



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση Αποβλήτων

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΠΤΗΤΙΚΟΥΣ  
ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ  
ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΣΤΙΚΑ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ**

ΚΑΠΑΡΤΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΠΑΣΧΑΛΙΔΟΥ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ

ΠΑΤΡΑ, 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο τον χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά, της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

«Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Επιβλέπουσα Καθηγήτρια, κ. Πασχαλίδου Αναστασία, Καθηγήτρια του Τμήματος Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων του Δ.Π.Θ., καθώς και τον Συνεπιβλέποντα Καθηγητή, κ. Κελέση Απόστολο, Δρ. Φυσικό - Περιβαλλοντολόγο και ΣΕΠ-ΕΑΠ, για την ανάθεση του θέματος και την καθοδήγησή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.»



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΠΤΗΤΙΚΟΥΣ  
ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ  
ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΣΤΗΝ  
ΕΛΛΑΔΑ

Καπαρτής Σταύρος

Επιβλέποντες Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:      Συνεπιβλέπων Καθηγητής:

Πασχαλίδου Αναστασία  
Καθηγήτρια  
Τμήμα Δασολογίας και  
Διαχείρισης Περιβάλλοντος  
και Φυσικών Πόρων  
Δ. Π. Θ.

Κελέσης Απόστολος  
Δρ. Φυσικός -  
Περιβαλλοντολόγος,  
ΣΕΠ-ΕΑΠ

Πάτρα, 2026

# Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	V
ABSTRACT.....	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	IX
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	XI
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	3
ΜΕΡΟΣ Α: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	4
<b>1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....</b>	<b>4</b>
<b>2 ΟΙ ΠΤΗΤΙΚΟΙ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΕΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ.....</b>	<b>5</b>
2.1 ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ .....	5
2.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ .....	7
2.3 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ ΤΩΝ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ .....	9
2.3.1 Οριζόντια μεταφορά.....	9
2.3.2 Κατακόρυφη μεταφορά.....	9
2.3.3 Ξηρή απόθεση.....	9
2.3.4 Υγρή απόθεση.....	10
2.4 ΦΩΤΟΞΕΙΔΩΣΗ ΚΑΙ ΑΛΛΗΛΟΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕ ΑΛΛΟΥΣ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥΣ ΡΥΠΟΥΣ.....	11
<b>3 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΡΥΠΩΝ.....</b>	<b>14</b>
3.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ .....	14
3.2 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ .....	15
<b>4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΤΥΧΗ ΤΩΝ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ.....</b>	<b>16</b>
<b>5 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΠΟΜΠΗ ΠΤΗΤΙΚΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ.....</b>	<b>17</b>
5.1 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ ΤΩΝ ΑΝΘΡΩΠΩΝ.....	17
5.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ .....	20
<b>6 ΤΟ ΒΕΝΖΟΛΙΟ.....</b>	<b>20</b>
6.1 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΟ ΠΡΟΦΙΛ .....	20
6.2 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ .....	21
6.2.1 Καταλυτική αναμόρφωση/διαχωρισμός .....	21
6.2.2 Απαλκλίωση και trans-αλκλίωση του τολουολίου.....	22
6.2.3 Πυρόλυση αργού πετρελαίου .....	22
6.2.4 Πολυμερισμός ακετυλενίου .....	22
6.3 ΧΡΗΣΕΙΣ ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ .....	23
6.4 ΘΕΣΜΟΘΕΤΗΣΗ ΟΡΙΟΥ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΥΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΚΘΕΣΗ ΣΤΟ ΒΕΝΖΟΛΙΟ .....	25
<b>ΜΕΡΟΣ Β: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>26</b>
<b>7 ΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....</b>	<b>26</b>
<b>8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>27</b>
8.1 ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ .....	27
8.2 ΕΠΟΧΙΚΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ.....	38
8.3 ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ.....	43
<b>9 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΤΗΣ ΟΔΟΥ ΠΑΤΗΣΙΩΝ.....</b>	<b>47</b>

9.1	ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ ΣΤΟΝ ΣΤΑΘΜΟ ΤΗΣ ΟΔΟΥ ΠΑΤΗΣΙΩΝ (2004-2024).....	48
9.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΣΤΗ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ	
	52	
9.2.1	<i>Οργάνωση δεδομένων</i> .....	52
9.2.2	<i>Αποτελέσματα και Συζήτηση</i> .....	53
<b>10</b>	<b>ΣΩΡΕΥΤΙΚΗ ΈΚΘΕΣΗ ΚΑΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΟΣΙΑ ΥΓΕΙΑ ....</b>	<b>62</b>
10.1	ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΒΕΝΖΟΛΙΟΥ ΚΑΙ ΣΩΡΕΥΤΙΚΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ «ΑΣΤΙΚΟΥΣ-ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ».....	63
10.2	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ-ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟ (2016-2024).....	67
10.3	ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΡΚΙΝΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΛΟΓΩ ΈΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΒΕΝΖΟΛΙΟ .....	68
10.3.1	<i>Παράμετροι Εκτίμησης Έκθεσης</i> .....	69
10.3.2	<i>Ανάλυση δεδομένων έκθεσης και χαρακτηρισμός καρκινικού κινδύνου (ILCR)</i> .....	70
10.3.3	<i>Ποιοτική αποτύπωση του κινδύνου για τη δημόσια υγεία</i> .....	74
<b>11</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>76</b>
<b>12</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>80</b>

## Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάζει τη διαχρονική πορεία της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από βενζόλιο ( $C_6H_6$ ) στην Ελλάδα, εστιάζοντας στη συγκριτική αξιολόγηση επτά στρατηγικών σταθμών μέτρησης του εθνικού δικτύου. Το βενζόλιο αποτελεί έναν ρύπο ιδιαίτερης βαρύτητας, λόγω της αποδεδειγμένης τοξικότητάς του και της καρκινογόνου δράσης του, καθιστώντας την παρακολούθησή του από το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) επιβεβλημένη για την προστασία της δημόσιας υγείας.

Ο σκοπός της μελέτης είναι η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικο-οικονομικών παραγόντων που επηρεάζουν τη συγκέντρωση βενζολίου και η εκτίμηση του καρκινικού κινδύνου για τον πληθυσμό. Η καινοτομία της εργασίας έγκειται στη χρήση μίας πλήρους εικοσαετούς σειράς δεδομένων (2004-2024) από τον κυκλοφοριακό σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα), η οποία συνδυάζεται με ταυτόχρονη συγκριτική ανάλυση των σταθμών Πειραιά, Ελευσίνας, Αγίας Σοφίας (Θεσσαλονίκη), Κορδελιού (Θεσσαλονίκη), Σίνδου (Θεσσαλονίκη) και Πάτρας για την περίοδο 2016-2024. Η μεθοδολογία βασίστηκε στη στατιστική επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων, με την εφαρμογή της τεχνικής του κινητού μέσου όρου 365 ημερών για την απομόνωση των μακροπρόθεσμων τάσεων στον σταθμό της Πατησίων, όπου η πληρότητα των μετρήσεων υπερέβη το 90% στην πλειονότητα των ετών.

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν σαφή πορεία βελτίωσης του αστικού ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Στην οδό Πατησίων, η μέση ετήσια τιμή υποχώρησε από το ιστορικό μέγιστο των  $7,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2004) στα  $4,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2024), σημειώνοντας συνολική πτώση 45,5%. Η μελέτη εντοπίζει περιόδους συστηματικής υπέρβασης του θεσμοθετημένου ορίου των  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2004-2009 και 2015-2018), ενώ από το 2019 και έπειτα καταγράφεται πλήρης συμμόρφωση. Ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε η επίδραση της πανδημίας COVID-19 το 2020, η οποία οδήγησε σε δραστική μείωση των ρύπων (έως 27,8% στον Πειραιά). Ωστόσο, η πρόσφατη τριετία (2022-2024) χαρακτηρίζεται από τάση ανάκαμψης των συγκεντρώσεων, με τον σταθμό του Πειραιά να καταγράφει αύξηση 43,2%.

Συμπερασματικά, η εργασία καταδεικνύει ότι, ενώ οι ακραίες τιμές έχουν περιοριστεί και οι ώρες αιχμής στην Πατησίων έχουν μειωθεί κατά 69,5%, οι κεντρικοί κυκλοφοριακοί σταθμοί παραμένουν σε ανησυχητικά επίπεδα, κοντά στο όριο

ασφαλείας. Η μελέτη ολοκληρώνεται με τον ποσοτικό προσδιορισμό του καρκινικού κινδύνου (ILCR), υπογραμμίζοντας την ανάγκη για συνεχή επιτήρηση και εφαρμογή στοχευμένων περιβαλλοντικών πολιτικών στα μεγάλα αστικά κέντρα.

### **Λέξεις-κλειδιά**

Βενζόλιο ( $C_6H_6$ ), Πτητικοί Οργανικοί Υδρογονάνθρακες (VOCs), Οδός Πατησίων, Αστική Ρύπανση, Καρκινικός Κίνδυνος (ILCR), Κινητός Μέσος Όρος

## Abstract

This master's thesis investigates the long-term trends of atmospheric pollution caused by benzene ( $C_6H_6$ ) in Greece, focusing on a comparative assessment of seven strategic monitoring stations within the national network. Benzene is a pollutant of significant concern due to its proven toxicity and carcinogenic potential, making its monitoring by the National Air Pollution Monitoring Network (NAPMN) under the Ministry of Environment and Energy (MINENV) essential for public health protection.

The primary objective of this study is to evaluate environmental trends and socioeconomical norms and estimate the associated cancer risk for the population. The innovation of this research lies in the utilization of a complete twenty-year data series (2004-2024) from the traffic station on Patission Street (Athens), combined with a contemporary comparative analysis of the Piraeus, Elefsina, Agia Sofia (Thessaloniki), Kordelio (Thessaloniki), Sindos (Thessaloniki) and Patras stations for the period 2016-2024. The methodology involved the statistical processing of primary data, applying the 365-day moving average technique to isolate long-term trends at the Patission station, where data capture exceeded 90% for the majority of the years studied.

The results demonstrate a clear trajectory of improvement in the urban atmospheric environment. At the Patission station, the mean annual concentration declined from a historical peak of  $7.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2004) to  $4.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2024), marking an overall reduction of 45.5%. The study identifies periods of systematic exceedance of the legislative limit of  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (2004-2009 and 2015-2018), while full compliance has been observed from 2019 onwards. A particularly significant impact was noted during the COVID-19 pandemic in 2020, which led to a drastic reduction in pollutants (up to 27.8% in Piraeus). However, the recent three-year period (2022-2024) is characterized by a recovery trend in concentrations, with the Piraeus station recording an increase of 43.2%.

In conclusion, the thesis demonstrates that while extreme values have been mitigated and peak hours at Patission have decreased by 69.5%, central traffic stations remain in concerning proximity to the safety limit. The study concludes with a quantitative determination of the Incremental Lifetime Cancer Risk (ILCR), highlighting the necessity for continuous surveillance and the implementation of targeted environmental policies in Greece's major urban centers.

## **Keywords**

Benzene (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), Volatile Organic Compounds (VOCs), Patisson Street, Urban Air Pollution, Cancer Risk Assessment (ILCR), Moving Average.

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5-1: Ασθένειες και συμπτώματα στην ανθρώπινη υγεία λόγω έκθεσης σε πτητικούς υδρογονάνθρακες ( <i>Riggs et al., 2022; Han et al., 2024; Mpora, 2025</i> )....	19
Πίνακας 6-1: Φυσικοχημικές ιδιότητες βενζολίου ( <a href="https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzene">https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzene</a> ).....	21
Πίνακας 6-2: Διεργασίες αξιοποίησης του βενζολίου για την παραγωγή ενώσεων που χρησιμεύουν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή δευτερογενών προϊόντων, βιομηχανικής και οικιακής χρήσης ( <i>Zuckerman, 1995; Encyclopedia of Toxicology, 2023; Clinical Ocular Toxicology, 2008</i> ).....	24
Πίνακας 7-1: Στοιχεία θέσης, χαρακτηρισμού και συχνότητας δειγματοληψίας των επιλεγμένων σταθμών μέτρησης ( <i>Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), 2025</i> ).....	26
Πίνακας 9-1: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Ιούλιο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).....	53
Πίνακας 9-2: Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Ιούλιος 2015). ....	54
Πίνακας 9-3: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Αύγουστο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).....	55
Πίνακας 9-4: Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αύγουστος 2015). ....	55
Πίνακας 9-5: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Σεπτέμβριο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).....	56
Πίνακας 9-6: Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Σεπτέμβριος 2015). ....	57
Πίνακας 9-7: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Οκτώβριο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).....	58
Πίνακας 9-8: Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Οκτώβριος 2015). ....	58
Πίνακας 9-9: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Νοέμβριο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).....	59
Πίνακας 9-10: Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Νοέμβριος 2015).....	60
Πίνακας 9-11: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Δεκέμβριο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).....	61
Πίνακας 9-12: Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Δεκέμβριος 2015). ....	61

Πίνακας 10-1: Συχνότητα εμφάνισης ωριαίων συγκεντρώσεων βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) που υπερβαίνουν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και συνολική ετήσια έκθεση (σε ώρες και ημέρες) στον σταθμό της οδού Πατησίων (2004-2024). .....	63
Πίνακας 10-2: Συχνότητα εμφάνισης ωριαίων συγκεντρώσεων βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) που υπερβαίνουν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και συνολική ετήσια έκθεση (σε ώρες και ημέρες) στον σταθμό του Πειραιά (2015-2024).....	64
Πίνακας 10-3: Συχνότητα εμφάνισης ωριαίων συγκεντρώσεων βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) που υπερβαίνουν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και συνολική ετήσια έκθεση (σε ώρες και ημέρες) στον σταθμό της Πάτρας (2016-2024).....	65
Πίνακας 10-4: Συχνότητα εμφάνισης ωριαίων συγκεντρώσεων βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) που υπερβαίνουν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ και συνολική ετήσια έκθεση (σε ώρες και ημέρες) στον σταθμό της οδού Αγίας Σοφίας (2016-2024, εκτός του 2020).....	66
Πίνακας 10-5: Συγκεντρωτικά στοιχεία σωρευτικής έκθεσης σε βενζόλιο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) για το σύνολο της περιόδου μελέτης ανά σταθμό αστικής κυκλοφορίας. ....	67
Πίνακας 10-6: Παράμετροι υπολογισμού ILTCR για ενήλικες και παιδιά (1-7 ετών).....	69
Πίνακας 10-7: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) για τη χρονική περίοδο 2016-2024 στους σταθμούς παρακολούθησης Πατησίων, Πειραιά, Πάτρας και Αγίας Σοφίας. ....	70
Πίνακας 10-8: ILTCR ανά σταθμό και έτος ( $\times 10^{-6}$ ) .....	71
Πίνακας 10-9: Ταξινόμηση επιπέδων επικινδυνότητας του δείκτη ILTCR.....	72
Πίνακας 10-10: Μέσος όρος του δείκτη ILTCR ανά σταθμό παρακολούθησης για την περίοδο 2016-2024 ( $\times 10^{-6}$ ).....	73
Πίνακας 10-11: Έτος μέγιστης απόκλισης και ποσοστιαία μεταβολή του δείκτη ILTCR (ενήλικες) σε σχέση με τον μέσο όρο ανά σταθμό. ....	74
Πίνακας 10-12: Ποιοτική ταξινόμηση επιπέδου κινδύνου ILTCR ανά σταθμό και έτος (2016-2024).....	75

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Σχηματική απλοποίηση των αντιδράσεων οξείδωσης και μετατροπής των πτητικών υδρογονανθράκων. Με κόκκινο πλαίσιο σημειώνονται τα ενδιάμεσα προϊόντα.....	13
Σχήμα 3.1: Η πορεία σχηματισμού τροποσφαιρικού όζοντος από τα οξειδωμένα παράγωγα των πτητικών υδρογονανθράκων (VOC-Volatile Organic Compounds) με τη συμμετοχή των οξειδίων του αζώτου. ....	15
Σχήμα 8.1: Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό της οδού Πατησίων για την εννεαετία 2016-2024. Η μπλε συνεχής γραμμή απεικονίζει τις καταγεγραμμένες τιμές, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη τη γραμμή τάσης (πολυωνυμική προσέγγιση 3ου βαθμού). ....	28
Σχήμα 8.2: Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό «Πειραιάς» για την εννεαετία 2016-2024. Η μπλε συνεχής γραμμή αναπαριστά τις μετρούμενες τιμές, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη απεικονίζει την πολυωνυμική τάση 3ου βαθμού ( $R^2=0,72$ ). ....	29
Σχήμα 8.3: Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό «Ελευσίνα» (2016-2022). Σημειώνεται η απουσία μετρήσεων για τα έτη 2023 και 2024, καθώς και η απουσία στατιστικής τάσης λόγω των ιδιαίτερα χαμηλών επιπέδων συγκέντρωσης του ρύπου. ....	30
Σχήμα 8.4: Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό «Αγίας Σοφίας» (2016-2024). Σημειώνεται η έλλειψη δεδομένων για το έτος 2020. Η διακεκομμένη γραμμή τάσης παρουσιάζεται ενδεικτικά, με τον συντελεστή ( $R^2 = 0,25$ ) να υποδηλώνει περιορισμένη στατιστική προσαρμογή λόγω της έντονης μεταβλητότητας των τιμών. ....	31
Σχήμα 8.5: Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό «Κορδελίο» (2016-2024). Η μπλε συνεχής γραμμή αναπαριστά τις μετρούμενες τιμές, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη απεικονίζει την πολυωνυμική τάση 3ου βαθμού ( $R^2=0,64$ ). ....	32
Σχήμα 8.6: Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό «Σίνδος» (2016-2024). Σημειώνεται η απουσία μετρήσεων για το διάστημα 2023-2024. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει την πολυωνυμική τάση με υψηλή στατιστική προσαρμογή ( $R^2 = 0,87$ ). ....	33
Σχήμα 8.7: Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό «Πάτρα» για την περίοδο 2016-2024. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο πολυωνυμικό μοντέλο τάσης 3ου βαθμού ( $R^2 = 0,53$ ), αναδεικνύοντας τις διακυμάνσεις του ρύπου κατά την περίοδο της πανδημίας και την πλήρη συμμόρφωση με το νομοθετικό όριο ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). ....	34
Σχήμα 8.8: Ετήσια μεταβολή της συγκέντρωσης βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στην 3ετία 2016-2018. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο θεσμοθετημένο όριο ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) και η μπλε διακεκομμένη γραμμή στον μέσο όρο τριετίας ( $2,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). ....	35
Σχήμα 8.9: Ετήσια μεταβολή της συγκέντρωσης βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στην 3ετία 2019-2021. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο θεσμοθετημένο όριο ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) και η μπλε διακεκομμένη γραμμή στον μέσο όρο τριετίας ( $2,53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Για τον σταθμό της Αγίας Σοφίας δεν υφίστανται δεδομένα για το έτος 2020. ....	36
Σχήμα 8.10: Ετήσια μεταβολή της συγκέντρωσης βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στην τριετία 2022-2024. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο θεσμοθετημένο όριο ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) και η μπλε διακεκομμένη γραμμή στον μέσο όρο τριετίας ( $2,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Για τους σταθμούς της Σίνδου και της Ελευσίνας δεν υφίστανται δεδομένα για τα έτη 2023-2024. ....	37

Σχήμα 8.11: Εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων βενζολίου σε επτά σταθμούς μέτρησης: α) Πατησίων, β) Πειραιάς, γ) Ελευσίνα, δ) Αγίας Σοφίας, ε) Κορδελιό, στ) Σίνδος και ζ) Πάτρα. Τα θηκογράμματα (box-plots) απεικονίζουν τις τιμές συγκέντρωσης σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για τη θερμή περίοδο (Απρίλιος–Σεπτέμβριος) και την ψυχρή περίοδο (Οκτώβριος–Μάρτιος). Με την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο προστασίας της ανθρώπινης υγείας των $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	39
Σχήμα 8.12: Μέση ημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στους αστικούς-κυκλοφοριακούς σταθμούς Πατησίων, Πειραιά, Αγίας Σοφίας και Πάτρας για την περίοδο 2016-2024, κατά τις (α) Εργάσιμες ημέρες και (β) τα Σαββατοκύριακα. Η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή υποδηλώνει το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο προστασίας της υγείας ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). .....	44
Σχήμα 8.13: Μέση ημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στους αστικούς/περιαστικούς-βιομηχανικούς σταθμούς Κορδελιού, Σίνδου και Ελευσίνας για τις περιόδους 2016-2024 και 2016-2022 αντίστοιχα, κατά τις (α) Εργάσιμες ημέρες και (β) τα Σαββατοκύριακα. Η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή υποδηλώνει το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο προστασίας της υγείας ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).....	46
Σχήμα 9.1: Διαχρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό της οδού Πατησίων (2004-2024). Το άνω τμήμα απεικονίζει τη στατιστική κατανομή των τιμών μέσω θηκογραμμάτων, ενώ ο κάτω πίνακας παραθέτει τα ποσοτικά δεδομένα πληρότητας, τις μέσες ετήσιες τιμές και τις ποσοστιαίες μεταβολές σε σχέση με το προηγούμενο έτος και το έτος βάσης (2004). .....	49
Σχήμα 9.2: Διαχρονική πορεία των συγκεντρώσεων βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων για την περίοδο 2004-2024. Η μπλε γραμμή απεικονίζει τον κινητό μέσο όρο (365 ημερών) για την εξομάλυνση των δεδομένων, ενώ η διακεκομμένη καμπύλη αναπαριστά την πολυωνυμική γραμμή τάσης 4ου βαθμού με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0,46$ . Η κόκκινη οριζόντια γραμμή οριοθετεί το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο προστασίας της ανθρώπινης υγείας ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). .....	51

## Εισαγωγή

Η ατμοσφαιρική ρύπανση στα αστικά κέντρα αποτελεί μία από τις κρισιμότερες περιβαλλοντικές προκλήσεις του 21ου αιώνα, με τους Πτητικούς Οργανικούς Υδρογονάνθρακες (VOCs) να διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο, λόγω της σύνθετης χημικής τους συμπεριφοράς και της συμβολής τους στον σχηματισμό δευτερογενών ρύπων, όπως το τροποσφαιρικό όζον ( $O_3$ ) και τα οργανικά αερολύματα (Atkinson, 2000). Ανάμεσα σε αυτές τις ενώσεις, το βενζόλιο ( $C_6H_6$ ) χρήζει εντατικής επιστημονικής παρακολούθησης, καθώς η αποδεδειγμένη καρκινογόνος δράση του θέτει σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία, ακόμη και σε συγκεντρώσεις που προσεγγίζουν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Directive - 2008/50, n.d.).

Παρά την εφαρμογή αυστηρότερων προτύπων στις εκπομπές ρύπων, η ατμοσφαιρική ποιότητα στα ελληνικά αστικά κέντρα εξακολουθεί να παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις, οι οποίες διαμορφώνονται από τη συνέργεια των πηγών εκπομπής με τις τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες (Fameli & Assimakopoulos, 2014). Οι διακυμάνσεις αυτές αναδεικνύουν τη δυναμική φύση των πτητικών ενώσεων στην τροπόσφαιρα, όπου οι διεργασίες διασποράς, μεταφοράς και φωτοχημικής αποικοδόμησης διαμορφώνουν τα επίπεδα συγκέντρωσης των ρύπων σε πραγματικό χρόνο (Vrekoussis et al., 2013). Προκύπτει, συνεπώς, ανάγκη για βαθύτερη κατανόηση της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς του  $C_6H_6$ , μέσα από τη στατιστική ανάλυση των μετρήσεων και την εκτενή συγκριτική αξιολόγηση των επιπέδων ρύπανσης μεταξύ διαφορετικών αστικών και βιομηχανικών περιβαλλόντων στην Ελλάδα.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία διαφοροποιείται από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, καθώς συνδυάζει μία πλήρη εικοσαετή σειρά δεδομένων (2004-2024) από τον εμβληματικό κυκλοφοριακό σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα) με ταυτόχρονη συγκριτική ανάλυση 6 ακόμη στρατηγικών σταθμών μέτρησης (Πειραιάς, Ελευσίνα, Αγία Σοφία - Θεσσαλονίκη, Κορδελιό - Θεσσαλονίκη, Σίνδος - Θεσσαλονίκη, Πάτρα). Η χρήση στατιστικών εργαλείων, όπως ο κινητός μέσος όρος 365 ημερών, επιτρέπει την απομόνωση των μακροπρόθεσμων τάσεων από τις εποχιακές διακυμάνσεις, προσφέροντας ακριβή απεικόνιση της διαχρονικής εξέλιξης, υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες στις πηγές εκπομπής.

Ο σκοπός της μελέτης είναι η αξιολόγηση της διαχρονικής πορείας της ρύπανσης από  $C_6H_6$  στην Ελλάδα και η εκτίμηση των επιπτώσεών της στη δημόσια υγεία. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, τίθενται οι εξής ειδικότεροι στόχοι:

- Η συγκριτική αξιολόγηση των επιπέδων ρύπανσης μεταξύ των επτά μελετούμενων σταθμών για την περίοδο 2016-2024.
- Η ποσοτική ανάλυση της διαχρονικής διακύμανσης του C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στον σταθμό της οδού Πατησίων για την περίοδο 2004-2024.
- Η διερεύνηση της επίδρασης των μετεωρολογικών παραμέτρων και των περιορισμών στην κυκλοφορία στις συγκεντρώσεις του ρύπου.
- Ο ποσοτικός προσδιορισμός του καρκινικού κινδύνου (ILCR) για τον πληθυσμό, με βάση τα ευρήματα της σωρευτικής έκθεσης.

## Μεθοδολογία

Για τη σύνταξη του θεωρητικού πλαισίου πραγματοποιήθηκε συστηματική αναζήτηση σε διεθνείς ηλεκτρονικές βάσεις δεδομένων επιστημονικών περιοδικών, όπως ScienceDirect, Scopus και Google Scholar. Η αναζήτηση επικεντρώθηκε σε εξειδικευμένους επιστημονικούς όρους και λέξεις-κλειδιά, όπως «Volatile Organic Compounds (VOCs)», «Benzene atmospheric levels», «Urban air pollution Greece», «Incremental Lifetime Cancer Risk (ILCR)», «Photochemical oxidation processes» κ.ά. Η μελέτη και αξιολόγηση της βιβλιογραφίας επέτρεψε την αναλυτική περιγραφή των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των πτητικών υδρογονανθράκων, των πηγών εκπομπής τους (ανθρωπογενών και φυσικών), καθώς και των μηχανισμών μεταφοράς και απόθεσής τους στην ατμόσφαιρα.

Το ερευνητικό σκέλος βασίστηκε στην επεξεργασία και στατιστική ανάλυση πρωτογενών δεδομένων ωριαίων συγκεντρώσεων  $C_6H_6$  από επτά στρατηγικούς σταθμούς μέτρησης (Πατησίων, Πειραιάς, Ελευσίνα, Αγία Σοφία, Κορδελιό, Σίνδος, Πάτρα). Ειδικότερα, για τη διαχρονική μελέτη του σταθμού της οδού Πατησίων (2004-2024), η στατιστική εγκυρότητα των ευρημάτων διασφαλίστηκε μέσω του ελέγχου πληρότητας των δεδομένων, η οποία στην πλειονότητα των ετών υπερέβη το 90% (με μέγιστο το 96,71% το 2016). Για τον συγκεκριμένο σταθμό, εφαρμόστηκε η τεχνική του κινητού μέσου όρου 365 ημερών (365-day moving average), με στόχο την απομόνωση των μακροπρόθεσμων τάσεων από τις εποχιακές διακυμάνσεις και τις μεμονωμένες περιόδους χαμηλής πληρότητας (π.χ. το 2009 με 25%). Παράλληλα, για τη συγκριτική αξιολόγηση του συνόλου των σταθμών κατά την περίοδο 2016-2024, χρησιμοποιήθηκαν περιγραφικά στατιστικά μέσα και θηκογράμματα (box plots) για τη διερεύνηση της διασποράς και της μεταβλητότητας των ρύπων. Η τελική αξιολόγηση της επικινδυνότητας βασίστηκε στον υπολογισμό του καρκινικού κινδύνου (ILCR), σύμφωνα με τα διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα.

## Μέρος Α: Θεωρητικό υπόβαθρο

### 1 Ορισμός και σημασία της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί μέρος της γενικότερης υποβάθμισης του φυσικού περιβάλλοντος και της ποιοτικής αλλοίωσης των επιμέρους οικοσυστημάτων του. Προκαλείται από την παρουσία χημικών ουσιών, αερίων ή σωματιδίων στον αέρα, η συγκέντρωση των οποίων ξεπερνά μία κρίσιμη, ορισμένη τιμή (Bai et al., 2018). Η ρυπαντική ικανότητα των διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων εξαρτάται κυρίως από την πηγή προέλευσής τους, τη χημική σύσταση και το μέγεθός τους. Έπειτα από την απελευθέρωσή τους στην ατμόσφαιρα, διασπείρονται και αναμειγνύονται με συστατικά του αέρα, καταλήγοντας στους αποδέκτες, όπου προκαλούν βλαβερές συνέπειες στους ζώντες οργανισμούς, στη βλάστηση και στα υλικά (Almetwally et al., 2020).

Η σπουδαιότητα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έγκειται στο γεγονός ότι καθορίζει την ποιότητα του αέρα. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις ρύπων στις αστικές περιοχές υποβαθμίζουν την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και εγκυμονούν κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία, καθώς αυξάνουν τα περιστατικά νοσηρότητας και θνητότητας, ενώ επηρεάζουν δυσμενώς και τη βιοποικιλότητα. Η συχνή και πυκνή κυκλοφορία οχημάτων, η λειτουργία βιομηχανικών μονάδων πλησίον του οικιστικού ιστού, αλλά και πληθώρα ανθρωπογενών δραστηριοτήτων είναι, μεταξύ άλλων, οι σημαντικότεροι παράγοντες για την εκδήλωση και επικράτηση συνθηκών που ενισχύουν την παρουσία και συσσώρευση των ρύπων (Logothetis et al., 2023).

Η θεσμική προσέγγιση της ποιότητας του αέρα αποτυπώνεται έντονα στην Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2024/2881 της 23ης Οκτωβρίου 2024. Στην ουσία, πρόκειται για αναδιατύπωση των προγενέστερων Οδηγιών 2004/107/EK και 2008/50/EK, προκειμένου να γίνει εναρμόνιση με τους «Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης» των Ηνωμένων Εθνών, που προασπίζουν την προστασία της υγείας και του περιβάλλοντος. Στη συγκεκριμένη Οδηγία περιέχονται διατάξεις που κατευθύνουν τη διακρατική προσπάθεια προς τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα και την προσέγγιση του στόχου της μηδενικής ρύπανσης. Για τον λόγο αυτόν, καθορίζονται κοινές μέθοδοι και κριτήρια εκτίμησης ποιότητας, ενώ παράλληλα δίνονται απαραίτητες κατευθυντήριες αρχές προς τα κράτη-μέλη για την ορθή καταγραφή και

παρακολούθηση των ρύπων, τη θέσπιση ορίων έκθεσης και ενημέρωσης του πληθυσμού και σχέδια δράσης για τη λήψη μέτρων έκτακτης ανάγκης και αντιμετώπισης της ρύπανσης ([Directive - EU - 2024/2881 - EN - EUR-LEX, n.d.](#)).

## **2 Οι πτητικοί υδρογονάνθρακες στην ατμόσφαιρα**

Στον εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας σε πτητικές οργανικές ενώσεις συμβάλλουν τόσο ανθρωπογενείς όσο και φυσικές πηγές εκπομπής. Προϊόντα εκπομπής των ανθρωπογενών πηγών είναι οι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες (αλκάνια), οι ακόρεστοι υδρογονάνθρακες (αλκένια και αρωματικοί, όπως  $C_6H_6$ , τολουόλιο, ξυλόλιο), καθώς και τα οξυγονωμένα συστατικά, όπως αλδεΐδες, κετόνες, εστέρες κ.ά. Βιογενούς προέλευσης ακόρεστες πτητικές ενώσεις που εκπέμπονται κυρίως από φυτά αποτελούν το ισοπρένιο, τα μονοτερπένια και τα σεσκιτερπένια ([Timmis, 2010](#)).

Η συγκέντρωση των πτητικών υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα κυμαίνεται σε ένα εύρος από ppbv (μέρη στο δισεκατομμύριο ή nmol/mol) έως ppt (μέρη στο τρισεκατομμύριο ή pmol/mol). Ωστόσο, παρά τις μικρές συγκεντρώσεις τους, διαδραματίζουν σημαίνοντα ρόλο στη χημεία της ατμόσφαιρας, ενισχύοντας το φωτοχημικό της προφίλ, τόσο σε τοπικό όσο παγκόσμιο επίπεδο, ανάλογα με τη διασπορά των συστατικών. Ορισμένοι δε από αυτούς δύνανται να επηρεάζουν και το κλίμα, αφενός μέσω των ιδιοτήτων τους, ως αέρια του θερμοκηπίου, και αφετέρου εξαιτίας της ικανότητάς τους να σχηματίζουν δευτερογενή οργανικά αερολύματα, μέσω αντιδράσεων οξείδωσης ([Wilkes, 2020](#)).

### **2.1 Ανθρωπογενείς πηγές εκπομπής πτητικών υδρογονανθράκων**

Στις αστικές περιοχές, οι ανθρωπογενείς εκπομπές πτητικών υδρογονανθράκων συντελούνται κυρίως μέσω της οδικής κυκλοφορίας και βιομηχανικών διεργασιών όπως η παραγωγή ενέργειας, η εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου, ο κατασκευαστικός τομέας, η παρασκευή διαλυτών και η διαχείριση των αστικών απορριμμάτων. Ειδικότερα, η οδική κυκλοφορία, μέσω της εξάτμισης καυσαερίων από μηχανές εσωτερικής καύσης, συμβάλλει στην απελευθέρωση μίας σειράς πτητικών ουσιών όπως το  $C_6H_6$ , το τολουόλιο, το αιθυλοβενζόλιο, το ξυλόλιο και το εξάνιο ([Zapata-Marin et al., 2022](#); [Starokozhev et al., 2009](#)).

Η εκπομπή  $C_6H_6$  σχετίζεται με την περιεκτικότητα της βενζίνης σε αυτό (ως ενισχυτικό του αριθμού των οκτανίων), η οποία, σύμφωνα με την οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (1998/70/EC), έχει οριστεί σε ποσοστό ίσο με 1% v/v (Muto et al., 2025). Αξίζει, βεβαίως, να σημειωθεί πως τη μεγαλύτερη ποσότητα  $C_6H_6$  εκπέμπουν τα παλαιότερης τεχνολογίας αυτοκίνητα που δεν διαθέτουν καταλυτική τεχνολογία και τα βαρέως τύπου πετρελαιοκίνητα οχήματα, όπως φορτηγά και λεωφορεία. Με όσο μικρότερη ταχύτητα κινούνται τα οχήματα αυτά, τόσο περισσότερο αυξάνονται οι εκπομπές  $C_6H_6$  (Καρακίτσιος, 2008).

Γενικότερα, το  $C_6H_6$  αποτελεί κοινό συστατικό όλων των ορυκτών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένης της βενζίνης, του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και του λιγνίτη. Χρησιμοποιείται δε στη βιομηχανία ως προσθετικό καυσίμων, ως ενδιάμεσο σε χημικές διεργασίες, ως διαλύτης και ως συστατικό σε μία πληθώρα καταναλωτικών προϊόντων. Η ευρεία χρήση του και οι πτητικές του ιδιότητες το καθιστούν αέριο ρύπο με έντονη παρουσία στην ατμόσφαιρα (Madani et al., 2025).

Η βιομηχανία παραγωγής διαλυτών αποτελεί, επίσης, σημαντική πηγή μη μεθανικών πτητικών υδρογονανθράκων, μίας μεγάλης ομάδας ενώσεων όπου τα άτομα υδρογόνου αντικαθίστανται από άτομα θείου, οξυγόνου, αζώτου και αλογόνων (Dimitriou & Kassomenos, 2020). Οι διαλύτες χρησιμοποιούνται για την αραίωση πρώτων υλών, τη διάλυση προσμίξεων και συχνά ως πλαστικοποιητές. Περιέχονται σε μία μεγάλη γκάμα προϊόντων, όπως προϊόντα φανοποιίας αυτοκινήτων, καθαριστικά, βαφές, χρώματα, βερνίκια, κόλλες, αρώματα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας. Οι εκπομπές από τους διαλύτες είναι συνέπεια της εξάτμισής τους, κατά την οποία μόρια ελαφρύτερων πτητικών υδρογονανθράκων εκλύονται προς την ατμόσφαιρα. Στην Ευρώπη, η παραγωγή και χρήση διαλυτών ευθύνονται για την απελευθέρωση άνω του 25% του συνόλου των μη μεθανικών υδρογονανθράκων ανθρωπογενούς προέλευσης (Notario et al., 2020).

Μία άλλη σημαντική πηγή εκπομπής πτητικών υδρογονανθράκων αποτελούν οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις εξόρυξης και επεξεργασίας πετρελαίου και φυσικού αερίου. Σημειακές πηγές θεωρούνται οι πηγές άντλησης, τα διυλιστήρια, οι αεραγωγοί διεργασιών, οι δεξαμενές αποθήκευσης, οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων καθώς και σημεία διαρροής του μηχανολογικού εξοπλισμού. Η διακίνηση και εμπορία των παραγόμενων προϊόντων μπορεί να προκαλέσει έκλυση πτητικών ουσιών και από κινητές πηγές, όπως τα δεξαμενόπλοια και τα βυτιοφόρα οχήματα. Τα πρατήρια καυσίμων εισφέρουν στην απελευθέρωση πτητικών υδρογονανθράκων τόσο κατά τη

διαδικασία πλήρωσης των υπόγειων δεξαμενών τους με καύσιμα όσο και κατά τη διάρκεια του ανεφοδιασμού των οχημάτων ([U.S. Environmental Protection Agency, 1998](#)).

Σε πολλές ανατολικές χώρες, όπως η Κίνα, η Ιαπωνία, η Σιγκαπούρη και η Ταϊβάν, αλλά και σε ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Γερμανία, η Γαλλία και η Ολλανδία, εφαρμόζεται η καύση των απορριμμάτων ως μία μέθοδος που αφενός μειώνει τον όγκο των υλικών που οδηγούνται τελικά προς ταφή και αφετέρου αξιοποιεί τη θερμότητα της καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στο ρεύμα αέριων που παράγεται από τη διαδικασία αυτή εντοπίζονται αρκετοί ατμοσφαιρικοί ρύποι, όπως διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ), οξείδια αζώτου και θείου, πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, άλλες πτητικές ενώσεις (αλκάνια, αλκένια, κυκλοαλκάνια, οξυγονωμένοι υδρογονάνθρακες, αλογονωμένα οργανικά συστατικά) και διοξίνες. Παρά τις τεχνολογίες αντιρρύπανσης και καθαρισμού των απαερίων που εφαρμόζονται, σημαντικές ποσότητες από τους παραπάνω ρύπους εκλύονται στην ατμόσφαιρα με ό, τι δυσμενείς συνέπειες αυτό συνεπάγεται ([Chang et al., 2025](#)).

Από την άλλη μεριά, οι χώροι υγειονομικής ταφής απορριμμάτων αστικής προέλευσης δύνανται να εκπέμπουν στην ατμόσφαιρα σημαντικές ποσότητες πτητικών οργανικών ενώσεων, εξαιτίας της ποικίλης σύνθεσης των οικιακών αποβλήτων και των πολύπλοκων φυσικοχημικών διεργασιών στις οποίες υπόκεινται κατά τη συμπίεση και κάλυψη με εδαφικά υλικά. Η βιοαποικοδόμηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων και η μεγάλη περιεκτικότητα σε χημικά προϊόντα εκλύουν βλαβερές για το περιβάλλον και τον άνθρωπο πτητικές ενώσεις, όπως μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ),  $\text{C}_6\text{H}_6$  και διάφορες αλογονωμένες ενώσεις ([Pan et al., 2023](#)).

## **2.2 Φυσικές πηγές εκπομπής πτητικών υδρογονανθράκων**

Οι φυσικές πηγές απελευθερώνουν τεράστιες ποσότητες πτητικών υδρογονανθράκων, ξεπερνώντας κατά πολύ τις συνολικές εκπομπές από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Από τη μία, αυτό οφείλεται στη δράση αναερόβιων βακτηρίων και μικροοργανισμών κατά την αποσύνθεση οργανικής ύλης στα εδαφικά και υδάτινα οικοσυστήματα, όπου και εκλύεται το μεγαλύτερο κλάσμα των ατμοσφαιρικών πτητικών υδρογονανθράκων, με κύριο εκπρόσωπο το  $\text{CH}_4$ . Από την άλλη, η βλάστηση και η χλωρίδα των δασικών κυρίως οικοσυστημάτων είναι υπεύθυνες για την εκπομπή άνω των 300 διαφορετικών ενώσεων, ως αποτέλεσμα του μεταβολισμού των φυτών και της απόκρισης των

αμυντικών τους μηχανισμών σε ερεθίσματα από βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες. Επίσης, άλλες φυσικές εκπομπές σχετίζονται με τις πυρκαγιές, την ηφαιστειακή δραστηριότητα και τα περιττώματα των ζώων (Μοσχονάς, 1998).

Κάθε χρόνο, περίπου  $10^9$  τηπητικών οργανικών συστατικών εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα ως συνέπεια της βιολογικής λειτουργίας των φυτών, με κύριες διεργασίες, μεταξύ άλλων, την ανάπτυξη, την άμυνα και την επικοινωνία τους με το περιβάλλον (Zhao et al., 2017). Τα φυτά βιοσυνθέτουν πτητικά οργανικά συστατικά μέσω δευτερογενών μεταβολικών οδών, τα οποία απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα μέσω των ανατομικών τους στοιχείων, όπως τα φύλλα, οι καρποί, τα άνθη και οι ρίζες. Μέχρι σήμερα, έχουν καταγραφεί και ταξινομηθεί περισσότερες από 80.000 ενώσεις που περιλαμβάνουν κυρίως τερπένια, αλκένια, αλκοόλες, εστέρες και καρβονυλικές ενώσεις. Κύρια βιοχημικά μονοπάτια για την παραγωγή πτητικών ουσιών συνιστούν ο μεταβολισμός λιπαρών οξέων και η σύνθεση μεβαλονικού και σικιμικού οξέος (Wang et al., 2024).

Η συνύπαρξη και η δραστηριότητα μικροοργανισμών και αλγών στο έδαφος ή στο νερό στα έλη, στις εκβολές ποταμών, στις λίμνες και σε ηφαιστειογενείς ζώνες ευθύνεται για την αναερόβια αναγωγή θεικών αλάτων που συντελείται κατά την αποσύνθεση του οργανικού κλάσματος. Αυτό οδηγεί στη παραγωγή και αποδέσμευση πτητικών θειούχων ενώσεων που ονομάζονται καρβονυλοσουλφίδια. Από την οικογένεια των ενώσεων αυτών, το διμέθυλο-σουλφίδιο είναι το μόριο με τη μεγαλύτερη αφθονία στην ατμόσφαιρα παράκτιων περιοχών, όπου συμμετέχει σε αντιδράσεις με ελεύθερες ρίζες, παράγοντας αερολύματα (Besis et al., 2021).

Ωστόσο, έρευνες για τη παρουσία πτητικών υδρογονανθράκων σε απομακρυσμένες περιοχές, όπως οι πόλοι της Γης και οι τροπικές ωκεάνιες περιοχές, έχουν καταδείξει όχι μόνο την ευρεία χωρική κατανομή των ενώσεων αυτών, αλλά και την επίδραση του φυτοπλαγκτού και των βακτηριακών πληθυσμών στον σχηματισμό πτητικών οργανικών ενώσεων και προϊόντων από την οξειδωσή τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην επιφάνεια της θάλασσας στην Ανταρκτική έχουν εντοπιστεί μικροβιακές κοινότητες (περί τα 20 είδη βακτηρίων) που δύνανται να παράγουν τολουόλιο (Wohl et al., 2023).

## **2.3 Διεργασίες μεταφοράς και απομάκρυνσης των πτητικών υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα**

### **2.3.1 Οριζόντια μεταφορά**

Από τη στιγμή που οι πτητικοί ρύποι εγκαταλείψουν την πηγή εκπομπής τους, υπόκεινται σε συνθήκες που αλλάζουν την κατεύθυνση και τη χωρική τους κατανομή εντός της αέριας μάζας. Η μεταφορά και η εξάπλωσή τους στην ατμόσφαιρα ονομάζεται διασπορά. Από το σημείο διαφυγής και έχοντας μία αρχική ορμή, λόγω του ρεύματος απαερίων ή των διαδικασιών της έκλυσής τους, οι ρύποι εισέρχονται στην ατμόσφαιρα, συνήθως με υψηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τον περιβάλλοντα αέρα. Ως αποτέλεσμα, κινούνται ανοδικά και παρασύρονται κατά τη διεύθυνση της ταχύτητας του ανέμου. Η οριζόντια διασπορά επηρεάζεται από τη σύσταση της στήλης αερίου στην οποία περιέχεται ο ρύπος, το είδος της πηγής (σημειακή ή κινητή) και δύναται να προκαλέσει την απομάκρυνση ή/και αραίωση των ρύπων ([Παπαναστασίου, 2007](#)).

### **2.3.2 Κατακόρυφη μεταφορά**

Η κατακόρυφη μεταφορά των πτητικών υδρογονανθράκων και η καθ' ύψος διασπορά τους συντελείται μέσω της διάχυσης, με την επίδραση της τυρβώδους ατμοσφαιρικής ανάμειξης. Οι πτητικές ενώσεις που εκπέμπονται από αστικά και βιομηχανικά περιβάλλοντα, κινούμενες μέσα στο ρεύμα των απαερίων, αναμειγνύονται με τις στροβιλώδεις κινήσεις των αερίων μαζών και ανέρχονται μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος. Το χαμηλότερο στρώμα της τροπόσφαιρας που συνορεύει με την επιφάνεια της Γης και εκτείνεται έως το ύψος ανάμειξης και εντός του οποίου λαμβάνει χώρα η τυρβώδης ροή του αέρα καλείται «ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα». Η γνώση του ύψους και των διεργασιών που τελούνται εντός του στρώματος αυτού είναι καθοριστικής σημασίας για τη μελέτη της διασποράς των αέριων ρύπων, είτε αυτοί εκπέμπονται χαμηλά στο έδαφος (π.χ. από οχήματα) είτε σε μεγαλύτερο ύψος (π.χ. απαγωγοί καυσαερίων εργοστασίων) ([Λεβεντίδου, 2012](#)).

### **2.3.3 Ξηρή απόθεση**

Η ξηρή απόθεση έγκειται στην απομάκρυνση των πτητικών οργανικών συστατικών από την ατμόσφαιρα και τη μετατόπισή τους προς το έδαφος, τη βλάστηση και τους

ωκεανούς. Πρόκειται για μία σταδιακή διαδικασία που περιλαμβάνει την αεροδυναμική μεταφορά των ρύπων και την αλληλεπίδραση με την επιφάνεια του αποδέκτη. Με τον τρόπο αυτόν, καθίσταται αδύνατη η αντίδραση των ρύπων με άλλα αέρια συστατικά για τη παραγωγή τροποσφαιρικού O<sub>3</sub> και δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων (Liggio et al., 2025).

Το έδαφος έχει την ικανότητα να λειτουργεί ως μέσο δέσμευσης πτητικών αέριων ρύπων, μέσω των βιοχημικών διεργασιών της μικροβιακής κοινότητας που συντηρεί. Διάφοροι μικροοργανισμοί που διαβιούν στο έδαφος προσλαμβάνουν πτητικούς υδρογονάνθρακες από την ατμόσφαιρα και διασπούν τα οργανικά μόρια, αξιοποιώντας τον άνθρακα ως πηγή ενέργειας για την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή τους (Yang et al., 2024). Επιπλέον, μελέτες (Bergman et al., 2025; Matsui, 2016) έχουν καταδείξει τον ρόλο των φυτών ως αποδέκτες πτητικών οργανικών ενώσεων από την ατμόσφαιρα. Μέσω των στομάτων και εξειδικευμένων υποδοχέων της επιδερμίδας τους, τα πτητικά μόρια γίνονται αντιληπτά και εισέρχονται σε πολύπλοκα βιοχημικά μονοπάτια των φυτικών κυττάρων.

#### **2.3.4 Υγρή απόθεση**

Υγρή απόθεση ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία οι πτητικοί υδρογονάνθρακες μεταφέρονται προς την επιφάνεια της Γης μέσω υετού. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε μέσω της απόπλυσης των ρύπων, οι οποίοι, ευρισκόμενοι κάτω από νέφη, παρασύρονται από τα κατακρημνίσματα προς το έδαφος, είτε με την ενσωμάτωση των ρύπων στα σταγονίδια και τους κρυστάλλους πάγου εντός των νεφών, που στη συνέχεια καταλήγουν στο εδαφικό ή υδάτινο οικοσύστημα. Γενικά, η διαδικασία είναι πιο απότομη και ξαφνική σε σχέση με την ξηρή απόθεση, αλλά μπορεί να απομακρύνει μεγαλύτερες ποσότητες πτητικών ρύπων (Παπαναστασίου, 2007).

Καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη της παραπάνω διεργασίας είναι η αύξηση της υδατοδιαλυτότητας και η ταυτόχρονη ελάττωση της πτητικότητας των μορίων, γεγονός που επιτυγχάνεται με την οξείδωση υδρογονανθράκων μεγάλου μοριακού βάρους και την παραγωγή μορίων που δρουν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών (Iavorivska et al., 2016). Επιπλέον, ένας παράγοντας που ενισχύει τη σύνδεση των ρύπων με τα μόρια νερού είναι η ύπαρξη λειτουργικών ομάδων που περιέχουν πρωτικά υδρογόνα ή μορίων με υψηλή ηλεκτραρνητικότητα, όπως τα αλογονωμένα

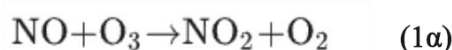
παράγωγα των πτητικών υδρογονανθράκων τα οποία αυξάνουν την πολικότητα και τον σχηματισμό δεσμών υδρογόνου με το νερό (Kaplan et al., 2024).

## 2.4 Φωτοξείδωση και αλληλοεπίδραση με άλλους τροποσφαιρικούς ρύπους

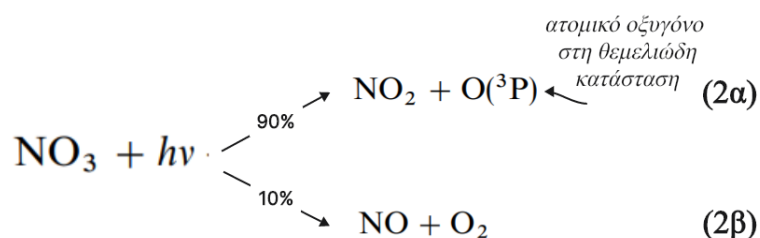
Στην τροπόσφαιρα, οι πτητικοί υδρογονάνθρακες μετατρέπονται μέσω χημικών διεργασιών που περιλαμβάνουν τη φωτόλυση σε μήκος κύματος μεγαλύτερο των 290 nm (μικρότερα μήκη κύματος απορροφώνται από το οξυγόνο (O<sub>2</sub>) και το O<sub>3</sub> στη στρατόσφαιρα), την αντίδραση με ρίζες υδροξυλίου (συνήθως κατά τη διάρκεια της ημέρας) και με ρίζες νιτρικών (κατά τις νυχτερινές ώρες), την αντίδραση με το τροποσφαιρικό O<sub>3</sub> και σε παράκτιες και θαλάσσιες περιοχές την αντίδραση με άτομα χλωρίου (κατά τη διάρκεια της ημέρας) (Atkinson & Arey, 2004; Mellouki et al., 2015; Shen & Ku, 1999; Creasey et al., 2001).

- Σχηματισμός νιτρικών ριζών (NO<sub>3</sub>):

Υπό τη παρουσία μονοξειδίου του αζώτου (NO) στη τροπόσφαιρα, προερχόμενου από ανθρωπογενείς ή/και βιογενείς πηγές, πραγματοποιούνται οι κάτωθι αντιδράσεις:

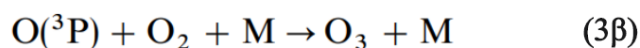
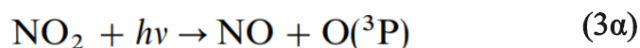


Καθώς οι NO<sub>3</sub> φωτολύονται τάχιστα (με χρόνο ζωής περί τα 5 sec σε ηλιόλουστες συνθήκες) και αντιδρούν με το NO, η συγκέντρωσή τους παραμένει χαμηλή κατά τη διάρκεια της ημέρας.



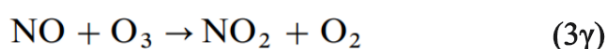
- Σχηματισμός O<sub>3</sub>:

Αρχικά συντελείται φωτόλυση του διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>), σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:



*M=αέρας*

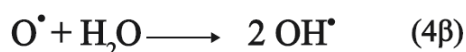
Στη συνέχεια το O<sub>3</sub> αντιδρά γρήγορα με το NO:



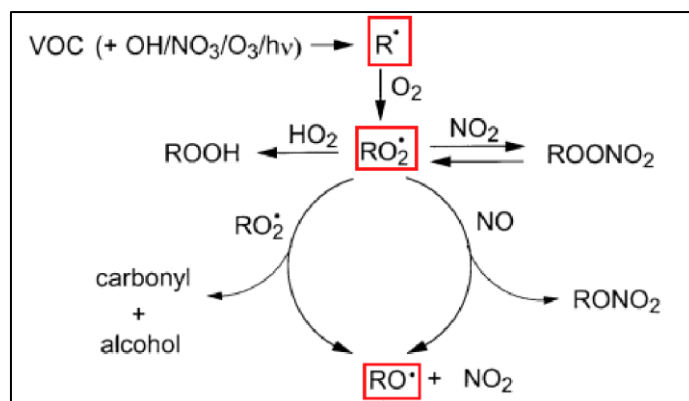
Καθώς τα αντιδρώντα και τα προϊόντα βρίσκονται σε φωτοχημική ισορροπία, οι παραπάνω αντιδράσεις πραγματοποιούνται χωρίς καθαρό σχηματισμό ή απώλεια O<sub>3</sub>.

- Σχηματισμός ριζών υδροξυλίου (OH•):

Οι (OH•) παράγονται από τη φωτόλυση του O<sub>3</sub>, σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις κατά τις οποίες πραγματοποιείται καθαρή απώλεια τροποσφαιρικού O<sub>3</sub>:

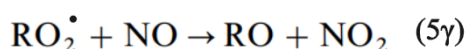
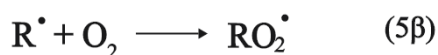
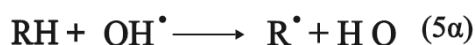


Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο μηχανισμός αντίδρασης των πτητικών υδρογονανθράκων στην τροπόσφαιρα περιλαμβάνει τη δημιουργία ενδιάμεσων προϊόντων όπως άλκυλο-ρίζες (R•), υπεροξυ-ρίζες (RO<sub>2</sub>•) και αλκοξυ-ρίζες (RO•) ή υποκατεστημένα παράγωγα αυτών (όταν περιέχουν υδροξυλ-ομάδες, νιτροξυ-ομάδες και την καρβονυλ-ομάδα). Στο Σχήμα 2.1, παρουσιάζεται συνοπτικά το σύνολο των βασικών αντιδράσεων αποδόμησης και μετατροπής των πτητικών υδρογονανθράκων.

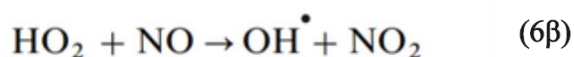
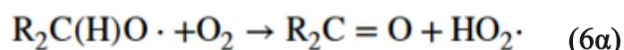


**Σχήμα 2.1:** Σχηματική απλοποίηση των αντιδράσεων οξείδωσης και μετατροπής των πτητικών υδρογονανθράκων. Με κόκκινο πλαίσιο σημειώνονται τα ενδιάμεσα προϊόντα.

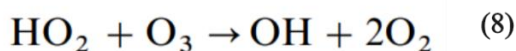
Αρχικά, η OH• αφαιρεί ένα άτομο υδρογόνου από τον πτητικό υδρογονάνθρακα, παράγοντας την R• η οποία στη συνέχεια ενώνεται με το O<sub>2</sub> της ατμόσφαιρας, σχηματίζοντας την RO<sub>2</sub>•. Αυτή με τη σειρά της αντιδρά με το NO, δίνοντας την RO•, κατά τις αντιδράσεις που παρουσιάζονται παρακάτω.



Έπειτα, η RO• αντιδρά με το O<sub>2</sub>, δίνοντας καρβονυλικά παράγωγα και την υδροϋπεροξυλική ρίζα HO<sub>2</sub>•, η οποία στη συνέχεια αντιδρά με το NO και παράγει νέες OH• και NO<sub>2</sub>, κατά τις αντιδράσεις:

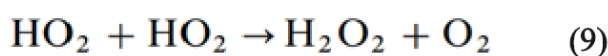


Όλες οι παραπάνω χημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται υπό την προϋπόθεση της ύπαρξης ικανοποιητικής συγκέντρωσης οξειδίων του αζώτου NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub>). Σε αντίθετη περίπτωση, η OH• και η HO<sub>2</sub>• αντιδρούν με το O<sub>3</sub>, σύμφωνα με τις αντιδράσεις:



Οι δύο αυτές αντιδράσεις αποτελούν μία επιπλέον διεργασία κατανάλωσης τροποσφαιρικού  $\text{O}_3$ .

Απουσία  $\text{NO}$  ή όταν αυτό βρίσκεται σε χαμηλή συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα, η  $\text{HO}_2\bullet$  δύναται να αντιδράσει είτε με όμοιά της είτε με την  $\text{RO}_2\bullet$ , κατά τις αντιδράσεις:



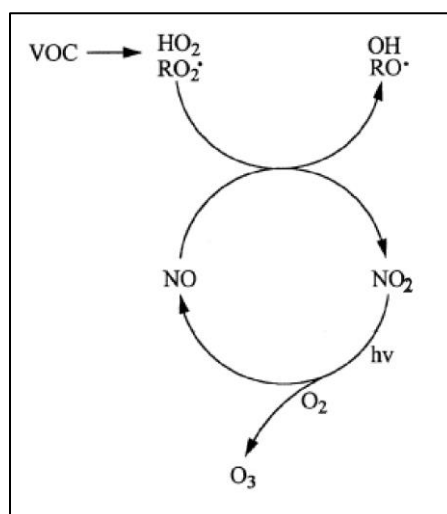
### 3 Παραγωγή δευτερογενών ρύπων

Οι πτητικοί υδρογονάνθρακες θεωρούνται σημαντικές πρόδρομες ενώσεις για τον σχηματισμό δευτερογενών ρύπων όπως το  $\text{O}_3$  και τα δευτερογενή οργανικά αερολύματα. Η πολυποίκιλη προέλευσή τους, το πολύπλοκο χημικό τους προφίλ και η υψηλή αντιδραστικότητά τους, τους προσδίδουν βασικό ρόλο στη δημιουργία ρύπων μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων (Shi et al., 2025).

#### 3.1 Παραγωγή τροποσφαιρικού όζοντος

Η οξείδωση των πτητικών υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα είναι μία εξαιρετικά πολύπλοκη χημική διεργασία που καθιστά αδύνατη την απλή συσχέτιση της αποδόμησής τους με τον σχηματισμό  $\text{O}_3$  στην τροπόσφαιρα. Διαφορετικές ενώσεις συνεισφέρουν με διαφορετικό τρόπο στην παραγωγή  $\text{O}_3$ , γεγονός που αντανακλά τις διαφορές που παρουσιάζουν τα μέλη της μεγάλης αυτής ομάδας οργανικών ενώσεων στη χημική δομή και την ικανότητα να μετέχουν σε αντιδράσεις.

Ορισμένα οργανικά μόρια αντιδρούν πολύ αργά, δίνοντας ανενεργά προϊόντα και συνεισφέροντας ελάχιστα στη δημιουργία  $\text{O}_3$ , ενώ κάποια άλλα αντιδρούν τάχιστα, παράγοντας δραστικά παράγωγα και συμβάλλοντας κατά πολύ στον σχηματισμό του δευτερογενούς ρύπου (Mellouki et al., 2015). Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται συνοπτικά η πορεία σχηματισμού τροποσφαιρικού  $\text{O}_3$  από πτητικούς υδρογονάνθρακες.



**Σχήμα 3.1:** Η πορεία σχηματισμού τροποσφαιρικού όζοντος από τα οξειδωμένα παράγωγα των πτητικών υδρογονανθράκων (VOC-Volatile Organic Compounds) με τη συμμετοχή των οξειδίων του αζώτου.

Τα προϊόντα οξείδωσης των πτητικών ενώσεων αντιδρούν με τα NO<sub>x</sub>, παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας, και σχηματίζουν τροποσφαιρικό O<sub>3</sub>. Η καθαρή φωτοχημική παραγωγή O<sub>3</sub> (αλλά και η απώλεια, όπως φαίνεται στις αντιδράσεις 7 και 8) επηρεάζεται από τη συγκέντρωση NO<sub>x</sub> και καθορίζεται από τον ρυθμό των αντιδράσεων 5γ και 6β. Κάθε παράγοντας που επηρεάζει τη συγκέντρωση OH<sup>•</sup> και τον αριθμό των μορίων NO που μετατρέπονται σε NO<sub>2</sub> (αντίδραση 3γ) επηρεάζει και τον ρυθμό παραγωγής O<sub>3</sub>, καθώς και την τελική ποσότητά του (Atkinson, 2000).

Κατά τους τελευταίους δύο αιώνες, τα αυξημένα επίπεδα πτητικών υδρογονανθράκων και NO<sub>x</sub> έχουν οδηγήσει στον διπλασιασμό του O<sub>3</sub> στην κατώτερη τροπόσφαιρα, καθιστώντας το, το τρίτο πιο σημαντικό ανθρωπογενές αέριο του θερμοκηπίου μετά το CO<sub>2</sub> και το CH<sub>4</sub>. Αξίζει να σημειωθεί ότι το τροποσφαιρικό O<sub>3</sub> καταστρέφει τη βλάστηση και μειώνει τη δέσμευση CO<sub>2</sub> από τα φυτά (Helmig et al., 2009).

### 3.2 Παραγωγή δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων

Η οξείδωση των πτητικών υδρογονανθράκων οδηγεί και στη δημιουργία δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων, τα οποία είναι συστατικά των πολύ λεπτών αιωρούμενων σωματιδίων και γι' αυτόν τον λόγο έχουν άμεσο αντίκτυπο στον σχηματισμό ομίχλης. Επιπρόσθετα, ορισμένα παραπροϊόντα της οξείδωσης, όπως η φορμαλδεΐδη και η

γλυοξάλη, που περιέχονται σε υγρά αερολύματα ή σταγονίδια νέφους, οξειδώνονται περαιτέρω, σχηματίζοντας νέες δευτερογενείς οργανικές ενώσεις.

Τα δευτερογενή οργανικά αερολύματα λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης, επηρεάζοντας, έτσι, τον σχηματισμό των νεφών και το μέγεθος και τον χρόνο κατακράτησης των σταγονιδίων στα νέφη, ενώ δύνανται να απομακρυνθούν από την ατμόσφαιρα μέσω πυρηνοποίησης και σύγκρουσης (Zhao et al., 2022).

Η αρχική χημική διεργασία που οδηγεί στον σχηματισμό των δευτερογενών οργανικών αερολυμάτων εκκινεί με την οξείδωση (στην αέρια φάση) ενός πτητικού πρόδρομου μορίου από μία οξειδωτική ένωση όπως η  $\text{OH}\bullet$ , η  $\text{NO}_3$  και το  $\text{O}_3$ . Ως αποτέλεσμα, τα παραγόμενα ημιπτητικά ή μη πτητικά μόρια αντιδρούν πολύ πιο γρήγορα με τη  $\text{OH}\bullet$  απ' ό, τι το μόριο «γονέας», σχηματίζοντας μία δεύτερη γενιά οξυγονωμένων προϊόντων, ικανών να σχηματίσουν οργανικά αερολύματα (Zhao et al., 2022).

Το μοντέλο που περιγράφει πιο κατάλληλα τον μηχανισμό σχηματισμού των δευτερογενών αερολυμάτων είναι αυτό της κατανομής μεταξύ αέριας και σωματιδιακής φάσης, κατά το οποίο ημιπτητικά μόρια απορροφώνται στην επιφάνεια προϋπάρχοντων σωματιδίων. Ωστόσο, δύναται να λάβει χώρα και ομογενής πυρηνοποίηση των δευτερογενών ενώσεων (είτε μη πτητικών είτε ημιπτητικών), η οποία καταλήγει στη δημιουργία νέων πολύ λεπτών σωματιδίων. Στην περίπτωση της κατανομής, αυξάνεται η μάζα των προϋπάρχοντων σωματιδίων, ενώ στη πυρηνοποίηση αυξάνεται ο αριθμός τους (Αποστολάκη, 2008).

#### **4 Παράγοντες που επηρεάζουν την τύχη των πτητικών υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα**

Μετεωρολογικές παράμετροι όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η υγρασία του αέρα επηρεάζουν έντονα τη συγκέντρωση και διασπορά των πτητικών ενώσεων στην ατμόσφαιρα. Η θερμοκρασία αυξάνει την πτητικότητα των οργανικών συστατικών, ενισχύοντας με τον τρόπο αυτόν τις εκπομπές από ανθρωπογενείς και βιογενείς πηγές. Από την άλλη μεριά, οι υψηλές θερμοκρασίες αυξάνουν τις αναθυμιάσεις από την επεξεργασία πετρελαιοειδών και τη χρήση διαλυτών. Επίσης, οι εκπομπές από μονάδες παραγωγής ενέργειας αυξάνονται με τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, εξαιτίας των απαιτήσεων για θέρμανση ή ψύξη (Αποστολάκη, 2008).

Η ταχύτητα του ανέμου επιδρά στη διασπορά και διάλυση των πτητικών υδρογονανθράκων, με τους ταχύτερους ανέμους να μειώνουν γενικά την κατά τόπο συγκέντρωσή τους, λόγω ανάμειξης με τον αέρα. Η υγρασία επηρεάζει τις αντιδράσεις στην αέρια φάση και μειώνει τη συγκέντρωση ορισμένων πτητικών στελεχών (Faraday et al., 2025).

Η κατακόρυφη κατανομή των συγκεντρώσεων διαφοροποιείται ανάλογα με την παρουσία (ή μη) ομίχλης στην ατμόσφαιρα, αλλά και σε συνάρτηση με την εποχή του έτους. Τους χειμερινούς μήνες, οι ρύποι έχουν αυξημένη συγκέντρωση σε σύγκριση με τους θερινούς, με τις τιμές άνοιξης-φθινοπώρου να κυμαίνονται μεταξύ των τιμών που παρατηρούνται τον χειμώνα και το καλοκαίρι. Αιτία γι' αυτό αποτελεί η υψηλότερη συγκέντρωση των  $\text{OH}\bullet$  το καλοκαίρι, με συνέπεια την αυξημένη απομάκρυνση των πτητικών ενώσεων από την ατμόσφαιρα. Επιπλέον, η ικανότητα των πτητικών μορίων να μετέχουν σε αντιδράσεις επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και είναι μειωμένη κατά τους χειμερινούς μήνες, όταν επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες.

Όσον αφορά στην ομίχλη, για τους αρωματικούς υδρογονάνθρακες ισχύει ότι σε ανέφελες ημέρες και μεγάλο υψόμετρο το ποσοστό τους είναι μικρότερο απ' ό,τι τις ημέρες με ομίχλη. Μία πιθανή εξήγηση για αυτό μπορεί να είναι ότι τις ημέρες με ομίχλη η βασικότερη διεργασία για την απομάκρυνσή τους (που είναι η αντίδραση με τις  $\text{OH}\bullet$ ) εξασθενεί, διότι τα αυξημένα επίπεδα  $\text{NO}$  κοντά στο έδαφος επιταχύνουν τη μετατροπή της  $\text{HO}_2\bullet$  σε  $\text{OH}\bullet$  (Chen et al., 2022).

## **5 Επιπτώσεις από την εκπομπή πτητικών υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα**

### **5.1 Επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων**

Η ατμοσφαιρική ρύπανση επηρεάζει άμεσα την ανθρώπινη υγεία. Οι συνέπειες εξαρτώνται από το είδος του ρύπου, την τοξικότητά του, τον βαθμό έκθεσης, τον χρόνο παραμονής των ουσιών στον εισπνεόμενο αέρα και τη γενικότερη κατάσταση της υγείας των ανθρώπων, με τον μεγαλύτερο κίνδυνο να υφίστανται τα άτομα των ευπαθών και ευαίσθητων πληθυσμιακών ομάδων (Manisalidis et al., 2020).

Στα μεγάλα αστικά κέντρα όπου και παρατηρούνται οι υψηλότερες ανθρωπογενείς εκπομπές πτητικών οργανικών ρύπων, λόγω της κυκλοφορίας των οχημάτων και της βιομηχανικής δραστηριότητας, η υγεία των πολιτών δέχεται

μεγαλύτερη επιβάρυνση. Οι εκπομπές C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, τολουολίου και ξυλολίου είναι ιδιαίτερες αυξημένες στο «μικροπεριβάλλον» που αναπτύσσεται στους οδικούς δρόμους, με συνέπεια ακόμη και η μικρή χρονικά παραμονή των ατόμων να αυξάνει την έκθεσή τους στους ρύπους αυτούς (Von Schneidemesser et al., 2019).

Ωστόσο, κίνδυνοι για την υγεία προκύπτουν και από την έκθεση των ατόμων σε πτητικούς υδρογονάνθρακες κατά την παραμονή τους εντός κατοικιών, σχολείων, γραφείων, επαγγελματικών καταστημάτων ή χώρων αναψυχής. Στο εσωτερικό περιβάλλον εκπέμπονται πτητικές ενώσεις από οικοδομικά υλικά, βερνίκια, καθαριστικά, αποσμητικά, διαλύτες, μελάνια και βιοκτόνα, αλλά και από τις εγκαταστάσεις θέρμανσης. Ανάμεσα στις πλέον επιβλαβείς ενώσεις σε εσωτερικούς χώρους συγκαταλέγονται το C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, το τολουόλιο, το ξυλόλιο, το αιθυλοβενζόλιο, η ακεταλδεΐδη και η φορμαλδεΐδη (Pál et al., 2024).

Η έκθεση σε πτητικούς υδρογονάνθρακες συντελείται κυρίως μέσω της αναπνοής. Λόγω της λιπόφιλης φύσης τους, οι ρύποι αυτοί εισέρχονται στην κυκλοφορία του αίματος μέσω των πνευμόνων και κατανέμονται τελικά σε όλο το σώμα. Τα όργανα που λειτουργούν με υψηλή ροή αίματος (εγκέφαλος, ήπαρ, νεφροί) τείνουν να συσσωρεύουν πτητικά μόρια ευκολότερα. Στο ήπαρ, οι ενώσεις αυτές μετατρέπονται σε μόρια μεγαλύτερης πολικότητας, ώστε να διευκολυνθεί η απέκκρισή τους. Ο μεταβολισμός τους παράγει δραστικά ενδιάμεσα μόρια που επάγουν τη κυττοτοξικότητα και τις μεταλλάξεις. Επιπλέον, το οξειδωτικό στρες που προκαλούν μειώνει τα αντιοξειδωτικά αποθέματα και διαταράσσει τη λειτουργία των μιτοχονδρίων. Τα παραπάνω συμβάλλουν στην καταστροφή λιπιδίων και πρωτεϊνών και στη θραύση κλώνων DNA, με συνέπεια να δυσχεραίνεται η ενδοκυτταρική σηματοδότηση της μεταγραφής και τελική κατάληξη την απόπτωση των κυττάρων και την αποδυνάμωση του ανοσοποιητικού συστήματος (Mpora, 2025).

Στον Πίνακα 5-1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι βλάβες που προκαλεί η είσοδος των πτητικών ουσιών στον ανθρώπινο οργανισμό, ανάλογα με το σύστημα οργάνων ή ιστών που προσβάλλουν.

**Πίνακας 5-1:** Ασθένειες και συμπτώματα στην ανθρώπινη υγεία λόγω έκθεσης σε πτητικούς υδρογονάνθρακες (Riggs et al., 2022; Han et al., 2024; Mpora, 2025).

Σύστημα που επηρεάζεται	Πάθηση/Συμπτώματα	Πτητικές οργανικές ενώσεις που ευθύνονται
Καρδιαγγειακό	-Αλλοιώσεις στο ενδοθήλιο καρδιαγγειακών ιστών -Ισχαιμική καρδιοπάθεια -Υπέρταση -Αρρυθμία	Βενζόλιο Ακρολεΐνη Φορμαλδεΐδη Στυρένιο
Αναπνευστικό	-Βήχας -Δύσπνοια -Άσθμα -Χρόνια βρογχίτιδα -Πνευμονική ίνωση	Ακρολεΐνη Φορμαλδεΐδη
Νευρικό	-Διαταραχές διάθεσης -Απώλεια μνήμης -Ελλειμματική προσοχή -Διαταραχή στην ανάπτυξη του εγκεφάλου σε νεογνά/παιδιά	Τολουόλιο Στυρένιο n-Εξάνιο
Ηπατικό/νεφρικό	-Ηπατομεγαλία -Στεάτωση -Νέκρωση ηπατικού ιστού -Διαταραχή ενζυμικής λειτουργίας -Καταστροφή αιμοφόρων αγγείων στους νεφρούς -Μειωμένη ικανότητα διήθησης	Τριγλωροαιθυλένιο Τετραχλωράνθρακες Βινυλοχλωρίδιο
Αναπαραγωγικό/Ενδοκρινικό	-Μείωση ποιότητας σπέρματος και τεστοστερόνης -Διαταραχή ωορρηξίας -Τερατογενέσεις και χαμηλό βάρος νεογνών -Νευροαναπτυξιακές διαταραχές εμβρύου	Βενζόλιο Φθαλικές ενώσεις

Ιδιαίτερο κίνδυνο διατρέχουν επαγγελματικές ομάδες τα μέλη των οποίων έρχονται καθημερινά σε επαφή και για μεγάλο χρονικό διάστημα με πληθώρα βλαπτικών πτητικών οργανικών ρύπων στον χώρο εργασίας τους ή κατά την άσκηση των καθηκόντων τους. Τα διάφορα «μικροπεριβάλλοντα» εργασίας στα οποία δραστηριοποιούνται οι επαγγελματίες αυτοί τους εκθέτουν σε υψηλές συγκεντρώσεις πτητικών ρύπων, σε σχέση με τα επίπεδα έκθεσης του γενικού πληθυσμού. Για παράδειγμα, οι αστυνομικοί που ρυθμίζουν την κυκλοφορία των οχημάτων σε μεγάλους οδικούς κόμβους, οι αστυνομικοί σε περιπολία, οι οδηγοί λεωφορείων και ταξί, και οι εργαζόμενοι σε διυλιστήρια ή πρατήρια καυσίμων αποτέλεσαν πληθυσμούς-στόχο και οι μετρήσεις C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> που έγιναν στον χώρο δραστηριότητάς τους κατέδειξαν ότι η έκθεσή τους είναι πολλαπλάσια σε σχέση με εκείνη του μέσου πληθυσμού (Καρακίτσιος, 2008).

## 5.2 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

Η επίδραση των πτητικών υδρογονανθράκων στο περιβάλλον σχετίζεται με τον σχηματισμό δευτερογενών αερολυμάτων και τροποσφαιρικού O<sub>3</sub>. Τα οργανικά αερολύματα έχουν κεντρικό ρόλο στην ατμοσφαιρική χημεία, καθώς επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα και το κλίμα, τροποποιώντας βασικές διεργασίες όπως ο σχηματισμός νεφών και το ισοζύγιο ακτινοβολίας της Γης. Με την ικανότητά τους να σκεδάζουν την ηλιακή ακτινοβολία και να λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης νεφών, επηρεάζουν το θερμικό ισοζύγιο και τα μοτίβα των βροχοπτώσεων (Sun et al., 2025).

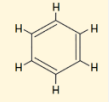
Το O<sub>3</sub> εισέρχεται στα φυτά μέσω των φύλλων, αυξάνοντας την παραγωγή δραστικών ελευθέρων ριζών στο μεσόφυλλο. Οι ενώσεις αυτές βλάπτουν τη δομή των χλωροπλαστών και εμποδίζουν τη μεταφορά ηλεκτρονίων κατά τη φωτοσύνθεση. Το O<sub>3</sub> προκαλεί, επίσης, το κλείσιμο των στομάτων και μεταβάλλει την αγωγιμότητά τους, εμποδίζοντας με αυτόν τον τρόπο τη δέσμευση του CO<sub>2</sub> (Nowroz et al., 2024). Σε περιπτώσεις έντονου στρες, τα φυτά εμφανίζουν έντονη χλώρωση στα φύλλα και περιορίζουν ή αναστέλλουν τη φωτοσυνθετική τους δραστηριότητα. Η μακροχρόνια έκθεσή τους σε υψηλές συγκεντρώσεις O<sub>3</sub> διαταράσσει τη φυσιολογική λειτουργία, την αναπνοή, την πρόσληψη νερού και θρεπτικών στοιχείων και τη μετακίνηση μεταβολικών προϊόντων (Gao et al., 2024). Τέλος, έχει βρεθεί ότι το O<sub>3</sub> επηρεάζει την επικονίαση των ανθέων, διαταράσσοντας τη χημική σηματοδότηση μεταξύ φυτών και εντόμων (Dubuisson et al., 2024). Ορισμένοι δε ανθρωπογενείς πτητικοί υδρογονάνθρακες παρεμβαίνουν στην αναπαραγωγή ωφέλιμων εντόμων, προκαλώντας με την παρουσία τους σύγχυση και αποπροσανατολισμό στα αρσενικά άτομα κατά την προσέγγιση των θηλυκών (Jürgens & Bischoff, 2016).

## 6 Το βενζόλιο

### 6.1 Φυσικοχημικό προφίλ

Το C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> είναι ένα άχρωμο, εξαιρετικά εύφλεκτο υγρό με γλυκιά οσμή. Εξατμίζεται στον αέρα πολύ γρήγορα και διαλύεται ελαφρώς στο νερό. Στον Πίνακα 6-1 παρουσιάζονται τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του.

**Πίνακας 6-1:** Φυσικοχημικές ιδιότητες βενζολίου  
(<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzene>)

Μοριακός Τύπος	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
Χημική δομή 	Χαμηλή χημική δραστηριότητα. Διαθέτει 3 διπλούς δεσμούς, όμως δεν δίνει καμία από τις αντιδράσεις προσθήκης των αλκενίων (αλογόνωση, ενυδάτωση, υδραλογόνωση), παρά μόνο αντιδράσεις υποκατάστασης.
Μοριακό βάρος	78,11 g/mol
Σημείο βρασμού	80,1 °C
Σημείο τήξης	5,5 °C
Πυκνότητα	0,8787 g/m <sup>3</sup> (15 °C)
Ιξώδες	0,604 mPa (25 °C)
Διαλυτότητα στο νερό	0,188% (25 °C)
Σημείο ανάφλεξης	-11 °C
Τάση ατμών	94,8 mm Hg (25 °C)

## 6.2 Διεργασίες παρασκευής

Οι κυριότερες βιομηχανικές διεργασίες παραγωγής C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> παρουσιάζονται παρακάτω (U.S. Environmental Protection Agency, 1998; De Recherche Sur Le Cancer & Humans, 2018).

### 6.2.1 Καταλυτική αναμόρφωση/διαχωρισμός

Τροφοδοσία της μεθόδου αποτελούν οι βαριές (με πολλά άτομα άνθρακα) νάφθες της απευθείας απόσταξης κλάσματος του πετρελαίου. Αφού πρώτα υποστούν κατεργασία με υδρογόνο για την απομάκρυνση του θείου, αναμειγνύονται με ανακυκλωμένο υδρογόνο και θερμαίνονται. Το ρεύμα που προκύπτει διέρχεται μέσω αντιδραστήρων στους οποίους ο καταλύτης (συνήθως χλωρίδιο του λευκόχρυσου ή ρόδιου) μετατρέπει τις παραφίνες σε αρωματικές ενώσεις. Τα προϊόντα του αντιδραστήρα κατευθύνονται στο τμήμα διαχωρισμού, όπου το υδρογόνο διαχωρίζεται από τους υγρούς υδρογονάνθρακες και επαναχρησιμοποιείται. Το υγρό προϊόν, εν συνεχεία, καταλήγει σε έναν σταθεροποιητή, όπου οι ελαφρύτερες ενώσεις απομακρύνονται, ενώ

παράλληλα αφαιρείται το βουτάνιο από το μίξιο τους. Κατόπιν, το C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> εκχυλίζεται από το αναμορφωμένο προϊόν.

### 6.2.2 Απαλκυλίωση και trans-αλκυλίωση του τολουολίου

Τολουόλιο υψηλής καθαρότητας, αναμειγμένο με βαρύτερες αρωματικές ενώσεις ή παραφίνες από τη στήλη κλασμάτωσης του C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, θερμαίνεται με αέριο πλούσιο σε υδρογόνο στους 730 °C και διέρχεται από καταλυτικό αντιδραστήρα απαλκυλίωσης. Το τολουόλιο (που είναι στην ουσία C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στο οποίο έχει υποκατασταθεί ένα άτομο υδρογόνου με μία μεθυλομάδα -CH<sub>3</sub>) αντιδρά με το υδρογόνο και παράγει C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> και CH<sub>4</sub>. Το αέριο μείγμα διαχωρίζεται σε έναν διαχωριστή υψηλής πίεσης και το C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> ανακτάται με απόσταξη.

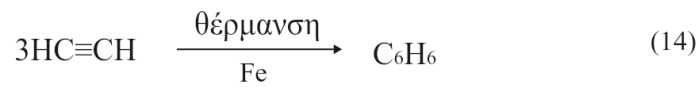
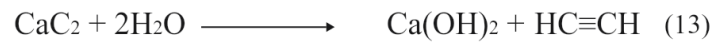
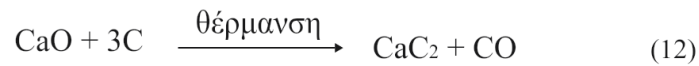
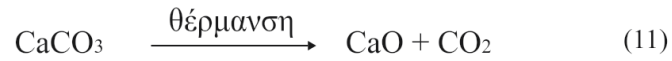
Κατά την trans-αλκυλίωση, δύο μόρια τολουολίου μετατρέπονται καταλυτικά σε ένα μόριο ξυλολίου και ένα μόριο C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>. Η διεργασία είναι παρόμοια με την απαλκυλίωση, αλλά απαιτεί μικρότερες θερμοκρασίες, καταναλώνει λιγότερο υδρογόνο και δεν υπάρχει απώλεια άνθρακα με την παραγωγή CH<sub>4</sub>.

### 6.2.3 Πυρόλυση αργού πετρελαίου

Είναι μία διεργασία αλληπάληλων σταδίων, όπου το αργό πετρέλαιο θερμαίνεται παρουσία ατμού. Έπειτα, το αέριο μείγμα κατευθύνεται σε έναν κλίβανο που λειτουργεί σε θερμοκρασίες 700-900 °C. Οι διαλυμένες ενώσεις υπόκεινται σε κλασματική απόσταξη κατά την οποία διαχωρίζονται στα συστατικά τους, συμπεριλαμβανομένου και του C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>.

### 6.2.4 Πολυμερισμός ακετυλενίου

Κατά τη συγκεκριμένη διεργασία, λαμβάνει χώρα ο τριμερισμός του ακετυλενίου παρουσία σιδήρου (Fe) ως καταλύτη και με την επικράτηση υψηλών θερμοκρασιών κατά την αντίδραση παράγεται C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>. Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες αποκλειστικά ανόργανες ενώσεις (ανθρακικό ασβέστιο, οξείδιο του ασβεστίου). Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται δίνονται παρακάτω:



### 6.3 Χρήσεις βενζολίου

Το  $\text{C}_6\text{H}_6$  χρησιμοποιείται γενικά στη βιομηχανία ως απολιπαντικό μετάλλων, ως διαλύτης οργανικών υλικών, ως πρόσθετο καυσίμων αλλά και ως αρχικό ή ενδιάμεσο προϊόν στη χημική και φαρμακευτική βιομηχανία. Με βάση αυτό συντίθεται μία πληθώρα προϊόντων, όπως βαφές, απορρυπαντικά, λιπαντικά και φυτοφάρμακα ([De Recherche Sur Le Cancer & Humans, 2018](#)). Στον Πίνακα 6-2 δίνονται συνοπτικά οι βασικότερες χρήσεις του  $\text{C}_6\text{H}_6$  στον βιομηχανικό τομέα για τη σύνθεση πρόδρομων πρώτων υλών.

**Πίνακας 6-2:** Διεργασίες αξιοποίησης του βενζολίου για την παραγωγή ενώσεων που χρησιμεύουν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή δευτερογενών προϊόντων, βιομηχανικής και οικιακής χρήσης (Zuckerman, 1995; Encyclopedia of Toxicology, 2023; Clinical Ocular Toxicology, 2008).

Παραγωγή αιθυλοβενζολίου και στυρενίου	Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής αιθυλοβενζολίου ενσωματώνεται στη διαδικασία αφυδρογόνωσης για την παραγωγή στυρενίου	<u>1ο στάδιο</u> -Καταλυτική αλκυλίωση $C_6H_6$ με αιθυλένιο, παρουσία καταλύτη (χλωριούχο αργίλιο) <u>Ενδιάμεσο στάδιο:</u> καθαρισμός ακατέργαστου αιθυλοβενζολίου και ανάκτηση καθαρού <u>2ο στάδιο</u> -Καταλυτική αφυδρογόνωση αιθυλοβενζολίου για παραγωγή στυρενίου	Το στυρένιο πολυμερίζεται προς πολυστυρένιο που είναι η πρώτη ύλη για πλαστικά, επιστρώσεις από λάτεξ, χρώματα, πολυεστέρες, συνθετικά καουτσούκ
Παραγωγή κυκλοεξανίου	Μέσω της υδρογόνωσης βενζολίου	Ανάμειξη καθαρού $C_6H_6$ και υδρογόνου σε καταλυτικούς αντιδραστήρες, παρουσία πλατίνας και νικελίου. Αντίδραση ιδιαίτερος εξώθερμη. Έλεγχος της θερμοκρασίας με ανακύκλωση υλικών και παραγωγή ατμού που διοχετεύεται σε άλλες βιομηχανικές διεργασίες	<u>Προϊόντα με πρώτη ύλη το κυκλοεξάνιο</u> Νάυλον, διαλύτες για ρητίνες-λίπη-έλαια, μυκητοκτόνα, αντιδραστήριο σε χημικές αναλύσεις για προσδιορισμό μοριακού βάρους
Παραγωγή κουμηνίου	Ολόκληρη η εμπορική ποσότητα του κουμηνίου παράγεται από την αντίδραση $C_6H_6$ με προπυλένιο	Το $C_6H_6$ και το προπυλένιο αντιδρούν σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις παρουσία όξινου καταλύτη (φωσφορικό οξύ ή θειικό οξύ)	<u>Προϊόντα με πρώτη ύλη το κουμένιο</u> Ακετόνη, φαινόλη, απορρυπαντικά, διαλύτες σμάλτων-βερνικιών-χρωμάτων
Παραγωγή φαινολών	Η οξείδωση του κουμηνίου παράγει ακετόνη και φαινόλη	<u>1ο στάδιο</u> -Το κουμένιο αντιδρά με το $O_2$ του αέρα και παράγεται υδροϋπεροξειδίο του κουμηνίου <u>2ο στάδιο</u> -Παρουσία όξινου καταλύτη ( $H_2SO_4$ ) το προϊόν του 1ου σταδίου διασπάται σε ακετόνη και φαινόλη	<u>Προϊόντα με πρώτη ύλη τις φαινόλες</u> Μονωτικά υλικά, κόλλες, βερνίκια, χρώματα, μελάνι, χρωστικές, φωτιστικά αέρια, αρώματα, σαπούνια, παιχνίδια
Παραγωγή νιτροβενζολίου	Νίτρωση του $C_6H_6$	Με μία έντονα εξώθερμη αντίδραση το $C_6H_6$ αντιδρά με νιτρικό οξύ παρουσία θειικού οξέος. Συνήθως το $C_6H_6$ υπόκειται σε συνεχόμενες νιτρώσεις εντός αντιδραστήρων συνεχούς ανάδευσης	<u>Προϊόντα με πρώτη ύλη το νιτροβενζόλιο</u> Ανιλίνη, λιπαντικά κινητήρων, φυτοφάρμακα, στιλβωτικά

Τόσο από τις διεργασίες σύνθεσης όσο και από τις βιομηχανικές χρήσεις του C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> παράγονται εκπομπές που δύνανται να χωριστούν σε τέσσερις τύπους: εκπομπές διεργασίας, εκπομπές αποθήκευσης, εκπομπές διαρροής εξοπλισμού και δευτερογενείς εκπομπές.

#### **6.4 Θεσμοθέτηση ορίου ασφαλείας για την προστασία της ανθρώπινης υγείας από την έκθεση στο βενζόλιο**

Η θεσμοθέτηση των οριακών τιμών για το C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στην Ελλάδα ξεκίνησε με την ΚΥΑ 9238/332/2004 (ΦΕΚ 405/Β/27.2.2004), η οποία εκδόθηκε για την εναρμόνιση της εθνικής νομοθεσίας με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/69/ΕΚ. Με την απόφαση αυτή ορίστηκε για πρώτη φορά η μέση ετήσια οριακή τιμή των 5 μg/m<sup>3</sup> για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, θέτοντας ως ορόσημο πλήρους συμμόρφωσης την 1η Ιανουαρίου 2010. Το νομοθετικό αυτό πλαίσιο εκσυγχρονίστηκε μεταγενέστερα με την Υ.Α. Η.Π. 14122/549/Ε.103/2011 (ΦΕΚ 488/Β/30.3.2011), η οποία ενσωμάτωσε την Οδηγία 2008/50/Ε και αποτελεί έως σήμερα το ισχύον κανονιστικό πλαίσιο για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα στη χώρα. Παράλληλα, πέρα από τον καθαρά νομοθετικό του χαρακτήρα, το όριο των 5 μg/m<sup>3</sup> λειτουργεί και ως ένα σταθερό σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης και τη σύγκριση των επιπέδων συγκέντρωσης βενζολίου μεταξύ των διαφορετικών σταθμών μέτρησης.

## Μέρος Β: Αποτελέσματα – Σύγκριση δεδομένων

### 7 Σταθμοί μέτρησης και περιοχή μελέτης

Η καταγραφή και παρακολούθηση των συγκεντρώσεων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στην ατμόσφαιρα πραγματοποιείται μέσω του εθνικού δικτύου σταθμών μέτρησης, το οποίο τελεί υπό την εποπτεία του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ). Συγκεκριμένα, η λειτουργία των σταθμών, η συλλογή και η διασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων πραγματοποιείται από το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ). Οι σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σε στρατηγικά σημεία μεγάλων πόλεων της ελληνικής επικράτειας, προσφέροντας αντιπροσωπευτική εικόνα της ποιότητας του αέρα σε εθνικό επίπεδο. Το πεδίο μελέτης της παρούσας εργασίας επικεντρώνεται στις περιοχές που εκτείνονται γύρω από τους επιλεγμένους σταθμούς, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα αστικών περιβαλλόντων με διαφορετικά χαρακτηριστικά ρύπανσης. Για τις ανάγκες της έρευνας, τα πρωτογενή δεδομένα αντλήθηκαν από συγκεκριμένους σταθμούς του δικτύου, οι οποίοι παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 7-1.

**Πίνακας 7-1:** Στοιχεία θέσης, χαρακτηρισμού και συχνότητας δειγματοληψίας των επιλεγμένων σταθμών μέτρησης (*Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), 2025*).

Όνομα σταθμού	Θέση σταθμού		Χαρακτηρισμός	Διενέργεια μετρήσεων	
	Γεωγραφικό μήκος	Γεωγραφικό πλάτος		Συχνότητα	Χρονικό διάστημα λήψης
Πατησίων	23.733053	37.999587	Αστικός-Κυκλοφορίας	ανά 1 ώρα	24 ώρες
Πειραιάς	23.645230	37.944656	Αστικός-Κυκλοφορίας	ανά 1 ώρα	24 ώρες
Ελευσίνα	23.538432	38.051322	Περιοστικός-Βιομηχανικός	ανά 1 ώρα	24 ώρες
Αγίας Σοφίας	22.945099	40.633724	Αστικός-Κυκλοφορίας	ανά 1 ώρα	24 ώρες
Κορδελιό	22.893219	40.673453	Αστικός-Βιομηχανικός	ανά 1 ώρα	24 ώρες
Σίνδος	22.802169	40.657842	Περιοστικός-Βιομηχανικός	ανά 1 ώρα	24 ώρες
Πάτρα	21.734512	38.246469	Αστικός-Κυκλοφορίας	ανά 1 ώρα	24 ώρες

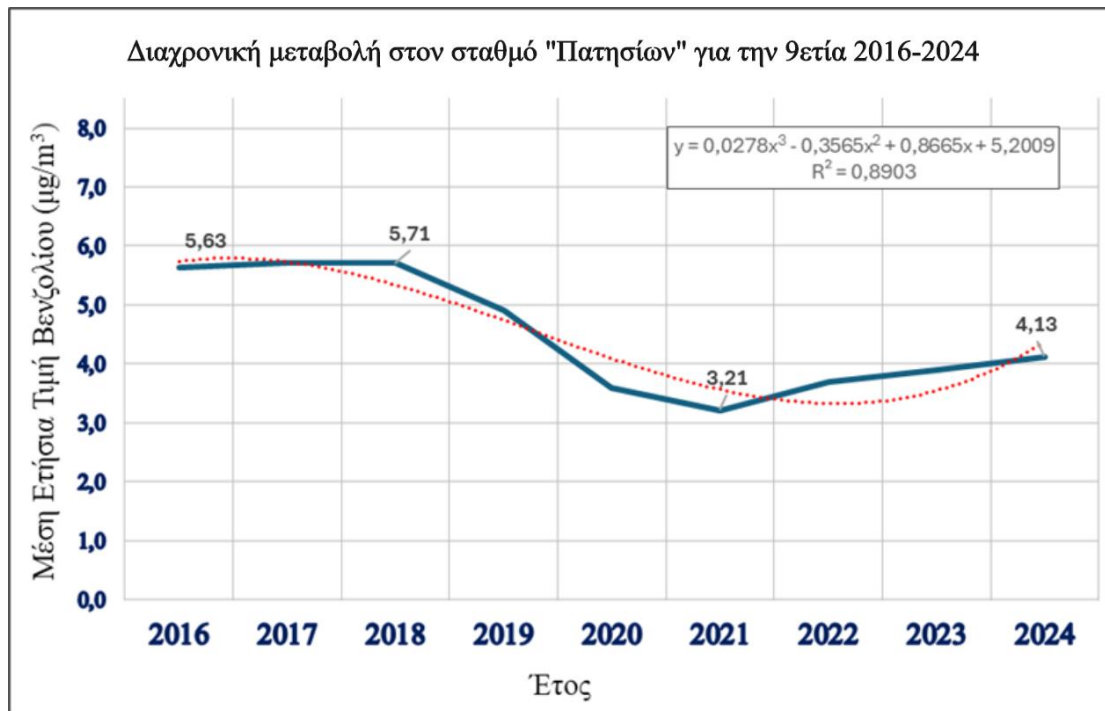
## 8 Αποτελέσματα της επεξεργασίας πρωτογενών δεδομένων

### 8.1 Διαχρονική μεταβολή της συγκέντρωσης βενζολίου

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η διαχρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων  $C_6H_6$ , όπως αυτές καταγράφηκαν από το δίκτυο σταθμών παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κατά την περίοδο μελέτης. Σκοπός της ανάλυσης είναι ο εντοπισμός των μεταβολών των συγκεντρώσεων σε διαφορετικές περιοχές του αστικού ιστού και η αξιολόγηση της επίδρασης τοπικών και άλλων παραγόντων στη διαμόρφωση της ποιότητας του αέρα.

Για κάθε σταθμό παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα μέσων ετήσιων τιμών, συνοδευόμενο από ένα πολυωνμικό μοντέλο τάσης και τον συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ), ο οποίος καταδεικνύει τη στατιστική αξιοπιστία της παρατηρούμενης μεταβολής. Μέσα από τη συγκριτική παράθεση των διαγραμμάτων, επιχειρείται η ερμηνεία των αυξομειώσεων σε συνάρτηση με τις εκπομπές από την κυκλοφορία των οχημάτων, τις κλιματικές συνθήκες, αλλά και την εφαρμογή περιβαλλοντικών μέτρων ή έκτακτων περιορισμών που επηρέασαν τη δραστηριότητα στην περιοχή.

Η διαχρονική εξέλιξη των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων  $C_6H_6$  για τον σταθμό της οδού Πατησίων κατά την περίοδο 2016-2024 απεικονίζεται στο Σχήμα 8.1.



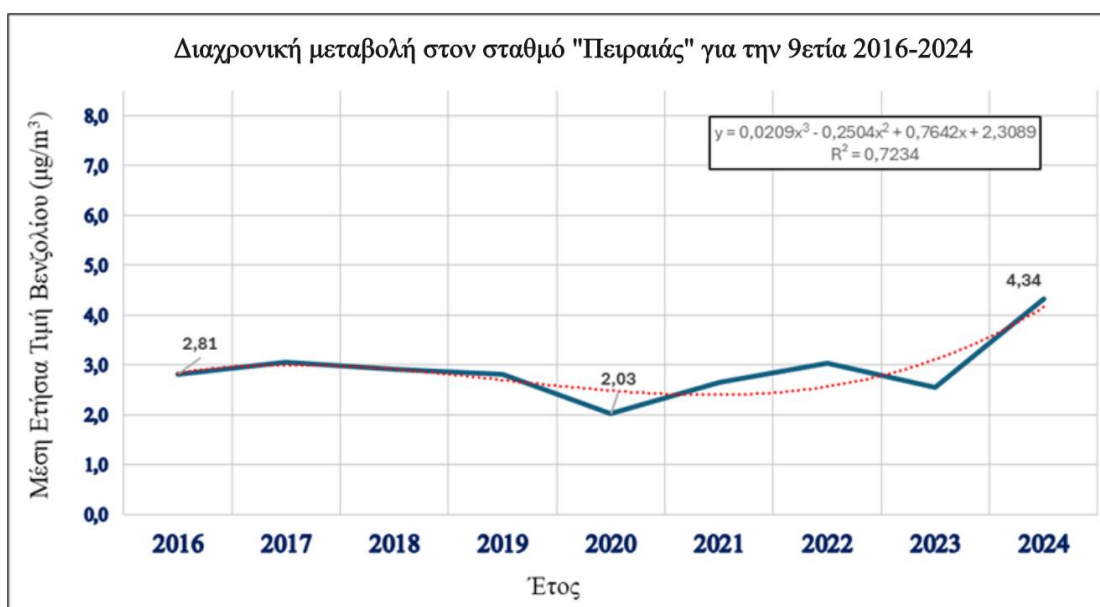
**Σχήμα 8.1:** Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό της οδού Πατησίων για την εννεαετία 2016-2024. Η μπλε συνεχής γραμμή απεικονίζει τις καταγεγραμμένες τιμές, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη τη γραμμή τάσης (πολυωνυμική προσέγγιση 3ου βαθμού).

Ειδικότερα, διακρίνεται γενικευμένη πτωτική πορεία των συγκεντρώσεων, με τις τιμές να εκκινούν από τα ( $5,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) το 2016 και να υποχωρούν στα ( $4,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) το 2024. Η χρονική περίοδος 2018-2021 παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς σε αυτήν εντοπίζεται η δραστικότερη μείωση του ρύπου, με την ελάχιστη τιμή ( $3,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) να καταγράφεται το έτος 2021. Η πτώση που παρατηρείται μετά το 2019 δεν είναι απλώς μία αριθμητική μείωση, αλλά η μετάβαση του σταθμού από κατάσταση μη συμμόρφωσης σε κατάσταση συμμόρφωσης με τα ευρωπαϊκά πρότυπα ποιότητας αέρα.

Η καταγραφή της ελάχιστης τιμής κατά το έτος 2021 φαίνεται να συνδέεται άμεσα με τους εκτεταμένους περιορισμούς στις μετακινήσεις και τη μείωση της οικονομικής δραστηριότητας λόγω της πανδημίας COVID-19. Η δραστική μείωση της κυκλοφορίας των οχημάτων, που αποτελεί την κύρια πηγή εκπομπών  $\text{C}_6\text{H}_6$  στο αστικό περιβάλλον, ερμηνεύει την κατακόρυφη πτώση των συγκεντρώσεων κατά τη διετία 2020-2021, ενώ η σταδιακή επάνοδος στην κανονικότητα μετά το 2022 αντικατοπτρίζεται στην ήπια ανοδική τάση που καταγράφεται στο τέλος της περιόδου μελέτης (Avdoulou et al., 2022).

Για την απεικόνιση της τάσης επιλέχθηκε πολυωνυμικό μοντέλο 3ου βαθμού, το οποίο εξασφαλίζει τη βέλτιστη προσαρμογή ( $R^2 = 0,89$ ). Το μοντέλο αυτό επιτυγχάνει την εξομάλυνση των βραχυχρόνιων διακυμάνσεων, αναδεικνύοντας τη μακροχρόνια πτωτική τάση, αλλά και την πρόσφατη τάση ανάκαμψης. Ο υψηλός συντελεστής προσδιορισμού υποδηλώνει ότι το μοντέλο ερμηνεύει το 89% της μεταβλητότητας των δεδομένων, γεγονός που προσδίδει υψηλή στατιστική σημαντικότητα στα ευρήματα. Τέλος, παρά την ελαφρά ανοδική τάση που παρατηρείται μετά το 2021, οι συγκεντρώσεις παραμένουν σε επίπεδα αισθητά χαμηλότερα από εκείνα της αρχής της περιόδου αναφοράς.

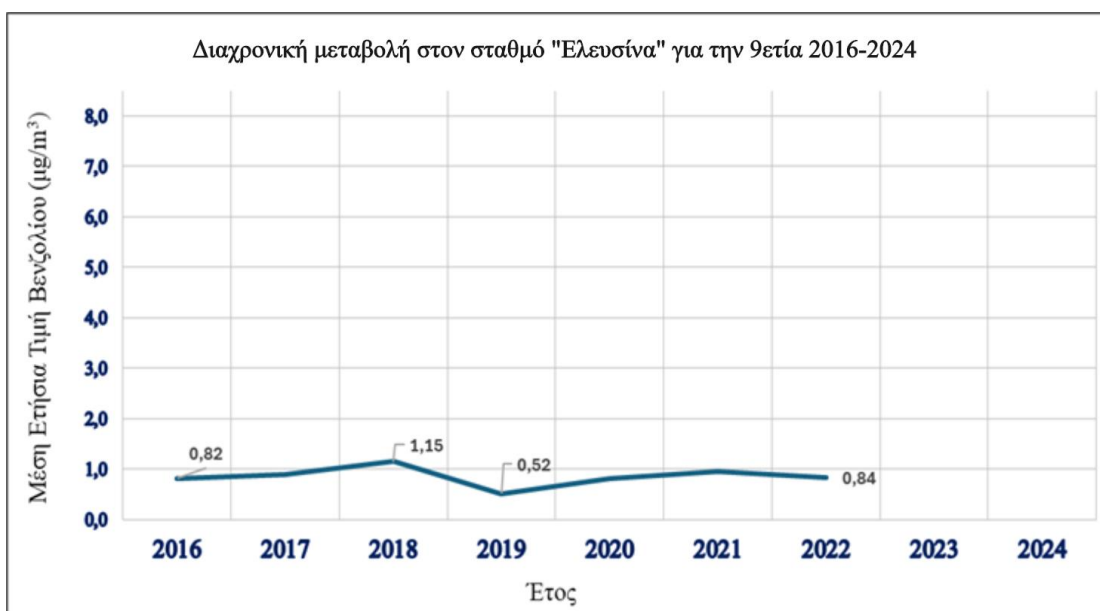
Στο Σχήμα 8.2 παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης  $C_6H_6$  στον σταθμό του Πειραιά για την περίοδο 2016-2024. Η πορεία του ρύπου χαρακτηρίζεται από σχετική σταθερότητα έως το 2019, με τιμές που κυμαίνονται περί των  $2,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Σχήμα 8.2:** Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό «Πειραιάς» για την εννεαετία 2016-2024. Η μπλε συνεχής γραμμή αναπαριστά τις μετρούμενες τιμές, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη απεικονίζει την πολυωνυμική τάση 3ου βαθμού ( $R^2=0,72$ ).

Η επίδραση της πανδημίας COVID-19 είναι εμφανής και σε αυτόν τον σταθμό, με τη χαμηλότερη τιμή ( $2,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) να καταγράφεται το 2020. Η μείωση αυτή αποδίδεται στον περιορισμό της κυκλοφορίας των οχημάτων και της δραστηριότητας στον λιμένα. Η μείωση που παρατηρείται στον Πειραιά κατά το έτος 2020 ευθυγραμμίζεται με τη βιβλιογραφική τεκμηρίωση για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στην Αττική λόγω των περιορισμών της πανδημίας (Avdoulou et al., 2022).

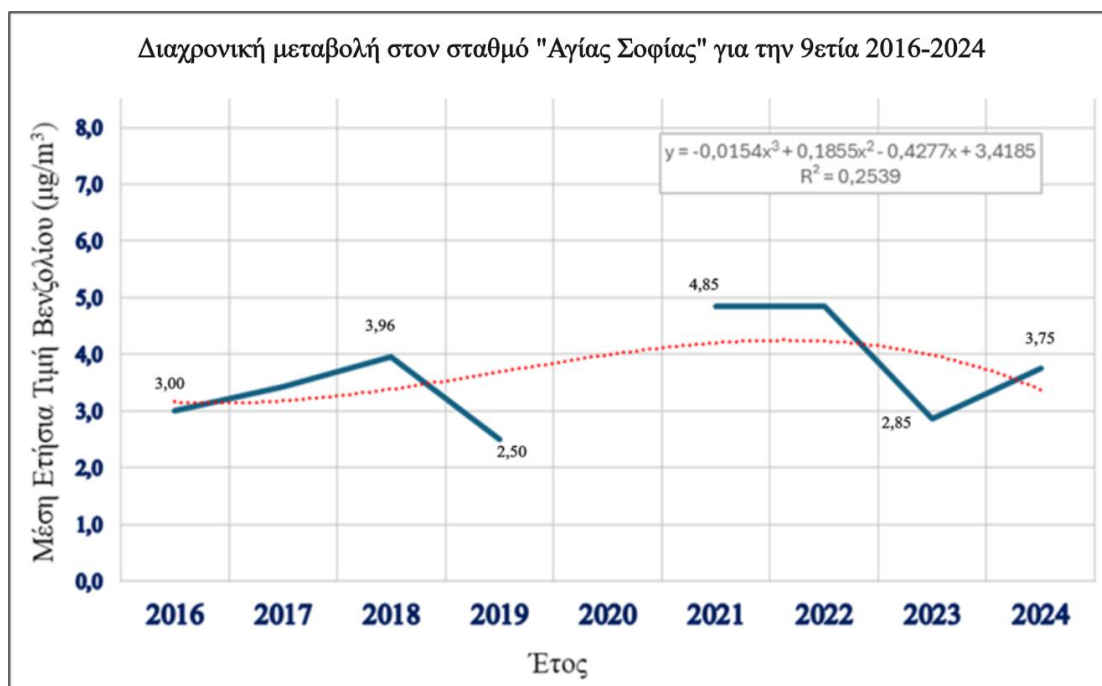
Στο Σχήμα 8.3 παρουσιάζεται η διαχρονική πορεία των συγκεντρώσεων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στον σταθμό της Ελευσίνας. Το κύριο χαρακτηριστικό του σταθμού αυτού είναι οι ιδιαίτερα χαμηλές μέσες ετήσιες τιμές, οι οποίες καθ' όλη την εξεταζόμενη περίοδο παραμένουν σταθερά κάτω από 1,2 μg/m<sup>3</sup>, υποδηλώνοντας περιορισμένη τοπική επιβάρυνση από τον συγκεκριμένο ρύπο. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι για τα έτη 2023 και 2024 δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από τον σταθμό, με αποτέλεσμα η χρονοσειρά να ολοκληρώνεται το 2022. Λόγω των εξαιρετικά χαμηλών τιμών και της απουσίας δεδομένων για την πρόσφατη διετία, δεν κρίθηκε σκόπιμη η εφαρμογή μοντέλου τάσης, καθώς οι μικρές αυξομειώσεις που παρατηρούνται (π.χ. η ελάχιστη τιμή 0,52 μg/m<sup>3</sup> το 2019) στερούνται στατιστικής σημαντικότητας και αποδίδονται σε τυχαίους τοπικούς παράγοντες.



**Σχήμα 8.3:** Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου (μg/m<sup>3</sup>) στον σταθμό «Ελευσίνα» (2016-2022). Σημειώνεται η απουσία μετρήσεων για τα έτη 2023 και 2024, καθώς και η απουσία στατιστικής τάσης λόγω των ιδιαίτερα χαμηλών επιπέδων συγκέντρωσης του ρύπου.

Στο Σχήμα 8.4 παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στον σταθμό της Αγίας Σοφίας για την περίοδο 2016-2024. Η χρονοσειρά εμφανίζει μία διακοπή το έτος 2020, λόγω έλλειψης διαθέσιμων μετρήσεων, γεγονός που εμποδίζει την πλήρη αξιολόγηση της επίδρασης των πρώτων περιοριστικών μέτρων της πανδημίας στον συγκεκριμένο σταθμό. Μετά την επανέναρξη των μετρήσεων το 2021, παρατηρείται αισθητή άνοδος των συγκεντρώσεων (4,85 μg/m<sup>3</sup>), οι οποίες διατηρήθηκαν σταθερές έως το 2022, πλησιάζοντας το ετήσιο όριο ασφαλείας. Η έντονη αυτή διακύμανση, σε συνδυασμό με την απότομη πτώση το 2023

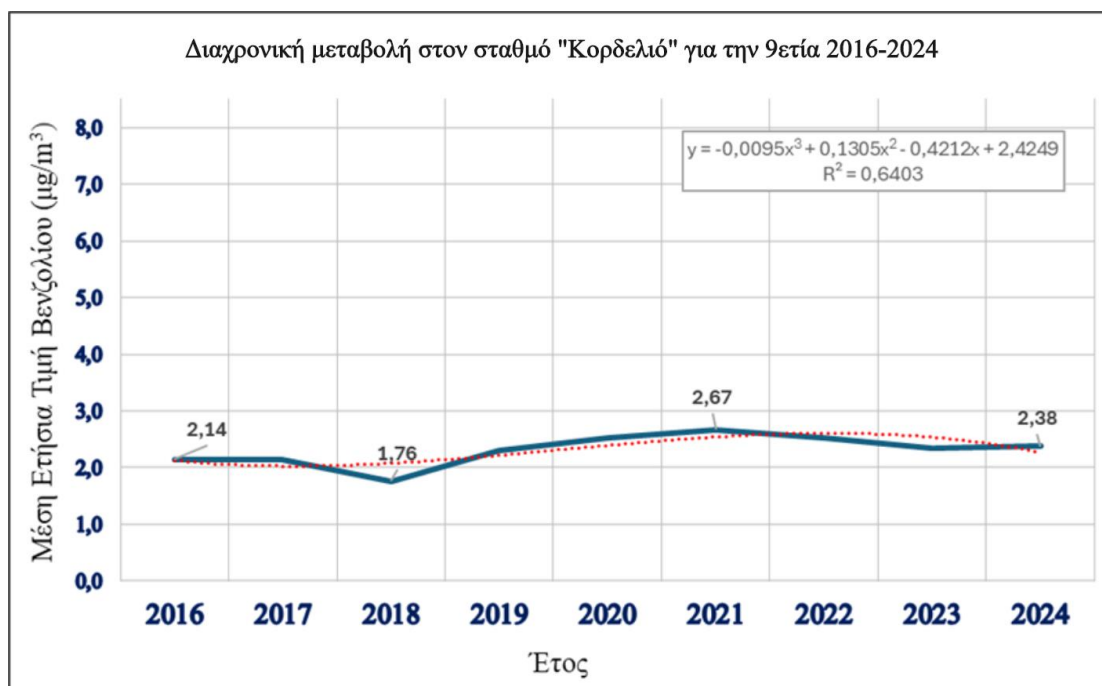
και την εκ νέου ανάκαμψη το 2024, αντικατοπτρίζεται στον χαμηλό συντελεστή προσδιορισμού του πολυωνυμικού μοντέλου ( $R^2 = 0,25$ ). Η τιμή αυτή υποδηλώνει ότι το μοντέλο ερμηνεύει μόλις το 25% της μεταβλητότητας των δεδομένων, με τη γραμμή τάσης να λειτουργεί μόνο ως ενδεικτική πορεία και όχι ως ασφαλές στατιστικό εργαλείο πρόβλεψης, λόγω της υψηλής αστάθειας των μετρούμενων τιμών στην περιοχή.



**Σχήμα 8.4:** Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό «Αγίας Σοφίας» (2016-2024). Σημειώνεται η έλλειψη δεδομένων για το έτος 2020. Η διακεκομμένη γραμμή τάσης παρουσιάζεται ενδεικτικά, με τον συντελεστή ( $R^2 = 0,25$ ) να υποδηλώνει περιορισμένη στατιστική προσαρμογή λόγω της έντονης μεταβλητότητας των τιμών.

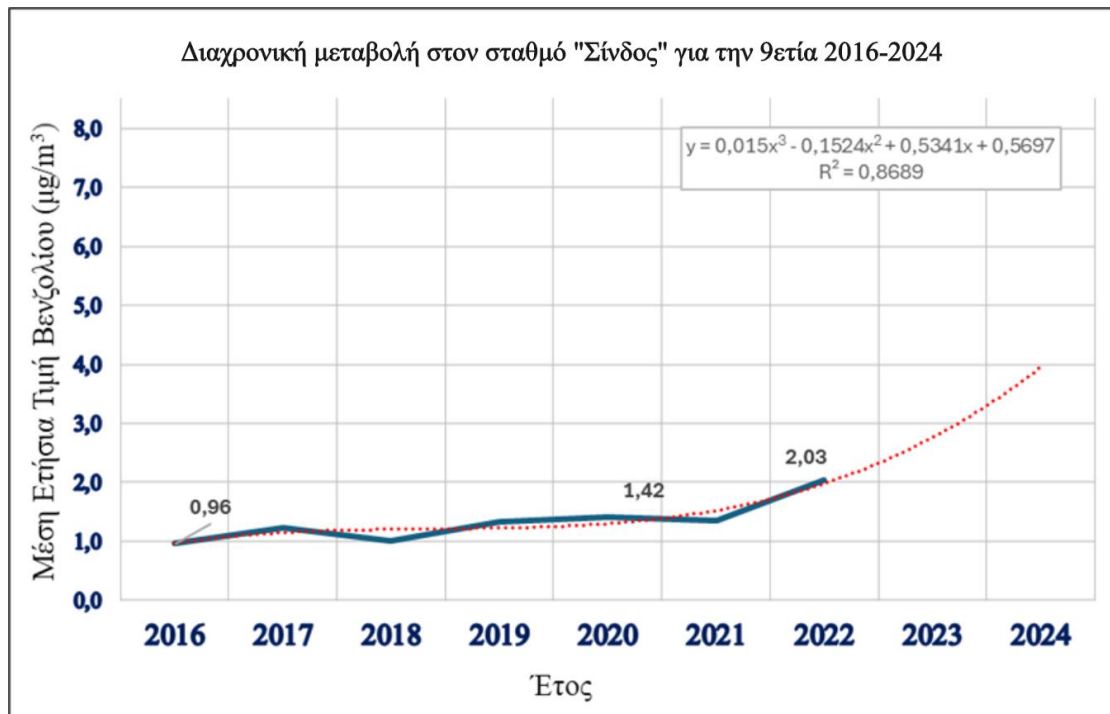
Στο Σχήμα 8.5 παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων  $\text{C}_6\text{H}_6$  στον σταθμό του Κορδελιού για την περίοδο 2016-2024. Η πορεία του ρύπου στην περιοχή χαρακτηρίζεται από σχετική σταθερότητα, με τις μέσες ετήσιες τιμές να κυμαίνονται μεταξύ  $1,76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  το 2018 και  $2,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$  το 2021. Αξιοσημείωτο είναι ότι ο σταθμός δεν εμφάνισε μείωση των συγκεντρώσεων κατά το πρώτο έτος της πανδημίας (2020), αλλά αντιθέτως κατέγραψε τη μέγιστη τιμή του το 2021, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι εκπομπές στην περιοχή ενδέχεται να επηρεάζονται περισσότερο από τοπικές δραστηριότητες ή τη θέρμανση, παρά αποκλειστικά από την κυκλοφορία οχημάτων. Η τάση των δεδομένων περιγράφεται από ένα πολυωνυμικό μοντέλο 3ου βαθμού με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0,64$ . Η τιμή αυτή υποδηλώνει ότι το μοντέλο ερμηνεύει το 64% της μεταβλητότητας των συγκεντρώσεων, προσφέροντας

ικανοποιητική στατιστική εικόνα της μέσης πορείας του ρύπου. Μετά το 2021, παρατηρείται μικρή πτωτική τάση, με τη συγκέντρωση να διαμορφώνεται στα 2,38  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  το 2024.



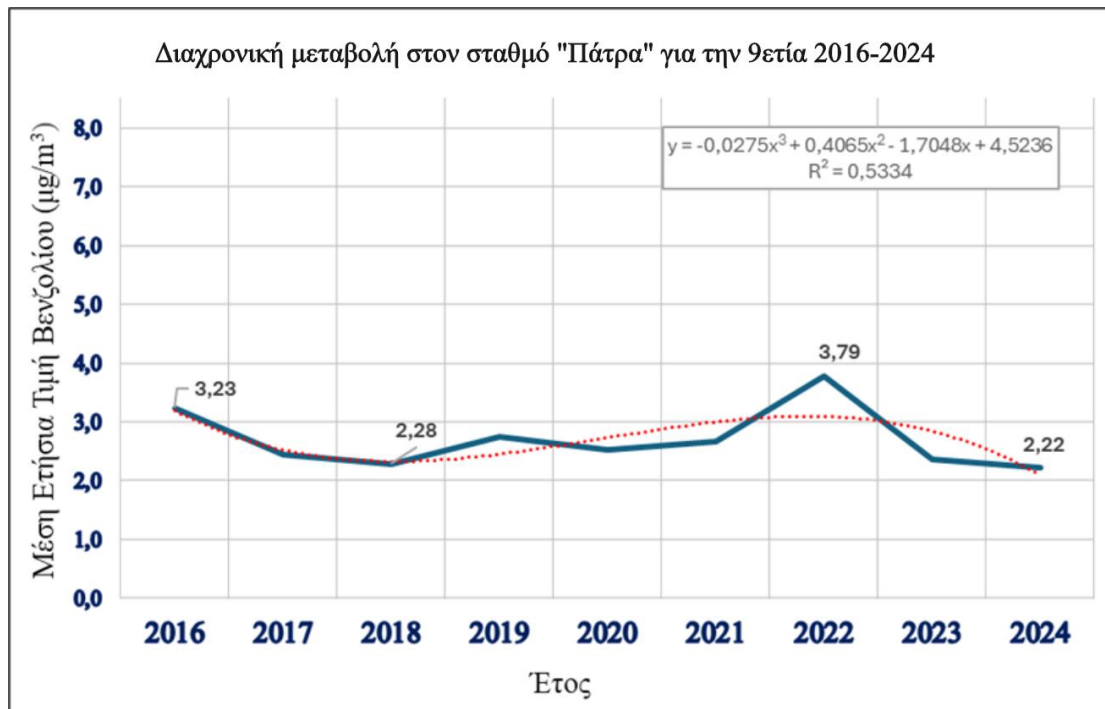
**Σχήμα 8.5:** Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό «Κορδελιό» (2016-2024). Η μπλε συνεχής γραμμή αναπαριστά τις μετρούμενες τιμές, ενώ η κόκκινη διακεκομμένη απεικονίζει την πολυωνμική τάση 3ου βαθμού ( $R^2=0,64$ ).

Στο Σχήμα 8.6 παρουσιάζεται η διαχρονική μεταβολή των συγκεντρώσεων  $\text{C}_6\text{H}_6$  στον σταθμό της Σίνδου για την περίοδο 2016-2024. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα ρύπανσης κατά την πρώτη πενταετία, με τις τιμές να παραμένουν σταθερά κάτω από το 1,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ωστόσο, από το 2021 και έπειτα παρατηρείται σαφής ανοδική πορεία, με τη συγκέντρωση να φτάνει τα 2,03  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  το 2022. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι για τα έτη 2023 και 2024 δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις, συνεπώς η πορεία της κόκκινης διακεκομμένης γραμμής για το διάστημα αυτό αποτελεί προβολή μίας δυναμικής τάσης και όχι πραγματική μέτρηση. Το πολυωνμικό μοντέλο 3ου βαθμού παρουσιάζει υψηλή στατιστική αξιοπιστία ( $R^2 = 0,87$ ), ερμηνεύοντας το 87% της μεταβλητότητας των δεδομένων. Η ισχυρή αυτή προσαρμογή αναδεικνύει την τάση αύξησης του ρύπου στην περιοχή, η οποία, ενδεχομένως, να συνδέεται με την εντατικοποίηση των δραστηριοτήτων στην Βιομηχανική Περιοχή της Σίνδου ή την αύξηση της κίνησης των βαρέων οχημάτων μετά την πανδημική περίοδο.



**Σχήμα 8.6:** Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας τιμής βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό «Σίνδος» (2016-2024). Σημειώνεται η απουσία μετρήσεων για το διάστημα 2023-2024. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει την πολυωνυμική τάση με υψηλή στατιστική προσαρμογή ( $R^2 = 0,87$ ).

Στο Σχήμα 8.7 απεικονίζεται η διαχρονική πορεία της μέσης ετήσιας τιμής  $\text{C}_6\text{H}_6$  στον σταθμό της Πάτρας. Η εξέταση των δεδομένων αποκαλύπτει ενδιαφέρουσα δυναμική, με τις συγκεντρώσεις να παραμένουν καθ' όλη τη διάρκεια της οκταετίας σταθερά κάτω από το θεσμοθετημένο όριο των  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , υποδηλώνοντας ικανοποιητικό επίπεδο ποιότητας αέρα ως προς τον συγκεκριμένο ρύπο.



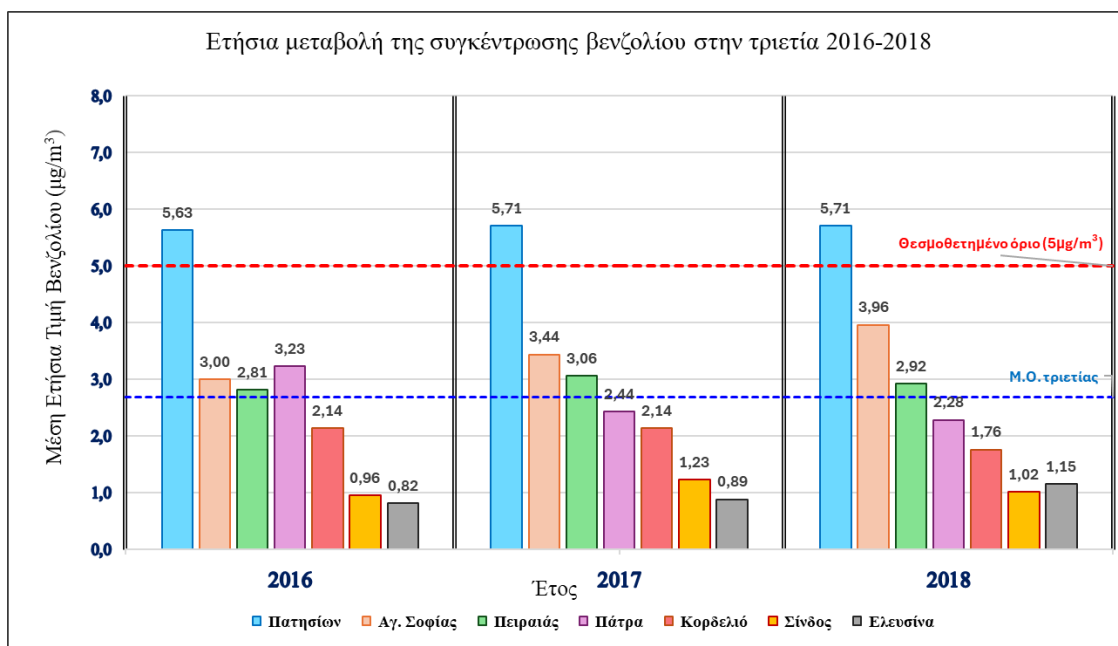
**Σχήμα 8.7:** Διαχρονική μεταβολή της μέσης ετήσιας συγκέντρωσης βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στον σταθμό «Πάτρα» για την περίοδο 2016-2024. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο πολυωνυμικό μοντέλο τάσης 3ου βαθμού ( $R^2 = 0,53$ ), αναδεικνύοντας τις διακυμάνσεις του ρύπου κατά την περίοδο της πανδημίας και την πλήρη συμμόρφωση με το νομοθετικό όριο ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Η περίοδος ξεκινά με τη μέγιστη τιμή της σειράς το 2016 στα  $3,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ακολουθούμενη από μία φάση σχετικής ύφεσης έως το 2018 στα  $2,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Σε αντίθεση με άλλους αστικούς σταθμούς, η Πάτρα δεν εμφανίζει την αναμενόμενη κατακόρυφη πτώση κατά τη διετία της πανδημίας (2020-2021), αλλά παρουσιάζει μία σταθεροποίηση των τιμών. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι τοπικές πηγές, όπως οι λιμενικές δραστηριότητες και η οικιακή θέρμανση, ενδεχομένως να διατήρησαν ένα σταθερό υπόβαθρο ρύπανσης παρά τους περιορισμούς στην κυκλοφορία των οχημάτων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αιχμή που καταγράφεται το έτος 2022 με  $3,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , η οποία μπορεί να αποδοθεί στην πλήρη επανεκκίνηση της οικονομικής δραστηριότητας και της επιβατικής ναυτιλίας μετά την πανδημία. Ωστόσο, η τάση αυτή αναστρέφεται άμεσα, με τις τιμές του 2023 και 2024 να υποχωρούν στα επίπεδα των  $2,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , που αποτελεί και την ελάχιστη καταγραφή της περιόδου μελέτης.

Για την ανάλυση της τάσης εφαρμόστηκε πολυωνυμικό μοντέλο 3ου βαθμού, το οποίο αποδίδει έναν συντελεστή προσδιορισμού ίσο με 0,53. Η τιμή αυτή υποδηλώνει ότι το μοντέλο ερμηνεύει το 53% της μεταβλητότητας των δεδομένων. Ο σχετικά χαμηλότερος συντελεστής σε σύγκριση με αμιγώς κυκλοφοριακούς σταθμούς αναδεικνύει την έντονη επίδραση στοχαστικών παραγόντων στην Πάτρα, όπως οι

μεταβολές στους θαλάσσιους ανέμους και η διακύμανση των λιμενικών δραστηριοτήτων, που επηρεάζουν τη διασπορά και τις συγκεντρώσεις του C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στον αστικό ιστό.

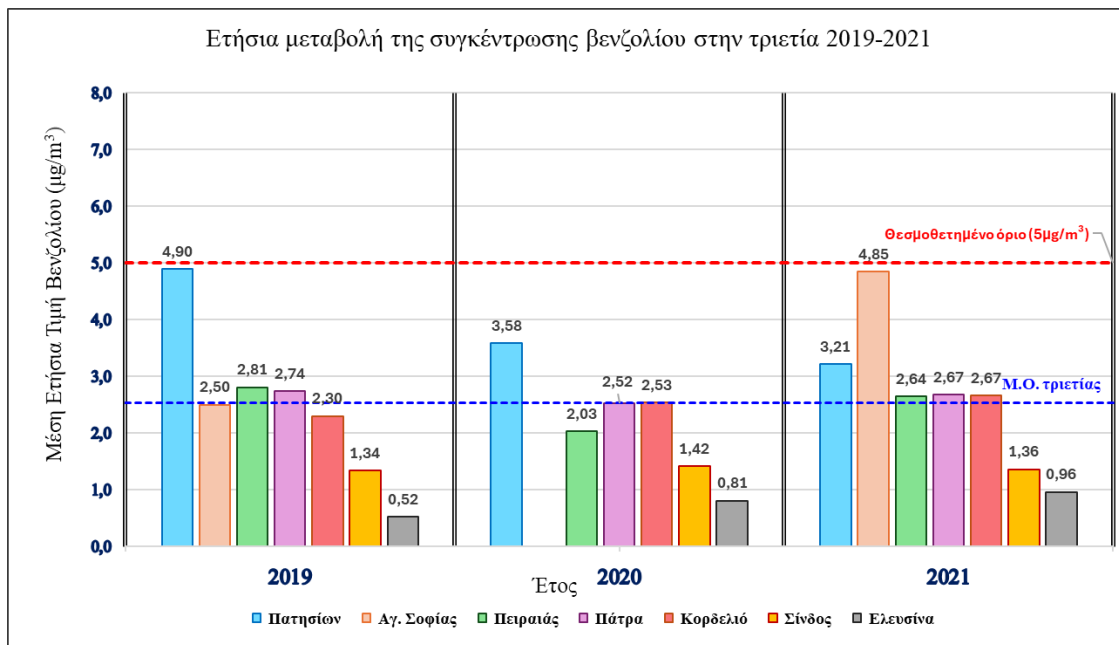
Το Σχήμα 8.8 παρουσιάζει τη συγκριτική εξέλιξη των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στους επτά μελετούμενους σταθμούς μέτρησης στην Ελλάδα κατά την τριετία 2016-2018.



**Σχήμα 8.8:** Ετήσια μεταβολή της συγκέντρωσης βενζολίου (μg/m<sup>3</sup>) στην 3ετία 2016-2018. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο θεσμοθετημένο όριο (5 μg/m<sup>3</sup>) και η μπλε διακεκομμένη γραμμή στον μέσο όρο τριετίας (2,68 μg/m<sup>3</sup>).

Ο σταθμός της Πατησίων είναι ο μοναδικός που καταγράφει σταθερά τιμές πάνω από το θεσμοθετημένο όριο των 5 μg/m<sup>3</sup>. Συγκεκριμένα, οι τιμές ξεκινούν από 5,63 μg/m<sup>3</sup> το 2016 και κορυφώνονται στα 5,71 μg/m<sup>3</sup> τη διετία 2017-2018, επιβεβαιώνοντας τη διαρκή κυκλοφοριακή επιβάρυνση στο κέντρο της Αθήνας. Όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί παραμένουν κάτω από το όριο, με τις τιμές τους να κυμαίνονται από 0,82 μg/m<sup>3</sup> (Ελευσίνα, 2016) έως 3,96 μg/m<sup>3</sup> (Αγίας Σοφίας, 2018). Η μπλε διακεκομμένη γραμμή ορίζει τον μέσο όρο της τριετίας στα 2,68 μg/m<sup>3</sup>. Οι σταθμοί Πατησίων, Αγίας Σοφίας και Πειραιάς βρίσκονται σταθερά πάνω από αυτό το επίπεδο, ενώ οι σταθμοί Σίνδος και Ελευσίνα καταγράφουν τις χαμηλότερες τιμές, κοντά στο 1 μg/m<sup>3</sup>.

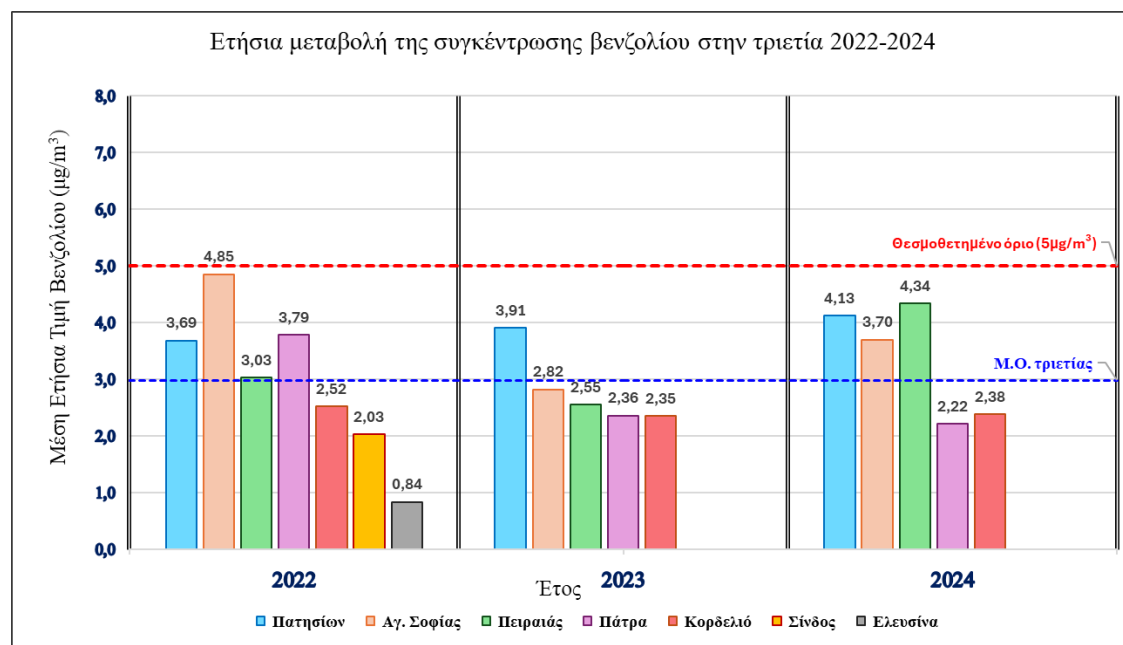
Στο Σχήμα 8.9 παρουσιάζεται η ετήσια μεταβολή των συγκεντρώσεων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> κατά την κρίσιμη τριετία 2019-2021, η οποία περιλαμβάνει τη μετάβαση από την κανονικότητα στην περίοδο των περιορισμών λόγω της πανδημίας COVID-19.



**Σχήμα 8.9:** Ετήσια μεταβολή της συγκέντρωσης βενζολίου (µg/m<sup>3</sup>) στην 3ετία 2019-2021. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο θεσμοθετημένο όριο (5 µg/m<sup>3</sup>) και η μπλε διακεκομμένη γραμμή στον μέσο όρο τριετίας (2,53 µg/m<sup>3</sup>). Για τον σταθμό της Αγίας Σοφίας δεν υφίστανται δεδομένα για το έτος 2020.

Η επίδραση των «lockdown» το 2020 οδήγησε σε δραστική μείωση των ρύπων, με τον σταθμό της Πατησίων να καταγράφει πτώση 26,9% (από 4,90 µg/m<sup>3</sup> το 2019 σε 3,58 µg/m<sup>3</sup> το 2020) και τον σταθμό του Πειραιά υποχώρηση 27,8% (από 2,81 µg/m<sup>3</sup> σε 2,03 µg/m<sup>3</sup>). Αντιθέτως, το 2021 παρατηρείται ανάκαμψη, με τον σταθμό της οδού Αγίας Σοφίας να σημειώνει την υψηλότερη τιμή της τριετίας (4,85 µg/m<sup>3</sup>), προσεγγίζοντας οριακά το θεσμοθετημένο όριο. Αξιοσημείωτη είναι η σταθερότητα που επέδειξε ο σταθμός της Πάτρας, ο οποίος παρά τη μικρή μείωση το 2020 (8,0%), επανήλθε το 2021, σημειώνοντας συνολική πτώση μόλις 2,5% σε σχέση με το 2019. Σημειώνεται ότι για τον σταθμό της Αγίας Σοφίας δεν υπήρξε διαθέσιμη μέτρηση για το έτος 2020. Τέλος, οι σταθμοί Σίνδου και Ελευσίνας διατήρησαν τις χαμηλότερες τιμές της μελέτης, αν και στην Ελευσίνα καταγράφηκε σημαντική ποσοστιαία αύξηση 84,6% μεταξύ 2019 και 2021 (από 0,52 µg/m<sup>3</sup> σε 0,96 µg/m<sup>3</sup>), παραμένοντας ωστόσο σε επίπεδα υποβάθρου.

Στο Σχήμα 8.10 παρουσιάζεται η ετήσια μεταβολή των συγκεντρώσεων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> κατά την τριετία 2022-2024, περίοδο που σηματοδοτεί την πλήρη επάνοδο στην κανονικότητα μετά τους περιορισμούς της πανδημίας.



**Σχήμα 8.10:** Ετήσια μεταβολή της συγκέντρωσης βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στην τριετία 2022-2024. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο θεσμοθετημένο όριο ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) και η μπλε διακεκομμένη γραμμή στον μέσο όρο τριετίας ( $2,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Για τους σταθμούς της Σίνδου και της Ελευσίνας δεν υφίστανται δεδομένα για τα έτη 2023-2024.

Παρά το γεγονός ότι οι τιμές παραμένουν κάτω από το θεσμοθετημένο όριο των  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , οι σταθμοί της Αγίας Σοφίας ( $4,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  το 2022), του Πειραιά ( $4,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$  το 2024) και της Πατησίων ( $4,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  το 2024) παρουσιάζουν ανησυχητική εγγύτητα στο όριο ασφαλείας, υπερβαίνοντας σημαντικά τον μέσο όρο της τριετίας ( $2,98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

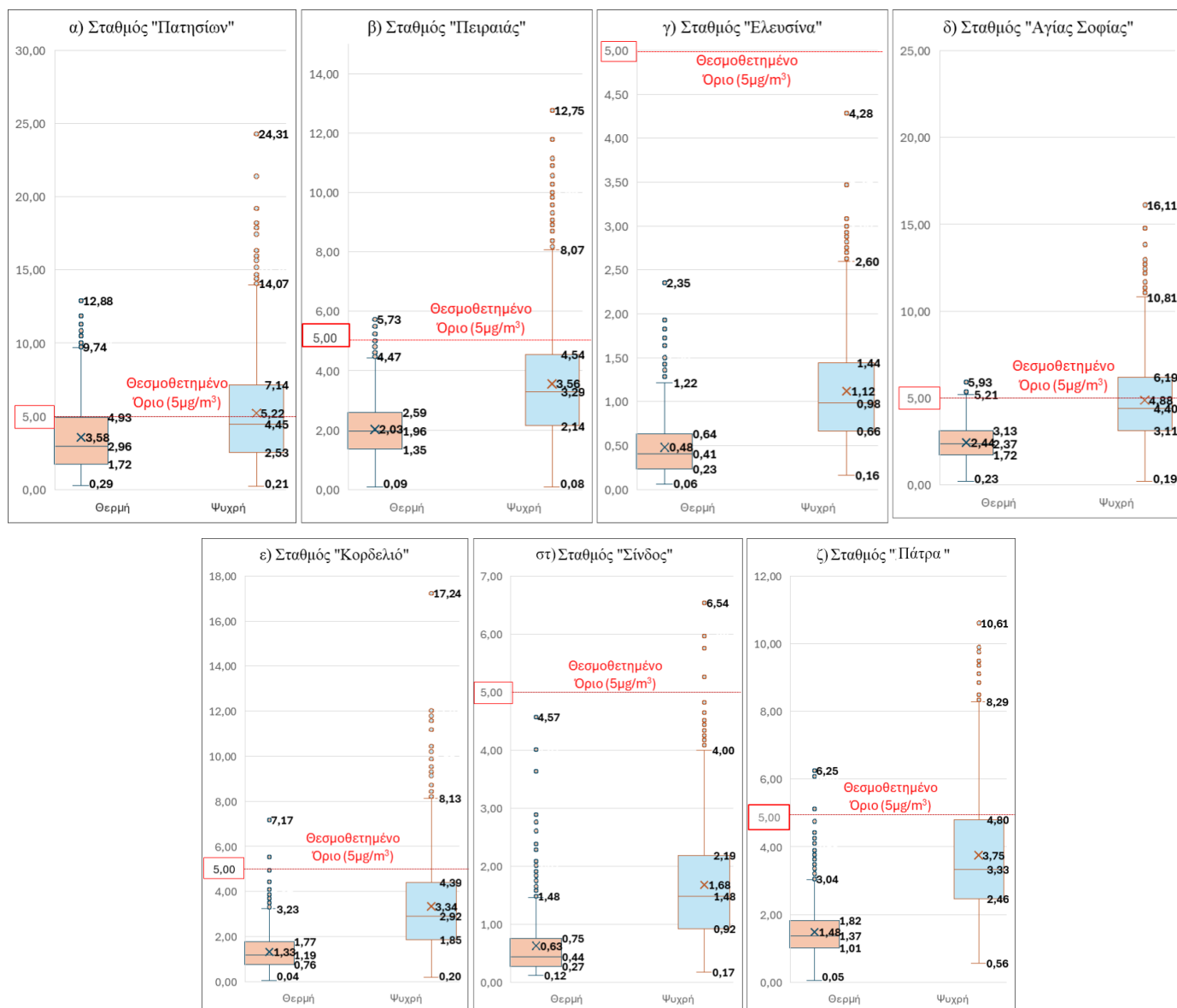
Η ανάλυση των δεδομένων αναδεικνύει ισχυρή άνοδο της συγκέντρωσης των ρύπων στα μεγάλα αστικά κέντρα, με τον σταθμό του Πειραιά να καταγράφει τη σημαντικότερη ποσοστιαία αύξηση κατά 43,2% μεταξύ 2022 και 2024. Αντίστοιχα, ο σταθμός της Πατησίων παρουσίασε άνοδο της τάξης του 11,9%, ενώ η Αγίας Σοφίας, παρά την αρχική αιχμή το 2022, σημείωσε συνολική υποχώρηση 22,7% στο τέλος της τριετίας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η Πάτρα, όπου καταγράφεται η δραστικότερη μείωση των συγκεντρώσεων κατά 41,4% (από  $3,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$  σε  $2,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), γεγονός που την κατατάσσει πλέον κάτω από τον μέσο όρο τριετίας.

Σημειώνεται ότι για τους σταθμούς της Ελευσίνας ( $0,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) και της Σίνδου ( $2,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) δεν υπήρξαν διαθέσιμες μετρήσεις για τα έτη 2023 και 2024, με

αποτέλεσμα οι χρονοσειρές τους να ολοκληρώνονται το 2022. Τέλος, ο σταθμός στο Κορδελιό διατηρεί σταθερή εικόνα χαμηλής επιβάρυνσης, σημειώνοντας οριακή μείωση 5,5% το 2024 σε σχέση με το 2022, παραμένοντας σε επίπεδα αισθητά ασφαλέστερα από τους κεντρικούς κυκλοφοριακούς σταθμούς.

## **8.2 Εποχική διακύμανση της συγκέντρωσης βενζολίου**

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων  $C_6H_6$  στους επτά επιλεγμένους σταθμούς του εθνικού δικτύου παρακολούθησης, με σκοπό την ανάδειξη των παραγόντων που διαμορφώνουν την ατμοσφαιρική ρύπανση σε διαφορετικές χρονικές περιόδους του έτους. Για τις ανάγκες της ανάλυσης, το έτος χωρίστηκε σε δύο διακριτές περιόδους: την ψυχρή περίοδο (Οκτώβριος – Μάρτιος) και τη θερμή περίοδο (Απρίλιος – Σεπτέμβριος).



**Σχήμα 8.11:** Εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων βενζολίου σε επτά σταθμούς μέτρησης: α) Πατησίων, β) Πειραιάς, γ) Ελευσίνα, δ) Αγίας Σοφίας, ε) Κορδελιό, στ) Σίνδος και ζ) Πάτρα. Τα θηκογράμματα (box-plots) απεικονίζουν τις τιμές συκέντρωσης σε µg/m<sup>3</sup> για τη θερμή περίοδο (Απρίλιος–Σεπτέμβριος) και την ψυχρή περίοδο (Οκτώβριος–Μάρτιος). Με την κόκκινη διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο προστασίας της ανθρώπινης υγείας των 5 µg/m<sup>3</sup>.

Σύμφωνα με το Σχήμα 8.11, στον σταθμό της οδού Πατησίων καταγράφεται σαφής εποχική διαφοροποίηση, με τις συγκεντρώσεις C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> κατά την ψυχρή περίοδο να παρουσιάζουν σημαντική άνοδο και μεγαλύτερη διασπορά. Ειδικότερα, κατά τη θερμή περίοδο, η διάμεσος τιμή διαμορφώνεται στα 2,96 µg/m<sup>3</sup>, με το 75% των τιμών (τρίτο τεταρτημόριο στα 4,93 µg/m<sup>3</sup>) να παραμένει οριακά κάτω από το θεσμοθετημένο όριο των 5 µg/m<sup>3</sup>. Αντιθέτως, κατά την ψυχρή περίοδο, η διάμεσος ανέρχεται στα 4,45 µg/m<sup>3</sup>, ενώ η μέση τιμή (5,22 µg/m<sup>3</sup>) υπερβαίνει το ετήσιο όριο, υποδεικνύοντας την επίδραση ακραίων τιμών. Το τρίτο τεταρτημόριο της ψυχρής περιόδου (7,14 µg/m<sup>3</sup>)

επιβεβαιώνει ότι σημαντικό ποσοστό των μετρήσεων κινείται πάνω από τα επιτρεπτά επίπεδα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ακραίες τιμές, οι οποίες από τα 12,88  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  το καλοκαίρι, σχεδόν διπλασιάζονται, φτάνοντας τα 24,31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  τον χειμώνα. Η διεύρυνση του ενδοτεταρτημοριακού εύρους και η παρουσία υψηλών ακραίων τιμών κατά την ψυχρή περίοδο αντικατοπτρίζουν την αθροιστική επίδραση των κυκλοφοριακών εκπομπών και της οικιακής θέρμανσης, σε συνδυασμό με τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τη συσσώρευση ρύπων (Liu et al., 2025).

Στον σταθμό του Πειραιά, η εποχική διακύμανση των συγκεντρώσεων  $\text{C}_6\text{H}_6$  είναι ιδιαίτερα έντονη, με την ψυχρή περίοδο να εμφανίζει σαφώς υψηλότερα επίπεδα ρύπανσης και μεγαλύτερη διασπορά τιμών. Κατά τη θερμή περίοδο, η διάμεσος τιμή διαμορφώνεται στο χαμηλό επίπεδο των 1,96  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ η μέση τιμή υπολογίζεται στα 2,03  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Το σύνολο σχεδόν του κυρίως σώματος της κατανομής (τρίτο τεταρτημόριο στα 2,59  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) παραμένει κάτω από το θεσμοθετημένο όριο των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , με ελάχιστες ακραίες τιμές που φτάνουν έως τα 5,73  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αντιθέτως, κατά την ψυχρή περίοδο παρατηρείται αξιοσημείωτη άνοδος όλων των στατιστικών παραμέτρων, με τη διάμεσο να ανέρχεται στα 3,29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και τη μέση τιμή στα 3,56  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Παρόλο που το τρίτο τεταρτημόριο (4,54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) παραμένει οριακά κάτω από το θεσμοθετημένο όριο, καταγράφεται πληθώρα ακραίων τιμών που υπερβαίνουν κατά πολύ τα 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , αγγίζοντας σε κάποιες περιπτώσεις τα 12,75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η παρουσία αυτών των εξαιρετικά υψηλών τιμών κατά τους ψυχρούς μήνες υποδηλώνει την επίδραση τοπικών πηγών καύσης και λιμενικών δραστηριοτήτων, οι οποίες σε συνθήκες περιορισμένης ατμοσφαιρικής διασποράς οδηγούν σε επεισόδια αυξημένης ρύπανσης (Dimitriou & Mihalopoulos, 2024; Nathanail et al., 2023).

Στον σταθμό της Ελευσίνας, οι συγκεντρώσεις  $\text{C}_6\text{H}_6$  διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, με το σύνολο των μετρήσεων και στις δύο περιόδους να υπολείπεται του θεσμοθετημένου ορίου των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Κατά τη θερμή περίοδο, η διάμεσος τιμή καταγράφεται εξαιρετικά χαμηλή στα 0,41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , με τη μέση τιμή να διαμορφώνεται στα 0,48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Το 75% των τιμών (τρίτο τεταρτημόριο) δεν υπερβαίνει τα 0,64  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ οι ακραίες τιμές παραμένουν περιορισμένες, με μέγιστη τα 2,35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Κατά την ψυχρή περίοδο, σημειώνεται στατιστικά σημαντική άνοδος των επιπέδων, με τη διάμεσο να υπερδιπλασιάζεται στα 0,98  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και τη μέση τιμή να ανέρχεται στα 1,12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η διεύρυνση του ενδοτεταρτημοριακού εύρους (0,66  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  έως 1,44  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) και η εμφάνιση υψηλότερων ακραίων τιμών, που αγγίζουν σε κάποιες περιπτώσεις τα

4,28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , υποδεικνύουν σαφή εποχική επιβάρυνση. Ωστόσο, παρά την αύξηση αυτή, η περιοχή της Ελευσίνας παρουσιάζει ικανοποιητική εικόνα συμμόρφωσης, καθώς ακόμα και οι μέγιστες καταγεγραμμένες τιμές κατά τους χειμερινούς μήνες δεν ξεπερνούν το ετήσιο όριο ασφαλείας.

Στον σταθμό της οδού Αγίας Σοφίας καταγράφεται έντονη εποχική διακύμανση, με τις συγκεντρώσεις  $\text{C}_6\text{H}_6$  να παρουσιάζουν σημαντική αύξηση και μεγάλη διασπορά κατά την ψυχρή περίοδο. Κατά τη θερμή περίοδο, η διάμεσος τιμή διαμορφώνεται στα 2,37  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (μέση τιμή 2,44  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), με το τρίτο τεταρτημόριο στα 3,13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , εντός του θεσμοθετημένου ορίου. Ωστόσο, κατά την ψυχρή περίοδο, η διάμεσος ανέρχεται στα 4,40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , προσεγγίζοντας οριακά τα 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ η μέση τιμή διαμορφώνεται στα 4,88  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το τρίτο τεταρτημόριο (6,19  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) υπερβαίνει το όριο, υποδεικνύοντας ότι τουλάχιστον το 25% των μετρήσεων κατά τους χειμερινούς μήνες αντιστοιχούν σε επίπεδα ρύπανσης άνω του επιτρεπτού. Επιπλέον, η ψυχρή περίοδος χαρακτηρίζεται από την παρουσία πολυάριθμων ακραίων τιμών, οι οποίες φτάνουν σε κάποιες περιπτώσεις έως και τα 16,11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η στατιστική αυτή εικόνα υποδηλώνει επιβαρυνμένη ατμόσφαιρα κατά τους ψυχρούς μήνες, η οποία πιθανώς συνδέεται με την εντατικοποίηση των τοπικών πηγών καύσης και τις δυσμενείς συνθήκες διασποράς (Dimitriou & Kassomenos, 2020; Parliari et al., 2023).

Στον σταθμό του Κορδελιού καταγράφεται, επίσης, έντονη εποχική διακύμανση, με την ψυχρή περίοδο να παρουσιάζει σημαντικά αυξημένα επίπεδα  $\text{C}_6\text{H}_6$  και έντονη παρουσία ακραίων τιμών. Κατά τη θερμή περίοδο, οι συγκεντρώσεις διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, με τη διάμεσο στα 1,19  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και τη μέση τιμή στα 1,33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Το κύριο σώμα των τιμών (τρίτο τεταρτημόριο στα 1,77  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) παραμένει σαφώς υπό το θεσμοθετημένο όριο των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , με τη μέγιστη ακραία τιμή να φτάνει τα 7,17  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αντιθέτως, κατά την ψυχρή περίοδο, παρατηρείται σημαντική άνοδος, με τη διάμεσο να ανέρχεται στα 2,92  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και τη μέση τιμή στα 3,34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Παρόλο που το τρίτο τεταρτημόριο (4,39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) παραμένει κάτω από το όριο, η κατανομή χαρακτηρίζεται από ένα εξαιρετικά πυκνό πλήθος ακραίων τιμών, οι οποίες υπερβαίνουν κατά πολύ το θεσμοθετημένο όριο, με τη μέγιστη να αγγίζει τα 17,24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η στατιστική αυτή εικόνα, με την πληθώρα των υψηλών ακραίων τιμών κατά τους χειμερινούς μήνες, υποδεικνύει την ύπαρξη έντονων επεισοδίων ρύπανσης, πιθανώς οφειλόμενων σε τοπικές πηγές καύσης και βιομηχανικές δραστηριότητες, σε

συνδυασμό με συνθήκες ατμοσφαιρικής ευστάθειας (Dimitriou & Mihalopoulos, 2024; Liu et al., 2025).

Στον σταθμό της Σίνδου, οι συγκεντρώσεις  $C_6H_6$  διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, γενικώς κάτω από το θεσμοθετημένο όριο των  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ωστόσο, η εποχική διακύμανση είναι σαφώς διακριτή. Κατά τη θερμή περίοδο, η διάμεσος τιμή διαμορφώνεται στο ιδιαίτερα χαμηλό επίπεδο των  $0,44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , με τη μέση τιμή να καταγράφεται στα  $0,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Το κύριο σώμα των μετρήσεων είναι εξαιρετικά συγκεντρωμένο, με το τρίτο τεταρτημόριο μόλις στα  $0,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ καταγράφονται ορισμένες ακραίες τιμές που φτάνουν σε κάποιες περιπτώσεις έως τα  $4,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αντιθέτως, κατά την ψυχρή περίοδο, παρατηρείται σημαντική ποσοστιαία αύξηση όλων των στατιστικών παραμέτρων, με τη διάμεσο να ανέρχεται στα  $1,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και τη μέση τιμή στα  $1,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Το ενδοτεταρτημοριακό εύρος διευρύνεται ( $0,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$  έως  $2,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), υποδηλώνοντας μεγαλύτερη μεταβλητότητα, ενώ η ψυχρή περίοδος χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση ακραίων τιμών που για πρώτη φορά υπερβαίνουν το θεσμοθετημένο όριο, αγγίζοντας κάποιες φορές τα  $6,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η τάση αυτή υποδεικνύει σαφή χειμερινή επιβάρυνση της ατμόσφαιρας, η οποία, όμως, παρά τις μεμονωμένες υπερβάσεις, διατηρεί τη συνολική ποιότητα του αέρα της περιοχής σε ικανοποιητικά επίπεδα συγκριτικά με τους αστικούς σταθμούς.

Στον σταθμό της Πάτρας καταγράφεται ιδιαίτερα έντονη εποχική διακύμανση, με τις συγκεντρώσεις  $C_6H_6$  κατά την ψυχρή περίοδο να παρουσιάζουν σημαντική άνοδο και διεύρυνση του εύρους των τιμών. Κατά τη θερμή περίοδο, η διάμεσος τιμή διαμορφώνεται στο χαμηλό επίπεδο των  $1,37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , με τη μέση τιμή να καταγράφεται στα  $1,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Το κύριο σώμα των μετρήσεων (τρίτο τεταρτημόριο στα  $1,82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) παραμένει σαφώς υπό το θεσμοθετημένο όριο των  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , αν και καταγράφονται ακραίες τιμές που φτάνουν κάποιες φορές έως τα  $6,25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αντιθέτως, κατά την ψυχρή περίοδο παρατηρείται κατακόρυφη αύξηση όλων των στατιστικών παραμέτρων, με τη διάμεσο να ανέρχεται στα  $3,33 \mu\text{g}/\text{m}^3$  και τη μέση τιμή στα  $3,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Παρόλο που το τρίτο τεταρτημόριο ( $4,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) παραμένει οριακά κάτω από το όριο, η κατανομή χαρακτηρίζεται από την παρουσία πολυάριθμων ακραίων τιμών που υπερβαίνουν κατά πολύ το θεσμοθετημένο όριο, αγγίζοντας σε κάποιες περιπτώσεις τα  $10,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η στατιστική αυτή εικόνα υποδηλώνει σημαντική επιβάρυνση της ατμόσφαιρας κατά τους χειμερινούς μήνες, η οποία πιθανώς συνδέεται με την εντατικοποίηση των τοπικών πηγών καύσης και την επίδραση των μετεωρολογικών

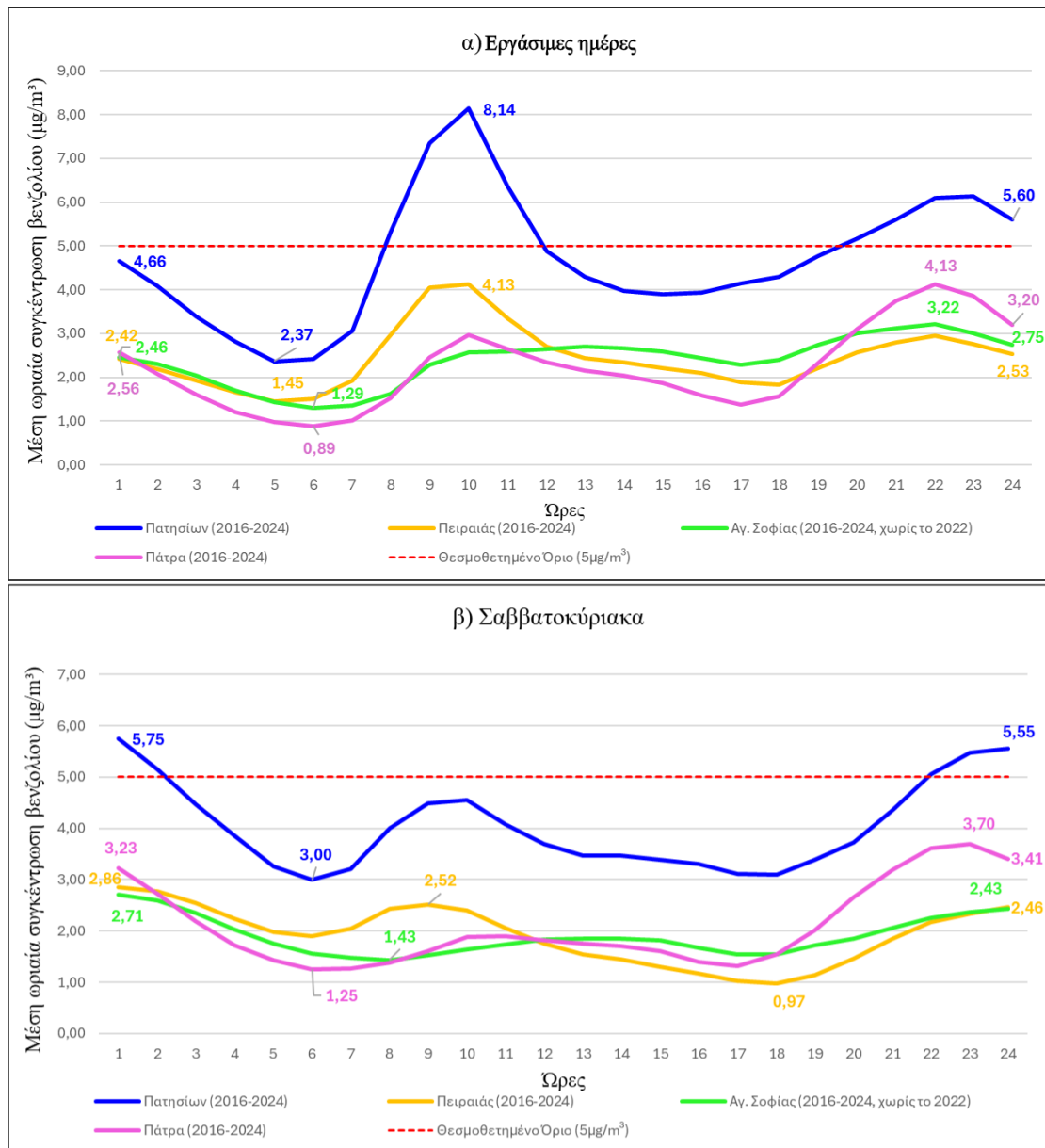
συνθηκών στην πόλη της Πάτρας (Begou & Kassomenos, 2020; Dimitriou & Mihalopoulos, 2024).

Συνολικά, η στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στους επτά σταθμούς μέτρησης αναδεικνύει τη σαφή εποχική διακύμανση, με σημαντική επιβάρυνση της ατμοσφαιρικής ποιότητας κατά την ψυχρή περίοδο (Οκτώβριος – Μάρτιος). Η τάση αυτή επιβεβαιώνεται από την άνοδο όλων των περιγραφικών στατιστικών δεικτών (διάμεσος, μέση τιμή, ενδοτεταρτημοριακό εύρος) σε όλες τις θέσεις μέτρησης, ανεξαρτήτως του βαθμού αστικοποίησης.

### 8.3 Ημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης βενζολίου

Στην ενότητα αυτή αναλύεται η ημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στους επιλεγμένους σταθμούς μέτρησης για την περίοδο 2016-2024, με στόχο τον προσδιορισμό των ωριαίων προτύπων ρύπανσης. Μέσω της επεξεργασίας των ωριαίων τιμών και του διαχωρισμού τους σε εργάσιμες ημέρες και σαββατοκύριακα, παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις που σχετίζονται με τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η κυκλοφορία των οχημάτων και η οικιακή θέρμανση. Η ανάλυση εστιάζει στον εντοπισμό των περιόδων αιχμής και στη σύγκριση των επιπέδων ρύπανσης με το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (5 μg/m<sup>3</sup>).

Στο Σχήμα 8.12 απεικονίζεται η μέση ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> για τους αστικούς-κυκλοφοριακούς σταθμούς Πατησίων, Πειραιά, Αγίας Σοφίας και Πάτρας, με διακριτή απεικόνιση για (α) τις εργάσιμες ημέρες και (β) τα σαββατοκύριακα. Η συγκριτική αυτή παράθεση επιτρέπει την αξιολόγηση της μεταβολής των επιπέδων του C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στον αστικό ιστό υπό διαφορετικές συνθήκες κυκλοφοριακού φόρτου, σε άμεση συσχέτιση με το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των 5 μg/m<sup>3</sup>.



**Σχήμα 8.12:** Μέση ημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στους αστικούς-κυκλοφοριακούς σταθμούς Πατησίων, Πειραιά, Αγίας Σοφίας και Πάτρας για την περίοδο 2016-2024, κατά τις (α) Εργάσιμες ημέρες και (β) τα Σαββατοκύριακα. Η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή υποδηλώνει το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο προστασίας της υγείας ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

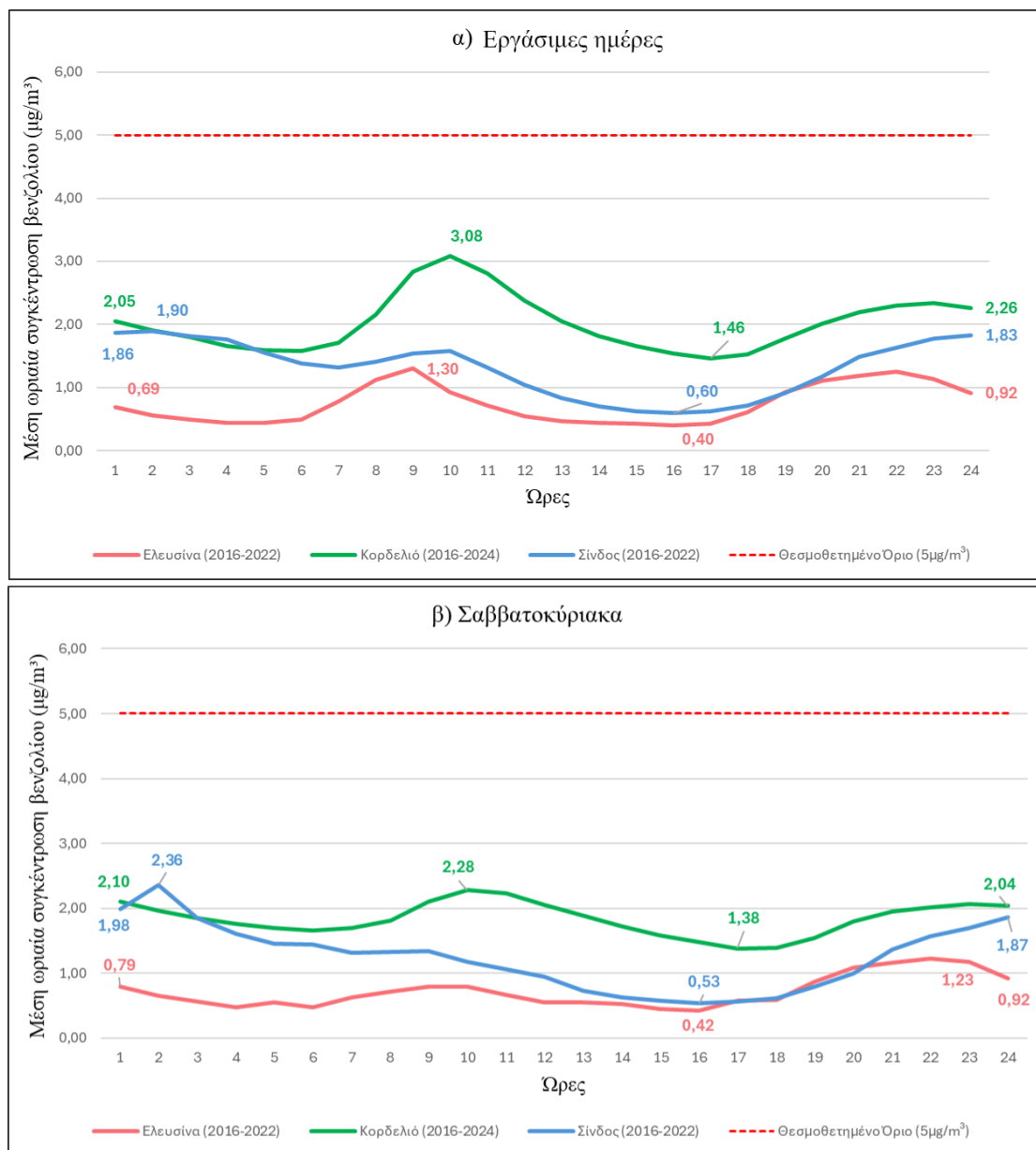
Κατά τις εργάσιμες ημέρες, η διακύμανση του  $\text{C}_6\text{H}_6$  ακολουθεί πιστά τον κύκλο της αστικής δραστηριότητας. Ο σταθμός της Πατησίων αποτελεί το σημείο μέγιστης επιβάρυνσης, με την πρωινή αιχμή να κορυφώνεται στις 10:00 ( $8,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), υπερβαίνοντας κατά 63% το θεσμοθετημένο όριο. Παρόμοια τάση, αν και σε χαμηλότερα επίπεδα, εμφανίζουν ο Πειραιάς ( $4,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) και η Αγίας Σοφίας ( $2,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Η μεσημβρινή/απογευματινή ύφεση (14:00-17:00) που παρατηρείται σε όλους τους σταθμούς δεν φαίνεται να οφείλεται σε μείωση της έντασης των πηγών, αλλά στην αύξηση του ύψους ανάμιξης της ατμόσφαιρας, που ευνοεί τη διασπορά των ρύπων

(Petrinoli et al., 2025). Αντιθέτως, η νυχτερινή άνοδος μετά τις 19:00 (με την Πατησίων να φτάνει τα 5,60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  στις 24:00 και την Πάτρα τα 4,13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  στις 22:00) μπορεί να αποδοθεί στον συνδυασμό αυξημένης οδικής κυκλοφορίας και οικιακής θέρμανσης, υπό συνθήκες θερμοκρασιακής αναστροφής, που εγκλωβίζουν τους ρύπους κοντά στο έδαφος (Dayan et al., 2023).

Τα σαββατοκύριακα, το προφίλ της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μεταβάλλεται ριζικά, αντανακλώντας τον περιορισμό των μετακινήσεων. Η πρωινή κυκλοφοριακή αιχμή των 10:00 σχεδόν εξαφανίζεται ή υποβαθμίζεται (π.χ. στον Πειραιά από 4,13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  πέφτει στα 2,52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), επιβεβαιώνοντας ότι η οδική κυκλοφορία είναι ο κύριος παράγοντας των πρωινών υπερβάσεων (Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2024). Ωστόσο, αναδεικνύεται και η επίδραση της αυξημένης κυκλοφορίας λόγω νυχτερινής διασκέδασης: η Πατησίων καταγράφει την υψηλότερη τιμή της στη 01:00 τα ξημερώματα (5,75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή των εργάσιμων ημερών (4,66  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Το εύρημα αυτό, σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές της Πάτρας (3,70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  στις 23:00), υποδεικνύει ότι η κίνηση στο κέντρο των πόλεων και γύρω από τους λιμένες για σκοπούς ψυχαγωγίας διατηρεί τα επίπεδα του  $\text{C}_6\text{H}_6$  σε ανησυχητικά επίπεδα, ακόμα και κατά τις αργίες.

Συνολικά, η ανάλυση καταδεικνύει ότι, ενώ τα επίπεδα  $\text{C}_6\text{H}_6$  κατά τις εργάσιμες ημέρες καθορίζονται από το «ωράριο εργασίας», τα σαββατοκύριακα κυρίαρχος παράγοντας είναι το «ωράριο αναψυχής», με τις μετεωρολογικές συνθήκες εγκλωβισμού κατά τις νυχτερινές ώρες να αποτελούν τον κοινό παρονομαστή για τις υψηλές συγκεντρώσεις και στις δύο περιπτώσεις (Petrinoli et al., 2025).

Στο Σχήμα 8.13 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων  $\text{C}_6\text{H}_6$  για τους σταθμούς Ελευσίνας, Σίνδου και Κορδελιού, οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως αστικοί-βιομηχανικοί ή περιαστικοί-βιομηχανικοί. Η ανάλυση των δεδομένων αυτών αποσκοπεί στον προσδιορισμό του βαθμού επιβάρυνσης από τις βιομηχανικές εκπομπές, σε αντιδιαστολή με τις αμιγώς κυκλοφοριακές πηγές των αστικών κέντρων. Η σύγκριση μεταξύ των εργάσιμων ημερών και των σαββατοκύριακων επιτρέπει την αξιολόγηση της σταθερότητας των πηγών ρύπανσης και της επίδρασης των τοπικών βιομηχανικών δραστηριοτήτων στην ποιότητα του αέρα, πάντα σε αναφορά με το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Σχήμα 8.13:** Μέση ημερήσια διακύμανση της συγκέντρωσης βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) στους αστικούς/περιαστικούς-βιομηχανικούς σταθμούς Κορδελιού, Σίνδου και Ελευσίνας για τις περιόδους 2016-2024 και 2016-2022 αντίστοιχα, κατά τις (α) Εργάσιμες ημέρες και (β) τα Σαββατοκύριακα. Η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή υποδηλώνει το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο προστασίας της υγείας ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Κατά τις εργάσιμες ημέρες, ο σταθμός στο Κορδελιό εμφανίζει τη μεγαλύτερη επιβάρυνση, με έντονη πρωινή κορύφωση στις 10:00 ( $3,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), η οποία, αν και παραμένει κάτω από το θεσμοθετημένο όριο των  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , είναι η υψηλότερη που καταγράφεται σε αυτή την ομάδα σταθμών. Η Σίνδος και η Ελευσίνα ακολουθούν παρόμοια τάση με χαμηλότερες τιμές, καταγράφοντας τις μέγιστες πρωινές τους συγκεντρώσεις στις 09:00 ( $1,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  για την Ελευσίνα και  $1,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  για τη Σίνδο).

Κοινό χαρακτηριστικό και των τριών σταθμών είναι η διατήρηση των συγκεντρώσεων σε σχετικά υψηλά επίπεδα κατά τις νυχτερινές ώρες (π.χ. Κορδελιό 2,26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  στις 24:00), γεγονός που υποδηλώνει τη συνεχή επίδραση των βιομηχανικών εκπομπών και των τοπικών πηγών καύσης υπό συνθήκες περιορισμένης διασποράς (Chatzopoulou & Mavroidis, 2025).

Τα σαββατοκύριακα παρατηρείται αξιοσημείωτη μετατόπιση στις ώρες αιχμής, ειδικά στη Σίνδο, όπου η μέγιστη τιμή μετατοπίζεται στις 02:00 τα ξημερώματα (2,36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), υπερβαίνοντας την αντίστοιχη πρωινή αιχμή των εργάσιμων ημερών. Στο Κορδελιό, η πρωινή αιχμή των 10:00 παραμένει ορατή αλλά σαφώς μειωμένη (2,28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), ενώ στην Ελευσίνα η υψηλότερη τιμή καταγράφεται το βράδυ στις 22:00 (1,23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Οι μεταμεσονύκτιες και νυχτερινές αυτές εξάρσεις, σε περιόδους μειωμένης κυκλοφορίας, επιβεβαιώνουν ότι οι πηγές ρύπανσης σε αυτές τις περιοχές συνδέονται με σταθερές βιομηχανικές διεργασίες και τη λειτουργία των γειτονικών διυλιστηρίων, οι οποίες δεν διακόπτονται κατά τις αργίες (Notario et al., 2020).

Συνολικά, οι σταθμοί αυτοί εμφανίζουν χαμηλότερες μέσες τιμές συγκριτικά με τους κυκλοφοριακούς σταθμούς του κέντρου, χωρίς υπερβάσεις του ετήσιου ορίου των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ωστόσο, η διακύμανση των συγκεντρώσεων, ιδιαίτερα η «μετατόπιση» των αιχμών κατά τις νυχτερινές ώρες των σαββατοκύριακων, υπογραμμίζει τη σημασία του βιομηχανικού υποβάθρου και των τοπικών πηγών. Η Ελευσίνα παραμένει η λιγότερο επιβαρυσμένη περιοχή, με τιμές που σπάνια ξεπερνούν τα 1,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ το Κορδελιό και η Σίνδος αναδεικνύονται ως περιοχές με πιο σύνθετο προφίλ ρύπανσης, όπου η βιομηχανική δραστηριότητα και οι μετεωρολογικές συνθήκες εγκλωβισμού διαμορφώνουν σταθερά επίπεδα  $\text{C}_6\text{H}_6$  στην ατμόσφαιρα καθ' όλη τη διάρκεια της εβδομάδας.

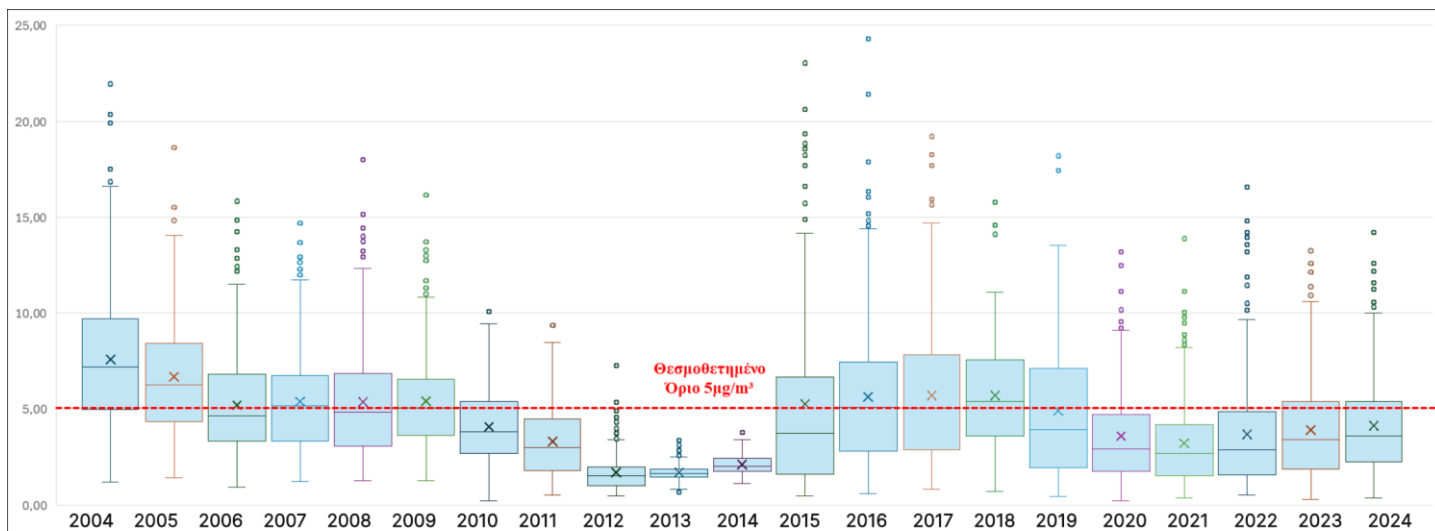
## 9 Η περίπτωση του σταθμού της οδού Πατησίων

Μετά την ολοκληρωμένη μελέτη της περιόδου 2016-2024, όπου εξετάστηκαν η διαχρονική, η εποχική και η ημερήσια διακύμανση του  $\text{C}_6\text{H}_6$  σε ένα ευρύ δίκτυο επτά σταθμών (Πατησίων, Πειραιάς, Ελευσίνα, Πάτρα, Αγίας Σοφίας, Κορδελιό και Σίνδος), η παρούσα ενότητα εστιάζει αποκλειστικά στον σταθμό της οδού Πατησίων. Η επιλογή του συγκεκριμένου σταθμού κρίνεται ως εξαιρετικής σημασίας, καθώς αποτελεί έναν από τους πλέον επιβαρυσμένους κυκλοφοριακούς σταθμούς του

λεκανοπεδίου, διαθέτοντας παράλληλα αξιόπιστες μετρήσεις για δύο δεκαετίες (2004-2024). Η ανάλυση αυτής της εικοσαετίας επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τη μακροπρόθεσμη τάση του ρύπου, προσφέροντας ολοκληρωμένη εικόνα της διαχρονικής εξέλιξης του C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στην καρδιά του αστικού ιστού της Αθήνας.

### **9.1 Διαχρονική εξέλιξη και στατιστική ανάλυση των συγκεντρώσεων βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (2004-2024)**

Στο Σχήμα 9.1 παρουσιάζεται η διαχρονική πορεία των συγκεντρώσεων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στον σταθμό της οδού Πατησίων για την περίοδο 2004-2024. Μέσα από τον συνδυασμό θηκογραμμάτων και αναλυτικών ποσοτικών δεδομένων, αναδεικνύονται οι διακυμάνσεις του ρύπου, η σχέση τους με το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των 5 μg/m<sup>3</sup>, καθώς και η συνολική τάση μείωσης των επιπέδων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> σε σύγκριση με το έτος βάσης.



Έτος	Ημέρες έτους που συμμετέχουν στον υπολογισμό του θηκογράμματος	Πληρότητα (1 έτος=365 ημέρες)	Μέση Ετήσια Τιμή Βενζολίου (µg/m³)	Μεταβολή έτους σε σχέση με το προηγούμενο	Μεταβολή έτους σε σχέση με το 2004
2004	273	74,79%	7,58		
2005	340	93,15%	6,69	-11,77%	-11,77%
2006	333	91,23%	5,20	-22,18%	-31,34%
2007	280	76,71%	5,39	3,54%	-28,92%
2008	334	91,51%	5,37	-0,29%	-29,12%
2009	346	94,79%	5,40	0,52%	-28,75%
2010	349	95,62%	4,07	-24,67%	-46,33%
2011	178	48,77%	3,31	-18,54%	-56,28%
2012	324	88,77%	1,69	-48,93%	-77,67%
2013	322	88,22%	1,70	0,42%	-77,58%
2014	333	91,23%	2,10	23,40%	-72,33%
2015	173	47,40%	5,26	150,62%	-30,66%
2016	353	96,71%	5,63	7,18%	-25,68%
2017	347	95,07%	5,71	1,38%	-24,65%
2018	216	59,18%	5,71	0,00%	-24,65%
2019	186	50,96%	4,90	-14,24%	-35,37%
2020	275	75,34%	3,58	-26,81%	-52,70%
2021	342	93,70%	3,21	-10,33%	-57,59%
2022	320	87,67%	3,69	14,69%	-51,35%
2023	308	84,38%	3,91	5,94%	-48,46%
2024	228	62,47%	4,13	5,67%	-45,54%

**Σχήμα 9.1:** Διαχρονική εξέλιξη των συγκεντρώσεων βενζολίου (µg/m<sup>3</sup>) στον σταθμό της οδού Πατησίων (2004-2024). Το άνω τμήμα απεικονίζει τη στατιστική κατανομή των τιμών μέσω θηκογραμμάτων, ενώ ο κάτω πίνακας παραθέτει τα ποσοτικά δεδομένα πληρότητας, τις μέσες ετήσιες τιμές και τις ποσοστιαίες μεταβολές σε σχέση με το προηγούμενο έτος και το έτος βάσης (2004).

Η ανάλυση των επιπέδων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στον σταθμό της οδού Πατησίων για το διάστημα 2004-2024 αναδεικνύει μία σύνθετη διακύμανση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η οποία χαρακτηρίζεται από μία αρχική φάση σημαντικής απομείωσης και μία μεταγενέστερη δευτερογενή άνοδο. Η μέση ετήσια τιμή εκκινεί από το μέγιστο επίπεδο των 7,58 µg/m<sup>3</sup> το 2004 και διολισθαίνει σταδιακά έως το ιστορικό χαμηλό

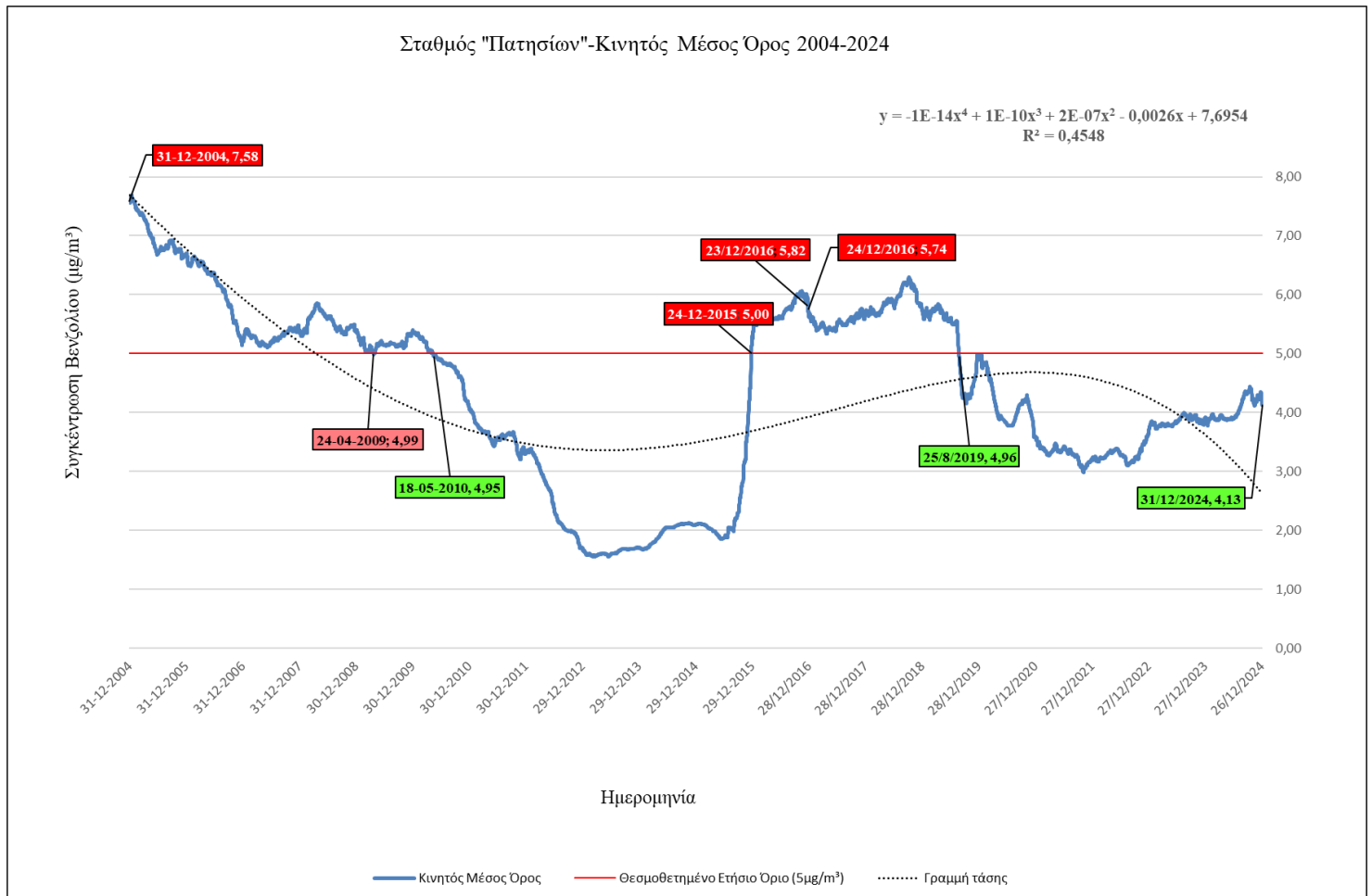
των 1,69  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  το 2012, οπότε και καταγράφεται η μέγιστη συνολική πτώση κατά 77,67% σε σχέση με το έτος βάσης. Παρά τη θετική αυτή πορεία, η περίοδος 2013-2018 σηματοδοτείται από αξιοσημείωτη ανάκαμψη των τιμών, με κορύφωση τα 5,71  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (2017-2018), γεγονός που αποτυπώνεται και στη μεταβολή του 2015 η οποία ανήλθε στο +150,62% σε σχέση με το προηγούμενο έτος, αν και η πληρότητα των δεδομένων τη συγκεκριμένη χρονιά ήταν περιορισμένη στο 47,40%.

Η σύγκριση με το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  αποκαλύπτει ότι ο σταθμός της Πατησίων παρουσίασε συστηματικές υπερβάσεις κατά την πρώτη περίοδο μελέτης (2004-2009) αλλά και κατά την τετραετία 2015-2018, όπου οι συγκεντρώσεις υπερέβησαν το επιτρεπτό όριο έως και κατά 14,2%. Από το 2019 και έπειτα, παρατηρείται σταθερή επιστροφή σε επίπεδα συμμόρφωσης, με την τιμή του 2024 να διαμορφώνεται στα 4,13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , εντός των ορίων (συνολική μείωση 45,54% συγκριτικά με το 2004).

Από την άλλη μεριά, τα θηκογράμματα αποκαλύπτουν μία σημαντική ποιοτική μεταβολή στο μοτίβο της ρύπανσης, καθώς το συνολικό εύρος των αιχμών έχει συρρικνωθεί αισθητά. Στα πρώτα έτη, οι απολήξεις και οι ακραίες τιμές των διαγραμμάτων εκτείνονταν σε πολύ υψηλότερα επίπεδα, υποδηλώνοντας ότι οι κάτοικοι εκτίθεντο σε συχνές και έντονες περιόδους υπερβάσεων, ακόμη και όταν ο μέσος όρος ήταν οριακά εντός ορίων. Αντίθετα, στην πρόσφατη πενταετία (2020-2024), η σύγκλιση των ορίων των θηκογραμμάτων γύρω από τη μέση τιμή υποδεικνύει μία πιο ομοιογενή κατανομή των συγκεντρώσεων  $\text{C}_6\text{H}_6$ , με λιγότερο έντονες διακυμάνσεις. Η στατιστική εγκυρότητα των μετρήσεων παραμένει ισχυρή στα περισσότερα έτη, με πληρότητα άνω του 90% (π.χ. 95,62% το 2010 και 96,71% το 2016), επιβεβαιώνοντας τη διαχρονική βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στο κέντρο της Αθήνας.

Προκειμένου να εξομαλυνθούν οι έντονες βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις και οι τυχαίες μεταβολές που ενδεχομένως να υφίστανται ως «θόρυβος» στην παραπάνω ετήσια ανάλυση, κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή της μεθόδου του κινητού μέσου όρου. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτελεσματικότερη απομόνωση των μακροπρόθεσμων τάσεων και την αποσαφήνιση της τάσης των συγκεντρώσεων  $\text{C}_6\text{H}_6$  στο χρόνο. Μέσω της εξομάλυνσης των δεδομένων, περιορίζεται η αλλοίωση που προκαλείται από μεμονωμένα ακραία επεισόδια ρύπανσης ή έτη με χαμηλή πληρότητα, παρέχοντας μία πιο στιβαρή βάση για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά

με την αποτελεσματικότητα των περιβαλλοντικών πολιτικών και τη διαχρονική βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας στην οδό Πατησίων.



**Σχήμα 9.2:** Διαχρονική πορεία των συγκεντρώσεων βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων για την περίοδο 2004-2024. Η μπλε γραμμή απεικονίζει τον κινητό μέσο όρο (365 ημερών) για την εξομάλυνση των δεδομένων, ενώ η διακεκομμένη καμπύλη αναπαριστά την πολυωνμική γραμμή τάσης 4ου βαθμού με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0,46$ . Η κόκκινη οριζόντια γραμμή οριοθετεί το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο προστασίας της ανθρώπινης υγείας ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Σύμφωνα με το Σχήμα 9.2, η μελέτη του ετήσιου κινητού μέσου όρου στον σταθμό της οδού Πατησίων αναδεικνύει έξι κρίσιμα χρονικά ορόσημα. Η έναρξη της καταγραφής στις 31/12/2004 αποτυπώνει τη δυσμενέστερη κατάσταση, με τιμή  $7,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , η οποία συνιστά υπέρβαση του ορίου κατά 51,60%. Παρόλο που στις 24/04/2009 ο κινητός μέσος όρος υποχωρεί οριακά στα  $4,99 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (-0,20%), η τιμή αυτή στερείται στατιστικής εγκυρότητας, λόγω της εξαιρετικά χαμηλής ημερήσιας πληρότητας (25%). Η πρώτη ουσιαστική και στατιστικά σημαντική συμμόρφωση καταγράφεται στις 18/05/2010 με τιμή  $4,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , εγκαινιάζοντας μία πενταετή περίοδο εντός των ορίων. Η τάση αυτή ανατρέπεται στις 24/12/2015, όπου ο κινητός

μέσος όρος αγγίζει εκ νέου το όριο των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , σηματοδοτώντας μία δευτερογενή φάση επιβάρυνσης. Η οριστική αποκατάσταση της ποιότητας του αέρα επιτυγχάνεται στις 25/08/2019 με την πτώση στα 4,96  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , οδηγώντας στην τρέχουσα εικόνα της 31/12/2024. Με τιμή 4,13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και απόκλιση -17,40% από το όριο, επιβεβαιώνεται η εδραίωση της συμμόρφωσης και η διαχρονική βελτίωση του αστικού ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος.

Συνολικά, η διαχρονική παρακολούθηση του σταθμού αποκαλύπτει μία παρατεταμένη περίοδο περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Από την έναρξη των μετρήσεων το 2004 έως τον Αύγουστο του 2019, ο σταθμός κατέγραψε συνολικά 3.293 ημέρες (περίπου 9 έτη) όπου ο κινητός μέσος όρος  $\text{C}_6\text{H}_6$  υπερέβαινε το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ειδικότερα, το έτος 2004 σημειώθηκαν 4021 ωριαίες μετρήσεις όπου η συγκέντρωση  $\text{C}_6\text{H}_6$  ξεπέρασε την τιμή 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ οι αντίστοιχες ώρες για το 2024 ήταν κατά 69,5% μειωμένες, φτάνοντας τις 1225 ώρες, γεγονός που υποδηλώνει όχι μόνο τη βελτίωση του μέσου όρου αλλά και τη συρρίκνωση των επικίνδυνων ωρών αιχμής.

## **9.2 Επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών στη μετρούμενη συγκέντρωση βενζολίου**

### **9.2.1 Οργάνωση δεδομένων**

Η στατιστική επεξεργασία βασίστηκε στη χρήση ημερήσιων μέσων τιμών για το σύνολο των εξεταζόμενων μεταβλητών. Τα δεδομένα ρύπανσης (συγκεντρώσεις  $\text{C}_6\text{H}_6$ ) αντλήθηκαν από τον σταθμό της οδού Πατησίων, ενώ οι τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων προήλθαν από το Historical Weather API της πλατφόρμας Open-Meteo ([Open-Meteo, χ.χ.](#)). Επισημαίνεται ότι τα μετεωρολογικά δεδομένα αναφέρονται στο πλησιέστερο στον σταθμό μέτρησης διαθέσιμο σημείο πλέγματος, το οποίο εντοπίζεται στην περιοχή του Κολωνού (συμβολή οδών Πρεβέζης και Δράμας), με γεωγραφικές συντεταγμένες 37,9904° N και 23,7317° E. Η ανάλυση εστιάζει στο δεύτερο εξάμηνο του έτους 2015 (Ιούλιος – Δεκέμβριος), περίοδος κατά την οποία η προκαταρκτική εξέταση μέσω θηκογραμμάτων ανέδειξε τη μεγαλύτερη συχνότητα και ένταση ακραίων τιμών. Για τη διερεύνηση της επίδρασης των μετεωρολογικών παραμέτρων, εφαρμόστηκε πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, με εξαρτημένη μεταβλητή τη συγκέντρωση  $\text{C}_6\text{H}_6$  και ανεξάρτητες μεταβλητές τις εξής πέντε παραμέτρους:

1. Σχετική υγρασία (2 m),
2. Ατμοσφαιρική πίεση στη στάθμη της θάλασσας,

3. Θερμοκρασία αέρα (2 m),
4. Ταχύτητα του ανέμου (10 m),
5. Ύψος του οριακού στρώματος.

Τα δεδομένα οργανώθηκαν σε μηνιαία βάση, προκειμένου να εκτιμηθεί η βαρύτητα κάθε παραμέτρου υπό διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, με κύριους δείκτες αξιολόγησης τον συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) και τα επίπεδα στατιστικής σημαντικότητας (p-values).

## 9.2.2 Αποτελέσματα και Συζήτηση

Στον Πίνακα 9-1 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για τον μήνα Ιούλιο του έτους 2015.

**Πίνακας 9-1:** Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Ιούλιο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).

<i>Μεταβλητή</i>	<i>Μέση Τιμή</i>	<i>Ελάχιστο</i>	<i>Μέγιστο</i>	<i>Τυπική Απόκλιση</i>
<i>Βενζόλιο (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</i>	2,72	0,47	6,30	1,94
<i>Σχετική Υγρασία (%)</i>	49,62	35,75	70,50	7,25
<i>Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)</i>	1011,54	1005,35	1018,88	4,12
<i>Θερμοκρασία (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</i>	27,85	23,03	32,08	2,15
<i>Ταχύτητα Ανέμου (km/h)</i>	10,29	3,38	18,25	4,49
<i>Ύψος Οριακού Στρώματος (m)</i>	843,19	628,75	1175,00	167,61

Στον Πίνακα 9-2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τον μήνα Ιούλιο. Η ανάλυση εστιάζει στον εντοπισμό των παραμέτρων που παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα ( $p < 0,05$ ) και στην ερμηνεία του ποσοστού της μεταβλητότητας του  $\text{C}_6\text{H}_6$  που εξηγείται από το μοντέλο ( $R^2$ ).

**Πίνακας 9-2:** Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Ιούλιος 2015).

Στατιστικά Παλινδρόμησης	Τιμή		
Πολλαπλό R	0,867		
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,751</b>		
Προσαρμοσμένο R <sup>2</sup>	0,701		
<b>Σημαντικότητα F</b>	<b>7,33 x 10<sup>-7</sup></b>		
Μέγεθος δείγματος	31		
Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Συντελεστές	Τυπικό Σφάλμα	τιμή-P (p-value)
Τεταγμένη (Intercept)	225,291	161,843	0,176
<b>Σχετική Υγρασία (%)</b>	<b>0,113</b>	0,039	<b>0,008</b>
Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)	-0,230	0,154	0,148
Θερμοκρασία (°C)	0,136	0,276	0,625
<b>Ταχύτητα Ανέμου (km/h)</b>	<b>-0,243</b>	0,092	<b>0,014</b>
Υψος Οριακού Στρώματος (m)	0,004	0,003	0,162

Η ανάλυση πολλαπλής παλινδρόμησης για τον μήνα Ιούλιο αναδεικνύει ένα εξαιρετικά ισχυρό και στατιστικά σημαντικό μοντέλο ( $F = 7,33 \times 10^{-7}$ ), με τον συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$  να ανέρχεται στο 0,751, υποδηλώνοντας ότι οι μετεωρολογικές παράμετροι ερμηνεύουν το 75,1% της διακύμανσης στη συγκέντρωση του  $C_6H_6$ . Τα αποτελέσματα δείχνουν τη Σχετική Υγρασία ( $p$ -value = 0,008) και την Ταχύτητα Ανέμου ( $p$ -value = 0,014) ως τους κυρίαρχους ρυθμιστές της ρύπανσης από  $C_6H_6$  στην οδό Πατησίων. Συγκεκριμένα, ο θετικός συντελεστής της υγρασίας (0,113) υποδεικνύει ότι για κάθε μονάδα ποσοστιαίας αύξησης της υγρασίας, η συγκέντρωση  $C_6H_6$  αυξάνεται κατά 0,11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ ο αρνητικός συντελεστής της ταχύτητας του ανέμου (-0,243) υποδηλώνει ότι για κάθε αύξηση της ταχύτητας κατά 1 km/h, η συγκέντρωση του ρύπου μειώνεται κατά 0,24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αυτή η συνέργεια επιβεβαιώνει ότι οι συνθήκες άπνοιας σε συνδυασμό με την αυξημένη υγρασία εγκλωβίζουν το  $C_6H_6$  στο επίπεδο του οδοστρώματος (Dayan et al., 2023; Samad et al., 2023).

Η διερεύνηση συνεχίζεται με την ανάλυση των δεδομένων για τον μήνα Αύγουστο, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν η μεταβολή των κυκλοφοριακών συνθηκών λόγω της θερινής περιόδου και η εμφάνιση των ετησίων ανέμων (μελτέμια) διαφοροποιούν τη συμπεριφορά του ρύπου.

Στον Πίνακα 9-3 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για τον μήνα Αύγουστο του έτους 2015.

**Πίνακας 9-3:** Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Αύγουστο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).

<i>Μεταβλητή</i>	<i>Μέση Τιμή</i>	<i>Ελάχιστο</i>	<i>Μέγιστο</i>	<i>Τυπική Απόκλιση</i>
<i>Βενζόλιο (μg/m<sup>3</sup>)</i>	1,67	0,48	3,48	0,77
<i>Σχετική Υγρασία (%)</i>	52,85	40,75	66,00	6,53
<i>Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)</i>	1011,88	1008,10	1017,55	2,77
<i>Θερμοκρασία (°C)</i>	28,01	25,25	30,75	1,48
<i>Ταχύτητα Ανέμου (km/h)</i>	10,56	3,25	17,63	4,24
<i>Ύψος Οριακού Στρώματος (m)</i>	839,31	666,25	1161,25	131,49

Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης, που παρατίθενται στον Πίνακα 9-4, αποτυπώνουν τη διατήρηση της ισχυρής εξάρτησης του C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> από τις μετεωρολογικές παραμέτρους, αναδεικνύοντας ταυτόχρονα μεταβολές στους επιμέρους συντελεστές επιρροής.

**Πίνακας 9-4:** Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αύγουστος 2015).

<i>Στατιστικά Παλινδρόμησης</i>	<i>Τιμή</i>		
<i>Πολλαπλό R</i>	0,838		
<b><i>R<sup>2</sup></i></b>	<b>0,703</b>		
<i>Προσαρμοσμένο R<sup>2</sup></i>	0,638		
<b><i>Σημαντικότητα F</i></b>	<b>1,86x10<sup>-5</sup></b>		
<i>Μέγεθος δείγματος</i>	29		
<i>Ανεξάρτητες Μεταβλητές</i>	<i>Συντελεστές</i>	<i>Τυπικό Σφάλμα</i>	<i>τιμή-P (p-value)</i>
<i>Τεταγμένη (Intercept)</i>	65,453	61,421	0,2976
<b><i>Σχετική Υγρασία (%)</i></b>	<b>-0,068</b>	0,018	<b>0,001</b>
<i>Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)</i>	-0,059	0,059	0,3207
<i>Θερμοκρασία (°C)</i>	0,037	0,092	0,6894
<b><i>Ταχύτητα Ανέμου (km/h)</i></b>	<b>-0,112</b>	0,0429	<b>0,016</b>
<i>Ύψος Οριακού Στρώματος (m)</i>	-0,00001	0,0012	0,9906

Η ανάλυση παλινδρόμησης για τον μήνα Αύγουστο παρουσιάζει ένα εξίσου ισχυρό μοντέλο ( $F = 1,86 \times 10^{-5}$ ), με τον συντελεστή  $R^2$  στο 0,703, γεγονός που υποδηλώνει ότι το 70,3% της διακύμανσης του C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> εξηγείται από τις μετεωρολογικές παραμέτρους. Σε αντίθεση με τον Ιούλιο, ο Αύγουστος αναδεικνύει τη Σχετική Υγρασία (p-value = 0,001) ως την πιο σημαντική ανεξάρτητη μεταβλητή, η οποία πλέον παρουσιάζει αρνητικό συντελεστή (-0,068), υποδεικνύοντας ότι για κάθε μονάδα

ποσοστιαίας αύξησης της υγρασίας, η συγκέντρωση του ρύπου μειώνεται κατά 0,07  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η Ταχύτητα Ανέμου (p-value = 0,016) παραμένει στατιστικά σημαντική, με τον αρνητικό συντελεστή της (-0,112) να επιβεβαιώνει ότι η αύξηση της έντασης του ανέμου κατά 1 km/h συντελεί στη μείωση της συγκέντρωσης του  $\text{C}_6\text{H}_6$  κατά 0,11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η αλλαγή στη συμπεριφορά της υγρασίας και η διατήρηση της σημασίας του ανέμου υποδηλώνουν ότι τον Αύγουστο, οι διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και η μειωμένη κυκλοφοριακή δραστηριότητα επαναπροσδιορίζουν τη δυναμική της ρύπανσης, καθιστώντας τον άνεμο και την υγρασία κύριους προγνωστικούς παράγοντες για τις ακραίες τιμές που καταγράφονται στον σταθμό.

Η ανάλυση επεκτείνεται στον μήνα Σεπτέμβριο, κατά τον οποίο οι ατμοσφαιρικές συνθήκες αρχίζουν να μεταβάλλονται λόγω της μετάβασης προς την φθινοπωρινή περίοδο. Στον Πίνακα 9-5 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για τον μήνα Σεπτέμβριο του έτους 2015.

**Πίνακας 9-5:** Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Σεπτέμβριο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).

<i>Μεταβλητή</i>	<i>Μέση Τιμή</i>	<i>Ελάχιστο</i>	<i>Μέγιστο</i>	<i>Τοπική Απόκλιση</i>
<i>Βενζόλιο (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</i>	3,64	0,99	7,86	2,05
<i>Σχετική Υγρασία (%)</i>	66,45	47,25	88,00	12,80
<i>Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)</i>	1012,93	1006,05	1018,93	2,96
<i>Θερμοκρασία (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</i>	24,63	18,75	31,30	3,02
<i>Ταχύτητα Ανέμου (km/h)</i>	8,16	4,25	15,95	2,99
<i>Ύψος Οριακού Στρώματος (m)</i>	584,79	348,75	1006,25	191,01

Τα αποτελέσματα της πολλαπλής παλινδρόμησης στον Πίνακα 9-6 καταδεικνύουν την εμφάνιση νέων παραμέτρων με στατιστική σημαντικότητα, υποδηλώνοντας μία πιο σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ των μετεωρολογικών μεταβλητών και των επιπέδων  $\text{C}_6\text{H}_6$  στην οδό Πατησίων.

**Πίνακας 9-6:** Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Σεπτέμβριος 2015).

Στατιστικά Παλινδρόμησης	Τιμή		
Πολλαπλό R	0,837		
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,701</b>		
Προσαρμοσμένο R <sup>2</sup>	0,639		
<b>Σημαντικότητα F</b>	<b>1,14x10<sup>-5</sup></b>		
Μέγεθος δείγματος	30		
Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Συντελεστές	Τυπικό Σφάλμα	τιμή-P (p-value)
Τεταγμένη (Intercept)	-145,247	121,422	0,243
Σχετική Υγρασία (%)	0,041	0,052	0,433
Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)	0,136	0,117	0,256
<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>0,474</b>	0,227	<b>0,047</b>
<b>Ταχύτητα Ανέμου (km/h)</b>	<b>-0,345</b>	0,146	<b>0,027</b>
Ύψος Οριακού Στρώματος (m)	-0,001	0,002	0,474

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Σεπτεμβρίου, το μοντέλο διατηρεί την υψηλή ερμηνευτική του ικανότητα με  $R^2 = 0,701$ , εξηγώντας το 70,1% της διακύμανσης του ρύπου ( $F = 1,14 \times 10^{-5}$ ). Κατά τον μήνα αυτόν, η Ταχύτητα Ανέμου ( $p\text{-value} = 0,027$ ) παραμένει ο κύριος ανασταλτικός παράγοντας της ρύπανσης, με τον αρνητικό συντελεστή (-0,345) να υποδηλώνει ότι αύξηση της ταχύτητας κατά 1 km/h επιφέρει μείωση της συγκέντρωσης του  $C_6H_6$  κατά 0,34  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αξιοσημείωτη είναι η εμφάνιση της Θερμοκρασίας ( $p\text{-value} = 0,047$ ) ως στατιστικά σημαντικής παραμέτρου, με θετικό συντελεστή (0,474). Η σχέση αυτή δείχνει ότι για κάθε βαθμό Κελσίου αύξησης της θερμοκρασίας, η συγκέντρωση  $C_6H_6$  αυξάνεται κατά 0,47  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αντίθετα, η σχετική υγρασία και το ύψος του οριακού στρώματος δεν εμφανίζουν στατιστική σημαντικότητα, υποδεικνύοντας ότι η διαμόρφωση των επιπέδων  $C_6H_6$  τον Σεπτέμβριο κυριαρχείται από το θερμικό πεδίο και τους μηχανισμούς οριζόντιας μεταφοράς.

Η μελέτη συνεχίζεται με τον μήνα Οκτώβριο, κατά τον οποίο η περαιτέρω πτώση της θερμοκρασίας και η αλλαγή των ατμοσφαιρικών συστημάτων επηρεάζουν άμεσα τη διασπορά των ρύπων. Στον Πίνακα 9-7 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για τον μήνα Οκτώβριο του έτους 2015.

**Πίνακας 9-7:** Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Οκτώβριο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).

<i>Μεταβλητή</i>	<i>Μέση Τιμή</i>	<i>Ελάχιστο</i>	<i>Μέγιστο</i>	<i>Τυπική Απόκλιση</i>
<i>Βενζόλιο (μg/m<sup>3</sup>)</i>	4,68	0,98	9,56	2,43
<i>Σχετική Υγρασία (%)</i>	76,89	65,75	92,25	6,29
<i>Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)</i>	1016,35	1003,83	1025,18	5,66
<i>Θερμοκρασία (°C)</i>	18,37	14,23	22,45	2,60
<i>Ταχύτητα Ανέμου (km/h)</i>	10,27	3,35	21,90	5,49
<i>Ύψος Οριακού Στρώματος (m)</i>	628,87	282,50	1225,00	306,06

Τα αποτελέσματα της παλινδρόμησης στον Πίνακα 9-8 αποτυπώνουν μία ισχυρή στατιστική εξάρτηση, αναδεικνύοντας νέες παραμέτρους ως καθοριστικούς παράγοντες για τη διαμόρφωση των επιπέδων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>.

**Πίνακας 9-8:** Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Οκτώβριος 2015).

<i>Στατιστικά Παλινδρόμησης</i>	<i>Τιμή</i>		
<i>Πολλαπλό R</i>	0,846		
<b><i>R<sup>2</sup></i></b>	<b>0,715</b>		
<i>Προσαρμοσμένο R<sup>2</sup></i>	0,658		
<b><i>Σημαντικότητα F</i></b>	<b>3,70x10<sup>-6</sup></b>		
<i>Μέγεθος δείγματος</i>	31		
<i>Ανεξάρτητες Μεταβλητές</i>	Συντελεστές	Τυπικό Σφάλμα	τιμή-P (p-value)
<i>Τεταγμένη (Intercept)</i>	350,159	91,593	0,001
<b><i>Σχετική Υγρασία (%)</i></b>	<b>-0,216</b>	0,089	<b>0,023</b>
<b><i>Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)</i></b>	<b>-0,315</b>	0,083	<b>0,001</b>
<i>Θερμοκρασία (°C)</i>	-0,211	0,178	0,247
<b><i>Ταχύτητα Ανέμου (km/h)</i></b>	<b>-0,268</b>	0,125	<b>0,042</b>
<i>Ύψος Οριακού Στρώματος (m)</i>	-0,003	0,003	0,308

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Οκτωβρίου, το μοντέλο παραμένει ιδιαίτερα αξιόπιστο με  $R^2 = 0,715$ , ερμηνεύοντας το 71,5% της διακύμανσης του  $C_6H_6$  ( $F=3,7 \times 10^{-6}$ ). Κατά τον μήνα αυτόν, η Ατμοσφαιρική Πίεση ( $p$ -value = 0,001) αναδεικνύεται ως ο πιο σημαντικός παράγοντας, με τον αρνητικό συντελεστή (- 0,315) να υποδηλώνει ότι για κάθε μονάδα αύξησης της πίεσης, η συγκέντρωση  $C_6H_6$  μειώνεται κατά 0,32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Παράλληλα, η Σχετική Υγρασία ( $p$ -value = 0,023) παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα με αρνητικό συντελεστή (- 0,216), δείχνοντας ότι αύξηση της υγρασίας κατά 1% συνδέεται με μείωση της συγκέντρωσης του ρύπου κατά 0,22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η Ταχύτητα Ανέμου ( $p$ -value = 0,042), η οποία οριακά παραμένει στατιστικά σημαντική (-0,268). Η κυριαρχία της πίεσης και της υγρασίας τον Οκτώβριο υποδηλώνει ότι η έλευση των βαρομετρικών συστημάτων και οι αλλαγές στην ατμοσφαιρική ευστάθεια αποτελούν πλέον τους κύριους μηχανισμούς που καθορίζουν τις ακραίες τιμές ρύπανσης, υπερκαλύπτοντας την επίδραση της θερμοκρασίας και του ύψους του οριακού στρώματος (Dayan et al., 2023).

Η ανάλυση συνεχίζεται με τον μήνα Νοέμβριο, ο οποίος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω της διαφοροποίησης της στατιστικής συμπεριφοράς του μοντέλου. Στον Πίνακα 9-9 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για τον μήνα Νοέμβριο του έτους 2015.

**Πίνακας 9-9:** Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Νοέμβριο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).

<i>Μεταβλητή</i>	<i>Μέση Τιμή</i>	<i>Ελάχιστο</i>	<i>Μέγιστο</i>	<i>Τυπική Απόκλιση</i>
<i>Βενζόλιο (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</i>	8,22	1,26	18,84	5,00
<i>Σχετική Υγρασία (%)</i>	78,63	67,00	90,25	6,72
<i>Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)</i>	1017,58	1001,38	1029,33	7,63
<i>Θερμοκρασία (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</i>	14,28	10,38	17,58	1,79
<i>Ταχύτητα Ανέμου (km/h)</i>	11,85	4,15	21,73	4,99
<i>Ύψος Οριακού Στρώματος (m)</i>	478,39	145,00	1260,00	267,86

Τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον Πίνακα 9-10 καταδεικνύουν αποσύνδεση των συγκεντρώσεων  $C_6H_6$  από τις μετεωρολογικές μεταβλητές, παρά τη διατήρηση υψηλού συντελεστή προσδιορισμού.

**Πίνακας 9-10:** Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Νοέμβριος 2015).

Στατιστικά Παλινδρόμησης	Τιμή		
Πολλαπλό R	0,848		
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0,719</b>		
Προσαρμοσμένο R <sup>2</sup>	0,626		
<b>Σημαντικότητα F</b>	<b>0,001</b>		
Μέγεθος δείγματος	21		
Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Συντελεστές	Τυπικό Σφάλμα	τιμή-P (p-value)
Τεταγμένη (Intercept)	-79,255	107,400	0,472
Σχετική Υγρασία (%)	-0,123	0,134	0,374
Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)	0,100	0,102	0,341
Θερμοκρασία (°C)	0,308	0,533	0,572
Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	-0,459	0,350	0,209
Ύψος Οριακού Στρώματος (m)	-0,008	0,007	0,238

Τα αποτελέσματα του Νοεμβρίου δείχνουν ότι, παρά τον υψηλό συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2 = 0,719$ ), καμία από τις μετεωρολογικές παραμέτρους δεν επιτυγχάνει επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας ( $p\text{-value} > 0,05$ ). Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται πρωτίστως στο περιορισμένο μέγεθος του δείγματος ( $n = 21$ ), το οποίο αυξάνει το τυπικό σφάλμα των εκτιμήσεων και καθιστά το μοντέλο λιγότερο ευαίσθητο στον εντοπισμό μεμονωμένων επιδράσεων. Η αδυναμία των μετεωρολογικών παραμέτρων να ερμηνεύσουν τη διακύμανση του  $C_6H_6$  υποδηλώνει ότι κατά τον μήνα αυτόν η ρύπανση στην οδό Πατησίων παρουσιάζει αποσύνδεση από τις μετεωρολογικές παραμέτρους. Η στατιστική αυτή «παραφωνία», σε συνδυασμό με το μικρό πλήθος παρατηρήσεων, υποδεικνύει ότι οι ακραίες τιμές του Νοεμβρίου ενδεχομένως να οφείλονται σε έκτακτες ανθρωπογενείς εκπομπές (π.χ. έναρξη περιόδου θέρμανσης) που υπερκαλύπτουν τους φυσικούς μηχανισμούς διασποράς, καθιστώντας τη μετεωρολογία δευτερεύοντα παράγοντα ερμηνείας για τη συγκεκριμένη περίοδο (Kanellopoulos et al., 2025).

Η ανάλυση ολοκληρώνεται με τον μήνα Δεκέμβριο, ο οποίος παρουσιάζει την ισχυρότερη στατιστική σύνδεση μεταξύ μετεωρολογικών συνθηκών και ρύπανσης. Ο Πίνακας 9-11 παρουσιάζει τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία για τον μήνα Δεκέμβριο του έτους 2015.

**Πίνακας 9-11:** Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των συγκεντρώσεων βενζολίου και των μετεωρολογικών παραμέτρων για τον μήνα Δεκέμβριο του 2015 στον σταθμό της οδού Πατησίων (Αθήνα).

Μεταβλητή	Μέση Τιμή	Ελάχιστο	Μέγιστο	Τυπική Απόκλιση
Βενζόλιο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	11,29	1,40	29,28	7,65
Σχετική Υγρασία (%)	77,79	67,25	86,00	5,35
Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)	1027,65	1022,53	1034,28	3,63
Θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ )	9,50	2,50	12,60	1,91
Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	9,87	4,38	21,33	4,12
Ύψος Οριακού Στρώματος (m)	453,79	108,75	1213,75	325,61

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 9-12, το μοντέλο επιτυγχάνει τη μέγιστη ερμηνευτική του ικανότητα, αναδεικνύοντας τις παραμέτρους που καθορίζουν τον εγκλωβισμό των ρύπων κοντά στην επιφάνεια κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

**Πίνακας 9-12:** Στατιστικά στοιχεία και συντελεστές της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για τη συγκέντρωση βενζολίου στον σταθμό της οδού Πατησίων (Δεκέμβριος 2015).

Στατιστικά Παλινδρόμησης	Τιμή		
Πολλαπλό $R$	0,884		
$R^2$	<b>0,782</b>		
Προσαρμοσμένο $R^2$	0,738		
Σημαντικότητα $F$	<b><math>1,49 \times 10^{-7}</math></b>		
Μέγεθος δείγματος	31		
Ανεξάρτητες Μεταβλητές	Συντελεστές	Τυπικό Σφάλμα	τιμή-P (p-value)
Τεταγμένη (Intercept)	-96,788	233,366	0,682
Σχετική Υγρασία (%)	<b>-0,777</b>	0,179	<b>0,0001</b>
Ατμοσφαιρική Πίεση (hPa)	0,176	0,232	0,456
Θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ )	-0,394	0,409	0,344
Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	0,578	0,614	0,355
Ύψος Οριακού Στρώματος (m)	<b>-0,031</b>	0,008	<b>0,001</b>

Ειδικότερα, ο Δεκέμβριος παρουσιάζει την υψηλότερη στατιστική συσχέτιση ( $R^2 = 0,781$ ), με τις μετεωρολογικές παραμέτρους να ερμηνεύουν το 78,1% της διακύμανσης του  $\text{C}_6\text{H}_6$  ( $F = 1,49 \times 10^{-7}$ ). Το πλέον κρίσιμο εύρημα είναι η ισχυρή στατιστική σημαντικότητα του Ύψους Οριακού Στρώματος (p-value = 0,001). Ο αρνητικός συντελεστής του (-0,031) υποδηλώνει ότι η βύθιση του οριακού στρώματος οδηγεί σε ραγδαία αύξηση των συγκεντρώσεων, επιβεβαιώνοντας το φαινόμενο του

ατμοσφαιρικού εγκλωβισμού. Παράλληλα, ο αρνητικός συντελεστής της Σχετικής Υγρασίας (-0,777) υποδηλώνει ότι για κάθε μονάδα αύξησης της υγρασίας, η συγκέντρωση του C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> μειώνεται κατά 0,77 μg/m<sup>3</sup>, γεγονός που πιθανώς να συνδέεται με μηχανισμούς απόπλυσης ή διαφοροποίησης της ατμοσφαιρικής ευστάθειας (Kumari et al., 2023). Η συνδυασμένη επίδραση του χαμηλού οριακού στρώματος και της υγρασίας ερμηνεύει σε μεγάλο βαθμό τις ακραίες τιμές του Δεκεμβρίου, υποδεικνύοντας ότι κατά τη χειμερινή περίοδο η κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας αποτελεί πρωταρχικό παράγοντα διαμόρφωσης των επιπέδων ρύπανσης στην οδό Πατησίων.

## 10 Σωρευτική Έκθεση και Εκτίμηση Κινδύνου για τη Δημόσια Υγεία

Η αξιολόγηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> σε αστικά κέντρα υπερβαίνει την απλή παράθεση μέσων τιμών, καθώς η ουσία αυτή αποτελεί αναγνωρισμένο καρκινογόνο (Ομάδα 1 κατά IARC), χωρίς ασφαλές κατώφλι έκθεσης (World Health Organization, 2000; International Agency for Research on Cancer, 2011). Η κρίσιμη παράμετρος για την Εκτίμηση Κινδύνου για τη Δημόσια Υγεία είναι η σωρευτική έκθεση, η οποία ορίζεται ως το γινόμενο της συγκέντρωσης του ρύπου επί τη διάρκεια της έκθεσης του πληθυσμού σε αυτόν. Δεδομένου ότι οι κάτοικοι και οι εργαζόμενοι πλησίον των σταθμών μέτρησης με υψηλά επίπεδα οδικής κυκλοφορίας υπόκεινται σε χρόνια έκθεση, η στατιστική καταγραφή της συχνότητας (σε ώρες) των υπερβάσεων του ορίου των 5 μg/m<sup>3</sup> αποτελεί τον πλέον έγκυρο δείκτη για τον προσδιορισμό της επίδρασης του C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> στον ανθρώπινο οργανισμό. Η συστηματική εμφάνιση ωριαίων τιμών άνω του ορίου αναφοράς συνθέτει ένα προφίλ επικινδυνότητας που συνδέεται άμεσα με την πιθανότητα εμφάνισης αιματολογικών διαταραχών και νεοπλασιών (International Agency for Research on Cancer, 2011).

Η παρούσα ανάλυση βασίστηκε στην επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων από το δίκτυο σταθμών μέτρησης του ΥΠΕΝ. Η επιλογή της χρήσης ωριαίων τιμών αντί για απλούς ετήσιους μέσους όρους κρίθηκε απαραίτητη για την ακριβέστερη αποτύπωση της σωρευτικής έκθεσης του πληθυσμού. Με αυτόν τον τρόπο, αναδεικνύεται η διάρκεια παραμονής σε υψηλές συγκεντρώσεις, επιτρέποντας μία πιο ρεαλιστική εκτίμηση του κινδύνου, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα.

## 10.1 Ανάλυση συγκεντρώσεων βενζολίου και σωρευτικής έκθεσης σε σταθμούς «αστικούς-κυκλοφορίας»

Η συνολική ανάλυση των τεσσάρων σταθμών «Αστικού - Κυκλοφοριακού» προφίλ (Πατησίων, Πειραιάς, Αγίας Σοφίας, Πάτρα) αναδεικνύει μία κοινή περιβαλλοντική πρόκληση, με τη σωρευτική έκθεση σε C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> να παραμένει κρίσιμος παράγοντας για τη δημόσια υγεία. Η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων του ΥΠΕΝ αποκαλύπτει ότι, παρά τις διακυμάνσεις, ο πληθυσμός εκτίθεται συστηματικά σε συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν τα επίπεδα υποβάθρου.

Ακολουθούν οι συγκεντρωτικοί πίνακες των ωριαίων μετρήσεων ανά σταθμό, οι οποίοι αποτυπώνουν το συνολικό χρονικό εύρος κατά το οποίο ο πληθυσμός εκτέθηκε σε επιβαρυμένες συγκεντρώσεις C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>.

**Πίνακας 10-1:** Συχνότητα εμφάνισης ωριαίων συγκεντρώσεων βενζολίου (μg/m<sup>3</sup>) που υπερβαίνουν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των 5 μg/m<sup>3</sup> και συνολική ετήσια έκθεση (σε ώρες και ημέρες) στον σταθμό της οδού Πατησίων (2004-2024).

Πατησίων	Εύρος μετρούμενης συγκέντρωσης βενζολίου (μg/m <sup>3</sup> )						Σύνολο ωρών έτους	Σύνολο ημερών έτους
	Έτος	5-10	10,1-15	15,1-20	20,1-30	30,1-50		
2004	2414	1198	325	117	14	5	4073	169,7
2005	2979	1118	269	121	12	1	4500	187,5
2006	2584	567	111	29	1	0	3292	137,2
2007	2483	498	84	30	1	0	3096	129,0
2008	2508	633	135	47	8	0	3331	138,8
2009	2826	663	98	45	1	0	3633	151,4
2010	2229	210	21	1	0	0	2461	102,5
2011	758	98	8	0	0	0	864	36,0
2012	175	12	0	0	0	0	187	7,8
2013	34	1	0	0	0	0	35	1,5
2014	5	0	0	0	0	0	5	0,2
2015	850	280	119	112	51	2	1414	58,9
2016	2534	788	258	137	30	0	3747	156,1
2017	2654	883	248	114	9	0	3908	162,8
2018	1785	461	70	27	1	0	2344	97,7
2019	1042	374	103	48	5	0	1572	65,5
2020	1063	203	74	35	3	0	1378	57,4
2021	1100	186	59	29	6	0	1380	57,5
2022	1204	327	76	34	6	0	1647	68,6
2023	1228	279	70	18	0	0	1595	66,5
2024	945	236	67	12	0	0	1260	52,5
							Γενικό σύνολο σταθμού	
							Ωρες	Ημέρες
							45722	1905

Ειδικότερα, τα δεδομένα του Πίνακα 10-1 για τον σταθμό της οδού Πατησίων καταδεικνύουν τη διαχρονική εξέλιξη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, αναδεικνύοντας περιόδους έντονης επιβάρυνσης αλλά και ύφεσης. Από το συνολικό δείγμα των 45.722 ωρών (αντιστοιχούν σε 1.905 ημέρες), η περίοδος 2004-2005 ήταν η πλέον επιβαρυνμένη, με το έτος 2005 να καταγράφει 4.500 ώρες έκθεσης, εκ των οποίων οι 1.118 ώρες αφορούσαν συγκεντρώσεις στην κλάση 10,1-15 µg/m<sup>3</sup>. Μετά από μία φάση σημαντικής μείωσης (2010-2014), όπου το 2014 καταγράφηκαν μόλις 5 ώρες συνολικά, παρατηρείται εκ νέου αύξηση από το 2015 και έπειτα. Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί το γεγονός ότι το 2015 καταγράφηκαν 51 ώρες στην υψηλή κλάση συγκέντρωσης 30,1-50 µg/m<sup>3</sup>, ενώ η σταθερή παρουσία τιμών στην κλάση 5-10 µg/m<sup>3</sup> (π.χ. 1.228 ώρες το 2023) υπογραμμίζει τη συνεχή σωρευτική έκθεση του πληθυσμού σε έναν αναγνωρισμένο καρκινογόνο ρύπο.

Ο σταθμός του Πειραιά αποτελεί κρίσιμο σημείο ελέγχου της ποιότητας του αέρα, καθώς συνδυάζει την κυκλοφοριακή επιβάρυνση ενός μεγάλου αστικού κέντρου με τις εκπομπές από τις λιμενικές δραστηριότητες. Η καταγραφή των ωριαίων υπερβάσεων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> για την περίοδο 2015-2024 επιτρέπει τη μελέτη της σωρευτικής έκθεσης σε ένα περιβάλλον με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ρύπανσης, όπου η παρουσία του ρύπου άνω του ορίου των 5 µg/m<sup>3</sup> είναι συστηματική.

**Πίνακας 10-2:** Συχνότητα εμφάνισης ωριαίων συγκεντρώσεων βενζολίου (µg/m<sup>3</sup>) που υπερβαίνουν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των 5 µg/m<sup>3</sup> και συνολική ετήσια έκθεση (σε ώρες και ημέρες) στον σταθμό του Πειραιά (2015-2024).

Πειραιάς Έτος	Εύρος μετρούμενης συγκέντρωσης βενζολίου (µg/m <sup>3</sup> )						Σύνολο ωρών έτους	Σύνολο ημερών έτους
	5-10	10,1-15	15,1-20	20,1-30	30,1-50	50,1-70		
2015	688	133	35	24	0	0	880	36,7
2016	752	158	35	2	0	0	947	39,5
2017	854	155	56	10	0	0	1075	44,8
2018	919	134	30	14	0	0	1097	45,7
2019	733	125	32	3	0	0	893	37,2
2020	592	143	30	12	0	0	777	32,4
2021	952	148	50	6	1	0	1157	48,2
2022	1100	265	67	21	0	0	1453	60,5
2023	701	95	16	3	0	0	815	34,0
2024	587	143	44	10	0	0	784	32,7
							Γενικό σύνολο σταθμού	
							Ωρες	Ημέρες
							9878	411,6

Τα δεδομένα για τον σταθμό του Πειραιά, όπως αποτυπώνονται στον Πίνακα 10-2 για την περίοδο 2015-2024, παρουσιάζουν εικόνα συστηματικής έκθεσης του πληθυσμού σε C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, με σημαντικές διακυμάνσεις. Από το γενικό σύνολο των 9.878 ωρών (που αντιστοιχούν σε 411,6 ημέρες), η συντριπτική πλειονότητα των μετρήσεων συγκεντρώνεται στην κλάση 5-10 µg/m<sup>3</sup>, με το έτος 2022 να αποτελεί το πλέον επιβαρυνμένο της δεκαετίας, καταγράφοντας 1.100 ώρες σε αυτή την κλάση και συνολικά 1.453 ώρες ετήσιας έκθεσης. Αξιοσημείωτο είναι ότι κατά το ίδιο έτος παρατηρήθηκε αιχμή και στις υψηλότερες κλάσεις συγκέντρωσης, με 265 ώρες στο εύρος 10,1-15 µg/m<sup>3</sup> και 21 ώρες στο εύρος 20,1-30 µg/m<sup>3</sup>. Παρά την υποχώρηση των δεικτών το 2023 και 2024, η διαχρονική παρουσία τιμών που υπερβαίνουν το όριο των 10 µg/m<sup>3</sup> (π.χ. 143 ώρες το 2024 στην κλάση 10,1-15 µg/m<sup>3</sup>) επιβεβαιώνει τη συνεχιζόμενη περιβαλλοντική πίεση στο αστικό κέντρο του Πειραιά.

Ο σταθμός της Πάτρας παρέχει σημαντικά δεδομένα για την ποιότητα του αέρα σε ένα από τα μεγαλύτερα αστικά και λιμενικά κέντρα της Δυτικής Ελλάδας. Η ανάλυση των ωριαίων συγκεντρώσεων C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> για την περίοδο 2016-2024 επιτρέπει την αξιολόγηση της χρονικής εξέλιξης της ρύπανσης και τον προσδιορισμό των περιόδων όπου ο πληθυσμός εκτέθηκε σε επίπεδα άνω του ορίου των 5 µg/m<sup>3</sup>.

**Πίνακας 10-3:** Συχνότητα εμφάνισης ωριαίων συγκεντρώσεων βενζολίου (µg/m<sup>3</sup>) που υπερβαίνουν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των 5 µg/m<sup>3</sup> και συνολική ετήσια έκθεση (σε ώρες και ημέρες) στον σταθμό της Πάτρας (2016-2024).

Πάτρα	Εύρος μετρούμενης συγκέντρωσης βενζολίου (µg/m <sup>3</sup> )						Σύνολο ωρών έτους	Σύνολο ημερών έτους
	Έτος	5-10	10,1-15	15,1-20	20,1-30	30,1-50		
2016	712	148	24	6	0	0	890	37,1
2017	830	154	27	1	1	0	1013	42,2
2018	736	128	27	4	0	2	897	37,4
2019	841	133	27	2	0	0	1003	41,8
2020	753	183	31	3	0	0	970	40,4
2021	688	124	26	1	0	0	839	35,0
2022	1424	259	53	2	0	0	1738	72,4
2023	453	90	15	1	0	0	559	23,3
2024	434	65	1	0	0	0	500	20,8
							Γενικό σύνολο σταθμού	
							Ωρες	Ημέρες
							8409	350,4

Τα δεδομένα για τον σταθμό της Πάτρας, όπως προκύπτουν από τον Πίνακα 10-3 για την περίοδο 2016-2024, καταγράφουν συνολική σωρευτική έκθεση 8.409

ωρών (που αντιστοιχούν σε 350,4 ημέρες). Η ανάλυση των μετρήσεων αναδεικνύει το έτος 2022 ως το πλέον επιβαρυνόμενο της περιόδου, με 1.738 ώρες συνολικής έκθεσης, εκ των οποίων οι 1.424 ώρες εντοπίστηκαν στην κλάση 5-10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και οι 259 ώρες στην κλάση 10,1-15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το έτος 2018, το οποίο, παρά τον χαμηλότερο συνολικό αριθμό ωρών (897 ώρες), κατέγραψε τις υψηλότερες συγκεντρώσεις ρύπανσης, με 2 ώρες στην κλάση 50,1-70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η διαχρονική τάση δείχνει σταθερή παρουσία τιμών στην κλάση 15,1-20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (με αποκορύφωμα τις 53 ώρες το 2022), γεγονός που επιβεβαιώνει τη συνεχή περιβαλλοντική πίεση από  $\text{C}_6\text{H}_6$  στον αστικό ιστό της Πάτρας, παρά τη σχετική κάμψη που παρατηρείται το 2023 και το 2024.

Ο σταθμός της οδού Αγίας Σοφίας παρέχει κρίσιμα δεδομένα για την ποιότητα του αέρα σε μία πυκνοκατοικημένη περιοχή της Θεσσαλονίκης με έντονη κυκλοφοριακή φόρτιση. Η ανάλυση των ωριαίων συγκεντρώσεων  $\text{C}_6\text{H}_6$  για την περίοδο 2016-2024 (εκτός του 2020) επιτρέπει τον προσδιορισμό της σωρευτικής έκθεσης των πολιτών σε επίπεδα ίσα ή ανώτερα του ορίου αναφοράς των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Πίνακας 10-4:** Συχνότητα εμφάνισης ωριαίων συγκεντρώσεων βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) που υπερβαίνουν το θεσμοθετημένο ετήσιο όριο των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και συνολική ετήσια έκθεση (σε ώρες και ημέρες) στον σταθμό της οδού Αγίας Σοφίας (2016-2024, εκτός του 2020).

Αγίας Σοφίας	Εύρος μετρούμενης συγκέντρωσης βενζολίου ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )						Σύνολο ωρών έτους	Σύνολο ημερών έτους
	5-10	10,1-15	15,1-20	20,1-30	30,1-50	50,1-70		
<b>Έτος</b>								
<b>2016</b>	895	142	30	9	1	0	1077	44,9
<b>2017</b>	1023	196	72	33	2	0	1326	55,3
<b>2018</b>	978	132	32	5	0	0	1147	47,8
<b>2019</b>	220	1	0	0	0	0	221	9,2
<b>2021</b>	1884	303	59	16	2	0	2264	94,3
<b>2022</b>	779	80	15	1	0	0	875	36,5
<b>2023</b>	534	123	26	11	0	0	694	28,9
<b>2024</b>	1519	231	68	14	0	0	1832	76,3
							Γενικό σύνολο σταθμού	
							Ώρες	Ημέρες
							9436	393,2

Τα δεδομένα για τον σταθμό της οδού Αγίας Σοφίας, όπως αποτυπώνονται στον Πίνακα 10-4 για την περίοδο 2016-2024, καταγράφουν μία συνολική σωρευτική έκθεση 9.436 ωρών (αντιστοιχούν σε 393,2 ημέρες). Η ανάλυση των δεδομένων δείχνει

ότι το έτος 2021 υπήρξε το πλέον επιβαρυνμένο, με 2.264 ώρες συνολικής έκθεσης, εκ των οποίων οι 1.884 ώρες εντοπίστηκαν στην κλάση 5-10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και οι 303 ώρες στην κλάση 10,1-15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Αξιοσημείωτη είναι, επίσης, η παρουσία αιχμών ρύπανσης κατά το έτος 2017, όπου καταγράφηκαν οι περισσότερες ώρες στις υψηλότερες κλάσεις συγκέντρωσης, με 33 ώρες στο εύρος 20,1-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και 2 ώρες στο εύρος 30,1-50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Παρά την πρόσκαιρη ύφεση το 2019 (μόλις 221 ώρες), η επαναφορά σε υψηλά επίπεδα το 2024, με 1.832 ώρες συνολικής έκθεσης και 231 ώρες στην κλάση 10,1-15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , υπογραμμίζει τη διατήρηση της ατμοσφαιρικής επιβάρυνσης στην περιοχή.

Ο Πίνακας 10-5 παρουσιάζει συνοπτικά τη συνολική έκθεση στο  $\text{C}_6\text{H}_6$  στο οποίο εκτέθηκε ο πληθυσμός πλησίον των τεσσάρων εξεταζόμενων σταθμών. Τα δεδομένα επιτρέπουν την άμεση σύγκριση μεταξύ της Αθήνας, του Πειραιά, της Θεσσαλονίκης και της Πάτρας, προσφέροντας μία ολοκληρωμένη εικόνα για τη χρονική διάρκεια των υπερβάσεων του ορίου των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**Πίνακας 10-5:** Συγκεντρωτικά στοιχεία σωρευτικής έκθεσης σε βενζόλιο ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) για το σύνολο της περιόδου μελέτης ανά σταθμό αστικής κυκλοφορίας.

Σταθμός Αστικής Κυκλοφορίας	Περίοδος Μετρήσεων	Συνολικές ώρες ( $\geq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Συνολικές ημέρες έκθεσης
Πατησίων (Αθήνα)	2004-2024	45.722	1.905
Πειραιάς	2015-2024	9.878	412
Αγίας Σοφίας (Θεσσαλονίκη)	2016-2024*	9.436	393
Πάτρα	2016-2024	8.409	350
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>		<b>73.445</b>	<b>3.060</b>

\*Στον σταθμό Αγίας Σοφίας δεν περιλαμβάνεται το έτος 2020, λόγω έλλειψης δεδομένων.

## 10.2 Συγκριτική Αξιολόγηση Αστικών-Κυκλοφοριακών Σταθμών για τη χρονική περίοδο (2016-2024)

Η συγκριτική ανάλυση της κοινής περιόδου 2016-2024 αναδεικνύει τη συστηματική έκθεση του πληθυσμού σε υψηλές συγκεντρώσεις  $\text{C}_6\text{H}_6$ , εστιάζοντας στις κλάσεις 15,1-20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  και 20,1-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Η προσέγγιση αυτή, βασισμένη στα πρωτογενή δεδομένα του ΥΠΕΝ, επιτρέπει την αξιολόγηση της ρύπανσης πέρα από μεμονωμένα

ακραία περιστατικά, αναδεικνύοντας τη διάρκεια παραμονής σε επίπεδα που επιβαρύνουν τη δημόσια υγεία. Σημειώνεται ότι για τον σταθμό της Αγίας Σοφίας δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για το έτος 2020.

Η συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων σταθμών για την περίοδο 2016-2024 αναδεικνύει τον σταθμό της οδού Πατησίων ως τον πλέον επιβαρυσμένο στις υψηλές κλάσεις ρύπανσης, καθώς οι ώρες στις κατηγορίες 15,1-20 και 20,1-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  κατέλαβαν διαχρονικά το μεγαλύτερο ποσοστό επί των συνολικών ετήσιων ωρών υπέρβασης, με αποκορύφωμα το 2016 όπου οι 395 ώρες αυτών των κλάσεων αντιπροσώπευαν το 10,5% της συνολικής έκθεσης. Στον αντίποδα, ο σταθμός της Αγίας Σοφίας εμφανίζει πιο συγκρατημένη εικόνα, με τις ώρες στις αντίστοιχες κλάσεις να κυμαίνονται συνήθως κάτω από το 8% του ετήσιου συνόλου (π.χ. 7,9% το 2017), ενώ οι σταθμοί του Πειραιά και της Πάτρας παρουσιάζουν ενδιάμεση επιβάρυνση, με τάσεις σταδιακής αποκλιμάκωσης μετά το 2018.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το έτος 2021, όπου παρά τη μεγάλη αύξηση των συνολικών ωρών έκθεσης σε όλους τους σταθμούς, η αναλογία των πολύ υψηλών συγκεντρώσεων (20,1-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) παρέμεινε σχετικά χαμηλή σε σχέση με την κυρίαρχη κλάση των 5-10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , γεγονός που υποδηλώνει μια διάχυτη αλλά λιγότερο οξεία εικόνα ρύπανσης κατά τη συγκεκριμένη χρονιά.

Συνολικά, η ανάλυση δείχνει ότι, ενώ ο σταθμός Αγίας Σοφίας και η Πάτρα συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο βάρος των υπερβάσεων στις χαμηλότερες κλάσεις, ο Πειραιάς και κυρίως η περιοχή πέριξ του σταθμού της οδού Πατησίων διατηρούν την πρωτοκαθεδρία στην εμφάνιση συχνότερων αιχμών ρύπανσης στις κλάσεις άνω των 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , παρά τη γενική βελτίωση που παρατηρείται προς το τέλος της εξεταζόμενης περιόδου το 2024.

### **10.3 Ποσοτική Εκτίμηση Καρκινικού Κινδύνου λόγω Έκθεσης σε Βενζόλιο**

Καθώς το  $\text{C}_6\text{H}_6$  έχει ταξινομηθεί από τον Διεθνή Οργανισμό Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC) ως καρκινογόνο της Ομάδας 1, η παρούσα ενότητα εστιάζει στον υπολογισμό του δείκτη ILTCR (Integrated Lifetime Cancer Risk) για τα παιδιά και τους ενήλικες. Η επιλογή των δύο συγκεκριμένων ηλικιακών ομάδων έγινε με σκοπό την αποτύπωση του εύρους επικινδυνότητας, εξετάζοντας τόσο τον μέσο ενήλικα όσο και την πλέον ευαίσθητη ομάδα των παιδιών (1-7 ετών), τα οποία παρουσιάζουν αυξημένη πρόσληψη

ρύπων αναλογικά με το σωματικό τους βάρος, λόγω του αυξημένου ρυθμού αναπνοής (European Environment Agency [EEA], 2023). Στόχος είναι να προσδιοριστεί η πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου στον πληθυσμό λόγω της μακροχρόνιας εισπνοής των καταγεγραμμένων συγκεντρώσεων, αξιολογώντας εάν οι τιμές αυτές υπερβαίνουν το όριο αποδεκτού κινδύνου ( $10^{-6}$ ) που ορίζει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (World Health Organization [WHO], 2020).

### 10.3.1 Παράμετροι Εκτίμησης Έκθεσης

Για τον υπολογισμό του καρκινικού κινδύνου (ILTCR), χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες φυσιολογικές και χρονικές παράμετροι οι οποίες ακολουθούν τα διεθνή πρότυπα του US EPA και τη μεθοδολογία των (Begou & Kassomenos, 2020) για τον πληθυσμό αναφοράς. Ο υπολογισμός βασίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$ILTCR = \frac{C \cdot IR \cdot ED \cdot EF \cdot YE \cdot CPF}{BW \cdot YL \cdot 24 \cdot 365} \quad \text{Εξίσωση (α)}$$

Οι όροι και οι παράμετροι που συνθέτουν την ανωτέρω εξίσωση επεξηγούνται αναλυτικά στον Πίνακα 10-6.

**Πίνακας 10-6:** Παράμετροι υπολογισμού ILTCR για ενήλικες και παιδιά (1-7 ετών)

Παράμετρος	Περιγραφή	Ενήλικες	Παιδιά (1-7 ετών)	Μονάδες
<i>C</i>	Μέση ετήσια συγκέντρωση βενζολίου	Ανά σταθμό	Ανά σταθμό	μg/m <sup>3</sup>
<i>IR</i>	Ρυθμός εισπνοής	<b>20</b>	<b>10</b>	m <sup>3</sup> /ημέρα
<i>ED</i>	Διάρκεια έκθεσης	24	24	ώρες/ημέρα
<i>EF</i>	Συχνότητα έκθεσης	365	365	ημέρες/έτος
<i>YE</i>	Έτη έκθεσης	30	6	έτη
<i>BW</i>	Σωματικό βάρος	<b>70</b>	<b>17</b>	kg
<i>YL</i>	Μέση διάρκεια ζωής	70	70	έτη
<i>*CPF</i>	Συντελεστής κλίσης καρκίνου	<b>2,73 x 10<sup>-5</sup></b>	<b>2,73 x 10<sup>-5</sup></b>	μg/(kg·day)

\* Ο συντελεστής CPF (Cancer Slope Factor) ο οποίος εμφανίζεται στην Εξίσωση (α) προκύπτει από τη σχέση:

$$CPF = IUR \times (BW / IR) \times 10^3 \quad \text{Εξίσωση (β)}$$

όπου, IUR (Inhalation Unit Risk) είναι ο κίνδυνος μονάδας εισπνοής για το C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>. Σύμφωνα με τη μελέτη αναφοράς, υιοθετείται η τιμή  $7,8 \times 10^{-6}$  μg/m<sup>3</sup>, η οποία οδηγεί στην τιμή CPF που χρησιμοποιείται στον Πίνακα 10-6. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής CPF υπολογίζεται με βάση τις φυσιολογικές παραμέτρους του «πρότυπου ενήλικα» (BW = 70 kg και IR = 20 m<sup>3</sup>/ημέρα), προκειμένου να μετατραπεί ο κίνδυνος μονάδας εισπνοής (IUR) σε μία σταθερή τιμή τοξικότητας αναφοράς για το C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία, η τιμή αυτή ( $2,73 \times 10^{-5}$ ) χρησιμοποιείται ως σταθερά στην Εξίσωση (α) τόσο για τους ενήλικες όσο και για τα παιδιά. Η διαφοροποίηση του κινδύνου (ILTCR) μεταξύ των δύο ομάδων προκύπτει αποκλειστικά από την εισαγωγή των ειδικών παραμέτρων σωματικού βάρους (BW) και ρυθμού εισπνοής (IR) των παιδιών στην κύρια εξίσωση υπολογισμού, αποφεύγοντας έτσι τον διπλό συνυπολογισμό των βιολογικών διαφορών.

### 10.3.2 Ανάλυση δεδομένων έκθεσης και χαρακτηρισμός καρκινικού κινδύνου (ILCR)

Στον Πίνακα 10-7 παρουσιάζονται οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> (μg/m<sup>3</sup>) για τη χρονική περίοδο 2016-2024 στους τέσσερις σταθμούς παρακολούθησης της παρούσας μελέτης (Πατησίων, Πειραιάς, Πάτρα, Αγίας Σοφίας). Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό του δείκτη ILTCR μέσω της Εξίσωσης (α). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών παρατίθενται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 10- 8.

**Πίνακας 10-7:** Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις βενζολίου (μg/m<sup>3</sup>) για τη χρονική περίοδο 2016-2024 στους σταθμούς παρακολούθησης Πατησίων, Πειραιά, Πάτρας και Αγίας Σοφίας.

Έτος	Μέση ετήσια συγκέντρωση βενζολίου ανά σταθμό (μg/m <sup>3</sup> )			
	Πατησίων	Πειραιάς	Πάτρα	Αγίας Σοφίας
2016	5,63	2,81	3,23	3
2017	5,71	3,06	2,44	3,44
2018	5,71	2,92	2,28	3,96
2019	4,9	2,81	2,74	2,5
2020	3,58	2,03	2,52	
2021	4,95	2,64	2,67	4,85
2022	3,69	3,03	3,79	4,85
2023	3,91	2,55	2,36	2,88
2024	4,13	4,34	2,22	3,75

**Πίνακας 10-8:** ILTCR ανά σταθμό και έτος (x 10<sup>-6</sup>)

Έτος	Πατησίων (Ε / Π)	Πειραιάς (Ε / Π)	Πάτρα (Ε / Π)	Αγίας Σοφίας (Ε / Π)
2016	18,82 / 7,75	9,39 / 3,87	10,79 / 4,44	10,02 / 4,13
2017	19,09 / 7,86	10,23 / 4,21	8,15 / 3,36	11,50 / 4,73
2018	19,09 / 7,86	9,76 / 4,02	7,62 / 3,14	13,23 / 5,45
2019	16,38 / 6,74	9,39 / 3,87	9,16 / 3,77	8,36 / 3,44
2020	11,97 / 4,93	6,79 / 2,79	8,42 / 3,47	*_
2021	16,55 / 6,81	8,82 / 3,63	8,92 / 3,67	16,21 / 6,67
2022	12,34 / 5,08	10,13 / 4,17	12,67 / 5,21	16,21 / 6,67
2023	13,07 / 5,38	8,52 / 3,51	7,89 / 3,25	9,63 / 3,96
2024	13,81 / 5,68	14,51 / 5,97	7,42 / 3,05	12,53 / 5,16

Ε = *Ενήλικες*

Π = *Παιδί*

\* Δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για το έτος 2020

Από την ανάλυση των δεδομένων ανά σταθμό προκύπτει ότι ο σταθμός στην οδό Πατησίων παρουσιάζει διαχρονικά τις υψηλότερες τιμές κινδύνου, με αποκορύφωση τη διετία 2017-2018 (19,09 για ενήλικες και 7,86 για παιδιά), γεγονός που αντανακλά τη διαρκή ατμοσφαιρική επιβάρυνση του κέντρου της Αθήνας. Στον αντίποδα, ο σταθμός της Πάτρας εμφανίζει χαμηλότερες μέσες τιμές κινδύνου, με το έτος 2024 να καταγράφει τη χαμηλότερη τιμή (7,42 για ενήλικες), υποδεικνύοντας σταδιακή βελτίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών στην περιοχή. Παράλληλα, στον Πειραιά παρατηρείται η σημαντικότερη αύξηση το 2024 (14,51 για ενήλικες), καταγράφοντας τη χειρότερη επίδοση του σταθμού για όλη την περίοδο μελέτης, ενώ ο σταθμός της Αγίας Σοφίας σημείωσε σημαντικές εξάρσεις την περίοδο 2021-2022 (16,21 για ενήλικες), παραμένοντας σταθερά σε υψηλότερα επίπεδα επιβάρυνσης σε σύγκριση με τους σταθμούς του Πειραιά και της Πάτρας για τα περισσότερα έτη.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του δείκτη ILTCR και τη συσχέτισή τους με την επικινδυνότητα για τη δημόσια υγεία, χρησιμοποιήθηκε η διεθνής ταξινόμηση των ορίων κινδύνου (Begou & Kassomenos, 2020). Η συγκεκριμένη κλίμακα επιτρέπει την κατάταξη των υπολογισθέντων τιμών σε τέσσερις διακριτές κατηγορίες, οι οποίες κυμαίνονται από το «αποδεκτό επίπεδο» έως τον «βέβαιο κίνδυνο» εμφάνισης καρκίνου. Στον Πίνακα 10-9 παρουσιάζονται αναλυτικά τα όρια αυτά, τα οποία αποτελούν τη βάση για την ανάλυση των δεδομένων των σταθμών μέτρησης που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

**Πίνακας 10-9:** Ταξινόμηση επιπέδων επικινδυνότητας του δείκτη ILTCR

Τιμή δείκτη ILTCR	Ταξινόμηση κινδύνου
$ILTCR > 10^{-4}$	Βέβαιος κίνδυνος καρκίνου
$1 \times 10^{-5} < ILTCR < 10^{-4}$	Πιθανός κίνδυνος καρκίνου
$1 \times 10^{-6} < ILTCR < 10^{-5}$	Ενδεχόμενος κίνδυνος καρκίνου
$ILTCR < 10^{-6}$	Αποδεκτό επίπεδο κινδύνου

Από την αξιολόγηση των δεδομένων του Πίνακα 10-9 προκύπτει ότι οι τιμές του δείκτη ILTCR για το σύνολο των εξεταζόμενων σταθμών παραμένουν σταθερά πάνω από το όριο του  $10^{-6}$  καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου 2016-2024. Η διαπίστωση αυτή αποκλείει την κατάταξη της έκθεσης του πληθυσμού στο «αποδεκτό επίπεδο κινδύνου» ( $< 10^{-6}$ ) και τοποθετεί όλα τα αποτελέσματα στις κατηγορίες αυξημένης επικινδυνότητας.

Συγκεκριμένα, οι τιμές για την ομάδα των ενηλίκων (Ε) υπερβαίνουν συστηματικά το όριο του  $10^{-5}$  στους περισσότερους σταθμούς, κατατάσσοντας την έκθεση στην κατηγορία του «πιθανού κινδύνου καρκίνου». Ιδιαίτερη επιβάρυνση παρατηρείται στον σταθμό της οδού Πατησίων, με τιμές που αγγίζουν το  $19,09 \times 10^{-6}$ , καθώς και στον σταθμό της Αγίας Σοφίας, όπου καταγράφονται τιμές έως  $16,21 \times 10^{-6}$ . Αντίστοιχα, οι τιμές για την ομάδα των παιδιών (Π), αν και χαμηλότερες από αυτές των ενηλίκων, κυμαίνονται σταθερά εντός της κατηγορίας του «ενδεχόμενου κινδύνου καρκίνου» ( $10^{-6}$  έως  $10^{-5}$ ), χωρίς να υποχωρούν σε καμία περίπτωση στο επίπεδο της αποδεκτής έκθεσης.

Συμπερασματικά, η διατήρηση των δεικτών σε αυτά τα επίπεδα επί μία οκταετία αναδεικνύει μία συνθήκη μόνιμης επικινδυνότητας για όλες τις εξεταζόμενες περιοχές, με τον κίνδυνο να παραμένει διαχρονικά σε επίπεδα που χρήζουν συνεχούς παρακολούθησης.

Στον Πίνακα 10-10 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι του δείκτη ILTCR για την περίοδο 2016-2024 ανά σταθμό παρακολούθησης, παρέχοντας μια συνολική εικόνα της χρόνιας επιβάρυνσης για τις δύο εξεταζόμενες πληθυσμιακές ομάδες. Οι τιμές αυτές επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση της επικινδυνότητας μεταξύ των περιοχών, αναδεικνύοντας τη μέση απόκλιση από το όριο αμελητέου κινδύνου για το σύνολο της εξεταζόμενης περιόδου.

**Πίνακας 10-10:** Μέσος όρος του δείκτη ILTCR ανά σταθμό παρακολούθησης για την περίοδο 2016-2024 ( $\times 10^{-6}$ )

Σταθμός	Μέσος ILTCR ενηλίκων	Μέσος ILTCR παιδών
Πατησίων	16,04	6,60
Πειραιάς	9,67	3,98
Πάτρα	9,05	3,73
Αγίας Σοφίας*	11,59	4,78

\*Σημείωση: Ο μέσος όρος για τον σταθμό της Αγίας Σοφίας υπολογίστηκε για 8 έτη, λόγω έλλειψης δεδομένων για το έτος 2020.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 10-10 προκύπτει ότι σε όλους τους σταθμούς παρακολούθησης ο μέσος δείκτης ILTCR υπερβαίνει το διεθνώς αποδεκτό όριο αμελητέου κινδύνου ( $10^{-6}$ ), γεγονός που υποδηλώνει συνεχή και χρόνια επιβάρυνση του πληθυσμού από την παρουσία  $C_6H_6$  στην ατμόσφαιρα. Ο σταθμός της οδού Πατησίων καταγράφει τη μέγιστη μέση τιμή (16,04 για ενήλικες και 6,60 για παιδιά), επιβεβαιώνοντας ότι το κέντρο της Αθήνας αποτελεί την πιο επιβαρυσμένη περιοχή της μελέτης, ενώ η Πάτρα εμφανίζει τον χαμηλότερο μέσο κίνδυνο (9,05 για ενήλικες), ο οποίος παραμένει, ωστόσο, εννέα φορές πάνω από το όριο ασφαλείας. Παράλληλα, ο σταθμός της οδού Αγίας Σοφίας παρουσιάζει ενδιάμεση επιβάρυνση (11,59), υπερβαίνοντας τον μέσο όρο του Πειραιά (9,67), ενώ σε όλες τις περιπτώσεις ο κίνδυνος για την ομάδα των ενηλίκων εμφανίζεται κατά 2,4 φορές υψηλότερος από αυτόν των παιδιών, λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας έκθεσης (30 έτη) που ενσωματώνει το μοντέλο υπολογισμού.

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι χρονικές διακυμάνσεις της επικινδυνότητας, στον Πίνακα 10-11 παρουσιάζεται η μέγιστη θετική απόκλιση του δείκτη ILTCR από τον μέσο όρο της εννεαετίας για κάθε σταθμό παρακολούθησης. Η συγκεκριμένη ανάλυση επιτρέπει τον προσδιορισμό του έτους με τη μεγαλύτερη επιβάρυνση (χειρότερο σενάριο) ανά περιοχή, αναδεικνύοντας τις περιόδους αιχμής της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και τη σχετική ποσοστιαία μεταβολή του κινδύνου σε σύγκριση με τα επίπεδα βάσης της περιόδου 2016-2024.

**Πίνακας 10-11:** Έτος μέγιστης απόκλισης και ποσοστιαία μεταβολή του δείκτη ILTCR (ενήλικες) σε σχέση με τον μέσο όρο ανά σταθμό.

Σταθμός	Χειρότερο έτος	Μέγιστος ILTCR (Ενήλικες)	Μέσος ILTCR (Ενήλικες)	Ποσοστό απόκλισης (%)
Πατησίων	2017 & 2018	19,09	16,04	+19,0
Πειραιάς	2024	14,51	9,67	+50,1
Πάτρα	2022	12,67	9,05	+40,0
Αγίας Σοφίας	2021 & 2022	16,21	11,59	+39,9

Ο Πειραιάς παρουσίασε τη μεγαλύτερη έξαρση το 2024, με τον κίνδυνο να εκτινάσσεται 50,1% πάνω από τον μέσο όρο του, γεγονός που υποδηλώνει μία πρόσφατη και σημαντική επιβάρυνση. Ο σταθμός της οδού Πατησίων, αν και έχει τις υψηλότερες τιμές συνολικά, εμφανίζει τη μικρότερη διακύμανση (+19,0%), υποδεικνύοντας ότι η ρύπανση εκεί είναι χρόνια και σταθερή. Στην Πάτρα και την περιοχή γύρω από τον σταθμό της οδού Αγίας Σοφίας, οι χειρότερες επιδόσεις σημειώθηκαν την περίοδο 2021-2022, με αποκλίσεις της τάξης του 40%.

### 10.3.3 Ποιοτική αποτύπωση του κινδύνου για τη δημόσια υγεία

Προκειμένου να διευκολυνθεί η ερμηνεία των ευρημάτων και να αναδειχθεί η ουσιαστική επικινδυνότητα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στους σταθμούς μελέτης, κρίθηκε σκόπιμη η ποιοτική κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων. Η μετάφραση των αριθμητικών δεικτών σε επίπεδα επικινδυνότητας επιτρέπει την άμεση αξιολόγηση της έκθεσης του πληθυσμού και την κατανόηση της σοβαρότητας των επιπτώσεων στη δημόσια υγεία. Στον Πίνακα 10-12 παρουσιάζεται η διαχρονική ταξινόμηση των τιμών του δείκτη ILTCR για κάθε σταθμό και ηλικιακή ομάδα, αντικαθιστώντας τις απόλυτες τιμές με τον αντίστοιχο χαρακτηρισμό επικινδυνότητας.

**Πίνακας 10-12:** Ποιοτική ταξινόμηση επιπέδου κινδύνου ILTCR ανά σταθμό και έτος (2016-2024).

Έτος	Πατησίων (Ε / Π)	Πειραιάς (Ε / Π)	Πάτρα (Ε / Π)	Αγίας Σοφίας (Ε / Π)
2016	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Πιθανός / Ενδεχόμενος
2017	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Πιθανός / Ενδεχόμενος
2018	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Πιθανός / Ενδεχόμενος
2019	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος
2020	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	*
2021	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Πιθανός / Ενδεχόμενος
2022	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Πιθανός / Ενδεχόμενος
2023	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος
2024	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Πιθανός / Ενδεχόμενος	Ενδεχόμενος / Ενδεχόμενος	Πιθανός / Ενδεχόμενος

*E=Ενήλικας,*

*Π=Παιδί*

*Πιθανός: Πιθανός κίνδυνος καρκίνου ( $> 10^{-5}$ ).*

*Ενδεχόμενος: Ενδεχόμενος κίνδυνος καρκίνου ( $10^{-6}$  έως  $10^{-5}$ ).*

*\*Δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα για τον σταθμό της οδού Αγίας Σοφίας το 2020.*

Η συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων καθιστά σαφές ότι η ομάδα των ενηλίκων εκτίθεται συστηματικά σε επίπεδα «πιθανού κινδύνου», ιδιαίτερα στον σταθμό της οδού Πατησίων και περιοδικά στους υπόλοιπους σταθμούς. Αντίθετα, η ομάδα των παιδιών παραμένει σταθερά στην κατηγορία του «ενδεχόμενου κινδύνου». Η απουσία οποιασδήποτε καταγραφής στην κατηγορία της «αποδεκτής έκθεσης» υπογραμμίζει τη διαχρονική επιβάρυνση του αστικού περιβάλλοντος και την αναγκαιότητα λήψης μέτρων για τη μείωση των ρύπων.

## 11 Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης συνοψίζονται στα εξής:

➤ Σχετικά με τη διαχρονική διακύμανση (2016-2024)

- Κατά την περίοδο 2016-2018, ο σταθμός της οδού Πατησίων παρουσίασε συστηματικές υπερβάσεις του θεσμοθετημένου ετήσιου ορίου των  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (με τιμές έως  $5,71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Ωστόσο, από το 2019 έως το 2024, παρατηρήθηκε πλήρης συμμόρφωση όλων των μελετώμενων σταθμών, καθώς καμία μέση ετήσια τιμή δεν ξεπέρασε το όριο ασφαλείας.

- Επιβεβαιώθηκε η υψηλή επιβάρυνση των κυκλοφοριακών σταθμών. Οι σταθμοί της οδού Πατησίων, της οδού Αγίας Σοφίας και του Πειραιά αναδείχθηκαν ως οι πλέον επιβαρυνμένοι, εμφανίζοντας τιμές σταθερά υψηλότερες από τον Μ.Ο. της εκάστοτε τριετίας (2016-2018, 2019-2021, 2022-2024), γεγονός που επιβεβαιώνει την άμεση σύνδεση των επιπέδων  $\text{C}_6\text{H}_6$  με τον κυκλοφοριακό φόρτο.

- Η επιβολή περιορισμών στην κυκλοφορία λόγω της πανδημίας COVID-19 οδήγησε σε δραστική μείωση των ρύπων, με χαρακτηριστική την υποχώρηση των τιμών στην οδό Πατησίων (26,9%) και στον Πειραιά (27,8%) το 2020. Μετά την πανδημία παρατηρήθηκε τάση ανάκαμψης των συγκεντρώσεων στα μεγάλα αστικά κέντρα. Ο σταθμός του Πειραιά κατέγραψε τη σημαντικότερη αύξηση (43,2%) μεταξύ 2022 και 2024, ενώ η οδός Πατησίων παρουσίασε άνοδο 11,9%.

- Ο σταθμός της Πάτρας καταγράφηκε ως η περιοχή με τη δραστικότερη βελτίωση, σημειώνοντας μείωση των συγκεντρώσεων κατά 41,4% (από  $3,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$  σε  $2,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), γεγονός που τον κατατάσσει πλέον κάτω από τον συνολικό Μ.Ο. της τελευταίας τριετίας.

- Παρά τη συνολική βελτίωση μετά το 2019, η ανησυχητική εγγύτητα ορισμένων σταθμών (π.χ. Αγίας Σοφίας με  $4,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$  το 2022) στο όριο ασφαλείας, καθιστά αναγκαία τη συνεχή επιτήρηση και την εφαρμογή στοχευμένων πολιτικών βιώσιμης κινητικότητας στα αστικά κέντρα.

➤ Σχετικά με την εποχική διακύμανση:

- Ο σταθμός της οδού Πατησίων παρουσίασε την πλέον επιβαρυνμένη εικόνα, καθώς κατά την ψυχρή περίοδο η μέση τιμή ( $5,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) υπερβαίνει το

ετήσιο θεσμοθετημένο όριο των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , ενώ ο σταθμός Αγίας Σοφίας το προσεγγίζει οριακά (4,88  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Στους υπόλοιπους σταθμούς, αν και οι μέσες τιμές παραμένουν εντός ορίων, καταγράφονται συχνά επεισόδια ρύπανσης, με ακραίες τιμές που υπερβαίνουν το όριο έως και τέσσερις φορές (π.χ. Πατησίων 24,31  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Κορδελιό 17,24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

- Η ψυχρή περίοδος χαρακτηρίστηκε από σημαντικά μεγαλύτερο ενδοτεταρτημοριακό εύρος (IQR) σε σύγκριση με τη θερμή, γεγονός που υποδηλώνει έντονη μεταβλητότητα των εκπομπών και αυξημένη συχνότητα επεισοδίων ρύπανσης. Η παρουσία πολυάριθμων ακραίων τιμών κατά τους χειμερινούς μήνες αντικατοπτρίζει την επίδραση τοπικών πηγών, όπως η οικιακή θέρμανση και η καύση βιομάζας.

- Παρατηρήθηκε σαφής διαφοροποίηση μεταξύ των κεντρικών αστικών σταθμών (Πατησίων, Αγίας Σοφίας, Πειραιάς, Πάτρα), όπου οι κυκλοφοριακές εκπομπές σε συνδυασμό με τη θέρμανση οδηγούν σε υψηλά επίπεδα ρύπανσης, και των περιφερειακών/βιομηχανικών σταθμών (Ελευσίνα, Σίνδος, Κορδελιό), οι οποίοι διατηρούν χαμηλότερο υπόβαθρο ρύπανσης, αλλά δεν στερούνται έντονων βραχυχρόνιων επεισοδίων.

- Η μελέτη κατέδειξε ότι το  $\text{C}_6\text{H}_6$  παραμένει ένας ρύπος κρίσιμης σημασίας για την αστική ατμόσφαιρα, με την εποχικότητα να αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διαμόρφωση των επιπέδων έκθεσης του πληθυσμού.

➤ Σχετικά με τη διαχρονική μελέτη του σταθμού της οδού Πατησίων:

- Η εικοσαετής καταγραφή ανέδειξε μία σαφή τροχιά περιβαλλοντικής αποκατάστασης. Από τη δυσμενέστερη κατάσταση του 2004 (7,58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , υπέρβαση +51,60%), ο σταθμός οδηγήθηκε στην εδραίωση της συμμόρφωσης το 2024, με τιμή 4,13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (απόκλιση -17,40% από το όριο), σημειώνοντας συνολική βελτίωση της τάξης του 45,5%.

- Η διαχρονική στατιστική ανάλυση του δευτέρου εξαμήνου του 2015 ανέδειξε μία σαφή μεταβολή στους μηχανισμούς που διέπουν τη διαμόρφωση των επιπέδων ρύπανσης από  $\text{C}_6\text{H}_6$  στον αστικό ιστό. Κατά τους θερινούς μήνες (Ιούλιος - Αύγουστος), η διακύμανση του ρύπου ελέγχεται πρωτίστως από τις διαδικασίες οριζόντιας διασποράς, με την ταχύτητα του ανέμου να αποτελεί τον κρισιμότερο παράγοντα εμφάνισης ακραίων τιμών. Αντίθετα, κατά τη χειμερινή περίοδο και

ειδικότερα τον Δεκέμβριο, η στατιστική σημαντικότητα μετατοπίζεται στις κατακόρυφες ατμοσφαιρικές διεργασίες.

- Η ισχυρή αρνητική συσχέτιση με το ύψος του οριακού στρώματος ( $p = 0,001$ ) επιβεβαίωσε ότι ο περιορισμός του στρώματος ανάμιξης αποτελεί τον κύριο μηχανισμό εγκλωβισμού των ρύπων, οδηγώντας στις υψηλότερες καταγεγραμμένες συγκεντρώσεις του έτους.

- Η υψηλή ερμηνευτική ικανότητα των μοντέλων παλινδρόμησης (με τιμές  $R^2$  έως και 0,78) επιβεβαίωσε ότι οι μετεωρολογικές παράμετροι της περιοχής δεν αποτελούν απλώς μία παράμετρο διασποράς της ρύπανσης, αλλά τον καθοριστικό παράγοντα που διαμορφώνει το προφίλ της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από  $C_6H_6$  στην οδό Πατησίων.

➤ Σχετικά με την σωρευτική έκθεση στους σταθμούς αστικούς-κυκλοφορίας.

- Ο σταθμός της οδού Πατησίων αναδείχθηκε ως ο πλέον επιβαρυσμένος διαχρονικά, καταγράφοντας τη συχνότερη εμφάνιση ωριαίων συγκεντρώσεων στις υψηλές κλάσεις 15,1-20 και 20,1-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , με το έτος 2016 να αποτελεί το σημείο μέγιστης έκθεσης (395 ώρες στις συγκεκριμένες κατηγορίες).

- Ο σταθμός της οδού Αγίας Σοφίας παρουσίασε ανησυχητική αυξητική τάση κατά το έτος 2024, φτάνοντας τις 1.832 συνολικές ώρες έκθεσης άνω των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , γεγονός που υποδηλώνει μία νέα δυναμική επιβάρυνσης στην περιοχή.

- Οι σταθμοί του Πειραιά και της Πάτρας εμφάνισαν μία πιο θετική εικόνα μετά το 2018, με σταθερή μείωση των ωρών που κατατάσσονται στις ανώτερες κλάσεις ρύπανσης (άνω των 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), υποδηλώνοντας τάση εξομάλυνσης των ακραίων τιμών συγκέντρωσης  $C_6H_6$ .

- Σε όλους τους σταθμούς, η συντριπτική πλειονότητα των ωρών υπέρβασης του ορίου των 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  εντοπίστηκε στην κλάση 5-10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , γεγονός που υποδηλώνει ότι ο πληθυσμός εκτίθεται σε συνεχή, χαμηλού επιπέδου αλλά υπερβαίνουσα τα όρια ρύπανση, παρά σε σπάνια και πολύ οξεία επεισόδια.

➤ Σχετικά με την εκτίμηση της επικινδυνότητας.

- Όλες οι τιμές ILTCR που υπολογίστηκαν υπερέβησαν το κατώτατο όριο αμελητέου κινδύνου ( $10^{-6}$ ), γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη για συνεχή επιτήρηση της ποιότητας του αέρα στους συγκεκριμένους σταθμούς.

- Ο κίνδυνος για τους ενήλικες καταγράφηκε σταθερά υπερδιπλάσιος σε σχέση με αυτόν των παιδιών, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας έκθεσης (30 έτη έναντι 6 ετών) που χρησιμοποιείται στο μοντέλο υπολογισμού.

## 12 Βιβλιογραφία

- Almetwally, A. A., Bin-Jumah, M., & Allam, A. A. (2020). Ambient air pollution and its influence on human health and welfare: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(20), 24815–24830. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09042-2>
- Atkinson, R. (2000). Atmospheric chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub>. *Atmospheric Environment*, 34(12–14), 2063–2101. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(99\)00460-4](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(99)00460-4)
- Atkinson, R., & Arey, J. (2004). Atmospheric degradation of volatile organic compounds. *ChemInform*, 35(10). <https://doi.org/10.1002/chin.200410285>
- Avdoulou, M. M., Golfopoulos, A. G., & Kalavrouziotis, I. K. (2022). Monitoring air pollution in Greek urban areas during the lockdowns, as a response measure of SARS-COV-2 (COVID-19). *Water Air & Soil Pollution*, 234(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-06024-7>
- Bai, L., Wang, J., Ma, X., & Lu, H. (2018). Air Pollution Forecasts: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4), 780. <https://doi.org/10.3390/ijerph15040780>
- Begou, P., & Kassomenos, P. (2020). One-year measurements of toxic benzene concentrations in the ambient air of Greece: An estimation of public health risk. *Atmospheric Pollution Research*, 11(10), 1829–1838. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.07.011>
- Bergman, M. E., Huang, X., Baudino, S., Caissard, J., & Dudareva, N. (2025). Plant volatile organic compounds: Emission and perception in a changing world. *Current Opinion in Plant Biology*, 85, 102706. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2025.102706>

- Besis, A., Georgiadou, E., & Samara, C. (2021). Odor-active volatile organic compounds along the seafront of Thessaloniki, Greece. Implications for sources of nuisance odor. *The Science of the Total Environment*, 799, 149388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149388>
- Chang, C., Chen, Y., Wang, J., Kao, W., Wang, C., Pan, X., Ou-Yang, C., Hsieh, H., Liu, W., & Chang, C. (2025). A study of VOCs in waste incinerator plumes and landfill emissions via drone sounding. *Atmospheric Environment X*, 27, 100344. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2025.100344>
- Chatzopoulou, A., & Mavroidis, I. (2025). Spatiotemporal analysis of air pollutants in Thessaloniki, Greece. *Atmosphere*, 16(9), 1057. <https://doi.org/10.3390/atmos16091057>
- Chen, D., Xu, Y., Xu, J., Lian, M., Zhang, W., Wu, W., Wu, M., & Zhao, J. (2022). The vertical Distribution of VOCs and their Impact on the environment: a review. *Atmosphere*, 13(12), 1940. <https://doi.org/10.3390/atmos13121940>
- Clinical Ocular Toxicology. (2008). In *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4160-4673-8.x0015-0>
- Creasey, D., Heard, D., & Lee, J. (2001). OH and HO<sub>2</sub> measurements in a forested region of north-western Greece. *Atmospheric Environment*, 35(27), 4713–4724. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(01\)00090-5](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(01)00090-5)
- Dayan, U., Koch, J., & Agami, S. (2023). Atmospheric conditions leading to buildup of benzene concentrations in urban areas in Israel. *Atmospheric Environment*, 300, 119678. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119678>
- De Recherche Sur Le Cancer, C. I., & Humans, I. W. G. O. T. E. O. C. R. T. (2018). *Benzene*.

- Dimitriou, K., & Kassomenos, P. (2020). Background concentrations of benzene, potential long range transport influences and corresponding cancer risk in four cities of central Europe, in relation to air mass origination. *Journal of Environmental Management*, 262, 110374. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110374>
- Dimitriou, K., & Mihalopoulos, N. (2024). Air Quality Assessment in Six Major Greek Cities with an Emphasis on the Athens Metropolitan Region. *Atmosphere*, 15(9), 1074. <https://doi.org/10.3390/atmos15091074>
- Directive - 2008/50 - EN - EUR-LEX. (n.d.). <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj>
- Directive - EU - 2024/2881 - EN - EUR-LEX. (n.d.). <http://data.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj>
- Directive - 2000/69 - EN - EUR-LEX. (n.d.). <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/69/oj>
- Dubuisson, C., Wortham, H., Garinie, T., Hossaert-McKey, M., Lapeyre, B., Buatois, B., Temime-Roussel, B., Ormeño, E., Staudt, M., & Proffit, M. (2024). Ozone alters the chemical signal required for plant – insect pollination: The case of the Mediterranean fig tree and its specific pollinator. *The Science of the Total Environment*, 919, 170861. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170861>
- Encyclopedia of Toxicology*. (2023). Elsevier.
- European Environment Agency. (2023, April 24). *Air pollution and children's health*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-pollution-and-childrens-health>
- Fameli, K., & Assimakopoulos, V. (2014). Development of a road transport emission inventory for Greece and the Greater Athens Area: Effects of important parameters. *The Science of the Total Environment*, 505, 770–786. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.015>

- Faraday, E. T., Osarodion, O. P., Ifeanyi, U. J., Omowunmi, F. S., & Emmanuel, O. A. (2025). Organic compounds in the atmosphere and their potential impact on health in Ondo State, Nigeria. *Environmental Analysis Health and Toxicology*, 40(1), e2025006. <https://doi.org/10.5620/eaht.2025006>
- Gao, L., Guan, K., He, L., Jiang, C., Wu, X., Lu, X., & Ainsworth, E. A. (2024). Tropospheric ozone pollution increases the sensitivity of plant production to vapor pressure deficit across diverse ecosystems in the Northern Hemisphere. *The Science of the Total Environment*, 951, 175748. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175748>
- Han, S., Xie, M., Cheng, S., Han, Y., Li, P., & Guo, J. (2024). Associations between specific volatile organic chemical exposures and cardiovascular disease risks: insights from NHANES. *Frontiers in Public Health*, 12, 1378444. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1378444>
- Helmig, D., Bottenheim, J., Galbally, I. E., Lewis, A., Milton, M. J. T., Penkett, S., Plass-Duelmer, C., Reimann, S., Tans, P., & Thiel, S. (2009). Volatile organic compounds in the global atmosphere. *Eos*, 90(52), 513–514. <https://doi.org/10.1029/2009eo520001>
- Iavorivska, L., Boyer, E. W., & DeWalle, D. R. (2016). Atmospheric deposition of organic carbon via precipitation. *Atmospheric Environment*, 146, 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.06.006>
- International Agency for Research on Cancer. (2011). *A review of human carcinogens. F. Chemical agents and related occupations: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans* (Vol. 100).

- Jürgens, A., & Bischoff, M. (2016). Changing odour landscapes: the effect of anthropogenic volatile pollutants on plant–pollinator olfactory communication. *Functional Ecology*, 31(1), 56–64. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12774>
- Kanellopoulos, P. G., Chrysochou, E., & Bakeas, E. (2025). Investigating BTEX emissions in Greece: spatiotemporal distribution, health risk assessment and ozone formation potential. *Atmosphere*, 16(10), 1162. <https://doi.org/10.3390/atmos16101162>
- Kaplan, A., Gozlan, I., Kira, O., & Avisar, D. (2024). Interactions between volatile air pollutants and atmospheric water production – Effects of chemical properties, mechanisms, and transfer processes. *Chemosphere*, 365, 143399. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143399>
- Kumari, P., Soni, D., Aggarwal, S. G., & Singh, K. (2023). Seasonal and diurnal measurement of ambient benzene at a high traffic inflation site in Delhi: Health risk assessment and its possible role in ozone formation pathways. *Environmental Analysis Health and Toxicology*, 38(3), e2023016. <https://doi.org/10.5620/eaht.2023016>
- Liggio, J., Makar, P., Li, S., Hayden, K., Darlington, A., Moussa, S., Wren, S., Staebler, R., Wentzell, J., Wheeler, M., Leithead, A., Mittermeier, R., Narayan, J., Wolde, M., Blanchard, D., Aherne, J., Kirk, J., Lee, C., Stroud, C., . . . Gentner, D. R. (2025). Organic carbon dry deposition outpaces atmospheric processing with unaccounted implications for air quality and freshwater ecosystems. *Science Advances*, 11(1), eadr0259. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adr0259>
- Liu, X., Zhang, X., Dufresne, M., Wang, T., Wu, L., Lara, R., Seco, R., Monge, M., Yáñez-Serrano, A. M., Gohy, M., Petit, P., Chevalier, A., Vagnot, M., Fortier, Y., Baudic, A., Gherzi, V., Gille, G., Lanzi, L., Gros, V., . . . Salameh, T. (2025).

- Measurement report: Exploring the variations in ambient BTEX in urban Europe and their environmental health implications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(1), 625–638. <https://doi.org/10.5194/acp-25-625-2025>
- Logothetis, I., Antonopoulou, C., Zisopoulos, G., Mitsotakis, A., & Grammelis, P. (2023). A Case Study of Air Quality and a Health Index over a Port, an Urban and a High-Traffic Location in Rhodes City. *Air*, 1(2), 139–158. <https://doi.org/10.3390/air1020011>
- Madani, N. A., Russo, P. N., & Carpenter, D. O. (2025). Sources and geographic differences in air releases of benzene in the United States. *Environmental Research*, 285(Pt 2), 122401. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.122401>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Matsui, K. (2016). A portion of plant airborne communication is endorsed by uptake and metabolism of volatile organic compounds. *Current Opinion in Plant Biology*, 32, 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.05.005>
- Mellouki, A., Wallington, T. J., & Chen, J. (2015). Atmospheric chemistry of oxygenated volatile organic compounds: Impacts on air quality and climate. *Chemical Reviews*, 115(10), 3984–4014. <https://doi.org/10.1021/cr500549n>
- Mpora, E. (2025). Volatile organic compounds as emerging environmental toxins: impacts on organ systems and public health implications. *INOSR APPLIED SCIENCES*, 13(2), 53–57.
- Muto, E. Y., Da Silva Figueiredo, E., Da Silva, H. D. P., & Da Cunha Trivelato, G. (2025). Benzene Exposure in Gas Stations across the World: A Systematic

- Review. *ACS Chemical Health & Safety*, 32(5), 534–547.  
<https://doi.org/10.1021/acs.chas.5c00041>
- Nathanail, E. G., Gavanas, N., & Adamos, G. (2023). Smart energy for smart transport. In *Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure*.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-23721-8>
- Notario, A., Gutiérrez-Álvarez, I., & Adame, J. A. (2020). Atmospheric benzene measurements in the main metropolitan and industrial areas of Spain from 2014 to 2017. *Atmospheric Research*, 238, 104896.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104896>
- Nowroz, F., Hasanuzzaman, M., Siddika, A., Parvin, K., Caparros, P. G., Nahar, K., & Prasad, P. V. (2024). Elevated tropospheric ozone and crop production: potential negative effects and plant defense mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1244515>
- Open-Meteo. (χ.χ.). Historical Weather API. <https://open-meteo.com/>
- Pál, L., Lovas, S., McKee, M., Diószegi, J., Kovács, N., & Szűcs, S. (2024). Exposure to volatile organic compounds in offices and in residential and educational buildings in the European Union between 2010 and 2023: A systematic review and health risk assessment. *The Science of the Total Environment*, 945, 173965.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173965>
- Pan, Q., Liu, Q., Zheng, J., Li, Y., Xiang, S., Sun, X., & He, X. (2023). Volatile and semi-volatile organic compounds in landfill gas: Composition characteristics and health risks. *Environment International*, 174, 107886.  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107886>

- Parliari, D., Giannaros, C., Papadogiannaki, S., & Melas, D. (2023). Short-Term effects of air pollution on mortality in the urban area of Thessaloniki, Greece. *Sustainability*, 15(6), 5305. <https://doi.org/10.3390/su15065305>
- Petrinoli, K., Kaskaoutis, D., Bougiatioti, A., Liakakou, E., Grivas, G., Kalkavouras, P., & Mihalopoulos, N. (2025). Year-long variability of the mixing layer height at an urban Mediterranean location and association with air pollution levels. *Atmospheric Pollution Research*, 16(10), 102612. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102612>
- PubChem. (n.d.). *Benzene*. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Benzene>
- Riggs, D. W., Malovichko, M. V., Gao, H., McGraw, K. E., Taylor, B. S., Krivokhizhina, T., Rai, S. N., Keith, R. J., Bhatnagar, A., & Srivastava, S. (2022). Environmental exposure to volatile organic compounds is associated with endothelial injury. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 437, 115877. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2022.115877>
- Samad, A., Kiseleva, O., Holst, C. C., Wegener, R., Kossmann, M., Meusel, G., Fiehn, A., Erbertseder, T., Becker, R., Roiger, A., Stanislawsky, P., Klemp, D., Emeis, S., Kalthoff, N., & Vogt, U. (2023). Meteorological and air quality measurements in a city region with complex terrain: influence of meteorological phenomena on urban climate. *Meteorologische Zeitschrift*, 32(4), 293–315. <https://doi.org/10.1127/metz/2023/1124>
- Shen, Y., & Ku, Y. (1999). Treatment of gas-phase volatile organic compounds (VOCs) by the UVO3 process. *Chemosphere*, 38(8), 1855–1866. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(98\)00400-7](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(98)00400-7)

- Shi, G., Du, H., Du, L., Ni, X., Hu, Y., Pang, D., & Yao, L. (2025). Distribution characteristics of volatile organic compounds and its multidimensional impact on ozone formation in arid regions based on machine learning algorithms. *Environmental Pollution*, 373, 126159. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126159>
- Starokozhev, E., Fries, E., Cycura, A., & Püttmann, W. (2009). Distribution of VOCs between air and snow at the Jungfrauoch high alpine research station, Switzerland, during CLACE 5 (winter 2006). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(9), 3197–3207. <https://doi.org/10.5194/acp-9-3197-2009>
- Sun, Y., Luo, H., Li, Y., Zhou, W., Xu, W., Fu, P., & Zhao, D. (2025). Atmospheric organic aerosols: online molecular characterization and environmental impacts. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01199-2>
- Timmis, K. (Ed.). (2010). *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*. Springer.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1998). *Locating and estimating air emissions from sources of benzene* (454/R-98-011). <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/locating-and-estimating-le-documents>
- Von Schneidmesser, E., Steinmar, K., Weatherhead, E. C., Bonn, B., Gerwig, H., & Quedenau, J. (2019). Air pollution at human scales in an urban environment: Impact of local environment and vehicles on particle number concentrations. *The Science of the Total Environment*, 688, 691–700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.309>
- Vrekoussis, M., Richter, A., Hilboll, A., Burrows, J. P., Gerasopoulos, E., Lelieveld, J., Barrie, L., Zerefos, C., & Mihalopoulos, N. (2013). Economic crisis detected

- from space: Air quality observations over Athens/Greece. *Geophysical Research Letters*, 40(2), 458–463. <https://doi.org/10.1002/grl.50118>
- Wang, L., Lun, X., Wang, Q., & Wu, J. (2024). Biogenic volatile organic compounds emissions, atmospheric chemistry, and environmental implications: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(6), 3033–3058. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01785-5>
- Wilkes, H. (2020). *Hydrocarbons, Oils and Lipids: diversity, origin, chemistry and fate*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-90569-3>
- Wohl, C., Li, Q., Cuevas, C. A., Fernandez, R. P., Yang, M., Saiz-Lopez, A., & Simó, R. (2023). Marine biogenic emissions of benzene and toluene and their contribution to secondary organic aerosols over the polar oceans. *Science Advances*, 9(4), eadd9031. <https://doi.org/10.1126/sciadv.add9031>
- World Health Organization. (2000). *Air Quality Guidelines for Europe*. WHO Regional Office Europe.
- World Health Organization. Regional Office for Europe. (2020, December). *AirQ+: carcinogenic pollutants and risk analysis* (WHO/EURO:2020-1561-41312-56214). <https://iris.who.int/>
- Yang, K., Llusà, J., Preece, C., Tan, Y., & Peñuelas, J. (2024). Exchange of volatile organic compounds between the atmosphere and the soil. *Plant and Soil*, 501(1–2), 509–535. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06524-x>
- Zapata-Marin, S., Schmidt, A. M., Crouse, D., Ho, V., Labrèche, F., Lavigne, E., Parent, M., & Goldberg, M. S. (2022). Spatial modeling of ambient concentrations of volatile organic compounds in Montreal, Canada. *Environmental Epidemiology*, 6(5), e226. <https://doi.org/10.1097/ee9.0000000000000226>

- Zhao, D. F., Buchholz, A., Tillmann, R., Kleist, E., Wu, C., Rubach, F., Kiendler-Scharr, A., Rudich, Y., Wildt, J., & Mentel, T. F. (2017). Environmental conditions regulate the impact of plants on cloud formation. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms14067>
- Zhao, Y., Lv, J., Zhou, Y., An, J., & Zhu, B. (2022). The variability of volatile organic compounds during a persistent fog-haze episode. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1069905>
- Zuckerman, A. J. (1995). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. *Journal of Clinical Pathology*, 48(7), 691.1-691. <https://doi.org/10.1136/jcp.48.7.691-a>
- Αποστολάκη, Μ. (2008). ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗ ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΟΥΣ ΣΕ ΔΑΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΗΣ ΒΟΡΕΙΑΣ ΚΑΙ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ [Διδακτορική Διατριβή]. Πανεπιστήμιο Κρήτης.
- Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (2024). Εκπομπές ρύπων και κυκλοφοριακά πρότυπα στην Αθήνα: Ετήσια έκθεση 2024. Παρατηρητήριο Κινητικότητας Αθήνας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. <https://amob.ntua.gr/>
- Καρακίτσιος, Σ. (2008). Έκθεση πληθυσμιακών ομάδων στο βενζόλιο και παράγοντες που την διαμορφώνουν. <https://doi.org/10.12681/eadd/17507>
- ΚΥΑ 9238/332. (2004). Καθορισμός οριακών και κατευθυντήριων τιμών ποιότητας της ατμόσφαιρας σε βενζόλιο και μονοξείδιο του άνθρακα. Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, ΦΕΚ 405/Β/27-02-2004. Ανακτήθηκε από το Εθνικό Τυπογραφείο.
- ΚΥΑ Η.Π. 14122/549/Ε.103. (2011). Μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2008/50/ΕΚ.

Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, ΦΕΚ 488/Β/30-03-2011. Ανακτήθηκε από το Εθνικό Τυπογραφείο.

Λεβεντίδου, Ε. (2012). *Μελέτη του ύψους του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος πάνω από την Ελλάδα με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων* [Μεταπτυχιακή Διατριβή]. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Μοσχονάς, Ν. (1998). *ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΦΩΤΟΟΞΕΙΔΩΤΙΚΩΝ* [Διδακτορική Διατριβή].

<https://doi.org/10.12681/eadd/10159>

Παπαναστασίου, Δ. (2007). *Ατμοσφαιρική ρύπανση-Μετεωρολογία σε αστικό περιβάλλον υπό συνθήκες υψηλού υποβάθρου* [Διδακτορική Διατριβή]. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2025). Ετήσια έκθεση ποιότητας της ατμόσφαιρας 2024. <https://ypen.gov.gr/>