



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Σχολή Τεχνολογίας
Τμήμα Περιβάλλοντος
ΠΜΣ «Διαχείριση Περιβάλλοντος»



Συσχέτιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με μετεωρολογικές παραμέτρους στην πόλη της Λάρισας

Πηνελόπη Κοτρώτσιου

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Κ. Παπαναστασίου

Λάρισα, Ιούνιος 2025

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Δημήτριο Κ. Παπαναστασίου που με εμπιστεύτηκε αναθέτοντάς μου την εργασία αυτή αλλά και για την αδιάκοπη και αμέριστη καθοδήγηση και βοήθειά του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης και σύνταξής της.

Θερμές ευχαριστίες στο Τμήμα Μεθόδων Παρατήρησης και Ποιοτικού Ελέγχου Δεδομένων, της Διεύθυνσης Κλίματος, Περιβάλλοντος και Μετεωρολογικών Παρατηρήσεων, της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας για την παραχώρηση των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω, τέλος, την οικογένεια και τους φίλους μου, παλιούς και νέους, για τη συνεχή στήριξη και τη δύναμη που μου δίνουν να παλεύω για όλα όσα ονειρεύομαι.

Περίληψη

Η διπλωματική αυτή εργασία εξετάζει την επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων σε αστικό περιβάλλον. Στόχος της είναι η αποτίμηση της συσχέτισης μεταξύ των επιπέδων της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων PM10 με τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και τη βροχόπτωση, για δύο περιόδους του έτους: την ψυχρή περίοδο (Νοέμβριος – Μάρτιος) και τη θερμή περίοδο (Μάιος – Σεπτέμβριος), στην πόλη της Λάρισας τα έτη 2007 – 2023. Τα δεδομένα της συγκέντρωσης των PM10 αντλήθηκαν από το αρχείο του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας, ενώ τα μετεωρολογικά δεδομένα παραχωρήθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. Για την ανάλυση των δεδομένων κατασκευάστηκαν διαφόρων ειδών γραφήματα από τα οποία εξήχθησαν συμπεράσματα για τα επίπεδα της ρύπανσης και των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή για διάφορες χρονικές περιόδους. Για τη μελέτη των συσχετίσεων μεταξύ της συγκέντρωσης των PM10 και των μετεωρολογικών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής Spearman. Ειδικότερα, καταγράφηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις PM10 την ψυχρή περίοδο (μέση τιμή $\sim 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) σε σχέση με τη θερμή (μέση τιμή $\sim 29 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ενώ οι συσχετίσεις διαφοροποιούνταν ανά περίοδο, με χαρακτηριστική την αρνητική συσχέτιση με την ελάχιστη θερμοκρασία την ψυχρή ($\rho = -0,33$) και θετική τη θερμή περίοδο ($\rho = 0,56$). Για τη βροχόπτωση, υπολογίστηκε αρνητική συσχέτιση με τις συγκεντρώσεις των PM10 και στις δύο περιόδους ($\rho = -0,27$ την ψυχρή περίοδο, $\rho = -0,21$ τη θερμή περίοδο), αναδεικνύοντας τον ρόλο της στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Συσχετίσεις υπολογίστηκαν, επίσης, ανά ώρα για τα έτη 2017 – 2023, με το είδος, την τιμή και τη σημαντικότητα των συσχετίσεων να παρουσιάζουν μεταβολές κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ παρατηρήθηκε αύξηση της ισχύος τους τις βραδινές ώρες και για τις δύο περιόδους. Μέσω αυτής της μελέτης μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως οι μετεωρολογικές παράμετροι μπορούν να επηρεάσουν, σε έναν βαθμό, τις συγκεντρώσεις των ρύπων στην ατμόσφαιρα και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό πολιτικών για τη μείωση της και την προστασία της δημόσιας υγείας.

Λέξεις κλειδιά: ατμοσφαιρική ρύπανση, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, βροχή, PM10, συντελεστής συσχέτισης Spearman, Λάρισα

Abstract

This thesis examines the impact of meteorological parameters on air pollutant concentrations in an urban environment. Its aim is to assess the correlation between the concentrations of particulate matter (PM₁₀) and temperature, relative humidity, and precipitation during two periods of the year: the cold period (November – March) and the warm period (May – September), in the city of Larisa from 2007 to 2023. PM₁₀ concentration data were obtained from the archives of the Ministry of Environment and Energy, while the meteorological data were provided by the Hellenic National Meteorological Service. Various types of graphs were constructed for data analysis, from which conclusions were drawn regarding pollution levels and prevailing meteorological conditions in the area during different time periods. Spearman's rank correlation coefficient was used to study the correlations between PM₁₀ concentrations and the meteorological parameters. Specifically, higher PM₁₀ concentrations were recorded during the cold period (mean value ~40 µg/m³) compared to the warm period (mean value ~29 µg/m³), while the correlations varied between periods, with a notable negative correlation with minimum temperature during the cold period ($\rho = -0.33$) and a positive correlation during the warm period ($\rho = 0.56$). Regarding precipitation, a negative correlation with PM₁₀ concentrations was calculated in both periods ($\rho = -0.27$ during the cold period, $\rho = -0.21$ during the warm period), highlighting its role in reducing air pollution levels. Correlations were also calculated on an hourly basis for the years 2017 – 2023, with the type, value, and significance of the correlations varying throughout the day, while an increase in the strength of the correlations was observed during nighttime in both periods. This study concludes that meteorological parameters can influence, to a certain extent, air pollutant concentrations in the atmosphere and should be considered in the design of policies aimed at reducing pollution and protecting public health.

Keywords: air pollution, temperature, relative humidity, precipitation, PM₁₀, Spearman correlation coefficient, Larisa.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	2
Abstract.....	3
Κατάλογος Σχημάτων.....	6
Κατάλογος Εικόνων	7
Κατάλογος Πινάκων	8
Κατάλογος Συντομογραφιών	9
1. Εισαγωγή	10
2. Θεωρητική Εισαγωγή.....	12
2.1 Ατμοσφαιρική Ρύπανση	12
2.2 Ατμοσφαιρικοί Ρύποι	12
2.3 Πηγές Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης	13
2.4 Επιπτώσεις Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης.....	13
2.5 Αιωρούμενα Σωματίδια.....	14
2.6 Όρια Ποιότητας της Ατμόσφαιρας για τα ΑΣ	16
2.7 Μετεωρολογικές Παράμετροι.....	17
2.8 Επίδραση Μετεωρολογικών Παραμέτρων στην Ατμοσφαιρική Ρύπανση.....	18
2.8.1 Θερμοκρασία	18
2.8.2 Σχετική Υγρασία	19
2.8.3 Ταχύτητα Ανέμου	19
2.8.4 Διεύθυνση Ανέμου	20
2.8.5 Βροχή.....	20
3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	21
3.1 20 ^{ος} Αιώνας.....	21
3.2 21 ^{ος} Αιώνας.....	26
3.2.1 Αιωρούμενα Σωματίδια	26
3.2.2 Οξείδια του Θείου	28
3.2.4 Μονοξείδιο του Άνθρακα.....	31
3.2.5 Υδρογονάνθρακες	32
3.2.6 Όζον.....	33
3.3 Τελευταία Δεκαετία.....	35
3.3.1 Αιωρούμενα Σωματίδια	35
3.3.2 Οξείδια του Θείου	40
3.3.3 Οξείδια του Αζώτου.....	41
3.3.4 Μονοξείδιο του Άνθρακα.....	42
3.3.5 Υδρογονάνθρακες	44
3.3.6 Όζον.....	45

4. Δεδομένα και Μεθοδολογία	48
4.1 Πηγές Δεδομένων.....	48
4.1.1 Δεδομένα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης	48
4.1.2 Μετεωρολογικά Δεδομένα	48
4.2 Περιοχή Μελέτης.....	49
4.2.1 Γενικές Πληροφορίες και Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά	49
4.3.2 Χρήσεις Γης.....	49
4.3.3 Το Κλίμα της Λάρισας.....	51
4.4 Μεθοδολογία Επεξεργασίας Δεδομένων.....	53
4.4.1 Δεδομένα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης	53
4.4.2 Μετεωρολογικά Δεδομένα	55
4.4.3 Συσχετίσεις.....	56
4.4.4 Συντελεστής Συσχέτισης Spearman	57
5. Αποτελέσματα	58
5.1 Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης	58
5.1.1 Σύγκριση Συγκέντρωσης PM10 με Άλλες Πόλεις	66
5.2 Στατιστική Ανάλυση Μετεωρολογικών Δεδομένων.....	68
5.3 Συσχετισμός Αποτελεσμάτων.....	74
6. Συμπεράσματα	82
Βιβλιογραφία.....	84

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Ομβροθερμικό διάγραμμα για την πόλη της Λάρισας για την περίοδο 1955 – 2010 (ΕΜΥ).	52
Σχήμα 2: Διάγραμμα σχετικής υγρασίας ανά μήνα του έτους για την πόλη της Λάρισας για την περίοδο 1955 – 2010 (ΕΜΥ).	52
Σχήμα 3: Διάγραμμα πληρότητας δεδομένων και αριθμού υπερβάσεων ορίων ΕΕ και ΠΟΥ. Με οριζόντιες γραμμές σημειώνονται οι επιτρεπόμενες υπερβάσεις των ορίων, σύμφωνα με την οδηγία 2008/50/ΕΚ (μπλε οριζόντια γραμμή) και 2024/2881 (κυανή οριζόντια γραμμή). ...	59
Σχήμα 4: Διάγραμμα ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM ₁₀ για τα έτη 2007 – 2023. Με οριζόντιες γραμμές σημειώνονται τα όρια σύμφωνα με την οδηγία 2008/50/ΕΚ της ΕΕ (κόκκινη οριζόντια γραμμή) και την οδηγία 2024/2881 και τον ΠΟΥ (μαύρη οριζόντια γραμμή).	60
Σχήμα 4: Διάγραμμα ετήσιας μέσης συγκέντρωσης PM ₁₀ ανά έτος. Με κόκκινες οριζόντιες γραμμές σημειώνονται τα θεσμοθετημένα όρια των ΕΕ και ΠΟΥ. Η μωβ διακεκομμένη γραμμή δείχνει την τάση της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης μέσα στα έτη.	61
Σχήμα 6: Διάγραμμα μέσης συγκέντρωσης PM ₁₀ ανά ημέρα της εβδομάδας για την ψυχρή (μπλε ράβδοι) και τη θερμή περίοδο (πορτοκαλί ράβδοι) των ετών 2007 – 2023.	64
Σχήμα 7: Διάγραμμα μέσης συγκέντρωσης PM ₁₀ ανά ώρα της ημέρας την ψυχρή (μπλε ράβδοι) και τη θερμή περίοδο (πορτοκαλί ράβδοι) των ετών 2017 – 2023. Με οριζόντιες γραμμές σημειώνονται τα όρια σύμφωνα με την οδηγία 2008/50/ΕΚ της ΕΕ (κυανή οριζόντια γραμμή) και την οδηγία 2024/2881 και τον ΠΟΥ (κόκκινη οριζόντια γραμμή).	66
Σχήμα 8: Διάγραμμα ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης θερμοκρασίας για τα έτη 2007 – 2023.	69
Σχήμα 9: Διάγραμμα τάσης ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης θερμοκρασίας με τη χρήση γραμμικής παλινδρόμησης για τα έτη 2007 – 2023.	69
Σχήμα 10: Διάγραμμα ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης σχετικής υγρασίας για τα έτη 2007 – 2023.	70
Σχήμα 11: Διάγραμμα τάσης ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης σχετικής υγρασίας με τη χρήση γραμμικής παλινδρόμησης για τα έτη 2007 – 2023.	71
Σχήμα 12: Διάγραμμα συνολικής μηνιαίας βροχόπτωσης για τα έτη 2007 – 2023. Με μωβ διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται η τάση της βροχόπτωσης για τα έτη αυτά.	72

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Επιπτώσεις έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια ανάλογα με τη διάμετρό τους και οι αντίστοιχες πηγές τους (προσαρμοσμένη) (VFA Solutions).	15
Εικόνα 2: Χάρτης με τις τοποθεσίες του σταθμού μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης και του μετεωρολογικού σταθμού (Google Earth).....	49
Εικόνα 3: Γεωφυσικός χάρτης της περιφερειακής ενότητας Λάρισας. Στο κέντρο με κόκκινο σημειώνεται η πόλη της Λάρισας (Ιστοσελίδα «Δήμος Φαρσάλων»).	50
Εικόνα 4: Πολεοδομικός χάρτης Λάρισας (Δήμος Λαρισαίων).	50
Εικόνα 5: Χάρτης της Λάρισας (πάνω αριστερά), χάρτης Λάρισας με τις χρήσεις γης κατά Corine 2018 (πάνω δεξιά) και το υπόμνημα για τον χάρτη με τις χρήσεις γης (κάτω).	51

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Αποτελέσματα περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης για τις συγκεντρώσεις των PM10 την ψυχρή και τη θερμή περίοδο για τα έτη 2007-2023.	63
Πίνακας 2: Αποτελέσματα περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης για μετεωρολογικές παραμέτρους την ψυχρή περίοδο για τα έτη 2007-2023.....	73
Πίνακας 3: Αποτελέσματα περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης για μετεωρολογικές παραμέτρους τη θερμή περίοδο για τα έτη 2007-2023.....	73
Πίνακας 4: Συντελεστές συσχέτισης Spearman για τις συγκεντρώσεις των PM10 και μετεωρολογικών παραμέτρων κατά την ψυχρή περίοδο των ετών 2017-2023.	75
Πίνακας 5: Συντελεστές συσχέτισης Spearman για τις συγκεντρώσεις των PM10 και μετεωρολογικών παραμέτρων κατά τη θερμή περίοδο των ετών 2017-2023.....	77
Πίνακας 6: Συντελεστές συσχέτισης Spearman για τις συγκεντρώσεις των PM10, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας ανά ώρα κατά την ψυχρή περίοδο των ετών 2017-2023.	79
Πίνακας 7: Συντελεστές συσχέτισης Spearman για τις συγκεντρώσεις των PM10, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας ανά ώρα κατά τη θερμή περίοδο των ετών 2017-2023.	81

Κατάλογος Συντομογραφιών

ΑΣ	Αιωρούμενα Σωματίδια
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΜΥ	Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
ΚΥΑ	Κοινή Υπουργική Απόφαση
ΠΟΥ	Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας
ΥΠΕΝ	Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος
NMHCs	Non-Methane Hydrocarbons/Μη Μεθανικοί Υδρογονάνθρακες
PAHs	Polycyclic aromatic hydrocarbons/Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες
PM	Particulate Matter/Αιωρούμενα Σωματίδια
RH	Relative Humidity/Σχετική Υγρασία
RH avg	Μέση Σχετική Υγρασία
RH max	Μέγιστη Σχετική Υγρασία
RH min	Ελάχιστη Σχετική Υγρασία
T	Temperature/Θερμοκρασία
T avg	Μέση Θερμοκρασία
T max	Μέγιστη Θερμοκρασία
T min	Ελάχιστη Θερμοκρασία
UCAR	University Corporation for Atmospheric Research
VHCs	Volatile Hydrocarbons/Πτητικοί υδρογονάνθρακες

1. Εισαγωγή

Η βιομηχανική επανάσταση θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους σταθμούς της σύγχρονης ανθρώπινης ιστορίας. Η ευρεία χρήση των μηχανημάτων οδήγησε στην απαλλαγή των ανθρώπων από επίπονες και ζημιογόνες για την υγεία τους εργασίες. Είχε, ωστόσο, σαν αποτέλεσμα την πρόκληση σημαντικών επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης που στοίχισαν τη ζωή σε χιλιάδες πολιτών τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική. Ήδη από τα πρώτα έτη μετά την καταγραφή αυτών των επεισοδίων, επιστήμονες εξετάζουν πιθανή σύνδεση αυτών των συμβάντων με τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή εκείνη την περίοδο. Με την πάροδο των ετών οι έρευνες πληθαίνουν, καλύπτοντας όλο και περισσότερες περιοχές του κόσμου και οδηγώντας στην λήψη μέτρων για την αποφυγή σοβαρών επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης για την προστασία του περιβάλλοντος αλλά και της δημόσιας υγείας.

Αντίστοιχες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί και για πόλεις της Ελλάδας, κυρίως την Αθήνα και τη Θεσσαλονίκη. Βασικός στόχος της εργασίας είναι η μελέτη του τρόπου με τον οποίο επιδρούν οι μετεωρολογικές παράμετροι στη συγκέντρωση των PM₁₀ στην πόλη της Λάρισας, για δύο περιόδους, την ψυχρή, η οποία καλύπτει τους μήνες Νοέμβριο έως και Μάρτιο, και τη θερμή που αφορά τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο, των ετών 2017 – 2023. Μέσα από γραφήματα για τα δεδομένα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από το 2007 και έπειτα, στόχος είναι, αρχικά, η δημιουργία μιας ολοκληρωμένης εικόνας για την παρουσία του συγκεκριμένου ρύπου στην ατμόσφαιρα της πόλης. Για το ίδιο διάστημα γραφήματα κατασκευάστηκαν και για τα μετεωρολογικά δεδομένα για την εξαγωγή ορισμένων γενικών συμπερασμάτων για τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην πόλη ανά εποχή. Έπειτα, υπολογίστηκαν συντελεστές συσχέτισης της συγκέντρωσης των PM₁₀ με ορισμένες μετεωρολογικές παραμέτρους, ώστε να αναδειχθεί η σχέση που συνδέει τα μεγέθη.

Η παρούσα εργασία δομείται ως εξής:

- Θεωρητική εισαγωγή για την κατανόηση βασικών όρων που σχετίζονται με το θέμα και αναφέρονται συχνά εντός του κειμένου και παρουσίαση βασικών πληροφοριών που είναι απαραίτητες για την εξαγωγή των συμπερασμάτων
- Βιβλιογραφική ανασκόπηση για την καταγραφή και ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων αντίστοιχων δημοσιευμένων ερευνών, παλαιότερων αλλά και νεότερων, που θα βοηθήσουν στην εξαγωγή και τη σύγκριση των συμπερασμάτων με αυτά που προέκυψαν από την μελέτη αυτή
- Παρουσίαση πληροφοριών για τα δεδομένα, την περιοχή μελέτης και τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων

- Καταγραφή των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας των δεδομένων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, των μετεωρολογικών δεδομένων αλλά και των αποτελεσμάτων της συσχέτισης των εξεταζόμενων μεγεθών
- Σύνοψη των βασικών συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη αυτή και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2. Θεωρητική Εισαγωγή

2.1 Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένας από τους πιο σημαντικούς περιβαλλοντικούς κινδύνους που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα στις μέρες μας. Σύμφωνα με το ελληνικό Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) «ατμοσφαιρική ρύπανση καλείται, η παρουσία στην ατμόσφαιρα κάθε είδους ουσιών, σε συγκέντρωση ή διάρκεια που μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία, στους ζωντανούς οργανισμούς και στα οικοσυστήματα και γενικά να καταστήσουν το περιβάλλον ακατάλληλο για τις επιθυμητές χρήσεις του». Ο ορισμός αυτός έρχεται σε συμφωνία με τον αντίστοιχο του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (European Environmental Agency ή ΕΕΑ), ο οποίος, επίσης, λαμβάνει υπόψιν την επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία και ευημερία καθώς και την πιθανή πρόκληση περαιτέρω περιβαλλοντικών προβλημάτων.

2.2 Ατμοσφαιρικοί Ρύποι

Κατά τη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, γενικά, λαμβάνονται υπόψιν επτά βασικές ομάδες ρύπων (Γεντεκάκης, 2010) οι οποίες είναι:

- Ενώσεις που περιέχουν C
- Ενώσεις που περιέχουν N
- Ενώσεις που περιέχουν S
- Αλογονούχες ενώσεις
- Φωτοχημικά οξειδωτικά
- Σωματιδιακοί ρύποι, αερολύματα
- Επικίνδυνοι και τοξικοί ρύποι

Στις αστικές περιοχές, όπου ο πληθυσμός είναι ιδιαίτερα μεγάλο, δίνεται έμφαση τόσο στη ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα όσο και στην ποιότητα του αέρα σε εσωτερικούς και εργασιακούς χώρους. Οι πιο συχνοί και σημαντικοί ρύποι που επιβαρύνουν τον ατμοσφαιρικό αέρα στις πόλεις είναι: CO , SO_2 , NO_x , O_3 , πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds ή VOCs), στις οποίες περιλαμβάνονται και υδρογονάνθρακες διαφόρων κατηγοριών (π.χ. πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες) και διαφόρων μεγεθών αιωρούμενα σωματίδια (ΑΣ) (Particulate Matter, PM). Σε χώρους όπου ζουν και εργάζονται οι κάτοικοι των αστικών περιοχών εντοπίζονται ρύποι που υπάρχουν και στον ατμοσφαιρικό αέρα και, επιπλέον, ημι-πτητικές οργανικές ενώσεις (Semi-Volatile Organic Compounds ή SVOCs), μικροοργανισμοί και ραδόνιο (Leung, 2015; Kayes et al., 2019; Cohen et al., 2004; Mohtar et al., 2018; WHO, 2023).

Οι ρύποι που αναφέρθηκαν παρατηρούνται στην ατμόσφαιρα όλο τον χρόνο, ωστόσο, οι συγκεντρώσεις τους μεταβάλλονται ανάλογα με την ώρα της ημέρας και την εποχή. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται σε διάφορους παράγοντες όπως οι πηγές των ρύπων, οι μετεωρολογικές συνθήκες και άλλες διεργασίες που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα και τα χαρακτηριστικά της περιοχής (Sadheesh & Jeyanthi, 2023; Filonchik & Yan, 2018; Shelton et al., 2022).

2.3 Πηγές Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Οι πηγές των ατμοσφαιρικών ρύπων χωρίζονται σε φυσικές και ανθρωπογενείς, ανάλογα με το αν οι ρύποι παράγονται από φυσικές διεργασίες ή από ανθρώπινες δραστηριότητες, αντίστοιχα. Ορισμένες φυσικές διεργασίες, όπως η έκρηξη ηφαιστειών και οι πυρκαγιές που προκαλούνται από φυσικά αίτια, μπορούν να οδηγήσουν στην έκλυση μεγάλων ποσοτήτων επικίνδυνων ουσιών στην ατμόσφαιρα. Σημαντική, όμως, είναι και η επιβάρυνση της ατμόσφαιρας εξαιτίας ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων και η χρήση ορισμένων χημικών και τοξικών ουσιών, ειδικά στη βιομηχανία (Γεντεκάκης, 2010; National Institute of Environmental Health Sciences, 2025). Σε αστικά περιβάλλοντα οι ρύποι που παρατηρούνται σε μεγαλύτερο βαθμό είναι προϊόντα καύσης ορυκτών καυσίμων σε κινητήρες οχημάτων και κεντρικές θερμάνσεις (π.χ. PM, CO) και ουσιών που παράγονται δευτερογενώς από αυτούς μέσω χημικών και φωτοχημικών αντιδράσεων (π.χ. O₃).

2.4 Επιπτώσεις Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης δεν έχουν αποδέκτη μόνο το περιβάλλον, αλλά επηρεάζουν και διάφορες πτυχές της ζωής των ανθρώπων, άλλους ζωντανούς οργανισμούς και υποδομές. Είναι ευρέως γνωστό πως η συχνή έκθεση σε ατμοσφαιρική ρύπανση επιδρά αρνητικά στο ανοσοποιητικό σύστημα, επιδεινώνει τις αλλεργίες, οδηγεί σε πολλά καρδιολογικά, αναπνευστικά και δερματολογικά προβλήματα, ακόμα και προβλήματα στην ανάπτυξη και την γονιμότητα (Brunekreef & Holgate, 2002; Glencross et al., 2020; Bernstein et al., 2004; Kampa & Castanas, 2008; Nieuwenhuijsen et al., 2014; Puri et al., 2017). Πληθώρα ερευνών σε όλη την υφήλιο έχουν δείξει, επιπλέον, πως η ατμοσφαιρική ρύπανση επηρεάζει αρνητικά την ευημερία των ανθρώπων, προκαλεί άγχος, ανησυχία και δρα συνεπικουρικά στην εμφάνιση ή την ενίσχυση πνευματικών διαταραχών. Μπορεί, επίσης, να μειώσει την απόδοση στην εργασία, ενώ έχει συνδεθεί και με την εμφάνιση παραβατικής συμπεριφοράς στους ανθρώπους (Lu, 2020). Όσον αφορά τα φυτά, ορισμένοι ρύποι επηρεάζουν την ανάπτυξη κάποιων ειδών φυτών, ειδικά όταν αυτά βρίσκονται σε πρώιμα στάδια ανάπτυξης (Honour et al., 2009; Winner & Atkinson, 1986). Τέλος, με

τη βροχή και την απόπλυση των ατμοσφαιρικών ρύπων, κυρίως των SO_x , που αυτή προκαλεί, παρατηρούνται φθορές τόσο σε κτίρια όσο και σε μνημεία (Rabl, 1999; Tidblad et al., 2009; Natarajan et al., 2022).

2.5 Αιωρούμενα Σωματίδια

Αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter ή PM) είναι σωματίδια με ποικίλη σύσταση που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα σε υγρή ή στερεή φάση και έχουν διάμετρο μικρότερη των 10 μ m. Τα αιωρούμενα σωματίδια μπορούν να είναι πρωτογενή, δηλαδή να εκλύονται κατευθείαν από πηγές, ή δευτερογενή, να σχηματίζονται, δηλαδή στην ατμόσφαιρα μέσω πολύπλοκων φυσικών και χημικών διεργασιών (Vallius, 2005). Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορα κριτήρια, ένα από τα οποία είναι η διάμετρός τους. Δύο κατηγορίες (U.S. Environmental Protection Agency, 2024; European Environmental Agency) στις οποίες χωρίζονται ανάλογα με τη διάμετρό τους είναι:

- PM10: Εισπνεύσιμα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 10 μ m
- PM2.5: Λεπτόκοκκα, εισπνεύσιμα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 2,5 μ m

Τα τελευταία χρόνια, μεγάλο μέρος της έρευνας που σχετίζεται με τα αιωρούμενα σωματίδια αφορά τα «πολύ λεπτόκοκκα σωματίδια» (ultrafine particles), δηλαδή σωματίδια με διάμετρο μικρότερη των 0,1 μ m.

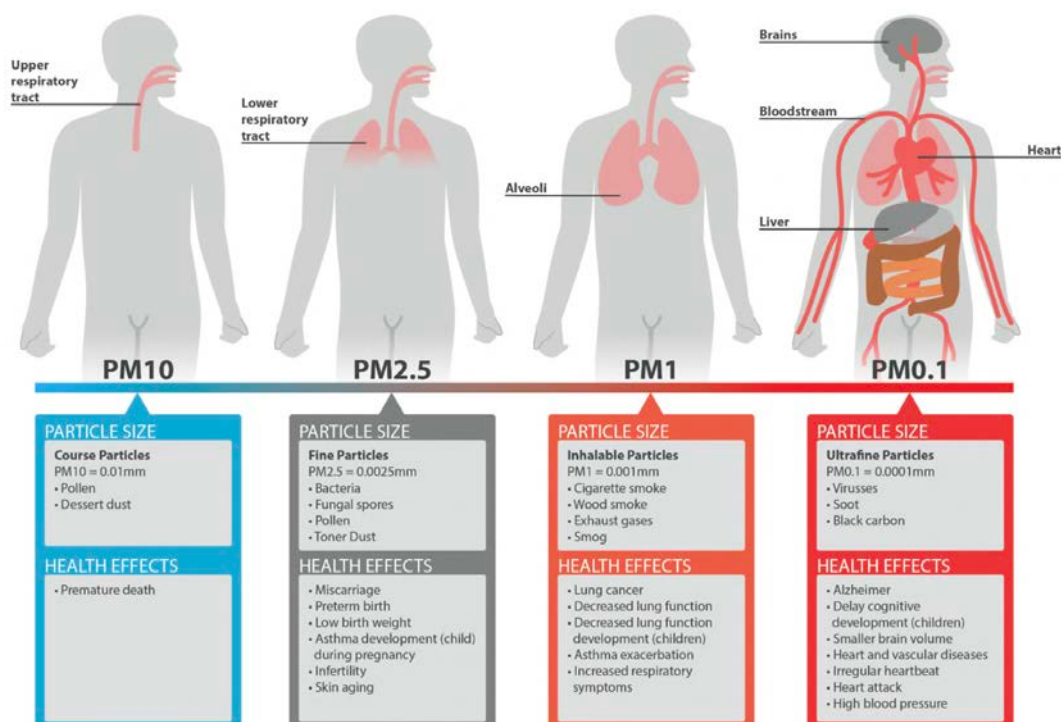
Το μέγεθος και η σύστασή τους μπορεί να μεταβληθεί λόγω συμπύκνωσης και εξάτμισης ατμών, συσσωμάτωσης με άλλα σωματίδια και χημικών αντιδράσεων. Λόγω του πολύ μικρού τους μεγέθους είναι σχεδόν αόρατα, αλλά σε περιπτώσεις που η συγκέντρωσή τους στην ατμόσφαιρα είναι υψηλή η παρουσία τους γίνεται αισθητή λόγω της μείωσης της ορατότητας (Vallius, 2005; Seinfeld & Pandis, 2016; American Lung Association, 2025).

Μια βασική ιδιότητα των αιωρούμενων σωματιδίων είναι πως μπορούν να αποτελέσουν πυρήνες συμπύκνωσης νεφών. Οι υδρατμοί επικάθονται στην επιφάνεια ορισμένων αιωρούμενων σωματιδίων, με διάμετρο που μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ κάποιων nm έως και κάποια μ m, και, υπό ορισμένες συνθήκες, μπορούν να συμπυκνωθούν και, έτσι, να σχηματιστούν νεφοσταγονίδια (Ahrens, 2018; Zhang et al., 2023).

Σημαντική είναι η συνεισφορά των αιωρούμενων σωματιδίων στη δημιουργία της «βιομηχανικής αιθαλομίχλης», ένα είδος ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλείται εξαιτίας καύσης κυρίως άνθρακα αλλά και υδρογονανθράκων σε στάσιμες πηγές (Zhang et al., 2015; Hu & Jiang, 2013; Zhou et al., 2015).

Η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια, και η είσοδός τους στον ανθρώπινο οργανισμό συνδέονται με μια πληθώρα προβλημάτων υγείας, η σοβαρότητα των οποίων αυξάνεται όσο μειώνεται η διάμετρος τους. Τα μεγαλύτερα σωματίδια

προκαλούν ενοχλήσεις στο ανώτερο αναπνευστικό καθώς και αλλεργικές αντιδράσεις, ενώ τα μικρότερα, τα οποία δεν μπορούν να συγκρατηθούν από τους αμυντικούς μηχανισμούς του ανώτερου αναπνευστικού συστήματος, μπορούν να προσβάλουν συστήματα όπως το καρδιαγγειακό και το κατώτερο αναπνευστικό και είναι πιθανό να εισέλθουν ακόμα και στο αίμα (Russell & Brunekreef, 2009; Kamra et al., 2008; U.S. Environmental Protection Agency; Land, Air, Water Aotearoa). Σημαντικές είναι, επίσης, οι επιπτώσεις της έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια στο δέρμα όπως και στο ενδοκρινικό, νευρικό, αναπαραγωγικό και ανοσοποιητικό σύστημα (Εικόνα 1) (Puri et al., 2017; American Lung Association; Glencross et al., 2020; VFA Solutions). Η σοβαρότητα των προβλημάτων εξαρτάται από τη διάρκεια της έκθεσης των ανθρώπων στα αιωρούμενα σωματίδια, τη συγκέντρωση αλλά και τη σύσταση των σωματιδίων. Ιδιαίτερα ευάλωτες θεωρούνται ορισμένες ομάδες όπως οι έγκυοι, τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι, οι άνθρωποι με χρόνια νοσήματα, οι παχύσαρκοι και οι καπνιστές (American Lung Association).



Εικόνα 1: Επιπτώσεις έκθεσης σε αιωρούμενα σωματίδια ανάλογα με τη διάμετρό τους και οι αντίστοιχες πηγές τους (προσαρμοσμένη) (VFA Solutions).

Σημαντικές είναι οι επιπτώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων στη λειτουργία των οικοσυστημάτων και στη διατήρηση της βιοποικιλότητάς τους, καθώς, λόγω ξηρής και υγρής απόθεσης, καταλήγουν, μέσω του εδάφους, στις ρίζες αλλά και στα φυλλώδη μέρη των φυτών. Έπειτα, αυτά προσλαμβάνονται από τα φυτά κατά τη διάρκεια φυσικών διεργασιών, όπως η φωτοσύνθεση και, λόγω της χημικής τους σύστασης, ενδέχεται να προκαλέσουν προβλήματα στη λειτουργία του φυτού (Grantz et al., 2003).

Μεγάλο ποσοστό των αιωρούμενων σωματιδίων που εκλύονται στην ατμόσφαιρα προέρχονται από φυσικές πηγές, όπως τα ηφαίστεια, το έδαφος, οι έρημοι, τα πετρώματα, η θάλασσα, τα φυτά κ.ά. (Lazaridis et al., 2002). Σε αστικά, όμως, περιβάλλοντα η υψηλή συγκέντρωση οφείλονται κυρίως σε καύσεις, π.χ. σε κεντρικές θερμάνσεις και κινητήρες εσωτερικής καύσης και κατασκευές. Ανάλογα και με την τοποθεσία της πόλης μπορεί να εντοπιστούν σωματίδια που προέρχονται από βιομηχανική δραστηριότητα ή αγροτική εκμετάλλευση της γης (Vallius, 2005).

2.6 Όρια Ποιότητας της Ατμόσφαιρας για τα ΑΣ

Οι σοβαρές επιπτώσεις που προκαλεί η έκθεση των ανθρώπων σε υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων έχουν οδηγήσει κυβερνήσεις χωρών σε όλο τον κόσμο να λάβουν μέτρα για τον περιορισμό της ποσότητάς τους στην ατμόσφαιρα. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) έχει δώσει κατευθυντήριες γραμμές για τους πιο σημαντικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους, μεταξύ των οποίων είναι και τα αιωρούμενα σωματίδια.

Τα όρια που έχει θέσει ο ΠΟΥ είναι διαφορετικά για τα PM₁₀, PM_{2.5} και τα πολύ λεπτόκοκκα σωματίδια, ενώ τα όρια αυτά διαφέρουν για κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες ανάλογα με τη διάρκεια της έκθεσης των ανθρώπων σε αυτά. Σύμφωνα με τον ΠΟΥ, κατά τη διάρκεια 24 ωρών ένας άνθρωπος δεν θα πρέπει να εκτίθεται σε συγκέντρωση PM₁₀ μεγαλύτερη των 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Το αντίστοιχο όριο που προτείνεται για τα PM_{2.5} είναι 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Για τα πολύ λεπτόκοκκα σωματίδια, υπάρχει συμφωνία στη βιβλιογραφία πως 1000 σωματίδια/ cm^3 και 10000 σωματίδια/ cm^3 είναι, αντίστοιχα, μια χαμηλή και μια υψηλή συγκέντρωση για διάστημα 24 ωρών. Οι μέσες ετήσιες οριακές τιμές για τα PM₁₀ είναι 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και για τα PM_{2.5} 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO, 2021).

Για τις περισσότερες χώρες-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), η οδηγία που είναι σε ισχύ για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα είναι η 2008/50/ΕΚ, η οποία συντάχθηκε τον Μάιο του 2008. Η οδηγία αυτή προβλέπει πως το όριο της ημερήσιας μέσης τιμής της συγκέντρωσης των PM₁₀ στην ατμόσφαιρα είναι τα 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, τιμή κατά 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ανώτερη από αυτή που προτείνει ο ΠΟΥ. Σημειώνεται, επίσης, πως δεν θα πρέπει να υπερβαίνεται η τιμή αυτή περισσότερες από 35 φορές ανά ημερολογιακό έτος. Το ετήσιο όριο, δηλαδή ο μέσος όρος των μετρήσεων, σύμφωνα με την ίδια οδηγία, δεν πρέπει να ξεπερνά τα 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Όσον αφορά τα PM_{2.5} η οδηγία αυτή θεσπίζει όριο μόνο για την μέση ετήσια τιμή, η οποία διαμορφώνεται σε 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ μεγαλύτερη της αντίστοιχης που έχει προταθεί από τον ΠΟΥ. Επίσης, τίθεται ένας προαιρετικός στόχος στα 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, τιμή που και πάλι ξεπερνά την τιμή που προτείνεται από τον ΠΟΥ. Για τα πολύ λεπτόκοκκα σωματίδια δεν γίνεται κάποια αναφορά στη συγκεκριμένη οδηγία (UNION, 2008).

Στην Ελλάδα η παραπάνω Ευρωπαϊκή Οδηγία έχει ενσωματωθεί στην Ελληνική Νομοθεσία με την Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) 14122/549/Ε.103 (ΦΕΚ 488 Β'/30-3-2011) (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2011).

Τον Οκτώβριο του 2024 ψηφίστηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο νέα οδηγία (2024/2881) σχετικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα στις χώρες της ΕΕ, η οποία τέθηκε σε ισχύ στις 10 Δεκεμβρίου του ίδιου έτους. Τα όρια που τίθενται για όλους τους ρύπους είναι πιο αυστηρά, σε μια προσπάθεια να εναρμονιστούν με τις συστάσεις του ΠΟΥ. Το νέο όριο για την ημερήσια έκθεση σε PM₁₀ διαμορφώνεται σε 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και δεν θα πρέπει να υπερβαίνεται πάνω από 18 φορές κατά τη διάρκεια ενός έτους. Ο ετήσιος μέσος όρος τιμών συγκέντρωσης των PM₁₀ δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Για τα PM_{2.5} ορίζεται για πρώτη φορά όριο για την ημερήσια μέση τιμή συγκέντρωσης στα 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, που δεν θα πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερες από 18 φορές τον χρόνο. Η μέση ετήσια οριακή τιμή για αυτή την ομάδα ρύπων διαμορφώνεται σε 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Τα κράτη-μέλη οφείλουν να ενσωματώσουν τα νέα όρια στη νομοθεσία τους έως τον Δεκέμβριο του 2026 και να λάβουν τα απαραίτητα μέτρα ώστε να επιτύχουν τους στόχους αυτούς έως την 1^η Ιανουαρίου 2030 (European Parliament & Council of the European Union, 2024). Στην Ελλάδα, προς το παρόν, δεν έχει επικαιροποιηθεί η νομοθεσία με την έκδοση της αντίστοιχης ΚΥΑ.

2.7 Μετεωρολογικές Παράμετροι

Με τη μελέτη της ατμόσφαιρας και των φαινομένων που παρατηρούνται σε αυτή ασχολείται η μετεωρολογία. Η μελέτη των ατμοσφαιρικών φαινομένων γίνεται με τη βοήθεια φυσικών μεγεθών που ονομάζονται μετεωρολογικές παράμετροι. Κάποιες από αυτές, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, έχουν σημαντική επίδραση στην ατμοσφαιρική ρύπανση και συγκεκριμένα είναι:

- Η θερμοκρασία (Temperature, T): πρόκειται για ένα μέτρο του πόσο ψυχρός ή θερμός είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας και η τιμή της είναι ένα μέτρο της μέσης ταχύτητας ή κίνησης των ατόμων και των μορίων της ατμόσφαιρας. Η μονάδα μέτρησής της μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την περιοχή και τον σκοπό για τον οποίο γίνεται η μέτρηση ($^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$ ή K) (Ahrens, 2018).
- Η σχετική υγρασία (Relative Humidity, RH): είναι ο λόγος (ή το επί τοις εκατό ποσοστό) της μάζας των υδρατμών που περιέχονται σε συγκεκριμένο όγκο αέρα σε ορισμένη στιγμή προς την μάζα των υδρατμών που θα έπρεπε να περιέχει ο ίδιος όγκος αέρα αν ήταν κορεσμένος, υπό την ίδια θερμοκρασία και πίεση (Ahrens, 2018).
- Η ταχύτητα του ανέμου (WS): ο όρος αυτός αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία γίνεται η κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα στην οριζόντια διεύθυνση

λόγω χωρικής διαφοροποίησης της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η τιμή της επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους, π.χ. το ύψος, την τραχύτητα του εδάφους κ.ά.. Οι πιο κοινές μονάδες μέτρησής της είναι: knots (κόμβοι), m/s, km/h, mi/h (Ahrens, 2018; Στάθης, 2016; Μελάς et al., 2016; Ζιακόπουλος & Φραγκούλη, 2011).

- Η διεύθυνση του ανέμου (WD): είναι η διεύθυνση από την οποία πνέει ο άνεμος. Μετριέται σε μοίρες, από 0° έως 359° (Δαλέζιος, 2016).
- Η βροχή: Στη μετεωρολογία, βροχή ονομάζεται η πτώση σταγόνων νερού με διάμετρο ίση ή μεγαλύτερη των 0,5mm (Ahrens, 2018).

2.8 Επίδραση Μετεωρολογικών Παραμέτρων στην Ατμοσφαιρική Ρύπανση

2.8.1 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία είναι μια μετεωρολογική παράμετρος που επηρεάζει την ατμοσφαιρική ρύπανση με ποικίλους τρόπους. Κατά τη διάρκεια των θερμών μηνών του έτους καταγράφονται έντονα φαινόμενα ξηρασίας αλλά και μεγάλες δασικές πυρκαγιές, με αποτέλεσμα την μεγάλη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ρύπους, κυρίως σωματιδιακούς αλλά και αέριους (π.χ. CO). Παράλληλα, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, η διάσπαση και αποσύνθεση των απορριμμάτων είναι ταχύτερη και οι ενεργειακές απαιτήσεις των κτιρίων αυξάνονται, με αποτέλεσμα την εκπομπή ατμοσφαιρικών ρύπων. Για το σχηματισμό πολλών δευτερογενών ρύπων, επίσης, όπως το τροποσφαιρικό O₃, απαιτείται η παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας η οποία είναι πιο έντονη τους θερμούς μήνες και δρα καταλυτικά στην πραγματοποίηση αυτών των αντιδράσεων (World Resources Institute; University Corporation for Atmospheric Research (UCAR); Meersens; Czarnecka & Nidzgorska-Lencewicz, 2011; Papanastasiou et al., 2015).

Κατά τις ψυχρές μέρες του έτους, αντίθετα, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του ατμοσφαιρικού αέρα, το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα, μέσα στο οποίο εκπέμπονται και διαχέονται οι ρύποι γίνεται πιο χαμηλό, με αποτέλεσμα οι συγκεντρώσεις των ρύπων κοντά στο έδαφος να αυξάνονται. Την περίοδο αυτή αυξάνονται και οι πηγές της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, λόγω της λειτουργίας των κεντρικών θερμάνσεων των κατοικιών (UCAR; Meersens; Nidzgorska-Lencewicz & Czarnecka, 2015; Bilal et al., 2021).

2.8.2 Σχετική Υγρασία

Λόγω της αρνητικής της συσχέτισης με τη θερμοκρασία, η σχετική υγρασία είναι ένα μέγεθος που επηρεάζει τη διασπορά και τον σχηματισμό πολλών δευτερογενών ρύπων. Η σχέση μεταξύ συγκεντρώσεων των ρύπων στην ατμόσφαιρα και σχετικής υγρασίας δεν είναι ξεκάθαρη, αλλά εξαρτάται από το ποσοστό της υγρασίας, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των ρύπων. Το O_3 παρουσιάζει, για παράδειγμα, μείωση στη συγκέντρωσή του όταν τα επίπεδα υγρασίας είναι υψηλά, καθώς η χημική αντίδραση μέσω της οποίας παράγεται επιβραδύνεται όταν ελαττώνεται η θερμοκρασία (Παπαναστασίου, 2007; Elminir, 2005; Sánchez-Ccoyllo & de Fatima Andrade, 2002).

Σε ό,τι αφορά τα αιωρούμενα σωματίδια, η μάζα και η συγκέντρωσή τους παρουσιάζουν, γενικά, θετική συσχέτιση με τη σχετική υγρασία. Ο υγρός αέρας δεν επιτρέπει τη διασπορά τους, καθώς αυτά συσσωματώνονται με τους υδρατμούς και συγκρατούνται κοντά στο έδαφος (Elminir, 2005; Tao et al., 2015; Bai et al., 2019; Zhang et al., 2023). Σε πολλές περιπτώσεις, επίσης, υψηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας ευνοούν τον σχηματισμό ορισμένων δευτερογενών αερολυμάτων, οδηγώντας σε αύξηση της συγκέντρωσης των PM στην ατμόσφαιρα (Yu et al., 2011; Xu et al., 2021; Ding et al., 2021; Wang et al., 2019). Ωστόσο, αν το ποσοστό της σχετικής υγρασίας είναι πολύ υψηλό, μπορεί να παρατηρηθεί και μείωση στη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων λόγω απόθεσής τους στο έδαφος (Sánchez-Ccoyllo & de Fatima Andrade, 2002; Barmpadimos et al., 2011).

2.8.3 Ταχύτητα Ανέμου

Η διασπορά των ρύπων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα του ανέμου. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου τόσο πιο μικρές είναι οι συγκεντρώσεις των ρύπων που καταγράφονται, καθώς ευνοείται η οριζόντια μεταφορά τους στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα την αραίωσή τους (Παπαναστασίου, 2007; Elminir, 2005; Zhang et al., 2023; Liu et al., 2020; He et al., 2017; Liu et al., 2021). Εξάιρεση αποτελεί το O_3 , το οποίο παρουσιάζει θετική συσχέτιση με την ταχύτητα του ανέμου (Liu et al., 2020; He et al., 2017). Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως, υπό υψηλές ταχύτητες ανέμου, οι ρύποι που συμμετέχουν στις διεργασίες καταστροφής του O_3 παρασύρονται από τον άνεμο οδηγώντας σε αύξηση της συγκέντρωσής του. Αντίστροφα, σε περιοχές όπου δεν υπάρχει δραστηριότητα που οδηγεί σε εκπομπή ουσιών απαραίτητων για τον σχηματισμό του O_3 , μπορεί να παρατηρηθεί αυξημένη συγκέντρωση του ρύπου εξαιτίας μεταφοράς των πρωτογενών ρύπων σε αυτές. Επιπρόσθετα, σε περιοχές κοντά σε ερήμους ή περιοχές που απουσιάζει η βλάστηση, όταν επικρατούν μεγάλης ταχύτητας άνεμοι, ειδικά κατά τις θερμές και άνυδρες περιόδους του έτους, είναι

δυνατόν να παρουσιαστεί αύξηση των αιωρούμενων σωματιδίων, λόγω της διάβρωσης της σκόνης του εδάφους (Liu et al., 2020; Mues et al., 2012).

2.8.4 Διεύθυνση Ανέμου

Η διεύθυνση του ανέμου σχετίζεται άμεσα με τη χωρική κατανομή των ρύπων. Όπως προαναφέρθηκε, η διασπορά των ρύπων οφείλεται στον άνεμο και η διεύθυνση του ανέμου καθορίζει την κατεύθυνση προς την οποία θα κινηθούν οι ρύποι. Περιοδικές μεταβολές στις συγκεντρώσεις ρύπων συχνά σχετίζονται με αντίστοιχες περιοδικές αλλαγές στη διεύθυνση του ανέμου στην περιοχή. Επιπλέον, η παρουσία ρύπων σε περιοχές όπου δεν δικαιολογείται από την ανθρώπινη δραστηριότητα ή την τοπογραφία, μπορεί επίσης να συνδέεται με συγκεκριμένες κατευθύνσεις ανέμου (Kayes et al., 2019; Mohtar et al., 2018; Sánchez-Ccoyllo & de Fatima Andrade, 2002; Radzka, 2020; Li et al., 2015).

2.8.5 Βροχή

Βασικός παράγοντας της μείωσης των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων είναι η βροχή, καθώς οδηγεί στην υγρή απόθεσή τους, έναν πολύ αποτελεσματικό φυσικό τρόπο απομάκρυνσης ρύπων από την ατμόσφαιρα (Barnpadimos et al., 2011; Liu et al., 2020; Mues et al., 2012; Akyüz & Çabuk, 2009). Σε περίπτωση υετού οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορούν είτε να σαρωθούν από την βροχή ή το χιόνι (απόπλυση) είτε να προσληφθούν σε προηγούμενο στάδιο από τα σταγονίδια που θα δημιουργήσουν το νέφος, τα οποία, έπειτα, ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας σταγόνες βροχής (βροχόπλυση ή χιονόπλυση). Επίσης, η απουσία ηλιακής ακτινοβολίας, λόγω νεφοκάλυψης, επιφέρει την αναστολή της πραγματοποίησης χημικών αντιδράσεων που οδηγούν στην παραγωγή δευτερογενών ρύπων, όπως το O_3 (Elminir, 2005; He et al., 2017; Karagiannidis et al., 2015).

3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

3.1 20^{ος} Αιώνας

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί διαχρονικά ένα αντικείμενο έρευνας για πολλούς επιστημονικούς κλάδους, καθώς πρόκειται για ένα παγκόσμιο πρόβλημα που επηρεάζει τόσο βιοτικούς όσο και αβιοτικούς παράγοντες του περιβάλλοντος. Μετά την έναρξη της βιομηχανικής επανάστασης και των σοβαρών επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης που ακολούθησαν, όπως τα “Donora Smog” και “London Smog” που συνέβησαν στη Ντονόρα της Πενσυλβάνια τον Οκτώβριο του 1948 και στο Λονδίνο τον Δεκέμβριο του 1952, αντίστοιχα, κατέστη σαφές πως είναι ανάγκη να μελετηθούν οι συνθήκες υπό τις οποίες έλαβαν χώρα αυτά τα επεισόδια ώστε να ληφθούν μέτρα για να αποφευχθούν αντίστοιχες καταστάσεις στο μέλλον. Μάλιστα, το επεισόδιο ατμοσφαιρικής ρύπανσης στις Ηνωμένες Πολιτείες αποτέλεσε την αφορμή για την ψήφιση νομοθεσίας το 1955 για τη χρηματοδότηση της έρευνας για την ατμοσφαιρική ρύπανση, ενώ 8 χρόνια αργότερα προστέθηκαν μέτρα για τον περιορισμό της. Το 1970 η νομοθεσία βελτιώθηκε σημαντικά, καθώς απέδιδε ευθύνες στην κυβέρνηση σε περίπτωση έκθεσης των ανθρώπων σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων. Ταυτόχρονα, ιδρύεται και η Environmental Protection Agency, η οποία είναι αρμόδια για την εφαρμογή της νομοθεσίας, που έφερε τον τίτλο “Clean Air Act”. Η νομοθεσία αυτή επικαιροποιούνται συχνά και το 1990 προστέθηκαν στοχευμένα μέτρα για την αντιμετώπιση της όξινης βροχής και της μείωσης της στιβάδας του O_3 , την εκπομπή τοξικών αερίων αλλά και την ατμοσφαιρική ρύπανση σε αστικά περιβάλλοντα. Η εφαρμογή του “Clean Air Act” είχε αξιοσημείωτα αποτελέσματα στην ποιότητα του αέρα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και, κατ’ επέκταση, στην ποιότητα ζωής των κατοίκων της (Ahlers, 2015; Chay & Greenstone, 2003; Ross et al., 2012).

Ήδη από το 1950, μελέτες σχετικά με το “Donora Smog” συσχετίζουν τα υψηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης που επικράτησαν τότε, μεταξύ άλλων, και με τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή (Parry, 1950; Townsend, 1950). Τον Ιανουάριο του 1954, περίπου έναν χρόνο μετά το σοβαρό επεισόδιο του Λονδίνου, δημοσιεύεται έρευνα στην οποία γίνεται μελέτη για το είδος των ρύπων που υπήρχαν στην ατμόσφαιρα του Λονδίνου κατά τη διάρκεια του “London Smog”, ενώ γίνεται αναφορά και στις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν τότε στην περιοχή, δίνοντας το έναυσμα για προσπάθεια συσχέτισης των μετεωρολογικών παραμέτρων με την ατμοσφαιρική ρύπανση (Wilkins, 1954). Τα ακόλουθα έτη ολοένα και περισσότερες έρευνες εξετάζουν τη σύνδεση των μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία, με την

ατμοσφαιρική ρύπανση με αφορμή αυτά τα επεισόδια (Absalom, 1954; Baynton, 1956; Gore & Shaddick, 1958; Hewson, 1956; Waller & Lawther, 1957).

Τη δεκαετία του 1960, οι έρευνες που μελετούν τη σύνδεση της ποιότητας του αέρα και των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν πληθαίνουν, με πολλές από αυτές να επικεντρώνονται σε αστικά περιβάλλοντα (Neiburger, 1969; Panofsky & Prasad, 1967; Shenfeld, 1970; Turner, 1961). Οι ρύποι τους οποίους καταγράφουν και εξετάζουν είναι, κυρίως, τα αιωρούμενα σωματίδια, ενώσεις του C , τα SO_x και τα NO_x , που δημιουργούσαν και το μεγαλύτερο πρόβλημα εκείνη την εποχή, οπότε τα καύσιμα που χρησιμοποιούνταν ευρέως ήταν το ξύλο και μη αποθειωμένα κλάσματα του αργού πετρελαίου (Fenger, 2009; Lefohn et al., 1999; Melsted & Pallua, 2018; Rafaj et al., 2015; Smith et al., 2004).

Ταυτόχρονα, πολλοί επιστήμονες εκφράζουν ενδιαφέρον, μέσω των ερευνών τους, για την έντονη ατμοσφαιρική ρύπανση που καταγράφεται στην πόλη του Λος Άντζελες. Σε πολλές από αυτές αναφέρεται πως κύριος παράγοντας που οδηγεί στον σχηματισμό του νέφους στην περιοχή είναι οι μετεωρολογικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, συσχετίζουν την παρουσία φωτοχημικού νέφους με την απουσία ανέμου καθώς και με τη θερμοκρασία. Οι μελετητές επικεντρώνονται στο βασικό συστατικό του νέφους, το O_3 , και το πώς αυτό παράγεται μέσω χημικών διεργασιών από πρωτογενείς ρύπους που εκπέμπονται, κυρίως, από κινητές πηγές, όπως τα αυτοκίνητα αλλά και από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Daugherty, 1960; Haagen-Smit, 1950; Haagen-Smit, 1954; Robinson, 1952; Senn, 1948).

Καθ' όλη τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα οι έρευνες για την ατμοσφαιρική ρύπανση συνεχίζονται με την εξειδίκευση να αυξάνεται. Οι μελέτες πλέον επικεντρώνονται σε έναν ή δύο ρύπους κάθε φορά και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τους, και συγκεκριμένα, τα αιωρούμενα σωματίδια (Cheng & Lam, 1998; Cuhadaroglu & Demirci, 1997; Kushlevsky et al., 1983; Trindade et al., 1980), τα οξείδια του θείου (Cuhadaroglu & Demirci, 1997; Henmi & Bresch 1985; Raynor et al., 1974), τα οξείδια του αζώτου (Delaney & Dowding, 1998; Holmen et al., 1997; Shahgedanova et al., 1999), αέριους ρύπους που περιέχουν άνθρακα, όπως το CO (Comrie & Diem, 1999; Poulida et al., 1991; Shahgedanova et al., 1999) και οι υδρογονάνθρακες (Kamens et al., 1988; Lindskog & Moldanova, 1994; Rappenglück et al., 1998; Rappenglück & Fabian, 1999; Viras & Siskos, 1993), αλλά και το O_3 (Holmen et al., 1997; Liu et al., 1994; Mukammal et al., 1982; Xu & Zhu, 1994). Κάποιες έρευνες, επίσης, τόσο στο εξωτερικό όσο και στην Ελλάδα, εξετάζουν τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης συναρτήσει των μετεωρολογικών παραμέτρων αποκλειστικά σε αστικές περιοχές, και σπανιότερα, σε ημιαστικές ή αγροτικές (Cuhadaroglu & Demirci, 1997; Kassomenos et al., 1995; Katsoulis, 1996; Raynor et al., 1974; Sjödin et al., 1994). Σε αυτές τις έρευνες μελετώνται οι συγκεντρώσεις πολλών ρύπων σαν συνάρτηση των μετεωρολογικών παραμέτρων, λαμβάνοντας υπόψη και χαρακτηριστικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, τις πηγές της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αλλά και την τοπογραφία της. Παράλληλα, ιδιαίτερα προς το τέλος του 20^{ου} αιώνα, γίνονται

προσπάθειες για την ανάπτυξη μοντέλων που θα έχουν ως στόχο την πρόβλεψη των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης με βάση τις μετεωρολογικές παραμέτρους, αναδεικνύοντας για άλλη μια φορά τη σημασία τους στην ποιότητα του αέρα (Aron & Aron, 1978; Clark & Karl, 1982; Lam & Cheng, 1998; Sanchez et al., 1990; Yi & Prybutok, 1996; Ziomas et al., 1995).

Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν οι μελέτες αυτής της περιόδου είναι πως οι μετεωρολογικές συνθήκες επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις των ρυπαντών με διάφορους τρόπους. Αρχικά, η παρουσία ορισμένων δευτερογενών ρύπων στην ατμόσφαιρα προϋποθέτει συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες που καταλύουν τις αντιδράσεις σχηματισμού τους, ενώ, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, υπάρχουν αλλαγές στις πηγές των ρύπων. Επίσης, η διασπορά των ρύπων εξαρτάται σημαντικά από τον άνεμο αλλά και, γενικότερα, από μετεωρολογικές παραμέτρους, και για αυτό τον λόγο αυτές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τη δημιουργία βιομηχανιών, μονάδων ηλεκτροπαραγωγής αλλά και κατά τη χωροθέτηση οικισμών, γεωργικών εκτάσεων και έργων υποδομής και κοινής ωφέλειας (Neiburger, 1969; Panofsky & Prasad, 1967; Robinson, 1952; Turner, 1961; Xu & Zhu, 1994).

Μέσα από τις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα προκύπτουν αρκετά συμπεράσματα για τον τρόπο με τον οποίο συσχετίζονται η συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων και οι μετεωρολογικές παράμετροι. Αρχικά, παρατηρείται θετική συσχέτιση της σχετικής υγρασίας με τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση της. Κατά τις ημέρες με βροχή, επίσης, λόγω υγρής απόθεσης, τα αιωρούμενα σωματίδια συσσωματώνονται και παρασύρονται από τις σταγόνες της βροχής, με αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσής τους στην ατμόσφαιρα. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, μπορεί να εξηγηθεί και το γεγονός πως τον χειμώνα και το φθινόπωρο καταγράφεται η υψηλότερη συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, ενώ το καλοκαίρι και την άνοιξη, οπότε η θερμοκρασία αυξάνεται και η υγρασία μειώνεται, η συγκέντρωση είναι μικρότερη. Όσον αφορά τον άνεμο, ανάλογα με τη διεύθυνσή του και την ταχύτητά του μπορεί να επηρεάσει με διαφορετικό τρόπο τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων. Αν και, γενικά, μεγάλη ταχύτητα ανέμου επιφέρει διασπορά των ρύπων και, άρα, μικρότερες συγκεντρώσεις, στην περίπτωση που ο άνεμος πνέει από διεύθυνση τέτοια ώστε να παρασύρει σωματίδια από πηγές, όπως βιομηχανίες ή αμμώδεις περιοχές χωρίς βλάστηση, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί αυξημένη συγκέντρωση (Cheng & Lam, 1998; Cuhadaroglu & Demirci, 1997; Kushlevsky et al., 1983; Trindade et al., 1980).

Αρκετές ομοιότητες παρουσιάζουν τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από έρευνες που επικεντρώνονται στη σχέση της συγκέντρωσης των SO_x με τις μετεωρολογικές παραμέτρους. Γενικά, παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσής τους με αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, εξαιρουμένων των περιπτώσεων που ο άνεμος πνέει από περιοχή που υπάρχουν σημαντικές πηγές τους, όπως βιομηχανίες, μονάδες παραγωγής ενέργειας αλλά και οχήματα. Η συσχέτιση με τη θερμοκρασία δεν είναι

ξεκάθαρη, αλλά, γενικά, παρατηρείται υψηλότερη συγκέντρωση SO_x κατά τους χειμερινούς μήνες, όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη. Η συγκέντρωση των SO_x δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη σχετική υγρασία, ενώ σε περιπτώσεις βροχής η συγκέντρωσή τους μειώνεται (Cuhadaroglu & Demirci, 1997; Henmi & Bresch, 1985; Raynor et al., 1974).

Τα NO_x είναι ακόμα μία κατηγορία ρύπων για την οποία κατά τον 20^ο αιώνα πραγματοποιήθηκαν έρευνες για τη μελέτη της εξάρτησης της συγκέντρωσής τους από μετεωρολογικές παραμέτρους. Όπως και στους ρύπους που εξετάστηκαν προηγουμένως, η συγκέντρωση των NO_x εξαρτάται σημαντικά από τη διεύθυνση του ανέμου, καθώς λόγω αυτής μπορεί να επιβαρυνθούν περιοχές χωρίς έντονη δραστηριότητα που βρίσκονται πλησίον μεγάλων οδικών έργων, βιομηχανικών εγκαταστάσεων και μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Η συσχέτιση της συγκέντρωσης των NO_x και της ταχύτητας του ανέμου είναι αρνητική, καθώς οι συνθήκες για διασπορά των ρύπων είναι ευνοϊκότερες όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγάλη. Όσον αφορά τη θερμοκρασία, παρατηρήθηκε, γενικά, αύξηση της συγκέντρωσης με μείωσή της, γεγονός που αποδόθηκε στη λειτουργία των κεντρικών θερμάνσεων κατά τους ψυχρούς μήνες του έτους. Υπό υψηλότερες θερμοκρασίες καταγράφηκε αλλαγή των συγκεντρώσεων των επιμέρους ενώσεων που αποτελούν τα NO_x , καθώς αυτά συμμετέχουν στις αντιδράσεις παραγωγής και καταστροφής του O_3 που πραγματοποιούνται υπό τέτοιες συνθήκες. Τέλος, η συσχέτιση της συγκέντρωσης των NO_x με τη σχετική υγρασία δεν ήταν ξεκάθαρη, ενώ, λόγω υγρής απόθεσης, κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων η συγκέντρωση των NO_x μειώνεται (Delaney & Dowding, 1998; Holmen et al., 1997; Shahgedanova et al., 1999).

Αν και ο αριθμός των άρθρων που δημοσιεύτηκαν αυτή την περίοδο και μελετούσαν τη συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του CO με τις μετεωρολογικές παραμέτρους είναι μικρότερος, μπορούν να εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα. Ο άνεμος επιδρά με τον ίδιο τρόπο όπως και στους υπόλοιπους ρύπους. Ειδικότερα, ανάλογα με τη διεύθυνσή του, μπορεί να μεταφέρει CO από άλλες περιοχές όπου η παρουσία πηγών είναι εντονότερη, ενώ μεγάλες ταχύτητες ανέμου ισοδυναμούν με μεγαλύτερη διασπορά του ρύπου και, συνεπώς, μικρότερη συγκέντρωση. Παρατηρήθηκε, επίσης, πως ο ρύπος αυτός δεν ακολουθεί συγκεκριμένο κύκλο κατά τη διάρκεια του έτους ώστε να γίνει συσχέτιση με τις μετεωρολογικές παραμέτρους. Αυτό, πιθανώς, να οφείλεται στην αλλαγή των πηγών, αλλά και των καταβοθρών του ανάλογα με τις εποχές του χρόνου. Μπορεί να γίνει, ωστόσο, μια έμμεση συσχέτιση μέσω της μελέτης του τρόπου με τον οποίο συνδέονται οι μετεωρολογικές παράμετροι με την παρουσία ή μη χημικών ουσιών που αντιδρούν με το CO . Παράδειγμα αποτελούν οι ελεύθερες ρίζες OH , ο σχηματισμός των οποίων ευνοείται από τις συνθήκες που επικρατούν το καλοκαίρι, μια εποχή του χρόνου που, γενικά, καταγράφεται μικρή μείωση της συγκέντρωσης του CO (Comrie & Diem, 1999; Poulida et al., 1991; Shahgedanova et al., 1999).

Οι υδρογονάνθρακες συνιστούν μια πολύ ευρεία κατηγορία ρύπων που παρουσιάζουν διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Άμεση συνέπεια αυτού είναι πως τα συμπεράσματα για τις συγκεντρώσεις τους και τη σχέση αυτών με μετεωρολογικές παραμέτρους παρουσιάζουν διαφορές. Σύμφωνα με τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν κατά το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα συνάγεται το συμπέρασμα πως ο άνεμος, ανάλογα με τη διεύθυνσή του, μπορεί να παρασύρει υδρογονάνθρακες και να επιβαρύνει περιοχές μακριά από σημαντικές πηγές, ενώ αν η ταχύτητά του είναι μεγάλη ευνοείται η διασπορά τους. Αυτό εξηγεί και το γεγονός πως κατά την άνοιξη, οπότε, λόγω της μετάβασης, ο καιρός είναι ασταθής και οι άνεμοι έντονοι, αν ο άνεμος δεν πνέει από επιβαρυμένες περιοχές, οι συγκεντρώσεις των υδρογονανθράκων μειώνονται. Τον χειμώνα, αντίθετα, όταν οι άνεμοι έχουν χαμηλές ταχύτητες και η θερμοκρασία είναι χαμηλή, οι συγκεντρώσεις αυξάνονται. Αυτό συμβαίνει αφενός λόγω μικρής διασποράς και αφετέρου λόγω αναστολής φωτοχημικών διεργασιών στις οποίες συμμετέχουν πολλοί από τους υδρογονάνθρακες και οι οποίες αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς τρόπους απομάκρυνσης τους. Το καλοκαίρι, όταν επικρατεί ηλιοφάνεια και υψηλές θερμοκρασίες, αυτές οι αντιδράσεις επιταχύνονται, ενώ μεγάλη συνεισφορά στην απομάκρυνση πολλών υδρογονανθράκων από την ατμόσφαιρα έχει και η εξάτμισή τους που ευνοείται αυτή την περίοδο του έτους. Τέλος, η συσχέτιση της σχετικής υγρασίας και των συγκεντρώσεων των περισσότερων υδρογονανθράκων είναι αρνητική, καθώς τις ημέρες με χαμηλή υγρασία η απόθεση των υδρογονανθράκων είναι, επίσης, χαμηλή και τα υψηλά επίπεδα υγρασίας ευνοούν τις αντιδράσεις απομάκρυνσής τους (Kamens et al., 1988; Lindskog & Moldanova, 1994; Rappenglück et al., 1998; Rappenglück & Fabian, 1999; Viras & Siskos, 1993).

Ένας από τους ρύπους που αποτέλεσαν αντικείμενο ενδιαφέροντος για τους ερευνητές την περίοδο αυτή ήταν το O_3 . Βασικό συμπέρασμα το οποίο αναφέρεται στην πλειονότητα των άρθρων που συνδέουν τη συγκέντρωση του ρύπου αυτού με τις μετεωρολογικές παραμέτρους, είναι η θετική συσχέτιση του O_3 με τη θερμοκρασία. Η παραγωγή του O_3 απαιτεί την παρουσία ηλιακού φωτός, η οποία συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας. Καθώς υψηλή θερμοκρασία οδηγεί σε μείωση της σχετικής υγρασίας, μπορεί να εξηγηθεί και το γεγονός πως κατά τη διάρκεια επεισοδίων με υψηλή συγκέντρωση O_3 καταγράφηκαν χαμηλές τιμές για τη σχετική υγρασία. Παρατηρήθηκε, επιπλέον, πως πριν από αυτά τα επεισόδια δεν υπήρχε βροχή. Όσον αφορά τον άνεμο, ανάλογα με τη διεύθυνσή του, μπορεί να επιβαρύνει περιοχές στις οποίες δεν υπάρχουν πηγές πρωτογενών ρύπων που απαιτούνται για το σχηματισμό του O_3 ή, αντίστροφα, να μειώσει τις συγκεντρώσεις των ρύπων αυτών στις περιοχές με έντονη δραστηριότητα. Σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου, σε περιοχές όπου καταγράφηκαν επεισόδια υψηλής συγκέντρωσης O_3 αυτή ήταν χαμηλή ή μεσαία. Σε περιπτώσεις, όμως, που η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγάλη πρωτογενείς ρύποι μπορούν να μεταφερθούν σε περιοχές που απουσιάζουν

οι πηγές τους, οπότε καταγράφεται υψηλή, για την περιοχή, συγκέντρωση (Holmen et al., 1997; Liu et al., 1994; Mukammal et al., 1982; Xu & Zhu, 1994).

3.2 21^{ος} Αιώνας

Περνώντας στην επόμενη χιλιετία, το ενδιαφέρον των επιστημόνων σε όλο τον κόσμο για τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι συγκεντρώσεις των ρύπων με τις μετεωρολογικές παραμέτρους παραμένει αμείωτο. Τα δημοσιευμένα άρθρα πληθαίνουν, με πολλά από αυτά να εξετάζουν έναν ή δύο ρύπους και να επικεντρώνονται στην ατμοσφαιρική ρύπανση περιοχών, αστικών και ημιαστικών, λαμβάνοντας υπόψη τους κυριότερους ρύπους που ανιχνεύονται σε αυτές. Επιπρόσθετα, σε σύγκριση με τον προηγούμενο αιώνα, περισσότερες είναι οι προσπάθειες για την ανάπτυξη μοντέλων που θα προβλέπουν με μεγάλη ακρίβεια τις συγκεντρώσεις ρύπων ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν. Αξιοσημείωτη είναι και η συνεισφορά Ελλήνων ερευνητών στον εμπλουτισμό της βιβλιογραφίας για τη σχέση ποιότητας αέρα και μετεωρολογικών συνθηκών, καθώς πολλές είναι οι έρευνες που δημοσιεύτηκαν αυτή την περίοδο και ασχολούνταν με το ζήτημα αυτό σε μεγάλες πόλεις της χώρας.

3.2.1 *Αιωρούμενα Σωματίδια*

Στην πλειονότητά τους, οι έρευνες που δημοσιεύτηκαν κατά την πρώτη δεκαεπενταετία του 21^{ου} αιώνα και εξέταζαν τη συσχέτιση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων και των μετεωρολογικών συνθηκών πραγματοποιήθηκαν σε αστικά περιβάλλοντα, χωρίς να απουσιάζουν μελέτες που επικεντρώνονται σε άλλου είδους περιοχές (Tecer et al., 2008). Οι μελέτες αυτές είναι αρκετά πιο λεπτομερείς και εκτενείς συγκριτικά με αυτές του 20^{ου} αιώνα, ενώ, σε πολλές από αυτές, υπάρχει διαχωρισμός των αιωρούμενων σωματιδίων για τα οποία έγιναν μετρήσεις και συσχετίσεις ανάλογα με το μέγεθός τους, κυρίως σε PM₁₀ και PM_{2.5}.

Μεγάλη έμφαση δόθηκε στη συσχέτιση της ταχύτητας του ανέμου και της παρουσίας αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα σε αστικές περιοχές. Γενικά, καταγράφηκε μια σημαντική αρνητική συσχέτιση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων με αυτή (Asimakopoulos et al., 2012; Barmpadimos et al., 2011; Gietl & Klemm, 2009; Hien et al., 2002; Jung et al., 2002; Karar & Gupta, 2006; Marcazzan et al., 2002; Papanastasiou & Melas, 2009; Papanastasiou et al., 2010; Tian et al., 2014; Turalioğlu et al., 2005; Zeri et al., 2011). Στη μελέτη των Barmpadimos et al. (2011) η συσχέτιση προέκυψε αρνητική και, κατά προσέγγιση, εκθετική. Σε ορισμένες έρευνες, ωστόσο, η αρνητική συσχέτιση ήταν ασθενής για ορισμένες περιόδους του χρόνου (Akyüz & Çabuk, 2009; Bhaskar & Mehta, 2010) και ελάχιστος

ήταν ο αριθμός των ερευνών που κατέληξαν σε θετική συσχέτιση της ταχύτητας του ανέμου και των επιπέδων PM₁₀ στην ατμόσφαιρα (Giri et al., 2008). Οι Asimakopoulos et al. (2012) σημειώνουν, επίσης, στην έρευνά τους πως ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου, υψηλές ταχύτητες μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση της συγκέντρωσης. Η ταχύτητα του ανέμου είναι παράγοντας ο οποίος επηρεάζει σημαντικά τη συγκέντρωση των μεγαλύτερων σωματιδίων, σύμφωνα με τους Barmnadimos et al. (2011) και Gietl & Klemm (2009), καθώς ευνοείται η διασπορά τους, αλλά επιδρά σε μεγαλύτερο βαθμό στην παρουσία μικρότερων αιωρούμενων σωματιδίων, κατά τους Gietl & Klemm (2009) και Hien et al. (2002).

Παρά το γεγονός πως η διεύθυνση του ανέμου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα επίπεδα PM στην ατμόσφαιρα, όπως αυτό έγινε εμφανές από παλαιότερες μελέτες που ασχολούνται με το ζήτημα αυτό, αναφορά σε αυτή γίνεται σε μικρό αριθμό ερευνών της περιόδου, συγκριτικά με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους (Asimakopoulos et al., 2012; Jung et al., 2002; Papanastasiou & Melas, 2009; Proias et al., 2012; Tian et al., 2014). Πιθανώς, αυτό να οφείλεται στη συμφωνία των συμπερασμάτων των ερευνών του 20^{ου} αιώνα που ήδη αναφέρθηκαν και στις οποίες προέκυψε το συμπέρασμα πως περιοχές μπορεί να επιβαρυνθούν από παρακείμενες αμμώδεις εκτάσεις, περιοχές με έντονη δραστηριότητα ή να απαλλαγούν από την ατμοσφαιρική ρύπανση, ανάλογα με τη διεύθυνση από την οποία πνέει ο άνεμος, κάτι το οποίο αναφέρεται και στις μελέτες αυτής της περιόδου. Στη μελέτη των Proias et al. (2012) αναφέρεται και η επίδραση της θαλάσσιας αύρας, η οποία κυριαρχεί στον τόπο που επιλέχθηκε για μελέτη κατά την περίοδο του καλοκαιριού. Παρατηρήθηκε πως όταν ο άνεμος πνέει από τη θάλασσα η ατμόσφαιρα επιβαρύνεται με υδροσταγονίδια, οδηγώντας σε αύξηση των επιπέδων PM₁₀.

Αντικρουόμενα είναι τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις μελέτες αυτής της περιόδου για τη συσχέτιση της σχετικής υγρασίας με τη συγκέντρωση των PM στην ατμόσφαιρα πόλεων. Στην πλειονότητά τους, οι μελέτες δείχνουν πως η συσχέτιση είναι αρνητική (Akyüz & Çabuk, 2009; Asimakopoulos et al., 2012; Hien et al., 2002; Karar & Gupta, 2006; Turalioğlu et al., 2005). Αυτό δεν επιβεβαιώνεται από τους Gietl & Klemm (2009) και Jung et al. (2002) οι οποίοι δεν βρήκαν κάποια σημαντική συσχέτιση των δύο, ενώ οι Marcazzan et al. (2002) κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η συσχέτιση είναι θετική. Γενικά, υπάρχει συμφωνία μεταξύ των ερευνητών που εξέτασαν κάθε εποχή ξεχωριστά, ως προς τη σημαντική αρνητική συσχέτιση μεταξύ των PM₁₀ και της σχετικής υγρασίας, είτε για όλες τις εποχές είτε για ορισμένες από αυτές (Barmnadimos et al., 2011; Bhaskar & Mehta, 2010; Giri et al., 2008; Hien et al., 2002). Εξαίρεση αποτελεί η μελέτη των Tian et al. (2014), οι οποίοι κατέληξαν σε θετική συσχέτιση της σχετικής υγρασίας και της συγκέντρωσης των PM₁₀ για όλες τις εποχές του χρόνου, πλην της άνοιξης.

Ομοφωνία υπήρξε μεταξύ των επιστημόνων για τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η συγκέντρωση των PM με τη βροχή σε αστικά περιβάλλοντα.

Συγκεκριμένα, οι περισσότερες μελέτες κατέληξαν σε μια ισχυρή αρνητική συσχέτιση (Akyüz & Çabuk, 2009; Barmpadimos et al., 2011; Bhaskar & Mehta, 2010; Gietl & Klemm, 2009; Giri et al., 2008; Hien et al., 2002; Karar & Gupta, 2006; Özbay, 2012; Zeri et al., 2011), ενώ στην έρευνα των Turalioğlu et al. (2005) η συσχέτιση ήταν ασθενώς αρνητική. Αυτό το συμπέρασμα αποδόθηκε στο γεγονός πως κατά τη διάρκεια της βροχής τα PM απομακρύνονται από την ατμόσφαιρα λόγω υγρής απόθεσης και, ταυτόχρονα, το έδαφος βρέχεται, εμποδίζοντας την σκόνη να ανασκηωθεί και να επιβαρύνει την ατμόσφαιρα.

Ποικίλα και διαφορετικά ήταν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την προσπάθεια συσχέτισης της θερμοκρασίας και των επιπέδων PM στην ατμόσφαιρα. Σημαντική αρνητική συσχέτιση προέκυψε στις μελέτες των Banerjee et al. (2011), Bhaskar & Mehta (2010) και Turalioğlu et al. (2005) για αυτή τη μετεωρολογική παράμετρο και τα συνολικά εκπεμπόμενα PM. Για τα PM₁₀ τα αποτελέσματα δεν είναι ξεκάθαρα, καθώς η συσχέτιση άλλοτε προκύπτει θετική για κάποιες ή και όλες τις εποχές του χρόνου (Akyüz & Çabuk, 2009; Asimakopoulos et al., 2012; Barmpadimos et al., 2011), άλλοτε αρνητική (Giri et al., 2008; Özbay, 2012; Proias et al., 2012; Tian et al., 2014) και άλλοτε δεν είναι σημαντική (Bhaskar & Mehta, 2010). Στη μελέτη των Papanastasiou et al. (2010) υψηλές τιμές PM₁₀ καταγράφηκαν το καλοκαίρι κατά τις ημέρες που η θερμοκρασία ήταν πολύ υψηλή, κάτι που αποδόθηκε στον σχηματισμό δευτερογενών σωματιδιακών ρύπων. Όσον αφορά τα PM_{2.5}, υπάρχει συμφωνία ότι η συγκέντρωσή τους επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία, ιδιαίτερα όταν αυτή είναι υψηλή (Akyüz & Çabuk, 2009; Asimakopoulos et al., 2012; Hien et al., 2002; Jung et al., 2002;).

3.2.2 Οξείδια του Θείου

Οι μελέτες που δημοσιεύτηκαν έως και το 2014 και εξετάζουν τη συσχέτιση των επιπέδων των SO_x με μετεωρολογικές παραμέτρους ήταν λιγότερες από αντίστοιχες μελέτες για άλλους ρύπους. Πιθανώς, αυτό να οφείλεται στο γεγονός πως τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται την περίοδο αυτή, στην πλειονότητά τους, υπόκεινται σε αποθείωση, κάτι που έχει ως συνέπεια τη μείωση των εκπομπών του σε πολλές χώρες (Smith et al., 2001; Smith et al., 2011; United States Environmental Protection Agency).

Στις περισσότερες έρευνες, η διεύθυνση του ανέμου είναι η μετεωρολογική παράμετρος που επιχειρήθηκε να συσχετιστεί με τη συγκέντρωση των SO_x . Υπάρχει ευρεία συμφωνία μεταξύ των ερευνητών ότι περιοχές χωρίς σημαντικές τοπικές πηγές του συγκεκριμένου ρύπου μπορεί να επιβαρυνθούν από εκπομπές σε γειτονικές περιοχές με έντονη δραστηριότητα, εφόσον πνέουν άνεμοι από κατάλληλες διευθύνσεις (Cheng & Lam, 2000; Elminir, 2005; Nenadović et al., 2010; Papaioannou et al., 2010; Tasić et al., 2013). Αντίστροφα, σε περιοχές επιβαρυνμένες

από τον συγκεκριμένο ρύπο, η συγκέντρωση μπορεί να παρουσιάσει μείωση λόγω ανέμου, καθώς αυτός οδηγεί στην απομάκρυνσή τους (Cheng & Lam, 2000; Elminir, 2005; Özbay, 2012; Santacatalina et al., 2011; Tasić et al., 2013).

Η ταχύτητα του ανέμου, αν και επηρεάζει σημαντικά τη διασπορά όλων των ρύπων, δεν αναφέρεται στην πλειονότητα των ερευνών που ασχολούνται με τα επίπεδα SO_x και δημοσιεύτηκαν την περίοδο 2000 – 2014. Μελέτη του τρόπου με τον οποίο συνδέονται τα δύο αυτά μεγέθη γίνεται στα άρθρα των Luvsan et al. (2012), Tasić et al. (2013), Tripathi et al. (2013) και Turalioğlu et al. (2005). Οι Luvsan et al. (2012), Tasić et al. (2013) και Turalioğlu et al. (2005) κατέληξαν πως η συσχέτιση είναι αρνητική, ενώ οι Tripathi et al. (2013) μη σημαντική. Σε θετική συσχέτιση κατέληξαν οι Banerjee et al. (2011), αποδίδοντας το γεγονός αυτό στην εγγύτητα του σταθμού μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με βιομηχανική περιοχή.

Μία ακόμη μετεωρολογική παράμετρος για την οποία έγινε προσπάθεια συσχέτισης με τα επίπεδα SO_x είναι η σχετική υγρασία. Τα αποτελέσματα είναι αντικρουόμενα, καθώς κατά τους Luvsan et al. (2012), Tripathi et al. (2013) και Turalioğlu et al. (2005) η συσχέτιση είναι ασθενώς θετική, ενώ οι Banerjee et al. (2011), Elminir (2005) και Özbay (2012) κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση, άλλοτε περισσότερο και άλλοτε λιγότερο ισχυρή.

Συμφωνία υπάρχει μεταξύ των ερευνητών που δραστηριοποιήθηκαν αυτή την περίοδο για τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η συγκέντρωση των SO_x με τη βροχή. Η παρουσία βροχής οδηγεί σε μείωση των επιπέδων SO_x λόγω υγρής απόθεσης (Nenadović et al., 2010; Özbay, 2012; Park et al., 2000; Zeri et al., 2011). Αρνητική, αν και ασθενής, ήταν και η συσχέτιση που κατέγραψαν και οι Turalioğlu et al. (2005).

Τέλος, αν και το πλήθος των ερευνών που εξετάζουν το θέμα είναι μικρό, ποικίλα είναι τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η θερμοκρασία με τη συγκέντρωση των SO_x στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, στις μελέτες των Kalbarczyk & Kalbarczyk (2008), Luvsan et al. (2012), Özbay (2012), Tripathi et al. (2013) και Turalioğlu et al. (2005) σαν συμπέρασμα προέκυψε πως η συσχέτιση αυτών των δύο μεγεθών είναι αρνητική. Κατά τον Elminir (2005), όμως, η συσχέτιση δεν είναι σημαντική.

3.2.3 Οξείδια του Αζώτου

Αρκετές είναι οι έρευνες που δημοσιεύτηκαν κατά την περίοδο 2000 – 2014 και εξετάζουν τη συσχέτιση των επιπέδων των NO_x με τις μετεωρολογικές παραμέτρους. Στην πλειονότητά τους, εξετάζουν ταυτόχρονα τα NO_x και τα SO_x , ενώ σε πολλές από αυτές μελετώνται τα NO_x και το O_3 , εξαιτίας της αναγκαιότητας ύπαρξης των πρώτων για την παραγωγή του δεύτερου.

Όπως και για όλους τους ρύπους, έτσι και για τα NO_x , η διεύθυνση του ανέμου συνιστά καθοριστικό παράγοντα για τη συγκέντρωση που καταγράφεται στις περιοχές μελέτης. Ειδικότερα, οι ερευνητές παρατήρησαν πως τις ημέρες που ο

άνεμος έπνεε από κοντινούς μεγάλους οδικούς άξονες, βιομηχανικές περιοχές και μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που εδράζονται πλησίον της περιοχής μελέτης, η ατμόσφαιρά της επιβαρύνθηκε με NO_x που συμπάρεσσε ο άνεμος (Cheng & Lam, 2000; Hatzianastassiou et al., 2007; Kalbarczyk & Kalbarczyk, 2007; Papaioannou et al., 2010; Xu et al., 2011; Yannopoulos, 2007).

Στην προσπάθειά τους να συσχετίσουν την ταχύτητα του ανέμου με τη συγκέντρωση των NO_x στην ατμόσφαιρα, οι μελετητές κατέληξαν σε παρόμοια συμπεράσματα. Ισχυρά αρνητική είναι η σχέση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και επιπέδων NO_x , καθώς υψηλή συγκέντρωση καταγράφηκε κατά τη διάρκεια ημερών που ο άνεμος ήταν ήπιος, οπότε δεν ευνοείται η διασπορά των ρύπων (Elminir, 2005; Hatzianastassiou et al., 2007; Kalbarczyk & Kalbarczyk, 2007; Mavroidis & Ilia, 2012; Xu et al., 2011; Żyromski et al., 2014). Σε περιπτώσεις, ωστόσο, που η διεύθυνση του ανέμου ήταν τέτοια ώστε να επιτρέπεται η επιβάρυνση των περιοχών μελέτης από άλλες παρακείμενες με έντονη δραστηριότητα, μεγάλες ταχύτητες ανέμου είχαν ως αποτέλεσμα την καταγραφή υψηλής συγκέντρωσης (Banerjee et al., 2011; Cheng & Lam, 2000).

Ελάχιστες είναι οι μελέτες που εξετάζουν τη συσχέτιση της συγκέντρωσης του NO_2 με τη σχετική υγρασία, καταλήγοντας, όμως, σε παρόμοια συμπεράσματα. Όπως προέκυψε από τις έρευνες των Elminir (2005), Kalbarczyk & Kalbarczyk (2007), Konač-Andrić et al. (2013) και Żyromski et al. (2014) η συσχέτιση των επιπέδων NO_2 και αυτής της μετεωρολογικής παραμέτρου, είναι ισχυρά αρνητική. Αρνητική αλλά λιγότερο ισχυρή ήταν η συσχέτιση στην οποία κατέληξαν οι Banerjee et al. (2011). Ο Elminir (2005) αποδίδει την αύξηση της συγκέντρωσης του NO_2 που σημειώνεται για χαμηλές τιμές σχετικής υγρασίας στη μείωση της συμμετοχής του σε αντιδράσεις με ελεύθερες ρίζες OH . Η συγκέντρωση του NO , από την άλλη, σύμφωνα με τη μελέτη των Mavroidis & Ilia (2012), παρουσιάζουν θετική συσχέτιση με τη συγκεκριμένη μετεωρολογική παράμετρο.

Σχετικά με τη βροχή και τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η παρουσία της με τη συγκέντρωση των NO_x , τα συμπεράσματα δεν είναι ξεκάθαρα, κάτι το οποίο οφείλεται και στον μικρό αριθμό ερευνών που ασχολούνται με το ζήτημα αυτό. Συγκεκριμένα, οι Kalbarczyk & Kalbarczyk (2007) καταλήγουν σε μη σημαντική συσχέτιση των δύο, ενώ οι Banerjee et al. (2011) και Czarnecka & Kalbarczyk (2005) καταγράφουν αρνητική συσχέτιση των επιπέδων NO_x και της παρουσίας βροχής.

Ποικίλα, και ενίοτε αντικρουόμενα, είναι τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τη συσχέτιση μεταξύ θερμοκρασίας και επιπέδων NO_x . Στην πλειονότητα των μελετών που δημοσιεύτηκαν αυτή την περίοδο η υψηλότερη συγκέντρωση παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα και η μικρότερη κατά τους θερμούς μήνες του έτους (Banerjee et al., 2011; Kalabokas & Kotzias, 2004; Kalbarczyk & Kalbarczyk, 2007; Mavroidis & Ilia, 2012; Papaioannou et al., 2010; Rozbicka, 2007; Xu et al., 2011). Αυτό αποδόθηκε από τους ερευνητές στην αλλαγή των αναγκών των ανθρώπων σε ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση. Ο Elminir (2005),

αντίθετα, κατέληξε στο συμπέρασμα πως η συγκέντρωση του NO_2 δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία, ενώ, στη μελέτη του κατέγραψε θετική συσχέτιση των δύο μεγεθών για τους μήνες Ιούλιο και Δεκέμβριο.

3.2.4 Μονοξείδιο του Άνθρακα

Οι έρευνες που δημοσιεύτηκαν την περίοδο 2000 – 2014 σχετικά με την επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στη συγκέντρωση του CO στην ατμόσφαιρα επικεντρώθηκαν στον άνεμο και τη θερμοκρασία. Ελάχιστες ήταν οι αναφορές στη συσχέτιση των επιπέδων CO με τη σχετική υγρασία και τη βροχή.

Όπως και στους περισσότερους ρύπους, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει, τόσο η διεύθυνση όσο και η ταχύτητα του ανέμου. Περιοχές στις οποίες οι πηγές του CO απουσιάζουν ή ο αριθμός τους είναι μικρός μπορεί να επιβαρυνθούν από παρακείμενες αν η διεύθυνση του ανέμου είναι ευνοϊκή (Belikov et al., 2006; Elminir, 2005; Henne et al., 2008; Lam et al., 2001). Ιδιαίτερα αν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγάλη, η μεταφορά των ρύπων μπορεί να γίνει γρήγορα και σε μεγάλες αποστάσεις (Elminir, 2005; Holloway et al., 2000; Lam et al., 2001; Xu et al., 2011). Από την άλλη πλευρά, στις περιοχές στις οποίες εκπέμπεται CO , η μεγάλη ταχύτητα ανέμου συνεισφέρει στη διασπορά του και, κατά συνέπεια, στη μείωση των επιπέδων του (Antony Chen et al., 2001; Fokeeva et al., 2007; Grechko et al., 2009; Lam et al., 2001; Zeri et al., 2011). Αρνητική και στατιστικά σημαντική ήταν και η συσχέτιση στην οποία οδηγήθηκαν μέσω της μελέτης τους και οι Sahu et al. (2013) για τους καλοκαιρινούς μήνες και για υγρές περιόδους του έτους.

Πολλοί ήταν οι ερευνητές που μελέτησαν τον τρόπο με τον οποίο συσχετίζεται η θερμοκρασία με την παρουσία CO στην ατμόσφαιρα. Υπήρξε συμφωνία στα αποτελέσματα των ερευνών αυτής της περιόδου και, συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως η συσχέτιση των δύο είναι αρνητική, καθώς η μεγαλύτερη συγκέντρωση καταγράφεται κατά τους ψυχρούς μήνες του έτους (Antony Chen et al., 2001; Belikov et al., 2006; Constant et al., 2008; Duci et al., 2003; Elminir, 2005; Gilge et al., 2010; Grechko et al., 2009; Lam et al., 2001; Sahu et al., 2013; Tsapakis & Stephanou, 2005; Xu et al., 2011; Zeri et al., 2011).

Η σχετική υγρασία και η βροχή είναι δύο παράμετροι των οποίων η επίδραση στα επίπεδα του CO στην ατμόσφαιρα δεν μελετήθηκε από πολλούς ερευνητές αυτής της περιόδου. Συγκεκριμένα, ο Elminir (2005) παρατήρησε πως η συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης του CO και της σχετικής υγρασίας είναι ασθενώς αρνητική, ενώ οι Konač-Andrić et al. (2013) κατέληξαν σε μη σημαντική συσχέτιση. Όσον αφορά την βροχή, αυτή δεν προκαλεί σημαντικές μεταβολές στη συγκέντρωση αυτού του ρύπου, καθώς αυτός δεν διαλύεται στο νερό οπότε δεν πραγματοποιείται υγρή απόθεσή του (Elminir, 2005; Zeri et al., 2011).

3.2.5 Υδρογονάνθρακες

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι υδρογονάνθρακες είναι μια κατηγορία ρύπων που περιλαμβάνει πληθώρα ουσιών που είναι δυνατό να βρίσκονται σε διαφορετικές φάσεις. Κατά την περίοδο 2000 – 2014 πολλοί ερευνητές μελέτησαν τη συσχέτιση μετεωρολογικών παραμέτρων και συγκεντρώσεων υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα που βρίσκονται τόσο σε αέρια όσο και σωματιδιακή μορφή.

Μετεωρολογικές παράμετροι που εξετάστηκαν στην πλειονότητα των ερευνών αυτής της περιόδου είναι η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου. Για τους σωματιδιακούς πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (Polycyclic aromatic hydrocarbons ή PAHs) εξήχθη το συμπέρασμα πως η διεύθυνση του ανέμου μπορεί να έχει καθοριστικό ρόλο στην επιβάρυνση περιοχών από άλλες κοντινές στις οποίες υπάρχουν αντίστοιχες πηγές (Guo et al., 2003; Mantis et al., 2005; Sikalos et al., 2002). Κατά τους Fon et al. (2007) και Tsarakis & Stephanou (2005), όμως, δεν υπάρχει κάποια σημαντική συσχέτιση μεταξύ των δύο. Όσον αφορά την ταχύτητα, μεγάλες τιμές της έχουν σαν αποτέλεσμα τα επίπεδα των σωματιδιακών PAHs να παρουσιάζουν μείωση (Guzmán-Torres et al., 2009; Karar & Gupta 2006; He et al., 2014; Mantis et al., 2005; Sikalos et al., 2002). Οι Burkart et al. (2013), Fang et al. (2004), Fon et al. (2007) και Tsarakis & Stephanou (2005), όμως, δεν κατέληξαν σε κάποια στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Για τη συγκέντρωση των αερίων PAHs στην ατμόσφαιρα και την ταχύτητα του ανέμου οι Tsarakis & Stephanou (2005) κατέληξαν σε μια ισχυρή θετική συσχέτιση. Για μη μεθανικούς υδρογονάνθρακες (Non-Methane Hydrocarbons ή NMHCs) οι Song et al. (2012) παρατήρησαν πως η συγκέντρωσή τους ήταν μικρότερη όταν επικρατούσαν συγκεκριμένης διεύθυνσης άνεμοι και όταν η ταχύτητα του ανέμου που έπνεε ήταν χαμηλή. Οι Li & Wang (2012) που μελέτησαν, επίσης, NMHCs συμπέραναν ότι συγκεκριμένες διευθύνσεις ανέμου επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα της περιοχής μελέτης, ενώ άλλες οδηγούν σε μικρότερη συγκέντρωση.

Αντικρουόμενα είναι τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν οι ερευνητές για τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η συγκέντρωση των σωματιδιακών PAHs με τη σχετική υγρασία. Οι Burkart et al. (2013), Mantis et al. (2005) και Sikalos et al. (2002) κατέγραψαν θετική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών, οι Karar & Gupta (2006) βρήκαν αρνητική συσχέτιση, ενώ οι He et al. (2014), Fang et al. (2004), Fon et al. (2007) και Tsarakis & Stephanou (2005) δεν εντόπισαν σημαντική συσχέτιση. Θετική ήταν η συσχέτιση μεταξύ αερίων PAHs και αυτής της μετεωρολογικής παραμέτρου σύμφωνα με τους Burkart et al. (2013). Από την έρευνα των Bakeas & Siskos (2002) για τους πτητικούς υδρογονάνθρακες (Volatile Hydrocarbons ή VHCs) προέκυψε πως τα επίπεδά τους παρουσιάζουν αύξηση με άνοδο της σχετικής υγρασίας.

Τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει η βροχή τα επίπεδα των σωματιδιακών PAHs εξέτασαν στις έρευνές τους οι Karar & Gupta (2006), Li et al. (2014) και Tham et al. (2008). Συγκεκριμένα, αποφάνθηκαν πως, λόγω της υγρής απόθεσης, η

συγκέντρωση των σωματιδιακών υδρογονανθράκων που κατατάσσονται σε αυτή την κατηγορία μειώνονται παρουσία βροχής.

Έντονο ήταν το ενδιαφέρον των μελετητών αυτής της περιόδου για τη σχέση που συνδέει τα επίπεδα τόσο σωματιδιακών όσο και αέριων υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα με τη θερμοκρασία. Ομοφωνία υπήρξε μεταξύ των ερευνητών που μελέτησαν τους σωματιδιακούς PAHs, καθώς όλοι κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση των δύο μεγεθών, ισχυρή κατά τους He et al. (2014), Karar & Gupta (2006) και Tham et al. (2008), αφού κατέγραψαν υψηλότερη συγκέντρωση κατά την ψυχρή περίοδο του έτους (Fang et al., 2004; Fon et al., 2007; Guo et al., 2003; Kitazawa et al., 2006; Li et al., 2014; Mantis et al., 2005; Sikalos et al., 2002; Tsarakis & Stephanou, 2005). Το φαινόμενο αυτό αποδόθηκε από τους He et al. (2014) και τους Sikalos et al. (2002) στο γεγονός πως κατά τους θερμούς μήνες του έτους οι υδρογονάνθρακες αυτοί συμμετέχουν σε μια πληθώρα χημικών αντιδράσεων με άλλους ρύπους που παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα εκείνη την περίοδο, όπως το NO_2 και το O_3 , με άμεση συνέπεια τη μείωση της συγκέντρωσής τους. Για τους αέριους PAHs οι Burkart et al. (2013) και Fang et al. (2004) κατέληξαν, επίσης, σε αρνητική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσής τους και της θερμοκρασίας. Από την άλλη, οι Bakeas & Siskos (2002) που μελέτησαν γενικά VHCs, παρατήρησαν πως με αύξηση της θερμοκρασίας τα επίπεδα παρουσίασαν άνοδο, κάτι που αποδόθηκε από τους ίδιους στην εξάτμιση υδρογονανθράκων από πηγές και μέρη αποθήκευσης.

3.2.6 Όζον

Πολλοί ήταν οι ερευνητές οι οποίοι μελέτησαν τη συσχέτιση της συγκέντρωσης του O_3 με τις μετεωρολογικές παραμέτρους. Η βιβλιογραφία της πρώτης δεκαπενταετίας του 21^{ου} αιώνα είναι πλούσια με τα αποτελέσματα για όλες σχεδόν τις μετεωρολογικές παραμέτρους να είναι αντικρουόμενα.

Η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα παράδειγμα μετεωρολογικής παραμέτρου για την οποία δεν είναι ξεκάθαρος ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται με τη συγκέντρωση του O_3 . Αρνητική συσχέτιση κατέγραψαν στις έρευνές τους οι Elminir (2005), Papanastasiou et al. (2012), Shan et al. (2009), Vukovich & Sherwell (2003) και Xu et al. (2011). Αντίθετα, σε θετική συσχέτιση κατέληξαν οι Dueñas et al. (2002), Konač-Andrić et al. (2013), Mavroidis & Ilia (2012) και Tu et al. (2007) οι έρευνες των οποίων αφορούν αστικό περιβάλλον, αλλά και οι Tarasova & Karpetchko (2003) που ασχολήθηκαν με μη αστική περιοχή. Τέλος, οι Konač-Andrić et al. (2009) και Seo et al. (2014) συμπέραναν πως η ταχύτητα του ανέμου δεν επηρεάζει σημαντικά τη συγκέντρωση του συγκεκριμένου ρύπου.

Συμφωνία υπάρχει μεταξύ των επιστημόνων για την επίδραση της διεύθυνσης του ανέμου στα επίπεδα του O_3 στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Στην πλειονότητά τους οι ερευνητές παρατήρησαν πως συγκεκριμένες διευθύνσεις ανέμου συνδέονται με

υψηλή συγκέντρωση (Camalier et al., 2007; Dueñas et al., 2002; Elminir, 2005; Kovač-Andrić et al., 2009; Mavroidis & Ilia, 2012; Papanastasiou & Melas, 2009; Tu et al., 2007). Ιδιαίτερα εμφανές ήταν αυτό το φαινόμενο σε περιοχές χωρίς έντονη δραστηριότητα, όπως προέκυψε από τις μελέτες των Chan & Chan (2000), Hatzianastassiou et al. (2007) και Mavroidis & Ilia (2012), εξαιτίας της μεταφοράς πρωτογενών ρύπων που είναι απαραίτητοι για τον σχηματισμό του O_3 . Αντίστροφα, σε περιοχή με έντονη δραστηριότητα καταγράφηκαν χαμηλές τιμές O_3 , λόγω της απουσίας πρωτογενών ρύπων που απαιτούνται για την παραγωγή του οι οποίοι παρασύρονται από τον άνεμο που πνέει στην περιοχή (Mavroidis & Ilia, 2012).

Ποικίλα είναι τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μελέτες που δημοσιεύτηκαν αυτή την περίοδο για τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται τα επίπεδα O_3 στην ατμόσφαιρα με τη σχετική υγρασία. Αρνητική συσχέτιση κατέγραψαν στις έρευνές τους οι Dueñas et al. (2002), Elminir (2005), Kovač-Andrić et al. (2013), Mavroidis & Ilia (2012), Papanastasiou et al. (2012) και Tu et al. (2007), όπως και οι Tarasova & Karpetchko (2003) με εξαίρεση την εποχή του χειμώνα. Οι Camalier et al. (2007) βρήκαν πως τα δύο μεγέθη έχουν αρνητική, σχεδόν γραμμική, συσχέτιση, ενώ οι Shan et al. (2009) και Xu et al. (2011) παρατήρησαν πως υψηλή σχετική υγρασία συνδέεται με χαμηλή συγκέντρωση O_3 στην κατώτερη τροπόσφαιρα. Μη σημαντική είναι η συσχέτιση των δύο μεγεθών σύμφωνα με τους Seo et al. (2014).

Μια άλλη μετεωρολογική παράμετρος που εξετάστηκε είναι η βροχή. Η παρουσία βροχής οδηγεί σε χαμηλότερα επίπεδα O_3 , σύμφωνα με τις μελέτες των Kovač-Andrić et al. (2009), Pudasainee et al. (2006) και Tu et al. (2007). Οι Dueñas et al. (2002) κατέληξαν, επίσης, σε αρνητική συσχέτιση, η οποία, όμως, δεν ήταν ισχυρή. Στην έρευνα των Shan et al. (2009) παρατηρήθηκε πως συχνή βροχή οδηγεί σε χαμηλά επίπεδα O_3 αλλά τα χαμηλά ύψη βροχής συνδέονται με αυξημένη συγκέντρωση.

Ομοφωνία υπάρχει μεταξύ των επιστημόνων για την επίδραση της θερμοκρασίας στη συγκέντρωση του O_3 στην ατμόσφαιρα. Κατά τη διάρκεια ημερών με υψηλές θερμοκρασίες καταγράφηκαν υψηλά επίπεδα του ρύπου αυτού (Camalier et al., 2007; Chan & Chan, 2000; Dueñas et al., 2002; Elminir, 2005; Hatzianastassiou et al., 2007; Kovač-Andrić et al., 2009; Mavroidis & Ilia, 2012; Papanastasiou et al., 2012; Ramsey et al., 2014; Seo et al., 2014; Shan et al., 2009; Tu et al., 2007; Xu et al., 2011). Αντίθετα, τις ψυχρές περιόδους του έτους η συγκέντρωση ήταν χαμηλή (Mavroidis & Ilia, 2012; Pudasainee et al., 2006; Shan et al., 2009). Όσοι μελέτησαν και στατιστικά τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται τα δύο αυτά μεγέθη κατέληξαν σε ισχυρή θετική συσχέτιση (Camalier et al., 2007; Dueñas et al., 2002; Pudasainee et al., 2006; Seo et al., 2014; Tarasova & Karpetchko, 2003; Vukovich & Sherwell, 2003).

3.3 Τελευταία Δεκαετία

3.3.1 Αιωρούμενα Σωματίδια

Το πλήθος των δημοσιεύσεων που ασχολούνται με την επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών στις συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων αυξήθηκε σημαντικά την τελευταία δεκαετία. Μεγάλο μέρος αυτών επικεντρώνονται ή εξετάζουν μεταξύ άλλων ρύπων τα αιωρούμενα σωματίδια, διαχωρίζοντάς τα, γενικά, σε δύο κατηγορίες, τα PM₁₀ και τα PM_{2.5}. Σε μέρος αυτών των άρθρων τα συμπεράσματα αφορούν γενικές σχέσεις μεταξύ μετεωρολογικών παραμέτρων και συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ σε άλλες η μελέτη αφορά μικρότερες χρονικές περιόδους, όπως εποχές και μήνες του χρόνου.

Η διεύθυνση του ανέμου, σύμφωνα και με τις έρευνες αυτής της περιόδου, συνιστά έναν καθοριστικό παράγοντα για τη συγκέντρωση των PM₁₀. Ανάλογα με την περιοχή μελέτης συγκεκριμένες διευθύνσεις ανέμου συνδέονται με υψηλή ή χαμηλή συγκέντρωση αυτών των σωματιδίων (Baltaci et al., 2019; Danek et al., 2022; Lazurca, 2015; Li et al., 2015; Liu et al., 2020; Munir et al., 2017; Nguyen et al., 2017; Rojas et al., 2020; Zhang et al., 2015; Zhang et al., 2018; Zu et al., 2017). Η υψηλή συγκέντρωση προκύπτει όταν ο άνεμος πνέει από διεύθυνση τέτοια ώστε να παρασύρει μαζί του ρύπους από κοντινές περιοχές στις οποίες είτε υπάρχει εκπομπή τους λόγω έντονης δραστηριότητας είτε απουσιάζει η βλάστηση και το έδαφος είναι αμμώδες, με αποτέλεσμα να μεταφέρεται σκόνη (Gualtieri et al., 2015; Lazurca, 2015; Nguyen et al., 2017; Sirithian & Thanatrakolsri, 2022; Zhang et al., 2015).

Λόγω της σπουδαιότητάς της στη διασπορά των ρύπων, η ταχύτητα του ανέμου είναι μια μετεωρολογική παράμετρος η οποία, επίσης, συγκέντρωσε το ενδιαφέρον των επιστημόνων που δραστηριοποιήθηκαν αυτή την περίοδο. Σε, γενικά, αρνητική συσχέτιση κατέληξε η πλειοψηφία των ερευνητικών ομάδων (Fortelli et al., 2016; He et al., 2017; Jędruszkiewicz et al., 2017; Li et al., 2015; Li et al., 2017; Li et al., 2019; Liu et al., 2020; Liu et al., 2020; Zalewska et al., 2021; Zhang et al., 2018), καθώς η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου είχε σαν επακόλουθο τη μείωση της συγκέντρωσης των μεγαλύτερων αιωρούμενων σωματιδίων, λόγω διασποράς τους (Gualtieri et al., 2015; Karagiannidis et al., 2015; Lazurca, 2015; Li et al., 2017; Munir et al., 2017), αλλά και το αντίστροφο, δηλαδή παρατηρήθηκε αυξημένη συγκέντρωση τους όταν η ταχύτητα του ανέμου ήταν χαμηλή (Danek et al., 2022; Munir et al., 2017; Rojas et al., 2020). Υπήρξαν, ωστόσο μελέτες, στις οποίες υψηλές ταχύτητες ανέμου συνδυάστηκαν με υψηλή συγκέντρωση PM₁₀, κάτι που προκλήθηκε από την οριζόντια μεταφορά τους από παρακείμενες πηγές λόγω καύσης ή περιοχές από τις οποίες μεταφέρεται σκόνη από το έδαφος (Fortelli et al., 2016; Li et al., 2017; Li et al., 2017; Liu et al., 2020; Munir et al., 2017; Zhang et al., 2018). Τα αποτελέσματα των μελετών στις οποίες εξετάστηκε κάθε εποχή του χρόνου

ξεχωριστά συγκλίνουν σε αρνητική συσχέτιση των δύο μεγεθών τον χειμώνα (Fallahizadeh et al., 2021; Li et al., 2019; Zhang et al., 2015), αλλά δεν συμφωνούν για τις υπόλοιπες εποχές. Οι Li et al. (2019) κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση και για όλες τις υπόλοιπες εποχές, οι Zhang et al. (2015) σε αρνητική συσχέτιση για άνοιξη και φθινόπωρο, ενώ οι Fallahizadeh et al. (2021) για το καλοκαίρι βρήκαν αρνητική συσχέτιση και για το φθινόπωρο θετική. Οι Zhang et al. (2018) οδηγήθηκαν σε στατιστικά σημαντική αλλά μη γραμμική συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης και ταχύτητας ανέμου.

Μια άλλη μετεωρολογική παράμετρος για την οποία μελετήθηκε ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζει τη συγκέντρωση των μεγαλύτερων σε διάμετρο αιωρούμενων σωματιδίων είναι η σχετική υγρασία, με τα αποτελέσματα να είναι ενίοτε αντικρουόμενα. Η πλειονότητα των ερευνητών κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η συσχέτιση των δύο μεγεθών είναι αρνητική (González-Duque et al., 2015; Kayes et al., 2019; Li et al., 2017; Li et al., 2019; Liu et al., 2020; Munir et al., 2017; Rojas et al., 2020). Η μείωση της συγκέντρωσης των PM10 υπό την παρουσία υψηλής σχετικής υγρασίας αποδόθηκε από τους Zu et al. (2017) στη διόγκωση που υφίστανται τα σωματίδια υπό τέτοιες συνθήκες, λόγω συσσωμάτωσης με τους υδρατμούς, με αποτέλεσμα την αύξηση της μάζας τους και την πιο εύκολή απόθεσή τους στο έδαφος. Οι Nguyen et al. (2017) απέδωσαν τη μείωση σε βροχόπλυση, λαμβάνοντας υπόψη πως υψηλή σχετική υγρασία, συχνά, συνοδεύεται από βροχόπτωση. Υπήρξε και μερίδα επιστημόνων που οδηγήθηκαν σε θετική συσχέτιση μεταξύ σχετικής υγρασίας και επιπέδων PM10 στην ατμόσφαιρα (He et al., 2017; Zalewska et al., 2021; Zhang et al., 2015), ενώ ελάχιστοι ήταν αυτοί που δεν εντόπισαν κάποια στατιστικά σημαντική συσχέτιση (Gualtieri et al., 2015). Οι ερευνητές που μελέτησαν τη σχέση των δύο μεγεθών κάθε εποχή κατέληξαν σε σημαντική αρνητική συσχέτιση το φθινόπωρο (Fallahizadeh et al., 2021) και την άνοιξη (Li et al., 2017). Αντικρουόμενα ήταν τα αποτελέσματα για το καλοκαίρι καθώς οι Fallahizadeh et al. (2021) παρατήρησαν θετική συσχέτιση, ενώ οι Li et al. (2017) αρνητική, κάτι που απέδωσαν στο γεγονός πως υπό υψηλά επίπεδα υγρασίας είναι δύσκολο να ανασηκωθεί σκόνη από το έδαφος.

Όπως έχουν δείξει και οι παλαιότερες έρευνες, η βροχή μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα επίπεδα των μεγαλύτερων σε διάμετρο σωματιδίων στην ατμόσφαιρα. Σημαντικό ήταν το πλήθος των ερευνών που κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η βροχή βοηθά στην υγρή απόθεση των PM10, επιφέροντας μείωση στη συγκέντρωσή τους (Fortelli et al., 2016; González-Duque et al., 2015; Jędruszkiewicz et al., 2017; Karagiannidis et al., 2015; Kayes et al., 2019; Lazurca, 2015; Li et al., 2019; Liu et al., 2020; Liu et al., 2020; Zu et al., 2017; Zhang et al., 2018). Εκτός από την υγρή απόθεση των ρύπων, η βροχή, σύμφωνα με τους Zhang et al. (2018) και Li et al. (2015), βοηθά και στη διαβροχή του εδάφους, εμποδίζοντας σκόνη να ανασηκωθεί από αυτό και να επιβαρύνει τον ατμοσφαιρικό αέρα. Οι Gualtieri et al. (2015), από την άλλη, δεν εντόπισαν ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών. Σε σημαντική αρνητική

συσχέτιση των δύο μεγεθών για δύο μήνες του χειμώνα, τον Δεκέμβριο και τον Φεβρουάριο, οδηγήθηκαν οι Baltaci et al. (2019). Παρόμοιο ήταν και το αποτέλεσμα των Liu et al. (2020) οι οποίοι αυτούς τους δύο μήνες παρατήρησαν αύξηση της συγκέντρωσης των PM₁₀ για χαμηλού ύψους βροχή. Αρνητική συσχέτιση κατέγραψαν οι Li et al. (2015) για το καλοκαίρι για υψηλά επίπεδα βροχής, ενώ οι Fallahizadeh et al. (2021) για το φθινόπωρο, και οι Liu et al. (2020) παρατήρησαν πως ελαφριά βροχόπτωση την άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης τους, ενώ τον χειμώνα σε αύξησή της.

Αντικρουόμενα ήταν τα αποτελέσματα των ερευνητών που δραστηριοποιήθηκαν την περίοδο αυτή για τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η θερμοκρασία με τη συγκέντρωση των PM₁₀ στην ατμόσφαιρα, αν και σύμφωνα με τους Li et al. (2017) είναι η μετεωρολογική παράμετρος που επιδρά περισσότερο σε αυτές. Σε, γενικά, αρνητική συσχέτιση κατέληξε η πλειονότητα των επιστημόνων (Kayes et al., 2019; Li et al., 2015; Li et al., 2019; Liu et al., 2020; Zalewska et al., 2021). Δεν απουσιάζουν και εκείνοι που οδηγήθηκαν σε θετική συσχέτιση (González-Duque et al., 2015; He et al., 2017; Munir et al., 2017) ή και σε στατιστικά μη σημαντική (Gualtieri et al., 2015; Lazurca, 2015). Η μεγάλη συγκέντρωση που κατέγραψαν οι Danek et al. (2022) υπό χαμηλές θερμοκρασίες συμβαδίζει με τα πορίσματα των ερευνών των Baltaci et al. (2019), Jędruszkiewicz et al. (2017) και Progiou et al. (2023) πως η μεγαλύτερη συγκέντρωση των PM₁₀ παρατηρείται κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν επικρατούν οι χαμηλότερες θερμοκρασίες του έτους, αλλά και με την παρατήρηση των Baltaci et al. (2019) πως η συγκέντρωση το καλοκαίρι είναι η ελάχιστη. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα αρνητική είναι η συσχέτιση των δύο μεγεθών κατά τους Jędruszkiewicz et al. (2017) και Liu et al. (2020) και θετική σύμφωνα με τους Karagiannidis et al. (2015) και Li et al. (2019). Ξεκάθαρα δεν είναι τα αποτελέσματα και για την άνοιξη, αφού οι Jędruszkiewicz et al. (2017), Li et al. (2019) και Liu et al. (2020) παρατήρησαν αύξηση της συγκέντρωσης των PM₁₀ με αύξηση της θερμοκρασίας αυτή την εποχή, ενώ οι Li et al. (2017) και Nguyen et al. (2017) το ακριβώς αντίθετο. Για τους καλοκαιρινούς μήνες οι μελετητές κλίνουν προς θετική συσχέτιση της συγκέντρωσης των PM₁₀ και της θερμοκρασίας (Baltaci et al., 2019; Karagiannidis et al., 2015; Jędruszkiewicz et al., 2017; Li et al., 2019; Papanastasiou et al., 2015; Zalewska et al., 2021) και για το φθινόπωρο σε αρνητική (Jędruszkiewicz et al., 2017; Li et al., 2019; Liu et al., 2020).

Τα μικρότερα σε μέγεθος σωματίδια τα οποία εντάσσονται στην κατηγορία των PM_{2.5} είναι, επίσης, ένα είδος ρύπου που εξετάστηκε διεξοδικά την τελευταία δεκαετία, τόσο σε μελέτες που ασχολούνται και με τα PM₁₀ ή άλλους ρύπους όσο και σε έρευνες που επικεντρώνονται μόνο σε αυτά. Μελετώντας τον τρόπο με τον οποίο επιδρά η διεύθυνση του ανέμου σε αυτά, οι επιστήμονες κατέληξαν στα συμπεράσματα πως αν ο άνεμος προέρχεται από περιοχές που επικρατεί έντονη δραστηριότητα μπορεί να επιβαρύνει μέρη στα οποία ο αριθμός των πηγών είναι μικρός (Nguyen et al., 2017; Sirithian & Thanatrakolsri, 2022). Για τον λόγο αυτό, σε

πολλά άρθρα, ορισμένες διευθύνσεις ανέμου συνδυάστηκαν με υψηλή συγκέντρωση PM_{2.5} (Liu et al., 2020; Nguyen et al., 2017; Wang & Ogawa, 2015; Zhang et al., 2015; Zhang et al., 2015; Zhang et al., 2018).

Σύμφωνα με μελέτες της περιόδου, η ταχύτητα του ανέμου έχει σημαντικότερη επίδραση στη συγκέντρωση των PM_{2.5} σε σχέση με αυτές των PM₁₀ (Li et al., 2015; Li et al., 2017; Zhang et al., 2018). Αρνητική ήταν η συσχέτιση στην οποία κατέληξαν οι περισσότερες έρευνες (He et al., 2017; Jędruszkiewicz et al., 2017; Li et al., 2015; Li et al., 2017; Li et al., 2019; Liu et al., 2020; Liu et al., 2020; Miao et al., 2018; Yang et al., 2017; Zaman et al., 2025; Zhang et al., 2018), ενώ μικρός ήταν ο αριθμός των μελετών που δεν εντόπισαν σημαντική συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων των PM_{2.5} και της ταχύτητας του ανέμου (Meng et al., 2019; Sirithian & Thanatrakolsri, 2022; Yin et al., 2016). Με την πλειονότητα των ερευνητών συμφωνούν οι Miao et al. (2018) και οι Yin et al. (2016), οι οποίοι κατέγραψαν υψηλή συγκέντρωση μικρών σωματιδίων όταν στην περιοχή μελέτης τους η ταχύτητα του ανέμου ήταν χαμηλή. Οι Munir et al. (2017), από την άλλη, οδηγήθηκαν σε θετική συσχέτιση των δύο μεγεθών, κάτι που απέδωσαν στη μεταφορά αυτών των ρύπων από άλλες παρακείμενες περιοχές στις οποίες η εκπομπή τους ήταν σημαντική. Σε αρνητική συσχέτιση τη χειμερινή περίοδο κατέληξαν οι Zhang et al. (2015) και Zhang et al. (2015), ενώ οι άλλες εποχές του χρόνου δεν μελετήθηκαν εκτενώς, με εξαίρεση στην έρευνα των Zhang et al. (2015) που παρατήρησαν μείωση της συγκέντρωσης των PM_{2.5} όταν η ταχύτητα του ανέμου σημείωνε αύξηση την άνοιξη και το φθινόπωρο.

Ο τρόπος με τον οποίο επιδρά η σχετική υγρασία στη συγκέντρωση των PM_{2.5} αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας πολλών επιστημόνων αυτής της περιόδου. Η σπουδαιότητά της αναδεικνύεται από το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν οι Yin et al. (2016), οι οποίοι στο άρθρο τους υποστηρίζουν πως είναι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τα επίπεδα των PM_{2.5}. Αντικρουόμενα είναι τα αποτελέσματα τα οποία συνήχθησαν, καθώς σε αρνητική συσχέτιση κατέληξαν πολλές από τις μελέτες που δημοσιεύτηκαν αυτή την περίοδο (Li et al., 2019; Liu et al., 2020; Munir et al., 2017; Sirithian & Thanatrakolsri, 2022; Wang & Ogawa, 2015), αλλά εξίσου σημαντικός ήταν και ο αριθμός των ερευνών που βρήκαν θετική, και πολλές φορές, ισχυρή συσχέτιση (He et al., 2017; Miao et al., 2018; Li et al., 2017; Yin et al., 2016; Zhang et al., 2015; Zhang et al., 2015). Οι Miao et al. (2018) αποδίδουν την αύξηση της συγκέντρωσης των PM_{2.5} για αυξημένα επίπεδα σχετικής υγρασίας στο γεγονός πως οι ημι-πτητικές ενώσεις έχουν τη δυνατότητα, υπό τέτοιες συνθήκες, να μετατραπούν σε αιωρούμενα σωματίδια. Υπήρξαν και περιπτώσεις, όμως, όπως αυτής των Zaman et al. (2025), που δεν εντοπίστηκε καμία συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των Yang et al. (2017) η οποία σε κάποιες περιοχές καταλήγει σε θετική και σε άλλες σε αρνητική συσχέτιση των μεγεθών, δείχνοντας πως οι συσχετίσεις εξαρτώνται και από άλλους παράγοντες, εκτός των μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως η τοποθεσία. Μελετώντας κάθε εποχή του χρόνου ξεχωριστά, οι επιστήμονες κατέληξαν σε θετική συσχέτιση των μεγεθών τον

χειμώνα (Kayes et al., 2019; Meng et al., 2019), αρνητική το φθινόπωρο (Wang & Ogawa, 2015), ενώ οι Kayes et al. (2019) οδηγήθηκαν σε αρνητική συσχέτιση για όλες τις εποχές πλην του χειμώνα.

Η βροχή είναι μια μετεωρολογική παράμετρος η οποία μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της συγκέντρωσης των PM₁₀, σύμφωνα με την πλειοψηφία των επιστημόνων, αλλά κατά τους Li et al. (2017) επηρεάζει σημαντικά και τα επίπεδα των PM_{2.5}, και σύμφωνα με τους Li et al. (2015), Li et al. (2019), Liu et al. (2020) και Zhang et al. (2018), περισσότερο από τα PM₁₀. Αρνητική είναι η συσχέτιση των δύο μεγεθών σύμφωνα με τα συμπεράσματα των μελετών αρκετών ερευνητικών ομάδων (Kayes et al., 2019; Li et al., 2019; Liu et al., 2020; Wang & Ogawa, 2015; Zhang et al., 2018), ενώ σε μη σημαντική συσχέτιση κατέληξαν οι Yin et al. (2016). Για τους χειμερινούς μήνες η συσχέτιση είναι αρνητική σύμφωνα με τους Zhang et al. (2015), ενώ στο ίδιο συμπέρασμα, μόνο για τον Φεβρουάριο, όμως, κατέληξαν οι Liu et al. (2020). Μείωση της συγκέντρωσης των PM_{2.5} για αύξηση του ύψους βροχής παρατηρήθηκε την άνοιξη και το φθινόπωρο από τους Zhang et al. (2015), ενώ για το καλοκαίρι δεν κατέληξαν σε ισχυρή συσχέτιση. Αντίθετα, οι Li et al. (2015) συμπέραναν πως η συσχέτιση των δύο μεγεθών το καλοκαίρι είναι αρνητική.

Η θερμοκρασία είναι μεταξύ των μετεωρολογικών παραμέτρων που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων με μικρή διάμετρο, σύμφωνα με τους Li et al. (2017). Τα αποτελέσματα των πρόσφατων ερευνών παραμένουν, για ακόμη μία φορά, αντικρουόμενα. Ορισμένοι μελετητές διαπίστωσαν αρνητική, ενίοτε ισχυρή, συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών (Kayes et al., 2019; Li et al., 2015; Li et al., 2019; Liu et al., 2020; Sirithian & Thanatrakolsri, 2022; Yang et al., 2017). Το εύρημα αυτό ερμηνεύει τη χαμηλή συγκέντρωση που καταγράφηκε κατά τους θερινούς μήνες από τους Jędruszkiewicz et al. (2017), καθώς και την αυξημένη συγκέντρωση κατά τη χειμερινή περίοδο στις περιοχές μελέτης των Jędruszkiewicz et al. (2017) και Asif et al. (2025), ιδίως όταν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ήταν χαμηλή. Αντίθετα, οι He et al. (2017), Miao et al. (2018), Munir et al. (2017) και Wang & Ogawa, (2015) κατέληξαν σε θετική, ενώ οι Yin et al. (2016) και Zaman et al. (2025) δεν εντόπισαν ισχυρή συσχέτιση των μεγεθών. Κατά τη μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στα επίπεδα PM_{2.5} για κάθε εποχή ξεχωριστά, το συμπέρασμα της μελέτης των Jędruszkiewicz et al. (2017) για τον χειμώνα έρχεται σε αντίθεση με το αποτέλεσμα των Li et al. (2019) καθώς, στις έρευνες αυτές προέκυψε αρνητική και θετική συσχέτιση, αντίστοιχα. Συμφωνία υπάρχει μεταξύ των Jędruszkiewicz et al. (2017), Li et al. (2017) και Li et al. (2019) οι οποίοι οδηγήθηκαν σε θετική συσχέτιση της συγκέντρωσης PM_{2.5} και θερμοκρασίας για το καλοκαίρι. Οι Li et al. (2019), επίσης, παρατήρησαν αύξηση της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων που εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία όταν η θερμοκρασία παρουσίαζε μείωση την άνοιξη και το φθινόπωρο. Σε θετική και στατιστικά σημαντική συσχέτιση των δύο μεγεθών κατέληξαν οι Zhang et al. (2015) για όλες τις εποχές, πλην του φθινοπώρου.

3.3.2 Οξείδια του Θείου

Και για την περίοδο 2015 – 2024 οι έρευνες που δημοσιεύτηκαν και εξετάζουν τη σχέση μεταξύ μετεωρολογικών παραμέτρων και της συγκέντρωσης των SO_x είναι σημαντικά λιγότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες μελέτες για άλλους ρύπους. Τα αποτελέσματα τους είναι αρκετά γενικά και σπάνια γίνεται ανάλυση για κάθε μία από τις εποχές του χρόνου.

Η επίδραση της διεύθυνσης του ανέμου στα επίπεδα των SO_x στην ατμόσφαιρα εξετάστηκε από μικρή μερίδα επιστημόνων. Ορισμένοι εξ αυτών παρατήρησαν πως υψηλά επίπεδα SO_x συνδυάζονται με άνεμο που πνέει από συγκεκριμένες διευθύνσεις, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή μελέτης (Lin et al., 2019; Zhang et al., 2015). Άλλες ερευνητικές ομάδες, ωστόσο, κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η συσχέτιση διεύθυνσης ανέμου και συγκέντρωσης SO_x δεν είναι σημαντική (Shelton et al., 2022; Simeunović et al., 2023).

Ποικίλα και αντικρουόμενα ήταν τα συμπεράσματα των μελετητών για τη σχέση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και συγκέντρωσης SO_x . Σε πολλά άρθρα αναφέρεται πως η συσχέτιση δεν είναι στατιστικά σημαντική (Nagy et al., 2020; Shelton et al., 2022; Simeunović et al., 2023; Yang et al., 2017), και σε άλλα πως είναι θετική, λόγω μεταφοράς ρύπων από παρακείμενες βιομηχανικές περιοχές και μονάδες ηλεκτροπαραγωγής (Lin et al., 2019; Mahdi et al., 2020; Radović et al., 2022). Λιγότερες ήταν οι μελέτες που κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση, η οποία αποδόθηκε στη διασπορά που επέρχεται για μεγάλες ταχύτητες ανέμου (Liu et al., 2020). Οι Rahman et al. (2022) σε ορισμένες από τις περιοχές μελέτης τους οδηγήθηκαν σε αρνητική και σε άλλες σε θετική συσχέτιση, δείχνοντας πως οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν σε μία περιοχή δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας που επηρεάζει την ατμοσφαιρική ρύπανση σε αυτή. Τέλος, οι Zhang et al. (2015) ήταν από τους ελάχιστους που εξέτασαν τη συσχέτιση των δύο μεγεθών για κάθε εποχή του χρόνου και σύναξαν το συμπέρασμα πως η συσχέτιση είναι αρνητική όλο τον χρόνο πλην του καλοκαιριού, οπότε στη διασπορά τον ρύπων διαδραματίζει πιο σημαντικό ρόλο η τυρβώδης κίνηση του αέρα.

Τα αποτελέσματα των ερευνών στις οποίες μελετήθηκε ο τρόπος με τον οποίο η συγκέντρωση των SO_x επηρεάζεται από τη σχετική υγρασία, επίσης, δεν συγκλίνουν. Η συσχέτιση των δύο μεγεθών δεν είναι σημαντική κατά τους Kayes et al. (2019), Mahdi et al. (2020), Shelton et al. (2022) και Simeunović et al. (2023), είναι αρνητική σύμφωνα με τις μελέτες των Lin et al. (2019) και Liu et al. (2020) και θετική κατά τους Nagy et al. (2020), Radović et al. (2022), Rahman et al. (2022) και Zhang et al. (2015). Οι τελευταίοι παρατήρησαν πως ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών η συσχέτιση αυτή είναι ισχυρή.

Μικρό ήταν το πλήθος των επιστημόνων που προσπάθησαν να συσχετίσουν τη βροχή με τα επίπεδα των SO_x στην ατμόσφαιρα. Σε αρνητική συσχέτιση οδηγήθηκε η πλειοψηφία αυτών (Lin et al., 2019; Liu et al., 2020; Yang et al., 2017),

ενώ σε ασθενή θετική οι Nagy et al. (2020). Καταληκτικά, οι Rahman et al. (2022) σε άλλες περιοχές εντόπισαν θετική και σε άλλες αρνητική συσχέτιση.

Η θερμοκρασία είναι η μετεωρολογική παράμετρος η οποία, σύμφωνα με τους Rahman et al. (2022), έχει τον πιο σημαντικό αντίκτυπο στη συγκέντρωση των SO_x στην ατμόσφαιρα. Στις μελέτες των Ilić et al. (2018), Yang et al. (2017) και Zhang et al. (2015) η συσχέτιση προέκυψε θετική, ενώ οι ερευνητικές ομάδες Mahdi et al. (2020), Shelton et al. (2022) και Simeunović et al. (2023) κατέληξαν σε μη σημαντική συσχέτιση. Σε, γενικά, αρνητική συσχέτιση οδηγήθηκαν μέσω της ανάλυσης των δεδομένων που συγκέντρωσαν οι Kayes et al. (2019), Liu et al. (2020) και Radović et al. (2022). Οι τελευταίοι μελέτησαν όλες τις εποχές ξεχωριστά βρήκαν το ίδιο αποτέλεσμα για όλο τον χρόνο πλην του χειμώνα, οπότε η συσχέτιση ήταν θετική.

3.3.3 Οξείδια του Αζώτου

Τα NO_x είναι μεταξύ των ρύπων που μελετήθηκαν από πολλούς ερευνητές και την τελευταία δεκαετία. Σε πολλές έρευνες γίνεται ταυτόχρονα μελέτη της επίδρασης των μετεωρολογικών παραμέτρων για όλες τις χημικές ουσίες που ανήκουν στα NO_x , ενώ σε αρκετές από τις έρευνες μελετάται αυτή η σχέση μόνο για το NO_2 . Τα αποτελέσματα, στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι γενικά. Σε λίγες περιπτώσεις γίνεται πιο διεξοδική μελέτη της σχέσης αυτής για κάθε εποχή του χρόνου.

Οι περισσότερες μελέτες που δημοσιεύτηκαν αυτή την περίοδο εξετάζουν τον τρόπο με τον οποίο επιδρά η διεύθυνση του ανέμου στο NO_2 . Οι περισσότερες ερευνητικές ομάδες κατέληξαν στο συμπέρασμα πως, ανάλογα και με την περιοχή μελέτης τους, αυξημένη συγκέντρωση NO_2 καταγράφονται όταν ο άνεμος πνέει από συγκεκριμένες διευθύνσεις και παρασέρνει κατά την κίνησή του αυτόν τον ρύπο από επιβαρυμένες περιοχές (Fei et al., 2016; Karagiannidis et al., 2015; Lin et al., 2019; Sayegh et al., 2016; Zhang et al., 2015). Στην έρευνα των Karagiannidis et al. (2015) αναφέρεται πως η διεύθυνση του ανέμου δεν επιδρά σε μεγάλο βαθμό στα επίπεδα NO_2 στην ατμόσφαιρα καθώς οι πηγές εκπομπής του, όταν εξετάζεται αστικό περιβάλλον, βρίσκονται εντός της περιοχής μελέτης αλλά και επειδή το NO_2 παράγεται και μέσω χημικών διεργασιών.

Η ταχύτητα του ανέμου και η σχέση της με τη συγκέντρωση των NO_x αποτέλεσε ένα ζήτημα με το οποίο ασχολήθηκαν πολλοί επιστήμονες μεταξύ των ετών 2015 και 2024. Στην πλειονότητά τους, οι ερευνητικές ομάδες κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση των δύο μεγεθών, αφού, σύμφωνα με αυτούς, ευνοείται η διασπορά των ρύπων υπό υψηλές ταχύτητες ανέμου (Fei et al., 2016; Gasmi et al., 2017; Gasmi et al., 2017; Grundström et al., 2015; Ilić et al., 2019; Karagiannidis et al., 2015; Liu et al., 2020; Nagy et al., 2020; Rojas et al., 2020). Για το NO , το οποίο μελέτησαν ξεχωριστά οι Karagiannidis et al. (2015), αναφέρεται πως επειδή ο

συγκεκριμένος ρύπος εκπέμπεται από διάφορες πηγές, και κυρίως οχήματα, εντός του αστικού περιβάλλοντος, αυξημένα επίπεδα παρατηρήθηκαν σε περιπτώσεις που ο άνεμος που έπνεε ήταν ήπιος. Θετική συσχέτιση καταγράφηκε από τους Lin et al. (2019) και Sayegh et al. (2016) κατά τη διάρκεια ημερών που ο άνεμος έπνεε από διευθύνσεις οι οποίες επέτρεπαν τη μεταφορά αυτών των ρύπων από άλλες παρακείμενες. Μελέτη κάθε εποχής ξεχωριστά έγινε στις έρευνες των Karagiannidis et al. (2015) και Zhang et al. (2015). Οι Karagiannidis et al. (2015) κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση τόσο τον χειμώνα όσο και το καλοκαίρι, σημειώνοντας, όμως, πως το καλοκαίρι ήταν λιγότερο ισχυρή. Οι Zhang et al. (2015) συμπέραναν πως η συσχέτιση είναι αρνητική όλο τον χρόνο, εκτός των καλοκαιρινών μηνών, οπότε η κατακόρυφη κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα διαδραματίζει σπουδαιότερο ρόλο στη μείωση της συγκέντρωσης των NO_x .

Γενικά και αντικρουόμενα ήταν τα αποτελέσματα των μελετητών για την επίδραση της σχετικής υγρασίας στα επίπεδα των NO_x στην ατμόσφαιρα. Σε αρνητική συσχέτιση κατέληξαν οι Ilić et al. (2019) και Lin et al. (2019), ενώ η πλειονότητα των ερευνητών κατέληξε σε θετική συσχέτιση (Gasmi et al., 2017; Gasmi et al., 2017; Zhang et al., 2015), ιδιαίτερα ισχυρή τον χειμώνα κατά τους Zhang et al. (2015).

Μικρό ήταν το πλήθος των ερευνών που μελέτησαν τη σχέση που συνδέει τη βροχή και τη συγκέντρωση των NO_x . Όλοι οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα πως η συσχέτιση είναι αρνητική (Karagiannidis et al., 2015; Lin et al., 2019; Liu et al., 2020; Rojas et al., 2020), άλλοτε περισσότερο και άλλοτε λιγότερο ισχυρή.

Η συσχέτιση της θερμοκρασίας και των επιπέδων των NO_x στην ατμόσφαιρα εξετάστηκε σε σημαντικό αριθμό άρθρων που δημοσιεύτηκαν αυτή την περίοδο. Η συντριπτική πλειοψηφία παρατήρησε αρνητική συσχέτιση των δύο μεγεθών (Gasmi et al., 2017; Gasmi et al., 2017; Ilić et al., 2019; Lin et al., 2019; Liu et al., 2020; Rojas et al., 2020; Sayegh et al., 2016), κάτι που εξηγείται αν ληφθεί υπόψιν πως υπό υψηλές θερμοκρασίες οι συνθήκες γίνονται ευνοϊκές για την πραγματοποίηση χημικών αντιδράσεων, όπως αυτής του σχηματισμού του O_3 , στις οποίες τα NO_x συμμετέχουν. Σε θετική συσχέτιση κατέληξαν οι Karagiannidis et al. (2015) αλλά και οι Papanastasiou et al. (2015) για τις ημέρες του καλοκαιριού που επικρατούσαν συνθήκες καύσωνα.

3.3.4 Μονοξείδιο του Άνθρακα

Η επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στη συγκέντρωση του CO απασχόλησε αρκετές ερευνητικές ομάδες που δραστηριοποιήθηκαν την περίοδο 2015 – 2024. Οι περισσότερες από αυτές, ωστόσο, επικεντρώθηκαν σε ορισμένες μετεωρολογικές παραμέτρους. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν αφορούν γενικές τάσεις για τη συγκέντρωση του ρύπου αυτού για μεταβολή κάποιας μετεωρολογικής

παραμέτρου και σπάνια γίνεται ανάλυση της σχέσης αυτής για κάθε εποχή του χρόνου.

Η διεύθυνση του ανέμου και ο τρόπος με τον οποίο επιδρά στα επίπεδα του *CO* στην ατμόσφαιρα αναφέρεται σε πολύ μικρό αριθμό μελετών. Συγκεκριμένα, οι Rojas et al. (2020) και οι Zhang et al. (2015) παρατήρησαν πως υψηλή συγκέντρωση του ρύπου καταγράφηκε όταν στην περιοχή μελέτης έπνεαν άνεμοι από συγκεκριμένες διευθύνσεις.

Η συσχέτιση ταχύτητας ανέμου και συγκέντρωσης *CO* απασχόλησε μεγαλύτερη μερίδα ερευνητών αυτής της περιόδου. Η πλειοψηφία αυτών κατέγραψαν τη μικρότερη συγκέντρωση του ρύπου όταν η ταχύτητα του ανέμου ήταν μεγάλη, με συνέπεια να οδηγηθούν σε αρνητική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών (Ahmed et al., 2015; Asadifard & Masoudi, 2018; Liu et al., 2020; Njoku et al., 2022; Rahman et al., 2022; Rojas et al., 2020). Σε δύο περιπτώσεις ερευνών η συσχέτιση προέκυψε θετική (Mahdi et al., 2020; Nagy et al., 2020), κάτι που αποδόθηκε από τους ερευνητές σε μεταφορά *CO* από πηγές του ρύπου που εδράζονται πλησίον της περιοχής, όπως μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και βιομηχανική περιοχή. Καταληκτικά, οι Zhang et al. (2015) που μελέτησαν τη σχέση αυτών των μεγεθών για κάθε μία από τις εποχές του χρόνου κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση όλο τον χρόνο πλην του καλοκαιριού. Οι ίδιοι αναφέρουν πως αυτό οφείλεται στην εντονότερη κατακόρυφη κίνηση του αέρα που παρατηρείται αυτή την εποχή και έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει τις συγκεντρώσεις των ρύπων σε μεγαλύτερο βαθμό.

Αντικρουόμενα ήταν τα συμπεράσματα τα οποία συνήχθησαν από τις μελέτες αυτής της περιόδου σχετικά με το πώς επηρεάζει η σχετική υγρασία τη συγκέντρωση του *CO*. Συγκεκριμένα, σε αρνητική συσχέτιση κατέληξαν οι Asadifard & Masoudi, (2018), Liu et al. 2020 και Rahman et al. (2022), σε θετική οι Njoku et al. (2022), Rana et al. (2015) και οι Mahdi et al. (2020) και σε μη σημαντική οι Ahmed et al. (2015). Σε δύο άρθρα που δημοσιεύτηκαν αυτή την περίοδο πραγματοποιήθηκε μελέτη της σχέσης αυτής ξεχωριστά για τις εποχές του χρόνου. Ειδικότερα, οι Zhang et al. (2015) παρατήρησαν πως η συσχέτιση ήταν θετική για όλο τον χρόνο, και στατιστικά πιο ισχυρή, σε σχέση με τις υπόλοιπες εποχές, τον χειμώνα, ενώ οι Kayes et al. (2019) οδηγήθηκαν σε θετική συσχέτιση μόνο τον χειμώνα.

Μικρό ήταν το πλήθος των ερευνών που ασχολήθηκαν με τη συσχέτιση της βροχής με τα επίπεδα του *CO* στην ατμόσφαιρα και τα αποτελέσματά τους δεν συγκλίνουν. Ειδικότερα, οι Rahman et al. (2022) κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η συσχέτιση είναι θετική, οι Liu et al. (2020) αρνητική και σύμφωνα με τους Rojas et al. (2020) δεν υπάρχει επίδραση της βροχής στη συγκέντρωση του ρύπου αυτού.

Η θερμοκρασία ήταν μία από τις μετεωρολογικές παραμέτρους για την οποία γίνεται λόγος σε σημαντικό αριθμό μελετών που εξετάζουν την επίδραση αυτών στα επίπεδα του *CO* στην ατμόσφαιρα, αν και δεν υπάρχουν μελέτες με αποτελέσματα που αφορούν κάθε εποχή του έτους. Η πλειοψηφία των ερευνητών κατέληξε σε αρνητική συσχέτιση των δύο μεγεθών (Ahmed et al., 2015; Kayes et al., 2019; Liu et

al., 2020; Njoku et al., 2022; Rojas et al., 2020; Ul-Haq et al., 2015), ενώ λίγοι ήταν αυτοί που κατέγραψαν αύξηση συγκέντρωσης με αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος (Asadifard & Masoudi, 2018; Mahdi et al., 2020; Rahman et al., 2022).

3.3.5 Υδρογονάνθρακες

Έντονο ήταν το ενδιαφέρον των ερευνητών που δραστηριοποιήθηκαν αυτή την περίοδο για την επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στις συγκεντρώσεις των υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα. Μεγάλο ήταν το πλήθος των μελετών στις οποίες εξετάζεται αυτή η σχέση για τους PAHs, με τα αποτελέσματα άλλοτε να συμφωνούν και άλλοτε να αποκλίνουν μεταξύ τους.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διεύθυνση του ανέμου μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά στην αύξηση ή τη μείωση των επιπέδων πολλών ρύπων στην ατμόσφαιρα, κάτι που, όμως, σύμφωνα με τις μελέτες που δημοσιεύτηκαν μεταξύ 2015 και 2024, δεν ισχύει για τους PAHs. Αυτό προκύπτει από το γεγονός πως όλοι οι ερευνητές που μελέτησαν τον τρόπο με τον οποίο συνδέεται αυτή η μετεωρολογική παράμετρος με τη συγκέντρωση των PAHs κατέληξαν σε μη σημαντική συσχέτιση (Birgul & Tasdemir, 2015; Liu et al., 2015; Panopoulou et al., 2018; Siudek, 2022).

Μεγαλύτερος ήταν ο αριθμός των άρθρων στα οποία γίνεται προσπάθεια συσχέτισης της ταχύτητας του ανέμου και των επιπέδων PAHs στην ατμόσφαιρα. Η πλειοψηφία των ερευνητικών ομάδων κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση των δύο μεγεθών (Amarillo & Carreras, 2016; Elorduy et al., 2016; Khan et al., 2018; Panopoulou et al., 2018; Vuong et al., 2020). Σε μη σημαντική συσχέτιση οδηγήθηκαν οι Birgul & Tasdemir (2015), Liu et al. (2015) και Siudek (2022). Ο τελευταίος αναφέρει πως αυτό συμβαίνει εξαιτίας του γεγονότος πως οι άνεμοι στον τόπο όπου διεξήχθη η έρευνά του αφενός μεταφέρουν PAHs από άλλες παρακείμενες περιοχές προς αυτόν, αφετέρου απομακρύνουν αυτούς που εκπέμπονται στην περιοχή μελέτης του. Τέλος, οι Liu et al. (2018) εξέτασαν τη σχέση αυτή για κάθε εποχή του χρόνου και κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση τους ανοιξιάτικους και καλοκαιρινούς μήνες.

Η σχετική υγρασία είναι μια από τις μετεωρολογικές παραμέτρους για την οποία γίνεται λόγος σε πολλές από τις μελέτες αυτής της περιόδου, με τα συμπεράσματα για τον τρόπο που επιδρά στη συγκέντρωση των PAHs να είναι ποικίλα. Σε θετική συσχέτιση οδηγήθηκαν μέσω της ανάλυσης των δεδομένων που συγκέντρωσαν οι Jakovljević et al. (2018), Khan et al. (2018) και Liu et al. (2015). Από την άλλη πλευρά, οι Liu et al. (2016) και Vuong et al. (2020) κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση. Σε σύγκριση με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους, συσχέτιση σχετικής υγρασίας και επιπέδων PAHs στην ατμόσφαιρα για κάθε εποχή του χρόνου γίνεται σε μεγαλύτερο πλήθος ερευνών. Συγκεκριμένα, αρνητική συσχέτιση το καλοκαίρι ήταν το συμπέρασμα το οποίο εξήχθη από τους Zhang et al. (2018) και Vuong et al. (2020). Στον αντίποδα, οι Liu et al. (2018) παρατήρησαν αύξηση της συγκέντρωσης

PAHs για μείωση σχετικής υγρασίας όλες τις εποχές πλην του καλοκαιριού. Καταληκτικά, σε θετική, στατιστικά σημαντική συσχέτιση των δύο μεγεθών κατέληξαν οι Pehneć et al. (2016) για τον χειμώνα, ενώ ίδιο, όχι όμως εξίσου ισχυρό, ήταν και το αποτέλεσμα για το καλοκαίρι.

Μικρό ήταν το πλήθος των μελετών που εξετάζουν τη συσχέτιση της βροχής και των επιπέδων PAHs στην ατμόσφαιρα και τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουν δεν είναι σύμφωνα μεταξύ τους. Οι Jakovljević et al. (2018) και Khan et al. (2018) οδηγήθηκαν σε μη σημαντική, οι Liu et al. (2015) σε θετική, ενώ ο Siudek (2022), ο οποίος μελέτησε και κάθε εποχή του χρόνου ξεχωριστά, σε αρνητική συσχέτιση, ιδίως κατά τους χειμερινούς μήνες.

Κατά την περίοδο 2015 – 2024, η βιβλιογραφία είναι ιδιαίτερα πλούσια ως προς τη μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στη συγκέντρωση των PAHs στην ατμόσφαιρα. Ομοφωνία υπάρχει για το είδος της συσχέτισης αυτών των δύο μεγεθών, καθώς η συντριπτική πλειοψηφία των ερευνητών κατέληξε σε αρνητική συσχέτιση (Amarillo & Carreras, 2016; Birgul & Tasdemir, 2015; Elorduy et al., 2016; Jakovljević et al., 2018; Khan et al., 2018; Liu et al., 2015; Liu et al., 2016; Pehneć et al., 2016; Siudek, 2022). Η αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, κατά τους Khan et al. (2018), βοηθά στην εξάτμιση των PAHs, ενώ για χαμηλές θερμοκρασίες ευνοείται η συμπύκνωσή τους, και, επομένως, η αύξηση των σωματιδιακών PAHs στην ατμόσφαιρα. Οι Zhang et al. (2018) ήταν μεταξύ των ερευνητικών ομάδων που μελέτησαν τη συσχέτιση και για κάθε εποχή του χρόνου και οδηγήθηκαν σε αρνητική συσχέτιση τον χειμώνα αλλά θετική το καλοκαίρι. Οι Liu et al. (2018) συμπέραναν το ίδιο για τον χειμώνα, αλλά για τις άλλες εποχές η συσχέτιση που κατέγραψαν δεν ήταν σημαντική. Οι Vuong et al. (2020), τέλος, κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση τους χειμερινούς μήνες.

3.3.6 Όζον

Η επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στη συγκέντρωση του τροποσφαιρικού O_3 εξετάστηκε από αρκετούς ερευνητές την τελευταία δεκαετία. Στην πλειονότητά τους οι μελέτες αυτές εξετάζουν τη συσχέτιση των μετεωρολογικών παραμέτρων για πολλούς ρύπους, μεταξύ αυτών και το O_3 . Άλλες επικεντρώνονται σε συγκεκριμένους ρύπους που συνδέονται με το O_3 και μπορούν να επηρεάσουν τη συγκέντρωσή του, όπως τα NO_x και τα PM. Πολλές από τις έρευνες αυτές, εκτός ορισμένων γενικών συμπερασμάτων, μελετούν και τη συσχέτιση των επιπέδων O_3 και των μετεωρολογικών παραμέτρων σε περιόδους μικρότερων του έτους.

Για τη διεύθυνση του ανέμου και τον τρόπο με τον οποίο αυτή συνδέεται με τη συγκέντρωση του O_3 τα αποτελέσματα είναι ποικίλα. Στην πλειονότητά τους οι ερευνητές παρατήρησαν πως αυξημένα επίπεδα O_3 επικρατούν για συγκεκριμένες διευθύνσεις ανέμου στον τόπο τον οποίο μελετούν (Jasaitis et al., 2016; Sharma et

al., 2017; Zhang et al., 2015). Αυτό αποδόθηκε από τους Sharma et al. (2017) και Zhang et al. (2015) στην επιβάρυνση των περιοχών μελέτης τους από ρύπους που εκπέμπονται σε κοντινές περιοχές και συμμετέχουν στην αντίδραση παραγωγής του O_3 . Σε μη σημαντική συσχέτιση κατέληξαν οι Karagiannidis et al. (2015), ενώ στο ίδιο αποτέλεσμα, μόνο για την περίοδο του καλοκαιριού, όμως, κατέληξαν και οι Zhang et al. (2015).

Μεγάλος ήταν ο αριθμός των άρθρων που δημοσιεύτηκαν αυτή την περίοδο στα οποία γίνεται αναφορά στη συσχέτιση της ταχύτητας του ανέμου και της συγκέντρωσης του O_3 , με τα αποτελέσματα να διαφέρουν τόσο μεταξύ διαφορετικών μελετών, όσο και μεταξύ διαφορετικών περιοχών μελέτης στην ίδια μελέτη. Αρκετές ερευνητικές ομάδες οδηγήθηκαν σε θετική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών, κάτι που σύμφωνα με αυτούς, πιθανώς να οφείλεται στη μεταφορά σε άλλες περιοχές ουσιών που συμμετέχουν στις ατμοσφαιρικές διεργασίες της καταστροφής του O_3 (Jasaitis et al., 2016; Karagiannidis et al., 2015; Sharma et al., 2017; Zhang et al., 2015). Θετική ήταν η συσχέτιση στην οποία κατέληξαν και οι Liu et al. (2020) και Zhao et al. (2020), κάτι που αποδόθηκε από τους τελευταίους στη μεταφορά O_3 από άλλες περιοχές. Στην έρευνά τους, ωστόσο, οι Zhao et al. (2020) κατέγραψαν και αρνητική συσχέτιση των δύο μεγεθών σε κάποιες από τις περιοχές μελέτης. Αιτιολόγησαν αυτή τους την παρατήρηση αναφέροντας πως οι πρόδρομοι ρύποι του O_3 , όταν επικρατούν υψηλές ταχύτητες ανέμου, μεταφέρονται μακριά από τις πηγές εκπομπής τους, επιβαρύνοντας άλλες περιοχές. Σε αρνητική συσχέτιση κατέληξαν και οι Yang et al. (2020), η οποία, σύμφωνα με τους ίδιους οφείλεται στη διασπορά των ρύπων. Οι Karagiannidis et al. (2015) και Zhang et al. (2015) μελέτησαν τη σχέση των μεγεθών αυτών για κάθε εποχή του χρόνου και κατέγραψαν θετική συσχέτιση τον χειμώνα. Αντικρουόμενα ήταν τα αποτελέσματά τους για το καλοκαίρι, καθώς οι Karagiannidis et al. (2015) κατέγραψαν, επίσης, θετική συσχέτιση, ενώ οι Zhang et al. (2015) αρνητική. Οι Zhang et al. (2015), καταληκτικά, βρήκαν πως η συσχέτιση και κατά τους φθινοπωρινούς μήνες είναι αρνητική.

Ο τρόπος με τον οποίο η σχετική υγρασία επηρεάζει τα επίπεδα του τροποσφαιρικού O_3 αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης για μεγάλη μερίδα των επιστημόνων που δραστηριοποιήθηκαν αυτή την περίοδο, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζουν, γενικά, μια σύγκλιση. Σε αρνητική συσχέτιση κατέληξε η συντριπτική πλειοψηφία των μελετητών (Gong et al., 2022; Kayes et al., 2019; Liu et al., 2020; Pu et al., 2017; Sharma et al., 2017; Yang et al., 2020; Zhang et al., 2015), ενώ μόνο στην έρευνα των Jasaitis et al. (2016) η συσχέτιση προέκυψε μη σημαντική. Για τις επιμέρους εποχές του χρόνου, αρνητική είναι η συσχέτιση στην οποία κατέληξαν οι Chen et al. (2019) και οι Zhang et al. (2015) για τον χειμώνα, ασθενώς αρνητική την άνοιξη σύμφωνα με τις έρευνες των Cerón Bretón et al. (2017) και Chen et al. (2019), αρνητική το καλοκαίρι κατά τους Chen et al. (2019) και Zhang et al. (2015), και σε μη σημαντική για το φθινόπωρο οδηγήθηκαν οι Chen et al. (2019).

Αντικρουόμενα ήταν τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξαν όσοι ερευνητές μελέτησαν τη συσχέτιση της βροχής και της συγκέντρωσης O_3 . Στην έρευνα των Jasaitis et al. (2016) καταγράφηκε πτώση της συγκέντρωσης για μέρες με βροχή. Το ακριβώς αντίστροφο παρατήρησαν οι Karagiannidis et al. (2015). Οι Liu et al. (2020) κατέληξαν σε αρνητική συσχέτιση μεταξύ επιπέδων O_3 και αυτής της μετεωρολογικής παραμέτρου, ενώ οι Zhang et al. (2015) παρατήρησαν πως για ελαφριά βροχή η συγκέντρωση του O_3 παρουσίαζε σημαντική μείωση. Τέλος, οι Chen et al. (2019), οι οποίοι μελέτησαν τη συσχέτιση για κάθε εποχή του χρόνου, κατέγραψαν αρνητική συσχέτιση την άνοιξη και το καλοκαίρι, και μη σημαντική τον υπόλοιπο χρόνο.

Σύγκλιση μεταξύ των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από τις μελέτες που δημοσιεύτηκαν αυτή την περίοδο υπάρχει και για τη συσχέτιση της θερμοκρασίας και των επιπέδων O_3 στην τροπόσφαιρα. Η πλειονότητα των ερευνητών κατέληξε σε θετική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών (Chen et al., 2019; Gong et al., 2022; Jasaitis et al., 2016; Liu et al., 2020; Pu et al., 2017; Sharma et al., 2017; Yang et al., 2020; Zhao et al., 2020). Εξαίρεση αποτελεί η μελέτη των Karagiannidis et al. (2015), οι οποίοι οδηγήθηκαν σε μη σημαντική συσχέτιση. Τόσο οι Zhang et al. (2015), όσο και οι Zhang et al. (2015), κατέγραψαν σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης για αύξηση της θερμοκρασίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, πλην των χειμερινών μηνών. Οι Parapanastasiou et al. (2015), οι οποίοι μελέτησαν την ποιότητα του αέρα κατά τη διάρκεια περιόδων καύσωνα, παρατήρησαν, τέλος, πως τα επίπεδα του O_3 αυτές τις ημέρες ήταν αυξημένα.

4. Δεδομένα και Μεθοδολογία

4.1 Πηγές Δεδομένων

4.1.1 Δεδομένα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Τα δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα του ΥΠΕΝ, αφορούν την πόλη της Λάρισας και καλύπτουν την περίοδο 2007 – 2023. Η πρόσβαση σε αυτά είναι ελεύθερη και προέρχονται από το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, δηλαδή αποτελούν επίσημες μετρήσεις σταθμών παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που βρίσκονται εγκατεστημένοι από το 2001 σε όλη την Ελλάδα. Οι σταθμοί στην Αττική και ένας στην Βοιωτία λειτουργούν υπό το Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας του Υπουργείου, ενώ οι υπόλοιποι λειτουργούν υπό την ευθύνη των περιφερειακών διοικήσεων.

Ο σταθμός μέτρησης από τον οποίο αντλήθηκαν τα δεδομένα βρίσκεται τοποθετημένος στο κτίριο της Περιφέρειας Θεσσαλίας, στο κέντρο της πόλης της Λάρισας (39.63553° N, 22.414549° E) σε υψόμετρο 85m. Χαρακτηρίζεται ως αστικός-υποβάθρου και οι ρύποι τους οποίους μετράει είναι NO_x , O_3 και PM10 ([Εικόνα 2](#)).

Τα δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία αφορούν αποκλειστικά τη συγκέντρωση των PM10 και καλύπτουν την περίοδο 2007 – 2023. Σημειώνεται ότι για τα έτη 2007 – 2016 οι διαθέσιμες τιμές αντιστοιχούν σε ημερήσιες μέσες τιμές, ενώ από το 2017 έως το 2023 καταγράφονται ωριαίες τιμές.

4.1.2 Μετεωρολογικά Δεδομένα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα για την πόλη της Λάρισας που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή παραχωρήθηκαν, έπειτα από σχετική αίτηση, από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ). Αφορούν, επίσης, την περίοδο 2007 – 2023 και ο μετεωρολογικός σταθμός από τον οποίον προήλθαν τα δεδομένα ανήκει στο Δίκτυο Μετεωρολογικών Σταθμών Επιφανείας της ΕΜΥ, ο οποίος βρίσκεται εντός της Αεροπορικής Βάσης Λάρισας (39.64598° N, 22.46015° E) σε υψόμετρο 74m ([Εικόνα 2](#)).

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και την βροχόπτωση. Για τις δύο πρώτες μετεωρολογικές παραμέτρους οι μετρήσεις ήταν διαθέσιμες με χρονική ανάλυση τριών ωρών και καταγράφονταν σε

ώρα UTC. Για την βροχόπτωση, οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν δύο φορές ημερησίως, στις 06:00 και 18:00 UTC.



Εικόνα 2: Χάρτης με τις τοποθεσίες του σταθμού μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης και του μετεωρολογικού σταθμού (Google Earth).

4.2 Περιοχή Μελέτης

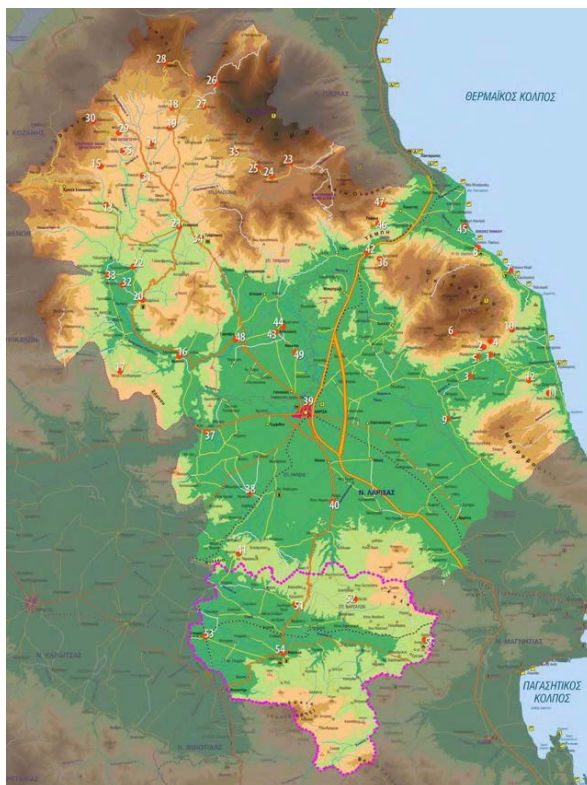
4.2.1 Γενικές Πληροφορίες και Γεωμορφολογικά Χαρακτηριστικά

Η Λάρισα είναι πρωτεύουσα της περιφέρειας Θεσσαλίας και ανήκει στις μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδας, τόσο όσον αφορά τον πληθυσμό της όσο και την έκταση της. Ο δήμος Λαρισαίων, με τη μορφή που έχει αποκτήσει σήμερα μετά την εφαρμογή του προγράμματος «Καλλικράτης», καλύπτει έκταση 335,12km², και, σύμφωνα με την τελευταία απογραφή, σε αυτόν κατοικούν μόνιμα 164.095 άνθρωποι (ΕΛΣΤΑΤ, 2023). Ανήκει στην περιφερειακή ενότητα Λάρισας, βρίσκεται στον Θεσσαλικό κάμπο, έναν από τους μεγαλύτερους πεδινούς σχηματισμούς της Ελλάδας, στο κέντρο σχεδόν της ηπειρωτικής χώρας και διασχίζεται από τον Πηνειό ποταμό ([Εικόνα 3](#)). Διαθέτει σημαντικό αριθμό αρχαίων, ρωμαϊκών και βυζαντινών μνημείων, ενώ, λόγω της θέσης της, αποτελεί συγκοινωνιακό κόμβο της ηπειρωτικής Ελλάδας, καθώς συνδέει οδικά και σιδηροδρομικά τη Βόρεια με τη Νότια χώρα.

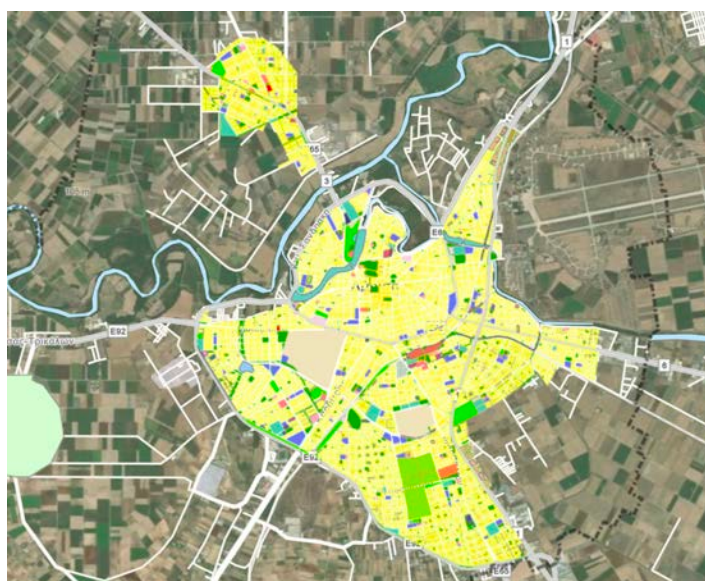
4.3.2 Χρήσεις Γης

Η πόλη της Λάρισας αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα αστικά κέντρα της Ελλάδας και το πολυπληθέστερο της Θεσσαλίας. Το κεντρικό της τμήμα είναι πυκνοδομημένο, με πολυώροφα κτίρια να δεσπόζουν. Αυτά συνιστούν κύριες κατοικίες αλλά φιλοξενούν και εμπορικά καταστήματα, επαγγελματικές στέγες,

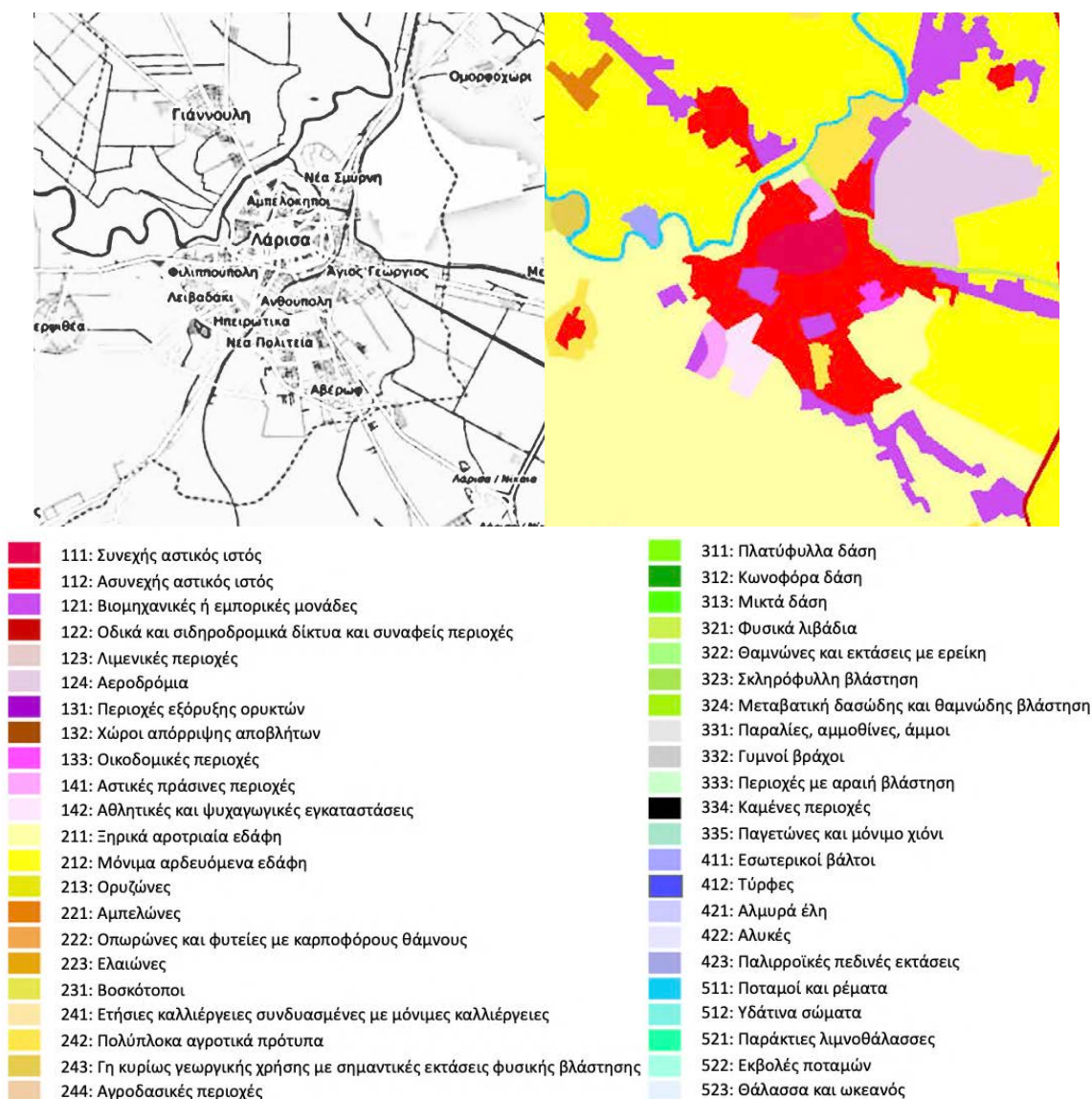
σχολικές μονάδες και δημόσιες υπηρεσίες. Δεν απουσιάζουν, ωστόσο, οι χώροι αθλητισμού και οι κοιτίδες πρασίνου, όπως πάρκα και άλση. Εμφανής είναι και η παρουσία στρατιωτικών εγκαταστάσεων, τόσο εντός του αστικού ιστού όσο και εκτός αυτού (Εικόνα 4). Απομακρυνόμενοι από το κέντρο, παρουσιάζεται μια σταδιακή μετάβαση από τις πυκνοκατοικημένες περιοχές σε χώρους που είναι εγκατεστημένες αρκετές βιομηχανικές μονάδες ή προορίζονται για καλλιέργεια (Εικόνα 5).



Εικόνα 3: Γεωφυσικός χάρτης της περιφερειακής ενότητας Λάρισας. Στο κέντρο με κόκκινο σημειώνεται η πόλη της Λάρισας (Ιστοσελίδα «Δήμος Φαρσάλων»).



Εικόνα 4: Πολυεδομικός χάρτης Λάρισας (Δήμος Λαρισαίων).

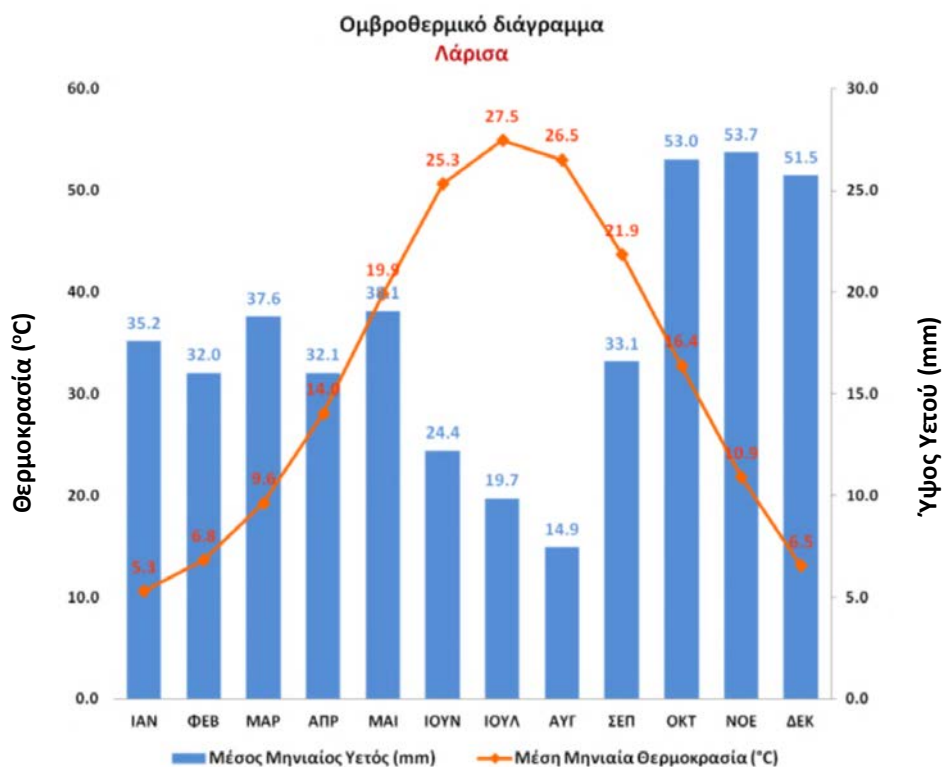


Εικόνα 5: Χάρτης της Λάρισας (πάνω αριστερά), χάρτης Λάρισας με τις χρήσεις γης κατά Corine 2018 (πάνω δεξιά) και το υπόμνημα για τον χάρτη με τις χρήσεις γης (κάτω).

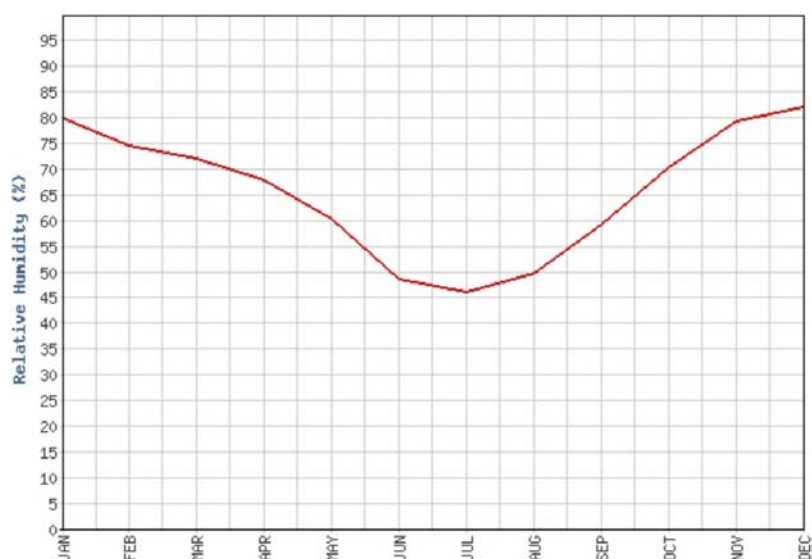
4.3.3 Το Κλίμα της Λάρισας

Το κλίμα της Λάρισας χαρακτηρίζεται ως ηπειρωτικό με πολύ θερμά καλοκαίρια, οπότε και συχνά η θερμοκρασία ξεπερνά τους 35°C και ενίοτε και τους 40°C, και ψυχρούς χειμώνες, ενώ συχνές και έντονες είναι οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, τόσο κατά τη διάρκεια της μέρας όσο και μεταξύ των διαφορετικών εποχών. Η μέση θερμοκρασία για τα έτη 1955 – 2010 ήταν 15,8°C, με τη χαμηλότερη να σημειώνεται τον Ιανουάριο (5,3°C) και τη μέγιστη τον Ιούλιο (27,5°C) ([Σχήμα 1](#)). Η μέση ετήσια σχετική υγρασία για την ίδια περίοδο ήταν 66%, με την ελάχιστη τιμή της να σημειώνεται τον Ιούλιο και η μέγιστη τον Δεκέμβριο ([Σχήμα 2](#)). Σε ένα έτος τα το συνολικό ύψος των κατακρημνισμάτων ήταν περίπου στα 425mm, κατά μέσο όρο.

Τα μεγαλύτερα ύψη βροχής καταγράφονται τον Νοέμβριο και τα χαμηλότερα τον Αύγουστο (Σχήμα 1). Ο μέσος όρος ημερών με υετό είναι μεγαλύτερος τον Δεκέμβριο και μικρότερος τον Αύγουστο. Πλην του Ιανουαρίου και του Δεκεμβρίου, η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου είναι η ανατολική, ενώ για τους δύο αυτούς μήνες κυριαρχεί ο βόρειος άνεμος. Σημαντικός είναι, όμως, και ο αριθμός των ημερών που επικρατεί άπνοια ή πολύ μικρής έντασης άνεμοι (EMY).



Σχήμα 1: Ομβροθερμικό διάγραμμα για την πόλη της Λάρισας για την περίοδο 1955 – 2010 (EMY).



Σχήμα 2: Διάγραμμα σχετικής υγρασίας ανά μήνα του έτους για την πόλη της Λάρισας για την περίοδο 1955 – 2010 (EMY).

4.4 Μεθοδολογία Επεξεργασίας Δεδομένων

4.4.1 Δεδομένα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Για την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής, αρχικά, έγινε έλεγχος πληρότητας των διαθέσιμων δεδομένων για την ατμοσφαιρική ρύπανση στην πόλη της Λάρισας. Από τον έλεγχο αυτό προέκυψε πως την καλύτερη πληρότητα για μεγάλο χρονικό διάστημα είχαν μόνο τα δεδομένα για τα PM10 οπότε επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν μόνο αυτά.

Για τη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην πόλη της Λάρισας έχει γίνει ανάλυση δεδομένων με περιγραφική στατιστική με τη χρήση του στατιστικού λογισμικού IBM SPSS Statistics (έκδοση 29.0.2.0) και έχουν κατασκευαστεί διαγράμματα με τη χρήση του λογισμικού MATLAB (έκδοση R2024b), λόγω των πολλών δυνατοτήτων που προσφέρει για την επεξεργασία, ανάλυση και οπτικοποίηση των δεδομένων. Τα δεδομένα οργανώθηκαν με βάση διαφορετικά χρονικά διαστήματα ώστε να δοθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα για τα επίπεδα των PM10 στην πόλη σε ετήσια, εποχική, ημερήσια και ωριαία βάση, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Μεταξύ άλλων, μελέτη της συγκέντρωσης του ρύπου πραγματοποιήθηκε για δύο περιόδους, την ψυχρή, που καλύπτει τους μήνες από τον Νοέμβριο μέχρι και τον Μάρτιο, και τη θερμή, που ορίστηκε η περίοδος από τον Μάιο έως και τον Σεπτέμβριο. Ο Απρίλιος και ο Οκτώβριος θεωρήθηκαν μεταβατικοί μήνες και δεν συμπεριλήφθηκαν σε κάποια από τις δύο αυτές περιόδους.

Αρχικά, κατασκευάστηκε ένα διάγραμμα στο οποίο για κάθε έτος παρουσιάζεται ο αριθμός των υπερβάσεων του ημερήσιου ορίου έκθεσης της ΕΕ και του ΠΟΥ σε σχέση με τον επιτρεπτό αλλά και η πληρότητα των μετρήσεων. Μέσα από αυτό το διάγραμμα αφενός γίνεται παρουσίαση αυτών των πληροφοριών και αφετέρου δίνεται η δυνατότητα να αξιολογηθεί η επάρκεια των δεδομένων ανά έτος, ώστε να κριθεί αν τα αποτελέσματα είναι αντιπροσωπευτικά, να εντοπιστούν έτη στα οποία καταγράφηκαν αυξημένα επίπεδα PM10 αλλά και να εκτιμηθεί η συμμόρφωση με τις θεσμικές απαιτήσεις ή αν υπάρχει ανάγκη λήψης περαιτέρω μέτρων. Σημειώνεται, τέλος, πως, σύμφωνα με την οδηγία της ΕΕ 2008/50/ΕΚ, οι ημέρες με επεισόδια μεταφοράς αφρικανικής σκόνης μπορούν να εξαιρεθούν από την αξιολόγηση υπέρβασης των οριακών τιμών PM10, καθώς θεωρούνται φυσικές πηγές. Ωστόσο, στην παρούσα ανάλυση δεν έχει αφαιρεθεί η επίδραση των ημερών με επεισόδια μεταφοράς αφρικανικής σκόνης, και ως εκ τούτου αυτές οι ημέρες έχουν συμπεριληφθεί στα αποτελέσματα.

Ένα ακόμα διάγραμμα που κατασκευάστηκε είναι αυτό για την ημερήσια μέση συγκέντρωση των PM10 για όλο το διάστημα που εξετάστηκε. Για τα έτη 2007 – 2016 διαθέσιμες ήταν τιμές ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης, ενώ για τα έτη 2017 – 2023 οι τιμές αφορούσαν ωριαίες μέσες τιμές. Για να κατασκευαστεί το διάγραμμα

έγινε πρώτα υπολογισμός της ημερήσιας μέσης τιμής και για τα έτη 2017 – 2023, αγνοώντας τις ελλείπουσες τιμές. Στο διάγραμμα αυτό έχουν προστεθεί και δύο οριζόντιες γραμμές που σημειώνουν τα ανώτατα επιτρεπτά όρια συγκέντρωσης που έχουν θεσπίσει ΕΕ και ΠΟΥ για την έκθεση των πολιτών στη διάρκεια μίας μέρας.

Έπειτα κατασκευάστηκε ένα γράφημα για την ετήσια μέση συγκέντρωση των PM10 στην ατμόσφαιρα για την περιοχή της Λάρισας. Για κάθε ένα έτος υπολογίστηκε ο μέσος όρος της συγκέντρωσης των PM10, ενώ για την ανάλυση της τάσης των τιμών αυτών εφαρμόστηκε γραμμική παλινδρόμηση. Σκοπός είναι, μέσω αυτής της ανάλυσης, να γίνει εκτίμηση για την ενδεχόμενη μεταβολή της συγκέντρωσης των PM10 στο διάστημα που εξετάστηκε. Στο διάγραμμα προστέθηκαν οριζόντιες γραμμές που υποδεικνύουν τα θεσπισμένα όρια από την ΕΕ, στην οδηγία 2008/50/ΕΚ που ίσχυε κατά την περίοδο μελέτης και στην οδηγία 2024/2881 που ψηφίστηκε τον προηγούμενο χρόνο και είναι σήμερα σε ισχύ αλλά δεν έχει ενσωματωθεί ακόμα στην Ελληνική νομοθεσία, και τον ΠΟΥ για την ανώτατη ετήσια μέση συγκέντρωση, στην οποία μπορούν να εκτίθενται οι άνθρωποι. Η προσθήκη αυτών των γραμμών έγινε ώστε να καταστεί δυνατή η εκτίμηση για την ποιότητα του αέρα στον οποίο εκτίθενται οι κάτοικοι της Λάρισας.

Με στόχο να δοθεί μια γενική εικόνα για τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην πόλη της Λάρισας τις δύο περιόδους που μελετήθηκαν, την ψυχρή (Νοέμβριος – Μάρτιος) και τη θερμή (Μάιος – Σεπτέμβριος), έγινε ανάλυση των αντίστοιχων δεδομένων για τα έτη 2007 – 2023 με τη χρήση περιγραφικής στατιστικής. Συγκεκριμένα, για τις ημερήσιες μέσες τιμές συγκέντρωσης των PM10 για τις δύο περιόδους υπολογίστηκαν η μέση, μέγιστη και ελάχιστη τιμή, η τυπική απόκλιση καθώς και οι τιμές που αντιστοιχούν στο 10^ο και 90^ο εκατοστημόριο.

Για να διερευνηθεί η εβδομαδιαία μεταβολή της συγκέντρωσης των PM10 κατασκευάστηκε ένα ραβδόγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η μέση τιμή της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης των PM10 ανά ημέρα της εβδομάδας για την ψυχρή και τη θερμή περίοδο. Μέσα από το γράφημα αυτό μπορούν να εντοπιστούν διακυμάνσεις της συγκέντρωσης των PM10 στην πόλη της Λάρισας που σχετίζονται με τις δραστηριότητες της πόλης και την εποχικότητα, καθώς τόσο οι μετεωρολογικές συνθήκες όσο και οι πηγές εκπομπής αλλάζουν σημαντικά μεταξύ των δύο αυτών περιόδων. Θα πρέπει να σημειωθεί πως για την κατασκευή αυτού του διαγράμματος οι επίσημες αργίες του ελληνικού κράτους καθώς και η τοπική αργία λόγω της γιορτής του πολιούχου της πόλης αντιμετωπίστηκαν σαν Κυριακές, ανεξαρτήτως της ημέρας της εβδομάδας στην οποία αντιστοιχούσαν.

Για τη μελέτη της ημερήσιας διακύμανσης της συγκέντρωσης των PM10 δημιουργήθηκε, επίσης, ένα ραβδόγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται η μέση τιμή της συγκέντρωσης των PM10 ανά ώρα της ημέρας για τις δύο περιόδους που εξετάζονται, ψυχρή και θερμή, καθώς και γραμμές που υποδεικνύουν τα όρια που έχουν θεσπιστεί από ΕΕ και ΠΟΥ για την έκθεση των ανθρώπων στον συγκεκριμένο ρύπο στη διάρκεια μιας ημέρας. Από το διάγραμμα αυτό μπορούν να εξαχθούν

συμπεράσματα για το πώς κατανέμονται οι εκπομπές των σωματιδίων αυτών κατά τη διάρκεια της ημέρας για τις δύο αυτές περιόδους που επικρατούν σημαντικά διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες. Τέλος, οι οριζόντιες γραμμές των ορίων καθιστούν εύκολη την οπτική ανίχνευση των υπερβάσεων τους.

4.4.2 Μετεωρολογικά Δεδομένα

Για την ανάλυση των μετεωρολογικών δεδομένων, και συγκεκριμένα της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της βροχής, για την πόλη της Λάρισας την περίοδο 2007 – 2023 έγινε στατιστική ανάλυση με τη χρήση του λογισμικού IBM SPSS Statistics και κατασκευάστηκαν με τη χρήση του λογισμικού MATLAB γραφήματα στα οποία παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά δεδομένα για αυτή την περίοδο.

Αναλύθηκαν δεδομένα για τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και το ύψος της βροχόπτωσης. Διαθέσιμα ήταν και δεδομένα για την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, τον άνεμο, τα οποία, όμως, δεν αναλύθηκαν, καθώς κρίθηκε ότι σε γενικές γραμμές δεν είναι αντιπροσωπευτικά για την πόλη της Λάρισας μια και καταγράφονται στο αεροδρόμιο της πόλης, σε περιοχή δηλαδή με διαφορετική τοπογραφία.

Αρχικά, μετά την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων, κατασκευάστηκε ένα διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται η ελάχιστη, μέση και μέγιστη θερμοκρασία (T_{min} , T_{avg} , T_{max} , αντίστοιχα), που καταγράφηκε ανά ημέρα σε όλο το χρονικό διάστημα που εξετάστηκε.

Ακολουθώντας την ίδια λογική και διαδικασία, κατασκευάστηκε και ένα διάγραμμα για τη ελάχιστη, μέση και μέγιστη σχετική υγρασία (RH_{min} , RH_{avg} , RH_{max} , αντίστοιχα) για το χρονικό διάστημα αυτό.

Για τις δύο αυτές παραμέτρους κατασκευάστηκαν, επίσης, διαγράμματα κατάλληλα ώστε να αναδειχθούν οι γενικές τάσεις τους κατά τη διάρκεια των ετών 2007 – 2023. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε γραμμική παλινδρόμηση για την ελάχιστη, μέση και μέγιστη θερμοκρασία και σχετική υγρασία ώστε να γίνουν ευδιάκριτες τυχούσες σημαντικές μεταβολές των τιμών τους με την πάροδο των ετών.

Για την οπτικοποίηση των δεδομένων της βροχής, μετά τους κατάλληλους υπολογισμούς, δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται το συνολικό ύψος της βροχής στη διάρκεια ενός μήνα για όλο το διάστημα που μελετήθηκε. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε γραμμική παλινδρόμηση για τη διερεύνηση πιθανής μακροπρόθεσμης τάσης στη μεταβολή των ετήσιων επιπέδων βροχόπτωσης.

Για να δοθεί μια εικόνα για τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν τις δύο περιόδους που μελετήθηκαν, την ψυχρή και τη θερμή, απομονώθηκαν τα αντίστοιχα δεδομένα και αναλύθηκαν με τη χρήση περιγραφικής στατιστικής. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν η ελάχιστη, μέγιστη και μέση τιμή καθώς και η τυπική

απόκλιση για την ελάχιστη, μέση και μέγιστη θερμοκρασία και σχετική υγρασία αλλά και για το ύψος της βροχόπτωσης.

4.4.3 Συσχετίσεις

Για την στατιστική ανάλυση των δεδομένων, την επιλογή του βέλτιστου τρόπου συσχέτισης και τον μετέπειτα υπολογισμό των αντίστοιχων συντελεστών μεταξύ της συγκέντρωσης των PM10 και των μετεωρολογικών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό λογισμικό SPSS Statistics.

Αρχικά, για τα έτη 2017 – 2023 κατασκευάστηκαν διαγράμματα διασποράς για την ημερήσια μέση συγκέντρωση των PM10 συναρτήσει της ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας για τις δύο περιόδους μελέτης, την ψυχρή και τη θερμή. Αντίστοιχα διαγράμματα κατασκευάστηκαν και για την ημερήσια μέση συγκέντρωση των PM10 και το συνολικό ημερήσιο ύψος βροχής.

Δημιουργήθηκαν, επιπλέον, διαγράμματα διασποράς για τη συγκέντρωση των PM10 συναρτήσει της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας ανά ώρα της ημέρας, επίσης, για τις δύο περιόδους των ετών 2017 – 2023. Σημειώνεται πως, λόγω της φύσης των μετεωρολογικών δεδομένων, έγινε πρώτα μετατροπή της ώρας των μετρήσεων από UTC σε τοπική. Για την ψυχρή περίοδο χρησιμοποιήθηκε η χειμερινή ώρα της Ελλάδας (UTC+2), ενώ για τη θερμή η θερινή (UTC+3). Εφόσον η χρονική ανάλυση των μετεωρολογικών δεδομένων ήταν 3 ώρες, ενώ των μετεωρολογικών 1 ώρα, αρχικά απομονώθηκαν τα κατάλληλα δεδομένα για κάθε μία από τις περιόδους και δημιουργήθηκαν 16 διαγράμματα διασποράς, 8 για την ωριαία συγκέντρωση των PM10 συναρτήσει της θερμοκρασίας και 8 για την ωριαία συγκέντρωση των PM10 συναρτήσει της σχετικής υγρασίας.

Λαμβάνοντας υπόψιν και τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, για την ψυχρή περίοδο κατασκευάστηκαν δύο επιπλέον διαγράμματα διασποράς. Στα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν συγκεντρωτικά τα δεδομένα για τρεις ώρες, 20, 23 και 02, ώστε να διερευνηθεί συνολικά η σχέση της συγκέντρωσης των PM10 με τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία κατά τις ώρες της ημέρας που παρατηρείται αυξημένη ατμοσφαιρική ρύπανση. Κατά τις ώρες αυτές, όπως προέκυψε μέσα από την ανάλυση των δεδομένων για τη συγκέντρωση των PM10, διαπιστώθηκε ότι υπερβαίνονται τα θεσμοθετημένα από την ΕΕ και τον ΠΟΥ όρια για τη μέγιστη συγκέντρωση στην οποία θα πρέπει να εκτίθενται οι πολίτες στη διάρκεια της ημέρας.

Με την κατασκευή και μελέτη αυτών των διαγραμμάτων κατέστη σαφές πως η συγκέντρωση των PM10 παρουσιάζει μονοτονική σχέση με την πλειονότητα των μετεωρολογικών παραμέτρων που εξετάστηκαν. Για τον λόγο αυτό, με τη χρήση του SPSS, υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης Spearman, για κάθε μία από τις

μετεωρολογικές παραμέτρους σε σχέση με τη συγκέντρωση των PM10. Μέσω αυτού εξήχθησαν συμπεράσματα για το είδος και τη σημαντικότητα των σχέσεων της συγκέντρωσης των PM10 και της εκάστοτε μετεωρολογικής παραμέτρου.

4.4.4 Συντελεστής Συσχέτισης Spearman

Ο συντελεστής συσχέτισης Spearman (Spearman's correlation coefficient, ρ ή r_s) είναι ένα μη παραμετρικό μέτρο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μονοτονικής σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών. Βασίζεται στις κατατάξεις των τιμών των παρατηρήσεων και όχι στις ίδιες τις αριθμητικές τιμές, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για περιπτώσεις όπου τα δεδομένα δεν ακολουθούν κανονική κατανομή, υπάρχουν ακραίες τιμές ή η σχέση μεταξύ των μεταβλητών είναι μη γραμμική αλλά μονοτονική. Η μονοτονική σχέση, την οποία εξετάζει ο συντελεστής Spearman, περιγράφει την τάση δύο μεταβλητών να μεταβάλλονται ταυτόχρονα προς μία σταθερή κατεύθυνση, δηλαδή καθώς αυξάνεται η μία μεταβλητή, η άλλη είτε αυξάνεται είτε μειώνεται, χωρίς απαραίτητα η σχέση τους να είναι γραμμική.

Για τον υπολογισμό του ρ , οι παρατηρήσεις κάθε μεταβλητής κατατάσσονται κατά αύξουσα σειρά και, στη συνέχεια, υπολογίζεται η διαφορά των κατατάξεων για κάθε ζεύγος παρατηρήσεων. Η τιμή του συντελεστή υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

όπου:

- d_i είναι η διαφορά μεταξύ των κατατάξεων των δύο μεταβλητών για κάθε παρατήρηση
- n είναι το πλήθος των παρατηρήσεων.

Οι τιμές του Spearman κυμαίνονται στο διάστημα [-1, +1]:

- Τιμή +1 υποδηλώνει τέλεια θετική μονοτονική συσχέτιση: καθώς αυξάνεται η μία μεταβλητή, αυξάνεται και η άλλη.
- Τιμή -1 υποδηλώνει τέλεια αρνητική μονοτονική συσχέτιση: καθώς αυξάνεται η μία μεταβλητή, η άλλη μειώνεται.
- Τιμή κοντά στο 0 υποδηλώνει απουσία μονοτονικής σχέσης.

Όσο η τιμή του ρ πλησιάζει τα άκρα του διαστήματος [-1, +1], τόσο ισχυρότερη είναι η μονοτονική σχέση.

5. Αποτελέσματα

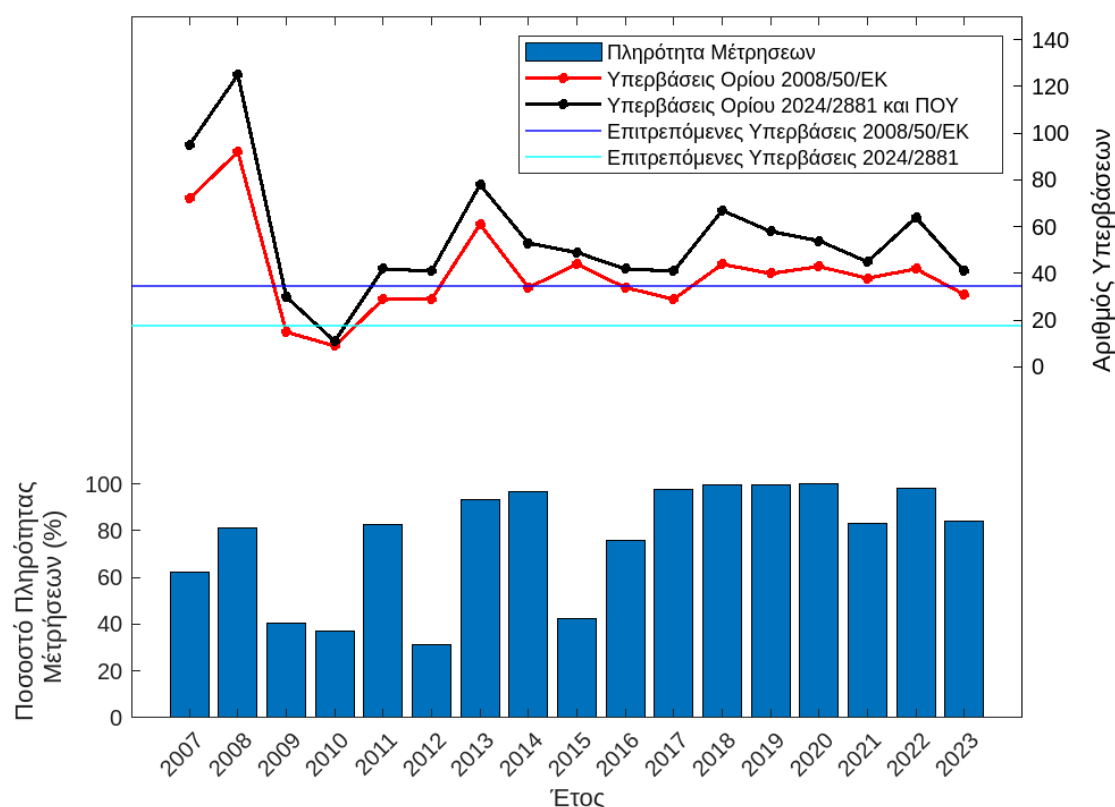
5.1 Στατιστική Ανάλυση Δεδομένων Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων που αφορούν τη συγκέντρωση των PM₁₀ που καταγράφηκε στην πόλη της Λάρισας για τα έτη 2007 – 2023. Σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι η αξιολόγηση της εξέλιξης της συγκέντρωσης των PM₁₀ σε διάφορες χρονικές περιόδους αλλά και η σύγκριση της με τα όρια που έχουν ήδη θεσπιστεί ή πρόκειται να θεσπιστούν από την ΕΕ και τον ΠΟΥ. Η μελέτη αυτή επιτρέπει την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα στον οποίο εκτίθεται ο πληθυσμός της πόλης, ενώ παράλληλα αναδεικνύει ενδεχόμενες ανάγκες για την εφαρμογή πρόσθετων μέτρων, με σκοπό την προστασία της δημόσιας υγείας και την συμμόρφωση στην ευρωπαϊκή και διεθνή νομοθεσία.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η πληρότητα των μετρήσεων της συγκέντρωσης των PM₁₀ ανά έτος, ο αριθμός των υπερβάσεων των ορίων της 2008/50/ΕΚ και των ΠΟΥ και 2024/2881, καθώς και ο αριθμός των επιτρεπόμενων υπερβάσεων των ορίων των 2008/50/ΕΚ και 2024/2881 στη διάρκεια ενός ημερολογιακού έτους ([Σχήμα 3](#)). Μέχρι και το 2016 η πληρότητα των μετρήσεων παρουσιάζει σημαντικές αυξομειώσεις, ενώ για τα έτη 2009, 2010, 2012 και 2015 μετρήσεις καταγράφονται για ποσοστό ημερών μικρότερο του 50%. Για τα έτη από το 2017 και έπειτα η πληρότητα των μετρήσεων υπερβαίνει, σταθερά, το 80%, ενισχύοντας την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των δεδομένων αυτών. Πρέπει να σημειωθεί πως η μικρή πληρότητα των δεδομένων για τα έτη μέχρι και το 2016 ήταν ένας από τους βασικούς λόγους για τους οποίους επιλέχθηκε η περίοδος 2017 – 2023 ως περίοδος μελέτης των συσχετίσεων.

Χρήσιμα είναι τα συμπεράσματα τα οποία μπορούν να εξαχθούν από το ίδιο γράφημα ([Σχήμα 3](#)) σχετικά με τις υπερβάσεις των τιμών που έχουν θεσπιστεί ως όρια από την ΕΕ και τον ΠΟΥ. Συγκεκριμένα, τόσο το όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, που ορίζεται από την οδηγία 2008/50/ΕΚ, όσο και το όριο των 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, που αναμένεται να θεσπιστεί σύμφωνα με την νέα οδηγία 2024/2881 και συμβαδίζει με την κατευθυντήρια οδηγία του ΠΟΥ, για τη διάρκεια μιας ημέρας παρατηρείται πως υπερβαίνονται συστηματικά. Ο αριθμός των υπερβάσεων παρουσιάζει μια σχετική σταθεροποίηση από το 2014 και έπειτα, χωρίς να απουσιάζουν και έτη κατά τα οποία οι υπερβάσεις παρουσίασαν αύξηση (2018 και 2022). Μελετώντας τον αριθμό των υπερβάσεων του ορίου της 2008/50/ΕΚ σε σχέση με τον αριθμό των επιτρεπόμενων υπερβάσεων της ίδιας οδηγίας, προκύπτει το συμπέρασμα πως, στην πλειοψηφία των ετών μετά το 2008, πλην του 2013, ο αριθμός των υπερβάσεων είναι μικρότερος ή ελάχιστα μεγαλύτερος των επιτρεπτών. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως το 2015, αν και η

πληρότητα των δεδομένων ατμοσφαιρικής ρύπανσης ήταν μικρή, το όριο της νομοθεσίας ξεπεράστηκε περισσότερες φορές από αυτές που θεωρούνται επιτρεπτές. Ανησυχητικά είναι τα αποτελέσματα της σύγκρισης του αριθμού των υπερβάσεων του νέου ορίου που αναμένεται να ενσωματωθεί στην ελληνική νομοθεσία, όπως αυτό προτείνεται από την οδηγία 2024/2881, και του αντίστοιχου αριθμού επιτρεπόμενων υπερβάσεων. Ειδικότερα, για τα έτη με ικανοποιητική πληρότητα δεδομένων, οπότε και τα αποτελέσματα είναι πιο αξιόπιστα, παρατηρείται συνεχής υπέρβαση του επιτρεπόμενου αριθμού ημερών με τιμές πάνω από το όριο. Ακόμη, όμως, και για έτη για τα οποία η πληρότητα είναι μικρή σε πολλές περιπτώσεις καταγράφεται σημαντικός αριθμός υπερβάσεων, πολλές φορές άνω του επιτρεπτού (2012 και 2015). Σημειώνεται πως ο ΠΟΥ στις οδηγίες του δεν αναφέρει αριθμό ημερών που θεωρείται ανεκτή η υπέρβαση του ορίου των $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Συνεπώς, αν και η συμμόρφωση στην τρέχουσα νομοθεσία από το 2010 και μετά είναι σχετικά επιτυχής, για άλλη μια φορά αναδεικνύεται η ανάγκη λήψης μέτρων για τον περιορισμό των εκπομπών των PM₁₀, ώστε να επιτευχθεί συμμόρφωση με τα νέα όρια που αναμένεται να εισαχθούν στην περιβαλλοντική πολιτική της χώρας.

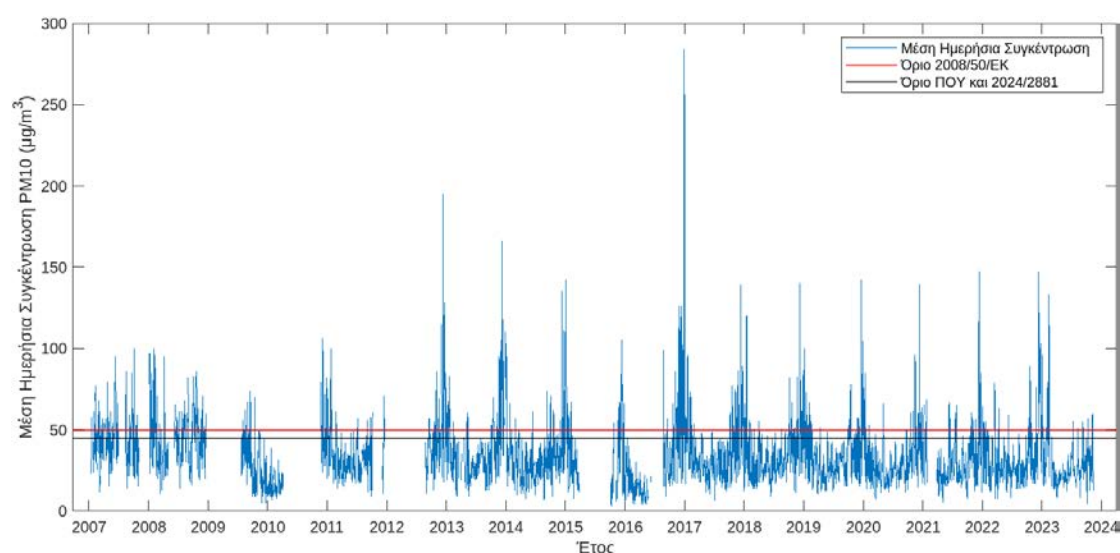


Σχήμα 3: Διάγραμμα πληρότητας δεδομένων και αριθμού υπερβάσεων ορίων ΕΕ και ΠΟΥ. Με οριζόντιες γραμμές σημειώνονται οι επιτρεπόμενες υπερβάσεις των ορίων, σύμφωνα με την οδηγία 2008/50/EK (μπλε οριζόντια γραμμή) και 2024/2881 (κυανή οριζόντια γραμμή).

Ακολουθεί το διάγραμμα στο οποίο παρουσιάζεται η ημερήσια μέση συγκέντρωση για τα έτη 2007 – 2023, καθώς και οι μέγιστες τιμές συγκέντρωσης στις

οποίες μπορούν να εκτεθούν οι άνθρωποι κατά τη διάρκεια μιας ημέρας κατά την ΕΕ και τον ΠΟΥ (Σχήμα 4). Από τη μελέτη του γραφήματος αυτού προκύπτει το συμπέρασμα πως, καθ' όλη την περίοδο που εξετάστηκε, οι υπερβάσεις των ορίων των $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία, και των $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, που αναμένεται να υιοθετηθεί και από την Ελλάδα σύντομα μετά την ψήφιση της οδηγίας 2024/2881 από την ΕΕ, είναι αρκετές σε αριθμό. Με πιο λεπτομερή παρατήρηση, μπορεί να διαπιστωθεί πως οι υπερβάσεις αυτές καταγράφονται κυρίως τους χειμερινούς μήνες, καθώς οι κορυφές εντοπίζονται κοντά στις ενδείξεις για την αλλαγή του έτους. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στην αυξημένη χρήση συστημάτων θέρμανσης κατά τους ψυχρούς μήνες, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερη κατανάλωση βιομάζας και ορυκτών καυσίμων. Δεν λείπουν, ωστόσο, και ημέρες εκτός του χειμώνα όπου σημειώνονται υπερβάσεις των θεσπισμένων ορίων.

Συμπερασματικά, και μέσα από αυτό το διάγραμμα, γίνεται εμφανές πως η πόλη της Λάρισας αντιμετωπίζει διαχρονικά πρόβλημα ατμοσφαιρικής ρύπανσης από PM10, καθώς τόσο ο αριθμός των υπερβάσεων όσο και ο αριθμός των επεισοδίων έντονης ατμοσφαιρικής ρύπανσης παραμένει υψηλός.

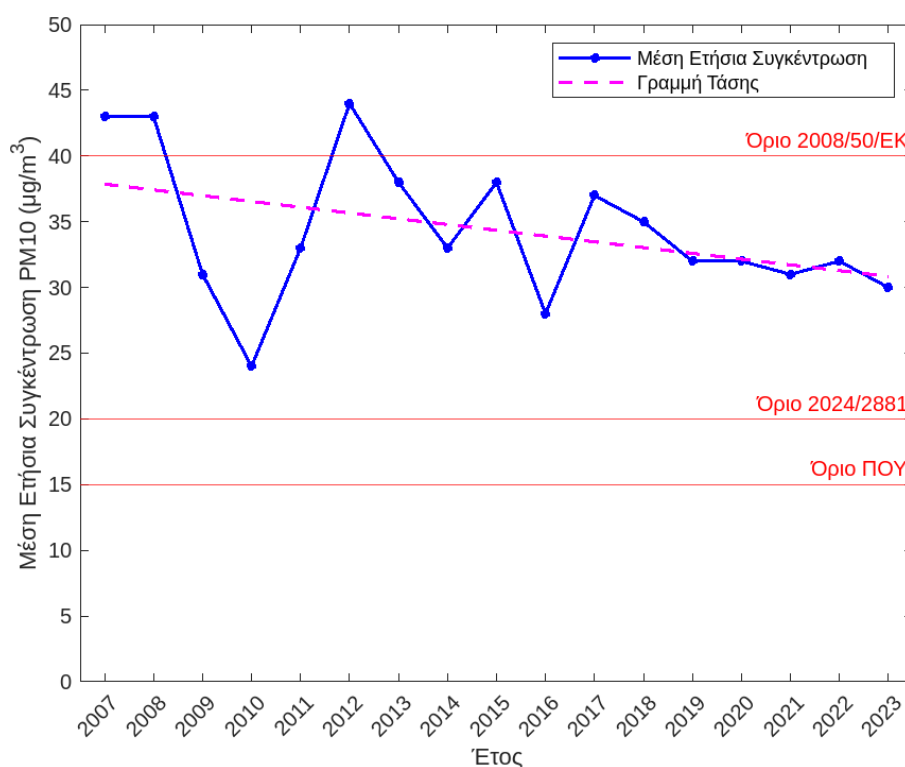


Σχήμα 4: Διάγραμμα ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης PM10 για τα έτη 2007 – 2023. Με οριζόντιες γραμμές σημειώνονται τα όρια σύμφωνα με την οδηγία 2008/50/ΕΚ της ΕΕ (κόκκινη οριζόντια γραμμή) και την οδηγία 2024/2881 και τον ΠΟΥ (μαύρη οριζόντια γραμμή).

Το επόμενο διάγραμμα που κατασκευάστηκε παρουσιάζει την ετήσια μέση τιμή της συγκέντρωσης των PM10 στην ατμόσφαιρα της Λάρισας για τα έτη 2007 – 2023 (Σχήμα 5). Από τη μελέτη αυτού του διαγράμματος είναι, αρχικά, εμφανής, η πτωτική τάση στις τιμές που καταγράφονται για αυτή τη χρονική περίοδο, όπως αποτυπώνεται και με τη μωβ διακεκομμένη γραμμή. Δεν απουσιάζουν, ωστόσο, οι διακυμάνσεις οι οποίες είναι ιδιαίτερα έντονες μέχρι και το 2017.

Η πτωτική αυτή πορεία της συγκέντρωσης του ρύπου αυτού μπορεί να αποδοθεί σε πληθώρα παραγόντων, όπως η εφαρμογή πολιτικής για τη διασφάλιση της ποιότητας του αέρα, η τεχνολογική πρόοδος και η ευρύτερη χρήση αντιρρυπαντικής τεχνολογίας σε σημαντικές πηγές του συγκεκριμένου ρύπου, όπως τα οχήματα, οι βιομηχανίες κ.ά., όπως και σε κοινωνικοοικονομικές συνθήκες, λόγω χάρη η οικονομική κρίση και η πανδημία, που οδήγησαν στην μείωση της δραστηριότητας και, κατ' επέκταση των εκπομπών.

Συγκρίνοντας την ετήσια μέση συγκέντρωση των PM₁₀ με τα αντίστοιχα όρια που έχουν θεσμοθετηθεί, συνάγεται το συμπέρασμα πως, παρά την πτωτική τάση που σημειώνεται, η συγκέντρωση παραμένει υψηλή, θέτοντας, πιθανώς, σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία. Συγκεκριμένα, αν και η υπέρβαση του ορίου των 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, το οποίο είναι και αυτό το οποίο αναφέρεται επί του παρόντος στην ελληνική νομοθεσία και συμφωνεί με την οδηγία 2008/50/ΕΚ της ΕΕ, παρατηρήθηκε μόνο κατά τα έτη 2007, 2008 και 2012, για κανένα έτος από αυτά που μελετήθηκαν δεν έχουν σημειωθεί τιμές που να πλησιάζουν την τιμή των 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ που αναμένεται να ενσωματωθεί στην ελληνική νομοθεσία μετά την νέα οδηγία της ΕΕ 2024/2881 ή την ακόμα αυστηρότερη κατευθυντήρια τιμή των 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ του ΠΟΥ. Καθίσταται φανερό, επομένως, πως η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα στην πόλη της Λάρισας εξακολουθεί να αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα περιβαλλοντικής και υγειονομικής σημασίας και για τον λόγο αυτό απαιτείται αυστηροποίηση των ήδη ισχυόντων μέτρων και αναπροσαρμογή της στρατηγικής για την προστασία της δημόσιας υγείας.



Σχήμα 5: Διάγραμμα ετήσιας μέσης συγκέντρωσης PM₁₀ ανά έτος. Με κόκκινες οριζόντιες γραμμές σημειώνονται τα θεσμοθετημένα όρια των ΕΕ και ΠΟΥ. Η μωβ διακεκομμένη γραμμή δείχνει την τάση της ετήσιας μέσης συγκέντρωσης μέσα στα έτη.

Λαμβάνοντας υπόψιν και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τη μελέτη των δύο προηγούμενων γραφημάτων ([Σχήμα 4](#) και [Σχήμα 5](#)), αξίζει να σημειωθεί πως, αν και η ετήσια μέση συγκέντρωση παρουσίασε μείωση μέσα στα έτη, πολλά είναι τα έντονα επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης που καταγράφονται καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου που εξετάζεται, με αυτό του 2017 να δεσπόζει. Καθίσταται, λοιπόν, σαφές πως η τάση μείωσης των εκπομπών δεν μπορεί να οδηγήσει σε επανάπαυση και πως απαιτείται μέριμνα και για τη μείωση και διαχείριση αυτών των επεισοδίων που συνιστούν σοβαρή απειλή για την ανθρώπινη υγεία, κυρίως για τις ευπαθείς ομάδες του πληθυσμού.

Η περιγραφική στατιστική ανάλυση των επιπέδων της συγκέντρωσης των PM₁₀ στην πόλη της Λάρισας που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας διενεργήθηκε για δύο περιόδους, την ψυχρή (Νοέμβριος – Μάρτιος) και τη θερμή (Μάιος – Σεπτέμβριος), λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών που εμφανίζει η ατμοσφαιρική ρύπανση από αιωρούμενα σωματίδια κατά τη διάρκειά τους. Για να καταστεί δυνατή η επισκόπηση των δεδομένων για κάθε μία από αυτές κατά την περίοδο 2007 – 2023, στον [Πίνακα 1](#) που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματά της. Όπως αναμένεται, υψηλότερες τιμές PM₁₀ καταγράφονται κατά την ψυχρή περίοδο, με τη μέση τιμή των ημερήσιων μέσων συγκεντρώσεων να διαμορφώνεται σε 40,24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και μέγιστη τιμή που φτάνει τα 284 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Για τη θερμή περίοδο οι αντίστοιχες τιμές είναι 29,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και 162 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, αντίστοιχα. Μελετώντας τις τιμές της τυπικής απόκλισης που υπολογίστηκαν για τις δύο περιόδους, 24,151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και 12,132 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ για την ψυχρή και τη θερμή περίοδο αντίστοιχα, καθίσταται φανερό πως η μεταβλητότητα της συγκέντρωσης των PM₁₀ είναι μεγαλύτερη για τις ημέρες με χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές με υψηλότερες. Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν τα αυξημένα επίπεδα PM₁₀ στην ατμόσφαιρα της πόλης την ψυχρή περίοδο που, πιθανώς, είναι αποτέλεσμα των εκπομπών λόγω κεντρικών θερμάνσεων αλλά και των δυσμενέστερων μετεωρολογικών συνθηκών, όπως οι θερμοκρασιακές αναστροφές, το χαμηλό ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα και οι χαμηλής έντασης άνεμοι, που συχνά επικρατούν και οι οποίες δεν επιτρέπουν τη διασπορά των ρύπων. Πρέπει, ωστόσο, να σημειωθεί, πως κρίνοντας από τη μέγιστη τιμή που προέκυψε για τα επίπεδα PM₁₀ τη θερμή περίοδο, αν και η συγκέντρωση τους θερμούς μήνες είναι σαφώς μικρότερη, υπάρχουν μέρες κατά τις οποίες η συγκέντρωση ξεπερνά τα ανώτατα επιτρεπτά όρια της νομοθεσίας αλλά και των κατευθυντήριων οδηγιών του ΠΟΥ. Αυτές οι υψηλές τιμές μπορεί να είναι αποτέλεσμα μεταφοράς σκόνης από την Αφρική, της αυξημένης έντασης του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας που παρατηρείται υπό τέτοιες συνθήκες κ.ά.. Οι τιμές του 10^{ου} εκατοστημορίου είναι παρόμοιες για την ψυχρή (17,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) και τη θερμή περίοδο (16,79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), γεγονός που υποδηλώνει ότι οι ημέρες με χαμηλές συγκεντρώσεις PM₁₀ παρουσιάζονται με παρόμοια συχνότητα και στις δύο εποχές. Αντίθετα, η τιμή του 90^{ου} εκατοστημορίου της ημερήσιας μέσης

συγκέντρωσης κατά την ψυχρή περίοδο ($68,71 \mu\text{g}/\text{m}^3$) είναι σημαντικά υψηλότερη από την αντίστοιχη της θερμής περιόδου ($44,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$), γεγονός που υποδηλώνει ότι τα γεγονότα με υψηλή συγκέντρωση PM₁₀ είναι εντονότερα και πιο συχνά κατά τους ψυχρούς μήνες.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης για τη συγκέντρωση των PM₁₀ την ψυχρή και τη θερμή περίοδο για τα έτη 2007 – 2023.

Συγκέντρωση PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Πλήθος Μετρήσεων	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Εκατοστημόρια	
						10°	90°
Ψυχρή Περίοδος	2055	4	284	40,24	24,151	17,00	68,71
Θερμή Περίοδος	1870	4	162	29,17	12,132	16,79	44,00

Το επόμενο διάγραμμα που κατασκευάστηκε πρόκειται για ένα ραβδόγραμμα το οποίο παρουσιάζει την ημερήσια μέση συγκέντρωση PM₁₀ για κάθε μία από τις ημέρες της εβδομάδας για τις δύο περιόδους μελέτης, την ψυχρή (μπλε ράβδοι) και τη θερμή (πορτοκαλί ράβδοι) ([Σχήμα 6](#)). Μελετώντας ενδελεχώς το γράφημα αυτό, μπορούν να εξαχθούν ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα για τη διακύμανση της συγκέντρωσης των PM₁₀ κατά τη διάρκεια της εβδομάδας τόσο την ψυχρή όσο και τη θερμή περίοδο και να εντοπιστούν οι διαφορές και οι ομοιότητες τους. Κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου παρατηρείται, για τις καθημερινές, πως η συγκέντρωση την Τρίτη και την Πέμπτη είναι μικρότερη από αυτή των υπόλοιπων ημερών. Αν ληφθεί υπόψιν το ωράριο λειτουργίας των καταστημάτων στην πόλη της Λάρισας, η μείωση αυτή μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός πως αυτές τις μέρες τα εμπορικά καταστήματα παραμένουν κλειστά το απόγευμα, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες καθημερινές ημέρες, οπότε η κίνηση των οχημάτων στο κέντρο της πόλης, όπου και είναι τοποθετημένος ο σταθμός μέτρησης, είναι περιορισμένη.

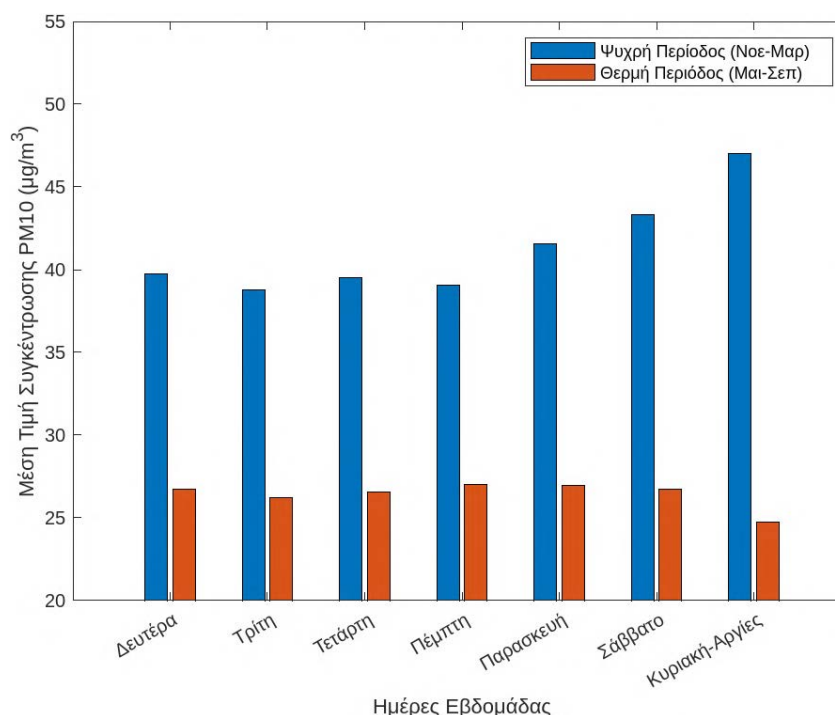
Τις Κυριακές και τις επίσημες αργίες της ψυχρής περιόδου σημειώνονται οι μεγαλύτερες τιμές συγκέντρωσης συγκριτικά με όλες τις υπόλοιπες μέρες της εβδομάδας. Ανοδική τάση παρατηρείται ήδη από την Παρασκευή η οποία κορυφώνεται την Κυριακή και τις αργίες. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί αφενός στις αυξημένες οικιακές εκπομπές, λόγω της αυξημένης χρήσης των συστημάτων θέρμανσης τις ημέρες που η πλειοψηφία των ανθρώπων δεν εργάζεται, και αφετέρου στην πιθανή αύξηση της κυκλοφορίας των οχημάτων προς το κέντρο της πόλης για λόγους ψυχαγωγικών και κοινωνικών δραστηριοτήτων. Ιδίως μετά το απόγευμα του Σαββάτου, οπότε οι περισσότεροι πολίτες δεν εργάζονται, πολλοί μετακινούνται προς το κέντρο της πόλης, όπου και βρίσκεται ο σταθμός μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, για λόγους αναψυχής. Οι εκπομπές λόγω της χρήσης των

οχημάτων τους μπορεί να συμπίπτει και με δυσμενείς συνθήκες για τη διασπορά των ρύπων, όπως θερμοκρασιακές αναστροφές που επικρατούν μετά τη δύση του ηλίου, οδηγώντας στην καταγραφή αυξημένων τιμών συγκέντρωσης PM₁₀.

Για τη θερμή περίοδο, οπότε η συγκέντρωση των PM₁₀ είναι σαφώς μικρότερη, παρατηρείται μικρή διακύμανση στη συγκέντρωση του ρύπου κατά τη διάρκεια της εβδομάδας. Σε αντίθεση με την ψυχρή περίοδο, από την Παρασκευή έως και την Κυριακή παρατηρείται πτωτική τάση για τις τιμές της συγκέντρωσης, με τις ελάχιστες να καταγράφονται την Κυριακή και τις αργίες. Αυτό το γεγονός μπορεί να αποδοθεί στη μείωση της κίνησης των οχημάτων εντός του αστικού ιστού, καθώς πολλοί επιλέγουν, αφού δεν εργάζονται, να εκδράμουν σε κοντινούς παραλιακούς προορισμούς.

Από τη μελέτη των τιμών για τη μέση συγκέντρωση PM₁₀ κάθε ημέρα της εβδομάδας συγκριτικά για τις δύο περιόδους, παρατηρείται ότι οι συγκεντρώσεις είναι υψηλότερες την ψυχρή περίοδο για όλες τις ημέρες, με τιμές μεγαλύτερες κατά ποσοστό από 45% (Πέμπτη) έως 90% (Κυριακή) σε σχέση με τη θερμή περίοδο. Οι πιο σημαντικές διαφορές εντοπίζονται τα Σαββατοκύριακα, με τιμές μεγαλύτερες κατά 62% το Σάββατο και σχεδόν διπλάσιες την Κυριακή (~90%) την ψυχρή περίοδο.

Μέσα από αυτό το διάγραμμα είναι εμφανής η διαφορά στις τιμές της συγκέντρωσης των PM₁₀ τις δύο περιόδους αλλά και η διακύμανση τους κατά τη διάρκεια της εβδομάδας. Τα στοιχεία που προκύπτουν από αυτό κρίνεται αναγκαίο να λαμβάνονται υπόψιν κατά τη δημιουργία και την επικαιροποίηση πολιτικών μείωσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και προστασίας της δημόσιας υγείας, οι οποίες θα μπορούσαν να λάβουν υπόψιν τους και τις δραστηριότητες της πόλης.



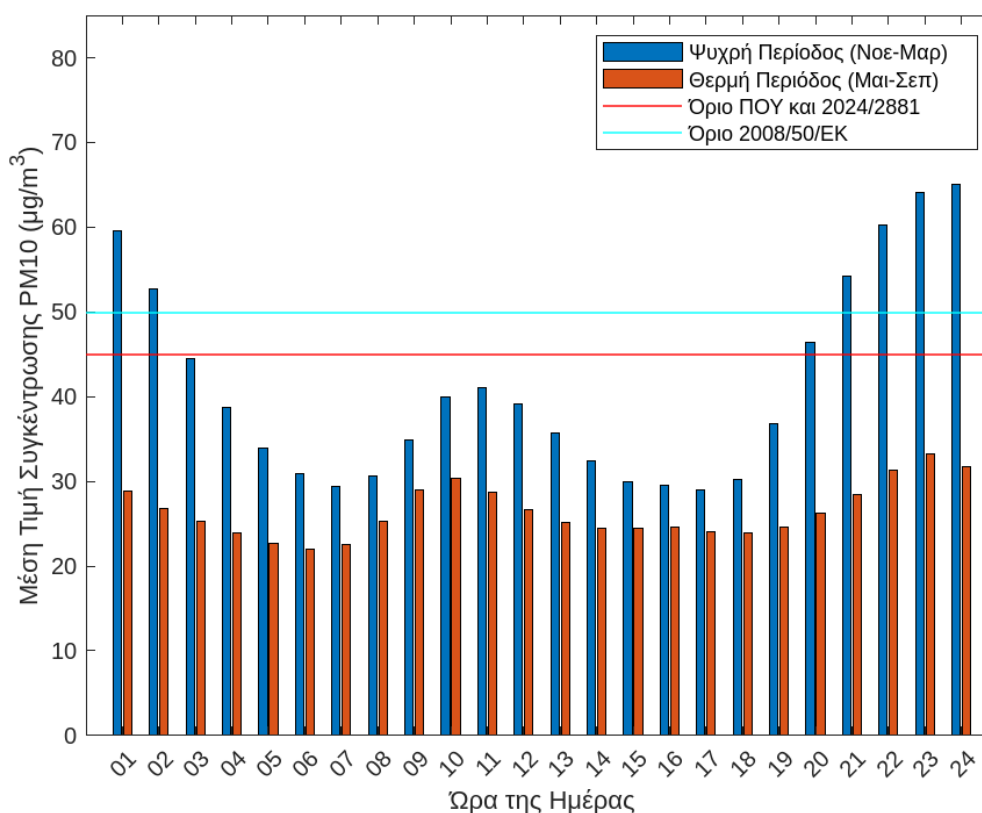
Σχήμα 6: Διάγραμμα μέσης συγκέντρωσης PM₁₀ ανά ημέρα της εβδομάδας για την ψυχρή (μπλε ράβδοι) και τη θερμή περίοδο (πορτοκαλί ράβδοι) των ετών 2007 – 2023.

Το τελευταίο διάγραμμα το οποίο κρίθηκε σκόπιμο να δημιουργηθεί παρουσιάζει με ράβδους διαφορετικού χρώματος τη μέση συγκέντρωση των PM₁₀ ανά ώρα της ημέρας για την ψυχρή (μπλε ράβδοι) και τη θερμή (πορτοκαλί ράβδοι) περίοδο των ετών 2017 – 2023 ([Σχήμα 7](#)). Από τη μελέτη του διαγράμματος είναι φανερό πως τόσο την ψυχρή όσο και τη θερμή περίοδο παρουσιάζονται δύο μέγιστα κατά τη διάρκεια της ημέρας, ένα το πρωί, συγκεκριμένα στις 11:00 – 12:00 την ψυχρή και στις 10:00 – 11:00 τη θερμή περίοδο, και ένα το βράδυ, στις 00:00 – 01:00 την ψυχρή και στις 23:00 – 00:00 τη θερμή περίοδο. Οι μέγιστες τιμές συγκέντρωσης που σημειώνονται τις ώρες αυτές, όπως και γενικά οι τιμές, διαφέρουν σημαντικά για τις δύο περιόδους, κάτι το οποίο έγινε εμφανές και από το προηγούμενο διάγραμμα.

Μέσα από τα αποτελέσματα της ανάλυσης των δεδομένων για την ψυχρή περίοδο είναι δυνατό να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα για την ποιότητα του αέρα στη Λάρισα κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου. Υψηλή συγκέντρωση παρατηρείται κυρίως τις βραδινές ώρες, κυρίως μεταξύ 20:00 – 03:00, οπότε και υπερβαίνεται το αυστηρότερο όριο των 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ που έχει θέσει τόσο ο ΠΟΥ όσο και η οδηγία 2024/2881 της ΕΕ. Ωστόσο, υπερβάσεις παρατηρούνται και για το υψηλότερο όριο των 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ που προβλέπεται από την τρέχουσα Ελληνική νομοθεσία για σχεδόν το ένα τέταρτο του ημερήσιου κύκλου (21:00 – 03:00). Πιθανή αιτία αυτού του φαινομένου είναι η θέρμανση των κατοικιών αλλά και η θερμοκρασιακή αναστροφή που εμποδίζει τη διασπορά των ρύπων και επικρατεί συνθήως κατά τις πρώτες βραδινές ώρες. Όσον αφορά το δεύτερο μέγιστο, που εντοπίζεται τις πρωινές ώρες (στις 11:00 – 12:00 την ψυχρή και στις 10:00 – 11:00 τη θερμή περίοδο), αυτό, πιθανώς, οφείλεται αφενός στις δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες, όπως το χαμηλό οριακό στρώμα και οι ασθενείς άνεμοι, που επικρατούν τις ώρες αυτές αλλά και στην κίνηση των οχημάτων, λόγω της μετάβασης των πολιτών στους χώρους εργασίας τους. Είναι μικρότερο κατά περίπου 37% σε σχέση με το βραδινό μέγιστο, καθώς είναι διαφορετικές οι κύριες πηγές εκπομπής. Τα πιο σύγχρονα αυτοκίνητα, τα οποία συνιστούν τις σημαντικότερες πηγές το πρωί, εκπέμπουν σαφώς λιγότερα PM₁₀ από τις πηγές καύσης βιομάζας, όπως είναι τα τζάκια και οι σόμπες των σπιτιών, που χρησιμοποιούνται κυρίως το βράδυ.

Πιο ενθαρρυντικά φαίνεται να είναι τα αποτελέσματα για την ποιότητα του αέρα κατά τη διάρκεια των ημερών τη θερινή περίοδο. Συγκεκριμένα, οι τιμές της συγκέντρωσης, που είναι κατά πολύ χαμηλότερες σε σχέση με την ψυχρή περίοδο, δεν ξεπερνούν για καμία ώρα της ημέρας κανένα από τα δύο όρια. Αυτό θεωρείται αναμενόμενο καθώς κατά τους μήνες αυτούς δεν λειτουργούν συστήματα θέρμανσης που είναι μία από τις σημαντικότερες πηγές PM₁₀. Γενικά, η συγκέντρωση δεν σημειώνει μεγάλη διακύμανση κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τα δύο μέγιστα που εντοπίζονται, ένα το πρωί, στο διάστημα 10:00 – 11:00, και ένα το βράδυ, μεταξύ 23:00 – 00:00, μπορούν να αποδοθούν στην κυκλοφορία των αυτοκινήτων τις ώρες αιχμής, το πρωί για τη μετάβαση των εργαζόμενων στις

δουλειές τους και το βράδυ για την επιστροφή στις κατοικίες των ανθρώπων που είτε εργάζονται το απόγευμα είτε έχουν επισκεφτεί εμπορικά καταστήματα.



Σχήμα 7: Διάγραμμα μέσης συγκέντρωσης PM10 ανά ώρα της ημέρας την ψυχρή (μπλε ράβδοι) και τη θερμή περίοδο (πορτοκαλί ράβδοι) των ετών 2017 – 2023. Με οριζόντιες γραμμές σημειώνονται τα όρια σύμφωνα με την οδηγία 2008/50/EK της ΕΕ (κυανή οριζόντια γραμμή) και την οδηγία 2024/2881 και τον ΠΟΥ (κόκκινη οριζόντια γραμμή).

5.1.1 Σύγκριση Συγκέντρωσης PM10 με Άλλες Πόλεις

Η ανάλυση των δεδομένων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης για τη Λάρισα κατά την περίοδο 2007 – 2023 έδειξε ότι, παρά την πτωτική τάση των ετήσιων μέσων τιμών της συγκέντρωσης των PM10, συχνά, και ιδίως κατά τους ψυχρούς μήνες, οι τιμές που καταγράφονται είναι υψηλές. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται σημαντικός αριθμός υπερβάσεων του ημερήσιου ορίου των 50 μg/m³, κυρίως το χειμώνα, που έχει θεσπιστεί από την ΕΕ και ισχύουν και στην Ελληνική νομοθεσία. Δεν σημειώνονται, όμως, υπερβάσεις του ετήσιου ορίου τα τελευταία χρόνια (από το 2013 και έπειτα). Οι υψηλές εκπομπές PM10 από τη λειτουργία των κεντρικών θερμάνσεων και την κίνηση των οχημάτων, σε συνδυασμό με δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες, αποτελούν τους βασικούς παράγοντες που οδηγούν στην υψηλή συγκέντρωση του ρύπου αυτού στην ατμόσφαιρα της πόλης τους χειμερινούς μήνες. Πιο ενθαρρυντικά είναι τα αποτελέσματα για τη θερμή περίοδο, οπότε οι τιμές των συγκεντρώσεων που καταγράφονται είναι σαφώς μικρότερες.

Ανάλογα με την περιοχή μελέτης, αντίστοιχες έρευνες για άλλες πόλεις της Ελλάδας για περιόδους μεταξύ των ετών 2007 – 2023 καταδεικνύουν πρότυπα ατμοσφαιρικής ρύπανσης που παρουσιάζουν ομοιότητες και διαφορές με αυτά της Λάρισας. Στην Αθήνα, παρά την πτωτική τάση που καταγράφεται για την ετήσια μέση συγκέντρωση των PM₁₀ στην ατμόσφαιρα, ιδιαίτερα τους χειμερινούς μήνες, παρατηρούνται συστηματικές υπερβάσεις του ημερήσιου ορίου. Σε αρκετούς σταθμούς, επίσης, οι ετήσιες μέσες τιμές συγκέντρωσης εξακολουθούν να υπερβαίνουν το αντίστοιχο όριο. Αντίστοιχα, στη Θεσσαλονίκη οι τιμές της συγκέντρωσης των PM₁₀ παραμένουν υψηλές, παρά την τάση μείωσης, επηρεαζόμενες τόσο από τοπικές πηγές, όπως η κυκλοφορία των οχημάτων και η χρήση κεντρικών συστημάτων θέρμανσης, όσο και από μεταφορά ρύπων από την κοντινή βιομηχανική περιοχή, με αποτέλεσμα συχνές και σημαντικές υπερβάσεις του ημερήσιου ορίου σε όλη τη διάρκεια του έτους. Στον Βόλο, οι ετήσιες μέσες τιμές συγκέντρωσης των PM₁₀, γενικά δεν υπερβαίνουν το αντίστοιχο όριο της Ελληνικής νομοθεσίας, αν και κατά τους ψυχρούς μήνες παρατηρούνται αυξημένα επίπεδα λόγω θέρμανσης και καιρικών συνθηκών. Παρά τη γενική συμμόρφωση με το ετήσιο όριο, καταγράφονται συχνές υπερβάσεις του ημερήσιου ορίου, ιδιαίτερα τον χειμώνα. Σε μικρότερες πόλεις, τέλος, όπως το Καρπενήσι και η Λαμία γενικά καταγράφονται μικρότερες τιμές συγκέντρωσης PM₁₀ και την ψυχρή και τη θερμή περίοδο του έτους σε σχέση με τις αντίστοιχες για την πόλη της Λάρισας. Συχνές, όμως, είναι οι υπερβάσεις του ημερήσιου ορίου που αναφέρεται στην Ελληνική νομοθεσία, ειδικά κατά τις πιο ψυχρές μέρες του έτους (Dimitriou & Kassomenos, 2018; Emmanouil et al., 2017; Moustris et al., 2020; Triantafyllou & Biskos, 2012).

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες μελέτες από άλλες ελληνικές πόλεις δείχνει ότι όλες αντιμετωπίζουν προβλήματα υπέρβασης των ορίων PM₁₀, σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό. Οι κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτό είναι η καύση βιομάζας και ορυκτών καυσίμων για θέρμανση, η κυκλοφορία των οχημάτων και, σε ορισμένες περιπτώσεις όπως στη Θεσσαλονίκη και τον Βόλο, η μεταφορά ρύπων από γειτονικές βιομηχανικές περιοχές.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μελέτης για τη Λάρισα με αντίστοιχα δεδομένα από άλλες πόλεις, διαπιστώνεται ότι η ποιότητα του αέρα στη Λάρισα είναι καλύτερη σε σχέση με μεγαλύτερες πόλεις, όπως η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη, αλλά ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι πιο επιβαρυνμένος σε σχέση με πόλεις μικρότερου μεγέθους, όπως η Λαμία και το Καρπενήσι. Παρουσιάζει, όμως, παρόμοια πρότυπα ατμοσφαιρικής ρύπανσης με τον Βόλο, μια πόλη συγκρίσιμου μεγέθους, ιδίως κατά την ψυχρή περίοδο.

5.2 Στατιστική Ανάλυση Μετεωρολογικών Δεδομένων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των μετεωρολογικών δεδομένων για την πόλη της Λάρισας για τα έτη 2007 – 2023. Οι μετεωρολογικές παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η βροχόπτωση, με στόχο την αποτύπωση και αξιολόγηση εποχικών μοτίβων αλλά και ακραίων καιρικών φαινομένων κατά τη διάρκεια των ετών αυτών.

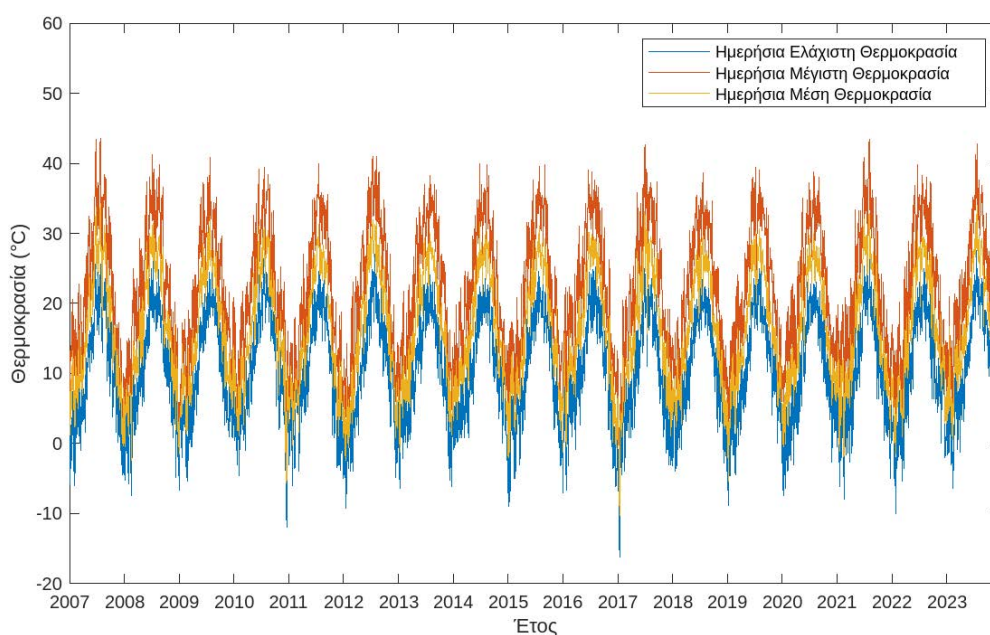
Το πρώτο διάγραμμα που δημιουργήθηκε παρουσιάζει τη διακύμανση της ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης θερμοκρασίας για την πόλη της Λάρισας κατά την περίοδο 2007 – 2023 ([Σχήμα 8](#)). Όπως αναμένεται για μια περιοχή σε αυτό το γεωγραφικό πλάτος, μέγιστα και για τις τρεις γραφικές παραστάσεις σημειώνονται την περίοδο του καλοκαιριού, ενώ ελάχιστα τους ψυχρότερους μήνες. Οι γραφικές παραστάσεις παρουσιάζουν σταθερό και επαναλαμβανόμενο μοτίβο, που αντικατοπτρίζει την προβλεψιμότητα των εποχικών μεταβολών της θερμοκρασίας.

Οι πιο σημαντικές ακραίες ελάχιστες τιμές εντοπίζονται κατά την αρχή του 2017, οπότε και καταγράφηκαν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες για τα δεδομένα της πόλης. Λαμβάνοντας υπόψιν και τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, το μέγιστο που σημειώθηκε για τη συγκέντρωση των PM10 στις αρχές του 2017 μπορεί να συνδεθεί και να εξηγηθεί από το ελάχιστο που σημείωσαν ελάχιστη, μέση και μέγιστη θερμοκρασία την ίδια περίοδο. Όσον αφορά τις μέγιστες τιμές των μεγεθών, τα καλοκαίρια του 2007, 2017 και 2021 είναι αυτά που ξεχωρίζουν, χωρίς, όμως, να αποκλίνουν σημαντικά από τις υπόλοιπες χρονιές που μελετήθηκαν.

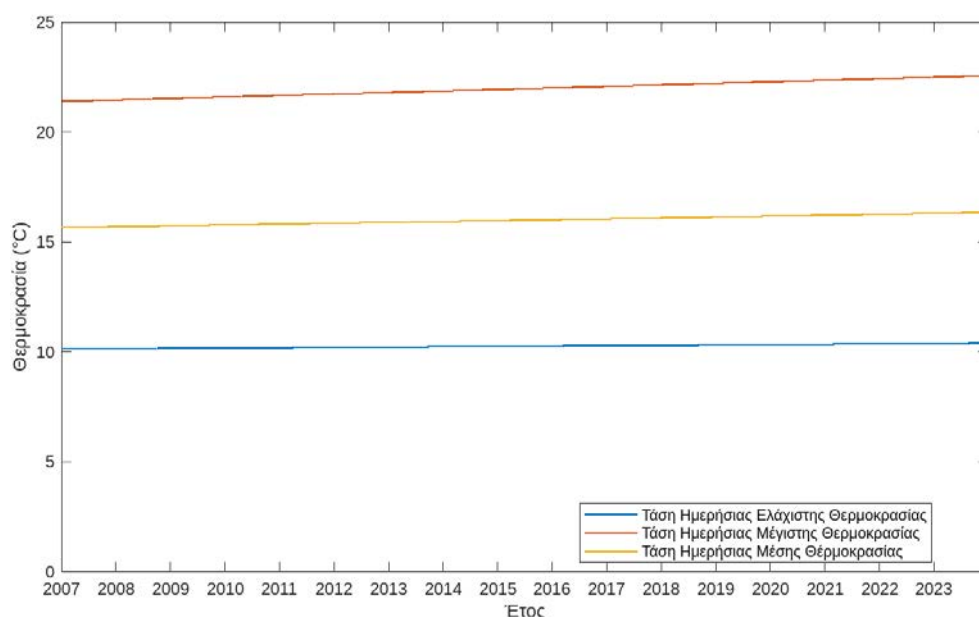
Από τη μελέτη του διαγράμματος προκύπτει πως η διαφορά μεταξύ ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας είναι, γενικά μικρότερη κατά τους χειμερινούς μήνες σε σύγκριση με τους θερινούς. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αποδοθεί στην μειωμένη διάρκεια ηλιοφάνειας τους χειμερινούς μήνες αλλά και της νεφοκάλυψης που συχνά επικρατεί κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Αποτέλεσμα αυτών είναι, αντιστοίχως, οι χαμηλότερες ημερήσιες μέγιστες θερμοκρασίες αλλά και η αδυναμία ψύξης του αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας, με αποτέλεσμα τη μείωση του ημερήσιου θερμομετρικού εύρους.

Για την περαιτέρω διερεύνηση της τάσης της θερμοκρασίας αλλά και πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην μετεωρολογική αυτή παράμετρο, κατασκευάστηκε το [Σχήμα 9](#), όπου η τάση έχει υπολογιστεί με γραμμική παλινδρόμηση. Μέσα από το διάγραμμα αυτό γίνεται φανερό πως για την ημερήσια ελάχιστη, μέση αλλά και μέγιστη θερμοκρασία υπάρχει αυξητική τάση με την πρόοδο των ετών. Από την κλίση των ευθειών μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως την πιο σημαντική συνολική αύξηση καταγράφει η μέση τιμή της μέγιστης θερμοκρασίας, κατά περίπου 1,2°C, ενώ μικρότερος είναι ο ρυθμός αύξησης για την μέση και έπειτα

για την ελάχιστη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, οι μέσες τιμές της μέσης και της ελάχιστης θερμοκρασίας αυξήθηκαν συνολικά κατά $0,7^{\circ}\text{C}$, και $0,3^{\circ}\text{C}$, αντίστοιχα, στο διάστημα 2007 – 2023. Αν και το χρονικό διάστημα είναι περιορισμένο για να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, είναι πιθανό αυτή η τάση θέρμανσης να αποτυπώνει μία από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην πόλη ή / και να οφείλεται στην ενίσχυση του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας λόγω αστικοποίησης, μείωσης της βλάστησης κ.ά..



Σχήμα 8: Διάγραμμα ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης θερμοκρασίας για τα έτη 2007 – 2023.

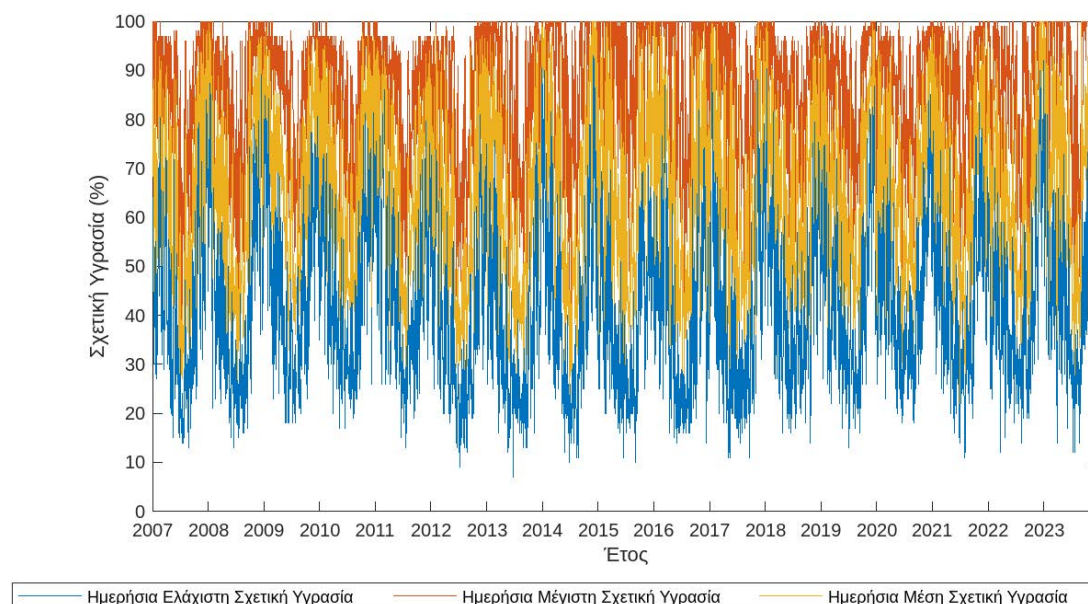


Σχήμα 9: Διάγραμμα τάσης ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης θερμοκρασίας με τη χρήση γραμμικής παλινδρόμησης για τα έτη 2007 – 2023.

Το γράφημα που ακολουθεί αποτυπώνει τις τιμές της ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης σχετικής υγρασίας για την περίοδο 2007 – 2023 (Σχήμα 10). Ένα από τα βασικά σημεία που προκύπτουν είναι οι έντονες εποχιακές μεταβολές. Μέγιστες τιμές για όλα τα μεγέθη σημειώνονται τους χειμερινούς και ελάχιστες κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, χωρίς να απουσιάζουν οι διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια τους. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν ληφθεί υπόψιν πως, γενικά, άνοδος της θερμοκρασίας συνοδεύεται από μείωση της σχετικής υγρασίας, καθώς με την άνοδο της θερμοκρασίας αυξάνεται η ικανότητα του ατμοσφαιρικού αέρα να συγκρατήσει υδρατμούς.

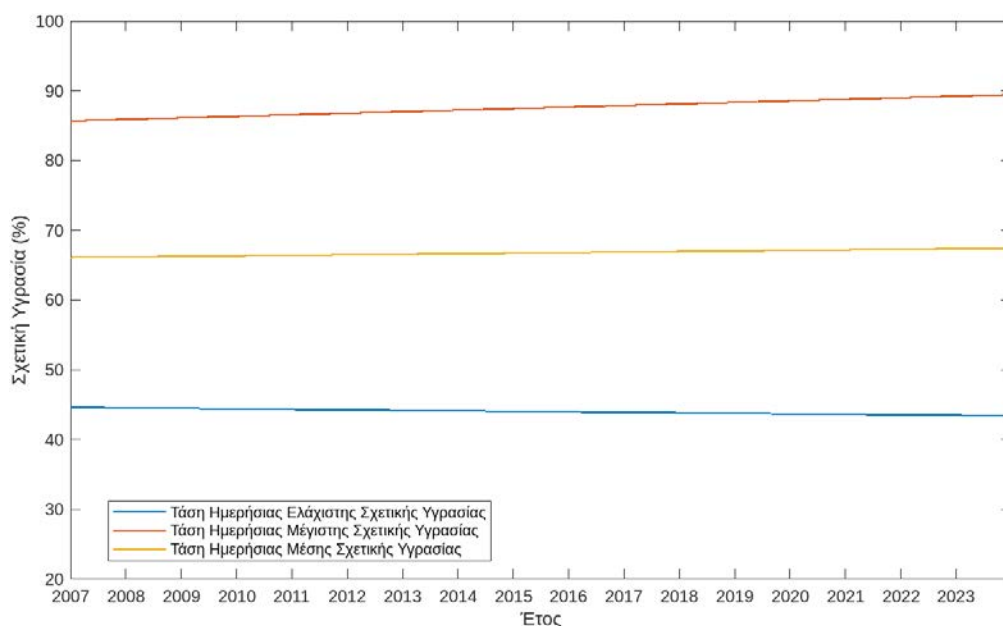
Αυτή η παραδοχή μπορεί να εξηγήσει και ένα από τα δεσπόζοντα ελάχιστα που παρουσιάζεται και στις τρεις γραφικές παραστάσεις το καλοκαίρι του 2012. Όπως σημειώθηκε στην ανάλυση του διαγράμματος για την ημερήσια ελάχιστη, μέση και μέγιστη θερμοκρασία, το 2012 καταγράφηκαν υψηλές τιμές θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Αυτό είχε, πιθανώς, ως επακόλουθο την μείωση τους σχετικής υγρασίας στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Κατά τη διάρκεια του έτους η διακύμανση της σχετικής υγρασίας είναι ιδιαίτερα έντονη, καθώς η ελάχιστη λαμβάνει τιμές συχνά κάτω από 30% τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ η μέγιστη κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι σταθερά άνω του 90%, κάτι το οποίο μπορεί να επιφέρει επιπτώσεις, μεταξύ άλλων, στην γεωργία και την ανθρώπινη υγεία. Σχετικά με τους αποστάσεις μεταξύ των γραφικών παραστάσεων, παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής της υγρασίας κατά το καλοκαίρι, ενώ πιο περιορισμένη φαίνεται να είναι τους χειμερινούς μήνες.



Σχήμα 10: Διάγραμμα ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης σχετικής υγρασίας για τα έτη 2007 – 2023.

Για να διαπιστωθεί αν υπάρχει τάση μεταβολής των τιμών της ελάχιστης, μέσης και μέγιστης σχετικής υγρασίας μέσα στα έτη κατασκευάστηκε το επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 11). Σημαντική φαίνεται να είναι η αύξηση της τιμής της μέγιστης σχετικής υγρασίας με την πάροδο των ετών, ενώ ο ρυθμός μεταβολής της μέσης σχετικής υγρασίας, αν και θετικός, είναι σαφώς μικρότερος. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή της μέγιστης σχετικής υγρασίας αυξήθηκε συνολικά κατά περίπου 3,8% και της μέσης κατά 1,3%. Αντίθετα, η μέση τιμή της ελάχιστης σχετικής υγρασίας σημείωσε μικρή συνολική μείωση της τάξης του 1,2%.



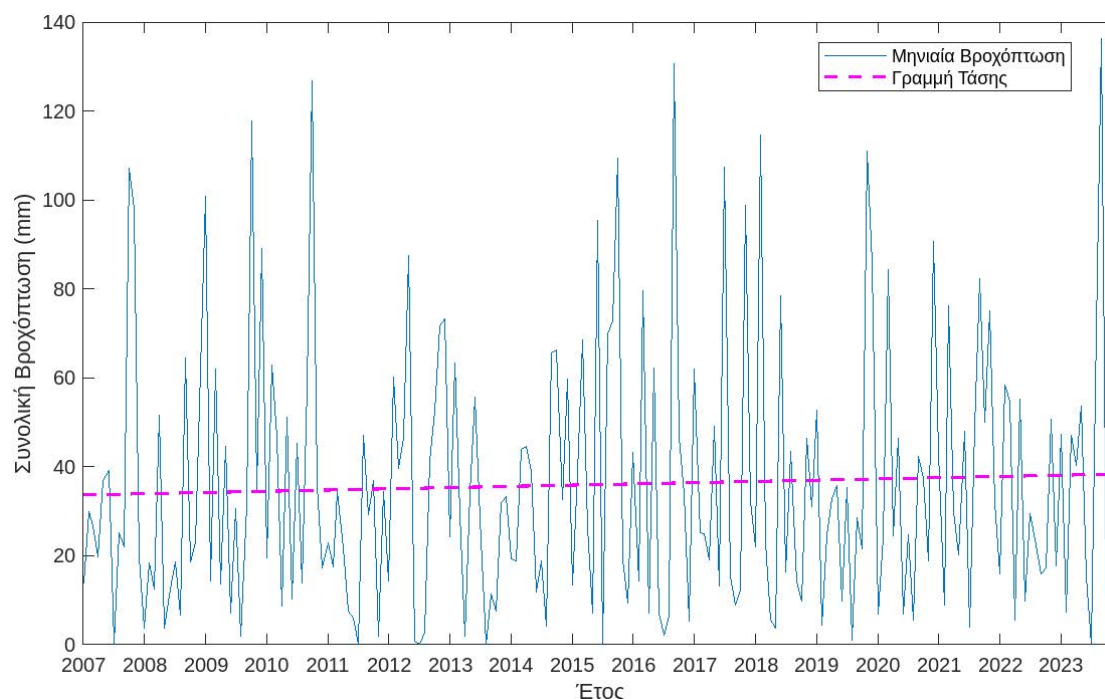
Σχήμα 11: Διάγραμμα τάσης ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης σχετικής υγρασίας με τη χρήση γραμμικής παλινδρόμησης για τα έτη 2007 – 2023.

Το τελευταίο διάγραμμα που δημιουργήθηκε παρουσιάζει την εξέλιξη της συνολικής μηνιαίας βροχόπτωσης για την εξεταζόμενη περίοδο 2007 – 2023 (Σχήμα 12). Όπως αναμένεται, τα μεγαλύτερα ύψη βροχής καταγράφονται κυρίως τους φθινοπωρινούς μήνες, ενώ για αρκετούς μήνες των καλοκαιριών που μελετώνται σημειώνονται πολύ μικρά ή και μηδενικά ύψη βροχής.

Αρκετές είναι οι περιπτώσεις στις οποίες σημειώθηκαν ιδιαίτερα μεγάλα ύψη βροχής, με τη σημαντικότερη κορυφή καταγράφεται το φθινόπωρο του 2023 (136,3mm), οπότε και η πόλη της Λάρισας, όπως και το μεγαλύτερο μέρος της Θεσσαλίας, επλήγη από τις καταστροφικές πλημμύρες που σημειώθηκαν από την επέλαση των κακοκαιριών Daniel και Elias. Πρέπει να σημειωθεί ότι, αν και αντίστοιχα ύψη βροχής είχαν παρατηρηθεί και κατά το παρελθόν, όπως τον Σεπτέμβριο του 2016 (130,7mm) και τον Οκτώβριο του 2010 (126,7mm), αυτά δεν συνοδεύτηκαν από εκτεταμένες ζημιές στην πόλη της Λάρισας, όπως συνέβη το 2023.

Από την γραμμή τάσης που προστέθηκε μετά τη χρήση γραμμικής παλινδρόμησης είναι φανερό η τάση αύξησης του ύψους της βροχόπτωσης κατά την περίοδο 2007 – 2023. Συγκεκριμένα, παρατηρείται συνολική αύξηση του ύψους της

βροχόπτωσης κατά περίπου 4,7mm. Είναι πιθανό αυτή η αυξητική τάση να προέκυψε ως αποτέλεσμα των ακραίων καιρικών φαινομένων και των υψών βροχόπτωσης που καταγράφηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις, ειδικά τα τελευταία χρόνια της περιόδου που εξετάστηκε.



Σχήμα 12: Διάγραμμα συνολικής μηνιαίας βροχόπτωσης για τα έτη 2007 – 2023. Με μωβ διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται η τάση της βροχόπτωσης για τα έτη αυτά.

Για την αποτύπωση της γενικής εικόνας των μετεωρολογικών μεταβλητών κατά τους ψυχρούς μήνες της περιόδου 2007 – 2023 στην περιοχή μελέτης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των δεδομένων με τη χρήση περιγραφικής στατιστικής, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στον [Πίνακα 2](#). Όπως προκύπτει και αναμένεται, την ψυχρή περίοδο επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες με ημερήσια μέση τιμή τούς 8,2°C. Σημαντικές είναι οι διαφορές που σημειώνονται μεταξύ των μέγιστων τιμών της ημερήσιας ελάχιστης, μέσης και μέγιστης μέσης θερμοκρασίας (17,4°C, 19,7°C και 27,0°C αντίστοιχα). Η σχετική υγρασία κινείται, γενικά, σε υψηλά επίπεδα με μέση τιμή κοντά στο 80%, ενώ δεν απουσιάζουν και οι μέρες στις οποίες καταγράφονται πολύ χαμηλές τιμές (ελάχιστη τιμή της ελάχιστης υγρασίας 12%). Όσον αφορά τη βροχή, αυτή φαίνεται να είναι περιορισμένη, αν και σημειώνονται γεγονότα έντονων βροχοπτώσεων με ύψη έως και 44,7mm.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη θερμή περίοδο των ίδιων ετών παρατίθενται στον [Πίνακα 3](#). Παρατηρούνται υψηλές θερμοκρασίες, κάτι που είναι τυπικό για την περίοδο αυτή, με ημερήσια μέση τιμή τους 24°C, ενώ η μέγιστη θερμοκρασία που σημειώθηκε την περίοδο αυτή άγγιξε τους 43,6°C. Οι τιμές της σχετικής υγρασίας, συγκριτικά με τις αντίστοιχες της ψυχρής περιόδου, είναι

χαμηλότερες, με ημερήσια μέση τιμή το 54%. Η ελάχιστη τιμή της ημερήσιας ελάχιστης σχετικής υγρασίας που καταγράφηκε ήταν μόνο 7%, ενώ η μέση τιμή αυτής της παραμέτρου υπολογίστηκε σε 34%. Η βροχόπτωση είναι ακόμα πιο περιορισμένη σε σχέση με την ψυχρή περίοδο, αλλά ακραία φαινόμενα οδήγησαν σε μέγιστη τιμή 69,2mm. Τα στοιχεία αυτά επιβεβαιώνουν πως στην περιοχή επικρατούν γενικά ξηρά και θερμά καλοκαίρια.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης για μετεωρολογικές παραμέτρους την ψυχρή περίοδο για τα έτη 2007 – 2023.

Μετεωρολογική Παράμετρος	Πλήθος Μετρήσεων	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
T min (°C)	2571	-16,2	17,4	3,5	4,4428
T avg (°C)	2571	-10,3	19,7	8,2	3,9724
T max (°C)	2571	-6,0	27,0	13,4	4,8653
RH min (%)	2571	12	100	57	18,075
RH avg (%)	2571	35	100	78	12,552
RH max (%)	2571	44	100	94	7,937
Βροχή (mm)	2558	0,0	44,7	1,3	3,5861

Πίνακας 3: Αποτελέσματα περιγραφικής στατιστικής ανάλυσης για μετεωρολογικές παραμέτρους τη θερμή περίοδο για τα έτη 2007 – 2023.

Μετεωρολογική Παράμετρος	Πλήθος Μετρήσεων	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Μέση Τιμή	Τυπική Απόκλιση
T min (°C)	2596	5,2	27,6	17,2	3,7882
T avg (°C)	2596	11,1	34,2	24,0	3,9685
T max (°C)	2596	13,2	43,6	30,7	4,7457
RH min (%)	2596	7	100	31	11,686
RH avg (%)	2596	22	100	54	12,859
RH max (%)	2596	36	100	80	13,731
Βροχή (mm)	2584	0,0	69,2	1,0	4,2335

5.3 Συσχετισμός Αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη συσχέτιση της συγκέντρωσης των PM10 και των μετεωρολογικών παραμέτρων της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας καθώς και της βροχής για τα έτη 2017 – 2023. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής Spearman, μέσω του οποίου επιχειρείται η ανάδειξη της ύπαρξης ή μη μονοτονικής σχέσης μεταξύ κάθε μετεωρολογικής παραμέτρου (T min, T avg, T max, RH min, RH avg, RH max και ύψους βροχής) και της ημερήσιας συγκέντρωσης των PM10, καθώς και ο προσδιορισμός του είδους αυτής της σχέσης. Η κατανόηση των σχέσεων που συνδέει αυτά τα μεγέθη μπορεί να συμβάλει στην ερμηνεία των μεταβολών των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης αλλά και στη διαμόρφωση πολιτικών πρόληψης και αντιμετώπισης επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία.

Αρχικά, μελετήθηκαν οι συσχετίσεις μεταξύ της ημερήσιας συγκέντρωσης των PM10 και των ημερήσιων ελάχιστων, μέσων και μέγιστων τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αλλά και της βροχής για τις ψυχρές περιόδους αυτών των ετών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον [Πίνακα 4](#). Διαπιστώθηκε αρνητική συσχέτιση μεταξύ της συγκέντρωσης των PM10 και της ελάχιστης θερμοκρασίας ($\rho = -0,342, p < 0,01$), η οποία ήταν πιο ασθενής και επίσης αρνητική για τη μέση θερμοκρασία ($\rho = -0,199, p < 0,01$). Αντίθετα, η συσχέτιση μεταξύ των επιπέδων PM10 και της μέγιστης θερμοκρασίας δεν ήταν στατιστικά σημαντική. Τα ευρήματα αυτά είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα άλλων μελετών (Kayes et al., 2019; Nguyen et al., 2017; Zalewska et al., 2021; Czernecki et al., 2017; Sindosi et al., 2021) και υποδηλώνουν πως οι χαμηλές θερμοκρασίες που σημειώνονται κατά τους μήνες Νοέμβριο έως Μάρτιο ευνοούν την άνοδο των επιπέδων PM10. Αυτό μπορεί να οφείλεται, πιθανώς, σε υψηλότερες τιμές εκπομπών από κεντρικές θερμάνσεις κατοικιών και κτιρίων, οι ανάγκες των οποίων είναι μεγαλύτερες υπό χαμηλές θερμοκρασίες, σε αυξημένη χρήση οχημάτων λόγω ψύχους ή και σε συνδυασμό αυτών.

Για τη συγκέντρωση των PM10 και τη σχετική υγρασία προέκυψε σε κάθε περίπτωση θετική και στατιστικά σημαντική συσχέτιση. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν προκύψει σε αντίστοιχες μελέτες που έχουν δημοσιευθεί, όπως των Trivedi et al. (2014), Zhang et al. (2015) και Li et al. (2017). Συγκεκριμένα, παρόμοιοι είναι οι συντελεστές που υπολογίστηκαν για την ασθενή, όπως προέκυψε, συσχέτιση των επιπέδων PM10 και μέσης ($\rho = 0,251, p < 0,01$) και μέγιστης σχετικής υγρασίας ($\rho = 0,261, p < 0,01$), ενώ πολύ ασθενής, αν και στατιστικά σημαντική, ήταν η συσχέτιση των επιπέδων PM10 και της ελάχιστης σχετικής υγρασίας ($\rho = 0,132, p < 0,01$). Υπάρχουν διάφορα αίτια στα οποία θα μπορούσε να αποδοθεί αυτό το φαινόμενο. Αρχικά, υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας σημειώνονται, γενικά, όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή, οπότε υπάρχουν αυξημένες ανάγκες για θέρμανση και,

κατ' επέκταση, αυξημένες εκπομπές PM₁₀. Υπό συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας, επίσης, ευνοείται η συσσωμάτωση μικρότερων αιωρούμενων σωματιδίων με υδροσταγονίδια του αέρα με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγαλύτερων σε διάμετρο σωματιδίων τα οποία προσμετρώνται στα PM₁₀.

Η βροχόπτωση, τέλος, παρουσίασε ασθενή αρνητική συσχέτιση ($\rho = -0,272, p < 0,01$) με τα επίπεδα PM₁₀ κατά τις ψυχρές περιόδους των ετών 2017 – 2023, αποτέλεσμα που συμφωνεί, ως προς το είδος της συσχέτισης με τα πορίσματα της πλειονότητας αντίστοιχων μελετών (Nguyen et al., 2017; Zalewska et al., 2021; González-Duque et al., 2015; Czernecki et al., 2017; Hassan et al., 2020; Li et al., 2019). Βασικός παράγοντας που οδηγεί στη μείωση της συγκέντρωσης του ρύπου αυτού είναι η απόπλυση κατά την οποία οι ρύποι παρασέρνονται από τη βροχή και καταλήγουν στο έδαφος. Άλλη εξήγηση που έχει δοθεί αναφέρει πως, λόγω της διαβροχής του εδάφους σε περίπτωση κατακρημνισμάτων, καθίσταται δύσκολο να συμβεί επαναιώρηση σκόνης από αυτό, οπότε δεν επιβαρύνεται επιπλέον η ατμόσφαιρα από σωματίδια μεγάλης διαμέτρου (Zhang et al., 2018; Li et al., 2015).

Κατά την περίοδο Νοεμβρίου – Μαρτίου διαπιστώθηκε ότι οι συγκεντρώσεις PM₁₀ στην πόλη της Λάρισας επηρεάζονται έως ενός βαθμού από τις μετεωρολογικές παραμέτρους που εξετάστηκαν, καθώς προέκυψαν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις. Μεταξύ αυτών, την πιο σημαντική επίδραση έχει η ελάχιστη θερμοκρασία, η μείωση της οποίας οδηγεί σε μικρή αύξηση των επιπέδων PM₁₀ στην ατμόσφαιρα. Δεύτερη κατά σειρά ισχύος είναι η συσχέτιση της συγκέντρωσης των PM₁₀ και της μέσης σχετικής υγρασίας, υποδεικνύοντας ασθενή αύξουσα μονοτονική σχέση. Γενικά, από το είδος των συσχετίσεων που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων συμπεραίνεται πως αύξηση των PM₁₀ παρατηρείται με μείωση της θερμοκρασίας και αύξηση της σχετικής υγρασίας, ενώ η ύπαρξη βροχής μπορεί να συμβάλει στην βελτίωση της ποιότητας του αέρα, αφού οδηγεί σε μείωση της συγκέντρωσης αυτού του ρύπου.

Πίνακας 4: Συντελεστές συσχέτισης Spearman για τη συγκέντρωση των PM₁₀ και μετεωρολογικών παραμέτρων κατά την ψυχρή περίοδο των ετών 2017 – 2023

	T min	T avg	T max	RH min	RH avg	RH max	Βροχή
PM ₁₀	-0,342**	-0,199**	0,040*	0,132**	0,261**	0,251**	-0,272**

**Η συσχέτιση είναι στατιστικώς σημαντική στο επίπεδο σημαντικότητας 0,01

*Μη στατιστικά σημαντική

Εξετάστηκαν, επίσης, οι συσχετίσεις μεταξύ της ημερήσιας μέσης συγκέντρωσης των PM₁₀ και των ίδιων μετεωρολογικών παραμέτρων (T min, T avg, T max, RH min, RH avg, RH max και ύψους βροχής) για τους πιο θερμούς μήνες των ετών 2017 – 2023. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον [Πίνακα 5](#).

Θετική είναι η συσχέτιση που καταγράφεται σε αυτή την περίπτωση μεταξύ των επιπέδων PM₁₀ και της θερμοκρασίας. Ειδικότερα, για τη συγκέντρωση των PM₁₀ και την μέγιστη θερμοκρασία σημειώθηκε μέτρια συσχέτιση ($\rho = 0,558, p < 0,01$), ενώ τόσο για την ελάχιστη όσο και για την μέση θερμοκρασία προέκυψε ασθενής αλλά στατιστικά σημαντική συσχέτιση ($\rho = 0,317, p < 0,01$ και $\rho = 0,439, p < 0,01$, αντίστοιχα). Παρόμοια είναι και τα αποτελέσματα των ερευνών των Nguyen et al. (2017), Zalewska et al. (2021), Trivedi et al. (2014), Czernecki et al. (2017), Li et al. (2019), Zhang et al. (2015), Li et al. (2017) και Karagiannidis et al. (2015). Οι υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης των PM₁₀ στην ατμόσφαιρα για αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των θερμών ημερών του χρόνου μπορούν να ερμηνευθούν με ποικίλους τρόπους. Ο σημαντικότερος, ίσως, παράγοντας που οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης των PM₁₀ με την άνοδο της θερμοκρασίας είναι η συσσώρευση ρύπων στο κέντρο της πόλης, ως αποτέλεσμα του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας και της κυκλοφορίας του αέρα που αυτό προκαλεί. Σημαντική επίδραση έχουν, επίσης, οι συνθήκες στασιμότητας που παρατηρούνται συχνά κατά τις θερμές μέρες του έτους λόγω των χαμηλών ταχυτήτων του ανέμου, ενώ και τα φαινόμενα ξηρασίας οδηγούν σε αύξηση της συγκέντρωσης των PM₁₀ στην ατμόσφαιρα λόγω της επαναιώρησης σκόνης (Czernecki et al. 2017; Lai & Cheng, 2009; Papanastasiou et al., 2010; Papanastasiou et al. 2014).

Από τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ συγκέντρωσης των PM₁₀ και ελάχιστης, μέσης και μέγιστης σχετικής υγρασίας προέκυψαν παρόμοιες αρνητικές τιμές ($\rho = -0,325, p < 0,01, \rho = -0,331, p < 0,01$ και $\rho = -0,328, p < 0,01$ αντίστοιχα) και στις τρεις περιπτώσεις, που οδηγούν στο συμπέρασμα πως αύξηση της τιμής οποιασδήποτε από αυτές τις παραμέτρους τη θερμή περίοδο οδηγεί σε μείωση των επιπέδων των PM₁₀. Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί με τα πορίσματα στα οποία κατέληξαν οι Nguyen et al. (2017), Trivedi et al. (2014), Hassan et al. (2020), Papanastasiou et al. (2015) και Zhang et al. (2015). Καθώς χαμηλά επίπεδα σχετικής υγρασίας συνοδεύονται από υψηλές θερμοκρασίες, οι λόγοι για τους οποίους παρατηρείται αύξηση της συγκέντρωσης των PM₁₀ με μείωση της τιμής αυτής της παραμέτρου τη θερμή περίοδο είναι παρόμοιοι με αυτούς που αναφέρθηκαν προηγουμένως για την συσχέτιση θερμοκρασίας και επιπέδων PM₁₀.

Η βροχόπτωση, τέλος, παρουσίασε, όπως και στην περίπτωση της ψυχρής περιόδου, ασθενή αρνητική συσχέτιση με τα επίπεδα PM₁₀ τους θερμούς μήνες των ετών αυτών ($\rho = -0,209, p < 0,01$). Αρνητική συσχέτιση για τα δύο αυτά μεγέθη προέκυψε και στις μελέτες των Li et al. (2015), Czernecki et al. (2017), Hassan et al. (2020) και Li et al. (2019) για τους καλοκαιρινούς μήνες. Η επίδραση της απόπλυσης και της βροχόπλυσης, και κατά την περίοδο αυτή, στα επίπεδα των PM₁₀ είναι σημαντική και μπορεί να βελτιώσει, ως ενός βαθμού, την ποιότητα του αέρα στον οποίο εκτίθενται οι κάτοικοι της Λάρισας.

Γενικά, για τους μήνες Μάιο έως και Σεπτέμβριο, τα επίπεδα των PM₁₀ στην Λάρισα επηρεάζονται με διαφορετικό τρόπο από τις διάφορες μετεωρολογικές

παραμέτρους σε σχέση με την ψυχρή περίοδο. Η μέγιστη θερμοκρασία φαίνεται να είναι ο πιο καθοριστικός μεταξύ των παραγόντων που μελετήθηκαν, καθώς η στατιστικά σημαντική θετική συσχέτιση που προέκυψε ήταν η μοναδική που χαρακτηρίζεται ως μέτρια. Μέσα από τη συγκεκριμένη ανάλυση γίνεται σαφές ότι υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας, γενικά, οδηγούν και σε αυξημένα επίπεδα PM10 τη θερμή περίοδο του έτους. Σε αντίθεση με την σχέση που παρατηρήθηκε κατά την ψυχρή περίοδο, κατά τους θερμούς μήνες αύξηση της ελάχιστης, μέσης και μέγιστης σχετικής υγρασίας οδηγεί σε ελαφρά μείωση των PM10. Η βροχόπτωση είναι η μοναδική μεταξύ των μετεωρολογικών παραμέτρων που εξετάστηκαν η οποία έχει το ίδιο είδος συσχέτισης με τις τιμές των συγκεντρώσεων του ρύπου αυτού και στις δύο περιόδους που μελετήθηκαν, ενώ και η τιμή της αρνητικής συσχέτισης που προέκυψε είναι παρόμοια.

Πίνακας 5: Συντελεστές συσχέτισης Spearman για τη συγκέντρωση των PM10 και μετεωρολογικών παραμέτρων κατά τη θερμή περίοδο των ετών 2017 – 2023.

	T min	T avg	T max	RH min	RH avg	RH max	Βροχή
PM10	0,317**	0,439**	0,558**	-0,325**	-0,331**	-0,328**	-0,209**

**Η συσχέτιση είναι στατιστικώς σημαντική στο επίπεδο σημαντικότητας 0,01

Πραγματοποιήθηκε, επίσης, υπολογισμός της τιμής του συντελεστή συσχέτισης Spearman μεταξύ της ωραίας συγκέντρωσης των PM10 και των αντίστοιχων τιμών της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας για την ψυχρή και τη θερμή περίοδο. Η ανάλυση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς μπορεί να συμβάλει στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο επιδρούν οι μετεωρολογικές αυτές παράμετροι στις τιμές της συγκέντρωσης των PM10 σε διάφορες χρονικές ζώνες της μέρας. Η συγκέντρωση του ρύπου αυτού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (μετεωρολογικές παράμετροι, πηγές εκπομπής κ.ά.), η δυναμική των οποίων είναι διαφορετική κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου. Από τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης μπορεί να γίνει φανερό σε ποιο διάστημα της ημέρας επιδρούν περισσότερο η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία.

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων για τους μήνες Νοέμβριο έως και Μάρτιο φαίνονται αναλυτικά στον [Πίνακα 6](#). Μελετώντας τα μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί πως, γενικά, αρνητική και στατιστικά σημαντική είναι η συσχέτιση μεταξύ της ωραίας συγκέντρωσης των PM10 και της αντίστοιχης θερμοκρασίας. Εξαιρεση αποτελούν οι μεσημεριανές ώρες (14:00 και 17:00) οπότε υπολογίστηκε στατιστικά μη σημαντική συσχέτιση. Πιθανότατα, το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός πως κατά τη διάρκεια αυτών των ωρών, οπότε και η θερμοκρασία φτάνει στα ημερήσια μέγιστα επίπεδα, η κατακόρυφη ανάμειξη των ρύπων ευνοείται λόγω της

αστάθειας της ατμόσφαιρας, οδηγώντας σε μείωση της συγκέντρωσης των PM10. Αν και ασθενείς, μεταξύ των τιμών που προέκυψαν, μεγαλύτερες απόλυτες τιμές συσχετίσεων καταγράφονται τις βραδινές ώρες ($\rho = -0,312, p < 0,01$ στις 23:00 και $\rho = -0,354, p < 0,01$ στις 02:00) αλλά και νωρίς το πρωί, στις 08:00 ($\rho = -0,297, p < 0,01$). Οι ασθενείς αρνητικές συσχετίσεις που καταγράφονται για τα μεγέθη αυτά τις βραδινές έως και τις πρώτες πρωινές ώρες (23:00 – 08:00) θα μπορούσαν να αποδοθούν στο χαμηλό ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και σε θερμοκρασιακές αναστροφές που συνήθως επικρατούν τις ώρες αυτές κατά τις ψυχρές ημέρες του χρόνου, κατά τη διάρκεια των οποίων δεν ευνοείται η διασπορά των ρύπων. Οι πολύ ασθενείς αρνητικές συσχετίσεις στις 11:00 και στις 20:00 δικαιολογούνται, επίσης, από θερμοκρασιακές αναστροφές που, όμως, δεν είναι τόσο ισχυρές αυτές τις ώρες της ημέρας.

Όσον αφορά τη σχετική υγρασία, γενικά, ασθενής θετική και στατιστικά σημαντική συσχέτιση καταγράφεται για τις ημέρες της ψυχρής περιόδου αυτών των ετών. Εξάιρεση αποτελεί μόνο η συσχέτιση που υπολογίστηκε για τις 11:00, που αν και θετική και στατιστικά σημαντική, είναι πολύ ασθενής. Όπως και στην περίπτωση της θερμοκρασίας, έτσι και για τη σχετική υγρασία, υψηλές τιμές συσχετίσεων καταγράφονται για τις ώρες 23:00 και 02:00 ($\rho = 0,328, p < 0,01$ και $\rho = 0,337, p < 0,01$ αντίστοιχα), οι οποίες, όμως δεν περιορίζονται στις ώρες αυτές. Παρόμοιες τιμές καταγράφονται και για τις 17:00 και 20:00 ($\rho = 0,301, p < 0,01$ και $\rho = 0,311, p < 0,01$ αντίστοιχα). Συμπεραίνεται, επομένως, πως καθ' όλη τη διάρκεια των ψυχρών ημερών αύξηση στη σχετική υγρασία οδηγεί σε αύξηση των επιπέδων των PM10, με το φαινόμενο να είναι πιο έντονο τις πρώτες ώρες μετά τη δύση του ηλίου. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποδοθεί σε έναν συνδυασμό μετεωρολογικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Συγκεκριμένα, οι θερμοκρασιακές αναστροφές και το χαμηλό οριακό στρώμα εμποδίζουν τη διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα και η πτώση της θερμοκρασίας, που συχνά συνοδεύει την αύξηση της σχετικής υγρασίας, εξαναγκάζει τους ανθρώπους στην καύση βιομάζας για τη θέρμανση των οικιών και των χώρων εργασίας τους. Επιπλέον, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη πως υπό συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας ευνοείται η υγροσκοπική ανάπτυξη των σωματιδίων κατά την οποία μικρότερα σε διάμετρο αιωρούμενα σωματίδια, λόγω συσσωμάτωσης με υδρατμούς, αυξάνουν τη διάμετρό τους και λογίζονται ως PM10.

Αξίζει να σημειωθεί πως από την εξέταση των συσχετίσεων για την ωριαία συγκέντρωση των PM10 με την αντίστοιχη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία συνδυαστικά για τις ώρες 20:00, 23:00 και 02:00 των ημερών της ψυχρής περιόδου, οπότε και παρατηρήθηκαν υπερβάσεις των θεσμοθετημένων ορίων κατά την ανάλυση των δεδομένων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, προέκυψε πως διατηρείται η αρνητική και στατιστικά σημαντική συσχέτιση για τη θερμοκρασία ($\rho = -0,269, p < 0,01$) και η θετική και στατιστικά σημαντική συσχέτιση για τη σχετική υγρασία ($\rho = 0,328, p < 0,01$). Το εύρημα αυτό ενισχύει την εκτίμηση πως τις συγκεκριμένες βραδινές ώρες η συγκέντρωση του ρύπου επηρεάζεται σημαντικά από

τις μετεωρολογικές μεταβλητές, λόγω των έντονων θερμοκρασιακών αναστροφών που επικρατούν και του χαμηλού ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, ταυτόχρονα με τις αυξημένες εκπομπές σωματιδίων λόγω καύσης για θέρμανση.

Πίνακας 6: Συντελεστές συσχέτισης Spearman για την ωριαία συγκέντρωση των PM10, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας ανά ώρα κατά την ψυχρή περίοδο των ετών 2017 – 2023.

Ώρα	PM10 – T	PM10 – RH
02:00	-0,354**	0,337**
05:00	-0,290**	0,293**
08:00	-0,297**	0,262**
11:00	-0,105**	0,125**
14:00	0,025*	0,232**
17:00	0,017*	0,301**
20:00	-0,127**	0,311**
23:00	-0,312**	0,328**
20:00, 23:00, 02:00	-0,269**	0,328**

**Η συσχέτιση είναι στατιστικώς σημαντική στο επίπεδο σημαντικότητας 0,01

*Μη στατιστικά σημαντική

Συμπερασματικά, από την μελέτη των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των τιμών που υπολογίστηκαν για τις συσχετίσεις της ωραίας συγκέντρωσης των PM10 με τις αντίστοιχες τιμές θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας για την ψυχρή περίοδο των ετών 2017 – 2023 στην πόλη της Λάρισας, προκύπτει σαν συμπέρασμα πως οι μετεωρολογικές παράμετροι της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας έχουν πιο ισχυρή επίδραση στη συγκέντρωση των PM10 τις βραδινές και τις πρώτες πρωινές ώρες, οπότε στην ατμόσφαιρα επικρατούν συνθήκες ευστάθειας. Η πληροφορία αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί σε προγνωστικά μοντέλα ποιότητας, καθώς και για τη στοχευμένη λήψη μέτρων περιορισμού της ατμοσφαιρικής ρύπανσης για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Αντίστοιχη ανάλυση έγινε και για τα δεδομένα που αφορούν τη θερμή περίοδο των ίδιων ετών, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται αναλυτικά στον [Πίνακα 7](#). Για τα επίπεδα των PM10 και τη θερμοκρασία η συσχέτιση είναι θετική και στατιστικά σημαντική για όλες τις ώρες που μελετήθηκαν. Η σημαντικότερη επίδραση στη συγκέντρωση των PM10 καταγράφεται τα μεσάνυχτα, οπότε και η συσχέτιση που υπολογίστηκε είναι μέτρια ($\rho = 0,431, p < 0,01$). Πιθανές αιτίες αυτού του φαινομένου είναι οι θερμοκρασιακές αναστροφές αλλά και η ευστάθεια της ατμόσφαιρας που επικρατεί λόγω της απουσίας ηλιακής ακτινοβολίας. Δεν

γίνεται, επομένως, δυνατή ούτε η διασπορά αλλά ούτε και η κατακόρυφη ανάμειξη των ρύπων, λόγω απουσίας τυρβώδους ροής. Κατά τις υπόλοιπες ώρες οι συσχετίσεις είναι ασθενείς με τιμές που κυμαίνονται από $\rho = 0,276$ ($p < 0,01$) στις 18:00 έως $\rho = 0,388$ ($p < 0,01$) στις 12:00. Οι συσχετίσεις αυτές καταδεικνύουν πως, αν και η θερμοκρασία επιδρά στις συγκεντρώσεις των ρύπων έως έναν βαθμό, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, όπως η κυκλοφορία των οχημάτων ή οι δραστηριότητες που πραγματοποιούνται, που κατά τη διάρκεια της ημέρας έχουν πιο καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των επιπέδων των PM10. Σε κάθε περίπτωση, όμως, κατά τη διάρκεια των πιο θερμών ημερών του έτους, αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει και αύξηση, είτε σε μικρότερο είτε σε μεγαλύτερο βαθμό, της συγκέντρωσης του εξεταζόμενου ρύπου.

Για τις ωριαίες τιμές συγκέντρωσης των PM10 και τη σχετική υγρασία οι συσχετίσεις που προέκυψαν είναι αρνητικές και, γενικά, στατιστικά σημαντικές. Αν και ασθενής, η πιο ισχυρή συσχέτιση καταγράφεται στις 24:00 ($\rho = -0,356, p < 0,01$). Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό πως υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας ενδέχεται να δρουν ευνοϊκά για την ποιότητα του αέρα στην πόλη της Λάρισας κατά τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο. Ενδελεχής μελέτη των αποτελεσμάτων αναδεικνύει πως τις ώρες μετά την ανατολή του ηλίου έως και λίγο πριν τη δύση του η απόλυτη τιμή των συσχετίσεων μειώνεται σταδιακά, ενώ το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νύχτας. Μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα, επομένως, πως ο ρόλος της σχετικής υγρασίας στη διαμόρφωση των συγκεντρώσεων των ρύπων γίνεται δευτερεύων στη διάρκεια της μέρας όταν η ανθρωπογενής δραστηριότητα, άρα και οι εκπομπές PM10, αυξάνονται. Αντιθέτως, κατά τη διάρκεια των βραδινών ωρών, όταν περιορίζονται οι πηγές εκπομπών και επικρατούν υψηλότερα επίπεδα σχετικής υγρασίας, η επίδραση της στη συγκέντρωση των PM10 στην ατμόσφαιρα ενισχύεται.

Καταληκτικά, κατά τη θερμή περίοδο των ετών 2017 – 2023, οι μετεωρολογικές παράμετροι που μελετήθηκαν, και ιδιαίτερα η θερμοκρασία, επηρεάζουν σημαντικά τα επίπεδα των PM10 καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, με εντονότερη επίδραση κατά τις βραδινές ώρες. Η αύξηση της θερμοκρασίας τις θερμές ημέρες συνοδεύεται από αύξηση της συγκέντρωσης των PM10, ενώ η άνοδος της σχετικής υγρασίας οδηγεί, γενικά, σε μείωση των επιπέδων τους. Ωστόσο, η σχετική υγρασία παρουσιάζει μικρότερη επίδραση στη συγκέντρωση των PM10, όπως υποδεικνύεται από τις τιμές των συντελεστών συσχέτισης. Η πιο έντονη επιρροή των μετεωρολογικών παραμέτρων κατά τις βραδινές ώρες υπογραμμίζει ότι, σε συνθήκες ευστάθειας της ατμόσφαιρας και μειωμένης ανθρωπογενούς δραστηριότητας, οι παράμετροι αυτές διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των συγκεντρώσεων PM10 στην ατμόσφαιρα της πόλης.

Πίνακας 7: Συντελεστές συσχέτισης Spearman για την ωριαία συγκέντρωση των PM10, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας ανά ώρα κατά τη θερμή περίοδο των ετών 2017 – 2023.

Ώρα	PM10 – T	PM10 – RH
03:00	0,346***	-0,384***
06:00	0,302***	-0,284***
09:00	0,305***	-0,279***
12:00	0,388***	-0,166***
15:00	0,346***	-0,068**
18:00	0,276***	-0,001*
21:00	0,336***	-0,194***
24:00	0,431***	-0,356***

***Η συσχέτιση είναι στατιστικώς σημαντική στο επίπεδο σημαντικότητας 0,01

**Η συσχέτιση είναι στατιστικώς σημαντική στο επίπεδο σημαντικότητας 0,05

*Μη στατιστικά σημαντική

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία ανέλυσε τη διαχρονική πορεία των τιμών της συγκέντρωσης των PM₁₀ στην πόλη της Λάρισας και τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζονται από τις μετεωρολογικές παραμέτρους της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και της βροχής. Μέσα από τη στατιστική ανάλυση και την αξιοποίηση δεδομένων για τα έτη 2007 – 2023, αναδείχθηκαν σημαντικά ευρήματα σχετικά με την ποιότητα του αέρα στην περιοχή, τις εποχικές τάσεις ρύπανσης, τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην πόλη και την επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων στα επίπεδα των PM₁₀. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνοψίζονται παρακάτω:

- Στην πόλη της Λάρισας καταγράφηκε πτωτική τάση των ετήσιων μέσων τιμών συγκέντρωσης των PM₁₀ κατά την περίοδο 2007 – 2023, ενώ παρατηρήθηκε και συμμόρφωση με το ετήσιο όριο των 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ωστόσο, αρκετές είναι οι υπερβάσεις του ημερήσιου ορίου (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) που σημειώνονται κάθε έτος, ιδίως κατά την ψυχρή περίοδο (Νοέμβριος – Μάρτιος), χωρίς να απουσιάζουν οι περιπτώσεις υπέρβασής του και τη θερμή περίοδο (Μάιος – Σεπτέμβριος).
- Η συγκέντρωση των PM₁₀ τη θερμή περίοδο είναι σταθερά χαμηλότερη (μέση τιμή 29,17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) σε σχέση με τη ψυχρή περίοδο (μέση τιμή 40,24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), οπότε και εντοπίζονται συχνά και έντονα φαινόμενα ατμοσφαιρικής ρύπανσης
- Μεταβολές στις τιμές της συγκέντρωσης σημειώνονται κατά τη διάρκεια της εβδομάδας και για τις δύο περιόδους που μπορούν να αποδοθούν στις αλλαγές της κυκλοφορίας των οχημάτων εντός του αστικού ιστού.
- Τα μεγαλύτερα επίπεδα PM₁₀ κατά τη διάρκεια της ημέρας, που υπερβαίνουν το ημερήσιο όριο, παρατηρούνται κατά τις βραδινές ώρες της ψυχρής περιόδου.
- Δυο μέγιστα των τιμών της συγκέντρωσης των PM₁₀ σημειώνονται κατά τη διάρκεια της ημέρας και για τις δύο περιόδους, μεγαλύτερο το βράδυ και μικρότερο το πρωί.
- Η μελέτη ανέδειξε την ανάγκη λήψης περαιτέρω μέτρων για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, ειδικά υπό τα αυστηρότερα όρια που αναμένεται να υιοθετηθούν από την ΕΕ (ημερήσιο όριο στα 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ αντί για 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ και ετήσιο όριο 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ αντί για 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Την ψυχρή περίοδο σημειώνονται οι ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας και οι μέγιστες τιμές σχετικής υγρασίας.
- Μεγαλύτερα ύψη βροχής σημειώνονται το φθινόπωρο, ελάχιστα ή και μηδενικά το καλοκαίρι, ενώ αρκετά είναι τα γεγονότα ακραίων βροχοπτώσεων.

- Αυξητική τάση σημείωσε η θερμοκρασία και το ύψος της βροχόπτωσης τα έτη 2007 – 2023.
- Μείωση της θερμοκρασίας την ψυχρή περίοδο οδηγεί σε αύξηση των επιπέδων PM10 στην ατμόσφαιρα, αφού στατιστικά σημαντική αρνητική συσχέτιση υπολογίστηκε μεταξύ των επιπέδων του ρύπου και της T_{min} ($\rho = -0,342, p < 0,01$) και T_{max} ($\rho = -0,199, p < 0,01$). Αντίστροφη σχέση παρουσιάζει η σχετική υγρασία με τη συγκέντρωση των PM10 ($\rho = 0,261, p < 0,01$ για RH avg και τη συγκέντρωση PM10)
- Τη θερμή περίοδο οι συσχετίσεις μεταξύ της συγκέντρωσης των PM10 και της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας έχουν αντίθετα πρόσημα σε σχέση με την ψυχρή (τιμή συσχέτισης μεταξύ συγκέντρωσης PM10 και T_{max} $\rho = 0,558, p < 0,01$ και μεταξύ συγκέντρωσης PM10 και RH max $\rho = -0,328, p < 0,01$)
- Η παρουσία βροχής βοηθά στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα ανεξάρτητα της εποχής που εξετάζεται, καθώς η συσχέτιση της συγκέντρωσης των PM10 και του ύψους της βροχής είναι αρνητική και για τις δύο περιόδους μελέτης ($\rho = -0,272, p < 0,01$ την ψυχρή και $\rho = -0,209, p < 0,01$ τη θερμή).
- Από τον υπολογισμό των συσχετίσεων ανά ώρα της ημέρας παρατηρήθηκε ότι τόσο την ψυχρή όσο και τη θερμή περίοδο οι απόλυτες τιμές τους είναι μεγαλύτερες τις βραδινές ώρες, υποδεικνύοντας πως τότε οι μετεωρολογικές παράμετροι διαδραματίζουν πιο σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των τιμών της συγκέντρωσης των PM10.

Καθώς δεν κατέστη δυνατή η μελέτη περισσότερων ρύπων, λόγω της πληρότητας των δεδομένων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, προτείνεται η έρευνα αντίστοιχων συσχετίσεων και για άλλους ρύπους με όλες τις μετεωρολογικές παραμέτρους, τόσο στην περιοχή αυτή όσο και για άλλες πόλεις της Ελλάδας για τις οποίες δεν έχουν πραγματοποιηθεί αντίστοιχες έρευνες. Με τον τρόπο αυτό θα γίνει εμφανές ποιες περιοχές αντιμετωπίζουν προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης και για ποιες περιόδους του έτους, κάτι που μπορεί να βοηθήσει στο να ληφθούν στοχευμένα μέτρα και να διαμορφωθούν αυστηρότερες πολιτικές για την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας.

Βιβλιογραφία

- Αποτελέσματα Απογραφής Πληθυσμού Κατοικιών 2021. Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). Ημερομηνία Ανάκτησης: 16-5-2025. https://elstat-outsourcers.statistics.gr/Census2022_GR.pdf
- Γεντεκάκης, Ι. (2010). *Ατμοσφαιρική Ρύπανση: Επιπτώσεις, Έλεγχος και Εναλλακτικές Τεχνολογίες*. Χανιά: Εκδόσεις Κλειδάριθμος ΕΠΕ.
- Δαλέζιος, Ν. (2016). *Αγρομετεωρολογία: ανάλυση και προσομοίωση*.
- Ζιακόπουλος, Δ., & Φραγκούλη, Π. (2011). *Το εγχειρίδιο του μετεωρολόγου-προγνώστη. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία*.
- Κλιματικά Δεδομένα για επιλεγμένους σταθμούς στην Ελλάδα-Λάρισα. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY). Ημερομηνία Ανάκτησης: 7-5-2025. http://oldportal.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=Thessaly&poli=Larisa
- Μελάς, Δ., Μπάης, Α., & Μπαλής, Δ. (2016). *Ατμοσφαιρική τεχνολογία*.
- Παπαναστασίου, Δ. (2007). *Ατμοσφαιρική ρύπανση-μετεωρολογία σε αστικό περιβάλλον υπό συνθήκες υψηλού υπόβαθρου* (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Φυσικής. Τομέας Εφαρμογών Φυσικής και Φυσικής Περιβάλλοντος. Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας).
- Ποιότητα της ατμόσφαιρας. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Ημερομηνία Ανάκτησης: 14-2-2025. <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/>
- Πολοδομικά Δεδομένα. Δήμος Λαρισαίων. Ημερομηνία Ανάκτησης: 7-5-2025. <https://gis.larissa-dimos.gr/poleodom/>
- Στάθης, Δ. (2016). *Μαθήματα δασικής μετεωρολογίας και κλιματολογίας*.
- Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής. (2011). *Κοινή Υπουργική Απόφαση 14122/549/Ε.103 περί ορίων ποιότητας ατμοσφαιρικού αέρα (ΦΕΚ 488/Β/30-3-2011)*. Ελληνική Δημοκρατία.
- Χάρτες. Δήμος Φαρσάλων. Ημερομηνία Ανάκτησης: 7-5-2025. <https://old.dimosfarsalon.gr/en/map>
- Absalom, H. W. L. (1954). Meteorological aspects of smog. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 80(344), 261-266.
- Ahlers, C. D. (2015). Origins of the clean air act: A new interpretation. *Envtl. I.*, 45, 75.
- Ahmed, E., Kim, K. H., Jeon, E. C., & Brown, R. J. (2015). Long term trends of methane, non methane hydrocarbons, and carbon monoxide in urban atmosphere. *Science of the Total Environment*, 518, 595-604.
- Ahrens, C. D. (2018). *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment* (12th ed.). Cengage Learning Canada Inc.
- Air pollution and your health*. National Institute of Health. Ημερομηνία Ανάκτησης: 14-2-2025. <https://www.niehs.nih.gov/health/topics/agents/air-pollution>
- Air pollution*. European Environment Agency. Ημερομηνία Ανάκτησης: 14-2-2025. <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/air-pollution>
- Akyüz, M., & Çabuk, H. (2009). Meteorological variations of PM2.5/PM10 concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in

- the atmospheric environment of Zonguldak, Turkey. *Journal of hazardous materials*, 170(1), 13-21.
- Amarillo, A. C., & Carreras, H. (2016). Quantifying the influence of meteorological variables on particle-bound PAHs in urban environments. *Atmospheric Pollution Research*, 7(4), 597-602.
- Antony Chen, L. W., Doddridge, B. G., Dickerson, R. R., Chow, J. C., Mueller, P. K., Quinn, J., & Butler, W. A. (2001). Seasonal variations in elemental carbon aerosol, carbon monoxide and sulfur dioxide: Implications for sources. *Geophysical Research Letters*, 28(9), 1711-1714.
- Aron, R. H., & Aron, L. M. (1978). Statistical forecasting models: I. Carbon monoxide concentrations in the Los Angeles basin. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 28(7), 681-688.
- Asadifard, E., & Masoudi, M. (2018). Status and prediction of carbon monoxide as an air pollutant in Ahvaz City, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 16(3), 203-213.
- Asif, M., Bhatti, M. S., & Prabhu, V. (2025). Spatio-temporal variation of ambient particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Punjab: role of stubble burning and meteorological factors. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(1), 1-17.
- Asimakopoulos, D. N., Flocas, H. A., Maggos, T., & Vasilakos, C. (2012). The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5-10}). *Science of the total environment*, 419, 124-135.
- Bai, D., Wang, H., Tan, Y., Yin, Y., Wu, Z., Guo, S., ... & Kong, X. (2019). Optical properties of aerosols and chemical composition apportionment under different pollution levels in Wuhan during January 2018. *Atmosphere*, 11(1), 17.
- Bakeas, E. B., & Siskos, P. A. (2002). Volatile hydrocarbons in the atmosphere of Athens, Greece. *Environmental Science and Pollution Research*, 9, 234-240.
- Baltaci, H., Akkoyunlu, B. O., Arslan, H., Yetemen, O., & Ozdemir, E. T. (2019). The influence of meteorological conditions and atmospheric circulation types on PM₁₀ levels in western Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 1-12.
- Banerjee, T., Singh, S. B., & Srivastava, R. K. (2011). Development and performance evaluation of statistical models correlating air pollutants and meteorological variables at Pantnagar, India. *Atmospheric Research*, 99(3-4), 505-517.
- Barnpadimos, I., Hueglin, C., Keller, J., Henne, S., & Prévôt, A. S. H. (2011). Influence of meteorology on PM₁₀ trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(4), 1813-1835.
- Baynton, H. W. (1956). Multiple correlations of particulate air pollution with weather factors at Detroit and Windsor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37(7), 333-337.
- Belikov, I. B., Brenninkmeijer, C. A. M., Elansky, N. F., & Ra'ko, A. A. (2006). Methane, carbon monoxide, and carbon dioxide concentrations measured in the atmospheric surface layer over continental Russia in the TROICA experiments. *Izvestiya, Atmospheric and oceanic physics*, 42, 46-59.
- Bernstein, J. A., Alexis, N., Barnes, C., Bernstein, I. L., Nel, A., Peden, D., ... & Williams, P. B. (2004). Health effects of air pollution. *Journal of allergy and clinical immunology*, 114(5), 1116-1123.

- Bhaskar, B. V., & Mehta, V. M. (2010). Atmospheric particulate pollutants and their relationship with meteorology in Ahmedabad. *Aerosol and Air Quality Research*, 10(4), 301-315.
- Bilal, M., Mhawish, A., Nichol, J. E., Qiu, Z., Nazeer, M., Ali, M. A., ... & Ke, S. (2021). Air pollution scenario over Pakistan: Characterization and ranking of extremely polluted cities using long-term concentrations of aerosols and trace gases. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112617.
- Birgul, A., & Tasdemir, Y. (2015). Concentrations, gas-particle partitioning, and seasonal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons at four sites in Turkey. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 68, 46-63.
- Bruneekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The lancet*, 360(9341), 1233-1242.
- Burkart, K., Nehls, I., Win, T., & Endlicher, W. (2013). The carcinogenic risk and variability of particulate-bound polycyclic aromatic hydrocarbons with consideration of meteorological conditions. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 6, 27-38.
- Camalier, L., Cox, W., & Dolwick, P. (2007). The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends. *Atmospheric environment*, 41(33), 7127-7137.
- Cerón Bretón, J. G., Cerón Bretón, R. M., Vivas Ucan, F., Barceló Baeza, C., Espinosa Fuentes, M. D. L. L., Ramírez Lara, E., ... & Uc Chi, M. P. (2017). Characterization and sources of aromatic hydrocarbons (BTEX) in the atmosphere of two urban sites located in Yucatan Peninsula in Mexico. *Atmosphere*, 8(6), 107.
- Chan, C. Y., & Chan, L. Y. (2000). Effect of meteorology and air pollutant transport on ozone episodes at a subtropical coastal Asian city, Hong Kong. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D16), 20707-20724.
- Chay, K., & Greenstone, M. (2003). Air quality, infant mortality, and the Clean Air Act of 1970.
- Chen, Z., Zhuang, Y., Xie, X., Chen, D., Cheng, N., Yang, L., & Li, R. (2019). Understanding long-term variations of meteorological influences on ground ozone concentrations in Beijing During 2006–2016. *Environmental pollution*, 245, 29-37.
- Cheng, S., & Lam, K. C. (1998). An analysis of winds affecting air pollution concentrations in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 32(14-15), 2559-2567.
- Cheng, S., & Lam, K. C. (2000). Synoptic typing and its application to the assessment of climatic impact on concentrations of sulfur dioxide and nitrogen oxides in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 34(4), 585-594.
- Clark, T. L., & Karl, T. R. (1982). Application of prognostic meteorological variables to forecasts of daily maximum one-hour ozone concentrations in the northeastern United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 21(11), 1662-1671.
- Cohen, A. J., Anderson, H. R., Ostro, B., Pandey, K. D., Krzyzanowski, M., Künzli, N., ... & Smith, K. R. (2004). Urban air pollution. *Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors*, 2, 1353-1433.

- Comrie, A. C., & Diem, J. E. (1999). Climatology and forecast modeling of ambient carbon monoxide in Phoenix, Arizona. *Atmospheric Environment*, 33(30), 5023-5036.
- Constant, P., Poissant, L., & Villemur, R. (2008). Annual hydrogen, carbon monoxide and carbon dioxide concentrations and surface to air exchanges in a rural area (Québec, Canada). *Atmospheric Environment*, 42(20), 5090-5100.
- Cuhadaroglu, B., & Demirci, E. (1997). Influence of some meteorological factors on air pollution in Trabzon city. *Energy and buildings*, 25(3), 179-184.
- Czarnecka, M., & Kalbarczyk, R. (2005). Zmienność stężenia ditlenku siarki i ditlenku azotu na Pomorzu w zależności od warunków meteorologicznych. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 5, 93-106.
- Czarnecka, M., & Nidzgorska-Lencewicz, J. (2011). Impact of weather conditions on winter and summer air quality. *International Agrophysics*, 25(1).
- Czernecki, B., Pórolniczak, M., Kolendowicz, L., Marosz, M., Kendzierski, S., & Pilgaj, N. (2017). Influence of the atmospheric conditions on PM10 concentrations in Poznań, Poland. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 74, 115-139.
- Danek, T., Weglinska, E., & Zareba, M. (2022). The influence of meteorological factors and terrain on air pollution concentration and migration: A geostatistical case study from Krakow, Poland. *Scientific Reports*, 12(1), 11050.
- Daugherty, R. L. (1960). The control of air pollution. *Engineering and Science*, 23(7), 16-20.
- Delaney, C., & Dowding, P. (1998). The relationship between extreme nitrogen oxide (NOX) concentrations in Dublin's atmosphere and meteorological conditions. *Environmental monitoring and assessment*, 52, 159-172.
- Dimitriou, K., & Kassomenos, P. (2018). A meteorological analysis of PM10 episodes at a high altitude city and a low altitude city in central Greece—The impact of wood burning heating devices. *Atmospheric Research*, 214, 329-337.
- Ding, J., Dai, Q., Zhang, Y., Xu, J., Huangfu, Y., & Feng, Y. (2021). Air humidity affects secondary aerosol formation in different pathways. *Science of The Total Environment*, 759, 143540.
- Duci, A., Chaloulakou, A., & Spyrellis, N. (2003). Exposure to carbon monoxide in the Athens urban area during commuting. *Science of the Total Environment*, 309(1-3), 47-58.
- Dueñas, C., Fernández, M. C., Cañete, S., Carretero, J., & Liger, E. (2002). Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean Coast. *Science of the Total Environment*, 299(1-3), 97-113.
- Elminir, H. K. (2005). Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of the total environment*, 350(1-3), 225-237.
- Elorduy, I., Elcoroaristizabal, S., Durana, N., García, J. A., & Alonso, L. (2016). Diurnal variation of particle-bound PAHs in an urban area of Spain using TD-GC/MS: Influence of meteorological parameters and emission sources. *Atmospheric Environment*, 138, 87-98.
- Emmanouil, C., Drositi, E., Vasilatou, V., Diapouli, E., Krikonis, K., Eleftheriadis, K., & Kungolos, A. (2017). Study on particulate matter air pollution, source origin, and human health risk based of PM10 metal content in Volos City, Greece. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 99(4), 691-709.

- European Parliament & Council of the European Union. (2024). *Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 10 December 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe*. Official Journal of the European Union, L 2024/288.
- Fallahizadeh, S., Kermani, M., Esrafil, A., Asadgol, Z., & Gholami, M. (2021). The effects of meteorological parameters on PM₁₀: Health impacts assessment using AirQ+ model and prediction by an artificial neural network (ANN). *Urban Climate*, 38, 100905.
- Fang, G. C., Chang, C. N., Wu, Y. S., Fu, P. P. C., Yang, I. L., & Chen, M. H. (2004). Characterization, identification of ambient air and road dust polycyclic aromatic hydrocarbons in central Taiwan, Taichung. *Science of the Total Environment*, 327(1-3), 135-146.
- Fei, L., Chan, L. Y., Bi, X., Guo, H., Liu, Y., Lin, Q., ... & Sheng, G. (2016). Effect of cloud-to-ground lightning and meteorological conditions on surface NO_x and O₃ in Hong Kong. *Atmospheric research*, 182, 132-141.
- Fenger, J. (2009). Air pollution in the last 50 years—From local to global. *Atmospheric environment*, 43(1), 13-22.
- Filonchik, M., & Yan, H. (2018). The characteristics of air pollutants during different seasons in the urban area of Lanzhou, Northwest China. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1-17.
- Fokeeva, E. V., Grechko, E. I., Dzhola, A. V., & Rakitin, V. S. (2007). Determination of carbon monoxide pollution of the atmosphere over Moscow with a spectroscopic method. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 43, 612-617.
- Fon, T. Y. W., Noriatsu, O., & Hiroshi, S. (2007). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the aerosol of Higashi Hiroshima, Japan: pollution scenario and source identification. *Water, Air, and Soil Pollution*, 182, 235-243.
- Fortelli, A., Scafetta, N., & Mazzarella, A. (2016). Influence of synoptic and local atmospheric patterns on PM₁₀ air pollution levels: a model application to Naples (Italy). *Atmospheric environment*, 143, 218-228.
- Gasmi, K., Aljalal, A., Al-Basheer, W., & Abdulahi, M. (2017). Analysis of NO_x, NO and NO₂ ambient levels as a function of meteorological parameters in Dhahran, Saudi Arabia. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 211, 77-86.
- Gasmi, K., Aljalal, A., Al-Basheer, W., & Abdulahi, M. (2017). Analysis of NO_x, NO and NO₂ ambient levels in Dhahran, Saudi Arabia. *Urban Climate*, 21, 232-242.
- Gietl, J. K., & Klemm, O. (2009). Analysis of traffic and meteorology on airborne particulate matter in Münster, Northwest Germany. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(7), 809-818.
- Gilge, S., Plass-Duelmer, C., Fricke, W., Kaiser, A., Ries, L., Buchmann, B., & Steinbacher, M. (2010). Ozone, carbon monoxide and nitrogen oxides time series at four alpine GAW mountain stations in central Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(24), 12295-12316.
- Giri, D., Adhikary, P. R., & Murthy, V. K. (2008). The influence of meteorological conditions on PM₁₀ concentrations in Kathmandu Valley.
- Glencross, D. A., Ho, T. R., Camina, N., Hawrylowicz, C. M., & Pfeffer, P. E. (2020). Air pollution and its effects on the immune system. *Free Radical Biology and Medicine*, 151, 56-68.

- Gong, S., Zhang, L., Liu, C., Lu, S., Pan, W., & Zhang, Y. (2022). Multi-scale analysis of the impacts of meteorology and emissions on PM_{2.5} and O₃ trends at various regions in China from 2013 to 2020 2. Key weather elements and emissions. *Science of The Total Environment*, 824, 153847.
- González-Duque, C. M., Cortés-Araujo, J., & Aristizábal-Zuluaga, B. H. (2015). Influence of meteorology and source variation on airborne PM₁₀ levels in a high relief tropical Andean city. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (74), 200-212.
- Gore, A. T., & Shaddick, C. W. (1958). Atmospheric pollution and mortality in the County of London. *British Journal of Preventive & Social Medicine*, 12(2), 104.
- Grantz, D. A., Garner, J. H. B., & Johnson, D. W. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment international*, 29(2-3), 213-239.
- Grechko, E. I., Dzhola, A. V., Rakitin, V. S., Fokeeva, E. V., & Kuznetsov, R. D. (2009). Variations of the carbon monoxide total column and parameters of the atmospheric boundary layer in the center of Moscow. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 22, 203-208.
- Grundström, M., Hak, C., Chen, D., Hallquist, M., & Pleijel, H. (2015). Variation and co-variation of PM₁₀, particle number concentration, NO_x and NO₂ in the urban air—Relationships with wind speed, vertical temperature gradient and weather type. *Atmospheric environment*, 120, 317-327.
- Gualtieri, G., Toscano, P., Crisci, A., Di Lonardo, S., Tartaglia, M., Vagnoli, C., ... & Gioli, B. (2015). Influence of road traffic, residential heating and meteorological conditions on PM₁₀ concentrations during air pollution critical episodes. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 19027-19038.
- Guo, H., Lee, S. C., Ho, K. F., Wang, X. M., & Zou, S. C. (2003). Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 37(38), 5307-5317.
- Guzmán-Torres, D., Eiguren-Fernández, A., Cicero-Fernández, P., Maubert-Franco, M., Retama-Hernández, A., Villegas, R. R., & Miguel, A. H. (2009). Effects of meteorology on diurnal and nocturnal levels of priority polycyclic aromatic hydrocarbons and elemental and organic carbon in PM₁₀ at a source and a receptor area in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 43(17), 2693-2699.
- Haagen-Smit, A. J. (1950). The air pollution problem in Los Angeles. *Engineering and Science*, 14(3), 7-13.
- Haagen-Smit, A. J. (1954). The control of air pollution in Los Angeles. *Engineering and Science*, 18(3), 11-16.
- Hatzianastassiou, N., Katsoulis, B. D., & Antakis, B. (2007). Extreme nitrogen oxide and ozone concentrations in Athens atmosphere in relation to meteorological conditions. *Environmental monitoring and assessment*, 128, 447-464.
- He, J., Fan, S., Meng, Q., Sun, Y., Zhang, J., & Zu, F. (2014). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with fine particulate matters in Nanjing, China: Distributions, sources and meteorological influences. *Atmospheric Environment*, 89, 207-215.
- He, J., Gong, S., Liu, H., An, X., Yu, Y., Zhao, S., ... & Yu, L. (2017). Influences of meteorological conditions on interannual variations of particulate matter pollution during winter in the Beijing–Tianjin–Hebei area. *Journal of Meteorological Research*, 31, 1062-1069.

- He, J., Gong, S., Yu, Y., Yu, L., Wu, L., Mao, H., ... & Li, R. (2017). Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014–2015 in major Chinese cities. *Environmental pollution*, 223, 484-496.
- Henmi, T., & Bresch, J. F. (1985). Meteorological case studies of regional high sulfur episodes in the western United States. *Atmospheric Environment* (1967), 19(11), 1783-1796.
- Henne, S., Klausen, J., Junkermann, W., Kariuki, J. M., Aseyo, J. O., & Buchmann, B. (2008). Representativeness and climatology of carbon monoxide and ozone at the global GAW station Mt. Kenya in equatorial Africa. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(12), 3119-3139.
- Hewson, E. W. (1956). Meteorological factors affecting causes and controls of air pollution. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 5(4), 235-241.
- Hien, P. D., Bac, V. T., Tham, H. C., Nhan, D. D., & Vinh, L. D. (2002). Influence of meteorological conditions on PM_{2.5} and PM_{2.5-10} concentrations during the monsoon season in Hanoi, Vietnam. *Atmospheric Environment*, 36(21), 3473-3484.
- Holloway, T., Levy, H., & Kasibhatla, P. (2000). Global distribution of carbon monoxide. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105(D10), 12123-12147.
- Holmen, A., Blomqvist, J., Frindberg, H., Johnelius, Y., Eriksson, N. E., Henricson, K. A., ... & Högstedt, B. (1997). Frequency of patients with acute asthma in relation to ozone, nitrogen dioxide, other pollutants of ambient air and meteorological observations. *International archives of occupational and environmental health*, 69, 317-322.
- Honour, S. L., Bell, J. N. B., Ashenden, T. W., Cape, J. N., & Power, S. A. (2009). Responses of herbaceous plants to urban air pollution: effects on growth, phenology and leaf surface characteristics. *Environmental pollution*, 157(4), 1279-1286.
- How Extreme Heat and Air Pollution Hurt People and the Economy*. World Resources Institute. Ημερομηνία Ανάκτησης: 17-2-2025. <https://www.wri.org/insights/extreme-heat-air-pollution>
- How weather affects air quality*. University Corporation for Atmospheric Research, Center for Science Education. Ημερομηνία Ανάκτησης: 17-2-2025. <https://scied.ucar.edu/learning-zone/air-quality/how-weather-affects-air-quality>
- Hu, D., & Jiang, J. (2013). A study of smog issues and PM_{2.5} pollutant control strategies in China. *Journal of Environmental Protection*, 4(7), 746-752.
- Ilić, P., Markić, D. N., & Bjelić, L. S. (2018). Variation concentration of sulfur dioxide and correlation with meteorological parameters.
- Ilić, P., Popović, Z., & Gotovac-Atlagić, S. (2019). Effects of meteorological variables on nitrogen dioxide variation.
- Impact of weather on air quality*. Meersens. Ημερομηνία Ανάκτησης: 17-2-2025. <https://meersens.com/mpact-of-weather-on-air-quality/?lang=en#BLOC2>
- Indoor air quality*. VFA Solutions. Ημερομηνία Ανάκτησης: 15-2-2025. <https://www.vfa-solutions.com/en/home/indoor-air-quality/>

- Jakovljević, I., Pehneć, G., Vađić, V., Čačković, M., Tomašić, V., & Jelinić, J. D. (2018). Polycyclic aromatic hydrocarbons in PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ particle fractions in an urban area. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11, 843-854.
- Jasaitis, D., Vasiliauskienė, V., Chadyšienė, R., & Pečiulienė, M. (2016). Surface ozone concentration and its relationship with UV radiation, meteorological parameters and radon on the eastern coast of the Baltic Sea. *Atmosphere*, 7(2), 27.
- Jędruszkiewicz, J., Czernecki, B., & Marosz, M. (2017). The variability of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in selected Polish agglomerations: The role of meteorological conditions, 2006–2016. *International Journal of Environmental Health Research*, 27(6), 441-462.
- Jung, I., Kumar, S., Kuruvilla, J., & Crist, K. (2002, May). Impact of meteorology on the fine particulate matter distribution in central and southeastern Ohio. In *Proceedings of the American Meteorological Society 12th Joint Conference on Applications of Air Pollution Meteorology with the Air and Waste Management Association Norfolk 2002*.
- Kalabokas, P. D., & Kotzias, D. (2004). Population exposure to atmospheric ozone in the European capital cities of Athens, Paris, Rome and their surroundings. *Fresenius Environmental Bulletin*, 13(5), 465-471.
- Kalbarczyk, R., & Kalbarczyk, E. (2007). Influence of meteorological conditions on the concentration of NO₂ and NO_x in northwest Poland in relation to wind direction. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, (38), 81-94.
- Kalbarczyk, R., & Kalbarczyk, E. (2008). Concentration of gas and particulate air pollutants in Suwałki analysed in relation to meteorological conditions. *Pol. J. Natur. Sc*, 23(1), 134-151.
- Kamens, R. M., Guo, Z., Fulcher, J. N., & Bell, D. A. (1988). The influence of humidity, sunlight, and temperature on the daytime decay of polyaromatic hydrocarbons on atmospheric soot particles. *Environmental science & technology*, 22(1), 103-108.
- Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*, 151(2), 362-367.
- Karagiannidis, A., Poupkou, A., Giannaros, T., Giannaros, C., Melas, D., & Argiriou, A. (2015). The air quality of a Mediterranean urban environment area and its relation to major meteorological parameters. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226, 1-13.
- Karar, K., & Gupta, A. K. (2006). Seasonal variations and chemical characterization of ambient PM₁₀ at residential and industrial sites of an urban region of Kolkata (Calcutta), India. *Atmospheric research*, 81(1), 36-53.
- Kassomenos, P., Kotroni, V., & Kallos, G. (1995). Analysis of climatological and air quality observations from greater Athens area. *Atmospheric Environment*, 29(24), 3671-3688.
- Katsoulis, B. D. (1996). The relationship between synoptic, mesoscale and microscale meteorological parameters during poor air quality events in Athens, Greece. *Science of the total environment*, 181(1), 13-24.
- Kayes, I., Shahriar, S. A., Hasan, K., Akhter, M., Kabir, M. M., & Salam, M. A. (2019). The relationships between meteorological parameters and air pollutants in an

- urban environment. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(3), 265-278.
- Khan, M. B., Masiol, M., Bruno, C., Pasqualetto, A., Formenton, G. M., Agostinelli, C., & Pavoni, B. (2018). Potential sources and meteorological factors affecting PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbon levels in six main cities of northeastern Italy: An assessment of the related carcinogenic and mutagenic risks. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 31987-32000.
- Kitazawa, A., Amagai, T., & Ohura, T. (2006). Temporal trends and relationships of particulate chlorinated polycyclic aromatic hydrocarbons and their parent compounds in urban air. *Environmental science & technology*, 40(15), 4592-4598.
- Kovač-Andrić, E., Brana, J., & Gvozdić, V. (2009). Impact of meteorological factors on ozone concentrations modelled by time series analysis and multivariate statistical methods. *Ecological informatics*, 4(2), 117-122.
- Kovač-Andrić, E., Radanović, T., Topalović, I., Marković, B., & Sakač, N. (2013). Temporal variations in concentrations of ozone, nitrogen dioxide, and carbon monoxide at Osijek, Croatia. *Advances in Meteorology*, 2013(1), 469786.
- Kushelevsky, A., Shani, G., & Haccoun, A. (1983). Effect of meteorologic conditions on total suspended particulate (TSP) levels and elemental concentration of aerosols in a semi-arid zone (Beer-Sheva, Israel). *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 35(1), 55-64.
- Lai, L. W., & Cheng, W. L. (2009). Air quality influenced by urban heat island coupled with synoptic weather patterns. *Science of the total environment*, 407(8), 2724-2733.
- Lam, K. C., & Cheng, S. (1998). A synoptic climatological approach to forecast concentrations of sulfur dioxide and nitrogen oxides in Hong Kong. *Environmental Pollution*, 101(2), 183-191.
- Lam, K. S., Wang, T. J., Chan, L. Y., Wang, T., & Harris, J. (2001). Flow patterns influencing the seasonal behavior of surface ozone and carbon monoxide at a coastal site near Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 35(18), 3121-3135.
- Lazaridis, M., Semb, A., Larssen, S., Hjellbrekke, A. G., Hov, Ø., Hanssen, J. E., ... & Tørseth, K. (2002). Measurements of particulate matter within the framework of the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP): I. First results. *Science of the total environment*, 285(1-3), 209-235.
- Lazurca, L. G. (2015). The influence of meteorological conditions on PM₁₀ concentrations in Suceava City (North–Eastern Romania). *GEOREVIEW: Scientific Annals of Stefan cel Mare University of Suceava. Geography Series*, 25(1), 103-116.
- Lefohn, A. S., Husar, J. D., & Husar, R. B. (1999). Estimating historical anthropogenic global sulfur emission patterns for the period 1850–1990. *Atmospheric Environment*, 33(21), 3435-3444.
- Leung, D. Y. (2015). Outdoor-indoor air pollution in urban environment: challenges and opportunity. *Frontiers in Environmental Science*, 2, 69.
- Li, H., Guo, B., Han, M., Tian, M., & Zhang, J. (2015). Particulate matters pollution characteristic and the correlation between PM (PM_{2.5}, PM₁₀) and meteorological factors during the summer in Shijiazhuang. *Journal of Environmental Protection*, 6(5), 457-463.

- Li, L., & Wang, X. (2012). Seasonal and diurnal variations of atmospheric non-methane hydrocarbons in Guangzhou, China. *International journal of environmental research and public health*, 9(5), 1859-1873.
- Li, W., Wang, C., Wang, H., Chen, J., Shen, H., Shen, G., ... & Tao, S. (2014). Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in rural and urban areas of northern China. *Environmental Pollution*, 192, 83-90.
- Li, X., Chen, X., Yuan, X., Zeng, G., León, T., Liang, J., ... & Yuan, X. (2017). Characteristics of particulate pollution (PM_{2.5} and PM₁₀) and their spacescale-dependent relationships with meteorological elements in China. *Sustainability*, 9(12), 2330.
- Li, X., Ma, Y., Wang, Y., Liu, N., & Hong, Y. (2017). Temporal and spatial analyses of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) and its relationship with meteorological parameters over an urban city in northeast China. *Atmospheric research*, 198, 185-193.
- Li, X., Song, H., Zhai, S., Lu, S., Kong, Y., Xia, H., & Zhao, H. (2019). Particulate matter pollution in Chinese cities: Areal-temporal variations and their relationships with meteorological conditions (2015–2017). *Environmental Pollution*, 246, 11-18.
- Lin, C. A., Chen, Y. C., Liu, C. Y., Chen, W. T., Seinfeld, J. H., & Chou, C. C. K. (2019). Satellite-derived correlation of SO₂, NO₂, and aerosol optical depth with meteorological conditions over East Asia from 2005 to 2015. *Remote Sensing*, 11(15), 1738.
- Lindskog, A., & Moldanova, J. (1994). The influence of the origin, season and time of the day on the distribution of individual NMHC measured at Rörvik, Sweden. *Atmospheric Environment*, 28(15), 2383-2398.
- Liu, C. M., Huang, C. Y., Shieh, S. L., & Wu, C. C. (1994). Important meteorological parameters for ozone episodes experienced in the Taipei basin. *Atmospheric Environment*, 28(1), 159-173.
- Liu, J., Man, R., Ma, S., Li, J., Wu, Q., & Peng, J. (2015). Atmospheric levels and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) bound to PM_{2.5} in Guangzhou, China. *Marine pollution bulletin*, 100(1), 134-143.
- Liu, X., Li, C., Tu, H., Wu, Y., Ying, C., Huang, Q., ... & Lu, Y. (2016). Analysis of the effect of meteorological factors on PM_{2.5}-associated PAHs during autumn-winter in urban Nanchang. *Aerosol and Air Quality Research*, 16(12), 3222-3229.
- Liu, Y., Yu, Y., Liu, M., Lu, M., Ge, R., Li, S., ... & Qadeer, A. (2018). Characterization and source identification of PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in different seasons from Shanghai, China. *Science of the total environment*, 644, 725-735.
- Liu, Y., Zhao, H., Ma, Y., Yang, H., Wang, Y., Wang, H., ... & Quan, W. (2021). Characteristics of particulate matter and meteorological conditions of a typical air-pollution episode in Shenyang, northeastern China, in winter 2017. *Atmospheric Pollution Research*, 12(1), 316-327.
- Liu, Y., Zhou, Y., & Lu, J. (2020). Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance. *Scientific reports*, 10(1), 14518.

- Liu, Z., Shen, L., Yan, C., Du, J., Li, Y., & Zhao, H. (2020). Analysis of the Influence of Precipitation and Wind on PM_{2.5} and PM₁₀ in the Atmosphere. *Advances in Meteorology*, 2020(1), 5039613.
- Lu, J. G. (2020). Air pollution: A systematic review of its psychological, economic, and social effects. *Current opinion in psychology*, 32, 52-65.
- Luvsan, M. E., Shie, R. H., Purevdorj, T., Badarch, L., Baldorj, B., & Chan, C. C. (2012). The influence of emission sources and meteorological conditions on SO₂ pollution in Mongolia. *Atmospheric Environment*, 61, 542-549.
- Mahdi, B. H., Yousif, K. M., & Dosky, L. S. (2020). Influence of meteorological parameters on air quality and other pollutants in Duhok city, Iraq. *The Iraqi Journal of Agricultural Science*, 51(4), 1160-1172.
- Mantis, J., Chaloulakou, A., & Samara, C. (2005). PM₁₀-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Greater Area of Athens, Greece. *Chemosphere*, 59(5), 593-604.
- Map Viewer. Copernicus Land Monitoring Service, European Union. Ημερομηνία Ανάκτησης: 7-5-2025. <https://land.copernicus.eu/en/map-viewer>
- Marcazzan, G. M., Valli, G., & Vecchi, R. (2002). Factors influencing mass concentration and chemical composition of fine aerosols during a PM high pollution episode. *Science of the total environment*, 298(1-3), 65-79.
- Mavroidis, I., & Ilia, M. (2012). Trends of NO_x, NO₂ and O₃ concentrations at three different types of air quality monitoring stations in Athens, Greece. *Atmospheric Environment*, 63, 135-147.
- Melsted, O., & Pallua, I. (2018). The historical transition from coal to hydrocarbons: Previous explanations and the need for an integrative perspective. *Canadian Journal of History*, 53(3), 395-422.
- Meng, C., Cheng, T., Gu, X., Shi, S., Wang, W., Wu, Y., & Bao, F. (2019). Contribution of meteorological factors to particulate pollution during winters in Beijing. *Science of The Total Environment*, 656, 977-985.
- Miao, Y., Liu, S., Guo, J., Yan, Y., Huang, S., Zhang, G., ... & Lou, M. (2018). Impacts of meteorological conditions on wintertime PM_{2.5} pollution in Taiyuan, North China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 21855-21866.
- Mohtar, A. A. A., Latif, M. T., Baharudin, N. H., Ahamad, F., Chung, J. X., Othman, M., & Juneng, L. (2018). Variation of major air pollutants in different seasonal conditions in an urban environment in Malaysia. *Geoscience Letters*, 5(1), 1-13.
- Moustris, K. P., Petraki, E., Ntourou, K., Priniotakis, G., & Nikolopoulos, D. (2020). Spatiotemporal evaluation of PM₁₀ concentrations within the Greater Athens Area, Greece. Trends, variability and analysis of a 19 years data series. *Environments*, 7(10), 85.
- Mues, A., Manders, A., Schaap, M., Kerschbaumer, A., Stern, R., & Builtjes, P. (2012). Impact of the extreme meteorological conditions during the summer 2003 in Europe on particulate matter concentrations. *Atmospheric environment*, 55, 377-391.
- Mukammal, E. I., Neumann, H. H., & Gillespie, T. J. (1982). Meteorological conditions associated with ozone in southwestern Ontario, Canada. *Atmospheric Environment (1967)*, 16(9), 2095-2106.
- Munir, S., Habeebullah, T. M., Mohammed, A. M., Morsy, E. A., Rehan, M., & Ali, K. (2017). Analysing PM_{2.5} and its association with PM₁₀ and meteorology in the

- arid climate of Makkah, Saudi Arabia. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(2), 453-464.
- Nagy, G., Kovács, R., Szőke, S., Bökfi, K. A., Gurgenedze, T., & Sahbeni, G. (2020). Characteristics of pollutants and their correlation to meteorological conditions in Hungary applying regression analysis. *Időjárás*, 124(1).
- Natarajan, N., Vasudevan, M., Dineshkumar, S. K., Nandhini, S. S., & Balaganesh, P. (2022). Effects of air pollution on monumental buildings in India: An overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(20), 29399-29408.
- Neiburger, M. (1969). The role of meteorology in the study and control of air pollution. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 50(12), 957-965.
- Nenadović, S. S., Matović, L., Milanović, M. M., Janicevic, S. V., Grbović-Novaković, J., & Lješević, M. A. (2010). Impacts of some meteorological parameters on the SO₂ concentrations in the City of Obrenovac, Serbia. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 75(5), 701-713.
- Nguyen, M. V., Park, G. H., & Lee, B. K. (2017). Correlation analysis of size-resolved airborne particulate matter with classified meteorological conditions. *Meteorology and atmospheric physics*, 129, 35-46.
- Nidzgorska-Lencewicz, J., & Czarnecka, M. (2015). Winter weather conditions vs. air quality in Tricity, Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 119, 611-627.
- Nieuwenhuijsen, M. J., Basagaña, X., Dadvand, P., Martinez, D., Cirach, M., Beelen, R., & Jacquemin, B. (2014). Air pollution and human fertility rates. *Environment international*, 70, 9-14.
- Njoku, E. A., Akpan, P. E., Effiong, A. E., Babatunde, I. O., Owoseni, O. A., & Olanrewaju, J. O. (2022). Evaluation of geostatistical and multiple regression models for assessment of spatial characteristics of carbon monoxide concentration in a data-limited environment. *Applied Geography*, 149, 102816.
- Özbay, B. (2012). Modeling the effects of meteorological factors on SO₂ and PM₁₀ concentrations with statistical approaches. *Clean–Soil, Air, Water*, 40(6), 571-577.
- Panofsky, H. A., & Prasad, B. (1967). The effect of meteorological factors on air pollution in a narrow valley. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 6(3), 493-499.
- Panopoulou, A., Liakakou, E., Gros, V., Sauvage, S., Locoge, N., Bonsang, B., ... & Mihalopoulos, N. (2018). Non-methane hydrocarbon variability in Athens during wintertime: the role of traffic and heating. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(21), 16139-16154.
- Papaioannou, A. B., Viras, L. G., Nastos, P. T., & Paliatsos, A. G. (2010). Temporal evolution of sulfur dioxide and nitrogen oxides in the city of Volos, Greece. *Environmental monitoring and assessment*, 161, 485-494.
- Papanastasiou, D. K., & Melas, D. (2009). Climatology and impact on air quality of sea breeze in an urban coastal environment. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(2), 305-315.
- Papanastasiou, D. K., & Melas, D. (2009). Statistical characteristics of ozone and PM₁₀ levels in a medium-sized Mediterranean city. *International Journal of Environment and Pollution*, 36(1-3), 127-138.

- Papanastasiou, D. K., Melas, D., & Kambezidis, H. D. (2014). Heat waves characteristics and their relation to air quality in Athens. *Glob. Nest J*, 16(5), 919-928.
- Papanastasiou, D. K., Melas, D., & Kambezidis, H. D. (2015). Air quality and thermal comfort levels under extreme hot weather. *Atmospheric Research*, 152, 4-13.
- Papanastasiou, D. K., Melas, D., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2010). Temperature, comfort and pollution levels during heat waves and the role of sea breeze. *International journal of biometeorology*, 54(3), 307-317.
- Papanastasiou, D. K., Melas, D., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2012). Estimation of ozone trend in central Greece, based on meteorologically adjusted time series. *Environmental Modeling & Assessment*, 17, 353-361.
- Park, S. U., In, H. J., Kim, S. W., & Lee, Y. H. (2000). Estimation of sulfur deposition in South Korea. *Atmospheric Environment*, 34(20), 3259-3269.
- Parry, R. W. (1950). Air pollution in Donora, Pennsylvania.
- Particle pollution*. American Lung Association. Ημερομηνία Ανάκτησης: 15-2-2025. <https://www.lung.org/clean-air/outdoors/what-makes-air-unhealthy/particle-pollution>
- Particulate matter (PM) basics*. U.S. Environmental Protection Agency. Ημερομηνία Ανάκτησης: 15-2-2025. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- Pehcec, G., Jakovljević, I., Šišović, A., Bešlić, I., & Vadić, V. (2016). Influence of ozone and meteorological parameters on levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in the air. *Atmospheric Environment*, 131, 263-268.
- Poulida, O., Dickerson, R. R., Doddridge, B. G., Holland, J. Z., Wardell, R. G., & Watkins, J. G. (1991). Trace gas concentrations and meteorology in rural Virginia: 1. Ozone and carbon monoxide. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 96(D12), 22461-22475.
- Progiou, A., Liora, N., Sebos, I., Chatzimichail, C., & Melas, D. (2023). Measures and policies for reducing PM exceedances through the use of air quality modeling: the case of Thessaloniki, Greece. *Sustainability*, 15(2), 930.
- Proias, G. T., Moustris, K. P., Larissi, I. K., Nastos, P. T., & Paliatsos, A. G. (2012). Ambient PM10 concentrations and the impact of wind at an urban site in Central Greece. *Fresenius Environmental Bulletin*, 21(7a), 1940-1946.
- Pu, X., Wang, T. J., Huang, X., Melas, D., Zanis, P., Papanastasiou, D. K., & Poupkou, A. (2017). Enhanced surface ozone during the heat wave of 2013 in Yangtze River Delta region, China. *Science of the Total Environment*, 603, 807-816.
- Pudasainee, D., Sapkota, B., Shrestha, M. L., Kaga, A., Kondo, A., & Inoue, Y. (2006). Ground level ozone concentrations and its association with NO_x and meteorological parameters in Kathmandu valley, Nepal. *Atmospheric environment*, 40(40), 8081-8087.
- Puri, P., Nandar, S. K., Kathuria, S., & Ramesh, V. (2017). Effects of air pollution on the skin: A review. *Indian journal of dermatology, venereology and leprology*, 83, 415.
- Rabl, A. (1999). Air pollution and buildings: An estimation of damage costs in France. *Environmental Impact Assessment Review*, 19(4), 361-385.
- Radon and health*. World Health Organization (WHO). Ημερομηνία Ανάκτησης: 14-2-2025. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>

- Radović, B., Ilić, P., Popović, Z., Vuković, J., & Smiljanić, S. (2022). Air quality in the town of Bijeljina-trends and levels of SO₂ and NO₂ concentrations. *QUALITY OF LIFE (BANJA LUKA)-APEIRON*, 22(1-2), 46-57.
- Radzka, E. (2020). The effect of meteorological conditions on air pollution in Siedlce. *Journal of Ecological Engineering*, 21(1), 97-104.
- Rafaj, P., Amann, M., Siri, J., & Wuester, H. (2015). Changes in European greenhouse gas and air pollutant emissions 1960–2010: decomposition of determining factors. *Uncertainties in Greenhouse Gas Inventories: Expanding Our Perspective*, 27-54.
- Rahman, M. M., Shuo, W., Zhao, W., Xu, X., Zhang, W., & Arshad, A. (2022). Investigating the relationship between air pollutants and meteorological parameters using satellite data over Bangladesh. *Remote Sensing*, 14(12), 2757.
- Ramsey, N. R., Klein, P. M., & Moore III, B. (2014). The impact of meteorological parameters on urban air quality. *Atmospheric Environment*, 86, 58-67.
- Rana, A. D., Ali, M., Mahmood, K., Tariq, S., & Qayyum, Z. (2015). Carbon monoxide (CO) emissions and its tropospheric variability over Pakistan using satellite-sensed data. *Advances in Space Research*, 56(4), 583-595.
- Rappenglück, B., & Fabian, P. (1999). Nonmethane hydrocarbons (NMHC) in the greater Munich area/Germany. *Atmospheric Environment*, 33(23), 3843-3857.
- Rappenglück, B., Fabian, P., Kalabokas, P., Viras, L. G., & Ziomas, I. C. (1998). Quasi-continuous measurements of non-methane hydrocarbons (NMHC) in the greater Athens area during MEDCAPHOT-TRACE. *Atmospheric Environment*, 32(12), 2103-2121.
- Raynor, G. S., Smith, M. E., & Singer, I. A. (1974). Meteorological effects on sulfur dioxide concentrations on suburban Long Island, New York. *Atmospheric Environment* (1967), 8(12), 1305-1320.
- Robinson, E. (1952). Some air pollution aspects of the Los Angeles temperature inversion. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 33(6), 247-250.
- Rojas, A. L. P., Borge, R., Mazzeo, N. A., Saurral, R. I., Matarazzo, B. N., Cordero, J. M., & Kropff, E. (2020). High PM₁₀ concentrations in the city of Buenos Aires and their relationship with meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, 241, 117773.
- Ross, K., Chmiel, J. F., & Ferkol, T. (2012). The impact of the clean air act. *The Journal of pediatrics*, 161(5), 781-786.
- Rozbicka, K. (2007). Charakterystyka zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego tlenkami azotu na obszarze aglomeracji warszawskiej ze szczególnym uwzględnieniem Ursynowa. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 16(1 [35]).
- Russell, A. G., & Brunekreef, B. (2009). A focus on particulate matter and health.
- Sadheesh, S., & Jeyanthi, J. (2023). Analysis of seasonal variation and dispersion pattern of ambient air pollutants in an urban environment. *Traffic*, 10(77), 03.
- Sahu, L. K., Sheel, V., Kajino, M., & Nédélec, P. (2013). Variability in tropospheric carbon monoxide over an urban site in Southeast Asia. *Atmospheric Environment*, 68, 243-255.

- Sánchez-Ccoyllo, O. R., & de Fatima Andrade, M. (2002). The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in São Paulo, Brazil. *Environmental Pollution*, 116(2), 257-263.
- Sanchez, M. L., Pascual, D., Ramos, C., & Perez, I. (1990). Forecasting particulate pollutant concentrations in a city from meteorological variables and regional weather patterns. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 24(6), 1509-1519.
- Santacatalina, M., Carratalá, A., & Mantilla, E. (2011). Influence of local and regional Mediterranean meteorology on SO₂ ground-level concentrations in SE Spain. *Journal of Environmental Monitoring*, 13(6), 1634-1645.
- Sayegh, A., Tate, J. E., & Ropkins, K. (2016). Understanding how roadside concentrations of NO_x are influenced by the background levels, traffic density, and meteorological conditions using Boosted Regression Trees. *Atmospheric Environment*, 127, 163-175.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- Senn, C. L. (1948). General Atmospheric Pollution—A Symposium: Los Angeles “Smog”.
- Seo, J., Youn, D., Kim, J. Y., & Lee, H. (2014). Extensive spatiotemporal analyses of surface ozone and related meteorological variables in South Korea for the period 1999–2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(12), 6395-6415.
- Shahgedanova, M., Burt, T. P., & Davies, T. D. (1999). Carbon monoxide and nitrogen oxides pollution in Moscow. *Water, Air, and Soil Pollution*, 112, 107-131.
- Shan, W., Yin, Y., Lu, H., & Liang, S. (2009). A meteorological analysis of ozone episodes using HYSPLIT model and surface data. *Atmospheric Research*, 93(4), 767-776.
- Sharma, A., Mandal, T. K., Sharma, S. K., Shukla, D. K., & Singh, S. (2017). Relationships of surface ozone with its precursors, particulate matter and meteorology over Delhi. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 74, 451-474.
- Shelton, S., Liyanage, G., Jayasekara, S., Pushpawela, B., Rathnayake, U., Jayasundara, A., & Jayasooriya, L. D. (2022). Seasonal variability of air pollutants and their relationships to meteorological parameters in an urban environment. *Advances in Meteorology*, 2022(1), 5628911.
- Shenfeld, L. (1970). Meteorological aspects of air pollution control. *Atmosphere*, 8(1), 3-13.
- Sikalos, T. I., Paleologos, E. K., & Karayannis, M. I. (2002). Monitoring of time variation and effect of some meteorological parameters in polynuclear aromatic hydrocarbons in Ioannina, Greece with the aid of HPLC-fluorescence analysis. *Talanta*, 58(3), 497-510.
- Simeunović, M., Kojić, R., Ralević, N., Pitka, P., & Kovačević, T. (2023). Influence of Traffic Flow and Meteorological Conditions on Air Pollution—A Case Study. *Promet-Traffic & Transportation*, 35(6), 932-946.
- Sirithian, D., & Thanatrakolsri, P. (2022). Relationships between meteorological and particulate matter concentrations (PM_{2.5} and PM₁₀) during the haze period in urban and rural areas, Northern Thailand. *Air, Soil and Water Research*, 15, 11786221221117264.

- Siudek, P. (2022). Compositional and seasonal differences of gas and particle phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) over the southern Baltic Sea coast. *Scientific Reports*, 12(1), 21005.
- Sjödin, Å., Loman, G., & Omstedt, G. (1994). Long-term continuous measurements of air pollutant concentrations, meteorology and traffic on a rural motorway and a model validation. *Science of the total environment*, 146, 365-375.
- Smith, S. J., Andres, R., Conception, E., & Lurz, J. (2004). *Historical sulfur dioxide emissions 1850-2000: Methods and results* (No. PNNL-14537). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- Smith, S. J., Pitcher, H., & Wigley, T. M. (2001). Global and regional anthropogenic sulfur dioxide emissions. *Global and planetary change*, 29(1-2), 99-119.
- Smith, S. J., van Aardenne, J., Klimont, Z., Andres, R. J., Volke, A., & Delgado Arias, S. (2011). Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(3), 1101-1116.
- Song, P., Geng, F. H., Sang, X. F., Chan, C. Y., Chan, L. Y., & Yu, Q. (2012). Characteristics and sources of non-methane hydrocarbons and halocarbons in wintertime urban atmosphere of Shanghai, China. *Environmental monitoring and assessment*, 184, 5957-5970.
- Sulfur Dioxide Trends*. United States Environmental Protection Agency. Ημερομηνία Ανάκτησης: 4-3-2025. <https://www.epa.gov/air-trends/sulfur-dioxide-trends>
- Tao, J., Zhang, L., Zhang, Z., Huang, R., Wu, Y., Zhang, R., ... & Zhang, Y. (2015). Control of PM_{2.5} in Guangzhou during the 16th Asian Games period: Implication for hazy weather prevention. *Science of the Total Environment*, 508, 57-66.
- Tarasova, O. A., & Karpetchko, A. Y. (2003). Accounting for local meteorological effects in the ozone time-series of Lovozero (Kola Peninsula). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3(4), 941-949.
- Tasić, V., Kovačević, R., & Milošević, N. (2013). Investigating the impacts of winds on SO₂ concentrations in Bor, Serbia. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 1(2), 141-151.
- Tecer, L. H., Süren, P., Alagha, O., Karaca, F., & Tuncel, G. (2008). Effect of meteorological parameters on fine and coarse particulate matter mass concentration in a coal-mining area in Zonguldak, Turkey. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(4), 543-552.
- Tham, Y. W., Takeda, K., & Sakugawa, H. (2008). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with atmospheric particles in Higashi Hiroshima, Japan: Influence of meteorological conditions and seasonal variations. *Atmospheric Research*, 88(3-4), 224-233.
- Tian, G., Qiao, Z., & Xu, X. (2014). Characteristics of particulate matter (PM₁₀) and its relationship with meteorological factors during 2001–2012 in Beijing. *Environmental pollution*, 192, 266-274.
- Tidblad, J., Kucera, V., & Hamilton, R. (2009). *The effects of air pollution on cultural heritage* (Vol. 6, pp. 10-12). J. Watt (Ed.). New York: Springer.
- Townsend, J. G. (1950). Investigation of the smog incident in Donora, Pa., and vicinity. *American Journal of Public Health and the Nations Health*, 40(2), 183-189.
- Triantafyllou, E., & Biskos, G. (2012). Overview of the temporal variation of PM₁₀ mass concentrations in the two major cities in Greece: Athens and Thessaloniki. *Global NEST Journal*, 14(4), 431-441.

- Trindade, H. A., Oliveira, A. E., Pfeiffer, W. C., Londres, H., & Costa-Ribeiro, C. (1980). Meteorological parameters and concentration of total suspended particulates in the urban area of Rio de Janeiro. *Atmospheric Environment* (1967), 14(8), 973-978.
- Tripathi, C. N., Kulshreshtha, J., & Gupta, I. (2013). Determination of SO_x concentration in ambient air and its dependency on meteorological parameters: A case study. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(3), 287-291.
- Tsapakis, M., & Stephanou, E. G. (2005). Occurrence of gaseous and particulate polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: study of sources and ambient temperature effect on the gas/particle concentration and distribution. *Environmental Pollution*, 133(1), 147-156.
- Tu, J., Xia, Z. G., Wang, H., & Li, W. (2007). Temporal variations in surface ozone and its precursors and meteorological effects at an urban site in China. *Atmospheric Research*, 85(3-4), 310-337.
- Turalioğlu, F. S., Nuhoğlu, A., & Bayraktar, H. (2005). Impacts of some meteorological parameters on SO₂ and TSP concentrations in Erzurum, Turkey. *Chemosphere*, 59(11), 1633-1642.
- Turner, D. B. (1961). Relationships between 24-hour mean air quality measurements and meteorological factors in Nashville, Tennessee. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 11(10), 483-489.
- UNION, P. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. *Official Journal of the European Union*.
- Vallius, M. (2005). Characteristics and sources of fine particulate matter in urban air.
- Viras, L. G., & Siskos, P. A. (1993). Spatial and time variation and effect of some meteorological parameters in polycyclic aromatic hydrocarbons in Athens Greece. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 3(2), 89-100.
- Vukovich, F. M., & Sherwell, J. (2003). An examination of the relationship between certain meteorological parameters and surface ozone variations in the Baltimore–Washington corridor. *Atmospheric Environment*, 37(7), 971-981.
- Vuong, Q. T., Thang, P. Q., Nguyen, T. N. T., Ohura, T., & Choi, S. D. (2020). Seasonal variation and gas/particle partitioning of atmospheric halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons and the effects of meteorological conditions in Ulsan, South Korea. *Environmental Pollution*, 263, 114592.
- Waller, R. E., & Lawther, P. J. (1957). Further observations on London fog. *British Medical Journal*, 2(5059), 1473.
- Wang, H., Ding, J., Xu, J., Wen, J., Han, J., Wang, K., ... & Russell, A. G. (2019). Aerosols in an arid environment: The role of aerosol water content, particulate acidity, precursors, and relative humidity on secondary inorganic aerosols. *Science of the Total Environment*, 646, 564-572.
- Wang, J., & Ogawa, S. (2015). Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentrations in Nagasaki, Japan. *International journal of environmental research and public health*, 12(8), 9089-9101.
- What is particulate matter and what are its effects on human health?*. European Environmental Agency. Ημερομηνία Ανάκτησης: 15-2-2025.

<https://www.eea.europa.eu/en/about/contact-us/faqs/what-is-particulate-matter-and-what-are-its-effects-on-human-health>

- Why is air quality important?*. Land, Air, Water Aotearoa (LAWA). Ημερομηνία Ανάκτησης: 15-2-2025. <https://www.lawa.org.nz/learn/factsheets/air-quality-topic/why-is-air-quality-important>
- Wilkins, E. T. (1954). Air pollution and the London fog of December, 1952. *Journal of the Royal Sanitary Institute*, 74(1), 1-21.
- Winner, W. E., & Atkinson, C. J. (1986). Absorption of air pollution by plants, and consequences for growth. *Trends in Ecology & Evolution*, 1(1), 15-18.
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.
- Xu, J., & Zhu, Y. (1994). Some characteristics of ozone concentrations and their relations with meteorological factors in Shanghai. *Atmospheric Environment*, 28(20), 3387-3392.
- Xu, L., Tsona, N. T., & Du, L. (2021). Relative humidity changes the role of SO₂ in biogenic secondary organic aerosol formation. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 12(30), 7365-7372.
- Xu, W. Y., Zhao, C. S., Ran, L., Deng, Z. Z., Liu, P. F., Ma, N., ... & Chen, L. L. (2011). Characteristics of pollutants and their correlation to meteorological conditions at a suburban site in the North China Plain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(9), 4353-4369.
- Yang, Q., Yuan, Q., Li, T., Shen, H., & Zhang, L. (2017). The relationships between PM_{2.5} and meteorological factors in China: seasonal and regional variations. *International journal of environmental research and public health*, 14(12), 1510.
- Yang, X., Wang, S., Zhang, W., Zhan, D., & Li, J. (2017). The impact of anthropogenic emissions and meteorological conditions on the spatial variation of ambient SO₂ concentrations: A panel study of 113 Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 584, 318-328.
- Yang, X., Wu, K., Wang, H., Liu, Y., Gu, S., Lu, Y., ... & Wang, Z. (2020). Summertime ozone pollution in Sichuan Basin, China: Meteorological conditions, sources and process analysis. *Atmospheric Environment*, 226, 117392.
- Yannopoulos, P. C. (2007). Spatial concentration distributions of sulfur dioxide and nitrogen oxides in Patras, Greece, in a winter period. *Environmental monitoring and assessment*, 135, 163-180.
- Yi, J., & Prybutok, V. R. (1996). A neural network model forecasting for prediction of daily maximum ozone concentration in an industrialized urban area. *Environmental pollution*, 92(3), 349-357.
- Yin, Q., Wang, J., Hu, M., & Wong, H. (2016). Estimation of daily PM_{2.5} concentration and its relationship with meteorological conditions in Beijing. *Journal of Environmental Sciences*, 48, 161-168.
- Yu, K. P., Lin, C. C., Yang, S. C., & Zhao, P. (2011). Enhancement effect of relative humidity on the formation and regional respiratory deposition of secondary organic aerosol. *Journal of hazardous materials*, 191(1-3), 94-102.
- Zalewska, T., Biernacik, D., & Marosz, M. (2021). Correlations between ⁷Be, ²¹⁰Pb, dust and PM₁₀ concentrations in relation to meteorological conditions in

- northern Poland in 1998–2018. *Journal of Environmental Radioactivity*, 228, 106526.
- Zaman, S. U., Budhavant, K., & Salam, A. (2025). The influence of meteorological factors on wintertime black carbon and PM_{2.5} pollution in Dhaka, Bangladesh. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-10.
- Zeri, M., Oliveira-Júnior, J. F., & Lyra, G. B. (2011). Spatiotemporal analysis of particulate matter, sulfur dioxide and carbon monoxide concentrations over the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 113(3), 139-152.
- Zhang, B., Jiao, L., Xu, G., Zhao, S., Tang, X., Zhou, Y., & Gong, C. (2018). Influences of wind and precipitation on different-sized particulate matter concentrations (PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5-10}). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 130, 383-392.
- Zhang, H., Wang, Y., Hu, J., Ying, Q., & Hu, X. M. (2015). Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China. *Environmental research*, 140, 242-254.
- Zhang, M., Chen, S., Zhang, X., Guo, S., Wang, Y., Zhao, F., ... & Bilal, M. (2023). Characters of particulate matter and their relationship with meteorological factors during winter Nanyang 2021–2022. *Atmosphere*, 14(1), 137.
- Zhang, N., Cao, J., Li, L., Ho, S. S. H., Wang, Q., Zhu, C., & Wang, L. (2018). Characteristics and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons and n-alkanes in PM_{2.5} in Xiamen. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(7), 1673-1683.
- Zhang, R., Wang, G., Guo, S., Zamora, M. L., Ying, Q., Lin, Y., ... & Wang, Y. (2015). Formation of urban fine particulate matter. *Chemical reviews*, 115(10), 3803-3855.
- Zhang, Z., Zhang, X., Gong, D., Quan, W., Zhao, X., Ma, Z., & Kim, S. J. (2015). Evolution of surface O₃ and PM_{2.5} concentrations and their relationships with meteorological conditions over the last decade in Beijing. *Atmospheric Environment*, 108, 67-75.
- Zhao, S., Yin, D., Yu, Y., Kang, S., Qin, D., & Dong, L. (2020). PM_{2.5} and O₃ pollution during 2015–2019 over 367 Chinese cities: Spatiotemporal variations, meteorological and topographical impacts. *Environmental Pollution*, 264, 114694.
- Zhou, M., He, G., Fan, M., Wang, Z., Liu, Y., Ma, J., ... & Liu, Y. (2015). Smog episodes, fine particulate pollution and mortality in China. *Environmental research*, 136, 396-404.
- Ziomas, I. C., Melas, D., Zerefos, C. S., Bais, A. F., & Paliatsos, A. G. (1995). Forecasting peak pollutant levels from meteorological variables. *Atmospheric Environment*, 29(24), 3703-3711.
- Zu, Y., Huang, L., Hu, J., Zhao, Z., Liu, H., Zhang, H., ... & Chen, M. (2017). Investigation of relationships between meteorological conditions and high PM₁₀ pollution in a megacity in the western Yangtze River Delta, China. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10, 713-724.

Żyromski, A., Biniak-Pieróg, M., Burszta-Adamiak, E., & Zamiar, Z. (2014). Evaluation of relationship between air pollutant concentration and meteorological elements in winter months. *Journal of Water and Land Development*, 22(1), 25-32.