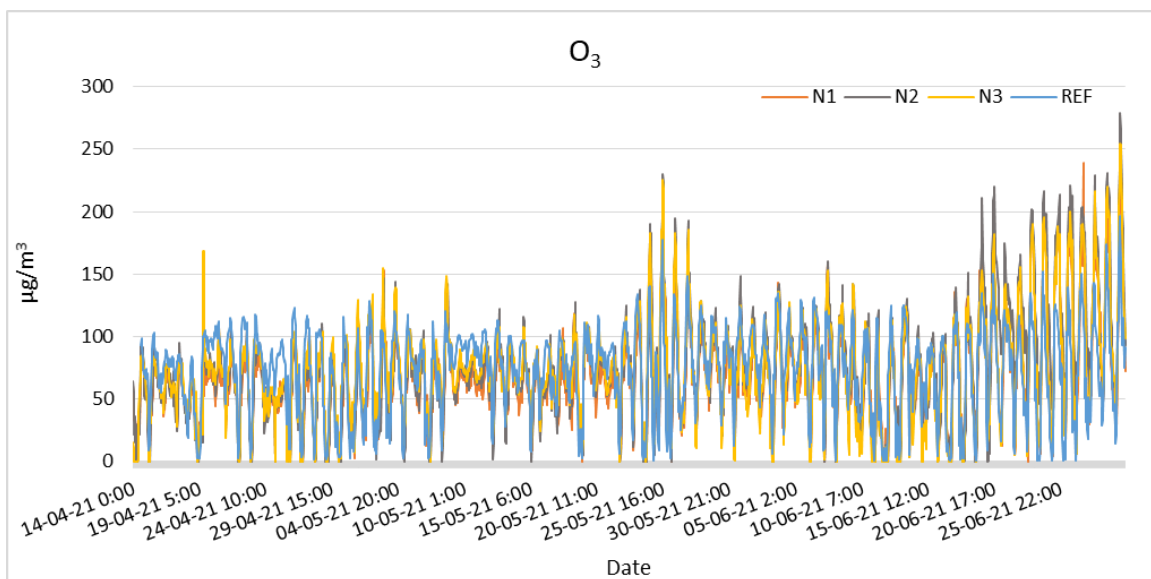


Σχήμα 6.27: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης του κάθε αισθητήρα όζοντος (O₃) με τη μέση τιμή.

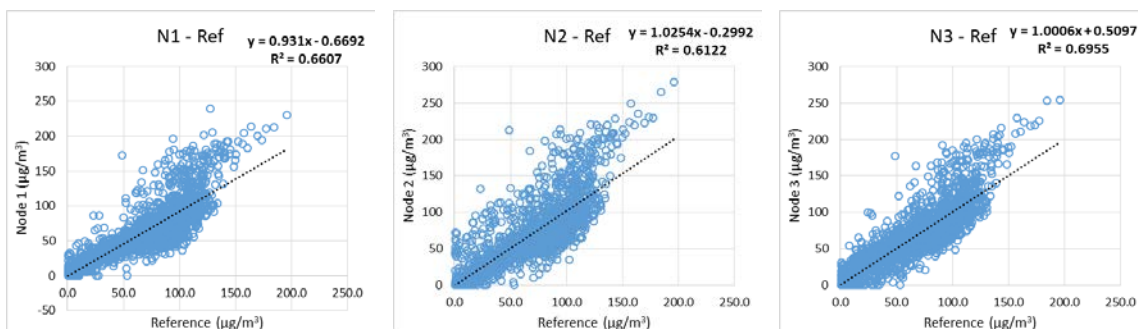


Σχήμα 6.28: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης μεταξύ αισθητήρων όζοντος (O₃).

Ως προς τα δεδομένα αναφοράς συγκέντρωσης όζοντος (O₃), το Σχήμα 6.29 παρουσιάζει την χρονοσειρά συγκέντρωσης όζοντος (O₃) των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους και αναφοράς, ενώ το Σχήμα 6.30 παρουσιάζει το βαθμό συσχέτισης μεταξύ των τιμών κάθε αισθητήρα όζοντος (O₃) χαμηλού κόστους και αναφοράς.



Σχήμα 6.29: Χρονοσειρά τιμών συγκέντρωσης όζοντος (O_3) των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους και αναφοράς.



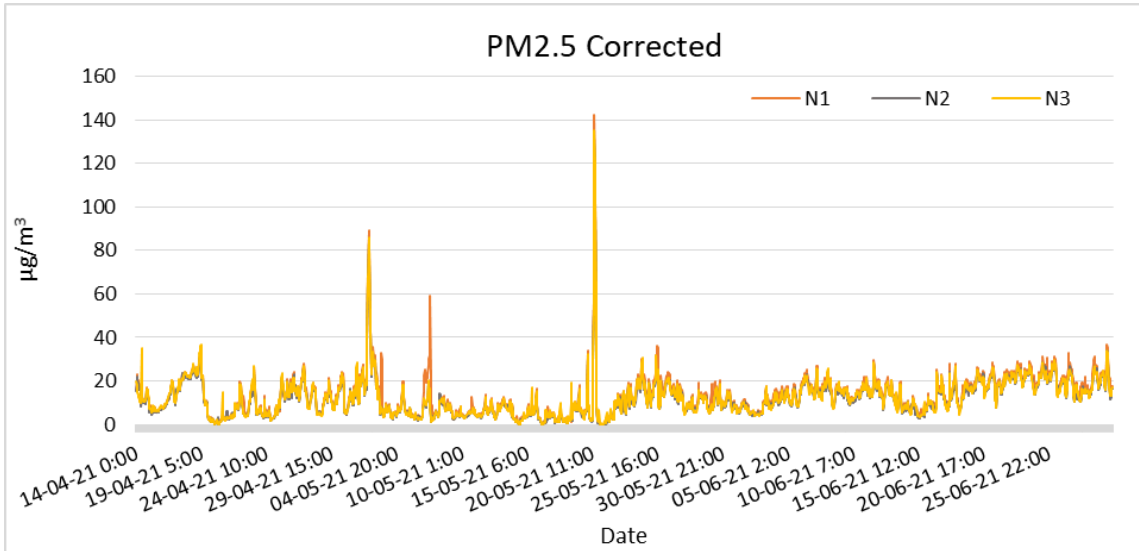
Σχήμα 6.30: Βαθμός συσχέτισης μεταξύ των τιμών κάθε αισθητήρα όζοντος (O_3) χαμηλού κόστους και αναφοράς.

Και στην περίπτωση των αισθητήρων O_3 παρατηρείται ότι παρά το γεγονός της καλής συσχέτισης μεταξύ των αισθητήρων χαμηλού κόστους η σύγκριση με τα αντίστοιχα δεδομένα των σταθμών αναφοράς δεν δίνει το ίδιο καλά αποτελέσματα.

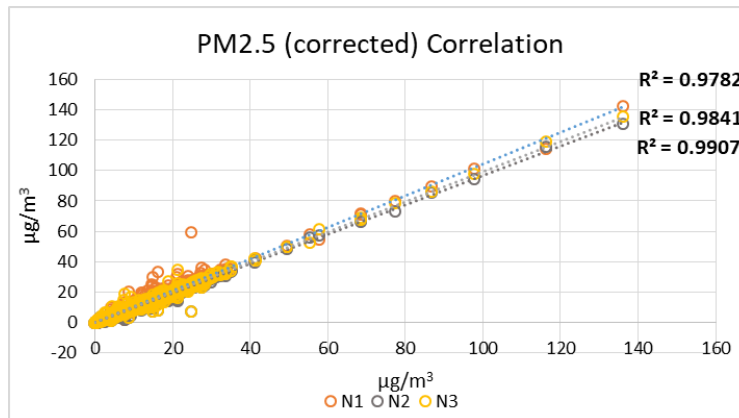
Σχετικά με τα μικροσωματίδια (PM), εφαρμόζοντας την εξίσωση διόρθωσης υγρασίας (RH), (5) και την εξίσωση διόρθωσης θερμοκρασίας (T), (6) στα πρωτογενή δεδομένα του PM_{2.5}, τα αποτελέσματα είναι οι διορθωμένες τιμές των συγκεντρώσεων μικροσωματιδίων.

Στο Σχήμα 6.31 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές των διορθωμένων τιμών PM_{2.5} από τρεις αισθητήρες χαμηλού κόστους. Το Σχήμα 6.32 παρουσιάζει τη συσχέτιση των διορθωμένων τιμών μεταξύ του μέσου όρου και κάθε αισθητήρα.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

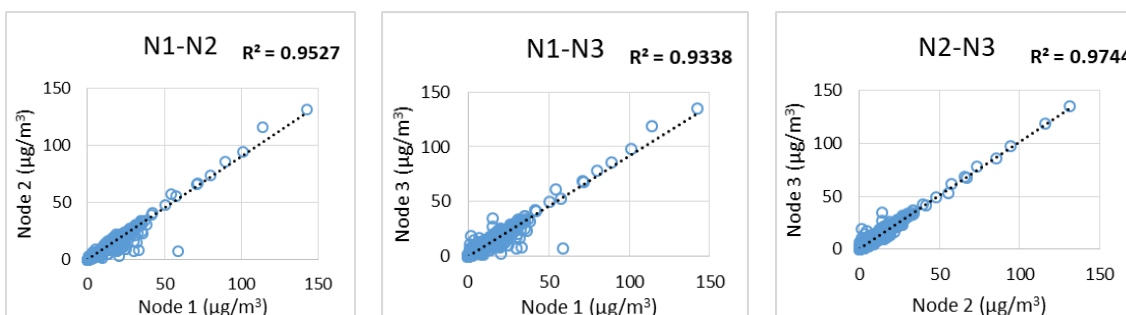


Σχήμα 6.31: Χρονοσειρά διορθωμένων δεδομένων από τους τρεις αισθητήρες μικροσωματιδίων (PM2.5), χαμηλού κόστους.



Σχήμα 6.32: Βαθμός συσχέτισης, διορθωμένων δεδομένων, κάθε αισθητήρα μικροσωματιδίων (PM2.5) με την μέση τιμή.

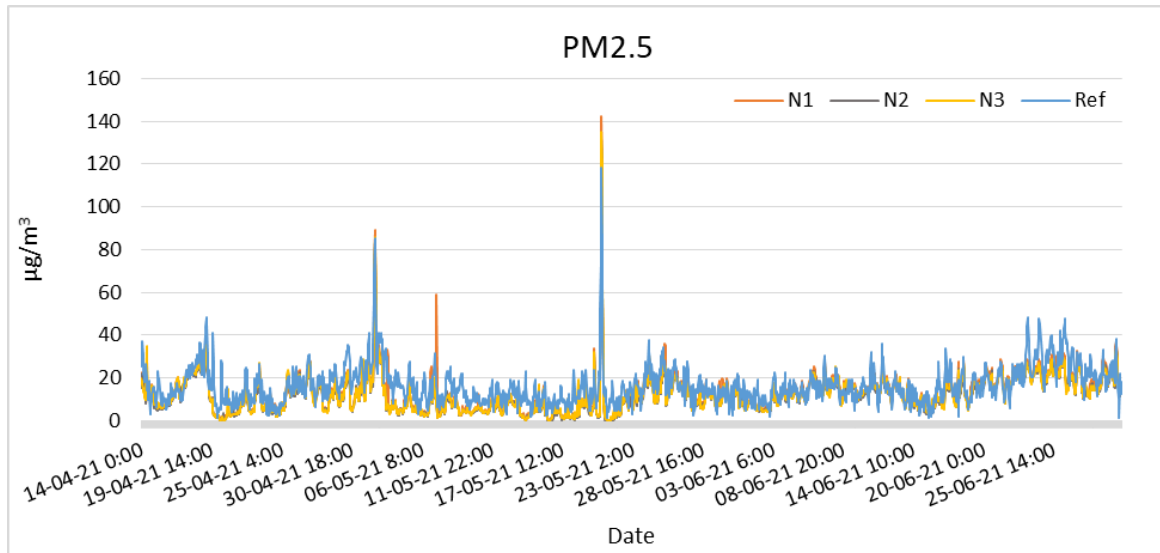
Το Σχήμα 6.33 παρουσιάζει τη συσχέτιση των διορθωμένων δεδομένων συγκέντρωσης μικροσωματιδίων (PM2.5) μεταξύ των τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους των σταθμών μέτρησης (nodes) 1, 2, 3.



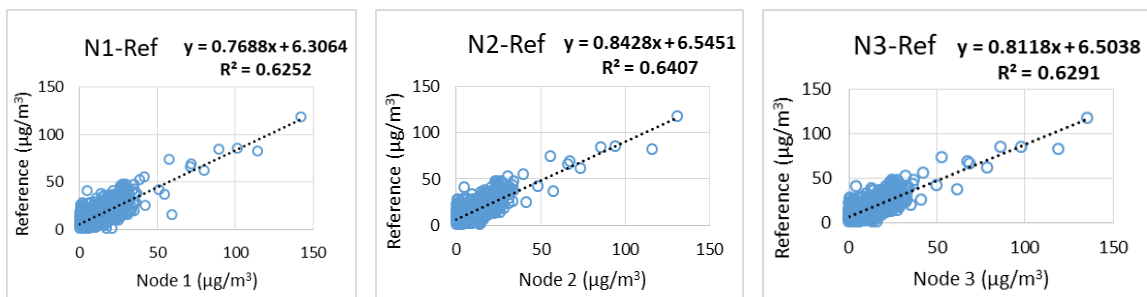
Σχήμα 6.33: Συσχέτιση, διορθωμένων δεδομένων, μεταξύ τριών αισθητήρων μικροσωματιδίων (PM2.5) χαμηλού κόστους, (σταθμοί μέτρησης 1, 2, 3).

Συγκριτικά με τα δεδομένα αναφοράς, το Σχήμα 6.34 παρουσιάζει την χρονοσειρά των διορθωμένων δεδομένων συγκέντρωσης μικροσωματιδίων (PM2.5) μεταξύ των τριών

αισθητήρων χαμηλού κόστους και αναφοράς. Ο βαθμός συσχέτισης (R^2) μεταξύ των διορθωμένων τιμών κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους και αναφοράς παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.35.

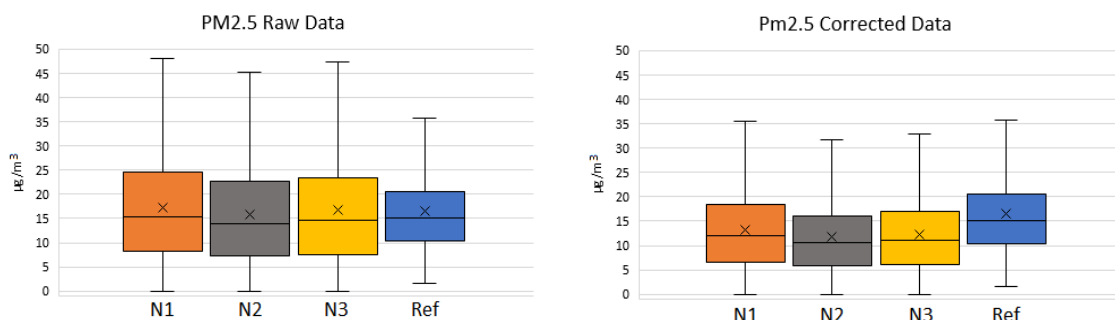


Σχήμα 6.34: Χρονοσειρά μεταξύ διορθωμένων δεδομένων από τους τρεις αισθητήρες μικροσωματιδίων (PM2.5), χαμηλού κόστους και αναφοράς.



Σχήμα 6.35: Συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων δεδομένων κάθε αισθητήρα μικροσωματιδίων (PM2.5) χαμηλού κόστους και αναφοράς (σταθμοί μέτρησης 1, 2, 3).

Το Σχήμα 6.36 παρουσιάζει τα θηκογράμματα, τόσο για τις πρωτογενείς τιμές, όσο και για τις διορθωμένες τιμές, μετά την εφαρμογή των εξισώσεων διόρθωσης υγρασίας – θερμοκρασίας, των μικροσωματιδίων (PM2.5).



Σχήμα 6.36: Θηκογράμματα πρωτόγενων και διορθωμένων τιμών μικροσωματιδίων (PM2.5).

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Η χρήση κανονικοποίησης – βαθμονόμησης των μετρήσεων κρίνεται απαραίτητη σε αισθητήρες χαμηλού κόστους σύμφωνα με την ανάλυση των δεδομένων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την εφαρμογή των συντελεστών διόρθωσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τόσο οι αισθητήρες μικροσωματιδίων όσο και οι αισθητήρες αέριων ρύπων εμφάνισαν ικανοποιητικό βαθμό συσχέτισης (R^2) σε σχέση με τις μετρήσεις από τα όργανα αναφοράς. Παρότι χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί συντελεστές παρατηρήθηκε η ομοιογένεια των διορθωμένων τιμών για κάθε ομάδα αισθητήρων και μετρούμενου μεγέθους. Τόσο οι μετρήσεις για το όζον (O_3) όσο και για το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), μετά την εφαρμογή των εξισώσεων διόρθωσης, παρουσίασαν ως αποτέλεσμα τις διορθωμένες μετρήσεις πολύ κοντά στις μετρήσεις αναφοράς. Αντίστοιχο αποτέλεσμα παρατηρήθηκε και στους αισθητήρες συγκέντρωσης μικροσωματιδίων μετά την εφαρμογή των εξισώσεων διόρθωσης υγρασίας και θερμοκρασίας. Μεταξύ των τριών αισθητήρων του κάθε μετρούμενου μεγέθους, ο συσχετισμός (R^2), για το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) παρουσίασε τιμή από 58% έως 71%, για το όζον (O_3) παρουσίασε τιμή συσχέτισης από 58% έως 70% και για τα μικροσωματίδια ($PM_{2.5}$) παρουσίασε τιμές συσχέτισης από 62% έως 65%. Επίσης, από τα θηκογράμματα, ανά περίπτωση, παρατηρήθηκε ότι μετά την εφαρμογή των εξισώσεων διόρθωσης, οι τιμές που προκύπτουν, εμφανίζεται να είναι πιο κοντά στις μετρήσεις από τα όργανα αναφοράς. Η εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) παρουσιάζει πόσο σημαντική είναι κάθε μεταβλητή για το συνολικό αποτέλεσμα, εφαρμόζοντας αυτόν τον τρόπο γίνεται κατανοητή η επίδραση κάθε μεταβλητής στην τελική διόρθωση. Ο Πίνακας 6.2 εμφανίζει τα αποτελέσματα της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τους τρεις αισθητήρες μικροσωματιδίων χαμηλού κόστους καθώς και το πώς επηρέασαν τις διορθωμένες τιμές από τις μεταβλητές (θερμοκρασία, υγρασία, βαρομετρική πίεση). Το επίπεδο σημαντικότητας είναι ίσο με 5% ($\alpha=0,05$).

Πίνακας 6.2: Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών (βαρομετρική πίεση, υγρασία, θερμοκρασία), μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$), σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

<i>Regression Statistics</i>	N1	N2	N3
Multiple R	0.98	0.98	0.98
Adjusted R Square	0.96	0.96	0.97
Observations	32	32	32
<i>Significance F</i>	$1 * 10^{-18}$	$2 * 10^{-19}$	$4.3 * 10^{-20}$
Intercept (P-value)	0.517	0.638	0.307
Raw $PM_{2.5}$ (P-value)	$1 * 10^{-16}$	$2 * 10^{-17}$	$6.8 * 10^{-18}$
Pressure (P-value)	0.674	0.833	0.440
Humidity (P-value)	$6 * 10^{-8}$	$2 * 10^{-8}$	$1.2 * 10^{-8}$
Temperature (P-value)	0.445	0.592	0.235

Παρατηρήθηκε υψηλός βαθμός (p-value) των πρωτογενών δεδομένων PM 2.5 όπως και υψηλός βαθμός (p-value) εμφανίζεται για την υγρασία, ενώ η βαρομετρική πίεση (p-value) δείχνει ότι συμβάλλει σε μικρότερο βαθμό, όπως και η θερμοκρασία (p-value). Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι ο βαθμός «σημαντικότητας F» είναι αρκετά χαμηλός, που σημαίνει ότι οι διορθωμένες τιμές της συγκέντρωσης μικροσωματιδίων από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους είναι κοντά στις τιμές αναφοράς.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα επίδρασης της βαρομετρικής πίεσης παρατηρείται ότι αυτή συμβάλλει στη διόρθωση των μετρήσεων, αφού στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει την πυκνότητα των σωματιδίων στον αέρα, ως προς το χρόνο που γίνεται η μέτρηση και το αποτέλεσμα όπως εμφανίζεται από τις χρονοσειρές είναι ότι, οι διορθωμένες μετρήσεις από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους, είναι κοντά στις μετρήσεις αναφοράς. Γενικά, η υγρασία, η θερμοκρασία και η βαρομετρική πίεση συμβάλλουν στη διόρθωση των μετρήσεων. Αυτό επιβεβαιώνεται επίσης από τα αποτελέσματα της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR), καθώς η διόρθωση τιμών έδειξε ότι, για τον αισθητήρα μικροσωματιδίων PM2.5, η διόρθωση υγρασίας είναι πιο σημαντική από τη διόρθωση θερμοκρασίας και βαρομετρικής πίεσης, καθώς και ότι ο βαθμός σημαντικότητας F είναι χαμηλός πράγμα το οποίο καθιστά το τελικό αποτέλεσμα των μετρήσεων να παρουσιάζει πιο ρεαλιστικές τιμές σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.

6.4 Διερεύνηση της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραμέτρων στην αξιοπιστία των μετρήσεων

Ο στόχος είναι να διαπιστωθεί ο βαθμός που επηρεάζονται οι μετρούμενες τιμές των αισθητήρων χαμηλού κόστους από περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, ειδικά σε αέριους ρύπους όπως το όζον (O₃) και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) όπως και στους αισθητήρες μικροσωματιδίων. Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται η ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης (Linear Regression - LR) και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (Multiple Linear Regression - MLR) των διορθωμένων δεδομένων από τρεις σταθμούς παρακολούθησης ποιότητας αέρα, χαμηλού κόστους.

6.4.1 Εισαγωγή στη μέθοδο

Ως προς τη μεθοδολογία, η χρήση των στατιστικών μοντέλων γραμμικής παλινδρόμησης (LR) και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) θεωρείται ως κατάλληλη

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

προσέγγιση αφού και οι δύο μεθοδολογίες παρέχουν τα απαιτούμενα αποτελέσματα ενώ ταυτόχρονα αποτελούν απλές και πρακτικές λύσεις. Η γραμμική παλινδρόμηση είναι μια γραμμική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ μιας εξαρτημένης μεταβλητής και μιας ανεξάρτητης μεταβλητής με τέτοιο τρόπο ώστε το μοντέλο να εξαρτάται γραμμικά από τις άγνωστες παραμέτρους που υπολογίζονται από τα δεδομένα. Επίσης, αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βαθμονόμηση αισθητήρα [209]. Η ακόλουθη εξίσωση (8) περιγράφει τη γραμμική παλινδρόμηση.

$$y = a + \beta x \quad (8)$$

Η πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (MLR), είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιεί πολλές ανεξάρτητες μεταβλητές για να προβλέψει το αποτέλεσμα μιας εξαρτημένης μεταβλητής. Ο στόχος της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) είναι να μοντελοποιήσει τη γραμμική σχέση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και της εξαρτημένης μεταβλητής. Ακολουθεί η γενική εξίσωση (9) της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης.

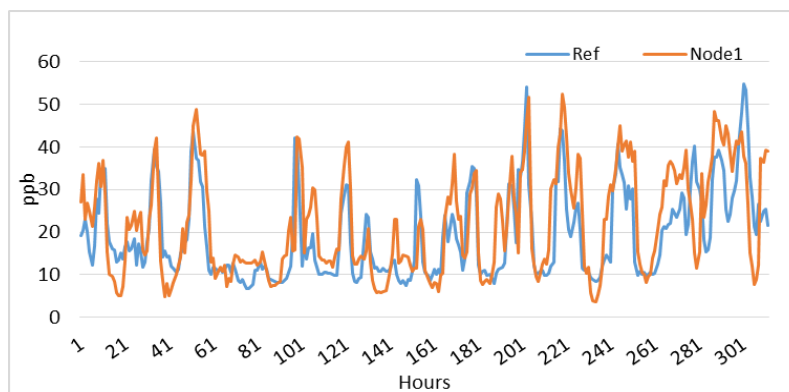
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon_r \quad (9)$$

6.4.2 Αποτελέσματα εφαρμογής των μεθόδων LR και MLR

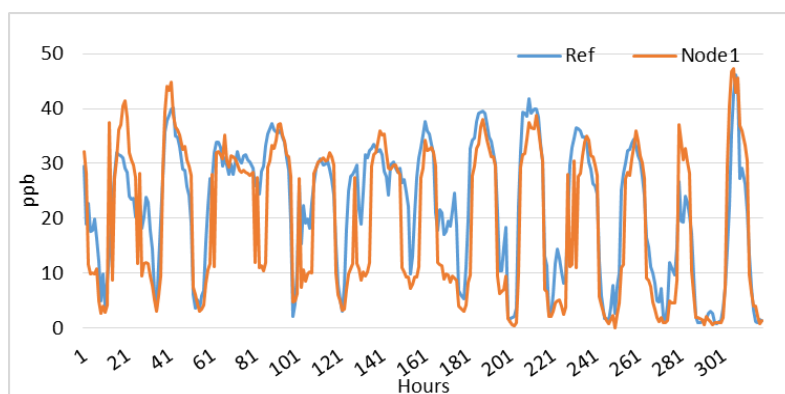
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που παρουσιάζονται περιλαμβάνουν τη συσχέτιση με τις τιμές αναφοράς από τα επίσημα μετρητικά όργανα για τα αέρια, διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και όζοντος (O_3) όπως και για τα μικροσωματίδια $\text{PM}_{2.5}$ κατά τη διάρκεια μιας περιόδου δύο μηνών.

Σχετικά με τους ηλεκτροχημικούς αισθητήρες αερίων ρύπων, χαμηλού κόστους, της εταιρείας Alphasense και συγκεκριμένα για τους αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και όζοντος (O_3) τα δεδομένα διορθώθηκαν σύμφωνα με τις εξισώσεις διόρθωσης.

Το Σχήμα 6.37 δείχνει τη χρονική διακύμανση των διορθωμένων τιμών από αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO_2), χαμηλού κόστους, σε σχέση με την χρονική διακύμανση των τιμών αναφοράς. Το Σχήμα 6.38 αφορά τις μετρήσεις όζοντος (O_3) όπου ακολουθήθηκε η αντίστοιχη διαδικασία και εμφανίζει τα αποτελέσματα του αισθητήρα χαμηλού κόστους σε σχέση με τα αντίστοιχα δεδομένα των οργάνων αναφοράς.



Σχήμα 6.37: Χρονοσειρές τιμών διοξειδίου του αζώτου (NO₂), του αισθητήρα χαμηλού κόστους και αναφοράς.



Σχήμα 6.38: Χρονοσειρές τιμών όζοντος (O₃), του αισθητήρα χαμηλού κόστους και αναφοράς.

Η εφαρμογή της μεθόδου γραμμικής παλινδρόμησης έγινε για κάθε είδος αισθητήρα σε όλους τους σταθμούς παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους. Ο Πίνακας 6.3 εμφανίζει τα αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των τιμών αναφοράς και των τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους node1 (N1) και node2 (N2) τόσο των πρωτογενών τιμών (Raw) όσο και των διορθωμένων τιμών (Corr.) για την συγκέντρωση μικροσωματιδίων (PM_{2.5}).

Πίνακας 6.3: Μικροσωματίδια (PM_{2.5}) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2 (πρωτογενείς και διορθωμένες τιμές).

Regression Statistics	N1 (Raw)	N2 (Raw)	N1 (Corr)	N2 (Corr)
Multiple R	0.92	0.92	0.94	0.90
R Square	0.85	0.84	0.89	0.81
Observations	59	59	59	59
Significance F	$6.8 * 10^{-25}$	$1.4 * 10^{-24}$	$1.9 * 10^{-28}$	$1.9 * 10^{-22}$
Intercept (P-value)	$8.1 * 10^{-27}$	$2 * 10^{-33}$	$1.1 * 10^{-19}$	$1.6 * 10^{-26}$
PM _{2.5} raw (P-value)	$6.8 * 10^{-25}$	$1.4 * 10^{-24}$	$1.9 * 10^{-28}$	$1.9 * 10^{-22}$

Ο Πίνακας 6.4 εμφανίζει τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης για τους αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO₂) μεταξύ των τιμών αναφοράς και των πρωτογενών τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους node1 (N1), node2 (N2), και node3 (N3).

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Πίνακας 6.4: Διοξείδιο του αζώτου (NO₂) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και πρωτογενών τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

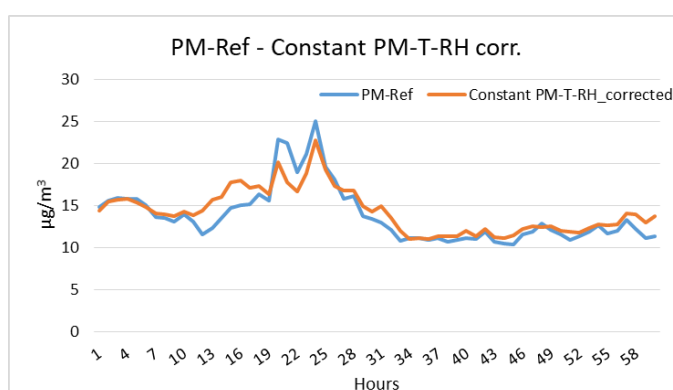
Regression Statistics	N1 (NO ₂ Raw)	N2 (NO ₂ Raw)	N3 (NO ₂ Raw)
Multiple R	0.70	0.79	0.65
R Square	0.50	0.62	0.42
Observations	299	299	299
Significance F	$5.4 * 10^{-46}$	$1.9 * 10^{-64}$	$1.9 * 10^{-36}$
Intercept (P-value)	$7.4 * 10^{-30}$	$4.9 * 10^{-10}$	$2.6 * 10^{-7}$
NO ₂ Node (P-value)	$5.4 * 10^{-46}$	$1.9 * 10^{-64}$	$1.9 * 10^{-36}$

Αντίστοιχα ο Πίνακας 6.5 εμφανίζει τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης για τους αισθητήρες όζοντος (O₃) μεταξύ των τιμών αναφοράς και των πρωτογενών τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Πίνακας 6.5: Όζον (O₃) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και πρωτογενών τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	N1 (O ₃ Raw)	N2 (O ₃ Raw)	N3 (O ₃ Raw)
Multiple R	0.52	0.79	0.69
R Square	0.27	0.62	0.47
Observations	299	299	299
Significance F	$1.2 * 10^{-21}$	$1.9 * 10^{-64}$	$4.6 * 10^{-43}$
Intercept (P-value)	$2.6 * 10^{-15}$	$4.9 * 10^{-10}$	$2.6 * 10^{-7}$
O ₃ Node (P-value)	$1.2 * 10^{-21}$	$1.9 * 10^{-64}$	$4.6 * 10^{-43}$

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις διόρθωσης (5) και (6) στις μη επεξεργασμένες τιμές του αισθητήρα PM, μια χρονοσειρά συμπεριφοράς μετρήσεων τριών ημερών φαίνεται στο Σχήμα 6.39. Τα δεδομένα απεικονίζονται σε αντιπαράθεση με τα επίσημα δεδομένα αναφοράς μετρήσεων για την ίδια χρονική περίοδο.



Σχήμα 6.39: Χρονοσειρές των τιμών συγκέντρωσης σωματιδίων (PM_{2.5}) του αισθητήρα χαμηλού κόστους και αναφοράς.

Ο Πίνακας 6.6 εμφανίζει τα αποτελέσματα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, για τους αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO₂) μεταξύ των τιμών αναφοράς και των βαρομετρικά διορθωμένων (θερμοκρασία) τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους N1, N2 και N3.

Πίνακας 6.6: Διοξειδίο του άζωτου (NO₂) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών (θερμοκρασία), σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	N1 (NO₂)	N2 (NO₂)	N3 (NO₂)
Multiple R	0.72	0.81	0.65
Adjusted R Square	0.52	0.65	0.41
Observations	306	306	306
Significance F	$6.8 * 10^{-89}$	$2.2 * 10^{-55}$	$3 * 10^{-35}$
Intercept (P-value)	$6.6 * 10^{-7}$	$1.5 * 10^{-10}$	0.09
Temperature (P-value)	0.10	$1.4 * 10^{-14}$	0.94
Node NO ₂ -Raw (P-value)	$1.8 * 10^{-68}$	$5.7 * 10^{-70}$	$3.7 * 10^{-28}$

Ο Πίνακας 6.7 εμφανίζει τα αποτελέσματα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, για τους αισθητήρες όζοντος (O₃) μεταξύ των τιμών αναφοράς και των βαρομετρικά διορθωμένων (θερμοκρασία) τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους N1, N2 και N3.

Πίνακας 6.7: Όζον (O₃) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών (θερμοκρασία), σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	N1 (O₃)	N2 (O₃)	N3 (O₃)
Multiple R	0.65	0.75	0.72
Adjusted R Square	0.42	0.56	0.52
Observations	306	306	306
Significance F	$8.1 * 10^{-67}$	$1.9 * 10^{-55}$	$8.4 * 10^{-48}$
Intercept (P-value)	0.68	$1.6 * 10^{-14}$	$1.9 * 10^{-4}$
Temperature (P-value)	0.07	$3.7 * 10^{-7}$	$1.3 * 10^{-7}$
Node O ₃ -Raw (P-value)	$2.3 * 10^{-41}$	$6.2 * 10^{-56}$	$1.3 * 10^{-16}$

Η εφαρμογή της γραμμικής παλινδρόμησης και της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, σε διορθωμένα δεδομένα σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, εμφανίζονται παρακάτω. Για τη χρονική περίοδο από 14-4-2021 έως 29-6-2021, ο Πίνακας 6.8 εμφανίζει τα αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης, ενώ ο Πίνακας 6.9 εμφανίζει τα αποτελέσματα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, για τους αισθητήρες συγκέντρωσης μικροσωματιδίων (PM_{2.5}) μεταξύ των τιμών αναφοράς και των βαρομετρικά διορθωμένων τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους N1, N2 και N3.

Πίνακας 6.8: Μικροσωματίδια (PM_{2.5}) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).

Regression Statistics	N1 (PM_{2.5})	N2 (PM_{2.5})	N3 (PM_{2.5})
Multiple R	0.79	0.80	0.79
R Square	0.63	0.64	0.63
Observations	1871	1871	1871
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$5.9 * 10^{-146}$	$5.2 * 10^{-167}$	$8.9 * 10^{-159}$
PM _{2.5} raw (P-value)	0	0	0

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Πίνακας 6.9: Μικροσωματίδια (PM2.5) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).

Regression Statistics	N1 (PM2.5)	N2 (PM2.5)	N3 (PM2.5)
Multiple R	0.74	0.81	0.81
Adjusted R Square	0.64	0.65	0.65
Observations	1871	1871	1871
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$3.2 * 10^{-16}$	$4.3 * 10^{-18}$	$6.5 * 10^{-12}$
Temperature (P-value)	0.684	0.908	$7.4 * 10^{-3}$
Node PM2.5-Raw (P-value)	0	0	0
Humidity (P-value)	$3.7 * 10^{-8}$	$1.7 * 10^{-8}$	$7.2 * 10^{-8}$

Σχετικά με την συγκέντρωση διοξειδίου του αζώτου (NO₂), ο Πίνακας 6.10 εμφανίζει τα αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης, ενώ ο Πίνακας 6.11 εμφανίζει τα αποτελέσματα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, μεταξύ των τιμών αναφοράς και των βαρομετρικά διορθωμένων τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους N1, N2 και N3.

Πίνακας 6.10: Διοξείδιο του αζώτου (NO₂) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).

Regression Statistics	N1 (NO₂)	N2 (NO₂)	N3 (NO₂)
Multiple R	0.73	0.74	0.67
R Square	0.54	0.54	0.44
Observations	1856	1856	1856
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$2.7 * 10^{-69}$	$4.2 * 10^{-68}$	$6.4 * 10^{-238}$
NO ₂ Node (P-value)	0	0	0

Πίνακας 6.11: Διοξείδιο του αζώτου (NO₂) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).

Regression Statistics	N1 (NO₂)	N2 (NO₂)	N3 (NO₂)
Multiple R	0.73	0.74	0.66
Adjusted R Square	0.54	0.55	0.44
Observations	1856	1856	1856
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$1.4 * 10^{-7}$	0.876	$6 * 10^{-12}$
Temperature (P-value)	0.170	$9.6 * 10^{-12}$	0.039
Node NO ₂ -Raw (P-value)	0	0	0

Σχετικά με την συγκέντρωση όζοντος (O₃), ο Πίνακας 6.12 εμφανίζει τα αποτελέσματα γραμμικής παλινδρόμησης, ενώ ο Πίνακας 6.13 εμφανίζει τα αποτελέσματα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, μεταξύ των τιμών αναφοράς και των βαρομετρικά διορθωμένων τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους N1, N2 και N3.

Πίνακας 6.12: Όζον (O₃) γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).

Regression Statistics	N1 (O₃)	N2 (O₃)	N3 (O₃)
Multiple R	0.81	0.78	0.83
R Square	0.66	0.61	0.70
Observations	1856	1856	1856
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$1.7 * 10^{-139}$	$1.1 * 10^{-158}$	$1.4 * 10^{-113}$
O ₃ Node (P-value)	0	0	0

Πίνακας 6.13: Όζον (O₃) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών, σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2, N3 (14-4-2021 έως 29-6-2021).

Regression Statistics	N1 (O₃)	N2 (O₃)	N3 (O₃)
Multiple R	0.82	0.79	0.85
Adjusted R Square	0.68	0.63	0.73
Observations	1856	1856	1856
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$3.6 * 10^{-92}$	$7.6 * 10^{-95}$	$2.1 * 10^{-119}$
Temperature (P-value)	$1.2 * 10^{-24}$	$5.4 * 10^{-21}$	$1.5 * 10^{-46}$
Node O ₃ -Raw (P-value)	0	0	0

Η εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης έγινε για κάθε είδος αισθητήρα αερίου ρύπου, χαμηλού κόστους, προκειμένου να αξιολογηθεί εάν οι αισθητήρες επηρεάζονται από βαρομετρικές συνθήκες. Ο Πίνακας 6.14 εμφανίζει τα αποτελέσματα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, για τους αισθητήρες μικροσωματιδίων (PM2.5) μεταξύ των τιμών αναφοράς και των βαρομετρικά διορθωμένων (θερμοκρασία, υγρασία) τιμών από τους σταθμούς χαμηλού κόστους N1 και N2.

Πίνακας 6.14: Μικροσωματίδια (PM2.5) πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών (θερμοκρασία, υγρασία), σταθμών χαμηλού κόστους N1, N2.

Regression Statistics	N1 (PM2.5)	N2 (PM2.5)
Multiple R	0.98	0.97
Adjusted R Square	0.97	0.94
Observations	60	60
Significance F	$3 * 10^{-41}$	$1.5 * 10^{-35}$
Intercept (P-value)	$2.5 * 10^{-14}$	$1.4 * 10^{-15}$
Temperature (P-value)	0.006	0.004
Node PM2.5-Raw (P-value)	$1.2 * 10^{-42}$	$1.7 * 10^{-36}$
Humidity (P-value)	$4.8 * 10^{-20}$	$1.6 * 10^{-11}$

Η χρήση των μεθόδων απλής γραμμικής παλινδρόμησης (LR) και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) έγινε για τη διερεύνηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων των αισθητήρων χαμηλού κόστους. Οι προαναφερόμενες μέθοδοι εφαρμόστηκαν στις μετρήσεις μικροσωματιδίων (PM2.5), διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και όζοντος (O₃). Συμπληρωματικά διερευνήθηκε πόσο επηρεάζονται από τις βαρομετρικές συνθήκες, αλλά

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

και κατά ποσό συμβάλουν οι διορθωτικοί συντελεστές που εφαρμόστηκαν κατά την βαθμονόμησή τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της απλής γραμμικής παλινδρόμησης (LR), παρατηρήθηκε ότι οι πρωτογενείς τιμές, όπως είναι αναμενόμενο, εμφανίζουν εξαιρετικό βαθμό σημαντικότητας (F) για την εξαγωγή των διορθωμένων τιμών τόσο για τα μικροσωματίδια (PM_{2.5}), όσο και για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και το όζον (O₃). Τα αποτελέσματα της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) για τη διόρθωση τιμών έδειξαν ότι, για τον αισθητήρα σωματιδίων PM_{2.5}, η διόρθωση υγρασίας είναι πιο σημαντική από τη διόρθωση θερμοκρασίας, ενώ για τους αισθητήρες των αερίων, διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και όζοντος (O₃) η διόρθωση με την θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι σημαντική. Εξίσου σημαντική είναι και η διόρθωση με τους συντελεστές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την βαθμονόμηση, στην περίπτωση των αέριων ρύπων, καθώς τα αποτελέσματα συγκέντρωσης, από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους, συγκλίνουν με τα αποτελέσματα συγκέντρωσης των οργάνων αναφοράς. Ο συντελεστής συσχέτισης (R²) μεταξύ διορθωμένων τιμών από τρεις αισθητήρες χαμηλού κόστους και τιμών αναφοράς, παρουσιάζεται για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) : 44% - 54%, για το όζον (O₃) : 61% - 69% και για τα μικροσωματίδια (PM_{2.5}) : 62% - 64%.

6.5 Βελτιστοποίηση αποτελεσμάτων με εφαρμογή φίλτρου F.I.R

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η εφαρμογή ενός φίλτρου Πεπερασμένης Κρουστικής Απόκρισης (Finite Impulse Response (FIR) ως εκτιμητής για την πρόβλεψη τιμών από τις μετρήσεις αισθητήρων αέριων ρύπων, χαμηλού κόστους.

6.5.1 Θεωρητικό υπόβαθρο μεθόδου

Τα φίλτρα FIR είναι ένας τύπος ψηφιακού φίλτρου που έχουν κρουστική απόκριση πεπερασμένης διάρκειας, πράγμα που σημαίνει ότι η έξοδός τους βασίζεται αποκλειστικά σε δείγματα εισόδου του παρελθόντος και του παρόντος. Τα φίλτρα FIR λειτουργούν περιστρέφοντας το σήμα εισόδου με μια πεπερασμένη παλμική απόκριση, η οποία είναι μια ακολουθία συντελεστών φίλτρου που καθορίζουν τα χαρακτηριστικά του φίλτρου. Η κρουστική απόκριση ενός φίλτρου FIR καθορίζεται συνήθως από τους συντελεστές του, οι οποίοι είναι πεπερασμένοι σε αριθμό και μπορούν να προγραμματιστούν σε μικροελεγκτή ή DSP (επεξεργαστής ψηφιακού σήματος) ή και σε λογισμικό (MatLab). Οι συντελεστές καθορίζουν την απόκριση συχνότητας του φίλτρου, η οποία περιγράφει πώς το φίλτρο επηρεάζει διαφορετικές συνιστώσες συχνότητας του σήματος εισόδου. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των φίλτρων FIR είναι η γραμμική απόκριση φάσης, που σημαίνει ότι

I.Χρηστάκης

εισάγουν μια σταθερή καθυστέρηση σε όλα τα στοιχεία συχνότητας του σήματος εισόδου, καθιστώντας τα χρήσιμα σε εφαρμογές όπου η παραμόρφωση φάσης είναι ανεπιθύμητη. Τα φίλτρα FIR μπορούν επίσης να σχεδιαστούν ώστε να έχουν πολύ ευκρινή αποκοπή και υψηλό βαθμό επιλεκτικότητας στο πεδίο της συχνότητας, καθιστώντας τα κατάλληλα για εφαρμογές όπως η επεξεργασία ήχου, η επεξεργασία εικόνας και η ρύθμιση σήματος. Συνοπτικά, τα φίλτρα FIR είναι ένας τύπος ψηφιακού φίλτρου με πεπερασμένη παλμική απόκριση που λειτουργούν περιστρέφοντας το σήμα εισόδου με μια ακολουθία συντελεστών φίλτρου. Έχουν γραμμική απόκριση φάσης και μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν απότομες αποκοπές και υψηλή επιλεκτικότητα στον τομέα της συχνότητας. Τα φίλτρα FIR μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εκτιμητές σε ποικίλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας σήματος, των συστημάτων ελέγχου και της ανάλυσης δεδομένων. Στην επεξεργασία σήματος, ένα φίλτρο FIR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση ή την πρόβλεψη μελλοντικών τιμών ενός σήματος με βάση τις προηγούμενες τιμές του. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας ένα παράθυρο προηγούμενων δειγμάτων εισόδου για τον υπολογισμό ενός σταθμισμένου αθροίσματος, όπου κάθε δείγμα πολλαπλασιάζεται με έναν αντίστοιχο συντελεστή βάρους. Η έξοδος του φίλτρου είναι το άθροισμα αυτών των σταθμισμένων δειγμάτων, το οποίο αντιπροσωπεύει μια εκτίμηση της τρέχουσας ή μελλοντικής τιμής του σήματος. Τα βάρη που χρησιμοποιούνται στο φίλτρο καθορίζονται από την επιθυμητή απόκριση συχνότητας του φίλτρου, το οποίο μπορεί να σχεδιαστεί για να περνά ορισμένες συχνότητες ενώ εξασθενεί άλλες. Προσαρμόζοντας τα βάρη του φίλτρου, είναι δυνατό να βελτιστοποιηθεί η απόδοση εκτίμησης για μια συγκεκριμένη εφαρμογή ή σήμα. Συνολικά, τα φίλτρα FIR μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ισχυροί εκτιμητές επειδή μπορούν να εκτιμήσουν με ακρίβεια την τρέχουσα ή μελλοντική τιμή ενός σήματος χρησιμοποιώντας μόνο έναν πεπερασμένο αριθμό προηγούμενων δειγμάτων εισόδου. Είναι επίσης υπολογιστικά αποδοτικά και μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν σε λογισμικό ή υλικό.

Τα ψηφιακά φίλτρα Πεπερασμένης Κρουστικής Απόκρισης (Finite Impulse Response (FIR) filters) ονομάζονται έτσι διότι η κρουστική τους απόκριση έχει μη μηδενικές τιμές που περιορίζονται χρονικά σε ένα «παράθυρο» έστω M δειγμάτων, ενώ πριν και μετά οι τιμές της είναι μηδενικές, άρα είναι πεπερασμένη χρονικά (time-limited).

Οι δύο κύριες ιδιότητές τους που τα κάνουν ιδιαίτερα δημοφιλή είναι οι εξής:

- Είναι πάντα ευσταθή, διότι η συνάρτηση μεταφοράς τους δεν έχει πόλους (παρά μόνον στη μηδενική συχνότητα), καθώς πρόκειται για ΜΗ αναδρομικά συστήματα τα

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

οποία δεν περιέχουν βρόχο ανάδρασης – feedback loop. Αυτό σημαίνει ότι, η έξοδος τη στιγμή n , έστω $y(n)$, δεν εξαρτάται από προηγούμενες τιμές της εξόδου, αλλά μόνο από την τρέχουσα και τις M προηγούμενες τιμές της εισόδου $\{x(n), x(n-1), \dots, x(n-M)\}$.

- Μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν γραμμική καμπύλη φάσης ως προς τη συχνότητα (linear phase), πράγμα που επιτυγχάνεται αν η κρουστική απόκριση είναι συμμετρική.

Η γενική μορφή της σχέσης εισόδου – εξόδου ή εξίσωσης διαφορών ενός FIR φίλτρου εμφανίζεται στην εξίσωση (10)

$$\begin{aligned} y(n) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k) = \\ &= \sum_{k=0}^M h(k)x(n-k) = \\ &= h(0)x(n) + h(1)x(n-1) + \dots + h(M)x(n-M) \end{aligned} \quad (10)$$

όπου M είναι η τάξη του φίλτρου και οι συντελεστές (coefficients) $\{h(0), h(1), \dots, h(M)\}$ είναι οι $(M+1)$ το πλήθος μη μηδενικές τιμές της (πεπερασμένης χρονικά) κρουστικής απόκρισης $\{h(k)\}$. Η έξοδος $y(n)$ τη στιγμή n είναι ο γραμμικός συνδυασμός του τρέχοντος και των M προηγούμενων δειγμάτων της εισόδου, $\{x(n), x(n-1), \dots, x(n-M)\}$, με συντελεστές ή «βάρη» τις τιμές της κρουστικής απόκρισης.

Στην ειδική περίπτωση που όλοι οι συντελεστές του FIR φίλτρου είναι ίσοι μεταξύ τους, και ίσοι με $1/(M+1)$ όπου M η τάξη του φίλτρου, στην έξοδο παίρνουμε τον μέσο όρο των $(M+1)$ πλέον πρόσφατων δειγμάτων της εισόδου. Για αυτή την περίπτωση η εξίσωση διαφορών εμφανίζεται στην εξίσωση (11).

$$\begin{aligned} &= \sum_{k=0}^M h(k)x(n-k) = \\ &= h(0)x(n) + h(1)x(n-1) + \dots + h(M)x(n-M) \\ &= \frac{1}{M+1}x(n) + \frac{1}{M+1}x(n-1) + \dots + \frac{1}{M+1}x(n-M) = \\ &= \frac{x(n) + x(n-1) + \dots + x(n-M)}{M+1} \end{aligned} \quad (11)$$

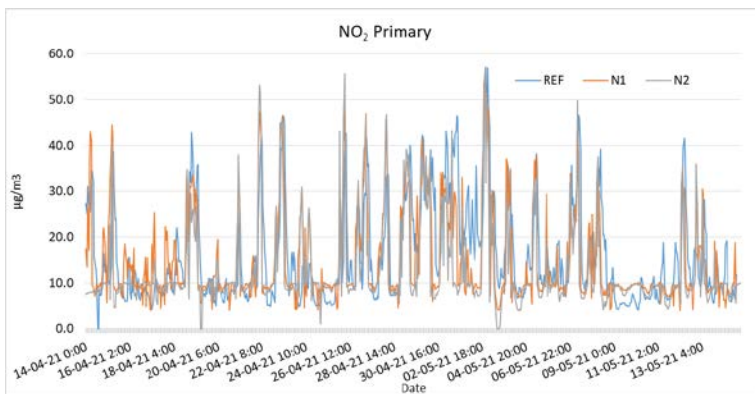
Η εξίσωση 11 ισχύει για κάθε χρονική στιγμή $n = 0, 1, 2, \dots$, και πρόκειται για έναν «κινούμενο» μέσο όρο δειγμάτων της εισόδου (Moving Average filter). Στην πραγματικότητα το ίδιο όνομα (Moving Average filter) μπορεί να δοθεί και στο γενικό FIR φίλτρο, διότι η σχέση (1) μπορούμε να θεωρήσουμε ότι περιγράφει ένα γενικευμένο μέσο όρο, με βάρη τους συντελεστές $\{h(0), h(1), \dots, h(M)\}$.

Τα φίλτρα κινούμενου μέσου όρου βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην στατιστική επεξεργασία χρονοσειρών. Οι χρονοσειρές (time series) είναι γενικότερα ψηφιακά σήματα και προκύπτουν κατά την μέτρηση διάφορων μεγεθών, σε τακτά διαστήματα, τα οποία μεταβάλλονται με τον χρόνο. Κατά την ανάλυση μιας χρονοσειράς δεδομένων παρατηρείται και ο υπολογισμός «τάσης» (trend), που εμφανίζουν τα δεδομένα, όπως μια αυξητική τάση, ή μια τάση μείωσης. Η διαπίστωση της «τάσης» (trend) σε μια χρονοσειρά γίνεται εφικτή με την εφαρμογή φίλτρου κινούμενου μέσου όρου. Αντιμετωπίζοντας τις μετρήσεις από ένα σταθμό παρακολούθησης ποιότητας αέρα, χαμηλού κόστους, ως χρονοσειρά, με την χρήση FIR φίλτρου, κινούμενου μέσου όρου δειγμάτων της εισόδου, είναι εφικτό ένα μοντέλο πρόβλεψης τιμών εξόδου του φίλτρου, εφόσον έχουμε τους συντελεστές – βάρη του φίλτρου κρουστικής απόκρισης.

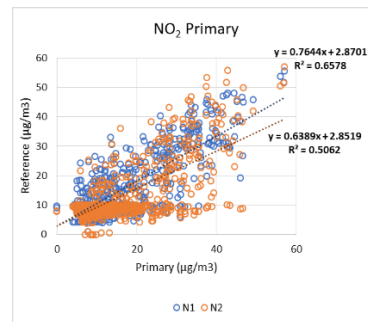
6.5.2 Εφαρμογή FIR στα δεδομένα

Δεδομένα δύο εβδομάδων (1 Μαρτίου 2021 έως 15 Μαρτίου 2021) χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των συντελεστών φίλτρου FIR και παρουσιάζονται στην αναφορά [205]. Τα διορθωμένα δεδομένα, διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και όζοντος (O_3), διάρκειας ενός μήνα (14 Απριλίου 2021 έως 14 Μαΐου 2021) εμφανίζονται στο Σχήμα 6.40 και στο Σχήμα 6.42 ενώ η συσχέτισή τους με τα αντίστοιχα δεδομένα του εξοπλισμού αναφοράς φαίνεται στο Σχήμα 6.41 και στο Σχήμα 6.43. Τα στοιχεία αναφοράς ελήφθησαν από την ιστοσελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Το Σχήμα 6.40 εμφανίζει τις χρονοσειρές διορθωμένων δεδομένων του διοξειδίου του αζώτου (NO_2) από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους (N1, N2) και τις τιμές αναφοράς. Το Σχήμα 6.41 εμφανίζει το αντίστοιχο διάγραμμα συσχέτισης. Το Σχήμα 6.42 εμφανίζει τις χρονοσειρές διορθωμένων δεδομένων του όζοντος (O_3) των αισθητήρων χαμηλού κόστους (N1, N2) και τις τιμές αναφοράς. Το Σχήμα 6.43 εμφανίζει το αντίστοιχο διάγραμμα συσχέτισης.

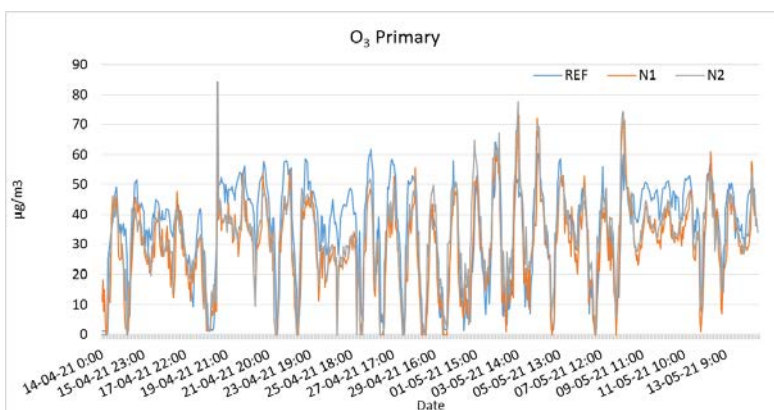
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



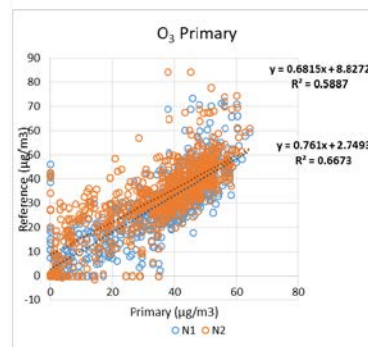
Σχήμα 6.40: Χρονοσειρά συγκέντρωσης (NO_2) διορθωμένων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους (N1, N2) και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.41: Συσχέτιση συγκέντρωσης (NO_2) διορθωμένων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους (N1, N2) και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.42: Χρονοσειρά συγκέντρωσης (O_3) διορθωμένων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους (N1, N2) και τιμών αναφοράς.

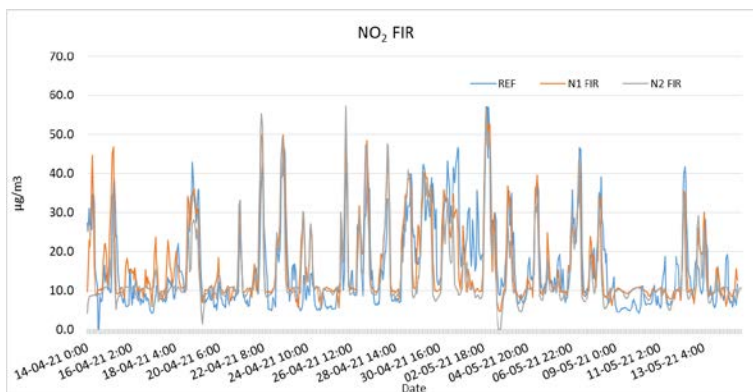


Σχήμα 6.43: Συσχέτιση συγκέντρωσης (O_3) διορθωμένων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους (N1, N2) και τιμών αναφοράς.

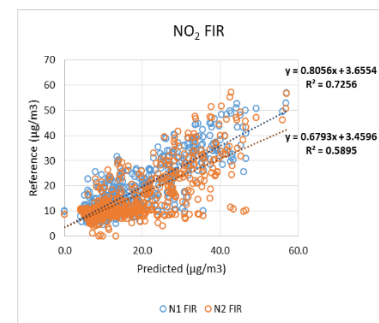
Ένα προσαρμοστικό φίλτρο, για κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους, χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της συνάρτησης μεταφοράς συστήματος, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του εκάστοτε αισθητήρα χαμηλού κόστους και τις μετρήσεις των οργάνων αναφοράς. Η εφαρμογή του αλγόριθμου των ελαχίστων μέσων τετραγώνων (LMS) έγινε για τον προσδιορισμό των συντελεστών απόκρισης παλμών για κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους. Η σύγκλιση χρησιμοποιεί τις τιμές παλμών και τις μετρήσεις από τον αισθητήρα χαμηλού κόστους για να εξαγάγει τις διορθωμένες μετρήσεις του αισθητήρα χαμηλού κόστους. Ως πρώτο βήμα, ο αισθητήρας χαμηλού κόστους αντιμετωπίστηκε ως προσαρμοστικό φίλτρο FIR και προσδιορίστηκαν οι συντελεστές του [210]. Αυτό πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του αισθητήρα χαμηλού κόστους και του αισθητήρα αναφοράς. Διαδοχικά το φίλτρο FIR, οι συντελεστές και οι μετρήσεις του αισθητήρα χαμηλού κόστους εφαρμόστηκαν σε διαφορετική χρονική περίοδο με στόχο τη λήψη των

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

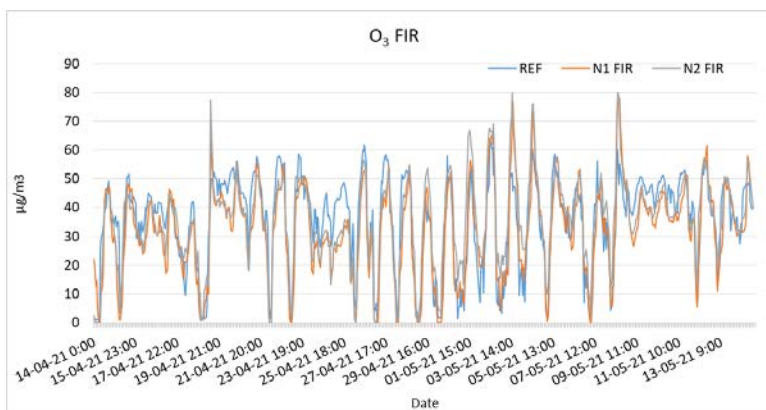
τιμών πρόβλεψης συγκέντρωσης αερίου ρύπου (Gas FIR). Τέλος οι προβλέψιμες τιμές συγκέντρωσης των αισθητήρων χαμηλού κόστους τέθηκαν σε συσχέτιση με τα αντίστοιχα δεδομένα από τα όργανα αναφοράς, προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση της διόρθωσης FIR. Τα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή της προσέγγισης του φίλτρου FIR ως εκτιμητής για την πρόβλεψη τιμών, παρουσιάζονται στα σχήματα (Σχήμα 6.44 έως Σχήμα 6.47). Το Σχήμα 6.44 και το Σχήμα 6.45 αφορούν την συγκέντρωση για το διοξείδιο του αζώτου (NO_2), ενώ το Σχήμα 6.46 και το Σχήμα 6.47 αφορούν την συγκέντρωση για το όζον (O_3).



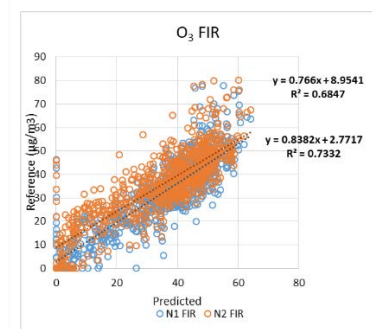
Σχήμα 6.44: Χρονοσειρά συγκέντρωσης (NO_2) προβλέψιμων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους (N1, N2) και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.45: Συσχέτιση συγκέντρωσης (NO_2) προβλέψιμων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους (N1, N2) και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.46: Χρονοσειρά συγκέντρωσης (O_3) προβλέψιμων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους (N1, N2) και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.47: Συσχέτιση συγκέντρωσης (O_3) προβλέψιμων τιμών αισθητήρων χαμηλού κόστους (N1, N2) και τιμών αναφοράς.

Η αξιολόγηση των προβλεπόμενων τιμών σε σχέση με τις τιμές αναφοράς πραγματοποιείται με την εφαρμογή της μεθόδου ρίζα μέσου τετραγώνου σφάλματος (RMSE). Ο Πίνακας 6.15 εμφανίζει τις τιμές RMSE τόσο για τις διορθωμένες τιμές σε

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

σχέση με τις τιμές αναφοράς, όσο και για τις προβλέψιμες τιμές σε σχέση με τις τιμές αναφοράς, για τους αισθητήρες χαμηλού κόστους.

Πίνακας 6.15: RMSE Διορθωμένων τιμών – τιμών αναφοράς και προβλέψιμων τιμών - τιμών αναφοράς.

	N1 (NO₂)	N2 (NO₂)	N1 (O₃)	N2 (O₃)
Primary- Ref	0.401	0.162	0.201	0.244
Predicted-Ref	0.376	0.120	0.008	0.040

Η βελτιστοποίηση των μετρήσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, από αισθητήρες ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους μπορεί να γίνει με την εφαρμογή της τεχνικής ψηφιακού φίλτρου Πεπερασμένης Κρουστικής Απόκρισης - Finite Impulse Response (FIR), ως μοντέλο πρόβλεψης με στόχο να μετακινηθούν οι πρωτεύουσες μετρήσεις πιο κοντά στις αντίστοιχες μετρήσεις του οργάνου αναφοράς. Ο βαθμός συσχέτισης (R^2) των μετρούμενων τιμών σε σχέση με τις τιμές αναφοράς κυμάνθηκε για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) από 0.50 έως 0.65, ενώ για το όζον (O₃) από 0.58 έως 0.67. Μετά την εφαρμογή της προσέγγισης του φίλτρου FIR, ο βαθμός συσχέτισης (R^2) των προβλεπόμενων τιμών σε σχέση με τις τιμές αναφοράς κυμάνθηκε για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) από 0.59 έως 0.72, ενώ για το όζον (O₃) από 0.68 έως 0.73. Η βελτιστοποίηση των μετρούμενων τιμών προκύπτει και από την εφαρμογή της μεθόδου RMSE, όπου ο βαθμός RMSE εμφανίζεται μικρότερος στις προβλεπόμενες τιμές από ό,τι στις μετρούμενες τιμές κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.

6.6 Βελτιστοποίηση μετρήσεων με εφαρμογή φίλτρου KALMAN

Σε αυτή την ενότητα μελετάται η εφαρμογή ενός φίλτρου Kalman για την βελτιστοποίηση τιμών από τις μετρήσεις αισθητήρων αέριων ρύπων, χαμηλού κόστους. Η επιλογή του φίλτρου Kalman έναντι άλλων μεθόδων όπως η μηχανική μάθηση κ.λπ. έγινε γιατί έχει αποδειχθεί ότι είναι η βέλτιστη λύση για μια μεγάλη κατηγορία κοινών προβλημάτων.

Μια χρονοσειρά αποτελεί μια στοχαστική διαδικασία X_t κατά την οποία κάθε παρατήρηση της είναι μια τυχαία μεταβλητή. Η ανάλυση των χρονοσειρών γίνεται μέσω των στατιστικών μεγεθών της για τα χαρακτηριστικά, την συμπεριφορά και την απόδοση που εμφανίζει. Τα στατιστικά μεγέθη των χρονοσειρών παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση και τον χαρακτηρισμό των δεδομένων με την πάροδο του χρόνου και αναφέρονται στις βασικές ιδιότητες των χρονοσειρών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση τάσεων, περιοδικοτήτων και άλλων χαρακτηριστικών. Τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά μιας χρονοσειράς είναι:

- Μέσος Όρος (Mean): Ο μέσος όρος παρέχει την κεντρική τιμή των παρατηρήσεων και βοηθά στον προσδιορισμό της τάσης των δεδομένων. Η σειρά των παρατηρήσεων $X(t_i)$ δεν επηρεάζει τον υπολογισμό της μέσης τιμής, και αυτή εξετάζεται παντού σχεδόν στις κατανομές. Ο γενικός τύπος της μέσης τιμής δίνεται από την εξίσωση (12).

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X(t_i) \quad (12)$$

όπου n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων.

- Διασπορά (Variance): Η διασπορά εμφανίζει την διακύμανση των δεδομένων γύρω από τον μέσο όρο. Η μαθηματική σχέση για τον προσδιορισμό της διασποράς δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (13).

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X(t_i) - \mu)^2 \quad (13)$$

όπου n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων και μ είναι ο μέσος όρος.

- Τυπική Απόκλιση (Standard Deviation): Η τυπική απόκλιση παρέχει μια μέτρηση για το πόσο συγκεντρωμένα ή διασπαρμένα είναι τα δεδομένα γύρω από τη μέση τιμή τους, και δίνεται από την τετραγωνική ρίζα της διασποράς, σύμφωνα με την εξίσωση (14).

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (14)$$

- Αυτοσυνδιακύμανση (Autocovariance): Εκφράζει την μέτρηση της συνδιακύμανσης μεταξύ δύο παρατηρήσεων στην ίδια χρονοσειρά, οι οποίες έχουν μια συγκεκριμένη χρονική απόσταση. Συγκεκριμένα, η αυτοσυνδιακύμανση μεταξύ των $X(t_i)$ και $X(t_i + k)$, όπου η χρονική απόσταση μεταξύ τους είναι k χρονικές περιόδους, ορίζεται από την εξίσωση (15).

$$\gamma_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (X(t_i) - \mu)(X(t_i + k) - \mu) \quad (15)$$

όπου n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων, μ είναι ο μέσος όρος, και k είναι η απόσταση στον χρόνο μεταξύ των δύο παρατηρήσεων.

- Αυτοσυσχέτιση (Autocorrelation): Ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης προσδιορίζει τη συσχέτιση μεταξύ παρατηρήσεων σε διάφορα χρονικά σημεία, βοηθώντας στην εκτίμηση της τυχαιότητας ή μη της χρονοσειράς, και δίνεται από την εξίσωση (16).

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\sqrt{\sigma^2 \cdot \sigma^2}} \quad (16)$$

όπου γ_k είναι ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης για διακύμανση k , σ^2 είναι η διασπορά της χρονοσειράς, και η ρίζα του γινομένου των διασπορών εξασφαλίζει την κανονικοποίηση του συντελεστή. Ο ρ_k βοηθά στην αξιολόγηση της τυχειότητας ή μη της χρονοσειράς.

Η συμπεριφορά μιας χρονοσειράς περιγράφεται από τα χαρακτηριστικά της, τα οποία περιλαμβάνουν:

- Χρονική Σειρά (Temporal Order): Τα δεδομένα είναι οργανωμένα με βάση τον χρόνο. Η σειρά των παρατηρήσεων είναι σημαντική και αναπαραστά την εξέλιξη του φαινομένου με την πάροδο του χρόνου.
- Τάσεις (Trends): Οι μακροπρόθεσμες αυξήσεις ή μειώσεις στα δεδομένα, που δείχνουν τη γενική κατεύθυνση του φαινομένου.
- Εποχικότητα (Seasonality): Κυκλικά μοτίβα ή περιοδικές διακυμάνσεις που επαναλαμβάνονται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, όπως η καθημερινή, εβδομαδιαία ή ετήσια εποχικότητα.
- Κυκλικότητα (Cycles): Μακροπρόθεσμες αυξήσεις ή μειώσεις που δεν είναι συσχετισμένες με τις κανονικές εποχικές διακυμάνσεις.
- Στοχαστικότητα (Randomness): Τυχαίες ή μη συστηματικές διακυμάνσεις που δεν μπορούν να εξηγηθούν από τις παραπάνω πτυχές.
- Εξωτερικοί Παράγοντες (External Factors): Εξωγενείς παράγοντες που δεν ανήκουν στη φυσική εξέλιξη του φαινομένου αλλά μπορεί να το επηρεάσουν.

Με τον όρο "στασιμότητα", αναφερόμαστε σε μια κατάσταση όπου μια διαδικασία παραμένει σταθερή με τον χρόνο. Συγκεκριμένα, ισχύει ότι ο μέσος όρος, η διασπορά και η αυτοσυσχέτιση δεν υφίστανται μεταβολές κατά τη διάρκεια του χρόνου. Αντιθέτως, όταν υπάρχει τάση, αυτό σημαίνει ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς μεταβάλλονται με τον χρόνο, καθιστώντας τη μη στάσιμη. Η εφαρμογή του φίλτρου Kalman συνίσταται από την βιβλιογραφία [211], [212], [213], για την ανάλυση μη στάσιμων σημάτων, όπως οι μετρήσεις αερίων ρύπων καθώς αυτές δεν εμφανίζουν συγκεκριμένο στατιστικό χαρακτηρισμό (όπως σταθερή μέση τιμή). Γενικότερα οι περιβαλλοντικές μετρήσεις είναι μη στασιμά σήματα καθώς επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, από την θέση τοποθέτησης του μετρητικού συστήματος, όπως

και από την εποχικότητα. Το φίλτρο Kalman είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο μαθηματικών εφαρμογών-λύσεων, καθώς ερμηνεύει πολύ καλά τόσο τα στοχαστικά συστήματα όσο και τη γραμμική άλγεβρα. Επίσης τα μη γραμμικά συστήματα ή αυτά με κάπως διαφορετικές συναρτήσεις υπολογιστικού κόστους, λειτουργούν πρακτικά καλά με ένα φίλτρο Kalman ή το Extended Kalman Filter, το οποίο είναι ένα είδος γραμμικής παραλλαγής του KF. Πολλές άλλες εναλλακτικές λύσεις, όπως η μηχανική μάθηση ή τα νευρωνικά δίκτυα, είναι πολύ πιο απαιτητικές υπολογιστικά. Σύμφωνα με τις ανάγκες για την βελτιστοποίηση τιμών από αισθητήρες αερίων ρύπων, χαμηλού κόστους, το φίλτρο Kalman εμφανίζει ικανοποιητική συμπεριφορά, καθώς απαιτεί χαμηλή απόδοση επεξεργασίας.

6.6.1 Θεωρητικό υπόβαθρο μεθόδου

Το φίλτρο Kalman είναι ένας μαθηματικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κατάστασης ενός συστήματος με χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα που υπόκειται σε θόρυβο μέτρησης. Αναπτύχθηκε από τον Rudolf Kalman τη δεκαετία του 1960 [214] και χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα ελέγχου, επεξεργασία σήματος και άλλες εφαρμογές που περιλαμβάνουν την εκτίμηση της κατάστασης ενός συστήματος. Το φίλτρο Kalman χρησιμοποιεί έναν αναδρομικό αλγόριθμο που συνδυάζει μετρήσεις από διάφορους αισθητήρες με προβλέψεις της κατάστασης του συστήματος, για να αποκτήσει μια βέλτιστη εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης του συστήματος. Βασίζεται σε ένα στατιστικό μοντέλο της συμπεριφοράς του συστήματος και ενημερώνει την εκτίμησή του με κάθε νέα μέτρηση που λαμβάνεται. Το φίλτρο Kalman είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε καταστάσεις όπου υπάρχει αβεβαιότητα ή θόρυβος στις μετρήσεις και όπου το υποκείμενο σύστημα υπόκειται σε τυχαίες διακυμάνσεις. Έχει εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων, όπως η πλοήγηση, τα συστήματα ελέγχου, η υπολογιστική όραση και τα οικονομικά.

Το φίλτρο Kalman λειτουργεί συνδυάζοντας δύο πηγές πληροφοριών: μετρήσεις ενός συστήματος και προβλέψεις της κατάστασης του συστήματος με βάση ένα μαθηματικό μοντέλο. Το φίλτρο χρησιμοποιεί αυτές τις δύο πηγές πληροφοριών για να εκτιμήσει την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Τα βασικά βήματα του αλγόριθμου φίλτρου Kalman είναι τα εξής:

- Αρχικοποίηση: Το φίλτρο Kalman αρχικοποιείται με μια εκτίμηση της αρχικής κατάστασης του συστήματος και τον πίνακα συνδιακύμανσης που περιγράφει την αβεβαιότητα της εκτίμησης.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

- Πρόβλεψη: Με βάση το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος, το φίλτρο Kalman προβλέπει την κατάσταση του συστήματος στο επόμενο χρονικό βήμα.
- Ενημέρωση: Το φίλτρο συγκρίνει την προβλεπόμενη κατάσταση με τις μετρήσεις του συστήματος στο επόμενο χρονικό βήμα. Με βάση τη σύγκριση, το φίλτρο υπολογίζει μια βέλτιστη εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος και τον πίνακα συνδιακύμανσης που περιγράφει την αβεβαιότητα της εκτίμησης.
- Επανάληψη: Στη συνέχεια, το φίλτρο επαναλαμβάνει τα βήματα πρόβλεψης και ενημέρωσης για κάθε επόμενο χρονικό βήμα, χρησιμοποιώντας την τελευταία εκτίμηση και τον πίνακα συνδιακύμανσης ως νέες αρχικές συνθήκες.

Το φίλτρο Kalman έχει σχεδιαστεί για να βελτιστοποιεί την εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος ελαχιστοποιώντας το σφάλμα μεταξύ της προβλεπόμενης κατάστασης και των πραγματικών μετρήσεων. Χρησιμοποιεί ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που λαμβάνουν υπόψη τον θόρυβο και την αβεβαιότητα στο σύστημα και στις μετρήσεις. Το φίλτρο είναι επαναληπτικό, πράγμα που σημαίνει ότι ενημερώνει την εκτίμησή του για την κατάσταση του συστήματος και την αβεβαιότητα της εκτίμησης με κάθε νέα μέτρηση. Συνολικά, το φίλτρο Kalman παρέχει μια βέλτιστη εκτίμηση της κατάστασης ενός συστήματος με βάση τόσο τις μετρήσεις όσο και τις προβλέψεις, ενώ λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα και τον θόρυβο στο σύστημα και στις μετρήσεις. Πολλές μελέτες έχουν δημοσιευτεί χρησιμοποιώντας το φίλτρο Kalman ως μοντέλο πρόβλεψης. Ένα μοντέλο αναζήτησης και πρόβλεψης καιρού (WRF) [215] συνέκρινε την παρατηρούμενη ταχύτητα ανέμου με την προβλεπόμενη ταχύτητα ανέμου και σύμφωνα με το φίλτρο Kalman στη συνέχεια αναθεώρησε τη θεωρία της προβλεπόμενης ταχύτητας ανέμου για να μειώσει τα συστηματικά και τυχαία σφάλματα. Η ακρίβεια της πρόβλεψης είχε βελτιωθεί σημαντικά. Η ερευνητική μελέτη [216] παρουσιάζει το φίλτρο Square Ensemble Kalman το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διατηρεί σταθερό τον χρόνο της υπολογιστικής διαδικασίας. Στην εργασία [217] σχετικά με την πρόβλεψη ατμοσφαιρικής ρύπανσης, σε έξι διαφορετικούς τύπους ατμοσφαιρικών ρύπων, εφαρμόστηκε ένας αλγόριθμος φίλτρου Kalman, σε αντίθεση με τα κοινά μοντέλα πρόβλεψης. Το εφαρμοσμένο μοντέλο φίλτρου Kalman έδειξε τα βέλτιστα αποτελέσματα πρόβλεψης. Ένα σύστημα για τη μοντελοποίηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από την ερευνητική ομάδα [218], παρουσίασε την εκτίμηση του ατμοσφαιρικού ρύπου, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Extended Kalman Filter. Σε μια άλλη εργασία [219] εφαρμόστηκε μια μη γραμμική συνάρτηση στον κλασικό αλγόριθμο φίλτρου Kalman για τη βελτίωση της τοπικής πρόγνωσης καιρού. Στην Ι.Χρηστάκης

ερευνητική εργασία [220] προτάθηκε ένα φίλτρο Kalman ως μια προσέγγιση μεθοδολογίας που βασίζεται σε δεδομένα για την Πρόβλεψη Χρόνου Άφιξης Λεωφορείου (Bus Arrival Time Prediction - BATP) εκμεταλλευόμενοι τους χωροχρονικούς συσχετισμούς των χρόνων ταξιδιού που ανιχνεύονται μέσω μιας συσκευής GPS. Η εργασία [221] περιγράφει την αποτελεσματική προσέγγιση της εφαρμογής του φιλτραρίσματος Kalman σε μετρήσεις συγκέντρωσης αερίων σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας φασματοσκοπία υπέρτονου διόδου-λείζερ. Οι ερευνητές της εργασίας [222] παρουσιάζουν την αξιολόγηση της καταλληλότητας της μεθόδου προσαρμοστικής παλινδρόμησης που βασίζεται στο KF για τη διόρθωση ντετερμινιστικών προβλέψεων για την ποιότητα του αέρα σε μια περιοχή (στο βόρειο τμήμα του Βελγίου) που χαρακτηρίζεται από υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η οποία έχει υψηλή πυκνότητα ανθρώπινων δραστηριοτήτων, με αντίστοιχα υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικών εκπομπών από κατοικίες, οδική κυκλοφορία και βιομηχανία. Στην εργασία [223] οι ερευνητές πρότειναν έναν αποτελεσματικό τρόπο βελτίωσης της ακρίβειας της πρόβλεψης των ρύπων του αέρα εσωτερικών χώρων, εάν χρησιμοποιούσαν μια τεχνική φιλτραρίσματος Kalman για τον καθαρισμό του αέρα με μεγαλύτερη ακρίβεια, η εφαρμογή αυτή έγινε μέσω ασύρματης λειτουργίας σε δίκτυα αισθητήρων με τη βοήθεια του IoT.

Η μελέτη εφαρμογής της μεθόδου φίλτρου Kalman στις διορθωμένες τιμές των αισθητήρων χαμηλού κόστους του σταθμού παρακολούθησης ποιότητας αέρα έχει ως στόχο η προβλέψιμη τιμή να είναι κοντά στην τιμή μέτρησης αναφοράς, ώστε να εμφανίζει υψηλό βαθμό συσχέτισης, σε σχέση με τις τιμές από τα όργανα αναφοράς. Επιπλέον, για το μοντέλο πρόβλεψης τιμής αισθητήρων χαμηλού κόστους, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των συντελεστών του φίλτρου Kalman με στόχο την ανίχνευση του βάρους κάθε συντελεστή κατά την τελική τιμή εκτίμησης. Ο προσδιορισμός του πόσο πιο κοντά είναι οι προβλεπόμενες τιμές σε σχέση με τις τιμές αναφοράς έχει γίνει με τη χρήση των μεθόδων μέσης απόλυτης απόκλισης (MAD), μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE), μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος (MAPE) και ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE).

Για την πρόβλεψη, ο αλγόριθμος φίλτρου Kalman δημιουργεί εκτιμήσεις των μεταβλητών τρέχουσας κατάστασης, μαζί με τις αβεβαιότητές τους. Μόλις παρατηρηθεί το αποτέλεσμα της επόμενης μέτρησης (κατεστραμμένο από σφάλμα, συμπεριλαμβανομένου του τυχαίου θορύβου), αυτές οι εκτιμήσεις ενημερώνονται χρησιμοποιώντας έναν σταθμισμένο μέσο όρο, με μεγαλύτερη βαρύτητα σε εκτιμήσεις με μεγαλύτερη βεβαιότητα. Ο αλγόριθμος

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

είναι αναδρομικός. Τα φίλτρα Kalman ανήκουν στα γραμμικά δυναμικά συστήματα, τα οποία είναι ικανά για μοντελοποίηση χώρου - κατάστασης. Λαμβάνοντας υπόψη τις υποκείμενες κρυφές καταστάσεις, οι οποίες αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου, πιθανώς ως συνάρτηση ορισμένων εξωτερικών εισόδων, είναι δυνατός ο επηρεασμός της εξόδου του συστήματος. Η βασική υπόθεση του φίλτρου Kalman είναι ο Gaussian χαρακτήρας των μετρήσεων (οι έξοδοι του συστήματος μεταβάλλονται από τον Gaussian θόρυβο) καθώς και η αβεβαιότητα της εξέλιξης της κατάστασης. Οι παρακάτω δυναμικές εξισώσεις μοντέλου (17), (18) περιγράφουν το φίλτρο Kalman.

$$y_{t+1} = Ay_t + Cu_t + w_t \quad (17)$$

$$x_t = By_t + Du_t + v_t \quad (18)$$

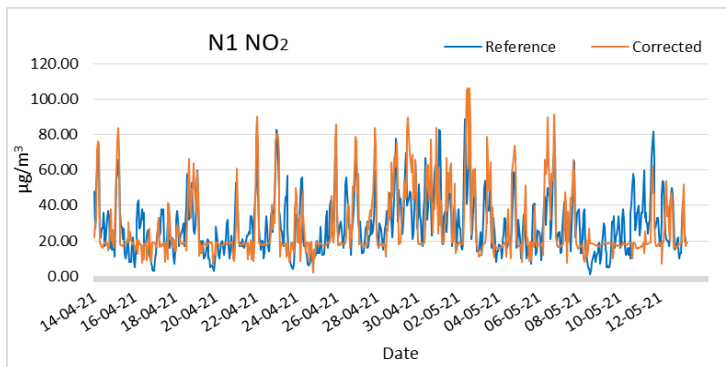
Οι καταστάσεις είναι διανύσματα, $y_t \in R^{d_y}$, τα οποία είναι μη παρατηρήσιμα. Η έξοδος του συστήματος $x_t \in R^{d_x}$ εξαρτάται μόνο από την τρέχουσα κατάσταση y_t και κάποιο πρόσθετο θόρυβο v_t . Η είσοδος του συστήματος, στην περίπτωση ενός μοντέλου συστήματος ελέγχου, $u_t \in R^{d_u}$, θεωρείται γνωστή. Η κατάσταση y_{t+1} είναι ανεξάρτητη από όλες τις άλλες καταστάσεις εάν είναι γνωστή η y_t . Υποθέτοντας ότι ο θόρυβος των μετρήσεων v_t και η εξέλιξη των καταστάσεων w_t είναι λευκός Gaussian θόρυβος με μέση τιμή μηδέν.

6.6.2 Εφαρμογή φίλτρου Kalman στα δεδομένα

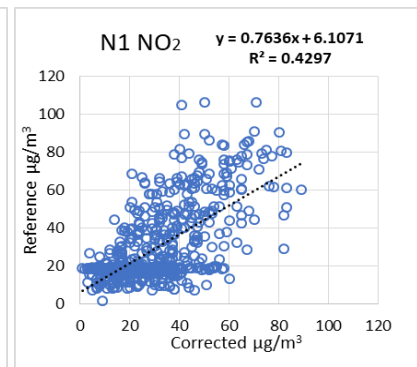
Η υλοποίηση του φίλτρου Kalman, για την εξαγωγή των τιμών πρόβλεψης, έχει γίνει σε περιβάλλον MatLab, τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στην εργασία [206] που δημοσιεύτηκε στο πλαίσιο εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής. Τα παρακάτω σχήματα αναφέρονται σε κάθε σταθμό (N1, N2, N3) και κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους ξεχωριστά. Οι αισθητήρες χαμηλού κόστους, αφορούν, το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και το όζον (O_3). Η κατηγοριοποίηση γίνεται ανά σταθμό, όπου εμφανίζονται τα γραφήματα των διορθωμένων τιμών με τις τιμές των οργάνων αναφοράς και τον βαθμό συσχέτισής τους, καθώς και οι προβλέψιμες τιμές από το φίλτρο Kalman, με τις τιμές των οργάνων αναφοράς και τον βαθμό συσχέτισής τους. Για τον σταθμό N1, το Σχήμα 6.48 εμφανίζει τις χρονοσειρές των διορθωμένων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και το Σχήμα 6.49 εμφανίζει τη συσχέτιση (R^2) μεταξύ των διορθωμένων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO_2). Το Σχήμα 6.50 εμφανίζει τις χρονοσειρές των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO_2), και το Σχήμα 6.51

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

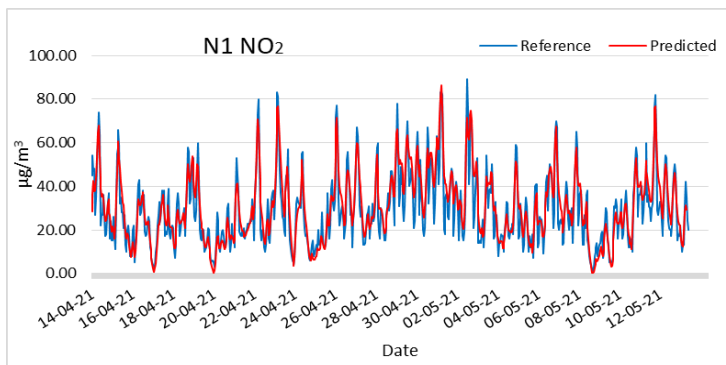
εμφανίζει τη συσχέτιση (R^2) μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO_2).



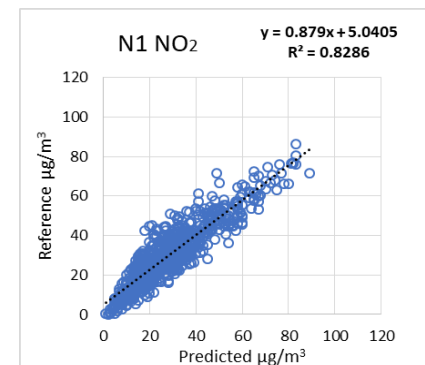
Σχήμα 6.48: Node1, NO_2 , χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.49: Node1, NO_2 , συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.



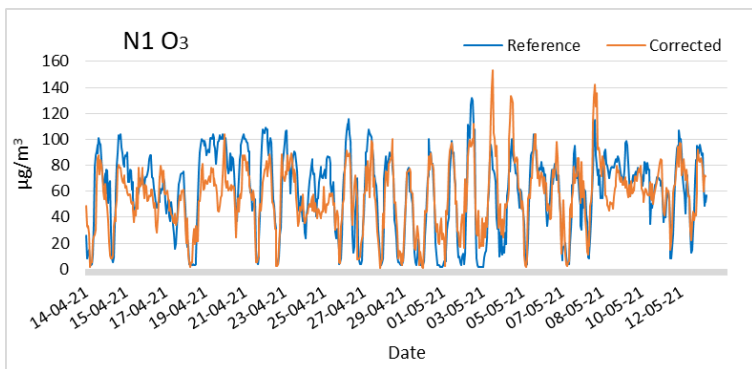
Σχήμα 6.50: Node1, NO_2 , χρονοσειρά προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.



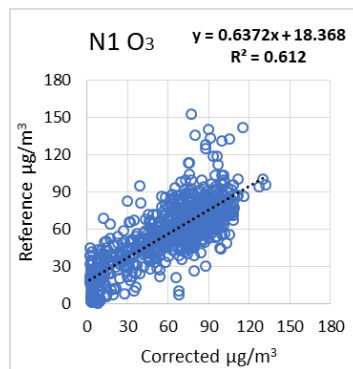
Σχήμα 6.51: Node1, NO_2 , συσχέτιση μεταξύ προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.

Για τον σταθμό N1, το Σχήμα 6.52 εμφανίζει τις χρονοσειρές των διορθωμένων τιμών και τις τιμές αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O_3) και το Σχήμα 6.53 εμφανίζει τη συσχέτιση (R^2) μεταξύ των διορθωμένων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O_3). Το Σχήμα 6.54 εμφανίζει τις χρονοσειρές των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O_3) και το Σχήμα 6.55 εμφανίζει τη συσχέτιση (R^2) μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O_3).

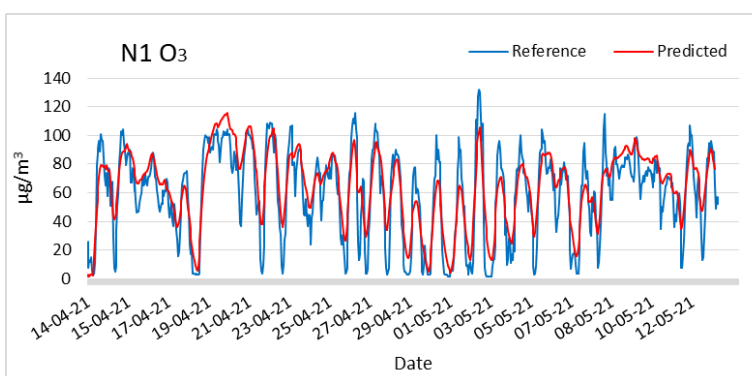
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



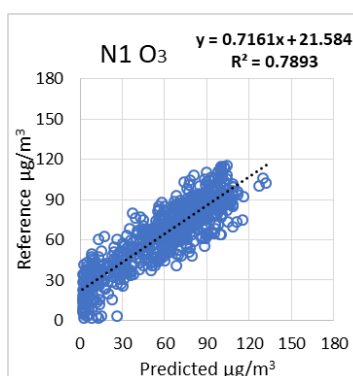
Σχήμα 6.52: Node1, O₃, χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.53: Node1, O₃, συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.

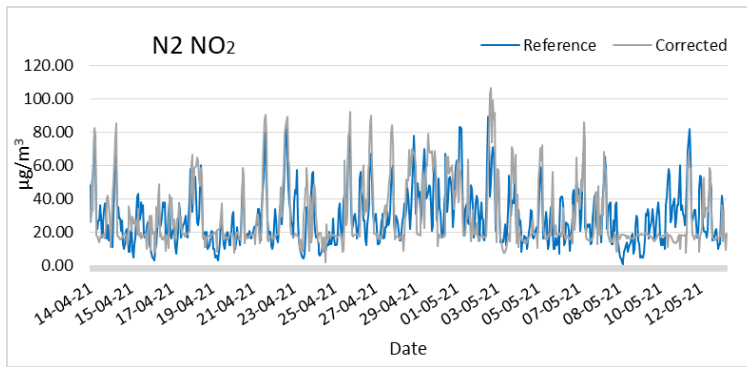


Σχήμα 6.54: Node1, O₃, χρονοσειρά προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.

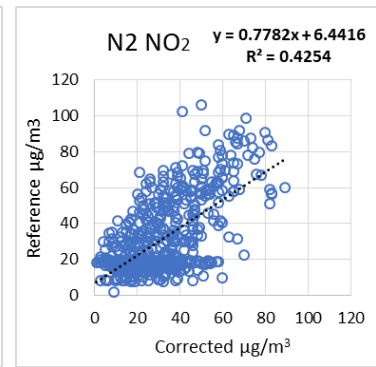


Σχήμα 6.55: Node1, O₃, συσχέτιση μεταξύ προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.

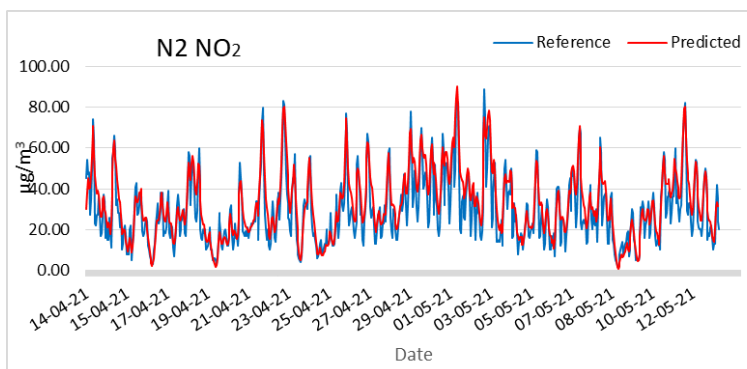
Για τον σταθμό N2, το Σχήμα 6.56 εμφανίζει τις χρονοσειρές των διορθωμένων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και το Σχήμα 6.57 εμφανίζει τη συσχέτιση (R²) μεταξύ των διορθωμένων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO₂). Το Σχήμα 6.58 εμφανίζει τις χρονοσειρές των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO₂), και το Σχήμα 6.59 εμφανίζει τη συσχέτιση (R²) μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO₂).



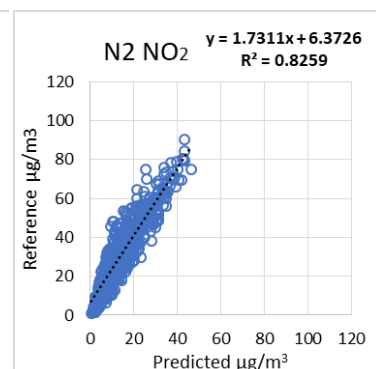
Σχήμα 6.56: Node2, NO₂, χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.57: Node2, NO₂, συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.

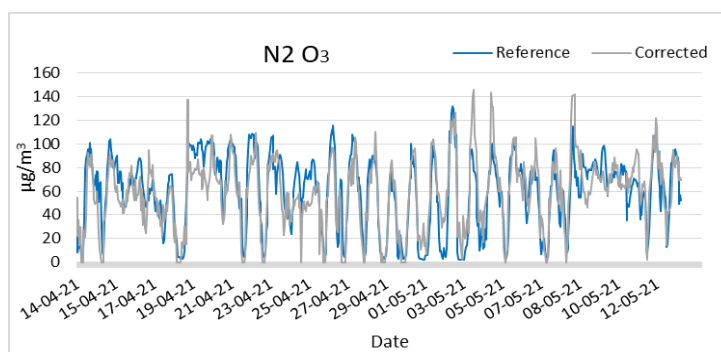


Σχήμα 6.58: Node2, NO₂, χρονοσειρά προβλεψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.

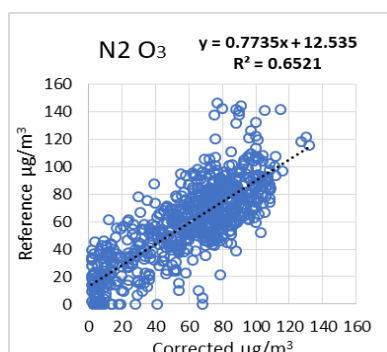


Σχήμα 6.59: Node2, NO₂, συσχέτιση μεταξύ προβλεψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.

Αναφορικά με τον N₂, το Σχήμα 6.60 εμφανίζει τις χρονοσειρές των διορθωμένων τιμών και τις τιμές αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O₃) και το Σχήμα 6.61 εμφανίζει τη συσχέτιση (R²) μεταξύ των διορθωμένων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O₃). Το Σχήμα 6.62 εμφανίζει τις χρονοσειρές των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O₃) και το Σχήμα 6.63 εμφανίζει τη συσχέτιση (R²) μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O₃).

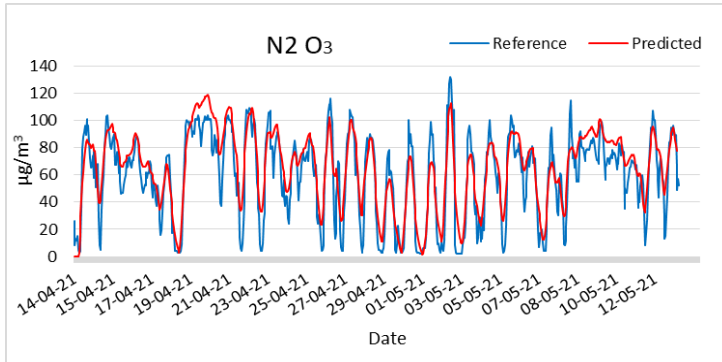


Σχήμα 6.60: Node2, O₃, χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.

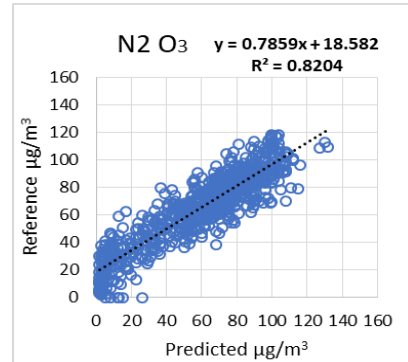


Σχήμα 6.61: Node2, O₃, συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

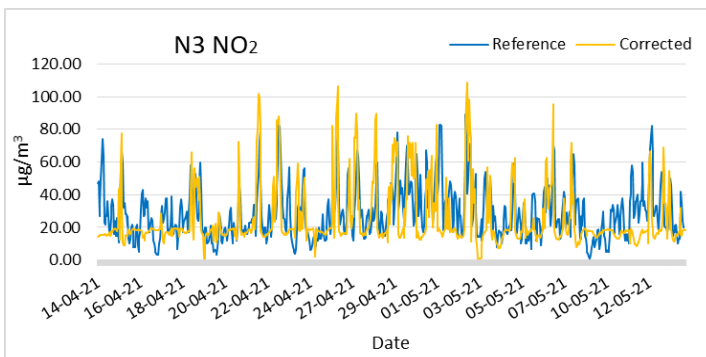


Σχήμα 6.62: Node2, O₃, χρονοσειρά προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.

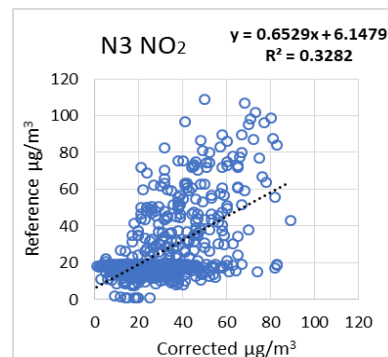


Σχήμα 6.63: Node2, O₃, συσχέτιση μεταξύ προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.

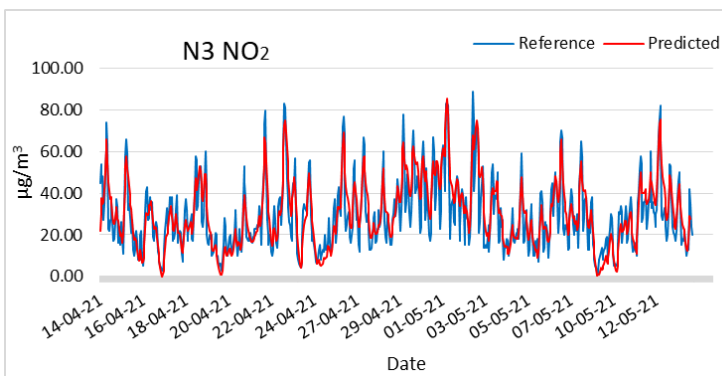
Τέλος για τον σταθμό N3, το Σχήμα 6.64 εμφανίζει τις χρονοσειρές των διορθωμένων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και το Σχήμα 6.65 εμφανίζει τη συσχέτιση (R²) μεταξύ των διορθωμένων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO₂). Το Σχήμα 6.66 εμφανίζει τις χρονοσειρές των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO₂), και το Σχήμα 6.67 εμφανίζει τη συσχέτιση (R²) μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (NO₂).



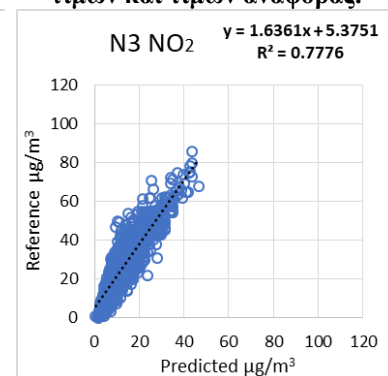
Σχήμα 6.64: Node3, NO₂, χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.65: Node3, NO₂, συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.

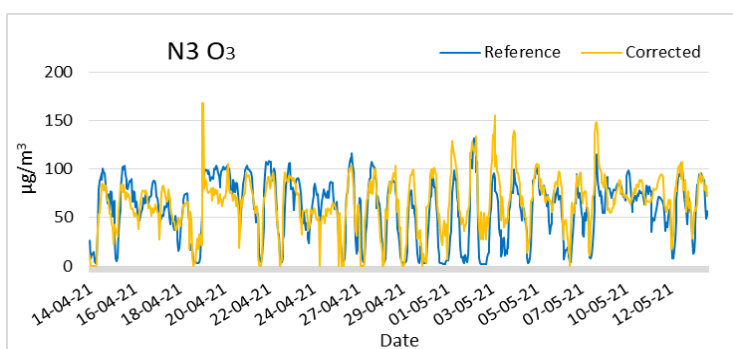


Σχήμα 6.66: Node3, NO₂, χρονοσειρά προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.

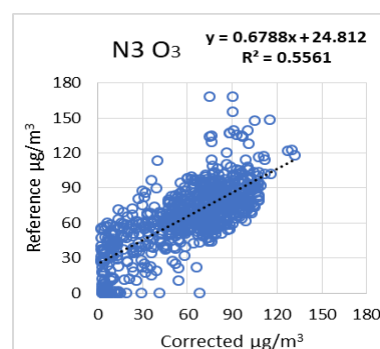


Σχήμα 6.67: Node3, NO₂, συσχέτιση μεταξύ προβλέψιμων τιμών και τιμών αναφοράς.

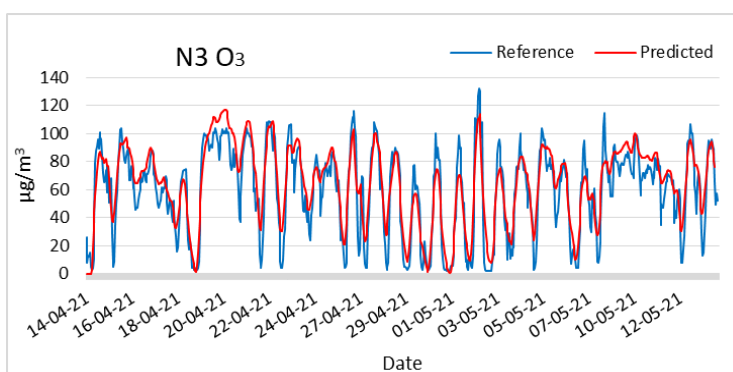
Για τον N3, το Σχήμα 6.68 εμφανίζει τις χρονοσειρές των διορθωμένων τιμών και τις τιμές αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O₃) και το Σχήμα 6.69 εμφανίζει τη συσχέτιση (R²) μεταξύ των διορθωμένων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O₃). Το Σχήμα 6.70 εμφανίζει τις χρονοσειρές των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O₃) και το Σχήμα 6.71 εμφανίζει τη συσχέτιση (R²) μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών και των τιμών αναφοράς της συγκέντρωσης του όζοντος (O₃).



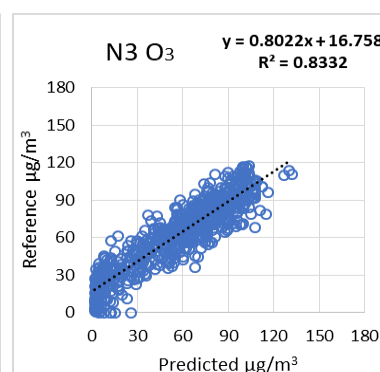
Σχήμα 6.68: Node3, O₃, χρονοσειρά διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.69: Node3, O₃, συσχέτιση μεταξύ διορθωμένων τιμών και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.70: Node3, O₃, χρονοσειρά προβλεπόμενων τιμών και τιμών αναφοράς.



Σχήμα 6.71: Node3, O₃, συσχέτιση μεταξύ προβλεπόμενων τιμών και τιμών αναφοράς.

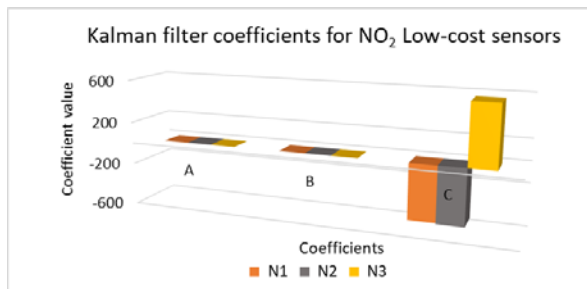
Ο Πίνακας 6.16 εμφανίζει τις τιμές των συντελεστών του φίλτρου Kalman (A, B, C, D) σύμφωνα με τις εξισώσεις (17) και (18), για κάθε αισθητήρα NO₂ και O₃.

Πίνακας 6.16: Τιμές συντελεστών Kalman (A, B, C, D) για κάθε αισθητήρα αερίου

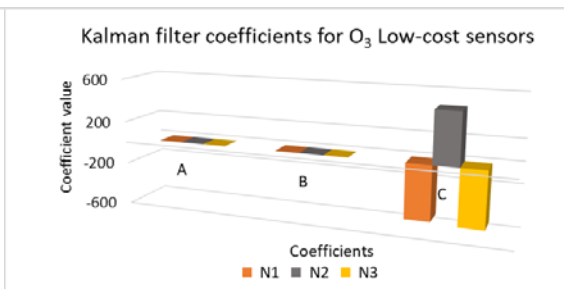
	N1 NO ₂	N2 NO ₂	N3 NO ₂	N1 O ₃	N2 O ₃	N3 O ₃
A	0.68	0.68	0.73	0.86	0.84	0.83
B	$-6 * 10^{-4}$	$-1 * 10^{-3}$	$4 * 10^{-4}$	$-2 * 10^{-4}$	$3 * 10^{-4}$	$-3 * 10^{-4}$
C	-516	-523	567	-503	473	-522
D	0	0	0	0	0	0

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Το Σχήμα 6.72 και το Σχήμα 6.73 εμφανίζουν τη διακύμανση της τιμής των συντελεστών A, B, C, D για τους χαμηλού κόστους αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και όζοντος (O₃), αντίστοιχα.



Σχήμα 6.72: Διακύμανση τιμών των συντελεστών φίλτρου Kalman για τους αισθητήρες NO₂.



Σχήμα 6.73: Διακύμανση τιμών των συντελεστών φίλτρου Kalman για τους αισθητήρες O₃.

Οι μέθοδοι, μέσης απόλυτης απόκλισης (MAD), μέσου τετραγώνου σφάλματος (MSE), μέσου απόλυτου ποσοστού σφάλματος (MAPE) και ρίζα μέσου τετραγώνου σφάλματος (RMSE), εφαρμόστηκαν στα αποτελέσματα με σκοπό την αξιολόγησή τους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Ο Πίνακας 6.17 παρουσιάζει τη μέση απόλυτη απόκλιση (MAD). Ο Πίνακας 6.18 παρουσιάζει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) και ο Πίνακας 6.19 το μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος (MAPE). Ο Πίνακας 6.20 εμφανίζει το ριζικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE).

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα MAD, διορθωμένων τιμών - τιμών αναφοράς και προβλεπόμενων τιμών - τιμών αναφοράς κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.

	N1 NO ₂	N2 NO ₂	N3 NO ₂	N1 O ₃	N2 O ₃	N3 O ₃
Corrected- Ref	14.8	15.5	13.3	20.0	24.0	21.8
Predicted-Ref	12.8	13.2	12.9	21.1	22.7	23.0

Πίνακας 6.18: Αποτελέσματα MSE, διορθωμένων τιμών - τιμών αναφοράς και προβλεπόμενων τιμών - τιμών αναφοράς κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.

	N1 NO ₂	N2 NO ₂	N3 NO ₂	N1 O ₃	N2 O ₃	N3 O ₃
Corrected- Ref	0.69	0.74	0.62	1.36	1.68	2.25
Predicted-Ref	0.55	0.66	0.55	2.26	2.42	2.33

Πίνακας 6.19: Αποτελέσματα MAPE, διορθωμένων τιμών - τιμών αναφοράς και προβλεπόμενων τιμών - τιμών αναφοράς κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.

	N1 NO ₂	N2 NO ₂	N3 NO ₂	N1 O ₃	N2 O ₃	N3 O ₃
Corrected- Ref	0.21	0.23	0.20	0.27	0.24	0.36
Predicted-Ref	0.19	0.22	0.19	0.46	0.45	0.43

Πίνακας 6.20: Αποτελέσματα RMSE, διορθωμένων τιμών - τιμών αναφοράς και προβλεπόμενων τιμών - τιμών αναφοράς κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.

	N1 NO ₂	N2 NO ₂	N3 NO ₂	N1 O ₃	N2 O ₃	N3 O ₃
Corrected- Ref	1.58	1.60	1.60	0.11	0.07	0.15
Predicted-Ref	1.67	1.79	1.80	1.40	1.38	1.39

Το φίλτρο Kalman είναι ένας αλγόριθμος για την εκτίμηση της κατάστασης ενός συστήματος σύμφωνα με ένα σύνολο μετρήσεων. Λαμβάνει τα δεδομένα εισόδου χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (17) & (18) με στόχο να προσεγγίσει την έξοδο. Χρησιμοποιώντας νέα δεδομένα μέτρησης εισόδου, με την τρέχουσα κατάσταση εξόδου, προσεγγίζει την επόμενη κατάσταση εξόδου. Μέσω της επαναληψιμότητας του αλγορίθμου έχει την ιδιότητα να συγκλίνει γρήγορα στην επίλυση. Σε αυτή την ενότητα έλαβε μέρος η διερεύνηση της συμπεριφοράς ενός φίλτρου Kalman για τη διόρθωση μετρούμενων τιμών από αισθητήρες χαμηλού κόστους. Αναλύοντας τα δεδομένα των συντελεστών του φίλτρου Kalman (Πίνακας 6.16), παρατηρήθηκε ότι, μεταξύ των αισθητήρων αερίου NO₂ και μεταξύ των αισθητήρων O₃, οι συντελεστές "B" και "D" που σχετίζονται με την έξοδο των μετρήσεων του φίλτρου Kalman, εμφανίζουν, πολύ κοντινές τιμές για τον συντελεστή "B" και μηδενική τιμή για τον συντελεστή "D", ενώ οι συντελεστές "A" και "C" οι οποίοι έχουν σχέση με τη διανυσματική κατάσταση της εξόδου του φίλτρου, ο συντελεστής "A" εμφανίζει παρόμοιες τιμές ενώ ο συντελεστής "C" πολύ διαφορετικές τιμές. Ο συντελεστής "C" συμβάλλει στην έξοδο της επόμενης διανυσματικής κατάστασης μεταβάλλοντας την τιμή εισόδου. Η τιμή του συντελεστή «C» αναμένεται να είναι διαφορετική για κάθε αισθητήρα καθώς συμβάλλει στην τιμή εισόδου που είναι η μέτρηση του αισθητήρα, για τον υπολογισμό της επόμενης διανυσματικής κατάστασης και τέλος στην πρόβλεψη της τιμής εξόδου. Η εφαρμογή των μεθόδων MAD, MSE, MAPE, RMSE εμφανίζει ικανοποιητικά αποτελέσματα καθώς με τη μέθοδο MAD για τις προβλεπόμενες τιμές υπάρχει μικρή βελτίωση του διοξειδίου του αζώτου ενώ του όζοντος κυμαίνονται στις ίδιες τιμές. Όσον αφορά τη μέθοδο MSE, οι προβλεπόμενες τιμές του διοξειδίου του αζώτου παρουσιάζουν βελτίωση, ενώ του όζοντος παρουσιάζουν διακύμανση. Παρόμοια συμπεριφορά των προβλεπόμενων τιμών σε σχέση με τις διορθωμένες τιμές παρατηρείται και με την εφαρμογή της μεθόδου MAPE. Όσον αφορά τα αποτελέσματα του RMSE, παρατηρήθηκε ότι, υπάρχει μείωση στις προβλεπόμενες τιμές σε σχέση με τις διορθωμένες τιμές. Η μείωση του RMSE είναι πολύ μικρή για τις τιμές από τους αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου, ενώ είναι πολύ μεγαλύτερη για τους αισθητήρες όζοντος. Αυτή η διαφορά σχετίζεται άμεσα με τον τύπο αερίου που αναγνωρίζεται από κάθε αισθητήρα και συγκεκριμένα ο αισθητήρας όζοντος παρουσιάζει αυτή τη συμπεριφορά καθώς επηρεάζεται και από συγκεντρώσεις NO_x, κατά την οποία απαιτείται προηγουμένως η αφαίρεση της συγκέντρωσης NO₂ από το O₃ ώστε να προκύψει η

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

διορθωμένη τιμή συγκέντρωσης O_3 . Αυτή η διαδικασία εισάγει ένα σφάλμα που καλύπτεται από την εφαρμογή του φίλτρου Kalman και εμφανίζεται κατά την εκτέλεση της μεθόδου RMSE. Γενικά, οι προβλεπόμενες τιμές είναι εντός ικανοποιητικών ορίων και το αναμενόμενο κέρδος δίνει πιο ρεαλιστικές τιμές των μετρήσεων σε σχέση με τις τιμές αναφοράς, γεγονός που καθιστά τις προβλεπόμενες τιμές του φίλτρου Kalman ως μοντέλο πρόβλεψης πιο έμπιστες και αξιόπιστες.

Αντιμετωπίζοντας τον κάθε αισθητήρα ως μαύρο κουτί, και εφαρμόζοντας στις μετρήσεις του ένα φίλτρο Kalman, είναι δυνατόν να εξαχθούν οι συντελεστές του φίλτρου. Αυτοί οι συντελεστές εφαρμόζονται στις μετρήσεις του αισθητήρα προκειμένου να βελτιστοποιηθούν, σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ο βαθμός συσχέτισης (R^2) των διορθωμένων τιμών, πριν από την εφαρμογή του φίλτρου Kalman, για τους αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO_2) κυμαινόταν από 0.50 έως 0.68 και για τους αισθητήρες όζοντος (O_3) κυμαινόταν από 0.63 έως 0.68. Μετά την εφαρμογή του φίλτρου Kalman, οι προβλεψιμες μετρήσεις δείχνουν βαθμό συσχέτισης ως προς τις μετρήσεις αναφοράς, για το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) από 0.89 έως 0.92, ενώ για το όζον (O_3) από 0.77 έως 0.81.

Εφαρμόζοντας τις μεθόδους MAD, MSE, MAPE και RMSE, για λόγους αξιολόγησης, στις μετρήσεις πριν και μετά την εφαρμογή του φίλτρου Kalman, παρατηρήθηκε ότι ο βαθμός κάθε μεθόδου παρουσιάζει μικρή διαφορά μεταξύ, τόσο των διορθωμένων, όσο και των προβλεπόμενων τιμών, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς δίνοντας τη δυνατότητα πιο αξιόπιστων μετρήσεων, με αποτέλεσμα οι προβλεπόμενες μετρήσεις να είναι πιο κοντά στις μετρήσεις αναφοράς. Επιπλέον, μελετώντας τις τιμές των συντελεστών του φίλτρου Kalman (A, B, C, D) όπου τα "A", "C" επηρεάζουν το αποτέλεσμα της επόμενης διανυσματικής κατάστασης ενώ τα "B", "D" επηρεάζουν το τρέχον αποτέλεσμα κατά τη μέτρηση, παρατηρήθηκε ότι οι συντελεστές "A", "B", "D" παρουσιάζουν παρόμοιες και κοντινές τιμές, ενώ μεγαλύτερος βαθμός διακύμανσης εμφανίζεται στον συντελεστή "C" καθώς αυτός συμβάλλει στην τιμή εισόδου (μετρούμενη από τον αισθητήρα), για την επόμενη κατάσταση εξόδου, δηλαδή την προβλεπόμενη τιμή εξόδου του φίλτρου Kalman. Αυτό επιβεβαιώνει ότι οι μετρήσεις ενός αισθητήρα μπορεί να είναι αξιόπιστες μετά την εφαρμογή της παρούσας μεθοδολογίας. Η χρήση συστημάτων που περιλαμβάνουν τέτοιους αισθητήρες μπορεί να αποτελέσει τρόπο ανάπτυξης δικτύων παρακολούθησης ποιότητας αέρα στο πεδίο, ειδικά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Ακολουθώντας συγκεκριμένες

τεχνικές διορθωτικών παραγόντων, είναι δυνατή η αξιοπιστία των μετρούμενων τιμών από αισθητήρες χαμηλού κόστους.

6.7 Προσδιορισμός των ορίων ασφαλούς διακύμανσης για τη βελτιστοποίηση των μετρήσεων σε χαμηλού κόστους ηλεκτροχημικούς αισθητήρες ποιότητας αέρα.

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται μια προσπάθεια για τον προσδιορισμό του εύρους ανοχής των μη διορθωμένων μετρήσεων από ηλεκτροχημικούς αισθητήρες με στόχο τη βελτιστοποίηση τους ως προς τις μετρήσεις αναφοράς. Επιπλέον, μετά τον προσδιορισμό των ορίων, παρουσιάζονται αναλύσεις, στατιστικής γραμμικής παλινδρόμησης (LR), και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων. Ειδικότερα επιχειρείται η εξακρίβωση του εύρους διακύμανσης και ο εντοπισμός των ποσοστιαίων ορίων διόρθωσης σε ηλεκτροχημικούς αισθητήρες όζοντος και διοξειδίου του αζώτου.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση δεδομένων περιγράφεται σε τέσσερα βήματα. Στο πρώτο βήμα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τρεις σταθμούς μέτρησης N_k ($k=1,2,3$) και ενός σταθμού αναφοράς (R). Το σύνολο των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν σε 36 μέρες (14-4-2021 έως 20-5-2021) που σημαίνει $S=864$ δείγματα. Με στόχο την διερεύνηση των αποκλίσεων των τιμών των αισθητήρων από το σταθμό αναφοράς (R), κατά το πρώτο βήμα, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης $R_{Nk=1..3}^2$. Κατά το δεύτερο βήμα υπολογίστηκαν οι αποκλίσεις των μετρήσεων των σταθμών από το σταθμό αναφοράς σύμφωνα με την εξίσωση (19)

$$SF_i = \frac{X_{N_{ki}} - X_{R_i}}{X_{N_{ki}}} \quad (19)$$

Κατά το τρίτο βήμα υπολογίστηκε για την χρονοσειρά SF_i η μέση τιμή και ο διάμεσος σύμφωνα με τις εξισώσεις (20), (21).

$$CF_A = \frac{\sum_{i=1}^S SF_i}{S} \quad (20)$$

$$CF_M = \frac{x_{(n/2)} + x_{((n/2)+1)}}{2} \quad (21)$$

Όπου x είναι ο ταξινομημένος κατάλογος των τιμών του συνόλου δεδομένων, και n είναι ο αριθμός των τιμών του συνόλου δεδομένων.

Κατά το τέταρτο βήμα διορθώθηκαν οι τιμές των ρύπων κάθε σταθμού με τη χρήση του ορίου ασφαλούς διακύμανσης (SVL), σύμφωνα με τις εξισώσεις (22), (23).

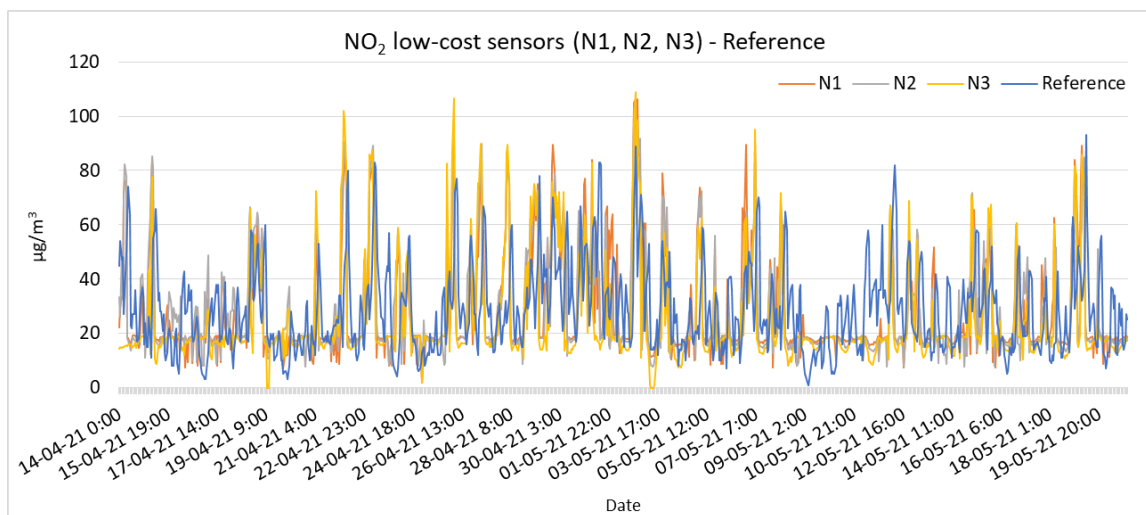
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

$$SVL_A = CF_A \cdot XN_{Ki} \quad (22)$$

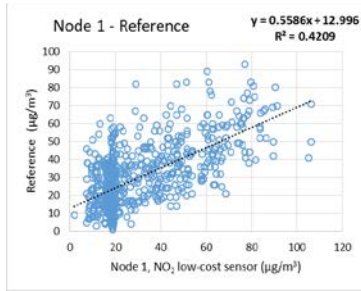
$$SVL_M = CF_M \cdot XN_{Ki} \quad (23)$$

Μετά την εφαρμογή των παραπάνω πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση, εστιάζοντας στην εφαρμογή στατιστικών μοντέλων στα δεδομένα. Η χρήση των στατιστικών μοντέλων της γραμμικής παλινδρόμησης (LR) και της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) θεωρήθηκε ως κατάλληλη προσέγγιση, καθώς και τα δύο παρέχουν τα απαιτούμενα αποτελέσματα και ταυτόχρονα αποτελούν απλές και πρακτικές λύσεις. Τέλος, η αξιολόγηση των βελτιστοποιημένων τιμών πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή των στατιστικών μοντέλων Mean Absolute Deviation (MAD), Mean Square Error (MSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE) και Root Mean Square Error (RMSE).

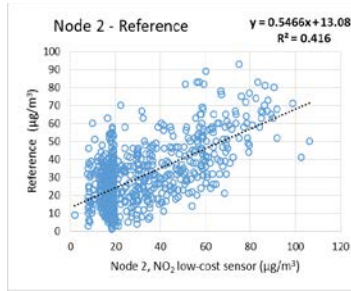
Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συσχέτισης των μετρήσεων μεταξύ των τριών σταθμών σε σχέση με το σταθμό αναφοράς για τους αέριους ρύπους του διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και όζοντος (O_3). Οι χρονοσειρές NO_2 των μετρήσεων από τους τρεις αισθητήρες (μη διορθωμένες) και οι μετρήσεις αναφοράς φαίνονται στο Σχήμα 6.74 και ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) φαίνονται στα Σχήμα 6.75, Σχήμα 6.76, Σχήμα 6.77.



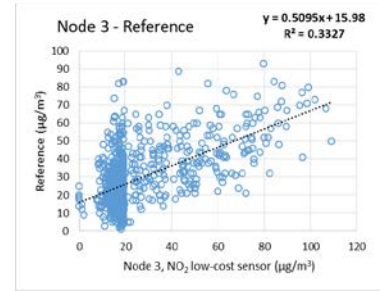
Σχήμα 6.74: Χρονοσειρές συγκέντρωσης NO_2 , μη διορθωμένων μετρήσεων από τρεις αισθητήρες χαμηλού κόστους και μετρήσεων αναφοράς.



Σχήμα 6.75: Συσχέτιση NO_2 μη διορθωμένων τιμών Node 1 με τιμές αναφοράς.

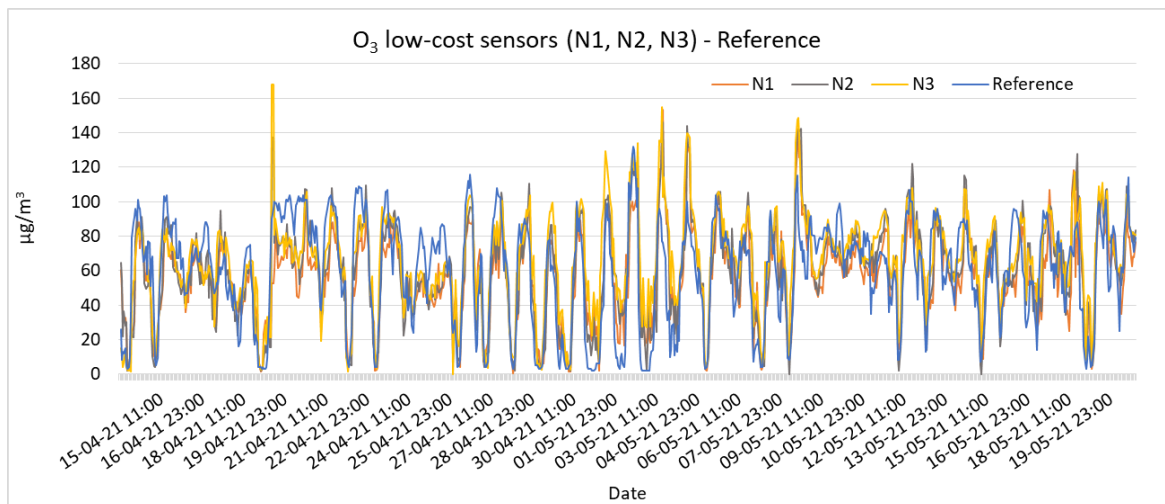


Σχήμα 6.76: Συσχέτιση NO_2 μη διορθωμένων τιμών Node 2 με τιμές αναφοράς.

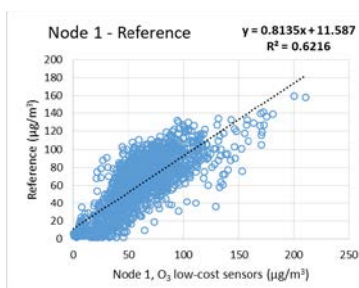


Σχήμα 6.77: Συσχέτιση NO_2 μη διορθωμένων τιμών Node 3 με τιμές αναφοράς.

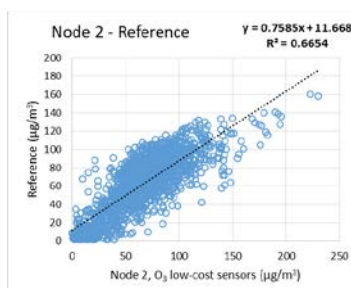
Οι χρονοσειρές για τον ρύπο O_3 των αισθητήρων (μη διορθωμένες) και οι μετρήσεις αναφοράς φαίνονται στο Σχήμα 6.78, και ο συντελεστής συσχέτισης (R^2) φαίνεται στο Σχήμα 6.79, Σχήμα 6.80, Σχήμα 6.81, αντίστοιχα.



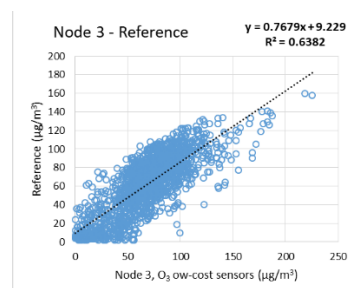
Σχήμα 6.78: Χρονοσειρές συγκέντρωσης O_3 , μη διορθωμένων μετρήσεων από τρεις αισθητήρες χαμηλού κόστους και μετρήσεων αναφοράς.



Σχήμα 6.79: Συσχέτιση O_3 μη διορθωμένων τιμών Node 1 με τιμές αναφοράς.



Σχήμα 6.80: Συσχέτιση O_3 μη διορθωμένων τιμών Node 2 με τιμές αναφοράς.

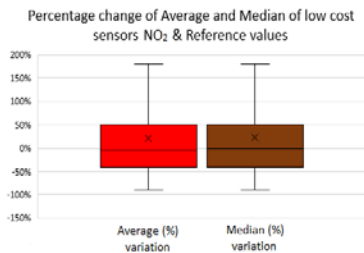


Σχήμα 6.81: Συσχέτιση O_3 μη διορθωμένων τιμών Node 3 με τιμές αναφοράς.

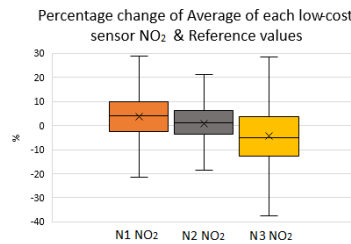
Το Σχήμα 6.82 παρουσιάζει λεπτομερώς τη συνολική διακύμανση, συμπεριλαμβανομένων των τιμών και των τριών αισθητήρων NO_2 χαμηλού κόστους, τόσο για τον μέσο όρο όσο

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

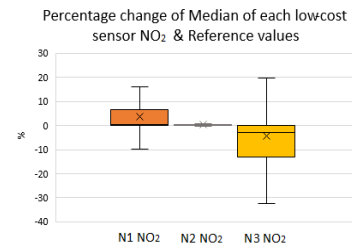
και για τον διάμεσο, ως προς τις τιμές αναφοράς πριν τη διόρθωση. Το Σχήμα 6.83 δείχνει την συμπεριφορά του SVL_A για κάθε αισθητήρα NO_2 σε σχέση με τις τιμές αναφοράς, και το Σχήμα 6.84 δείχνει την συμπεριφορά του SVL_M για κάθε αισθητήρα NO_2 σε σχέση με τις τιμές αναφοράς. Το Σχήμα 6.85 δείχνει τη συνολική διακύμανση συμπεριλαμβανομένων των τιμών και των τριών αισθητήρων O_3 , τόσο για τον μέσο όρο και τον διάμεσο. Το Σχήμα 6.86 δείχνει την συμπεριφορά του SVL_A για κάθε αισθητήρα O_3 σε σχέση με τις τιμές αναφοράς, και το Σχήμα 6.87 δείχνει την συμπεριφορά του SVL_M για κάθε αισθητήρα O_3 σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.



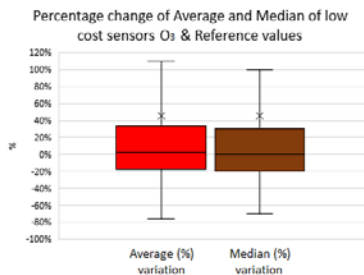
Σχήμα 6.82: Συνολική διακύμανση μετρήσεων τριών αισθητήρων NO_2 χαμηλού κόστους, ως προς τις μετρήσεις αναφοράς, για τις μεθόδους μέσου όρου και διάμεσου.



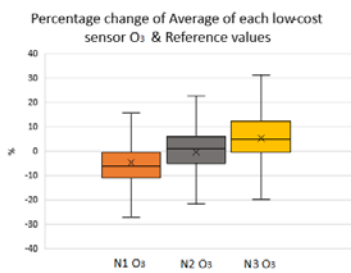
Σχήμα 6.83: Διακύμανση της ποσοστιαίας μεταβολής, με τη μέθοδο μέσου όρου, των μετρήσεων για κάθε αισθητήρα NO_2 χαμηλού κόστους σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.



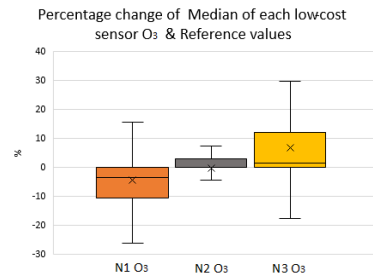
Σχήμα 6.84: Διακύμανση της ποσοστιαίας μεταβολής, με τη μέθοδο διάμεσου, των μετρήσεων για κάθε αισθητήρα NO_2 χαμηλού κόστους σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.



Σχήμα 6.85: Συνολική διακύμανση μετρήσεων τριών αισθητήρων O_3 χαμηλού κόστους, ως προς τις μετρήσεις αναφοράς, για τις μεθόδους μέσου όρου και διάμεσου.



Σχήμα 6.86: Διακύμανση της ποσοστιαίας μεταβολής, με τη μέθοδο μέσου όρου, των μετρήσεων για κάθε αισθητήρα O_3 χαμηλού κόστους σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.

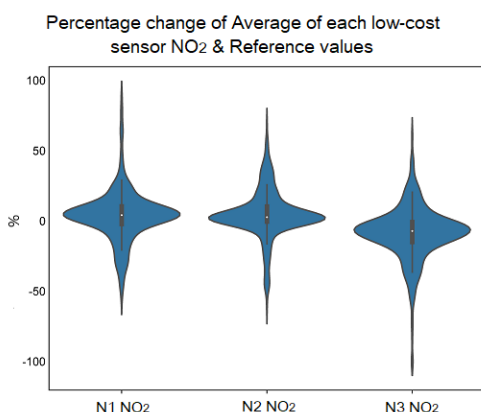


Σχήμα 6.87: Διακύμανση της ποσοστιαίας μεταβολής, με τη μέθοδο διάμεσου, των μετρήσεων για κάθε αισθητήρα O_3 χαμηλού κόστους σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.

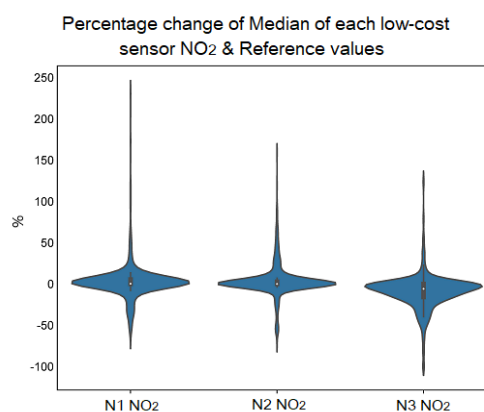
Επιπλέον, η απεικόνιση της ποσοστιαίας μεταβολής των δεδομένων των μετρήσεων των αισθητήρων με χρήση καμπυλών βιολιού (violin plot) θα βοηθήσει στην εξαγωγή πιο ολοκληρωμένων συμπερασμάτων. Οι καμπύλες βιολιού στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζουν την ποσοστιαία μεταβολή των τιμών και στον οριζόντιο άξονα απεικονίζουν, ανάλογα με το πλάτος της καμπύλης, τη συχνότητα επανάληψης της τιμής της ποσοστιαίας

I.Χρηστάκης

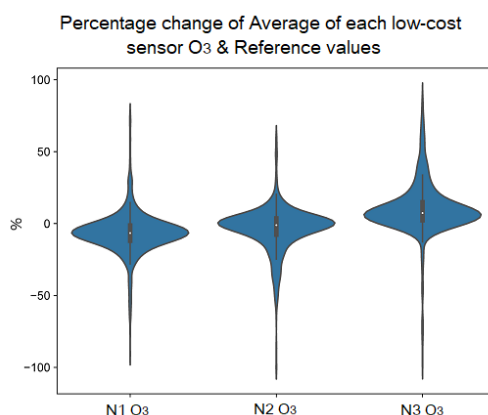
μεταβολής. Το Σχήμα 6.88 απεικονίζει την κατανομή της ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων NO_2 ως προς τις τιμές αναφοράς του SVL_A ενώ το Σχήμα 6.89 δείχνει την κατανομή της ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων NO_2 ως προς τις τιμές αναφοράς του SVL_M . Το Σχήμα 6.90 δείχνει την κατανομή της ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων O_3 ως προς τις τιμές αναφοράς του SVL_A και το Σχήμα 6.91 απεικονίζει την κατανομή της ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων O_3 ως προς τις τιμές αναφοράς του SVL_M .



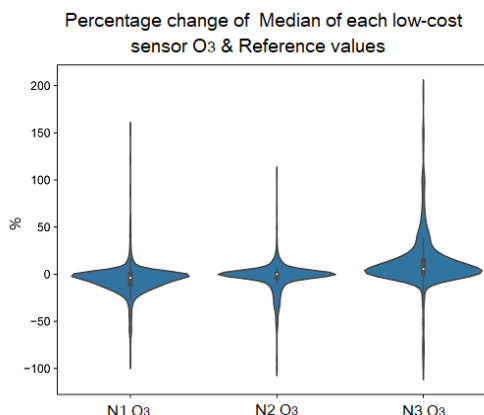
Σχήμα 6.88: Κατανομή ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων κάθε αισθητήρα NO_2 ως προς τις τιμές αναφοράς με την μέθοδο μέσου όρου.



Σχήμα 6.89: Κατανομή ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων κάθε αισθητήρα NO_2 ως προς τις τιμές αναφοράς με την μέθοδο διάμεσου.



Σχήμα 6.90: Κατανομή ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων κάθε αισθητήρα O_3 ως προς τις τιμές αναφοράς με την μέθοδο μέσου όρου.

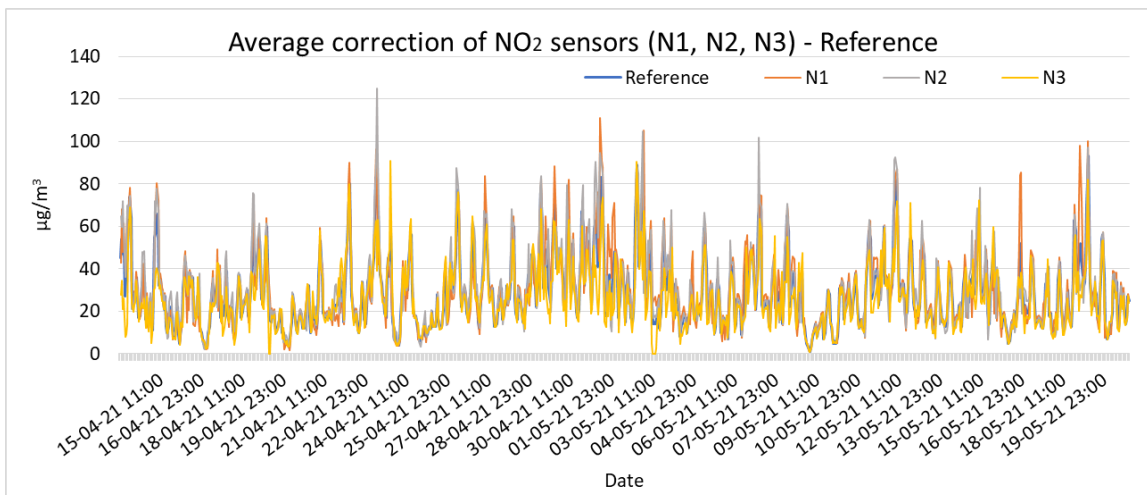


Σχήμα 6.91: Κατανομή ποσοστιαίας μεταβολής των μετρήσεων κάθε αισθητήρα O_3 ως προς τις τιμές αναφοράς με την μέθοδο διάμεσου.

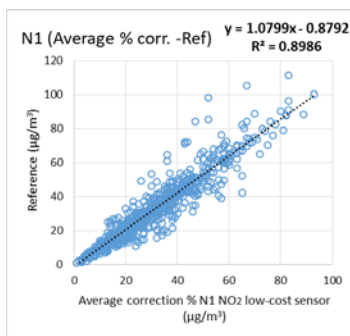
Η εξέταση τόσο των θηκογραμμάτων όσο και των καμπυλών βιολιού σχετικά με τις μετρήσεις για το NO_2 και το O_3 επιτρέπει τον προσδιορισμό του ασφαλούς εύρους ποσοστιαίων μεταβολών για τις μεθόδους SVL_A και SVL_M από τους τρεις ηλεκτροχημικούς αισθητήρες. Οι αισθητήρες NO_2 εμπίπτουν σε ένα ασφαλές εύρος από -40% έως +50% τόσο κατά το SVL_A όσο και κατά το SVL_M , ενώ οι αισθητήρες O_3 παρουσιάζουν μια ασφαλή διακύμανση μεταξύ -17% και +33% με την μέθοδο SVL_A και -20% έως +30% της μεθόδου SVL_M . Μεμονωμένα για κάθε αισθητήρα NO_2 , οι μέθοδοι SVL_A και SVL_M παρουσιάζουν μέγιστη ασφαλή διακύμανση μεταξύ -12% και +10% και -13% έως +6%

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

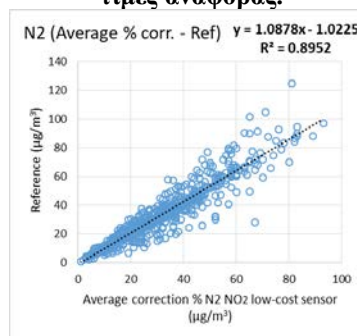
αντίστοιχα, ενώ ξεχωριστά για κάθε αισθητήρα O_3 οι μέθοδοι SVL_A και του SVL_M παρουσιάζουν μέγιστη ασφαλή διακύμανση μεταξύ -11% και +13% και -10% έως +12% αντίστοιχα. Για τον σκοπό αξιολόγησης στο σύνολο των αισθητήρων NO_2 και O_3 , ο κοινός ποσοστιαίος μέσος όρος της μεθόδου SVL_A και ο κοινός ποσοστιαίος μέσος όρος της μεθόδου SVL_M , εφαρμόστηκαν στις μη διορθωμένες μετρήσεις κάθε αισθητήρα. Το Σχήμα 6.92 παρουσιάζει τις διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα NO_2 , χρησιμοποιώντας την SVL_A ως διορθωτικό παράγοντα, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς. Το Σχήμα 6.93 παρουσιάζει τη συσχέτιση (R^2) των διορθωμένων τιμών σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO_2 του σταθμού 1. Το Σχήμα 6.94 παρουσιάζει τη συσχέτιση (R^2) των διορθωμένων τιμών σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO_2 του σταθμού 2. Το Σχήμα 6.95 παρουσιάζει τη συσχέτιση (R^2) των διορθωμένων τιμών σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO_2 του σταθμού 3.



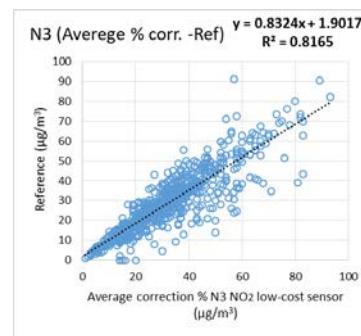
Σχήμα 6.92: Διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα NO_2 , με τη διακύμανση μέσου όρου, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.



Σχήμα 6.93: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO_2 του σταθμού 1.



Σχήμα 6.94: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO_2 του σταθμού 2.

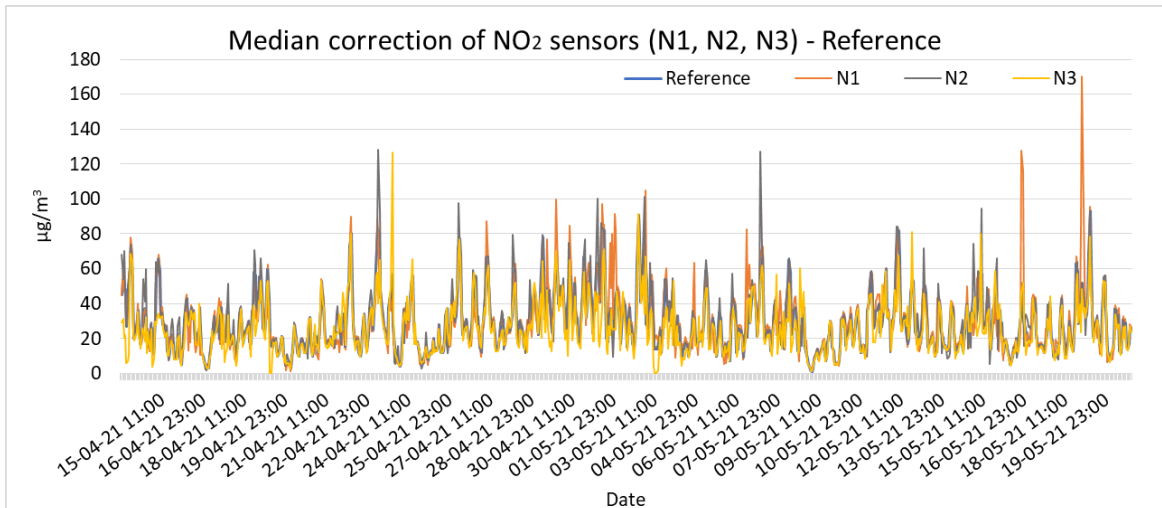


Σχήμα 6.95: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO_2 του σταθμού 3.

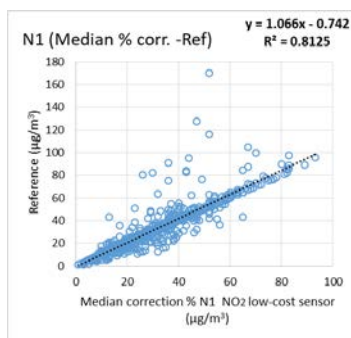
Το Σχήμα 6.96 παρουσιάζει τις διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα NO_2 , χρησιμοποιώντας την SVL_M ως διορθωτικό παράγοντα, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς. Τα σχήματα (Σχήμα

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

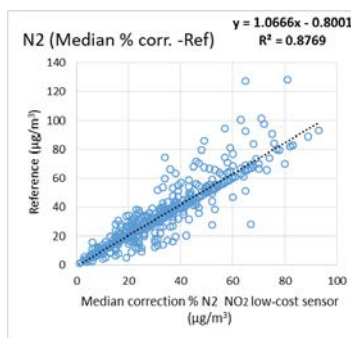
6.97, Σχήμα 6.98, Σχήμα 6.99), παρουσιάζουν τη συσχέτιση (R^2) των διορθωμένων τιμών σε σχέση με τις τιμές αναφοράς, των αισθητήρων NO₂ για τους σταθμούς 1, 2, 3, αντίστοιχα.



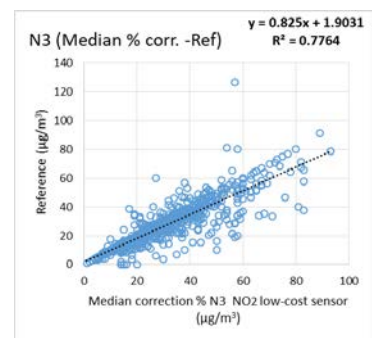
Σχήμα 6.96: Διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα NO₂, με τη διακύμανση διάμεσου, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.



Σχήμα 6.97: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO₂ του σταθμού 1.



Σχήμα 6.98: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO₂ του σταθμού 2.

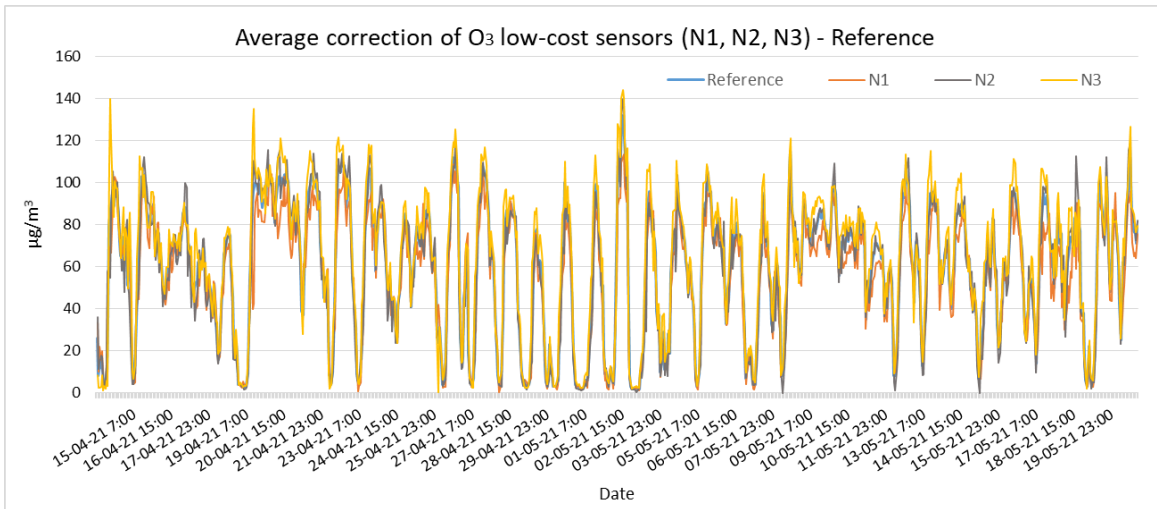


Σχήμα 6.99: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα NO₂ του σταθμού 3.

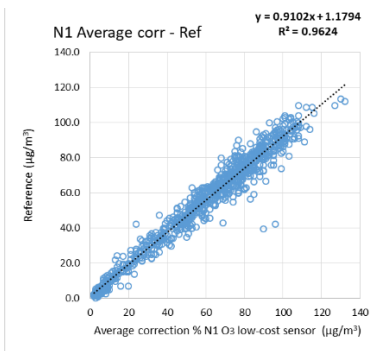
Το Σχήμα 6.100 παρουσιάζει τις διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα O₃, χρησιμοποιώντας την SVL_A ως διορθωτικό παράγοντα, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς. Τα σχήματα (Σχήμα 6.101, Σχήμα 6.102, Σχήμα 6.103), παρουσιάζουν τη συσχέτιση (R^2) των διορθωμένων τιμών σε σχέση με τις τιμές αναφοράς, των αισθητήρων O₃ για τους σταθμούς 1, 2, 3, αντίστοιχα.

Το Σχήμα 6.104 παρουσιάζει τις διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα O₃, χρησιμοποιώντας την SVL_M ως διορθωτικό παράγοντα, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς. Τα σχήματα (Σχήμα 6.105, Σχήμα 6.106, Σχήμα 6.107), παρουσιάζουν τη συσχέτιση (R^2) των διορθωμένων τιμών σε σχέση με τις τιμές αναφοράς, των αισθητήρων O₃ για τους σταθμούς 1, 2, 3, αντίστοιχα.

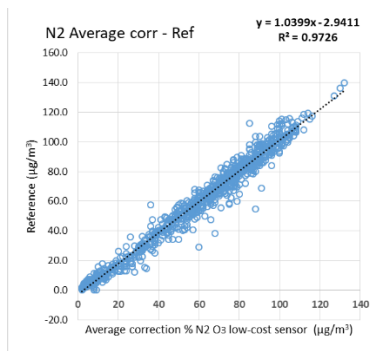
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



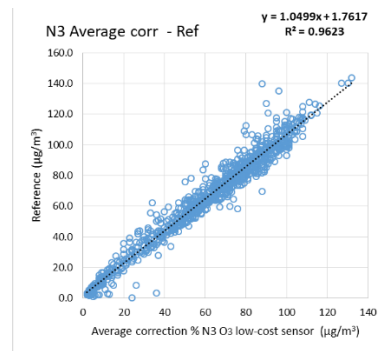
Σχήμα 6.100: Διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα O₃, με τη διακύμανση μέσου όρου, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.



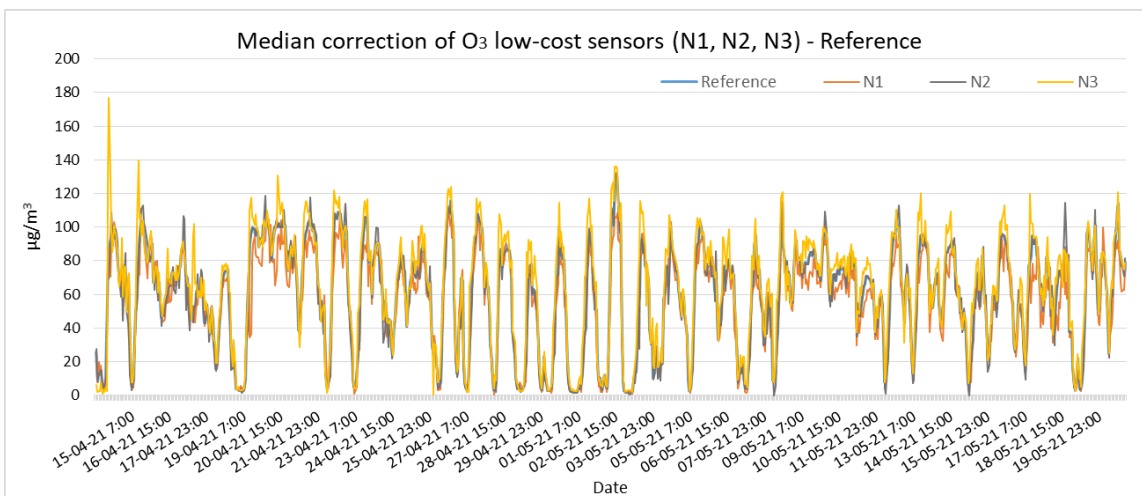
Σχήμα 6.101: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O₃ του σταθμού 1.



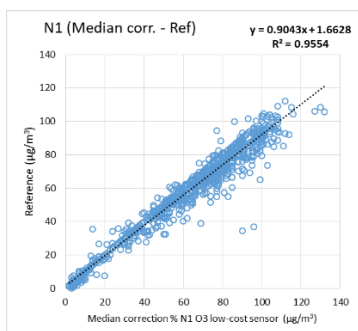
Σχήμα 6.102: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O₃ του σταθμού 2.



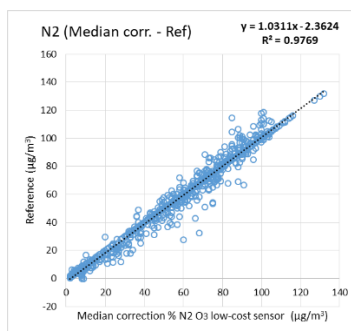
Σχήμα 6.103: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (μέσου όρου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O₃ του σταθμού 3.



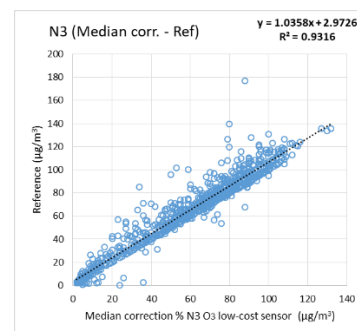
Σχήμα 6.104: Διορθωμένες τιμές κάθε αισθητήρα O₃, με τη διακύμανση διάμεσου, σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.



Σχήμα 6.105: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O₃ του σταθμού 1.



Σχήμα 6.106: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O₃ του σταθμού 2.



Σχήμα 6.107: Συσχέτιση διορθωμένων τιμών (διάμεσου) σε σχέση με τις τιμές αναφοράς του αισθητήρα O₃ του σταθμού 3.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκε στατιστική ανάλυση των δεδομένων με την εφαρμογή απλής γραμμικής παλινδρόμησης και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, για κάθε περίπτωση αισθητήρων αέριων ρύπων σε όλους τους σταθμούς παρακολούθησης χαμηλού κόστους.

6.7.1 Γραμμική Παλινδρόμηση (LR)

Ο Πίνακας 6.21 δείχνει το LR των τιμών αναφοράς και των μη διορθωμένων τιμών από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του NO₂. Ο Πίνακας 6.22 δείχνει το LR των τιμών αναφοράς με το μέσο όρο και διάμεσο των μη διορθωμένων τιμών των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του NO₂.

Πίνακας 6.21: NO₂ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των μη διορθωμένων τιμών από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	N1	N2	N3
Multiple R	0.65	0.64	0.58
R Square	0.42	0.42	0.33
Adjusted R Square	0.42	0.42	0.33
Standard Error	12.19	12.24	13.08
Observations	886	886	886
Significance F	$8.4 * 10^{-107}$	$2.9 * 10^{-105}$	$1 * 10^{-79}$
Intercept (P-value)	$6.7 * 10^{-60}$	$2.8 * 10^{-60}$	$4.3 * 10^{-83}$
NO ₂ Sensor (P-value)	$8.4 * 10^{-107}$	$2.9 * 10^{-105}$	$1 * 10^{-79}$

Πίνακας 6.22: NO₂ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και του μέσου όρου και διάμεσου των μη διορθωμένων τιμών από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	Average N1, N2, N3	Median N1, N2, N3
Multiple R	0.65	0.66
R Square	0.43	0.43
Adjusted R Square	0.42	0.43
Standard Error	12.14	12.04
Observations	886	886
Significance F	$2.2 * 10^{-108}$	$1.7 * 10^{-111}$

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Intercept (P-value)	$5 * 10^{-57}$	$1.2 * 10^{-57}$
Aver. N1, N2, N3 (P-value)	$2.2 * 10^{-108}$	
Med. N1, N2, N3 (P-value)		$1.7 * 10^{-111}$

Ο Πίνακας 6.23 δείχνει το LR των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με την SVL_A , των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του NO₂.

Πίνακας 6.23: NO₂ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με τη διακύμανση μέσω όρου, των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	N1	N2	N3
Multiple R	0.94	0.95	0.90
R Square	0.89	0.89	0.80
Adjusted R Square	0.89	0.89	0.80
Standard Error	5.41	5.20	7.12
Observations	886	886	886
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$3.7 * 10^{-19}$	$9.4 * 10^{-26}$	$1.9 * 10^{-25}$
Aver. Corr. (P-value)	0	0	0

Ο Πίνακας 6.24 δείχνει το LR των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με την SVL_M , των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του NO₂.

Πίνακας 6.24: NO₂ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με τη διακύμανση διάμεσου, των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	N1	N2	N3
Multiple R	0.89	0.94	0.87
R Square	0.80	0.88	0.76
Adjusted R Square	0.80	0.88	0.76
Standard Error	7.17	5.49	7.80
Observations	886	886	886
Significance F	0	0	$6.2 * 10^{-279}$
Intercept (P-value)	$4.1 * 10^{-29}$	$3.9 * 10^{-22}$	$1.6 * 10^{-31}$
Med. Corr. (P-value)	0	0	$6.2 * 10^{-279}$

Ο Πίνακας 6.25 δείχνει το LR των τιμών αναφοράς και των μη διορθωμένων τιμών από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του O₃.

Πίνακας 6.25: O₃ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των μη διορθωμένων τιμών από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	N1	N2	N3
Multiple R	0.75	0.79	0.76
R Square	0.60	0.62	0.58
Adjusted R Square	0.60	0.62	0.58
Standard Error	20.15	18.78	19.57
Observations	886	886	886
Significance F	$2 * 10^{-159}$	$1.7 * 10^{-186}$	$1.3 * 10^{-170}$
Intercept (P-value)	$7.4 * 10^{-7}$	$6.9 * 10^{-11}$	0.044
O ₃ Sensor (P-value)	$2 * 10^{-159}$	$2 * 10^{-186}$	$1 * 10^{-170}$

Ο Πίνακας 6.26 δείχνει το LR των τιμών αναφοράς με το μέσο όρο και διάμεσο των μη διορθωμένων τιμών των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του O₃.

Πίνακας 6.26: O₃ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και του μέσου όρου και διάμεσου των μη διορθωμένων τιμών από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	Average N1, N2, N3	Median N1, N2, N3
Multiple R	0.79	0.78
R Square	0.62	0.61
Adjusted R Square	0.62	0.61
Standard Error	18.75	18.90
Observations	887	887
Significance F	$3.7 * 10^{-187}$	$4.8 * 10^{-184}$
Intercept (P-value)	$5 * 10^{-3}$	$2.1 * 10^{-4}$
Aver. N1, N2, N3 (P-value)	$3.7 * 10^{-187}$	
Med. N1, N2, N3 (P-value)		$4.8 * 10^{-184}$

Ο Πίνακας 6.27 δείχνει το LR των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με την του SVL_A , των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του O₃.

Πίνακας 6.27: O₃ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με τη διακύμανση μέσου όρου, των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	N1	N2	N3
Multiple R	0.98	0.99	0.98
R Square	0.96	0.97	0.96
Adjusted R Square	0.96	0.97	0.96
Standard Error	5.86	4.99	5.88
Observations	886	886	886
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$25 * 10^{-2}$	$1.3 * 10^{-32}$	0.148
Aver. Corr. (P-value)	0	0	0

Ο Πίνακας 6.28 δείχνει το LR των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με την του SVL_M , των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του O₃.

Πίνακας 6.28: O₃ LR μεταξύ των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με τη διακύμανση διάμεσου, των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	N1	N2	N3
Multiple R	0.98	0.99	0.97
R Square	0.96	0.98	0.93
Adjusted R Square	0.96	0.98	0.93
Standard Error	6.38	4.59	7.93
Observations	886	886	886
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$69 * 10^{-2}$	$2 * 10^{-26}$	$18 * 10^{-2}$
Med. Corr. (P-value)	0	0	0

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης εξάγονται τα εξής: Από τον πίνακα (Πίνακας 6.21) διακρίνεται η ομοιομορφία των τιμών μεταξύ των αισθητήρων NO₂, καθώς και η σημαντικότητα F αλλά και ο μικρός βαθμός της p-value και για τους τρεις αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου. Ο Πίνακας 6.22 δείχνει τη γραμμική παλινδρόμηση τόσο του μέσου όρου όσο και του διάμεσου στο σύνολο των μετρήσεων, ανά κατηγορία αισθητήρων, και σε αυτήν την περίπτωση η σημαντικότητα F δείχνει μια πολύ χαμηλή τιμή,

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

ενώ οι τιμές p-value τόσο του μέσου όσο και του διάμεσου είναι πολύ μικρές . Ο Πίνακας 6.23 δείχνει την παλινδρόμηση μεταξύ των διορθωμένων τιμών με την SVL_A σχέση με τις τιμές αναφοράς, ο βαθμός σημαντικότητας F είναι μικρός όπως και το p-value των διορθωμένων τιμών. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται στον πίνακα (Πίνακας 6.24), καθώς δείχνει υψηλό βαθμό συσχέτισης των διορθωμένων τιμών με την SVL_M σε σχέση με τις τιμές αναφοράς, ο βαθμός σημαντικότητας F είναι πολύ χαμηλός, και το p-value των διορθωμένων τιμών αρκετά χαμηλό. Ο Πίνακας 6.25 δείχνει τα αποτελέσματα της γραμμικής παλινδρόμησης τριών αισθητήρων όζοντος, οι αισθητήρες παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς το βαθμό συσχέτισης, ενώ ο βαθμός σημαντικότητας F και το p-value δείχνουν σημαντικά υψηλότερη τιμή. Ο Πίνακας 6.26 δείχνει τη συμπεριφορά του μέσου όρου και του διάμεσου ανά κατηγορία αισθητήρα, ο βαθμός σημαντικότητας F είναι πολύ χαμηλός, ο βαθμός συσχέτισης είναι ικανοποιητικός, ενώ το p-value, τόσο του μέσου όρου όσο και του διάμεσου είναι πολύ χαμηλό. Ο Πίνακας 6.27 και ο Πίνακας 6.28 δείχνουν τη γραμμική παλινδρόμηση των διορθωμένων τιμών με την SVL_A και SVL_M , όπου ο βαθμός συσχέτισης είναι υψηλός, καθώς και η σημαντικότητα F αλλά και το p-value των διορθωμένων τιμών.

6.7.2 Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (MLR)

Ο Πίνακας 6.29 δείχνει το MLR των τιμών αναφοράς και την επίδραση της ποσοστιαίας μεταβολής του μέσου όρου και του διάμεσου στις μη διορθωμένες τιμές των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του NO₂.

Πίνακας 6.29: NO₂ MLR μεταξύ των τιμών αναφοράς και της επίδρασης της ποσοστιαίας μεταβολής του μέσου όρου και του διάμεσου στις μη διορθωμένες τιμές από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	Average N1, N2, N3	Median N1, N2, N3
Multiple R	0.79	0.79
R Square	0.62	0.63
Adjusted R Square	0.62	0.63
Standard Error	9.85	9.72
Observations	886	886
Significance F	$1.9 * 10^{-187}$	$2.8 * 10^{-192}$
Intercept (P-value)	$4.6 * 10^{-129}$	$1.2 * 10^{-131}$
Aver. N1, N2, N3 (P-value)	$3.7 * 10^{-164}$	
% Average - Ref (P-value)	$1.2 * 10^{-82}$	
Med. N1, N2, N3 (P-value)		$3.9 * 10^{-169}$
% Median - Ref (P-value)		$2.3 * 10^{-84}$

Ο Πίνακας 6.30 δείχνει το MLR των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με την SVL_A (χρησιμοποιώντας τη διακύμανση μέσου όρου % ως συντελεστή διόρθωσης) των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του NO₂.

Πίνακας 6.30: MLR NO₂, μεταξύ τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών με τη διακύμανση μέσου όρου (N1, N2, N3).

Regression Statistics	N1	N2	N3
Multiple R	0.94	0.95	0.90
R Square	0.89	0.89	0.80
Adjusted R Square	0.89	0.89	0.80
Standard Error	5.35	5.19	7.11
Observations	886	886	886
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$1.7 * 10^{-10}$	$1.2 * 10^{-19}$	$2.9 * 10^{-24}$
Aver. Corr. (P-value)	0	0	0
% Average - Ref (P-value)	$2.5 * 10^{-6}$	0.100	0.207

Ο Πίνακας 6.31 δείχνει το MLR των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με την SVL_M (χρησιμοποιώντας τη διακύμανση διάμεσου % ως συντελεστή διόρθωσης) των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του NO₂. Ο Πίνακας 6.32 δείχνει το MLR των τιμών αναφοράς και την επίδραση της ποσοστιαίας μεταβολής με τον μέσο όρο και τον διάμεσο στις μη διορθωμένες τιμές των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του O₃.

Πίνακας 6.31: MLR NO₂, μεταξύ τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών με τη διακύμανση διάμεσου (N1, N2, N3).

Regression Statistics	N1	N2	N3
Multiple R	0.90	0.94	0.87
R Square	0.80	0.88	0.76
Adjusted R Square	0.80	0.88	0.76
Standard Error	7.08	5.49	7.79
Observations	886	886	886
Significance F	0	0	$4 * 10^{-277}$
Intercept (P-value)	$9.4 * 10^{-17}$	$3 * 10^{-16}$	$6 * 10^{-27}$
Median Corr. (P-value)	0	0	$7.9 * 10^{-275}$
% Median - Ref (P-value)	$8.9 * 10^{-7}$	0.037	0.799

Πίνακας 6.32: O₃ MLR μεταξύ των τιμών αναφοράς και της επίδρασης της ποσοστιαίας μεταβολής του μέσου όρου και του διάμεσου στις μη διορθωμένες τιμές από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους N1, N2, N3.

Regression Statistics	Average N1, N2, N3	Median N1, N2, N3
Multiple R	0.84	0.84
R Square	0.70	0.70
Adjusted R Square	0.70	0.70
Standard Error	16.51	16.59
Observations	887	887
Significance F	$2 * 10^{-234}$	$1.1 * 10^{-232}$
Intercept (P-value)	$1.1 * 10^{-23}$	$2.9 * 10^{-27}$
Aver. N1, N2, N3 (P-value)	$7.6 * 10^{-190}$	
% Average - Ref (P-value)	$6.6 * 10^{-51}$	

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Med. N1, N2, N3 (P-value)	$1 * 10^{-189}$
% Median - Ref (P-value)	$2.8 * 10^{-52}$

Ο Πίνακας 6.33 δείχνει το MLR των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με την SVL_A (χρησιμοποιώντας τη διακύμανση μέσου όρου % ως συντελεστή διόρθωσης) των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του O_3 .

Πίνακας 6.33: MLR O_3 , μεταξύ τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών με τη διακύμανση μέσου όρου (N1, N2, N3).

Regression Statistics	N1	N2	N3
Multiple R	0.98	0.99	0.98
R Square	0.96	0.97	0.96
Adjusted R Square	0.96	0.97	0.96
Standard Error	5.86	4.89	5.88
Observations	886	886	886
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$4.6 * 10^{-3}$	$2 * 10^{-38}$	$67 * 10^{-2}$
Aver. Corr. (P-value)	0	0	0
% Average - Ref (P-value)	$79 * 10^{-2}$	$1.3 * 10^{-9}$	0.257

Ο Πίνακας 6.34 δείχνει το MLR των τιμών αναφοράς και των διορθωμένων τιμών, με την SVL_M (χρησιμοποιώντας τη διακύμανση διάμεσου % ως συντελεστή διόρθωσης) των αισθητήρων χαμηλού κόστους N1, N2, N3, του O_3 .

Πίνακας 6.34: MLR O_3 , μεταξύ τιμών αναφοράς και διορθωμένων τιμών με τη διακύμανση διάμεσου (N1, N2, N3).

Regression Statistics	N1	N2	N3
Multiple R	0.98	0.99	0.97
R Square	0.96	0.98	0.93
Adjusted R Square	0.96	0.98	0.93
Standard Error	6.38	4.53	7.93
Observations	886	886	886
Significance F	0	0	0
Intercept (P-value)	$31 * 10^{-2}$	$2.7 * 10^{-30}$	$18 * 10^{-2}$
Median Corr. (P-value)	0	0	0
% Median - Ref (P-value)	0.236	$3 * 10^{-7}$	0.369

Από τα αποτελέσματα της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης εξάγονται σημαντικές πληροφορίες όπως, ο Πίνακας 6.29 και ο Πίνακας 6.32 όπου εμφανίζουν την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση τόσο του μέσου όρου όσο και του διάμεσου, των μετρήσεων από τους τρεις αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και όζοντος (O_3) αντίστοιχα, σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς. Η ομοιογένεια φαίνεται από τον ικανοποιητικό βαθμό συσχέτισης ενώ η σημαντικότητα F παρουσιάζει μια πολύ χαμηλή τιμή, οι τιμές p-value τόσο του μέσου όρου όσο και του διάμεσου είναι αντίστοιχα πολύ μικρές, επίσης μια πολύ

χαμηλή p-value εμφανίζεται στη διακύμανση (%) τόσο του μέσου όρου - αναφοράς όσο και του διάμεσου - αναφοράς.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ, τόσο των διορθωμένων τιμών των μετρήσεων (Πίνακας 6.30 και Πίνακας 6.31 για το διοξείδιο του αζώτου, και Πίνακας 6.33 και Πίνακας 6.34 για το όζον) με την SVL_A σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, όσο και των διορθωμένων τιμών των μετρήσεων του SVL_M σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς.

Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις, ο βαθμός σημαντικότητας F είναι χαμηλός, όπως και τα p-value των διορθωμένων τιμών σε κάθε περίπτωση. Επίσης η ποσοστιαία μεταβολή του μέσου όρου - αναφοράς και η ποσοστιαία μεταβολή του διάμεσου - αναφοράς, δείχνει πολύ χαμηλό p-value.

Τόσο η παλινδρόμηση διακύμανσης μέσου όρου, όσο και η διακύμανση διάμεσου, παρουσίασαν εξαιρετικό βαθμό σημαντικότητας F ενώ τα p-value των διορθωμένων τιμών με το μέσο όρο και των διορθωμένων τιμών με τον διάμεσο ήταν αρκετά χαμηλά. Επιπλέον, η ποσοστιαία μεταβολή του μέσου όρου - αναφοράς και η ποσοστιαία μεταβολή του διάμεσου - αναφοράς, δείχνει πολύ χαμηλό p-value.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε με την εφαρμογή στατιστικών μοντέλων MAD, MSE, MAPE, RMSE για την επιβεβαίωση της ορθότητας των αποτελεσμάτων. Αυτά τα στατιστικά μοντέλα εφαρμόστηκαν στις μη διορθωμένες μετρήσεις και στις μετρήσεις που διορθώθηκαν με τις SVL_A και SVL_M .

Τα αποτελέσματα των μοντέλων MAD, MSE, MAPE, RMSE παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 6.35, Πίνακας 6.36, Πίνακας 6.37, Πίνακας 6.38) αντίστοιχα.

Πίνακας 6.35: MAD μεταξύ, μη διορθωμένων τιμών, διορθωμένων τιμών με διακύμανση μέσου όρου, διορθωμένων τιμών με διακύμανση διάμεσου, σε κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.

MAD	N1 NO ₂	N2 NO ₂	N3 NO ₂	N1 O ₃	N2 O ₃	N3 O ₃
Non-corrected	2.1	3.2	2.6	15.3	18.6	17.1
SVL_A corrected	9.8	10.3	8.9	19.5	21.8	21.1
SVL_M corrected	9.7	10.2	9.0	18.6	21.8	21.4

Πίνακας 6.36: MSE μεταξύ, μη διορθωμένων τιμών, διορθωμένων τιμών με διακύμανση μέσου όρου, διορθωμένων τιμών με διακύμανση διάμεσου, σε κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.

MSE	N1 NO ₂	N2 NO ₂	N3 NO ₂	N1 O ₃	N2 O ₃	N3 O ₃
Non-corrected	216.4	223.2	265.0	418.8	375.3	438.3
SVL_A corrected	37.8	38.7	59.6	54.2	29.3	64.8
SVL_M corrected	67.2	39.0	72.6	59.3	24.0	100.3

Πίνακας 6.37: MAPE μεταξύ, μη διορθωμένων τιμών, διορθωμένων τιμών με διακύμανση μέσου όρου, διορθωμένων τιμών με διακύμανση διάμεσου, σε κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.

MAPE	N1 NO ₂	N2 NO ₂	N3 NO ₂	N1 O ₃	N2 O ₃	N3 O ₃
Non-corrected	49.0	52.7	50.8	62.5	56.2	81.1
<i>SVL_A</i> corrected	12.9	11.7	14.8	11.2	9.9	13.9
<i>SVL_M</i> corrected	10.5	9.1	13.81	9.1	7.0	14.8

Πίνακας 6.38: RMSE μεταξύ, μη διορθωμένων τιμών, διορθωμένων τιμών με διακύμανση μέσου όρου, διορθωμένων τιμών με διακύμανση διάμεσου, σε κάθε αισθητήρα χαμηλού κόστους.

RMSE	N1 NO ₂	N2 NO ₂	N3 NO ₂	N1 O ₃	N2 O ₃	N3 O ₃
Non-corrected	0.35	0.48	1.63	0.68	0.30	0.30
<i>SVL_A</i> corrected	0.06	0.04	0.10	0.12	0.19	0.31
<i>SVL_M</i> corrected	0.04	0.00	0.06	0.09	0.00	0.25

Η μέση απόλυτη απόκλιση (MAD) και στους δύο τύπους αισθητήρων (NO₂ και O₃) εμφανίζει πιο συνεπή συμπεριφορά στις μη διορθωμένες τιμές. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι τιμές MAD είναι πολύ κοντά τόσο στις διορθωμένες τιμές με την *SVL_A* όσο και στις διορθωμένες τιμές με την *SVL_M*. Για το λόγο αυτό, το μοντέλο μέσης απόλυτης απόκλισης (MAD) εφαρμόστηκε και στις τιμές αναφοράς όπου οι προκύπτουσες τιμές για το NO₂ ήταν 10, ενώ για το O₃ ήταν 19.8. Αυτό επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, μετά την εφαρμογή της διόρθωσης των τιμών μέτρησης, και στις δύο περιπτώσεις.

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) παρουσιάζει σημαντική βελτίωση τόσο στις διορθωμένες τιμές με τις *SVL_A* και *SVL_M* σε σχέση με τις τιμές αναφοράς.

Εξίσου ικανοποιητικά είναι τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στο μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (MAPE). Και στις δύο περιπτώσεις οι διορθωμένες τιμές παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση, σε σχέση με τις μη διορθωμένες τιμές.

Τέλος, τα αποτελέσματα που εμφανίζονται με τη μέθοδο ρίζα μέσου τετραγώνου σφάλματος (RMSE) είναι εξαιρετικά, καθώς η εφαρμογή αυτής της μεθόδου δείχνει πολύ χαμηλό βαθμό στις διορθωμένες τιμές των *SVL_A* και *SVL_M* σε σχέση με τον υψηλό βαθμό (RMSE) των μη διορθωμένων τιμών.

Συνοψίζοντας η εφαρμογή των μεθόδων *SVL_A* και *SVL_M* έγινε για την διόρθωση των τιμών. Τα αποτελέσματα έδειξαν για τις μη διορθωμένες μετρήσεις των ηλεκτροχημικών αισθητήρων σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, βαθμό συσχέτισης (R²) για το διοξείδιο του αζώτου από 0.33 έως 0.42, ενώ για το όζον από 0.62 έως 0.66. Στο σύνολο των αισθητήρων, ο μέσος όρος και ο διάμεσος των μη διορθωμένων μετρήσεων των

αισθητήρων διοξειδίου του αζώτου σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς έδειξαν βαθμό συσχέτισης (R^2) 0.42 και 0.43, αντίστοιχα, ενώ για το όζον ο βαθμός συσχέτισης (R^2) του μέσου όρου και του διάμεσου ήταν 0.67.

Υπολογίστηκε ο κοινός μέσος όρος της ποσοστιαίας μεταβολής του μέσου όρου των μετρήσεων των αισθητήρων και ο κοινός μέσος όρος της ποσοστιαίας μεταβολής του διάμεσου των μετρήσεων των αισθητήρων. Από την κατανομή της ποσοστιαίας μεταβολής, εντοπίστηκαν τα ασφαλή όρια διακύμανσης που μπορεί να έχουν οι αισθητήρες, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τα θηκογράμματα και τις καμπύλες βιολιού (boxplots & violin plots) και για τις δύο μεθόδους, δείχνουν ότι τα ασφαλή όρια μπορεί να έχουν μια μεταβολή των μετρήσεων, της τάξης, για τους αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου από -13% έως +10% ενώ για τους αισθητήρες όζοντος από -13% έως +13%.

Για τον σκοπό αξιολόγησης, οι μέθοδοι SVL_A και SVL_M εφαρμόστηκαν στις μη διορθωμένες μετρήσεις των αισθητήρων χαμηλού κόστους. Τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις έδειξαν βαθμό συσχέτισης (R^2) για το διοξείδιο του αζώτου από 0.78 έως 0.89, ενώ ο βαθμός συσχέτισης (R^2) του όζοντος από 0.93 έως 0.97. Επί των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκαν μέθοδοι γραμμικής παλινδρόμησης και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, από τα οποία φαίνεται τόσο η σημαντικότητα F της υπόθεσης, όσο και η συμμετοχή (p -value) του μέσου όρου και του διάμεσου ως συντελεστές διόρθωσης. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνεται με τις μεθόδους MAD, MSE, MAPE και RMSE.

6.8 Προσέγγιση μη γραμμικής παλινδρόμησης ως συντελεστής διόρθωσης των μετρήσεων ηλεκτροχημικών αισθητήρων ποιότητας του αέρα χαμηλού κόστους.

Σε αυτή την ενότητα μελετάται η δυνατότητα αξιοποίησης της μη γραμμικής παλινδρόμησης ως συντελεστής διόρθωσης σε μετρήσεις από ηλεκτροχημικούς αισθητήρες.

6.8.1 Εισαγωγή στη μέθοδο

Ως στατιστικό μοντέλο, η μη γραμμική παλινδρόμηση είναι η εφαρμογή της ανάλυσης παλινδρόμησης όπου τα δεδομένα παρατήρησης αποτυπώνονται από μια συνάρτηση που περιλαμβάνει έναν μη γραμμικό συνδυασμό των παραμέτρων του μοντέλου και εξαρτάται από μία ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές. Τα δεδομένα ταξινομούνται σε πίνακες και προσαρμόζονται αναλόγως με μια μέθοδο διαδοχικών προσεγγίσεων. Γενικά, η

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

γραμμική παλινδρόμηση δείχνει τη συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών χρησιμοποιώντας μια ευθεία γραμμή, ενώ η μη γραμμική παλινδρόμηση δείχνει τη συσχέτιση μεταξύ μεταβλητών χρησιμοποιώντας μια καμπύλη.

6.8.2 Αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου

Η μεθοδολογία εφαρμογής της μη γραμμικής παλινδρόμησης έγινε σε δεδομένα από ηλεκτροχημικούς αισθητήρες χαμηλού κόστους για χρονική διάρκεια ενός μήνα (14-4-2021 έως και 13-5-2021) και περιγράφεται σε τέσσερα βήματα.

- Από τις ωριαίες μετρήσεις αισθητήρων χαμηλού κόστους του ίδιου τύπου εξήχθησαν οι μέσοι όροι.

- Οι μέσες τιμές συσχετίστηκαν με τις μέσες τιμές αναφοράς και ο βαθμός συσχέτισης εκφράστηκε με πολυωνμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε σε εβδομαδιαία βάση για τις μετρήσεις ενός μήνα.

- Από τις εβδομαδιαίες πολυωνμικές συσχετίσεις εκτιμήθηκε η μηνιαία πολυωνμική συνάρτηση.

- Η μηνιαία πολυωνμική συνάρτηση εφαρμόστηκε στις μετρήσεις των αισθητήρων χαμηλού κόστους και τα αποτελέσματα επαναξιολογήθηκαν.

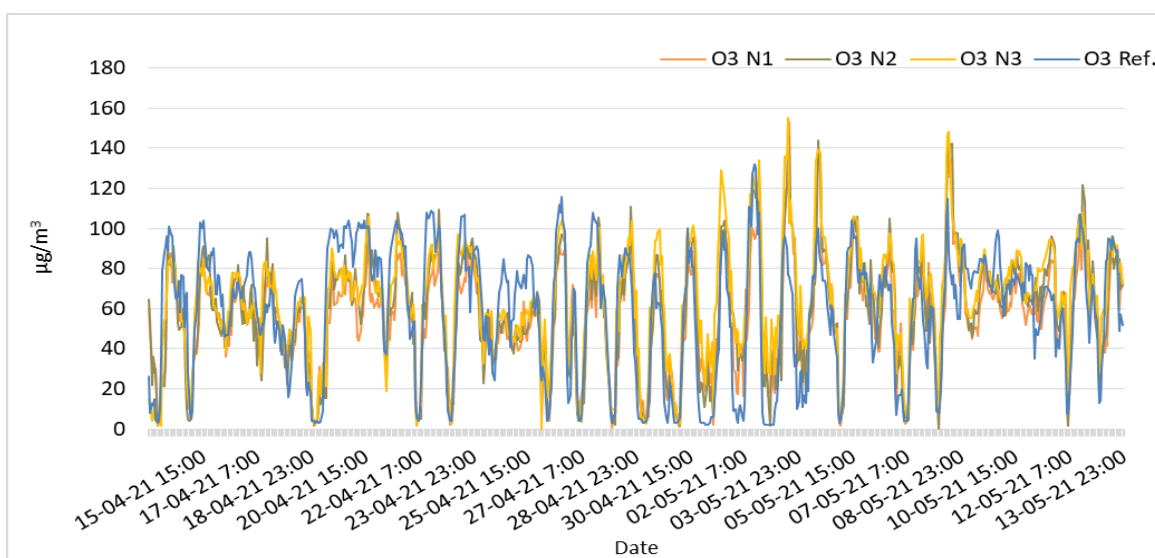
Τέλος, για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μη γραμμικής μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Deviation (MAD) και Mean Absolute Error (MAE), τόσο στα εβδομαδιαία όσο και στα μηνιαία δεδομένα.

Για τις ανάγκες περαιτέρω διερεύνησης, οι μετρήσεις του προαναφερόμενου χρονικού διαστήματος διαχωρίστηκαν ανά εβδομάδα, σε ένα σύνολο τεσσάρων εβδομάδων (14 έως 21 Απριλίου 2021, 22 έως 29 Απριλίου 2021, 30 Απριλίου έως 6 Μαΐου 2021, 7 έως 13 Μαΐου 2021).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο της εβδομαδιαίας όσο και της μηνιαίας συσχέτισης των μετρήσεων μεταξύ των τριών σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, σε σχέση με τα επίσημα δεδομένα για τους αέριους ρύπους του διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και όζοντος (O₃).

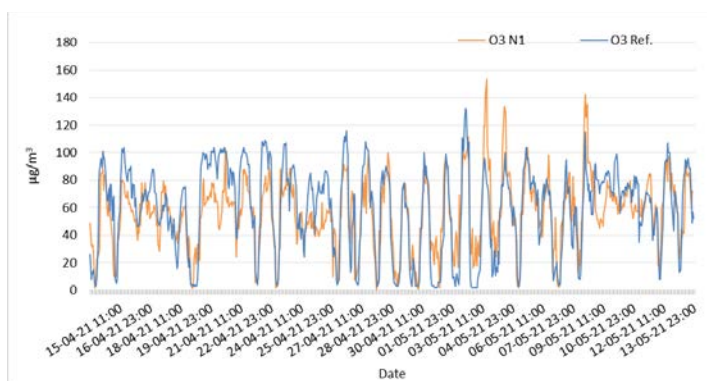
6.8.3 Μελέτη εβδομαδιαίας και μηνιαίας συσχέτισης των μετρήσεων O₃ μεταξύ των τριών σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους.

Οι λαμβανόμενες μη διορθωμένες (noncorrected) μετρήσεις συγκέντρωσης όζοντος, και για τους τρεις ηλεκτροχημικούς αισθητήρες όζοντος χαμηλού κόστους, σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.108.

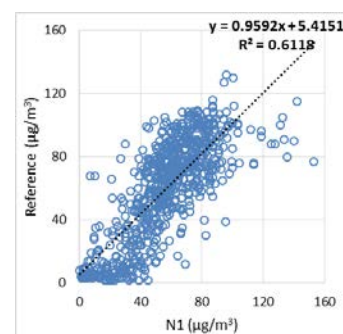


Σχήμα 6.108: Χρονοσειρές μετρήσεων της συγκέντρωσης O₃ από σταθμούς παρακολούθησης χαμηλού κόστους και όργανα αναφοράς.

Συγκεκριμένα στα σχήματα (Σχήμα 6.109, Σχήμα 6.111, Σχήμα 6.113) παρουσιάζονται οι χρονοσειρές της συγκέντρωσης O₃, τόσο τα δεδομένα αναφοράς όσο και τα δεδομένα από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους. καθώς και στα σχήματα (Σχήμα 6.110, Σχήμα 6.112, Σχήμα 6.114) παρουσιάζεται ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μετρήσεων αναφοράς και των μετρήσεων των αισθητήρων (O₃) χαμηλού κόστους, των κόμβων 1, 2, 3 (N1, N2, N3), αντίστοιχα.

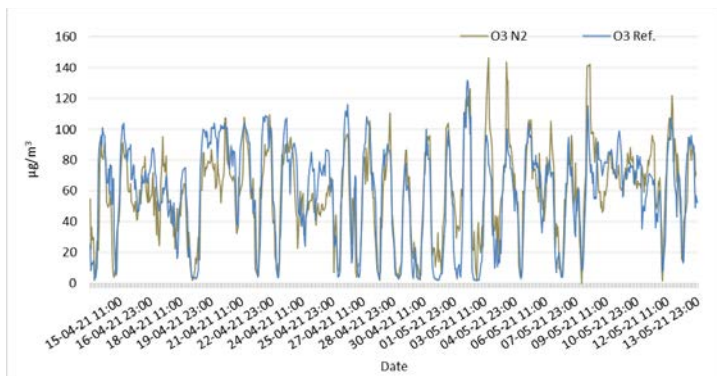


Σχήμα 6.109: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων O₃ του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.

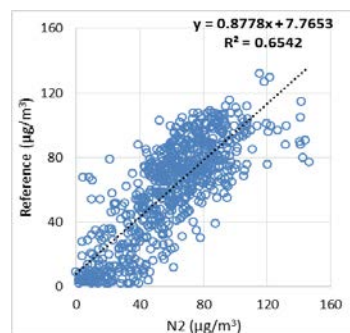


Σχήμα 6.110: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων O₃ του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.

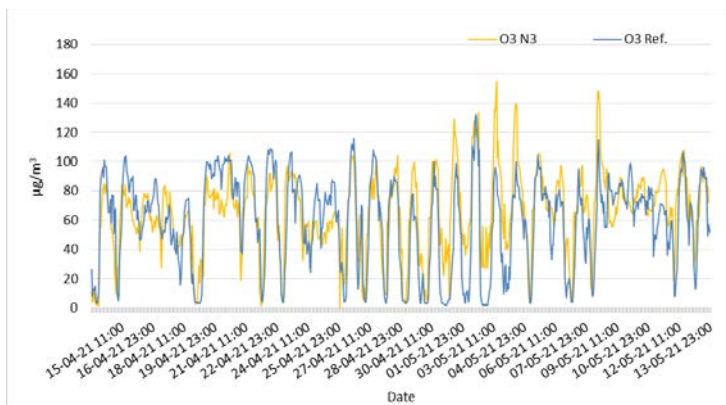
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



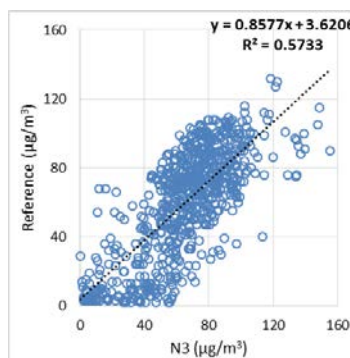
Σχήμα 6.111: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων O₃ του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.



Σχήμα 6.112: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων O₃ του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.

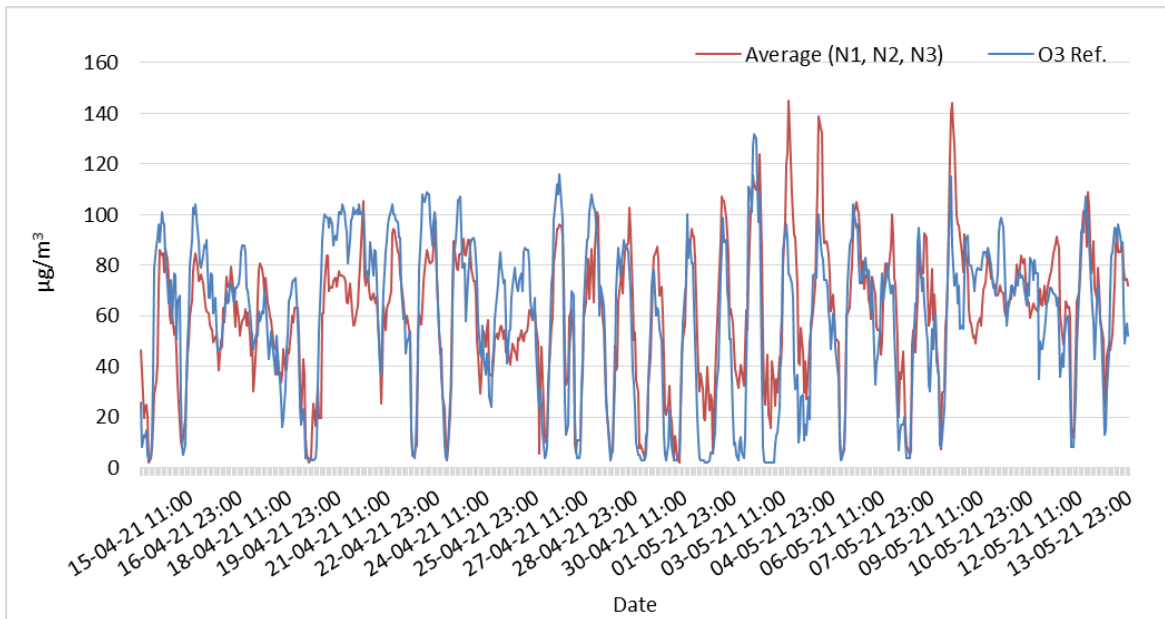


Σχήμα 6.113: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων O₃ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.

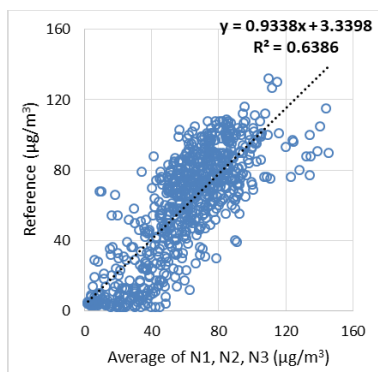


Σχήμα 6.114: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων O₃ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.

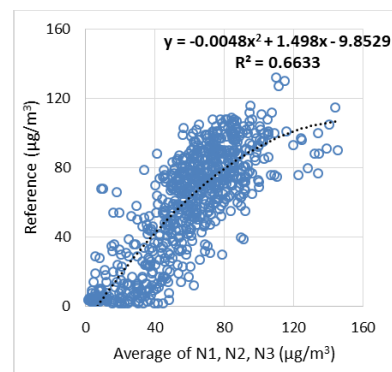
Στο Σχήμα 6.115 παρουσιάζεται ο μέσος όρος των ωριαίων μετρήσεων συγκέντρωσης O₃ των τριών αισθητήρων σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, ενώ στο Σχήμα 6.116 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς της απλής γραμμικής παλινδρόμησης με το βαθμό συσχέτισης, και στο Σχήμα 6.117 το διάγραμμα διασποράς της μη γραμμικής παλινδρόμησης με την πολυωνυμική εξίσωση και του βαθμού συσχέτισης, των μετρήσεων συγκέντρωσης O₃.



Σχήμα 6.115: Χρονοσειρές των μετρήσεων της συγκέντρωσης O₃ του μέσου όρου των τριών κόμβων (N1, N2, N3) των σταθμών παρακολούθησης χαμηλού κόστους και των οργάνων αναφοράς.



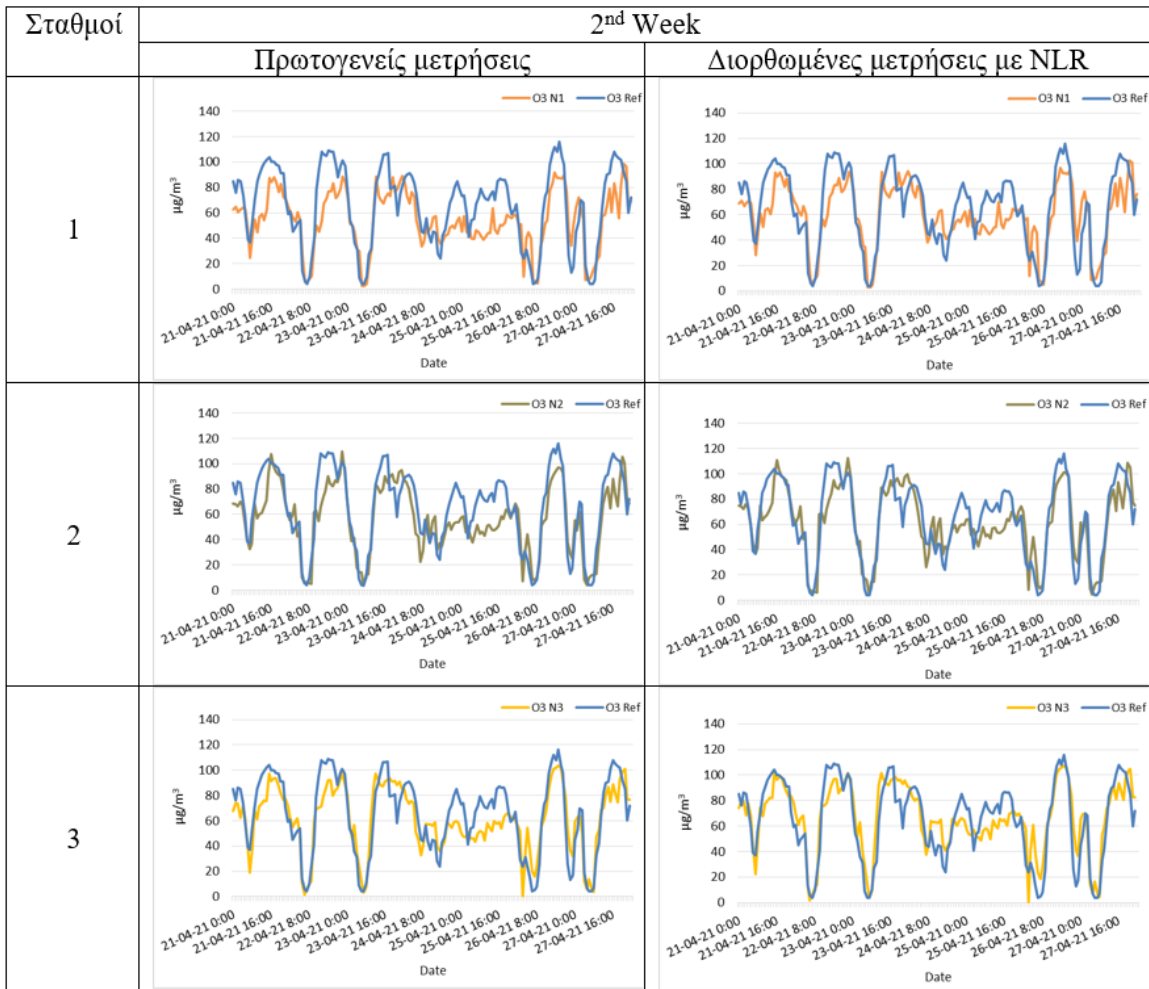
Σχήμα 6.116: Διάγραμμα διασποράς των μετρήσεων O₃ της γραμμικής παλινδρόμησης των μετρήσεων μέσου όρου (N1, N2, N3).



Σχήμα 6.117: Διάγραμμα διασποράς των μετρήσεων O₃ της μη γραμμικής (πολυνυμική συνάρτηση 2ου βαθμού) παλινδρόμησης των μετρήσεων μέσου όρου (N1, N2, N3).

Το Σχήμα 6.118 παρουσιάζει ενδεικτικά στοιχεία, κατά τη διάρκεια της δεύτερης εβδομάδας, τόσο των πρωτογενών μετρήσεων όσο και των διορθωμένων με μη γραμμική παλινδρόμηση (NLR), σύμφωνα με την εβδομαδιαία πολυνυμική συνάρτηση, των μετρήσεων της συγκέντρωσης O₃, από τους τρεις αισθητήρες.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

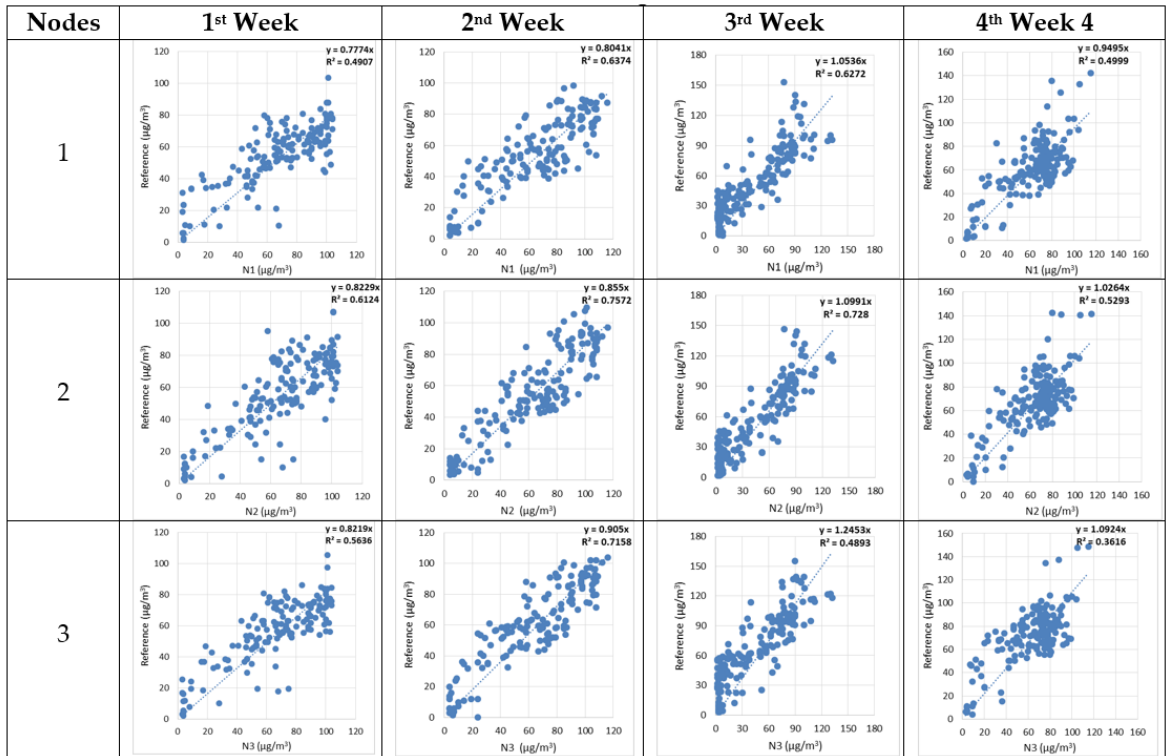


Σχήμα 6.118: Χρονοσειρές μη διορθωμένων και διορθωμένων με NLR, μετρήσεων τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους O₃ σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, της δεύτερης εβδομάδας.

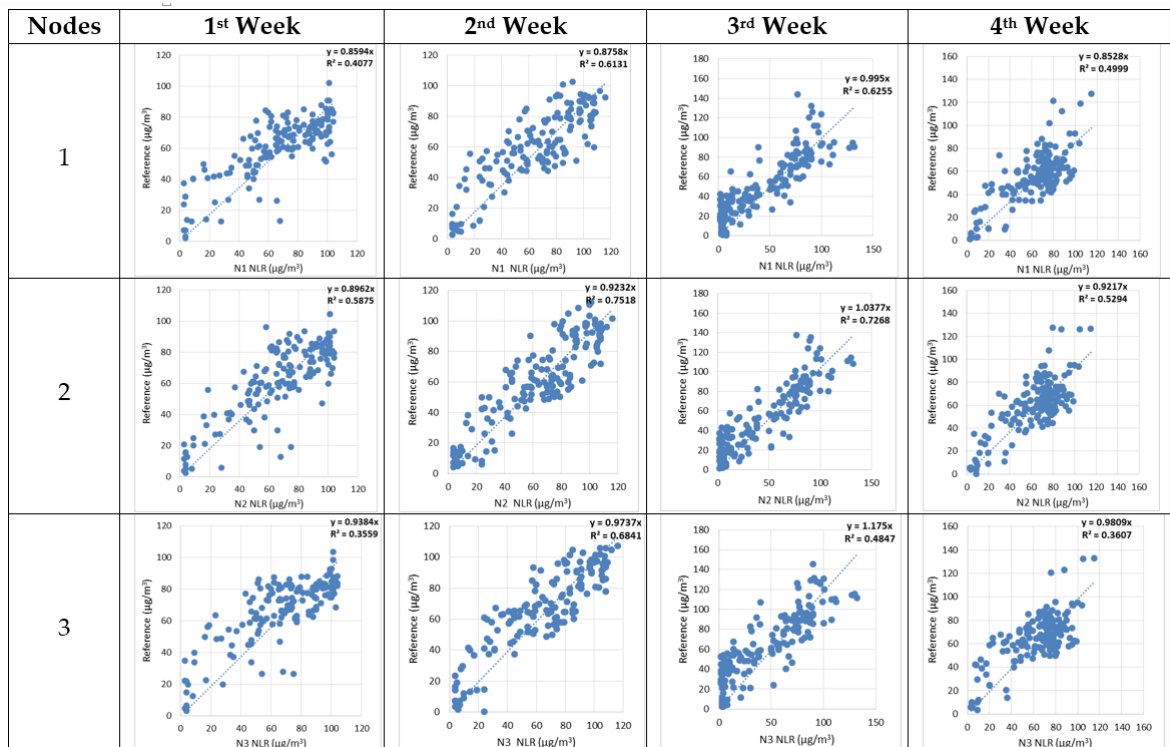
Για την εκτίμηση της πολωνυμικής συνάρτησης το πείραμα διεξήχθη σε εβδομαδιαία βάση. Από τα δεδομένα κάθε εβδομάδας προέκυψε τόσο μια πολωνυμική συνάρτηση όσο και ο βαθμός συσχέτισης των δεδομένων.

Στο Σχήμα 6.119 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων, των τριών αισθητήρων O₃, των κόμβων 1, 2, 3 (N1, N2, N3) σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, για κάθε εβδομάδα.

Στο Σχήμα 6.120 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς των τριών αισθητήρων O₃, N1, N2, N3 κάθε εβδομάδας με την πολωνυμική συνάρτηση κάθε εβδομάδας που εφαρμόζεται στα δεδομένα των αισθητήρων.



Σχήμα 6.119: Διαγράμματα διασποράς των μετρήσεων O₃ (μη διορθωμένων - αναφοράς) κάθε εβδομάδας για κάθε αισθητήρα, πριν από την εφαρμογή της μη γραμμικής παλινδρόμησης (NLR)



Σχήμα 6.120: Διαγράμματα διασποράς των μετρήσεων O₃ (διορθωμένων - αναφοράς) κάθε εβδομάδας για κάθε αισθητήρα, μετά την εφαρμογή μη γραμμικής παλινδρόμησης (NLR)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.120, ο υπολογισμός της πολωνυμικής συνάρτησης για τη διόρθωση σε μηνιαία βάση έγινε με συνεκτίμηση τόσο των πολωνυμικών εβδομαδιαίων συσχετίσεων όσο και της ορθότητας, της αξιολόγησης

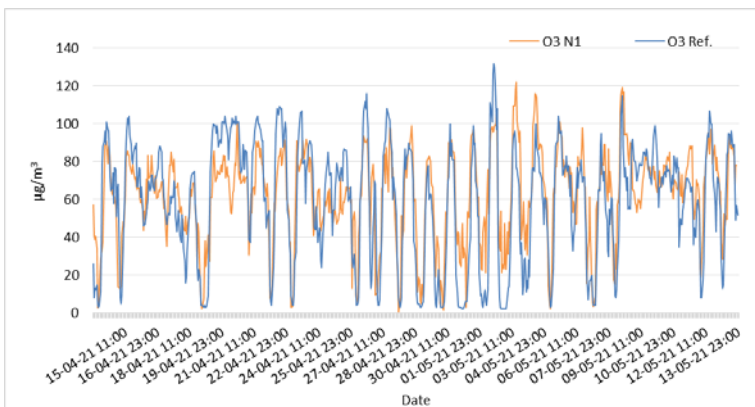
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς. Η πολυωνμική συνάρτηση που ενεργεί στα δεδομένα των αισθητήρων ως διορθωτικός παράγοντας στις μετρήσεις συγκέντρωσης αέριων ρύπων όζοντος από αισθητήρες χαμηλού κόστους, περιγράφεται στην εξίσωση (24).

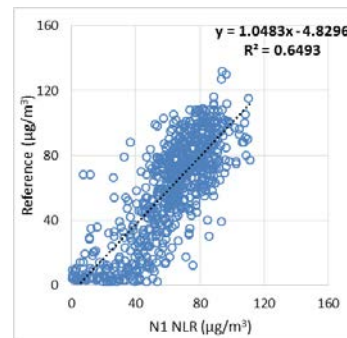
$$O_3NLR = -0.068 \cdot O_3^2 + 1.45 \cdot O_3 + 2.65 \quad (24)$$

όπου, το O_3NLR είναι η διορθωμένη μέτρηση της συγκέντρωσης του όζοντος και το O_3 είναι η μη διορθωμένη μέτρηση της συγκέντρωσης του αισθητήρα όζοντος.

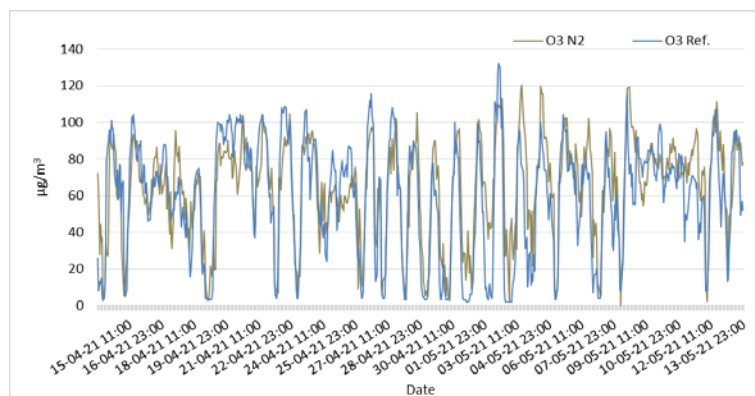
Η πολυωνμική συνάρτηση της εξίσωσης (24) εφαρμόστηκε στα πρωτογενή δεδομένα κάθε αισθητήρα O_3 και τα αποτελέσματα για τους κόμβους N1, N2, N3, εμφανίζονται στα σχήματα (Σχήμα 6.121, Σχήμα 6.123, Σχήμα 6.125) για τις χρονοσειρές όσο και στα σχήματα (Σχήμα 6.122, Σχήμα 6.124, Σχήμα 6.126) για τα διαγράμματα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς.



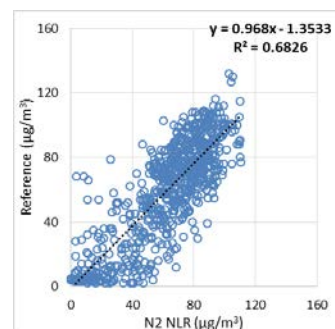
Σχήμα 6.121: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων O_3 του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.



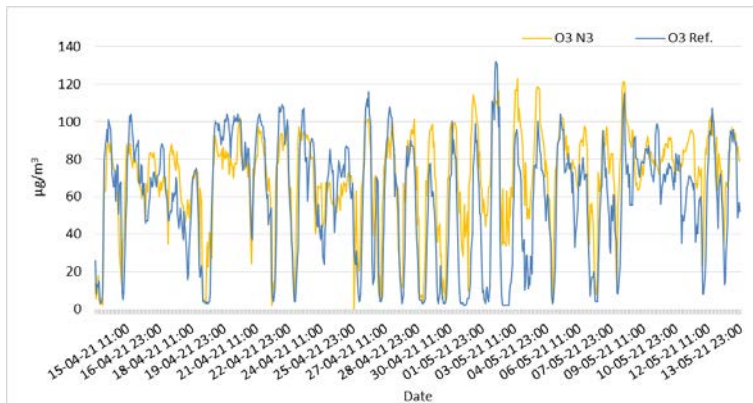
Σχήμα 6.122: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων O_3 του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.



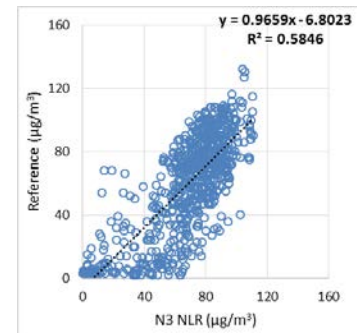
Σχήμα 6.123: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων O_3 του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.



Σχήμα 6.124: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων O_3 του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.



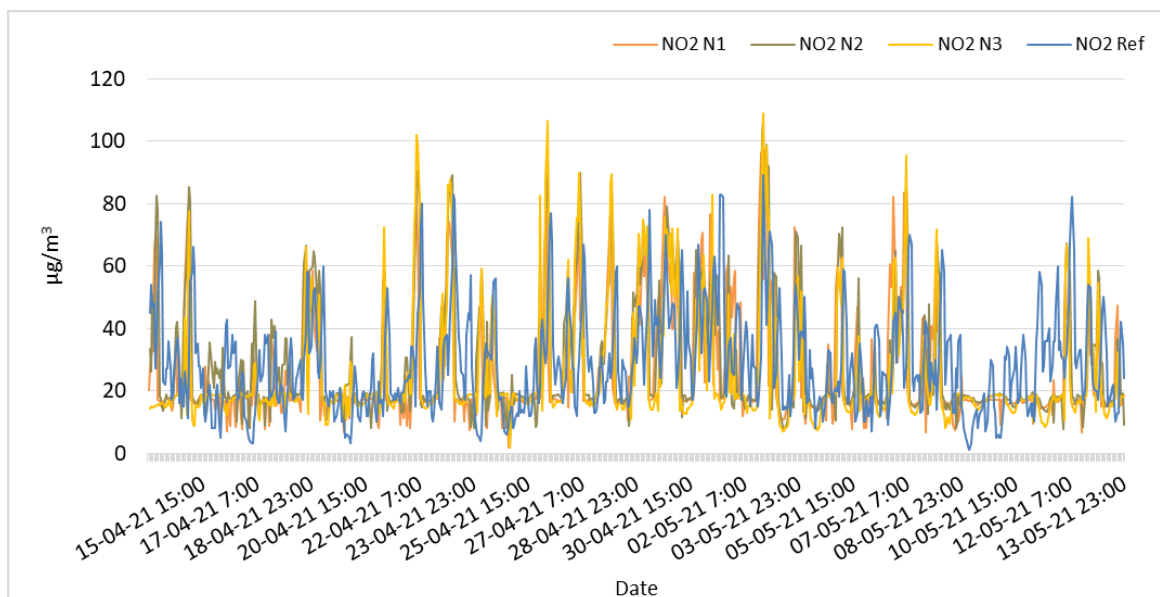
Σχήμα 6.125: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων O₃ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.



Σχήμα 6.126: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων O₃ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.

6.8.4 Μελέτη εβδομαδιαίας και μηνιαίας συσχέτισης των μετρήσεων NO₂ μεταξύ των τριών σταθμών παρακολούθησης της ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους.

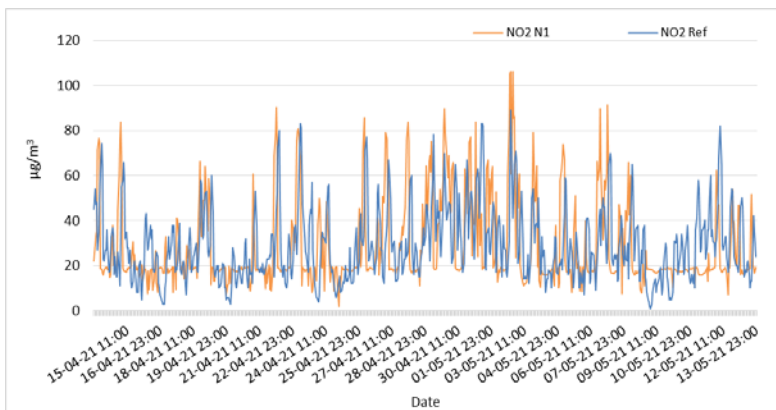
Οι λαμβανόμενες μη διορθωμένες (noncorrected) μετρήσεις συγκέντρωσης NO₂ και για τους τρεις ηλεκτροχημικούς αισθητήρες χαμηλού κόστους, σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.127.



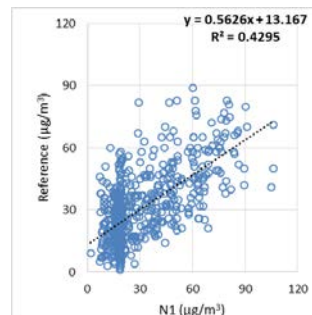
Σχήμα 6.127: Χρονοσειρές μετρήσεων της συγκέντρωσης NO₂ από σταθμούς παρακολούθησης χαμηλού κόστους και όργανα αναφοράς.

Συγκεκριμένα στα σχήματα (Σχήμα 6.128, Σχήμα 6.130, Σχήμα 6.132) παρουσιάζονται οι χρονοσειρές της συγκέντρωσης του NO₂, τόσο τα δεδομένα αναφοράς όσο και τα δεδομένα των αισθητήρων, καθώς και στα σχήματα (Σχήμα 6.129, Σχήμα 6.131, Σχήμα 6.133) παρουσιάζεται ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μετρήσεων αναφοράς και των μετρήσεων των αισθητήρων των κόμβων 1, 2, 3 (N1, N2, N3), αντίστοιχα.

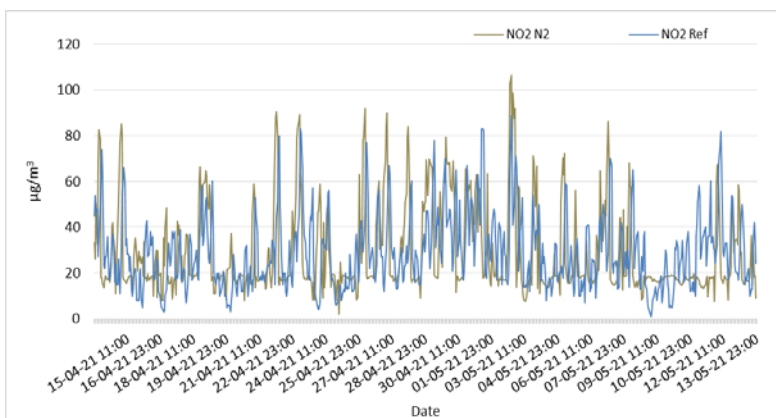
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



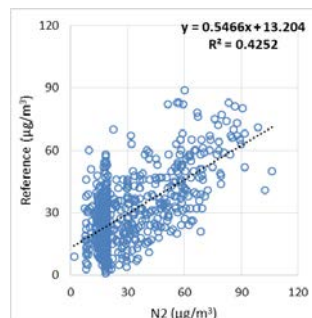
Σχήμα 6.128: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων NO₂ του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.



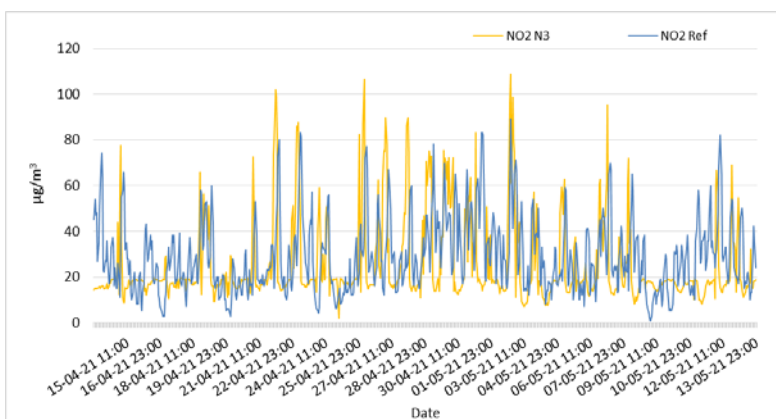
Σχήμα 6.129: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων NO₂ του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.



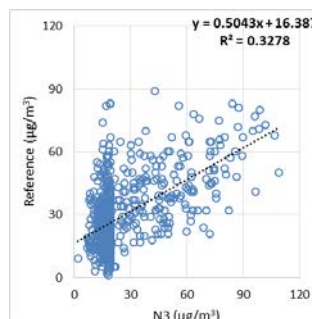
Σχήμα 6.130: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων NO₂ του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.



Σχήμα 6.131: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων NO₂ του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.

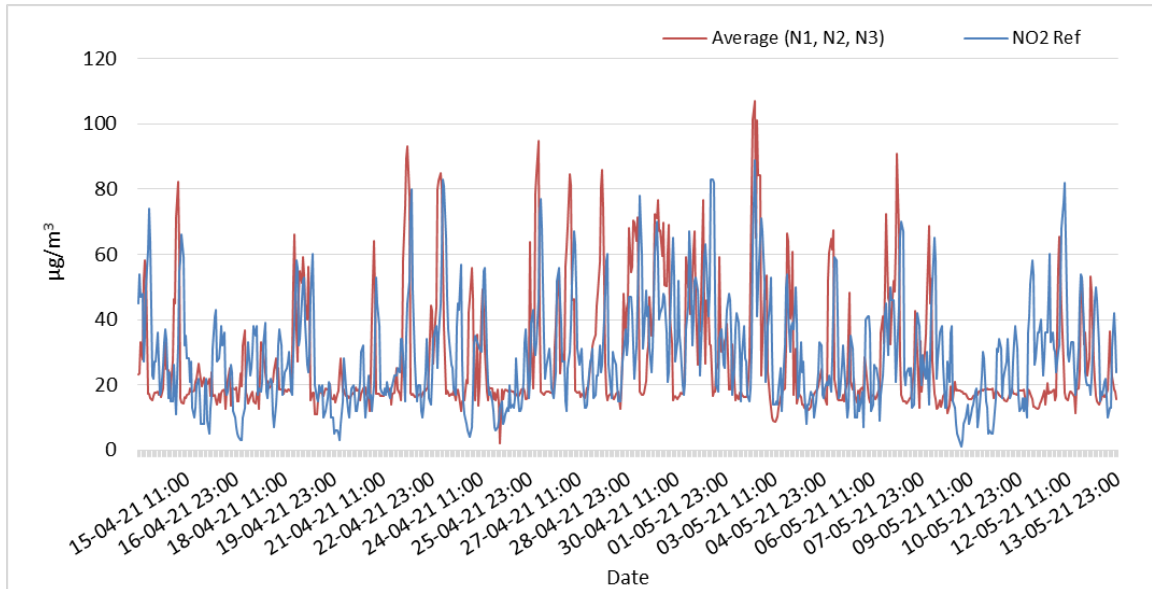


Σχήμα 6.132: Χρονοσειρές των μη διορθωμένων μετρήσεων NO₂ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.

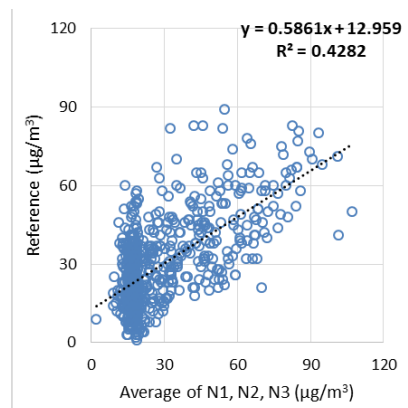


Σχήμα 6.133: Διάγραμμα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων NO₂ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.

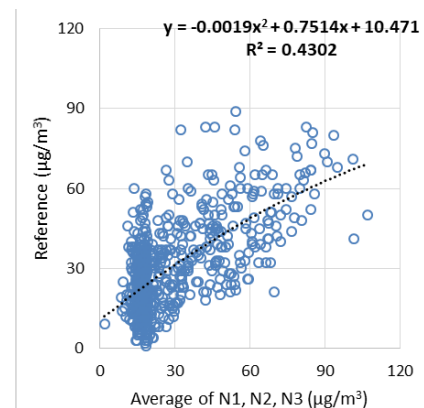
Στο Σχήμα 6.134 παρουσιάζεται ο μέσος όρος των ωριαίων μετρήσεων συγκέντρωσης NO₂ των τριών αισθητήρων σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, ενώ στο Σχήμα 6.135 παρουσιάζεται το διάγραμμα διασποράς της απλής γραμμικής παλινδρόμησης με το βαθμό συσχέτισης, και στο Σχήμα 6.136 το διάγραμμα διασποράς της μη γραμμικής παλινδρόμησης με την πολυωνμική εξίσωση και του βαθμού συσχέτισης, των μετρήσεων συγκέντρωσης NO₂.



Σχήμα 6.134: Χρονοσειρές των μετρήσεων της συγκέντρωσης NO₂ του μέσου όρου των τριών κόμβων (N1, N2, N3) των σταθμών παρακολούθησης χαμηλού κόστους και των οργάνων αναφοράς.



Σχήμα 6.135: Διάγραμμα διασποράς των μετρήσεων NO₂ της γραμμικής παλινδρόμησης των μετρήσεων μέσου όρου (N1, N2, N3).

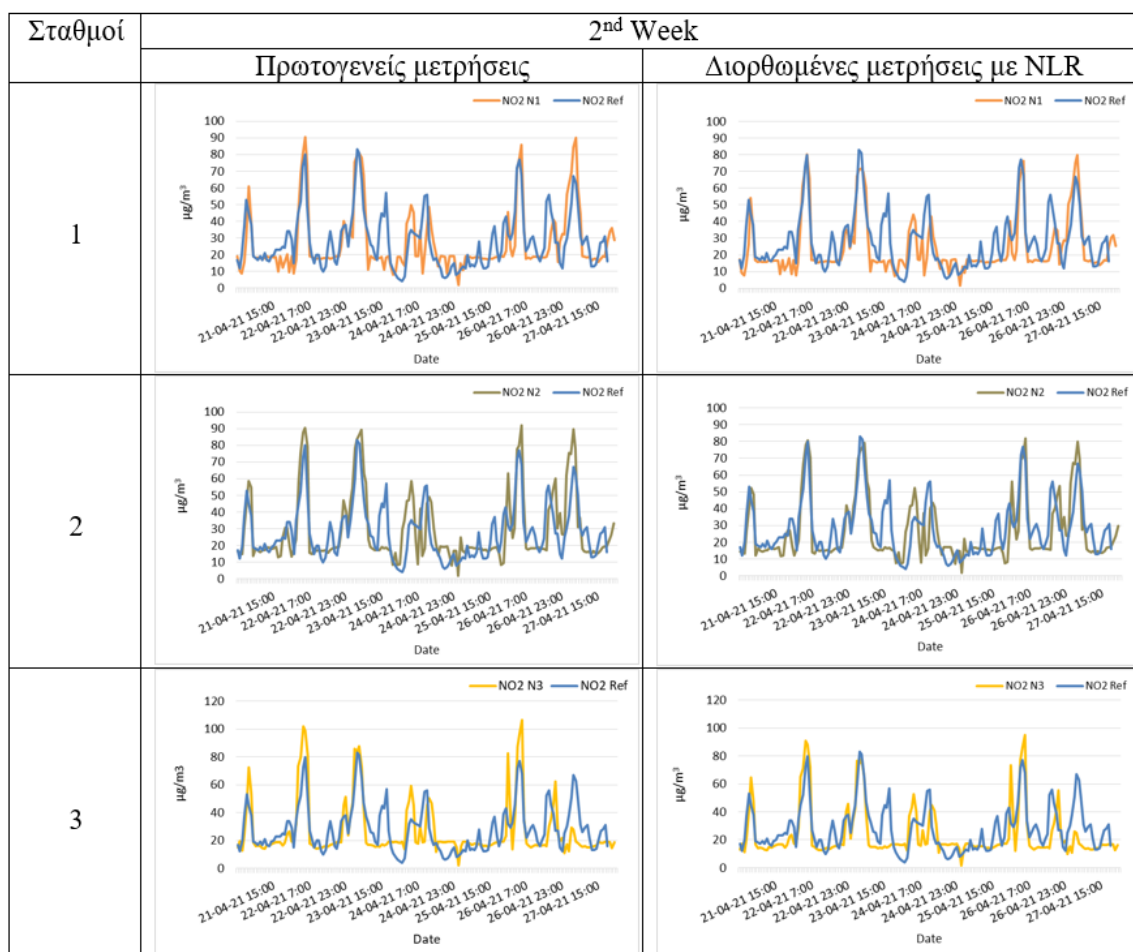


Σχήμα 6.136: Διάγραμμα διασποράς των μετρήσεων NO₂ της μη γραμμικής (πολυωνμική συνάρτηση 2ου βαθμού) παλινδρόμησης των μετρήσεων μέσου όρου (N1, N2, N3).

Το Σχήμα 6.137 παρουσιάζει ενδεικτικά στοιχεία, κατά τη διάρκεια της δεύτερης εβδομάδας, τόσο των πρωτογενών μετρήσεων όσο και των διορθωμένων με μη γραμμική παλινδρόμηση (NLR), εφαρμόζοντας την εβδομαδιαία πολυωνμική συνάρτηση ως

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

διορθωτικό συντελεστή στις μετρήσεις συγκέντρωσης του NO₂ από τους τρεις αισθητήρες χαμηλού κόστους.

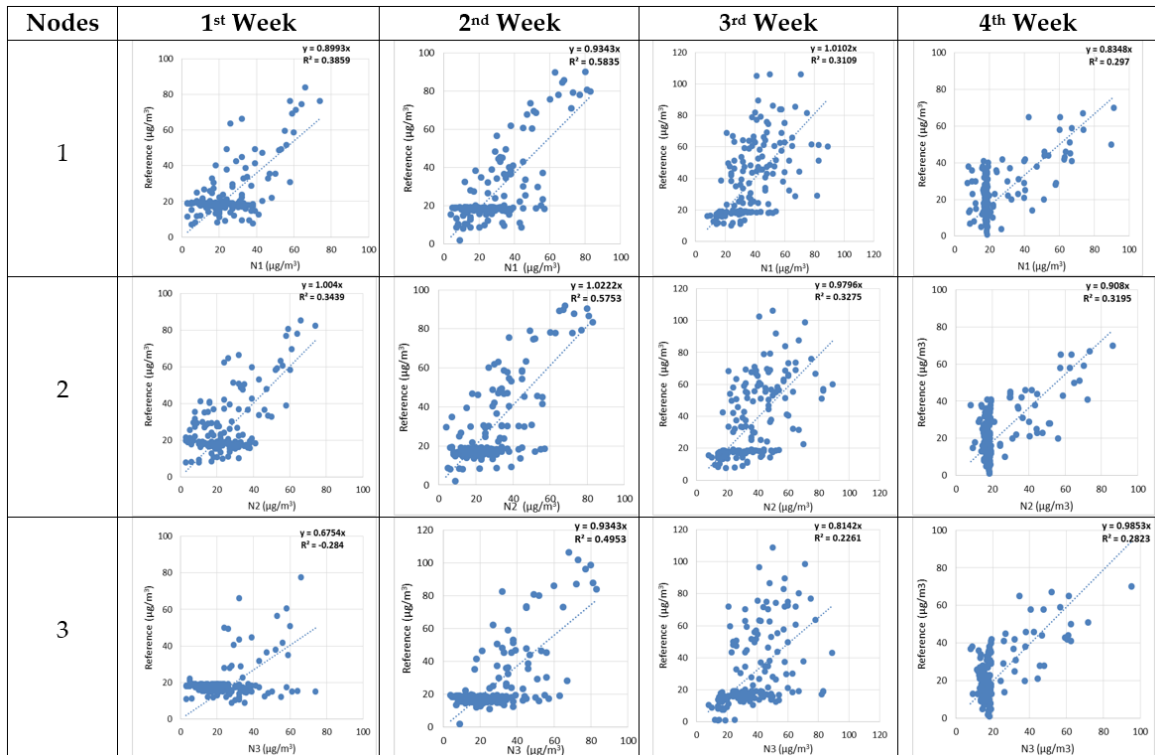


Σχήμα 6.137: Χρονοσειρές μη διορθωμένων και διορθωμένων με NLR, μετρήσεων τριών αισθητήρων χαμηλού κόστους NO₂ σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, της δεύτερης εβδομάδας.

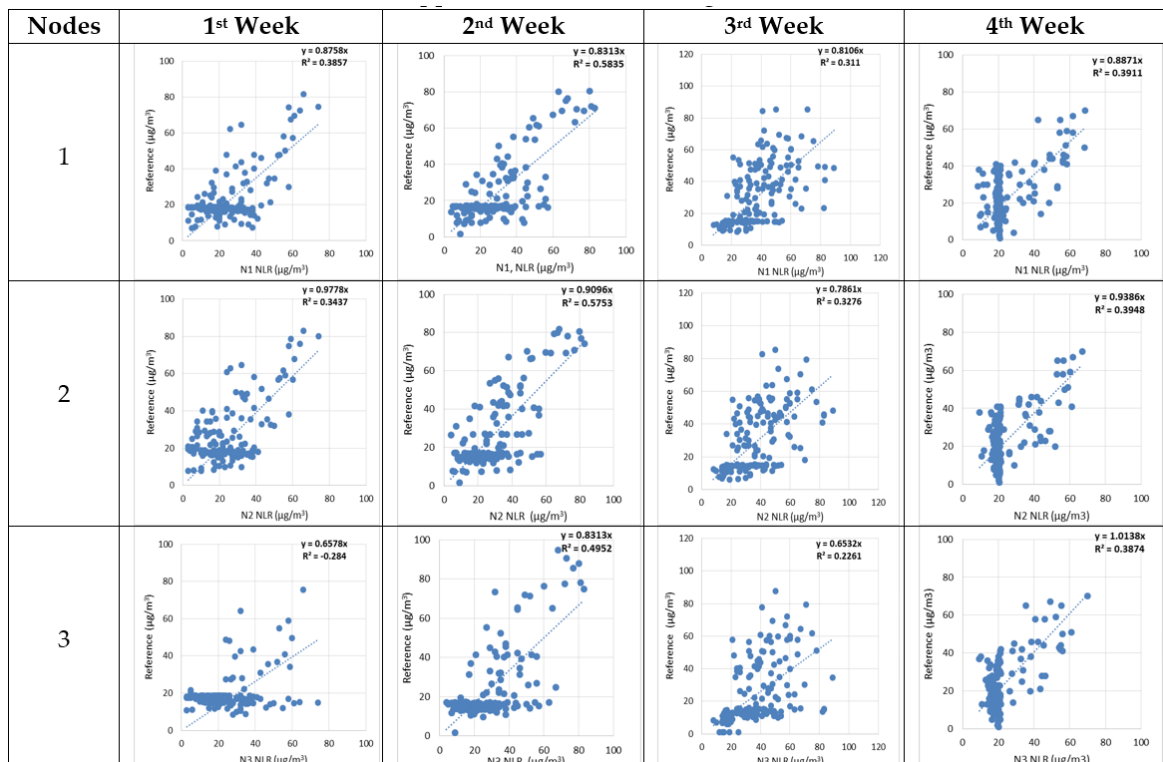
Για την εκτίμηση της πολυωνυμικής συνάρτησης το πείραμα διεξήχθη σε εβδομαδιαία βάση. Από τα δεδομένα κάθε εβδομάδας προέκυψε τόσο μια πολυωνυμική συνάρτηση όσο και ο βαθμός συσχέτισης των δεδομένων.

Στο Σχήμα 6.138 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς των μη διορθωμένων μετρήσεων, των τριών αισθητήρων NO₂ των κόμβων 1, 2, 3 (N1, N2, N3) σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, για κάθε εβδομάδα.

Στο Σχήμα 6.139 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς των τριών χαμηλού κόστους αισθητήρων (NO₂) N1, N2, N3 κάθε εβδομάδας με την πολυωνυμική συνάρτηση κάθε εβδομάδας που εφαρμόζεται στα δεδομένα των αισθητήρων.



Σχήμα 6.138: Διαγράμματα διασποράς των μετρήσεων NO₂ (μη διορθωμένων - αναφοράς) κάθε εβδομάδας για κάθε αισθητήρα, πριν από την εφαρμογή της μη γραμμικής παλινδρόμησης (NLR).



Σχήμα 6.139: Διαγράμματα διασποράς των μετρήσεων NO₂ (διορθωμένων - αναφοράς) κάθε εβδομάδας για κάθε αισθητήρα, μετά την εφαρμογή μη γραμμικής παλινδρόμησης (NLR).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.139 ο υπολογισμός της πολωνυμικής συνάρτησης για τη διόρθωση σε μηνιαία βάση έγινε με συνεκτίμηση τόσο των πολωνυμικών εβδομαδιαίων συσχετίσεων όσο και της ορθότητας, της αξιολόγησης

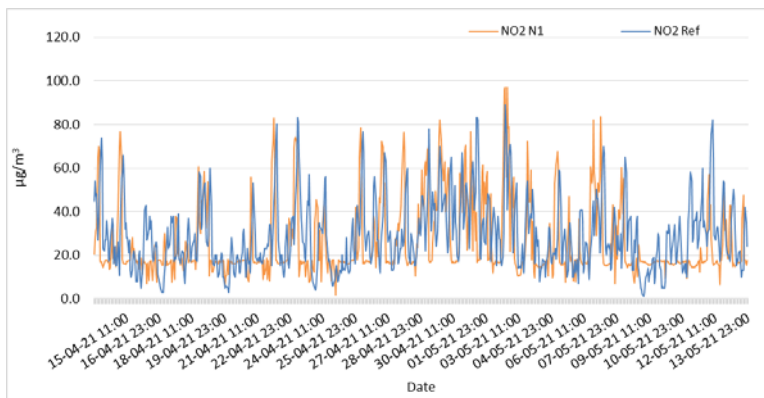
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα δεδομένα αναφοράς. Η πολυωνμική συνάρτηση που ενεργεί στα δεδομένα των αισθητήρων ως διορθωτικός παράγοντας στις μετρήσεις συγκέντρωσης αέριων ρύπων NO_2 από αισθητήρες χαμηλού κόστους, περιγράφεται στην εξίσωση (25).

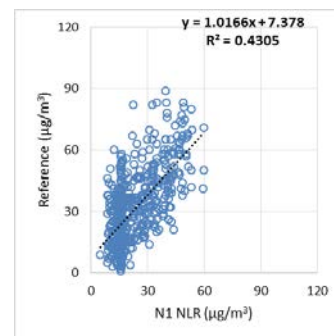
$$NO_2NLR = -0.038 \cdot NO_2^2 + 0.68 \cdot NO_2 + 3.79 \quad (25)$$

όπου, το NO_2NLR είναι η διορθωμένη μέτρηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου και το NO_2 είναι η μη διορθωμένη μέτρηση της συγκέντρωσης του αισθητήρα NO_2 .

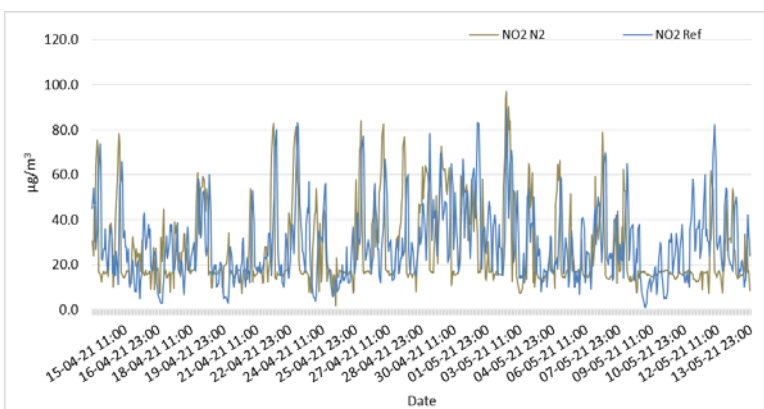
Η πολυωνμική συνάρτηση της εξίσωσης (25) εφαρμόστηκε στα πρωτογενή δεδομένα κάθε αισθητήρα NO_2 και τα αποτελέσματα για τους κόμβους N1, N2, N3, των χρονοσειρών εμφανίζονται στα σχήματα (Σχήμα 6.140, Σχήμα 6.142, Σχήμα 6.144) και στα σχήματα (Σχήμα 6.141, Σχήμα 6.143, Σχήμα 6.145) τα διαγράμματα διασποράς, των διορθωμένων μετρήσεων σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς.



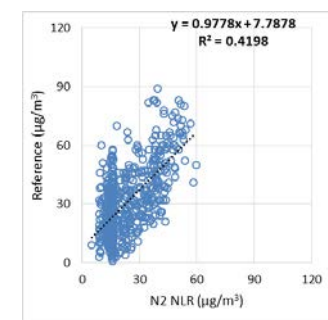
Σχήμα 6.140: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων NO_2 του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.



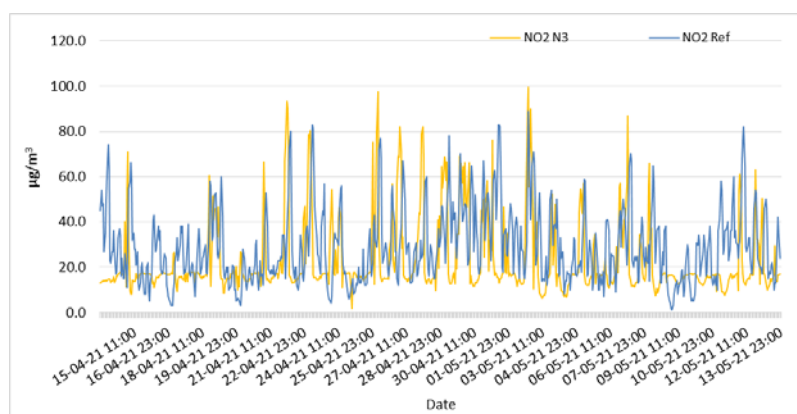
Σχήμα 6.141: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων NO_2 του N1 και των μετρήσεων αναφοράς.



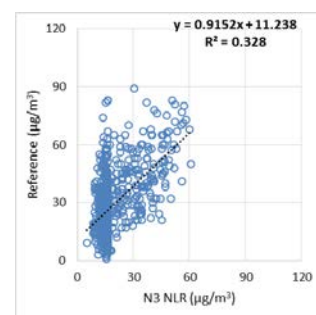
Σχήμα 6.142: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων NO_2 του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.



Σχήμα 6.143: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων NO_2 του N2 και των μετρήσεων αναφοράς.



Σχήμα 6.144: Χρονοσειρές των διορθωμένων μετρήσεων NO₂ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.



Σχήμα 6.145: Διάγραμμα διασποράς των διορθωμένων μετρήσεων NO₂ του N3 και των μετρήσεων αναφοράς.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της μη γραμμικής παλινδρόμησης σε μετρήσεις της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών ρύπων από αισθητήρες χαμηλού κόστους, οι μέθοδοι Ρίζα Μέσου Τετραγωνικό Σφάλμα (RMSE), Μέση Απόλυτη Απόκλιση (MAD) και Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE) εφαρμόστηκαν σε μηνιαία δεδομένα μετρήσεων.

Ο Πίνακας 6.39 παρουσιάζει τα αποτελέσματα RMSE, MAD, MAE τόσο των μη διορθωμένων (πρωτογενών) όσο και των διορθωμένων μετρήσεων για τους τρεις αισθητήρες όζοντος (O₃), αντίστοιχα.

Πίνακας 6.39: Μηνιαία αξιολόγηση των μετρήσεων O₃ μέσω των μεθόδων RMSE, MAD, MAE.

	O ₃								
Sensors	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Method	RMSE			MAD			MAE		
Primary	1.51	1.73	0.10	16.21	19.30	16.16	19.94	23.18	21.37
Corrected	1.83	2.05	0.22	15.09	17.24	13.75	18.93	21.63	19.14

Ο Πίνακας 6.40 παρουσιάζει τα αποτελέσματα RMSE, MAD, MAE τόσο των μη διορθωμένων (πρωτογενών) όσο και των διορθωμένων μετρήσεων για τους τρεις αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO₂), αντίστοιχα.

Πίνακας 6.40: Μηνιαία αξιολόγηση των μετρήσεων NO₂ μέσω των μεθόδων RMSE, MAD, MAE.

	NO ₂								
Sensors	N1	N2	N3	N1	N2	N3	N1	N2	N3
Method	RMSE			MAD			MAE		
Primary	0.90	1.04	1.45	2.29	2.15	17.37	11.78	11.77	25.98
Corrected	0.99	1.12	1.50	1.88	2.01	2.60	12.28	12.36	12.77

Η εφαρμογή της μη γραμμικής παλινδρόμησης σε δεδομένα μετρήσεων από αισθητήρες χαμηλού κόστους, ιδίως ηλεκτροχημικούς αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου και όζοντος,

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

δείχνει ότι μπορεί να βελτιώσει σε κάποιο βαθμό τις μετρήσεις από αυτούς τους αισθητήρες. Όσον αφορά το όζον, τα εβδομαδιαία διορθωμένα δεδομένα έδειξαν ότι ο βαθμός συσχέτισης μπορεί να βελτιωθεί έως και 5 % σε σχέση με τα πρωτογενή (μη διορθωμένα) δεδομένα, ενώ τα μηνιαία διορθωμένα δεδομένα έδειξαν βελτίωση του βαθμού συσχέτισης έως και 4 %. Όσον αφορά το διοξείδιο του αζώτου, τα εβδομαδιαία διορθωμένα δεδομένα σε σύγκριση με τα πρωτογενή (μη διορθωμένα) δεδομένα έδειξαν βελτίωση του βαθμού συσχέτισης έως και 9 %, ενώ τα μηνιαία διορθωμένα δεδομένα έδειξαν βελτίωση του συντελεστή συσχέτισης έως και 2.5 %. Αν και οι βελτιώσεις στον βαθμό συσχέτισης μεταξύ των διορθωμένων μετρήσεων και των μετρήσεων αναφοράς δεν είναι σημαντικές, αξίζει να αναφερθούν τα αποτελέσματα στην αξιολόγηση της μεθόδου της μη γραμμικής παλινδρόμησης, μέσω των μεθόδων RMSE, MAD, MAE. Η μέθοδος RMSE έδειξε πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ των αρχικών και των διορθωμένων τιμών τόσο για τους αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου όσο και για τους αισθητήρες όζοντος, από τους πίνακες της μηνιαίας ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Στις μεθόδους MAD και MAE η βελτίωση είναι εμφανής σύμφωνα με τον πίνακα αποτελεσμάτων. Αυτή η διόρθωση που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της μη γραμμικής παλινδρόμησης έχει άμεση επίδραση στη βελτίωση των μετρήσεων, των αισθητήρων χαμηλού κόστους, με αποτέλεσμα οι διορθωμένες μετρήσεις να είναι πιο κοντά στις πραγματικές.

6.9 Γήρανση αισθητήρων χαμηλού κόστους

Σε αυτή την παράγραφο διερευνάται η συμπεριφορά των αισθητήρων χαμηλού κόστους, κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Πολλοί κατασκευαστές ηλεκτροχημικών αισθητήρων, χαμηλού κόστους, δίνουν ως διάρκεια λειτουργίας περί τα δυο (2) έτη, κατά τα οποία ο αισθητήρας λειτουργεί σε μια γραμμική περιοχή, πέραν του χρόνου αυτού ο αισθητήρας λειτουργεί σε μη γραμμική περιοχή δίδοντας εσφαλμένες και αναξιόπιστες μετρήσεις.

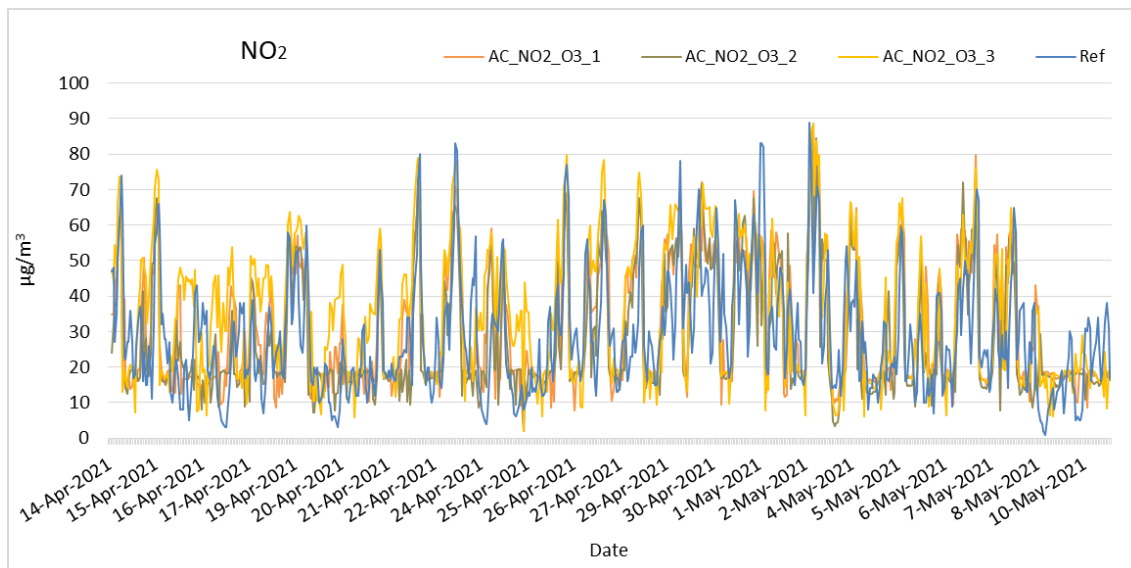
Η γήρανση των αισθητήρων και η ακρίβεια της απόκρισής τους κατά τη διάρκεια της ζωής τους δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς. Έρευνες έχουν δείξει ότι η γήρανση μεταβάλλει την τάση εξόδου του ηλεκτροδίου εργασίας (περίπου 20% μετά από 9 μήνες συνεχούς λειτουργίας), επομένως συνιστάται η συχνή βαθμονόμηση του αισθητήρα [35]. Σε άλλη εργασία [224] αποδείχθηκε ότι η γήρανση του αισθητήρα είναι μια μη αναστρέψιμη διαδικασία και η έγκαιρη αναγνώριση μη λειτουργικών αισθητήρων είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση αξιόπιστης ποιότητας δεδομένων σε μακροπρόθεσμες αναπτύξεις πεδίου,

επίσης, για πολύ μεγάλες αναπτύξεις (> 2 χρόνια), ο αισθητήρας πιθανότατα να μην είναι ευαίσθητος στο NO₂ και O₃.

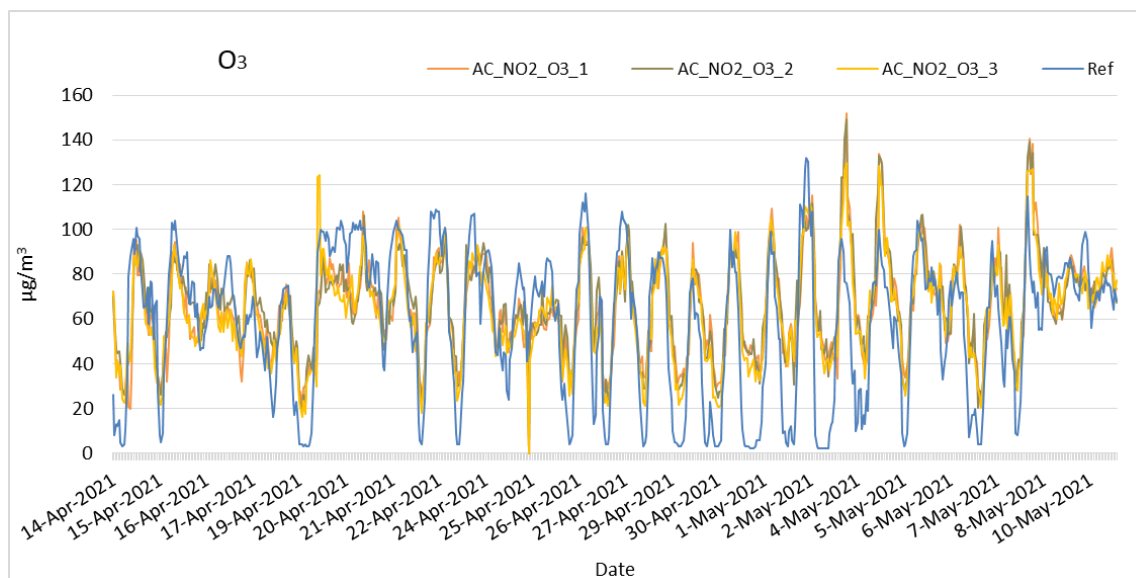
Στην παράγραφο αυτή γίνεται προσπάθεια να διερευνηθούν οι αλλαγές στην απόκριση των τιμών μέτρησης κατά τη διάρκεια ζωής (γήρανση) ενός ηλεκτροχημικού αισθητήρα αερίων ρύπων χαμηλού κόστους. Ειδικότερα, η μελέτη αφορά ηλεκτροχημικούς αισθητήρες χαμηλού κόστους, διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και όζοντος (O₃), τα αποτελέσματα της έρευνας, έχουν δημοσιευτεί στην εργασία [225] στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής. Η απόδοση δύο ολοκαίνουργιων αισθητήρων (NO₂, O₃) αξιολογήθηκε σε σύγκριση με όργανα αναφοράς. Στη συνέχεια, μακροπρόθεσμα (3 μήνες, 6 μήνες, 8 μήνες) συγκρίθηκε η απόδοση των αισθητήρων με τα όργανα αναφοράς και επαναξιολογήθηκε. Σύμφωνα με τις διαφορές που προέκυψαν από τις επαναξιολογήσεις σε σχέση με την αρχική αξιολόγηση των τιμών του αισθητήρα, δημιουργήθηκε και δοκιμάστηκε μια συνάρτηση διόρθωσης κατά τη διάρκεια ζωής του αισθητήρα. Για το λόγο αυτό, τρεις σταθμοί παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους έχουν εγκατασταθεί και παραμένει στο κέντρο της Αθήνας, από τον Απρίλιο του 2021, για σκοπούς αξιολόγησης κοντά στους επίσημους σταθμούς μέτρησης ποιότητας αέρα του ελληνικού Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Οι αισθητήρες των σταθμών που είναι εγκατεστημένοι στο πεδίο αρχικά βαθμονομήθηκαν χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις των μετρούμενων αερίων ρύπων από επίσημα όργανα μέτρησης και διαδοχικά μελετήθηκε και διορθώθηκε η απόκλιση τιμών λόγω γήρανσης υιοθετώντας συγκεκριμένα μοντέλα τα οποία βελτιώνουν την απόδοσή τους κατά τη διάρκεια ζωής τους σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης και διόρθωσης, τα εξαγόμενα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε βήματα προκειμένου να επαληθευτεί η επίδραση της γήρανσης χρησιμοποιώντας την εξίσωση διόρθωσης (εξίσωση 6). Συγκεκριμένα, κατά την περίοδο βαθμονόμησης και αρχικής διόρθωσης (δηλαδή 14 Απριλίου 2021 έως 10 Μαΐου 2021) η χρονική διακύμανση των διορθωμένων τιμών για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και το όζον (O₃) για τους τρεις σταθμούς σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των οργάνων αναφοράς παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.146 και στο Σχήμα 6.147 αντίστοιχα. Στο εξής, οι διορθωμένες τιμές που υπολογίζονται για τους τρεις σταθμούς θα αποτυπώνονται σε διαγράμματα συσχέτισης διασποράς προκειμένου να είναι δυνατή η αξιολόγηση της απόδοσης μετατροπής.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



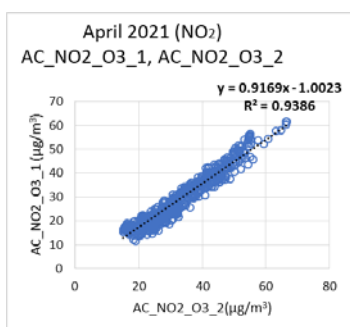
Σχήμα 6.146: Χρονοσειρές συγκέντρωσης NO₂ από αισθητήρες χαμηλού κόστους και αναφοράς (14 Απριλίου έως 10 Μαΐου 2021)



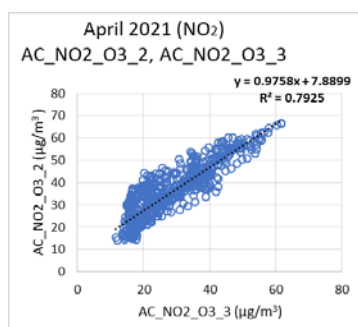
Σχήμα 6.147: Χρονοσειρές συγκέντρωσης O₃ από αισθητήρες χαμηλού κόστους και αναφοράς (14 Απριλίου έως 10 Μαΐου 2021)

Από τα σχήματα (Σχήμα 6.146 και Σχήμα 6.147) εμφανίζεται ότι οι διορθωμένες τιμές συγκέντρωσης των μετρούμενων αερίων παρουσιάζουν την τάση να ακολουθούν τις αντίστοιχες τιμές των οργάνων αναφοράς. Η απόδοση της εξίσωσης διόρθωσης κατά την βαθμονόμηση των αισθητήρων εμφανίζεται από τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ των διορθωμένων μετρήσεων των τριών αισθητήρων (NO₂ & O₃). Η συμπεριφορά του βαθμού συσχέτισης για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) φαίνεται στα σχήματα (Σχήμα 6.148, Σχήμα 6.149, Σχήμα 6.150), ενώ για το όζον (O₃) απεικονίζεται στα σχήματα (Σχήμα 6.151, Σχήμα 6.152, Σχήμα 6.153). Η συμπεριφορά των τριών ομάδων αισθητήρων (NO₂ & O₃) όπως

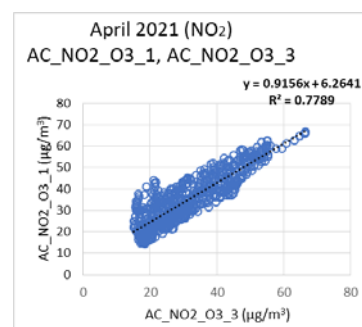
φαίνεται στα προηγούμενα σχήματα είναι ενδεικτική και εμφανίζει την αξιολόγηση της απόδοσής τους.



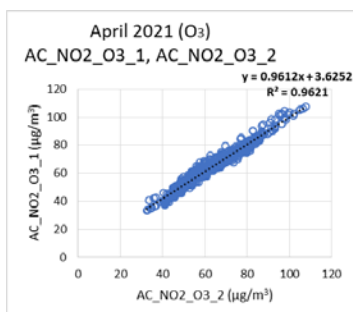
Σχήμα 6.148: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO₂) μεταξύ N1 & N2.



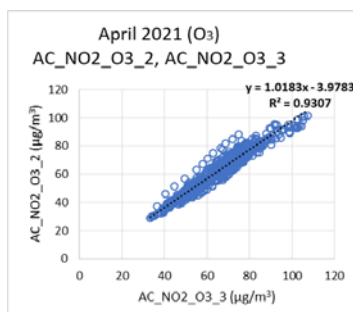
Σχήμα 6.149: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO₂) μεταξύ N2 & N3.



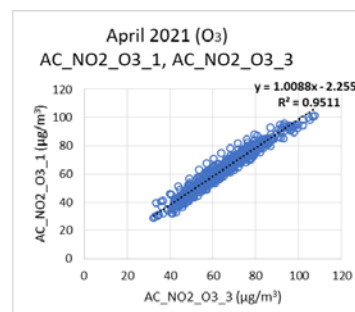
Σχήμα 6.150: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO₂) μεταξύ N1 & N3.



Σχήμα 6.151: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης όζοντος (O₃) μεταξύ N1 & N2.



Σχήμα 6.152: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης όζοντος (O₃) μεταξύ N2 & N3.



Σχήμα 6.153: Συσχέτιση τιμών συγκέντρωσης όζοντος (O₃) μεταξύ N1 & N3.

Ο Πίνακας 6.41 συνοψίζει τις τιμές των συντελεστών C1 και C2 (διορθωτικοί συντελεστές εξίσωσης (4)) για όλους τους σταθμούς μέτρησης χαμηλού κόστους για όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των συναρτήσεων συσχέτισης, διόρθωσης και γήρανσης. Διαδοχικά, η χρονικά εξαρτώμενη απόκλιση από την ακρίβεια μελετήθηκε χρησιμοποιώντας το ακόλουθο πρωτόκολλο.

- Οι τιμές των C1 και C2 διατηρήθηκαν σταθερές και ο βαθμός συσχέτισης (R^2) μελετήθηκε μεταξύ των μετρήσεων, από τα όργανα αναφοράς και των διορθωμένων μετρήσεων από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους, κατά τον Ιούλιο 2021, τον Οκτώβριο 2021 και τον Δεκέμβριο του 2021. Τα αποτελέσματα αυτού του βήματος παρουσιάζει ο Πίνακας 6.42 και εμφανίζουν με την πάροδο του χρόνου σταδιακή επιδείνωση του βαθμού συσχέτισης (R^2). Στον ίδιο πίνακα εμφανίζεται η προσαρμογή συσχέτισης μεταξύ των μετρήσεων από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους και αναφοράς. Η συσχέτιση παρουσιάζεται ως εξίσωση, $y = ax + b$, όπου y είναι η εξαρτημένη μεταβλητή (τιμή οργάνου αναφοράς $\mu\text{g}/\text{m}^3$), a είναι ο συντελεστής παλινδρόμησης, x (μέτρηση αισθητήρα χαμηλού κόστους $\mu\text{g}/\text{m}^3$) είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή και b είναι μια σταθερά. Στη

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

συνέχεια, υπολογίστηκαν νέες μεμονωμένες τιμές για τα C1 και C2, διαφορετικές για κάθε περίοδο μελέτης (δηλαδή Ιούλιος 2021, Οκτώβριος 2021 και Δεκέμβριος 2021) και υπολογίστηκε εκ νέου ο βαθμός συσχέτισης (R^2) υποδεικνύοντας τη χρονική διακύμανση των C1 και C2 και για τα δύο αέρια (NO_2 & O_3) κατά τη διάρκεια της γήρανσης. Ο Πίνακας 6.43 περιλαμβάνει τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Στον ίδιο πίνακα εμφανίζονται και οι συντελεστές της εξίσωσης προσαρμογής συσχέτισης των μετρήσεων, από τα όργανα αναφοράς και τους αισθητήρες χαμηλού κόστους.

- Η παρατήρηση των συντελεστών προσαρμογής C1 και C2 έγινε προκειμένου να ληφθεί η χρονική διακύμανση των C1 και C2 και να ανευρεθούν όλες οι ενδιάμεσες τιμές τους. Κατά την εκτέλεση αυτού του τελευταίου βήματος για να ληφθεί ο τύπος γήρανσης, παρατηρείται ότι ο συντελεστής C1 για διοξείδιο του αζώτου (NO_2), κατά τη λειτουργία των αισθητήρων, εμφανίζει μείωση κατά μία μονάδα, ανά μήνα, της αρχικής τιμής, από την έναρξη λειτουργίας του αισθητήρα. Ο συντελεστής C1 για το όζον (O_3), κατά τη λειτουργία των αισθητήρων, εμφανίζει αύξηση, ανά μήνα, κατά μία μονάδα της αρχικής τιμής, από την έναρξη λειτουργίας του αισθητήρα. Ο συντελεστής C1 αφορά τη γήρανση του αισθητήρα (αναφέρεται ως C1Age), ο συντελεστής C1Age για τον αισθητήρα διοξειδίου του αζώτου (NO_2) περιγράφεται στην εξίσωση (26) και για τον αισθητήρα όζοντος (O_3) περιγράφεται στην εξίσωση (27).

$$C1_{Age}(NO_2) = C1_{init}(NO_2) - (1 * n) \quad (26)$$

$$C1_{Age}(O_3) = C1_{init}(O_3) + (1 * n) \quad (27)$$

όπου, $C1_{init}$ είναι η αρχική τιμή του συντελεστή από την αρχή της λειτουργίας του αισθητήρα, και n οι μήνες κατά τους οποίους λειτουργεί ο αισθητήρας.

Πίνακας 6.41: Συντελεστές C1 & C2 για αισθητήρες αερίων NO_2 και O_3 και για τους τρεις σταθμούς χαμηλού κόστους σε όλη την υπό μελέτη χρονική περίοδο.

Gas	No des	April 2021				July 2021				October 2021				December 2021			
		C1	C2			C1	C2			C1	C2			C1	C2		
			a	b	c		a	b	c		a	b	c		a	b	c
NO_2	1	50	15	2.2	1	47	15	3.5	1.2	43	15	3.5	1	41	15	2	1
	2	50	15	2	1	47	15	2.5	1	44	15	3.3	2	42	15	2.5	1
	3	74	15	2.4	1.5	72	15	3.4	1	69	15	3.5	1	67	15	3	1
		C1	C2			C1	C2			C1	C2			C1	C2		
O_3	1	43	1.8			45	2.8			48	2.4			50	2		
	2	45	1.8			47	2.5			49	2.1			51	2		
	3	40	1.7			43	2.4			45	3			47	1.6		

Πίνακας 6.42: Σύνοψη των αποτελεσμάτων συσχέτισης μεταξύ του οργάνου αναφοράς και των αισθητήρων χαμηλού κόστους ενώ οι συντελεστές C1 και C2 διατηρούνται σταθεροί και ίσοι με αυτούς που υπολογίστηκαν κατά την εγκατάσταση του σταθμού.

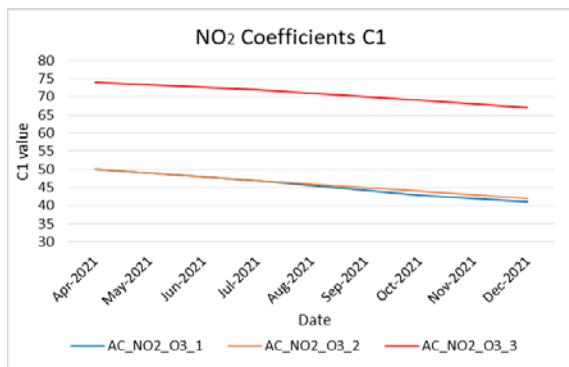
Nodes		Apr-21		Jul-21		Oct-21		Dec-21	
		NO ₂	O ₃	NO ₂	O ₃	NO ₂	O ₃	NO ₂	O ₃
AC NO ₂ _O ₃ 1	a	0.8151	0.4625	-0.3521	0.826	0.7902	0.5071	0.4829	0.531
	b	11.408	39.326	50.281	63.485	13.657	39.892	39.602	25.26
	R²	0.49	0.55	0.05	0.20	0.39	0.65	0.45	0.68
AC NO ₂ _O ₃ 2	a	0.9373	0.5156	-0.2162	0.7511	0.7648	0.4751	0.3962	0.466
	b	4.2728	33.426	31.447	62.033	39.329	30.472	27.553	13.46
	R²	0.70	0.61	0.05	0.17	0.16	0.54	0.33	0.22
AC NO ₂ _O ₃ 3	a	0.8897	0.4658	-0.1519	0.788	0.3447	0.3995	0.3266	0.488
	b	2.0495	38.05	32.619	57.386	9.5425	75.144	30.408	21.56
	R²	0.70	0.54	0.02	0.26	0.24	0.46	0.25	0.71

Πίνακας 6.43: Σύνοψη των αποτελεσμάτων συσχέτισης μεταξύ του οργάνου αναφοράς και των αισθητήρων χαμηλού κόστους, ενώ οι συντελεστές C1 και C2 υπολογίζονται εκ νέου ανάλογα με τις συναρτήσεις γήρανσης (Εξισώσεις 10 και 11).

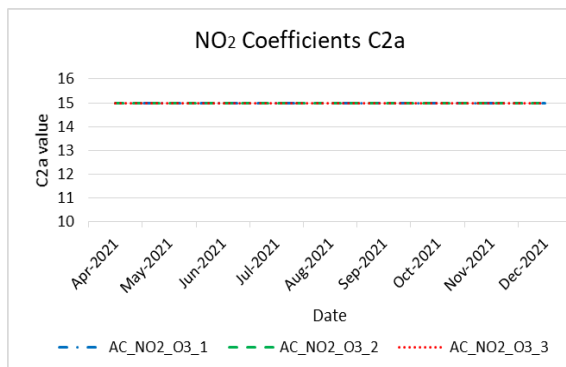
Nodes		Apr-21		Jul-21		Oct-21		Dec-21	
		NO ₂	O ₃	NO ₂	O ₃	NO ₂	O ₃	NO ₂	O ₃
AC NO ₂ _O ₃ 1	a	0.8151	0.4625	-0.2377	0.5311	0.6429	0.3718	0.4322	0.477
	b	11.408	39.326	37.704	42.24	8.7848	34.555	27.746	29.72
	R²	0.49	0.55	0.06	0.20	0.41	0.65	0.43	0.68
AC NO ₂ _O ₃ 2	a	0.9373	0.5156	-0.2236	0.5409	0.5061	0.4081	0.4293	0.481
	b	4.2728	33.426	29.386	46.249	23.494	29.889	16.356	15.89
	R²	0.70	0.61	0.06	0.17	0.16	0.54	0.47	0.47
AC NO ₂ _O ₃ 3	a	0.8897	0.4658	-0.1616	0.5583	0.3382	0.2284	0.5357	0.517
	b	2.0495	38.05	32.57	43.127	10.227	45.797	12.01	31.65
	R²	0.70	0.54	0.03	0.26	0.25	0.47	0.50	0.71

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η χρονική διακύμανση όλων των συντελεστών (C1 και C2) προκειμένου να είναι δυνατή η αξιολόγηση της απόδοσης των συναρτήσεων γήρανσης. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα (Σχήμα 6.154, Σχήμα 6.155, Σχήμα 6.156, Σχήμα 6.157) για τους αισθητήρες διοξειδίου του αζώτου (NO₂) και τα σχήματα (Σχήμα 6.158, Σχήμα 6.159) για τους αισθητήρες όζοντος (O₃). Συγκεκριμένα, στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η μεταβλητότητα των συντελεστών C1 και C2 κατά το χρόνο λειτουργίας (8 μήνες) των αισθητήρων.

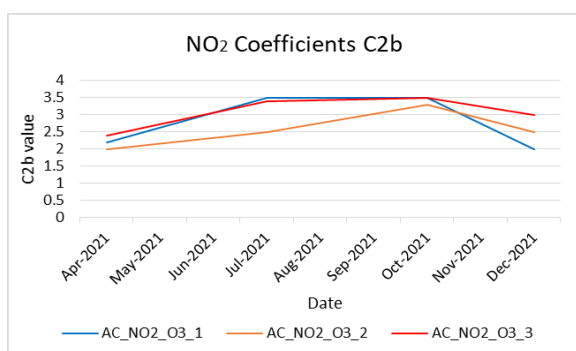
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων



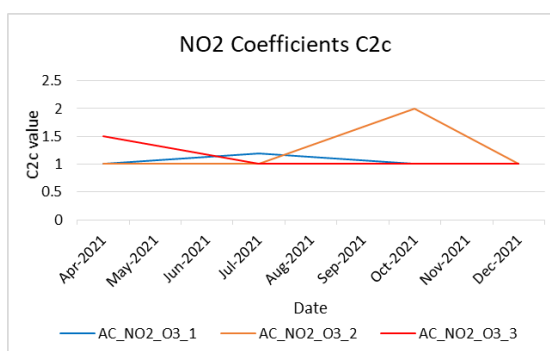
Σχήμα 6.154: Διακύμανση συντελεστή C1 κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα NO₂, χαμηλού κόστους.



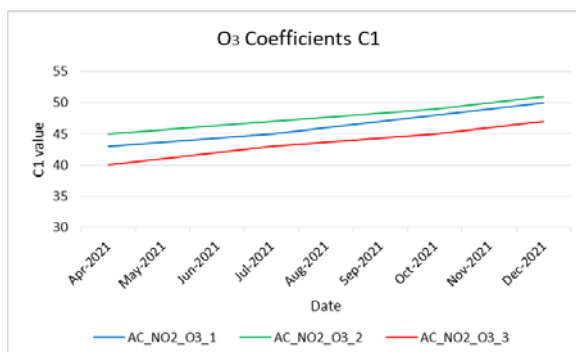
Σχήμα 6.155: Διακύμανση συντελεστή C2a κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα NO₂, χαμηλού κόστους.



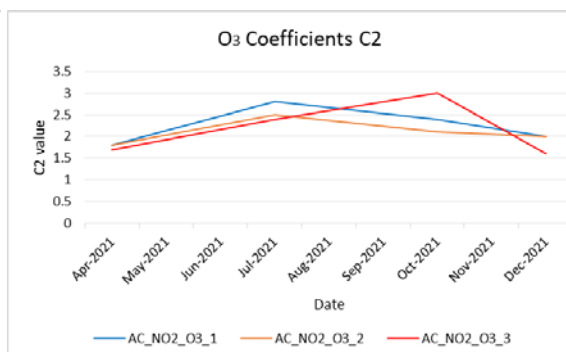
Σχήμα 6.156: Διακύμανση συντελεστή C2b κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα NO₂, χαμηλού κόστους.



Σχήμα 6.157: Διακύμανση συντελεστή C2c κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα NO₂, χαμηλού κόστους.



Σχήμα 6.158: Διακύμανση συντελεστή C1 κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα O₃, χαμηλού κόστους.



Σχήμα 6.159: Διακύμανση συντελεστή C2 κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας του αισθητήρα O₃, χαμηλού κόστους.

Ο συντελεστής C2 αφορά την κλίμακα των μετρούμενων τιμών σε σχέση με τη γήρανση του αισθητήρα. Σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κατασκευάστριας εταιρείας Alphasence για τους αισθητήρες NO₂ [194] και O₃ [192], η ευαισθησία των ηλεκτροχημικών αισθητήρων εξαρτάται από τη θερμοκρασία [226]. Οι μέσες τιμές θερμοκρασίας ανά μήνα για το έτος 2021 για την περιοχή της Αθήνας ελήφθησαν από την ιστοσελίδα meteo.gr (<http://penteli.meteo.gr/stations/athens/NOAAPRYR.TXT>). Από τις Ι.Χρηστάκης

θερμοκρασίες που αναγράφονται στον πίνακα (Πίνακας 6.44), ελήφθησαν οι μέσες θερμοκρασίες για τους μήνες που έλαβε χώρα το πείραμα.

Πίνακας 6.44: Ετήσια κλιματολογική έκθεση για το 2021 (meteo.gr)

ANNUAL CLIMATOLOGICAL SUMMARY				
NAME: athens984 CITY: STATE:				
ELEV: 60m LAT: 37° 58' 42" N LONG: 23° 42' 56" E				
TEMPERATURE (°C), HEAT BASE 18.3, COOL BASE 18.3				
Year	Month	Mean MAX	Mean MIN	MEAN
2021	1	15.0	7.9	11.5
	2	15.8	7.0	11.3
	3	16.2	8.3	12.1
	4	20.0	11.3	15.7
	5	27.3	17.8	22.4
	6	30.1	21.1	25.4
	7	34.1	25.9	29.9
	8	34.3	25.5	29.7
	9	28.5	20.5	24.2
	10	21.7	15.0	18.0
	11	19.1	12.6	15.7
	12	14.9	8.3	11.7

Ο συντελεστής $C2$ (αναφέρεται ως $C2_{Scale}$) σε αντίθεση με τον συντελεστή $C1_{Age}$ δεν σχετίζεται τόσο στενά με τη διάρκεια ζωής του αισθητήρα. Αντίθετα, η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει τη συμπεριφορά του αισθητήρα κατά συνέπεια και τις μετρήσεις. Έτσι, ο συντελεστής $C2_{Scale}$ είναι η διορθωμένη τιμή αφού ληφθεί υπόψη η θερμοκρασία σύμφωνα με το [192] και [226]. Ο συντελεστής $C2_{Scale(O_3)}$ για μετρήσεις O_3 δίνεται από την εξίσωση (28).

$$C2_{Scale(O_3)} = C2_{init(O_3)} + (S_{init} - S_{current})/10 \quad (28)$$

όπου, $C2_{init(O_3)}$ είναι η αρχική τιμή του συντελεστή από την αρχή της λειτουργίας του αισθητήρα O_3 , S_{init} είναι η ευαισθησία του αισθητήρα κατά την πρώτη ημέρα λειτουργίας του [192] σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία και το $S_{current}$ είναι η αντίστοιχη ευαισθησία [226] στη θερμοκρασία του τρέχοντος μήνα.

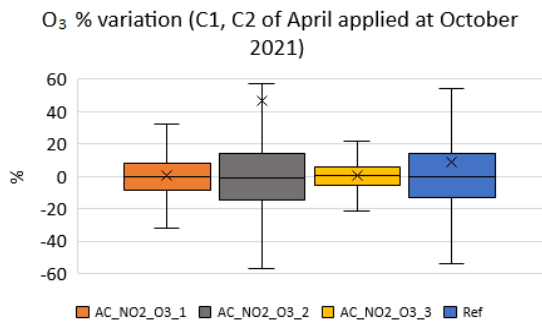
Σύμφωνα με τον πίνακα (Πίνακας 6.41), οι συντελεστές $C2a_{Scale(NO_2)}$ ($NO_2 < 3$) and $C2c_{Scale(NO_2)}$ ($3 < NO_2 < 30$) παραμένουν πρακτικά σταθεροί όπου $C2a_{Scale} = 15$ και $C2c_{Scale} = 1$. Σε αντίθεση με τα παραπάνω ο συντελεστής $C2b_{Scale(NO_2)}$ ($NO_2 > 30$) επηρεάζεται έντονα από τη θερμοκρασία. Ο συντελεστής $C2b_{Scale(NO_2)}$ για μετρήσεις NO_2 δίνεται από την εξίσωση (29).

$$C2b_{Scale(NO_2)} = C2b_{init(NO_2)} + (S_{init} - S_{current})/10 \quad (29)$$

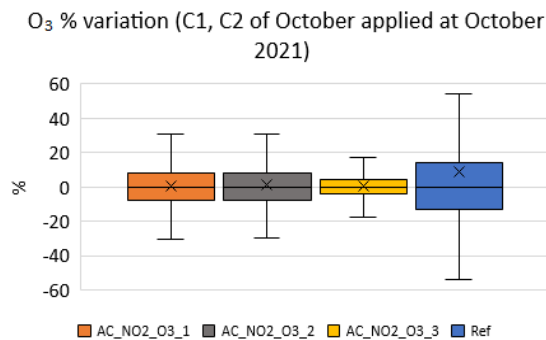
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

όπου $C2_{init(NO_2)}$ είναι η αρχική τιμή του συντελεστή από την αρχή της λειτουργίας του αισθητήρα NO_2 , S_{init} είναι η ευαισθησία του αισθητήρα κατά την πρώτη ημέρα λειτουργίας του [194] σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία και $S_{current}$ είναι η αντίστοιχη ευαισθησία [226] στη θερμοκρασία του τρέχοντος μήνα.

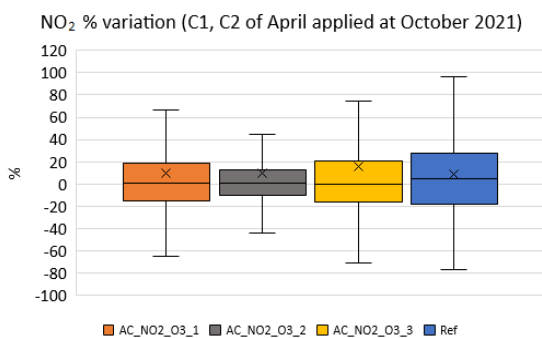
Τα παρακάτω θηκογράμματα δείχνουν τη διακύμανση των μετρούμενων ποσοτήτων, μεταξύ των αισθητήρων και των οργάνων αναφοράς. Το Σχήμα 6.160 εμφανίζει τη διακύμανση O_3 για τον Οκτώβριο 2021 χρησιμοποιώντας τους συντελεστές C1 και C2 που υπολογίστηκαν για τον Απρίλιο του 2021, ενώ το Σχήμα 6.161 εμφανίζει την αντίστοιχη διακύμανση χρησιμοποιώντας τους συντελεστές για τον Οκτώβριο του 2021. Τα σχήματα (Σχήμα 6.162 και Σχήμα 6.163) αντίστοιχα εμφανίζουν τον βαθμό διόρθωσης χρησιμοποιώντας τους συντελεστές C1 και C2 για το NO_2 .



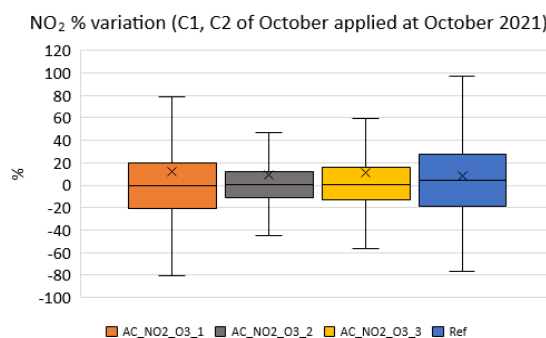
Σχήμα 6.160: Διακύμανση των αισθητήρων O_3 με χρήση των συντελεστών που υπολογίστηκαν για τον Ιούλιο του 2021 και εφαρμόστηκαν τον Οκτώβριο του 2021.



Σχήμα 6.161: Διακύμανση αισθητήρων O_3 με χρήση των συντελεστών που υπολογίστηκαν για τον Οκτώβριο του 2021 και εφαρμόστηκαν τον Οκτώβριο του 2021.



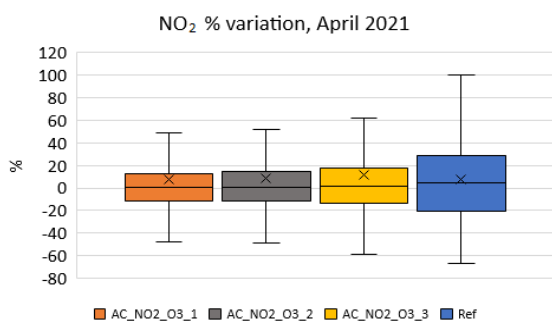
Σχήμα 6.162: Διακύμανση αισθητήρων NO_2 με χρήση των συντελεστών που υπολογίστηκαν για τον Ιούλιο του 2021 και εφαρμόστηκαν τον Οκτώβριο του 2021.



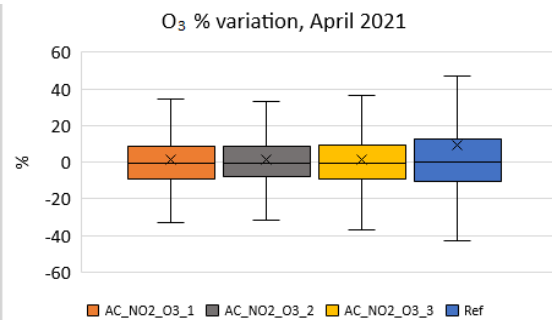
Σχήμα 6.163: Διακύμανση αισθητήρων NO_2 με χρήση των συντελεστών που υπολογίστηκαν για τον Οκτώβριο του 2021 και εφαρμόστηκαν τον Οκτώβριο του 2021.

Στα σχήματα (Σχήμα 6.164 ως Σχήμα 6.171) παρουσιάζεται η διακύμανση NO_2 και O_3 για κάθε μήνα για τους συντελεστές C1 και C2 που υπολογίστηκαν εκ νέου σύμφωνα με τους

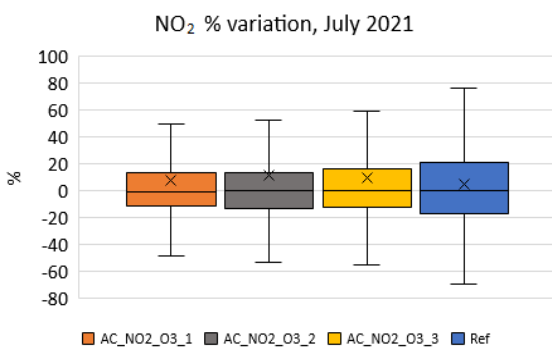
τύπους γήρανσης για κάθε έναν από τους μήνες που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα, το Σχήμα 6.164 και το Σχήμα 6.165 αντιστοιχούν στη στατιστική διακύμανση των μετρήσεων αναφοράς / αισθητήρων χρησιμοποιώντας τα διορθωμένα κατά τη γήρανση C1 και C2 για το NO₂ και το O₃ για τον Απρίλιο του 2021 (περίοδος Α). Το αντίστοιχο θηκόγραμμα για τον Ιούλιο 2021 (περίοδος Β) απεικονίζεται στο Σχήμα 6.166 και στο Σχήμα 6.167. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα Οκτωβρίου 2021 (περίοδος Γ) παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.168 και στο Σχήμα 6.169 για το NO₂ και το O₃ αντίστοιχα. Τέλος, τα αποτελέσματα των εξαγόμενων στατιστικών θηκογραμμάτων σχετικά με τον Δεκέμβριο του 2021 (περίοδος Δ) εμφανίζονται στο Σχήμα 6.170 και στο Σχήμα 6.171.



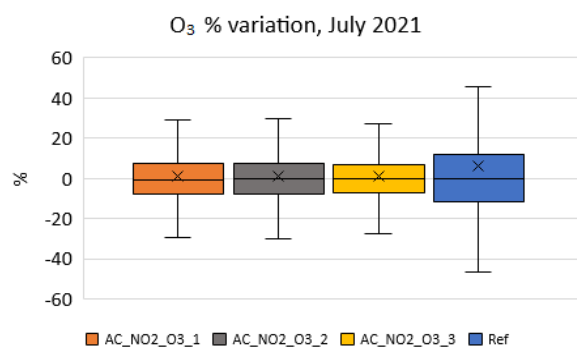
Σχήμα 6.164: Διακύμανση του NO₂ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Α.



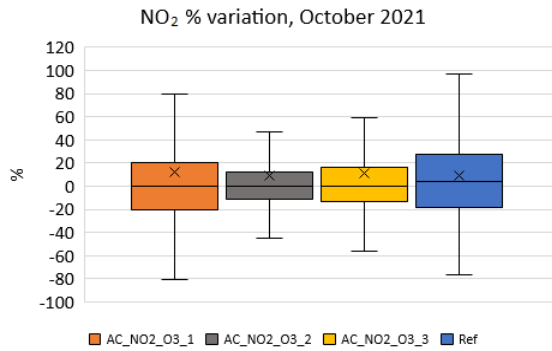
Σχήμα 6.165: Διακύμανση του O₃ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Α.



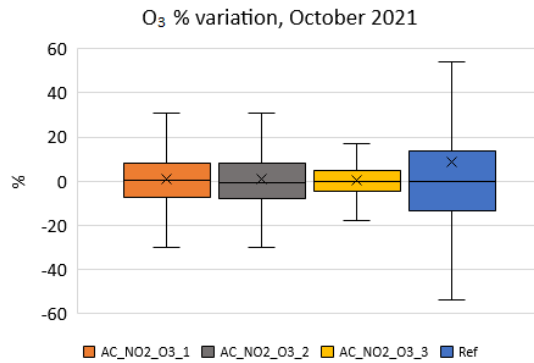
Σχήμα 6.166: Διακύμανση του NO₂ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Β.



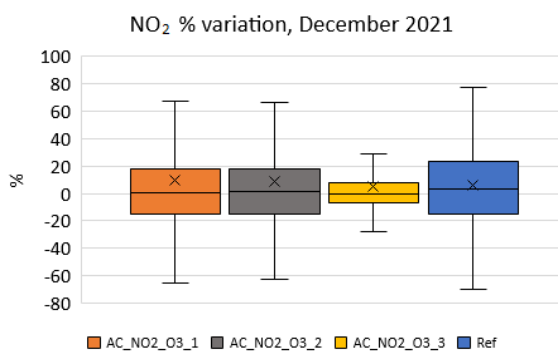
Σχήμα 6.167: Διακύμανση του O₃ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Β.



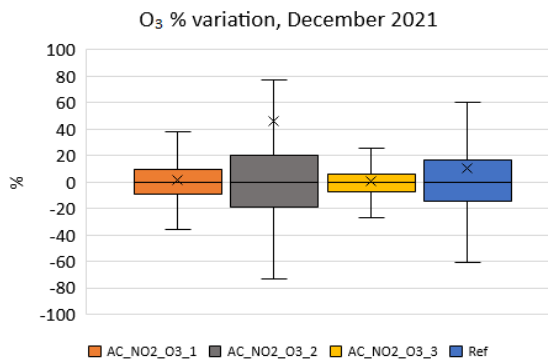
Σχήμα 6.168: Διακύμανση του NO₂ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Γ.



Σχήμα 6.169: Διακύμανση του O₃ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Γ.



Σχήμα 6.170: Διακύμανση του NO₂ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Δ.



Σχήμα 6.171: Διακύμανση του O₃ χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που υπολογίστηκαν για την χρονική περίοδο Δ.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η γήρανση των ηλεκτροχημικών αισθητήρων και η διόρθωση των τιμών τους μπορεί να γίνει με διορθωτικούς συντελεστές που σχετίζονται με τη χρονική διάρκεια της λειτουργίας τους. Δύο συντελεστές C1 & C2 επισημοποιούν την τελική μέτρηση του αισθητήρα από την αρχή της λειτουργίας του. Κατά την διεξαγωγή της έρευνας προέκυψε ότι ο συντελεστής C1 (εξισώσεις (26), (27)) σχετίζεται άμεσα με τη γήρανση και η τιμή του αλλάζει για κάθε μήνα λειτουργίας του αισθητήρα, με διαφορετική μαθηματική συνάρτηση ανά κατηγορία αισθητήρων αερίου ρύπου. Καθώς αυτοί οι αισθητήρες δείχνουν μια αλλαγή στην ευαισθησία της μέτρησης σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ο συντελεστής C1 αλλάζει τη μετρούμενη τιμή σε σχέση με τη γήρανση, εισάγεται ταυτόχρονα ένα σφάλμα, ενώ ο συντελεστής C2 (εξισώσεις (28), (29)) απαιτείται για τη μικρομετρική διόρθωση της μέτρησης του αισθητήρα, με τιμές που σχετίζονται με τη μέση θερμοκρασία του υπό μελέτη μήνα λειτουργίας. Η εφαρμογή των συντελεστών στους χαμηλού κόστους αισθητήρες αερίου από τη μια πλευρά, μπορεί να δώσει περισσότερο ρεαλιστικές μετρήσεις στο πεδίο, από την άλλη να δείξει τη δυναμική

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου
των Πραγμάτων

του συστήματος, των αισθητήρων χαμηλού κόστους, η οποία εμφανίζεται να ακολουθεί την τάση των μετρήσεων όπως αναφέρονται από τα εμπορικά όργανα μέτρησης.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

7. Συμπεράσματα – Θέματα για περαιτέρω έρευνα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τόσο τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την ανάπτυξη της διατριβής, όσο και θέματα για περαιτέρω έρευνα τα οποία αποτελούν τμήμα μελλοντικής ερευνητικής δραστηριότητας. Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διατριβή. Στην δεύτερη ενότητα δίνεται έμφαση σε θέματα που χρήζουν περαιτέρω έρευνας που θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη βελτιωμένων συστημάτων, όπως αισθητήρων χαμηλού κόστους και διαφορετικής τεχνολογίας αλλά και εναλλακτικούς τρόπους μετάδοσης δεδομένων.

7.1 Συμπεράσματα

Η καινοτομία που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή τεκμηριώνεται σε δυο άξονες. Ως προς την επιστήμη, εφαρμόζοντας τεχνικές ψηφιακών φίλτρων και μεθόδων βελτιστοποίησης για την αξιοπιστία των μετρήσεων από αισθητήρες χαμηλού κόστους με παρόμοια και καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τις εργασίες [218] [221] [222] [223] [48] ως προς την τεχνική φίλτρου Kalman, ενώ οι τεχνικές F.I.R και μέσου ορού και διάμεσου ως διορθωτικοί συντελεστές δεν συναντώνται στην βιβλιογραφία. Επίσης η γήρανση των ηλεκτροχημικών αισθητήρων αναφέρεται πολύ περιορισμένα στη βιβλιογραφία. Ως προς τον τομέα της μηχανικής, παρουσιάζοντας ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους υποστηριζόμενο από ένα πλήθος λειτουργιών οι οποίες δεν έχουν υλοποιηθεί σε προηγούμενες εργασίες [30] [32] [33] [44] [45] [46], όπως λήψη μετρήσεων και επεξεργασία τοπικά, στιγματοθέτησης, αδιάληπτης λειτουργίας, επιλογής ασύρματης δικτύωσης (WiFi, GPRS) και over the air programming. Η διερεύνηση της ομοιογένειας των μετρήσεων από τους αισθητήρες ποιότητας αέρα όζοντος (O_3), διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και μικροσωματιδίων ($PM_{2.5}$) χαμηλού κόστους, αποτέλεσε κριτήριο αξιολόγησης της συμπεριφοράς των αισθητήρων χαμηλού κόστους που χρησιμοποιήθηκαν. Η διαδικασία αυτή έγινε για την αποτύπωση της αξιολόγησης των αισθητήρων χαμηλού κόστους, με στόχο την ανεξαρτητοποίηση της εφαρμογής της διαδικασίας βαθμονόμησης στο σύνολο των αισθητήρων, ώστε τα αποτελέσματα να είναι παρόμοια για οποιονδήποτε αισθητήρα ιδίου μοντέλου της κατασκευάστριας εταιρείας. Και στις τρεις κατηγορίες αισθητήρων παρουσιάστηκε ένας ικανοποιητικός βαθμός συσχέτισης (R^2) μεταξύ των αισθητήρων ιδίου τύπου για τις πρωτογενείς τιμές. Οι αισθητήρες μεταξύ τους παρουσίασαν μέση τιμή βαθμού συσχέτισης, για το διοξείδιο του αζώτου (NO_2) 86%, το όζον (O_3) 75% και τα

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

μικροσωματίδια (PM_{2.5}) 95%. Μέσω αυτών των αποτελεσμάτων συνάγεται το συμπέρασμα ότι, ως προς την αξιολόγησή τους, οι συγκεκριμένοι αισθητήρες, εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά κατά την αντίδρασή τους με τον περιβαλλοντικό αέρα κατ' επέκταση και των μετρήσεών τους, και μας δίδουν την δυνατότητα αξιοποίησής τους για την παρακολούθηση της ποιότητας αέρα σε μια περιοχή, με έναν αρκετά αξιόπιστο τρόπο.

Η βαθμονόμηση των αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους κρίνεται απαραίτητη και έγινε με την συν-τοποθέτηση (απόσταση < 1m) των σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους δίπλα σε επίσημα όργανα (HORIBA APOA-360 για το όζον και το HORIBA APNA-360 για το διοξείδιο του αζώτου).

Για τους αισθητήρες αέριων ρύπων όζοντος (O₃) και διοξειδίου του αζώτου (NO₂), χρησιμοποιήθηκε συνάρτηση διόρθωσης σχετικά με την θερμοκρασία, ενώ αναγκαία ήταν και η εφαρμογή συνάρτησης κανονικοποίησης - βαθμονόμησης, αποτελούμενη από δυο συντελεστές (C1, C2). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε, ομοιογένεια των διορθωμένων τιμών, για κάθε ομάδα αισθητήρων, τόσο μεταξύ των αισθητήρων, όσο και κάθε αισθητήρα σε σχέση με τα όργανα αναφοράς. Αυτό εμφανίζεται και από τη μέση τιμή του βαθμού συσχέτισης (R²) μεταξύ των μετρήσεων, των αισθητήρων χαμηλού κόστους και των οργάνων αναφοράς, για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) 65%, το όζον (O₃) 64% και για τα μικροσωματίδια (PM_{2.5}) 64%. Συνεπώς η εφαρμογή εξισώσεων βαθμονόμησης σε αισθητήρες χαμηλού κόστους είναι αναγκαία και έχει ως αποτελέσματα την εμφάνιση περισσότερο αξιόπιστων μετρήσεων.

Αντικείμενο έρευνας αποτέλεσε ο βαθμός επίδρασης των βαρομετρικών συνθηκών στο διορθωμένο αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό η εφαρμογή μεθόδων απλής γραμμικής παλινδρόμησης (LR) και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) έγινε για τη διερεύνηση της επίρειας των αποτελεσμάτων από τις βαρομετρικές συνθήκες, αλλά και για το ποσό συμβάλουν οι διορθωτικοί συντελεστές που εφαρμόστηκαν κατά την βαθμονόμησή τους. Από τα αποτελέσματα της μεθόδου απλής γραμμικής παλινδρόμησης (LR), παρατηρήθηκε ότι οι πρωτογενείς τιμές, εμφανίζουν υψηλό βαθμό σημαντικότητας για την εξαγωγή των διορθωμένων τιμών τόσο για τα μικροσωματίδια (PM_{2.5}), όσο και για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και το όζον (O₃). Για τους αισθητήρες μικροσωματιδίων (PM_{2.5}) χαμηλού κόστους, η διερεύνηση της επίδρασης της βαρομετρικής πίεσης στη διόρθωση των μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένης της διόρθωσης με την υγρασία και την θερμοκρασία, εμφανίζεται να συμβάλλει για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Από τα αποτελέσματα της μεθόδου πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) παρατηρήθηκε

I.Χρηστάκης

ότι, για τους αισθητήρες μικροσωματιδίων PM_{2.5}, η διόρθωση υγρασίας είναι πιο σημαντική από τη διόρθωση θερμοκρασίας και της βαρομετρικής πίεσης, ενώ για τους αισθητήρες των αερίων, διοξείδιο του αζώτου (NO₂) και όζοντος (O₃) η διόρθωση θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι σημαντική.

Η διερεύνηση εφαρμογής ψηφιακού φίλτρου πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (F.I.R.), έλαβε χώρα ως προς τη μελέτη μοντέλου πρόβλεψης των μετρούμενων τιμών, με στόχο την προσέγγιση των διορθωμένων τιμών στις τιμές από τα όργανα αναφοράς. Μια χρονική περίοδος μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ως χρόνος εκπαίδευσης για την εξαγωγή των συντελεστών του φίλτρου, ενώ σε δεύτερη χρονική περίοδο, χρησιμοποιώντας διορθωμένες μετρήσεις από τους αισθητήρες χαμηλού κόστους και τους συντελεστές του φίλτρου, εξήχθησαν ικανοποιητικά αποτελέσματα μετρήσεων. Εφαρμόζοντας την προσέγγιση του φίλτρου F.I.R, ο βαθμός συσχέτισης (R²) εμφάνισε βελτίωση των μετρήσεων, για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) κατά 15%, ενώ για το όζον (O₃) κατά 16%. Η βελτιστοποίηση των προβλεπόμενων μετρήσεων αποδεικνύεται και μέσω της μεθόδου RMSE.

Η εφαρμογή φίλτρου Kalman στις διορθωμένες τιμές εμφάνισε εξαιρετικά αποτελέσματα. Για την υλοποίηση απαιτείται ένα χρονικό διάστημα εκμάθησης του φίλτρου, για την εξαγωγή των συντελεστών του, ενώ σε δεύτερο χρονικό διάστημα ο συνδυασμός διορθωμένων μετρήσεων από τους αισθητήρες και των συντελεστών του φίλτρου, έχει ως αποτέλεσμα την πρόβλεψη μετρήσεων. Μετά την εφαρμογή του φίλτρου Kalman, ο βαθμός συσχέτισης (R²) εμφάνισε βελτίωση στις μετρήσεις, για το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) κατά 53%, ενώ για το όζον (O₃) κατά 26%. Οι μέθοδοι MAD, MSE, MAPE και RMSE, επιβεβαιώνουν την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η εφαρμογή των μεθόδων SVL_A και SVL_M έλαβε χώρα για τον εντοπισμό των ορίων της ποσοστιαίας μεταβολής των μη διορθωμένων μετρήσεων σε σχέση με τις μετρήσεις αναφοράς, σε ηλεκτροχημικούς αισθητήρες χαμηλού κόστους, διοξειδίου του αζώτου και όζοντος. Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση της συμμετρίας και την επιβεβαίωση της ομοιογένειας των αισθητήρων ανά κατηγορία αερίου ρύπου. Τα ασφαλή όρια μεταβολής στις μετρήσεις των αισθητήρων κυμαίνονται, για το διοξείδιο του αζώτου από -13% έως +10% ενώ για το όζον από -13% έως +13%. Ως προς την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, ο βαθμός συσχέτισης (R²) εμφάνισε βελτίωση, για το διοξείδιο του αζώτου κατά 58% και για το όζον κατά 36%. Κατά τις μεθόδους γραμμικής παλινδρόμησης (LR) και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR), είναι εμφανής η

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

σημαντικότητα f , όπως και η συνεισφορά στη διόρθωση (p -value) των δυο μεθόδων. Τέλος η αξιοπιστία επιβεβαιώνεται με την εφαρμογή των μοντέλων MAD, MSE, MAPE και RMSE.

Σημαντικό τμήμα της έρευνας αποτέλεσε η συμπεριφορά των αισθητήρων αέριων ρύπων χαμηλού κόστους, κατά τη διάρκεια (χρόνο) λειτουργίας τους. Στόχος ήταν να διερευνηθεί η αξιοπιστία των τιμών μέτρησης από τους αισθητήρες αέριων ρύπων, διοξειδίου του αζώτου (NO_2) και όζοντος (O_3), χαμηλού κόστους, σε σχέση με τις τιμές μέτρησης των οργάνων αναφοράς. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η γήρανση τους είναι θεραπεύσιμη με δυο διορθωτικούς συντελεστές (C1 & C2) που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση από την αρχή λειτουργίας των αισθητήρων και οι οποίοι σχετίζονται με τη χρονική διάρκεια της λειτουργίας τους. Ως ερευνητικό αποτέλεσμα, προκύπτει ότι ο συντελεστής C1 σχετίζεται άμεσα με τη γήρανση και η τιμή του αλλάζει για κάθε μήνα λειτουργίας του αισθητήρα με διαφορετική μαθηματική συνάρτηση, για κάθε είδους αισθητήρα, ενώ ο συντελεστής C2 εκτελεί μικρομετρική διόρθωση των τιμών σε σχέση με τη μέση θερμοκρασία του υπό μελέτη μήνα λειτουργίας.

Συνοπτικά ο Πίνακας 7.1 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης (R^2) ανά μέθοδο βελτίωσης που εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής.

Πίνακας 7.1: Τιμές συντελεστή συσχέτισης (R^2) ανά μέθοδο βελτίωσης

Μέθοδος	R^2		
	O_3	NO_2	PM2.5
Βαθμονόμηση	0.60 - 0.67	0.50 - 0.58	0.62 - 0.65
PM Pressure corr.			0.80 - 0.85
	Βελτίωση %		
FIR	16	15	
Kalman	26	53	
SVL_A - SVL_M	36	58	
Nonlinear	11	8	

Οι αισθητήρες ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, έχουν τη δυνατότητα να φέρουν επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο παρακολουθούμε και κατανοούμε την ατμοσφαιρική ρύπανση, η χρήση τους προτείνεται ως συμπλήρωμα και όχι ως αντικατάσταση των επίσημων οργάνων, για την αύξηση της χωρικής κάλυψης και ανάπτυξης δικτύου παρακολούθησης ποιότητας αέρα μιας περιοχής. Ωστόσο, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί και τα πιθανά μειονεκτήματα αυτών των αισθητήρων. Οι αισθητήρες ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους μπορούν να παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την ποιότητα του αέρα σε πραγματικό χρόνο και με κόστος πολύ μικρότερο των παραδοσιακών

συστημάτων. Η ακρίβεια και η αξιοπιστία τους μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με παράγοντες όπως ο τύπος του αισθητήρα, η βαθμονόμηση, η τοποθέτηση και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Μπορεί να μην είναι σε θέση να ανιχνεύσουν ορισμένους τύπους ατμοσφαιρικών ρύπων ή να μετρήσουν με ακρίβεια τις συγκεντρώσεις τους. Μπορεί να απαιτούν τακτική συντήρηση, βαθμονόμηση και αντικατάσταση για να διασφαλιστούν ακριβείς μετρήσεις. Τα δεδομένα τους ενδέχεται να μην είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα επίσημα δεδομένα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, καθώς ενδέχεται να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί αισθητήρες και μέθοδοι μέτρησης. Για την βελτιστοποίηση των μετρήσεων, από αισθητήρες χαμηλού κόστους, απαιτείται μετά-επεξεργασία των δεδομένων. Η χρήση ψηφιακών φίλτρων και μοντέλων βελτιστοποίησης έδειξε ότι οι μετρήσεις είναι περισσότερο αξιόπιστες. Η ευρεία χρήση τους θα μπορούσε να συμβάλει, τόσο στην αύξηση της χωρικής κάλυψης για την παρακολούθηση ποιότητας αέρα μιας περιοχής, όσο και της ευαισθητοποίησης του κοινού για την ατμοσφαιρική ρύπανση και να διευκολύνει τις προσπάθειες της κοινότητας για την αντιμετώπισή της.

7.2 Θέματα για περαιτέρω έρευνα

Σημειώνεται ότι από το διάστημα συγγραφής της Διδακτορικής Διατριβής μέχρι σήμερα έχουν προκύψει δυο επιπλέον δημοσιεύσεις. Η πρώτη από αυτές έχει ήδη ολοκληρωθεί και δημοσιευθεί (["https://www.mdpi.com/2624-6120/5/1/4"](https://www.mdpi.com/2624-6120/5/1/4) Signals). Η δημοσίευση ασχολείται με την εφαρμογή της τεχνικής LASSO στα πειραματικά δεδομένα πεδίου και στην παρουσίαση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Η τεχνική LASSO στην επεξεργασία σήματος χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος της απόλυτης τιμής των συντελεστών προσθέτοντας έναν όρο ποινής (penalty), αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον μηδενισμό των μη σημαντικών συντελεστών. Η δεύτερη έχει σταλεί στο περιοδικό Applied Sciences όπου έχει γίνει δεκτή προς δημοσίευση και αφορά στα αποτελέσματα της παραγράφου 6.7. Η δημοσίευση παρουσιάζει τη χρήση της μη γραμμικής παλινδρόμησης ως διορθωτικό συντελεστή των μετρήσεων, από την οποία εμφανίζεται η βελτίωση των τιμών μέτρησης μέσα από μια πολυωνυμική συνάρτηση 2^{ου} βαθμού και μίας μεταβλητής.

Μελλοντικός ερευνητικός στόχος είναι η αναζήτηση απαντήσεων σε ένα σύνολο ερευνητικών ερωτημάτων και περαιτέρω έρευνας σχετικά με την ανάπτυξη και την αξιοποίηση τέτοιου είδους συστημάτων, τόσο ως προς τη χρήση διαφορετικών αισθητήρων ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, όσο και ως προς τις διατάξεις, όπως καθώς και με εναλλακτικούς τρόπους μετάδοσης δεδομένων.

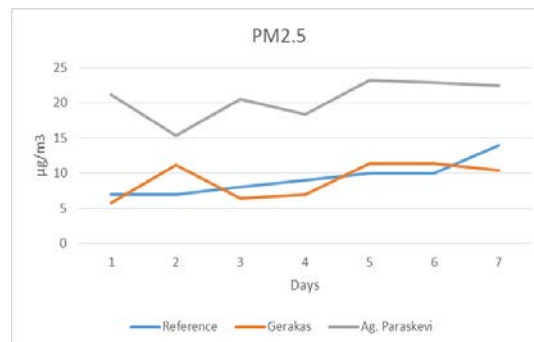
Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια ένα πλήθος από αισθητήρες ποιότητας αέρα είναι διαθέσιμο εμπορικά. Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες της εταιρίας SpecSensor παρουσιάζουν πολύ καλά χαρακτηριστικά και είναι οικονομικότεροι από αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή, ενώ η χρήση τους σε συστήματα παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους αποτελεί πεδίο μελέτης και έρευνας τόσο στο υλικολογισμικό πεδίο όσο και στις διαδικασίες βαθμονόμησης και γήρανσης με σκοπό την αξιολόγηση τους.

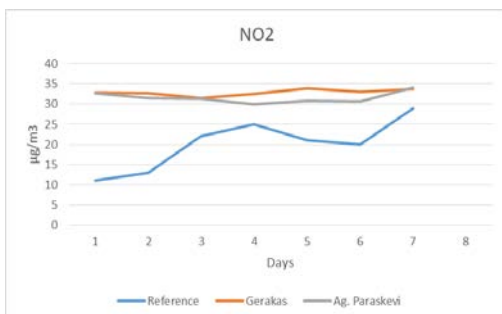
Προς αυτή την κατεύθυνση δημιουργήθηκαν δύο σταθμοί παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους, που χρησιμοποιούν τους συγκεκριμένους αισθητήρες (Σχήμα 7.1) με διασύνδεση ασυρμάτου δικτύου (WiFi). Τα πρώτα αποτελέσματα μετρήσεων εμφανίζονται στα σχήματα (Σχήμα 7.2, Σχήμα 7.3, Σχήμα 7.4). Διερευνητικά εξελίσσεται ο εντοπισμός μηδενισμού του αισθητήρα σύμφωνα με τις βαρομετρικές συνθήκες, όπως και η διαδικασία βαθμονόμησης που θα πρέπει να ακολουθείται ως πρωτόκολλο, η εργασία αυτή έχει δημοσιευτεί (I. Christakis, G. Hloupis, O. Tsakiridis και I. & Stavrakas, «Integrated open source air quality monitoring platform.,» In 2022 11th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAS, 2022.) [227].



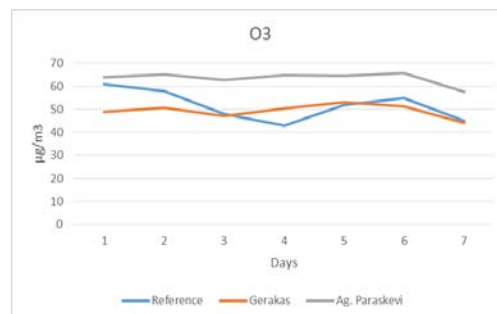
Σχήμα 7.1: Σταθμός παρακολούθησης ποιότητας αέρα με αισθητήρες αερίων ρύπων SpecSensor



Σχήμα 7.2: Απόκριση συγκέντρωσης μικροσωματιδίων (PM_{2.5})



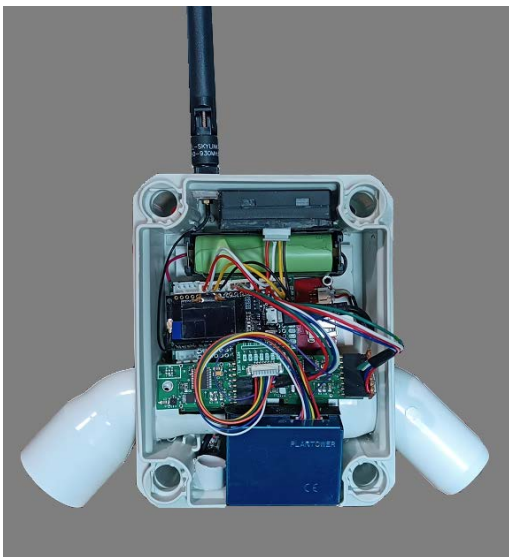
Σχήμα 7.3: Απόκριση συγκέντρωσης διοξειδίου του αζώτου (NO₂)



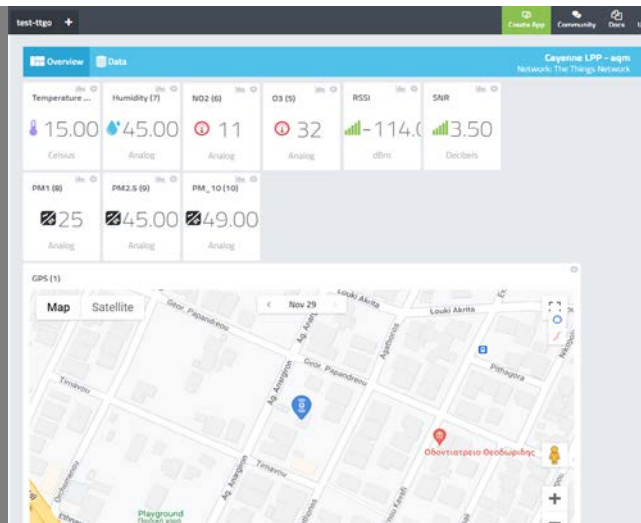
Σχήμα 7.4: Απόκριση συγκέντρωσης όζοντος (O₃)

7.2.1 Εναλλακτικοί τρόποι μετάδοσης πληροφορίας

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας νέα συστήματα τηλεπικοινωνιών έχουν δημιουργηθεί με σκοπό την εξυπηρέτηση δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων και γενικότερα διατάξεων IoT. Ένα από αυτά τα δίκτυα είναι και το Long Range (LoRa) το οποίο προσφέρει την δυνατότητα μεγάλης ακτίνας κάλυψης με μικρό ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας και μηδενικό κόστος. Η δημιουργία σταθμών παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους υποστηριζόμενοι από ένα τέτοιο πρωτόκολλο μετάδοσης πληροφορίας θα εξασφάλιζε την δημιουργία ενός πυκνού χωρικού δικτύου μετρήσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης μιας περιοχής, ενώ ταυτόχρονα το κόστος χρήσης σχετικά με την μετάδοση πληροφορίας θα ήταν μηδενικό. Στο πλαίσιο της έρευνας έχει δημιουργηθεί ένας σταθμός υποστηριζόμενος από πρωτόκολλο μετάδοσης LoRa, (Σχήμα 7.5) ο οποίος είναι σε πειραματική φάση λειτουργίας ως προς την απόκριση του συστήματος και την συλλογή δεδομένων. Στο Σχήμα 7.6 εμφανίζεται η διεπαφή χρήστη του πληροφοριακού συστήματος Cayenne, το οποίο αποθηκεύει και οπτικοποιεί τις πληροφορίες σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη.



Σχήμα 7.5: Σταθμός παρακολούθησης ποιότητας αέρα χαμηλού κόστους (LoRa)



Σχήμα 7.6: Πληροφοριακό σύστημα απεικόνισης και αποθήκευσης δεδομένων (Cayenne)

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

8. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] N. Castell, F. R. Dauge, P. Schneider, M. Vogt, U. Lerner, B. Fishbain, D. Broday, A. Bartonova, «Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?», *Environment international*, 99, pp. 293-302, 2017.
- [2] A. C. Rai, P. Kumar, F. Pilla, A. N. Skouloudis, S. Di Sabatino, C. Ratti, A. Yasar D. Rickerby, «End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring», *Science of The Total Environment*, 607, pp. 691-705, 2017.
- [3] W. H. O. WHO, «Global Air Quality Guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide», *World Health Organization: Geneva, Switzerland*, 2021.
- [4] L. G. Costa, T. B. Cole, K. Dao, Y. C. Chang, J. Coburn, J. M. Garrick, «Effects of air pollution on the nervous system and its possible role in neurodevelopmental and neurodegenerative disorders», *Pharmacology & therapeutics*, 210, 107523., 2020.
- [5] M. Kowalska, M. Skrzypek, M. Kowalski, J. Cyrus, «Effect of NOx and NO2 concentration increase in ambient air to daily bronchitis and asthma exacerbation, Silesian voivodeship in Poland», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 754, 2020.
- [6] F. Bernardini, L. Attademo, R. Trezzi, C. Gobbicchi, P. M. Balducci, V. Del Bello, G. Menculini, L. Pauselli, M. Piselli, T. Sciarma, P. Moretti, A. Tamantini, R. Quartesan, M. Compton, A. Tortorella, «Air pollutants and daily number of admissions to psychiatric emergency services: evidence for detrimental mental health effects of ozone», *Epidemiology and psychiatric sciences*, 29, 2020.
- [7] Air Quality in Europe, EEA. «EEA Report No 13/2017» European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 2018.
- [8] EPA/600/P-99/002bF, «Air Quality Criteria for Particulate Matter», U.S. Environmental Protection Agency: Research Triangle, 2004.
- [9] EPA/600/R-06/063, «Provisional Assessment of Recent Studies on Health Effects of Particulate Matter Exposure», U.S. Environmental Protection Agency: Research Triangle Park, NC, 2006.
- [10] B. Brunekreef, B. Forsberg, «Epidemiological evidence of effects of coarse airborne particles on health», *European respiratory journal*, 26(2), pp. 309-318, 2005.
- [11] H. Kan, S. J. London, G. Chen, Y. Zhang, G. Song, N. Zhao, L. Jiang, B. Chen, «Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China», *Environment international*, 33(3), pp. 376-384, 2007.
- [12] R. D. Peng, H. H. Chang, M. L. Bell, A. McDermott, S. L. Zeger, J. M. Samet, F. Dominici, «Coarse particulate matter air pollution and hospital admissions for cardiovascular and respiratory diseases among Medicare patients», *Jama*, 299(18), pp. 2172-2179, 2008.

- [13] L. Perez, M. Medina-Ramón, N. Kunzli, A. Alastuey, J. Pey, N. Perez, R. Garcia, A. Tobias, Z. Querol, J. Sunyer, «Size fractionate particulate matter, vehicle traffic, and case-specific daily mortality in Barcelona, Spain», *Environmental science & technology*, 43(13), pp. 4707-4714, 2009.
- [14] IARC., «Outdoor Air Pollution a Leading Environmental Cause of Cancer Deaths», Press Release No 221; WHO, Copenhagen, Denmark, 2013.
- [15] J. Berman, K. Ebisu, «Changes in U.S. air pollution during the COVID-19 pandemic», *Sci. Total Environ.* 2020, 739, 139864., 2020.
- [16] J. Ding, R. van der A, H. Eskes, B. Mijling, T. Stavrou, J. van Geffen, J. Veefkind, «NOx Emissions Reduction and Rebound in China Due to the COVID-19 Crisis», *Geophysical Research Letters*, 47(19), e2020GL08991, 2020.
- [17] J. Breuer, R. Samsun, R. Peters, D. Stolten, «The impact of diesel vehicles on NOx and PM10 emissions from road transport in urban morphological zones: A case study in North Rhine-Westphalia, Germany», *Sci. Total Environ.* 727, 138583., 2020.
- [18] S. Gürçam, E. Konuralp, S. Ekici, «Determining the effect of air transportation on air pollution in the most polluted city in Turkey», *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* 93, p. 354–362, 2021.
- [19] K. Bilsback, D. Kerry, B. Croft, B. Ford, S. Jathar, E. Carter, R. Martin and J. Pierce, "Beyond SOx reductions from shipping: Assessing the impact of NOx and carbonaceous-particle controls on human health and climate», *Environ. Res. Lett.* 15, 124046, 2020.
- [20] Z. Shi, T. Vu, S. Kotthaus, R. Harrison, S. Grimmond, S. Yue, T. Zhu, J. Lee, Y. Han, M. Demuzere and e. al, «Introduction to the special issue «In-depth study of air pollution sources and processes within Beijing and its surrounding region (APHH-Beijing)», *Atmos. Chem. Phys.* 19, p. 7519–7546, 2019.
- [21] S. Kolluru, A. Patra, Nazneen, S. Shiva Nagendra, «Association of air pollution and meteorological variables with COVID-19 incidence: Evidence from five megacities in India», *Environ. Res.* 2021, 195, 110854, 2021.
- [22] E. G. Snyder, T. H. Watkins, P. A. Solomon, E. D. Thoma, R. W. Williams, G. S. Hagler, D. Shelow, D. A. Hindin, V. J. Kilaru, P. W. Preuss, «The changing paradigm of air pollution monitoring», *Environmental science & technology*, 47(20), pp. 11369-11377, 2013.
- [23] P. Kumar, L. Morawska, C. Martani, G. Biskos, M. Neophytou, S. Di Sabatino, M. Bell, L. Norford and R. Britter, «The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities», *Environment international*, 75, p. 199–205, 2015.
- [24] C. Malings, R. Tanzer, A. Haurlyiuk, P. Saha, A. Robinson, A. Presto and R. & Subramanian, «Fine particle mass monitoring with low-cost sensors: Corrections and long-term performance evaluation», *Aerosol Science and Technology*, 54(2), pp. 160-174, 2020.

- [25] X. Liu, R. Jayaratne, P. Thai, T. Kuhn, I. Zing, B. Christensen, R. Lamont, M. Dunbabin, S. Zhu, J. Gao & al., «Low-cost sensors as an alternative for long-term air quality monitoring», *Environmental research*, 185, 109438, 2020.
- [26] S. Feinberg, R. Williams, G. Hagler, J. Rickard, R. Brown, D. Garver, G. Harshfield, P. Stauffer, E. Mattson, R. Judge & al., «Long-term evaluation of air sensor technology under ambient conditions in Denver, Colorado», *Atmospheric measurement techniques*, 11(8), pp. 4605-4615, 2018.
- [27] P. Wei, Z. Ning, S. Ye, L. Sun, F. Yang, K. Chun Wong, D. Westerdahl, P. Louie, «Impact analysis of temperature and humidity conditions on electrochemical sensor response in ambient air quality monitoring», *Sensors*, 18(2), 59, 2018.
- [28] V. Van Zoest, F. Osei, A. Stein, G. Hoek, «Calibration of low-cost NO₂ sensors in an urban air quality network», *Atmospheric environment*, 210, pp. 66-75, 2019.
- [29] O. Popoola, G. Stewart, M. Mead, R. Jones, «Development of a baseline-temperature correction methodology for electrochemical sensors and its implications for long-term stability», *Atmospheric environment*, 147, pp. 330-343, 2016.
- [30] E. S. Cross, L. R. Williams, D. K. Lewis, G. R. Magoon, T. B. Onasch, M. L. Kaminsky, D. Worsnop, J. T. Jayne, «Use of electrochemical sensors for measurement of air pollution: correcting interference response and validating measurements», *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(9), vol. 10, 9, pp. 3575-3588, 2017.
- [31] T. Migos, I. Christakis, K. Moutzouris, I. Stavrakas, «On the Evaluation of Low-Cost PM Sensors for Air Quality Estimation», *8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)*, Thessaloniki, Greece, 2019.
- [32] Y. Gao, W. Dong, K. Guo, X. Liu, Y. Chen, X. Liu, J. Bu, C. Chen, «Mosaic: A low-cost mobile sensing system for urban air quality monitoring», *IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*, 2016.
- [33] W. Jiao, G. Hagler, R. Williams, R. Sharpe, R. Brown, D. Garver, R. Judge, M. Caudill, J. Rickard, M. Davis, L. Weinstock, S. Zimmer-Dauphinee, K. Buckley, «Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) project: evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States», *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(11), pp. 5281-5292, 2016.
- [34] R. Laref, E. Losson, A. Sava, M. Siadat, «Field Evaluation of Low Cost Sensors Array for Air Pollution Monitoring», *10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS) (Vol. 2)*, pp. 849-853, 2019.
- [35] N. Afshar-Mohajer, C. Zuidema, S. Sousan, L. Hallett, M. Tatum, A. M. Rule, G. Thomas, T. Peters, K. Koehler, «Evaluation of low-cost electro-chemical sensors for environmental monitoring of ozone, nitrogen dioxide, and carbon monoxide», *Journal of occupational and environmental hygiene*, 15(2), pp. 87-98, 2018.

- [36] L. Morawska, P. K. Thai, X. Liu, A. Asumadu-Sakyi, G. Ayoko, A. Bartonova, R. Williams, «Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?», *Environment international*, 116,, pp. 286-299, 2018.
- [37] R. E. Peltier, N. Castell, A. L. Clements, T. Dye, C. Hüglin, J. H. Kroll, Z. Ning, M. Parsons, M. Penza, F. Reisen & E. Schneidmesser, «An Update on Low-cost Sensors for the Measurement of Atmospheric Composition», *World Meteorological Organization (WMO) No.1215*, 2021.
- [38] J. Kim, A. A. Shusterman, K. J. Lieschke, C. Newman & R. C. Cohen, «The BERkeley Atmospheric CO₂ Observation Network: field calibration and evaluation of low-cost air quality sensors», *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(4), pp. 1937-1946, 2018.
- [39] C. Malings, R. Tanzer, A. Haurlyiuk, S. P. N. Kumar, N. Zimmerman, L. B. Kara, A. A. Presto & R. Subramanian, «Development of a general calibration model and long-term performance evaluation of low-cost sensors for air pollutant gas monitoring», *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(2), pp. 903-920, 2019.
- [40] D. H. Hagan, G. Isaacman-VanWertz, J. P. Franklin, L. M. M. Wallace, B. D. Kocar, C. L. Heald & J. H. Kroll, «Calibration and assessment of electrochemical air quality sensors by co-location with regulatory-grade instruments», *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1), pp. 315-328, 2018.
- [41] A. Bigi, M. Mueller, S. K. Grange, G. Ghermandi & C. Hueglin, «Performance of NO, NO₂ low cost sensors and three calibration approaches within a real world application», *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(6), pp. 3717-3735, 2018.
- [42] K. R. Smith, P. M. Edwards, P. D. Ivatt, J. D. Lee, F. Squires, C. Dai, R. E. Peltier, M. J. Evans, Y. Sun & A. C. Lewis, «An improved low-power measurement of ambient NO₂ and O₃ combining electrochemical sensor clusters and machine learning», *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(2), pp. 1325-1336, 2019.
- [43] G. S. Hagler, R. Williams, V. Papapostolou & A. Polidori, «Air quality sensors and data adjustment algorithms: When is it no longer a measurement?», *Environ. Sci. Technol.*, 52, p. 5530–5531, 2018.
- [44] B. Maag, Z. Zhou & L. Thiele, «W-air: Enabling personal air pollution monitoring on wearables», *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2(1), pp. 1-25, 2018.
- [45] S. Kaivonen & E. C. H. Ngai, «Real-time air pollution monitoring with sensors on city bus», *Digital Communications and Networks*, vol. 6, 1, pp. 23-30, 2020.
- [46] E. Kosmidis, P. Syropoulou, S. Tekes, P. Schneider, E. Spyromitros-Xioufis, M. Riga, P. Charitidis, A. Moumtzidou, S. Papadopoulos, S. Vrochidis, I. Kompatsiaris, I. Stavrakas, G. Hloupis, A. Loukidis, K. Kourtidis, A. K. Georgoulas & G. Alexandri, «hackAIR: Towards raising awareness about air quality in Europe by developing a collective online platform», *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 7, 5, p. 187, 2018.

- [47] M. J. Molina, A. V. Ivanov, S. Trakhtenberg & L. T. Molina, «Atmospheric evolution of organic aerosol», *Geophysical Research Letters*, vol. 31, 22, 2004.
- [48] P. Ferrer-Cid, J. M. Barcelo-Ordinas, J. Garcia-Vidal, A. Ripoll & M. Viana, «Multisensor data fusion calibration in IoT air pollution platforms», *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, 4, pp. 3124-3132, 2020.
- [49] T. Sayahi, A. Butterfield & K. E. Kelly, «Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors», *Environmental pollution*, vol. 245, pp. 932-940, 2019.
- [50] M. He, N. Kuerbanjiang & S. Dhaniyala, «Performance characteristics of the low-cost Plantower PMS optical sensor», *Aerosol Science and Technology*, vol. 54, 2, pp. 232-241, 2020.
- [51] F. Bulot, H. Russell, M. Rezaei, M. Johnson, S. Ossont, A. Morris, P. Basford, N. Easton, G. Foster, M. Loxham & S. Cox, «Laboratory comparison of low-cost particulate matter sensors to measure transient events of pollution», *Sensors*, vol. 20, 8, p. 2219, 2020.
- [52] F. Karagulian, M. Barbieri, A. Kotsev, L. Spinelle, M. Gerboles, F. Lagler, N. Redon, S. Crunaire & A. Borowiak, «Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring», *Atmosphere*, 10(9), 2019.
- [53] D. Yamunathangam, K. Pritheka & P. Varuna, «IoT enabled air pollution monitoring and awareness creation system», *Int. J. of Recent Techn. and Eng*, vol. 7, 4, pp. 398-400, 2019.
- [54] H. N. Shah, Z. Khan, A. A. Merchant, M. Moghal, A. Shaikh & P. Rane, «IOT based air pollution monitoring system», *International Journal of Scientific Engineering Research*, vol. 9, 2, pp. 62-66, 2018.
- [55] V. Sajjan & P. Sharma, «Research on an IoT based air pollution monitoring system», *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.(IJITEE)*, vol. 8, 9S2, 2019.
- [56] M. Levy Zamora, F. Xiong, D. Gentner, B. Kerkez, J. Kohrman-Glaser & K. Koehler, «Field and laboratory evaluations of the low-cost plantower particulate matter Sensor», *Environmental science technology*, vol. 53, 2, pp. 838-849, 2018.
- [57] J. Wang, Y. Wang, H. Liu, Y. Yang, X. Zhang, Y. Li, Y. Zhang & G. Deng, «Diagnostic identification of the impact of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations in Beijing», *Atmospheric environment*, vol. 81, pp. 158-165, 2013.
- [58] B. T. Ly, Y. Matsumi, T. V. Vu, K. Sekiguchi, T. T. Nguyen, C. T. Pham, T. D. Nghiem, I. H. Ngo, Y. Kurotsuchi, T. H. Nguyen & T. Nakayama, «The effects of meteorological conditions and long-range transport on PM_{2.5} levels in Hanoi revealed from multi-site measurement using compact sensors and machine learning approach», *Journal of Aerosol Science*, vol. 152, p. 105716, 2021.
- [59] Z. Chen, D. Chen, C. Zhao, M. P. Kwan, J. Cai, Y. Zhuang, B. Zhao, X. Wang, B. Chen, J. Yang, R. Li, B. He, B. Gao, K. Wang & B. Xu, «Influence of meteorological conditions on

PM2.5 concentrations across China: A review of methodology and mechanism», *Environment international*, vol. 139, p. 105558, 2020.

- [60] F. Y. Cheng & C. H. Hsu, «Long-term variations in PM2.5 concentrations under changing meteorological conditions in Taiwan», *Scientific reports*, vol. 9, 1, pp. 1-12, 2019.
- [61] W. J. Chi & Y. C. Lin, «Investigation of the main PM2.5 sources and diffusion patterns and corresponding meteorological conditions by the wavelet analysis approach», *Atmospheric Pollution Research*, vol. 12, 11, p. 101222, 2021.
- [62] M. Hu, Y. Wang, S. Wang, M. Jiao, G. Huang & B. Xia, «Spatial-temporal heterogeneity of air pollution and its relationship with meteorological factors in the Pearl River Delta, China», *Atmospheric Environment*, vol. 254, p. 118415, 2021.
- [63] J. He, S. Gong, H. Liu, X. An, Y. Yu, S. P. Zhao, L. Wu, C. B. Song, C. H. Zhou, J. Wang, C. M. Yin & L. Yu, «Influences of meteorological conditions on interannual variations of particulate matter pollution during winter in the Beijing–Tianjin–Hebei area», *Journal of Meteorological Research*, vol. 31, pp. 1062-1069, 2017.
- [64] J. Wang, X. Lu, Y. Yan, L. Zhou & W. Ma, «Spatiotemporal characteristics of PM2.5 concentration in the Yangtze River Delta urban agglomeration, China on the application of big data and wavelet analysis», *Science of The Total Environment*, vol. 724, p. 138134, 2020.
- [65] K. J. Maji & C. Sarkar, «Spatio-temporal variations and trends of major air pollutants in China during 2015–2018», *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, pp. 33792-33808, 2020.
- [66] C. Borrego, M. Coutinho, A. Costa, J. Ginja, C. Ribeiro, A. Monteiro, I. Ribeiro, J. Valente, J. Amorim, H. Martins, D. Lopes & A. Miranda, «Challenges for a new air quality directive: the role of monitoring and modelling techniques», *Urban climate*, vol. 14, pp. 328-341, 2015.
- [67] P. Kumar, A. N. Skouloudis, M. Bell, M. Viana, M. C. Carotta, G. Biskos & L. Morawska, «Real-time sensors for indoor air monitoring and challenges ahead in deploying them to urban buildings», *Science of the Total Environment*, vol. 560, pp. 150-159, 2016.
- [68] F. Borghi, A. Spinazzè, S. Rovelli, D. Campagnolo, L. Del Buono, A. Cattaneo & D. M. Cavallo, «Miniaturized monitors for assessment of exposure to air pollutants: A review», *International journal of environmental research and public health*, vol. 14, 8, p. 909, 2017.
- [69] A. L. Clements, W. G. Griswold, A. Rs, J. E. Johnston, M. M. Herting, J. Thorson, C.-O. A. & M. Hannigan, «Low-cost air quality monitoring tools: from research to practice (a workshop summary)», *Sensors*, 17(11), p. 2478, 2017.
- [70] G. R. McKercher, J. A. Salmond & J. K. Vanos, «Characteristics and applications of small, portable gaseous air pollution monitors», *Environmental Pollution*, vol. 223, pp. 102-110, 2017.

- [71] M. Jovašević-Stojanović, A. Bartonova, D. Topalović, I. Lazović, B. Pokrić & Z. Ristovski, «On the use of small and cheaper sensors and devices for indicative citizen-based monitoring of respirable particulate matter», *Environmental Pollution*, vol. 206, pp. 696-704, 2015.
- [72] R. Baron & J. Saffell, «Amperometric gas sensors as a low cost emerging technology platform for air quality monitoring applications: A review», *ACS sensors*, vol. 2, 11, pp. 1553-1566, 2017.
- [73] H. Hojajji, H. Kalantarian, A. A. Bui, C. E. King & M. Sarrafzadeh, «Temperature and humidity calibration of a low-cost wireless dust sensor for real-time monitoring», *In 2017 IEEE sensors applications symposium (SAS)*, pp. 1-6, 2017.
- [74] P. deSouza, V. Nthusi, W. Ho, J. Klopp, J. Saffell, R. Jones, B. Shaw & C. Ratti, «A Nairobi experiment in using low cost air quality monitors», *Clean Air Journal*, vol.27, 2, pp. 12-42, 2017.
- [75] L. Alphasense, «AAN_104.pdf», Alphasense Ltd, . Available: <https://www.gasdetectorsusa.com/gdusa/download/ElectrochemicalSensorOperation.pdf>.
- [76] S. V. Kumar, «Traffic Flow Prediction using Kalman Filtering Technique», *Procedia Engineering*, vol. 187, pp. 582-587, 2017.
- [77] M. Mastali, J. Vazquez-Arenas, R. Fraser, M. Fowler, S. Afshar & M. Stevens, «Battery state of the charge estimation using Kalman filtering», *Journal of Power Sources*, vol. 239, pp. 294-307, 2013.
- [78] R. Fitria & D. K. Arif, «State variable estimation of nonisothermal continuous stirred tank reactor using fuzzy kalman filter», *(IJCSAM) International Journal of Computing Science and Applied Mathematics*, vol. 3, 1, pp. 16-20, 2017.
- [79] T. Soubdhan, J. Ndong, H. Ould-Baba & M. T. Do, «A robust forecasting framework based on the Kalman filtering approach with a twofold parameter tuning procedure: Application to solar and photovoltaic prediction», *Solar Energy*, vol. 131, pp. 246-259, 2016.
- [80] D. K. Arif, D. Adzkiya, P. Aditya, F. Winata, D. Agustin, M. R. Habibi, A. Ririsati & R. Prasyanto, «Modeling of three-dimensional radar tracking system and its estimation using extended kalman filter», σε *In 2017 5th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA)*, IEEE, 2017.
- [81] A. Patton, A. Datta, M. L. Zamora, C. Buehler, F. Xiong, D. R. Gentner & K. Koehler, «Non-Linear Probabilistic Calibration of Low-Cost Environmental Air Pollution Sensor Networks for Neighborhood Level Spatiotemporal Exposure Assessment», *Journal of Exposure Science Environmental Epidemiology*, 2022.
- [82] J. P. Sá, H. Chojer, P. T. B. S. Branco, M. C. M. Alvim-Ferraz, F. G. Martins & S. I. V. Sousa, «Two Step Calibration Method for Ozone Low-Cost Sensor: Field Experiences with the UrbanSense DCUs», *Journal of Environmental Management*, vol. 328, p. 116910., 2023.

- [83] S. v. Ratingen, J. A. Vonk, C. Blokhuis, J. Wesseling, E. Tielemans & E. Weijers., «Seasonal Influence on the Performance of Low-Cost NO₂ Sensor Calibrations», *Sensors*, vol. 21, 23, p. 7919–7919, 2021.
- [84] K. Aula, E. Lagerspetz, P. Nurmi & S. Tarkoma, «Evaluation of Low-Cost Air Quality Sensor Calibration Models», *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2022.
- [85] D. Suriano & M. Penza, «Assessment of the Performance of a Low-Cost Air Quality Monitor in an Indoor Environment through Different Calibration Models», *Atmosphere*, vol. 13, 4, p. 567, 2022.
- [86] R. R. Kureshi, B. K. Mishra, D. Thakker, R. John, A. Walker, S. Simpson, N. Thakkar & A. K. Wante, «Data-Driven Techniques for Low-Cost Sensor Selection and Calibration for the Use Case of Air Quality Monitoring», *Sensors*, vol. 22, 3, p. 1093, 2022.
- [87] A. Lewis, W. R. Peltier & E. von Schneidemesser, «Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications», World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2018.
- [88] M. Jerrett, D. Donaire-Gonzalez, O. Popoola, R. Jones, R. C. Cohen, E. Almanza, A. De Nazelle, I. Mead, G. Carrasco-Turigas, T. Cole-Hunter, M. Triguero-Mas, E. Seto & M. Nieuwenhuijsen, «Validating novel air pollution sensors to improve exposure estimates for epidemiological analyses and citizen science», *Environmental research*, vol. 158, pp. 286-294, 2017.
- [89] L. D'Alvia, E. Palermo & Z. Del Prete, «Validation and application of a novel solution for environmental monitoring: A three months study at “Minerva Medica” archaeological site in Rome», *Measurement*, vol. 129, pp. 31-36, 2018.
- [90] A. C. Lewis, J. D. Lee, P. M. Edwards, M. D. Shaw, M. J. Evans, S. J. Moller, K. R. Smith, J. W. Buckley, M. Ellis, S. R. Gillot & A. White, «Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research», *Faraday discussions*, vol. 189, pp. 85-103, 2016.
- [91] R. Williams, V. Kilaru, E. Snyder, A. Kaufman, T. Dye, A. Rutter, A. Russell & H. Hafner, «Air Sensor Guidebook», Environmental Protection Agency, US, 2014.
- [92] M. Gerboles, L. Spinelle & A. Borowiak, «Measuring air pollution with low-cost sensors. Thoughts on the Quality of Data Measured by Sensors», European Commission: Ispra, Italy, 2017.
- [93] C. Borrego, A. M. Costa, J. Ginja, M. Amorim, M. Coutinho, K. Karatzas & M. Penza, «Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise», *Atmospheric Environment*, 147, pp. 246-263, 2016.
- [94] M. Mueller, J. Meyer & C. Hueglin, «Design of an ozone and nitrogen dioxide sensor unit and its long-term operation within a sensor network in the city of Zurich», *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 10, 10, pp. 3783-3799, 2017.

- [95] A. Surgaylo, *Master's Thesis, Development of a Measurement Platform by Using Low-Cost Air Quality Sensors for Air Quality Measurements*, Stuttgart, Germany, 2018: University of Stuttgart, 2018.
- [96] X. Pang, M. Shaw, S. Gillot & A. Lewis, «The impacts of water vapour and co-pollutants on the performance of elec-trochemical gas sensors used for air quality monitoring», *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 266, p. 674–684, 2018.
- [97] G. Solis, *Master's Thesis Test and Analysis of Key Factors that Can Affect the Reliability of Results Obtained from Low-Cost Sensors for Outdoor Air Quality Measurements*, Stuttgart, Germany: University of Stuttgart, 2019.
- [98] D. E. Williams, «Electrochemical sensors for environmental gas analysis», *Current Opinion in Electrochemistry*, vol. 22, pp. 145-153, 2020.
- [99] A. K. Farquhar, G. S. Henshaw & D. E. Williams, «Understanding and correcting unwanted influences on the signal from electrochemical gas sensors», *ACS sensors*, vol. 6, 3, pp. 1295-1304, 2021.
- [100] A. Gonzalez, A. Boies, J. Swason & D. Kittelson, «Field calibration of low-cost air pollution sensors», *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, pp. 1-17, 2019.
- [101] S. Munir, M. Mayfield, D. Coca & S. A. Jubb, «Structuring an integrated air quality monitoring network in large urban areas—Discussing the purpose, criteria and deployment strategy» *Atmospheric Environment: X*, vol. 2, p. 100027, 2019.
- [102] L. Spinelle, M. Gerboles, M. G. Villani, M. Aleixandre & F. Bonavitacola, «Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. Part A: Ozone and nitrogen dioxide», *Sensors and Actuators B: Chemical*, 215, pp. 249-257, 2015.
- [103] A. Kumar, H. Kim & G. P. Hancke, «Environmental monitoring systems: A review», *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, 4, pp. 1329-1339, 2012.
- [104] U. Guth, W. Vonau, W. Oelßner, L. Moretto & K. Kalcher, «(eds) Environmental Analysis by Electro-chemical Sensors and Biosensors», *Gas Sensors*, New York, Springer, 2014, pp. 569-580.
- [105] D. K. Deshmukh, Y. I. Tsai, M. K. Deb & P. Zarmas, «Characteristics and sources of water-soluble ionic species associated with PM10 particles in the ambient air of central India», *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 89(5), pp. 1091-1097, 2012.
- [106] «European Environment Agency» . Available: <https://www.eea.europa.eu/el/themes/air/intro>. [Accessed 17-12-2022].
- [107] Z. J. Andersen, L. C. Kristiansen, K. K. Andersen, T. S. Olsen, M. Hvidberg, S. S. Jensen, M. Ketzel, S. Loft, M. Sorensen, A. Tjonneland, K. Overvad & O. Raaschou-Nielsen, «Stroke and long-term exposure to outdoor air pollution from nitrogen dioxide: a cohort study», *Stroke*, 43(2), pp. 320-325, 2012.

- [108] R. D. Brook, S. Rajagopalan, C. A. Pope III, J. R. Brook, A. Bhatnagar, A. V. Diez-Roux & J. D. Kaufman, «Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association», *Circulation*, 121(21), pp. 2331-2378, 2010.
- [109] M. Goldberg, «A systematic review of the relation between long-term exposure to ambient air pollution and chronic diseases», *Reviews on environmental health*, 23(4), pp. 243-298, 2008.
- [110] Z. J. Andersen, K. Bønnelykke, M. Hvidberg, S. S. Jensen, M. Ketzel, S. Loft & O. Raaschou-Nielsen, «Long-term exposure to air pollution and asthma hospitalisations in older adults: a cohort study», *Thorax*, 67(1), pp. 6-11, 2012.
- [111] Z. J. Andersen, M. Hvidberg, S. S. Jensen, M. Ketzel, S. Loft, M. Sørensen & O. Raaschou-Nielsen, «Chronic obstructive pulmonary disease and long-term exposure to traffic-related air pollution: a cohort study», *American journal of respiratory and critical care medicine*, 183(4), pp. 455-461, 2011.
- [112] U. Gehring, A. H. Wijga, M. Brauer, P. Fischer, J. C. de Jongste, M. Kerkhof & B. Brunekreef, «Traffic-related air pollution and the development of asthma and allergies during the first 8 years of life», *American journal of respiratory and critical care medicine*, 181(6), pp. 596-603, 2010.
- [113] M. Zhou, Y. Liu, L. Wang, X. Kuang, X. Xu & H. Kan, «Particulate air pollution and mortality in a cohort of Chinese men», *Environmental Pollution*, 186, pp. 1-6, 2014.
- [114] O. Raaschou-Nielsen, Z. J. Andersen, M. Hvidberg, S. S. Jensen, M. Ketzel, M. Sørensen & A. Tjønneland, «Air pollution from traffic and cancer incidence: a Danish cohort study», *Environmental Health*, 10(1), pp. 1-11, 2011.
- [115] E. M. Saber & G. Heydari, «Flow patterns and deposition fraction of particles in the range of 0.1–10 μm at trachea and the first third generations under different breathing conditions», *Computers in biology and medicine*, 42(5), pp. 631-638., 2012.
- [116] M. Hadei, S. S. H. Nazari, M. Yarahmadi, M. Kermani, M. Farhadi & A. Shahsavani, «Estimation of gender-specific lung cancer deaths due to exposure to PM_{2.5} in 10 cities of Iran during 2013-2016: A modeling approach», *International journal of cancer management*, 10(8), 2017.
- [117] I. Bos, P. De Boever, I. P. L. & R. Meeusen, «Physical activity, air pollution and the brain», *Sports Medicine*, 44(11), pp. 1505-1518, 2014.
- [118] H. E. Volk, F. Lurmann, B. Penfold, I. Hertz-Picciotto & R. McConnell, «Traffic-related air pollution, particulate matter, and autism», *JAMA psychiatry*, 70(1), pp. 71-77, 2013.
- [119] X. Zhang, X. Chen & X. Zhang, «The impact of exposure to air pollution on cognitive performance», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(37), pp. 9193-9197, 2018.

- [120] O. OCDE, «Economic consequences of outdoor air pollution», *Organisation for Economic Co-operation and Development.*, 2016.
- [121] A. Lewis & P. Edwards, «Validate personal air-pollution sensors», *Nature*, 535(7610), pp. 29-31, 2016.
- [122] «European Parliament» . Available: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/el/sheet/75/luchtvervuiling-en-geluidshinder>. [Accessed 17-12-2022].
- [123] «Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας» . Available: <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/nomothesia/>. [Accessed 17-12-2022].
- [124] «Οδηγία 2008/50/EK» . Available: https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/legacy/Files/Perivallon/Poiotita%20Atmosfairas/Nomothesia/FEK488B_KYA14122.pdf. [Accessed 17-12-2022].
- [125] «Οδηγία 2004/107/EK» . Available: https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/legacy/Files/Perivallon/Poiotita%20Atmosfairas/Nomothesia/FEK920B_KYA22306.pdf. [Accessed 17-12-2022].
- [126] «Οδηγία 2015/1480/EK» . Available: https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/legacy/Files/Perivallon/Poiotita%20Atmosfairas/Nomothesia/FEK1311B_KYA174505.pdf. [Accessed 17-12-2022].
- [127] «KYA 70601» . Available: https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/legacy/Files/Perivallon/Poiotita%20Atmosfairas/Nomothesia/FEK3272B_KYA70601.pdf. [Accessed 17-12-2022].
- [128] «K.Y.A 11824» . Available: https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/legacy/Files/Perivallon/Poiotita%20Atmosfairas/Nomothesia/FEK369B_KYA11824.pdf. [Accessed 17-12-2022].
- [129] M. Shao, Y. Zhang, L. Zeng, X. Tang, J. Zhang, L. Zhong & B. Wang, «Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production», *Journal of Environmental Management*, 90(1), pp. 512-518, 2009.
- [130] N. Uysal & R. M. Schapira, «Effects of ozone on lung function and lung diseases», *Current opinion in pulmonary medicine*, 9(2), pp. 144-150, 2003.
- [131] Care, process, Model & (CPM)., «Outdoor Air Quality and Health» . Available: <https://intermountainhealthcare.org/ext/>. [Accessed 17-12-2022].
- [132] E. J. Dunlea, S. C. Herndon, D. D. Nelson, R. M. Volkamer, F. San Martini, P. M. Sheehy, M. S. Zahniser, J. H. Shorter, J. C. Wormhoudt, B. K. Lamb, E. J. Allwine, J. S. Gaffney, N. A. Marley, M. Grutter, C. Marquez & M. M. J. Blanco, «Evaluation of nitrogen dioxide chemiluminescence monitors in a polluted urban environment», *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(10), pp. 2691-2704, 2007.

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων

- [133] J. Yin & R. M. Harrison, «Pragmatic mass closure study for PM_{1.0}, PM_{2.5} and PM₁₀ at roadside, urban background and rural sites», *Atmospheric Environment*, 42(5), pp. 980-988, 2008.
- [134] D. P. Chock, «An advection-diffusion model for pollutant dispersion near roadways», *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 17(7), p. 1978, 976-989.
- [135] J. G. Wagner, A. S. Kamal, M. Morishita, J. T. Dvonch, J. R. Harkema & A. C. Rohr, « PM_{2.5}-induced cardiovascular dysregulation in rats is associated with elemental carbon and temperature-resolved carbon subfractions», *Particle and fibre toxicology*, 11(1), pp. 1-10, 2014.
- [136] C. Ehrlich, G. Noll, W. D. Kalkoff, G. Baumbach & A. Dreiseidler, « PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0}—emissions from industrial plants—results from measurement programmes in Germany», *Atmospheric Environment*, 41(29), pp. 6236-6254, 2007.
- [137] J. Lelieveld, J. S. Evans, M. Fnais, D. Giannadaki & A. Pozzer, « The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale», *Nature*, 525(7569), pp. 367-371, 2015.
- [138] «EU clean air policy» . Available: https://environment.ec.europa.eu/topics/air_en. [Accessed 17-12-2022].
- [139] «WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide» . Available: http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf;jsessionid=992C8E634E68034B0FE2DDAB76EEDCF7?sequence=1. [Accessed 17-12-2022].
- [140] F. Concas, J. Mineraud, E. Lagerspetz, S. Varjonen, X. Liu, K. Puolamäki, P. Nurmi & S. Tarkoma, «Low-cost outdoor air quality monitoring and sensor calibration: A survey and critical analysis», *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 17(2), pp. 1-44, 2021.
- [141] L. Spinelle, M. Aleixandre & M. Gerboles, « Protocol of evaluation and calibration of low-cost gas sensors for the monitoring of air pollution», *Publication Office of the European Union, Luxembourg.*, 2013.
- [142] O. A. Popoola, G. B. Stewart, M. I. Mead & R. L. Jones, «Development of a baseline-temperature correction methodology for electrochemical sensors and its implications for long-term stability», *Atmospheric environment*, 147, pp. 330-343, 2016.
- [143] J. G. Watson, G. Thurston, N. Frank, J. P. Lodge Jr, R. W. Wiener, F. F. McElroy, N. T. Kleinman, P. K. Mueller, A. C. Schmidt MS, F. W. Lipfert, R. J. Thompson, P. K. Dasgupta, D. Marrack MD, R. A. Michaels, T. Moore, S. Penkala, I. Tomback, L. Vestman, T. Hauser & J. C. Chow, «Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles», *Journal of the air Waste Management Association*, 45(9), pp. 666-684, 1995.

- [144] L. Spinelle, M. Gerboles, M. G. Villani, M. Aleixandre & F. Bonavitacola, «Field calibration of a cluster of low-cost commercially available sensors for air quality monitoring. Part B: NO, CO and CO₂», *Sensors and Actuators B: Chemical*, 238, pp. 706-715, 2017.
- [145] N. Zikova, P. K. Hopke & A. R. Ferro, « Evaluation of new low-cost particle monitors for PM_{2.5} concentrations measurements», *Journal of Aerosol Science*, 105, pp. 24-34, 2017.
- [146] O. A. Popoola, D. Carruthers, C. Lad, V. B. Bright, M. I. Mead, M. E. Stettler, J. R. Saffell & R. L. Jones, «Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings», *Atmospheric Environment*, 194,, pp. 58-70, 2018.
- [147] I. Heimann, V. B. Bright, M. W. McLeod, M. I. Mead, O. A. M. Popoola, G. B. Stewart & R. L. Jones, «Source attribution of air pollution by spatial scale separation using high spatial density networks of low cost air quality sensors», *Atmospheric Environment*, 113, pp. 10-19, 2015.
- [148] S. Munir, M. Mayfield, D. Coca, S. A. Jubb & O. Osammor, «Analysing the performance of low-cost air quality sensors, their drivers, relative benefits and calibration in cities—A case study in Sheffield», *Environmental monitoring and assessment*, 191(2), pp. 1-22, 2019.
- [149] F. E. Ahangar, F. R. Freedman & A. Venkatram, «Using low-cost air quality sensor networks to improve the spatial and temporal resolution of concentration maps», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(7), p. 1252, 2019.
- [150] P. Schneider, N. Castell, M. Vogt, F. R. Dauge, W. A. Lahoz & A. Bartonova, «Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information», *Environment international*, 106, pp. 234-247, 2017.
- [151] L. Chatzidiakou, A. Krause, O. A. Popoola, A. Di Antonio, M. Kellaway, Y. Han & R. L. Jones, «Characterising low-cost sensors in highly portable platforms to quantify personal exposure in diverse environments», *Atmospheric measurement techniques*, 12(8), pp. 4643-4657, 2019.
- [152] J. E. Thompson, «Crowd-sourced air quality studies: A review of the literature portable sensors», *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 11,, pp. 23-34, 2016.
- [153] A. Collier-Oxandale, B. Feenstra, V. Papapostolou, H. Zhang, M. Kuang, B. Der Boghossian & A. Polidori, «Field and laboratory performance evaluations of 28 gas-phase air quality sensors by the AQ-SPEC program», *Atmospheric Environment*, 220, p. 117092, 2020.
- [154] A. Mukherjee, L. G. Stanton, A. R. Graham & P. T. Roberts, «Assessing the utility of low-cost particulate matter sensors over a 12-week period in the Cuyama valley of California», *Sensors*, 17(8), p. 1805, 2017.
- [155] R. Piedrahita, Y. Xiang, N. Masson, J. Ortega, A. Collier, Y. Jiang & L. Shang, «. The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring», *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(10), pp. 3325-3336, 2014.

- [156] W. Y. Yi, K. M. Lo, T. Mak, K. S. Leung, Y. Leung & M. L. Meng, «A survey of wireless sensor network based air pollution monitoring systems», *Sensors*, *15*(12), pp. 31392-31427, 2015.
- [157] S. De Vito, E. Massera, M. Piga, L. Martinotto & G. Di Francia, «On field calibration of an electronic nose for benzene estimation in an urban pollution monitoring scenario», *Sensors and Actuators B: Chemical*, *129*(2), pp. 750-757, 2008.
- [158] S. De Vito, M. Piga, L. Martinotto & G. Di Francia, «CO, NO₂ and NO_x urban pollution monitoring with on-field calibrated electronic nose by automatic bayesian regularization», *Sensors and Actuators B: Chemical*, *143*(1), pp. 182-191, 2009.
- [159] D. Hasenfratz, O. Saukh & L. Thiele, «On-the-fly calibration of low-cost gas sensors», *European Conference on Wireless Sensor Networks Springer*, 2012.
- [160] D. Oletic & V. Bilas, «Design of sensor node for air quality crowdsensing», *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, pp. 1-5, 2015.
- [161] R. Piedrahita, Y. Xiang, N. Masson, J. Ortega, A. Collier, Y. Jiang & L. Shang, «The next generation of low-cost personal air quality sensors for quantitative exposure monitoring», *Atmospheric Measurement Techniques*, *7*(10), pp. 3325-3336, 2014.
- [162] Ö. Örnek & B. Karlik, «An overview of metal oxide semiconducting sensors in electronic nose applications», *Proc. of the 3rd International Symposium on Sustainable Development*, vol. 2, pp. 506-515, 2012.
- [163] P. Pickering, S. Tewari & C. Twanow, «Metal Oxide Gas Sensing Material and MEMS Process», FierceElectronics, . Available: <https://www.fierceelectronics.com/components/metal-oxide-gas-sensing-material-and-mems-process..> [Accessed 12-4-2024].
- [164] C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang & R. Gao, «Metal oxide gas sensors: Sensitivity and influencing factors», *sensors*, *10*(3), pp. 2088-2106, 2010.
- [165] N. Masson, R. Piedrahita & M. Hannigan, «Approach for quantification of metal oxide type semiconductor gas sensors used for ambient air quality monitoring», *Sensors and Actuators B: Chemical*, *208*, pp. 339-345, 2015.
- [166] W. Tsujita, A. Yoshino, H. Ishida & T. Moriizumi, «Gas sensor network for air-pollution monitoring», *Sensors and Actuators B: Chemical*, *110*(2), pp. 304-311, 2005.
- [167] A. C. Romain & J. Nicolas, « Long term stability of metal oxide-based gas sensors for e-nose environmental applications: An overview», *Sensors and Actuators B: Chemical*, *146*(2), pp. 502-506, 2010.
- [168] J. H. Sohn, M. Atzeni, L. Zeller & G. Pioggia, «Characterisation of humidity dependence of a metal oxide semiconductor sensor array using partial least squares», *Sensors and Actuators B: Chemical*, *131*(1), pp. 230-235, 2008.

- [169] D. Hasenfratz, O. Saukh, S. Sturzenegger & L. Thiele, «Participatory air pollution monitoring using smartphones», *Mobile Sensing*, 1, pp. 1-5, 2012.
- [170] J. Burgués & S. Marco, «Low power operation of temperature-modulated metal oxide semiconductor gas sensors», *Sensors*, 18(2), p. 339, 2018.
- [171] A. A. Vasiliev, A. E. Varfolomeev, I. A. Volkov, N. P. Simonenko, P. V. Arsenov, I. S. Vlasov & T. Maeder, «Reducing humidity response of gas sensors for medical applications: Use of spark discharge synthesis of metal oxide nanoparticles», *Sensors*, 18(8), p. 2600, 2018.
- [172] E. Esposito, S. De Vito, M. Salvato, V. Bright, R. L. Jones & O. Popoola, «Dynamic neural network architectures for on field stochastic calibration of indicative low cost air quality sensing systems», *Sensors and Actuators B: Chemical*, 231, pp. 701-713, 2016.
- [173] K. Hu, V. Sivaraman, H. Bhugubanda, S. Kang & A. Rahman, «SVR based dense air pollution estimation model using static and wireless sensor network», *IEEE SENSORS*, pp. 1-3, 2016.
- [174] N. Nikzad, N. Verma, C. Ziftci, E. Bales, N. Quick, P. Zappi & W. G. Griswold, «Citisense: Improving geospatial environmental assessment of air quality using a wireless personal exposure monitoring system», *Proceedings of the conference on Wireless Health*, 2012.
- [175] O. Saukh, D. Hasenfratz & L. Thiele, «Reducing multi-hop calibration errors in large-scale mobile sensor networks», *Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 2015.
- [176] N. Zimmerman, A. A. Presto, S. P. Kumar, J. Gu, A. Haurlyuk, E. S. Robinson & R. Subramanian, « A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring», *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(1), pp. 291-313, 2018.
- [177] c. m. Cost-effective electrochemical sensor for oxygen, «Cost-effective electrochemical sensor for oxygen, carbon monoxide», Nano Environmental Technology S.r.l., . Available: <https://www.nenvitech.com/products/electrochemical-cells/safety-line/>. [Accessed 12-4-2024].
- [178] C. G. S. C. U. N. I. (. |. A. Devices, «Complete Gas Sensor Circuit Using Nondispersive Infrared (NDIR) | Analog Devices» Analog.com, . Available: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/complete-gas-sensor-circuit-using-nondispersive-infrared.html>. [Accessed 12-4-2024].
- [179] T. V. Dinh, I. Y. Choi, Y. S. Son & J. C. Kim, «A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction», *Sensors and Actuators B: Chemical*, 231, pp. 529-538, 2016.
- [180] D. W. -. D. Master, «PID sensors | Draeger» Draeger.Web WWW - Draeger Master. Available: www.draeger.com. https://www.draeger.com/en_seeur/Products/PID-sensors. [Accessed 12-4-2024].

- [181] S. O. Agbroko & J. Covington, «A novel, low-cost, portable PID sensor for the detection of volatile organic compounds», *Sensors and Actuators B: Chemical*, 275, pp. 10-15, 2018.
- [182] M. Aleixandre & M. Gerboles, «Review of small commercial sensors for indicative monitoring of ambient gas», *Chem. Eng. Trans*, 30, 2012.
- [183] L. Spinelle, M. Gerboles, G. Kok, S. Persijn & T. Sauerwald, «Review of portable and low-cost sensors for the ambient air monitoring of benzene and other volatile organic compounds», *Sensors*, 17(7), p. 1520, 2017.
- [184] A. S. Mihăiță, L. Dupont, O. Chery, M. Camargo & C. Cai, «Evaluating air quality by combining stationary, smart mobile pollution monitoring and data-driven modelling», *Journal of cleaner production*, 221, pp. 398-418, 2019.
- [185] M. I. Mead, O. A. M. Popoola, G. B. Stewart, P. Landshoff, M. Calleja, M. Hayes & R. L. Jones, «The use of electrochemical sensors for monitoring urban air quality in low-cost, high-density networks», *Atmospheric Environment*, 70, pp. 186-203, 2013.
- [186] J. R. Stetter & J. Li, «Amperometric gas sensors a review», *Chemical reviews*, 108(2), pp. 352-366, 2008.
- [187] A. J. Bard, L. R. Faulkner & H. S. White, «Electrochemical methods: fundamentals and applications», *John Wiley Sons*, 2022.
- [188] Z. Yong & Z. Haoxin, «Digital universal particle concentration sensor pms5003 series data manual», *Plantower: Beijing, China.*, 2016.
- [189] Y. Eremin, «SCATTERING | Scattering Theory», *Encyclopedia of Modern Optics*, Elsevier, 2005, pp. 326-330.
- [190] «PTQ3004-2015 PMS5003 series data manual English_SLT_V1.0K» Plantower, . Available: https://docs.smartcitizen.me/assets/datasheets/pms5003/PTQ3004-2015%20PMS5003%20series%20data%20manual%20English_SLT_V1.0K.pdf. [Accessed 14-2-2024].
- [191] STMicroelectronic, «NUCLEO-F091RC - STM32 Nucleo-64 development board with STM32F091RC MCU, supports Arduino and ST morpho connectivity - STMicroelectronics» . Available: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f091rc.html>. [Accessed 15-6-2023].
- [192] U. Alphasense, «Gas Sensors Air Quality Monitors» . Available: https://ametekcdn.azureedge.net/mediafiles/project/oneweb/oneweb/alphasense/products/datasheets/alphasense_ox-b431_datasheet_en_1.pdf?revision:afe72812-8a0a-4a30-8e56-1b7047c532ab. [Accessed 1-2-2023].
- [193] «Individual Sensor Board (ISB)» Alphasense . Available: https://ametekcdn.azureedge.net/mediafiles/project/oneweb/oneweb/alphasense/products/datasheets/alphasense_isb_datasheet_en_1.pdf?revision:fc527d7-05eb-47a9-b934-203c179c4d90. [Accessed 1-2-2023].

- [194] Alphasense. UK, «Gas Sensors Air Quality Monitors» . Available:
https://ametekcdn.azureedge.net/mediafiles/project/oneweb/oneweb/alphasense/products/datasheets/alphasense_no2-b43f_datasheet_en_1.pdf?revision:95cdfc22-824f-482a-b26d-d7f2f4688ea8. [Accessed 1-2-2023].
- [195] «PMS5003---Laser PM2.5 sensor», Plantower Technology. Available:
https://www.plantower.com/en/products_33/74.html. [Accessed 1-2-2023].
- [196] «BME280 Integrated Environmental Unit», Bosch sensortec. Available:
https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product_flyer/bst-bme280-fl000.pdf. [Accessed 1-2-2023].
- [197] «Breakout Board for Micro SD Card Mini». Available: https://grobotronics.com/breakout-board-for-micro-sd-card-mini.html?gad_source=1&clid=Cj0KCQiA5rGuBhCnARIsAN11vgTu-H0YoKMhtGKvDjYl0VQSDkMloBofmzTRJSKU-iErG6XQto82TG4aAjVrEALw_wcB. [Accessed 14-2-2024].
- [198] grobotronics.com, «ESP8266 WiFi Module». Available:
<https://grobotronics.com/esp8266-wifi-module.html>. [Accessed 14-2-2024].
- [199] <https://wirelesslan.gr>, «SIM808 Module GSM/GPRS/GPS 3G SHIELD». Available:
<https://wirelesslan.gr/product/sim808-module-gsm-gprs-gps-3g-shield/>. [Accessed 14-2-2024].
- [200] <https://circuit.rocks>, «GPS NEO6MV2 Flight Control Module». Available:
<https://circuit.rocks/products/gps-neo6mv2-flight-control-module>. [Accessed 14-2-2024].
- [201] <https://www.elecrow.com>, «Mini Solar/Lipo Charger Board». Available:
<https://www.elecrow.com/mini-solar-lipo-charger-board.html>. [Accessed 14-2-2024].
- [202] I. Christakis, G. Hloupis, I. Stavrakas, O. Tsakiridis, «Low cost sensor implementation and evaluation for measuring NO₂ and O₃ pollutants», *In 2020 9th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST) (pp. 1-4). IEEE., 2020.*
- [203] T. Migos, I. Christakis, K. Moutzouris, I. Stavrakas, «On the evaluation of low-cost PM sensors for air quality estimation», *In 2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST) (pp. 1-4). IEEE., 2019.*
- [204] I. Christakis, K. Moutzouris, O. Tsakiridis, I. Stavrakas, «Barometric Pressure as a correction factor for low-cost particulate matter sensors», *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1123, No. 1, p. 012068). IOP Publishing., 2022.*
- [205] I. Christakis, O. Tsakiridis, I. Stavrakas, «Optimization of low cost gas sensor measurements using FIR filter approach», *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022.*
- [206] I. Christakis, O. Tsakiridis, D. Kandris & I. Stavrakas, «A Kalman Filter Scheme for the Optimization of Low-Cost Gas Sensor Measurements», *Electronics*, vol. 13, 25, 2024.

- [207] I. Christakis, E. Sarri, O. Tsakiridis, I. Stavrakas, « Identification of the Safe Variation Limits for the Optimization of the Measurements in Low-Cost Electrochemical Air Quality Sensors», *Electrochem*, vol. 5, 1, 2024.
- [208] «Alphasense UK: Gas Sensors Air Quality Monitors», Alphasense. Available: <https://www.alphasense.com/>. [Accessed 1-2-2023].
- [209] S. Moltchanov, I. Levy, Y. Etzion, U. Lerner, D. M. Broday, B. Fishbain, «On the feasibility of measuring urban air pollution by wireless distributed sensor networks», *Science of The Total Environment*, vol. 502, pp. 537-547, 2015.
- [210] J. McClellan T. Parks, «A unified approach to the design of optimum FIR linear-phase digital filters», *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 20(6), 697-701., vol. 20, 6, pp. 697-701, 1973.
- [211] H.-S. Kim, L. Zhang, A. Bienkowski K. R. Pattipati, «A Single-Pass Noise Covariance Estimation Algorithm in Adaptive Kalman Filtering for Non-Stationary Systems», *IEEE 24th International Conference on Information Fusion (FUSION)*., 2021.
- [212] V. Gómez A. Maravall, «Estimation, Prediction, and Interpolation for Nonstationary Series with the Kalman Filter», *Journal of the American Statistical Association*, vol. 89, 426, pp. 611-624, 1994.
- [213] C. Cheng, A. Sa-ngasoongsong, O. F. Beyca, T. Le, H. Yang, Z. Kong & S.T.S. Bukkapatnam, «Time Series Forecasting for Nonlinear and Non-Stationary Processes: A Review and Comparative Study», *IIE Transactions*, vol. 47, 10, pp. 1053-1071, 2010.
- [214] R. E. Kalman, «A new approach to linear filtering and prediction problems», *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, 1, pp. 35-45, 1960.
- [215] S. Hua, S. Wang, S. Jin, S. Feng B. Wang, «Wind speed optimisation method of numerical prediction for wind farm based on Kalman filter method», *The Journal of Engineering*, vol. 13, pp. 1146-1149, 2017.
- [216] E. Apriliani, D. K. Arif B. A. Sanjoyo, «The square root ensemble Kalman filter to estimate the concentration of air pollution», *IEEE, international conference on mathematical application in engineering (ICMAE'10)*, kuala lumpur, Malaysia, 2010.
- [217] X. Lai, T. Yang, Z. Wang P. Chen, «IoT Implementation of Kalman Filter to Improve Accuracy of Air Quality Monitoring and Prediction», *Applied Sciences*, vol. 9, 9, p. 1831, 2019.
- [218] S. Metia, S. D. Oduro, Q. P. Ha, H. Duc M. Azzi, «Environmental time series analysis and estimation with extended kalman filtering», *1st International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation*, 2013.
- [219] G. Galanis, P. Louka, P. Katsafados, I. Pytharoulis G. Kallos, «Applications of Kalman filters based on non-linear functions to numerical weather predictions», *In Annales geophysicae*, vol. 24, 10, pp. 2451-2460, 2006.

- [220] A. Achar, D. Bharathi, B. A. Kumar L. Vanajakshi, «Bus arrival time prediction: A spatial Kalman filter approach», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, 3, pp. 1298-1307, 2019.
- [221] D. P. Leleux, R. Claps, W. Chen, F. K. Tittel T. L. Harman, «Applications of Kalman filtering to real-time trace gas concentration measurements», *Applied Physics B*, vol. 74, pp. 85-93, 2002.
- [222] K. De Ridder, U. Kumar, D. Lauwaet, L. Blyth W. Lefebvre, «Kalman filter-based air quality forecast adjustment», *Atmospheric Environment*, vol. 50, pp. 381-384, 2012.
- [223] R. Vadivelu, G. Santhakumar, V. P. Boopana, S. Dharani, S. D. Bharathi D. Balasubramaniam, «Improved Air Quality Testing Using Kalman Filter Based on IoT Data Fusion for Smart Cities», *In Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1916, 1, p. 012114, 2021.
- [224] J. Li, A. Hauryliuk, C. Malings, S. R. Eilenberg, R. Subramanian A. A. Presto, «Characterizing the aging of Alphasense NO₂ sensors in long-term field deployments», *ACS sensors*, vol. 6, 8, pp. 2952-2959, 2021.
- [225] I. Christakis, O. Tsakiridis, D. Kandris I. Stavrakas, « Air Pollution Monitoring via Wireless Sensor Networks: The Investigation and Correction of the Aging Behavior of Electrochemical Gaseous Pollutant Sensors», *Electronics*, vol. 12, 8, 2023.
- [226] Luftqualität, «Stadt Zürich,». Available: <https://zueriluft.ch/makezurich/AAN803.pdf>. [Accessed 1-2-2023].
- [227] I. Christakis, G. Hloupis, O. Tsakiridis I. Stavrakas, «Integrated open source air quality monitoring platform», *In 2022 11th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST, 2022)*.
- [228] T. Owczarek, M. Rogulski A. Badyda, «Preliminary comparative assessment and elements of equivalence of air pollution measurement results of portable monitoring stations with using stochastic models», *In E3S Web of Conferences (Vol. 28, p. 01028)*. EDP Sciences., 2018.
- [229] H. Kim, M. Müller, S. Henne C. Hüglin, «Long-term behavior and stability of calibration models for NO and NO₂ low-cost sensors», *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(9), pp. 2979-2992, 2022.
- [230] P. deSouza, V. Nthusi, W. Ho, J. Klopp, J. Saffell, R. Jones, B. Swaw C. Ratti, «A Nairobi experiment in using low cost air quality monitors», *Clean Air Journal= Tydskrif vir Skoon Lug*, vol. 27, 2, pp. 12-42, 2017.
- [231] K. Farmer, «InfluxData» InfluxData. Available: <https://www.influxdata.com>. [Accessed 30-1-2024].

Συστήματα μέτρησης και παρακολούθησης περιβαλλοντικών ρύπων με τη χρήση τεχνολογίας Διαδικτύου των Πραγμάτων