



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**«Προσδιορισμός Ποιότητας της Ατμόσφαιρας και Θερμικής Άνεσης, σε
Εσωτερικούς και Εξωτερικούς Χώρους»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Νικολάκου Μαρίτας-Λουΐζας

A.M.: 51204524

Επιβλέπων:

Δρ Σπυρόπουλος Γεώργιος

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

«Air Quality and Thermal Comfort Determination, Indoors and Outdoors»

DIPLOMA THESIS

by

Nikolakou Marita-Louiza

Student ID: 51204524

Supervisor:

Dr. Spyropoulos Georgios

Athens, October 2024

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

<i>Δρ Γεώργιος Σπυρόπουλος ΕΔΙΠ</i>	<i>Δρ Κωνσταντίνος Μουστρής Καθηγητής</i>	<i>Δρ Δημήτριος Ζαφειράκης Επίκουρος Καθηγητής</i>
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και ΝΙΚΟΛΑΚΟΥ ΜΑΡΙΤΑ-ΛΟΥΪΖΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2024

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 ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη ΜΑΡΙΤΑ-ΛΟΥΪΖΑ ΝΙΚΟΛΑΟΥ του ΠΑΥΛΟΥ, με αριθμό μητρώου 51204524 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

Η Δηλούσα



ΝΙΚΟΛΑΚΟΥ ΜΑΡΙΤΑ-ΛΟΥΪΖΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία, έγινε απόπειρα προσδιορισμού της ποιότητας της ατμόσφαιρας και της θερμικής άνεσης, σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Για την επίτευξη της μελέτης έγινε χρήση μετρήσεων από τρεις αισθητήρες χαμηλού κόστους PurpleAir σε δύο διαφορετικές περιοχές της Αθήνας. Οι δύο εκ των τριών αισθητήρων βρίσκονται σε διαμέρισμα στην Ακαδημία Πλάτωνος, ο ένας εσωτερικά του διαμερίσματος και ο άλλος εξωτερικά, ενώ ο τρίτος αισθητήρας είναι εξωτερικός και βρίσκεται σε διαμέρισμα στην περιοχή του Ηρακλείου, Αττικής. Οι μετρήσεις με τις οποίες έγινε η μελέτη της Διπλωματικής εργασίας είναι περίπου 2 χρόνων. Πιο συγκεκριμένα, η χρονοσειρά αναφοράς είναι από τον Απρίλιο του 2021 έως και τον Μάρτιο του 2023. Η επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να εκμαιευτούν όσο το δυνατόν πιο εμπειριστατωμένα συμπεράσματα για την διακύμανση του ρύπου $PM_{2.5}$, την εικόνα της ποιότητας της ατμόσφαιρας με τη βοήθεια του δείκτη AQI αλλά και της θερμικής άνεσης με τη χρήση του Discomfort Index (DI) και στις δύο περιοχές έρευνας. Ειδικότερα, για την Ακαδημία Πλάτωνος, όπου υπάρχει αισθητήρας και εντός και εκτός του διαμερίσματος, έγινε συγκριτική μελέτη που αφορά την διακύμανση της μέσης συγκέντρωσης $PM_{2.5}$ και του δείκτη της ποιότητας της ατμόσφαιρας AQI μέσα και έξω από το διαμέρισμα. Στην συνέχεια, όμοιες συγκριτικές μελέτες έγιναν με μετρήσεις από τον εξωτερικό αισθητήρα της Ακαδημίας Πλάτωνος και τον εξωτερικό αισθητήρα του Ηρακλείου. Επιπλέον, απεικονίστηκαν σε διαγράμματα και σχολιάστηκαν οι υπερβάσεις της οριακής τιμής 24ώρου του ρύπου $PM_{2.5}$ που τυχόν παρατηρούνται στις δοθείσες μετρήσεις. Υπολογίστηκε επίσης και ο δείκτης θερμικής άνεσης DI εντός και εκτός της οικίας, για την Ακαδημία Πλάτωνος και για το Ηράκλειο. Τέλος, έγινε ειδική μνεία στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα με σκοπό την χρήση των μετρήσεων για τη δημιουργία προβλεπτικών μοντέλων. Ειδικότερα, δημιουργήθηκαν μοντέλα για δύο περιπτώσεις, την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ στην Ακαδημία Πλάτωνος με την ύπαρξη αισθητήρα μόνο στο Ηράκλειο και πρόβλεψη της εσωτερικής συγκέντρωσης $PM_{2.5}$ που θα διευκολύνουν την προειδοποίηση των κατοίκων στην Ακαδημία Πλάτωνος για το πότε πρέπει να αερίσουν την οικία για την επίτευξη καλύτερης εσωτερικής ποιότητας του αέρα.

Λέξεις κλειδιά: Ατμοσφαιρικά σωματίδια, ποιότητα του αέρα, εσωτερική ποιότητα του αέρα, μετρήσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αισθητήρες χαμηλού κόστους, PurpleAir, AQI, θερμική άνεση, discomfort index, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

ABSTRACT

In this Diploma thesis, an attempt was made to determine the quality of the atmosphere and thermal comfort in both indoor and outdoor spaces. To achieve this, measurements from three low-cost PurpleAir sensors in two different areas of Athens were used. Two of the three sensors are located in an apartment in Academy of Plato, one inside the apartment and the other outside, while the third sensor is an outdoor sensor located in an apartment in Heraklion, Attica. The measurements used in the study of the Diploma thesis span approximately 2 years. More specifically, the reference time series is from April 2021 to March 2023. The processing and analysis of the measurements were carried out in such a way as to extract the most substantiated conclusions about the variation of $PM_{2.5}$ pollution, the picture of air quality with the help of the AQI index, and thermal comfort using the Discomfort Index (DI) in both study areas. Specifically, for the Academy of Plato, where there is a sensor both inside and outside the apartment, a comparative study was conducted regarding the variation of the average concentration of $PM_{2.5}$ and AQI inside and outside the apartment. Subsequently, similar comparative studies were conducted with measurements from the outdoor sensor of the Academy of Plato and the outdoor sensor of Heraklion. Additionally, the exceedances of the 24-hour limit value of $PM_{2.5}$ pollution, if any, were depicted in diagrams and commented on in the given measurements. The thermal comfort index DI was also calculated both inside and outside the home, for the Academy of Plato and for Heraklion. Finally, special mention was made of Artificial Neural Networks with the aim of using the measurements to create predictive models. Specifically, models were created for two scenarios: predicting $PM_{2.5}$ concentrations at the Academy of Plato with the existence of the sensor only in Heraklion, and predicting the indoor $PM_{2.5}$ concentration, which would facilitate the warning of residents in the Academy of Plato about when to ventilate their homes to achieve better indoor air quality (IAQ).

Keywords: Atmospheric particles, air quality, indoor air quality, air pollution measurements, low-cost sensors, PurpleAir, AQI, thermal comfort, discomfort index, artificial neural networks

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών στο τμήμα Μηχανολογίας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους τους καθηγητές που κατά την διάρκεια της φοίτησής μου με καθοδήγησαν, με στήριξαν και βοήθησαν να διευρύνω τους ορίζοντές μου. Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τον κ. Μουστρή, που με την διδασκαλία του αποτέλεσε το έναυσμα να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα και τον κ. Σπυρόπουλο για την καθοδήγηση και εμπιστοσύνη του κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής μου εργασίας. Θέλω επίσης να ευχαριστήσω θερμά τις φίλες και συμφοιτήτριές μου, την Αιμιλία, την Καλλιόπη και ιδιαίτερα την Εύη για την πολύτιμη και άνευ όρων στήριξή τους χωρίς την οποία δεν θα τα είχα καταφέρει. Τέλος, η απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου ανήκει στην οικογένειά μου, στους γονείς μου, τον Παύλο και την Φρόσω, οι οποίοι με στήριξαν και συνεχίζουν να με στηρίζουν αδιάκοπα.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT	6
1. Κεφάλαιο 1 ^ο : Ατμοσφαιρική ρύπανση – Θερμική άνεση.....	9
1.1. Ατμοσφαιρική ρύπανση	9
1.2. Αιωρούμενα σωματίδια	11
1.3. Ποιότητα του αέρα και επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.....	11
1.4. Νομοθεσία.....	12
1.5. Θερμική άνεση και οι παράμετροι.....	14
2. Κεφάλαιο 2 ^ο : Δείκτες	15
2.1. Δείκτες ποιότητας του αέρα	15
2.2. Δείκτες θερμικής άνεσης.....	21
2.3. Δείκτης ποιότητας ζωής.....	23
3. Κεφάλαιο 3 ^ο : Τρόποι παρακολούθησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	29
3.1. Σταθμοί Μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης.....	29
3.2. PurpleAir.....	29
3.3. Συσκευές παρακολούθησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης	30
3.4. Low-cost sensors	31
4. Κεφάλαιο 4 ^ο : Μελέτη περίπτωσης	31
4.1. Διαδικασία συλλογής μετρήσεων.....	31
4.2. Περιγραφή μετρήσεων	35
4.3. Γιατί γίνεται βαθμονόμηση	39
4.4. Περιγραφή αισθητήρα.....	39
4.5. Σημεία τοποθέτησης αισθητήρων.....	40
5. Κεφάλαιο 5 ^ο : Μεθοδολογία	43
5.1. Επιλογή εξοπλισμού	43
5.2. Επιλογή περιοχής	44
5.3. Εγκατάσταση αισθητήρων.....	44
5.4. Συνδεσιμότητα και συλλογή δεδομένων	45
5.5. Επεξεργασία μετρήσεων	45
5.6. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	55
6. Κεφάλαιο 6 ^ο : Αποτελέσματα.....	64
6.1. Ακαδημία Πλάτωνος Μέσα – Έξω.....	64
6.1.1. Σύγκριση συγκεντρώσεων PM _{2,5}	64
6.1.2. Σύγκριση τιμών AQI	70
6.2. Ακαδημία Πλάτωνος – Ηράκλειο.....	74
6.2.1. Σύγκριση συγκεντρώσεων PM _{2,5}	74
6.2.2. Σύγκριση τιμών AQI	79
6.3. Υπερβάσεις συγκέντρωσης PM _{2,5}	83
6.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων AQI.....	84
6.5. Θερμική άνεση.....	85
6.6. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	86
6.6.1. ΤΝΔ Ηράκλειο – Ακαδημία Πλάτωνος.....	86
6.6.2. ΤΝΔ Ακαδημία Πλάτωνος Μέσα – Έξω.....	97
7. Κεφάλαιο 7 ^ο : Συμπεράσματα	113
Βιβλιογραφία	115

1. Κεφάλαιο 1^ο: Ατμοσφαιρική ρύπανση – Θερμική άνεση

1.1. Ατμοσφαιρική ρύπανση

Η πρόκληση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι μακροχρόνια, αλλά αναμφισβήτητα παρούσα, καθιστώντας αναγκαία την έμφαση στην αντιμετώπιση της έξαρσής της. Τι σημαίνει όμως ο όρος «ατμοσφαιρική ρύπανση»; Σύμφωνα με τον καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, Ιωάννη Γεντεκάκη ατμοσφαιρική ρύπανση είναι «η προσθήκη κάθε υλικού, μοριακής ή σωματιδιακής φύσης, στην ατμόσφαιρα που μας περιβάλλει, η οποία θα έχει σαν αποτέλεσμα την βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη δηλητηρίαση της ζωής πάνω στον πλανήτη.» [1]

Σε συγκεκριμένες συνθήκες, η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να κλιμακωθεί σε σημείο που να δημιουργεί δυσμενή περιβάλλοντα διαβίωσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, συχνά περιγράφεται ως «Νέφος» που επηρεάζει το περιβάλλον. Το «Νέφος» παρουσιάζεται με δύο μορφές, νέφος αιθαλομίχλης και φωτοχημικό νέφος. [2]

- Ο σχηματισμός του νέφους αιθαλομίχλης συμβαίνει σε περιόδους χαμηλών θερμοκρασιών και υψηλής σχετικής υγρασίας, σε συνδυασμό με αυξημένη συγκέντρωση ρύπων όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου και τα αιωρούμενα σωματίδια. [2]
- Ο σχηματισμός του φωτοχημικού νέφους συμβαίνει σε περιόδους υψηλών θερμοκρασιών, έντονης και παρατεταμένης ηλιοφάνειας και χαμηλής σχετικής υγρασίας, σε συνδυασμό με αυξημένη συγκέντρωση οξειδίων του αζώτου, υδρογονανθράκων και των ενώσεων που προκύπτουν. [2]



Εικόνα 1.1 Οι πύργοι της Σανγκάη πάνω από το νέφος [3]

Και οι δύο μορφές νέφους έχουν ως κύριο κριτήριο σχηματισμού την υψηλή συγκέντρωση ρύπων, για αυτό είναι σημαντικό να εξηγήσουμε τι είναι ρύπος. Ρύπος θεωρείται οποιαδήποτε ουσία, η οποία όταν εισάγεται στο περιβάλλον είτε από ανθρώπινες δραστηριότητες είτε λόγω κάποιας φυσικής διεργασίας, προκαλεί δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις [1,4]. Κάποιες πηγές ρύπων και συνεπώς ατμοσφαιρικής ρύπανσης αναφέρονται παρακάτω [5,6].

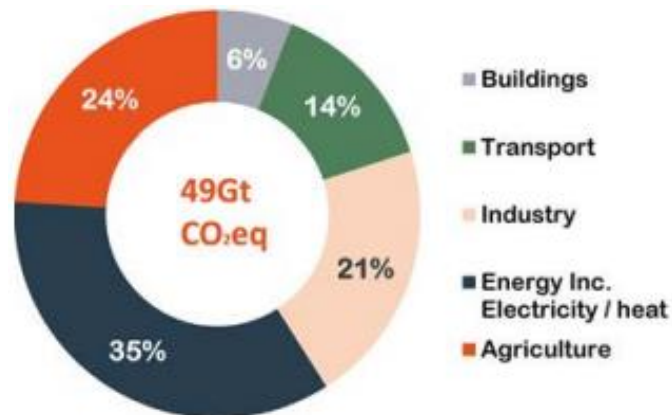
Ανθρώπινες δραστηριότητες:

- Καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τις μεταφορές, τη βιομηχανία και τα νοικοκυριά
- Βιομηχανικές διεργασίες και χρήση διαλυτών
- Διαχείριση αποβλήτων
- Γεωργία
- Εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων από εργοστάσια

Φυσικές διεργασίες:

- Εκρήξεις ηφαιστειών
- Πυρκαγιές

- ♦ Αμμοθύελλες
- ♦ Εκνέφωση θαλάσσιου άλατος

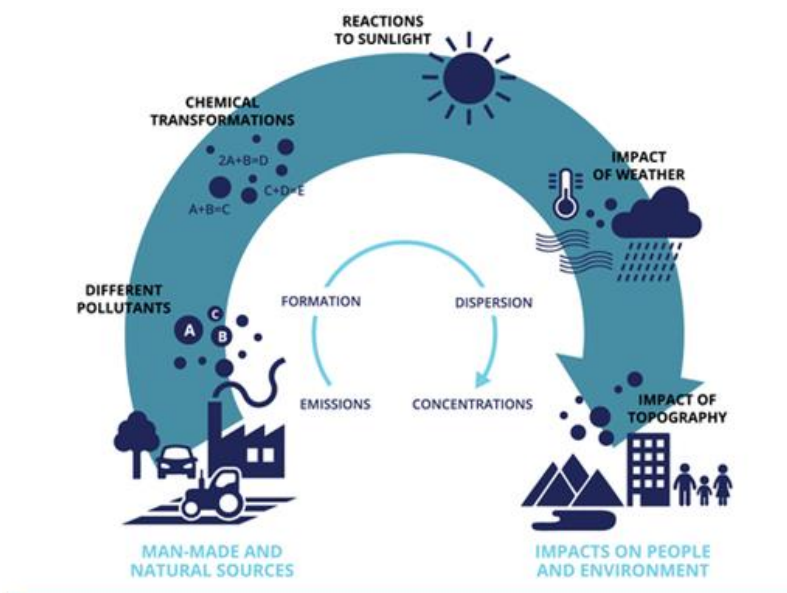


Εικόνα 1.2 Κύριες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης [7]

Οι ρύποι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, πρωτογενείς και δευτερογενείς. Πρωτογενείς ρύποι είναι οι ουσίες που εκπέμπονται κατευθείαν από την πηγή, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου, το υδρόθειο και τα οξείδια του αζώτου. Οι δευτερογενείς ρύποι είναι προϊόντα αντιδράσεων μεταξύ συστατικών του καθαρού αέρα και των πρωτογενών ρύπων [1]

Οι κύριοι ρύποι που απασχολούν την επιστημονική κοινότητα και τους διεθνής οργανισμούς είναι οι παρακάτω:

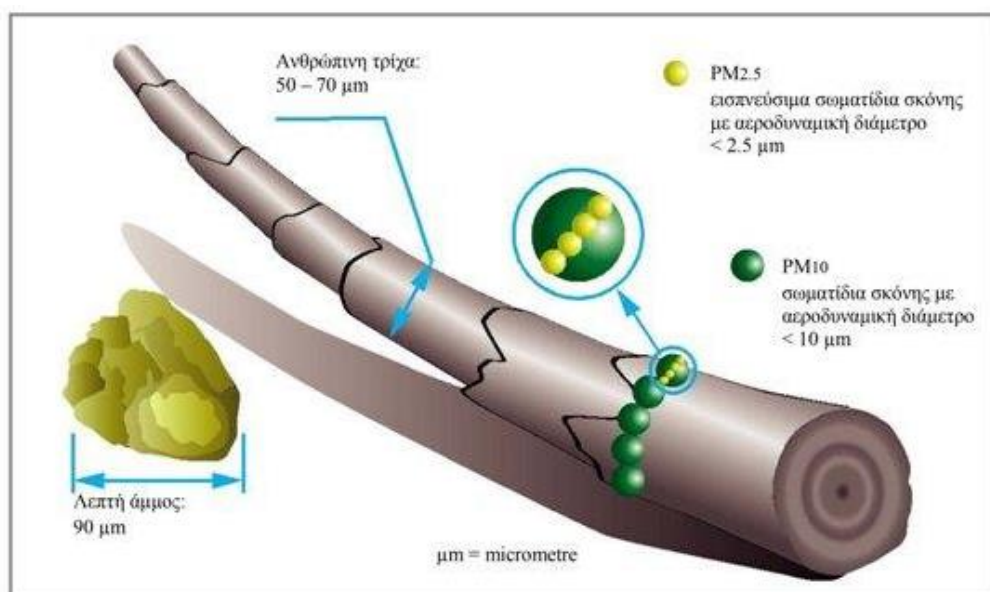
- Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO)
- Τα οξείδια του αζώτου (NO, NO₂)
- Το διοξείδιο του θείου (SO₂)
- Το όζον (O₃)
- Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM₁₀ – PM_{2,5})
- Το Βενζόλιο (C₆H₆)
- Τα βαρέα μέταλλα, κυρίως ο μόλυβδος (Pb)



Εικόνα 1.3 Ατμοσφαιρική ρύπανση: από τις εκπομπές έως την έκθεση [8]

1.2. Αιωρούμενα σωματίδια

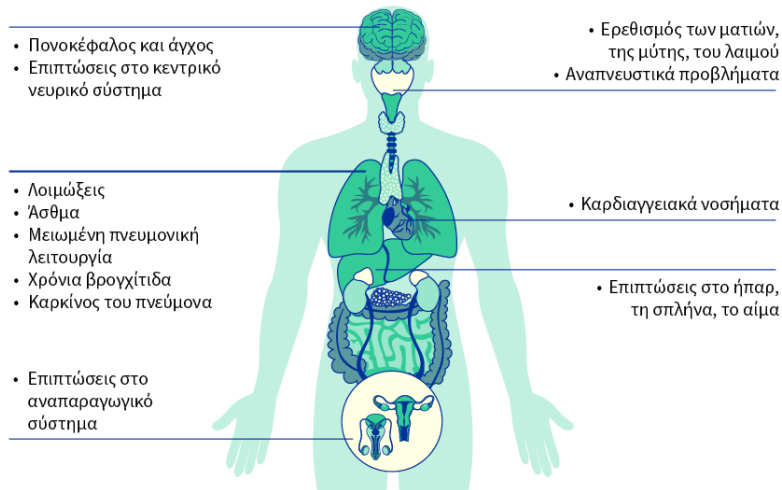
Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) δεν είναι ένας μοναδικός ρύπος, αλλά ένα πολύπλοκο μείγμα πολλών χημικών ειδών. Αποτελείται τόσο από στερεά όσο και από αερολύματα, που περιλαμβάνουν μικρά σταγονίδια υγρού, ξηρά στερεά θραύσματα και στερεούς πυρήνες επικαλυμμένους με υγρό [9]. Αυτά τα σωματίδια παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα στο μέγεθος, το σχήμα και τη χημική σύσταση και μπορεί να περιέχουν μια σειρά ουσιών, συμπεριλαμβανομένων ανόργανων ιόντων, μεταλλικών ενώσεων, στοιχειακού άνθρακα, οργανικών ενώσεων και συστατικών από τον φλοιό της Γης [10]. Τα ρυθμιστικά πρότυπα για την ποιότητα του αέρα κατηγοριοποιούν συνήθως τα σωματίδια με βάση τη διάμετρό τους. Εισπνεύσιμα σωματίδια με διάμετρο 10 microns ή μικρότερη (PM₁₀) μπορούν να διεισδύσουν στους πνεύμονες και να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία. Τα λεπτά σωματίδια, ή PM_{2,5}, αναφέρονται σε σωματίδια με διάμετρο 2,5 microns ή μικρότερη, που αποτελούν ένα υποσύνολο σωματιδίων PM₁₀ [11].



Εικόνα 1.4 Σύγκριση μεγέθους αιωρούμενων σωματιδίων [12]

1.3. Ποιότητα του αέρα και επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Η πιο θεμελιώδης φυσική λειτουργία του ανθρώπου είναι η αναπνοή. Ωστόσο, όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, ο αέρας που εισπνέουμε περιέχει ρύπους που βλάπτουν τόσο την ανθρώπινη υγεία όσο και το περιβάλλον. Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί τον κυριότερο περιβαλλοντικό κίνδυνο για την υγεία στην Ευρώπη. Συγκεκριμένα, οδηγεί στην ανάπτυξη και έξαρση αναπνευστικών και καρδιαγγειακών παθήσεων. Οι πρόωροι θάνατοι που οφείλονται στην ατμοσφαιρική ρύπανση αποδίδονται κυρίως σε καρδιακές παθήσεις και εγκεφαλικά επεισόδια, ενώ επικρατούν επίσης οι ασθένειες των πνευμόνων και ο καρκίνος του πνεύμονα [13].



Εικόνα 1.5 Επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο ανθρώπινο σώμα [14]

Το 2020, η έκθεση σε λεπτά σωματίδια ήταν η κύρια αιτία για 238.000 πρόωρους θανάτους, ξεπερνώντας τον αριθμό των θανάτων από τροχαία ατυχήματα κατά δώδεκα φορές, που ανήλθαν συνολικά σε 18.800 το ίδιο έτος. Σύμφωνα με τα πρόσφατα στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, το 2021, το 97% του αστικού πληθυσμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης εκτέθηκε σε συγκεντρώσεις λεπτών σωματιδίων ($PM_{2,5}$), που αντιπροσωπεύουν την πιο επικίνδυνη κατηγορία ατμοσφαιρικών ρύπων, οι συγκεντρώσεις των οποίων ξεπέρασαν τα ασφαλή όρια που καθορίζονται από τις τελευταίες οδηγίες του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ) [15,16].

1.4. Νομοθεσία

Οι επιπτώσεις και οι κίνδυνοι που εγκυμονεί το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οδήγησαν τους αρμόδιους φορείς παγκοσμίως, να θεσπίσουν σοβαρότατους νόμους και οδηγίες για την αντιμετώπιση του φαινομένου. Το πρώτο σημαντικό μέτρο για την αντιμετώπιση των φαινομένων εκφυλισμού του ατμοσφαιρικού αέρα, συναντάται τον Ιούλιο του 1956, και ήρθε ως απόρροια της αιθαλομίχλης του Λονδίνου, που προκάλεσε σοβαρότατες συνέπειες στην υγεία πολλών κατοίκων της πόλης, και ιδιαίτερα αυτών που είχαν υποκείμενα προβλήματα όπως καρδιακές παθήσεις, άσθμα κλπ.. Αναφορά γίνεται στο γνωστό «Clean Air Act», το οποίο έδινε στις τοπικές αρχές την δυνατότητα να ελέγχουν τις εκπομπές αερίων των βιομηχανιών και να απαγορεύουν την καύση ορισμένων βλαβερών υλικών [17].

Το 1970 γίνονται σοβαρότερες και πιο εντατικές προσπάθειες των αρμόδιων φορέων να θεσπίσουν ένα κοινό πλαίσιο που θα διέπει την Ευρωπαϊκή Ένωση και θα αποσκοπεί στον αποτελεσματικότερο έλεγχο της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Από τότε, μέχρι και σήμερα, το θέμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης θεωρείται μείζονος σημασίας στο Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Παρόλο που έχουν γίνει πολλές προσπάθειες και παρατηρείται μία βελτίωση σε σχέση με παλαιότερα, τα αποτελέσματα δεν φαίνεται να είναι αρκετά ώστε να ικανοποιήσουν τους στόχους της ΕΕ. Το 2023, εκδόθηκε από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό ένα ενημερωτικό σημείωμα που καθιστούσε σαφές ότι η ποιότητα του αέρα στην Ευρώπη υπερβαίνει τα ανώτατα όρια που έχουν θεσπιστεί, τα οποία θα παραθέσουμε στη συνέχεια [18,19].

Οι σημαντικότερες ντιρεκτίβες της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν ως εξής:

- Οδηγία «**Directive 2008/50/EC Cleaner Air for Europe - C.A.F.E**»: Θεσπίζονται τα ανώτατα όρια για τους εξής κυριότερους 12 ρύπους: Διοξείδιο του θείου, Διοξείδιο του Αζώτου, **Αιωρούμενα σωματίδια ($PM_{10,0}$ και $PM_{2,5}$)**, Όζον, Βενζόλιο, Μόλυβδος, Αρσενικό, Κάδμιο, Νικέλιο και Βενζο(α)πυρένιο [20].

Ειδικά για τα αιωρούμενα σωματίδια, τα οποία απασχολούν και την παρούσα μελέτη, τα ανώτατα όρια διαμορφώνονται ως εξής:

Για τα PM_{2.5}, η οριακή τιμή ετησίως είναι 25 µg/m³ ενώ η ενδεικτική οριακή τιμή είναι 20 µg/m³.

Για τα PM_{10.0}, σε 24ώρο βήμα η οριακή τιμή είναι 50 µg/m³, ενώ ετησίως η οριακή τιμή είναι 40 µg/m³.

Πολύ σημαντικό είναι να τονιστεί ότι τα ανώτατα όρια δύναται να υπερβαίνονται έως 35 ημέρες ετησίως.

- **Directive 2004/107/EC**: Αναφέρεται στους ρύπους Αρσενικό, Κάδμιο, Μόλυβδος, Νικέλιο και Πολυκυκλικούς Αρωματικούς Υδρογονάνθρακες [21].
- **Directive 2016/2284/EE**: Θεσπίζει για κάθε Κράτος Μέλος της ΕΕ τα ανώτατα εθνικά όρια εκπομπών ρύπων [22].
- **Directive 2015/1480/EC**: Πρόκειται για τροποποίηση ορισμένων παραρτημάτων στις ευρωπαϊκές ντιρεκτίβες 2008/50/EC και 2004/107/EC που αναφέραμε παραπάνω

Στόχος της ΕΕ είναι να πετύχει το σενάριο της μηδενικής ρύπανσης έως το 2050. Για τον λόγο αυτό, η νομοθεσία και τα ανώτατα όρια των ρυπαντών γίνονται αυστηρότερα όπως αυστηρότερες γίνονται και οι συνέπειες που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν τα κράτη που παραβιάζουν τα όρια αυτά ή/και τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες [23].

Σαφώς και η Ελλάδα, ως κράτος – μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οφείλει να συμμορφώνεται με την ισχύουσα Νομοθεσία και να τηρεί τις Οδηγίες που θεσπίζονται με σκοπό την εξασφάλιση της ανθρώπινης υγείας αλλά και των οικοσυστημάτων. Σε συνδυασμό με τις ισχύουσες Ευρωπαϊκές διατάξεις που διέπουν την χώρα, κατά καιρούς έχουν τεθεί σε εφαρμογή Κοινές Υπουργικές Αποφάσεις (ΚΥΑ).

Η ΚΥΑ 11824 αφορά επίσης βραχυπρόθεσμα έκτακτα μέτρα για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της πρωτεύουσας τέθηκε σε ισχύ στις 24.5.1993 [24].

Η ΚΥΑ 22306, με ισχύ από τις 08.06.2007, θέτει τα εξής [25]:

- εφαρμογή των διατάξεων των άρθρων 7 και 8 του ν. 1650/1986 και συγχρόνως η συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2004/107/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 15ης Δεκεμβρίου 2004 των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων «σχετικά με το αρσενικό, το κάδμιο, τον υδράργυρο, το νικέλιο και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες στον ατμοσφαιρικό αέρα» και κατ' επέκταση με την οδηγία 96/62/ΕΚ (άρθρα 5, 6 (παρ. 3, 4 και 5) και 11 (παρ. 1δ)), του Συμβουλίου της 27ης Σεπτεμβρίου 1996 των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων «για την εκτίμηση και τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος
- θέσπιση τιμών – στόχων για τη συγκέντρωση αρσενικού, καδμίου, νικελίου και βενζο(α)πυρενίου στον ατμοσφαιρικό αέρα,
- διασφάλιση ότι, όσον αφορά το αρσενικό, το κάδμιο, το νικέλιο και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες, οι τιμές τους την ατμόσφαιρα είτε διατηρούνται ως έχουν αν είναι εντός ορίων είτε μειώνονται εάν είναι εκτός ορίων
- προσδιορισμό κοινών μεθόδων και κριτηρίων για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων των παραπάνω ρυπαντών στον ατμοσφαιρικό αέρα
- διασφάλιση της επαρκούς πληροφόρησης τόσο στους αρμόδιους φορείς όσο και στο ευρύ κοινό όσον αφορά τους παραπάνω ρυπαντές

Η ΚΥΑ 141122, η οποία ισχύει από τις 30.03.2011, αποσκοπεί στα εξής [26]:

- εφαρμογή των διατάξεων του άρθρου 7 του Ν. 1650/1986 και συγχρόνως η συμμόρφωση με την οδηγία 2008/50 /ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 2008 «για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη»
- προσδιορισμό των στόχων για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα
- εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα και επικοινωνία των αποτελεσμάτων στο ευρύ κοινό
- διατήρηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα

- προαγωγή της συνεργασίας με τα άλλα κράτη – μέλη της ΕΕ σε ό,τι αφορά τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Η ΚΥΑ 7061, η οποία τέθηκε σε ισχύ στις 23.12.2013 αναφέρονται βραχυπρόθεσμα σχέδια δράσης για την αντιμετώπιση ατμοσφαιρικής ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια. Ενδεικτικά, στην ΚΥΑ 7061 (ΦΕΚ 3272B/23.12.13) αναφέρονται τα εξής [27]:

- καθορισμός των επιπέδων συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων ($PM_{10.0}$) για την ενημέρωση του πληθυσμού (ανάλογα με τα επίπεδα συγκέντρωσης $PM_{10.0}$, γίνονται είτε συστάσεις προφύλαξης, είτε εφαρμόζονται μέτρα μείωσης εκπομπών βραχυπρόθεσμου χαρακτήρα)
- καθορισμός των μέτρων ενημέρωσης και προστασίας του πληθυσμού ανάλογα με τα επίπεδα συγκεντρώσεων $PM_{10.0}$
- Ο καθορισμός των μέτρων μείωσης των εκπομπών $PM_{10.0}$ από εστίες τις διάφορες καύσης (π.χ. τη βιομηχανία – βιοτεχνία και την κυκλοφορία οχημάτων)

Η ΚΥΑ 174505, η οποία δημοσιεύθηκε στην Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, τροποποιεί την ΚΥΑ 22306/1075/2007 και την ΚΥΑ 14122/549/2011 ώστε να έρχονται σε συμμόρφωση με την οδηγία 2015/1480/ΕΕ «για την τροποποίηση ορισμένων παραρτημάτων των οδηγιών του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου 2004/107/ΕΚ και 2008/50/ΕΚ, οι οποίες ορίζουν τους κανόνες σχετικά με τις μεθόδους αναφοράς, την επικύρωση των δεδομένων και την τοποθεσία των σημείων δειγματοληψίας για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα» της Ευρωπαϊκής Επιτροπής [28].

1.5. Θερμική άνεση και οι παράμετροι

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του ανθρώπινου σώματος είναι η ομοιοθερμία, η οποία αναφέρεται στην ικανότητά του να διατηρεί σταθερή εσωτερική θερμοκρασία (περίπου $37,5^{\circ}\text{C}$). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της θερμορύθμισης. Όταν εκτίθεται σε ψυχρά περιβάλλοντα, το σώμα παράγει θερμότητα μέσω διεργασιών όπως το ρίγος, η συστολή των περιφερειακών αιμοφόρων αγγείων και η αύξηση της μεταβολικής δραστηριότητας. Αντίθετα, σε θερμές συνθήκες, το σώμα διαχέει θερμότητα για να διατηρήσει την εσωτερική του θερμοκρασία, μέσω διεργασιών όπως η εφίδρωση [29].

Η θερμορύθμιση συνδέεται με την έννοια της θερμικής άνεσης, η οποία αναφέρεται στην κατάσταση στην οποία ένα ανθρώπινο σώμα, όταν είναι σχετικά υγιές και κατάλληλα ντυμένο, ούτε χάνει ούτε κερδίζει θερμότητα. Αυτή η κατάσταση εμφανίζεται μέσα σε ένα στενό εύρος που είναι γνωστό ως ζώνη ουδετερότητας, θερμικής αδιαφορίας ή θερμικής άνεσης [30]. Σύμφωνα με το Ελληνικό Ινστιτούτο Υγείας και Ασφάλειας στην Εργασία (ΕΛΙΝΥΑΕ), θερμική άνεση είναι η ψυχική κατάσταση που εκφράζει την ικανοποίηση ενός ατόμου για το θερμικό του περιβάλλον και αξιολογείται μέσω της υποκειμενικής αξιολόγησης [31]. Η επίτευξη θερμικής άνεσης απαιτεί εξισορρόπηση των παρακάτω περιβαλλοντικών, βιολογικών και εξωτερικών παραμέτρων. [32,33]

Περιβαλλοντικοί παράμετροι:

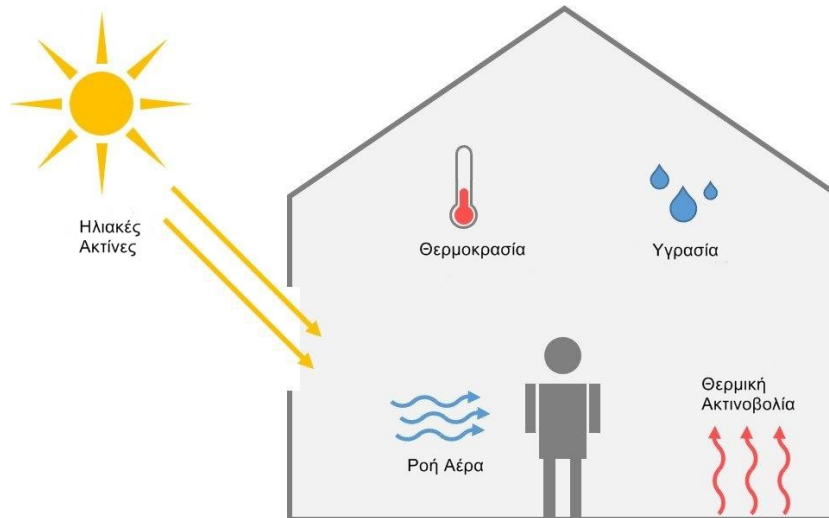
- Θερμοκρασία αέρα: Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα επηρεάζει σημαντικά τη θερμική άνεση.
- Θερμοκρασία ακτινοβολίας: Η μέση θερμοκρασία των επιφανειών γύρω από ένα άτομο επηρεάζει την αντίληψή του για τη ζεστασιά ή το κρύο.
- Υγρασία: Η σχετική υγρασία επηρεάζει την εξάτμιση του ιδρώτα, η οποία είναι απαραίτητη για την ψύξη του σώματος.
- Κίνηση αέρα: Η ταχύτητα και η ροή του αέρα μπορούν να βελτιώσουν την άνεση διευκολύνοντας την απώλεια θερμότητας μέσω μεταφοράς.

Βιολογικοί παράμετροι:

- Φύλλο: Το φύλο επηρεάζει σημαντικά την αντίληψη της θερμικής άνεσης, με αξιοσημείωτες διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ ανδρών και γυναικών.
- Ηλικία: Η ηλικία έχει σημαντικό αντίκτυπο στις προτιμήσεις και τις αντιλήψεις για τη θερμική άνεση.

Εξωτερικοί παράμετροι:

- Ένδυση: Το είδος και η ποσότητα του ρουχισμού χρησιμεύουν ως μόνωση και έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη θερμική άνεση.
- Επίπεδο δραστηριότητας: Οι αυξημένοι μεταβολικοί ρυθμοί από τη σωματική δραστηριότητα αυξάνουν την εσωτερική παραγωγή θερμότητας, επηρεάζοντας τη θερμική άνεση.



Εικόνα 1.6 Περιβαλλοντικοί παράγοντες θερμικής άνεσης [34]

2. Κεφάλαιο 2^ο: Δείκτες

2.1. Δείκτες ποιότητας του αέρα

Η ανάγκη ενημέρωσης του κοινού για τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οδήγησε στην δημιουργία δεικτών που καθορίζουν την ποιότητα του αέρα, υποδεικνύοντας έτσι το επίπεδο ρύπανσης ανά πάσα στιγμή. Ο όρος δείκτες ατμοσφαιρικής ρύπανσης αναφέρεται σε αριθμητικές τιμές που υπολογίζονται μέσω αλγορίθμων που επιτρέπουν την καλύτερη αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα και των πιθανών επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία στον πληθυσμό. Αυτοί οι δείκτες χρησιμοποιούνται παγκοσμίως επειδή προσφέρουν μια πιο πρακτική και ολοκληρωμένη εικόνα της καθημερινής ποιότητας του αέρα σε μια συγκεκριμένη περιοχή, σε αντίθεση με το να βασίζονται αποκλειστικά σε τιμές συγκέντρωσης ρύπων για τον προσδιορισμό της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος.

Το πρόβλημα με τη χρήση δεικτών ατμοσφαιρικής ρύπανσης έγκειται στην υποκειμενικότητά τους. Κάθε χώρα έχει το δικό της κλίμα κάτι που επηρεάζει το πως αξιολογεί την ατμοσφαιρική ρύπανση με αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφορετικά κριτήρια τοξικότητας και όρια συγκέντρωσης των ρύπων. Για αυτό στο πέρασμα των χρόνων έχουν δημιουργηθεί ποικίλοι δείκτες ποιότητας του αέρα με βάση τις ανάγκες κάθε περιοχής.

Air Quality Index (AQI)

Ο κυριότερος και πιο διαδεδομένος δείκτης ποιότητας του αέρα είναι ο Air Quality Index (AQI). Δημιουργήθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (EPA) και άρχισε να χρησιμοποιείται το 1999 αντικαθιστώντας τον Pollutant Standard Index (PSI). [35,36]

Ο AQI χωρίζεται σε έξι κατηγορίες, καθεμία από τις οποίες αντικατοπτρίζει διαφορετικό επίπεδο ανησυχίας για την υγεία. Μια τιμή AQI πάνω από 300 υποδηλώνει επικίνδυνη ποιότητα αέρα, ενώ μια τιμή κάτω από 50 σημαίνει καλή ποιότητα αέρα. Το αμερικανικό σύστημα AQI βασίζεται στη μέτρηση πέντε σημαντικών ρύπων [37]:

1. Σωματίδια (PM_{2,5} και PM₁₀)
2. Όζον (O₃)
3. Διοξείδιο του αζώτου (NO₂)
4. Διοξείδιο του θείου (SO₂)
5. Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

Ο δείκτης AQI υπολογίζεται για κάθε ρύπο ξεχωριστά με βάση την παρακάτω εξίσωση: [38]

$$AQI = \frac{(AQI_{Hi}) - (AQI_{Lo})}{(Conc_{Hi}) - (Conc_{Lo})} \times ((Conc_i) - (Conc_{Lo})) + (AQI_{Lo})$$

Όπου,

AQI_{Hi}: η τιμή του δείκτη AQI σύμφωνα με την τιμή συγκέντρωσης Conc_{Hi}

AQI_{Lo}: η τιμή του δείκτη AQI σύμφωνα με την τιμή συγκέντρωσης Conc_{Lo}

Conc_i: η τιμή συγκέντρωσης του ρύπου τη στιγμή που υπολογίζεται ο δείκτης και με βάση τα εθνικά όρια ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Conc_{Hi}: η ανώτερη τιμή συγκέντρωσης κάθε ρύπου χωριστά

Conc_{Lo}: η μικρότερη τιμή συγκέντρωσης κάθε ρύπου χωριστά

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια για κάθε τιμή ρύπου ετησίως, μαζί με τις αντίστοιχες ανώτερες και κατώτερες τιμές του Δείκτη Ποιότητας Αέρα (AQI). Αφού υπολογιστούν οι επιμέρους δείκτες για κάθε τύπο ρύπων, η υψηλότερη από αυτές τις επιμέρους τιμές λαμβάνεται ως η ημερήσια τιμή AQI.

Τιμή AQI	0-50	51-100	101-150	151-200	201-300	301-500
PM ₁₀ μg/m ³ (24 hr)	0-54	55-154	155-254	255-354	355-424	>424
PM _{2,5} μg/m ³ (24 hr)	0-15.4	15.5-40.4	40.5-65.4	65.5-150.4	150.5-250.4	>250.4
CO ppm (8 hr)	0-4.4	4.5-9.4	9.5-12.4	12.5-15.4	15.5-30.4	>30.4
SO ₂ ppm (24 hr)	0-0.034	0.035-0.144	0.145-0.225	0.225-0.304	0.305-0.604	>0.604
O ₃ ppm (8 hr)	0-0.064	0.065-0.084	0.085-0.104	0.105-0.124	0.125-0.374	>0.374
O ₃ ppm (1 hr)	***	***	0.125-0.164	0.165-0.204	0.205-0.404	>0.404
NO ₂ ppm (1hr)	***	***	***	***	0.65-1.24	>1.24

Πίνακας 1. Τιμές των επιμέρους δεικτών του δείκτη AQI

Τιμές δείκτη AQI	Κατηγορία ποιότητας αέρα	Πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία
0-50	Καλή	Καμία επίπτωση για το σύνολο του πληθυσμού
51-100	Μέτρια	Μερικές ή καθόλου επιπτώσεις στο σύνολο του πληθυσμού
101-150	Ανθυγιεινή για ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού	Ελαφρά επιδείνωση των συμπτωμάτων στις πιο ευάλωτες κατηγορίες του πληθυσμού, με συμπτώματα ερεθισμού της υγείας του πληθυσμού
151-200	Ανθυγιεινή	Σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία των πιο ευάλωτων ομάδων του πληθυσμού
201-300	Πολύ ανθυγιεινή	Σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία του συνόλου σχεδόν του πληθυσμού
301-500	Επικίνδυνα ανθυγιεινή	Σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία του συνόλου σχεδόν του πληθυσμού

Πίνακας 2. Κατηγορίες τιμών του δείκτη AQI και πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία [37]

Pollutants Standard Index (PSI)

Το 1963 η EPA ανέπτυξε ένα σύστημα για τη μέτρηση των επιπέδων ρύπανσης των κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων που ρυθμίζονται βάσει του νόμου περί καθαρού αέρα (CleanAir Act) , εστιάζοντας στις επιπτώσεις τους στην υγεία. Αυτό το σύστημα κυμαίνεται από 0 (υγιεινό) έως 500 (εξαιρετικά ανθυγιεινό). Το 1999, ο δείκτης προτύπων ρύπανσης (PSI) αντικαταστάθηκε από τον δείκτη ποιότητας αέρα (AQI). Παρά την αντικατάσταση του στην Αμερική, ο PSI χρησιμοποιείται ακόμα στην Σιγκαπούρη [39,40].

PSI Value	Air Quality Descriptor
0 - 50	Good
51 - 100	Moderate
101 - 200	Unhealthy
201 - 300	Very unhealthy
Above 300	Hazardous

Εικόνα 2.1 Κατηγορίες τιμών του δείκτη AQI [40]

Air Quality Health Index (AQHI)

Ο AQHI είναι ένα συγκεντρωτικό σύστημα μέτρησης που χρησιμοποιείται στον Καναδά και το Χονγκ-Κονγκ για να ορίσει την ποιότητα του αέρα με βάση τον αντίκτυπο του στην υγεία των ανθρώπων. Το AQHI κυμαίνεται από 1 έως 10+ και οι τιμές του ομαδοποιούνται σε κατηγορίες κινδύνου για την υγεία.

Το AQHI βασίζεται σε επιστημονική έρευνα που διεξήχθη από την Health Canada για τον εντοπισμό σημαντικών ρύπων που βλάπτουν την υγεία των ανθρώπων. Αυτοί οι ρύποι είναι:

- Επίπεδο όζον (O_3)
- $PM_{2,5}$
- PM_{10}
- Διοξείδιο του αζώτου (NO_2)

Το διοξείδιο του θείου (SO_2) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) απορρίφθηκαν από το AQHI, επειδή δεν συσχετίστηκαν με πρόσθετο κίνδυνο για την υγεία αφού ελήφθησαν υπόψη οι επιπτώσεις του όζοντος, του διοξειδίου του αζώτου και των σωματιδίων. Η κυβέρνηση του Καναδά δεν έχει γνωστοποιήσει τον τρόπο υπολογισμού του δείκτη. [41,42]



Εικόνα 2.2 Κατηγορίες τιμών AQHI [39]

European Air Quality Index (EAQI)

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (ΕΟΠ) και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εγκαινίασαν μια διαδικτυακή πλατφόρμα με την ονομασία «European Air Quality Index». Αυτή η πλατφόρμα παρέχει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για την ποιότητα του αέρα, χρησιμοποιώντας δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από περισσότερους από 2.000 σταθμούς παρακολούθησης σε όλη την Ευρώπη.

Ο Δείκτης περιλαμβάνει έναν διαδραστικό χάρτη που εμφανίζει τις τοπικές συνθήκες ποιότητας του αέρα σε κάθε σταθμό, με βάση πέντε βασικούς ρύπους που βλάπτουν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον: αιωρούμενα σωματίδια ($PM_{2,5}$ και PM_{10}), όζον σε επίπεδο εδάφους (O_3), διοξείδιο του αζώτου (NO_2) και διοξείδιο του θείου (SO_2). Ο EAQI παρέχει μια συνολική βαθμολογία για κάθε σταθμό παρακολούθησης, που αντιπροσωπεύεται από μια έγχρωμη κουκκίδα στο χάρτη. Αυτή η βαθμολογία αντικατοπτρίζει τη χειρότερη βαθμολογία μεταξύ των πέντε ρύπων [43].



Εικόνα 2.3 Στιγμιότυπο του διαδραστικού χάρτη EAQI [43]

Ο δείκτης κυμαίνεται από 1 (καλό) έως 6 (εξαιρετικά κακό) και υπολογίζεται χωριστά για κάθε ρύπο ανάλογα με τις συγκεντρώσεις του. Όσο υψηλότερες είναι οι συγκεντρώσεις, τόσο υψηλότερος είναι ο δείκτης. Ο ολικός ωριαίος ΕΑQI ορίζεται ως η υψηλότερη τιμή από τους πέντε επιμέρους δείκτες ρύπων που υπολογίστηκαν για την ίδια ώρα [44].

POLLUTANT	INDEX LEVEL (based on pollutant concentrations in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
	1 Very good	2 Good	3 Medium	4 Poor	5 Very Poor	6 Extremely Poor
Ozone (O_3)	0-50	50-100	100-130	130-240	240-380	380-800
Nitrogen dioxide (NO_2)	0-40	40-90	90-120	120-230	230-340	340-1000
Sulphur dioxide (SO_2)	0-100	100-200	200-350	350-500	500-750	750-1250
Particulates less than 10 μm (PM_{10})	0-20	20-40	40-50	50-100	100-150	150-1200
Particulates less than 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$)	0-10	10-20	20-25	25-50	50-75	75-800

Note: PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ values are based on 24-hour running means

Εικόνα 2.4 Κατηγορίες τιμών του δείκτη ΕΑQI βασισμένες στην συγκέντρωση των ρύπων [44]

Η διαδικασία υπολογισμού του ΕΑQI δεν έχει γνωστοποιηθεί από τον ΕΟΠ ή την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

Daily Air Quality Index (DAQI)

Ο Ημερήσιος Δείκτης Ποιότητας Αέρας (DAQI) χρησιμοποιείται από τις περισσότερες υπηρεσίες πληροφόρησης στο Ηνωμένο Βασίλειο μαζί με ένα σύστημα τεσσάρων ζωνών εγκεκριμένο από την Επιτροπή για τις Ιατρικές Επιδράσεις των Ρύπων του Αέρα (COMEAP). Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί μια κλίμακα που κυμαίνεται από το 1 έως το 10 για τη μέτρηση των ακόλουθων ρύπων: [45]

- Αιωρούμενα Σωματίδια ($\text{PM}_{2.5}$ και PM_{10})
- Διοξείδιο του αζώτου (NO_2)
- Διοξείδιο του θείου (SO_2)
- Όζον (O_3)

Το Ηνωμένο Βασίλειο δεν έχει δημοσιεύσει τον τύπο υπολογισμού του DAQI.

Air Pollution Banding	Value	Accompanying health messages for at-risk individuals*	Accompanying health messages for the general population
Low	1-3	Enjoy your usual outdoor activities.	Enjoy your usual outdoor activities.
Moderate	4-6	Adults and children with lung problems, and adults with heart problems, who experience symptoms , should consider reducing strenuous physical activity, particularly outdoors.	Enjoy your usual outdoor activities.
High	7-9	Adults and children with lung problems, and adults with heart problems, should reduce strenuous physical exertion, particularly outdoors, and particularly if they experience symptoms. People with asthma may find they need to use their reliever inhaler more often. Older people should also reduce physical exertion.	Anyone experiencing discomfort such as sore eyes, cough or sore throat should consider reducing activity, particularly outdoors.
Very High	10	Adults and children with lung problems, adults with heart problems, and older people, should avoid strenuous physical activity. People with asthma may find they need to use their reliever inhaler more often.	Reduce physical exertion, particularly outdoors, especially if you experience symptoms such as cough or sore throat.

Εικόνα 2.5 Κατηγορίες τιμών του δείκτη AQI και πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία [45]

Comprehensive Air-quality Index (CAI)

Στόχος του CAI, που χρησιμοποιείται από την Νότια Κορέα είναι να διευκολύνει το κοινό να κατανοήσει τα επίπεδα ποιότητας του αέρα και να συμβάλει στην προστασία της υγείας των ανθρώπων από τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Ο CAI υπολογίζεται με την χρήση του παρακάτω τύπου: [46]

$$I_p = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} \times (C_p - BP_{LO}) + I_{LO}$$

Όπου,

I_p : Ο δείκτης ποιότητας του αέρα για κάθε ρύπο χωριστά

C_p : Η στρογγυλεμένη συγκέντρωση κάθε ρύπου

BP_{HI} : Το σημείο διακοπής που είναι μεγαλύτερο ή ίσο με C_p

BP_{LO} : Το σημείο διακοπής που είναι μικρότερο ή ίσο με C_p

I_{HI} : Η τιμή του δείκτη που αντιστοιχεί στο BP_{HI}

I_{LO} : Η τιμή του δείκτη που αντιστοιχεί στο BP_{LO}

Description		Good		Moderate		Unhealthy		Very unhealthy	
Values	I_{LO}	0		51		101		251	
	I_{HI}	50		100		250		500	
Concentration		BP_{LO}	BP_{HI}	BP_{LO}	BP_{HI}	BP_{LO}	BP_{HI}	BP_{LO}	BP_{HI}
SO ₂ (ppm)	1hr	0	0.02	0.021	0.05	0.051	0.15	0.151	1
CO(ppm)	1hr	0	2	2.1	9	9.1	15	15.1	50
O ₃ (ppm)	1hr	0	0.03	0.031	0.09	0.091	0.15	0.151	0.6
NO ₂ (ppm)	1hr	0	0.03	0.031	0.06	0.061	0.2	0.201	2
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24hr	0	30	31	80	81	150	151	600
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24hr	0	15	16	35	36	75	76	500

Πίνακας 3. Τιμές των επιμέρους δεικτών του δείκτη AQI [46]

Description	Good	Moderate	Unhealthy	Very unhealthy	
values	0~50	51~100	101~250	251~350	351~500
Health Effects	A level that will not impact patients suffering from diseases related to air pollution	A level which may have a meager impact on patients in case of chronic exposure	A level that may have harmful impacts on patients and members of sensitive groups (children, aged or weak people), and also cause the general public unpleasant feelings	A level which may have a serious impact on patients and members of sensitive groups in case of acute exposure, and that even the general public can be weakly affected	A level which may need to take emergency measures for patients and members of sensitive groups and have harmful impacts on the general public

Πίνακας 4. Κατηγορίες τιμών του δείκτη AQI και πιθανές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία [46]

Ο υπολογισμός όλων των παραπάνω δεικτών βασίζεται σε έναν μόνο ρύπο κάτι που ενδεχομένως οδηγεί σε σημαντική υποτίμηση της επιρροής πολλαπλών ρύπων, καθώς επικεντρώνονται αποκλειστικά στη συγκέντρωση του κύριου ρύπου. Αυτό σε συνδυασμό με ότι δεν είναι γνωστοί όλοι οι τύποι υπολογισμού και η νομοθεσία αρκετά διαφορετική με βάση το κλίμα, καθιστά την σύγκριση των δεικτών διαφορετικών εθνών σχεδόν αδύνατη [47,48].

2.2. Δείκτες θερμικής άνεσης

Με βάση τον ΠΟΥ, η ιδανική θερμοκρασία για τον άνθρωπο κυμαίνεται από 16-21 °C και η υγρασία μεταξύ 30-70% [49,50]. Όμως, έρευνες έχουν δείξει ότι οι προτιμήσεις για τη θερμική άνεση διαφέρουν ανάλογα με τη γεωγραφική θέση [51–53]. Γι' αυτό είναι απαραίτητο να καθιερωθούν ορισμένοι βιοκλιματικοί δείκτες, που αντικατοπτρίζουν την πραγματική αίσθηση που έχει το ανθρώπινο σώμα σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Μερικοί δείκτες θερμικής άνεσης είναι:

- **Humidex Index**

Ο δείκτης Humidex δημιουργήθηκε από τους Masterton και Richardson το 1979, και υπολογίζεται με την χρήση του παρακάτω τύπου [54]:

$$\text{Humidex} = T + 0.5555 \times (6.11 \times e^{5417.7530 \times \left(\frac{1}{273.16} - \frac{1}{d}\right)} - 10)$$

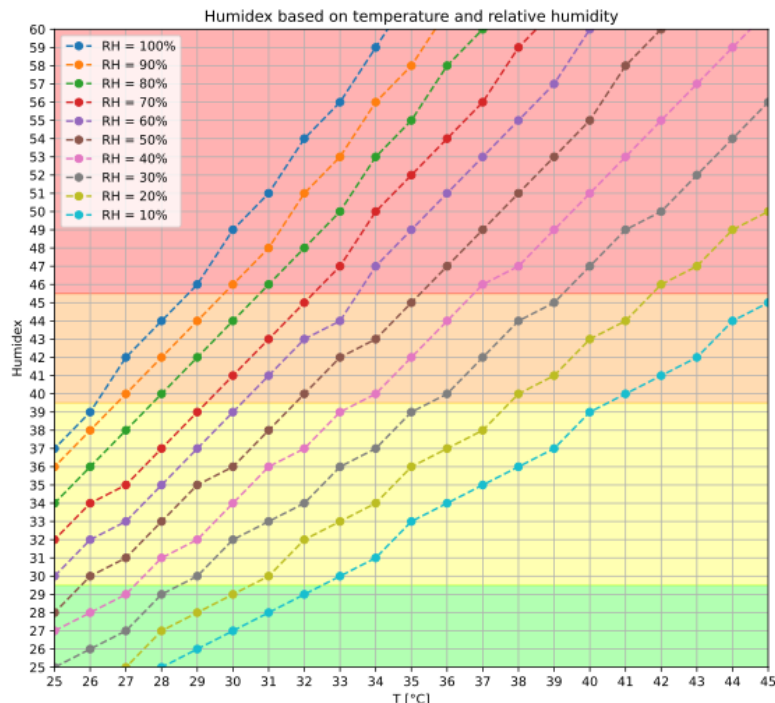
Όπου,

d: η θερμοκρασία δρόσου σε Κέλβιν (K)

T: η θερμοκρασία του αέρα σε °C

Το humidex αναλύεται σε βαθμούς άνεσης [30]:

- 20 έως 29: Καμία ενόχληση
- 30 έως 39: Κάποια δυσφορία
- 40 έως 45: Μεγάλη ενόχληση. αποφύγετε την δραστηριότητα
- 46 και άνω: Επικίνδυνο. πιθανή θερμοπληξία



Εικόνα 2.6 Humidex ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία [55]

- **Thom's discomfort index (DI)**

Ο DI δημιουργήθηκε από το E. C. Thom το 1959 [56] και έχει δύο τύπους υπολογισμού [57].

Η αρχική μορφή του τύπου ήταν:

$$DI(^{\circ}F) = 0.4(T_{dry} + T_{wet}) + 15$$

Όπου,

T_{dry} : θερμοκρασία ξηρού βολβού σε Fahrenheit ($^{\circ}F$)

T_{wet} : θερμοκρασία υγρού βολβού σε $^{\circ}F$

Εάν η θερμοκρασία του αέρα (T_a) δίνεται σε $^{\circ}C$ και η σχετική υγρασία (RH) σε %, το DI μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$DI(^{\circ}C) = T_a - 0.55(1 - 0.01RH) \cdot (T_a - 14.5)$$

Όπου,

T_a : η θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}C$

RH: η σχετική υγρασία σε %

Αίσθημα θερμικής άνεσης-δυσφορίας	DI ($^{\circ}C$)
Κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Παύση εργασίας και παροχή ιατρικής φροντίδας	≥ 32.0
Ισχυρή θερμική επιβάρυνση σε όλο τον πληθυσμό (θερμοπληξία)	$29.0 \geq DI > 32.0$
Σοβαρή θερμική επιβάρυνση σε μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού και κυρίως σε ευάλωτες ομάδες	$27.0 \geq DI > 29.0$
Περισσότερο από το 50% του πληθυσμού εκφράζει το αίσθημα της θερμικής δυσφορίας	$24.0 \geq DI > 27.0$
Λιγότερο από το 50% του πληθυσμού εκφράζει το αίσθημα της θερμικής δυσφορίας	$21.0 \geq DI > 24.0$
Καμία θερμική δυσφορία. Ουδέτερη κατάσταση θερμικής άνεσης	$DI < 21.0$

Εικόνα 2.7 Συνθήκες θερμικής άνεσης με βάσει τον δείκτη DI [58]

- **Summer Simmer Index (SSI)**

Ο δείκτης SSI δημιουργήθηκε από τον W. J. Perri το 1987 και υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο [59,60]:

$$SSI = 1.98(T_f - (0.55 - 0.0055(RH))(T_f - 58)) - 56.83$$

Όπου,

T_f : η θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}C$ ή $^{\circ}F$ και ο SSI αποδίδεται αντίστοιχα

RH: η σχετική υγρασία σε %

SSI ($^{\circ}C$)	Αντιληπτή Θερμική Αίσθηση
$21 \leq SSI < 25$	Σχεδόν όλα τα άτομα βιώνουν ένα υψηλό επίπεδο άνεσης, με ελαφριά δροσιά
$25 \leq SSI < 28$	Σχεδόν όλοι αισθάνονται άνετα
$28 \leq SSI < 33$	Τα περισσότερα άτομα βρίσκονται σε μια κατάσταση άνεσης αν και με μια ελαφριά αίσθηση ζέστης
$33 \leq SSI < 38$	Το επίπεδο δυσφορίας αυξάνεται ιδιαίτερα
$38 \leq SSI < 44$	Η παρατεταμένη έκθεση στον ήλιο και η σωματική δραστηριότητα μπορεί να οδηγήσουν σε ηλίαση και θερμική εξάντληση, σημαντικό επίπεδο δυσφορίας
$44 \leq SSI < 52$	Πρακτικά όλοι αισθάνονται άβολα και αντιμετωπίζουν τον κίνδυνο θερμοπληξίας
$52 \leq SSI < 65$	Παρουσία ακραίου κινδύνου θερμοπληξίας ιδιαίτερα στα ευάλωτα άτομα, όπως οι ηλικιωμένοι, άτομα με εξασθενημένο ανοσοποιητικό σύστημα και τα μικρά παιδιά. Μέγιστο επίπεδο δυσφορίας, συνθήκες καύσωνα
$65 < SSI$	Επικείμενη καταπληξία (καρδιαγγειακό σοκ) μετά από παρατεταμένη έκθεση σε αυτές τις θερμοκρασιακές συνθήκες

Εικόνα 2.8 Η ερμηνεία των τιμών SSI [59]

2.3. Δείκτης ποιότητας ζωής

Ο Δείκτης Ποιότητας Ζωής (Life Quality Index – LQI) είναι ένα ολιστικό εργαλείο αξιολόγησης που δημιουργήθηκε για να αξιολογήσει τη συνολική ευημερία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες τόσο των ατόμων όσο και των κοινοτήτων. Λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλές μεταβλητές, δημιουργεί μια ενοποιημένη βαθμολογία που αντιπροσωπεύει το συνολικό βιοτικό επίπεδο [61].

Οι μεταβλητές είναι:

- **Υγεία:** αναφέρεται στην μέτρηση προσδόκιμου ζωής, την προσβασιμότητα στην υγειονομική περίθαλψη και την συνολική κατάσταση υγείας του πληθυσμού.
- **Εκπαίδευση:** περιλαμβάνει παράγοντες όπως τα ποσοστά αλφαριθμητισμού, τα εκπαιδευτικά επιτεύγματα και το επίπεδο εκπαίδευσης που παρέχεται.
- **Εισόδημα και οικονομική σταθερότητα:** καθορίζονται από το κατά κεφαλήν εισόδημα, τα επίπεδα απασχόλησης και το επίπεδο οικονομικής ασφάλειας που υπάρχει στην κοινωνία.
- **Περιβάλλον:** αφορά ζητήματα όπως η ποιότητα του αέρα και του νερού, η διαθεσιμότητα χώρων πρασίνου και τα επίπεδα ρύπανσης.
- **Ασφάλεια και προστασία:** καθορίζονται μέσω του ποσοστού εγκληματικότητας και του επιπέδου προσωπικής ασφάλειας που βιώνει κάποιος.
- **Συνθήκες στέγασης και διαβίωσης:** αναφέρονται στην ποιότητα και διαθεσιμότητα στέγασης, καθώς και στην πρόσβαση σε βασικές υπηρεσίες κοινής ωφέλειας.
- **Κοινωνική και κοινοτική ζωή:** αξιολογεί πτυχές όπως η συμμετοχή της κοινότητας, οι κοινωνικές συνδέσεις και οι ευκαιρίες για πολιτιστική και ψυχαγωγική ενασχόληση.
- **Διακυβέρνηση και συμμετοχή των πολιτών:** αξιολογούνται με βάση την αποτελεσματικότητα των δομών διακυβέρνησης, την πολιτική σταθερότητα και τα επίπεδα συμμετοχής των πολιτών.

Μερικοί δείκτες ποιότητας ζωής είναι:

Air Quality Life Index (AQLI)

Ο Δείκτης Ζωής Ποιότητας Αέρα (AQLI) αποτελεί μια ποσοτική μέτρηση που διατυπώθηκε από το Ινστιτούτο Ενεργειακής Πολιτικής στο Πανεπιστήμιο του Σικάγο (Energy Policy Institute at the University of Chicago, EPIC) και αξιολογεί τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στο προσδόκιμο ζωής. Ο AQLI μετατρέπει αποτελεσματικά τις συγκεντρώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις αντίστοιχες επιπτώσεις τους στο προσδόκιμο ζωής, προσφέροντας έτσι έναν ξεκάθαρο και κατανοητό δείκτη της πιθανής αύξησης της διάρκειας ζωής που θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω βελτιώσεων στην ποιότητα του αέρα.

Πλεονεκτήματα:

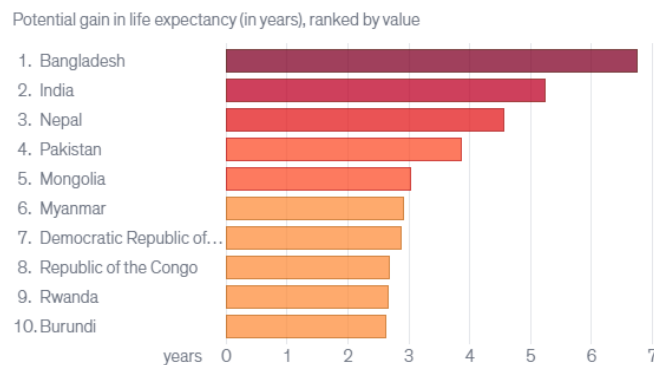
- ♦ Άμεση μέτρηση επιπτώσεων στην υγεία: μετατρέπει τις περίπλοκες στατιστικές για την ατμοσφαιρική ρύπανση σε απτή ποσοτικοποίηση της μείωσης του προσδόκιμου ζωής, διευκολύνοντας έτσι την επικοινωνία των επιπτώσεων της υγείας που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση τόσο στον γενικό πληθυσμό όσο και στους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής.
- ♦ Παγκόσμια Κάλυψη: ο δείκτης προσφέρει ολοκληρωμένα δεδομένα για μια εκτεταμένη σειρά γεωγραφικών περιοχών, που περιλαμβάνει τόσο παγκόσμιες όσο και τοπικές κλίμακες, γεγονός που επιτρέπει τη σχολαστική ανάλυση σε διάφορες περιοχές και υποστηρίζει διεθνείς συγκρίσεις.

- Συνάφεια πολιτικής: δίνοντας έμφαση στο προσδόκιμο ζωής, ο AQLI αντιμετωπίζει έναν κρίσιμο δείκτη δημόσιας υγείας, καθιστώντας τον ένα τρομερό εργαλείο για την υποστήριξη τροπολογιών πολιτικής που στοχεύουν στον μετριασμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- Προσιτότητα: καθιστά τα πολύπλοκα περιβαλλοντικά δεδομένα πιο απλά, ενισχύοντας την κατανόηση μεταξύ των απλών ατόμων, γεγονός που έχει τη δυνατότητα να ανυψώσει τη συνείδηση του κοινού και να υποστηρίξει βελτιώσεις στην ποιότητα του αέρα.
- Μακροπρόθεσμη Προοπτική: ενσωματώνοντας την πτυχή της παρατεταμένης έκθεσης στην ατμοσφαιρική ρύπανση, αποδίδει μια πιο ολιστική κατανόηση των συνολικών επιπτώσεων της ποιότητας του αέρα στο προσδόκιμο ζωής για εκτεταμένες διάρκειες.

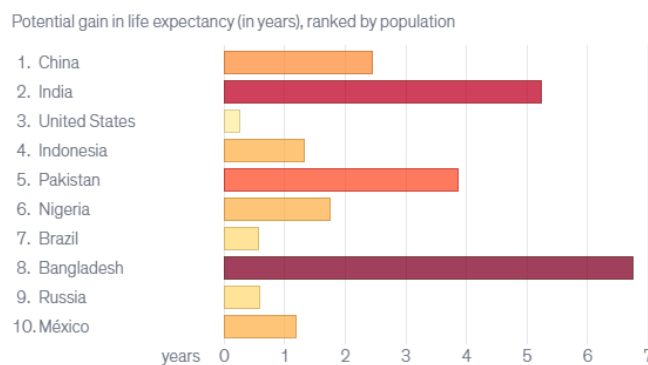
Μειονεκτήματα:

- Εστίαση μόνο στα PM_{2.5}: αντιμετωπίζει κυρίως τα PM_{2.5}, ενώ παραμελεί άλλους επιβλαβείς ρύπους όπως το όζον και το διοξείδιο του αζώτου.
- Υποθέσεις στην εκτίμηση επιπτώσεων στην υγεία: βασίζεται σε επιδημιολογικά μοντέλα που εκτιμούν τις μειώσεις του προσδόκιμου ζωής με βάση δυνητικά ελλιπή δεδομένα υγείας.
- Έλλειψη οξείας έκθεσης: δίνει προτεραιότητα στη μακροπρόθεσμη έκθεση στα PM_{2.5}, παραβλέποντας τις επιζήμιες βραχυπρόθεσμες αιχμές έκθεσης που επηρεάζουν τις ευάλωτες ομάδες.
- Περιορισμοί δεδομένων σε ορισμένες περιοχές: η αξιοπιστία του εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων για την ατμοσφαιρική ρύπανση, τα οποία μπορεί να είναι ανεπαρκή στις αναπτυσσόμενες χώρες.
- Εστίαση στο προσδόκιμο ζωής: αν και το προσδόκιμο ζωής είναι ζωτικής σημασίας, ο AQLI αποτυγχάνει να συμπεριλάβει άλλα αποτελέσματα για την υγεία, όπως η νοσηρότητα και οι οικονομικές επιπτώσεις.
- Περιβαλλοντικοί και κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες: ο δείκτης αγνοεί μια ολοκληρωμένη σειρά περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών καθοριστικών παραγόντων που επηρεάζουν τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην υγεία.

Η πιο πρόσφατη κατάταξη είναι του 2021. Με βάση αυτήν η χώρα με το μεγαλύτερο πιθανό κέρδος στο προσδόκιμο ζωής, αν ανταποκριθεί στις κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ για τα αιωρούμενα σωματίδια, είναι το Μπαγκλαντές με την πιθανή αύξηση να ισούται με 6,76 χρόνια [62–64].



Εικόνα 2.9 Οι 10 χώρες όπου οι άνθρωποι θα κερδίσουν τα περισσότερα χρόνια ζωής το 2021 [64]



Εικόνα 2.10 Τα πιθανά κέρδη στο προσδόκιμο ζωής που θα είχαν οι πιο πυκνοκατοικημένες χώρες στον κόσμο το 2021 [64]

Numbeo's Quality of Life Index

Ο δείκτης ποιότητας ζωής του Numbeo αξιολογεί διάφορους παράγοντες, όπως το κόστος ζωής, τα επίπεδα ρύπανσης, την ασφάλεια, την ποιότητα της υγειονομικής περίθαλψης και τις συνθήκες κυκλοφορίας. Πρόσφατες κατατάξεις έχουν προσδιορίσει το Λουξεμβούργο, την Ολλανδία και τη Δανία ως κορυφαίες χώρες όσον αφορά την ποιότητα ζωής.

Πλεονεκτήματα:

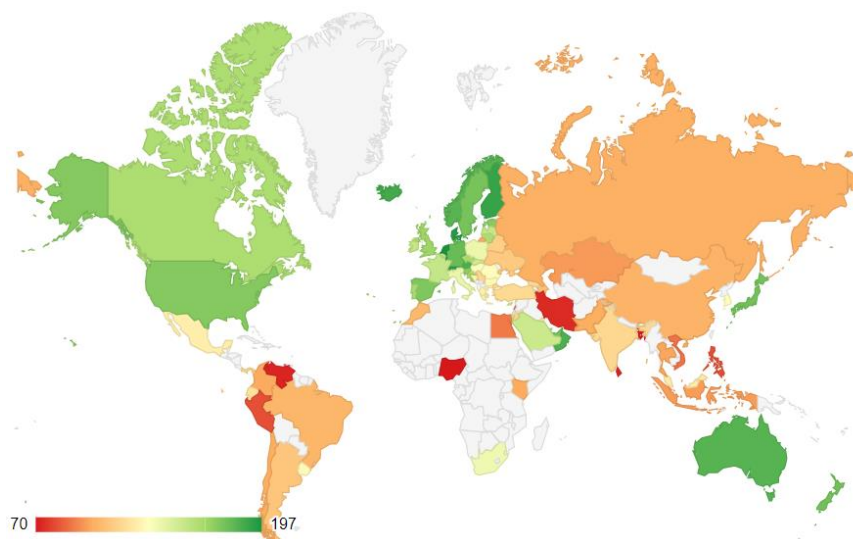
- Δεδομένα παρεχόμενα από τον χρήστη: Προσφέρει έγκαιρα δεδομένα που δημιουργούνται από τους χρήστες που καταγράφουν αποτελεσματικά τις παρούσες συνθήκες.
- Εκτεταμένες μεταβλητές: Περιλαμβάνει μια ποικιλία μεταβλητών που επηρεάζουν το βιοτικό επίπεδο.
- Φιλικότητα προς τον χρήστη: Η πλατφόρμα είναι διαισθητική και διευκολύνει την απλή σύγκριση μεταξύ διαφορετικών πόλεων και χωρών.

Παρά τα πλεονεκτήματά του, πλήττεται και από αρκετούς περιορισμούς αρκετοί εκ των οποίων δημιουργούνται εξαιτίας των θετικών του στοιχείων.

Μειονεκτήματα:

- Αξιοπιστία: ο δείκτης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από δεδομένα χρηστών, τα οποία ενδέχεται να ποικίλουν σε ακρίβεια και να μην αντιπροσωπεύουν ολόκληρο τον πληθυσμό.
- Γεωγραφική προκατάληψη: με τις συνεισφορές να τείνουν να προέρχονται από τεχνολογικά έμπειρα και εύπορα άτομα που κατοικούν κυρίως σε αστικά περιβάλλοντα, με αποτέλεσμα πιθανή διαστρέβλωση του δείκτη.
- Υποκειμενικότητα: ορισμένα στοιχεία όπως η ασφάλεια και η ρύπανση είναι υποκειμενικά και επηρεάζονται από προσωπικές αντιλήψεις, οδηγώντας σε αποκλίσεις μεταξύ των ερωτηθέντων.
- Περιορισμένο πεδίο εφαρμογής: μπορεί να μην καλύπτει πλήρως όλες τις διαστάσεις της ποιότητας ζωής, όπως η ψυχική ευεξία, οι πολιτιστικές ανέσεις και συγκεκριμένες κοινωνικές ανησυχίες.
- Χρονική συνάφεια: τα δεδομένα ενδέχεται να μην ενημερώνονται αρκετά συχνά ώστε να αντικατοπτρίζουν τις γρήγορες αλλαγές στις συνθήκες διαβίωσης εντός χωρών ή πόλεων.
- Σύγκριση δεδομένων: οι διαφορές στην αναφορά και την ερμηνεία δεδομένων μεταξύ των περιοχών δημιουργούν προκλήσεις για την πραγματοποίηση άμεσων συγκρίσεων.

Η Ολλανδία ήταν η πρώτη χώρα στην κατάταξη το 2023 με τον δείκτη να ισούται 196,7. Τελευταία χώρα στην 84^η θέση ήταν η Νιγηρία με 38,5 και η Ελλάδα ήταν στην 26^η θέση με 128,6. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όσο μεγαλύτερο ο δείκτης τόσο καλύτερο το επίπεδο ζωής [65,66].



Εικόνα 2.11 Numbeo's Quality of Life Index 2023 [66]

OECD Better Life Index

Ο δείκτης καλύτερης ζωής του ΟΟΣΑ (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης), είναι ένα δυναμικό εργαλείο που έχει σχεδιαστεί για την αξιολόγηση της ποιότητας ζωής σε διάφορα έθνη. Αυτό το εργαλείο δίνει τη δυνατότητα στα άτομα να πραγματοποιούν συγκρίσεις μεταξύ των χωρών αξιολογώντας έντεκα κρίσιμους τομείς, καθένας από τους οποίους αντικατοπτρίζει μια θεμελιώδη διάσταση της ανθρώπινης ύπαρξης.

- | | |
|--------------------|---|
| 1. Στέγαση | 7. Συμμετοχή στα κοινά |
| 2. Εισόδημα | 8. Υγεία |
| 3. Θέσεις εργασίας | 9. Ικανοποίηση από τη ζωή |
| 4. Κοινότητα | 10. Ασφάλεια |
| 5. Εκπαίδευση | 11. Ισορροπία μεταξύ επαγγελματικής και προσωπικής ζωής |
| 6. Περιβάλλον | |

Πλεονεκτήματα:

- Ολιστική προσέγγιση: ενσωματώνει διάφορες πτυχές της ευημερίας, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη προοπτική για την ποιότητα ζωής που υπερβαίνει τα οικονομικά μέτρα όπως το Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν (ΑΕΠ).
- Αλληλεπίδραση χρήστη: δίνει τη δυνατότητα στα άτομα να αξιολογούν τις χώρες με βάση τις δικές τους αξίες και προτεραιότητες. Οι χρήστες μπορούν να εξατομικεύσουν τον δείκτη εκχωρώντας διαφορετικά βάρη σε κάθε θέμα σύμφωνα με τις προσωπικές τους προτεραιότητες, δημιουργώντας ένα προσαρμοσμένο μέτρο ευεξίας.
- Πολιτική διορατικότητα: ο δείκτης παρέχει πληροφορίες πολιτικής στους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, βοηθώντας τους στην κατανόηση των διαφορετικών πτυχών της ευημερίας και στον προσδιορισμό των περιοχών που απαιτούν βελτίωση.

Μειονεκτήματα:

- Πολυπλοκότητα και ερμηνεία: επηρεάζονται από τη συμπερίληψη 11 διαφορετικών θεμάτων, θέτοντας προκλήσεις για την κατανόηση των χρηστών. Ο συνδυασμός διαφορετικών μετρήσεων σε έναν μόνο δείκτη μπορεί να υποκρύψει σημαντικές λεπτομέρειες.
- Διαθεσιμότητα και ποιότητα δεδομένων: οι διαφορές μεταξύ των χωρών μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια και συγκρισιμότητα των ευρημάτων, καθώς ορισμένα έθνη ενδέχεται να μην έχουν δεδομένα για κάποιους δείκτες, με αποτέλεσμα ελλιπείς αξιολογήσεις.
- Σύγκριση δεδομένων: οι παραλλαγές στις πολιτιστικές αξίες και προτεραιότητες των χρηστών μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικές ερμηνείες του τι καθορίζει την υψηλή ποιότητα ζωής.
- Χρονική συνάφεια: η εξάρτηση του δείκτη σε περιοδικά ενημερωμένα δεδομένα ενδέχεται να αποτύχει να καταγράψει τις γρήγορες αλλαγές στην ευημερία που προκαλούνται από οικονομικές, κοινωνικές ή περιβαλλοντικές διακυμάνσεις.
- Ευρύ πεδίο εφαρμογής: μπορεί να αποσπάσει την προσοχή από συγκεκριμένα ζητήματα κρίσιμα για ορισμένες περιοχές ή πληθυσμούς, παραμελώντας ενδεχομένως βαθιά τοπικά ζητήματα που επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα ζωής.
- Επιπτώσεις της πολιτικής: οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής προσπαθώντας να τον μετατρέψουν σε δραστικά μέτρα για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των τοπικών αναγκών, μπορεί να θεωρήσουν δύσκολο να προσδιορίσουν συγκεκριμένους τομείς για παρέμβαση λόγω της ευρείας και συγκεντρωτικής φύσης του δείκτη,

Ο δείκτης καλύτερης ζωής του ΟΟΣΑ δεν έχει κατάταξη χωρών, επειδή ο υπολογισμός του είναι καθαρά υποκειμενικός με βάση την βαρύτητα που θα δώσει ο χρήστης στην κάθε παράμετρο [67].



Εικόνα 2.12 Οι έντεκα παράμετροι του OECD Better Life Index [67]

Human Development Index (HDI)

Ο Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης (HDI) αντιπροσωπεύει μια σύνθετη μέτρηση που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση και την κατηγοριοποίηση των εθνών σύμφωνα με τον βαθμό ανθρώπινης ανάπτυξης τους. Δημιουργήθηκε από το Πρόγραμμα Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (UNDP) και διανέμεται σε ετήσια βάση στην Έκθεσή του για την Ανθρώπινη Ανάπτυξη [68].

Ο HDI αποτελείται από τρεις κύριες συνιστώσες [68,69]:

- Προσδόκιμο ζωής κατά τη γέννηση (συνιστώσα υγείας): αξιολογεί την ικανότητα να διατηρηθεί μια παρατεταμένη και υγιής ζωή. Η αύξηση του προσδόκιμου ζωής σημαίνει βελτίωση των συνολικών συνθηκών υγείας του πληθυσμού.
- Δείκτης εκπαίδευσης (συνιστώσα εκπαίδευσης):
 - Μέσος όρος σχολικών ετών: αυτή η μέτρηση αντικατοπτρίζει τη μέση διάρκεια του μορφωτικού επιπέδου μεταξύ ατόμων ηλικίας 25 ετών και άνω.
 - Αναμενόμενα έτη σχολικής φοίτησης: αυτός ο αριθμός υποδηλώνει τον σωρευτικό αριθμό των εκπαιδευτικών ετών που μπορεί να προσδοκά ότι θα λάβει ένα παιδί σε σχολική ηλικία, εάν συνεχιστούν οι τρέχουσες τάσεις στα ποσοστά εγγραφής ανάλογα με την ηλικία καθ' όλη τη διάρκεια της εκπαιδευτικής διαδρομής του παιδιού.
- Ακαθάριστο Εθνικό Εισόδημα (ΑΕΕ) κατά κεφαλήν (οικονομική συνιστώσα): δείχνει το μέσο εισόδημα των ατόμων σε ένα έθνος. Προσαρμόζεται για ισοτιμία αγοραστικής δύναμης έτσι ώστε να διευκολύνει τις συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών χωρών.

Το HDI υπολογίζεται λαμβάνοντας τον γεωμετρικό μέσο όρο των κανονικοποιημένων δεικτών για καθεμία από τις τρεις συνιστώσες [70]:

$$\text{HDI} = \sqrt[3]{\text{Health Index} \times \text{Education Index} \times \text{Income Index}}$$

Οι χώρες ταξινομούνται σε τέσσερα επίπεδα με βάση τη βαθμολογία τους HDI:

- Πολύ υψηλή ανθρώπινη ανάπτυξη: HDI 0,800 και άνω
- Υψηλή ανθρώπινη ανάπτυξη: HDI από 0,700 έως 0,799
- Μέση Ανθρώπινη Ανάπτυξη: HDI από 0,550 έως 0,699
- Χαμηλή ανθρώπινη ανάπτυξη: HDI κάτω από 0,550

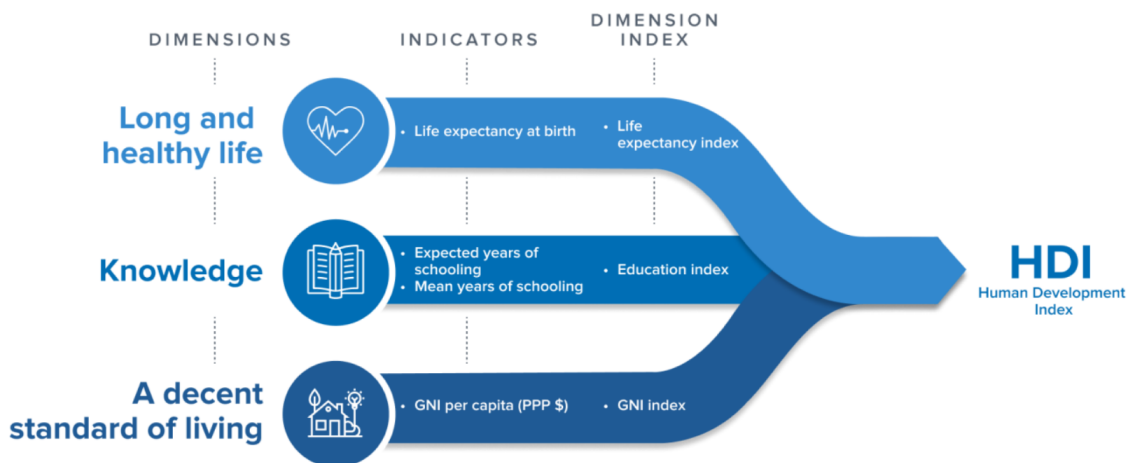
Πλεονεκτήματα:

- ♦ Ολοκληρωμένο μέτρο: ενσωματώνει τις διαστάσεις της υγείας, της εκπαίδευσης και του εισοδήματος, παρουσιάζοντας μια πολύπλευρη προοπτική για την ανάπτυξη πέρα από απλές οικονομικές μετρήσεις.
- ♦ Συγκριτικό εργαλείο: λειτουργεί ως συγκριτικός μηχανισμός για χώρες και περιφέρειες, βοηθώντας τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και τους ερευνητές στην αξιολόγηση και τη συγκριτική αξιολόγηση της αναπτυξιακής προόδου.
- ♦ Απλότητα και σαφήνεια: είναι εύκολος στην κατανόηση, ενισχύοντας την προσβασιμότητά του σε διάφορους ενδιαφερόμενους φορείς, συμπεριλαμβανομένων των υπευθύνων χάραξης πολιτικής και του γενικού πληθυσμού.
- ♦ Εστίαση στους ανθρώπους: δίνοντας προτεραιότητα στο προσδόκιμο ζωής, την εκπαίδευση και το εισόδημα, θέτει σε πρώτο πλάνο την ανθρώπινη ευημερία, ευθυγραμμιζόμενο με ευρύτερα αναπτυξιακά πρότυπα.
- ♦ Παγκόσμιο Πρότυπο: ως ένας διεθνώς αναγνωρισμένος δείκτης, θεσπίζει ένα ενιαίο πλαίσιο για την αξιολόγηση της ανάπτυξης, την προώθηση του παγκόσμιου διαλόγου και της συνεργασίας.

Μειονεκτήματα

- ♦ Υπεραπλούστευση: δυνητικά μειώνει την πολυπλοκότητα της ανάπτυξης σε ένα μοναδικό μέτρο, παραβλέποντας βασικούς παράγοντες όπως η ανισότητα και οι κοινωνικοοικονομικές συνθήκες.
- ♦ Αγνοεί την ανισότητα: παραβλέπει την ενδοεθνική ανισότητα, με αποτέλεσμα παραπλανητικές εκτιμήσεις για την ευημερία.
- ♦ Εξαίρεση περιβαλλοντικών παραγόντων: αποτυγχάνει να ενσωματώσει την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη διαρκή ανάπτυξη, επιτρέποντας υψηλές βαθμολογίες παρά τις επιβλαβείς οικολογικές πρακτικές.
- ♦ Περιορισμένο εύρος δεικτών: η εστίαση του HDI σε τρεις διαστάσεις μπορεί να αποκλείσει κρίσιμους αναπτυξιακούς παράγοντες όπως η πολιτική ελευθερία και η κοινωνική ένταξη, παραβλέποντας πτυχές ποιοτικής διακυβέρνησης.
- ♦ Ποιότητα και διαθεσιμότητα δεδομένων: η αξιοπιστία του HDI εξαρτάται από την ποιότητα και τη συνέπεια των εθνικών δεδομένων, τα οποία μπορεί να είναι ξεπερασμένα ή να βασίζονται σε εκτιμήσεις, επηρεάζοντας την ακρίβεια του δείκτη.
- ♦ Αυθαίρετη στάθμιση: η ίση στάθμιση της υγείας, της εκπαίδευσης και του εισοδήματος από το HDI μπορεί να μην αντιπροσωπεύει με ακρίβεια τη σχετική σημασία τους σε διαφορετικά πλαίσια ή πληθυσμούς.

Οι χώρες της Βόρειας Ευρώπης κυριαρχούν στην κορυφαία κατάταξη του HDI, ενώ οι χαμηλότερες βαθμολογίες παρατηρούνται κυρίως στις αφρικανικές χώρες. Η πρώτη χώρα στην κατάταξη 2022, με τον καλύτερο δείκτη ανθρώπινης ανάπτυξης, είναι η Ελβετία με δείκτη 0,967. Η τελευταία χώρα στην 193^η θέση είναι η Σομαλία με δείκτη 0,380 Η Ελλάδα βρίσκεται στην 33^η θέση με δείκτη 0,893 [71].



Εικόνα 2.13 Συνιστώσες και δείκτες HDI [68]

3. Κεφάλαιο 3^ο: Τρόποι παρακολούθησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης

3.1. Σταθμοί Μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Η παρακολούθηση, καταγραφή και συλλογή δεδομένων που αφορούν την ατμοσφαιρική ρύπανση είναι μείζονος σημασίας για την διασφάλιση της υγείας και της ευζωίας της ανθρωπότητας. Τα δεδομένα αυτά είθισται να συλλέγονται με την χρήση σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Δεδομένου ότι τα στοιχεία από τους σταθμούς μέτρησης, χρησιμοποιούνται για την καλύτερη αξιολόγηση των ήδη υπάρχοντων νόμων, κανονισμών και οδηγιών, αλλά και για την θέσπιση νέων που θα διέπουν την παγκόσμια κοινότητα και θα διασφαλίζουν την ανθρώπινη υγεία, είναι υψίστης σημασίας τα στοιχεία αυτά να είναι το κατά δύναμιν έγκυρα και να χρειάζονται όσο το δυνατόν λιγότερες παρεμβάσεις για διορθώσεις.

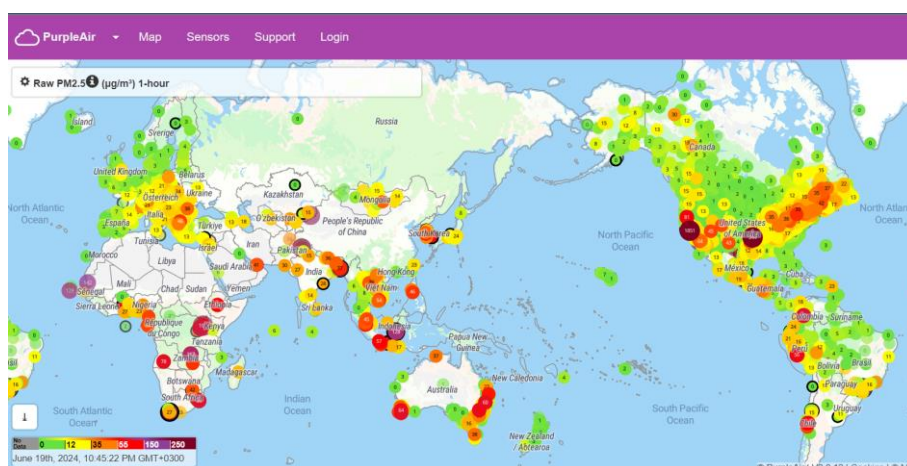


Εικόνα 3.1 Σταθμός μέτρησης αερορύπανσης στο προαύλιο της Περιφερειακής Ενότητας Μαγνησίας [72]

3.2. PurpleAir

Για την συλλογή των ερευνητικών δεδομένων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έγινε χρήση της ηλεκτρονικής πλατφόρμας του PurpleAir. Η εν λόγω πλατφόρμα παρέχεται δωρεάν στους χρήστες του διαδικτύου και αποσκοπεί στην παρακολούθηση, σε πραγματικό χρόνο, της μεταβολής της ποιότητας της ατμόσφαιρας παγκοσμίως (www.purpleair.com).

Το κύριο εργαλείο που δύναται να χρησιμοποιήσει το κοινό, είναι ο παγκόσμιος διαδραστικός χάρτης, πάνω στον οποίο απεικονίζονται οι σημειακοί μετρητές που είναι εγκατεστημένοι σε διάφορα σημεία της γης. Παρακάτω παρατίθεται ένα στιγμιότυπο οθόνης από την αρχική σελίδα του χάρτη του PurpleAir.



Εικόνα 3.2 Στιγμιότυπο οθόνης του διαδραστικού χάρτη του PurpleAir [73]

Αξίζει να σημειωθεί, είναι εμφανές και στο παραπάνω στιγμιότυπο οθόνης, ότι ανάλογα με την ποσότητα αιωρούμενων σωματιδίων (PM_{2.5}), το χρώμα στην σήμανση του μετρητή αλλάζει.



- Χρώμα Γκρι: «No Data», δηλαδή ο μετρητής για κάποιον λόγο δεν μετράει την ποιότητα του αέρα. Αυτό συνήθως οφείλεται σε κάποια βλάβη του δικτύου σύνδεσης ή σε κάποια μηχανική βλάβη του μετρητή.
- Χρώμα Πράσινο: «0», δηλαδή η ποσότητα PM_{2.5} στον αέρα είναι από 0 έως 12 μg/m³. Ουσιαστικά, η ποιότητα του αέρα είναι ικανοποιητική, χωρίς να ελλοχεύονται κίνδυνοι σε περίπτωση 24ώρης έκθεσης στον ατμοσφαιρικό αέρα.
- Χρώμα Κίτρινο: «12», δηλαδή η ποσότητα PM_{2.5} στον αέρα είναι από 12 έως 35 μg/m³. Η ποιότητα του αέρα κρίνεται μεν αποδεκτή, προτείνεται δε, στα άτομα με ευαισθησία στην αέρια ρύπανση, να μην εκτεθούν στον ατμοσφαιρικό αέρα.
- Χρώμα Πορτοκαλί: «35», δηλαδή η ποσότητα PM_{2.5} στον αέρα είναι από 35 έως 55 μg/m³. Συστήνεται ιδιαίτερη προσοχή στις ευπαθείς ομάδες.
- Χρώμα Κόκκινο: «55», δηλαδή η ποσότητα PM_{2.5} στον αέρα είναι από 55 έως 150 μg/m³. Υπάρχει το ενδεχόμενο οι ευπαθείς ομάδες να έχουν σοβαρότερες συνέπειες από την έκθεση στον ατμοσφαιρικό αέρα, αλλά μπορεί και ο γενικός πληθυσμός να βιώσει κάποια συμπτώματα (π.χ. βήχας, ενόχληση στα μάτια κλπ.)
- Χρώμα Μωβ: «150», δηλαδή η ποσότητα PM_{2.5} στον αέρα είναι από 150 έως 250 μg/m³. Εντείνονται οι ανησυχίες και ο κίνδυνος επιπτώσεων στην υγεία όλου του εμπλεκόμενου πληθυσμού με 24ώρη έκθεση, αυξάνεται.
- Χρώμα Σκούρο κόκκινο: «250», δηλαδή η ποσότητα PM_{2.5} στον αέρα είναι άνω των 250 μg/m³. Σε αυτές τις περιπτώσεις η κατάσταση κρίνεται έκτακτη και είναι πολύ πιθανό όλος ο πληθυσμός με 24ώρη έκθεση στον ατμοσφαιρικό αέρα να έχει επιπτώσεις στην υγεία του.

3.3. Συσκευές παρακολούθησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Οι συσκευές παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση της συγκέντρωσης διάφορων ρύπων στον αέρα. Βοηθούν στην αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα και στη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Οι συσκευές ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του ρύπου που μετρούν, το περιβάλλον χρήσης (εσωτερικά ή εξωτερικά) και το επίπεδο λεπτομέρειας που απαιτείται. Αυτό έχει οδηγήσει στην ύπαρξη πολλών διαφορετικών τύπων οργάνων παρακολούθησης. Ακολουθεί μια σύντομη επισκόπηση των τεχνολογιών που επικρατούν [74–80].

- Μετρητές σωματιδιακής ύλης
 - Βαρομετρικοί δειγματολήπτες: συλλέγουν σωματίδια σε ένα φίλτρο, το οποίο στη συνέχεια ζυγίζεται για να προσδιοριστεί η συγκέντρωση.
 - Beta Attenuation Monitors (BAM): χρησιμοποιούν ακτινοβολία βήτα για τη μέτρηση σωματιδίων. Η μείωση της ακτινοβολίας είναι ανάλογη με τη μάζα των σωματιδίων σε ένα φίλτρο.
 - Λείζερ σκέδασης: χρησιμοποιούν σκέδαση φωτός για την μέτρηση και το μέγεθος των σωματιδίων
- Μετρητές αερίων
 - Αισθητήρες υπέρυθρων αερίων (IRGA): χρησιμοποιούν απορρόφηση υπέρυθρου φωτός και μετράνε αέρια όπως CO, CO₂ και CH₄.
 - Αισθητήρες ιονισμού φλόγας (FID): ανιχνεύουν τους υδρογονάνθρακες στον αέρα ιονίζοντας το δείγμα με φλόγα.
 - Αισθητήρες χημειοφωταύγειας: μετρούν το φως που παράγει η αντίδραση μεταξύ NO και όζοντος (O₃), χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση NO_x.
 - Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες: μετρούν τη συγκέντρωση του αερίου με βάση το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τη χημική αντίδρασή του με την επιφάνεια του αισθητήρα.

- Μετρητές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC)
 - Αισθητήρες φωτοϊονισμού (PIDs): ιονίζουν τις VOC χρησιμοποιώντας υπεριώδη ακτινοβολία και μετράνε το ρεύμα που παράγεται.
 - Αισθητήρες ιονισμού φλόγας (FIDs): καίνε τις VOC και μετράνε τα ιόντα που παράγονται.
 - Αισθητήρες αέριας χρωματογραφία (GC): διαχωρίζουν τις VOC σε ένα δείγμα για μεμονωμένη ανάλυση.
- Όργανα απομακρυσμένης παρακολούθησης
 - Ανιχνευτές φωτός και εμβέλειας (LIDAR): χρησιμοποιούν λέιζερ για τη μέτρηση του κατακόρυφου προφίλ των αερολυμάτων και των αερίων στην ατμόσφαιρα.
 - Αισθητήρες διαφορικής οπτικής φασματοσκοπίας απορρόφησης (DOAS): μετρούν τα ίχνη αερίων αναλύοντας την απορρόφηση του ηλιακού φωτός ή του τεχνητού φωτός σε απόσταση.

3.4. Low-cost sensors

Οι αισθητήρες χαμηλού κόστους, όπως είναι οι αισθητήρες PurpleAir που χρησιμοποιούνται και στην παρούσα διπλωματική εργασία, μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά στην διαμόρφωση μίας εμπειριστατωμένης εικόνας για την ποιότητα της ατμόσφαιρας μίας περιοχής έρευνας. Κατά κανόνα, οι μετρήσεις που παρέχονται από έναν τέτοιο αισθητήρα αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα, οπότε σε συνδυασμό με το χαμηλό τους κόστους, θεωρούνται πολύ καλή λύση τόσο για την επιστημονική κοινότητα όσο και για το ευρύ κοινό με ιδιαίτερο ενδιαφέρον επί του θέματος.

Ανατρέχοντας στην βιβλιογραφία, μπορούμε να εντοπίσουμε αρκετές μελέτες περίπτωσης και πειράματα, όπου αισθητήρες χαμηλού κόστους χρησιμοποιούνται ως το κύριο όργανο για την παροχή δεδομένων. Με την χρήση μετρήσεων από τέτοιους αισθητήρες, ερευνητές αποπειράθηκαν να υπολογίσουν τις μακροπρόθεσμες συγκεντρώσεις PM_{2.5} από εσωτερικές πηγές [81]. Και στον Ελλαδικό χώρο έχουν σημειωθεί έρευνες που αφορούν μετρήσεις με αισθητήρες χαμηλού κόστους. Ειδικότερα, με σκοπό την αξιολόγηση του αισθητήρα «PurpleAir PA-II» σε πραγματικές συνθήκες, πάρθηκαν μετρήσεις στην Αθήνα (με μετρήσεις πέντε μηνών από το καλοκαίρι του 2019 έως και τον χειμώνα/την άνοιξη του 2020) και στα Ιωάννινα για την ίδια χρονική περίοδο [82].

4. Κεφάλαιο 4^ο: Μελέτη περίπτωσης

4.1. Διαδικασία συλλογής μετρήσεων

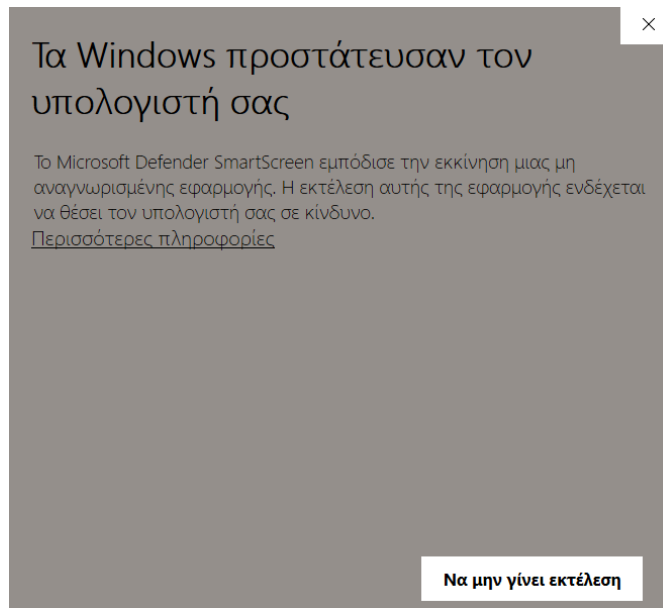
Στα πλαίσια της διπλωματικής δημιουργήθηκε ο παρακάτω οδηγός λήψης δεδομένων από το PurpleAir.

Οδηγός για λήψη δεδομένων PurpleAir

Βήμα 1^ο: Στέλνετε email στο contact@purpleair.com, το οποίο πρέπει να αναφέρει το ονοματεπώνυμο σας καθώς και το email στο οποίο επιθυμείτε να σας στείλουν τα API keys. Όταν σας απαντήσουν το email που θα στείλουν θα έχει δύο κλειδιά, το “Read key” και το “Write key”.

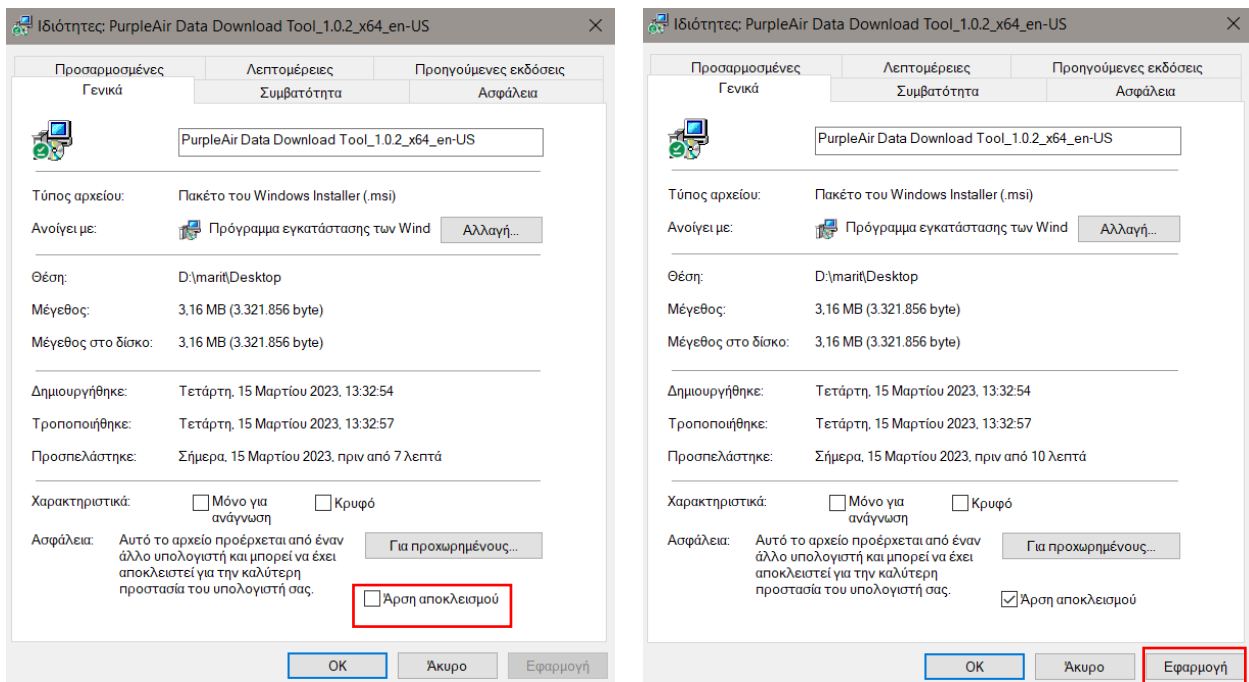
Βήμα 2^ο: Επισκεφτείτε αυτό το link <https://community.purpleair.com/t/purpleair-data-download-tool/3787> και κατεβάστε την εφαρμογή PurpleAir Date Download Tool ανάλογα με το λογισμικό του υπολογιστή σας.

Βήμα 3^ο: Ανοίξτε τον φάκελο στον οποίο κατέβηκε το Installer και τρέξε το. Αφού κάνετε διπλό κλικ στο installer το windows defender θα εμφανίσει το εξής μήνυμα:



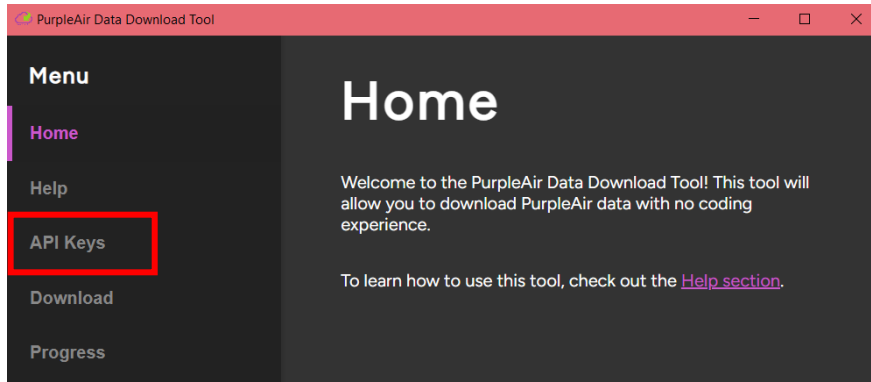
Η εφαρμογή δεν είναι κακόβουλη απλά δεν είναι γνωστή στη βάση δεδομένων του windows defender. Για να προσπεράσετε αυτό το μήνυμα και να εγκαταστήσετε την εφαρμογή πρέπει:

- α) Δεξί κλικ πάνω στο installer
- β) Ανοίξετε τις ιδιότητες (properties)
- γ) Θα εμφανιστεί αυτό το παράθυρο και θα πατήσετε «Άρση αποκλεισμού» και έπειτα «Εφαρμογή»

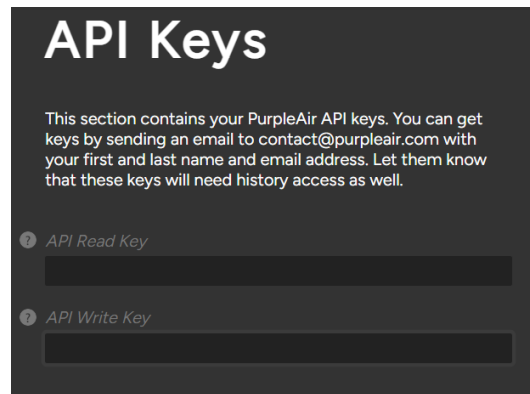


Βήμα 4°: Προχωρήστε στην εγκατάσταση του PurpleAir Date Download Tool.

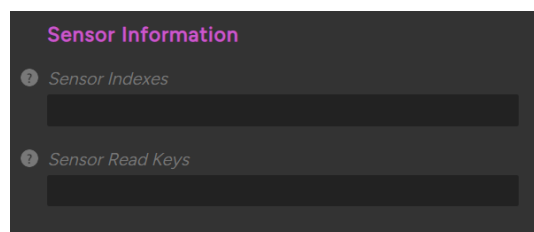
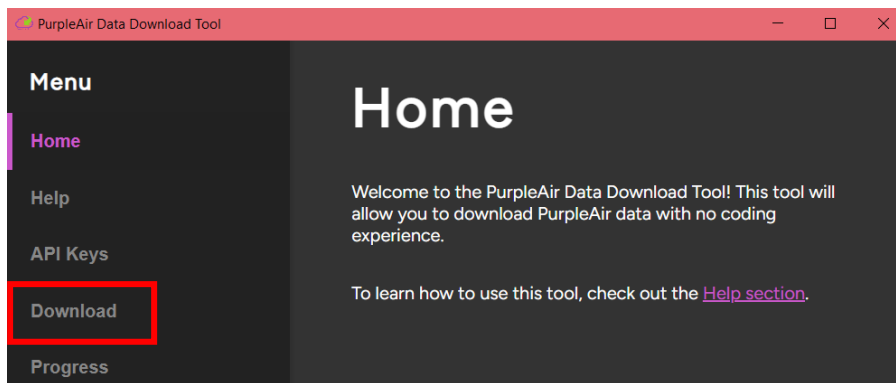
Βήμα 5°: Αφού εγκαταστήσετε την εφαρμογή ανοίξετε την. Θα δείτε το παρακάτω παράθυρο και θα πατήσετε το “API Keys”.



Βήμα 6^ο: Συμπληρώστε τα κλειδιά από το email.

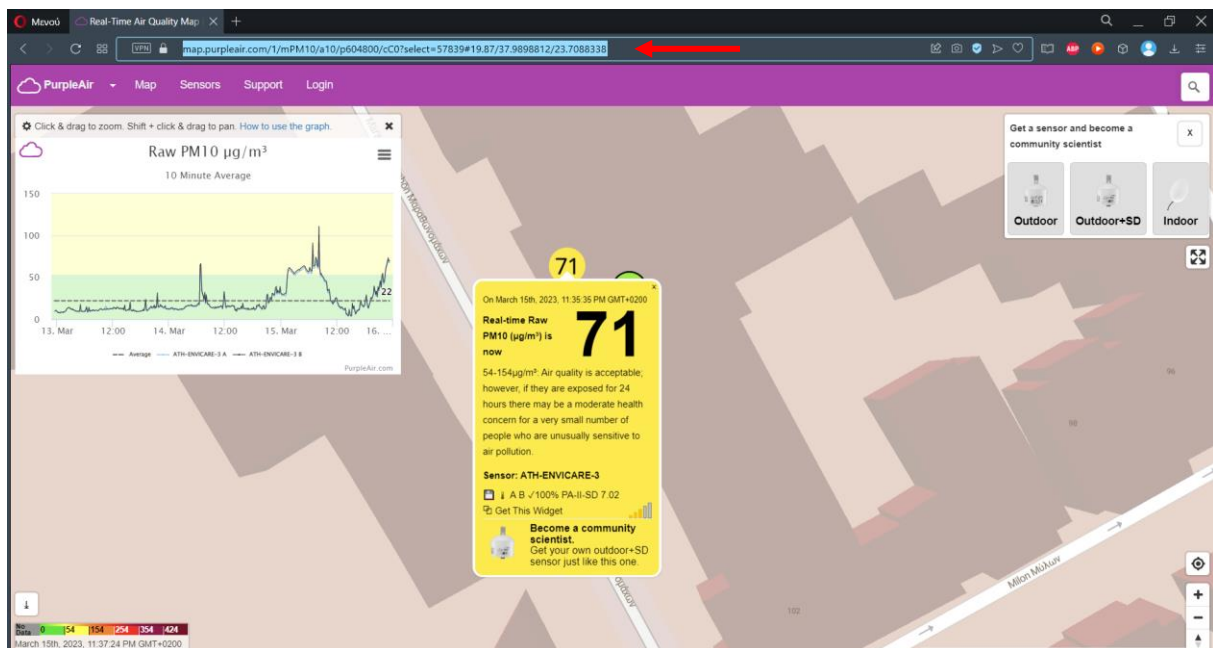


Βήμα 7^ο: Πηγαίνετε στο download. Εκεί θα σας ζητηθεί να συμπληρώστε κάποιες πληροφορίες σχετικά με τον αισθητήρα και τα δεδομένα που θέλετε να κατεβάσετε.



Όσον αφορά το Sensor Indexes:

1. Πηγαίνετε στον χάρτη του PurpleAir
2. Πατάτε πάνω στον αισθητήρα του οποίου τα δεδομένα θέλετε.
3. Πάτε στο URL της σελίδας



Εικόνα 4.1 Στιγμιότυπο οθόνης από τον διαδραστικό χάρτη PurpleAir [73]

- Εστω ότι θέλουμε τα δεδομένα του παραπάνω αισθητήρα με URL <https://map.purpleair.com/1/mPM10/a10/p604800/cC0?select=57839#19.87/37.9898812/23.7088338>. Το Sensor Index είναι τα νούμερα μετά το ίσον (=), δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση 57839.

Αν θέλετε δεδομένα για πάνω από έναν αισθητήρα, χωρίζετε τα Sensor Indexes με κόμμα χωρίς κενό μεταξύ τους. Για παράδειγμα 57839,57838...

Όσον αφορά το Sensor Read Key: Δεν χρειάζεται, εφόσον ο αισθητήρας είναι δημόσιος. Επομένως, αυτό το πεδίο μένει κενό.

Βήμα 8^ο: Αφού έχετε συμπληρώσει τα στοιχεία των αισθητήρων που θέλουμε, πρέπει να αναφέρετε ποια δεδομένα θέλετε να κατεβάσετε.

- Start/End Timestamp: Από μέχρι πότε θέλετε τα δεδομένα
- Average: Τον μέσο όρο των τιμών (10min, 60min). Αν πάτε το ποντίκι σας πάνω από το ερωτηματικό αριστερά της λέξης, θα σας δείξει τις χρονικές επιλογές που μπορείτε να διαλέξετε.
- Fields: Τα δεδομένα που θέλετε. Για παράδειγμα, θερμοκρασία, υγρασία και PM2,5.
- Save Directory: Επιλέγετε το φάκελο στον οποίο θέλετε να αποθηκευτεί το αρχείο που θα κατέβει.

Request Information

? Start Timestamp (inclusive)

? End Timestamp (exclusive)

? Average

? Fields

? Save Directory

Πιο συγκεκριμένα για το Fields, μπορείτε να ζητήσετε τα παρακάτω δεδομένα, όπως αναφέρονται στο link <https://api.purpleair.com/#api-sensors-get-sensor-history> μαζί με περαιτέρω πληροφορίες για το κάθε πεδίο συμπλήρωσης και τι είναι οι όροι στην παρακάτω φωτογραφία.

Αν θέλετε να κατεβάσετε πολλά δεδομένα στο ίδιο αρχείο, χωρίζετε τον τίτλο τους με κόμμα χωρίς κενά μεταξύ τους. Για παράδειγμα, temperature, humidity_a, pm1.0_atm.

```
Station information and status fields:
hardware *, latitude *, longitude *, altitude *, firmware_version *, rssi,
uptime, pa_latency, memory,

Environmental fields:
humidity, humidity_a, humidity_b, temperature, temperature_a,
temperature_b, pressure, pressure_a, pressure_b

Miscellaneous fields:
voc, voc_a, voc_b, analog_input

PM1.0 fields:
pm1.0_atm, pm1.0_atm_a, pm1.0_atm_b, pm1.0_cf_1, pm1.0_cf_1_a,
pm1.0_cf_1_b

PM2.5 fields:
pm2.5_alt, pm2.5_alt_a, pm2.5_alt_b, pm2.5_atm, pm2.5_atm_a,
pm2.5_atm_b, pm2.5_cf_1, pm2.5_cf_1_a, pm2.5_cf_1_b

PM10.0 fields:
pm10.0_atm, pm10.0_atm_a, pm10.0_atm_b, pm10.0_cf_1, pm10.0_cf_1_a,
pm10.0_cf_1_b

Visibility fields:
scattering_coefficient, scattering_coefficient_a,
scattering_coefficient_b, deciviews, deciviews_a, deciviews_b,
visual_range, visual_range_a, visual_range_b

Particle count fields:
0.3_um_count, 0.3_um_count_a, 0.3_um_count_b, 0.5_um_count,
0.5_um_count_a, 0.5_um_count_b, 1.0_um_count, 1.0_um_count_a,
1.0_um_count_b, 2.5_um_count, 2.5_um_count_a, 2.5_um_count_b,
5.0_um_count, 5.0_um_count_a, 5.0_um_count_b, 10.0_um_count,
10.0_um_count_a, 10.0_um_count_b
```

Εικόνα 4.2 Στιγμιότυπο οθόνης στο οποίο φαίνονται τα δεδομένα που μπορεί να ζητήσει κάποιος από το PurpleAir [83]

4.2. Περιγραφή μετρήσεων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των δεδομένων που μπορεί κάποιος να κατεβάσει μέσω του PurpleAir, ποια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική και γιατί.

Τα δεδομένα χωρίζονται σε οχτώ κατηγορίες: δεδομένα πληροφοριών σταθμού και κατάστασης, περιβαλλοντικά δεδομένα, διάφορα δεδομένα, δεδομένα PM_{1,0}, PM_{2,5} και PM₁₀, δεδομένα ορατότητας και δεδομένα καταμέτρησης σωματιδίων. Επίσης σε κάθε αρχείο δεδομένων περιλαμβάνονται χωρίς να ζητηθούν η ημερομηνία και η ώρα καταγραφής σε παγκόσμια ώρα coordinated universal time (UTC) [83,84].

Κάθε αισθητήρας έχει δύο μετρητές ως δικλίδα ασφαλείας, οι μετρήσεις των οποίων καταγράφονται σε χωριστά και χαρακτηρίζονται ως Α και Β. Όλες οι κατηγορίες εκτός των δεδομένων σχετικά με την κατάσταση του σταθμού έχουν τιμές Α και Β αν ο αισθητήρας είναι εξοπλισμένος με δύο μετρητές που καταγράφουν τα δεδομένα της κατηγορίας.

Δεδομένα πληροφοριών σταθμού και κατάστασης

- Latitude: Η τιμή θέσης γεωγραφικού πλάτους του αισθητήρα.
- Longitude: Η τιμή θέσης γεωγραφικού μήκους του αισθητήρα.
- Altitude: Το υψόμετρο της θέσης του αισθητήρα σε πόδια.
- Private: Εάν ο αισθητήρας έχει καταχωρηθεί ως ιδιωτικός ή δημόσιος. Πιθανές τιμές είναι: 0 = Δημόσιο ή 1 = Ιδιωτικό.
- Hardware: Οι αισθητήρες και το άλλο υλικό που εντοπίστηκε από το υλικολογισμικό.
- Firmware version: Η τελευταία γνωστή έκδοση υλικολογισμικού στη συσκευή.
- Rssi: Η ισχύς του σήματος Wi-Fi.
- Uptime: Ο χρόνος σε λεπτά από την έναρξη του υλικολογισμικού όπως αναφέρθηκε τελευταία από τον αισθητήρα.
- Pa latency: Ο χρόνος που απαιτείται για την αποστολή δεδομένων στους διακομιστές PurpleAir σε milliseconds.
- Memory: Δωρεάν μνήμη HEAP σε Kb.

Από τα παραπάνω χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα δεδομένα rssi για να καθοριστούν πιθανές διακοπές στη μεταφορά δεδομένων μέσω Wi-Fi, καθώς και πιθανές διακοπές στην ηλεκτροδότηση.

Περιβαλλοντικά δεδομένα

- Humidity: Σχετική υγρασία στο εσωτερικό του περιβλήματος του αισθητήρα (%). Κατά μέσο όρο, είναι 4% χαμηλότερη από τις συνθήκες περιβάλλοντος. Μηδενική τιμή εάν ο αισθητήρας δεν είναι εξοπλισμένος με μετρητή. Η μέτρηση της υγρασίας έχει τις εξής παραλλαγές:
 - Humidity: αποδίδει μέσο όρο για τα κανάλια A και B
 - Humidity_a: επιστρέφει τα δεδομένα του καναλιού A
 - Humidity_b: επιστρέφει τα δεδομένα του καναλιού B
- Temperature: Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του περιβλήματος του αισθητήρα σε Fahrenheit. Κατά μέσο όρο, είναι 8 F υψηλότερο από τις συνθήκες περιβάλλοντος. Μηδενική τιμή εάν ο αισθητήρας δεν είναι εξοπλισμένος με μετρητή. Όπως και η υγρασία, η μέτρηση της θερμοκρασίας έχει τις παραλλαγές:
 - Temperature
 - Temperature_a
 - Temperature_b
- Pressure: Η τρέχουσα πίεση σε Millibars. Ομοίως με τα άλλα περιβαλλοντικά δεδομένα η πίεση έχει τις παραλλαγές:
 - Pressure
 - Pressure_a
 - Pressure_b

Από τα περιβαλλοντικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν μόνο η υγρασία και η θερμοκρασία.

Διάφορα δεδομένα

- VOC: Συγκέντρωση πτητικών οργανικών ενώσεων (Volatile organic compounds ή VOCs) σε στατικές μονάδες iaq της Bosch σύμφωνα με το φύλλο προδιαγραφών BME680. Το συγκεκριμένο πεδίο είναι σε πειραματικό στάδιο και μηδενικό στους περισσότερους αισθητήρες της PurpleAir. Το VOC έχει τις παραλλαγές:
 - voc
 - voc_a
 - voc_b
- Analog input: Εάν έχει συνδεθεί κάτι σε αυτό δίνεται η μέτρηση της αναλογικής τάσης στην είσοδο ADC της πλακέτας ελέγχου του αισθητήρα PurpleAir.

Στην παρούσα διπλωματική δεν χρησιμοποιήθηκε κανέναν δεδομένο από αυτήν την κατηγορία.

Δεδομένα PM_{1,0}

- pm1.0_atm: Επιστρέφει τον μέσο όρο παραλλαγής ATM για τα κανάλια A και B. Η εκτιμώμενη συγκέντρωση μάζας PM_{1,0} (μg/m³). Παραλλαγές:
 - pm1.0_atm_a
 - pm1.0_atm_b
- pm1.0_cf_1: Επιστρέφει τον μέσο όρο παραλλαγής CF=1 για τα κανάλια A και B. Παραλλαγές:
 - pm1.0_cf_1_a
 - pm1.0_cf_1_b

Δεδομένα PM_{2,5}

- pm2.5_alt: Επιστρέφει τον μέσο όρο παραλλαγής ALT για τα κανάλια A και B. Η εκτιμώμενη συγκέντρωση μάζας PM_{2,5} (μg/m³) της παραλλαγής ALT προέρχεται από τις μετρήσεις σωματιδίων. Παραλλαγές:
 - pm2.5_alt_a
 - pm2.5_alt_b
- pm2.5_atm: Επιστρέφει τον μέσο όρο παραλλαγής ATM για τα κανάλια A και B. Παραλλαγές:
 - pm2.5_atm_a
 - pm2.5_atm_b
- pm2.5_cf_1: Επιστρέφει τον μέσο όρο παραλλαγής CF=1 για τα κανάλια A και B. Παραλλαγές:
 - pm2.5_cf_1_a
 - pm2.5_cf_1_b

Δεδομένα PM₁₀

- pm10.0_atm: Επιστρέφει τον μέσο όρο παραλλαγής ATM για τα κανάλια A και B. Η εκτιμώμενη συγκέντρωση μάζας PM₁₀ (μg/m³). Παραλλαγές:
 - pm10.0_atm_a
 - pm10.0_atm_b
- pm10.0_cf_1: Επιστρέφει τον μέσο όρο παραλλαγής CF=1 για τα κανάλια A και B. Παραλλαγές:
 - pm10.0_cf_1_a
 - pm10.0_cf_1_b

Από τα δεδομένα για τα αιρούμενα σωματίδια χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα pm2.5_cf_1, pm2.5_cf_1_a και pm2.5_cf_1_b. Η επιλογή έγινε λόγω της περισσότερης νομοθεσίας για τα PM_{2,5}.

Δεδομένα ορατότητας

- Scattering coefficient: Σκέδαση λεπτών σωματιδίων φωτός: Η αλληλεπίδραση του φωτός με τα λεπτά σωματίδια που προκαλεί την ανακατεύθυνση του φωτός από τη διαδρομή του. Κατά την εξέταση μιας σκηνής, η ομίχλη οφείλεται εν μέρει στο φως που εκπέμπεται από τα σκηνικά στοιχεία που διασκορπίζονται έξω από το οπτικό μονοπάτι και στο τυχαίο φως (φως του αέρα) που διαχέεται στη διαδρομή της όρασης. Παραλλαγές:
 - Scattering_coefficient
 - Scattering_coefficient_a
 - Scattering_coefficient_b
- Deciviews: Ένας δείκτης ομίχλης που σχετίζεται με τη σκέδαση και την εξαφάνιση του φωτός που σχετίζεται περίπου γραμμικά με την ανθρώπινη αντίληψη της ομίχλης. Παραλλαγές:
 - Deciviews
 - Deciviews_a
 - Deciviews_b

- Visual range: Συχνά αναφέρεται ως ορατότητα, το οπτικό εύρος είναι η απόσταση από τον παρατηρητή που ένα μεγάλο σκοτεινό αντικείμενο, π.χ. μια κορυφή βουνού ή ένα μεγάλο κτίριο, απλώς εξαφανίζεται από το οπτικό πεδίο. Παραλλαγές:
 - Visual_range
 - Visual_range_a
 - Visual_range_b

Δεν χρησιμοποιήθηκε κανένα δεδομένα από αυτήν την κατηγορία.

Δεδομένα καταμέτρησης σωματιδίων

Η καταμέτρηση συγκέντρωσης (σωματίδια/100ml) των όλων σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη από 0,3μm, 0,5μm, 1μm, 2,5μm, 5μm και 10μm και οι παραλλαγές τους.

- | | | |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ 0.3_um_count <ul style="list-style-type: none"> ➢ 0.3_um_count_a ➢ 0.3_um_count_b | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 0.5_um_count: <ul style="list-style-type: none"> ➢ 0.5_um_count_a ➢ 0.5_um_count_b | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 1.0_um_count: <ul style="list-style-type: none"> ➢ 1.0_um_count_a ➢ 1.0_um_count_b |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ 2.5_um_count: <ul style="list-style-type: none"> ➢ 2.5_um_count_a ➢ 2.5_um_count_b | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 5.0_um_count: <ul style="list-style-type: none"> ➢ 5.0_um_count_a ➢ 5.0_um_count_b | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 10.0_um_count: <ul style="list-style-type: none"> ➢ 10.0_um_count_a ➢ 10.0_um_count_b |

Δεν χρησιμοποιήθηκε κανένα δεδομένα από αυτήν την κατηγορία.

Διαφορά μεταξύ ALT, ATM και CF=1

Οι μετρητές λείζερ Plantower που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες PurpleAir παρέχουν τρία σετ μετρήσεων σωματιδίων με διαφορετικούς «συντελεστές διόρθωσης». Δύο από αυτούς οι συντελεστές διόρθωσης, CF=1 και ATM, αναπτύχθηκαν από τον κατασκευαστή Plantower. Ο τρίτος, ALT, αναπτύχθηκε από τον Lance Arthur Wallace και προστέθηκε σχετικά πρόσφατα στο δίκτυο του PurpleAir. Αυτοί οι συντελεστές βοηθούν στην εκτίμηση της πυκνότητας των σωματιδίων που διέρχονται από τους μετρητές λείζερ. Συνδυάζοντας αυτήν την εκτίμηση πυκνότητας με τον όγκο των σωματιδίων, οι μετρητές λείζερ μπορούν να υπολογίσουν μια μέτρηση μάζας, εκφρασμένη σε μικρογραμμάρια ανά κυβικό μέτρο ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) [85,86].

Η μεθοδολογία πίσω από την ανάπτυξη των CF=1 και ATM τους είναι άγνωστη. Παρά αυτές τις αβεβαιότητες, ο κατασκευαστής προσφέρει οδηγίες στο εγχειρίδιο λειτουργίας για το PMS5003, υποδεικνύοντας ότι το CF=1 ισχύει για τυπικό περιβάλλον (εσωτερικοί χώροι/θάλαμος), ενώ το CF=ATM είναι κατάλληλο για ατμοσφαιρικό περιβάλλον [85].

Ο συντελεστής διόρθωσης ALT, γνωστός και ως ALT-CF3 βασίζεται σε μια τεχνική που χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες για τον υπολογισμό των $\text{PM}_{2,5}$ από αισθητήρες που υπολογίζουν αριθμούς σωματιδίων σε διάφορες κατηγορίες μεγεθών. Τα δεδομένα από 33 αισθητήρες PurpleAir που βρίσκονται σε απόσταση 500 μέτρων από 27 αισθητήρες Federal Reference στην Καλιφόρνια, που συλλέχθηκαν σε διάστημα 18 μηνών, οδήγησαν στην επιλογή του 3.0 ως παράγοντα βαθμονόμησης [87,88].

Οι συντελεστές διόρθωσης CF=1 και ATM χρησιμοποιούνται για όλες τις διαμέτρους αιρούμενων σωματιδίων $\text{PM}_{0,1}$, $\text{PM}_{2,5}$ και PM_{10} , ενώ ο συντελεστής ALT έχει διαμορφωθεί μόνο για $\text{PM}_{2,5}$.

Θεωρείται ότι η φόρμουλα ALT παράγει τιμές με εξαιρετικά καλή ακρίβεια, κατά μέσο όρο 4-8%, σε σύγκριση με περίπου 10-15% για τον αλγόριθμο CF=1 [88]. Όμως παρά την καλύτερη ακρίβεια, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν οι τιμές του αλγορίθμου CF=1 και να γίνει περαιτέρω βαθμονόμηση.

4.3. Γιατί γίνεται βαθμονόμηση

Όσον αφορά την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία, οι αισθητήρες βρίσκονται κλεισμένοι σε πλαστικό κουβούκλιο το οποίο έχει διαφορετικές συνθήκες από το περιβάλλον. Αυτό έχει αποτέλεσμα, οι τιμές τις υγρασίας να τείνουν να είναι 4% χαμηλότερες και τις θερμοκρασίας 8F υψηλότερες από αυτές του περιβάλλοντος. Ως εκ τούτου είναι αναγκαία η βαθμονόμηση των τιμών ώστε να εξαιρεθεί τυχόν σφάλμα που οφείλεται στην παρέκκλιση του εξωτερικού περιβάλλοντος με αυτό εντός του πλαστικού κουβούκλιου [82,89]

Όσον αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια, μελέτες έχουν δείξει ότι χαμηλού κόστους αισθητήρες PurpleAir τείνουν να υποεκτιμούν και να υπερεκτιμούν την συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων συγκριτικά με τα αισθητήρες αναφοράς. Επίσης, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η απόκλιση των τιμών των αισθητήρων A και B, καθώς και η επιρροή της υψηλής υγρασίας στην μέτρηση των αιωρούμενων σωματιδίων [90–92]. Με βάση τα παραπάνω, η βαθμονόμηση των τιμών είναι αναγκαία ώστε εξαιρεθούν οι υποεκτιμημένες (πολύ χαμηλές) και υπερεκτιμημένες (πολύ μεγάλες) μετρήσεις, καθώς και για να διορθωθεί όσο είναι δυνατόν η απόκλιση μεταξύ του A και B αισθητήρα όπως και η πιθανή επίδραση της υγρασίας.

4.4. Περιγραφή αισθητήρα

Για τη συλλογή δεδομένων στις οικίες στην Ακαδημία Πλάτωνος και Ηράκλειο, Αττικής, χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες PurpleAir και συγκεκριμένα τρεις PurpleAir Classic Air Quality Monitors (PA-II).

Το PurpleAir Classic Air Quality Monitor (PA-II) είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο όργανο για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα, κατάλληλο για εφαρμογή τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Επιλέγεται κυρίως για την παρακολούθηση των PM, καθώς ποσοτικοποιεί τη συγκέντρωση των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, κατηγοριοποιώντας τα συγκεκριμένα σε PM_{1,0}, PM_{2,5} και PM₁₀

Βασικά χαρακτηριστικά του PurpleAir Classic (PA-II) [84,92–95]:

- Διπλοί αισθητήρες λέιζερ: χρησιμοποιεί μηχανισμό μέτρησης σωματιδίων με διπλό λέιζερ για να παρέχει ακριβείς ποσοτικοποιήσεις σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο. Η διαμόρφωση του που περιλαμβάνει δύο αισθητήρες ενισχύει την αξιοπιστία των δεδομένων, καθώς επιτρέπει τη διασταυρούμενη επαλήθευση των μετρήσεων που λαμβάνονται από κάθε μεμονωμένο αισθητήρα.
- Συνδεσιμότητα Wi-Fi: είναι εξοπλισμένο με δυνατότητες Wi-Fi, επιτρέποντας έτσι στους χρήστες να έχουν απομακρυσμένη πρόσβαση σε πληροφορίες για την ποιότητα του αέρα σε πραγματικό χρόνο μέσω του χάρτη PurpleAir ή διάφορων εφαρμογών τρίτων. Τα δεδομένα αρχειοθετούνται επιπρόσθετα και διατίθενται για αναδρομική ανάλυση.
- Ένδειξη LED: διαθέτει ένδειξη LED που αντιπροσωπεύει οπτικά την ποιότητα του αέρα, με το χρώμα να αλλάζει ανάλογα με τα ανιχνευμένα επίπεδα σωματιδίων.
- Αντοχή στις καιρικές συνθήκες: έχει σχεδιαστεί για να αντέχει σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, καθιστώντας το κατάλληλο για συνεχή παρακολούθηση σε μια σειρά ρυθμίσεων.
- Τροφοδοτικό: λειτουργεί από μετασχηματιστή AC, διευκολύνοντας την απλή εγκατάσταση και συντήρηση, ιδιαίτερα επωφελής για εκτεταμένες περιόδους παρακολούθησης.
- Κοινοτική κοινή χρήση Δεδομένων: Οι πληροφορίες που παράγονται από το PA-II μπορούν να διαδοθούν στην ευρύτερη κοινότητα της PurpleAir, προωθώντας τη δημιουργία ενός παγκόσμιου δικτύου συστημάτων παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Αυτή η διάταξη δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να αντιπαραθέτουν τοπικές μετρήσεις ποιότητας αέρα με αυτές από άλλες γεωγραφικές περιοχές.

- ☛ Υψηλή ανάλυση δεδομένων: παρέχει δεδομένα υψηλής ανάλυσης με συχνές ενημερώσεις, που πραγματοποιούνται γενικά κάθε 2 λεπτά, διασφαλίζοντας έτσι ότι οι χρήστες διαθέτουν τις πιο ενημερωμένες πληροφορίες που έχουν στη διάθεσή τους.

Συνολικά, το PurpleAir Classic PA-II εκτιμάται για την ακρίβεια, τη φιλικότητα προς τον χρήστη και τον ρόλο του στη βελτίωση της συλλογικής κατανόησης της ποιότητας του αέρα μέσω παρακολούθησης προσανατολισμένη στην κοινότητα.



Εικόνα 4.3 Η συσκευή PurpleAir-II-SD [93]

4.5. Σημεία τοποθέτησης αισθητήρων

Η γενική περιοχή έρευνας, στην οποία εστιάζει την μελέτη της η διπλωματική εργασία, είναι ο νομός της Αττικής και πιο συγκεκριμένα η Αθήνα. Όπως είναι γνωστό, η Αθήνα αποτελεί πρωτεύουσα της Ελλάδας και την μεγαλύτερη σε έκταση και πολυπληθέστερη πόλη της χώρας. Η Αθήνα μετράει περίπου 3,6 εκατομμύρια κατοίκους, από το σύνολο των 10,4 εκατομμυρίων ανθρώπων που κατοικούν στην χώρα, κάνοντας την, την 8^η πολυπληθέστερη πόλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης [96,97].

Η μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας καλύπτει περίπου 412 τετραγωνικά χιλιόμετρα και περιβάλλεται από τέσσερα κύρια όρη: την Πάρνηθα, την Πεντέλη, το Αιγάλεω και τον Υμηττό [98].

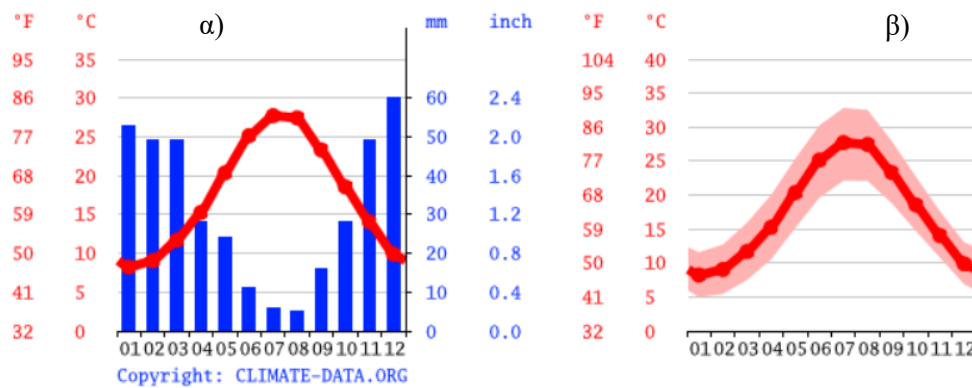
Αξίζει να αναφέρουμε και το ατμοσφαιρικό προφίλ της πόλης, καθώς είναι ένας από τους κύριους παράγοντες διαμόρφωσης της διακύμανσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Το κλίμα της Αθήνας χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό, με ζεστά, ξηρά καλοκαίρια και ήπιους, υγρούς χειμώνες.

Στον παρακάτω πίνακα, βλέπουμε πως έχει διαμορφωθεί η μηνιαία μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος και άλλες περιβαλλοντικές παράμετροι στην Αθήνα, με θερμοκρασιακά δεδομένα από το 1991 έως και το 2021.

Κατά τους χειμερινούς μήνες, η μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνεται από 10 έως 12°C ενώ κατά τους θερινούς μήνες η θερμοκρασία περιβάλλοντος κυμαίνεται από 28 έως 30°C. Φυσικά και τα ακραία καιρικά φαινόμενα δεν λείπουν, με έντονες βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις τον χειμώνα, και παρατεταμένες περιόδους καύσωνα τους θερινούς μήνες (η θερμοκρασία ξεπερνάει τους 40°C).

	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Avg. Temperature °C (°F)	8.2 °C (46.8) °F	9 °C (48.3) °F	11.7 °C (53) °F	15.3 °C (59.5) °F	20.3 °C (68.6) °F	25.1 °C (77.3) °F	27.7 °C (81.9) °F	27.4 °C (81.4) °F	23.3 °C (73.9) °F	18.5 °C (65.4) °F	14 °C (57.3) °F	9.9 °C (49.8) °F
Min. Temperature °C (°F)	5 °C (41) °F	5.4 °C (41.8) °F	7.5 °C (45.5) °F	10.5 °C (51) °F	15.1 °C (59.3) °F	19.6 °C (67.3) °F	22.1 °C (71.8) °F	22.1 °C (71.7) °F	18.8 °C (65.8) °F	14.7 °C (58.5) °F	10.8 °C (51.4) °F	6.9 °C (44.4) °F
Max. Temperature °C (°F)	11.6 °C (52.8) °F	12.7 °C (54.9) °F	15.9 °C (60.7) °F	20 °C (68) °F	25.3 °C (77.6) °F	30.2 °C (86.4) °F	32.8 °C (91.1) °F	32.5 °C (90.6) °F	28 °C (82.3) °F	22.7 °C (72.9) °F	17.6 °C (63.7) °F	13 °C (55.5) °F
Precipitation / Rainfall mm (in)	53 (2)	49 (1)	49 (1)	28 (1)	24 (0)	11 (0)	6 (0)	5 (0)	16 (0)	28 (1)	49 (1)	60 (2)
Humidity(%)	78%	75%	70%	63%	55%	48%	46%	48%	58%	67%	75%	78%
Rainy days (d)	6	5	5	4	3	2	1	1	2	3	5	6
avg. Sun hours (hours)	5.7	6.5	8.3	10.5	12.0	12.9	12.8	12.0	10.2	7.9	6.3	5.5

Εικόνα 4.4 Μέση / Ελάχιστη / Μέγιστη θερμοκρασία, Μέσος όρος mm βροχοπτώσης, Μέση υγρασία, Μέσος όρος ημερών με βροχή, Μέσος όρος ωρών με ήλιο της Αθήνας (σειρά δεδομένων από το 1991 έως το 2021) [99]



Εικόνα 4.5 α) Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας και mm βροχόπτωσης ανά μήνα, β) μέση θερμοκρασία ανά μήνα στην Αθήνα [99]

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μετρήσεων από σημειακούς σταθμούς μέτρησης PurpleAir στην Αθήνα. Πιο συγκεκριμένα, όλοι οι μετρητές είναι τοποθετημένοι σε ιδιόκτητα σπίτια, σε αρκετά κεντρικά και πυκνοκατοικημένα σημεία της πόλης.

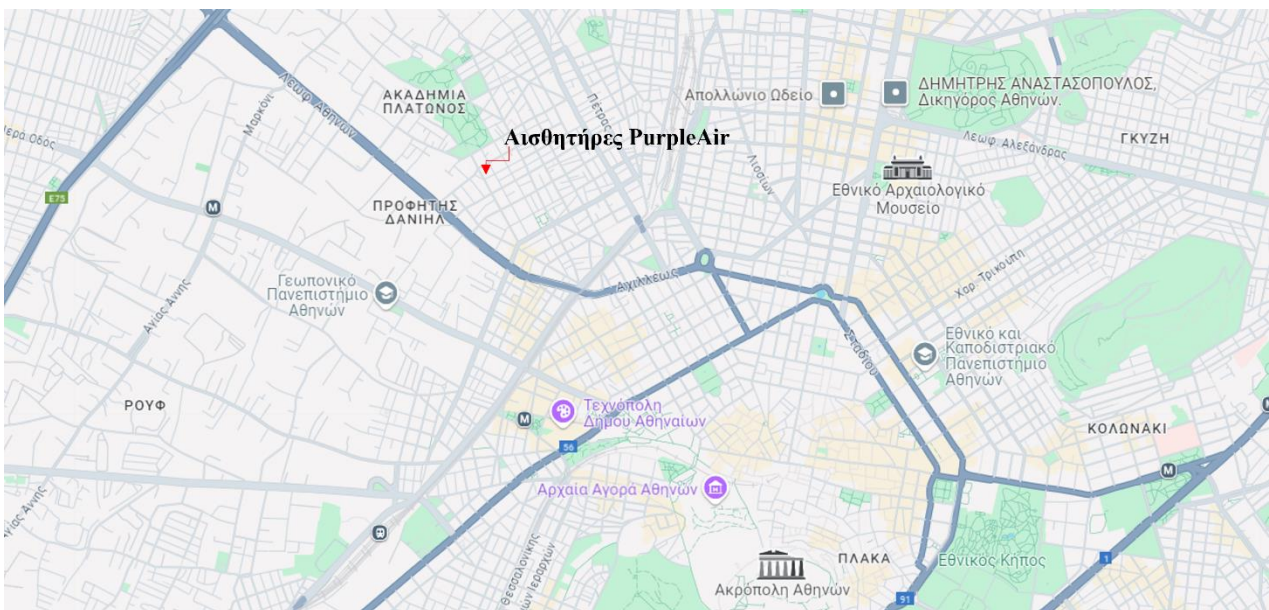
Αρχικά, ο μετρητής με την ονομασία «ATH-ENVICARE-5» βρίσκεται στο εσωτερικό ενός διαμερίσματος στην Ακαδημία Πλάτωνος. Στο διαμέρισμα κατοικεί μία τριμελής οικογένεια, με το ένα μέλος της οποίας να είναι ανήλικο.

Ο μετρητής «ATH-ENVICARE-3» βρίσκεται στο μπαλκόνι του διαμερίσματος. Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι η πολυκατοικία όπου βρίσκονται οι δύο μετρητές είναι πολύ κοντά, σε απόσταση περίπου 400 μέτρων, στην Ακαδημία Πλάτωνος, ένα από τα λίγα πάρκα που υπάρχουν στην Αθήνα με μεγάλη έκταση πρασίνου.

Η Ακαδημία Πλάτωνος, όντας ένα από τα λίγα πάρκα σε κεντρική περιοχή της Αθήνας και με εύκολη προσβασιμότητα, προσελκύει πολλούς επισκέπτες, ειδικά όταν ο καιρός το επιτρέπει, οπότε είναι φυσικό να υπάρχουν μέρες με έντονο συνωστισμό στην γύρω περιοχή.

Στον αντίποδα, το διαμέρισμα βρίσκεται πολύ κοντά σε μεγάλους αστικούς αυτοκινητόδρομους. Ενδεικτικά η λεωφόρος Λένορμαν είναι στα 750 m και η Λεωφόρος Αθηνών στα 650 m.

Όλα τα προαναφερόμενα, μπορούμε εύκολα να τα διακρίνουμε και στον παρακάτω χάρτη, όπου απεικονίζονται οι τοποθεσίες των μετρητών σε σχέση με τα σημεία ενδιαφέροντος, που θα μπορούσαν δυνητικά να επηρεάσουν τις μετρήσεις που παράγονται.



Εικόνα 4.6 Η περιοχή μελέτης στην Ακαδημία Πλάτωνος

Ο τρίτος αισθητήρας μελέτης βρίσκεται στα βόρεια προάστια της Αθήνας, και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή του Ηρακλείου. Το Ηράκλειο είναι μία αστική περιοχή της Αθήνας, αρκετά πυκνοκατοικημένη, αριθμεί περίπου 50.495 κατοίκους και εκτείνεται σε 4,65 τετραγωνικά χιλιόμετρα (km²). Την περιοχή εξυπηρετεί η στάση του ηλεκτρικού «Νέο Ηράκλειο», πολλαπλές γραμμές λεωφορείων καθώς και η Λεωφόρος Κύμης, η οποία βρίσκεται μόλις 1,5 km από το κέντρο της περιοχής [100–102].

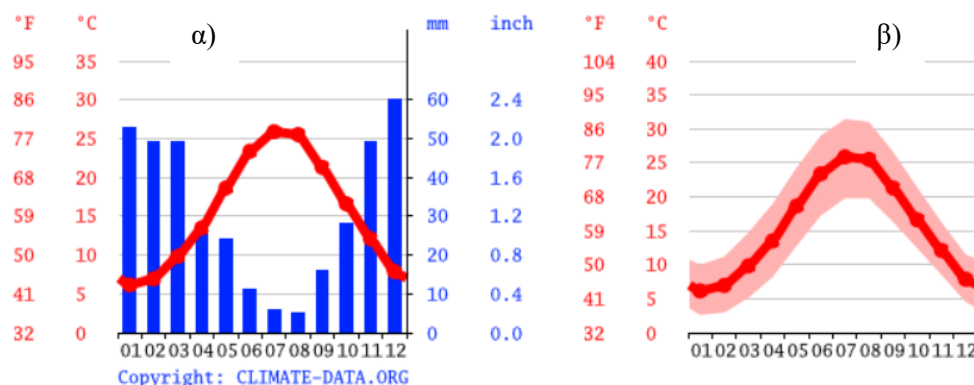
Παρακάτω βλέπουμε πως έχει διαμορφωθεί η μηνιαία μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος και άλλες περιβαλλοντικές παράμετροι στην περιοχή του Αμαρουσίου, κατά την χρονική περίοδο 1999 – 2019, καθώς είναι η πιο κοντινή περιοχή για την οποία βρέθηκαν στοιχεία. Το Μαρούσι απέχει 3.6km, οδικώς, από το Ηράκλειο.

Τον χειμώνα οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος κυμαίνονται από 6 έως 12 °C ενώ το καλοκαίρι οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 18 έως περίπου 26 °C.

Αξίζει να αναφέρουμε, πως στα βόρεια προάστια της Αθήνας, όπως είναι η περιοχή του Αμαρουσίου αλλά και του Ηρακλείου όπου είναι τοποθετημένος ο αισθητήρας, το φαινόμενο της έντονης χιονόπτωσης είναι αρκετά συχνό. Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενα εδάφια, τα έντονα καιρικά φαινόμενα που τυχόν προκύπτουν, επηρεάζουν έως έναν βαθμό τα επίπεδα αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

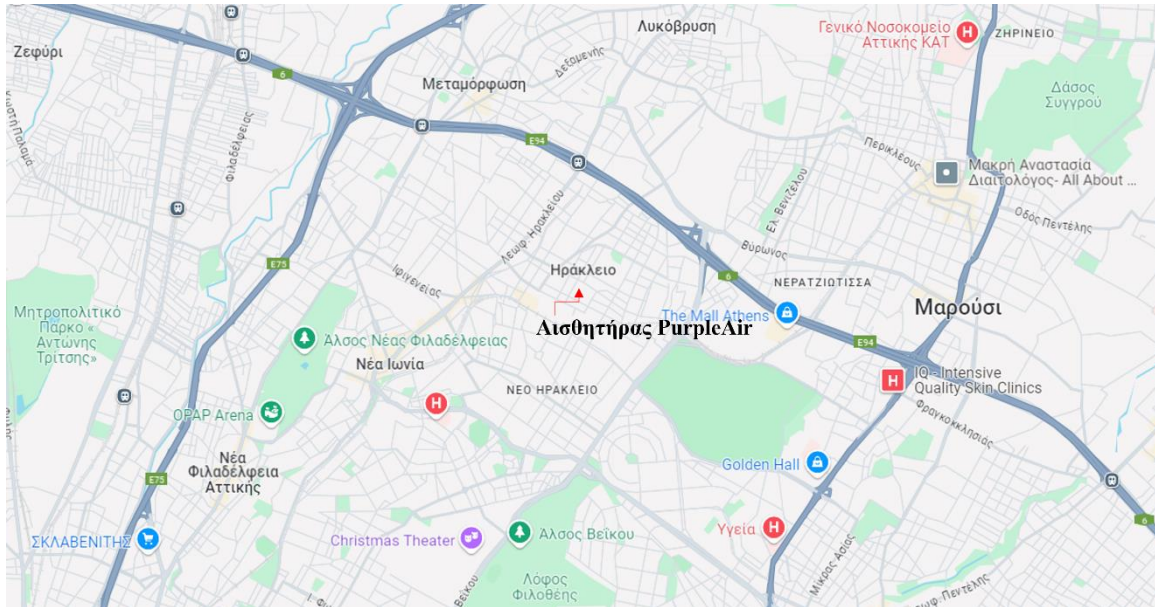
	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
Avg. Temperature °C (°F)	6.1 °C (43.1) °F	6.9 °C (44.5) °F	9.8 °C (49.7) °F	13.5 °C (56.3) °F	18.6 °C (65.5) °F	23.4 °C (74.1) °F	25.9 °C (78.6) °F	25.5 °C (77.9) °F	21.3 °C (70.3) °F	16.6 °C (61.9) °F	12.1 °C (53.8) °F	7.9 °C (46.2) °F
Min. Temperature °C (°F)	2.6 °C (36.7) °F	3 °C (37.3) °F	5.1 °C (41.2) °F	8.2 °C (46.7) °F	12.8 °C (55) °F	17.2 °C (63) °F	19.8 °C (67.6) °F	19.8 °C (67.6) °F	16.3 °C (61.3) °F	12.4 °C (54.3) °F	8.5 °C (47.3) °F	4.5 °C (40.2) °F
Max. Temperature °C (°F)	10 °C (50) °F	11.2 °C (52.1) °F	14.7 °C (58.5) °F	18.9 °C (66.1) °F	24.3 °C (75.7) °F	29 °C (84.2) °F	31.4 °C (88.6) °F	31 °C (87.8) °F	26.6 °C (79.9) °F	21.4 °C (70.5) °F	16.3 °C (61.3) °F	11.5 °C (52.8) °F
Precipitation / Rainfall mm (in)	53 (2)	49 (1)	49 (1)	28 (1)	24 (0)	11 (0)	6 (0)	5 (0)	16 (0)	28 (1)	49 (1)	60 (2)
Humidity(%)	79%	75%	69%	61%	53%	46%	43%	45%	56%	67%	76%	79%
Rainy days (d)	6	5	5	4	3	2	1	1	2	3	5	6
avg. Sun hours (hours)	5.7	6.5	8.3	10.5	12.0	12.9	12.8	12.0	10.2	7.9	6.3	5.5

Εικόνα 4.7 Μέση / Ελάχιστη / Μέγιστη θερμοκρασία, Μέσος όρος mm βροχόπτωσης, Μέση υγρασία, Μέσος όρος ημερών με βροχή, Μέσος όρος ωρών με ήλιο του Αμαρουσίου (σειρά δεδομένων από το 1999 έως το 2019) [103]



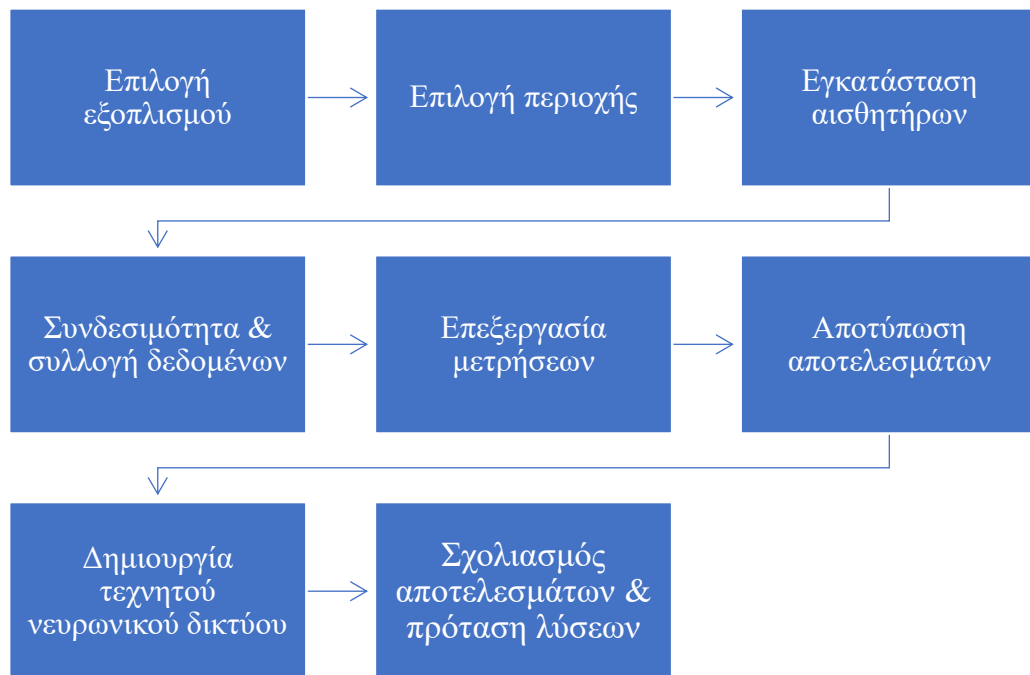
Εικόνα 4.8 α) Διάγραμμα μέσης θερμοκρασίας και mm βροχόπτωσης ανά μήνα, β) μέση θερμοκρασία ανά μήνα στο Μαρούσι [103]

Ο μετρητής «ATH-ENVICARE-2» είναι ένας εξωτερικός μετρητής, ομοίως τοποθετημένος σε μπαλκόνι διαμερίσματος. Κάτι που αξίζει, και διακρίνεται και στο παρακάτω στιγμιότυπο οθόνης, είναι πως το διαμέρισμα στο οποίο έχει τοποθετηθεί ο αισθητήρας, βρίσκεται απέναντι από ένα μικρό πάρκο. Η ευρύτερη γειτονιά είναι πυκνοκατοικημένη, με διακριτή την πολυεδομία μίας τυπικής Αθηναϊκής γειτονιάς.



Εικόνα 4.9 Η περιοχής μελέτης στο Ηράκλειο

5. Κεφάλαιο 5^ο: Μεθοδολογία



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα ροής της συστηματικής προσέγγισης.

5.1. Επιλογή εξοπλισμού

Πριν γίνει η επιλογή των αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν είναι σημαντικό να απαντηθούν ορισμένα ερωτήματα. Πρώτον αν πρόκειται για περιφερειακή ή προσωπική παρακολούθηση ατμοσφαιρικών ρύπων. Δεύτερον αν ο αισθητήρας θα χρησιμοποιηθεί για στατικές ή φορητές μετρήσεις. Και τρίτον ποιο είναι το περιβάλλον μέτρησης (εσωτερικό, εξωτερικό ή και τα δύο). Στη συνέχεια πρέπει να καθοριστεί το χρηματικό

ποσό που μπορεί να διατεθεί. Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο διαθέσιμος χώρος για τον αισθητήρα και η πηγή παροχής ενέργειας.

Όσον αφορά την πηγή ενέργειας, αν επιλεγθεί αισθητήρας που τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός και το ύψος του σημείου τοποθέτησης, καθώς και η πρόσβαση για συντήρηση των φωτοβολταϊκών. Αν πρόκειται για τροφοδοσία με καλωδίωση, η εγκατάσταση πρέπει να γίνει κοντά σε πρίζα. Και αν πρόκειται για φορητή τροφοδοσία είναι αναγκαίο ο αισθητήρας να είναι προσβάσιμος για επαναφόρτιση.

Ένα ακόμα σημαντικό κριτήριο στην επιλογή εξοπλισμού είναι τα δεδομένα που επιθυμεί να αποκομίσει ο ερευνητής. Είτε θέλει δεδομένα για έναν συγκεκριμένο ρύπο είτε για πολλαπλούς και αν επιθυμεί και μετεωρολογικά δεδομένα.

5.2. Επιλογή περιοχής

Οι αισθητήρες ατμοσφαιρικής ρύπανσης πρέπει να τοποθετούνται σε θέση που να εξασφαλίζει αντιπροσωπευτική μέτρηση των επιπέδων ρύπανσης. Ο στόχος της μελέτης είναι καθοριστικός για την επιλογή της περιοχής.

- Περιοχές συμφόρησης: Συχνά η τοποθέτηση αισθητήρων γίνεται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές για τη μέτρηση της έκθεσης του πληθυσμού σε ρύπους.
- Περιοχές υψηλής κυκλοφορίας: Τοποθέτηση αισθητήρων κοντά σε δρόμους υψηλής κυκλοφορίας για να καταγράφουν τις εκπομπές των οχημάτων.
- Βιομηχανικές περιοχές: Τοποθέτηση αισθητήρων κοντά σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις για την παρακολούθηση των εκπομπών από βιομηχανικές δραστηριότητες.
- Ευαίσθητες περιοχές: Σε περιοχές όπως σχολεία, νοσοκομεία και πάρκα, οι αισθητήρες μπορούν να βοηθήσουν στην προστασία των ευάλωτων ομάδων από την ατμοσφαιρική ρύπανση.
- Απομακρυσμένες περιοχές: Τοποθέτηση αισθητήρων για να μετρηθούν τα επίπεδα υποβάθρου και ρύπανσης που μεταδίδονται από άλλες περιοχές.

5.3. Εγκατάσταση αισθητήρων

Οι αισθητήρες ατμοσφαιρικής ρύπανσης συνήθως απαιτούν την έκδοση άδειας εγκατάστασης και πρόσβαση στην τοποθεσία για τακτική συντήρηση. Ένα πλεονέκτημα των αισθητήρων χαμηλού κόστους είναι η δυνατότητα τοποθέτησης τους φαινομενικά παντού. Ανάλογα με τις διαθέσιμες επιλογές στον χώρο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στύλος, φράχτης, κιγκλίδωμα ή βάση στον τοίχο. Με βάση τη νομοθεσία προτείνεται [20,24–28]:

- Τοποθέτηση τουλάχιστον 6 πόδια (2 μέτρα) μακριά από εμφανείς πηγές ρύπανσης, όπως αεραγωγούς, γεννήτριες ή ψησταριές.
- Ανεμπόδιστη εισαγωγή και απελευθέρωση αέρα με επαρκή ροή.
- Τοποθέτηση σε ύψος 10-16 πόδια (3-6 μέτρα) πάνω από το επίπεδο του δρόμου, εάν εξετάζεται ο γενικός πληθυσμός, ή υψηλότερα, εάν λαμβάνεται υπόψη η ποιότητα του αέρα της περιοχής.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σημαντικό κριτήριο για το σημείο εγκατάστασης των αισθητήρων είναι η παροχή ενέργειας. Οι παράγοντες για την τοποθέτηση με βάση την παροχή ενέργειας συζητούνται στο υποκεφάλαιο 5.1.

Για την τοποθέτηση αισθητήρα σε εξωτερικό χώρο είναι σημαντικό να βρίσκεται μακριά από φυτά γνωστά για την αυξημένη παραγωγή γύρης. Αυτό είναι απαραίτητο για την ακριβή λήψη μετρήσεων αιωρούμενων σωματιδίων. Πιο συγκεκριμένα για τοποθέτηση αισθητήρα σε εξωτερικό χώρο κατοικίας, θα πρέπει να εγκατασταθεί μακριά από σημεία που απλώνονται ρούχα και άλλες πηγές υγρασίας, καθώς η αυξημένη υγρασία μπορεί επίσης να επηρεάσει τις μετρήσεις των σωματιδίων. Επιπλέον, ο προσανατολισμός του μπαλκονιού παίζει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της έκθεσης του αισθητήρα στον ήλιο. Τέλος, είναι επιτακτική

ανάγκη να διασφαλιστεί ότι ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος σε ασφαλές σημείο, προστατευμένο από τα καιρικά φαινόμενα.

Για την τοποθέτηση αισθητήρα σε εσωτερικό χώρο είναι σημαντικό να βρίσκεται σε σχετικά ουδέτερο σημείο του χώρου. Να μην είναι δίπλα σε παράθυρο και επηρεάζεται από την ροή αέρα ή αν βρίσκεται σε σπίτι δίπλα σε απορροφητήρα που θα καλύπτει τα επίπεδα ρύπανσης. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη αν στον χώρο ζουν ή εργάζονται καπνιστές και το που και πόσο συχνά καπνίζουν. Τέλος, είναι επιθυμητό να βρίσκεται σε χώρο που δεν έχει ιδιαίτερα αυξημένα επίπεδα κίνησης συγκριτικά με άλλους χώρους στο κτίριο ώστε οι μετρήσεις να είναι όσο το δυνατόν πιο αντικειμενικές.

5.4. Συνδεσιμότητα και συλλογή δεδομένων

Η συνδεσιμότητα των αισθητήρων και η συλλογή δεδομένων διαφέρει ανάλογα με το αν αφορά λίγους ή πολλούς μετρητές.

Τα κύρια προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την επιλογή αισθητήρων χαμηλού κόστους για εγκατάσταση πολλών αισθητήρων αφορούν κυρίως το μόντεμ που διαθέτει ο αισθητήρας και αν αυτό μπορεί να αναβαθμιστεί σε μόντεμ 5G. Τα μόντεμ 5G παρέχουν χαμηλή καθυστέρηση, αναγκαία για την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο [104,105]. Αντίθετα, αν η εγκατάσταση του αισθητήρα γίνει σε χώρο με σταθερή σύνδεση στο ίντερνετ (πχ κατοικία, σχολεία, δημόσια κτίρια), προτιμώνται αισθητήρες με βάση το Wi-Fi [106].

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αποθήκευσης δεδομένων αισθητήρων χαμηλού κόστους, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής και τους διαθέσιμους πόρους. Ορισμένες από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους περιγράφονται παρακάτω [107,108]:

- 1) **Κάρτες SD:** προσιτές, εύκολες στη χρήση και ιδανικές για την αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων σε τοπικό επίπεδο. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε μικροελεγκτές όπως το Arduino και το Raspberry Pi.
- 2) **Εσωτερική μνήμη μικροελεγκτών:** μερικοί μικροελεγκτές έχουν εσωτερική μνήμη που μπορεί να αξιοποιηθεί για προσωρινή αποθήκευση δεδομένων. Αυτή η μέθοδος έχει περιορισμένη χωρητικότητα.
- 3) **Εξωτερικοί Σκληροί Δίσκοι ή USB Sticks:** ιδανικά για την αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων και την μεταφορά τους σε άλλη συσκευή για ανάλυση.
- 4) **Cloud Storage:** πρόσβαση στα δεδομένα από οπουδήποτε αρκεί να υπάρχει σύνδεση στο διαδίκτυο. Η πιο διαδομένη μέθοδος, καθώς υπάρχουν πολλές υπηρεσίες cloud που προσφέρουν δωρεάν μετρήσεις. Καθιστά δυνατή την συλλογή δεδομένων από τρίτους.
- 5) **Τοπικοί Διακομιστές (NAS):** μια καλή λύση για την αποθήκευση μεγάλων δεδομένων χωρίς σύνδεση στο διαδίκτυο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνεχή αποθήκευση και πρόσβαση σε πραγματικό χρόνο.
- 6) **Μεταφορά μέσω Δικτύου (Wi-Fi, Bluetooth):** τα δεδομένα μεταφέρονται σε άλλες συσκευές ή διακοσμητές για αποθήκευση. Χρήσιμο για απομακρυσμένη εγκατάσταση αισθητήρων.

Στο υποκεφάλαιο 4.1 δίνεται οδηγός για το πως συλλέχθηκαν τα δεδομένα αυτής της διπλωματικής.

5.5. Επεξεργασία μετρήσεων

Τα δεδομένα αναλύθηκαν με χρήση του Microsoft Office Excel και ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα:

1. Επεξεργασία των αρχικών αρχείων καταγραφής δεδομένων του οργάνου της μορφής «.csv» ώστε να είναι πιο εύκολη η μετατροπή τους σε επεξεργάσιμο αρχείο «.xlsx».

The screenshot shows a spreadsheet application displaying a CSV file. The formula bar at the top shows the formula: `time_stamp,rssi,humidity,temperature,pressure,pm2.5_alt,pm2.5_alt_a,pm2.5_alt_b,pm2.5_atm,pm2.5_atm_a,pm2.5_atm_b,pm2.5_cf_1,pm2.5_cf_1_a,pm2.5_cf_1_b`. The spreadsheet grid contains data starting from row 1, column A. The first few rows of data are as follows:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	time_stamp,rssi,humidity,temperature,pressure,pm2.5_alt,pm2.5_alt_a,pm2.5_alt_b,pm2.5_atm,pm2.5_atm_a,pm2.5_atm_b,pm2.5_cf_1,pm2.5_cf_1_a,pm2.5_cf_1_b																		
2	2021-01-01T00:00:00Z,-69,51.466,62.233,1005.498,5.2,5.3,5.1,9.183,9.212,9.154,9.183,9.212,9.154																		
3	2021-01-01T01:00:00Z,-69,54.4,61.5,1005.869,5.7,5.9,5.5,10.123999999999999,10.299,9.949,10.123999999999999,10.299,9.949																		
4	2021-01-01T02:00:00Z,-69,54.867,61.1006,03,6,2,6.4,6.1,11.150500000000000001,11.183,11.118,11.150500000000000001,11.183,11.118																		

Εικόνα 5.1. Στιγμιότυπο οθόνης από την αρχική μορφή του αρχείου δεδομένων ".csv"

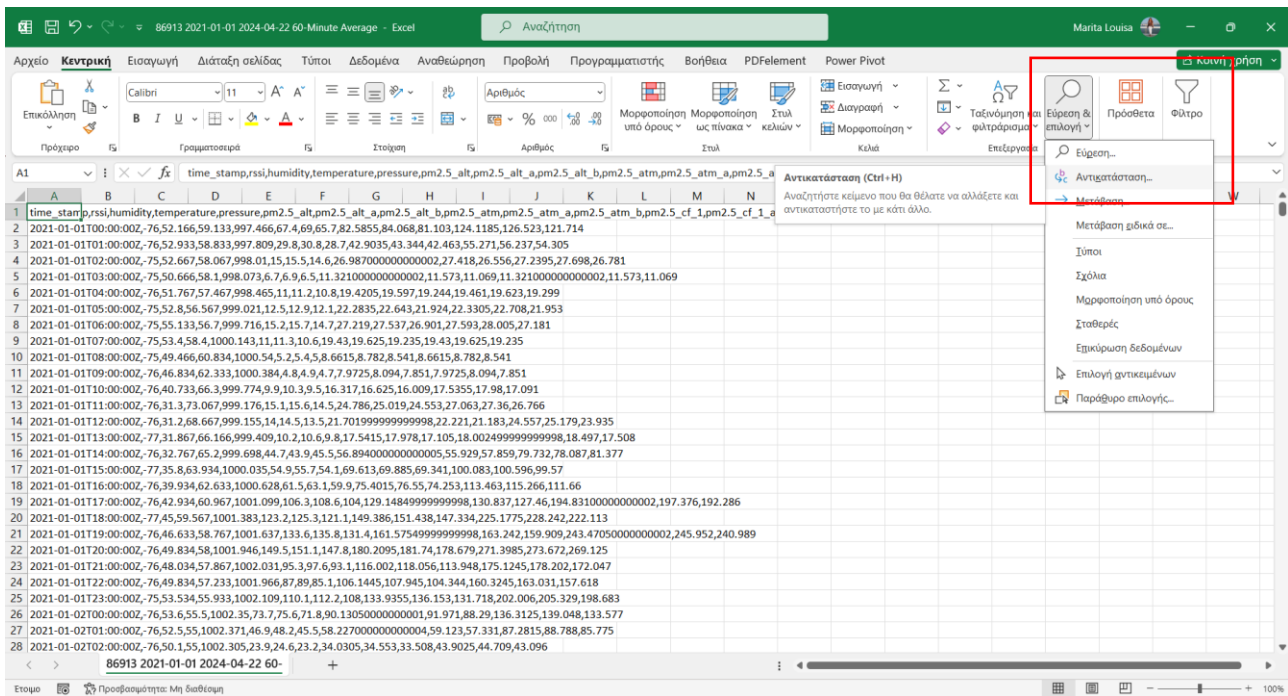
α) Αλλαγή της μορφής του πρώτου κελιού (το κελί με τους τίτλους) από Γενική Μορφή σε Αριθμός. Αυτό γίνεται για να μην επηρεαστεί το κελί με τους τίτλους στα επόμενα βήματα της επεξεργασίας.

The screenshot shows the Excel application interface. The 'Number' format is selected in the 'Number Format' dropdown menu. The spreadsheet grid is the same as in Figure 5.1. The formula bar shows the formula: `b,pm2.5_cf_1,pm2.5_cf_1_a,pm2.5_cf_1_b`. The status bar at the bottom shows the file name: `86913 2021-01-01 2024-04-22 60-`.

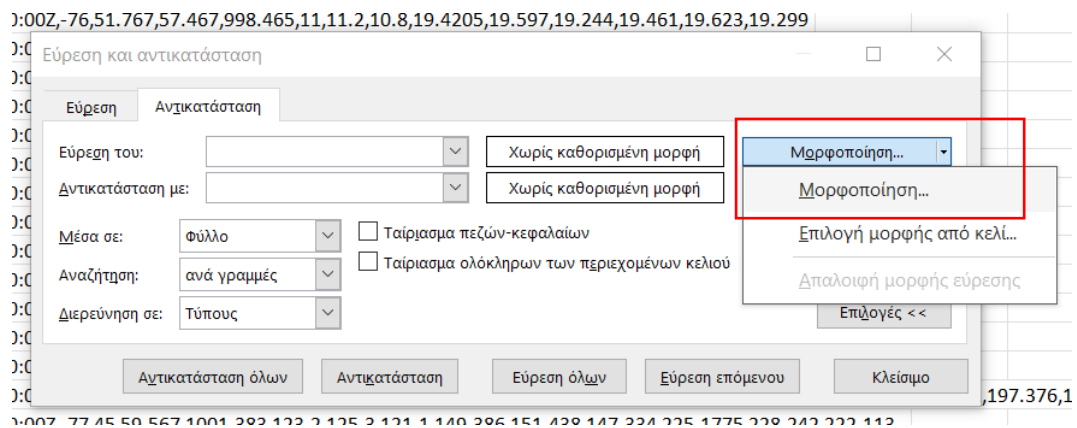
Εικόνα 5.2 Στιγμιότυπο οθόνης από την αρχική μορφή του αρχείου δεδομένων ".csv"

β) Πρέπει να γίνει αντικατάσταση των «Τ» με κόμμα «,». Για επιτευχθεί αυτό, πρώτα Μορφοποίηση => Επιλογή μορφής κελιού => Γενική

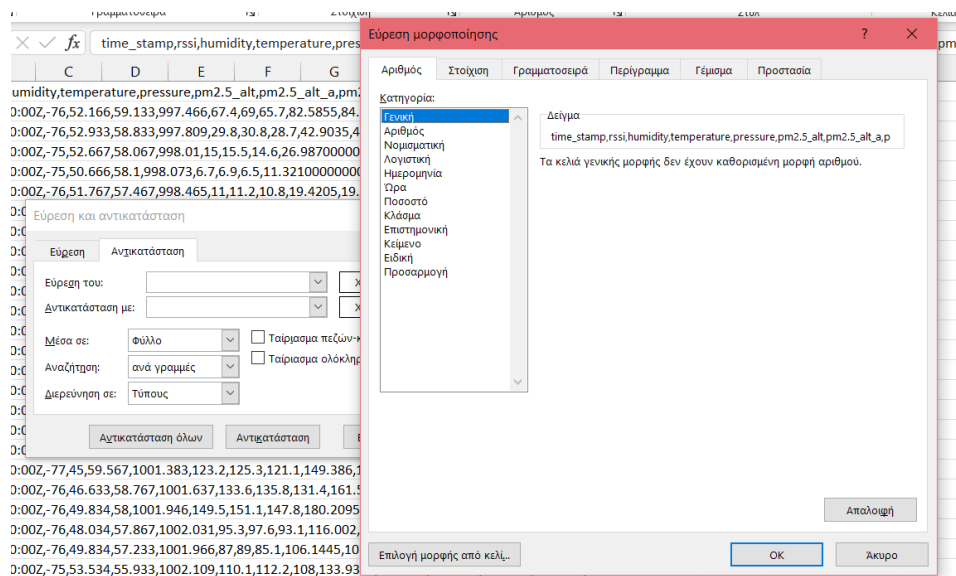
Εύρεση & επιλογή => Αντικατάσταση



Εικόνα 5.3 Στιγμιότυπο οθόνης από την αρχική μορφή του αρχείου δεδομένων ".csv"

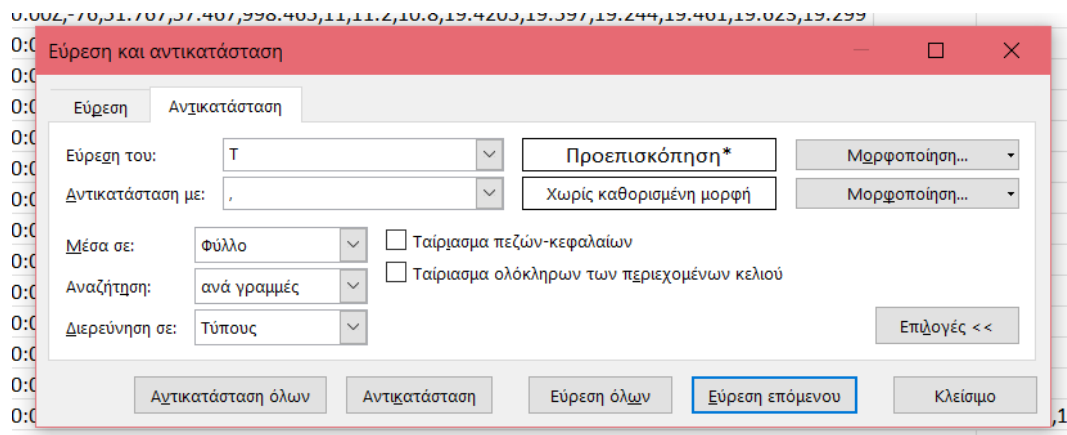


Εικόνα 5.4 Στιγμιότυπο οθόνης του Excel



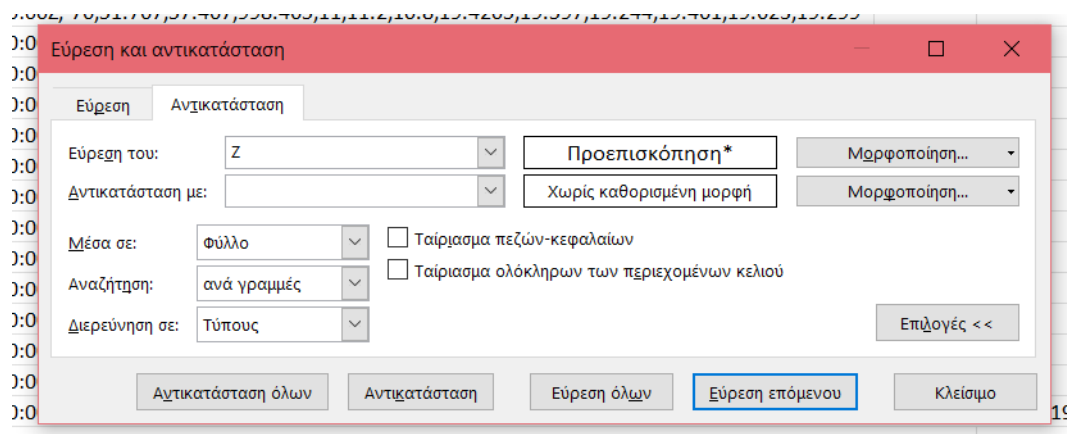
Εικόνα 5.5 Στιγμιότυπο οθόνης του Excel

Τώρα γίνεται η αντικατάσταση του «Τ» με κόμμα «,» ώστε η ημερομηνία και η ώρα να είναι δύο τιμές αντί για μια και συνεπώς σε διαφορετικές στήλες όταν θα γίνει η εισαγωγή δεδομένων στο Excel. Η παραπάνω διαδικασία διευκολύνει την μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων.



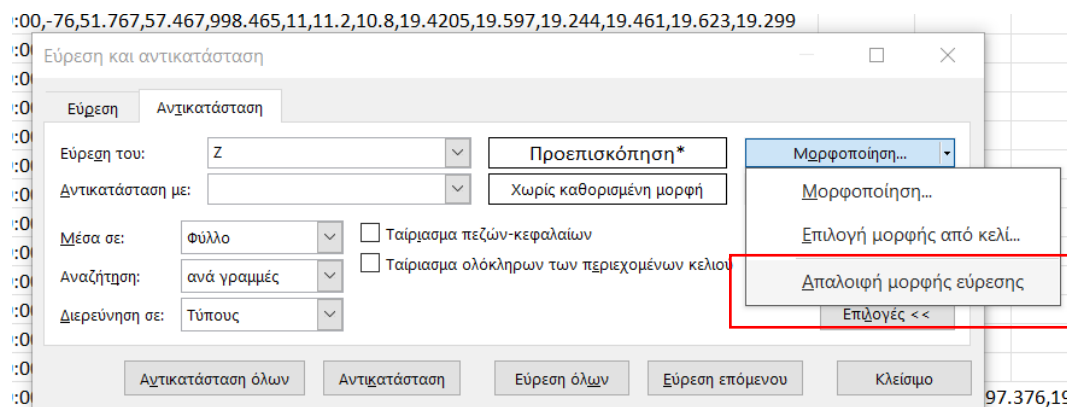
Εικόνα 5.6 Στιγμιότυπο οθόνης του Excel

γ) Αντικατάσταση του «Z» με «κενό» για να μην υπάρχει δίπλα στην ώρα όταν θα γίνει εισαγωγή δεδομένων στο Excel.



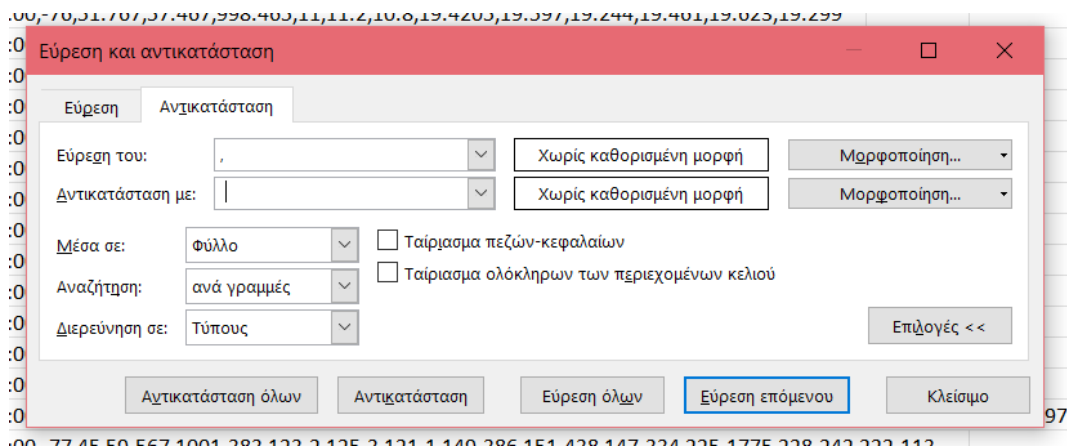
Εικόνα 5.7 Στιγμιότυπο οθόνης του Excel

δ) Αφαίρεση της μορφοποίησης. Στα επόμενα βήματα η αντικατάσταση πρέπει να γίνει και στο κελί των τίτλων για αυτό αφαιρείται η μορφοποίηση.



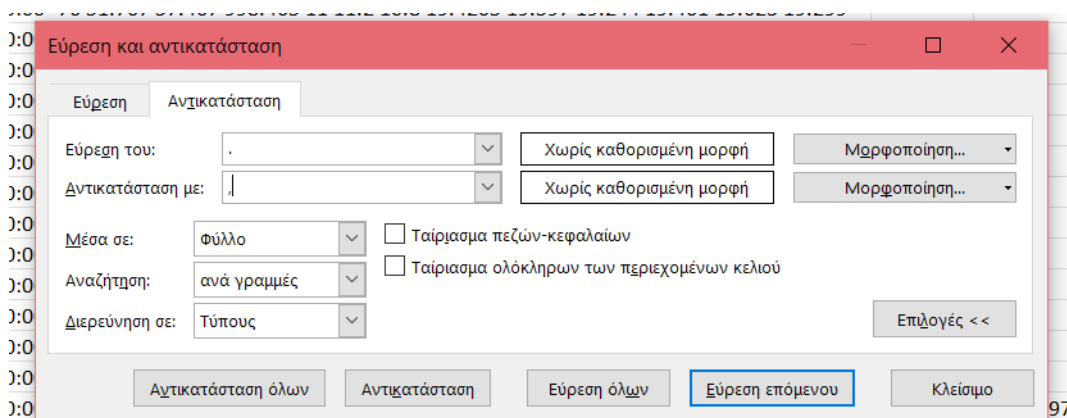
Εικόνα 5.8 Στιγμιότυπο οθόνης του Excel

ε) Αντικατάσταση του κόμμα «,» με «πλήκτρο διαστήματος» (space bar)



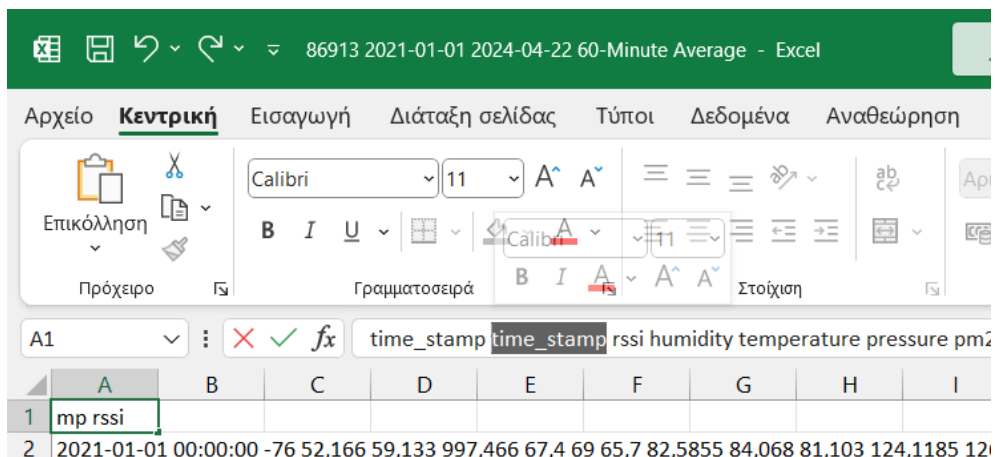
Εικόνα 5.9 Στιγμιότυπο οθόνης του Excel

στ) Αντικατάσταση της τελείας «.» με κόμμα «,»



Εικόνα 5.10 Στιγμιότυπο οθόνης του Excel

ζ) Με την αντικατάσταση του «T» σε κόμμα «,» η ημερομηνία και η ώρα πλέον είναι δύο τιμές αντί για μια. Για αυτό πρέπει να προστεθεί ένας τίτλος ώστε ο αριθμός των τιμών να είναι ίδιος με των τίτλων, κάτι που επιτυγχάνεται κάνοντας αντιγραφή επικόλληση το «time_stamp» στο πρώτο κελί.



Εικόνα 5.11 Στιγμιότυπο οθόνης του Excel

2. Εισαγωγή των δεδομένων σε επεξεργάσιμο αρχείο μορφής «.xlsx».

Μήνας	2021			2022			2023		
	Πόσες πρέπει να είναι	Πόσες είναι	Ποσοστό	Πόσες πρέπει να είναι	Πόσες είναι	Ποσοστό	Πόσες πρέπει να είναι	Πόσες είναι	Ποσοστό
Ιανουάριος	744	738	99,2%	744	715	96%	744	744	100%
Φεβρουάριος	672	672	100%	672	672	100%	672	672	100%
Μάρτιος	744	744	100%	744	744	100%	744	744	100%
Απρίλιος	720	719	99,9%	720	720	100%	720	720	100%
Μάιος	744	722	97%	744	744	100%	744	744	100%
Ιούνιος	720	710	98,6%	720	720	100%	720	720	100%
Ιούλιος	744	726	97,6%	744	735	99%	744	744	100%
Αύγουστος	744	744	100%	744	744	100%	744	744	100%
Σεπτέμβριος	720	716	99,4%	720	720	100%	720	720	100%
Οκτώβριος	744	744	100%	744	744	100%	744	730	98,1%
Νοέμβριος	720	714	99,2%	720	720	100%	720	306	42,5%
Δεκέμβριος	744	742	99,7%	744	744	100%	744	512	68,8%

Πίνακας 6. Πληρότητα μετρήσεων του αισθητήρα ATH_ENVICARE_3 εξωτερικά της οικίας στην Ακαδημία Πλάτωνος, Αττικής

Μήνας	2021			2022			2023		
	Πόσες πρέπει να είναι	Πόσες είναι	Ποσοστό	Πόσες πρέπει να είναι	Πόσες είναι	Ποσοστό	Πόσες πρέπει να είναι	Πόσες είναι	Ποσοστό
Ιανουάριος	-	-	-	744	744	100%	744	744	100%
Φεβρουάριος	-	-	-	672	672	100%	672	672	100%
Μάρτιος	744	55	7,4%	744	744	100%	744	744	100%
Απρίλιος	720	695	96,5%	720	720	100%	720	720	100%
Μάιος	744	720	96,8%	744	744	100%	744	744	100%
Ιούνιος	720	720	100%	720	720	100%	720	720	100%
Ιούλιος	744	744	100%	744	686	92,2%	744	744	100%
Αύγουστος	744	744	100%	744	744	100%	744	744	100%
Σεπτέμβριος	720	713	99,0%	720	720	100%	720	613	85,1%
Οκτώβριος	744	744	100%	744	744	100%	744	534	71,8%
Νοέμβριος	720	714	99,2%	720	720	100%	720	719	99,9%
Δεκέμβριος	744	742	99,7%	744	744	100%	744	744	100%

Πίνακας 7. Πληρότητα μετρήσεων του αισθητήρα ATH_ENVICARE_5 εντός της οικίας στην Ακαδημία Πλάτωνος, Αττικής

ATH_ENVIACRE_2

ATH_ENVICARE_3

ATH_ENVICARE_5

Έτος	Πόσες πρέπει να είναι	Πόσες είναι	Ποσοστό	Πόσες πρέπει να είναι	Πόσες είναι	Ποσοστό	Πόσες πρέπει να είναι	Πόσες είναι	Ποσοστό
2021	8760	8614	98,3%	8760	8711	99,4%	8760	6591	75,2%
2022	8760	7898	90,2%	8760	8722	99,6%	8760	8702	99,3%
2023	8760	8246	94,1%	8760	8100	92,5%	8760	8442	96,4%

Πίνακας 8. Ετήσια πληρότητα των αισθητήρων

6. Βαθμονόμηση δεδομένων

Στο κεφάλαιο 4.3 αναφέρονται οι λόγοι που χρειάζεται η βαθμονόμηση. Παρακάτω θα γίνει αναφορά στον τρόπο βαθμονόμησης των δεδομένων.

α) Βαθμονόμηση υγρασίας

Η υγρασία (humidity) βαθμονομήθηκε με τη χρήση της εξίσωσης [82]:

$$y = 0,96 + 1,42x$$

β) Βαθμονόμηση θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία (temperature) βαθμονομήθηκε με τη χρήση της εξίσωσης [82]:

$$y = -2,52 + 0,88x$$

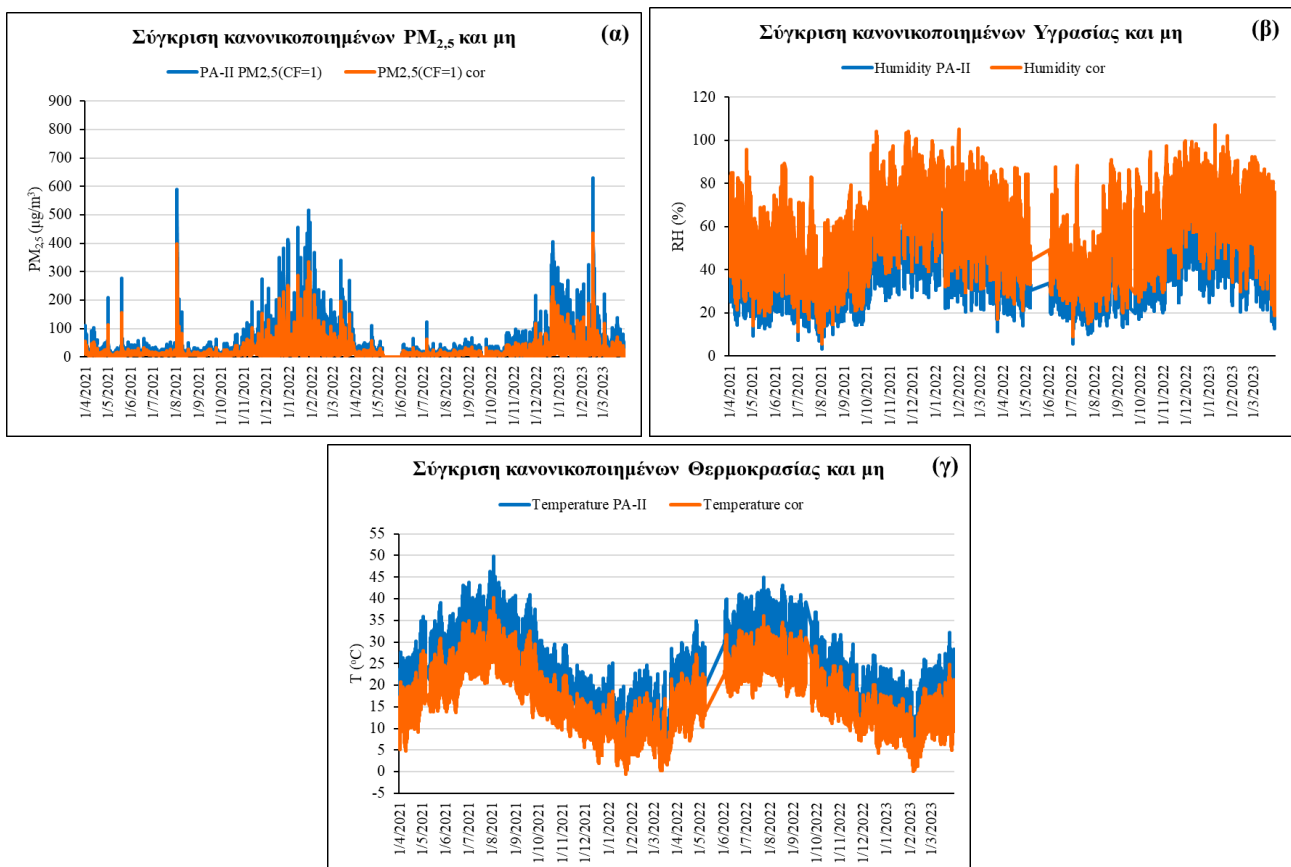
γ) Βαθμονόμηση PM_{2,5}

Οι τιμές PM_{2,5} βαθμονομήθηκαν με τη χρήση της εξίσωσης [82]:

$$PM_{2,5cor} = 0,00387 \times PM_{2,5(CF=1)}^2 + 0,443 \times PM_{2,5(CF=1)} + 2,60$$

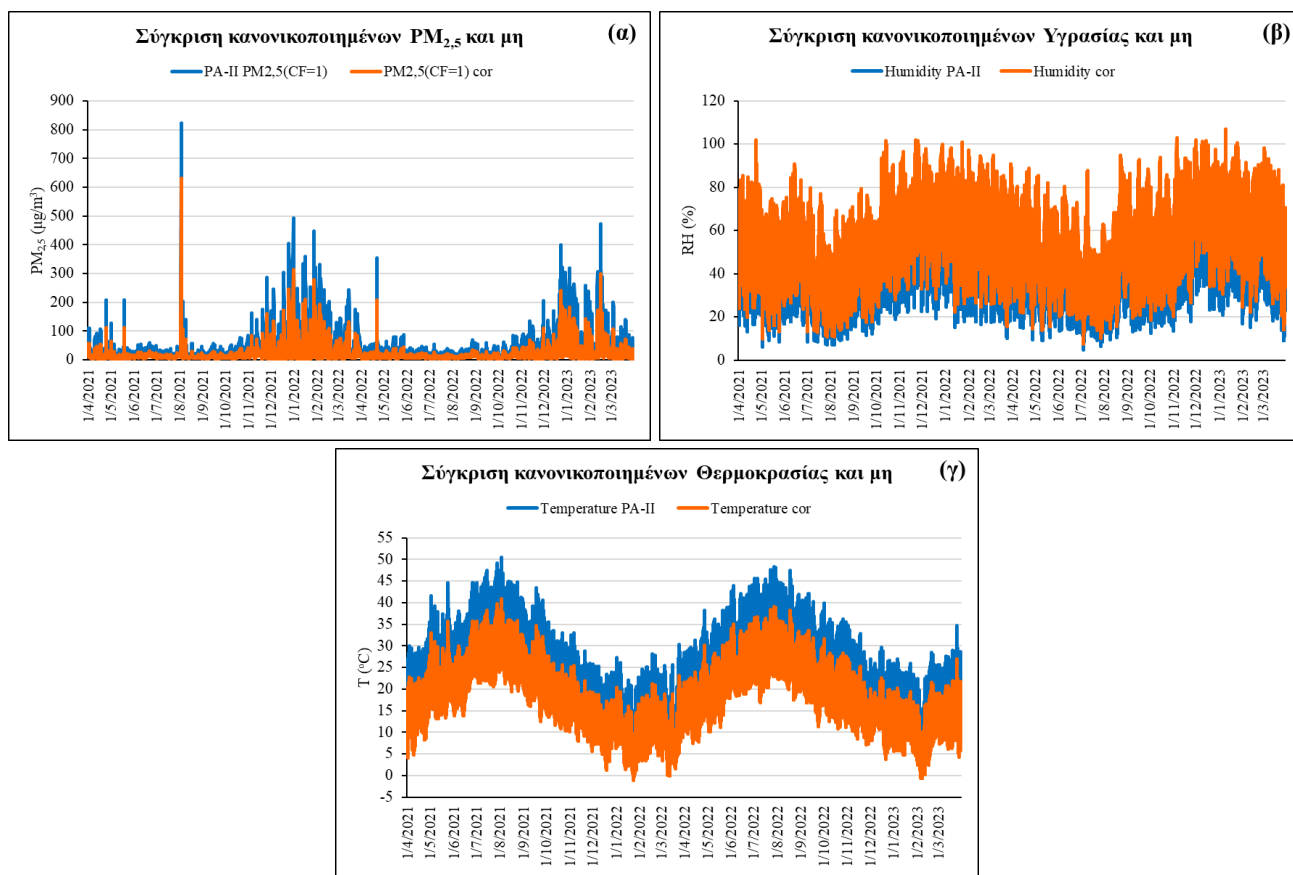
Στα Σχήμα 5.2, Σχήμα 5.3 και Σχήμα 5.4 παρατηρείται ότι μετά την βαθμονόμηση υπάρχει μια εξομάλυνση των τιμών, με τις πολύ υψηλές τιμές να μειώνονται και τις πολύ χαμηλές τιμές να αυξάνονται. Οι βαθμονομημένες τιμές PM_{2,5} και θερμοκρασίας είναι επί το πλείστον χαμηλότερες από τις αρχικές, ενώ οι τιμές της υγρασίας είναι επί το πλείστον μεγαλύτερες.

ΑΘΗ-ENVICARE-2 (Ηράκλειο)



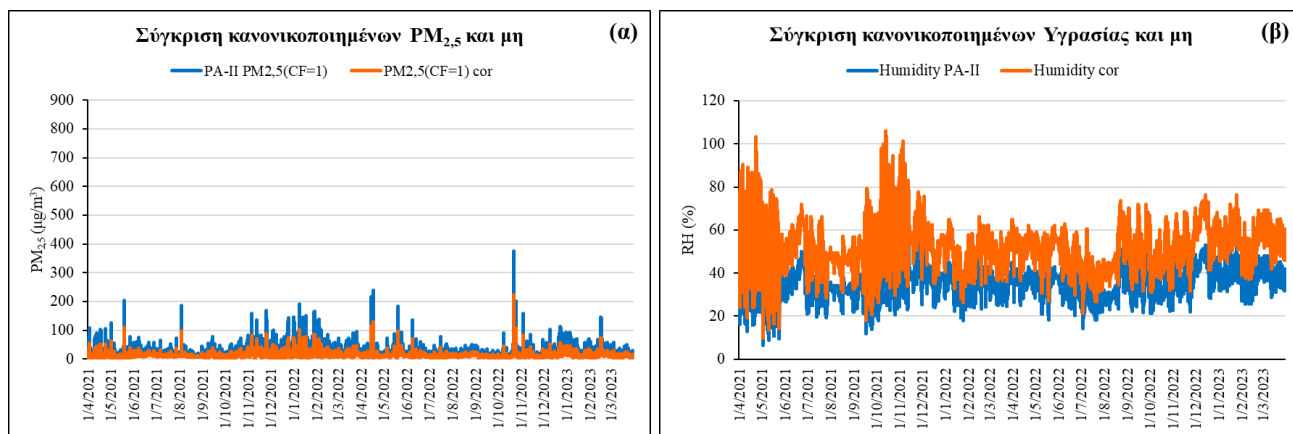
Σχήμα 5.2 (α) Σύγκριση βαθμονομημένων τιμών PM_{2,5} με τις αρχικές τιμές; (β) Σύγκριση βαθμονομημένων τιμών υγρασίας με τις αρχικές τιμές; (γ) Σύγκριση βαθμονομημένων τιμών θερμοκρασίας με τις αρχικές τιμές

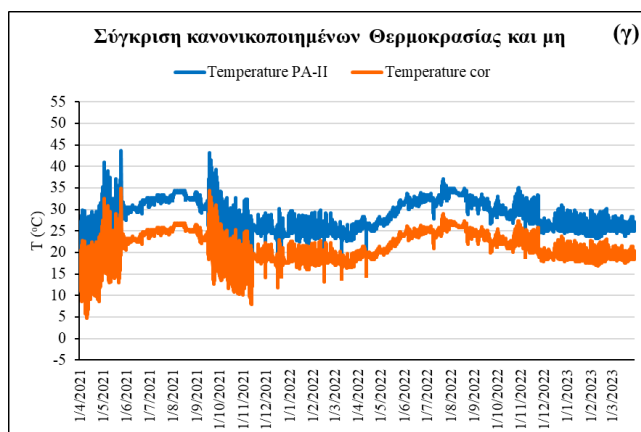
ATH-ENVICARE-3 (Ακαδημία Πλάτωνος, Έξω)



Σχήμα 5.3 (α) Σύγκριση βαθμονομημένων τιμών $PM_{2.5}$ με τις αρχικές τιμές (β) Σύγκριση βαθμονομημένων τιμών υγρασίας με τις αρχικές τιμές (γ) Σύγκριση βαθμονομημένων τιμών θερμοκρασίας με τις αρχικές τιμές

ATH-ENVICARE-5 (Ακαδημία Πλάτωνος, Μέσα)





Σχήμα 5.4 (α) Σύγκριση βαθμονομημένων τιμών $PM_{2.5}$ με τις αρχικές τιμές (β) Σύγκριση βαθμονομημένων τιμών υγρασίας με τις αρχικές τιμές (γ) Σύγκριση βαθμονομημένων τιμών θερμοκρασίας με τις αρχικές τιμές

7. Υπολογισμός AQI και DI

Ο τύπος για τον υπολογισμό του AQI δίνεται στο κεφάλαιο 2.1 και ο τύπος για τον DI στο κεφάλαιο 2.2.

8. Προσδιορισμός αριθμού υπερβάσεων.

Στο στάδιο αυτό υπολογίστηκαν ο μέσος μηνιαίος αριθμός υπερβάσεων για όλη την χρονοσειρά ανά αισθητήρα. Η οριακή συγκέντρωση των $PM_{2.5}$ λήφθηκε από την βιβλιογραφία και ισούται με $25 \mu g/m^3$. Ο προσδιορισμός των υπερβάσεων έγινε στις ημερήσιες μέσες τιμές των δεδομένων.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρατίθενται τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν μετά το πέρας της επεξεργασίας των μετρήσεων.

5.6. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής δημιουργήθηκαν κάποια τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ), με τη βοήθεια της εφαρμογής «Neural Net Fitting» του λογισμικού MATLAB™ [109].

Η εφαρμογή «Neural Network Fitting» διευκολύνει τη δημιουργία, την οπτικοποίηση και την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου δύο επιπέδων ανατροφοδότησης ειδικά σχεδιασμένης για την αντιμετώπιση προκλήσεων προσαρμογής δεδομένων. Χρησιμοποιώντας αυτή την εφαρμογή, κάποιος έχει τη δυνατότητα να:

- Εισάγει σύνολα δεδομένων από ένα αρχείο, τον χώρο εργασίας MATLAB® ή να επιλέξει από μια σειρά παραδειγμάτων συνόλων δεδομένων.
- Διαχωρίζει τα σύνολα δεδομένων σε διακριτά υποσύνολα εκπαίδευσης, επικύρωσης και δοκιμής.
- Προσδιορίζει και εκπαιδεύσει ένα μοντέλο νευρωνικών δικτύων.
- Αξιολογήστε την απόδοση του δικτύου μέσω υπολογισμών μέσου τετραγώνου σφάλματος και τεχνικών ανάλυσης παλινδρόμησης.
- Εξετάσει τα αποτελέσματα μέσω τεχνικών οπτικοποίησης, όπως προσαρμογή παλινδρόμησης ή ιστογράμματα σφαλμάτων.
- Δημιουργήσει σενάρια MATLAB που επιτρέπουν την αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων και την τροποποίηση της μεθοδολογίας εκπαίδευσης.
- Δημιουργήσει λειτουργίες που είναι συμβατές με την ανάπτυξη χρησιμοποιώντας τα εργαλεία MATLAB Compiler™ και MATLAB Coder™, μαζί με την επιλογή εξαγωγής στο Simulink® για ενοποίηση με το Simulink Coder.

Η εφαρμογή «Neural Network Fitting» προσφέρει ολοκληρωμένους αλγόριθμους εκπαίδευσης που είναι διαθέσιμοι για την εκπαίδευση του νευρωνικού σας δικτύου.

- Levenberg-Marquardt: Αναθεωρεί τις παραμέτρους βάρους και προκατάληψης σύμφωνα με τη μεθοδολογία βελτιστοποίησης Levenberg-Marquardt (LM). Η εκπαιδευτική προσέγγιση LM θεωρείται συχνά ως ο πιο εύχρηστος αλγόριθμος εκπαίδευσης, αν και απαιτεί μεγαλύτερη κατανομή μνήμης σε σύγκριση με εναλλακτικές μεθόδους.
- Κανονικοποίηση Bayesian: Χρησιμοποιεί τη βελτιστοποίηση LM για να ενημερώσει τα βάρη και τις προκαταλήψεις. Ελαχιστοποιεί τα τετράγωνα σφάλματα και τα βάρη για την επίτευξη αποτελεσματικής γενίκευσης δικτύου. Αν και είναι χρονοβόρος, αυτός ο αλγόριθμος υπερέχει στη γενίκευση με θορυβώδη ή περιορισμένα σύνολα δεδομένων.
- Κλιμακωμένη οπίσθια διάδοση συζυγούς κλίσης: Ενημερώνει τις τιμές βάρους και προκατάληψης σύμφωνα με τη μέθοδο κλιμακούμενης διαβάθμισης συζυγούς. Συνιστάται για μεγάλα προβλήματα, καθώς χρησιμοποιεί υπολογισμούς διαβάθμισης που είναι πιο αποδοτικοί στη μνήμη από τους Jacobian υπολογισμούς που χρησιμοποιούνται από την κανονικοποίηση LM ή Bayesian.

Με τον αλγόριθμο εκπαίδευσης LM, δημιουργήθηκαν νευρωνικά για δύο περιπτώσεις:

- 1) Την πρόβλεψη της συγκέντρωσης $PM_{2,5}$ στην Ακαδημία Πλάτωνος χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από τον αισθητήρα στο Ηράκλειο.
- 2) Την πρόβλεψη της εσωτερικής συγκέντρωσης $PM_{2,5}$ στην Ακαδημία Πλάτωνος, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από την εξωτερική συγκέντρωση αλλά και προηγούμενες εσωτερικές μετρήσεις.

Το δεύτερο αποσκοπεί σε μελλοντική μελέτη για την ανάπτυξη αυτόματου συστήματος αερισμού ή κώδικα που θα μπορεί να εφαρμοστεί στα ήδη υπάρχοντα κλιματιστικά, ο οποίος θα αποτρέπει την εσωτερική ποιότητα του αέρα από το να είναι χειρότερη από την εξωτερική και θα προειδοποιεί τους κατοίκους για υπερβάσεις ατμοσφαιρικής ρύπανσης εντός της οικίας.

Για την πρώτη περίπτωση, αναπτύχθηκαν τρία ΤΝΔ. Αυτά έχουν ως στόχο την πρόβλεψη σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή γνωρίζοντας την συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στο Ηράκλειο να γνωρίζουμε και την συγκέντρωση στην Ακαδημία Πλάτωνος χωρίς όμως να υπάρχει εκεί αισθητήρας. Τα δεδομένα εισόδου στο νευρωνικό είναι:

- α) Ο μήνας, σε μορφή 1, 2, 3... όπου 1 ο Ιανουάριος, 2 ο Φεβρουάριος, κ.ο.κ. (1 μέχρι 12).
- β) Η μέρα σε μορφή 1, 2, 3... όπου 1 η Δευτέρα, 2 η Τρίτη, κ.ο.κ. (1 μέχρι 7).
- γ) Η ώρα σε μορφή 1, 2, 3... όπου το 1 να αντιστοιχεί στις 00:00, το 2 στη 01:00, κ.ο.κ. (1 μέχρι 24).
- δ) Ένας συντελεστής βαρύτητας της ημέρας, όπου οι καθημερινές ισούνται με το 0, το Σάββατο με το 1 και η Κυριακή και οι αργίες με το 2.
- ε) Ένας συντελεστής βαρύτητας της ώρας, όπου οι ώρες από τις 23:00 μέχρι τις 07:00 ισούνται με 0, από τις 11:00 μέχρι τις 18:00 με 1 και από τις 08:00 μέχρι τις 10:00 και τις 19:00 μέχρι τις 22:00 ισούνται με 2.
- στ) Ο δείκτης θερμικής άνεσης στην Ακαδημία Πλάτωνος από τον οποίο αντλούνται δεδομένα για την υγρασία και την θερμοκρασία.
- ζ) Ο δείκτης θερμικής άνεσης στο Ηράκλειο.
- η) Η συγκέντρωση $PM_{2,5}$ στο Ηράκλειο.

Για την δεύτερη περίπτωση, αναπτύχθηκαν έξι ΤΝΔ. Αυτά έχουν ως στόχο την πρόβλεψη της εσωτερικής συγκέντρωσης για την επόμενη ώρα, δηλαδή γνωρίζοντας την εσωτερική συγκέντρωση στις 14:00 και χρησιμοποιώντας εξωτερική συγκέντρωση σε πραγματικό χρόνο, να προβλεφθεί τι θα ισχύει στις 15:00. Τα δεδομένα εισόδου στο νευρωνικό είναι ίδια από το α) μέχρι και το στ) και προστίθενται:

- ζ) Ο δείκτης θερμικής άνεσης στο εσωτερικό της κατοικίας
- η) Η συγκέντρωση $PM_{2,5}$ στο εξωτερικό της κατοικίας.
- θ) Η συγκέντρωση $PM_{2,5}$ στο εσωτερικό της κατοικίας.

Τα νευρωνικά της δεύτερης περίπτωσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες με βάση τα δεδομένα εισόδου τους.

- Δεδομένα εισόδου μία ώρα πριν: για τα δεδομένα στ) μέχρι ζ) δόθηκαν στο νευρωνικό οι τιμές για μία ώρα πριν και για την ώρα μηδέν. Για το θ) δόθηκαν τιμές μόνο για μία ώρα πριν, καθώς στόχος είναι η πρόβλεψη της ώρας μηδέν.

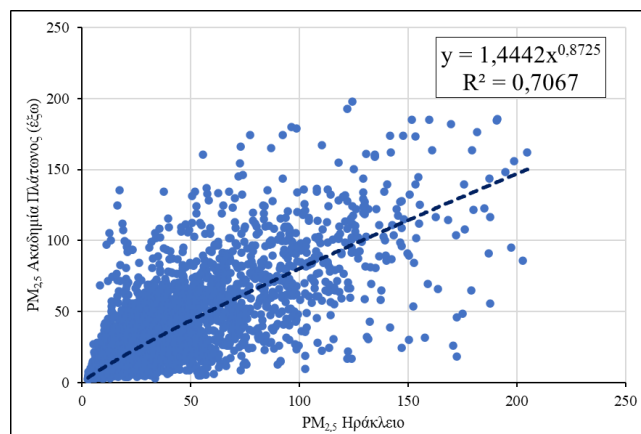
- Δεδομένα εισόδου 24 ώρες πριν: για τα δεδομένα στ) μέχρι ζ) δόθηκαν στο νευρωνικό οι τιμές για 24 ώρες πριν, 23 ώρες πριν, 22 ώρες πριν και ούτω καθ' εξής μέχρι την ώρα μηδέν. Για το θ) δόθηκαν τιμές για 24 ώρες πριν, 23 ώρες πριν και ούτω καθ' εξής μέχρι μία ώρα πριν, καθώς στόχος είναι η πρόβλεψη της ώρας μηδέν.

Για τη σωστή λειτουργία των ΤΝΔ, τα δεδομένα εισόδου και εξόδου πρέπει να επεξεργαστούν ώστε να μην έχουν κενά και να έχουν τελεία αντί για κόμμα ως διαχωριστικό δεκαδικών. Η συμπλήρωση των κενών έγινε ως εξής.

- Πρώτα εντοπίστηκε το σετ δεδομένων με τα λιγότερα κενά, που στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν του αισθητήρα στο Ηράκλειο (ATH-ENVICARE-2) και έγιναν διαγράμματα με το σετ δεδομένων του εξωτερικού αισθητήρα στην Ακαδημία Πλάτωνος (ATH-ENVICARE-3), επειδή οι δύο εξωτερικοί αισθητήρες θα έχουν την καλύτερη συσχέτιση. Στα διαγράμματα αυτά προστέθηκε γραμμή τάσης και εμφανίστηκε η εξίσωση και ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2).
- Για την συμπλήρωση των κενών στο σετ δεδομένων του ATH-ENVICARE-3 στα διαγράμματα ήταν τα δεδομένα του στον άξονα y και τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-2 στον άξονα x. Και το αντίθετο για την συμπλήρωση των κενών στο σετ δεδομένων του ATH-ENVICARE-2.
- Με τη βοήθεια φίλτρων αφαιρέθηκαν τα κενά από τα διαγράμματα και τέθηκαν όρια στις τιμές με σκοπό την εύρεση όσο μεγαλύτερου R^2 γίνεται. Έπειτα, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις των γραμμών τάσης συμπληρώθηκαν τα κενά.
- Η ίδια διαδικασία έγινε και για την συμπλήρωση του σετ δεδομένων του εσωτερικού αισθητήρα στην Ακαδημία Πλάτωνος (ATH-ENVICARE-5) με τη βοήθεια του συμπληρωμένου σετ δεδομένων του ATH-ENVICARE-3.

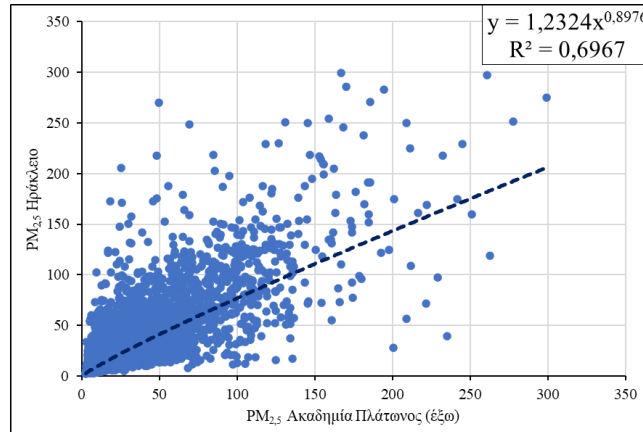
Για την συμπλήρωση κενών στα δεδομένα $PM_{2,5}$:

Από το Σχήμα 5.5 με τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-2 στον άξονα X και τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον Y, χωρίς κενά και για $PM_{2,5}$ Ηράκλειο $< 205 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $PM_{2,5}$ Ακαδημία Πλάτωνος (έξω) $< 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ από την δυναμική γραμμή τάσης προέκυψε η εξίσωση: $y = 1,4442x^{0,8725}$ και $R^2=0,7067$.



Σχήμα 5.5 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των κενών στα δεδομένα $PM_{2,5}$ του ATH-ENVICARE-3

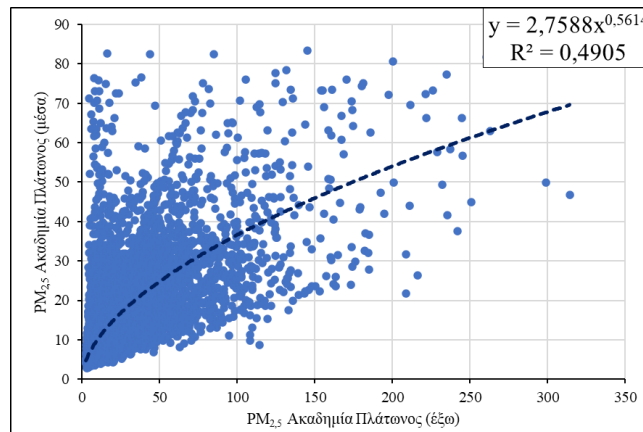
Από το Σχήμα 5.6 με τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον άξονα X και τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-2 στον Y, χωρίς κενά και για $PM_{2,5}$ Ηράκλειο $< 305 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και $PM_{2,5}$ Ακαδημία Πλάτωνος (έξω) $< 305 \mu\text{g}/\text{m}^3$ από την δυναμική γραμμή τάσης προέκυψε η εξίσωση: $y = 1,2324x^{0,8976}$ και $R^2=0,6982$.



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των κενών στα δεδομένα PM_{2,5} του ATH-ENVICARE-2

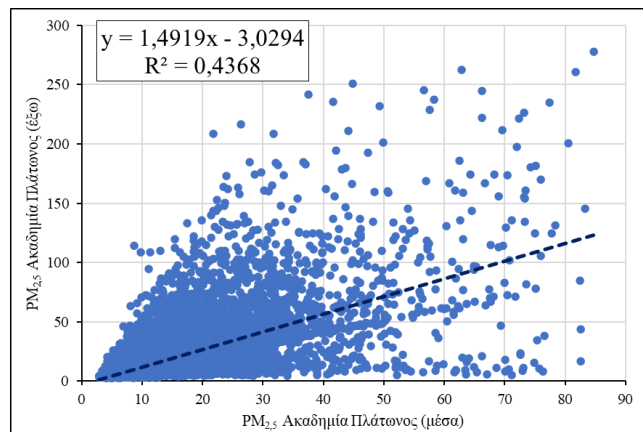
Με τις παραπάνω εξισώσεις συμπληρώθηκαν τα κενά των ATH-ENVICARE-2 και ATH-ENVICARE-3.

Από το Σχήμα 5.7 με τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-5 στον άξονα X και τα μερικώς συμπληρωμένα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον Y, χωρίς κενά και για PM_{2,5} έξω < 285 μg/m³ και PM_{2,5} μέσα < 85 μg/m³ από την γραμμική γραμμική τάσης προέκυψε η εξίσωση: $y = 1,4919x - 3,0294$ και $R^2=0,4368$.



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των κενών στα δεδομένα PM_{2,5} του ATH-ENVICARE-5

Από το Σχήμα 5.8 με τα μερικώς συμπληρωμένα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον άξονα X και τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-5 στον Y, χωρίς κενά και για PM_{2,5} έξω < 315 μg/m³ και PM_{2,5} μέσα < 85 μg/m³ από την δυναμική γραμμική τάσης προέκυψε η εξίσωση: $y = 2,7586x^{0,5614}$ και $R^2=0,4905$.

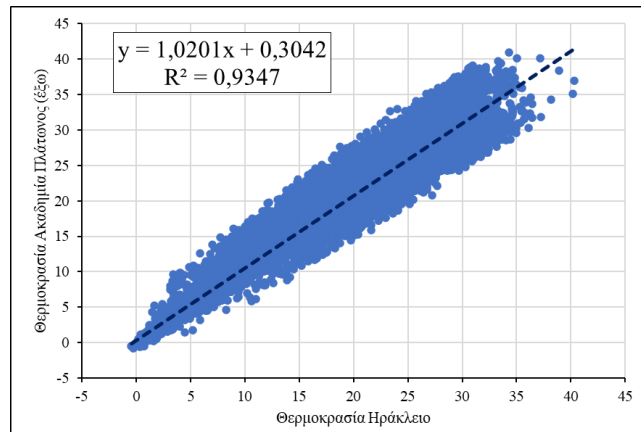


Σχήμα 5.8 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των υπόλοιπων κενών στα δεδομένα PM_{2,5} του ATH-ENVICARE-3

Με τις παραπάνω εξισώσεις συμπληρώθηκαν τα υπόλοιπα κενά του ATH-ENVICARE-3 και τα κενά ATH-ENVICARE-5.

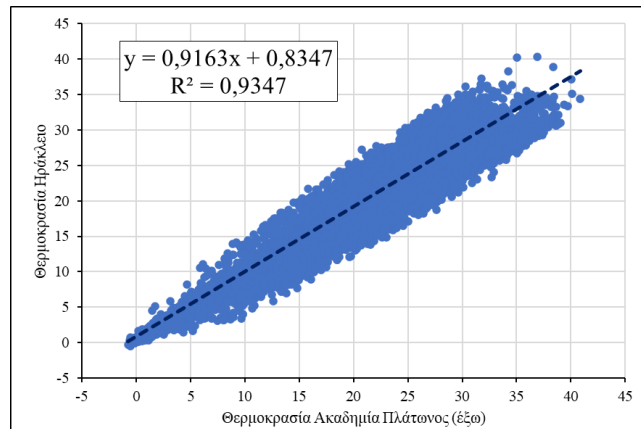
Για την συμπλήρωση κενών στα δεδομένα της θερμοκρασίας:

Από το Σχήμα 5.9 με τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-2 στον άξονα X και τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον Y, χωρίς κενά και για τιμές της θερμοκρασίας $> -1^{\circ}\text{C}$ από την γραμμική γραμμή τάσης προέκυψε η εξίσωση: $y = 1,0201x + 0,3042$ και $R^2=0,9347$.



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των κενών στα δεδομένα θερμοκρασίας του ATH-ENVICARE-3

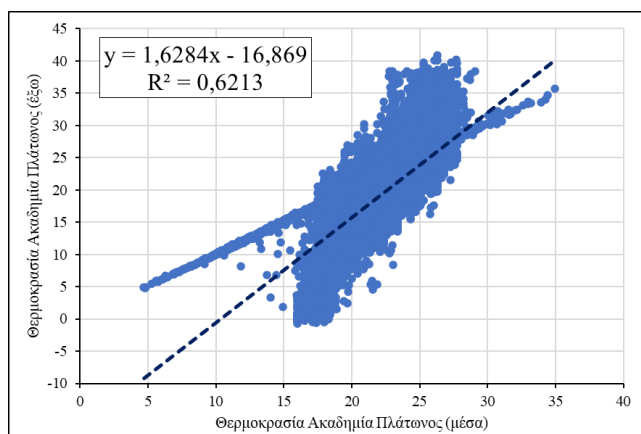
Από το διάγραμμα με τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον άξονα X και τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-2 στον Y, χωρίς κενά και για τιμές της θερμοκρασίας $> -1^{\circ}\text{C}$ από την γραμμική γραμμή τάσης προέκυψε η εξίσωση: $y = 0,9163x + 0,8347$ και $R^2=0,9347$.



Σχήμα 5.10 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των κενών στα δεδομένα θερμοκρασίας του ATH-ENVICARE-2

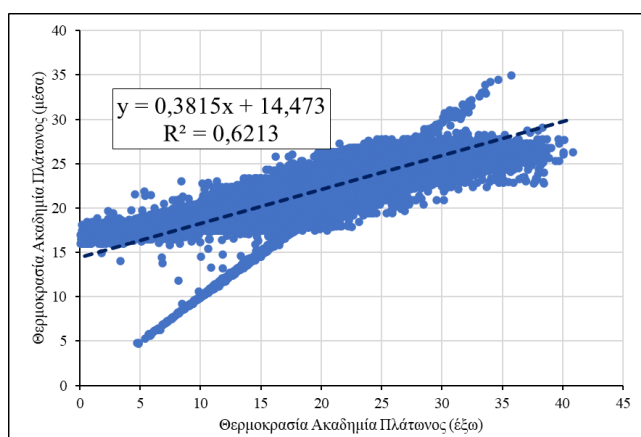
Με τις παραπάνω εξισώσεις συμπληρώθηκαν τα κενά των ATH-ENVICARE-2 και ATH-ENVICARE-3.

Από το Σχήμα 5.11 με τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-5 στον άξονα X και τα μερικώς συμπληρωμένα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον Y, χωρίς κενά και για τιμές της θερμοκρασίας $> -1^{\circ}\text{C}$ από την γραμμική γραμμή τάσης προέκυψε η εξίσωση: $y = 1,6284x - 16,869$ και $R^2=0,6213$.



Σχήμα 5.11 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των υπόλοιπων κενών στα δεδομένα θερμοκρασίας του ATH-ENVICARE-3

Από το Σχήμα 5.12 με τα μερικώς συμπληρωμένα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον άξονα X και τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-5 στον Y, χωρίς κενά και για τιμές της θερμοκρασίας > -1°C από την γραμμική τάση προέκυψε η εξίσωση: $y = 0,3815x + 14,473$ και $R^2=0,6213$.

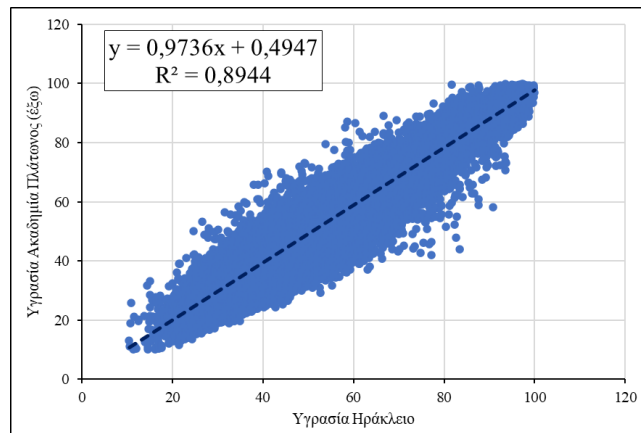


Σχήμα 5.12 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των κενών στα δεδομένα θερμοκρασίας του ATH-ENVICARE-5

Με τις παραπάνω εξισώσεις συμπληρώθηκαν τα υπόλοιπα κενά του ATH-ENVICARE-3 και τα κενά ATH-ENVICARE-5.

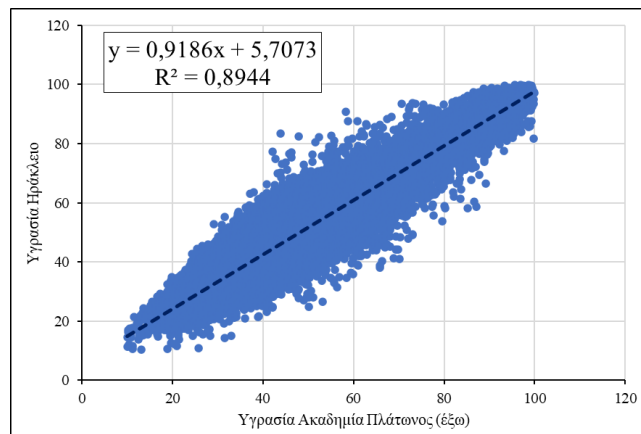
Για την συμπλήρωση κενών στα δεδομένα της υγρασίας:

Από το Σχήμα 5.13 με τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-2 στον άξονα X και τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον Y, χωρίς κενά και για τιμές της υγρασίας μεταξύ 10% και 100%, από την γραμμική γραμμή τάσης προέκυψε η εξίσωση: $y = 0,9163x + 0,8347$ και $R^2=0,8944$.



Σχήμα 5.13 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των κενών στα δεδομένα υγρασίας του ATH-ENVICARE-3

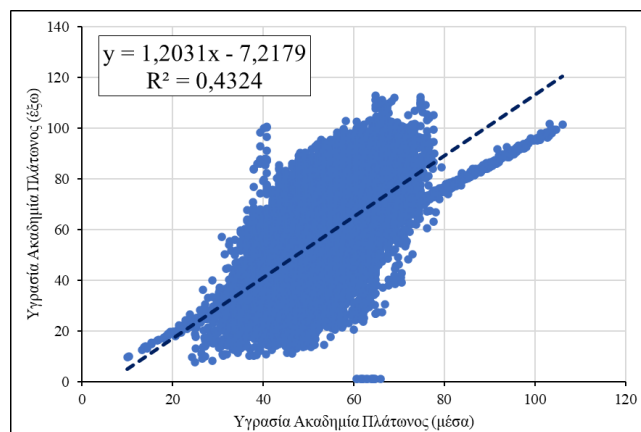
Από το Σχήμα 5.14 με τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον άξονα X και τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-2 στον Y, χωρίς κενά και για τιμές της υγρασίας μεταξύ 10% και 100% από την γραμμική γραμμή τάσης προέκυψε η εξίσωση: $y = 0,9186x + 5,7073$ και $R^2=0,8944$.



Σχήμα 5.14 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των κενών στα δεδομένα υγρασίας του ATH-ENVICARE-2

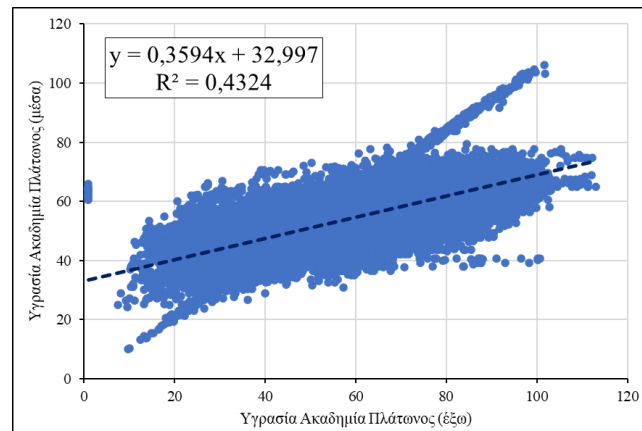
Με τις παραπάνω εξισώσεις συμπληρώθηκαν τα κενά των ATH-ENVICARE-2 και ATH-ENVICARE-3.

Από το Σχήμα 5.15 με τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-5 στον άξονα X και τα μερικώς συμπληρωμένα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον Y, χωρίς κενά, από την γραμμική γραμμή τάσης προέκυψε η εξίσωση: $y = 1,2031x - 7,2179$ και $R^2=0,4324$.



Σχήμα 5.15 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των υπόλοιπων κενών στα δεδομένα υγρασίας του ATH-ENVICARE-3

Από το Σχήμα 5.16 με τα μερικώς συμπληρωμένα δεδομένα του ATH-ENVICARE-3 στον άξονα X και τα δεδομένα του ATH-ENVICARE-5 στον Y, χωρίς κενά και για τιμές της υγρασίας μεταξύ 10% και 100%, από την γραμμική γραμμική τάσης προέκυψε η εξίσωση: $y = 0,3594x + 32,997$ και $R^2=0,4324$.



Σχήμα 5.16 Διάγραμμα διασποράς για την συμπλήρωση των κενών στα δεδομένα υγρασίας του ATH-ENVICARE-5

Με τις παραπάνω εξισώσεις συμπληρώθηκαν τα υπόλοιπα κενά του ATH-ENVICARE-3 και τα κενά ATH-ENVICARE-5.

Στη συνέχεια έγινε στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με τη χρήση δεικτών αξιοπιστίας και υπερβάσεων [110–113]. Για την καλύτερη κατανόηση του υπολογισμού των παρακάτω δεικτών αξιοπιστίας, σημειώνεται ότι η προβλεπόμενη τιμή του μεγέθους για το οποίο γίνεται πρόβλεψη από το προβλεπτικό μοντέλο συμβολίζεται με P_i , ενώ η αντίστοιχη πραγματική τιμή του συμβολίζεται με O_i . Το πλήθος των προβλέψεων συμβολίζεται με n .

Mean Bias Error (MBE): το μέσο λάθος προκατάληψης-εμμονής χρησιμοποιείται για την περιγραφή του πόσο το προβλεπτικό μοντέλο υπερεκτιμά ή υποεκτιμά την κατάσταση. Όταν $MBE > 0$ σημαίνει ότι το προβλεπτικό μοντέλο υπερεκτιμά την κατάσταση, ενώ όταν $MBE < 0$ σημαίνει ότι την υποεκτιμά. Έχει την ίδια μονάδα μέτρησης με το προβλεπόμενο μέγεθος.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$$

Root Mean Square Error (RMSE): η απόκλιση μέσης τετραγωνικής τιμής περιγράφει την διαφορά μεταξύ των τιμών που προβλέπονται από το μοντέλο και των τιμών που παρατηρούνται πραγματικά. Το RMSE αθροίζει τις μεμονωμένες διαφορές και χρησιμεύει ως ένα μέτρο που δείχνει την ικανότητα του ανεπτυγμένου μοντέλου. Έχει την ίδια μονάδα μέτρησης με το προβλεπόμενο μέγεθος.

$$RMSE = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Pearson's Correlation Coefficient (R): ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson περιγράφει την συσχέτιση μεταξύ των πραγματικών τιμών ενός δείγματος, με τις αντίστοιχες τιμές που προβλέπει το μοντέλο.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(O_i - O_{i\text{ave}}) \cdot (P_i - P_{i\text{ave}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{i\text{ave}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{i\text{ave}})^2}}$$

Όπου,

$O_{i\text{ave}}$ είναι ο μέσος όρος των πραγματικών τιμών του μεγέθους για το οποίο γίνεται η πρόβλεψη και $P_{i\text{ave}}$ είναι ο μέσος όρος των προβλεπόμενων από το μοντέλο τιμών.

R	Χαρακτηρισμός Συσχέτισης
R=1	Απόλυτη θετική συσχέτιση
0.5≤R<1	Ισχυρή θετική συσχέτιση
0.3≤R≤0.5	Μέτρια θετική συσχέτιση
0<R≤0.3	Ασθενής θετική συσχέτιση
R=0	Καμία συσχέτιση
-0.3≤R<0	Ασθενής αρνητική συσχέτιση
-0.5≤R≤-0.3	Μέτρια αρνητική συσχέτιση
-1<R≤-0.5	Ισχυρή αρνητική συσχέτιση
R=-1	Απόλυτη αρνητική συσχέτιση

Πίνακας 9. Εύρος τιμών του συντελεστή συσχέτισης Pearson

Index of Agreement (R): ο δείκτης συμφωνίας περιγράφει το πόσο κοντά είναι οι προβλεπόμενες τιμές του μοντέλου, με τις αντίστοιχες παρατηρούμενες/πραγματικές τιμές του μεγέθους. Είναι αδιάστατο μέγεθος με τιμές μεταξύ μηδέν και ένα ($0 \leq IA \leq 1$). Όταν $IA=0$, δεν υπάρχει καμία συμφωνία μεταξύ πρόβλεψης και παρατηρήσεις. Όταν $IA=1$ τότε υπάρχει τέλεια συμφωνία μεταξύ τους.

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_{i,ave}| + |O_i - O_{i,ave}|)^2}$$

Στον υπολογισμό των παρακάτω δεικτών αξιοπιστίας της πρόγνωσης των υπερβάσεων (δείκτες αληθούς/ψευδούς αποτελέσματος), το X συμβολίζει τον αριθμό των πραγματικών/παρατηρούμενων υπερβάσεων που προβλέπει σωστά το μοντέλο. Το Y συμβολίζει τον αριθμό των υπερβάσεων που παρατηρήθηκαν αλλά δεν προβλήθηκαν από το μοντέλο. Το Z συμβολίζει τον αριθμό υπερβάσεων που προβλέφθηκαν από το μοντέλο αλλά δεν παρατηρήθηκαν. Τέλος, το W συμβολίζει τον αριθμό μη-υπερβάσεων που παρατηρήθηκαν και ταυτόχρονα προβλέφθηκαν σωστά από το μοντέλο [114–116].

True Predicted Rate (TPR): το ποσοστό αληθών προγνώσεων υπέρβασης αντιπροσωπεύει το κλάσμα των σωστών προβλέψεων υπέρβασης επί του συνόλου των πραγματικών υπερβάσεων. Όταν $TPR=0\%$ σημαίνει 0% επιτυχία στην πρόβλεψη των υπερβάσεων, ενώ όταν $TPR=100\%$ σημαίνει 100% επιτυχή πρόβλεψη των υπερβάσεων.

$$TPR = \frac{X}{X + Y} \cdot 100\%$$

False Positive Rate (FPR): το ψευδοθετικό ποσοστό πρόβλεψης των υπερβάσεων αντιπροσωπεύει το κλάσμα των λάθος προβλέψεων υπέρβασης επί του συνόλου των μη-υπερβάσεων που παρατηρήθηκαν. Παίρνει τιμές από 0% έως και 100%. Όταν $FPR=0\%$ σημαίνει 100% επιτυχία, δηλαδή το μοντέλο δεν προβλέπει λάθος υπερβάσεις ενώ στην πραγματικότητα δεν υπήρχε υπέρβαση.

$$FPR = \frac{Z}{Z + W} \cdot 100\%$$

False Alarm Rate (FAR): το ψευδών ποσοστό συναγερμών αντιπροσωπεύει το κλάσμα των λάθος προβλέψεων υπέρβασης επί του συνόλου των παρατηρούμενων υπερβάσεων. Παίρνει τιμές από 0% έως και 100%. Όταν $FAR=0\%$ σημαίνει 100% επιτυχία δηλαδή το μοντέλο δεν προβλέπει λάθος υπερβάσεις ενώ στην πραγματικότητα υπήρχε υπέρβαση και προβλέφθηκε σωστά η υπέρβαση.

$$FAR = \frac{Z}{Z + X} \cdot 100\%$$

Success Index (SI): ο δείκτης επιτυχίας αντιπροσωπεύει την συνολική ικανότητα του μοντέλου να προβλέπει σωστά αν μια περίπτωση είναι ή όχι περίπτωση υπέρβασης, δηλαδή το ποσοστό των σωστών προβλέψεων

υπέρβασης επί του συνόλου των περιπτώσεων πρόβλεψης, ανεξάρτητα αν ήταν ή όχι στην πραγματικότητα περιπτώσεις υπέρβασης. Παίρνει τιμές από 0% έως και 100%. Όταν SI=100% σημαίνει 100% επιτυχία, δηλαδή το μοντέλο προβλέπει σωστά όλες τις περιπτώσεις υπέρβασης καθώς και όλες τις περιπτώσεις μη-υπέρβασης.

$$SI = \frac{X + W}{X + Y + Z + W} \cdot 100\%$$

Στα ΤΝΔ που αναπτύχθηκαν θεωρούνται ως υπέρβαση οι τιμές $\leq 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

6. Κεφάλαιο 6^ο: Αποτελέσματα

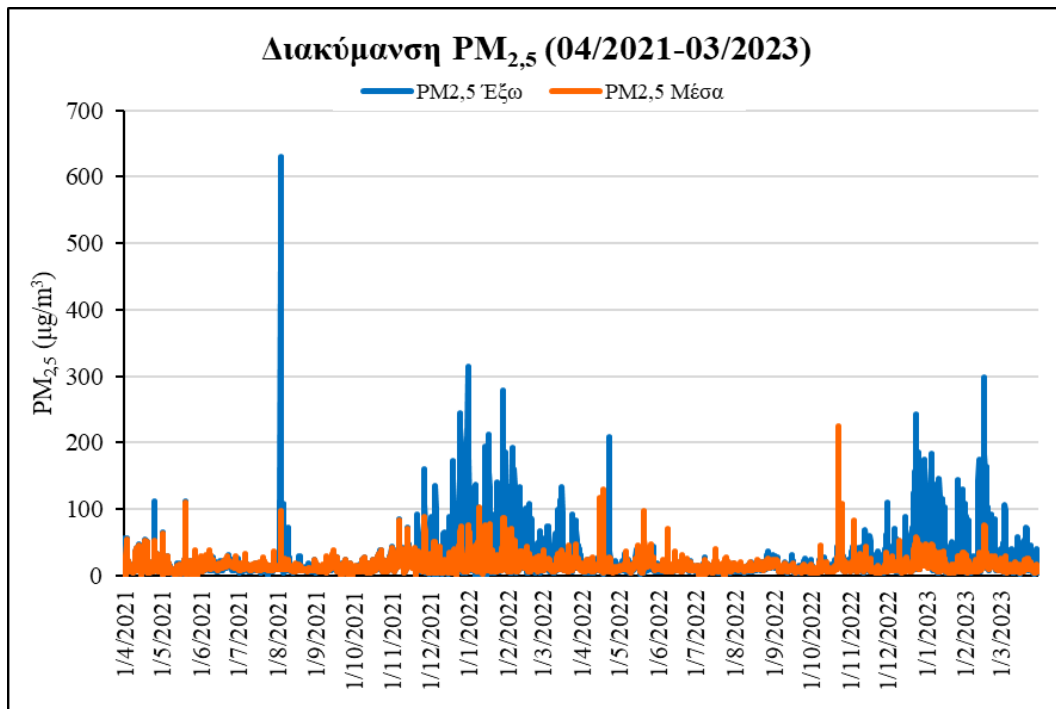
Η ΕΕ χρησιμοποιεί εκτενώς τις ημερήσιες μέσες συγκεντρώσεις $\text{PM}_{2.5}$ για την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα, τον καθορισμό ορίων έκθεσης και την θέσπιση νομοθεσίας. Η χρονική ανάλυση που έγινε για αυτή τη διπλωματική προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα της έκθεσης 24 ωρών και είναι πολύτιμη για την αξιολόγηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων στην υγεία. Ενώ οι ημερήσιες μέσες τιμές προσφέρουν μια γενική προοπτική, οι ωριαίες μέσες τιμές παρέχουν μια πιο λεπτομερή άποψη, επιτρέποντας τον εντοπισμό περίπλοκων μοτίβων στις συγκεντρώσεις $\text{PM}_{2.5}$ καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και διευκολύνοντας τον εντοπισμό των πηγών ρύπανσης. Οι μηνιαίες και ετήσιες μέσες τιμές, από την άλλη πλευρά, είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση των μακροπρόθεσμων τάσεων της ποιότητας του αέρα και των σχετικών επιπτώσεων στην υγεία.

Στα παρακάτω υποκεφάλαια γίνεται σύγκριση των μετρήσεων εντός και εκτός της τυπικής κατοικίας στην Ακαδημία Πλάτωνος, καθώς και των εξωτερικών δεδομένων της κατοικίας με τα εξωτερικά δεδομένα κατοικίας στο Ηράκλειο, Αττικής. Τα διαγράμματα που ακολουθούν απεικονίζουν την μέση μηνιαία, ημερήσια και ωριαία διακύμανση των συγκεντρώσεων $\text{PM}_{2.5}$ και του δείκτη AQI.

6.1. Ακαδημία Πλάτωνος Μέσα – Έξω

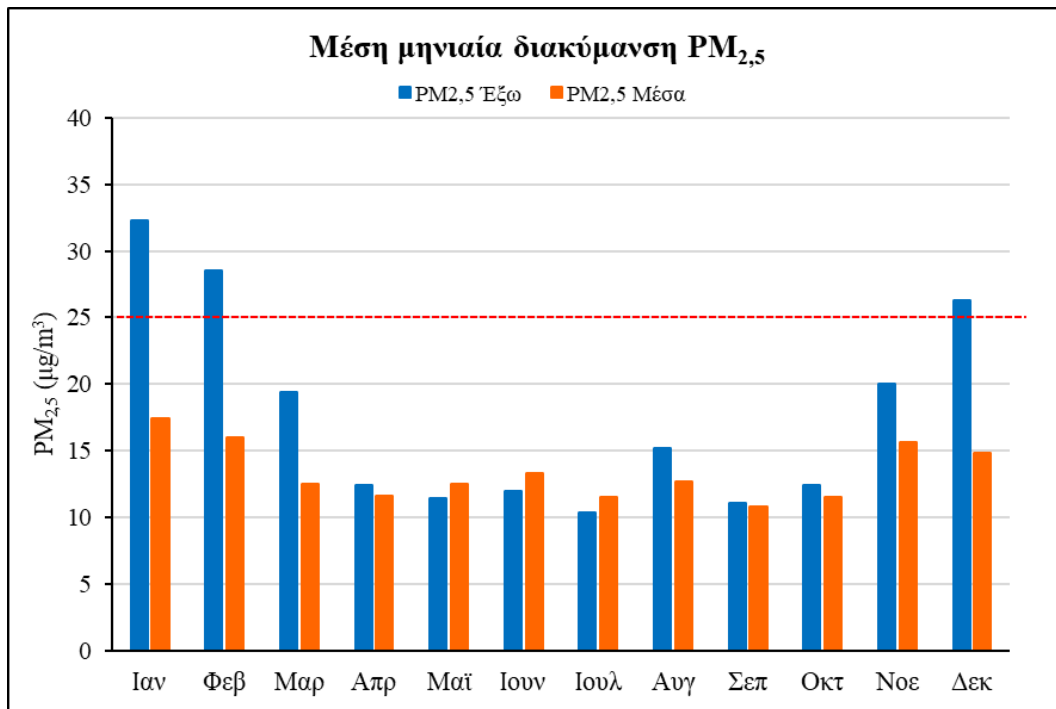
6.1.1. Σύγκριση συγκεντρώσεων $\text{PM}_{2.5}$

Το Σχήμα 6.1 παρουσιάζει τις χρονικές μεταβολές των ωριαίων συγκεντρώσεων $\text{PM}_{2.5}$ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου καθ' όλη την διετία μετρήσεων. Μια σημαντική αύξηση των επιπέδων $\text{PM}_{2.5}$ στο εξωτερικό περιβάλλον παρατηρήθηκε μεταξύ 3 και 4 Αυγούστου 2021, πιθανώς λόγω πυρκαγιών στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής [117]. Οι επικρατούντες άνεμοι κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου μετέφεραν καπνό και αιωρούμενα σωματίδια από τον τόπο της πυρκαγιάς στο κέντρο της Αθήνας και κατ' επέκταση στην τοποθεσία του διαμερίσματος. Ως αποτέλεσμα, τα επίπεδα $\text{PM}_{2.5}$ ξεπέρασαν τα $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$, πολύ υψηλότερα από τις ετήσιες μέσες κατευθυντήριες τιμές. Η αρχική ανάλυση των δεδομένων δείχνει ότι οι συγκεντρώσεις $\text{PM}_{2.5}$ στο εξωτερικό περιβάλλον γενικά υπερέβαιναν τα εσωτερικά επίπεδα κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Επιπρόσθετη ανάλυση είναι απαραίτητη για τη διερεύνηση των εποχιακών διακυμάνσεων και άλλων παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα του εσωτερικού αέρα.



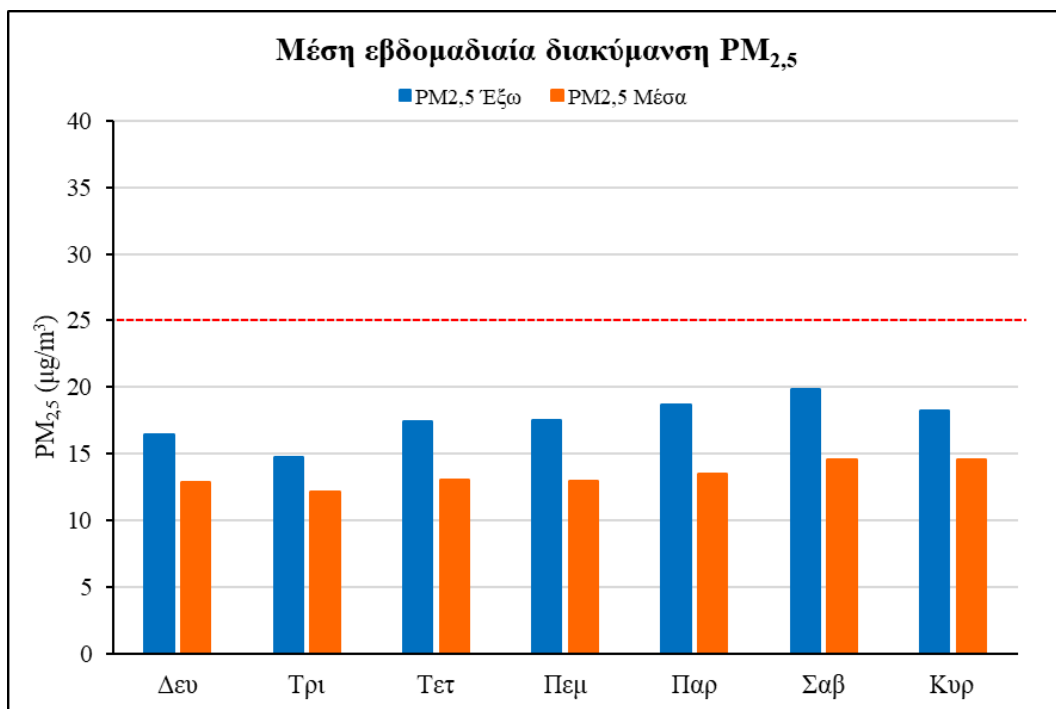
Σχήμα 6.1 Συνολική διακύμανση PM_{2,5} μέσα και έξω στην Ακαδημία Πλάτωνος για όλη την εξεταζόμενη χρονοσειρά

Το Σχήμα 6.2 αποκαλύπτει διακριτά εποχιακά μοτίβα στις συγκεντρώσεις PM_{2,5}, τα οποία θα συζητηθούν περαιτέρω. Οι συγκεντρώσεις τείνουν να είναι αυξημένες κατά τους ψυχρότερους μήνες (Νοέμβριο έως Φεβρουάριο) και μειωμένες κατά τους θερμότερους μήνες (Ιούνιο έως Αύγουστο). Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην αυξημένη θέρμανση και την καύση ξύλου το χειμώνα, με αποτέλεσμα υψηλότερες εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων. Παρόλο που υπάρχουν μεμονωμένες περιπτώσεις όπου τα επίπεδα PM_{2,5} στο εσωτερικό της οικίας υπερβαίνουν τα εξωτερικά επίπεδα (Μάιο έως Ιούνιο), η γενική τάση δείχνει ότι η ποιότητα του εξωτερικού αέρα επηρεάζει σημαντικά τις συγκεντρώσεις PM_{2,5} στο εσωτερικό. Παράγοντες όπως ο αερισμός, τα δομικά υλικά και η ρύπανση του εξωτερικού αέρα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της ποιότητας στο εσωτερικό του διαμερίσματος. Η αύξηση των εσωτερικών επιπέδων συγκέντρωσης PM_{2,5} κατά τους θερμότερους μήνες αποδίδεται στην αύξηση της συχνότητας και της διάρκειας αερισμού της κατοικίας, λόγω των υψηλότερων εξωτερικών θερμοκρασιών κάτι που υποδηλώνει ότι ο αερισμός των χώρων, ως απάντηση στις υψηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες, οδηγεί σε εισροή μεγαλύτερων ποσοτήτων ρύπανσης από το εξωτερικό περιβάλλον. Παρά την υπέρβαση των ορίων της Ε.Ε. για τις εξωτερικές συγκεντρώσεις PM_{2,5}, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες, οι εσωτερικές συγκεντρώσεις παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.



Σχήμα 6.2 Μηνιαίες μέσες συγκεντρώσεις PM_{2,5} μέσα και έξω και το όριο 24 ωρών που έχει τεθεί από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο

Το Σχήμα 6.3 απεικονίζει σχετικά σταθερά ημερήσια επίπεδα PM_{2,5}, με ελάχιστες διακυμάνσεις από μέρα σε μέρα. Αυτό υποδηλώνει ότι παράγοντες πέρα από τη μέρα της εβδομάδας, όπως οι μακροπρόθεσμες τάσεις ή τα εποχιακά μοτίβα, μπορεί να ασκούν σημαντικότερη επιρροή στις συγκεντρώσεις PM_{2,5}. Ωστόσο, μια σύγκριση του Σχήμα 6.3 και του Σχήμα 6.4 αποκαλύπτει ότι αυτό δεν είναι εντελώς ακριβές. Η διακύμανση από μέρα σε μέρα γίνεται εμφανής στις εποχιακές ημερήσιες μέσες τιμές, ιδιαίτερα κατά τους χειμερινούς μήνες (Δεκέμβριο έως Φεβρουάριο) (Σχήμα 6.4α), και λιγότερο κατά τους υπόλοιπους μήνες του έτους. Αυτό σημαίνει ότι το Σχήμα 6.3 επηρεάζεται σημαντικά από τη μικρότερη διακύμανση κατά τη διάρκεια του υπόλοιπου έτους, συγκαλύπτοντας τις ακραίες μεταβολές που παρατηρούνται το χειμώνα (Σχήμα 6.4α) καθώς και τα υψηλότερα εσωτερικά επίπεδα κατά το καλοκαίρι (Σχήμα 6.4γ).



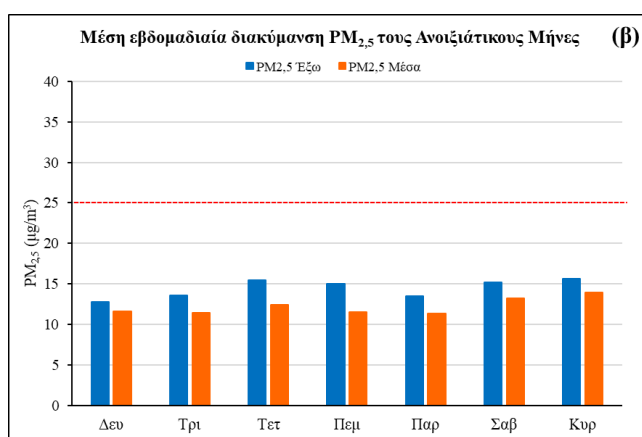
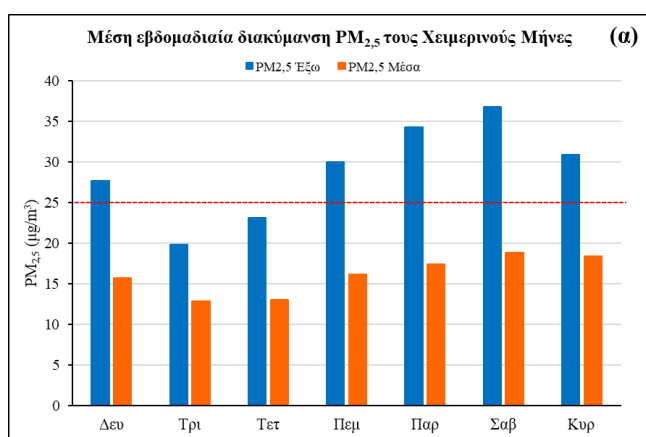
Σχήμα 6.3 Ημερήσιες μέσες συγκεντρώσεις PM_{2,5} μέσα και έξω και το όριο 24 ωρών που έχει τεθεί από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο

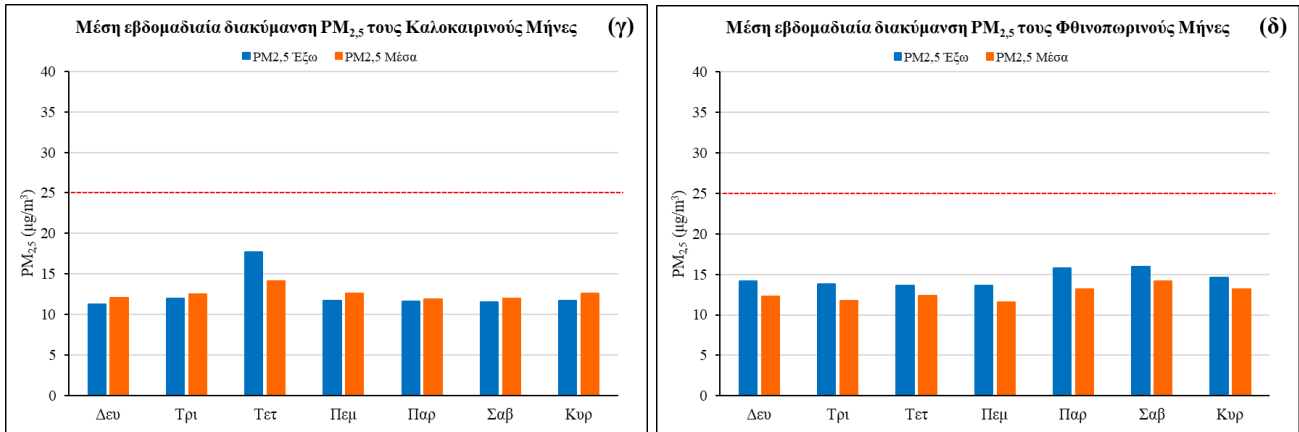
Κατά τους χειμερινούς μήνες (Σχήμα 6.4α), τα εξωτερικά επίπεδα PM_{2,5} υπερέβαιναν συχνά τα όρια που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση, θέτοντας σε σημαντικό κίνδυνο την υγεία των κατοίκων, ειδικά αν αντιμετωπίζουν αναπνευστικά προβλήματα. Η χειμερινή περίοδος φαίνεται να παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες σε σχέση με την έκθεση σε PM_{2,5}, πιθανότατα λόγω συνδυασμού παραγόντων όπως η εντατικοποίηση της χρήσης συστημάτων θέρμανσης, ο περιορισμός του αερισμού των κτιρίων και ο τομέας μεταφορών. Η μεγαλύτερη συγκέντρωση τις Παρασκευές και τα Σάββατα οφείλεται στην αυξημένη κίνηση στο τέλος της εργάσιμης εβδομάδας και στην αρχή του Σαββατοκύριακου.

Ειδικότερα, αυτή η αύξηση στα επίπεδα των PM_{2,5} αποδίδεται στην αυξημένη κυκλοφορία των οχημάτων στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Ένας σημαντικός αριθμός οδηγών επιλέγει να χρησιμοποιήσει το ιδιωτικό του όχημα τις Παρασκευές για να μετακινηθούν στην εργασία τους, επιτρέποντάς τους έτσι είτε να φύγουν από την Αθήνα είτε να συμμετάσχουν σε κοινωνικές επισκέψεις, ψώνια ή άλλες ψυχαγωγικές δραστηριότητες αργότερα. Αυτή η τάση παρατηρείται επίσης και τα Σάββατα, ιδιαίτερα τις πρώτες πρωινές ώρες, όταν κατά μήκος της Λεωφόρου Αθηνών παρατηρείται συνήθως αυξημένη κυκλοφοριακή συμφόρηση, που οφείλεται στους προαναφερθέντες παράγοντες.

Τα Σχήμα 6.4β, γ και δ απεικονίζουν την απουσία σημαντικής μεταβλητότητας μεταξύ των ημερών καθ' όλη τη διάρκεια του υπόλοιπου έτους, χωρίς υπερβάσεις του ορίου της ΕΕ ούτε στο εσωτερικό ούτε στο εξωτερικό περιβάλλον της κατοικίας. Η άνοιξη (Σχήμα 6.4β) και το φθινόπωρο (Σχήμα 6.4δ) παρουσιάζουν συγκρίσιμα μοτίβα συγκέντρωσης, τα οποία μπορούν να αποδοθούν στις παρόμοιες μετεωρολογικές τάσεις που χαρακτηρίζουν αυτές τις εποχές. Είναι αξιοσημείωτο ότι το κλίμα της Αθήνας γενικά επιτρέπει επαρκή αερισμό, αποτρέποντας τα εσωτερικά επίπεδα PM_{2,5} από το να υπερβαίνουν τις εξωτερικές συγκεντρώσεις

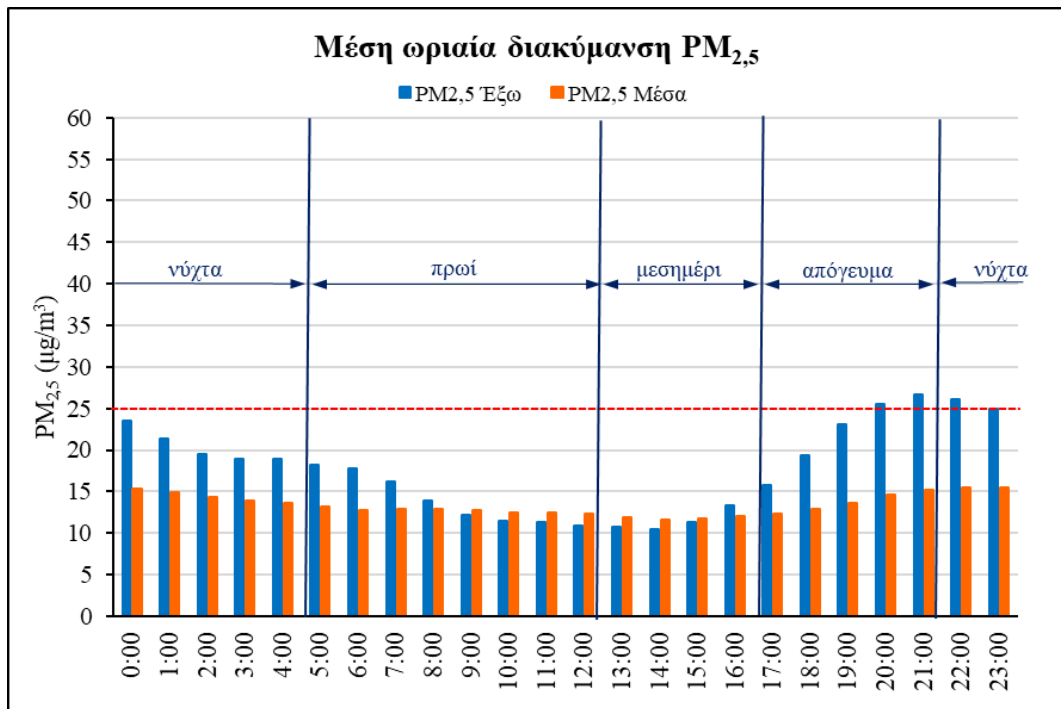
Το καλοκαίρι ξεχωρίζει ως η πιο διακριτή εποχή (Σχήμα 6.4γ), παρουσιάζοντας επίπεδα συγκέντρωσης που αποκλίνουν από εκείνα των προηγούμενων και των επόμενων εποχών. Συνεχώς υψηλότερες εσωτερικές συγκεντρώσεις σε σύγκριση με τις εξωτερικές παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η εξαιρετικά υψηλή συγκέντρωση που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1 παραπάνω, που αποδίδεται σε εγγύς πυρκαγιές όπως προαναφέρθηκε, συνέβαλε επίσης και στην υψηλότερη συγκέντρωση που καταγράφηκε την Τετάρτη σε σύγκριση με άλλες ημέρες στο Σχήμα 6.4γ. Η αυξημένη εσωτερική συγκέντρωση μπορεί να αποδοθεί στην τάση των κατοίκων να αποφεύγουν τη χρήση κλιματιστικών μονάδων, ευνοώντας αντ' αυτού τη χρήση ανοιχτών παραθύρων και ανεμιστήρων αέρα για τη ρύθμιση του εσωτερικού θερμικού περιβάλλοντος.





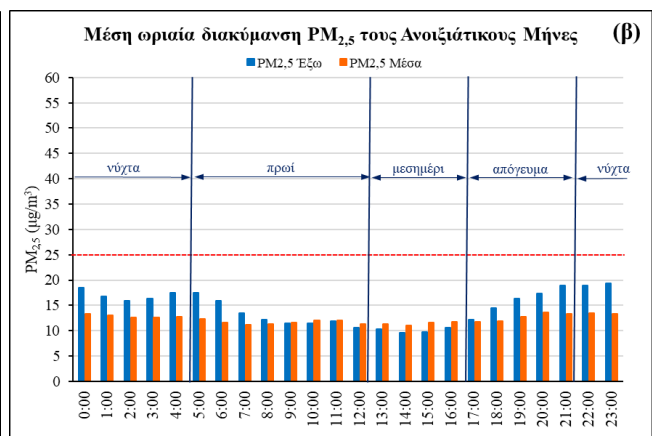
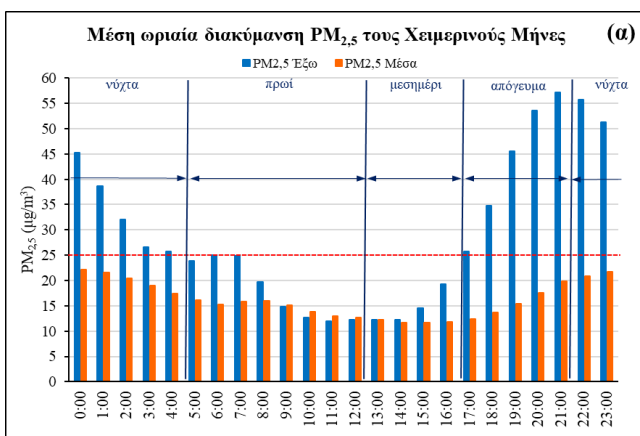
Σχήμα 6.4 (α) Ο ημερήσιος μέσος όρος PM_{2,5} μέσα και έξω κατά τους χειμερινούς μήνες· (β) ο ημερήσιος μέσος όρος PM_{2,5} μέσα και έξω κατά τους ανοιξιάτικους μήνες· (γ) ο ημερήσιος μέσος όρος PM_{2,5} μέσα και έξω κατά τους θερινούς μήνες· (δ) ο ημερήσιος μέσος όρος PM_{2,5} μέσα και έξω κατά τους φθινοπωρινούς μήνες.

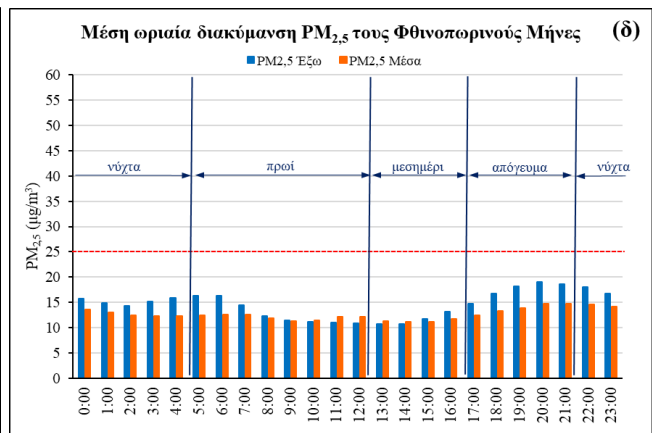
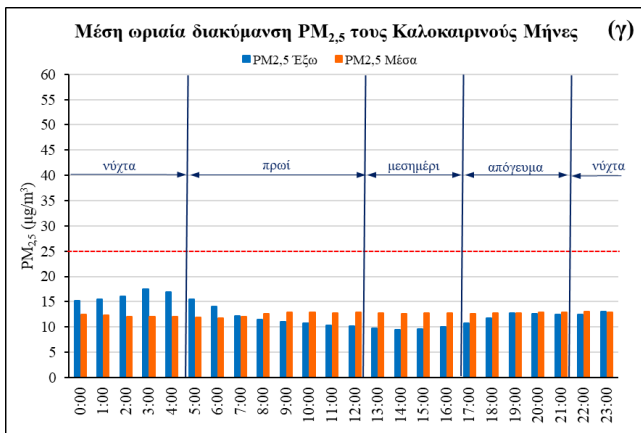
Η ανάλυση των ωριαίων δεδομένων στο Σχήμα 6.5 αποκαλύπτει διάφορες σημαντικές τάσεις και παρατηρήσεις. Οι εξωτερικές συγκεντρώσεις PM_{2,5} παρουσιάζουν σημαντικές ωριαίες διακυμάνσεις, με κορυφαία επίπεδα κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες. Λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματικές συνθήκες της Αττικής και την παράκτια τοποθεσία της Αθήνας, το φαινόμενο της θαλάσσιας αύρας (sea breeze) είναι κοινό κατά τις απογευματινές ώρες. Αυτό το μετεωρολογικό συμβάν συνήθως περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός παράκτιου αέρα από το νότο και την ανατολή, μεταφέροντας αέριες μάζες προς τους πρόποδες των βουνών Υμηττός, Πάρνηθα και Αιγάλεω [118]. Κατά συνέπεια, οι ρύποι, συμπεριλαμβανομένων των σωματιδίων PM_{2,5}, που προέρχονται από τις γύρω περιοχές, μεταφέρονται προς το αστικό κέντρο. Αυτή η διαδικασία συμβάλλει στην αύξηση των συγκεντρώσεων PM_{2,5} κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες, επιμένοντας μέχρι τα χαράματα. Επιπλέον, τα υψηλά επίπεδα αντανακλούν την αυξημένη κυκλοφορία των οχημάτων μέχρι τις 21:00 και τις εκπομπές των τοπικών εστιατορίων (ξυλόφουρνοι), καθώς και άλλες ανθρωπογενείς πηγές που συμβάλλουν στη ρύπανση του αέρα στο αστικό περιβάλλον. Τα εσωτερικά επίπεδα PM_{2,5} ακολουθούν γενικά την εξωτερική τάση, υποδεικνύοντας μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δύο, αν και με ένα στενότερο εύρος διακύμανσης. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι εσωτερικές συγκεντρώσεις υπερβαίνουν τις εξωτερικές, πιθανώς λόγω της μείωσης των εξωτερικών συγκεντρώσεων και της επιρροής εσωτερικών πηγών όπως το μαγείρεμα, ο καθαρισμός και τα μοτίβα αερισμού. Συνολικά, οι εξωτερικές συγκεντρώσεις υπερβαίνουν το όριο της ΕΕ ορισμένες ώρες τη νύχτα, ενώ οι εσωτερικές δεν το υπερβαίνουν ποτέ.



Σχήμα 6.5 Ωριαίες μέσες συγκεντρώσεις PM_{2,5} μέσα και έξω και το όριο 24 ωρών που έχει τεθεί από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο

Τα Σχήμα 6.6α, β, γ και δ απεικονίζουν τις ωριαίες μέσες συγκεντρώσεις PM_{2,5} για κάθε εποχή: χειμώνα, άνοιξη, καλοκαίρι και φθινόπωρο, αντίστοιχα. Αξιοσημείωτα, ο χειμώνας παρουσιάζει τις πιο σημαντικές διακυμάνσεις, ιδιαίτερα στις εξωτερικές συγκεντρώσεις, υπογραμμίζοντας τη ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των χειμερινών συνθηκών, της υγρασίας και των αιωρούμενων σωματιδίων. Η ευρεία χρήση θερμαντήρων, τζακιών και ξυλόσομπων, ειδικά στα οικονομικά ευάλωτα νοικοκυριά ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της οικονομικής κρίσης της Ελλάδας, έχει επιδεινώσει αυτό το πρόβλημα. Αυτές οι πρακτικές συνεχίζουν να συμβάλλουν σημαντικά στη ρύπανση του αέρα στην Αθήνα, ιδιαίτερα κατά τις απογευματινές και νυχτερινές ώρες και κατά τους χειμερινούς μήνες όταν ο στάσιμος αέρας παγιδεύει τους ρύπους κοντά στο έδαφος [119]. Επιπλέον, επιχειρήσεις όπως εστιατόρια και αρτοποιεία, συχνά βασίζονται σε κάρβουνο ή ξυλόφουρνους, κατά την ίδια χρονική περίοδο και απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες PM_{2,5}. Μελέτες έχουν δείξει ότι η καύση ξύλου μπορεί να παράγει σωματίδια PM_{2,5} σε επίπεδα παρόμοια ή μεγαλύτερα από αυτά που παράγονται από την κυκλοφορία [120,121] και αυτές οι οποίες μπορούν να είναι εξίσου επιβλαβείς, επιδεινώνοντας τους κινδύνους για την αναπνευστική και καρδιαγγειακή υγεία.



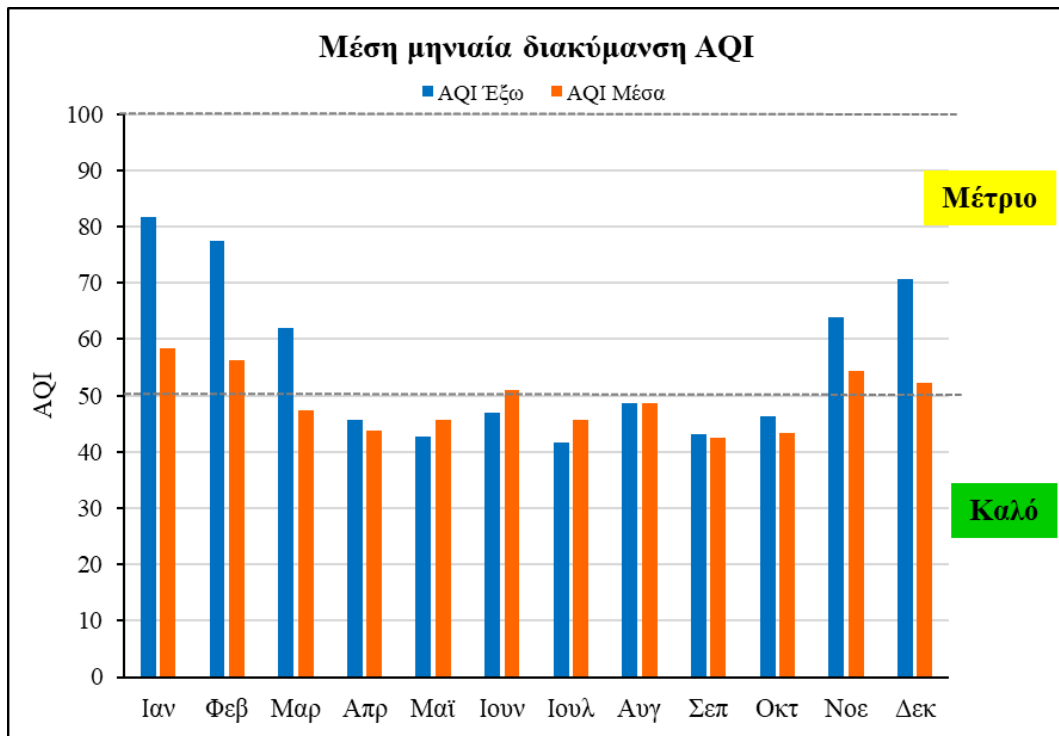


Σχήμα 6.6 (α) Ο ωριαίος μέσος όρος $PM_{2.5}$ μέσα και έξω κατά τους χειμερινούς μήνες· **(β)** ο ωριαίος μέσος όρος $PM_{2.5}$ μέσα και έξω κατά τους ανοιξιάτικους μήνες· **(γ)** ο ωριαίος μέσος όρος $PM_{2.5}$ μέσα και έξω κατά τους θερινούς μήνες· **(δ)** ο ωριαίος μέσος όρος $PM_{2.5}$ μέσα και έξω κατά τους φθινοπωρινούς μήνες.

6.1.2. Σύγκριση τιμών AQI

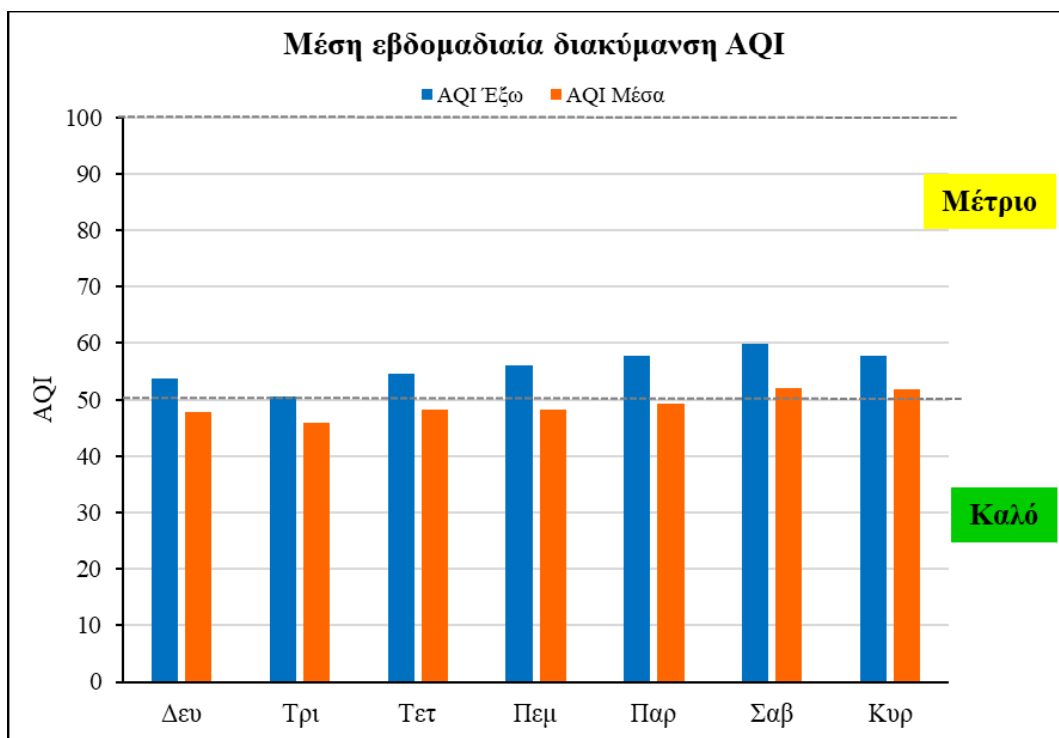
Παρακάτω παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των μέσων μηνιαίων, ημερήσιων και ωριαίων τιμών AQI για να παρέχουν μια ευρύτερη προοπτική. Σε συμφωνία με τις κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ για την ποιότητα του αέρα, ο AQI κατατάσσεται ως «Καλός» ($AQI < 50$) και «Μέτριος» ($AQI 51-100$). Από το Σχήμα 6.5, προκύπτει μια σαφής εποχιακή τάση, αντικατοπτρίζοντας τα μοτίβα που παρατηρούνται στις συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$. Τα επίπεδα AQI εντός της οικίας ακολουθούν γενικά την εξωτερική τάση, με υψηλότερες τιμές κατά τους χειμερινούς μήνες. Παρόλο που η διαφορά μεταξύ των επιπέδων εσωτερικού και εξωτερικού AQI είναι λιγότερο έντονη από αυτή των συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$ στο Σχήμα 6.2, πιθανώς λόγω της στενότερης κλίμακας AQI, υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο εσωτερικός AQI υπερβαίνει τον εξωτερικό, ειδικά κατά περιόδους υψηλής εξωτερικής ρύπανσης ή ανεπαρκούς εσωτερικού αερισμού.

Ενώ οι περισσότεροι μήνες παραμένουν εντός του εύρους «Καλό», όλοι οι ψυχροί μήνες παρουσιάζουν επίπεδα AQI «Μέτριο», τόσο έξω όσο και μέσα. Ωστόσο, ο εσωτερικός AQI δεν υπερβαίνει ποτέ το 60, σε αντίθεση με την κορυφή του εξωτερικού AQI που υπερβαίνει το 80 τον Ιανουάριο. Αυτό υποδηλώνει ότι το εσωτερικό περιβάλλον του διαμερίσματος προσφέρει ένα βαθμό προστασίας από την εξωτερική ατμοσφαιρική ρύπανση. Για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα, η υιοθέτηση ενός εξελιγμένου συστήματος αερισμού ικανό να διακρίνει περιόδους κατά τις οποίες η εξωτερική ποιότητα του αέρα υπερβαίνει τα εσωτερικά επίπεδα θα μπορούσε να είναι επωφελής. Ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να βελτιώσει τη συνολική ποιότητα του εσωτερικού αέρα προσαρμόζοντας στρατηγικά τους ρυθμούς αερισμού με βάση τα δεδομένα πραγματικού χρόνου για την ποιότητα του αέρα.



Σχήμα 6.7 Ο μηνιαίος μέσος όρος του AQI για PM_{2,5} μέσα και έξω και τα όρια της κλίμακας "Καλό" και "Μέτριο".

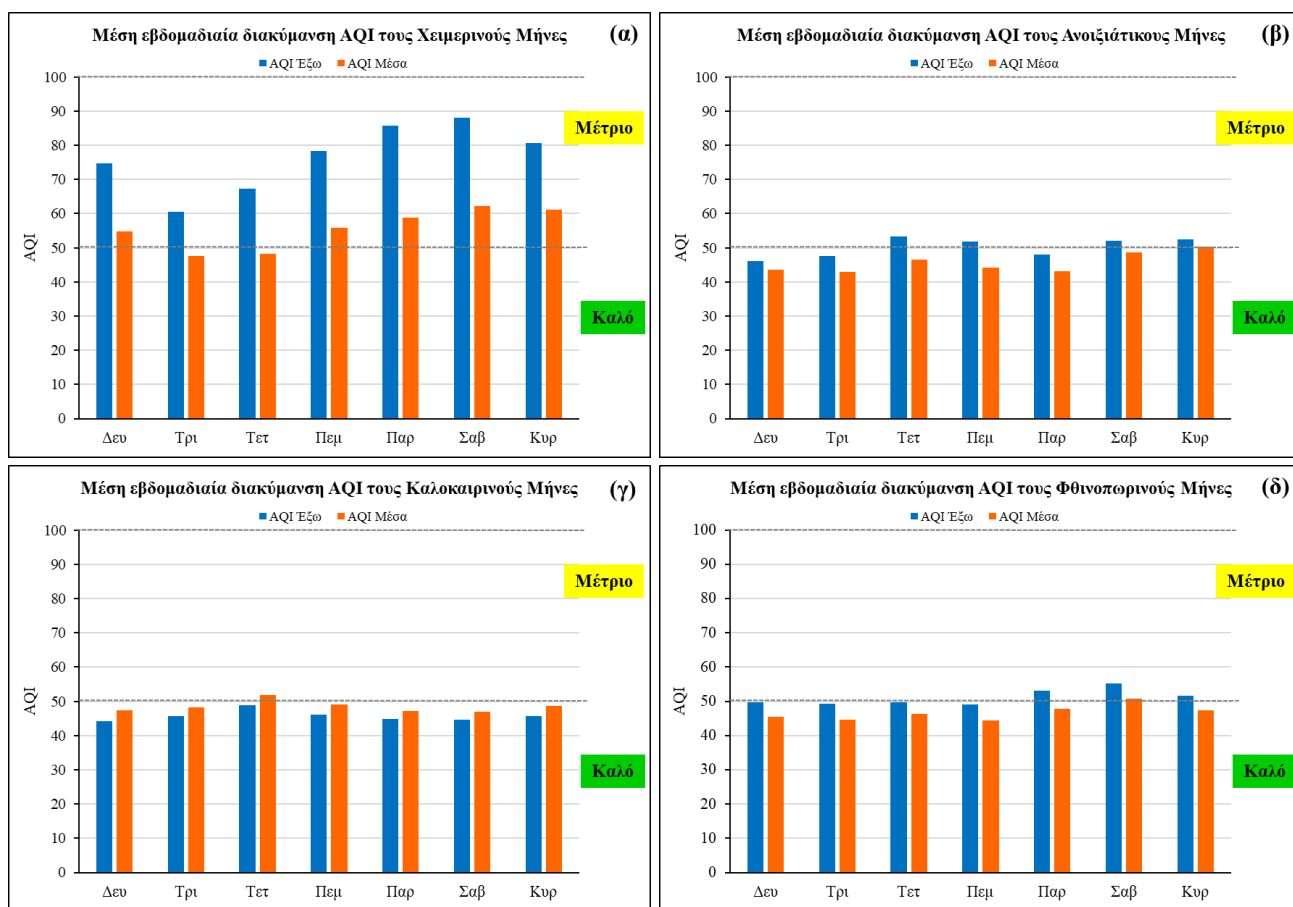
Το Σχήμα 6.8 αποκαλύπτει μια αξιοσημείωτη έλλειψη σημαντικής διακύμανσης από μέρα σε μέρα στον AQI κατά τις καθημερινές, με μια μικρή αύξηση που εμφανίζεται μόνο τα Σαββατοκύριακα. Ενώ ο εξωτερικός AQI παραμένει συνεχώς εντός του εύρους «Μέτριο», ο εσωτερικός AQI μεταβαίνει από «Καλό» σε «Μέτριο» αποκλειστικά τα Σαββατοκύριακα. Αυτό το μοτίβο συσχετίζεται άμεσα με τον αυξημένο χρόνο εντός της κατοικίας και υπογραμμίζει την ανάγκη για βελτιωμένο αερισμό.



Σχήμα 6.8 Ο ημερήσιος μέσος όρος του AQI για PM_{2,5} μέσα και έξω και τα όρια της κλίμακας "Καλό" και "Μέτριο".

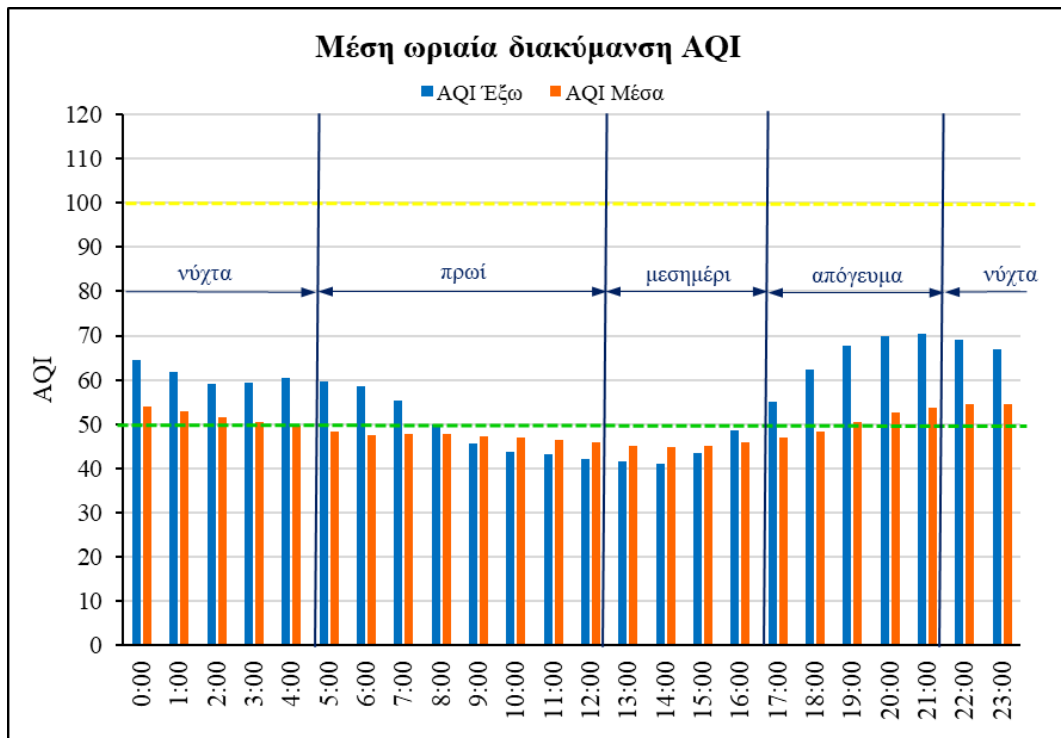
Τα Σχήμα 6.9α, β, γ και δ παρουσιάζουν τον μέσο ημερήσιο AQI για τον χειμώνα, την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, αντίστοιχα. Όλες οι μέρες στο εύρος «Μέτριο» κατά τους χειμερινούς μήνες (Σχήμα 6.9α) είναι ανησυχητικό, καθώς υποδηλώνει παρατεταμένη έκθεση σε ατμοσφαιρική ποιότητα που ενδεχομένως επηρεάζει την υγεία. Αντίθετα, οι υπόλοιπες εποχές (Σχήμα 6.9β, γ και δ) παρουσιάζουν ελάχιστες υπερβάσεις του κατώτατου ορίου «Καλό».

Παρόμοια με τις συγκεντρώσεις PM_{2,5}, το εσωτερικό AQI υπερβαίνει τα εξωτερικά επίπεδα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Σχήμα 6.9γ), πιθανώς λόγω αυξημένου αερισμού και αλλαγών στη συμπεριφορά των κατοίκων που σχετίζονται με τη θερμοκρασία. Αυτό υπογραμμίζει τη ευαισθησία της ποιότητας του αέρα ακόμη και στις μικρές αλλαγές στις συνθήκες και ενισχύει την ανάγκη για περαιτέρω ανάλυση χρησιμοποιώντας ωριαία διάγραμμα μέσου AQI.



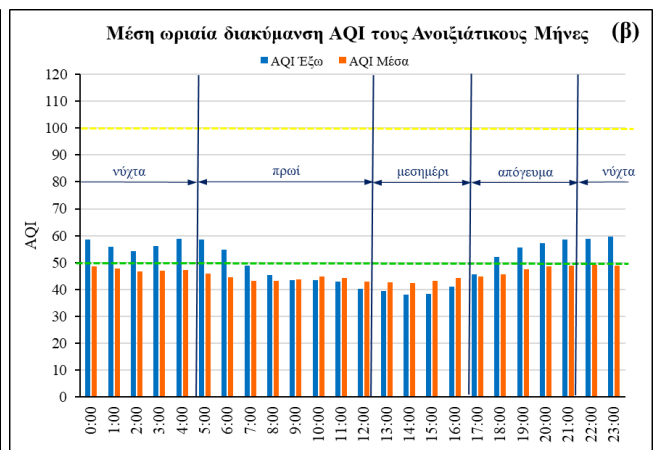
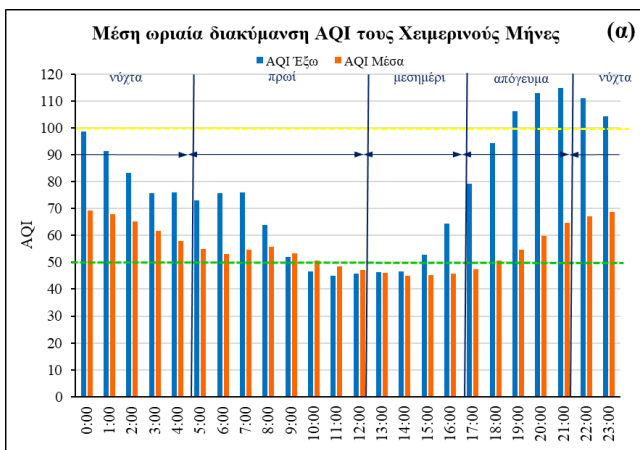
Σχήμα 6.9 (α) Ο ημερήσιος μέσος όρος AQI για PM_{2,5} μέσα και έξω κατά τους χειμερινούς μήνες· (β) ο ημερήσιος μέσος όρος AQI για PM_{2,5} μέσα και έξω κατά τους ανοιξιότικους μήνες· (γ) ο ημερήσιος μέσος όρος AQI για PM_{2,5} μέσα και έξω κατά τους θερινούς μήνες· (δ) ο ημερήσιος μέσος όρος AQI για PM_{2,5} μέσα και έξω κατά τους φθινοπωρινούς μήνες.

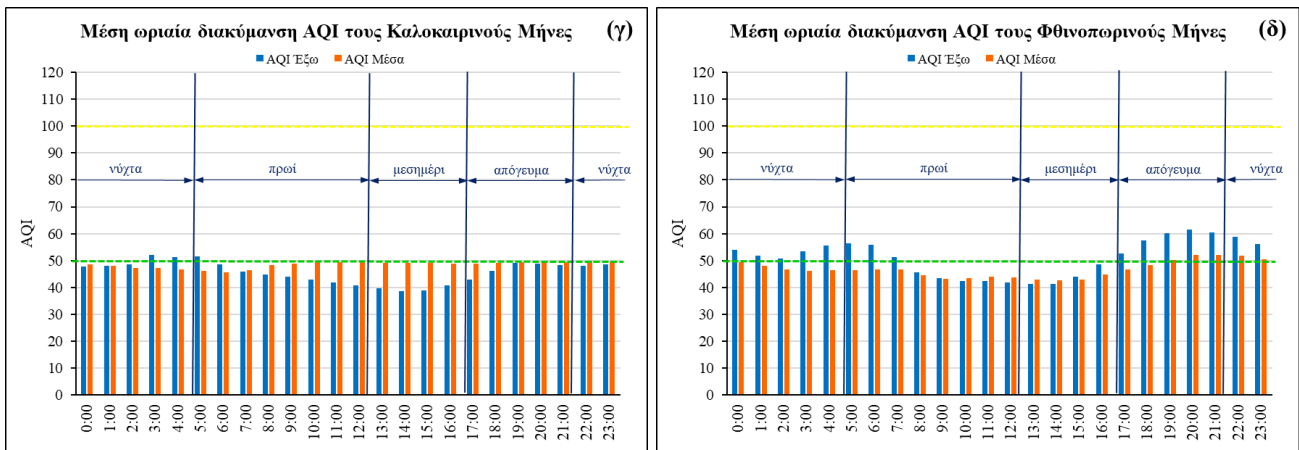
Το Σχήμα 6.10 απεικονίζει ένα σαφές μοτίβο στις τιμές AQI τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά, με υψηλότερα επίπεδα κατά τη διάρκεια της νύχτας και χαμηλότερα επίπεδα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ενώ η πλειοψηφία των νυχτερινών μετρήσεων AQI εμπίπτει στο εύρος «Καλό», είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτές οι τιμές συχνά πλησιάζουν το όριο για την κατηγορία «Μέτριο». Αυτό υποδηλώνει ότι ακόμη και κατά τις νυχτερινές ώρες, η ποιότητα του αέρα μπορεί να είναι οριακά αποδεκτή, ειδικά σε αστικά περιβάλλοντα.



Σχήμα 6.10 Ο ωριαίος μέσος όρος του AQI για PM_{2.5} μέσα και έξω και τα όρια της κλίμακας "Καλό" και "Μέτριο".

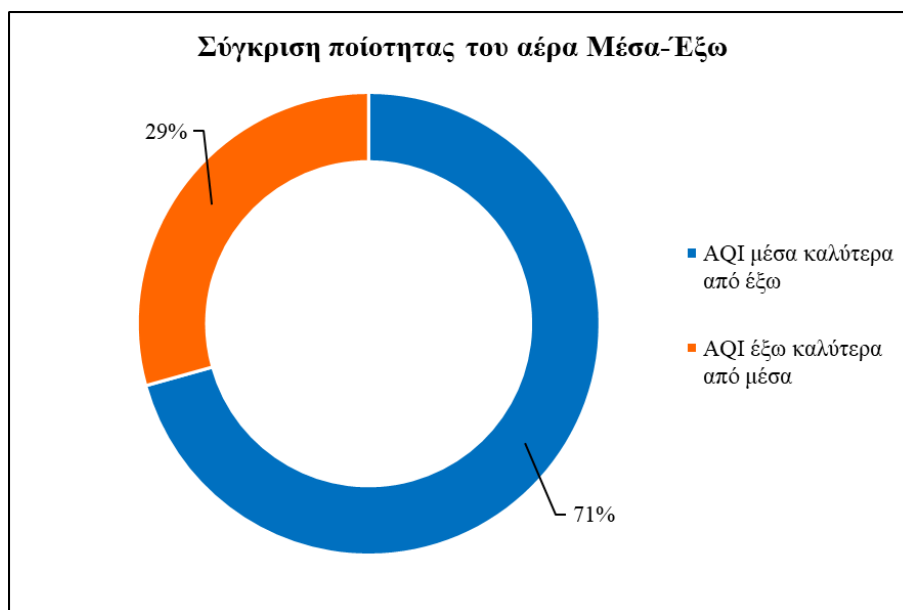
Παρόμοια με την προηγούμενη ανάλυση, η μέση ωριαία AQI για κάθε εποχή παρουσιάζεται στα Σχήμα 6.11α, β, γ και δ για τον χειμώνα, την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, αντίστοιχα. Η συνολική εικόνα είναι ότι κατά ορισμένες πρωινές ώρες και πολλές απογευματινές ώρες, η εξωτερική ποιότητα του αέρα είναι ελαφρώς καλύτερη. Σημαντικά, οι κάτοικοι του συγκεκριμένου σπιτιού είναι συνήθως απόντες από το σπίτι μεταξύ 09:00 και 18:00 λόγω εργασίας, πράγμα που σημαίνει ότι τα παράθυρα είναι κλειστά ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες.





Σχήμα 6.11 (α) Ο ωριαίος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} μέσα και έξω κατά τους χειμερινούς μήνες· (β) ο ωριαίος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} μέσα και έξω κατά τους ανοιξιάτικους μήνες· (γ) ο ωριαίος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} μέσα και έξω κατά τους θερινούς μήνες· (δ) ο ωριαίος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} μέσα και έξω κατά τους φθινοπωρινούς μήνες.

Τέλος, το Σχήμα 6.12 απεικονίζει την επικράτηση της ανώτερης ποιότητας εσωτερικού αέρα κατά την διετή περίοδο μελέτης, αποκαλύπτοντας ότι το 71% των μετρήσεων κατέγραψε υψηλότερες συγκεντρώσεις εξωτερικού PM_{2.5} σε σύγκριση με τα εσωτερικά επίπεδα. Ωστόσο, το 29% των μετρήσεων υπέδειξε καλύτερη ποιότητα εξωτερικού αέρα. Για 30 ημέρες στην όλη περίοδο, η κατηγορία εξωτερικού AQI ήταν «Καλή», ενώ η κατηγορία εσωτερικού AQI ήταν «Μέτρια», αντιστοιχώντας μόνο στο 4,3%.



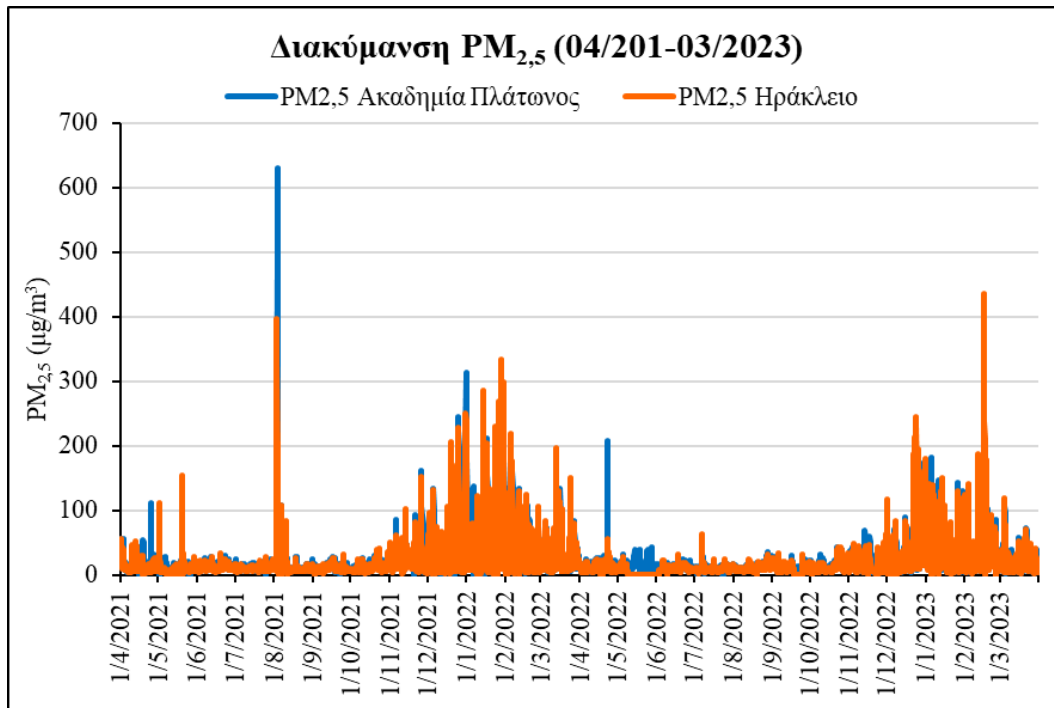
Σχήμα 6.12 Σύγκριση ποιότητας αέρα εσωτερικού και εξωτερικού χώρου

6.2. Ακαδημία Πλάτωνος – Ηράκλειο

6.2.1. Σύγκριση συγκεντρώσεων PM_{2.5}

Το Σχήμα 6.13 παρουσιάζει τις χρονικές μεταβολές των ωριαίων συγκεντρώσεων PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και το Ηράκλειο καθ' όλη την διετία μετρήσεων. Όμοια με το Σχήμα 6.1 η σημαντική αύξηση των επιπέδων PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος μεταξύ 3 και 4 Αυγούστου 2021, πιθανώς οφείλεται σε πυρκαγιές στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής [117]. Από ότι φαίνεται επηρεάστηκε και το Ηράκλειο αλλά όχι όσο το κέντρο της Αθήνας. Επίσης, στο Ηράκλειο παρατηρήθηκε άλλη μια σημαντική αύξηση των επιπέδων PM_{2.5} στις 16 Φεβρουαρίου του 2023 και πιθανώς οφείλεται σε φωτιά εστιατορίου σε γειτονική περιοχή [122]. Οι άνεμοι εκείνες τις ώρες διευκόλυναν την μεταφορά καπνού και σωματιδίων από την Νέα Φιλαδέλφεια στο

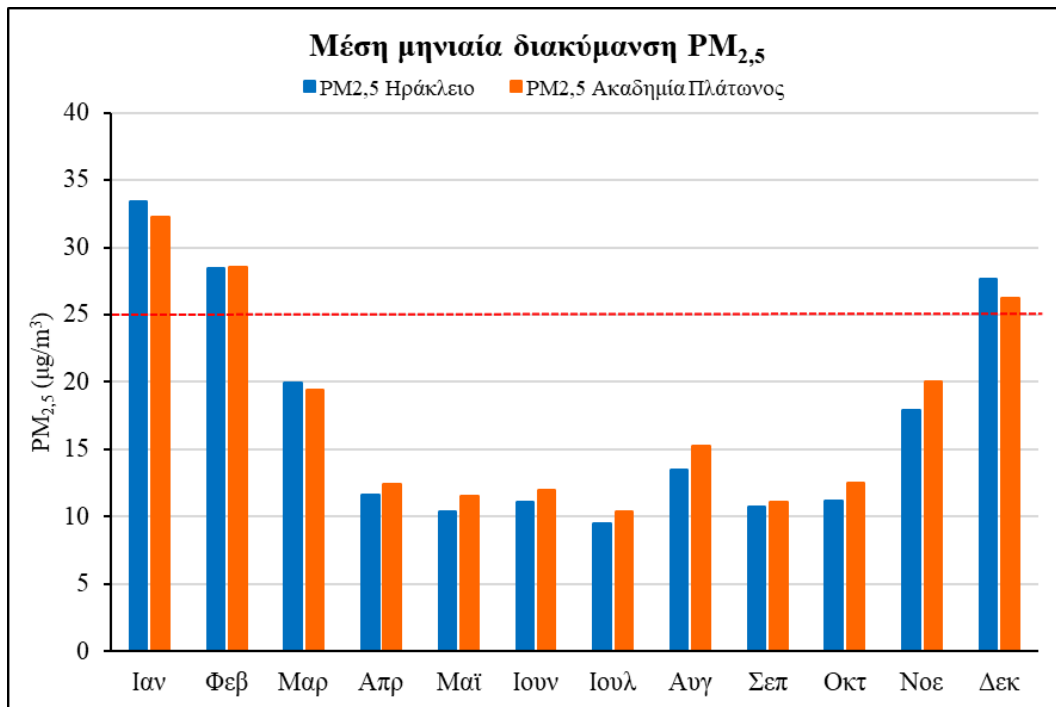
Ηράκλειο, με αποτέλεσμα τα επίπεδα $PM_{2.5}$ να ξεπεράσουν τα $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, υψηλότερα από τις ετήσιες μέσες κατευθυντήριες τιμές. Η αρχική ανάλυση των δεδομένων δείχνει ότι οι συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ στο Ηράκλειο και την Ακαδημία Πλάτωνος είναι παρόμοια. Επιπρόσθετη ανάλυση είναι απαραίτητη για τη διερεύνηση των εποχιακών διακυμάνσεων και άλλων παραγόντων που μπορεί να διαφοροποιούν την ποιότητα του αέρα στις δύο περιοχές.



Σχήμα 6.13 Συνολική διακύμανση $PM_{2.5}$ στην Ακαδημία Πλάτωνος και το Ηράκλειο για όλη την εξεταζόμενη χρονοσειρά

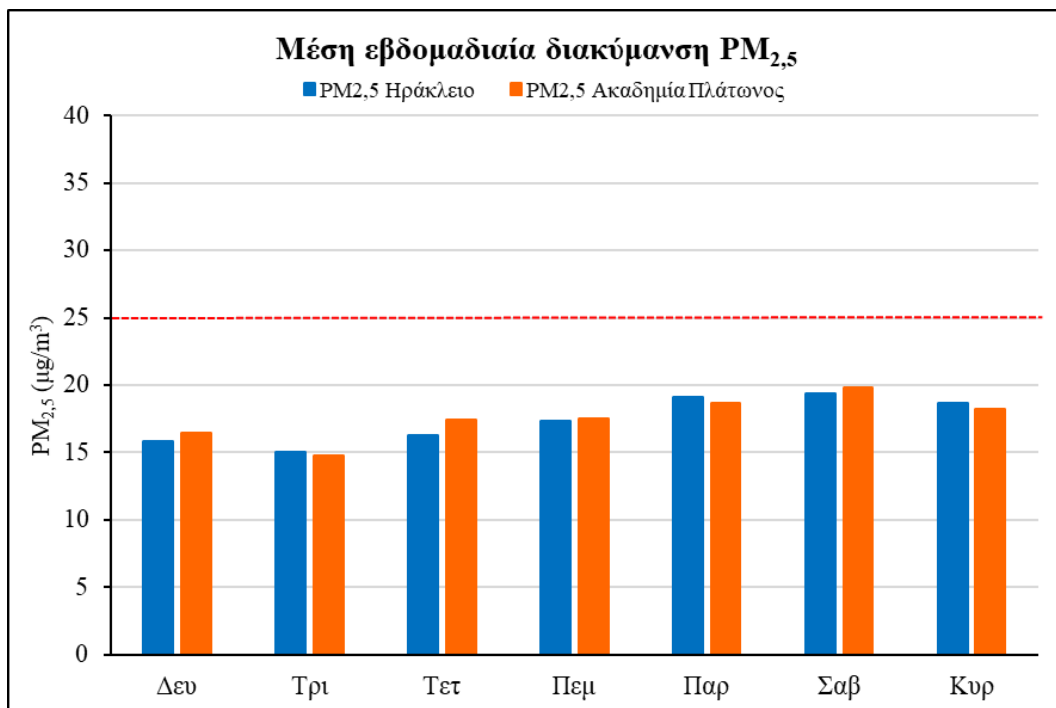
Στο Σχήμα 6.14 είναι εμφανής η εποχικότητα στις συγκεντρώσεις των $PM_{2.5}$ και στις δύο περιοχές. Τα υψηλότερα επίπεδα καταγράφονται κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ τα χαμηλότερα κατά τους καλοκαιρινούς. Αυτή η εποχικότητα μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους παράγοντες που έχουν ήδη αναφερθεί παραπάνω. Αν και οι δύο περιοχές παρουσιάζουν παρόμοιο γενικό μοτίβο, υπάρχουν και κάποιες διαφορές στις συγκεντρώσεις των $PM_{2.5}$. Για παράδειγμα, το Ηράκλειο φαίνεται να έχει ελαφρώς υψηλότερες συγκεντρώσεις κατά τους χειμερινούς μήνες σε σύγκριση με την Ακαδημία Πλάτωνος, κάτι που τονίζει την συσχέτιση της θερμοκρασία και της υγρασίας με τα αιωρούμενα σωματίδια. Το Ηράκλειο παρόλο που είναι περιοχή με περισσότερη βλάστηση από την Ακαδημία Πλάτωνος έχει υψηλότερο μέσο ώρα $PM_{2.5}$ τους χειμερινούς μήνες εξαιτίας των χαμηλότερων θερμοκρασιών και υψηλής υγρασίας στην περιοχή. Οι χαμηλές θερμοκρασίες εγκλωβίζουν την ρύπανση κοντά στην επιφάνεια καθώς προκαλούν στασιμότητα του αέρα, δηλαδή περιορισμένη κίνηση των αέριων μαζών. Η υψηλή υγρασία ευνοεί χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στον σχηματισμό αιωρούμενων σωματιδίων και αλλάζει το μέγεθος, τη σύνθεση και το σχήμα των υπαρχόντων. Αντίθετα τους υπόλοιπους μήνες του χρόνου η Ακαδημία Πλάτωνος έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση $PM_{2.5}$. Αυτό υποδεικνύει ότι το Ηράκλειο προστατεύεται από τα περισσότερα δέντρα, χαρακτηριστικό των Βορείων Προαστίων, και την γεωγραφική του θέση, σε αντίθεση με την Ακαδημία Πλάτωνος που βρίσκεται σε χαμηλότερο υψόμετρο και στο κέντρο του αστικού ιστού.

Και οι δύο περιοχές υπερβαίνουν κατά τους χειμερινούς μήνες τα ευρωπαϊκά όρια για τα $PM_{2.5}$, ιδιαίτερα Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο. Αυτό δείχνει ότι η ποιότητα του αέρα στην Αττική χειροτερεύει σημαντικά το χειμώνα, με πιθανές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων.



Σχήμα 6.14 Μηνιαίες μέσες συγκεντρώσεις PM_{2,5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο και το όριο 24 ωρών που έχει τεθεί από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο

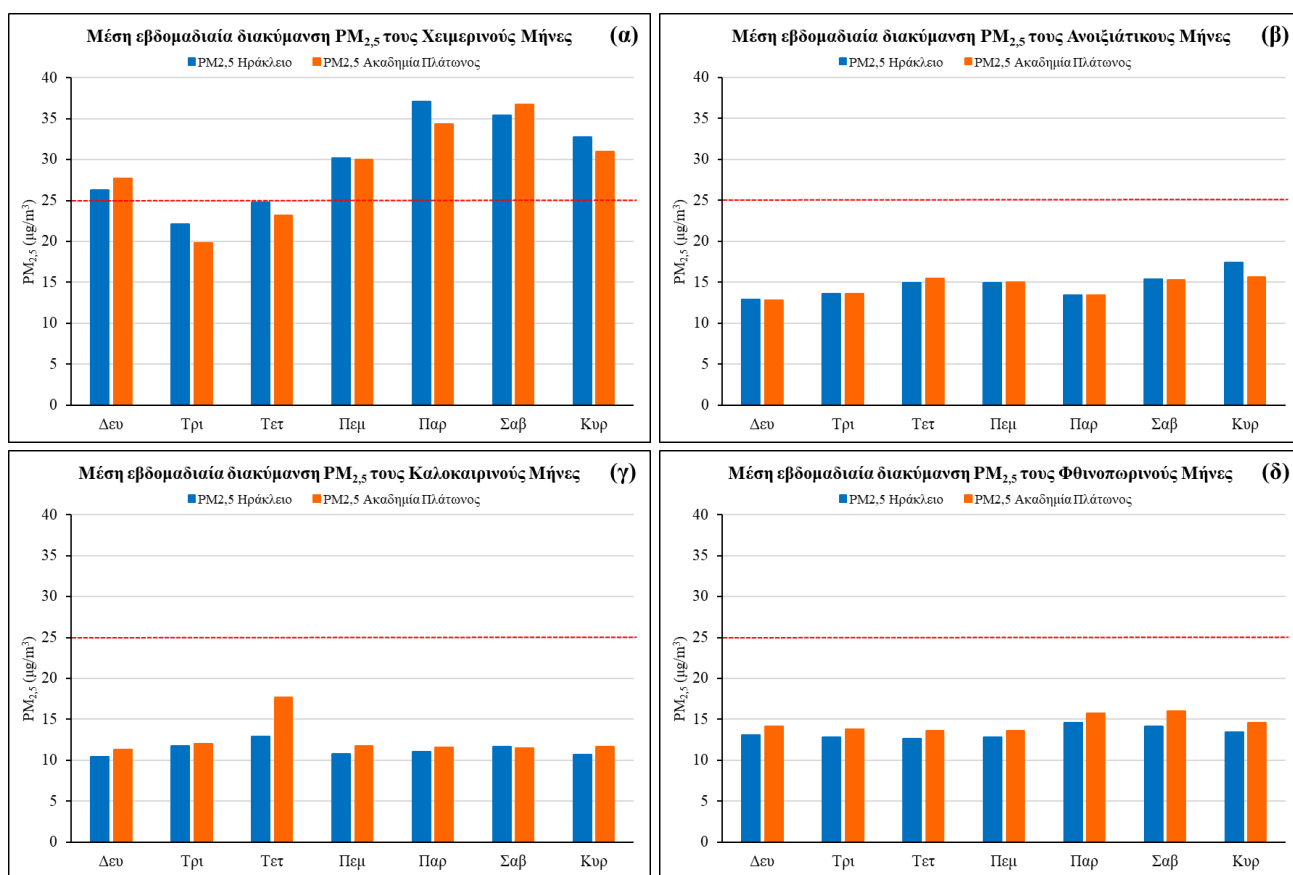
Οι συγκεντρώσεις των PM_{2,5} στις δύο περιοχές παρουσιάζουν παρόμοια ημερήσια πρότυπα (Σχήμα 6.15), με μικρές διακυμάνσεις. Αυτό υποδηλώνει ότι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα στις δύο περιοχές είναι παρόμοιοι. Στις περισσότερες μέρες της εβδομάδας, η Ακαδημία Πλάτωνος φαίνεται να παρουσιάζει ελαφρώς υψηλότερες συγκεντρώσεις PM_{2,5} σε σύγκριση με το Ηράκλειο. Το κέντρο της Αθήνας εκτίθεται σε υψηλότερα επίπεδα κυκλοφορίας και άλλων ανθρωπογενών πηγών ρύπανσης, γεγονός που μπορεί να εξηγεί τις ελαφρώς υψηλότερες συγκεντρώσεις. Το όριο της ΕΕ δεν υπερβαίνεται καμία μέρα της εβδομάδας, κάτι που ομοίως με το υποκεφάλαιο 6.1.1 διαψεύδεται στο Σχήμα 6.16α.



Σχήμα 6.15 Ημερήσιες μέσες συγκεντρώσεις PM_{2,5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο και το όριο 24 ωρών που έχει τεθεί από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο

Τα Σχήμα 6.16α, β, γ και δ απεικονίζουν τον ημερήσιο μέσο όρο $PM_{2,5}$ για τον χειμώνα, την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο αντίστοιχα. Τα μοτίβα συγκέντρωσης $PM_{2,5}$ φαίνεται τα ταυτίζονται με αυτά του Σχήμα 6.14 και η αιτιολογία είναι η ίδια. Κάτι που ισχύει και για την αυξημένη συγκέντρωση την Τετάρτη στο Σχήμα 6.16γ που ομοίως με πριν οφείλεται σε δασικές πυρκαγιές στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Η εκτεταμένη ατμοσφαιρική ρύπανση από τις πυρκαγιές φαίνεται να μην επηρέασε το Ηράκλειο, πιθανόν λόγω της κατεύθυνσης του αέρα και της εκτεταμένης βλάστησης στην περιοχή.

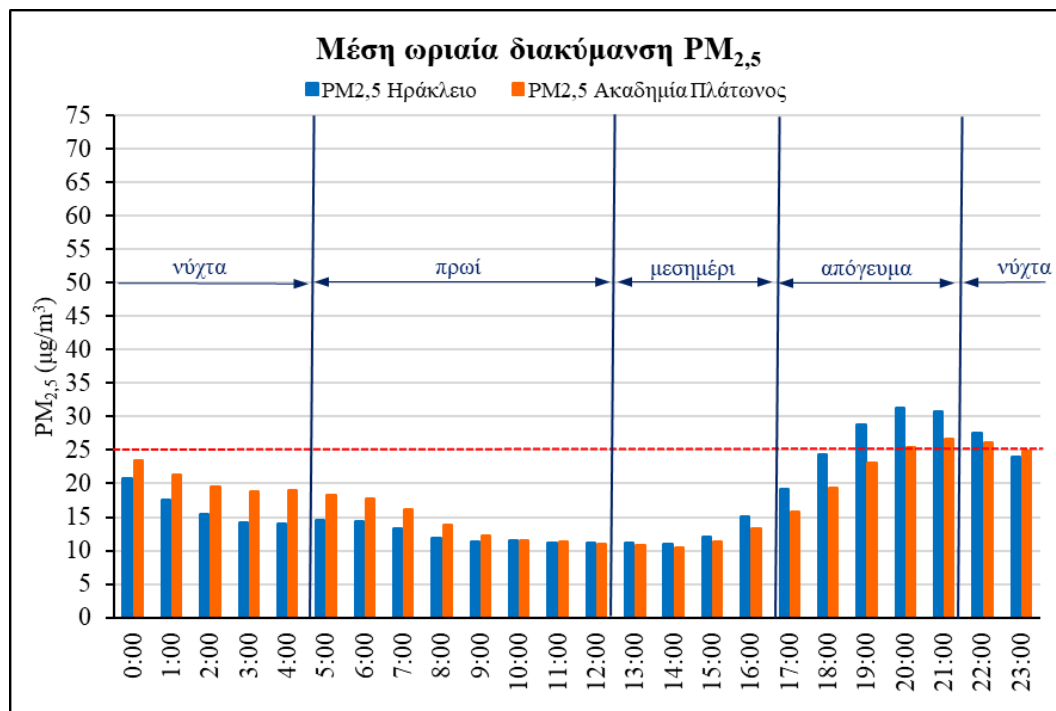
Οι υπερβάσεις του ημερήσιου μέσου όρου συγκέντρωσης $PM_{2,5}$ (ο οποίος είναι στα $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) γίνονται μόνο κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ όλο τον υπόλοιπο χρόνο, αντίστοιχα και στις δύο περιοχές, δεν παρουσιάζεται καμία τιμή υπέρβασης, σε καμία ημέρα της εβδομάδας. Οι περισσότερες υπερβάσεις γίνονται την Παρασκευή και το Σαββατοκύριακο, πιθανόν λόγω της αυξημένης κινητικότητας που παρουσιάζεται στις περιοχές αυτές. Τους υπόλοιπους μήνες του χρόνου, οι ημερήσιες μέσες τιμές συγκέντρωσης $PM_{2,5}$ κινούνται σε χαμηλά επίπεδα και παρατηρείται παρόμοιο μοτίβο στην εβδομαδιαία διακύμανσή τους.



Σχήμα 6.16 (α) Ο ημερήσιος μέσος όρος $PM_{2,5}$ στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους χειμερινούς μήνες· (β) ο ημερήσιος μέσος όρος $PM_{2,5}$ στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους ανοιξιάτικους μήνες· (γ) ο ημερήσιος μέσος όρος $PM_{2,5}$ στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους θερινούς μήνες· (δ) ο ημερήσιος μέσος όρος $PM_{2,5}$ στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους φθινοπωρινούς μήνες.

Όσον αφορά την ωριαία διακύμανση των $PM_{2,5}$ (Σχήμα 6.17) παρατηρείται ότι οι περισσότερες υπερβάσεις στο Ηράκλειο γίνονται από τις 19:00 έως τις 22:00, ενώ στην Ακαδημία Πλάτωνος μόνο στις 21:00, στις 22:00 και στις 20:00 είναι οριακά στην γραμμή. Να σημειωθεί ότι 23:00 με 00:00 το βράδυ οι ωριαίες μέσες συγκεντρώσεις δεν υπερβαίνουν το ευρωπαϊκό όριο, βρίσκονται όμως πολύ κοντά σε αυτό. Οι διαφορές μεταξύ των περιοχών είναι απειροελάχιστη από τις 09:00 μέχρι τις 18:00, καθώς το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού βρίσκεται στην εργασία του, οπότε η κινητικότητα στους δρόμους και στις γύρω περιοχές δεν είναι τόσο έντονη. Από τις 19:00 έως και τις 22:00 η κινητικότητα του πληθυσμού είναι εντονότερη και ο αριθμός των Ι.Χ. στους δρόμους αυξάνεται. Τις βραδινές ώρες, και ειδικά 23:00 με 01:00 οι μέσες τιμές συγκέντρωσης είναι κάπως αυξημένες, χωρίς όμως να υπερβαίνουν το όριο.

Η έντονη διαφορά των $PM_{2,5}$ στις δύο περιοχές με το Ηράκλειο να υπερτερεί από τις 16:00 μέχρι τις 22:00 και την Ακαδημία Πλάτωνος να υπερτερεί από τις 23:00 μέχρι τις 08:00, πιθανώς οφείλεται στη διαφορετική γεωγραφική θέση περιοχών, καθώς οι επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες (άνεμος, θερμοκρασία, υγρασία) επηρεάζονται από την υψομετρική διαφορά και με τη σειρά τους επηρεάζουν τη διασπορά και την απόθεση των αιωρούμενων σωματιδίων.

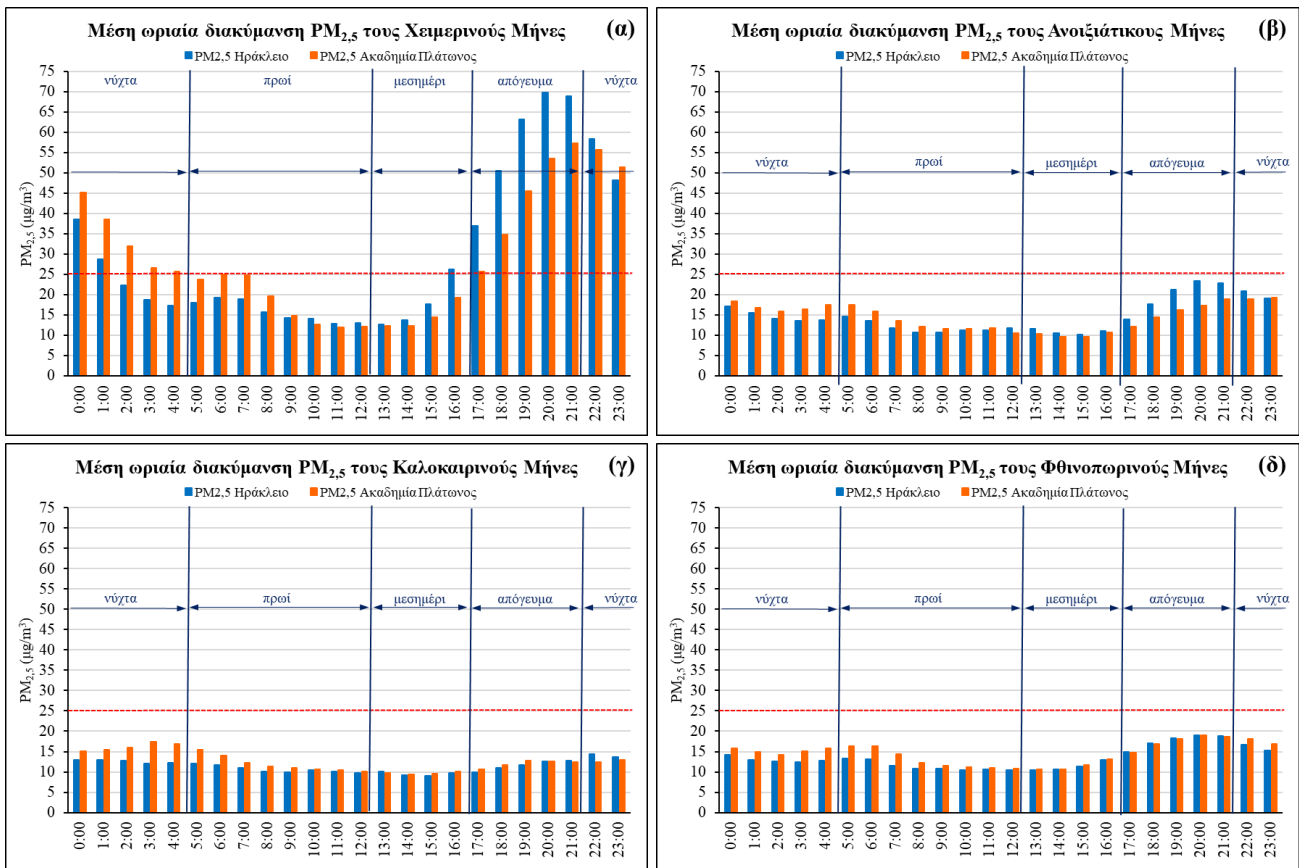


Σχήμα 6.17 Ωριαίες μέσες συγκεντρώσεις $PM_{2,5}$ στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο και το όριο 24 ωρών που έχει τεθεί από το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο

Τα Σχήμα 6.18α, β, γ και δ απεικονίζουν τον ωριαίο μέσο όρο $PM_{2,5}$ κατά τους χειμερινούς, ανοιξιάτικους, καλοκαιρινούς και φθινοπωρινούς μήνες, αντίστοιχα. Ομοίως με την μελέτη της μέσης συγκέντρωσης σε ημερήσια κλίμακα (Σχήμα 6.16), οι υπερβάσεις διακρίνονται μόνο τους χειμερινούς μήνες, ενώ όλο τον υπόλοιπο χρόνο δεν παρουσιάζεται καμία υπέρβαση του ορίου.

Ειδικότερα τους χειμερινούς μήνες (Σχήμα 6.18α), υπάρχει έντονη και συνεχόμενη υπέρβαση του ορίου, και στις δύο υπό μελέτη περιοχές. Στο Ηράκλειο από τις 16:00 έως και τις 01:00 και στην Ακαδημία Πλάτωνος από τις 17:00 έως και τις 07:00. Τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες, δηλαδή από τις 08:00 έως τις 15:00 οι τιμές είναι σχετικά χαμηλές και δεν παρατηρείται καμία υπέρβαση στην Ακαδημία Πλάτωνος. Οι έντονες διαφορές μεταξύ των δύο περιοχών ίσως οφείλονται στις αλλαγές του ανέμου, την πτώση της θερμοκρασίας και την αύξηση της υγρασίας στο Ηράκλειο, κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες που οδηγούν τον γενικό πληθυσμό να αναζητήσει τρόπους θέρμανσης νωρίτερα μέσα στη μέρα.

Όσον αφορά τους υπόλοιπους μήνες, η διακύμανση του ωριαίου μέσου όρου $PM_{2,5}$ ανά εποχή ακολουθεί περίπου το ίδιο μοτίβο. Σε γενικές γραμμές, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Σχήμα 6.18γ) οι μέσες τιμές κινούνται σε χαμηλά επίπεδα καθ' όλη την διάρκεια του 24ώρου. Την άνοιξη (Σχήμα 6.18β) και το φθινόπωρο (Σχήμα 6.18δ) παρατηρούνται λίγο πιο αυξημένες τιμές κατά τις απογευματινές/βραδινές ώρες χωρίς όμως να υπάρχουν υπερβάσεις του ορίου. Οι αυξημένες τιμές το απόγευμα και το βράδυ μπορεί να οφείλονται στην έντονη κινητικότητα του πληθυσμού εκείνες τις ώρες, στην χρήση συστημάτων θέρμανσης που μπορεί να επηρεάζουν τον ατμοσφαιρικό αέρα κατά τους χειμερινούς μήνες.

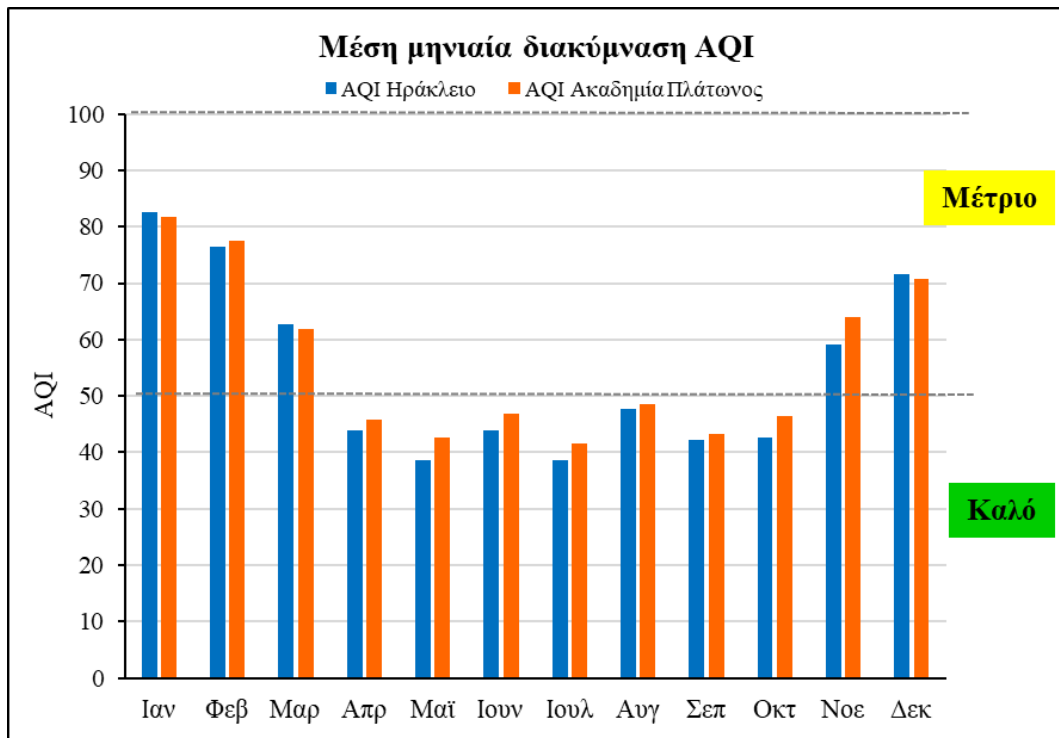


Σχήμα 6.18 (α) Ο ωριαίος μέσος όρος PM_{2,5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους χειμερινούς μήνες· **(β)** ο ωριαίος μέσος όρος PM_{2,5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους ανοιξιιάτικους μήνες· **(γ)** ο ωριαίος μέσος όρος PM_{2,5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους θερινούς μήνες· **(δ)** ο ωριαίος μέσος όρος PM_{2,5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους φθινοπωρινούς μήνες.

6.2.2. Σύγκριση τιμών AQI

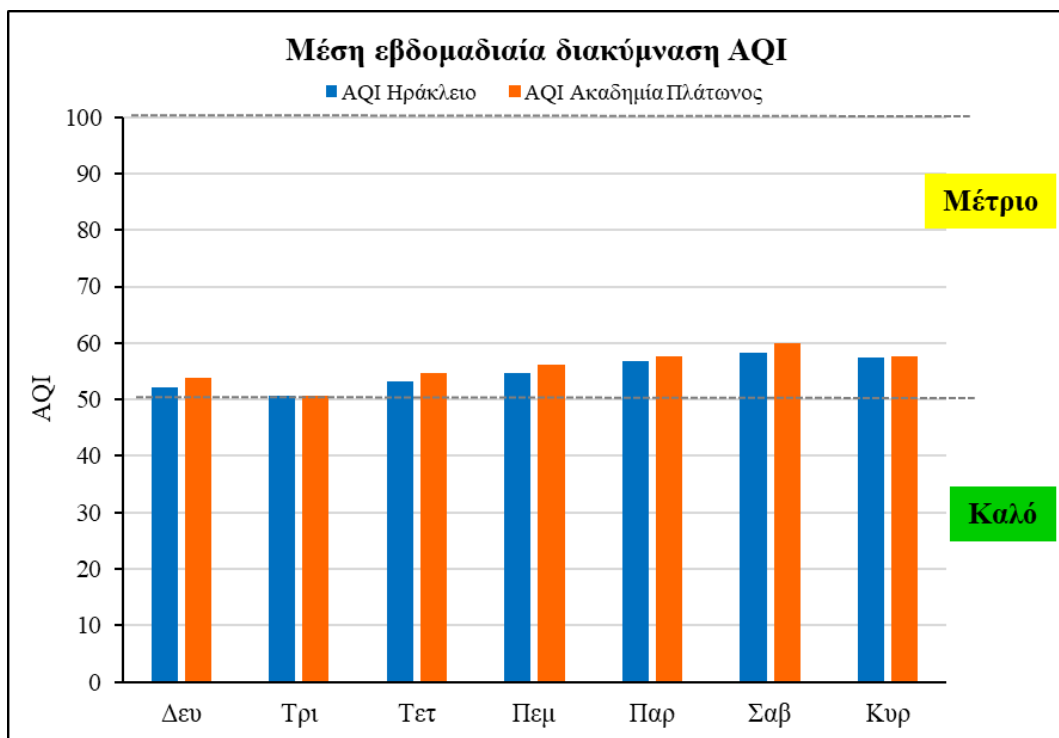
Από το Σχήμα 6.19, προκύπτει μια σαφής εποχιακή τάση, αντικατοπτρίζοντας τα μοτίβα που παρατηρούνται στις συγκεντρώσεις PM_{2,5}. Τα επίπεδα AQI στις δύο περιοχές εμφανίζουν παρόμοια τάση, με υψηλότερες τιμές κατά τους χειμερινούς μήνες. Η διαφορά μεταξύ των επιπέδων AQI είναι ίδια με αυτή των συγκεντρώσεων PM_{2,5} στο Σχήμα 6.14. Δεν επηρεάζονται από την στενότερη κλίμακα AQI.

Ενώ οι περισσότεροι μήνες παραμένουν εντός του εύρους «Καλό», όλοι οι ψυχροί μήνες και ο Μάρτιος παρουσιάζουν επίπεδα AQI «Μέτριο», τόσο στο Ηράκλειο όσο και στην Ακαδημία Πλάτωνος. Η μέγιστη τιμή AQI τον Ιανουάριο και ο ιδιαίτερα υψηλός AQI τον Φεβρουάριο και τον Δεκέμβριο, και για τις δύο περιοχές, δείχνουν ότι η ποιότητα του αέρα στην Αττική χειροτερεύει σημαντικά το χειμώνα, με πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.



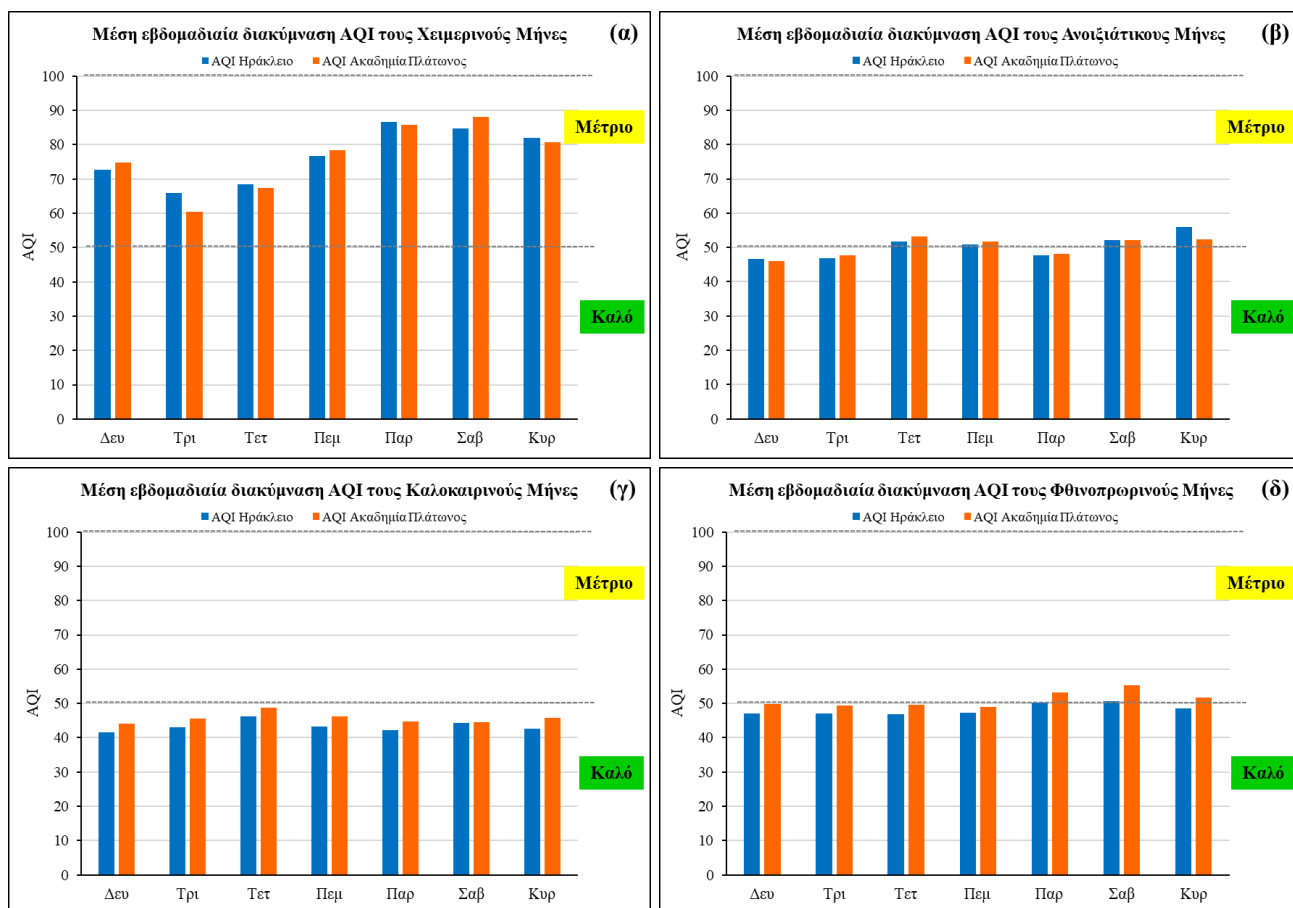
Σχήμα 6.19 Ο μηνιαίος μέσος όρος του AQI για PM_{2,5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο και τα όρια της κλίμακας "Καλό" και "Μέτριο".

Το Σχήμα 6.20 αποκαλύπτει μια αξιοσημείωτη έλλειψη σημαντικής διακύμανσης από μέρα σε μέρα στο AQI με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται το Σάββατο και την Τρίτη να είναι η μόνη μέρα που δεν έχει περάσει στο «Μέτριο», αν και είναι στο όριο.



Σχήμα 6.20 Ο ημερήσιος μέσος όρος του AQI για PM_{2,5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο και τα όρια της κλίμακας "Καλό" και "Μέτριο".

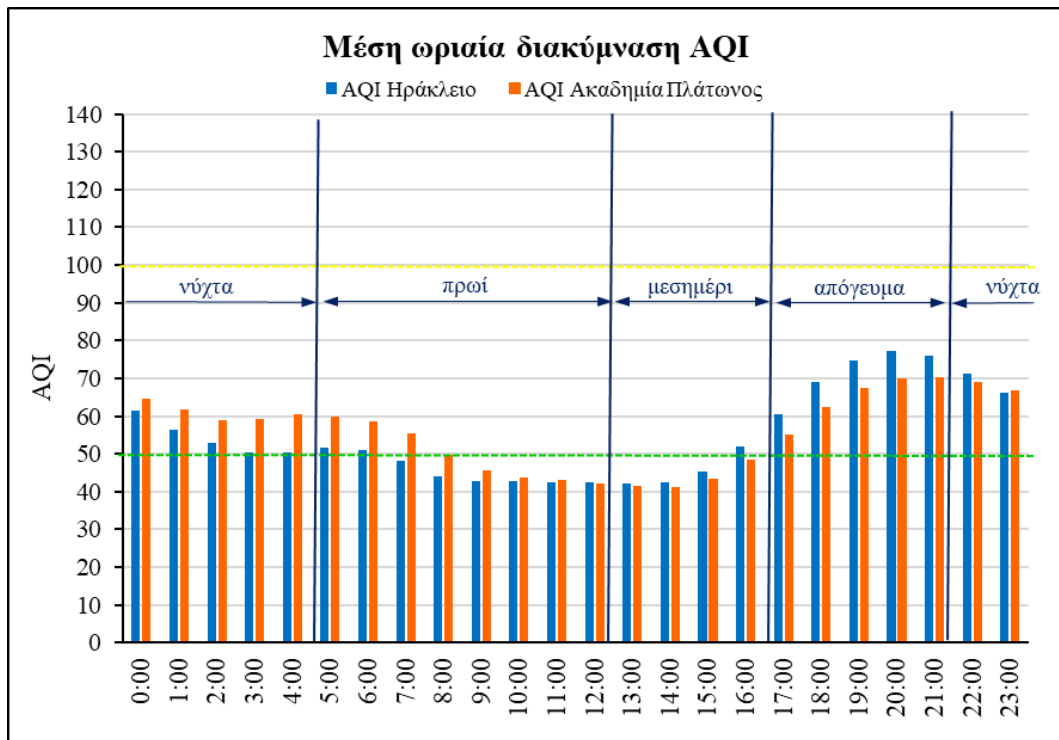
Τα Σχήμα 6.21α, β, γ και δ παρουσιάζουν τον μέσο ημερήσιο AQI για τον χειμώνα, την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, αντίστοιχα. Όλες οι μέρες στο εύρος «Μέτριο» κατά τους χειμερινούς μήνες (Σχήμα 6.21α) είναι ανησυχητικό, καθώς υποδηλώνει παρατεταμένη έκθεση σε ατμοσφαιρική ποιότητα που ενδεχομένως επηρεάζει την υγεία. Αντίθετα, οι υπόλοιπες εποχές (Σχήμα 6.21β, γ και δ) παρουσιάζουν ελάχιστες υπερβάσεις του κατώτατου ορίου «Καλό».



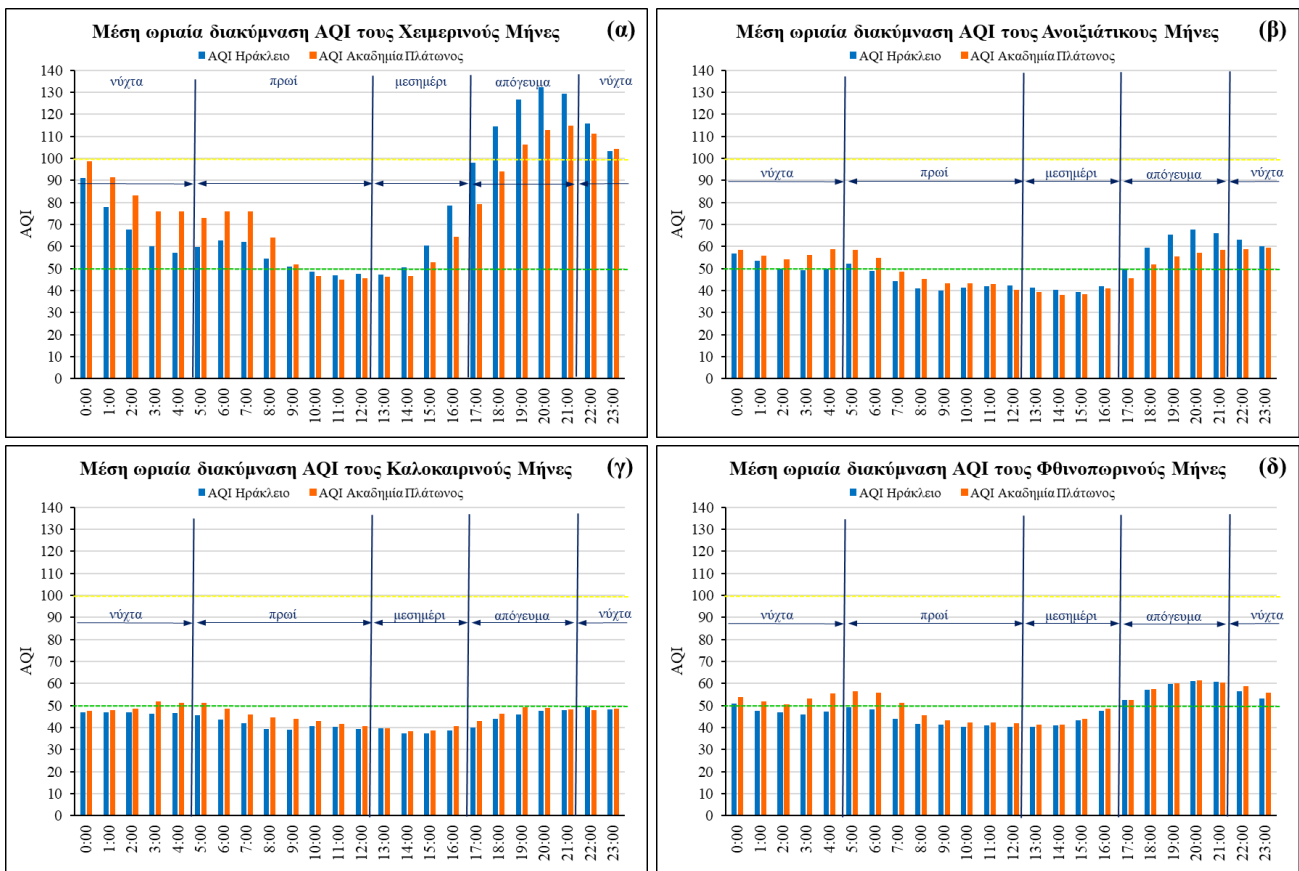
Σχήμα 6.21 (α) Ο ημερήσιος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους χειμερινούς μήνες· (β) ο ημερήσιος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους ανοιξιότικους μήνες· (γ) ο ημερήσιος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους θερινούς μήνες· (δ) ο ημερήσιος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους φθινοπωρινούς μήνες.

Το Σχήμα 6.22 απεικονίζει ένα σαφές μοτίβο στις τιμές AQI των δύο περιοχών, με υψηλότερα επίπεδα κατά τη διάρκεια της νύχτας και χαμηλότερα επίπεδα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ενώ η πλειοψηφία των νυχτερινών μετρήσεων AQI εμπίπτει στο εύρος «Καλό», είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτές οι τιμές συχνά πλησιάζουν το όριο για την κατηγορία «Μέτριο». Αυτό υποδηλώνει ότι ακόμη και κατά τις νυχτερινές ώρες, η ποιότητα του αέρα μπορεί να είναι οριακά αποδεκτή, ειδικά σε αστικά περιβάλλοντα. Το μικρότερο εύρος τιμών της κλίμακας του AQI φαίνεται να επηρεάζει τις διαφορές μεταξύ των δύο περιοχών, καθώς δεν είναι τόσο έντονες όσο μεταξύ των συγκεντρώσεων PM_{2.5} στα Σχήμα 6.17 και Σχήμα 6.18.

Παρόμοια με την προηγούμενη ανάλυση, η μέση ωριαία AQI για κάθε εποχή παρουσιάζεται στα Σχήμα 6.23α, β, γ και δ για τον χειμώνα, την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, αντίστοιχα. Η συνολική εικόνα είναι ότι κατά τις πρωινές και βραδινές ώρες η ποιότητα του αέρα στην Ακαδημία Πλάτωνος είναι χειρότερη, ενώ κατά τις απογευματινές και μερικές μεσημεριανές, κυρίως τον χειμώνα (Σχήμα 6.23α) και την άνοιξη (Σχήμα 6.23β) είναι χειρότερα στο Ηράκλειο.

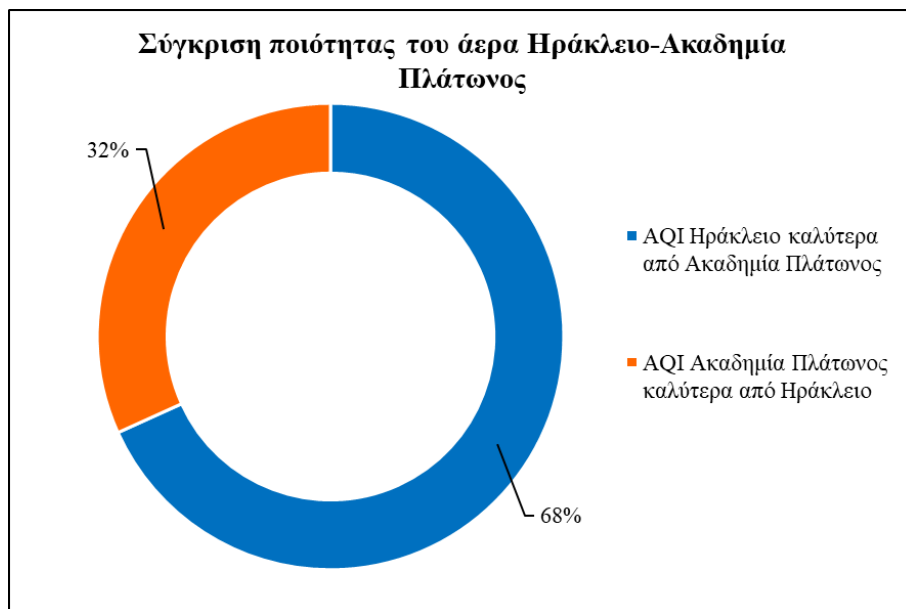


Σχήμα 6.22 Ο ωριαίος μέσος όρος του AQI για PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο και τα όρια της κλίμακας "Καλό" και "Μέτριο".



Σχήμα 6.23 (α) Ο ωριαίος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους χειμερινούς μήνες· (β) ο ωριαίος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους ανοιξιάτικους μήνες· (γ) ο ωριαίος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους θερινούς μήνες· (δ) ο ωριαίος μέσος όρος AQI για PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος και στο Ηράκλειο κατά τους φθινοπωρινούς μήνες.

Τέλος, το Σχήμα 6.24 απεικονίζει την επικράτηση της ανώτερης ποιότητας του αέρα στο Ηράκλειο κατά την διετή περίοδο μελέτης, αποκαλύπτοντας ότι το 68% των μετρήσεων κατέγραψε υψηλότερες συγκεντρώσεις PM_{2,5} στην Ακαδημία Πλάτωνος. Ωστόσο, το 32% των μετρήσεων υπέδειξε καλύτερη ποιότητα του αέρα στο Ηράκλειο, κάτι που πιθανώς αντικατοπτρίζει την μεγάλη διαφορά PM_{2,5} των περιοχών κατά τους χειμερινούς μήνες.



Σχήμα 6.24 Σύγκριση ποιότητας αέρα στην Ακαδημία Πλάτωνος και το Ηράκλειο

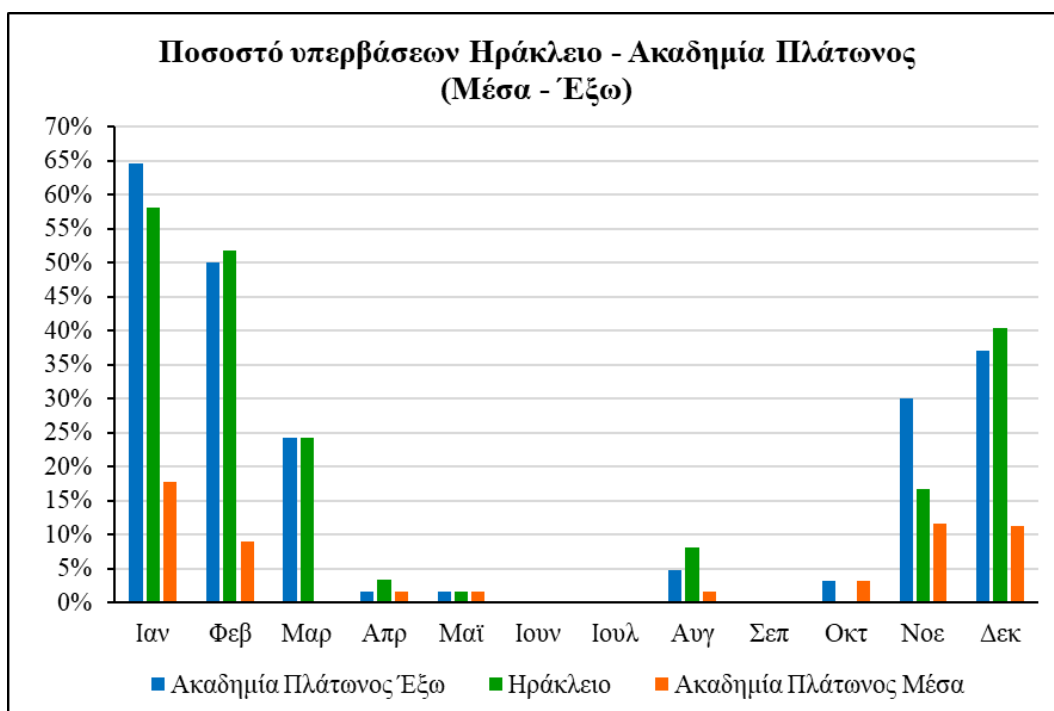
6.3. Υπερβάσεις συγκέντρωσης PM_{2,5}

Κατά τη διετή περίοδο μελέτης, το 18,1% των μετρήσεων στην Ακαδημία Πλάτωνος έξω, το 5,1% των μετρήσεων στην Ακαδημία Πλάτωνος μέσα και το 17,7% των μετρήσεων στο Ηράκλειο υπερέβαιναν το όριο των 25 μg/m³ για τα PM_{2,5} της ΕΕ. Το 4,7% από αυτές να είναι ταυτόχρονες υπερβάσεις μέσα και έξω, ενώ για την Ακαδημία Πλάτωνος και το Ηράκλειο το 15,4%. Ο Πίνακας 10 και το Σχήμα 6.25 απεικονίζουν το μηνιαίο ποσοστό των δεδομένων που υπερβαίνουν αυτό το όριο της ΕΕ.

Η λεπτομερής ανάλυση των ποσοστών μηνιαίας υπέρβασης αποκαλύπτει αρκετές βασικές τάσεις. Όπως αναμενόταν, δεδομένων των ευρημάτων από προηγούμενα κεφάλαια, οι υπερβάσεις στους εξωτερικούς χώρους ήταν πιο έντονες τον Ιανουάριο, ακολουθούμενοι από τον Φεβρουάριο και τον Δεκέμβριο. Αντίθετα, οι θερμότεροι μήνες (Ιούνιος, Ιούλιος και Σεπτέμβριος) παρουσίασαν τα χαμηλότερα ποσοστά. Ενώ οι υπερβάσεις σε εσωτερικούς χώρους ήταν γενικά χαμηλότερες, αξιοσημείωτες αιχμές σημειώθηκαν τον Ιανουάριο, τον Νοέμβριο και τον Δεκέμβριο. Τα αυξημένα ποσοστά τον Αύγουστο σε αντίθεση με τους υπόλοιπους θερμούς μήνες οφείλονται στις φωτιές που πλήττουν την Αττική κάθε καλοκαίρι. Είναι σημαντικό ότι ένα σημαντικό ποσοστό υπερβάσεων παρατηρήθηκε ταυτόχρονα σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, υπογραμμίζοντας μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της ποιότητας του αέρα εσωτερικού και εξωτερικού χώρου.

Μήνας	Ηράκλειο		Ακαδημία Πλάτωνος			
	Μέσες Μηνιαίες Υπερβάσεις	Ποσοστό στο σύνολο του μήνα	Έξω		Μέσα	
			Μέσες Μηνιαίες Υπερβάσεις	Ποσοστό στο σύνολο του μήνα	Μέσες Μηνιαίες Υπερβάσεις	Ποσοστό στο σύνολο του μήνα
Ιαν	18	58,1%	20	64,5%	5,5	17,7%
Φεβ	14,5	51,8%	14	50,0%	2,5	8,9%
Μαρ	7,5	24,2%	7,5	24,2%	0	0,0%
Απρ	1	3,3%	0,5	1,7%	0,5	1,7%
Μαϊ	0,5	1,6%	0,5	1,6%	0,5	1,6%
Ιουν	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%
Ιουλ	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%
Αυγ	2,5	8,1%	1,5	4,8%	0,5	1,6%
Σεπ	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%
Οκτ	0	0,0%	1	3,2%	1	3,2%
Νοε	5	16,7%	9	30,0%	3,5	11,7%
Δεκ	12,5	40,3%	11,5	37,1%	3,5	11,3%

Πίνακας 10. Ποσοστά υπέρβασης για κάθε μήνα και μέσες μηνιαίες υπερβάσεις (όριο ΕΕ: 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) για την Ακαδημία Πλάτωνος μέσα και έξω και για το Ηράκλειο



Σχήμα 6.25 Ποσοστά υπέρβασης για κάθε μήνα για την Ακαδημία Πλάτωνος μέσα και έξω και για το Ηράκλειο

6.4. Σχολιασμός αποτελεσμάτων AQI

Χρησιμοποιώντας την καθιερωμένη μεθοδολογία υπολογισμού AQI, παράχθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα. Ο Πίνακας 11 παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της συχνότητας και της κατανομής των κατηγοριών AQI εντός του συνόλου δεδομένων που αναφέρεται σε μέσες μετρήσεις 24 ωρών.

Όσον αφορά την Ακαδημία Πλάτωνος, παρά την αστική τοποθεσία της κατοικίας και την εγγύτητα σε μεγάλες οδικές αρτηρίες, η πλειονότητα των μετρήσεων AQI εμπίπτει στο εύρος «Καλή» και «Μέτρια», τόσο μέσα όσο και έξω από την οικία. Παρατηρήθηκε μια μικρή διαφορά μεταξύ της ποιότητας του αέρα μέσα και έξω, αλλά ήταν γενικά μικρή. Συγκεκριμένα, η κατηγορία «Ανθυγιεινή για ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού»

παρουσίασε 6,2% υψηλότερη συχνότητα σε εξωτερικούς χώρους, ενώ η κατηγορία «Ανθυγιεινή» παρατηρήθηκε αποκλειστικά στον έξω. Επιπλέον, το εσωτερικό περιβάλλον κατέδειξε 8,9% υπεροχή τιμών «Καλού» AQI σε σύγκριση με τις εξωτερικές συνθήκες όπου υπερτερούν τιμές «Μέτρου» AQI κατά 4,3%.

Όσον αφορά το Ηράκλειο, παρατηρείται μόνο 0,1% διαφορά μεταξύ των καταστάσεων «Καλή» και «Μέτρια» με την πρώτη να υπερτερεί. Το ίδιο ποσοστό διαφοράς υπάρχει και μεταξύ των «Ανθυγιεινών για ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού» τιμών στο Ηράκλειο και την Ακαδημία Πλάτωνος (έξω). Επίσης, το Ηράκλειο έχει 0,3% περισσότερες τιμές στην «Ανθυγιεινή» κατηγορία, ενώ καμία περιοχή δεν έχει μετρήσεις στο εύρος «Πολύ ανθυγιεινή» και «Επικίνδυνα ανθυγιεινή». Οι διαφορές μεταξύ των δύο περιοχών απεικονίζονται σχηματικά και σχολιάζονται στο υποκεφάλαιο 6.2.2.

Αν και οι διαφορές είναι μικρές, τα δεδομένα δείχνουν σταθερά ανώτερη ποιότητα αέρα στο εσωτερικό του σπιτιού σε σύγκριση με το εξωτερικό περιβάλλον και ελαφρώς καλύτερη ατμόσφαιρα στο Ηράκλειο συγκριτικά με την Ακαδημία Πλάτωνος.

	AQI	Ηράκλειο	Ακαδημία Πλάτωνος	
			Έξω	Μέσα
Καλή	0-50	45,5%	43,5%	52,4%
Μέτρια	51-100	45,4%	47,8%	47,0%
Ανθυγιεινή για ευαίσθητες ομάδες του πληθυσμού	101-150	6,9%	6,8%	0,6%
Ανθυγιεινή	151-200	2,2%	1,9%	0,0%
Πολύ ανθυγιεινή	201-300	0,0%	0,0%	0,0%
Επικίνδυνα ανθυγιεινή	≥301	0,0%	0,0%	0,0%

Πίνακας 11. Ποσοστά AQI σε κάθε κατηγορία για όλη την χρονοσειρά

6.5. Θερμική άνεση

Χρησιμοποιώντας τον τύπο που αναφέρεται στο κεφάλαιο 2.2, υπολογίστηκε ο δείκτης θερμικής άνεσης (Discomfort Index, DI), για την Ακαδημία Πλάτωνος εντός και εκτός της οικίας και για το Ηράκλειο και αποτυπώνονται στον Πίνακα 12.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των τιμών και στις δύο περιοχές εμφανίζεται στο εύρος $DI < 21$ που υποδηλώνει ουδέτερη κατάσταση θερμικής άνεσης και καμία θερμική δυσφορία. Στο εύρος αυτό παρατηρείται 2,6% διαφορά μεταξύ Ηράκλειου και Ακαδημίας Πλάτωνος με το πρώτο να υπερτερεί. Όσον αφορά τις τιμές μεγαλύτερες ή ίσες με το 21 και μικρότερες του 24, η διαφορά μεταξύ των περιοχών είναι πολύ μικρή (0,1%). Σε αυτό το εύρος τιμών το λιγότερο από το 50% του πληθυσμού εκφράζει αίσθημα θερμικής δυσφορίας. Η Ακαδημία Πλάτωνος υπερτερεί στις επόμενες κατηγορίες, κατά 2,5% μεταξύ 24 και 27 και κατά 0,22% μεταξύ 27 και 29. Όταν ο DI είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 24 και μικρότερος του 27, περισσότερο από το 50% του πληθυσμού εκφράζει αίσθημα θερμικής δυσφορίας. Όταν είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 27 και μικρότερος του 29, υπάρχει σοβαρή θερμική επιβάρυνση σε μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού και ιδιαίτερα σε ευάλωτες ομάδες. Τα παραπάνω ποσοστά δείχνουν ότι η θερμική άνεση στην Ακαδημία Πλάτωνος είναι χειρότερη από το Ηράκλειο, κάτι που υποδεικνύει τις υψηλότερες θερμοκρασίες που επικρατούν στο κέντρο της Αττικής σε σύγκριση με τα βόρεια προάστια του νομού. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη βλάστησης στο αστικό κέντρο και την πυκνότερη πολεοδομία, καθώς και στην υψομετρική διαφορά των περιοχών.

Ενώ υπολογίστηκε και παρουσιάζεται, η θερμική άνεση εντός της κατοικίας στην Ακαδημία Πλάτωνος δεν μπορεί να σχολαστεί καθώς είναι υποκειμενική στους κατοίκους.

	Ηράκλειο	Ακαδημία Πλάτωνος		Ηράκλειο	Ακαδημία Πλάτωνος	
		Έξω	Μέσα		Έξω	Μέσα
DI<21	13513	13081	11666	82,7%	80,1%	71,4%
21-24	2281	2262	4640	14,0%	13,9%	28,4%
24-27	536	950	25	3,3%	5,8%	0,2%
27-29	1	38	0	0,0%	0,2%	0,0%
29-32	0	0	0	0,0%	0,0%	0,0%
≥32	0	0	0	0,0%	0,0%	0,0%

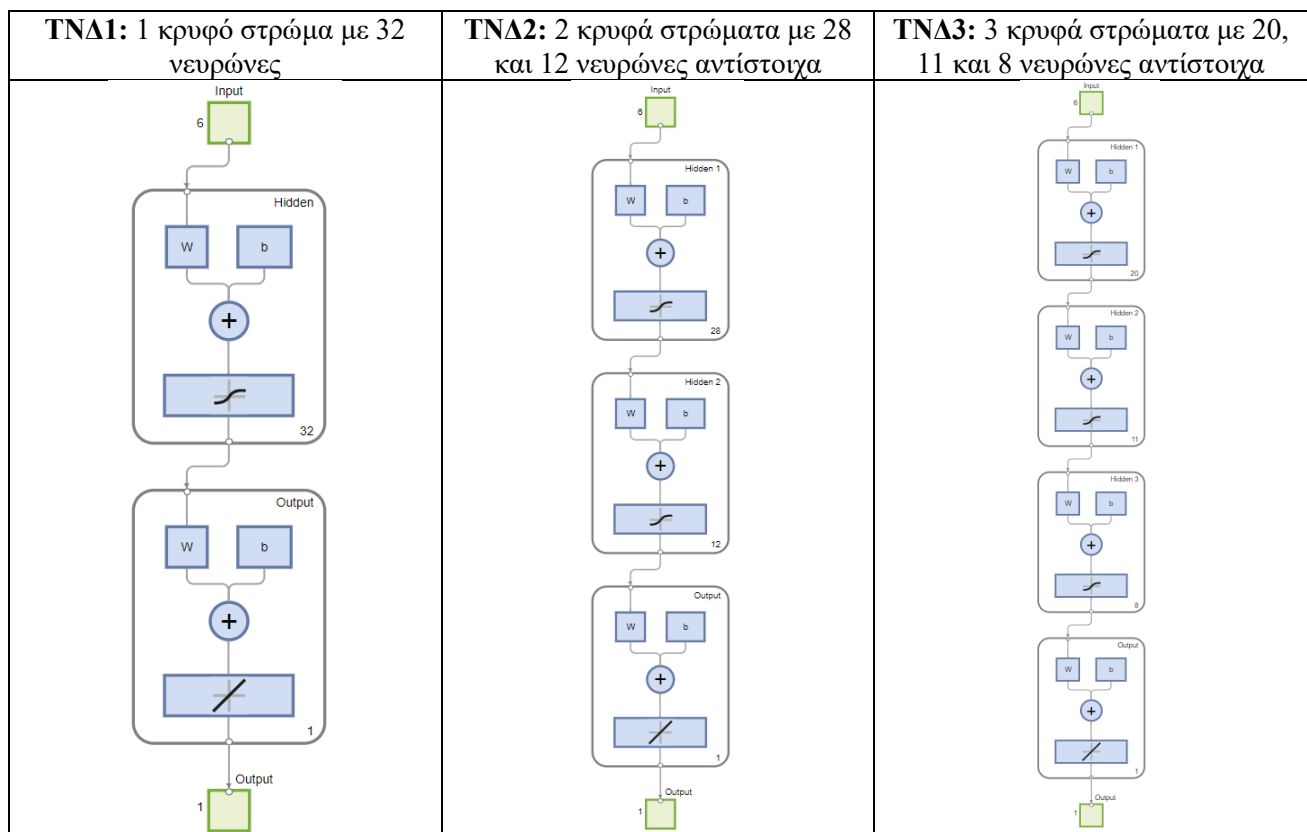
Πίνακας 12. Ποσοστά DI σε κάθε κατηγορία για όλη την χρονοσειρά (16331 ώρες)

6.6. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Σε όλα τα ΤΝΔ το 70% των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε για εκπαίδευση, το 15% για επαλήθευση και το υπόλοιπο 15% για τεστ. Όλα οι νευρώνες συνδέονται με την σιγμοειδή συνάρτηση.

6.6.1. ΤΝΔ Ηράκλειο – Ακαδημία Πλάτωνος

Για την πρόβλεψη της συγκέντρωσης $PM_{2.5}$ στην Ακαδημία Πλάτωνος χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από τον αισθητήρα στο Ηράκλειο αναπτύχθηκαν τρία μοντέλα. Το ΤΝΔ1 έχει ένα κρυφό στρώμα με 32 νευρώνες, το ΤΝΔ2 έχει δύο κρυφά στρώματα με 28 και 12 νευρώνες αντίστοιχα και το ΤΝΔ3 έχει τρία κρυφά στρώματα με 20, 11 και 8 νευρώνες αντίστοιχα (Πίνακας 13).



Πίνακας 13. Function Fitting Neural Network view των τριών ΤΝΔ

Οι εποχές στα νευρωνικά δίκτυα ορίζονται ως ολοκληρωμένες διελεύσεις ολόκληρου του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης. Σε κάθε εποχή, το δίκτυο εμπλέκεται με κάθε περίπτωση εκπαίδευσης, τροποποιώντας τα βάρη και τις προκαταλήψεις του ανάλογα με την ασυμφωνία μεταξύ της προβλεπόμενης παραγωγής του και του πραγματικού στόχου.

Το gradient είναι ένα μέτρο για το πόσο μεγάλη είναι η κλίση της επιφάνειας του σφάλματος. Χρησιμοποιείται για την ενημέρωση των παραμέτρων του μοντέλου κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης.

Στον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt (LM), η παράμετρος Mu παίρνει τιμές από 0 έως 1 και χρησιμεύει ως συντελεστής απόσβεσης που ρυθμίζει την ισορροπία μεταξύ της βαθμίδωσης και της μεθόδου Gauss-Newton. Όταν το Mu είναι μικρό, ο αλγόριθμος LM μιμείται τη μέθοδο Gauss-Newton πιο στενά, η οποία χαρακτηρίζεται από ταχεία σύγκλιση. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις αρχικές συνθήκες και μπορεί να παρουσιάσει αστάθεια στο πλαίσιο μεγαλύτερων προβλημάτων. Αντίθετα, όταν το Mu είναι μεγάλο, ο αλγόριθμος LM συμπεριφέρεται περισσότερο σαν gradient descent, που είναι πιο εύρωστος αλλά μπορεί να συγκλίνει αργά. Το Mu ξεκινά συνήθως από μια ελάχιστη τιμή και αυξάνεται σταδιακά εάν ο αλγόριθμος δείξει ανεπαρκή πρόοδο.

Ο έλεγχος επικύρωσης είναι ένα κρίσιμο στοιχείο στην εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων, το οποίο χρησιμεύει για να εξακριβωθεί ότι το μοντέλο αποκτά γνώση με επάρκεια και γενικεύει κατάλληλα σε δεδομένα που δεν είχαν συναντήσει στο παρελθόν. Αυτή η αξιολόγηση συνεπάγεται την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του μοντέλου σε ένα ξεχωριστό σύνολο δεδομένων που αναφέρεται ως σύνολο επικύρωσης, το οποίο εξαιρείται από τη διαδικασία εκπαίδευσης.

- TNΔ1: - Εποχές: 58
- Χρόνος εκτέλεσης: 59 secs
 - Απόδοση: 77,6
 - Gradient: 384
 - Mu: 0,1
 - Έλεγχοι επικύρωσης: 6

Training Progress			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	58	1000
Elapsed Time	-	00:00:59	-
Performance	7.28e+05	77.6	0
Gradient	1.3e+06	384	1e-07
Mu	0.001	0.1	1e+10
Validation Checks	0	6	6

Training Algorithms	
Data Division:	Random dividerand
Training:	Levenberg-Marquardt trainlm
Performance:	Mean Squared Error mse
Calculations:	MEX

Εικόνα 6.1 Training Progress του TNΔ1

Το μοντέλο είχε 58 ολοκληρωμένες διελεύσεις ολόκληρου του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης, σε χρόνο 59 δευτερολέπτων. Το MSE των δεδομένων εκπαίδευσης είναι 77,6. Το gradient είναι ίσο με 384, μια υψηλή τιμή κλίσης υποδηλώνει μια ταχεία αλλαγή στο MSE. Το mu ίσουςται με 0,1, επομένως ο αλγόριθμος LM μιμείται την μέθοδο Gauss-Newton. Τέλος, έγιναν 6 έλεγχοι επικύρωσης κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης του μοντέλου.

- TNA2: - Εποχές: 67
- Χρόνος εκτέλεσης: 1 min 4 secs
 - Απόδοση: 63,6
 - Κλίση: 104
 - Mu: 0,01
 - Έλεγχοι επικύρωσης: 6

Training Progress			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	67	1000
Elapsed Time	-	00:01:04	-
Performance	3.64e+05	63.6	0
Gradient	1.69e+06	104	1e-07
Mu	0.001	0.01	1e+10
Validation Checks	0	6	6

Training Algorithms	
Data Division:	Random dividerand
Training:	Levenberg-Marquardt trainlm
Performance:	Mean Squared Error mse
Calculations:	MEX

Εικόνα 6.2 Training Progress του TNA2

Το μοντέλο είχε 67 ολοκληρωμένες διελεύσεις ολόκληρου του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης, σε χρόνο 1 λεπτό και 4 δευτερόλεπτα. Το MSE των δεδομένων εκπαίδευσης είναι 63,6. Το gradient είναι ίσο με 104, μια υψηλή τιμή κλίσης υποδηλώνει μια ταχεία αλλαγή στο MSE. Το mu ίσους με 0,01, επομένως ο αλγόριθμος LM μιμείται την μέθοδο Gauss-Newton. Τέλος, έγιναν 6 έλεγχοι επικύρωσης κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης του μοντέλου.

- TNA3: - Εποχές: 31
- Χρόνος εκτέλεσης: 18 secs
 - Απόδοση: 50,7
 - Κλίση: 129
 - Mu: 0,1
 - Έλεγχοι επικύρωσης: 6

Training Progress			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	31	1000
Elapsed Time	-	00:00:18	-
Performance	3.56e+05	50.7	0
Gradient	1.18e+06	129	1e-07
Mu	0.001	0.1	1e+10
Validation Checks	0	6	6

Training Algorithms	
Data Division:	Random dividerand
Training:	Levenberg-Marquardt trainlm
Performance:	Mean Squared Error mse
Calculations:	MEX

Εικόνα 6.3 Training Progress του TNA3

Το μοντέλο είχε 31 ολοκληρωμένες διελεύσεις ολόκληρου του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης, σε χρόνο 18 δευτερολέπτων. Το MSE των δεδομένων εκπαίδευσης είναι 50,7. Το gradient είναι ίσο με 129, μια υψηλή τιμή κλίσης υποδηλώνει μια ταχεία αλλαγή στο MSE. Το mu ίσους με 0,1, επομένως ο αλγόριθμος LM μιμείται την μέθοδο Gauss-Newton. Τέλος, έγιναν 6 έλεγχοι επικύρωσης κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης του μοντέλου.

TNA1

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.26α, οι τιμές R για την εκπαίδευση, την επικύρωση, τη δοκιμή και όλα τα σύνολα δεδομένων είναι 0,89571, 0,86377, 0,87189 και 0,88712, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν ότι το μοντέλο εξηγεί ένα σημαντικό μέρος της διακύμανσης στα δεδομένα PM_{2.5}. Δεδομένου ότι οι τιμές R είναι όλες σχετικά υψηλές και θετικές, επιβεβαιώνει την ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των τιμών στόχου PM_{2.5}. Αυτό δείχνει ότι το μοντέλο έχει καλές επιδόσεις όσον αφορά την αποτύπωση της

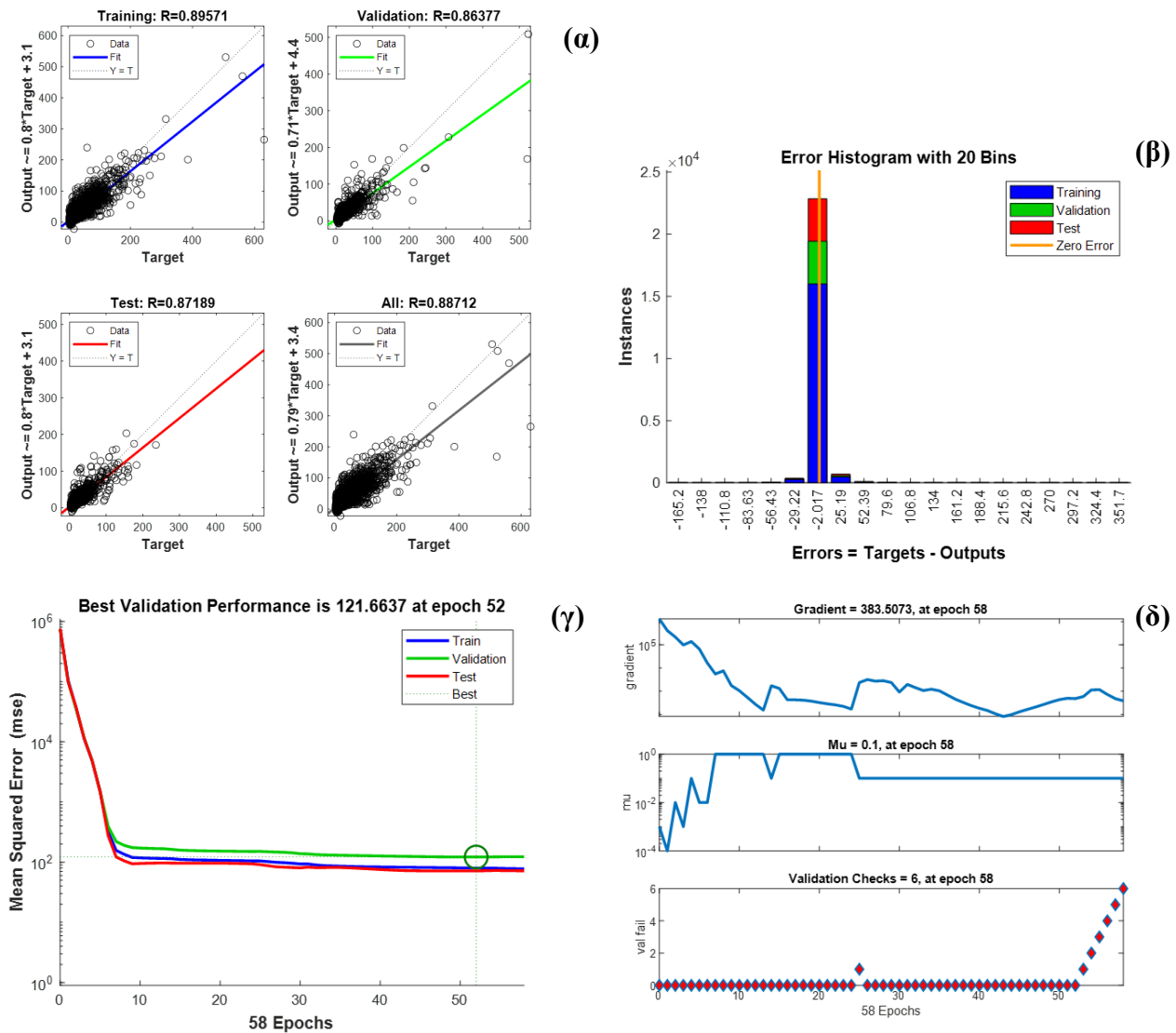
συνολικής τάσης στα δεδομένα. Τα διαγράμματα διασποράς δείχνουν μια γενική τάση των προβλεπόμενων τιμών $PM_{2,5}$ να ευθυγραμμίζονται στενά με τις τιμές στόχου $PM_{2,5}$, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο είναι ικανό να συλλάβει τις υποκείμενες σχέσεις στα δεδομένα. Ωστόσο, υπάρχει κάποιος βαθμός διασποράς γύρω από τις γραμμές τάσης, υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο δεν είναι τέλει και μπορεί να παρουσιάζει κάποιο βαθμό λάθους στις προβλέψεις του.

Παρατηρώντας το ιστόγραμμα σφάλματος του TNΔ1 (Σχήμα 6.26β) είναι εμφανές η κατανομή βρίσκεται στα αριστερά. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει σχετικά μικρό σφάλμα και το ότι είναι στις αρνητικές τιμές υποδηλώνει ότι το μοντέλο υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές. Επίσης, η πλειοψηφία των σφαλμάτων συγκεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο είναι γενικά ακριβές για τις περισσότερες περιπτώσεις. Η ύπαρξη μερικών ακραίων σημείων υποδεικνύει την δυσκολία του μοντέλου να προβλέψει με ακρίβεια τις τιμές σε ορισμένες περιπτώσεις.

Όσον αφορά το Σχήμα 6.26γ, το διάγραμμα δείχνει την πορεία εκπαίδευσης του νευρωνικού χρησιμοποιώντας το Mean Square Error. Η χαμηλότερη τιμή MSE κατά την διάρκεια της επαλήθευσης σημειώθηκε στην εποχή 52 από τις 58 και ισούται με 121,6637. Αυτό υποδηλώνει ότι οι προβλέψεις του μοντέλου αποκλείουν σημαντικά από τις πραγματικές τιμές, κάτι που μπορεί να οφείλεται σε θόρυβο στα δεδομένα, προκατάληψη του μοντέλου ή άλλα ζητήματα κατά την εκπαίδευση. Επίσης, το μοντέλο ενδέχεται να μην είναι αρκετά περίπλοκο για να καταγράψει τα υποκείμενα μοτίβα στα δεδομένα. Το κυκλικό σημείο στην καμπύλη επικύρωσης υποδεικνύει την εποχή κατά την οποία θα μπορούσε να είχε εφαρμοστεί πρόωρη διακοπή για να αποφευχθεί η υπερβολική προσαρμογή.

Το Σχήμα 6.26δ απεικονίζει τους ελέγχους gradient, Mu και επικύρωσης κατά τη διάρκεια των 58 εποχών.

- Gradient: Η συνολική τάση της κλίσης είναι πτωτική, υποδεικνύοντας ότι το δίκτυο σημειώνει πρόοδο στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απώλειας. Υπάρχουν διακυμάνσεις στην τιμή της κλίσης, κάτι που είναι σύνηθες κατά τη διάρκεια της προπόνησης. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να αποδοθούν στον στοχαστικό χαρακτήρα της εκπαιδευτικής διαδικασίας, όπου το δίκτυο ενημερώνεται με βάση τυχαία επιλεγμένες παρτίδες δεδομένων. Η τελική τιμή κλίσης στην εποχή 58 είναι 383,5073. Μια σχετικά υψηλή τιμή κλίσης σε αυτό το στάδιο μπορεί να υποδηλώνει ότι το δίκτυο απέχει ακόμη από τη βέλτιστη λύση ή ότι ο ρυθμός εκμάθησης μπορεί να χρειάζεται προσαρμογή.
- Mu: Το διάγραμμα δείχνει την εξέλιξη του ρυθμού μάθησης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου. Το mu ξεκινά με μια σχετικά χαμηλή τιμή, η οποία είναι κοινή πρακτική σε πολλούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να κάνει μεγαλύτερα βήματα αρχικά, οδηγώντας ενδεχομένως σε ταχύτερη σύγκλιση. Παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τις πρώτες εποχές, μια συμπεριφορά που παρατηρείται συχνά στους προσαρμοστικούς αλγόριθμους ρυθμού μάθησης, όπου ο ρυθμός μάθησης προσαρμόζεται με βάση τις πληροφορίες κλίσης. Μετά από έναν ορισμένο αριθμό εποχών, η τιμή του mu σταθεροποιείται σε σχετικά χαμηλό επίπεδο. Αυτό υποδηλώνει ότι το δίκτυο έχει φτάσει σε μια περιοχή όπου απαιτούνται μικρότερα βήματα για την τελειοποίηση των βαρών και των προκαταλήψεων. Η τελική τιμή του mu (0,1) στην εποχή 58 υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει σε ένα λογικό ρυθμό εκμάθησης.
- Έλεγχος επικύρωσης: Η έλλειψη πρώιμων αποτυχιών δείχνει ότι το μοντέλο μαθαίνει σχετικά καλά στην αρχή, χωρίς σημαντικά προβλήματα υπερπροσαρμογής ή υποπροσαρμογής. Η συγκέντρωση των αστοχιών προς το τέλος υποδηλώνει ένα πιθανό πρόβλημα υπερπροσαρμογής, όπου το μοντέλο εξειδικεύεται υπερβολικά στα δεδομένα εκπαίδευσης.



Σχήμα 6.26 (α) Διαγράμματα παλινδρόμησης (regression) (β) Ιστόγραμμα σφαλμάτων (error histogram) (γ) Διάγραμμα απόδοσης (Validation performance) (δ) Διαγράμματα κατάστασης εκπαίδευσης (training state)

TNA2

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.27α, οι τιμές R για την εκπαίδευση, την επικύρωση, τη δοκιμή και όλα τα σύνολα δεδομένων είναι 0,90737, 0,89594, 0,85547 και 0,89753, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν μια ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των τιμών στόχου $PM_{2,5}$, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο αποδίδει καλά στην καταγραφή των υποκείμενων σχέσεων στα δεδομένα. Όμοια με το TNA1 τα διαγράμματα διασποράς δείχνουν μια γενική τάση των προβλεπόμενων τιμών $PM_{2,5}$ να ευθυγραμμίζονται στενά με τις τιμές στόχου $PM_{2,5}$, με κάποιο βαθμό διασποράς γύρω από τις γραμμές τάσης. Αυτό δείχνει ότι το μοντέλο δεν είναι τέλει και μπορεί να παρουσιάζει κάποιο βαθμό λάθους στις προβλέψεις του.

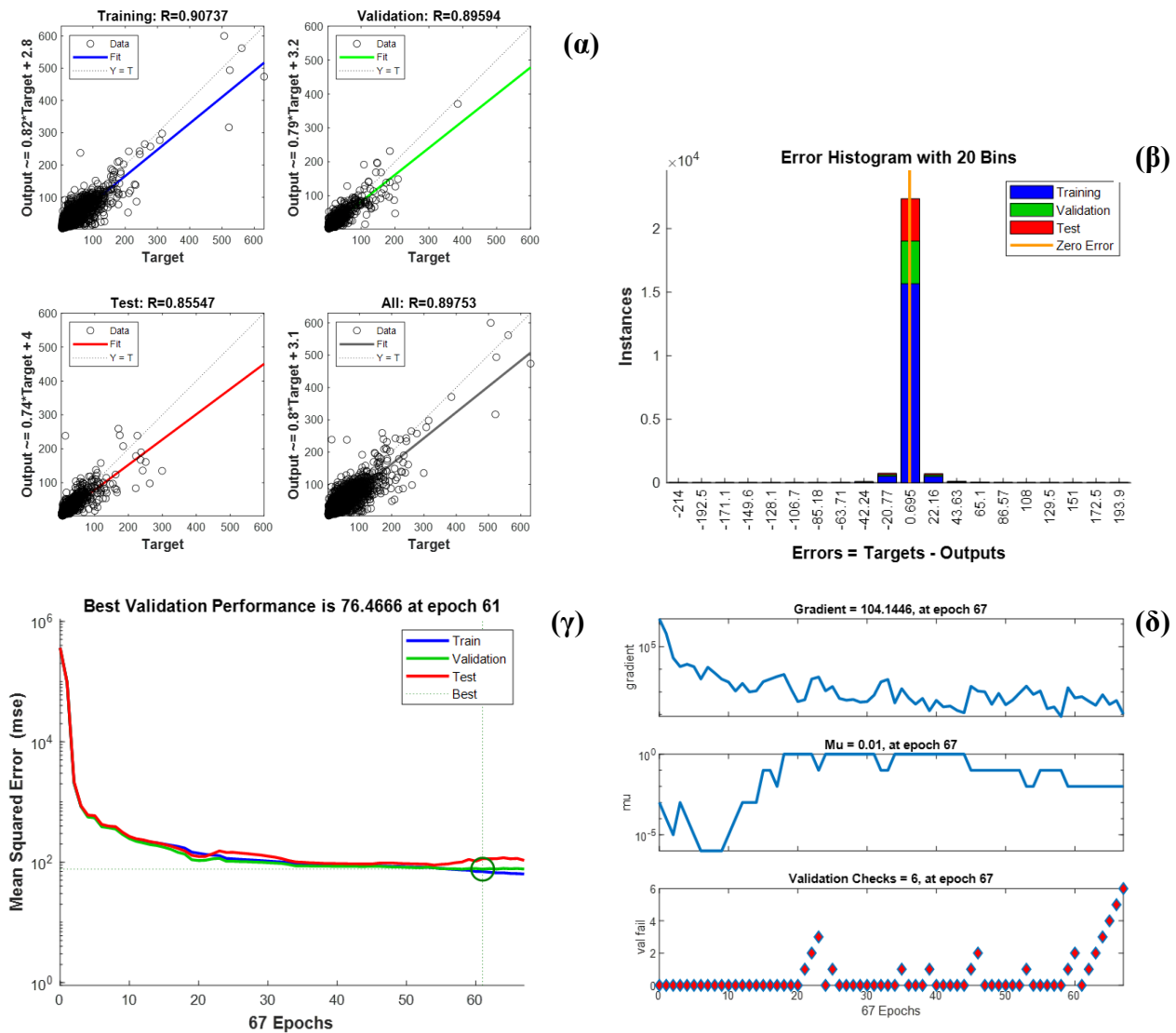
Παρατηρώντας το ιστόγραμμα σφάλματος του TNA2 (Σχήμα 6.27β) είναι εμφανές η κατανομή βρίσκεται στο κέντρο. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει σχετικά μικρό σφάλμα κοντά στο μηδέν και υποδηλώνει ότι το μοντέλο παρουσιάζει ελάχιστη απόκλιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών τιμών. Επίσης, η πλειοψηφία των σφαλμάτων συγκεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο είναι γενικά ακριβές για τις περισσότερες περιπτώσεις. Η ύπαρξη μερικών ακραίων σημείων υποδεικνύει την δυσκολία του μοντέλου να προβλέψει με ακρίβεια τις τιμές σε ορισμένες περιπτώσεις.

Όσον αφορά το Σχήμα 6.27γ, το διάγραμμα δείχνει την πορεία εκπαίδευσης του νευρωνικού χρησιμοποιώντας το Mean Square Error. Η χαμηλότερη τιμή MSE κατά την διάρκεια της επαλήθευσης σημειώθηκε στην εποχή 61 από τις 67 και ισούται με 76,4666. Αυτό υποδηλώνει ότι οι προβλέψεις του μοντέλου αποκλείουν σημαντικά

από τις πραγματικές τιμές, κάτι που, όμοια με το προηγούμενο μοντέλο, μπορεί να οφείλεται σε θόρυβο στα δεδομένα, προκατάληψη του μοντέλου ή άλλα ζητήματα κατά την εκπαίδευση. Επίσης, το μοντέλο ενδέχεται να μην είναι αρκετά περίπλοκο για να καταγράψει τα υποκείμενα μοτίβα στα δεδομένα. Το κυκλικό σημείο στην καμπύλη επικύρωσης υποδεικνύει την εποχή κατά την οποία θα μπορούσε να είχε εφαρμοστεί πρόωρη διακοπή για να αποφευχθεί η υπερβολική προσαρμογή.

Το Σχήμα 6.27δ απεικονίζει τους ελέγχους gradient, Mu και επικύρωσης κατά τη διάρκεια των 67 εποχών.

- Gradient: Η συνολική τάση της κλίσης είναι πτωτική, υποδεικνύοντας ότι το δίκτυο σημειώνει πρόοδο στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απώλειας. Υπάρχουν διακυμάνσεις στην τιμή της κλίσης, κάτι που είναι σύνηθες κατά τη διάρκεια της προπόνησης. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να αποδοθούν στον στοχαστικό χαρακτήρα της εκπαιδευτικής διαδικασίας, όπου το δίκτυο ενημερώνεται με βάση τυχαία επιλεγμένες παρτίδες δεδομένων. Η τελική τιμή κλίσης στην εποχή 67 είναι 104,1446.
- Mu: Το mu ξεκινά με μια σχετικά χαμηλή τιμή, η οποία είναι κοινή πρακτική σε πολλούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να κάνει μεγαλύτερα βήματα αρχικά, οδηγώντας ενδεχομένως σε ταχύτερη σύγκλιση. Παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τις πρώτες εποχές, μια συμπεριφορά που παρατηρείται συχνά στους προσαρμοστικούς αλγόριθμους ρυθμού μάθησης, όπου ο ρυθμός μάθησης προσαρμόζεται με βάση τις πληροφορίες κλίσης. Μετά από έναν ορισμένο αριθμό εποχών, η τιμή του mu σταθεροποιείται σε σχετικά χαμηλό επίπεδο. Αυτό υποδηλώνει ότι το δίκτυο έχει φτάσει σε μια περιοχή όπου απαιτούνται μικρότερα βήματα για την τελειοποίηση των βαρών και των προκαταλήψεων. Η τελική τιμή του mu (0,01) στην εποχή 67 υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει σε ένα λογικό ρυθμό εκμάθησης.
- Έλεγχοι επικύρωσης: Το μοντέλο φαίνεται να έχει καλή απόδοση στις πρώτες εποχές, με λίγες αποτυχίες επικύρωσης. Γύρω στην εποχή 20, το μοντέλο αρχίζει να αντιμετωπίζει μια σειρά αποτυχιών επικύρωσης, υποδεικνύοντας πιθανώς ότι το μοντέλο αρχίζει να προσαρμόζεται υπερβολικά στα δεδομένα εκπαίδευσης. Οι αστοχίες συνεχίζουν να συμβαίνουν σποραδικά κατά τις υπόλοιπες εποχές, υποδηλώνοντας ότι η απόδοση του μοντέλου παρουσιάζει διακυμάνσεις. Η συγκέντρωση των αστοχιών προς το τέλος υποδηλώνει ένα πιθανό πρόβλημα υπερπροσαρμογής, όπου το μοντέλο εξειδικεύεται υπερβολικά στα δεδομένα εκπαίδευσης.



Σχήμα 6.27 (α) Διαγράμματα παλινδρόμησης (regression): (β) Ιστόγραμμα σφαλμάτων (error histogram): (γ) Διάγραμμα απόδοσης (Validation performance): (δ) Διαγράμματα κατάστασης εκπαίδευσης (training state)

TNΔ3

Οι τιμές R για την εκπαίδευση, την επικύρωση, τη δοκιμή και όλα τα σύνολα δεδομένων είναι 0,93099, 0,90721, 0,85561 και 0,9183, αντίστοιχα (Σχήμα 6.28α). Το TNΔ3 έχει τις καλύτερες τιμές R συγκριτικά με τα δύο προηγούμενα. Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν μια ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των τιμών στόχου $PM_{2,5}$, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο αποδίδει καλά στην καταγραφή των υποκείμενων σχέσεων στα δεδομένα.

Παρατηρώντας το ιστόγραμμα σφάλματος του TNΔ3 (Σχήμα 6.28β) είναι εμφανές η κατανομή βρίσκεται στα αριστερά. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει σχετικά μικρό σφάλμα και το ότι είναι στις αρνητικές τιμές υποδηλώνει ότι το μοντέλο υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές. Επίσης, το συνολικό σχήμα είναι σχετικά ευρύ, υποδηλώνοντας ένα μέτριο επίπεδο διακύμανσης στα σφάλματα. Τα σύνολα εκπαίδευσης και επικύρωσης παρουσιάζουν παρόμοια μοτίβα, υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο γενικεύεται καλά. Ωστόσο, το σετ δοκιμής δείχνει μια ελαφρώς διαφορετική κατανομή, υποδηλώνοντας πιθανή υπερπροσαρμογή.

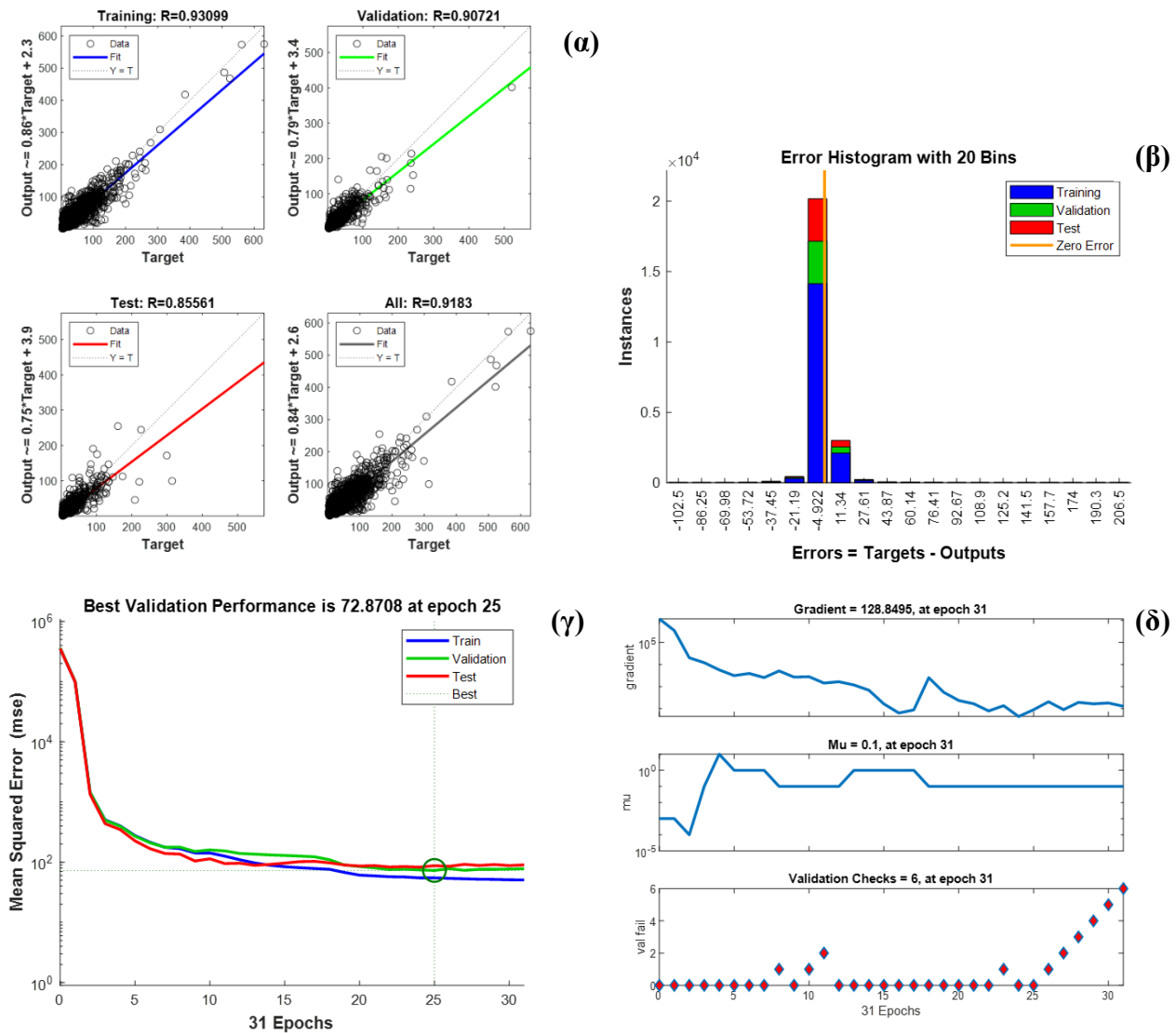
Όσον αφορά το Σχήμα 6.28γ, το MSE εκπαίδευσης συνεχίζει να μειώνεται σημαντικά, ενώ το MSE επικύρωσης αρχίζει να αυξάνεται μετά από περίπου την εποχή 25, κάτι που υποδηλώνει ότι το μοντέλο μαθαίνει πολύ καλά τα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά δυσκολεύεται να γενικεύσει σε μη ορατά δεδομένα. Το χαμηλότερο MSE επικύρωσης, δηλαδή το σημείο όπου το μοντέλο είχε καλύτερη απόδοση, επιτυγχάνεται στην εποχή 25 από τις

31 και είναι 72,8708. Αυτό υποδηλώνει ότι οι προβλέψεις του μοντέλου αποκλείουν σημαντικά από τις πραγματικές τιμές, κάτι που μπορεί να οφείλεται σε θόρυβο στα δεδομένα, προκατάληψη του μοντέλου ή άλλα ζητήματα κατά την εκπαίδευση. Το κυκλικό σημείο στην καμπύλη επικύρωσης υποδεικνύει την εποχή κατά την οποία θα μπορούσε να είχε εφαρμοστεί πρόωρη διακοπή για να αποφευχθεί η υπερβολική προσαρμογή.

Το Σχήμα 6.28δ απεικονίζει τους ελέγχους gradient, Mu και επικύρωσης κατά τη διάρκεια των 31 εποχών.

- Gradient: Η συνολική τάση της κλίσης είναι πτωτική, υποδεικνύοντας ότι το δίκτυο σημειώνει πρόοδο στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απώλειας. Υπάρχουν διακυμάνσεις στην τιμή της κλίσης, κάτι που είναι σύνηθες κατά τη διάρκεια της προπόνησης. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να αποδοθούν στον στοχαστικό χαρακτήρα της εκπαιδευτικής διαδικασίας, όπου το δίκτυο ενημερώνεται με βάση τυχαία επιλεγμένες παρτίδες δεδομένων. Η τελική τιμή κλίσης στην εποχή 31 είναι 128,8495.
- Mu: Το mu ξεκινά με μια σχετικά χαμηλή τιμή, η οποία είναι κοινή πρακτική σε πολλούς αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να κάνει μεγαλύτερα βήματα αρχικά, οδηγώντας ενδεχομένως σε ταχύτερη σύγκλιση. Παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τις πρώτες εποχές, μια συμπεριφορά που παρατηρείται συχνά στους προσαρμοστικούς αλγόριθμους ρυθμού μάθησης, όπου ο ρυθμός μάθησης προσαρμόζεται με βάση τις πληροφορίες κλίσης. Μετά από έναν ορισμένο αριθμό εποχών, η τιμή του mu σταθεροποιείται σε σχετικά χαμηλό επίπεδο. Αυτό υποδηλώνει ότι το δίκτυο έχει φτάσει σε μια περιοχή όπου απαιτούνται μικρότερα βήματα για την τελειοποίηση των βαρών και των προκαταλήψεων. Η τελική τιμή του mu (0,1) στην εποχή 31 υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει σε ένα λογικό ρυθμό εκμάθησης.
- Έλεγχοι επικύρωσης: Το μοντέλο φαίνεται να έχει καλή απόδοση στις πρώτες εποχές, με λίγες αποτυχίες επικύρωσης. Γύρω στην εποχή 10, το μοντέλο αρχίζει να αντιμετωπίζει μια σειρά αποτυχιών επικύρωσης, υποδεικνύοντας πιθανώς ότι το μοντέλο αρχίζει να προσαρμόζεται υπερβολικά στα δεδομένα εκπαίδευσης. Οι αποτυχίες συνεχίζουν να συμβαίνουν σποραδικά κατά τις υπόλοιπες εποχές, υποδηλώνοντας ότι η απόδοση του μοντέλου παρουσιάζει διακυμάνσεις. Η συγκέντρωση των αποτυχιών προς το τέλος υποδηλώνει ένα πιθανό πρόβλημα υπερπροσαρμογής, όπου το μοντέλο εξειδικεύεται υπερβολικά στα δεδομένα εκπαίδευσης.

Παρατηρώντας συνολικά την απόδοση των τριών μοντέλων είναι εμφανές ότι το TNΔ3 είναι το καλύτερο αλλά και το πιο επιρρεπές σε υπερπροσαρμογή. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην χρήση περισσότερων νευρών (3 αντί για 1 ή 2 στα TNΔ1 και 2 αντίστοιχα) και στα διαφορετικά δεμένα εισόδοι. Τα δύο πρώτα νευρωνικά είχαν δεδομένα για μία ώρα πριν μόνο για PM_{2,5} του αισθητήρα στο Ηράκλειο και όλα τα άλλα δεδομένα ήταν της ώρας 0. Στο τρίτο νευρωνικό όλα τα δεδομένα είχαν τιμές για μία ώρα πριν.



Σχήμα 6.28 (α) Διαγράμματα παλινδρόμησης (regression): (β) Ιστόγραμμα σφαλμάτων (error histogram): (γ) Διάγραμμα απόδοσης (Validation performance): (δ) Διαγράμματα κατάστασης εκπαίδευσης (training state)

Παρατηρώντας τον Πίνακα 14, όλα τα μοντέλα παρουσιάζουν $MBE < 0$, άρα υποεκτιμούν τα πραγματικά δεδομένα με το TNΔ3 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συμφωνία και το TNΔ2 τη μεγαλύτερη ασυμφωνία. Το RMSE βρίσκεται σε κάθε περίπτωση μεταξύ των $7,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και των $9,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ με το TNΔ3 να εμφανίζει τη μικρότερη τιμή, δηλαδή προσεγγίζει καλύτερα τις προβλεπόμενες τιμές και το TNΔ1 να εμφανίζει τη μεγαλύτερη απόκλιση. Οι δείκτες συσχέτισης R και των τριών TNΔ εμφανίζουν ισχυρή θετική συσχέτιση. Τέλος, από τους δείκτες συμφωνίας είναι προφανές πως το TNΔ3 έχει τη μεγαλύτερη συμφωνία με τις πραγματικές τιμές, καθώς βρίσκεται πιο κοντά στο 1, με το TNΔ1 να εμφανίζει την μικρότερη αλλά επίσης πολύ κοντά στο 1. Οι δείκτες αυτοί δείχνουν ότι τα νευρωνικά έχουν καλή προσέγγιση με τις πραγματικές τιμές και πολύ συμφωνία τιμών.

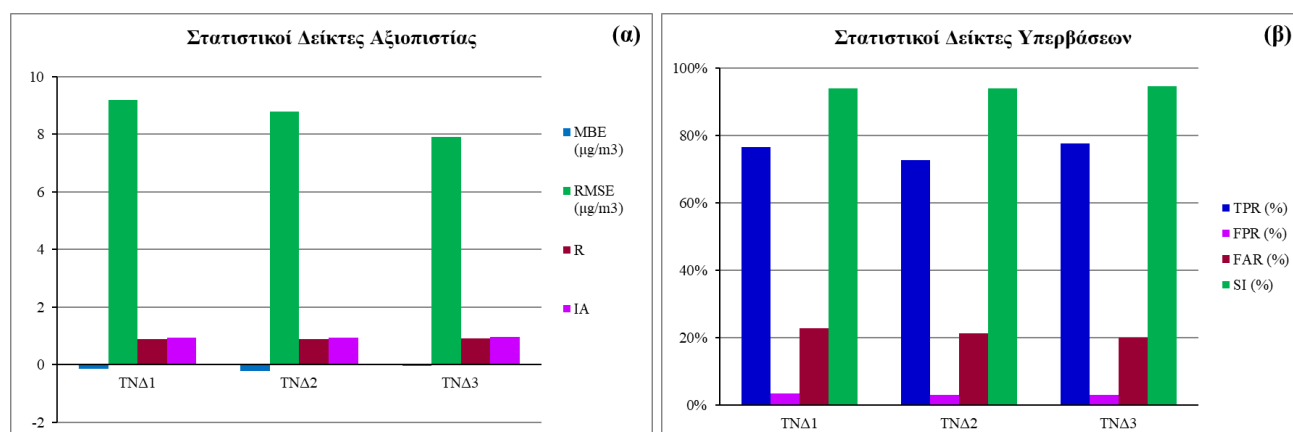
Στατιστικός Δείκτης Αξιοπιστίας	TNΔ1	TNΔ2	TNΔ3
MBE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-0,1474	-0,2199	-0,0401
RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	9,1992	8,8023	7,9007
R	0,8879	0,8980	0,9186
IA	0,9373	0,9434	0,9557

Πίνακας 14. Στατιστικοί δείκτες αξιοπιστίας των TNΔ

Με βάση τον Πίνακα 15, το TPR είναι μεταξύ 73% και 78%, με το TNΔ3 (78%) να προβλέπει καλύτερα τις υπερβάσεις. Στη συνέχεια, ο δείκτης FPR είναι ίσος για τα τρία νευρωνικά (3%) και ο FAR παρουσιάζει πολύ μικρή διαφορά με το TNΔ1 να έχει την μεγαλύτερη τιμή (23%) και το TNΔ3 την μικρότερη (20%). Αυτό σημαίνει πως και τα τρία μοντέλα προβλέπουν ελάχιστες λάθος υπερβάσεις και σχετικά λίγους λάθος συναγερούς. Τέλος, ο SI είναι 94% για όλα τα νευρωνικά, άρα έχουν μεγάλο ποσοστό σωστών προβλέψεων, υπερβάσεων και μη.

Στατιστικός Δείκτης Υπερβάσεων	TNΔ1	TNΔ2	TNΔ3
TPR (%)	77%	73%	78%
FPR (%)	3%	3%	3%
FAR (%)	23%	21%	20%
SI (%)	94%	94%	94%

Πίνακας 15. Στατιστικοί δείκτες υπερβάσεων των TNΔ

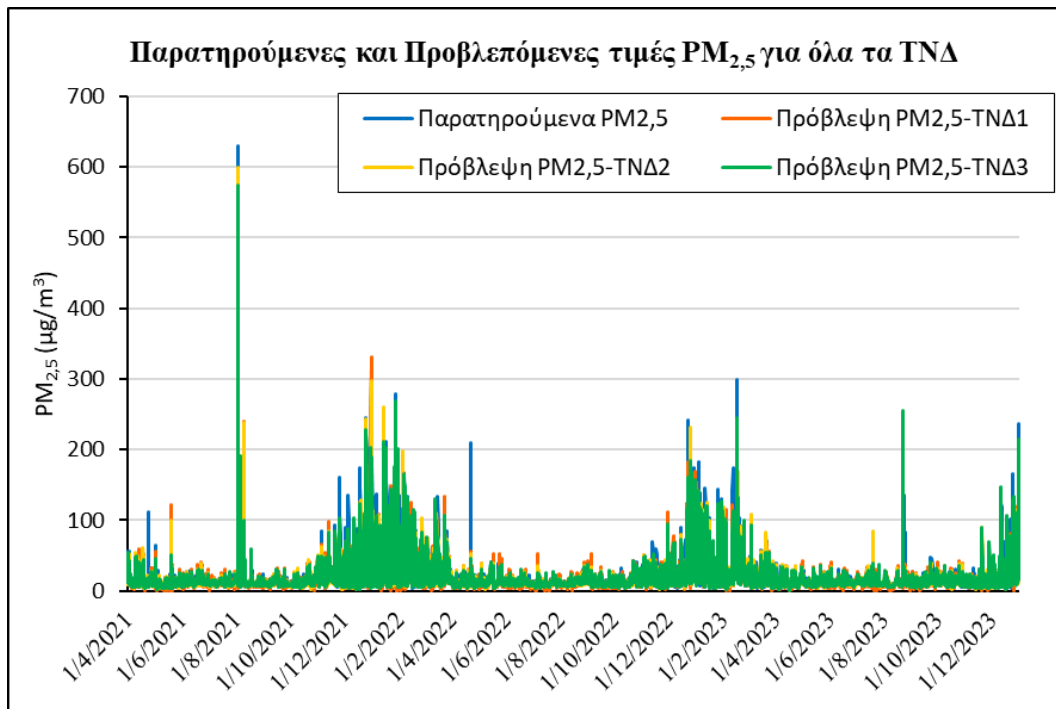


Σχήμα 6.29 (α) Σχηματική απεικόνιση των δεικτών αξιοπιστίας; (β) Σχηματική απεικόνιση των δεικτών υπερβάσεων

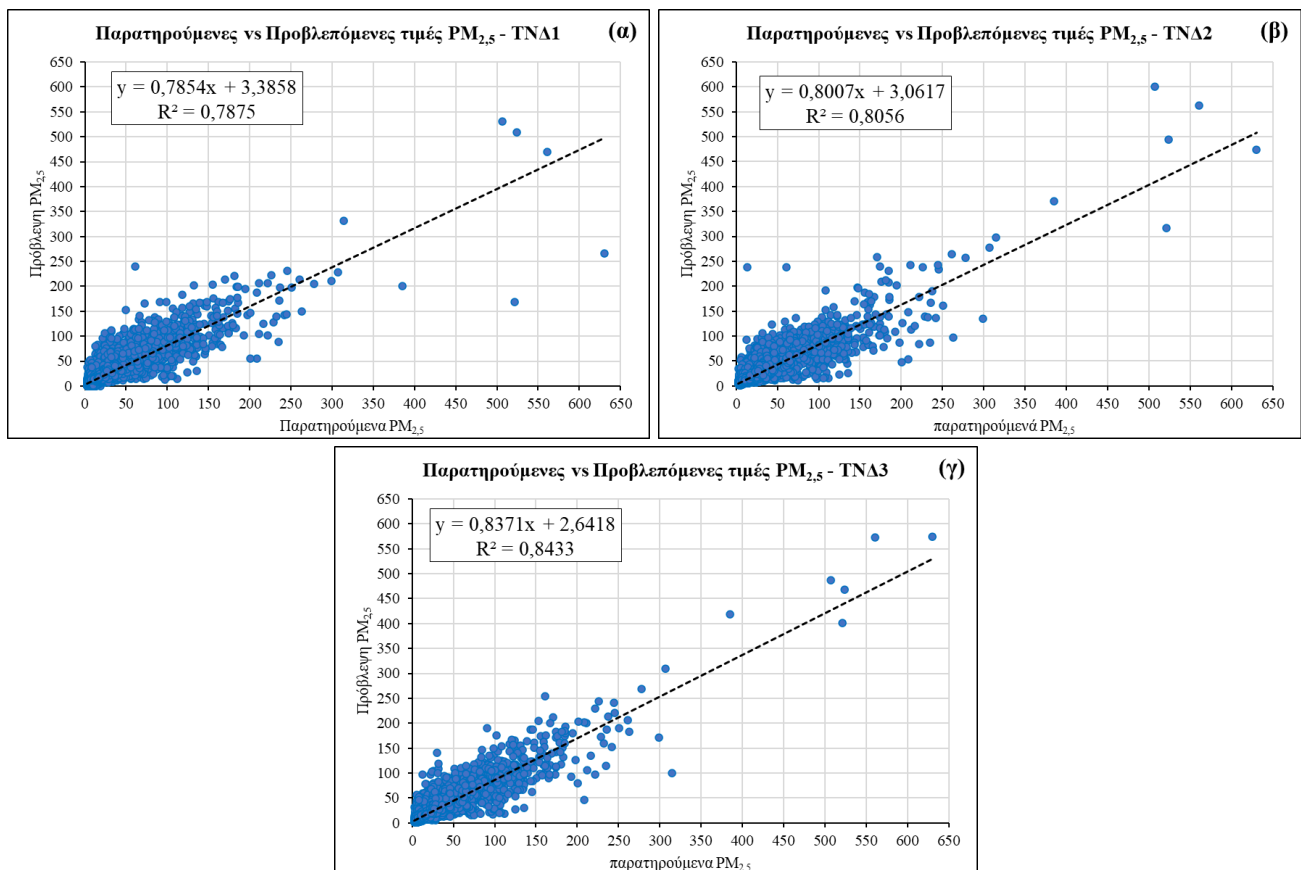
Παρατηρώντας τα Σχήμα 6.30 και Σχήμα 6.31 γίνεται εμφανές ότι, οι προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5} και από τα τρία μοντέλα ακολουθούν γενικά την τάση των παρατηρούμενων τιμών, υποδεικνύοντας ότι τα μοντέλα είναι ικανά να αποτυπώσουν τη συνολική χρονική δυναμική των συγκεντρώσεων PM_{2,5}.

Το TNΔ3 φαίνεται να παρουσιάζει την πλησιέστερη συμφωνία με τις παρατηρούμενες τιμές, υποδηλώνοντας ότι μπορεί να είναι το πιο ακριβές μοντέλο. Τα TNΔ1 και TNΔ2 εμφανίζουν ορισμένες αποκλίσεις από τις παρατηρούμενες τιμές, ιδιαίτερα σε περιόδους υψηλών συγκεντρώσεων PM_{2,5}. Και τα τρία μοντέλα τείνουν να υποτιμούν τις συγκεντρώσεις PM_{2,5} σε περιόδους υψηλής ρύπανσης, γεγονός που υποδηλώνει ότι μπορεί να είναι προκατειλημμένες προς χαμηλότερες προβλέψεις. Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις, τα μοντέλα φαίνεται να υπερεκτιμούν τις συγκεντρώσεις PM_{2,5}, ιδιαίτερα σε περιόδους χαμηλής ρύπανσης.

Συνολικά, το Σχήμα 6.30 υποδηλώνει ότι τα μοντέλα νευρωνικών δικτύων είναι ικανά να παρέχουν λογικές προβλέψεις για τις συγκεντρώσεις PM_{2,5}. Αυτό υποστηρίζεται και από τις τιμές R² που φαίνονται στο Σχήμα 6.31 με το TNΔ3 (Σχήμα 6.31γ) να έχει την καλύτερη συσχέτιση (R²=0,8433) κάτι που ταυτίζεται και με όλα τα παραπάνω.



Σχήμα 6.30 Πραγματικές και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5}

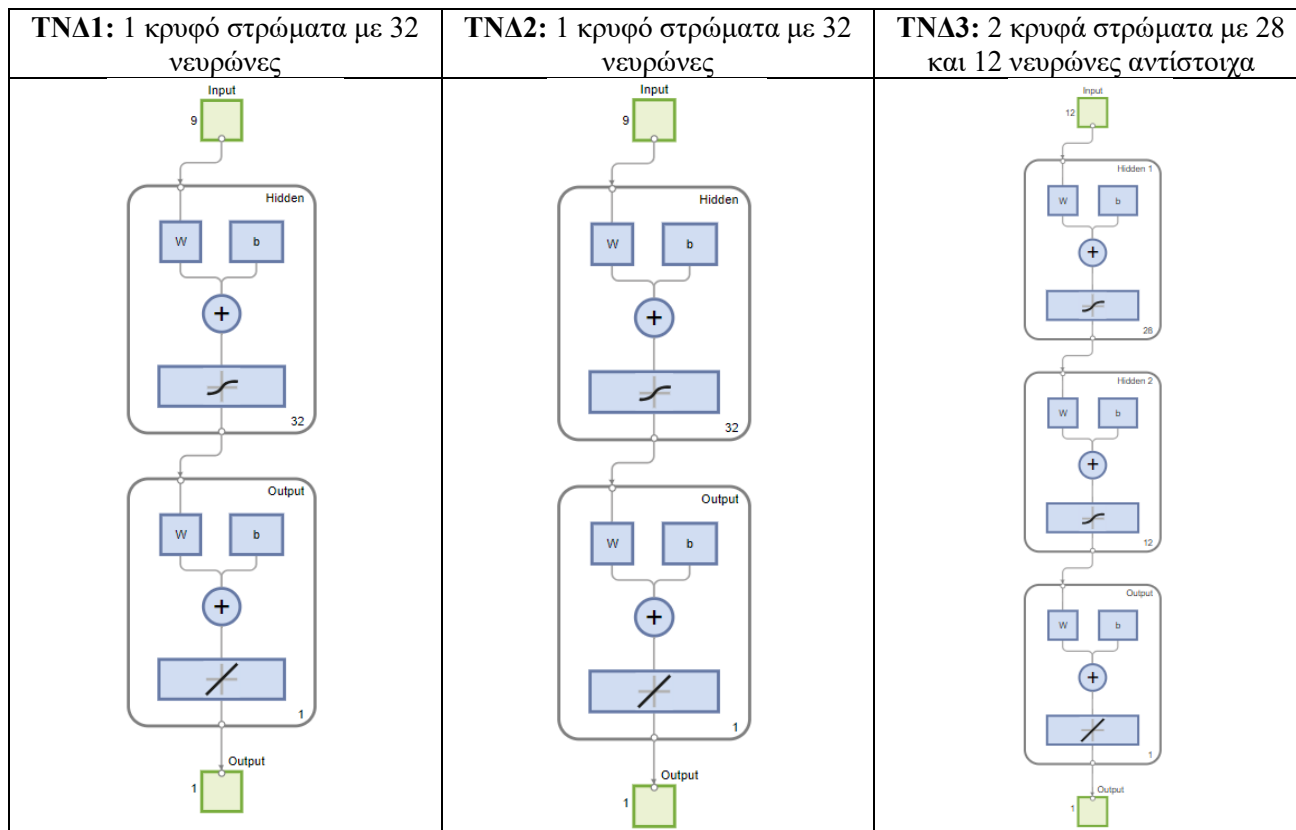


Σχήμα 6.31 (α) Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5} για το TNΔ1· (β) Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5} για το TNΔ2· (γ) Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5} για το TNΔ3

6.6.2. ΤΝΔ Ακαδημία Πλάτωνος Μέσα – Έξω

Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 5.6 αναπτύχθηκαν έξι ΤΝΔ με σκοπό την πρόβλεψη της εσωτερικής συγκέντρωσης $PM_{2.5}$. Στα πρώτα τρία με δεδομένα εισόδου μία ώρα πριν θα γίνει απλή αναφορά καθώς δεν είχαν την επιθυμητή ποιότητα αποτελεσμάτων, συγκριτικά με τα υπόλοιπα τρία ΤΝΔ με δεδομένα εισόδου 24 ώρες πριν τα οποία θα σχολιαστούν περαιτέρω.

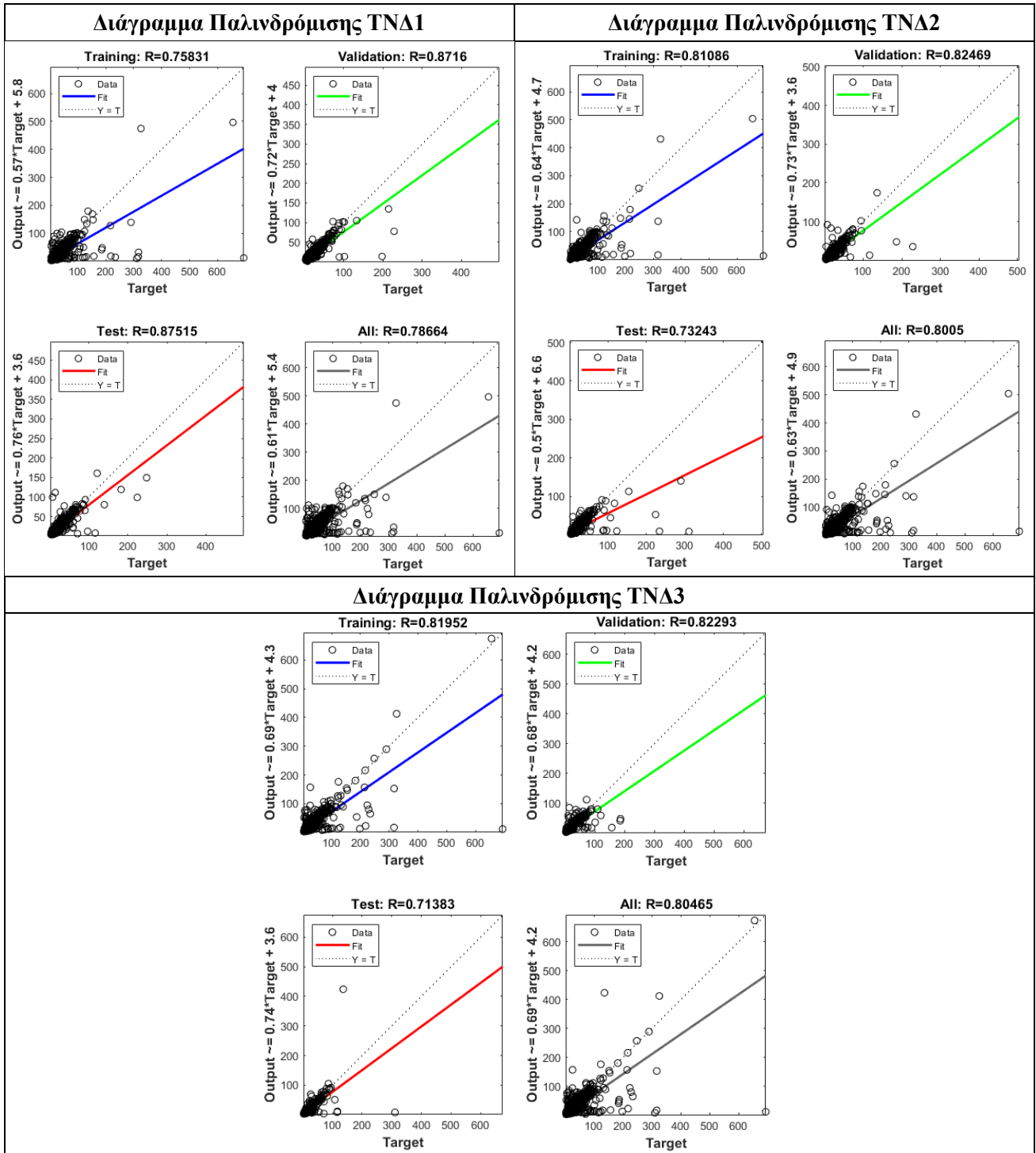
- Με δεδομένα εισόδου 1 ώρα πριν



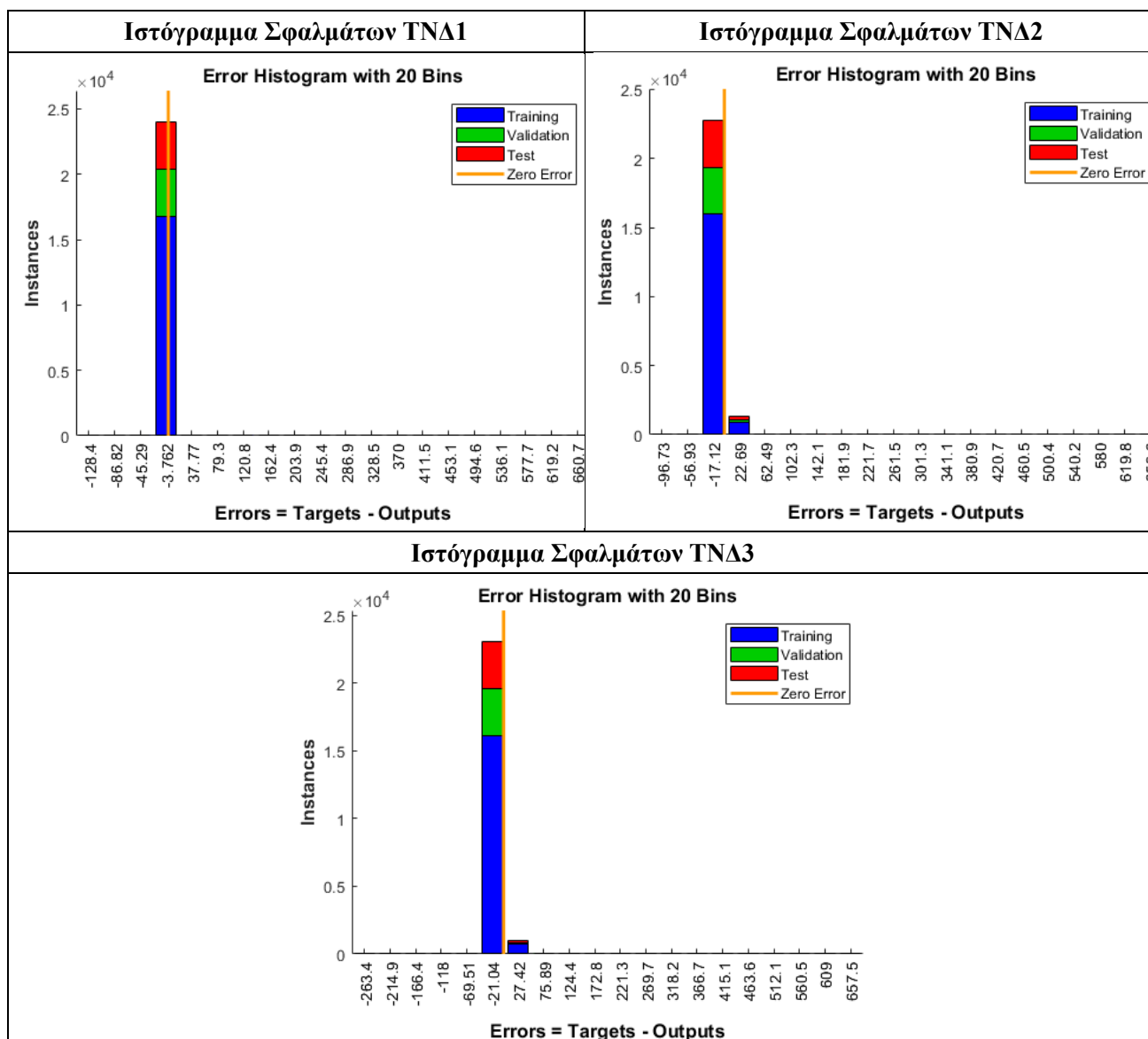
Πίνακας 16. Function Fitting Neural Network view των τριών ΤΝΔ

Εκπαίδευση ΤΝΔ1	Εκπαίδευση ΤΝΔ2	Εκπαίδευση ΤΝΔ3																																																																																				
<p>Training Results</p> <p>Training finished: Met validation criterion ✔</p> <p>Training Progress</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Unit</th> <th>Initial Value</th> <th>Stopped Value</th> <th>Target Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Epoch</td> <td>0</td> <td>12</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>Elapsed Time</td> <td>-</td> <td>00:00:07</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Performance</td> <td>1.59e+05</td> <td>70.4</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Gradient</td> <td>8.98e+05</td> <td>7.46</td> <td>1e-07</td> </tr> <tr> <td>Mu</td> <td>0.001</td> <td>1</td> <td>1e+10</td> </tr> <tr> <td>Validation Checks</td> <td>0</td> <td>6</td> <td>6</td> </tr> </tbody> </table> <p>Training Algorithms</p> <p>Data Division: Random dividerand Training: Levenberg-Marquardt trainlm Performance: Mean Squared Error mse Calculations: MEX</p>	Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value	Epoch	0	12	1000	Elapsed Time	-	00:00:07	-	Performance	1.59e+05	70.4	0	Gradient	8.98e+05	7.46	1e-07	Mu	0.001	1	1e+10	Validation Checks	0	6	6	<p>Training Results</p> <p>Training finished: Met validation criterion ✔</p> <p>Training Progress</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Unit</th> <th>Initial Value</th> <th>Stopped Value</th> <th>Target Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Epoch</td> <td>0</td> <td>19</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>Elapsed Time</td> <td>-</td> <td>00:00:05</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Performance</td> <td>2.72e+05</td> <td>56.2</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Gradient</td> <td>8.72e+05</td> <td>40.8</td> <td>1e-07</td> </tr> <tr> <td>Mu</td> <td>0.001</td> <td>0.1</td> <td>1e+10</td> </tr> <tr> <td>Validation Checks</td> <td>0</td> <td>6</td> <td>6</td> </tr> </tbody> </table> <p>Training Algorithms</p> <p>Data Division: Random dividerand Training: Levenberg-Marquardt trainlm Performance: Mean Squared Error mse Calculations: MEX</p>	Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value	Epoch	0	19	1000	Elapsed Time	-	00:00:05	-	Performance	2.72e+05	56.2	0	Gradient	8.72e+05	40.8	1e-07	Mu	0.001	0.1	1e+10	Validation Checks	0	6	6	<p>Training Results</p> <p>Training finished: Met validation criterion ✔</p> <p>Training Progress</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Unit</th> <th>Initial Value</th> <th>Stopped Value</th> <th>Target Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Epoch</td> <td>0</td> <td>18</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>Elapsed Time</td> <td>-</td> <td>00:00:21</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Performance</td> <td>2.58e+05</td> <td>54.1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Gradient</td> <td>1.75e+06</td> <td>213</td> <td>1e-07</td> </tr> <tr> <td>Mu</td> <td>0.001</td> <td>0.1</td> <td>1e+10</td> </tr> <tr> <td>Validation Checks</td> <td>0</td> <td>6</td> <td>6</td> </tr> </tbody> </table> <p>Training Algorithms</p> <p>Data Division: Random dividerand Training: Levenberg-Marquardt trainlm Performance: Mean Squared Error mse Calculations: MEX</p>	Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value	Epoch	0	18	1000	Elapsed Time	-	00:00:21	-	Performance	2.58e+05	54.1	0	Gradient	1.75e+06	213	1e-07	Mu	0.001	0.1	1e+10	Validation Checks	0	6	6
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value																																																																																			
Epoch	0	12	1000																																																																																			
Elapsed Time	-	00:00:07	-																																																																																			
Performance	1.59e+05	70.4	0																																																																																			
Gradient	8.98e+05	7.46	1e-07																																																																																			
Mu	0.001	1	1e+10																																																																																			
Validation Checks	0	6	6																																																																																			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value																																																																																			
Epoch	0	19	1000																																																																																			
Elapsed Time	-	00:00:05	-																																																																																			
Performance	2.72e+05	56.2	0																																																																																			
Gradient	8.72e+05	40.8	1e-07																																																																																			
Mu	0.001	0.1	1e+10																																																																																			
Validation Checks	0	6	6																																																																																			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value																																																																																			
Epoch	0	18	1000																																																																																			
Elapsed Time	-	00:00:21	-																																																																																			
Performance	2.58e+05	54.1	0																																																																																			
Gradient	1.75e+06	213	1e-07																																																																																			
Mu	0.001	0.1	1e+10																																																																																			
Validation Checks	0	6	6																																																																																			

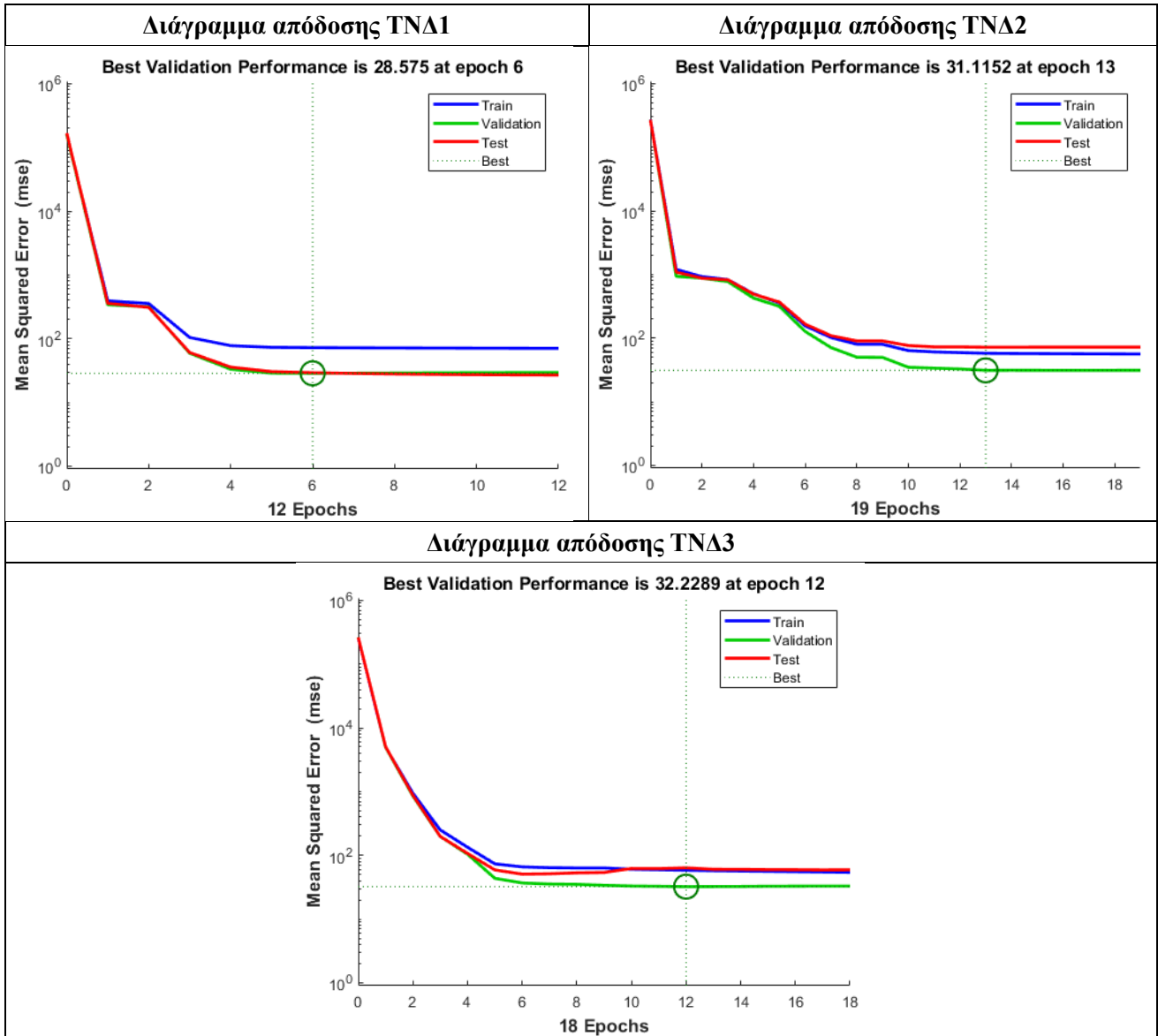
Πίνακας 17. Εκπαίδευση των ΤΝΔ



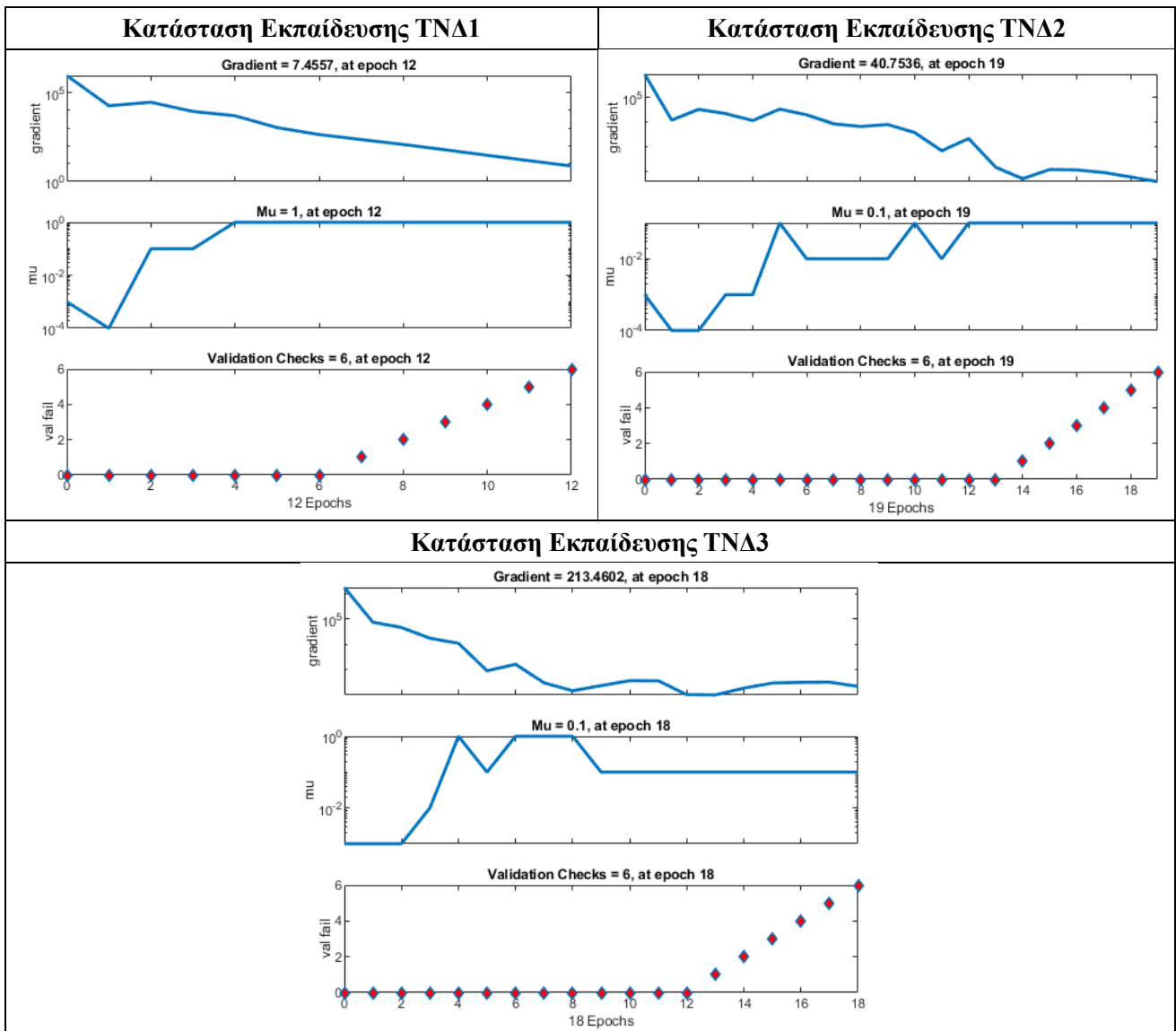
Πίνακας 18. Διαγράμματα Παλινδρόμησης των TNΔ



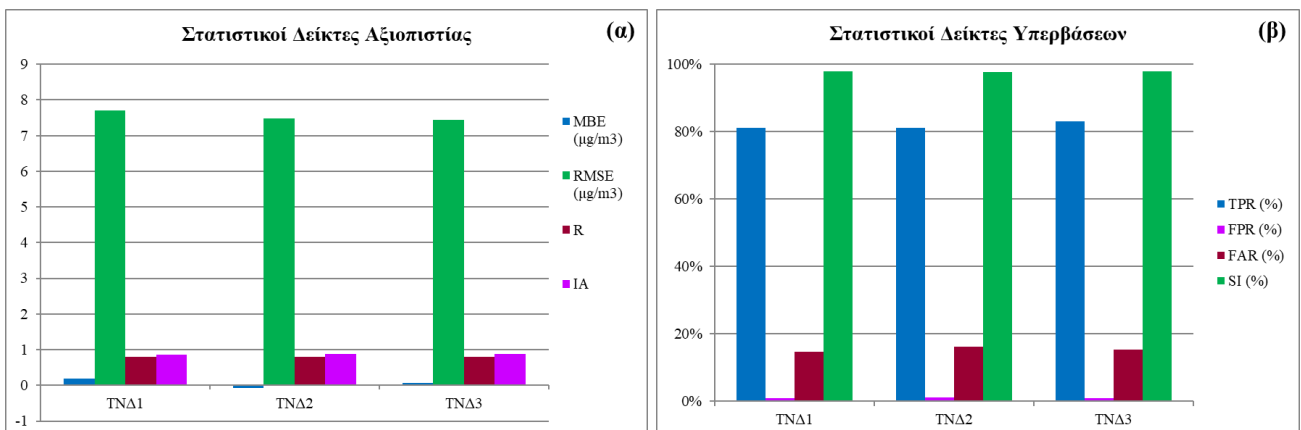
Πίνακας 19 Ιστόγραμμα σφαλμάτων των ΤΝΔ



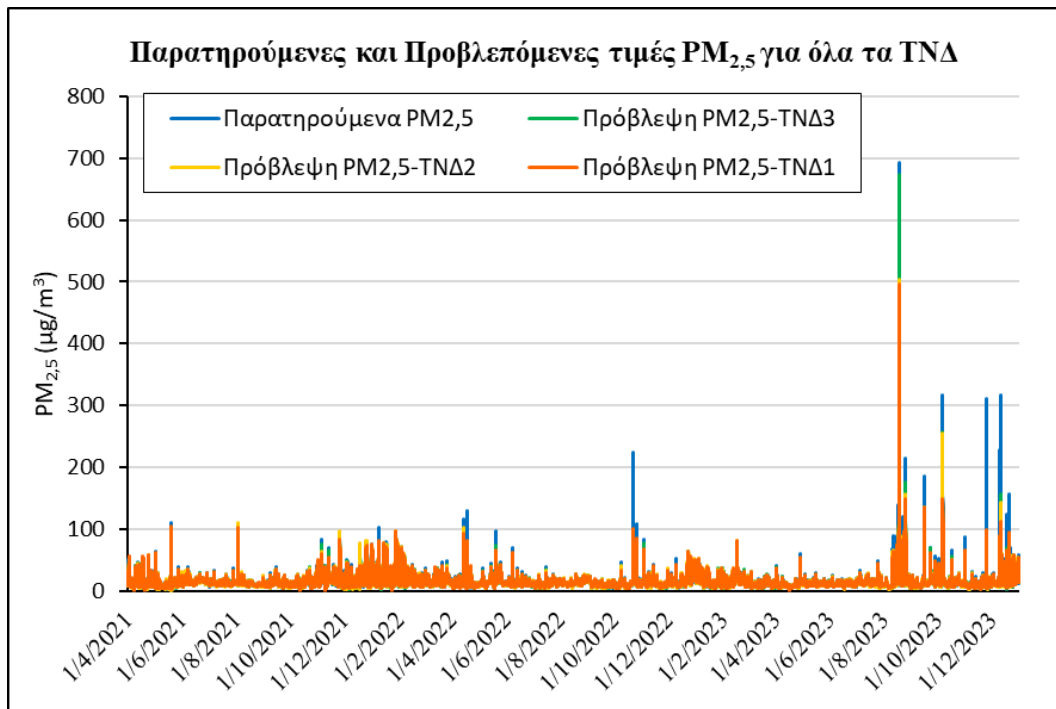
Πίνακας 20. Διαγράμματα απόδοσης των ΤΝΔ



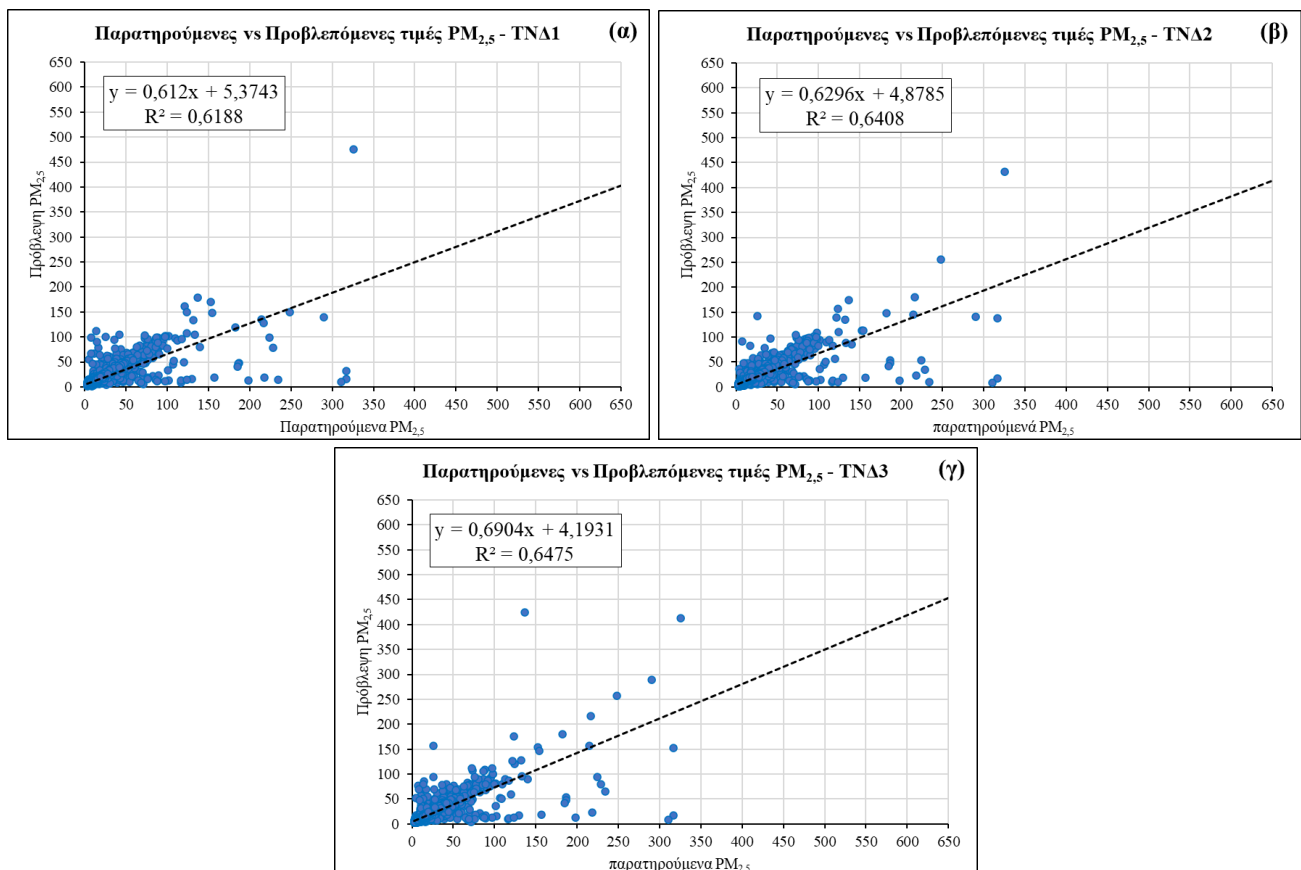
Πίνακας 21. Διαγράμματα Κατάστασης εκπαίδευσης των TNA



Σχήμα 6.32 (α) Σχηματική απεικόνιση των δεικτών αξιοπιστίας: (β) Σχηματική απεικόνιση των δεικτών υπερβάσεων



Σχήμα 6.33 Πραγματικές και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5}

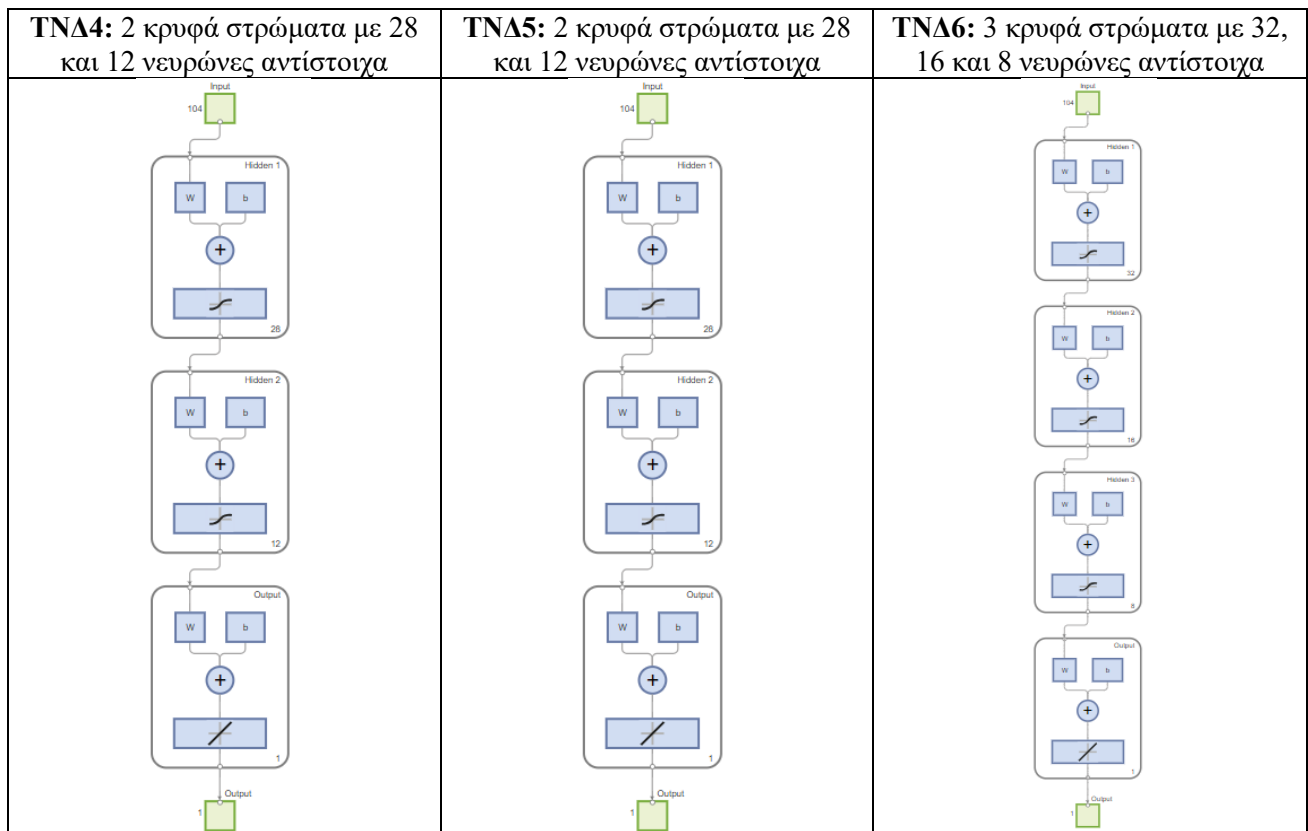


Σχήμα 6.34 (α) Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5} για το TNΔ1· (β) Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5} για το TNΔ2· (γ) Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5} για το TNΔ3

Παρά τη φαινομενικά καλή απόδοσή τους, τα παραπάνω νευρωνικά δεν είχαν την επιθυμητή συσχέτιση με τις πραγματικές μετρήσεις όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.33 και στα Σχήμα 6.34α, β και γ.

– Με δεδομένα εισόδου 24 ώρες πριν

Για την πρόβλεψη της εσωτερικής συγκέντρωσης $PM_{2.5}$ στην Ακαδημία Πλάτωνος, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από την εξωτερική συγκέντρωση αλλά και προηγούμενες εσωτερικές μετρήσεις αναπτύχθηκαν τρία νευρωνικά. Δύο με δύο κρυφά στρώματα με 28 και 12 νευρώνες αντίστοιχα και ένα με τρία κρυφά στρώματα με 32, 16 και 8 νευρώνες αντίστοιχα.



Πίνακας 22. Function Fitting Neural Network view των τριών ΤΝΔ

- TNΔ4:
- Εποχές: 13
 - Χρόνος εκτέλεσης: 3 mins 58 secs
 - Απόδοση: 41,7
 - Κλίση: 2356,8
 - Mu: 0,01
 - Έλεγχοι επικύρωσης: 6

Training Progress			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	13	1000
Elapsed Time	-	00:03:58	-
Performance	1.11e+05	41.7	0
Gradient	2.02e+06	2356.8	1e-07
Mu	0.001	0.01	1e+10
Validation Checks	0	6	6

Training Algorithms

Data Division: Random dividerand
 Training: Levenberg-Marquardt trainlm
 Performance: Mean Squared Error mse
 Calculations: MEX

Εικόνα 6.4 Training Progress του TNΔ4

Το μοντέλο είχε 16 ολοκληρωμένες διελεύσεις ολόκληρου του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης, σε χρόνο 3 λεπτά και 58 δευτερόλεπτα. Το MSE των δεδομένων εκπαίδευσης είναι 41,7. Το gradient είναι ίσο με 2356,8, που είναι σχετικά υψηλό, υποδηλώνοντας ότι το δίκτυο απέχει ακόμα πολύ από τη βέλτιστη λύση. Το mu

ίσονται με 0,01, επομένως ο αλγόριθμος LM μιμείται την μέθοδο Gauss-Newton. Τέλος, έγιναν 6 έλεγχοι επικύρωσης κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης του μοντέλου.

- TNΔ5:
- Εποχές: 16
 - Χρόνος εκτέλεσης: 3 mins 58 secs
 - Απόδοση: 41,7
 - Κλίση: 39,8
 - Mu: 1
 - Έλεγχοι επικύρωσης: 6

Training Progress			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	16	1000
Elapsed Time	-	00:03:58	-
Performance	1.11e+05	41.7	0
Gradient	2.02e+06	39.8	1e-07
Mu	0.001	1	1e+10
Validation Checks	0	6	6

Training Algorithms

Data Division: Random dividerand
 Training: Levenberg-Marquardt trainlm
 Performance: Mean Squared Error mse
 Calculations: MEX

Εικόνα 6.5 Training Progress του TNΔ5

Το μοντέλο είχε 16 ολοκληρωμένες διελεύσεις ολόκληρου του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης, σε χρόνο 3 λεπτά και 58 δευτερόλεπτα. Το MSE των δεδομένων εκπαίδευσης είναι 41,7. Το gradient είναι ίσο με 39,8, μια χαμηλή τιμή κλίσης υποδηλώνει ότι το δίκτυο πλησιάζει σε ένα τοπικό ή παγκόσμιο ελάχιστο του MSE. Το mu ίσονται με 1, επομένως ο αλγόριθμος LM συμπεριφέρεται σαν gradient descent. Τέλος, έγιναν 6 έλεγχοι επικύρωσης κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης του μοντέλου.

- TNΔ6:
- Εποχές: 14
 - Χρόνος εκτέλεσης: 4 mins 49 secs
 - Απόδοση: 15,5
 - Κλίση: 1860
 - Mu: 0,1
 - Έλεγχοι επικύρωσης: 6

Training Progress			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	14	1000
Elapsed Time	-	00:04:49	-
Performance	2.67e+04	15.5	0
Gradient	6.52e+05	1.86e+03	1e-07
Mu	0.001	0.1	1e+10
Validation Checks	0	6	6

Training Algorithms

Data Division: Random dividerand
 Training: Levenberg-Marquardt trainlm
 Performance: Mean Squared Error mse
 Calculations: MEX

Εικόνα 6.6 Training Progress του TNΔ6

Το μοντέλο είχε 14 ολοκληρωμένες διελεύσεις ολόκληρου του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης, σε χρόνο 4 λεπτά και 49 δευτερόλεπτα. Το MSE των δεδομένων εκπαίδευσης είναι 15,5. Το gradient είναι ίσο με 1860 που είναι σχετικά υψηλό, υποδηλώνοντας ότι το δίκτυο απέχει ακόμα πολύ από τη βέλτιστη λύση. Το mu ίσονται με 0,1, επομένως ο αλγόριθμος LM μιμείται την μέθοδο Gauss-Newton. Τέλος, έγιναν 6 έλεγχοι επικύρωσης κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης του μοντέλου.

Παρατηρείται ότι ο χρόνος εκτέλεσης για τα παραπάνω νευρωνικά είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν των TNΔ της περίπτωσης του υποκεφαλαίου 6.6.1. Αυτό οφείλεται στον αισθητά μεγαλύτερο όγκο δεδομένων εισόδου των συγκεκριμένων νευρωνικών.

TNΔ4

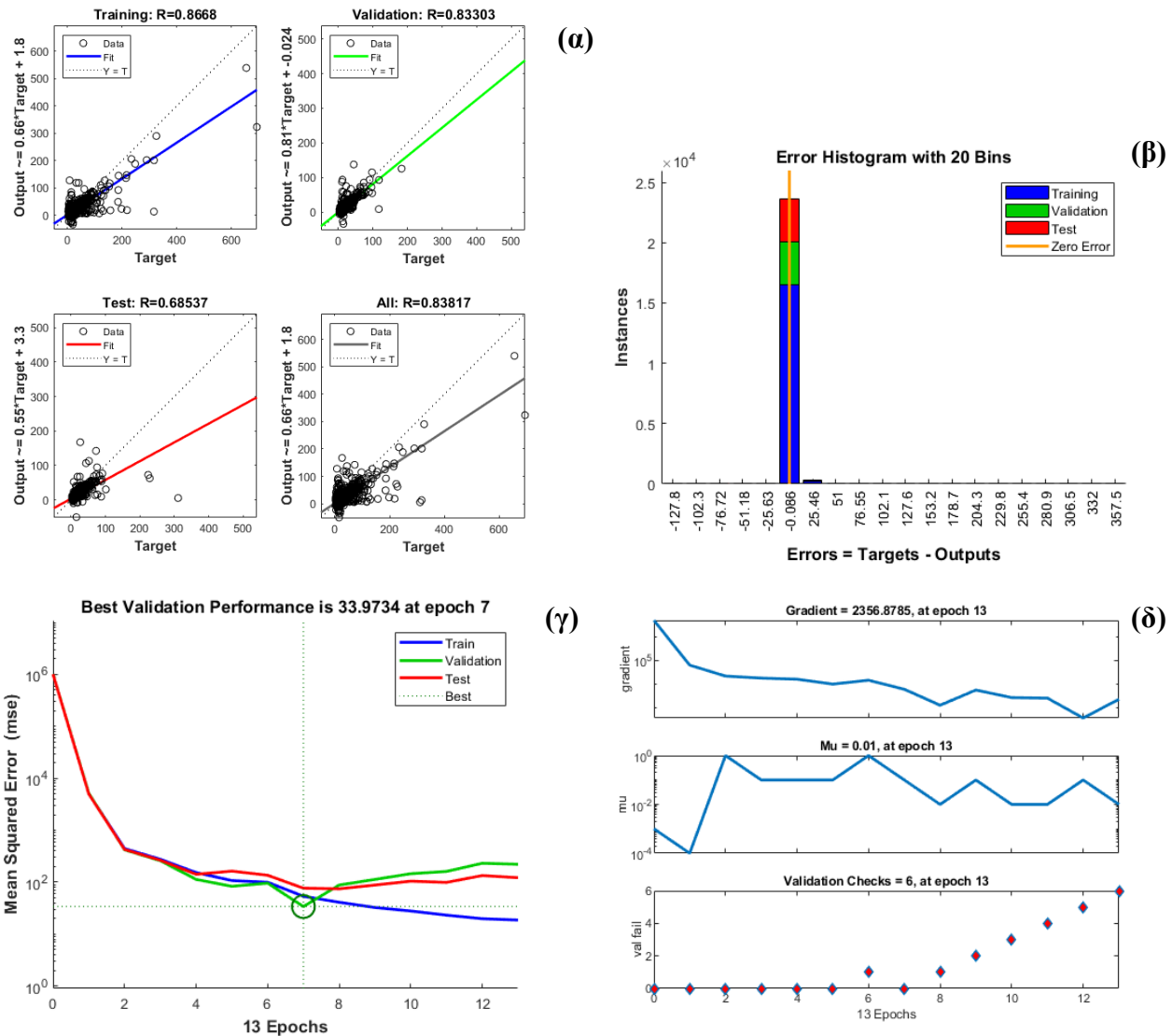
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.35α, οι τιμές R για την εκπαίδευση, την επικύρωση, τη δοκιμή και όλα τα σύνολα δεδομένων είναι 0,8668, 0,83303, 0,68537 και 0,83817, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν μια ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των τιμών στόχου $PM_{2,5}$, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο αποδίδει καλά στην καταγραφή των υποκείμενων σχέσεων στα δεδομένα. Η ελαφρά μείωση του R από εκπαίδευση σε δοκιμή υποδηλώνει ότι το μοντέλο τείνει να υπερπροσαρμόζει, αλλά είναι εντός ενός λογικού εύρους.

Το ιστόγραμμα σφάλματος του νευρωνικού παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την κατανομή των προγνωστικών ανακρίβειών που σχετίζονται με το μοντέλο νευρωνικών δικτύων. Μέσω της απεικόνισης της συχνότητας διαφόρων μεγεθών σφάλματος, μπορούμε να βελτιώσουμε την κατανόηση της αποτελεσματικότητας του μοντέλου και να εντοπίσουμε πιθανές οδούς βελτίωσης. Παρατηρώντας το ιστόγραμμα σφάλματος του TNΔ4 (Σχήμα 6.35β) είναι εμφανές η κατανομή βρίσκεται στα αριστερά. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει σχετικά μικρό σφάλμα και το ότι είναι στις αρνητικές τιμές υποδηλώνει ότι το μοντέλο υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές. Επίσης, η πλειοψηφία των σφαλμάτων συγκεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο είναι γενικά ακριβές για τις περισσότερες περιπτώσεις. Η έλλειψη ακραίων σημείων υποδεικνύει την ευκολία του μοντέλου να προβλέψει με σχετική ακρίβεια σε όλο το εύρος των τιμών.

Όσον αφορά το Σχήμα 6.35γ, το MSE εκπαίδευσης συνεχίζει να μειώνεται σημαντικά, ενώ το MSE επικύρωσης αρχίζει να αυξάνεται μετά από περίπου την εποχή 7, κάτι που υποδηλώνει ότι το μοντέλο μαθαίνει πολύ καλά τα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά δυσκολεύεται να γενικεύσει σε μη ορατά δεδομένα. Το χαμηλότερο MSE επικύρωσης, δηλαδή το σημείο όπου το μοντέλο είχε καλύτερη απόδοση, επιτυγχάνεται στην εποχή 7 από τις 13 και είναι 33,9734. Αυτό υποδηλώνει ότι υπάρχει κάποια απόκλιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών τιμών, κάτι που μπορεί να οφείλεται σε θόρυβο στα δεδομένα, προκατάληψη του μοντέλου ή άλλα ζητήματα κατά την εκπαίδευση. Το κυκλικό σημείο στην καμπύλη επικύρωσης υποδεικνύει την εποχή κατά την οποία θα μπορούσε να είχε εφαρμοστεί πρόωγη διακοπή για να αποφευχθεί η υπερβολική προσαρμογή.

Το Σχήμα 6.35δ απεικονίζει τους ελέγχους gradient, Mu και επικύρωσης κατά τη διάρκεια των 13 εποχών.

- Gradient: Η συνολική τάση της κλίσης είναι πτωτική, υποδεικνύοντας ότι το δίκτυο σημειώνει πρόοδο στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απώλειας. Υπάρχουν διακυμάνσεις στην τιμή της κλίσης, κάτι που είναι σύνηθες κατά τη διάρκεια της προπόνησης. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να αποδοθούν στον стоχαστικό χαρακτήρα της εκπαιδευτικής διαδικασίας, όπου το δίκτυο ενημερώνεται με βάση τυχαία επιλεγμένες παρτίδες δεδομένων. Η τελική τιμή κλίσης στην εποχή 13 είναι 2356,8785 που είναι σχετικά υψηλή, υποδηλώνοντας ότι το δίκτυο απέχει ακόμα πολύ από τη βέλτιστη λύση.
- Mu: Το mu ξεκινά με μια σχετικά χαμηλή τιμή, μια κοινή στρατηγική σε πολλές ρυθμίσεις εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων, ειδικά όταν αντιμετωπίζουμε σύνθετα προβλήματα ή όταν η αρχική εικασία απέχει πολύ από τη βέλτιστη λύση. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να κάνει μεγαλύτερα βήματα αρχικά, οδηγώντας ενδεχομένως σε ταχύτερη σύγκλιση. Παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τις πρώτες εποχές, μια συμπεριφορά που παρατηρείται συχνά στους προσαρμοστικούς αλγόριθμους ρυθμού μάθησης, όπου ο ρυθμός μάθησης προσαρμόζεται με βάση τις πληροφορίες κλίσης. Παρατηρείται ότι η τιμή του mu δεν σταθεροποιείται. Αυτό υποδηλώνει ότι το δίκτυο μπορεί να μαθαίνει πολύ καλά τα δεδομένα εκπαίδευσης, οδηγώντας σε κακή απόδοση σε αόρατα δεδομένα. Η τελική τιμή του mu (0,01) στην εποχή 13 υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει σε ένα λογικό ρυθμό εκμάθησης.
- Έλεγχος επικύρωσης: Το μοντέλο φαίνεται να έχει καλή απόδοση στις πρώτες εποχές, με λίγες αποτυχίες επικύρωσης. Γύρω στην εποχή 6, το μοντέλο αρχίζει να αντιμετωπίζει μια σειρά αποτυχιών επικύρωσης, υποδεικνύοντας πιθανώς ότι το μοντέλο αρχίζει να προσαρμόζεται υπερβολικά στα δεδομένα εκπαίδευσης. Οι αστοχίες συνεχίζουν να συμβαίνουν σποραδικά κατά τις υπόλοιπες εποχές, υποδηλώνοντας ότι η απόδοση του μοντέλου παρουσιάζει διακυμάνσεις. Η συγκέντρωση των αστοχιών προς το τέλος υποδηλώνει ένα πιθανό πρόβλημα υπερπροσαρμογής, όπου το μοντέλο εξειδικεύεται υπερβολικά στα δεδομένα εκπαίδευσης.



Σχήμα 6.35 (α) Διαγράμματα παλινδρόμησης (regression) (β) Ιστόγραμμα σφαλμάτων (error histogram) (γ) Διάγραμμα απόδοσης (Validation performance) (δ) Διαγράμματα κατάστασης εκπαίδευσης (training state)

TNΔ5

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.36α, οι τιμές R για την εκπαίδευση, την επικύρωση, τη δοκιμή και όλα τα σύνολα δεδομένων είναι 0,83054, 0,73066, 0,80986 και 0,81233, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν μια μέτρια έως ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των τιμών στόχου $PM_{2.5}$, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο συλλαμβάνει τις υποκείμενες σχέσεις στα δεδομένα σε κάποιο βαθμό. Τα διαγράμματα διασποράς αποκαλύπτουν μια γενική τάση των προβλεπόμενων τιμών $PM_{2.5}$ που ευθυγραμμίζονται στενά με τις τιμές στόχου $PM_{2.5}$, με κάποιο βαθμό διασποράς γύρω από τις προσαρμοσμένες γραμμές. Αυτό δείχνει ότι το μοντέλο δεν είναι τέλει και μπορεί να παρουσιάζει κάποιο βαθμό λάθους στις προβλέψεις του.

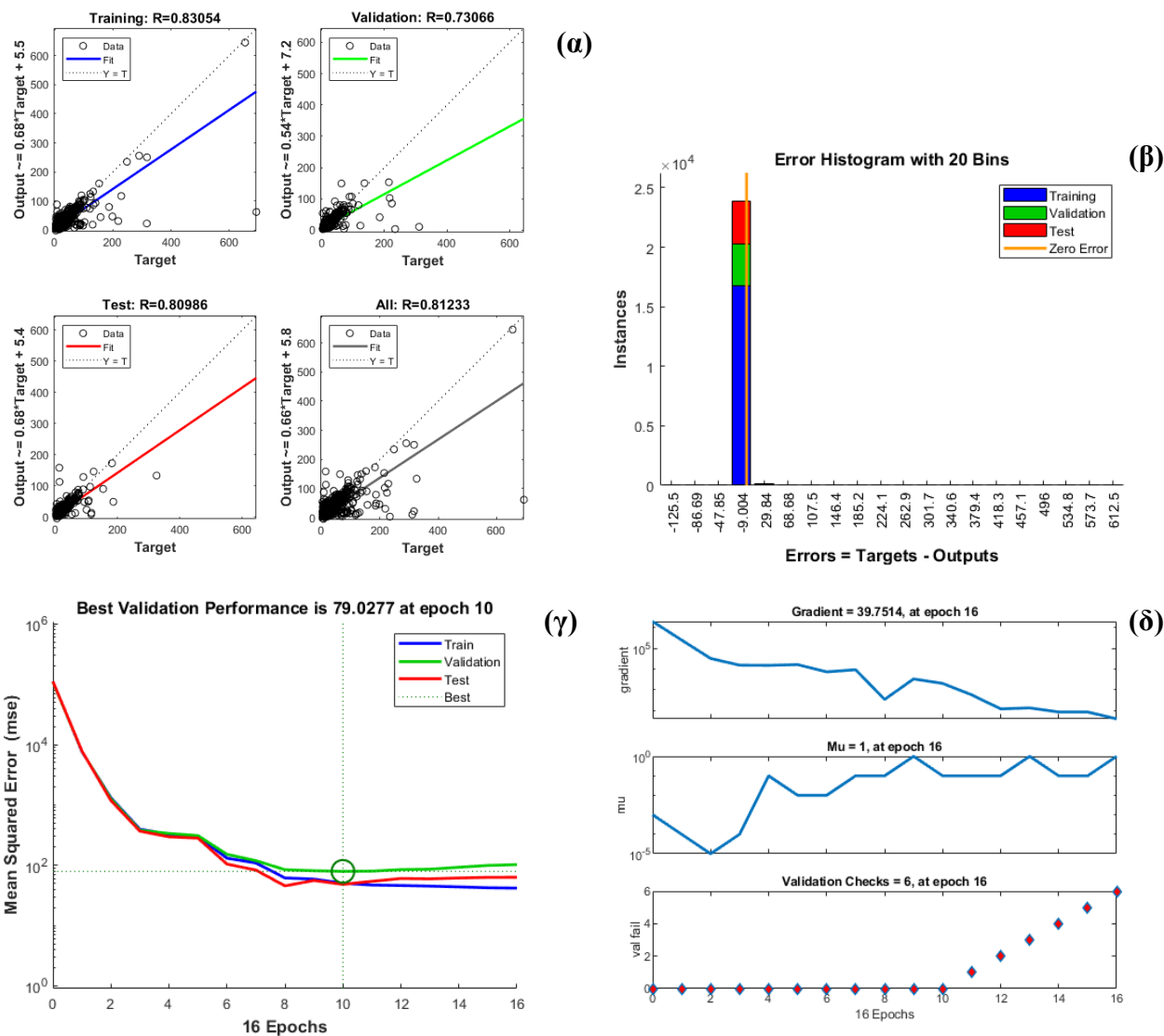
Παρατηρώντας το ιστόγραμμα σφάλματος του TNΔ5 (Σχήμα 6.36β) είναι εμφανές η κατανομή βρίσκεται στα αριστερά. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει αρνητικό σφάλμα και υποδηλώνει ότι το μοντέλο υποεκτιμά τις πραγματικές τιμές. Επίσης, η πλειοψηφία των σφαλμάτων συγκεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο είναι γενικά ακριβές για τις περισσότερες περιπτώσεις. Η έλλειψη ακραίων σημείων υποδεικνύει την ευκολία του μοντέλου να προβλέψει με σχετική ακρίβεια σε όλο το εύρος των τιμών.

Όσον αφορά το Σχήμα 6.36γ, το MSE εκπαίδευσης συνεχίζει να μειώνεται σημαντικά, ενώ το MSE επικύρωσης αρχίζει να αυξάνεται μετά από περίπου την εποχή 10, κάτι που υποδηλώνει ότι το μοντέλο μαθαίνει πολύ καλά τα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά δυσκολεύεται να γενικεύσει σε μη ορατά δεδομένα. Το χαμηλότερο MSE επικύρωσης, δηλαδή το σημείο όπου το μοντέλο είχε καλύτερη απόδοση, επιτυγχάνεται στην εποχή 10 από τις

16 και είναι 79,0277. Αυτό υποδηλώνει ότι υπάρχει σχετικά μεγάλη απόκλιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών τιμών, κάτι που μπορεί να οφείλεται σε θόρυβο στα δεδομένα, προκατάληψη του μοντέλου ή άλλα ζητήματα κατά την εκπαίδευση. Το κυκλικό σημείο στην καμπύλη επικύρωσης υποδεικνύει την εποχή κατά την οποία θα μπορούσε να είχε εφαρμοστεί πρόωρη διακοπή για να αποφευχθεί η υπερβολική προσαρμογή.

Το Σχήμα 6.36δ απεικονίζει τους ελέγχους gradient, Mu και επικύρωσης κατά τη διάρκεια των 16 εποχών.

- Gradient: Η συνολική τάση της κλίσης είναι πτωτική, υποδεικνύοντας ότι το δίκτυο σημειώνει πρόοδο στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απώλειας. Υπάρχουν διακυμάνσεις στην τιμή της κλίσης, κάτι που είναι σύνηθες κατά τη διάρκεια της προπόνησης. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να αποδοθούν στον στοχαστικό χαρακτήρα της εκπαιδευτικής διαδικασίας, όπου το δίκτυο ενημερώνεται με βάση τυχαία επιλεγμένες παρτίδες δεδομένων. Η τελική τιμή κλίσης στην εποχή 16 είναι 39,7514.
- Mu: Το mu ξεκινά με μια σχετικά χαμηλή τιμή, μια κοινή στρατηγική σε πολλές ρυθμίσεις εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων, ειδικά όταν αντιμετωπίζουμε σύνθετα προβλήματα ή όταν η αρχική εικασία απέχει πολύ από τη βέλτιστη λύση. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να κάνει μεγαλύτερα βήματα αρχικά, οδηγώντας ενδεχομένως σε ταχύτερη σύγκλιση. Παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τις πρώτες εποχές, μια συμπεριφορά που παρατηρείται συχνά στους προσαρμοστικούς αλγόριθμους ρυθμού μάθησης, όπου ο ρυθμός μάθησης προσαρμόζεται με βάση τις πληροφορίες κλίσης. Παρατηρείται ότι η τιμή του mu δεν σταθεροποιείται. Αυτό υποδηλώνει ότι το δίκτυο μπορεί να μαθαίνει πολύ καλά τα δεδομένα εκπαίδευσης, οδηγώντας σε κακή απόδοση σε άορατα δεδομένα. Η τελική τιμή του mu (1) στην εποχή 16 υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος κάνει πολύ μεγάλα βήματα κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης..
- Έλεγχος επικύρωσης: Το μοντέλο φαίνεται να έχει καλή απόδοση στις πρώτες εποχές, με λίγες αποτυχίες επικύρωσης. Η συγκέντρωση των αστοχιών προς το τέλος υποδηλώνει ένα πιθανό πρόβλημα υπερπροσαρμογής, όπου το μοντέλο εξειδικεύεται υπερβολικά στα δεδομένα εκπαίδευσης.



Σχήμα 6.36 (α) Διαγράμματα παλινδρόμησης (regression) (β) Ιστόγραμμα σφαλμάτων (error histogram) (γ) Διάγραμμα απόδοσης (Validation performance) (δ) Διαγράμματα κατάστασης εκπαίδευσης (training state)

TNΔ6

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.37α, οι τιμές R για την εκπαίδευση, την επικύρωση, τη δοκιμή και όλα τα σύνολα δεδομένων είναι 0,83054, 0,73066, 0,80986 και 0,81233, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές υποδεικνύουν μια μέτρια έως ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των τιμών στόχου $PM_{2.5}$, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο συλλαμβάνει τις υποκείμενες σχέσεις στα δεδομένα σε κάποιο βαθμό. Τα διαγράμματα διασποράς αποκαλύπτουν μια γενική τάση των προβλεπόμενων τιμών $PM_{2.5}$ που ευθυγραμμίζονται στενά με τις τιμές στόχου $PM_{2.5}$, με κάποιο βαθμό διασποράς γύρω από τις προσαρμοσμένες γραμμές. Αυτό δείχνει ότι το μοντέλο δεν είναι τέλει και μπορεί να παρουσιάζει κάποιο βαθμό λάθους στις προβλέψεις του.

Παρατηρώντας το ιστόγραμμα σφάλματος του TNΔ6 (Σχήμα 6.37β) είναι εμφανές η κατανομή βρίσκεται στα αριστερά αλλά με θετικές τιμές. Αυτό δείχνει ότι υπάρχει μικρό σφάλμα και ότι το μοντέλο υπερεκτιμά τις πραγματικές τιμές. Επίσης, η πλειοψηφία των σφαλμάτων συγκεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος, υποδηλώνοντας ότι το μοντέλο είναι γενικά ακριβές για τις περισσότερες περιπτώσεις. Η έλλειψη ακραίων σημείων υποδεικνύει την ευκολία του μοντέλου να προβλέψει με σχετική ακρίβεια σε όλο το εύρος των τιμών.

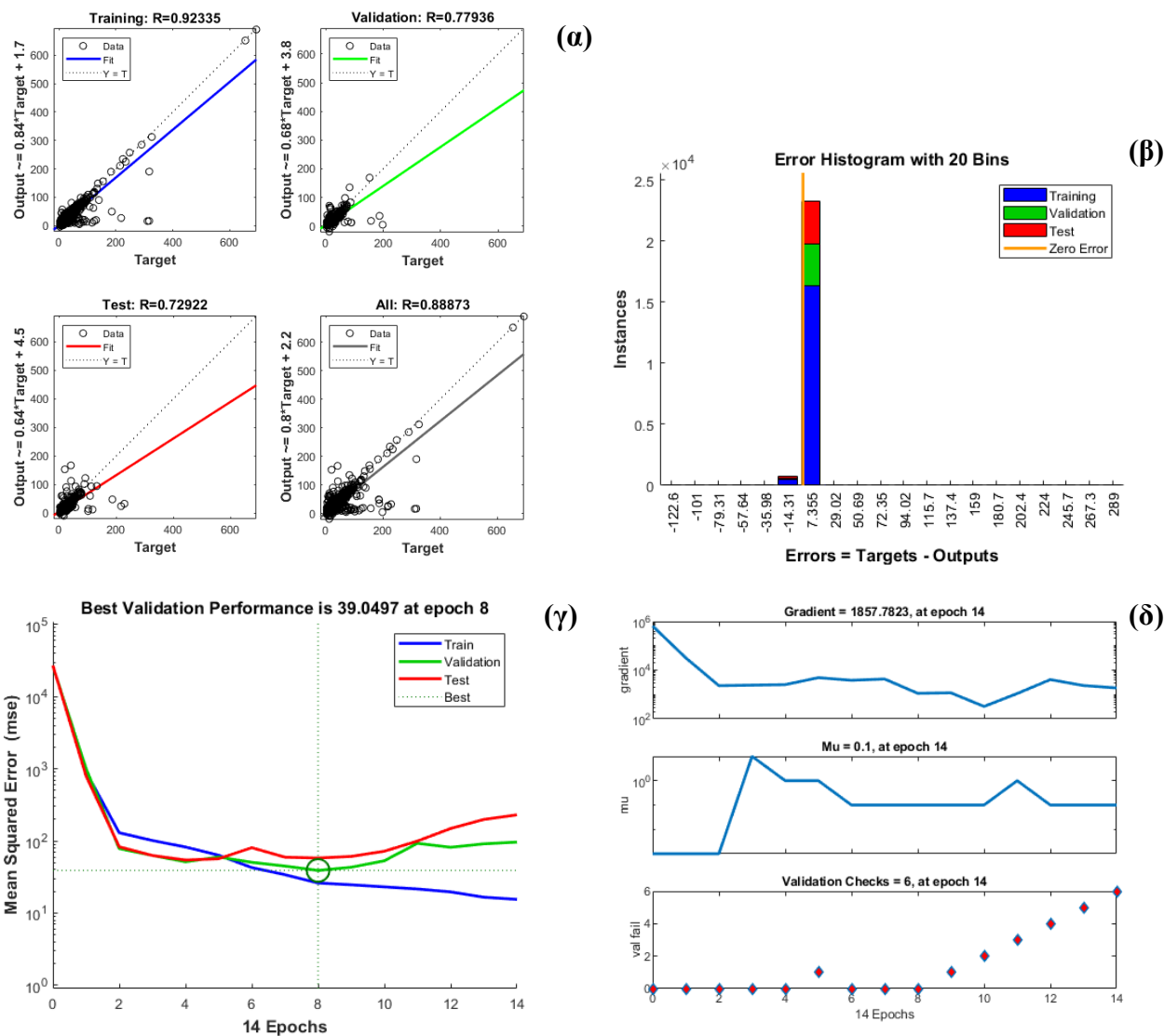
Όσον αφορά το Σχήμα 6.37γ, το MSE εκπαίδευσης συνεχίζει να μειώνεται σημαντικά, ενώ το MSE επικύρωσης αρχίζει να αυξάνεται μετά από περίπου την εποχή 8, κάτι που υποδηλώνει ότι το μοντέλο μαθαίνει πολύ καλά τα δεδομένα εκπαίδευσης, αλλά δυσκολεύεται να γενικεύσει σε μη ορατά δεδομένα. Το χαμηλότερο MSE

επικύρωσης, δηλαδή το σημείο όπου το μοντέλο είχε καλύτερη απόδοση, επιτυγχάνεται στην εποχή 8 από τις 14 και είναι 39,0497. Αυτό υποδηλώνει ότι υπάρχει σχετικά κάποια απόκλιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών τιμών, κάτι που μπορεί να οφείλεται σε θόρυβο στα δεδομένα, προκατάληψη του μοντέλου ή άλλα ζητήματα κατά την εκπαίδευση. Το κυκλικό σημείο στην καμπύλη επικύρωσης υποδεικνύει την εποχή κατά την οποία θα μπορούσε να είχε εφαρμοστεί πρόωρη διακοπή για να αποφευχθεί η υπερβολική προσαρμογή.

Το Σχήμα 6.37δ απεικονίζει τους ελέγχους gradient, Mu και επικύρωσης κατά τη διάρκεια των 14 εποχών.

- Gradient: Η συνολική τάση της κλίσης είναι πτωτική, υποδεικνύοντας ότι το δίκτυο σημειώνει πρόοδο στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης απώλειας. Υπάρχουν διακυμάνσεις στην τιμή της κλίσης, κάτι που είναι σύνηθες κατά τη διάρκεια της προπόνησης. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να αποδοθούν στον стоχαστικό χαρακτήρα της εκπαιδευτικής διαδικασίας, όπου το δίκτυο ενημερώνεται με βάση τυχαία επιλεγμένες παρτίδες δεδομένων. Η τελική τιμή κλίσης στην εποχή 14 είναι 1857,7829 που είναι σχετικά υψηλό, υποδηλώνοντας ότι το δίκτυο απέχει ακόμα πολύ από τη βέλτιστη λύση.
- Mu: Το mu ξεκινά με μια χαμηλή τιμή, μια κοινή στρατηγική σε πολλές ρυθμίσεις εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων, ειδικά όταν αντιμετωπίζουμε σύνθετα προβλήματα ή όταν η αρχική εικασία απέχει πολύ από τη βέλτιστη λύση. Αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να κάνει μεγαλύτερα βήματα αρχικά, οδηγώντας ενδεχομένως σε ταχύτερη σύγκλιση. Παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τις πρώτες εποχές, μια συμπεριφορά που παρατηρείται συχνά στους προσαρμοστικούς αλγόριθμους ρυθμού μάθησης, όπου ο ρυθμός μάθησης προσαρμόζεται με βάση τις πληροφορίες κλίσης. Παρατηρείται ότι η τιμή του mu δεν σταθεροποιείται. Αυτό υποδηλώνει ότι το δίκτυο μπορεί να μαθαίνει πολύ καλά τα δεδομένα εκπαίδευσης, οδηγώντας σε κακή απόδοση σε άορατα δεδομένα. Η τελική τιμή του mu (0,1) στην εποχή 14 υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος έχει συγκλίνει σε ένα λογικό ρυθμό εκμάθησης.
- Έλεγχος επικύρωσης: Το μοντέλο φαίνεται να έχει καλή απόδοση στις πρώτες εποχές, με λίγες αποτυχίες επικύρωσης. Η συγκέντρωση των αστοχιών προς το τέλος υποδηλώνει ένα πιθανό πρόβλημα υπερπροσαρμογής, όπου το μοντέλο εξειδικεύεται υπερβολικά στα δεδομένα εκπαίδευσης.

Παρατηρώντας συνολικά την απόδοση των τριών μοντέλων είναι εμφανές ότι το TNΔ6 είναι το καλύτερο. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην χρήση περισσότερων νευρών (3 αντί για 1 ή 2 στα TNΔ1 και 2 αντίστοιχα). Παρόλα αυτά, με την μεγάλη πυκνότητα των δεδομένων εισόδου αυξάνεται ο κίνδυνος υπερπροσαρμογής.



Σχήμα 6.37 (α) Διαγράμματα παλινδρόμησης (regression) (β) Ιστόγραμμα σφαλμάτων (error histogram) (γ) Διάγραμμα απόδοσης (Validation performance) (δ) Διαγράμματα κατάστασης εκπαίδευσης (training state)

Παρατηρώντας τον Πίνακα 23, τα μοντέλα TNΔ4 και TNΔ6 παρουσιάζουν $MBE < 0$, άρα υποεκτιμούν τα πραγματικά δεδομένα, ενώ το TNΔ5 έχει $MBE > 0$ που σημαίνει ότι υπερεκτιμά τα πραγματικά δεδομένα. Το TNΔ6 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συμφωνία και το TNΔ4 τη μεγαλύτερη ασυμφωνία. Το RMSE βρίσκεται σε κάθε περίπτωση μεταξύ των $5,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και των $7,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ με το TNΔ6 να εμφανίζει τη μικρότερη τιμή, δηλαδή προσεγγίζει καλύτερα τις προβλεπόμενες τιμές και το TNΔ5 να εμφανίζει τη μεγαλύτερη απόκλιση. Οι δείκτες συσχέτισης R και των τριών TNΔ εμφανίζουν ισχυρή θετική συσχέτιση. Τέλος, από τους δείκτες συμφωνίας είναι προφανές πως το TNΔ6 έχει τη μεγαλύτερη συμφωνία με τις πραγματικές τιμές, καθώς βρίσκεται πιο κοντά στο 1, με το TNΔ5 να εμφανίζει την μικρότερη. Οι δείκτες αυτοί δείχνουν ότι τα νευρωνικά έχουν σχετικά καλή προσέγγιση με τις πραγματικές τιμές και πολύ συμφωνία τιμών.

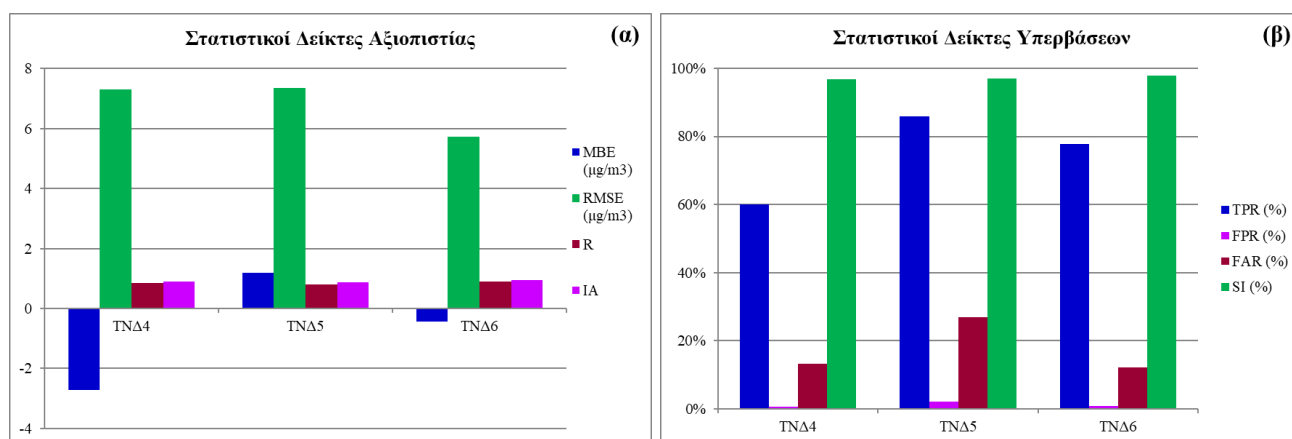
Στατιστικός Δείκτης Αξιοπιστίας	TNΔ4	TNΔ5	TNΔ6
MBE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-2,7243	1,1797	-0,4259
RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	7,2973	7,3647	5,7262
R	0,8424	0,8132	0,8895
IA	0,8888	0,8833	0,9390

Πίνακας 23. Στατιστικοί δείκτες αξιοπιστίας των TNΔ

Με βάση τον Πίνακα 24, το TPR είναι μεταξύ του 60% και του 86%, με το TNΔ3 να έχει το μικρότερο (60%) και το TNΔ5 το μεγαλύτερο (86%, άρα είναι αυτό που προβλέπει καλύτερα τις υπερβάσεις. Στη συνέχεια, ο δείκτης FPR παρουσιάζει μικρότερη τιμή (1%) για το TNΔ4 και TNΔ6 και μεγαλύτερη για το TNΔ5 (2%) και αντίστοιχα ο FAR παρουσιάζει χαμηλότερη τιμή (12%) για το TNΔ6 και μεγαλύτερη (27%) για το TNΔ5. Αυτό σημαίνει πως το TNΔ6 δίνει τις περισσότερες λάθος υπερβάσεις και λάθος συναγερμούς, ενώ το TNΔ4 τις λιγότερες. Τέλος, ο SI είναι έχει πολύ μικρή διαφορά μεταξύ των τριών νευρωνικών με τα TNΔ4 και 5 να ισούνται (97%) και το TNΔ6 να εμφανίζει τον μεγαλύτερο (98%). Άρα όλα τα νευρωνικά έχουν μεγάλο ποσοστό σωστών προβλέψεων, υπερβάσεων και μη.

Στατιστικός Δείκτης Υπερβάσεων	TNΔ4	TNΔ5	TNΔ6
TPR (%)	60%	86%	78%
FPR (%)	1%	2%	1%
FAR (%)	13%	27%	12%
SI (%)	97%	97%	98%

Πίνακας 24. Στατιστικοί δείκτες υπερβάσεων των TNA

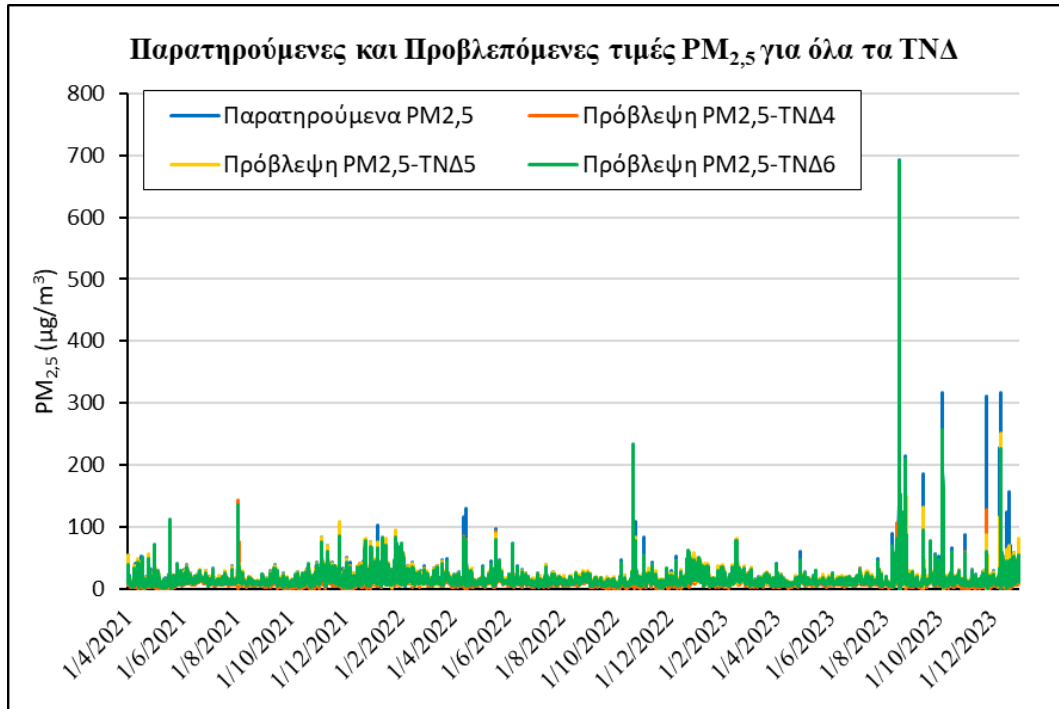


Σχήμα 6.38 (α) Σχηματική απεικόνιση των δεικτών αξιοπιστίας (β) Σχηματική απεικόνιση των δεικτών υπερβάσεων

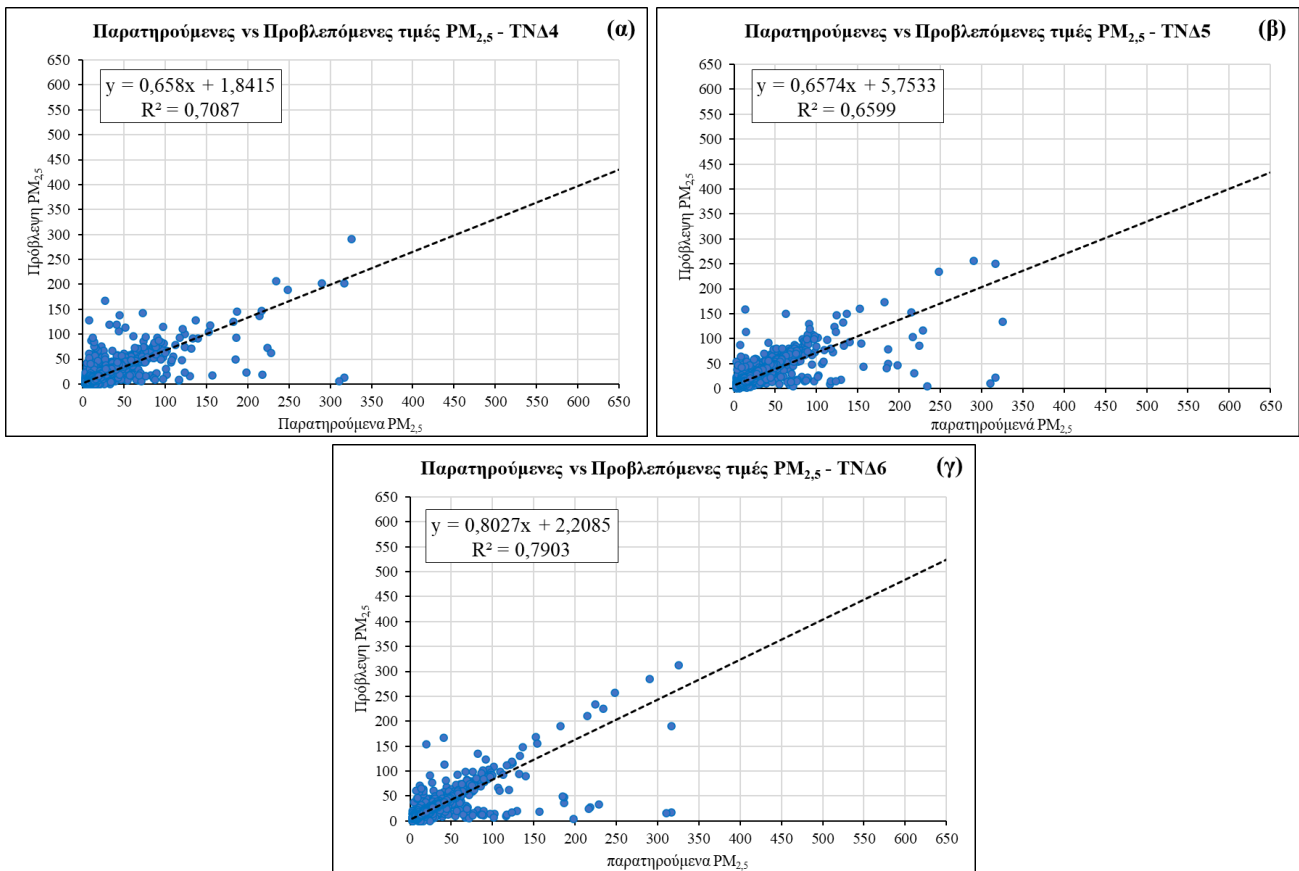
Παρατηρώντας τα Σχήμα 6.39 και Σχήμα 6.40 γίνεται εμφανές ότι, οι προβλεπόμενες τιμές $PM_{2.5}$ και από τα τρία μοντέλα ακολουθούν γενικά την τάση των παρατηρούμενων τιμών, υποδεικνύοντας ότι τα μοντέλα είναι ικανά να συλλάβουν τη συνολική χρονική δυναμική των συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$.

Το TNΔ6 φαίνεται να παρουσιάζει την πλησιέστερη συμφωνία με τις παρατηρούμενες τιμές, υποδηλώνοντας ότι μπορεί να είναι το πιο ακριβές μοντέλο. Τα TNΔ4 και TNΔ5 εμφανίζουν ορισμένες αποκλίσεις από τις παρατηρούμενες τιμές, ιδιαίτερα σε περιόδους υψηλών συγκεντρώσεων $PM_{2.5}$. Και τα τρία μοντέλα τείνουν να υποτιμούν τις συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ σε περιόδους υψηλής ρύπανσης, γεγονός που υποδηλώνει ότι μπορεί να είναι προκατειλημμένα προς χαμηλότερες προβλέψεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα μοντέλα τείνουν να υπερεκτιμούν τις συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$, ιδιαίτερα σε περιόδους χαμηλής ρύπανσης.

Συνολικά, το Σχήμα 6.39 υποδηλώνει ότι τα μοντέλα νευρωνικών δικτύων είναι ικανά να παρέχουν λογικές προβλέψεις για τις συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$. Αυτό υποστηρίζεται και από τις τιμές R^2 που φαίνονται στο Σχήμα 6.40 με το TNΔ6 (Σχήμα 6.40γ) να έχει την καλύτερη συσχέτιση ($R^2=0,7903$) κάτι που ταυτίζεται και με την απόδοσή του. Αντίθετα, ενώ το TNΔ5 ($R^2=0,6599$) φαινόταν να είχε καλύτερη απόδοση από το TNΔ4 ($R^2=0,7087$), το δεύτερο έχει μεγαλύτερο R^2 , όπως απεικονίζεται στα Σχήμα 6.40α και β.



Σχήμα 6.39 Πραγματικές και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5}



Σχήμα 6.40 (α) Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5} για το TNΔ4· (β) Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5} για το TNΔ5· (γ) Παρατηρούμενες και προβλεπόμενες τιμές PM_{2,5} για το TNΔ6

7. Κεφάλαιο 7^ο: Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, έγινε απόπειρα προσδιορισμού της ποιότητας της ατμόσφαιρας και της θερμικής άνεσης, σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Η ποιότητα της ατμόσφαιρας προσδιορίστηκε με τον υπολογισμό του δείκτη AQI, ενώ η θερμική άνεση προσδιορίστηκε με τον υπολογισμό του δείκτη DI. Επίσης, με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB δημιουργήθηκαν προβλεπτικά μοντέλα για δύο σενάρια: την πρόβλεψη των συγκεντρώσεων PM_{2.5} στην Ακαδημία Πλάτωνος με την ύπαρξη αισθητήρα μόνο στο Ηράκλειο και πρόβλεψη της εσωτερικής συγκέντρωσης PM_{2.5} που θα διευκολύνουν την προειδοποίηση των κατοίκων στην Ακαδημία Πλάτωνος για το πότε πρέπει να αερίσουν την οικία για την επίτευξη καλύτερης εσωτερικής ποιότητας του αέρα.

Η επεξεργασία και ανάλυση των μετρήσεων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να εκμαιευτούν όσο το δυνατόν πιο εμπειριστατωμένα συμπεράσματα για την διακύμανση του ρύπου PM_{2.5}, την εικόνα της ποιότητας της ατμόσφαιρας αλλά και της θερμικής άνεσης για ολόκληρη την χρονοσειρά (Απρίλιος 2021 με Μάρτιο 2023) και στις δύο περιοχές έρευνας.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, τόσο η Ακαδημία Πλάτωνος (μέσα και έξω) όσο και το Ηράκλειο παρουσιάζουν αυξημένη συγκέντρωση PM_{2.5} κατά τους χειμερινούς μήνες. Η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη λόγω της πτώσης της θερμοκρασίας, της αύξησης της υγρασίας και της στασιμότητας του αέρα που είναι άμεσα συνδεδεμένα με την διακύμανση των επιπέδων PM_{2.5}, καθώς και της εντατικής χρήσης θέρμανσης. Τα παραπάνω αντικατοπτρίζονται και στα διαγράμματα του AQI, κάτι που είναι λόγος ανησυχίας καθώς υποδηλώνει παρατεταμένη έκθεση σε ατμοσφαιρική ποιότητα που ενδεχομένως επηρεάζει την υγεία. Όσον αφορά την θερμική άνεση, το μεγαλύτερο ποσοστό των τιμών και στις δύο περιοχές εμφανίζεται στο εύρος DI<21 που υποδηλώνει ουδέτερη κατάσταση θερμικής άνεσης και καμία θερμική δυσφορία. Συγκρίνοντας τις υπόλοιπες κατηγορίες του δείκτη, προκύπτει ότι η θερμική άνεση στην Ακαδημία Πλάτωνος είναι χειρότερη από το Ηράκλειο, κάτι που υποδεικνύει τις υψηλότερες θερμοκρασίες που επικρατούν στο κέντρο της Αττικής σε σύγκριση με τα βόρεια προάστια του νομού. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη βλάστησης στο αστικό κέντρο και την πυκνότερη πολεοδομία, καθώς και στην υψομετρική διαφορά των περιοχών.

Συγκεκριμένα, η συγκριτική μελέτη που αφορά την διακύμανση της μέσης συγκέντρωσης PM_{2.5} και του δείκτη AQI εντός και εκτός του διαμερίσματος στην Ακαδημία Πλάτωνος ανέδειξε την συσχέτιση μεταξύ των εσωτερικών συγκεντρώσεων PM_{2.5} και της εξωτερικής ποιότητας του αέρα. Παρά την επί το πλείστον υπεροχή των εξωτερικών συγκεντρώσεων, υπήρξαν περιπτώσεις, κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου η ποιότητα του αέρα εντός της οικίας ήταν χειρότερη απ' ότι έξω. Αυτό είναι αξιοσημείωτο, καθώς τονίζει την ανάγκη καλύτερης διαχείρισης αερισμού του χώρου. Με σκοπό να καταστεί δυνατό, οι κάτοικοι να γνωρίζουν πότε η ποιότητα του αέρα εντός της οικίας είναι χειρότερη σε σχέση με την ποιότητα του αέρα εκτός αυτής, αναπτύχθηκαν κάποια μοντέλα TNΔ.

Όσον αφορά την συγκριτική μελέτη της διακύμανσης της μέσης συγκέντρωσης PM_{2.5} και AQI για την Ακαδημία Πλάτωνος και το Ηράκλειο, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι παρά τα παρόμοια μοτίβα των δύο περιοχών, στο Ηράκλειο η ποιότητα του αέρα είναι καλύτερη. Εξαιρέση σε αυτό, αποτελούν οι χειμερινοί μήνες εξαιτίας των χαμηλότερων θερμοκρασιών και υψηλότερης υγρασίας στην περιοχή. Αντίθετα τους υπόλοιπους μήνες του χρόνου η Ακαδημία Πλάτωνος έχει μεγαλύτερη συγκέντρωση PM_{2.5}. Αυτό υποδεικνύει ότι το Ηράκλειο προστατεύεται από τα περισσότερα δέντρα, χαρακτηριστικό των Βορείων Προαστίων, και την γεωγραφική του θέση, σε αντίθεση με την Ακαδημία Πλάτωνος που βρίσκεται σε χαμηλότερο υψόμετρο και στο κέντρο του αστικού ιστού.

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει αρκετούς περιορισμούς που πρέπει να αναγνωριστούν. Αρχικά, συλλέχθηκαν δεδομένα από δύο μόνο κατοικίες, άρα τα αποτελέσματα ενδέχεται να μην είναι απολύτως αντιπροσωπευτικά της ευρύτερης περιοχής της Αθήνας και του γενικού πληθυσμού. Επιπλέον, το γεγονός ότι η χρονοσειρά των δεδομένων ήταν δύο χρόνια, περιορίζει σημαντικά την δυνατότητα ανάδειξης μακροπρόθεσμων τάσεων στην ποιότητα του αέρα. Είναι αναγκαίο να διεξαχθούν μελέτες μεγαλύτερου χρονικού διαστήματος για την αξιολόγηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων στην υγεία από την έκθεση σε PM_{2.5}.

Μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν επίσης να εξερευνήσουν τους ακόλουθους τομείς:

- **Χωρική μεταβλητότητα:** Διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ ποικίλλουν μεταξύ διαφορετικών συνοικιών και περιοχών εντός της Αθήνας, εστιάζοντας σε διαφορετικές παραμέτρους όπως η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου (λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή των τοπικών πρασίνων χώρων, των κυκλοφοριακών προτύπων και άλλων παραγόντων).
- **Αντιστοίχιση πηγών:** Προσδιορισμός των συγκεκριμένων πηγών $PM_{2.5}$ στην περιοχή μελέτης.
- **Επιπτώσεις στην υγεία:** Αξιολόγηση των επιπτώσεων στην υγεία από την έκθεση σε $PM_{2.5}$ στους κατοίκους της περιοχής μελέτης.
- **Πολιτικές συνέπειες:** Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των υφιστάμενων πολιτικών ποιότητας του αέρα και εντοπισμός πιθανών βελτιώσεων.
- **Βελτιστοποίηση της ποιότητας του εσωτερικού αέρα με χρήση τεχνητής νοημοσύνης:** Συστήματα τεχνητής νοημοσύνης, εξοπλισμένα με προηγμένους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, θα μπορούσαν να αναλύσουν δεδομένα ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο, να προβλέψουν τις επόμενες δύο έως τέσσερις ώρες χρησιμοποιώντας μοντέλα και εξισώσεις που προέρχονται από νευρωνικά δίκτυα και να βελτιστοποιήσουν τον αερισμό επιλεκτικά, ενεργοποιώντας ή απενεργοποιώντας τα υπάρχοντα συστήματα αερισμού εντός μιας κατοικίας.

Με την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών και τη διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας, μπορούμε να αποκτήσουμε μια βαθύτερη κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ στις κατοικημένες περιοχές και να αναπτυχθούν πιο αποτελεσματικές στρατηγικές για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και την προστασία της δημόσιας υγείας. Επιπλέον, η ύπαρξη παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο μπορεί να συμβάλει σε πολύτιμες πληροφορίες για μελλοντικές στρατηγικές αστικού σχεδιασμού που δίνουν προτεραιότητα τόσο στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα όσο και στην υγεία των κατοίκων.

Για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των προβλημάτων που προκαλεί, προτείνονται οι εξής τρόποι αντιμετώπισης:

- Η χρήση φιλικότερων προς το περιβάλλον καυσίμων θέρμανσης, όπως το φυσικό αέριο και τα βιοκαύσιμα, αντί για πετρέλαιο, καθώς και εναλλακτικοί τρόποι θέρμανσης όπως οι αντλίες θερμότητας.
- Ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων. Η ενεργειακή αναβάθμιση θα διευκολύνει την βελτίωση της εσωτερικής ποιότητας του αέρα.
- Η ενθάρρυνση των πολιτών να επιλέξουν τα MMM ως βασικό μέσο μεταφοράς αποτελεί μια κρίσιμη στρατηγική στην αντιμετώπιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης που θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Είναι σημαντικό τα MMM να είναι σύγχρονα και να πληρούν τις προδιαγραφές πράσινης κίνησης.
- Προώθηση της ηλεκτροκίνησης μέσα από επιδοτούμενα προγράμματα για την αγορά ηλεκτροκίνητων οχημάτων.
- Θεσμοθέτηση ενός πιο αυστηρού ευρωπαϊκού νομικού πλαισίου για την ποιότητα του αέρα και εντατικοποίηση των ελεγκτικών μηχανισμών.

Βιβλιογραφία

1. Γεντεκάκης, Ι. *ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ Επιπτώσεις, Έλεγχος & Εναλλακτικές Τεχνολογίες*; 2η.; ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, 2010; ISBN 978-960-461-394-6.
2. *What Is Smog | Sulfurous Smog and Photochemical Smog*; 2018;
3. Smog Available online: <https://education.nationalgeographic.org/resource/smog> (accessed on 22 September 2023).
4. Βουδούρης, Κ. *Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος - Υπόγεια Νερά & Περιβάλλον*; Εκδόσεις Τζιόλα, 2009; ISBN 978-960-418-170-4.
5. Colls, J. *Air Pollution*; Taylor & Francis, 2002; ISBN 978-0-415-25564-6.
6. Vallero, D. *Fundamentals of Air Pollution*; Fourth.; 2007; ISBN 978-0-12-373615-4.
7. Xiao, X.; Gao, M. Overview of Climate Change, Air Pollution, and Human Health. In *Air Pollution, Climate, and Health*; Elsevier, 2021; pp. 3–12 ISBN 978-0-12-820123-7.
8. Air Pollution — European Environment Agency Available online: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/intro> (accessed on 22 September 2023).
9. US EPA, O. Particulate Matter (PM) Pollution Available online: <https://www.epa.gov/pm-pollution> (accessed on 23 February 2024).
10. Inhalable Particulate Matter and Health (PM2.5 and PM10) | California Air Resources Board Available online: <https://ww2.arb.ca.gov/resources/inhalable-particulate-matter-and-health> (accessed on 23 February 2024).
11. What Is Particulate Matter? | SCDHEC Available online: <https://scdhec.gov/environment/your-air/most-common-air-pollutants/particulate-matter/what-particulate-matter> (accessed on 23 February 2024).
12. Τέλος Στα Επιβλαβή Αιωρούμενα Σωματίδια, Με Νέα Φίλτρα Available online: <https://www.sport-fm.gr/article/telos-sta-epiblabi-aiwroumena-swmatidia-me-nea-filtra/768144> (accessed on 23 February 2024).
13. Health Impacts of Air Pollution in Europe, 2022 — European Environment Agency Available online: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution> (accessed on 23 February 2024).
14. Ατμοσφαιρική ρύπανση στην ΕΕ: Στοιχεία και αριθμοί Available online: <https://www.consilium.europa.eu/el/infographics/air-pollution-in-the-eu/> (accessed on 23 February 2024).
15. Ποιότητα του αέρα Available online: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/air-quality/> (accessed on 23 February 2024).
16. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide Available online: <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789240034228> (accessed on 12 May 2023).
17. Clean Air Act 1956 Available online: <https://navigator.health.org.uk/theme/clean-air-act-1956> (accessed on 20 September 2023).
18. Europe's Air Quality Status 2023 Available online: <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023/europes-air-quality-status2023> (accessed on 24 June 2024).
19. Ατμοσφαιρική ρύπανση και ηχορύπανση | Θεματολογικά δελτία για την Ευρωπαϊκή Ένωση | Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο Available online: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/el/sheet/75/ατμοσφαιρικη-ρυσπανση-και-ηχορυσπανση> (accessed on 18 June 2024).
20. *Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe*; 2008; Vol. 152;.
21. Directive - 2004/107 - EN - EUR-Lex Available online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/107/oj> (accessed on 18 June 2024).
22. ΟΔΗΓΙΑ (ΕΕ) 2016/ 2284 ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ - της 14ης Δεκεμβρίου 2016 - σχετικά με τη μείωση των εθνικών εκπομπών ορισμένων ατμοσφαιρικών ρύπων, την τροποποίηση της οδηγίας 2003/ 35/ ΕΚ και την κατάργηση της οδηγίας 2001/ 81/ ΕΚ.
23. Ατμοσφαιρική ρύπανση: έγκριση νομοθεσίας για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα | Επικαιρότητα | Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο Available online: <https://www.europarl.europa.eu/news/el/press->

room/20240419IPR20587/atmosfairiki-rupansi-egkrisi-nomothesis-gia-ti-veltiosi-tis-poiotitas-tou-aera (accessed on 24 June 2024).

24. Ελληνική Δημοκρατία. ΦΕΚ 369/B/24-05-1993. Έκτακτα Μέτρα Για Την Αντιμετώπιση Της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης Στην Περιοχή Της Πρωτεύουσας. *Εφημερίδα Της Κυβερνήσεως*.
25. Ελληνική Δημοκρατία. ΦΕΚ 920/B/08-06-2007. Καθορισμός Τιμών – Στόχων Και Ορίων Εκτίμησης Των Συγκεντρώσεων Του Αρσενικού, Του Καδμίου, Του Υδραργύρου, Του Νικελίου Και Των Πολυκυκλικών Αρωματικών Υδρογονανθράκων Στον Ατμοσφαιρικό Αέρα, Σε Συμμόρφωση Με Τις Διατάξεις Της Οδηγίας 2004/107/ΕΚ «Σχετικά Με Το Αρσενικό, Το Κάδμιο, Τον Υδράργυρο, Το Νικέλιο Και Τους Πολυκυκλικούς Αρωματικούς Υδρογονάνθρακες Στον Ατμοσφαιρικό Αέρα» Του Συμβουλίου Της 15ης Δεκεμβρίου 2004 Των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων». *Εφημερίδα Της Κυβερνήσεως*.
26. Ελληνική Δημοκρατία. ΦΕΚ 488/B/30-11-2011. Μέτρα Για Τη Βελτίωση Της Ποιότητας Της Ατμόσφαιρας, Σε Συμμόρφωση Με Τις Διατάξεις Της Οδηγίας 2008/50/ΕΚ «για Την Ποιότητα Του Ατμοσφαιρικού Αέρα Και Καθαρότερο Αέρα Για Την Ευρώπη» Του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου Και Του Συμβουλίου Της Ευρωπαϊκής Ένωσης Της 21ης Μαΐου 2008». *Εφημερίδα Της Κυβερνήσεως*.
27. Ελληνική Δημοκρατία. ΦΕΚ 3272/B/23-12-2013. Βραχυπρόθεσμα Σχέδια Δράσης Για Την Αντιμετώπιση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης Από Αιωρούμενα Σωματίδια. *Εφημερίδα Της Κυβερνήσεως*.
28. Ελληνική Δημοκρατία. ΦΕΚ 1311/B/13-04-2017. Τροποποίηση Των Παραρτημάτων IV Και V Του Άρθρου 8 Της Υπ' Αριθμ. 22306/1075/2007 Κοινής Υπουργικής Απόφασης (Β'920) Και Των Παραρτημάτων I, III, VI Και IX Του Άρθρου 30 Της Υπ' Αριθμ. 14122/549/2011 Κοινής Υπουργικής Απόφασης (Β'488), Σε Συμμόρφωση Με Την Οδηγία 2015/1480/ΕΕ «για Την Τροποποίηση Ορισμένων Παραρτημάτων Των Οδηγιών Του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου Και Του Συμβουλίου 2004/107/ΕΚ Και 2008/50/ΕΚ, Οι Οποίες Ορίζουν Τους Κανόνες Σχετικά Με Τις Μεθόδους Αναφοράς, Την Επικύρωση Των Δεδομένων Και Την Τοποθεσία Των Σημείων Δειγματοληψίας Για Την Εκτίμηση Της Ποιότητας Του Ατμοσφαιρικού Αέρα» Της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. *Εφημερίδα Της Κυβερνήσεως*.
29. McNab, B.K. The Evolution of Endothermy in the Phylogeny of Mammals. *Am. Nat.* **1978**, *112*, 1–21, doi:10.1086/283249.
30. Teodoreanu, E. Thermal Comfort Index. *Present Environ. Sustain. Dev.* **2016**, *10*, doi:10.1515/pesd-2016-0029.
31. EΛIΝYAE Available online: <https://www.elinyae.gr/en/node/73370> (accessed on 19 June 2024).
32. Jenkins, M. Thermal Comfort Basics: What Is ASHRAE 55? | SimScale Blog Available online: <https://www.simscale.com/blog/what-is-ashrae-55-thermal-comfort/> (accessed on 19 June 2024).
33. Thermal Comfort Available online: <https://www.ecophon.com/en/about-ecophon/functional-demands/thermal-comfort/> (accessed on 15 September 2023).
34. monodomiki.gr Θερμική Άνεση Available online: <https://www.monodomiki.gr/ell/blog-details/thermiki-anesi> (accessed on 19 June 2024).
35. Peters, A. The Origin Story of the Air Quality Index—and the Toxic ‘Smaze’ That Came before It Available online: <https://www.fastcompany.com/90909054/the-origin-story-of-the-air-quality-index-and-the-toxic-smaze-that-came-before-it> (accessed on 19 June 2024).
36. Park, C. Pollution Standards Index. In *A Dictionary of Environment and Conservation*; Oxford University Press, 2007 ISBN 978-0-19-860995-7.
37. AQI Basics | AirNow.Gov Available online: <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics> (accessed on 13 May 2023).
38. The AQI Equation - Air Quality and AQI Info Available online: <https://forum.airnowtech.org/t/the-aqi-equation/169> (accessed on 13 May 2023).
39. Standards for Air Quality Indices in Different Countries (AQI) Available online: <https://atmotube.com/blog/standards-for-air-quality-indices-in-different-countries-aqi> (accessed on 19 June 2024).
40. Haze - The National Environment Agency Available online: <https://www.haze.gov.sg> (accessed on 20 June 2024).
41. Canada, E. and C.C. Air Quality: Frequently Asked Questions Available online: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/air-quality-health-index/frequently-asked-questions.html> (accessed on 20 June 2024).
42. EPD AQHI : FAQs Available online: <https://www.aqhi.gov.hk/en/what-is-aqhi/faqs.html> (accessed on 20 June 2024).

43. European Air Quality Index: Current Air Quality Information at Your Finger Tips Available online: <https://www.eea.europa.eu/highlights/european-air-quality-index-current> (accessed on 1 September 2024).
44. European Air Quality Index Calculation — CAMS Training Available online: <https://ecmwf-projects.github.io/copernicus-training-cams/proc-aq-index.html> (accessed on 1 September 2024).
45. Department for Environment, F. and R.A. (Defra) webmaster@defra.gsi.gov.uk What Is the Daily Air Quality Index?- Defra, UK Available online: <https://uk-air.defra.gov.uk/air-pollution/daq?view=more-info> (accessed on 20 June 2024).
46. AirKorea : Introduction to the CAI Available online: https://www.airkorea.or.kr/eng/khaiInfo?pMENU_NO=166 (accessed on 20 June 2024).
47. A Review of Current Air Quality Indexes and Improvements under the Multi-Contaminant Air Pollution Exposure - ScienceDirect Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720316066> (accessed on 15 July 2024).
48. Karavas, Z.; Karayannis, V.; Moustakas, K. Comparative Study of Air Quality Indices in the European Union towards Adopting a Common Air Quality Index. *Energy Environ.* **2021**, *32*, 959–980, doi:10.1177/0958305X20921846.
49. *Health Impact of Low Indoor Temperatures: Report on a WHO Meeting : Copenhagen, 11-14 November 1985*; Environmental health series; World Health Organization, Regional Office for Europe: Copenhagen, 1987;
50. REHVA Journal Thermal and Acoustic Comfort Requirements in European Standard and National Regulations Available online: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/thermal-and-acoustic-comfort-requirements-in-european-standard-and-national-regulations> (accessed on 8 July 2024).
51. Jose, J.A.O. A Review of General and Local Thermal Comfort Models for Controlling Indoor Ambiences. In *Air Quality*; IntechOpen, 2010 ISBN 978-953-307-131-2.
52. Al-Sharif, O.; Newir, A.; Halawa, M. *Geographical Variations in Thermal Comfort Preferences Based on ASHRAE Database II*; 2023;
53. Liu, Z.; Li, J.; Xi, T. A Review of Thermal Comfort Evaluation and Improvement in Urban Outdoor Spaces. *Buildings* **2023**, *13*, 3050, doi:10.3390/buildings13123050.
54. Masterton, J.M.; Richardson, F.A.; Canada Service de l'environnement atmosphérique *Humidex : A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity*; Atmospheric Environment: Downsview, Ont., 1979;
55. Humidex. *Wikipedia* 2024.
56. Thom, E.C. The Discomfort Index. *Weatherwise* **1959**, *12*, 57–61, doi:10.1080/00431672.1959.9926960.
57. Stathopoulou, M.; Cartalis, C.; Keramitsoglou, I.; Santamouris, M. Thermal Remote Sensing of Thom's Discomfort Index (DI): Comparison with in Situ Measurements. *Proc SPIE* **2005**, *5983*, 131–139, doi:10.1117/12.627541.
58. Poupkou, A.; Nastos, P.; Melas, D.; Zerefos, C. Climatology of Discomfort Index and Air Quality Index in a Large Urban Mediterranean Agglomeration. *Water Air Soil Pollut. - WATER AIR SOIL POLLUT* **2011**, *222*.
59. Asghari, M.; Fallah-Ghalhari, G.; Heidari, H. Investigation of Thermal Comfort Changes Using Summer Simmer Index (SSI): A Case Study in Different Climates of Iran. *Open Environ. Res. J.* **2021**, *14*, 13–23, doi:10.2174/2590277602114010013.
60. Summer Simmer Index Available online: <https://www.vcalc.com/wiki/rklarsen/Summer-Simmer-Index> (accessed on 14 June 2024).
61. Pandey, M.; Nathwani, J. Life Quality Index. In *Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research*; Michalos, A.C., Ed.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2014; pp. 3576–3577 ISBN 978-94-007-0753-5.
62. About The Air Quality Life Index (AQLI). *AQLI*.
63. Methodology AQLI. *AQLI*.
64. The Air Quality Life Index (AQLI). *AQLI*.
65. Quality of Life Index by City 2024 Mid-Year Available online: <https://www.numbeo.com/quality-of-life/rankings.jsp> (accessed on 15 July 2024).
66. Quality of Life Index by Country 2023 Available online: https://www.numbeo.com/quality-of-life/rankings_by_country.jsp?title=2023 (accessed on 15 July 2024).

67. OECD Better Life Index Available online: <https://www.oecdbetterlifeindex.org/#/1111111111> (accessed on 15 July 2024).
68. Nations, U. *Human Development Index*; United Nations;
69. What Is the Human Development Index (HDI)? Available online: <https://www.investopedia.com/terms/h/human-development-index-hdi.asp> (accessed on 15 July 2024).
70. Human Development Index (HDI) & Its Formula - UPSC OWL 2024.
71. Human Development Index (HDI) by Country 2024 Available online: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/hdi-by-country> (accessed on 19 August 2024).
72. Σταθμός μέτρησης αερορύπανσης στο προαύλιο της Περιφερειακής Ενότητας Μαγνησίας. *E-Thessal*. 2019.
73. Real-Time Air Quality Map | PurpleAir Available online: <https://map.purpleair.com/1/mAQI/a10/p604800/cC0#10.99/37.9719/23.7596> (accessed on 8 September 2024).
74. Williams, R.; Kilaru, V.; Snyder, E.; Kaufman, A.; Dye, T.; Rutter, A.; Russel, A.; Hafner, H. *Air Sensor Guidebook*; 2014;
75. Air Quality Lab | University Of Surrey Available online: <https://www.surrey.ac.uk/global-centre-clean-air-research/air-quality-lab/laboratory-instruments> (accessed on 20 August 2024).
76. Air Quality Meter | PCE Instruments Available online: https://www.pce-instruments.com/english/measuring-instruments/test-meters/air-quality-meter-kat_150925.htm (accessed on 20 August 2024).
77. Air Quality Analyzers: Ambient Air Best Equipment Available online: <https://envira.global/air-quality-analyzers/> (accessed on 20 August 2024).
78. Air Quality Instruments and Monitors Available online: https://www.geotechenv.com/air_quality_instruments.html (accessed on 20 August 2024).
79. Air Quality Measurement and Monitoring Instruments | Kimo Instrument Available online: <https://www.kimoinstruments.com/hvac-and-r-instruments/portable-instruments/air-quality-measurement> (accessed on 20 August 2024).
80. An Inside Look at How Air Quality Monitors Work Available online: <https://www2.purpleair.com/blogs/blog-home/an-inside-look-at-how-air-quality-monitors-work> (accessed on 8 September 2024).
81. Wallace, L.; Ott, W. Long-Term Indoor-Outdoor PM_{2.5} Measurements Using PurpleAir Sensors: An Improved Method of Calculating Indoor-Generated and Outdoor-Infiltrated Contributions to Potential Indoor Exposure. *Sensors* **2023**, *23*, 1160, doi:10.3390/s23031160.
82. Stavroulas, I.; Grivas, G.; Michalopoulos, P.; Liakakou, E.; Bougiatioti, A.; Kalkavouras, P.; Fameli, K.M.; Hatzianastassiou, N.; Mihalopoulos, N.; Gerasopoulos, E. Field Evaluation of Low-Cost PM Sensors (Purple Air PA-II) Under Variable Urban Air Quality Conditions, in Greece. *Atmosphere* **2020**, *11*, 926, doi:10.3390/atmos11090926.
83. API - PurpleAir Available online: <https://api.purpleair.com/#api-sensors-get-sensor-history> (accessed on 24 June 2024).
84. API History Fields Descriptions - Data / API Available online: <https://community.purpleair.com/t/api-history-fields-descriptions/4652> (accessed on 24 June 2024).
85. What Is the Difference Between CF=1, ATM, and ALT? - Data / API Available online: <https://community.purpleair.com/t/what-is-the-difference-between-cf-1-atm-and-alt/6442/14> (accessed on 24 June 2024).
86. MazamaScience/AirSensor: Documents/PurpleAir_CF=ATM_vs_CF=1.Md Available online: https://rdr.io/github/MazamaScience/AirSensor/f/documents/PurpleAir_CF%3DATM_vs_CF%3D1.md (accessed on 24 June 2024).
87. Wallace, L. Intercomparison of PurpleAir Sensor Performance over Three Years Indoors and Outdoors at a Home: Bias, Precision, and Limit of Detection Using an Improved Algorithm for Calculating PM_{2.5}. *Sensors* **2022**, *22*, 2755, doi:10.3390/s22072755.
88. Wallace, L.; Bi, J.; Ott, W.R.; Sarnat, J.; Liu, Y. Calibration of Low-Cost PurpleAir Outdoor Monitors Using an Improved Method of Calculating PM_{2.5}. *Atmos. Environ.* **2021**, *256*, 118432, doi:10.1016/j.atmosenv.2021.118432.

89. Barkjohn, K.; Gantt, B.; Clements, A. Development and Application of a United States-Wide Correction for PM_{2.5} Data Collected with the PurpleAir Sensor. *Atmospheric Meas. Tech.* **2021**, *14*, 4617–4637, doi:10.5194/amt-14-4617-2021.
90. Kosmopoulos, G.; Salamalikis, V.; Wilbert, S.; Zorzalejo, L.; Hanrieder, N.; Karatzas, S.; Kazantzidis, A. Investigating the Sensitivity of Low-Cost Sensors in Measuring Particle Number Concentrations across Diverse Atmospheric Conditions in Greece and Spain. *Sensors* **2023**, *2023*, *23*, doi:10.3390/s23146541.
91. A New Calibration System for Low-Cost Sensor Network in Air Pollution Monitoring - ScienceDirect Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104221001094> (accessed on 25 June 2024).
92. Demanega, I.; Mujan, I.; Singer, B.C.; Anđelković, A.S.; Babich, F.; Licina, D. Performance Assessment of Low-Cost Environmental Monitors and Single Sensors under Variable Indoor Air Quality and Thermal Conditions. *Build. Environ.* **2021**, *187*, 107415, doi:10.1016/j.buildenv.2020.107415.
93. PurpleAir Classic Air Quality Monitor Available online: <https://www2.purpleair.com/products/purpleair-pa-ii> (accessed on 31 May 2023).
94. Kosmopoulos, G.; Salamalikis, V.; Pandis, S.N.; Yannopoulos, P.; Bloutsos, A.A.; Kazantzidis, A. Low-Cost Sensors for Measuring Airborne Particulate Matter: Field Evaluation and Calibration at a South-Eastern European Site. *Sci. Total Environ.* **2020**, *748*, 141396, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141396.
95. What Do Purpleair Sensors Measure, and How Do They Work? Available online: <https://community.purpleair.com/t/what-do-purpleair-sensors-measure-and-how-do-they-work/3499> (accessed on 12 May 2023).
96. Eurostat Report: Athens Ranks 8th in EU Population - Tovima.Com Available online: <https://www.tovima.com/society/eurostat-report-athens-ranks-8th-in-eu-population/> (accessed on 1 July 2024).
97. Statistics | Eurostat Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/all_themes?lang=en&display=list&sort=category (accessed on 1 July 2024).
98. Αθήνα-Ελλάδα-Ευρώπη-Γη - Μικρή Εγκυκλοπαίδεια Available online: <http://users.uoa.gr/~nektar/science/geography/encyclopaedia.htm> (accessed on 1 July 2024).
99. Athens Climate, Weather By Month, Average Temperature (Greece) - Weather Spark Available online: <https://weatherspark.com/y/89228/Average-Weather-in-Athens-Greece-Year-Round> (accessed on 30 May 2023).
100. ΔΗΜΟΣ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΑΤΤΙΚΗΣ Available online: <https://www.iraklio.gr/> (accessed on 3 September 2024).
101. Ηράκλειο Αττικής. *Βικιπαίδεια* 2024.
102. Νέο Ηράκλειο Available online: <https://www.touristorama.com/m/%CE%BD%CE%B5%CE%BF-%CE%B7%CF%81%CE%B1%CE%BA%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%BF> (accessed on 3 September 2024).
103. Marousi Climate: Weather Marousi & Temperature by Month Available online: <https://en.climate-data.org/europe/greece/marousi/marousi-764508/> (accessed on 3 September 2024).
104. Hossein Motlagh, N.; Lagerspetz, E.; Nurmi, P.; Li, X.; Varjonen, S.; Mineraud, J.; Siekkinen, M.; Rebeiro-Hargrave, A.; Hussein, T.; Petäjä, T.; et al. Toward Massive Scale Air Quality Monitoring. *IEEE Commun. Mag.* **2020**, *58*, 54–59, doi:10.1109/MCOM.001.1900515.
105. Han, Y.; Park, B.; Jeong, J. A Novel Architecture of Air Pollution Measurement Platform Using 5G and Blockchain for Industrial IoT Applications. *Procedia Comput. Sci.* **2019**, *155*, 728–733, doi:10.1016/j.procs.2019.08.105.
106. Zimmerman, N. Tutorial: Guidelines for Implementing Low-Cost Sensor Networks for Aerosol Monitoring. *J. Aerosol Sci.* **2021**, *159*, 105872, doi:10.1016/j.jaerosci.2021.105872.
107. Bencs, L. Low-Cost Sensor Monitoring of Air Quality Indicators during Outdoor Renovation Activities around a Dwelling House. *Atmosphere* **2024**, *15*, 790, doi:10.3390/atmos15070790.
108. Bucek, P.; Maršolek, P.; Bílek, J. Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring - the Current State of the Technology and a Use Overview. *Chem.-Didact.-Ecol.-Metrol.* **2021**, *26*, 41–54, doi:10.2478/cdem-2021-0003.

109. Neural Net Fitting - Solve Fitting Problem Using Two-Layer Feed-Forward Networks - MATLAB Available online: <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/neuralnetfitting-app.html> (accessed on 27 September 2024).
110. Nastos, P.; Moustris, K.; Larissi, I.; Paliatsos, A. Air Quality and Bioclimatic Conditions within the Greater Athens Area, Greece - Development and Applications of Artificial Neural Networks. In; 2011 ISBN 978-953-307-511-2.
111. Willmott, C.; Ackleson, S.; Davis, R.; Feddema, J.; Klink, K.; Legates, D.; O'Donnell, J.; Rowe, C. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. *J. Geophys. Res.* **1985**, doi:10.1029/JC090iC05p08995.
112. Willmott, C.J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **1982**, doi:10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2.
113. Walker, S.E.; Slørdal, L.H.; Guerreiro, C.; Gram, F.; Grønskei, K.E. Air Pollution Exposure Monitoring and Estimation. Part II. Model Evaluation and Population Exposure. *J. Environ. Monit. JEM* **1999**, *1*, 321–326, doi:10.1039/a902776i.
114. Schlink, U.; Dorling, S.; Pelikan, E.; Nunnari, G.; Cawley, G.; Junninen, H.; Greig, A.; Foxall, R.; Eben, K.; Chatterton, T.; et al. A Rigorous Inter-Comparison of Ground-Level Ozone Predictions. *Atmos. Environ.* **2003**, *37*, 3237–3253, doi:10.1016/S1352-2310(03)00330-3.
115. Papanastasiou, D.; Melas, D.; Kioutsioukis, I. Development and Assessment of Neural Network and Multiple Regression Models in Order to Predict PM10 Levels in a Medium-Sized Mediterranean City. *Water. Air. Soil Pollut.* **2007**, *182*, 325–334, doi:10.1007/s11270-007-9341-0.
116. Spyropoulos, G.; Nastos, P.; Moustris, K. Performance of Aether Low-Cost Sensor Device for Air Pollution Measurements in Urban Environments. Accuracy Evaluation Applying the Air Quality Index (AQI). *Atmosphere* **2021**, *12*, 1246, doi:10.3390/atmos12101246.
117. dasarxeio Σε πλήρη εξέλιξη η πυρκαγιά στη Βαρυμπόμπη - Εκκενώθηκε και μέρος του Κρουονερίου Available online: <https://dasarxeio.com/2021/08/04/99839/> (accessed on 23 September 2024).
118. The Sea Breeze | National Oceanic and Atmospheric Administration Available online: <https://www.noaa.gov/jetstream/ocean/sea-breeze> (accessed on 23 September 2024).
119. Gratsea, M.; Liakakou, E.; Mihalopoulos, N.; Adamopoulos, A.; Tsilibari, E.; Gerasopoulos, E. The Combined Effect of Reduced Fossil Fuel Consumption and Increasing Biomass Combustion on Athens' Air Quality, as Inferred from Long Term CO Measurements. *Sci. Total Environ.* **2017**, *592*, 115–123, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.03.045.
120. Farneli, K.-M.; Dionysis, K.; Assimakopoulos, V. Seasonal Changes on PM2.5 Concentrations and Emissions at Urban Hotspots in the Greater Athens Area, Greece. In Proceedings of the 16th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics—COMECAP 2023; MDPI, August 29 2023; p. 124.
121. Dayan, U.; Ricaud, P.; Zbinden, R.; Dulac, F. Atmospheric Pollution over the Eastern Mediterranean during Summer – a Review. *Atmospheric Chem. Phys.* **2017**, *17*, 13233–13263, doi:10.5194/acp-17-13233-2017.
122. Φωτιά σε γνωστή ψησταριά της Νέας Φιλαδέλφειας Available online: <https://www.in.gr/2023/02/16/greece/nea-filadelfeia-fotia-se-gnosto-estiatorio/> (accessed on 26 September 2024).