



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΓΕΩΡΓΙΑ Α. ΚΕΛΕΣΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διερεύνηση των επιπέδων του επιφανειακού όζοντος κατά τη διάρκεια
επεισοδίων καύσωνα στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης**



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2023



ΓΕΩΡΓΙΑ Α. ΚΕΛΕΣΗ

Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5715

**Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας,
Ιούνιος 2023**

Επιβλέπων Καθηγητής: Ζάνης Πρόδρομος



© Γεωργία Α. Κελέση, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Διερεύνηση των επιπέδων του επιφανειακού όζοντος κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης – *Διπλωματική Εργασία*

© Georgia A. Kelesi, School of Geology, Dept. of Meteorology and Climatology, 2023
All rights reserved.

Investigation of near-surface ozone levels during heatwave events at the urban area of Thessaloniki– *Bachelor Thesis*



Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Πρόδρομο Ζάνη για την ανάθεση και την επίβλεψη της εργασίας, τη σημαντική βοήθειά του κατά την εκπόνηση της εργασίας, καθώς και για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και την υποστήριξη που μου παρείχε σ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Γεωλογικού Τμήματος, του Αριστοτέλειο Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και το Δίκτυο Μέτρησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης και Μετεωρολογικών Παραμέτρων, του Δήμου Θεσσαλονίκης, για την παροχή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος, δε θα ήθελα να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την κατανόηση, τη βοήθεια, τη συνεχή προτροπή και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν, κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

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

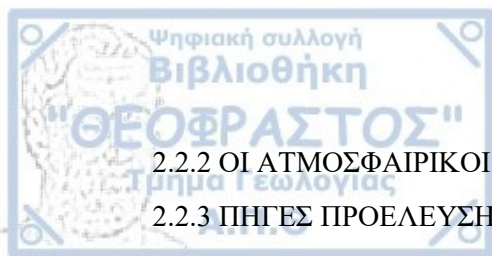
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου: Μετεωροσκοπείο, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	10
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	12
ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ	13
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	16
Investigation of near-surface ozone levels during heatwave events at the urban area of Thessaloniki	18
ABSTRACT	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	20
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΚΑΥΣΩΝΑ	20
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	20
1.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΚΑΥΣΩΝΑ	21
1.3 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΓΕΝΕΣΗΣ ΕΝΟΣ ΚΑΥΣΩΝΑ	28
1.3.1 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΠΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΛΟΥΝ ΣΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΥΣΩΝΑ	28
1.3.2 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ (ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΛΗΞΗ) ΕΝΟΣ ΚΑΥΣΩΝΑ	31
1.4 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΩΝΑ ΚΑΙ ΘΝΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ	31
1.5 Η ΑΣΤΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΝΗΣΙΔΑ – ΚΑΙ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΟΔΙΚΗΣ ΧΑΡΑΔΡΑΣ	37
1.5.1 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΝΗΣΙΔΑΣ (ΑΘΝ) ΚΑΙ ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΟΥ	38
1.5.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΟΔΙΚΗΣ ΧΑΡΑΔΡΑΣ	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	47
ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ	47
2.1 Η ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ	47
2.1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ	47
2.1.2 ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ	51
2.2 Η ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ	54
2.2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ - ΑΙΤΙΕΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ	54

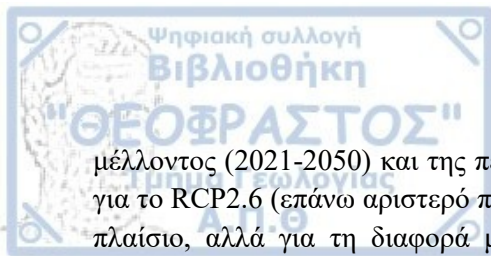


2.2.2 ΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ.....	58
2.2.3 ΠΗΓΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ.....	60
2.3 Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ.....	61
2.4 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ.....	65
2.5 ΤΟ ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΟ ΝΕΦΟΣ.....	78
2.5.1 ΤΟ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΖΟΝ (O ₃).....	79
2.5.2 Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ (O ₃)	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	89
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	89
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	89
3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	93
3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ O ₃ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	96
3.4 ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ - ΕΠΙΤΡΕΠΤΑ ΟΡΙΑ.....	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	103
ΤΑ ΕΠΕΙΣΟΔΙΑ ΚΑΥΣΩΝΑ ΚΑΙ ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2020	103
4.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	103
4.2 ΤΑ ΕΠΕΙΣΟΔΙΑ ΚΑΥΣΩΝΑ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2020	110
4.3 ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΤΟ ΘΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2020.....	123
4.4 ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΚΑΥΣΩΝΑ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2020	127
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	136
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	142
ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	142
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	149
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	154

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Επεισόδια καύσωνα, που συνέβησαν στην Ελλάδα την περίοδο 1955-2001, από τη στατιστική επεξεργασία των παρατηρήσεων θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού της Ν. Φιλαδέλφειας (Ζιακόπουλος κ.ά., 2008; Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015).	30
Εικόνα 2. (α) Διάγραμμα εξέλιξης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας όπως παρατηρήθηκε από NASA (Goddard Institute for Space Studies, USA), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA), Berkeley Earth (USA) και τις εθνικές Μετεωρολογικές Υπηρεσίες της Μεγ. Βρετανίας και της Ιαπωνίας που δείχνουν σημαντική ομοιότητα αποτελεσμάτων (WMO, 2022). (β) Διάγραμμα εξέλιξης της παγκόσμιας θερμοκρασίας όπως παρατηρήθηκε τα τελευταία 170 έτη (μαύρη γραμμή) σε σχέση με το χρονικό διάστημα 1850-2020 και όπως εκτιμήθηκε από μοντέλα, εξαιτίας της δράσης ανθρωπογενών και φυσικών δραστηριοτήτων (καφέ γραμμή) και εξαιτίας της δράσης μόνο φυσικών δραστηριοτήτων (πράσινη γραμμή) (IPCC, 2021).	33
Εικόνα 3. Επεισόδιο καύσωνα, που συνέβη στην Ελλάδα τον Ιούλιο του 1987 (Ζουμάκης, 2016). (α) Η ημερήσια διακύμανση των θερμοκρασιών (T_{min} , T_{max}) και οι καταγραφές θανάτων στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών, κατά την περίοδο του ισχυρού καύσωνα του Ιουλίου του 1987. (Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός Σταθμός του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών-Υπουργείο Υγείας και Πρόνοιας:Τεχνικές Εκθέσεις 1987/1988). (β) Οι μέγιστες θερμοκρασίες και η θνησιμότητα στο Δήμο Θεσσαλονίκης κατά την περίοδο του ισχυρού καύσωνα του Ιουλίου του 1987. (Πηγές δεδομένων: Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης-Ληξιαρχείο Δήμου Θεσσαλονίκης).	37
Εικόνα 4. Υπερθέρμανση στο κέντρο της πόλης του Παρισιού, που απεικονίζεται με τη μορφή ενός «νησιού» (Αστική Θερμική Νησίδα)	39
Εικόνα 5. (α) Εικόνα από την πόλη του Τόκυο. (β) Θερμική εικόνα της ΑΘΝ στο Τόκυο.....	40
Εικόνα 6. Τρόποι δημιουργίας του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας.....	41
Εικόνα 7. Το φαινόμενο της οδικής χαράδρας. (i) Είδη ροών στην οδική χαράδρα σε σχέση με το λόγο του επιμήκους (W/H) (ii) Κύρια χαρακτηριστικά κανονικής οδικής χαράδρας.	45
Εικόνα 8. Εικονική αναπαράσταση του φαινομένου του θερμοκηπίου.	49
Εικόνα 9. Στρώματα της ατμόσφαιρα σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας ($^{\circ}\text{C}$) με το ύψος (km)-έντονη γραμμή.....	53
Εικόνα 10. Φωτοχημική αιθαλομίχλη στην Αθήνα και στην πόλη του Λος Άντζελες (Η.Π.Α.). Πηγή: Μελάς κ.ά., 2000;Ζάνης, 2014.	58
Εικόνα 11. Απεικόνιση των ατμοσφαιρικών διεργασιών, οι οποίες καθορίζουν τη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων.....	62
Εικόνα 12. Σχηματικές απεικονίσεις της θαλάσσιας αύρας (αριστερά) και της απόγειος αύρας (δεξιά).....	75
Εικόνα 13. Άνεμοι πλαγιάς (μικρά κόκκινα και μπλε βέλη), κοιλάδας (μεγάλο κόκκινο βέλος) και βουνών (μεγάλο μπλε βέλος) κατά την ημέρα (αριστερά) και κατά τη νύχτα (δεξιά).	77
Εικόνα 14. (α) Σχηματική απεικόνιση τυπικής κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης-μερικής πίεσης- του ατμοσφαιρικού όζοντος σαν συνάρτηση με το ύψος. (β) Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή του UV, που προσπίπτει στην ατμόσφαιρα και αυτού που προσπίπτει στο έδαφος, μετά την απορρόφηση τμημάτων της ακτινοβολίας από το O_2 και το O_3	81

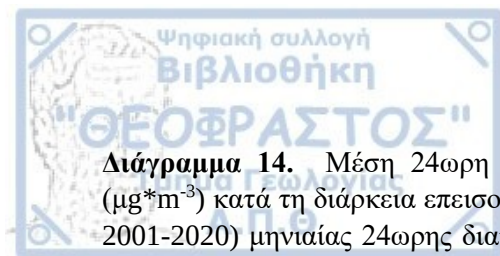
Εικόνα 15. Δορυφορικές εικόνες της Ανταρκτικής και εκτιμήσεις της NASA που δείχνουν την απώλεια όζοντος στην στρατόσφαιρα. Οι μονάδες μέτρησης είναι Dobson units (DU).	83
Εικόνα 16. Σχηματική απεικόνιση της προέλευσης του ατμοσφαιρικού όζοντος.	84
Εικόνα 17. Σχηματική απεικόνιση πολυπλοκότητας μηχανισμών των αλυσιδωτών αντιδράσεων της φωτοχημικής ρύπανσης (παραγωγή μεγάλου αριθμού δευτερογενών αέριων ρύπων).	85
Εικόνα 18. Σχηματική απεικόνιση τυπικής ημερήσιας πορείας των συγκεντρώσεων των αερίων ρύπων που σχηματίζουν το φωτοχημικό νέφος.	86
Εικόνα 19. Η θέση της Θεσσαλονίκης.	91
Εικόνα 20. Η θέση των εγκατεστημένων σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.	95
Εικόνα 21. Σχηματικό διάγραμμα μέτρησης του όζοντος με τη μέθοδο της απορρόφησης της υπεριώδους ακτινοβολίας UV.	98
Εικόνα 22. Αστική Θερμική Νησίδα στη Θεσσαλονίκη.	105
Εικόνα 23. Οι θέσεις των δύο αντιπροσωπευτικών σταθμών που επιλέχθηκαν στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.	107
Εικόνα 24. (α) Ο αστικός σταθμός υποβάθρου του Επταπυργίου, στην Άνω Πόλη, του Δικτύου Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, του Δήμου Θεσσαλονίκης. (β) Εσωτερικό Σταθμού Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, του Δήμου Θεσσαλονίκης.	108
Εικόνα 25. Μετεωρολογικός Σταθμός Α.Π.Θ., Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ. – Οροφή Μετεωροσκοπείου, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. ...	109
Εικόνα 26. Μέση ετήσια διακύμανση των θερμοκρασιών (T_{min} , T_{max} , ($^{\circ}C$)) και η ανάλυση της τάσης (με επιμέρους γραμμικά μοντέλα), για τους θερινούς μήνες (Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο), την περίοδο 1946–2016, για τη Θεσσαλονίκη, σύμφωνα με την ανάλυση του Ζουμάκη (2016).	116
Εικόνα 27. Κατανομή των μέγιστων ημερήσιων θερμοκρασιών ($^{\circ}C$), τους θερινούς μήνες (Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο), με τα αντίστοιχα όρια ($97,5^{\circ}$ εκατοστημόριο της κατανομής – η συνεχής καμπύλη απεικονίζει την αντίστοιχη κανονική κατανομή), τις περιόδους 1931–2016 (επάνω) και 2006-2016 (κάτω), για τη Θεσσαλονίκη, σύμφωνα με την ανάλυση του Ζουμάκη (2016).	116
Εικόνα 28. Αποτελέσματα από τις μαθηματικές προσομοιώσεις του περιφερειακού κλιματικού μοντέλου EURO-CORDEX στις οποίες παρουσιάζεται η διαφορά των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών-TAS, μεταξύ του εγγύς μέλλοντος (2021–2050) και της περιόδου αναφοράς (1971–2000) για τη νοτιοανατολική Ευρώπη για το RCP2.6 (α). (β) το ίδιο με το (α), αλλά για τη διαφορά μεταξύ του τέλους του αιώνα (2071–2100) και της περιόδου αναφοράς. (c) και (d) τα ίδια με τα (α) και (β) αντίστοιχα, αλλά για το RCP4.5. (e) και (f) τα ίδια με τα (α) και (β) αντίστοιχα, αλλά για το RCP8.5. (g) χρονοσειρές (1950–2100) με τη διαφορά μεταξύ των μέσων ετήσιων TAS και των μέσων TAS για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) για την Ελλάδα (μόνο χερσαίες περιοχές, τα όρια φαίνονται στο σχήμα). Οι ράβδοι σφάλματος υποδηλώνουν το $\pm 1\sigma$ από τους ετήσιους μέσους όρους των 11 προσομοιώσεων EURO-CORDEX και σχεδιάζονται ανά 5 έτη. Το πλαίσιο στα δεξιά δείχνει τη μέση διαφορά των περιόδων 1971–2000, 2021–2050 και 2071–2100 με την περίοδο αναφοράς.	117
Εικόνα 29. Αποτελέσματα από τις μαθηματικές προσομοιώσεις του περιφερειακού κλιματικού μοντέλου EURO-CORDEX, στις οποίες παρουσιάζεται η διαφορά των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών TAS, για τους καλοκαιρινούς μήνες (JJA:Ιούνιος-Αύγουστος), μεταξύ του εγγύς	



μέλλοντος (2021-2050) και της περιόδου αναφοράς (1971-2000) για τη νοτιοανατολική Ευρώπη για το RCP2.6 (επάνω αριστερό πλαίσιο). Στο επάνω δεξιό πλαίσιο, το ίδιο με το επάνω αριστερό πλαίσιο, αλλά για τη διαφορά μεταξύ του τέλους του αιώνα (2071-2100) και της περιόδου αναφοράς. Στο μεσαίο αριστερό πλαίσιο και στο μεσαίο δεξί πλαίσιο, το ίδιο με το επάνω αριστερό πλαίσιο και το επάνω δεξιό πλαίσιο, αντίστοιχα, αλλά για το RCP4.5. Στο κάτω αριστερό πλαίσιο και στο κάτω δεξί πλαίσιο, το ίδιο με το επάνω αριστερό πλαίσιο και το επάνω δεξιό πλαίσιο, αντίστοιχα, αλλά για το RCP8.5. 118

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1. Ημερήσια διακύμανση και γραμμική τάση των T_{min} , T_{mean} , T_{max} ($^{\circ}C$), τους θερμούς μήνες Μάιος–Σεπτέμβριος, κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000, στη Θεσσαλονίκη.	111
Διάγραμμα 2. Ημερήσια διακύμανση και γραμμική τάση των θερμοκρασιών T_{min} , T_{mean} , T_{max} ($^{\circ}C$), τους θερμούς μήνες Μάιος–Σεπτέμβριος, κατά την περίοδο 2001-2020, στη Θεσσαλονίκη.	112
Διάγραμμα 3. Μέση ετήσια διακύμανση και γραμμική τάση των θερμοκρασιών T_{min} , T_{mean} , T_{max} , των θερμών μηνών Μαΐου–Σεπτεμβρίου, κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000, στη Θεσσαλονίκη.	113
Διάγραμμα 4. Μέση ετήσια διακύμανση και γραμμική τάση των θερμοκρασιών T_{min} , T_{mean} , T_{max} , των θερμών μηνών Μαΐου–Σεπτεμβρίου, κατά την περίοδο 2001-2020, στη Θεσσαλονίκη.	114
Διάγραμμα 5. Μέση ετήσια διακύμανση και γραμμική τάση των θερμοκρασιών T_{min} , T_{mean} , T_{max} ($^{\circ}C$), κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000 (επάνω) και κατά την περίοδο 2001-2020 (κάτω), στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.	115
Διάγραμμα 6. Ετήσια κατανομή και γραμμική τάση των επεισοδίων καύσωνα στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2001-2020.	115
Διάγραμμα 7. (α) Μηνιαία κατανομή των επεισοδίων καύσωνα στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2001-2020. (β) Κατανομή της μέγιστης T_{max} ($^{\circ}C$), κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα στη Θεσσαλονίκη, τα έτη 2001-2020.	116
Διάγραμμα 8. Μέση ωριαία διακύμανση και τυπική απόκλιση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος ($\mu g \cdot m^{-3}$), της περιόδου 2001-2020, τους μήνες Απρίλιο-Σεπτέμβριο, στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου.	124
Διάγραμμα 9. Μέση ωριαία διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος ($\mu g \cdot m^{-3}$) κατά τη θερινή περίοδο του έτους, στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, τα έτη 2001-2020.	125
Διάγραμμα 10. Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος ($\mu g \cdot m^{-3}$) κατά τη θερινή περίοδο του έτους, στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, τα έτη 2001-2020.	125
Διάγραμμα 11. Μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος ($\mu g \cdot m^{-3}$) κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαίας 24ωρης διακύμανσης και της τυπικής απόκλισης των συγκεντρώσεων του όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στη Θεσσαλονίκη. – Κατηγορία I	129
Διάγραμμα 12. Μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος ($\mu g \cdot m^{-3}$) κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαίας 24ωρης διακύμανσης και της τυπικής απόκλισης των συγκεντρώσεων του όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στη Θεσσαλονίκη. – Κατηγορία II	131
Διάγραμμα 13. Μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος ($\mu g \cdot m^{-3}$) κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαίας 24ωρης διακύμανσης και της τυπικής απόκλισης των συγκεντρώσεων του όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στη Θεσσαλονίκη. – Κατηγορία III	132



Διάγραμμα 14. Μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαίας 24ωρης διακύμανσης και της τυπικής απόκλισης των συγκεντρώσεων του όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στη Θεσσαλονίκη. – Κατηγορία IV..... 134



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Χαρακτηρισμός «επεισοδείου καύσωνα» από μια σειρά μελετών, που παρατίθενται από Founda et al. (2022).....	23
Πίνακας 2. Σύνθεση του «ξηρού» ατμοσφαιρικού αέρα	48
Πίνακας 3. Τυπικές συγκεντρώσεις (μέση σύσταση) γήινης ατμόσφαιρας.	51
Πίνακας 4. Κριτήρια ενδεικτικής ταξινόμησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης.	56
Πίνακας 5. Κλιματικά δεδομένα για τη Θεσσαλονίκη.	90
Πίνακας 6. Κλιματικά δεδομένα για τη Θεσσαλονίκη.	93
Πίνακας 7. Όρια εκτίμησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας από την Οδηγία 2008/50/EK.....	100
Πίνακας 8. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες των δύο αντιπροσωπευτικών σταθμών που επιλέχθηκαν στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.	109

ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Η Θεσσαλονίκη είναι η δεύτερη μεγαλύτερη ελληνική πόλη και η μεγαλύτερη σε έκταση και πληθυσμό πόλη της Μακεδονίας, με περισσότερο από ένα εκατομμύριο κάτοικους, στη μητροπολιτική περιοχή της. Επίσης, αποτελεί το κύριο εμπορικό, οικονομικό και πολιτισμικό αστικό κέντρο της βόρειας Ελλάδας και ένα από τα μεγαλύτερα των Βαλκάνιων. Εξαιτίας αυτής της μεγάλης αστικοποίησης η Θεσσαλονίκη είναι πυκνοκατοικημένη και παρουσιάζει σημαντικά πολεοδομικά προβλήματα, με αποτέλεσμα ο συνδυασμός των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων (κυρίως της κυκλοφορίας μεγάλου αριθμού οχημάτων) και των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή, να οδηγούν στην υποβάθμιση του ατμοσφαιρικού της περιβάλλοντος, με αρνητικές συνέπειες, στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον.

Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι, κατά τη διάρκεια των τεσσάρων τελευταίων δεκαετιών, υπάρχει μια προοδευτική άνοδος της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο. Η περίοδος 2010-2019 ήταν μια από τις θερμότερες δεκαετίες που έχουν καταγραφεί ποτέ, καθώς η παγκόσμια μέση θερμοκρασία ξεπέρασε τα προβιομηχανικά επίπεδα περίπου κατά $1,1^{\circ}\text{C}$. Αυτή η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας, σε παγκόσμια κλίμακα και η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως ισχυρών και συχνών επεισοδίων καύσωνα, μπορεί να οδηγήσει σε μη αναστρέψιμη αλλαγή του κλίματος με δραματικές συνέπειες στην ισορροπία των οικοσυστημάτων, περιορισμό της παγοκάλυψης, αύξηση του αριθμού των πολύ θερμών ημερών, ξηρασία και ερημοποίηση ορισμένων περιοχών, άνοδος της στάθμης των υδάτων, κλπ. Κατά τη διάρκεια των ισχυρών επεισοδίων καύσωνα, σε πυκνοδομημένες αστικές περιοχές, μπορεί να προκληθεί σημαντική αύξηση της θνησιμότητας, σε μικρό χρονικό διάστημα, εξαιτίας της επιδείνωσης των συνθηκών δυσφορίας.

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση των επιπτώσεων της αστικοποίησης και των αλλαγών στις κλιματικές συνθήκες στο ατμοσφαιρικό περιβάλλον της Θεσσαλονίκης, καθώς και τη διερεύνηση των επιπέδων της συγκέντρωσης του όζοντος, που είναι ο κύριος δείκτης και μέτρο εμφάνισης της φωτοχημικής ρύπανσης, κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης την περίοδο 2001-2020.

Στο πρώτο κεφάλαιο, αυτής της διπλωματικής εργασίας, περιγράφεται το φαινόμενο του καύσωνα και ο μηχανισμός γένεσής αυτού του φαινομένου. Στη συνέχεια περιγράφονται οι μετεωρολογικοί παράγοντες και οι συνοπτικές συνθήκες που συμβάλουν στη γένεση ενός καύσωνα, καθώς και τα χαρακτηριστικά στάδια έναρξης και λήξης του. Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικά παραδείγματα κυμάτων καύσωνα και παρατηρούμενης θνησιμότητας κατά τη διάρκεια ισχυρών επεισοδίων καύσωνα. Επίσης, παρουσιάζονται το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας και οι συνέπειές του, καθώς και το φαινόμενο της αστικής οδικής χαράδρας, τα οποία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση μιας πιο ανθεκτικής προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή των αστικών περιοχών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται ο ορισμός, η χημική σύσταση και τα στρώματα της ατμόσφαιρας. Στη συνέχεια περιγράφεται ο ορισμός και οι αιτίες της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς και οι πηγές προέλευσης των σημαντικότερων ατμοσφαιρικών ρύπων. Ο κύκλος των ατμοσφαιρικών ρύπων και η επίδραση των μετεωρολογικών φαινομένων στα επίπεδα των ατμοσφαιρικών ρύπων περιγράφεται στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το φαινόμενο της φωτοχημικής ρύπανσης και ειδικότερα η παραγωγή και η σημασία του τροποσφαιρικού όζοντος, αλλά δίνονται και πληροφορίες για το στρατοσφαιρικό όζον.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αφού δίνονται πληροφορίες για τα γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, δηλαδή της πόλης της Θεσσαλονίκης, παρουσιάζεται η μεθοδολογία μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή και ειδικότερα των επιπέδων της συγκέντρωσης του επιφανειακού όζοντος. Επίσης, παρουσιάζεται το εθνικό και ευρωπαϊκό θεσμικό πλαίσιο για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, καθώς και τα επιτρεπτά όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας στην Ελλάδα και την ΕΕ.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, αναλύονται τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2001-2020. Έτσι, αρχικά παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δύο αντιπροσωπευτικών σταθμών που επιλέχθηκαν, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, όσον αφορά τις μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα και τις μετρήσεις της συγκέντρωσης του επιφανειακού όζοντος.



Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα επεισόδια καύσωνα στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2001-2020, καθώς και οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα, κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000 και την εξεταζόμενη περίοδο 2001-2020. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα επίπεδα συγκέντρωσης του επιφανειακού όζοντος, κατά τη διάρκεια του θερινού εξαμήνου του έτους, στη Θεσσαλονίκη, την περίοδο 2001-2020. Τέλος, γίνεται διερεύνηση των επιπέδων των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος, κατά τη διάρκεια των ημερών που εμφανίστηκαν τα επεισόδια καύσωνα, σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος, της εξεταζόμενης περιόδου 2001-2020, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν τη διπλωματική εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα επίπεδα της ποιότητας της ατμόσφαιρας σ' ένα αστικό περιβάλλον, με πολεοδομική πολυπλοκότητα, οφείλονται στο συνδυασμό της ποσότητας και του είδους των ατμοσφαιρικών ρύπων, που εκπέμπονται, από τις διάφορες φυσικές και ανθρωπογενείς, πηγές, αλλά και από την αλληλεπίδραση που αναπτύσσεται μεταξύ αυτών των ρύπων και των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Επίσης, από τη συνεχή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, στο πλαίσιο της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής, υπάρχει στο άμεσο μέλλον σοβαρός κίνδυνος να προκληθεί δραματική αύξηση της συχνότητας των επεισοδίων καύσωνα, που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της θνησιμότητας σε αστικές περιοχές. Η Θεσσαλονίκη είναι μία πυκνοκατοικημένη, με πολεοδομικά προβλήματα, πόλη, στην οποία ο συνδυασμός των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν, έχουν σαν αποτέλεσμα την υποβάθμιση του ατμοσφαιρικού της περιβάλλοντος, με βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες αρνητικές συνέπειες, στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη των επιπέδων της συγκέντρωσης του επιφανειακού όζοντος, που είναι ο κύριος δείκτης της φωτοχημικής ρύπανσης, κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, μιας από τις μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδος. Η εξεταζόμενη περίοδος ήταν η θερμή περίοδος Μαΐου-Σεπτεμβρίου και κυρίως οι καλοκαιρινοί μήνες, κατά τη διάρκεια των ετών 2001-2020. Γι' αυτό το λόγο, χρησιμοποιήθηκαν τα διαθέσιμα δεδομένα από δυο αντιπροσωπευτικούς σταθμούς, το Μετεωρολογικό Σταθμό, του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Γεωλογικού Τμήματος, του Αριστοτέλειο Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, στο γεωγραφικό κέντρο της πόλης, όσον αφορά τα μετεωρολογικά δεδομένα (μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα) και το Σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, του Δικτύου Μέτρησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, του Δήμου Θεσσαλονίκης, όσον αφορά τις μετρήσεις της συγκέντρωσης του επιφανειακού όζοντος.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, έγινε στατιστική επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων και αφού έγινε εκτίμηση των επεισοδίων καύσωνα στη Θεσσαλονίκη, κατά την περίοδο 2001-2020 (περίοδο αναφοράς 1971-2000), παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα (T_{min} , T_{mean} , T_{max}) και οι μεταβολές των επιπέδων των

συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης κατά το θερινό εξάμηνο του έτους, την περίοδο 2001-2020. Έτσι, από τους υπολογισμούς αυτούς, παρατηρήθηκε μια συνεχής ανοδική τάση των ημερήσιων και μέσων ετήσιων διακυμάνσεων των θερμοκρασιών T_{min} , T_{mean} , T_{max} , τόσο στις μέσες ετήσιες τιμές, όσο και στις μέσες τιμές των θερμών μηνών της περιόδου Μαΐου-Σεπτεμβρίου, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, και κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000, και κατά την εξεταζόμενη περίοδο 2001-2020. Επίσης, εκτιμήθηκε ότι ο συνολικός αριθμός των επεισοδίων κάυσιων, στη Θεσσαλονίκη, την περίοδο 2001-2020, ήταν 44, με τα περισσότερα απ' αυτά να εμφανίστηκαν τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, σε ποσοστά περίπου 32% και 52%, αντίστοιχα. Ακόμη, διαπιστώθηκε ότι περίπου στο 25% των επεισοδίων κάυσιων, που εμφανίστηκαν την εξεταζόμενη χρονική περίοδο, η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος, κατά τη διάρκεια των ημερών του επεισοδίου κάυσιων, ήταν σημαντικά μεγαλύτερη, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης. Επομένως, από τις παραπάνω εκτιμήσεις προκύπτει ότι, η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως τα επεισόδια κάυσιων, ενδέχεται να οδηγήσουν σε σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας της ατμόσφαιρας αστικών περιοχών, όπως η αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Τέλος, έγινε παρουσίαση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων.

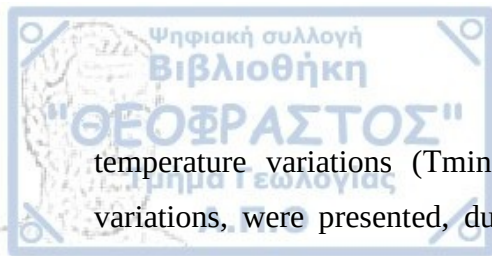
Λέξεις Κλειδιά: Ατμοσφαιρική ρύπανση, επεισόδια κάυσιων, επίπεδα συγκεντρώσεων επιφανειακού όζοντος, διακύμανση θερμοκρασίας αέρα, ποιότητα αέρα, ανθρώπινη υγεία, ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

ABSTRACT

The levels of air quality in an urban environment, with urban planning complexity, are due to the combination of the quantity and type of atmospheric pollutants emitted by the various natural and anthropogenic sources, but also by the interaction that develops between these pollutants and the meteorological conditions prevailing in the area. Also, from the continuous increase of the global average surface temperature, in the context of climate change, there is a serious risk in the near future of causing a dramatic increase in the frequency of heat waves episodes, which can lead to a significant increase in summer mortality, in urban areas. Thessaloniki is a densely populated city with urban planning problems, in which the combination of anthropogenic activities and the prevailing meteorological conditions result in the degradation of its atmospheric environment, with short-term and long-term negative consequences for human health and the environment.

The aim of this study was to attempt to investigate the levels of surface ozone concentration, which is the main indicator of the photochemical pollution appearance, during heat wave episodes, in the urban area of Thessaloniki, one of the largest cities in Greece. The considered period was the warm period from May to September, and mainly the summer months, during the years 2001-2020. For the purposes of this study, the available measurements of air temperature were used, from a representative meteorological station in the geographical city center. These meteorological data were provided from the Meteorological Station of the Department of Meteorology and Climatology, of the School of Geology, of Aristotle University of Thessaloniki. Regarding surface ozone concentration measurements, the available measurements were provided, from the urban background Station of Eptapyrgio, of the Air Pollution Monitoring Network, of the Municipality of Thessaloniki.

Thus, within the framework of this work, a statistical analysis of the above data was carried out, and after an assessment of the heat wave episodes in the urban area of Thessaloniki during the period 2001-2020 (reference period 1971-2000), the air



temperature variations (T_{min} , T_{mean} , T_{max}) and the surface ozone concentration variations, were presented, during the warm period of the year, throughout the years 2001-2020. From these assessment, a continuous upward trend was observed in the daily and average annual T_{min} , T_{mean} , T_{max} temperature variations, during both the warm months of the May-September period, but also the whole year period, in the urban area of Thessaloniki, at the two above mentioned periods (1971-2000 and 2001-2020). It was also estimated that the total number of heat wave episodes, in Thessaloniki in the period 2001-2020, was 44, with most of them occurring during July and August, at rates of approximately 32% and 52%, respectively. Furthermore, it was found that in approximately 25% of the heat wave episodes, which occurred in the examined period, the mean 24-hour variation of surface ozone concentrations, during the days of the heat wave episode, was significantly greater, compared to the corresponding mean (of the period 2001-2020) monthly 24-hour variation of surface ozone concentrations (of the month of each heat wave episode appearance), at the urban background station of Eptapyrgio, in the urban area of Thessaloniki. Therefore, from the above estimates, it is established that the more frequent occurrence of extreme weather events, such as heat wave episodes, may lead to a significant degradation of the quality of the atmosphere in urban areas, such as the urban area of Thessaloniki.

Finally, the conclusions obtained from the processing of the above data were presented.

Key Words: Atmospheric pollution, heat waves, surface ozone concentration levels, temperature variations, air quality, human health, greater Thessaloniki area.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΚΑΥΣΩΝΑ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μία από τις κυριότερες περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές απειλές, των τελευταίων δεκαετιών, σε παγκόσμια κλίμακα. Οι αλλαγές αυτές που οφείλονται, αφενός σε φυσικές διαδικασίες και αφετέρου σε ανθρώπινες δραστηριότητες, προσθέτουν τεράστιες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, προκαλώντας την ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου και την υπερθέρμανση του πλανήτη. Έτσι, σύμφωνα με τη Διεθνή Επιτροπή Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) προκαλούνται σημαντικές επιπτώσεις στο κλίμα και στη σύνθεση της ατμόσφαιρας, στο περιβάλλον, στην ανθρώπινη υγεία, στη διατροφική ασφάλεια, στην οικονομική δραστηριότητα και στους φυσικούς πόρους (IPCC, 2021: Climate Change 2021). Ειδικότερα, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες επηρεάζουν ολοένα και περισσότερο το κλίμα και τη θερμοκρασία της γης, εξαιτίας της χρήσης ορυκτών καυσίμων, της αποψίλωσης των δασών, της αύξησης της κτηνοτροφίας και της χρήσης αζωτούχων λιπασμάτων και της εκπομπής φθοριούχων αερίων. Αυτή η κατάσταση αναμένεται να έχει σοβαρές συνέπειες στη δομή και στην εξέλιξη των οικοσυστημάτων, καθώς και στην ανθρώπινη υγεία, με δραματική αύξηση της θνησιμότητας. Η περίοδος 2011-2020 ήταν μια από τις θερμότερες δεκαετίες που έχουν καταγραφεί ποτέ, καθώς η παγκόσμια μέση θερμοκρασία ξεπέρασε το 2019 τα προβιομηχανικά επίπεδα κατά 1,1°C (https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el).

Ένα από τα κυριότερα αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής αναμένεται να είναι η αύξηση της συχνότητας εμφάνισης ισχυρών καυσώνων. Τα ακραία επεισόδια καύσωνα συνήθως έχουν δραματικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, σαν αποτέλεσμα της θερμικής καταπόνησης στον ανθρώπινο οργανισμό. Οι πυκνοδομημένες αστικές περιοχές, όπως αυτή της Θεσσαλονίκης, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες στις παραπάνω συνθήκες, λόγω και της ανάπτυξης των φαινομένων της αστικής νησίδας θερμότητας και

της οδικής χαράδρας. Έτσι, η ταυτόχρονη επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της θερμικής καταπόνησης στην υγεία του ανθρώπου, κατά τη διάρκεια των ισχυρών επεισοδίων καύσωνα συνδέονται με αυξημένη συνολική νοσηρότητα και θνησιμότητα.

Το φαινόμενο του «καύσωνα», σε πολλές περιπτώσεις, μπορεί να μην είναι τίποτα περισσότερο από ένα αίσθημα αδιαθεσίας για τον άνθρωπο, ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να αποδειχθεί θανατηφόρο. Σύμφωνα με διάφορες εκτιμήσεις, η υπερβολική ζέστη και το φαινόμενο του «καύσωνα» προκαλούν μεγάλο αριθμό θανάτων ετησίως και για το λόγο αυτό, συμπεριλαμβάνεται στη λίστα με τις σημαντικότερες θανατηφόρες φυσικές καταστροφές. Το φαινόμενο του «καύσωνα», λοιπόν, είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό μετεωρολογικό φαινόμενο και γι' αυτό κατέχει αξιοσημείωτη θέση στη μελέτη των μετεωρολογικών φαινομένων.

1.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΚΑΥΣΩΝΑ

Το φαινόμενο του «καύσωνα» έχει ταυτιστεί από τη συντριπτική πλειοψηφία των πολιτών με τις πολύ υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν κατά τη θερινή περίοδο. Σύμφωνα με την ελληνική και τη διεθνή βιβλιογραφία, δεν υπάρχει μοναδικός, αυστηρός και γενικώς αποδεκτός ορισμός της έννοιας του καύσωνα. Κατά καιρούς, πολλοί ερευνητές, στην Ελλάδα και διεθνώς, προσπάθησαν να ορίσουν την έννοια αυτή με διάφορους τρόπους και σε διάφορες χρονικές και γεωγραφικές κλίμακες. Η δυσκολία που χαρακτηρίζει τον ορισμό της έννοιας αυτής διαπιστώνεται από το μεγάλο αριθμό των όρων που έχουν κατά καιρούς προταθεί, για την ερμηνεία της. Ανάμεσα σε αυτούς ξεχωρίζουν οι ορισμοί «ημέρα καύσωνα», (heatwave day), «θερμό κύμα», (heat wave), «θερμή εισβολή», (warm invasion), «μεγάλη θερμή μεταφορά», (large warm advection), «θερμή περίοδος», (warm period), (ή «θερμή εποχή», ή «θερμό έτος» ή «θερμός μήνας») και «επεισόδιο καύσωνα», (heatwave episode), κ.λπ. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των εννοιών είναι η τοπική ισχύς τους.

Παρακάτω πιο συγκεκριμένα ακολουθούν μερικοί ενδεικτικοί ορισμοί του φαινομένου, «καύσωνα»:

(α) Ως «επεισόδιο καύσωνα» αναφέρονται οι ορισμοί:

- 1) «Επεισόδιο καύσωνα» θεωρείται μια περίοδος άνω των 3 διαδοχικών ημερών, στις οποίες η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία υπερβαίνει το 99^ο εκατοστημόριο της ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας κατά την περίοδο Μαΐου-Σεπτεμβρίου, με περίοδο ελέγχου την περίοδο 1971-2000 (Jacob et al., 2014).
- 2) Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO), «επεισόδιο καύσωνα» ορίζεται η περίοδος άνω των 5 συνεχόμενων ημερών με ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία, που υπερβαίνει κατά τουλάχιστον 5°C, τη μέση ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία της περιόδου Μαΐου-Σεπτεμβρίου, με περίοδο ελέγχου την περίοδο 1971-2000 (1961-1990) (Frich et al., 2002; Jacob et al., 2014).
- 3) Ένας άλλος ορισμός χρησιμοποιεί, τόσο την ελάχιστη θερμοκρασία, (TASMIN), όσο και τη μέγιστη θερμοκρασία, (TASMAX). Ως «επεισόδιο καύσωνα» ορίζεται ένα γεγονός τουλάχιστον 3 διαδοχικών «ζεστών (καυτών)» ημερών που η ελάχιστη και η μέγιστη θερμοκρασία της ημέρας υπερβαίνουν ταυτόχρονα δύο κριτήρια, τα όρια του 90^{ου} εκατοστημρίου Tmin_Q90 και Tmax_Q90, αντίστοιχα κατά την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου, με περίοδο ελέγχου την περίοδο 1995-2015 (21 έτη) (Lavaysse et al., 2018).
- 4) Μια άλλη προσέγγιση για το «επεισόδιο καύσωνα» είναι όταν για τουλάχιστον δύο συνεχόμενες ημέρες το ημερήσιο μέγιστο της θερμοκρασίας και το ημερήσιο ελάχιστο της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερα από τα όρια των 40,6°C και των 26,7°C, αντίστοιχα, (όρια θερμικής καταπόνησης της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ-National Weather Service, με εξαίρεση περιοχές που ταυτόχρονα οι μέσες ετήσιες τιμές του μέγιστου και του ελάχιστου της θερμοκρασίας υπερβαίνουν κατά 1% τα παραπάνω όρια, οπότε αυτές οι τιμές του 1% τις αντικαθιστούν, με περίοδο ελέγχου 1951-1990) (Robinson, 2001a,b).
- 5) Η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, (EMY), επισημαίνει ότι δεν υπάρχει γενικός ορισμός επεισοδίου καύσωνα, αφού η θερμοκρασία εξαρτάται κυρίως από το γεωγραφικό πλάτος. Ωστόσο, για την Ελλάδα, ένα κατώφλι θερμοκρασίας αποτελεί η τιμή των 39°C με την προϋπόθεση να παρατηρηθεί σε ευρεία περιοχή και να καταγράφονται τιμές μεγαλύτερες ή ίσες των 39°C για τουλάχιστον 3

ημέρες. Επίσης, να καταγράφονται υψηλές ελάχιστες θερμοκρασίες (26°C-30°C) κάτι που είναι δεδομένο σε επεισόδια ίσα ή μεγαλύτερα των 4-5 ημερών.

http://www.emy.gr/emyl/pdf/heatwave_2021.pdf

- 6) Όταν παρατηρούνται θερμές μεταφορές μεγάλης κλίμακας, συνήθως από τη Βόρεια Αφρική, και οι υψηλές θερμοκρασίες επικρατούν περισσότερο από μια ημέρα σ' ολόκληρη τη χώρα, τότε «επεισόδιο καύσωνα» ορίζεται μια σειρά τουλάχιστον 3 διαδοχικών ημερών με μέγιστη θερμοκρασία τουλάχιστον 38°C, (Ζιακόπουλος, κ.ά., 2008).
- 7) Επίσης, οι Founda et al. (2022), παραθέτουν μια σειρά μελετών με διαφορετικά κριτήρια για το χαρακτηρισμό του «επεισόδιο καύσωνα», (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Χαρακτηρισμός «επεισοδίου καύσωνα» από μια σειρά μελετών, που παρατίθενται από Founda et al. (2022).

Δείκτης	Όριο	Διάρκεια(ημέρες)	Αναφορά (Reference)
T_{mean}	95th perc. (May-Sep.) (=29.7 °C)	2+	Anderson and Bell (2011), You et al. (2017)
T_{mean}	98th perc. (May-Sep.) (=30.8 °C)	2+	*
T_{max}	95th perc. (May-Sep.) (=36.2 °C)	2+	*
T_{min}	95th perc. (May-Sep.) (=25.1 °C)	2+	*
T_{max}	35 °C (absolute)	3+	Tan et al. (2010), Tong et al. (2010) Kueh et al. (2017), Founda and Santamouris (2017)
T_{max}	95th perc. (June-Aug.) (=37.0 °C)	3+	WMO (2015), Katavoutas and Founda (2019b)
T_{max}	95th moving perc. (June-Aug.)	3+	
T_{max}	T1: > 97.5th perc. (Jan-Dec) (=35.9 °C) T2: > 81st perc. (Jan-Dec) (=31.1 °C) 95th perc (Jan-Dec) (=28.5	Every day > T2; 3+ consecutive days > T1; mean T_{max} > T1	Meehl and Tebaldi (2004)

- 8) Η Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, (ΓΓΠΠ), χαρακτηρίζει ως «επεισόδιο καύσωνα», την περίοδο τουλάχιστον 3 ημερών, κατά την οποία η θερμοκρασία στις πεδινές περιοχές της ηπειρωτικής χώρας είναι μεγαλύτερη από

τους 37°C και η μέση ημερήσια θερμοκρασία είναι ίση ή μεγαλύτερη από τους 31°C (<http://www.gscp.gr/ggpp/>).

(β) Ως «**ημέρα καύσωνα**» χαρακτηρίζεται μια ημέρα με υψηλή μέγιστη θερμοκρασία ($T_{\max}$), σύμφωνα με διάφορες κρίσιμες τιμές, που έχουν ορισθεί, είτε ως διεθνή, είτε ως πανελλαδικά κριτήρια, από διάφορους ερευνητές. Ειδικότερα:

- 1) «Ημέρα καύσωνα» στην Ελλάδα, ορίζεται κάθε ημέρα του καλοκαιριού (θερινή περίοδος), όταν, στο μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ), η ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία είναι τουλάχιστον 37°C και η μέση ημερήσια τουλάχιστον 31°C και ταυτόχρονα η τιμή της ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας στο Μετεωρολογικό Σταθμό της Λάρισας είναι τουλάχιστον ίση με 38°C , (Metaxas and Kallos, 1979; 1980).

Οι μετεωρολογικοί Σταθμοί ΕΑΑ και Λάρισας θεωρούνται από τους Metaxas and Kallos (1979; 1980) σαν αντιπροσωπευτικοί του ελλαδικού χώρου, ο πρώτος εξαιτίας της θέσης του εντός της μεγαλύτερης αστικής περιοχής της χώρας και λόγω της παράκτιας τοπογραφίας του, και ο δεύτερος εξαιτίας του τυπικού ηπειρωτικού χαρακτήρα του και λόγω της μεγάλης συχνότητας, έντασης και διάρκειας με την οποία παρατηρείται σ' αυτόν το φαινόμενο του καύσωνα.

- 2) «Ημέρα καύσωνα», στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής, χαρακτηρίζεται η κάθε ημέρα κατά την οποία η ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία στην συγκεκριμένη περιοχή υπερβαίνει την τιμή που είναι μεγαλύτερη του 93% του αριθμού των ημερήσιων μέγιστων θερμοκρασιών μιας μακράς θερμής περιόδου, όταν σαν θερμή περίοδο συμπεριλαμβάνουν τον Ιούλιο και τον Αύγουστο και τις ημέρες του Σεπτεμβρίου, οι οποίες αφενός αποτελούν συνέχεια των ημερών του Αυγούστου και αφετέρου χαρακτηρίζονται από τιμές ημερήσιας μέσης θερμοκρασίας μεγαλύτερες ή ίσες των 35°C (Ανδρεάκος και Μποζανάς, 1980). Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό για την «ημέρα καύσωνα», οι ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας καύσωνα είναι οι εξής:

- i) για το Μετεωρολογικό Σταθμό του Πειραιά είναι οι $33,2^{\circ}\text{C}$,
- ii) για το Μετεωρολογικό Σταθμό του Ελληνικού είναι οι $35,6^{\circ}\text{C}$,

iii) για το Μετεωρολογικό Σταθμό της Νέας Φιλαδέλφειας είναι οι 37,0°C και

iv) για το Μετεωρολογικό Σταθμό της Ελευσίνας είναι οι 37,2°C.

3) Η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, δέχεται τον πρώτο ορισμό, αναφορικά με την «ημέρα καύσωνα», καθώς μια τέτοια ημέρα ορίζεται όταν επικρατούν οι συνθήκες: $T_{\max} \geq 37^{\circ}\text{C}$ και μέση $T_{24\text{ώρου}} \geq 31^{\circ}\text{C}$ (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015). Όμως, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του λεκανοπεδίου της Αττικής, ορίζεται ως «επεισόδιο καύσωνα» για την Αθήνα και το διάστημα τουλάχιστον 3 ημερών, όπου στο σταθμό της Ν. Φιλαδέλφειας, το όριο μέγιστης θερμοκρασίας είναι οι 38°C (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015).

(γ) Ως «**θερμό κύμα**» χαρακτηρίζεται ως εξής:

- 1) Η σειρά των διαδοχικών ημερών που αποτελεί κύμανση, κατά την οποία η μέση θερμοκρασία του αέρα κοντά στο έδαφος, μιας τουλάχιστον ημέρας, είναι κατά τουλάχιστον 5°C μεγαλύτερη από την κανονική θερμοκρασία της αντίστοιχης ημερομηνίας, σύμφωνα με παρατηρήσεις της περιόδου 1901-1950 (Mariolopoulos and Karapiperis, 1956).
- 2) Μια «περίοδος ασυνήθιστα ζεστή και άβολη με συνήθως υγρό καιρό» ή απλά ως μια «απόκλιση από το μέσο όρο θερμοκρασίας μιας περιοχής» (Milligan et al., 2004).

(δ) Ο όρος «**θερμή εισβολή**» ορίζεται ως εξής:

- 1) Η αύξηση των τιμών των πρωτευόντων ή δευτερευόντων μεγίστων της θερμοκρασίας του αέρα κατά τουλάχιστον 0,6°C σ' έναν τουλάχιστον Μετεωρολογικό Σταθμό της Ελλάδας (Φλόκας, 1970; Flocas, 1972).
- 2) «Θερμή εισβολή στην κατώτερη τροπόσφαιρα» στο Μετεωρολογικό Σταθμό του Ελληνικού χαρακτηρίζεται η εντός 48 ωρών αύξηση του πάχους του στρώματος 1000/500 hPa, η οποία είναι μεγαλύτερη από 100 γεωδυναμικά μέτρα (gpm), ή η εντός 48 ωρών αύξηση της θερμοκρασίας της ισοβαρικής επιφάνειας των 850 hPa κατά τουλάχιστον 5°C, (Ρεπαλής, 1975).

(ε) Ο όροι «**θερμή περίοδος**», ή «**θερμή εποχή**», ή «**θερμό έτος**» ή «**θερμός μήνας**», χαρακτηρίζονται ως εξής:

- 1) Ως «θερμή περίοδο» ή «περίοδο θερμών ημερών», στο Μετεωρολογικό Σταθμό Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) ορίζεται κάθε σειρά διαδοχικών ημερών, με τιμές ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας, τουλάχιστον ίσες με την τιμή του αθροίσματος του μέσου όρου της ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας, μιας μακράς σειράς ετών και της τυπικής απόκλισης του μέσου αυτού, (Flocas, 1981). Επίσης, το 1985 δόθηκε ένας επιπλέον ορισμός από τον Φλόκα, αναφορικά με τον ορισμό της «πολύ θερμής περιόδου», σύμφωνα με τον οποίο, στο Μετεωρολογικό Σταθμό Θεσσαλονίκης, χαρακτηρίζεται η κάθε περίοδος με τιμή μέσης θερμοκρασίας μεγαλύτερη από το άθροισμα του μέσου όρου αυτής, για μια μακρά σειρά ετών και του διπλάσιου της τυπικής απόκλισης του μέσου αυτού (Φλόκας, 1985).
- 2) Ως «πολύ θερμή περίοδο» στη Ν. Βαλκανική ορίζεται κάθε περίοδος τριών τουλάχιστον διαδοχικών ημερών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από τιμές ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας μεγαλύτερες από το μακροχρόνιο μέσο όρο της ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας κατά τουλάχιστον 4°C (Balafoutis and Arseni-Papadimitriou, 1998).
- 3) Ως «πολύ θερμή εποχή» στην Ελλάδα αναφέρεται η κάθε εποχή με τιμή μέσης θερμοκρασίας μεγαλύτερη κατά 0,5°C από τη μακροχρόνια μέση τιμή αυτής, (Giles and Flocas, 1984).
- 4) Ως «θερμός μήνας», (warm month), στους Μετεωρολογικούς Σταθμούς Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) και Λάρισας, θεωρείται κάθε μήνας με τιμή μέσης θερμοκρασίας μεγαλύτερη από τη μέση τιμή της θερμοκρασίας για μια μακρά σειρά ετών του παρελθόντος (Flocas, 1976).
- 5) Ως «εξαιρετικά θερμός μήνας» ορίζεται στο Μετεωρολογικό Σταθμό Θεσσαλονίκης του ΑΠΘ, ο μήνας Ιούλιος, όταν η τιμή της μέσης θερμοκρασίας του είναι μεγαλύτερη από 27.1°C (Σαχσαμάνογλου κ.ά., 1987).
- 6) Ως «εξαιρετικό από άποψης θερμοκρασίας έτος» ή «εξαιρετική από άποψης θερμοκρασίας εποχή» στο Μετεωρολογικό Σταθμό Λευκωσίας της Κύπρου χαρακτηρίζεται κάθε έτος (εποχή) που η τιμή μέσης θερμοκρασίας είναι

τουλάχιστον ίση με την τιμή του αθροίσματος του μέσου όρου της θερμοκρασίας μιας μακράς σειράς ετών και της ποσότητας ($1,96 \cdot \sigma$), όπου σ η τυπική απόκλιση αυτού του μέσου όρου (Maheras and Arseni-Papadimitriou, 1988).

Επίσης, υπάρχει και η δυνατότητα έμμεσου εντοπισμού ημερών καύσωνα, μέσω της αίσθησης της θερμικής δυσφορίας, που προκαλείται από το φαινόμενο του καύσωνα. Η εύρεση αυτή γίνεται με τη βοήθεια βιομετεωρολογικών δεικτών ή δεικτών δυσφορίας, που (Σπύρου, 2000). Οι βιομετεωρολογικοί δείκτες αξιοποιούν μετεωρολογικά δεδομένα για την περιγραφή της επίδρασης των κλιματικών συνθηκών στον άνθρωπο και είναι εμπειρικές σχέσεις που εκφράζουν ποσοτικά την αίσθηση της θερμικής δυσφορίας, σε συνάρτηση διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων (κυρίως θερμοκρασία και υγρασία του αέρα, ενώ λιγότερο σημαντική είναι η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου και της ακτινοβολίας). Πιο σύνθετοι βιοκλιματικοί δείκτες μπορεί να περιλαμβάνουν ακόμα και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντα χώρου. Οι θερμοφυσιολογικοί δείκτες απαιτούν σαν δεδομένα χαρακτηριστικά της ανθρώπινης φυσιολογίας (ηλικία, φύλο, ένταση εργασίας κλπ.) και κοινές μετεωρολογικές παραμέτρους, όπως, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου και ακτινοβολία (Λαβή, 2016). Οι θερμοφυσιολογικοί παράμετροι κυρίως διαμορφώνουν το επίπεδο της θερμικής δυσφορίας (επίπεδο δραστηριότητας των ατόμων, δηλαδή το ρυθμό μεταβολικής παραγωγής θερμότητας από τον ανθρώπινο οργανισμό και τη θερμομονωτική ικανότητα των ενδυμάτων τους).

Συμπερασματικά, ο ορισμός του φαινομένου του καύσωνα είναι ένας ορισμός που χαρακτηρίζει ένα μεγάλο χρονικό διάστημα από υψηλές θερμοκρασίες. Μπορεί να προκαλέσει προσωρινές αλλαγές στον τρόπο ζωής και ενδέχεται να έχει αρνητικές συνέπειες στην υγεία του πληθυσμού μιας πόλης και γενικότερα μιας περιοχής, (Robinson, 2001a,b). Οι ορισμοί που παρατέθηκαν, παραπάνω, βασίζονται σε οριακές τιμές μιας θερμοκρασιακής παραμέτρου. Το θερμοκρασιακό όριο που κάθε φορά χρησιμοποιείται διαφέρει σε κάθε μελέτη και από περιοχή σε περιοχή ακόμη και για τον ίδιο Μετεωρολογικό Σταθμό. Γενικότερα, το όριο αυτό μπορεί να ταυτίζεται με συγκεκριμένη τιμή της ημερήσιας μέσης ή ημερήσιας μέγιστης θερμοκρασίας, ή να ισούται με την τιμή του αθροίσματος του μέσου όρου της θερμοκρασίας, για μια μακρά περίοδο του παρελθόντος και ενός πολλαπλασίου της τυπικής απόκλισης αυτού του

μέσου όρου (Σπύρου, 2000). Επισημαίνεται ακόμη, ότι οι τιμές των μετεωρολογικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των ημερών καύσωνα στην Ελλάδα, γενικά, διαφέρουν από τις αντίστοιχα χρησιμοποιούμενες εκτός Ελλάδας. Επιπλέον, οι ορισμοί μπορεί να είναι διαφορετικοί, από χώρα σε χώρα, αλλά πιθανότατα και από ήπειρο σε ήπειρο, εξαιτίας του διαφορετικού τρόπου που αντιλαμβάνονται τη θερμική δυσφορία λόγω καύσωνα, οι κάτοικοι διαφορετικών περιοχών της Γης.

1.3 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΓΕΝΕΣΗΣ ΕΝΟΣ ΚΑΥΣΩΝΑ

1.3.1 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΠΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΟΥ ΣΥΜΒΑΛΟΥΝ ΣΤΗ ΓΕΝΕΣΗ ΕΝΟΣ ΚΑΥΣΩΝΑ

Ο καύσωνας συνήθως εμφανίζεται σε περιόδους διακοπής των Ετησίων ανέμων, αν και υπάρχουν περιπτώσεις υψηλών μέγιστων θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια βορείων ανέμων, που εξαιτίας ειδικών συνοπτικών αιτίων αποκτούν ισχυρή ανατολική συνιστώσα και επομένως περνώντας κατά μήκος της Μικράς Ασίας θερμαίνονται αδιαβατικά ή εξαιτίας της επίδρασης του θερμού εδάφους (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015). Εάν εξαιρέσουμε τις μεμονωμένες ημέρες, που χαρακτηρίζονται από υψηλές θερμοκρασίες, τότε, ο καύσωνας, στη Ελλάδα, συνδέεται με έντονες θερμές μεταφορές μεγάλης κλίμακας, ερχόμενες, συνήθως, από τη Βόρεια Αφρική. Διαρκεί περισσότερο από μία ημέρα και καλύπτει, σχεδόν, ολόκληρη τη χώρα.

Σύμφωνα με την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015), οι μετεωρολογικοί παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για τη γένεση ενός καύσωνα είναι οι εξής:

- ✓ Η πολύ ισχυρή θερμή μεταφορά σ' όλη την ελεύθερη τροπόσφαιρα. Οι αέριες μάζες είναι τροπικές-ηπειρωτικές με προέλευση τη Βόρεια Αφρική, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις θερμές αέριες μάζες είναι δυνατόν να μεταφερθούν στην Ελλάδα από τις ηπειρωτικές περιοχές του τριγώνου Ανατολικής Τουρκίας-Ιράκ-Συρίας.

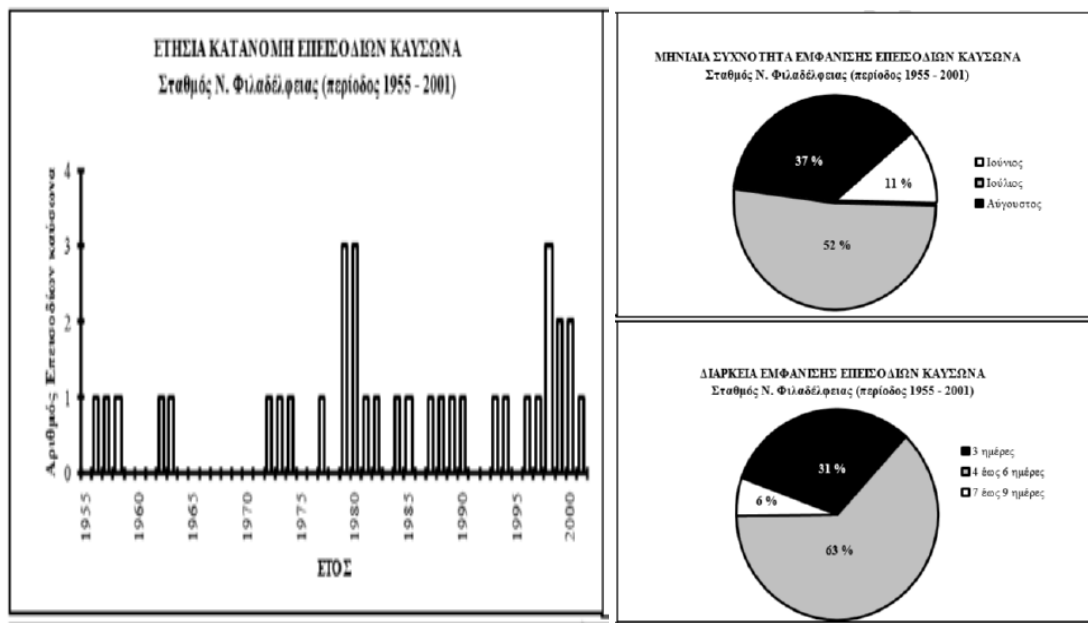
- ✓ Οι μεγάλης κλίμακας καθοδικές κινήσεις του αέρα σε μια εκτεταμένη περιοχή που περιλαμβάνει την Ελλάδα και που οφείλονται στην αρνητική μεταφορά στροβιλισμού εξαιτίας της έντονα αντικυκλωνικής κυκλοφορίας στα Βαλκάνια, Κεντρική Μεσόγειο και Νότια Ιταλία.
- ✓ Η έντονη μη αδιαβατική θέρμανση εξαιτίας της παρατεταμένης ηλιοφάνειας. Σε αρκετές περιπτώσεις καύσωνα η κατακόρυφη θερμοβαθμίδα στο στρώμα επιφανείας, (850hPa), είναι υπερξηροαδιαβατική και συχνά παρατηρούνται τιμές 12°C/1000m.

Το σημαντικότερο σύστημα στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία, που παρατηρείται στη στάθμη των 500hPa, για να ευνοηθεί η δημιουργία της κύματος καύσωνα, είναι ένα αποκομμένο βαρομετρικό χαμηλό στη ΒΔ-Ευρώπη, που κινείται αργά Α-ΒΑ. Στις πιο πολλές περιπτώσεις, αυτό το χαμηλό βαρομετρικό αποτελεί το δυτικό χαμηλό του αντικυκλώνα εμποδισμού, με τον άξονα των υψηλών πιέσεων, αρχικά κατά μήκος περίπου του 20^{ου} Ανατολικού Μεσημβρινού και με το ανατολικό χαμηλό στην περιοχή της Ρωσίας. Ο άξονας των υψηλών πιέσεων κατά τη διάρκεια του καύσωνα μετατοπίζεται αργά ανατολικά και στρέφεται κατά τη διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, καθώς ο αντικυκλώνας εμποδισμού διαλύεται στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015).

Η εμφάνιση ενός επεισοδίου καύσωνα συνδέεται άμεσα με τον υποτροπικό αεροχείμαρρο, ο οποίος δεν φθάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, αλλά είναι σημαντικός, διότι συνοδεύεται από έντονες καθοδικές κινήσεις, καλοκαιρία και κατά το θέρος κύματα καύσωνα στο νότιο τμήμα του (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015; Λαβή, 2016). Ο υποτροπικός αεροχείμαρρος είναι σημαντικός στη διαμόρφωση του κλίματος της Μεσογείου και οποιαδήποτε μετακίνησή του στα βόρεια της Μεσογείου έχει επιπτώσεις στην ξηρασία και τη βροχόπτωση. Στην Ελλάδα, το καλοκαίρι, ο υποτροπικός αεροχείμαρρος συνήθως βρίσκεται μεταξύ Πελοποννήσου και Κρήτης, όμως στις περιπτώσεις καύσωνα εντοπίζεται σχεδόν πάντοτε στα Βόρεια Βαλκάνια (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015).

Γενικά, υπάρχουν πολλοί φυσικοί μηχανισμοί που σχετίζονται με τον καύσωνα. Ένας κύριος φυσικός μηχανισμός για την εμφάνιση των κυμάτων καύσωνα είναι η

παρουσία αντικυκλωνικού συστήματος πάνω από μια περιοχή με έντονη επιφανειακή θέρμανση, ένα σύστημα που μπορεί να προσδιοριστεί ως ατμοσφαιρικός εμποδισμός (blocking) κάτω από επίμονες συνθήκες ανέμου νότιου τομέα (Cassou et al., 2005).



Εικόνα 1. Επεισόδια καύσωνα, που συνέβησαν στην Ελλάδα την περίοδο 1955-2001, από τη στατιστική επεξεργασία των παρατηρήσεων θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού της Ν. Φιλαδέλφειας (Ζιακόπουλος κ.ά., 2008; Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015).

Στην Εκόνα 1 παρουσιάζονται τα επεισόδια καύσωνα, που συνέβησαν στην Ελλάδα την περίοδο 1955-2001, όπως προέκυψαν από τη στατιστική επεξεργασία των παρατηρήσεων θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού της Ν. Φιλαδέλφειας (Ζιακόπουλος κ.ά., 2008; Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015). Από την επεξεργασία αυτή διαπιστώνεται ότι, τα επεισόδια καύσωνα, τις τελευταίες δεκαετίες, παρουσίασαν μια προοδευτική αύξηση και ήταν διάρκειας 3 ημερών, 4-6 ημερών και μεγαλύτερης των 6 ημερών, με συχνότητα εμφάνισης 31%, 63% και 6% αντίστοιχα, ενώ η μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης επεισοδίων καύσωνα παρατηρήθηκε τον Ιούλιο.

1.3.2 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΑΔΙΑ (ΕΝΑΡΞΗ ΚΑΙ ΛΗΞΗ) ΕΝΟΣ ΚΑΥΣΩΝΑ

Στην Ελλάδα το φαινόμενο του καύσωνα συνήθως αρχίζει να εξελίσσεται ομαλά, καθώς η άνοδος της θερμοκρασίας είναι βαθμιαία. Ειδικότερα, παρατηρείται καθυστέρηση στην άνοδο της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας του αέρα στην επιφάνεια του εδάφους, περίπου 24 ώρες, από την έναρξη της θέρμανσης της ισοβαρικής επιφανείας των 850hPa (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015).

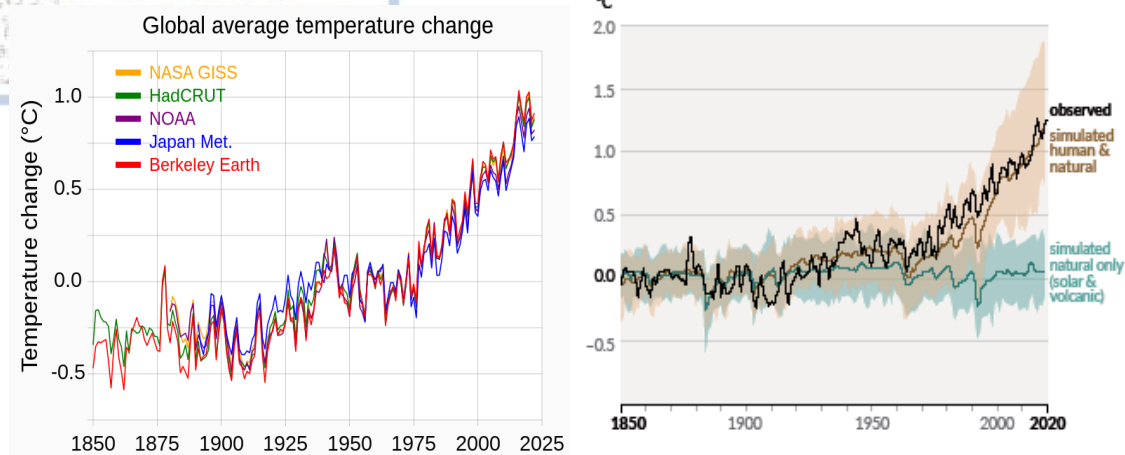
Ωστόσο, το φαινόμενο του καύσωνα στην Ελλάδα λήγει απότομα και όχι σταδιακά, όπως ξεκινάει να εμφανίζεται. Συγκεκριμένα, ο καύσωνας τελειώνει απότομα με την εισβολή ψυχρών αερίων μαζών, ερχόμενων από τα Βόρεια Βαλκάνια, οι οποίες πολλές φορές προκαλούν την εκδήλωση καταιγίδων, κυρίως, στη Βόρεια Ελλάδα.

Στην Αττική, για παράδειγμα, παρατηρούνται, συχνά, μικρά σφάλματα στην ακριβή πρόγνωση του χρόνου επικράτησης των B-BA ανέμων. Για μια πρόγνωση μικρής διάρκειας, οι ενδείξεις του χρόνου έναρξης των B-BA ανέμων στο νησί της Λήμνου είναι πολύ χρήσιμες. Μετά από ένα διάστημα 4-5 ωρών, συνήθως, παρατηρούνται BA άνεμοι και στην Αττική και συγκεκριμένα στη Ν.Φιλαδέλφια και στο Τατόι. Για τη λήξη του καύσωνα, το αναμενόμενο ρεύμα είναι ΒΔ και στην Αττική εξελίσσεται αργά, και όχι απότομα, και συνήθως, την ημέρα της λήξης του, παρατηρούνται οι υψηλότερες θερμοκρασίες της περιόδου (Ζιακόπουλος και Φραγκούλη, 2015).

1.4 ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΩΝΑ ΚΑΙ ΘΝΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ

Στην Ευρώπη, στην Ασία και στις ΗΠΑ περιοχές με μεσαίο γεωγραφικό πλάτος, όπως η Μεσόγειος, είναι πιθανό να αντιμετωπίσουν στο άμεσο μέλλον μια μη αναστρέψιμη άνοδο της θερμοκρασίας από την υπερθέρμανση του πλανήτη εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής. Ο Διεθνής Μετεωρολογικός Οργανισμός (WMO) και η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος του ΟΗΕ, θεωρεί πως η μέση θερμοκρασία του πλανήτη έχει αυξηθεί $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα (κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 ετών) εξαιτίας κυρίως της ανθρώπινης δραστηριότητας και ενδέχεται να

αυξηθεί κατά $1.4-5.8^{\circ}\text{C}$ κατά τη χρονική περίοδο 1990-2100 (WMO, 2022). Η παγκόσμια μέση θερμοκρασία το 2021 ήταν $1.11 \pm 0.13^{\circ}\text{C}$ πάνω από τη μέση θερμοκρασία της προβιομηχανικής περιόδου 1850–1900 (Εικόνα 2), ενώ τα τελευταία επτά έτη 2015-2021 ήταν από τα επτά θερμότερα αυτής της περιόδου (WMO, 2022). Η προβιομηχανική περίοδος 1850–1900 χρησιμοποιείται σαν τιμή αναφοράς από τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC). Η τελευταία έκθεση (Sixth Assessment Report) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC) αναφέρει ότι η μέση παγκόσμια θερμοκρασία της Γης, την περίοδο 1995-2014 ήταν αυξημένη κατά 0.85°C , σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που αφορά τα επίπεδα της προβιομηχανικής περιόδου 1850–1900, ενώ η αντίστοιχη τιμή για την περίοδο 2001–2020 ήταν 0.99°C [$0.84-1.10$] $^{\circ}\text{C}$ και 1.09°C [$0.95-1.20$] $^{\circ}\text{C}$ για την πιο πρόσφατη δεκαετία (2011–2020) (IPCC, 2021: Climate Change 2021). Η μέση τιμή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν από τις παραπάνω εκτιμήσεις του WMO (2022) ήταν $1.01 \pm 0.12^{\circ}\text{C}$ πάνω από τα επίπεδα της προβιομηχανικής περιόδου 1850–1900. Επίσης, διαπιστώνεται ότι, κατά τη διάρκεια των τεσσάρων τελευταίων δεκαετιών, υπάρχει μια προοδευτική άνοδος της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο. Ακόμη, τα επίπεδα θερμοκρασίας στην ξηρά έχουν ανέλθει γρηγορότερα σε σχέση με εκείνα της θάλασσας, κατά 1.59°C και 0.88°C , αντίστοιχα. Η μέση θερμοκρασία της Γης αναμένεται, στο ευμενέστερο σενάριο, να κυμαίνεται σε επίπεδα μεταξύ 1.1 ως 2.6°C υψηλότερα κατά τα έτη 2081–2100, ενώ στο δυσμενέστερο σενάριο το εύρος αυτό μπορεί να είναι $2.6-4.8^{\circ}\text{C}$. Η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας εξαιτίας των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, την περίοδο 2010-2019, σε σχέση με την περίοδο 1850-1900 πιθανότατα κυμαίνεται από 0.8°C ως 1.3°C , με μέση εκτίμηση τους 1.07°C (IPCC, 2021: Climate Change 2021).



Εικόνα 2. (α) Διάγραμμα εξέλιξης της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας όπως παρατηρήθηκε από NASA (Goddard Institute for Space Studies, USA), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA), Berkeley Earth (USA) και τις εθνικές Μετεωρολογικές Υπηρεσίες της Μεγ. Βρετανίας και της Ιαπωνίας που δείχνουν σημαντική ομοιότητα αποτελεσμάτων (WMO, 2022). **(β)** Διάγραμμα εξέλιξης της παγκόσμιας θερμοκρασίας όπως παρατηρήθηκε τα τελευταία 170 έτη (μαύρη γραμμή) σε σχέση με το χρονικό διάστημα 1850-2020 και όπως εκτιμήθηκε από μοντέλα, εξαιτίας της δράσης ανθρωπογενών και φυσικών δραστηριοτήτων (καφέ γραμμή) και εξαιτίας της δράσης μόνο φυσικών δραστηριοτήτων (πράσινη γραμμή) (IPCC, 2021).
Πηγή: WMO, 2022, https://en.wikipedia.org/wiki/Global_surface_temperature, (IPCC, 2021).

Αυτή η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας, σε παγκόσμια κλίμακα και η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, δυστυχώς επαληθεύουν τις προβλέψεις για μη αναστρέψιμη αλλαγή του κλίματος με δραματικές συνέπειες στην ισορροπία των οικοσυστημάτων, περιορισμό της παγοκάλυψης, ξηρασία, αύξηση του αριθμού των πολύ θερμών ημερών και του αριθμού των πολύ ψυχρών ημερών, ερημοποίηση ορισμένων περιοχών, αλλαγές στη χρήση της γης, άνοδος της στάθμης των υδάτων, κλπ.

Επομένως, οι φυσικές καταστροφές πρόκειται να είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που θα αντιμετωπίζει η σύγχρονη κοινωνία μας. Σύμφωνα με το United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) από άποψη φονικότητας, τα κύματα καύσωνα τοποθετούνται στην τρίτη θέση στην κατάταξη των φυσικών καταστροφών, μετά τους σεισμούς και τις καταιγίδες με μέσο όρο 14.731 θανάτους ανά έτος, στη δεκαετία 2000-2011. Αν και δεν έχουν γίνει εκτεταμένες καταγραφές και δεν είναι εύκολο να εξακριβωθούν τα αίτια θανάτου κατά τη διάρκεια ενός κύματος καύσωνα, τα τελευταία χρονιά δείχνουν απότομη αύξηση κρουσμάτων κατά τις περιόδους αυξημένης θερμοκρασίας (<http://www.unisdr.org/>). Ο μεγαλύτερος κίνδυνος

παρατηρείται στις μεγαλύτερες πόλεις, όπου σχηματίζονται και οι Αστικές Θερμικές Νησίδες (ΑΘΝ), (Doick and Hutchings, 2013). Συνολικά από το 1980 μέχρι το 2008 έχουν καταγραφεί 126 κύματα καύσωνα, τα οποία προκάλεσαν ζημιές σχεδόν 22 τρισεκατομμυρίων δολαρίων και επλήγησαν πάνω από 4.500.000 άνθρωποι, (<http://www.unisdr.org/>).

Οι ισχυροί καύσωνες μπορεί να προκαλέσουν το θάνατο πολλών ανθρώπων σε μικρό χρονικό διάστημα. Ένα μεγάλο μέρος της ερευνητικής δραστηριότητας περιλαμβάνει μελέτες για τις συνθήκες δυσφορίας κατά τη διάρκεια ισχυρών επεισοδίων καύσωνα και τη σχέση των βιοκλιματικών δεικτών δυσφορίας με την αύξηση της θνησιμότητας. Αν και ο ορισμός του φαινομένου του καύσωνα διαφέρει από περιοχή σε περιοχή και τα θερμοκρασιακά όρια αλλάζουν, ανάλογα με το κλίμα της περιοχής, ένας καύσωνας μπορεί να πλήξει ένα σημαντικό τμήμα του πλανήτη και δεν παύει να προκαλεί ζημιές και να αφαιρεί ανθρώπινες ζωές. Γενικά, η υπερθέρμανση του πλανήτη και η αύξηση της συχνότητας των επεισοδίων καύσωνα μπορεί να συμβάλλουν σε σημαντικά μεγαλύτερη θερινή και μικρότερη χειμερινή θνησιμότητα, ειδικά στην περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου. Επίσης από τα κλιματικά μοντέλα προβλέπεται αύξηση της συχνότητας εμφάνισης των ακραίων επεισοδίων καύσωνα, λόγω της κλιματικής αλλαγής, με αντίστοιχη αύξηση της θερινής θνησιμότητας (Ζουμάκης, 2016).

Ένα σημαντικό επεισόδιο καύσωνα στην Ιταλία καταγράφηκε κατά τη διάρκεια 16 ημερών (19 Ιουλίου–3 Αυγούστου) το 1983. Οι θερμοκρασίες που καταγράφηκαν σε διάφορα μέρη της Ιταλίας παρέμειναν σταθερά πάνω από το μέσο όρο της περιόδου 1946-1970. Οι μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες που καταγράφηκαν στο κέντρο της Ρώμης ήταν 34°C (ή υψηλότερη για 13 συνεχόμενες ημέρες) και 36°C (ή υψηλότερη για 5 συνεχόμενες ημέρες). Κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου κύματος καύσωνα, θεωρείται ότι υπήρξε μια αύξηση της θνησιμότητας σε σχέση με το προηγούμενο έτος της τάξης του 30% (Centers for Disease Control and Prevention (CDC), <http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/00000405.htm>).

Ένα ακόμη σημαντικό επεισόδιο καύσωνα ήταν αυτό που έπληξε το Σικάγο στα μέσα του Ιουλίου του 1995. Ο καύσωνας αυτός έπληξε όλες τις μεσοδυτικές και βορειοανατολικές πολιτείες των ΗΠΑ, καθώς καταγράφηκαν πιθανότατα πάνω από 1000

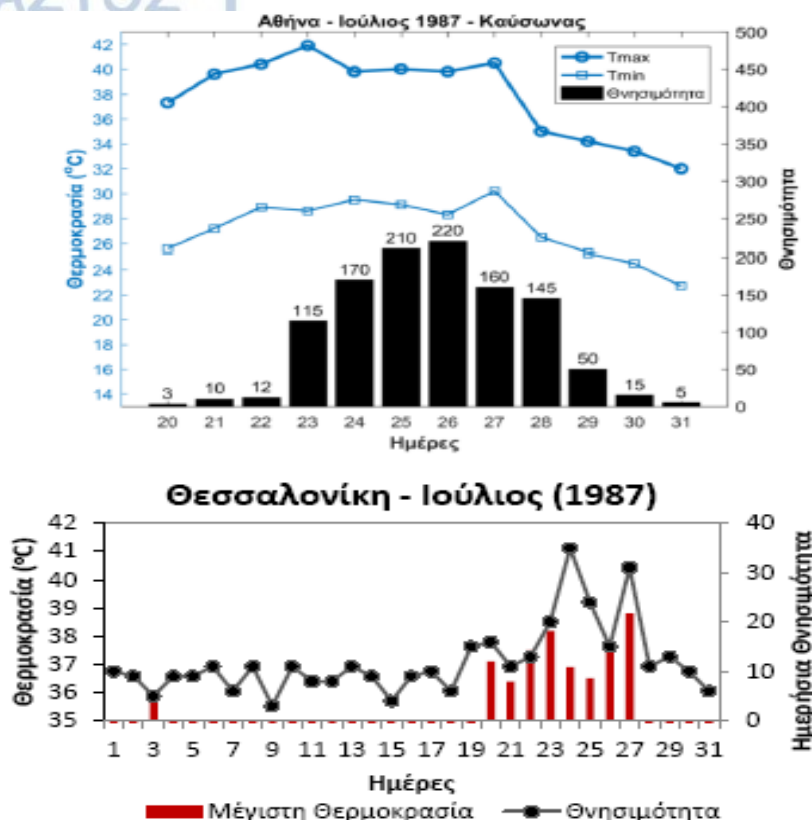
θύματα, με τα μισά από αυτά να παρουσιάζονται στην πόλη του Σικάγο. Σύμφωνα με αναφορές στα δυο αεροδρόμια, της πόλης του Σικάγο, οι θερμοκρασίες που σημειώθηκαν ήταν οι υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες στα τελευταία 123 χρόνια που υπήρχαν επίσημες καταγραφές. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του καύσωνα αυτού ήταν η πολύ υψηλή υγρασία του αέρα που έφτανε πάνω από το 90% τις απογευματινές ώρες. Από τους 580 θανάτους που καταγράφηκαν την περίοδο του καύσωνα οι 465 αποδόθηκαν σε αίτια υπερβολικών θερμοκρασιών σύμφωνα με τα κριτήρια του Κέντρου Ελέγχου και Πρόληψης Νοσημάτων των ΗΠΑ (Centers for Disease Control and Prevention-CDC; Γκοντσεαρούκ, 2013). Η κατανάλωση της ενέργειας την περίοδο αυτού του καύσωνα ξεπέρασε την κανονική ζήτηση της καλοκαιρινής περιόδου κατά 5,5%, με αποτέλεσμα οι καταναλωτές στις ΗΠΑ να πληρώσουν, για την αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος, 1,3 δισ. Δολάρια.

Επίσης, χαρακτηριστικό παράδειγμα καύσωνα ήταν το καλοκαίρι του 2003, μια εξαιρετικά θερμή περίοδο, καθώς καταγράφηκαν πιθανότατα πάνω από 70.000 θύματα στην Ευρώπη, τα οποία αποδίδονται στο κύμα καύσωνα αυτής της περιόδου (Robine et al., 2008; Pirard, 2003). Βέβαια, ο αριθμός των νεκρών είναι αρκετά δύσκολο να υπολογιστεί με ακρίβεια. Η θερμή εισβολή οφείλεται στον αντικυκλώνα του ατλαντικού που εξαπλώθηκε και εγκαταστάθηκε πάνω από τη δυτική ηπειρωτική Ευρώπη. Αρχικά, τα πρώτα κύματα καύσωνα σημειώθηκαν στη Νότιο Ιταλία, τον Ιούνιο και τον Ιούλιο, ενώ στη συνέχεια στη Δυτική Ευρώπη, (συμπεριλαμβανομένης και της Νότιας Ιταλίας) οι υψηλότερες θερμοκρασίες σημειώθηκαν μεταξύ της 1^{ης} και 20^{ης} ημέρας του Αυγούστου. Η Πορτογαλία, το κέντρο της Γαλλίας και ορισμένες περιοχές της Ισπανίας και της Βόρειας Ιταλίας, ήταν οι περιοχές που πληγήκαν από μια μακρά περίοδο διαδοχικών ημερών υψηλής θερμοκρασίας. Στο Βέλγιο, στην Αγγλία και στην Ολλανδία, αυτός ο καύσωνας παρατηρήθηκε γενικότερα με μικρότερη διάρκεια και ηπιότερη ένταση. Οι θερμοκρασίες που καταγράφηκαν ήταν οι υψηλότερες στην Ευρώπη από το 1500. Έτσι, εξαιτίας αυτού του καύσωνα (2003) υπήρξε αύξηση της θνησιμότητας και ειδικότερα, στη Γαλλία, καταγράφηκαν 14.800 θάνατοι μεταξύ 1-20 Αυγούστου, δηλαδή 55% αύξηση θανάτων, σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια. Στην Ιταλία ο αριθμός των θανάτων έφτασε τις 4.175, μεταξύ 15 Ιουλίου και 15 Αυγούστου, στην Πορτογαλία τους 1.316 θανάτους, μεταξύ 31 Ιουλίου και 12 Αυγούστου, στην Αγγλία τους 2.045 θανάτους

και στην Ολλανδία τους 1.400 θανάτους από τον Ιούνιο έως τον Αύγουστο του 2003 (Pirard, 2003). Οι οικονομικές ζημιές, για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης που επλήγησαν από τον καύσωνα, έφτασαν περίπου τα 100 δισ. Δολάρια, με σημαντικές ζημιές κυρίως στον αγροτικό τομέα, που έφθασαν το ύψος των 13 δισ Δολαρίων.

Στη Ρωσία το καλοκαίρι του 2010 υπήρξε ένα κύμα καύσωνα, που οδήγησε στη μεγαλύτερη ξηρασία των τελευταίων 40 ετών (μέχρι τότε), εξαιτίας της οποίας ξέσπασαν εκτεταμένες δασικές πυρκαγιές και η παραγωγή των καλλιεργειών μειώθηκε κατά 25% (καταστράφηκαν τουλάχιστον 90 εκατ. στρέμματα καλλιεργειών). Στην ευρωπαϊκή Ρωσία, η υψηλότερη θερμοκρασία έφθασε τους 44,0°C, στις 11 Ιουλίου στην περιοχή Yashkul, ενώ στην ασιατική Ρωσία, στην περιοχή Belogorsk, η θερμοκρασία έφτασε τους 42,3°C (Katsafados et al., 2014). Ο καύσωνας αυτός θεωρείται ότι προκάλεσε περισσότερους από 55,000 νεκρούς και η οικονομία της Ρωσίας ζημιώθηκε συνολικά περισσότερο από 15 δις. δολάρια (Λαβή, 2016).

Σύμφωνα με διάφορες μελέτες υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των υψηλών θερμοκρασιών και της αύξησης της συχνότητας των θανάτων. Έτσι, ένα από τα χειρότερα ακραία επεισόδια καύσωνα, που συνέβησαν στην Ελλάδα, ήταν τον Ιούλιο του 1987 (Preserakos, 1989), όταν σύμφωνα με το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, για 7 συνεχόμενες ημέρες στην Αθήνα, οι μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες ξεπέρασαν τους 40°C (οι μέγιστες ημερήσιες θερμοκρασίες στο κέντρο της Αθήνας κυμαινόταν μεταξύ 41°C και 47°C) με αποτέλεσμα να καταγραφούν στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας, περισσότεροι από 2000 επιπλέον θάνατοι (Εικόνα 3, Ζουμάκης, 2016), εξαιτίας της ισχυρότατης θερμικής καταπόνησης, με αντίστοιχη καταγραφή αυξημένης θνησιμότητας και στη Θεσσαλονίκη.



Εικόνα 3. Επεισόδιο καύσωνα, που συνέβη στην Ελλάδα τον Ιούλιο του 1987 (Ζουμάκης, 2016). **(α)** Η ημερήσια διακύμανση των θερμοκρασιών (Tmin, Tmax) και οι καταγραφές θανάτων στην ευρύτερη περιοχή των Αθηνών, κατά την περίοδο του ισχυρού καύσωνα του Ιουλίου του 1987. (Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός Σταθμός του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών-Υπουργείο Υγείας και Πρόνοιας:Τεχνικές Εκθέσεις 1987/1988). **(β)** Οι μέγιστες θερμοκρασίες και η θνησιμότητα στο Δήμο Θεσσαλονίκης κατά την περίοδο του ισχυρού καύσωνα του Ιουλίου του 1987. (Πηγές δεδομένων: Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης-Ληξιαρχείο Δήμου Θεσσαλονίκης).

1.5 Η ΑΣΤΙΚΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΝΗΣΙΔΑ – ΚΑΙ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΟΛΙΚΗΣ ΧΑΡΑΔΡΑΣ

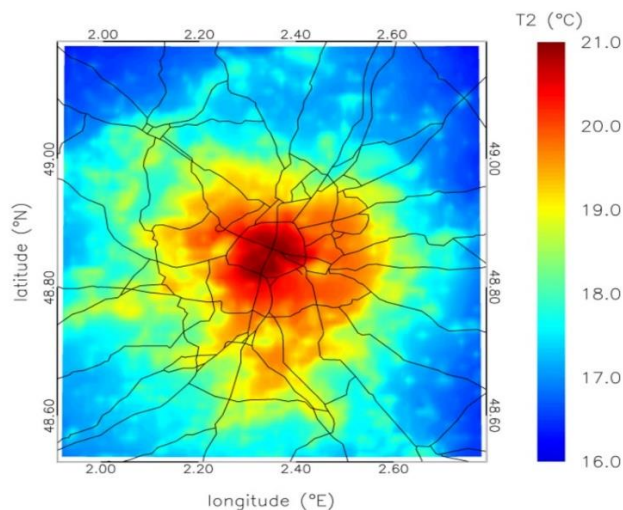
Τις τελευταίες δεκαετίες η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και της μεγάλης αστικοποίησης, προκαλεί σημαντικές μεταβολές στα χαρακτηριστικά της ατμοσφαιράς. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που επηρεάζει το επίπεδο διαβίωσης των ανθρώπων είναι το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας (ΑΘΝ). Το φαινόμενο αυτό έχει σαν κυριότερο αντικείμενο τη διερεύνηση της αύξησης της θερμοκρασίας των αστικών περιοχών σε σχέση με την αντίστοιχη θερμοκρασία που επικρατεί στις γύρω

από αυτήν περιαστικές και αγροτικές περιοχές. Επίσης, εκτός από το πρόβλημα του φαινομένου της ΑΘΝ, που προκαλεί την παγίδευση της θερμότητας μέσα σε μια πόλη, παρατηρείται και το φαινόμενο της παγίδευσης των ατμοσφαιρικών ρύπων, που εκπέμπονται μέσα στις οδικές χαράδρες (street canyon effect), κυρίως από την κυκλοφορία οχημάτων, δηλαδή την περιοχή ενός αστικού δρόμου, ο οποίος περιβάλλεται από κτίρια στα πυκνοδομημένα πολεοδομικά συγκροτήματα αστικών περιοχών.

1.5.1 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΝΗΣΙΔΑΣ (ΑΘΝ) ΚΑΙ ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΟΥ

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες γύρω από το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας, ΑΘΝ, (Urban Heat Island-UHI). Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με την υπερθέρμανση αστικών, κεντρικών ή προαστιακών περιοχών, σε σχέση με την περιβάλλουσα περιοχή. Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες δημιουργούνται μέσω της αστικής δραστηριότητας και έχουν άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής των κατοίκων. Συγκεκριμένα, ως Αστική Θερμική Νησίδα ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο, η θερμοκρασία του αέρα στις αστικές περιοχές είναι, κατά μέσο όρο, υψηλότερη μερικούς βαθμούς από την αντίστοιχη θερμοκρασία σε μη αστικές περιοχές (περιαστικές περιοχές), (Καρτάλης, 1999; Giannaros & Melas, 2012). Η έννοια «νησί» (Εικόνα 4) έχει επικρατήσει λόγω της ομοιότητας του ισοθερμικού διαγράμματος μιας αστικής περιοχής με τον τοπογραφικό χάρτη ενός νησιού (Oke, 1981; 1982). Αυτή η διαφορά των θερμοκρασιών κυμαίνεται, συνήθως, από 1-2°C κατά τη διάρκεια της ημέρας και μπορεί να φτάσει τους 6-8°C κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν επικρατεί άπνοια ή πνέουν ασθενείς άνεμοι, (Καρτάλης, 1999). Έτσι, η διαφορά αυτή των θερμοκρασιών εκδηλώνεται κυρίως τις νυχτερινές ώρες (Giannaros & Melas, 2012; Parliari et al., 2019; Σάρας, 2020), ενώ γενικά το χειμώνα η ΑΘΝ έχει μικρότερη ένταση από ότι ους θερινούς μήνες, όταν η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στη Γη είναι κατά πολύ μεγαλύτερη Oke (1982). Επιπλέον, το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως στα χαρακτηριστικά των υλικών, στη στεγανοποιημένη κάλυψη εδάφους, στη χρήση της γης, στην ελάχιστη βλάστηση, στην εντατική

οικοδόμηση και στη μορφή της πόλης. Κυρίως, όμως, οφείλεται στην αυξημένη εκπομπή θερμών αέριων ρύπων (βιομηχανιών, κυκλοφορίας οχημάτων, θέρμανσης κτιρίων κ.ά.), που παρουσιάζεται στα κέντρα των πόλεων και επιδεινώνουν της θερμικές συνθήκες εξαιτίας της στενότητας των δρόμων, του ύψους των κτιρίων και της υψηλής κυκλοφοριακής κίνησης.

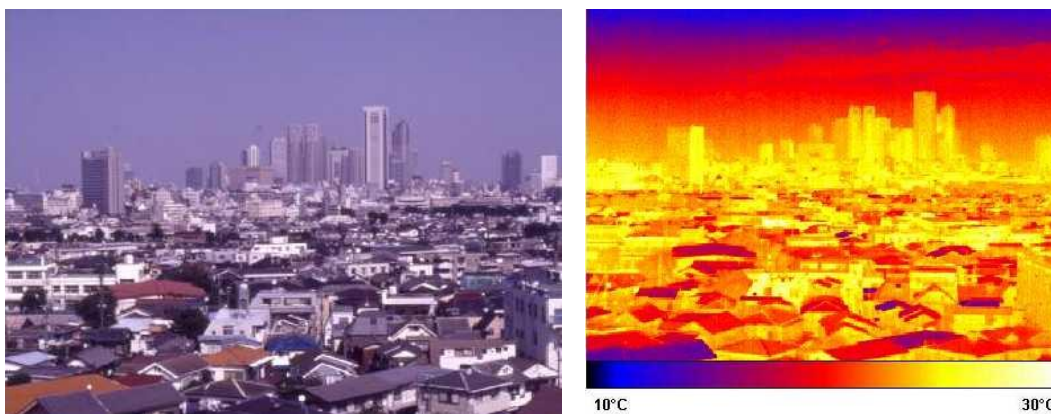


Εικόνα 4. Υπερθέρμανση στο κέντρο της πόλης του Παρισιού, που απεικονίζεται με τη μορφή ενός «νησιού» (Αστική Θερμική Νησίδα)

Πηγή: Mean air temperature in Paris, France at 22:00 CEST in summer 2003. Πηγή: VITO, Planetek, http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Satellites_predict

Ειδικότερα, η ΑΘΝ σχηματίζεται όταν, η καθημερινή ηλιακή ενέργεια απορροφάται από τις ανθρώπινες κατασκευές, που έχουν την ικανότητα να απορροφούν υψηλά ποσά ακτινοβολίας και να τη διατηρούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα (Εικόνα 5). Επομένως, ανάλογα με το υλικό, ασφαλτος, τσιμέντο, πλακάκια, δέντρα, σίδερα, αλλάζει και το κατά πόσο θα αυξηθεί, αλλά και για πόσο χρονικό διάστημα θα διατηρηθεί η υψηλότερη των κανονικών θερμοκρασία. Η διαφορά μπορεί να κυμαίνεται από 1-20°C υπό σκιά, (Aguíar, 2012). Επίσης, η έλλειψη βλάστησης, που προαναφέρθηκε, είναι το κυρίαρχο αίτιο που επιδεινώνει το φαινόμενο της Αστικής Θερμικής Νησίδας, επειδή μειώνει τη φυσική σκίαση της πόλης, την απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα φύλλα των δέντρων και των φυτών, καθώς επίσης και την υγρασία, που μπορεί να μετριάσει το φαινόμενο. Τέλος, τα χαρακτηριστικά των υλικών δόμησης αλλά και η αστική εξάπλωση και κάλυψη επιδρούν σε μικρότερο ή

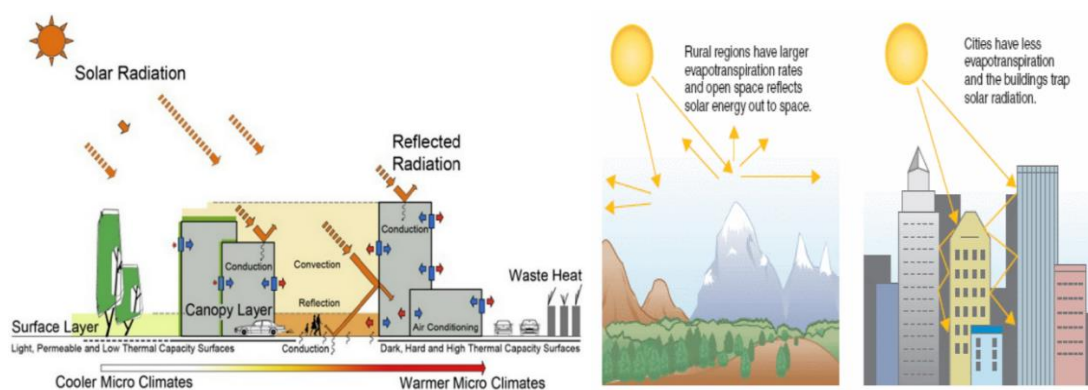
μεγαλύτερο βαθμό και συγκεκριμένα, τα υλικά δόμησης επιδρούν με τα χαρακτηριστικά της ανακλαστικότητας, (η ικανότητα που έχουν τα υλικά να ανακλούν, την ηλιακή ενέργεια που δέχονται, πίσω στο περιβάλλον), της θερμικής εκπομπής (η ικανότητα που έχουν τα υλικά να εκπέμπουν τη θερμότητα, που αποθηκεύουν κατά τη διάρκεια της ημέρας, πίσω στο περιβάλλον) και της θερμικής χωρητικότητας, (η ικανότητα που έχουν τα υλικά να αποθηκεύουν θερμότητα).



Εικόνα 5. (α) Εικόνα από την πόλη του Τόκιο. **(β)** Θερμική εικόνα της ΑΘΝ στο Τόκιο.
Πηγή: Urban Climatology and Urban Thermal Climates, Photo: courtesy M. Roth, National University of Singapore,
<http://publish.uwo.ca/~javoogt/urban%20climate%20.htm>

Τα αίτια δημιουργίας της Αστικής Θερμικής Νησίδας είναι πολλά. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι η μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και θερμοχωρητικότητα των υλικών των κτιρίων και άλλων κατασκευών του αστικού περιβάλλοντος, η αυξημένη απορρόφηση και ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, η εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος από τις κάθετες πλευρές των ψηλών κτιρίων, η μείωση της ταχύτητας των ανέμων κατά 25% περίπου μέσα στα οικοδομικά συγκροτήματα (η γεωμετρία του αστικού χώρου, δηλαδή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που εκφράζουν τη σχέση δομημένου όγκου – ελεύθερου χώρου, αποτελεί βασικό παράγοντα διαφοροποίησης του αστικού κλίματος από το κλίμα του φυσικού χώρου), η έλλειψη πρασίνου και, συνεπώς, της εξατμισιοδιαπνοής, οι ανθρωπογενείς εκλύσεις θερμότητας κλπ., (Καρτάλης, 1999). Ακόμη, η βλάστηση και τα κτίρια είναι εμπόδια που καθορίζουν το επίπεδο θέασης του ουρανού (Συντελεστής Θέασης του Ουρανού-Sky view Factor), που είναι μια παράμετρος χαρακτηρισμού της θερμικής ισορροπίας,

της γεωμετρίας και της πυκνότητας των πόλεων, καθώς επίσης και της ΑΘΝ (Τσόγκας 2021). Ωστόσο, το φαινόμενο της ΑΘΝ μπορεί να αποδοθεί σ' ένα μεγάλο μέρος του, στη χαμηλή λευκαύγεια (albedo) της πόλης (το μέτρο ανακλαστικότητας μιας επιφάνειας ή ενός σώματος ορίζεται το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας προς την προσπίπτουσα σε μία επιφάνεια), τη μεγάλη αντανάκλαση της επιφάνειας και την αυξημένη επιφάνεια των κτιρίων, που απορροφούν την ηλιακή ενέργεια (Εικόνα 6). Το σκυρόδεμα, το τσιμέντο και οι μεταλλικές επιφάνειες τείνουν να απορροφούν την ηλιακή και γήινη ακτινοβολία (θερμοχωρητικότητα των δομικών υλικών) και την επανεκπέμπουν ως θερμική ακτινοβολία (Σάρας, 2020). Ακόμη, ο προσανατολισμός των οδών και των δομικών στοιχείων μιας αστικής περιοχής είναι σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την ταχύτητα του ανέμου και την ποσότητα και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει, κάτι που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και τη θερμική άνεση. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με μελέτες παρατηρείται συσχέτιση της πυκνότητας του πληθυσμού με την ένταση του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας κυρίως, όμως, στα εύκρατα κλίματα, (Brazel, 2000).



Εικόνα 6. Τρόποι δημιουργίας του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας

Πηγή: (α) (Soltani and Sharifi, 2017), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263517300432#f0010>
(β) Γκιόκας Κ., 2019: Το φαινόμενο της ΑΘΝ στη δυτική μητροπολιτική Αθήνα, Ερευνητική Εργασία, σελ. 7
http://oldwww.arch.ntua.gr/sites/default/files/project/14369/_gkiokas_konstantinos.pdf

Επίσης, οι μετεωρολογικοί-κλιματικοί παράμετροι, όπως η ταχύτητα και η κυκλοφορία (πεδίο ροής) του ανέμου, η νεφοκάλυψη, η θερμοκρασία και υγρασία του αέρα, παίζουν σημαντικό ρόλο στη δημιουργία της Αστικής Θερμικής Νησίδας (Giannaros & Melas, 2012; Σάρας, 2020). Τέλος, οι ανθρώπινες δραστηριότητες, ο

πληθυσμός και η τοπογραφία-γεωγραφική θέση μιας πόλης, όπως προαναφέρθηκε, είναι ένα από τα, κύρια αίτια του σχηματισμού της ΑΘΝ, διότι παράγουν υψηλά ποσά ενέργειας και θερμότητας, που αποθηκεύονται μέσα στα όρια της πόλης. Έτσι, όλες οι βιομηχανικές μονάδες, αλλά και η κίνηση των οχημάτων μέσα σε μια αστική περιοχή, παράγουν θερμότητα και ακτινοβολία, που απορροφάται από τον αστικό ιστό κατά τη διάρκεια της ημέρας και επανεκπέμπεται πίσω στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια της νύχτας και έτσι, αυξάνεται το φαινόμενο της ΑΘΝ. Το φαινόμενο της ΑΘΝ παίζει σημαντικό ρόλο και τη θερινή περίοδο, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια ενός καύσωνα, όταν τα πολεοδομικά συγκροτήματα συσσωρεύουν πολύ μεγάλες ποσότητες θερμότητας και μετατρέπονται σε μια μορφή θερμοκήπιου, στα οποία αναπτύσσονται εξαιρετικά μεγάλες θερμοκρασίες και σημειώνονται ακραίοι ρυθμοί θνησιμότητας (Preserakos, 1989).

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι οι επιπτώσεις του φαινομένου της ΑΘΝ είναι πηγή σημαντικού αριθμού προβλημάτων. Οι επιπτώσεις αυτές μπορεί να είναι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές, με τις κυριότερες απ' αυτές να είναι η υποβάθμιση της ποιότητας του περιβάλλοντος, η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, η θερμική δυσφορία και γενικότερα η επιδείνωση της ανθρώπινης υγείας, ιδιαίτερα ευαίσθητων πληθυσμιακών ομάδων. Η επιβάρυνση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και κυρίως η εμφάνιση αιθαλομίχλης, εξαιτίας του φαινομένου της ΑΘΝ, είναι μια από τις πιο συχνές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα σε αστικές περιοχές (Rosenfeld et al., 1998), που χαρακτηρίζονται από ένα πυκνοδομημένο περιβάλλον, με έλλειψη πρασίνου και αλόγιστη χρήση πόρων και ενέργειας (Τσόγκας, 2021). Η επιβάρυνση αυτή, είναι πολύ πιθανόν να ενταθεί, εάν υπάρξουν υψηλότερες θερμοκρασίες του αέρα, κάτι που μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θνησιμότητας, (Matzarakis et al., 2009). Η ΑΘΝ έχει σχετικά μικρή επίδραση στις εκτιμήσεις των παγκόσμιων τάσεων των θερμοκρασιών του επιφανειακού αέρα. Παρόλα αυτά, ο τρόπος με τον οποίο έχουν κατασκευαστεί οι πόλεις και η έντονη αστικοποίηση, έχουν σαν συνέπεια την εκπομπή από τις ανθρώπινες διεργασίες μεγάλων ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου, που εξαιτίας της ΑΘΝ, οδήγησε σε μια συνολική επιδείνωση των αρνητικών επιπτώσεων του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής (Rizwan et al., 2008). Επομένως, η γεωμετρία του αστικού χώρου, τα δομικά υλικά

και οι ανθρώπινες δραστηριότητες στις πόλεις προκαλούν την αύξηση των θερμοκρασιών, σε σχέση με τις θερμοκρασίες των περιαστικών περιοχών και κατ' επέκταση οδηγούν στην ενίσχυση της ΑΘΝ και στην αλλοίωση των κλιματικών τους χαρακτηριστικών. Έτσι, το φαινόμενο της ΑΘΝ έχει σημαντικές μετεωρολογικές επιπτώσεις στο αστικό περιβάλλον. Οι κυριότερες από αυτές έχουν σχέση με τη συχνότητα πτώσης κεραυνών, το σχηματισμό ομίχλης και συννεφιάς, την εμφάνιση καταιγίδων, την εμφάνιση θαλάσσιας αύρας, ακόμη και την αλλαγή του ρυθμού βροχόπτωσης στις πόλεις (Τσόγκας, 2021). Παράλληλα, η προαναφερθείσα έντονη αστική δραστηριότητα και οι ενεργειακές απαιτήσεις των πόλεων οξύνουν το πρόβλημα της υπερθέρμανσης και της μεγάλης περιβαλλοντικής ρύπανσής τους, με αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις, λόγω του φαινομένου της ΑΘΝ, να δημιουργείται η αντίληψη ενός «εικονικού καύσωνα». Η ένταση της ΑΘΝ εξαρτάται από την ένταση της αστικοποίησης, καθώς και από τα δομικά, χωροταξικά, γεωγραφικά χαρακτηριστικά της αστικής περιοχής, με αποτέλεσμα η ΑΘΝ να αυξάνει τον αντίκτυπο των κυμάτων καύσωνα και ταυτόχρονα, να συμβάλλει σε αύξηση φαινομένων, όπως το θερμοκρασιακό στρες και η θερμοπληξία. Επομένως, η συνηθέστερη κοινωνική συνέπεια, εξαιτίας της ΑΘΝ, από τις επιπτώσεις και τα προβλήματα που δημιουργούνται στην υγεία του γενικότερου πληθυσμού είναι η δυσφορία, δηλαδή η δυσκολία κατά την αναπνοή, που σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στο θάνατο. Επίσης, οι αυξημένες θερμοκρασίες, λόγω της ΑΘΝ, οδηγούν στην αύξηση της ανάγκης για μηχανική ψύξη, ειδικότερα τους θερινούς μήνες του έτους, ενώ παρατηρείται μείωση των ωρών που απαιτούνται για τη θέρμανση των κτιρίων. Παρόλα αυτά, οι επιπτώσεις από το σύνολο αυτών των αναγκών εκτιμάται ότι προκαλούν αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας από οικιακές και εμπορικές χρήσεις (Santamouris et al., 2001).

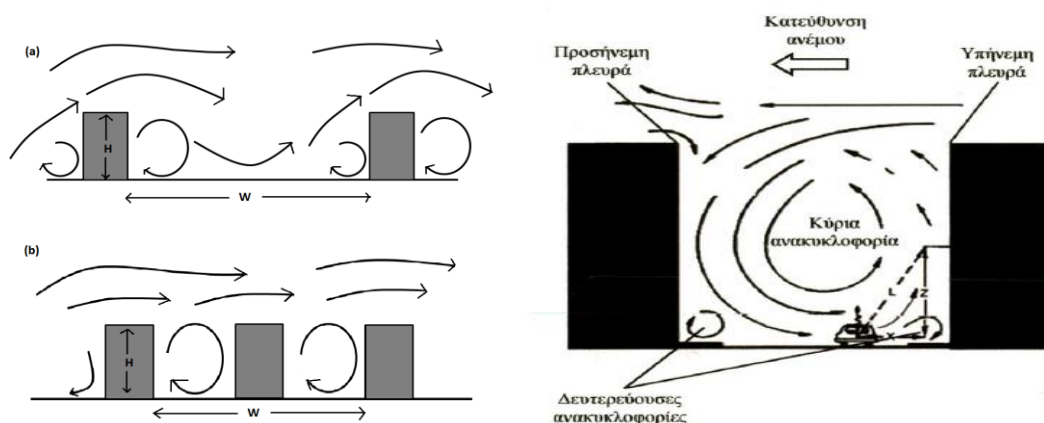
Για τους παραπάνω λόγους, οι συνέπειες της ΑΘΝ αποκτούν ιδιαίτερη σημασία στη ανάπτυξη στρατηγικών και επιχειρησιακών σχεδίων φορέων, της δημόσιας υγείας, της χάραξης πολιτικής, του πολεοδομικού σχεδιασμού, του τουρισμού, κλπ. Έτσι, για παράδειγμα, η στρατηγική της ΕΕ έχει ως κύριο στόχο να συμβάλει στο να γίνει η Ευρώπη πιο ανθεκτική στην προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή. Σε τοπικό επίπεδο η εφαρμογή μεθόδων παθητικής ψύξης των κτιρίων, όπως, για παράδειγμα των

πράσινων στεγών/δωμάτων, προσόψεων κτιρίων ή μπαλκονιών και γενικότερα της αύξησης της βλάστησης, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα σημαντικό βήμα στην επαναφορά χαμηλότερων θερμοκρασιών στο εσωτερικό των πόλεων και στην επαναφορά θερμικής ισορροπίας σε αστικές περιοχές. Σήμερα, η αντιμετώπιση του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας είναι αναπόσπαστο κομμάτι του αστικού σχεδιασμού και της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται δράσεις σε ευρωπαϊκό (χρηματοδοτούμενα προγράμματα, όπως το LIFE ASTI, <https://lifeasti.eu/>), εθνικό (ΥΠΕΝ-ΚΑΠΕ) και τοπικό επίπεδο (συστήματα παθητικής ψύξης κτιρίων), που αποσκοπούν στη βελτίωση του μικροκλίματος των περιοχών και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην άμβλυνση του φαινομένου της ΑΘΝ. Επομένως, είναι αναγκαία η ενίσχυση της ετοιμότητας και της ικανότητας ανταπόκρισης στις επιπτώσεις της ΑΘΝ και της κλιματικής αλλαγής, σε τοπικό, εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο, που μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση του συντονισμού, ώστε να υπάρξει αειφόρος ανάπτυξη και βιωσιμότητα των αστικών περιοχών.

1.5.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΟΔΙΚΗΣ ΧΑΡΑΔΡΑΣ

Με τον όρο οδική ή αστική χαράδρα (street canyon) εννοούμε ένα σχετικά στενό δρόμο, που κατά μήκος και των δύο πλευρών του βρίσκονται, συνήθως, συγκροτήματα κτιρίων πολύ υψηλότερα από το πλάτος αυτού του δρόμου, έτσι ώστε να εμποδίζεται η εύκολη διάχυση των ατμοσφαιρικών ρύπων. Με την πάροδο του χρόνου ο όρος απέκτησε ευρύτερη σημασία, συμπεριλαμβάνοντας οποιαδήποτε διδιάστατη ή τριδιάστατη ακολουθία κτιρίων. Τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας οδικής χαράδρας είναι το ύψος (H), το πλάτος (W) και το μήκος (L) της, η δε διασπορά των ρύπων μέσα σ' αυτή, εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες, τις εκπομπές των ατμοσφαιρικών ρύπων και τη ροή του ανέμου. Η πολύπλοκη γεωμετρία τους έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη πεδίων (κυρίως τυρβώδους) ροής, με περιοχές έντονης ανακυκλοφορίας και επιταχυνόμενης ροής, ενώ οι μηχανισμοί διασποράς των αέριων ρύπων επηρεάζονται και από τη θερμοκρασιακή ευστάθεια (Αγγελίδης, 2010). Εάν η διεύθυνση του ανέμου είναι παράλληλη προς τον άξονα του

δρόμου, τότε παρατηρείται μια σχεδόν εκθετική μείωση της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών ρύπων με το ύψος, ενώ εάν η διεύθυνση του ανέμου είναι κάθετη προς τον άξονα του δρόμου, τότε εμφανίζεται μια πολύπλοκη στροβιλώδης ροή μέσα στην οδική χαράδρα (Εικόνα 7). Αυτή η στροβιλώδης κυκλοφορία ευνοεί μια μεγάλη συσσώρευση των ατμοσφαιρικών �ύπων στην υπήνεμη πλευρά, σε σχέση με την προσήνεμη πλευρά της οδικής χαράδρας (Oke, 1988; Vardoulakis et al., 2003). Επομένως, η διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων μέσα σε μια οδική χαράδρα είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο, ενώ στις συγκεντρώσεις των ρύπων παίζουν ρόλο, κυρίως, οι εκπομπές τους (κυκλοφορία οχημάτων) και δευτερευόντως ο άνεμος (Κουτσουράκης, 2010; Ζουμάκης, 2016). Γενικά, η συγκέντρωση των ατμοσφαιρικών ρύπων στην ευρύτερη περιοχή ενός δρόμου εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της οδικής χαράδρας (ύψος, πλάτος, μήκος της χαράδρας, σχήμα και μέγεθος των κτιρίων, κλπ), από τις μετεωρολογικές παραμέτρους (κυρίως ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου), τις συνθήκες ευστάθειας της ατμόσφαιρας, την ένταση των θερμικών αναταράξεων, τους εκπεμπόμενους αέριους ρύπους (ανά κατηγορία οχήματος), τον κυκλοφοριακό φόρτο και το είδος και την ταχύτητα των οχημάτων (Ζουμάκης, 2016).



Εικόνα 7. Το φαινόμενο της οδικής χαράδρας. (i) Είδη ροών στην οδική χαράδρα σε σχέση με το λόγο του επιμήκους (W/H) (ii) Κύρια χαρακτηριστικά κανονικής οδικής χαράδρας.

Πηγή: Oke, 1988; Vardoulakis et al., 2000; Αγγελίδης, 2010.

Ένας παράγοντας που, όπως προαναφέρθηκε, επηρεάζει τη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων μέσα στην οδική χαράδρα είναι και η κατάσταση της

ευστάθειας της ατμόσφαιρας. Ειδικότερα, όταν το έδαφος έχει ψυχθεί λόγω ακτινοβολίας και έχει αποκτήσει χαμηλότερη θερμοκρασία από το υπερκείμενο στρώμα της ατμόσφαιρας (συχνά κατά τις βραδυνές ώρες), υπάρχει μια θετική θερμοβαθμίδα (αύξηση της θερμοκρασίας με το ύψος), που εμποδίζει τις κατακόρυφες μετακινήσεις αερίων μαζών (ευσταθής κατάσταση της ατμόσφαιρας). Το αποτέλεσμα είναι να μην ευνοείται η διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων, καθώς παγιδεύονται εντός της οδικής χαράδρας, ενώ αντίθετα σε περιπτώσεις ασταθούς ατμόσφαιρας, κάθε κατακόρυφη μετακίνηση του ρευστού ενισχύεται (Κουτσουνάκης, 2010). Η διασπορά ατμοσφαιρικών ρύπων επηρεάζεται και εξαιτίας των θερμοκρασιακών διαφορών που μπορεί υπάρξει και εξαιτίας της διαφορετικής θέρμανσης των τοιχωμάτων της οδικής χαράδρας, που μπορεί να οφείλεται στην πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας ή και σε άλλους παράγοντες (Αγγελίδης, 2010). Η αλλαγή του σχήματος της οροφής των κτιρίων, όπως η χρήση κεκλιμένων στεγών, είναι μια από τις τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διευκόλυνση του αερισμού της οδικής χαράδρας, σε περίπτωση ευσταθούς κατάστασης της ατμόσφαιρας και να βοηθήσουν ώστε να ξεπεραστεί η παγίδευση των ατμοσφαιρικών ρύπων εντός της οδικής χαράδρας (Κουτσουνάκης, 2010). Έτσι, τα θερμικά φαινόμενα και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις υψηλών θερμοκρασιών, που αναπτύσσονται μέσα στις οδικές χαράδρες επιδρούν σημαντικά στη διαμόρφωση του πεδίου ροής και του μηχανισμού διασποράς των ατμοσφαιρικών ρύπων.

Επομένως, κατά τη διάρκεια ισχυρών επεισοδίων καύσωνα, τα διάφορα συγκροτήματα κτιρίων παγιδεύουν μεγάλα ποσά θερμότητας, εξαιτίας των ιδιοτήτων (θερμικής αγωγιμότητας) των δομικών υλικών και κυρίως του σκυροδέματος, που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και απελευθερώνει θερμότητα, περισσότερο από όλα τα άλλα δομικά υλικά, ακόμη και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στα πολεοδομικά συγκροτήματα πυκνοδομημένων περιοχών, να αυξάνονται υπερβολικά οι θερμοκρασίες και οι ρυθμοί θνησιμότητας (Ζουμάκης, 2016). Έτσι, η παγίδευση της θερμότητας μέσα στα κτίρια, σε συνδυασμό με την παγίδευση των ατμοσφαιρικών ρύπων εξαιτίας του φαινομένου της οδικής χαράδρας, έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος των αστικών περιοχών (Oke, 1982; Vardoulakis et al., 2000).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

2.1 Η ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

2.1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Ατμόσφαιρα ονομάζεται ο λεπτός αέριος μανδύας, που περιβάλλει τον πλανήτη μας, τον ακολουθεί στις διάφορες κινήσεις του και αποτελεί το προστατευτικό στρώμα, που συντηρεί τη ζωή στη γη από την επικίνδυνη υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου, καθώς και από υλικό που μπορεί να προέλθει από το διαπλανητικό χώρο. Η ατμόσφαιρα εκτείνεται σε ύψος περίπου 3.500km από την επιφάνεια της γης. Παρόλα αυτά, σχεδόν το 99% της ατμόσφαιρας βρίσκεται σε απόσταση μόλις 30km από το έδαφος. Οι ταχύτητες περιστροφής του αεριώδους και του στερεού τμήματος της Γης, γενικά συμπίπτουν, χωρίς να είναι κατά κανόνα ίσες εξαιτίας των διαφορετικών, κάθε φορά, ποσοτήτων ενέργειας, που απορροφά το κάθε τμήμα. Επίσης, η ατμόσφαιρα επαναπορροφά μεγάλο ποσοστό της υπερύθρου ακτινοβολίας, η οποία εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης, σταθεροποιώντας έτσι τη θερμοκρασία της (Ahrens, 2009).

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι ένα δυναμικό σύστημα και ταυτόχρονα ένα πολύπλοκο μείγμα, η σύσταση και η δομή του οποίου, καθώς και η συνεχής μεταβολή των φυσικοχημικών φαινομένων που συμβαίνουν μέσα σ' αυτόν, επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τους διάφορους βιογεωχημικούς κύκλους και τα οικοσυστήματα και διαμορφώνουν τις καιρικές συνθήκες και κατά συνέπεια το κλίμα σε κάθε περιοχή του πλανήτη μας (Ζιώμας και Ρεμουντάκη, 2003). Γενικά, ενώ η σύσταση και η πυκνότητα της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται με το ύψος από την επιφάνεια της γης, μέχρι και περίπου το ύψος των 80-100km, η ατμόσφαιρα είναι κατά μέσο όρο ομοιογενής και παρατηρείται καλή κατακόρυφη ανάμιξη των συστατικών της. Έτσι, στα κατώτερα στρώματά του, ο ατμοσφαιρικός αέρας αποτελείται από ένα μίγμα αέριων συστατικών, τα οποία στο σύνολό τους ονομάζονται «ξηρός» αέρας, από νερό σε στερεή, υγρή ή αέρια μορφή και από αερολύματα, τα οποία είναι υγρά ή στερεά

ατμοσφαιρικά σωματίδια. Στον Πίνακα (2)

(<http://www.geo.auth.gr/courses/gmc/1000/synthesi.html>) παρουσιάζεται η σύσταση του «ξηρού» αέρα και ειδικότερα οι χημικοί τύποι και η περιεκτικότητα των αερίων, που τον συνιστούν, αλλά και η πυκνότητα, το μοριακό βάρος και η κρίσιμη θερμοκρασία αυτών των αερίων. Σύμφωνα με τον Πίνακα (2) τα πρώτα τέσσερα αέρια, άζωτο, οξυγόνο, αργό και διοξείδιο του άνθρακα συνιστούν περίπου το 99.98% του «ξηρού» ατμοσφαιρικού αέρα. Επίσης, ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει υδρατμούς H₂O, πλήθος άλλων αερίων ουσιών σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις ή σε ίχνη, καθώς και διάφορα υγρά και στερεά σωματίδια (<http://www.geo.auth.gr/courses/gmc/gmc318y/>).

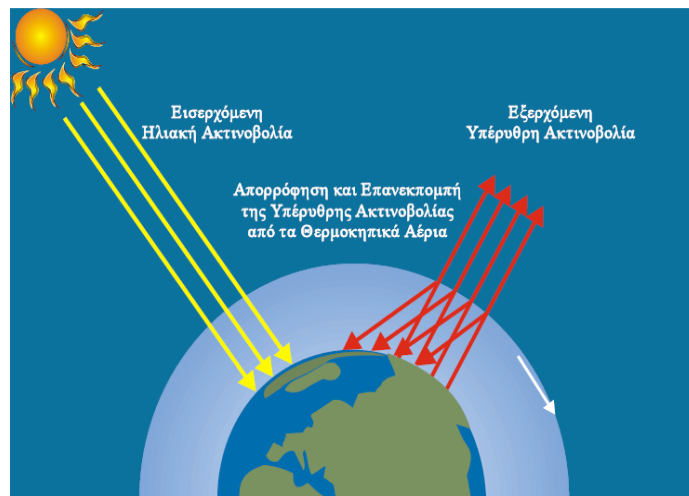
Πίνακας 2. Σύνθεση του «ξηρού» ατμοσφαιρικού αέρα

Πηγή: <http://www.geo.auth.gr/courses/gmc/1000/synthesi.html>

Αέρια	Σύμβολα	Περιεκτικότητα		Πυκνότητα σε g/m ³	Μοριακό βάρος	Κρίσιμη θερμοκρ.
		Κατ' όγκο	Κατά βάρος			
Άζωτο	N	78.08	75.51	1250	28.016	-147.2
Οξυγόνο	O	20.95	23.14	1429	32.000	-118.9
Αργό	Ar	0.93	1.3	1786	39.944	-122.0
Διοξ. άνθρακος	CO ₂	0.03	~0.5	1977	44.010	31.0
Νέο	Ne	(18.18)×10 ⁻⁴	120×10 ⁻⁵	900	20.183	-228.0
Ήλιο	He	(5.24)×10 ⁻⁴	8.10 ⁻⁵	178	4.003	-258.0
Μεθάνιο	CH ₄	~2.2×10 ⁻⁴	—	717	16.04	—
Κρυπτό	Kr	(1.14)×10 ⁻⁴	29.10 ⁻⁵	3736	83.7	-63.0
Οξειδ. Αζώτου	N ₂ O	(0.5±0.1)×10 ⁻⁴	—	1978	44.016	—
Υδρογόνο	H ₂	~0.5×10 ⁻⁴	0.35×10 ⁻⁵	90	2.016	-239.0
Ξένο	Xe	(0.087)×10 ⁻⁴	3.6×10 ⁻⁵	5891	131.3	16.6
Όζο	O ₃	(0-0.07)×10 ⁻⁴ έως (1-3)×10 ⁻⁴	~0.17×10 ⁻⁵	2140	48.0	5.0

Ορισμένα από αυτά τα αέρια (φυσικά συστατικά) της ατμόσφαιρας, όπως το O₂ και το CO₂, είναι απαραίτητα για τον άνθρωπο, τα φυτά και τα ζώα, καθώς συμμετέχουν στις διαδικασίες της ζωής (αναπνοή, φωτοσύνθεση, κλπ). Έτσι, για παράδειγμα το CO₂, που είναι ένα φυσικό συστατικό της ατμόσφαιρας, ενώ βρίσκεται σε ένα πολύ μικρό, αλλά σημαντικό ποσοστό του όγκου του αέρα, κυρίως είναι απαραίτητο για τη φωτοσύνθεση, με την οποία τα φυτά προσλαμβάνουν τις πρώτες ύλες από το

περιβάλλον και τις μετατρέπουν σε τροφή (Μελάς, 2007). Το φυσικώς παραγόμενο CO_2 εισέρχεται στην ατμόσφαιρα κυρίως από την αποσύνθεση της βλάστησης, αλλά και από ηφαιστειακές εκρήξεις και την εκπονή των έμβιων όντων (Ahrens, 2009). Η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε CO_2 δεν είναι αυτή τη στιγμή σε ισορροπία, γιατί ο ρυθμός εισαγωγής του στην ατμόσφαιρα είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό απομάκρυνσής του εξαιτίας κυρίως της καύσης ορυκτών καυσίμων, της καύσης φυτών για γεωργικούς σκοπούς, της αποψύλωσης των δασών και των πυρκαγιών. Αντίστοιχα, το O_2 βρίσκεται σε ισορροπία στην ατμόσφαιρα και τα επίπεδά του δεν διαφοροποιούνται με την πάροδο του χρόνου. Η εισαγωγή του O_2 στην ατμόσφαιρα πραγματοποιείται κυρίως με τη φωτοσύνθεση, παρουσία του ηλιακού φωτός, ενώ απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα, όταν διασπάται η οργανική ύλη και κατά τη διάρκεια της αναπνοής, καθώς οι πνεύμονες λαμβάνουν οξυγόνο και απελευθερώνουν CO_2 (Ahrens, 2009).



Εικόνα 8. Εικονική αναπαράσταση του φαινομένου του θερμοκηπίου.
Πηγή: Μελάς, 2007.

Επιπλέον, το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, το υποξείδιο του αζώτου, το όζον και οι υδρατμοί, είναι συστατικά του τροποσφαιρικού αέρα που έχουν την ιδιότητα να απορροφούν και να εκπέμπουν ακτινοβολία σε μεγάλα μήκη κύματος ($>4\mu\text{m}$), στην περιοχή του υπέρυθρου (IR, Infrared). Έτσι, από τα αέρια αυτά και τους υδρατμούς απορροφάται μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από την επιφάνεια

της γης, με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η ελεύθερη διαφυγή της στο διάστημα, με επακόλουθο η γήινη ατμόσφαιρα να αυξάνει και να σταθεροποιεί τη θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης κατά, περίπου, 35°C περισσότερο (Ρεμουντάκη, 2010). Το φαινόμενο αυτό, είναι γνωστό με τον όρο «φαινόμενο του θερμοκηπίου» (Εικόνα 8), το οποίο ενισχύεται με την αύξηση των συγκεντρώσεων στην ατμόσφαιρα, κυρίως των παραπάνω αερίων, που ονομάζονται θερμοκηπικά αέρια (greenhouse gases), καθώς και άλλων αερίων που παρουσιάζουν αυτή την ιδιότητα, όπως οι χλωροφθοράνθρακες (CFC) και οι υδροφθοράνθρακες (που περιλαμβάνουν HCFC και HFCs). Η αύξηση αυτή προέρχεται κυρίως από τις εκπομπές ανθρώπινων δραστηριοτήτων, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων (κυρίως άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου) και από την αποψίλωση των δασών, τις πυρκαγιές και άλλες αλλαγές στη χρήση της γης (IPCC, 2021). Έτσι, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, στη φυσική του διάσταση, όχι μόνο δεν βλάπτει, αλλά αντίθετα είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, περίπου στους 15°C. Βέβαια, η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, εξαιτίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που προκαλείται από τις προαναφερθείσες ανθρωπογενείς εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων, αυξάνουν την ικανότητα της παγίδευσης της υπέρυθρης ακτινοβολίας της γης, από τη γήινη ατμόσφαιρα, μεταβάλλοντας έτσι σημαντικά το κλίμα.

Πίνακας 3. Τυπικές συγκεντρώσεις (μέση σύσταση) γήινης ατμόσφαιρας.
Πηγή: Ζάνης, 2014.

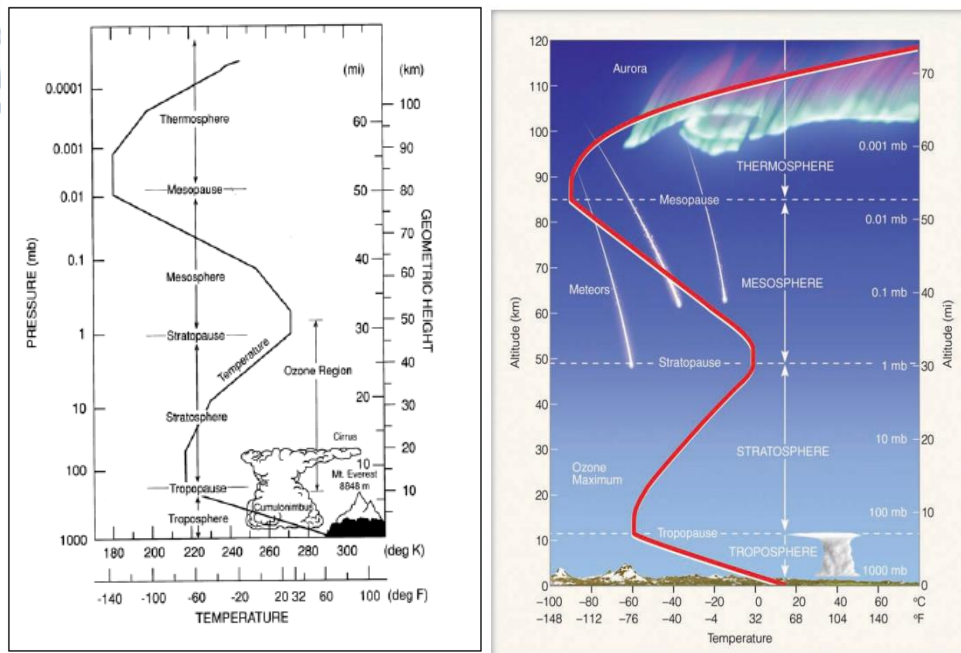
Κύρια Στοιχεία	Συγκέντρωση	Χρόνος ζωής /έτη
N ₂	0.781	1.6 x 10 ⁷
O ₂	0.209	9000
Ar	0.0093	4.5 x 10 ⁹
H ₂ O	0 – 0.04	5 ημέρες
CO ₂	370 ppmv	5
CH ₄	1700 ppbv	10
H ₂	550 ppb	4
N ₂ O	320 ppb	150
CO	40 – 200 ppb	0.2
O ₃	20 – 100 ppb στη τροπόσφαιρα και μερικά ppmv στη στρατόσφαιρα	0.05
C ₂ H ₆	1 ppb	0.2
SO ₂	0.1 ppb	5 ημέρες
NO ₂	0.1 ppb	2 ημέρες

Ο Πίνακας (3) δείχνει τη σημερινή μέση σύσταση της γήινης ατμόσφαιρας, που παραμένει περίπου ίδια τα πρώτα 100km από την επιφάνεια της γης. Εξαίρεση αποτελούν το όζον με μέγιστο συγκέντρωσης στη στρατόσφαιρα και οι υδρατμοί με μέγιστο στην τροπόσφαιρα (Ζάνης, 2014).

2.1.2 ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑΣ

Η ατμόσφαιρα διαιρείται σ' έναν αριθμό στρωμάτων, σύμφωνα με τις θερμικές της ιδιότητες (θερμοκρασία) και τα χημικά της χαρακτηριστικά. Έτσι, ένας χαρακτηριστικός τρόπος διαχωρισμού της ατμόσφαιρας είναι η κατανομή της (στρωμάτωση) σύμφωνα με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, σε συνάρτηση με το ύψος, από την επιφάνεια της γης (Εικόνα 9). Τα στρώματα, σύμφωνα μ' αυτή τη μεταβολή της θερμοκρασίας καθ' ύψος είναι η Τροπόσφαιρα, η Στρατόσφαιρα, η Μεσόσφαιρα και η Θερμόσφαιρα. Ταυτόχρονα, ανάμεσά τους, παρατηρούνται και μεταβατικές ζώνες σημαντικού πάχους, που αποτελούν τα όρια μεταξύ δύο διαδοχικών στρωμάτων, που κατά σειρά είναι η Τροπόπαυση, η Στρατόπαυση και η Μεσόπαυση.

Το πρώτο στρώμα της ατμόσφαιρας ονομάζεται Τροπόσφαιρα, εκτείνεται από το επίπεδο της θάλασσας μέχρι περίπου το ύψος των 10-12km στους πόλους και περίπου των 16km στον ισημερινό και αποτελεί την κατώτερη περιοχή της γήινης ατμόσφαιρας. Η θερμοκρασία της μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια της γης με ρυθμό μείωσης κατά μέσο όρο $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. Περιλαμβάνει περίπου το 75-80% της μάζας της ατμόσφαιρας και σχεδόν το σύνολο των υδρατμών. Σ' αυτό το στρώμα λαμβάνουν χώρα σχεδόν όλα τα μετεωρολογικά φαινόμενα και τα φαινόμενα ρύπανσης της ατμόσφαιρας (Φλόκας, 1997). Το δεύτερο στρώμα ονομάζεται Στρατόσφαιρα, το ανώτερο τμήμα της φθάνει μέχρι περίπου το ύψος των 50km και είναι η περιοχή που βρίσκεται το στρώμα του όζοντος. Επιπλέον, το στρώμα της Στρατόσφαιρας χαρακτηρίζεται από αύξηση της θερμοκρασίας από τους -52°C , που παρατηρείται στην κορυφή της Τροπόσφαιρας, μέχρι τους -2°C . Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας ανάλογα με το ύψος οφείλεται κυρίως στην παρουσία του όζοντος, που η συγκέντρωσή του μπορεί να φτάσει, στο μέσον της Στρατόσφαιρας, στο επίπεδο των 10 μερών ανά εκατομμύριο κατ' όγκον (10ppm) και οφείλεται στην απορρόφηση της ενέργειας της υπεριώδους ακτινοβολίας από το όζον. Σημειώνεται ότι η Στρατόσφαιρα και η Τροπόσφαιρα περιέχουν το 99% του συνόλου της μάζας της ατμόσφαιρας (η τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης στην Στρατόσφαιρα είναι $\sim 1\text{mb}$). Το μεταβατικό στρώμα μεταξύ Τροπόσφαιρας και Στρατόσφαιρας στην κορυφή της Τροπόσφαιρας ονομάζεται Τροπόπαυση.



Εικόνα 9. Στρώματα της ατμόσφαιρα σε σχέση με τη μεταβολή της θερμοκρασίας (°C) με το ύψος (km)-έντονη γραμμή.

Πηγή: Brasseur et al., 1999; Ahrens, 2009.

Το τρίτο στρώμα ονομάζεται Μεσόσφαιρα, εκτείνεται από τη Στρατόπαυση μέχρι περίπου τα 80km και είναι η πιο ψυχρή περιοχή της ατμόσφαιρας. Μέσα σ' αυτό το στρώμα παρατηρείται μεγάλη πτώση της θερμοκρασίας καθ' ύψος με τιμές, που φτάνουν μέχρι τους -80°C με -90°C στο ανώτερο όριο αυτού (Μεσόπαυση). Αυτή η μεγάλη ελάττωση της θερμοκρασίας με το ύψος οφείλεται κυρίως στην απουσία του όζοντος μέσα σ' αυτό το στρώμα. Το τέταρτο στρώμα ονομάζεται Θερμόσφαιρα, εκτείνεται μέχρι περίπου το ύψος των 400km και χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη αραιώση του αέρα. Μέσα στη Θερμόσφαιρα, η θερμοκρασία αυξάνει μονότονα με το ύψος, με τιμές που φτάνουν τους 1000°K ή και περισσότερο, ανάλογα με την ηλιακή δραστηριότητα, το γεωγραφικό πλάτος και την ώρα της ημέρας. Αυτή η αύξηση στη θερμοκρασία οφείλεται στην εκλυόμενη ενέργεια από τις εξώθερμες χημικές αντιδράσεις, στη μεγάλη αραιώση του ατμοσφαιρικού αέρα, στην έλλειψη τριατομικών μορίων και στην ηλιακή ακτινοβολία με μήκη κύματος μικρότερα των 175nm (Φλόκας, 1997). Το ανώτερο όριο της Θερμόσφαιρας είναι η Θερμόπαυση και πάνω απ' αυτήν εκτείνεται η ισόθερμη Εξώσφαιρα μέχρι περίπου τα 400-500km.

Ο κατακόρυφος διαχωρισμός της ατμόσφαιρας σε στρώματα, εκτός από τον παραπάνω με βάση τη μεταβολή της θερμοκρασίας με το ύψος, μπορεί να γίνει με κριτήριο τη χημική της σύσταση. Έτσι, μπορεί να χωριστεί σε δύο στρώματα, στην *Ομοιόσφαιρα*, που εκτείνεται περίπου μεταξύ 0-85km και έχει κύριο γνώρισμα τη σχεδόν σταθερή ατμοσφαιρική σύσταση, εξαιτίας της καλής ανάμιξης των ατμοσφαιρικών συστατικών και στο υπερκείμενο στρώμα την «*Ετερόσφαιρα*» (>85km), που χαρακτηρίζεται από μεταβλητή ατμοσφαιρική σύσταση. Επίσης, μπορεί να γίνει με κριτήριο τις ηλεκτρικές της ιδιότητες, βάση των οποίων η γήινη ατμόσφαιρα μπορεί να χωριστεί στις περιοχές της «*Ιονόσφαιρας*», που εκτείνεται μεταξύ 30-300km περίπου (περιοχή που παρατηρείται μερικός ιονισμός των διαφόρων ατμοσφαιρικών συστατικών από την ηλιακή ακτινοβολία) και της «*Μαγνητόσφαιρας*», που εκτείνεται περίπου από τα 1000km, έως και περίπου 10 ακτίνες γης (στο φωτιζόμενο τμήμα της), στην οποία η κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων καθορίζεται από το γήινο μαγνητικό πεδίο (Χαϊνά, 2014).

2.2 Η ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Η ρύπανση της ατμόσφαιρας αποτελεί σήμερα ένα από τα σπουδαιότερα σύγχρονα περιβαλλοντικά προβλήματα, σε εθνικό και διεθνές επίπεδο, αφού επηρεάζει καθοριστικά την υγεία και την ποιότητα ζωής ενός μεγάλου τμήματος του πληθυσμού, αλλά και της βιωσιμότητας των οικοσυστημάτων.

2.2.1. ΟΡΙΣΜΟΣ - ΑΙΤΙΕΣ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Ατμοσφαιρική ρύπανση ονομάζεται η παρουσία ρύπων στην ατμόσφαιρα (κάθε είδους ουσιών, ακτινοβολίας, θορύβου ή άλλης μορφής ενέργειας) σε συγκέντρωση, ποσότητα ή διάρκεια, τέτοια που είναι δυνατόν να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις, είτε βραχυπρόθεσμα, είτε μακροπρόθεσμα, στην υγεία, τους ζωντανούς οργανισμούς και τα οικοσυστήματα. Είναι δηλαδή, η προσθήκη κάθε υλικού, μοριακής ή σωματιδιακής φύσης, στην ατμόσφαιρα, η οποία θα έχει ως αποτέλεσμα τη δηλητηρίαση της ζωής πάνω στη γη (Ζάνης, 2014).

Ο όρος ατμοσφαιρική ρύπανση καλύπτει μεγάλο φάσμα τοξικών ρύπων, αερίων και σωματιδιακών, που εκπέμπονται στην τροπόσφαιρα, τόσο από διάφορες ανθρωπογενείς εκπομπές, όσο και από διάφορες φωτοχημικές διεργασίες. Σε παγκόσμια κλίμακα, οι εκπομπές ορισμένων ατμοσφαιρικών ρύπων από φυσικές διεργασίες (θάλασσα, πυρκαγιές δασών, ηφαιστειακές εκρήξεις, φυτά, κόκκοι γύρης, κλπ) είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Όμως, οι ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων και σωματιδιακών ρύπων, που προέρχονται, είτε από αστικές δραστηριότητες (κυκλοφορία οχημάτων, κεντρικές θερμάνσεις, δημόσια έργα, κλπ), είτε από βιομηχανικές δραστηριότητες (θερμοηλεκτρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, διυλιστήρια, μεταλλουργία, βιομηχανία ορυκτών, κλπ), υπερβαίνουν πολλές φορές τα επιτρεπτά όρια, με αποτέλεσμα τα επίπεδα αυτών των ρύπων να είναι η κύρια αιτία του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Seinfeld & Pandis, 2006).

Η ατμοσφαιρική ρύπανση, σε κάθε περιοχή, εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το είδος και η ένταση της πηγής ρύπανσης, οι μετεωρολογικές συνθήκες, η τοπογραφία, η φύση των ρύπων, κλπ. Ειδικότερα, οι κυριότερες αιτίες (παράγοντες) που παίζουν καθοριστικό ρόλο στο σχηματισμό ατμοσφαιρικής ρύπανσης (ΥΠΕΝ, 2001-2021; ΕΑΑ, 2013), σε μια περιοχή είναι: **i)** Η φύση και η ποσότητα ρύπων (είδος και ένταση των πηγών ρύπανσης), δηλαδή ο ρυθμός εκπομπής των ρύπων και αν είναι χημικά δραστικοί ή αδρανείς οι ρύποι. **ii)** Οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή. Ένας από τους πιο καθοριστικούς μετεωρολογικούς παράγοντες είναι ο άνεμος. Γενικά, ο ρυθμός απομάκρυνσης των αερίων ρύπων εξαρτάται από την ταχύτητα και τη διεύθυνση των επικρατούντων ανέμων, με αποτέλεσμα οι αέριοι ρύποι να μεταφέρονται, ακόμη και σε μεγάλες αποστάσεις, από την πηγή εκπομπής τους. Επιπλέον, σημαντικοί μετεωρολογικοί παράμετροι είναι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα, η ευστάθεια της ατμόσφαιρας και το μετεωρολογικό ύψος ανάμειξης, οι μετεωρολογικές κατακρημνίσεις (βροχόπτωση, χιόνι, κλπ) και ειδικότερα για τους φωτοχημικούς ρύπους η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η διάρκεια της ηλιοφάνειας. **iii)** Τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής. Η γεωμορφολογική διαμόρφωση καθορίζει τις τοπικές συνθήκες κίνησης του αέρα και δημιουργεί προϋποθέσεις αραίωσης ή συμπύκνωσης των ρύπων.

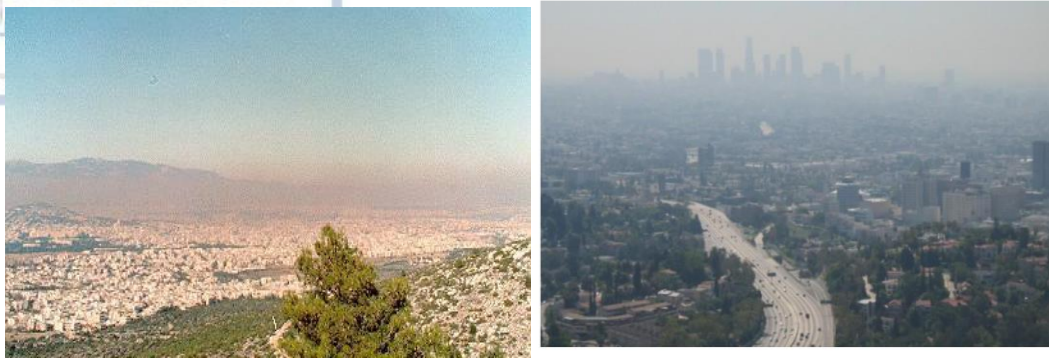
Έτσι, μια περιοχή που περικλείεται από βουνά ή έχει στενούς δρόμους και ψηλά κτίρια (οδικές χαράδρες) δεν διευκολύνει τη διέλευση του αέρα και άρα δημιουργεί συνθήκες για τη συσσώρευση των ρύπων. **iv)** Η χρονική διακύμανση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η ατμοσφαιρική ρύπανση παρουσιάζει κύκλους (ημερήσιος, εποχικός, διαχρονικός, κλπ), που είναι συνδεδεμένοι με τις αντίστοιχες μεταβολές των ανθρώπινων δραστηριοτήτων και των μετεωρολογικών παραγόντων (ΥΠΕΝ, 2001-2021; ΕΑΑ, 2013).

Πίνακας 4. Κριτήρια ενδεικτικής ταξινόμησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
Πηγή: Μελάς, 2007.

A. Περιβάλλον	1. Εσωτερικών χώρων 2. Εξωτερικό περιβάλλον
B. Πηγές	1. Φυσικές α. Γεωχημική, β. 2. Ανθρωπογενείς α. Κοινωνική β. Επαγγελματική γ. Προσωπική ρύπανση
Γ. Φυσικές Ιδιότητες	1. Αέρια 2. Σωματίδια 3. Οσμές
Δ. Χρόνος	1. Μόνιμα αέρια 2. Μεταβλητά αέρια
Ε. Χημική δράση	1. Χημικά ενεργά αέρια 2. Χημικά αδρανή αέρια 3. Ελεύθερες ρίζες
ΣΤ. Προέλευση	1. Πρωτογενείς 2. Δευτερογενείς
Ζ. Κλίμακα	1. Τοπική-αστική 2. Περιφερειακή 3. Παγκόσμια κλίμακα
Η. Δραστικότητα	1. Ρύποι υψηλής τοξικότητας 2. Συνηθισμένοι ρύποι

Η ταξινόμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια. Έτσι, μπορεί να γίνει με βάση τις φυσικές ή χημικές τους ιδιότητες, τις επιπτώσεις τους, την προέλευσή τους, κλπ. Τα κριτήρια μιας ενδεικτικής ταξινόμησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 (Μελάς, 2007).

Η ατμοσφαιρική ρύπανση, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, μπορεί να φτάσει σε επίπεδα, τα οποία είναι πιθανό να δημιουργήσουν ανεπιθύμητες συνθήκες διαβίωσης. Το «Νέφος» (είδος) της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορεί να εμφανιστεί, είτε σαν Νέφος Καπνομίχλης (Αιθαλομίχλη), είτε σαν Φωτοχημικό Νέφος. Η Αιθαλομίχλη (SMOG, λέξη που προέρχεται από SMOke και foG) ή καπνομίχλη τύπου Λονδίνου, παρουσιάζεται όταν έχουμε αυξημένες εκπομπές και επομένως υψηλή συγκέντρωση ρύπων, όπως αιωρούμενων σωματιδίων (κυρίως αιθάλης-καπνού), SO₂, CO, σε συνδυασμό με μετεωρολογικές (σχετικά χαμηλή θερμοκρασία και μεγάλη σχετική υγρασία) και τοπογραφικές συνθήκες, που εμποδίζουν τη φυσική διάχυση της ρύπανσης. Τότε οι αέριοι και σωματιδιακοί ρύποι εγκλωβίζονται, με αποτέλεσμα την αύξηση των συγκεντρώσεων αυτών των ρύπων και τη δημιουργία αιθαλομίχλης στην περιοχή. Η αιθάλη-καπνός αποτελείται συνήθως από μικρά σωματίδια μαύρου χρώματος (κυρίως άνθρακα), που προέρχονται από ατελείς καύσεις. Οι σημαντικότερες ανθρωπογενείς πηγές αιωρούμενων σωματιδίων είναι οι κάθε είδους καύσεις (θερμοηλεκτρικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, κεντρική θέρμανση, κλπ), οι διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες και η κυκλοφορία κάθε είδους οχημάτων (<https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/aithalomichli/>). Το Φωτοχημικό Νέφος (ή φωτοχημική αιθαλομίχλη τύπου Λος Άντζελες) εμφανίζεται, σήμερα, σε πολλές πόλεις, μεταξύ των οποίων και η Αθήνα και η Θεσσαλονίκη (Εικόνα 10) και δημιουργείται από εκπομπές οξειδίων του αζώτου, μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογονανθράκων, τα οποία με την παρουσία του ηλιακού φωτός αντιδρούν μεταξύ τους σχηματίζοντας τη φωτοχημική αιθαλομίχλη. Ο σημαντικότερος δείκτης φωτοχημικής ρύπανσης, σε μια περιοχή, είναι το όζον. Η ημερήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων των ρύπων του Φωτοχημικού Νέφους οφείλεται αφενός σε εκπομπές (όπως το πρωινό κυκλοφοριακό μέγιστο) και αφετέρου σε χημικούς παράγοντες (όπως οι αντιδράσεις μεταξύ των φωτοχημικών ρύπων) και μετεωρολογικές συνθήκες (όπως η ηλιακή ακτινοβολία και οι κακές συνθήκες διασποράς). Η φωτοχημική αιθαλομίχλη (κυρίως οι πρόδρομοι ρύποι του όζοντος, που θεωρούνται τα οξείδια του αζώτου, οι μη μεθανικές πτητικές οργανικές ενώσεις και το μονοξείδιο του άνθρακα) συνδέονται, κυρίως, με τις ανθρωπογενείς εκπομπές των οδικών μεταφορών (Ζάνης 2014; Μελάς κ.ά., 2000).



Εικόνα 10. Φωτοχημική αιθαλομίχλη στην Αθήνα και στην πόλη του Λος Άντζελες (Η.Π.Α.).
Πηγή: Μελάς κ.ά., 2000; Ζάνης, 2014.

Τέλος, τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης συνήθως τα εκφράζουμε με τις εξής δύο μονάδες συγκέντρωσης: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ή mg/m^3 , μάζα ρύπου ανά όγκο αέρα, είτε ppm, μέρη ρύπου ανά εκατομμύριο όγκου αέρα. Μερικές φορές, οι συγκεντρώσεις ενός αέριου ρύπου εκφράζονται σε ppb, μέρη ρύπου ανά δισεκατομμύριο όγκου αέρα, ενώ, οι συγκεντρώσεις των σωματιδιακών ρύπων, εκφράζονται συνήθως σε $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.2.2 ΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΡΥΠΟΙ

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι αέρια ή αερολύματα (υγρά ή στερεά σωματίδια σε αιώρηση στον αέρα), τα οποία συναντώνται στην ατμόσφαιρα σε συγκεντρώσεις, που απειλούν την ομαλή διαβίωση και υγεία των οργανισμών ή παρεμποδίζουν και μεταβάλλουν την ομαλή λειτουργία των οικοσυστημάτων (Ζάνης, 2008). Έτσι, σαν ατμοσφαιρικός ρύπος θεωρείται οποιαδήποτε χημική ουσία ανιχνεύεται στον ατμοσφαιρικό αέρα, που συναντάται σε διάφορες φάσεις, δηλαδή σε στερεή, αέρια ή υγρή και ενδέχεται να προκαλέσει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου ή στο περιβάλλον (Οδηγία 2008/50/EK). Οι διάφοροι ατμοσφαιρικοί ρύποι διακρίνονται σε: **πρωτογενείς ρύπους**, που εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, όπως ακριβώς παράγονται, είτε από φυσική, είτε από ανθρωπογενή πηγή προέλευσης και σε **δευτερογενείς ρύπους**, που σχηματίζονται από τους πρωτογενείς ρύπους, μέσω κυρίως διαφόρων χημικών αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στην ατμόσφαιρα (Ζάνης 2014; Ρεμουντάκη, 2010). Οι κυριότεροι πρωτογενείς ρύποι είναι το μονοξείδιο του αζώτου, το μονοξείδιο του άνθρακα, το διοξείδιο του θείου, τα

αιωρούμενα σωματίδια, ο μόλυβδος και οι υδρογονάνθρακες. Οι κυριότεροι δευτερογενείς ρύποι είναι το διοξείδιο του αζώτου, το όζον, τα αιωρούμενα σωματίδια, διάφορες οργανικές ενώσεις (κετόνες, αλδεΐδες, κλπ), προϊόντα οξείδωσης που περιέχουν θείο (θειικά άλατα, τριοξείδιο του θείου, κλπ) κ.ά.

Οι κυριότεροι ατμοσφαιρικοί ρύποι (Γεντεκάκης, 2010) είναι οι εξής:

- i) **Ενώσεις, που περιέχουν άνθρακα:** Μονοξείδιο του άνθρακα (CO), Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), υδρογονάνθρακες (HCs) και παράγωγες οργανικές ενώσεις, π.χ. πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs)
- ii) **Ενώσεις, που περιέχουν άζωτο:** Υποξείδιο του αζώτου (N₂O), οξείδιο του αζώτου (NO), διοξείδιο του αζώτου (NO₂), αμμωνία (NH₃)
- iii) **Ενώσεις, που περιέχουν θείο:** Διοξείδιο του θείου (SO₂), υδρόθειο (H₂S), καρβονυλοσουλφίδιο (OCS) και διμεθυλοσουλφίδιο (CH₃SCH₃, DMS)
- iv) **Αλογονούχες ενώσεις:** Αλογόνα (F₂, Cl₂, Br₂) και παράγωγα, υδραλογόνα (HF, HCl, HBr) και αλογονάνθρακες (CFCs, HCFCs, HFCs, υπεραλογονομένοι-αλογονάνθρακες και αλογονο-βρωμάνθρακες)
- v) **Φωτοχημικά οξειδωτικά:** Όζον (O₃), οξείδια και νιτρικά υπεροξυακύλια (PAN)
- vi) **Αιωρούμενα σωματίδια:** Σωματιδιακοί ρύποι και αερολύματα (PM)
- vii) **Επικίνδυνοι και τοξικοί ρύποι:** Συστατικά αλκυλιωμένου Μόλυβδου (Pb), πολυκυκλικές οργανικές ενώσεις, εξαχλωροβενζόλιο, πολυχλωριωμένα διφενύλια και βαρέα μέταλλα (Cd, Pb, Be, Ni, Hg, As) κ.ά.

Στην ατμόσφαιρα ένας ρύπος, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σημαντικός, ανάλογα με τη συγκέντρωσή του και τις επιπτώσεις που έχει στο περιβάλλον του και τον άνθρωπο. Συγκεκριμένα, ορισμένα από αυτά τα αέρια ή σωματίδια είναι φυσικά συστατικά της ατμόσφαιρας, όπως το SO₂ ή το CO. Ωστόσο, τα αέρια, αυτά, γίνονται ατμοσφαιρικοί ρύποι, όταν η συγκέντρωσή τους ξεπερνά ορισμένα όρια. Επίσης, υπάρχουν άλλοι ρύποι στην ατμόσφαιρα, που δεν είναι συστατικά του ατμοσφαιρικού αέρα και η παρουσία τους μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες σε οποιαδήποτε

συγκέντρωση. Έτσι, για παράδειγμα, οι ίνες αμιάντου είναι γνωστό ότι προκαλούν καρκίνο, (Ρεμουντάκη, 2010).

Οι ατμοσφαιρικοί εκπέμπονται από διάφορες πηγές, μεταφέρονται από αυτές σε μεγάλες αποστάσεις, διασπείρονται και υφίστανται φυσικοχημικές μεταβολές. Επιπρόσθετα, τα φωτοχημικά οξειδωτικά είναι μία από τις πιο σημαντικές ομάδες των δευτερογενών ρύπων, καθώς παράγονται κατά τις φωτοχημικές αντιδράσεις, με πρόδρομες ουσίες τα οξείδια του αζώτου, τους υδρογονάνθρακες και τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα φωτοχημικά οξειδωτικά περιλαμβάνουν, κυρίως, το όζον, το υπεροξυακετυλονιτρίλιο (PAN), το υπεροξυβενζολονιτρίλιο (PBN), την ακρολεΐνη, τη φορμαλδεΰδη, κ.ά. και η ποσότητά τους στην ατμόσφαιρα εκτιμάται, συνήθως, με τη μέτρηση της συγκέντρωσης του όζοντος, (Πετρακάκης κ.ά., 2005). Τέλος, τα φωτοχημικά οξειδωτικά συνεισφέρουν στην οξειδωτική ικανότητα της ατμόσφαιρας, και οι αυξημένες συγκεντρώσεις τους, σε μια περιοχή, έχουν σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό της φωτοχημικής αιθαλομίχλης.

Συμπερασματικά, ο ορισμός του ατμοσφαιρικού ρύπου και της ρυπασμένης ή μη ατμόσφαιρας, εξαρτάται από το θεωρούμενο χώρο, το χρονικό πλαίσιο, και τις επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει σε διάφορες καταστάσεις (Ρεμουντάκη, 2010).

2.2.3 ΠΗΓΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ

Το μεγαλύτερο ποσοστό των παραγόμενων πρωτογενών αέριων ρύπων προέρχεται από φυσικές πηγές, παρόλο που τα μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα οφείλονται σε ανθρωπογενείς εκπομπές, που συγκεντρώνονται σε μικρές γεωγραφικές περιοχές, κυρίως, αστικές και βιομηχανικές περιοχές. Σ' αυτό συνηγορεί και η μεγάλη και καλή διασπορά των φυσικών πηγών, που έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη ανάμιξη των ατμοσφαιρικών ρύπων με τον καθαρό αέρα. Γι' αυτό και από μόνες τους, οι εκπομπές αερίων ρύπων από φυσικές πηγές (με κάποιες μικρές εξαιρέσεις) δεν οδηγούν σε υψηλές συγκεντρώσεις (Ζάνης, 2008; Μελάς κ.ά., 2000).

Οι κυριότερες φυσικές πηγές και οι αντίστοιχοι εκπεμπόμενοι ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι (Ζάνης, 2014):



- Τα ηφαίστεια τα οποία εκπέμπουν, κυρίως, αιωρούμενα σωματίδια, διοξείδιο του θείου, μεθάνιο και υδρόθειο.
- Οι ωκεανοί και οι θαλάσσιες εκτάσεις, που εκπέμπουν, κυρίως, χλωριούχο νάτριο και θειικά άλατα.
- Οι δασικές πυρκαγιές που εκπέμπουν, κυρίως, αιωρούμενα σωματίδια, διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα.
- Η βιολογική αποσύνθεση των φυτών και των ζώων από την οποία εκπέμπονται, κυρίως, υδρογονάνθρακες, υδρόθειο και αμμωνία.
- Τα φυτά και τα δέντρα, που εκπέμπουν, κυρίως, υδρογονάνθρακες.
- Η αποσάθρωση του εδάφους από την οποία εκπέμπονται αιωρούμενα σωματίδια.

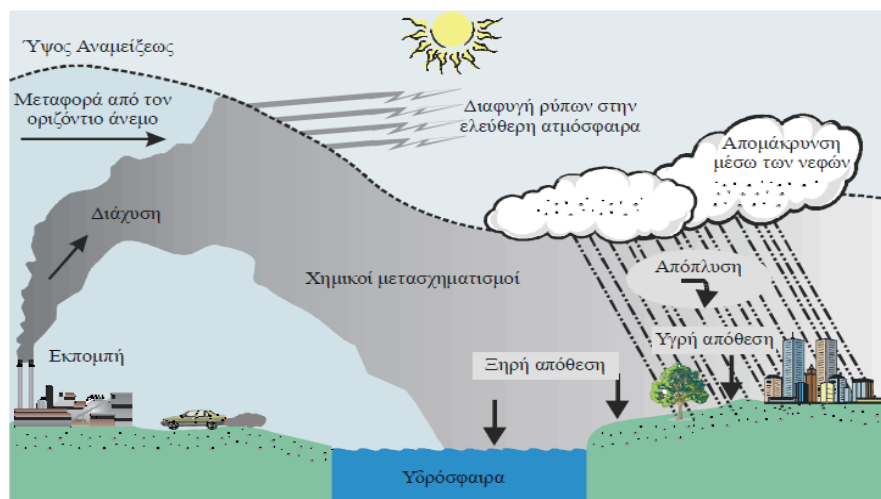
Οι σημαντικότερες ανθρωπογενείς πηγές και οι αντίστοιχοι εκπεμπόμενοι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορεί να θεωρηθούν οι εξής:

- Τα μέσα μεταφοράς (οχήματα, πλοία, αεροπλάνα, τραίνα).
- Η θέρμανση κατοικιών και γραφείων.
- Οι διαδικασίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (θερμοηλεκτρικά εργοστάσια, λιγνιτωρυχεία, κλπ).
- Οι βιομηχανικές καύσεις καυσίμων και γενικά οι εκπομπές από διάφορες βιομηχανικές διεργασίες (βιομηχανία ορυκτών, χημική βιομηχανία, παραγωγή και επεξεργασία μετάλλων, κλπ).
- Η εξόρυξη και διανομή καυσίμων.
- Οι οποιαδήποτε ανεπιθύμητες καύσεις.
- Οι οικοδομικές και γεωργικές εργασίες.

2.3 Ο ΚΥΚΛΟΣ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ

Ο κύκλος των ατμοσφαιρικών ρύπων αποτελείται κυρίως από τους ατμοσφαιρικούς μηχανισμούς της εκπομπής, της μεταφοράς, της διάχυσης, της εναπόθεσης, κλπ. των αέριων και σωματιδιακών ρύπων, αλλά και από οποιοσδήποτε φυσικούς ή χημικούς μετασχηματισμούς αυτών των ρύπων, μεταξύ της πηγής και του αποδέκτη. Έτσι, στην Εικόνα 10 παρουσιάζονται μερικοί από τους σημαντικότερους ατμοσφαιρικούς

μηχανισμούς, που είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά, το μετασχηματισμό και τελικά την απομάκρυνση των εκπεμπόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων.



Εικόνα 11. Απεικόνιση των ατμοσφαιρικών διεργασιών, οι οποίες καθορίζουν τη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων.

Πηγή: Μελάς κ.ά., 2000.

Η μεταφορά είναι μια από τις κύριες διαδικασίες του κύκλου των ατμοσφαιρικών ρύπων. Ειδικότερα, είναι ο μηχανισμός με τον οποίο μεταφέρεται η ατμοσφαιρική ρύπανση, με κύριο μέσο τον άνεμο, από μία πηγή σ' έναν αποδέκτη. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι όταν εκπέμπονται από μια καμινάδα είναι γενικά θερμότεροι από τον περιβάλλοντα αέρα, με αποτέλεσμα τα καυσαέρια, συνήθως με μορφή θύσανου, να ανυψώνονται, σε συνδυασμό και με την αρχική τους ορμή, μέχρι ενός ύψους (Εικόνα 11). Βέβαια, το ύψος αυτό, που ονομάζεται ενεργό ύψος της καμινάδας, είναι υψηλότερο του κατασκευαστικού ύψους της καμινάδας. Έτσι, το ύψος που γίνεται η εκπομπή των ρύπων καθορίζει σημαντικά την ποιότητα του αέρα της περιοχής, γιατί οι συγκεντρώσεις των ρύπων στο έδαφος μειώνονται σε μεγάλο βαθμό, με την αύξηση του ύψους στο οποίο φθάνουν οι εκπεμπόμενοι ρύποι (Μελάς κ.ά., 2000).

Ο μηχανισμός της μεταφοράς των ατμοσφαιρικών ρύπων διακρίνεται: α) στην οριζόντια μεταφορά και β) στην κατάκορη μεταφορά. Η διαδικασία της οριζόντιας μεταφοράς χαρακτηρίζεται ως η μεταφορά των ατμοσφαιρικών ρύπων μακριά από την πηγή με τη βοήθεια του οριζόντιου ανέμου και αποτελεί το σημαντικότερο μηχανισμό

απομάκρυνσης και αραίωσης των ατμοσφαιρικών ρύπων. Ωστόσο, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ χαμηλή ή επικρατούν συνθήκες άπνοιας, τότε η αραίωση των ρύπων είναι χαμηλή και αυξάνονται τα πιθανά επεισόδια ρύπανσης, ιδιαίτερα σε περιοχές με μεγάλο αριθμό εκπομπών. Επίσης, όταν ο εκπεμπόμενος θύσανος φθάσει πάνω από το ύψος των ισχυρών στροβιλώδων κινήσεων, τότε οι ρύποι μπορεί να ταξιδέψουν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις στην ελεύθερη ατμόσφαιρα. Ο εκπεμπόμενος θύσανος από την καμινάδα, δεν παραμένει κυλινδρικού σχήματος (της ίδιας διαμέτρου με την καμινάδα), αλλά λόγω της τύρβης και των στροβίλων αναμειγνύεται στο χώρο με τον περιβάλλοντα αέρα. Έτσι, ο ρυπασμένος θύσανος εξαπλώνεται καθώς μεταφέρεται με τον άνεμο. Αυτή, η κατακόρυφη μεταφορά που χαρακτηρίζεται από τις αναταρακτικές (ανοδικές και καθοδικές) κινήσεις του αέρα και τους τυρβώδεις στρόβιλους, είναι υπεύθυνες και για τη διαπλάτυνση και την αραίωση του θυσάνου. Ο μηχανισμός αυτός της αραίωσης χαρακτηρίζεται σαν ατμοσφαιρική διάχυση και η έντασή του εξαρτάται από το βαθμό ανατάραξης της ατμόσφαιρας. Όταν επικρατούν συνθήκες ευστάθειας τότε, οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μικρότερης κλίμακας και η κατακόρυφη διάχυση πραγματοποιείται αργά. Αντίθετα, όταν επικρατούν συνθήκες μεγάλης αστάθειας τότε, οι τυρβώδεις στρόβιλοι είναι μεγαλύτεροι και η διάχυση χαρακτηρίζεται ως έντονη. Γενικά, η διάχυση των ατμοσφαιρικών ρύπων φτάνει μέχρι ένα ορισμένο ύψος από την επιφάνεια του εδάφους (~1 χιλιόμετρο), που ονομάζεται ύψος ανάμειξης (Ζάνης, 2014; Μελάς κ.ά., 2000).

Το σύνολο αυτών των δύο παραπάνω διαδικασιών (μηχανισμοί της ανάμειξης λόγω τύρβης και της εξάπλωσης του ρυπασμένου θυσάνου) χαρακτηρίζεται σαν διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων. Όπως προαναφέρθηκε, ένα μέρος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι δυνατόν να διαφύγει από το στρώμα ανάμειξης στην ελεύθερη ατμόσφαιρα. Στην ελεύθερη ατμόσφαιρα, η απουσία αναταρακτικών κινήσεων, έχει σαν αποτέλεσμα η κατακόρυφη μεταφορά των ρύπων να γίνεται με πολύ μικρότερους ρυθμούς. Όμως, στην περιοχή αυτή οι αντίστοιχοι ατμοσφαιρικοί μηχανισμοί είναι μεγαλύτερης χωρικής και χρονικής κλίμακας με αποτέλεσμα οι ρύποι που διαφεύγουν στην ελεύθερη ατμόσφαιρα να επηρεάζουν μεγάλες περιοχές.

Με τον όρο μετασχηματισμό ορίζουμε την παραγωγή ή καταστροφή ενός δεδομένου στοιχείου διαμέσου φυσικών (όπως η ξηρή και η υγρή εναπόθεση) και χημικών (όπως

χημικές αντιδράσεις) διαδικασιών. Έτσι, ένας μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για την απομάκρυνση των εκπεμπόμενων ατμοσφαιρικών ρύπων, κατά το χρόνο της παραμονής τους στην ατμόσφαιρα, είναι οι διάφοροι φυσικοί και χημικοί μετασχηματισμοί, που υφίστανται οι ρύποι λόγω αντιδράσεων, τόσο μεταξύ τους, όσο και με τα συστατικά της καθαρής ατμόσφαιρας. Στην ατμόσφαιρα γίνεται ένα σύνολο αντιδράσεων, καθώς σ' αυτήν διοχετεύονται χημικά ενεργά συστατικά και παράγονται διάφορες καινούργιες ουσίες από αντιδράσεις μεταξύ αέριων, υγρών και σωματιδίων, που αντιδρούν μεταξύ τους. Συνήθως, πρόκειται για νέους δευτερογενείς ρύπους, ενώ οι καινούργιες, αυτές, ουσίες μπορεί, ορισμένες φορές, να μην είναι αέριοι ρύποι. Τέλος, μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα χημικών μετασχηματισμών στην ατμόσφαιρα είναι οι φωτοχημικές αντιδράσεις φωτόλυσης κάποιων στοιχείων, οι χημικές αντιδράσεις οξείδωσης και οι ετερογενείς αντιδράσεις πάνω σε νεφοσταγονίδια και αιωρούμενα σωματίδια (Ζάνης, 2014).

Ο μηχανισμός της μεταφοράς των ατμοσφαιρικών ρύπων από την ατμόσφαιρα στο έδαφος ονομάζεται εναπόθεση. Η διαδικασία της εναπόθεσης είναι μία φυσική διαδικασία απομάκρυνσης των αέριων ρύπων από την ατμόσφαιρα και τη χωρίζουμε σε τρεις διαφορετικούς τύπους εναπόθεσης: 1) τη βαρυτική καθίζηση (που είναι η πτώση λόγω βαρύτητας των σχετικά μεγάλων και βαρέων σωματιδίων), 2) την ξηρή εναπόθεση (που υφίστανται τα μικρά σωματίδια και οι αέριες ενώσεις, που ακολουθούν λόγω αδράνειας τις κινήσεις του αέρα και εάν έρθουν σε επαφή με την υποκείμενη επιφάνεια κατακρατούνται) και 3) την υγρή εναπόθεση που συμβαίνει σε περίπτωση υετού (αυτό μπορεί να συμβεί είτε με απόπλυση, δηλαδή σάρωση των αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα από τη βροχή ή το χιόνι, είτε με πρόσληψη των αέριων ρύπων, σ' ένα προηγούμενο στάδιο, από τα μικρά σταγονίδια του νέφους, που αργότερα μπορεί να ενωθούν μεταξύ τους δημιουργώντας σταγόνες βροχής) (Μελάς κ.ά., 2000).

Γενικά, είναι σημαντικό να γίνεται διάκριση των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, από την αποτιθέμενη ρύπανση με τις αντίστοιχες επιπτώσεις της, εξαιτίας του ότι η κλίμακα των δύο φαινομένων είναι αρκετά διαφορετική. Οι άμεσες επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι περισσότερο ένα τοπικό πρόβλημα και οι επιδράσεις της είναι συνήθως μεγαλύτερες στις περιοχές που βρίσκονται κοντά στην πηγή της ρύπανσης

(φωτοχημική αιθαλομίχλη αστικών περιοχών, κλπ). Αντίθετα, η επίδραση της απόθεσης εξαπλώνεται σε μεγάλες αποστάσεις, δηλαδή πολλές εκατοντάδες χιλιόμετρα (όξινη βροχή, κλπ).

Συμπερασματικά, ο κύκλος των ατμοσφαιρικών ρύπων είναι μία ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία, που εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι δρουν σε διαφορετικές κλίμακες χρόνου και χώρου. Οι παράγοντες αυτοί είναι (Ζάνης, 2008):

- i) τα μέσης και τοπικής κλίμακας συστήματα κυκλοφορίας, που συνδέονται με τα ιδιαίτερα τοπογραφικά χαρακτηριστικά κάθε τόπου (θαλάσσια-απόγειος αύρα, αύρα κοιλάδας-βουνού, κατακόρυφη μεταφορά λόγω θέρμανσης στους πρόποδες ορεινών όγκων, κλπ),
- ii) η συνοπτική μετεωρολογική κατάσταση στην ατμόσφαιρα (κυκλωνική ή αντικυκλωνική κατάσταση, μέτωπα, ταχύτητα του συνοπτικού ανέμου, κλπ),
- iii) η γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας (που σχετίζεται με τη μεταφορά ρύπων σε παγκόσμια κλίμακα),
- iv) ο βαθμός ανατάραξης της ατμόσφαιρας και η αντίστοιχη σχετική ένταση των στροβίλων, που καθορίζουν τη διάχυση των ατμοσφαιρικών ρύπων,
- v) ο χρόνος ζωής των ατμοσφαιρικών ρύπων, που εξαρτάται από το ρυθμό των φυσικών και χημικών μετασχηματισμών των ρύπων ή την καταστροφή τους,
- vi) η χωρική κατανομή και η ένταση των πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

2.4 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΡΥΠΩΝ

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων μεταβάλλονται με το χρόνο σε κάθε περιοχή. Ειδικότερα, στις αστικές περιοχές, τα επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης συνήθως, οφείλονται στις επικρατούσες δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες, που περιορίζουν τη διάχυση και μεταφορά των ρύπων και παρόλο που οι ανθρωπογενείς εκπομπές ρύπων είναι κυρίως υπεύθυνες για τα υψηλά επίπεδα ρύπανσης, τα επεισόδια αυτά συνήθως δεν προκαλούνται από ξαφνικές μεταβολές αυτών των εκπομπών

(Ζερεφός, 1984; Μουσιόπουλος, 1997). Οι κυριότερες μετεωρολογικές παράμετροι, που επιδρούν με άμεσο ή έμμεσο τρόπο, στον κάθε ατμοσφαιρικό ρύπο και διαμορφώνουν (αυξάνουν ή μειώνουν), τοπικά, τη συγκέντρωσή του και επομένως τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μια περιοχή είναι οι:

- 1) Άνεμος (ταχύτητα και διεύθυνση),
- 2) Θερμοκρασία και Σχετική Υγρασία του αέρα,
- 3) Οριακό στρώμα,
- 4) Ηλιακή Ακτινοβολία,
- 5) Ατμοσφαιρική Ευστάθεια και Θερμοκρασιακή Αναστροφή
- 6) Υετός,
- 7) Νέφωση,
- 8) Τοπικά συστήματα κυκλοφορίας
- 9) Η αστική θερμική νησίδα (ΑΘΝ)

1) Άνεμος (ταχύτητα και διεύθυνση)

Η ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου είναι από τις κυριότερες μετεωρολογικές παραμέτρους που επηρεάζουν την ατμοσφαιρική ρύπανση μιας περιοχής. Η ταχύτητα του ανέμου καθορίζει το ρυθμό, που οι ατμοσφαιρικοί ρύποι απομακρύνονται από την πηγή εκπομπής τους, καθώς όσο αυξάνει η ταχύτητα του ανέμου, τόσο μειώνεται η συγκέντρωση των ρύπων, ενώ η άπνοια ή οι άνεμοι χαμηλής έντασης δεν ευνοούν τη διασπορά των ρύπων και άρα οδηγούν στην αύξηση των επιπέδων ρύπανσης (Κασσωμένος, 2017; Μελάς κ.ά., 2000). Η διεύθυνση του ανέμου καθορίζει την πορεία που ακολουθεί ο άνεμος και κατ' επέκταση προσδιορίζει την περιοχή προς την οποία κατευθύνονται οι ατμοσφαιρικοί ρύποι (ιδιαίτερα αν προέρχονται από σημειακές πηγές) και επομένως σχετίζεται άμεσα με την επιδείνωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας μιας περιοχής. Επίσης, η μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου μπορεί να αλλάξει σημαντικά τα επίπεδα της συγκέντρωσης των ρύπων, γιατί διαχέεται η ατμοσφαιρική ρύπανση σε μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή, με ευεργετικές συνέπειες στις τοπικές συγκεντρώσεις των ρύπων, που έτσι γίνονται χαμηλότερες (Ζάνης, 2014; Μελάς, 2007). Ορισμένες μετεωρολογικές συνθήκες προκαλούν ισχυρούς ανέμους, ενώ άλλες σχετίζονται με

ασθενείς ανέμους. Έτσι, για παράδειγμα στο κέντρο βαρομετρικά υψηλών (αντικυκλώνων) ο καιρός είναι ηλιόλουστος και οι άνεμοι πολύ ασθενείς. Επομένως, σε περιοχές που βρίσκονται συχνά κάτω από την επίδραση στάσιμων αντικυκλώνων, οι συνθήκες διασποράς δεν είναι καλές και όταν αυτές συνδυάζονται με αυξημένες εκπομπές ατμοσφαιρικής ρύπανσης (μεγάλες αστικές ή βιομηχανικές περιοχές), αυξάνει η πιθανότητα εμφάνισης ενός επεισοδίου ρύπανσης (Κασσωμένος, 2017).

2) Θερμοκρασία και Σχετική Υγρασία του αέρα

Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας συμβάλλει στη διαμόρφωση των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Ειδικότερα, καθορίζει την πορεία των φωτοχημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα και την ταχύτητά τους, αποτέλεσμα που οδηγεί στην καταστροφή των υπαρχόντων αέριων ρύπων ή στη δημιουργία και στη συσσώρευση νέων ρύπων σε μια περιοχή (Κουιμτζής και Σαμαρά, 1994). Επιπλέον, οι αλλαγές στη θερμοκρασία προκαλούνται εξαιτίας της μεταβολής της ροής της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία συνδέεται με την ανάπτυξη του οριακού στρώματος και τη διασπορά των αερίων ρύπων. Επίσης, οι υψηλές θερμοκρασίες του αέρα σχετίζονται με ανέφελους ουρανούς και βραδέως κινούμενα συστήματα ατμοσφαιρικής πίεσης και γενικότερα συνθήκες στασιμότητας και μεταφοράς αερίων μαζών σε χαμηλότερα ύψη (καταβύθιση του αέρα από ανώτερα στρώματα) (Μελάς, 1997).

Η σχετική υγρασία (RH) του ατμοσφαιρικού αέρα είναι ο λόγος της μάζας των υδρατμών, που περιέχονται σε δοσμένο όγκο υγρού αέρα προς τη μάζα των υδρατμών, που θα περιείχε αυτός ο όγκος αέρα, αν ήταν κορεσμένος σε υδρατμούς, κάτω από τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (Φλόκας, 1997). Η σχετική υγρασία του αέρα είναι ένα μέγεθος που έχει άμεση σχέση με τη θερμοκρασία του αέρα και συγκεκριμένα η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα συνήθως συνεπάγεται τη μείωση της σχετικής υγρασίας του αέρα. Επίσης, η υγρασία του περιβάλλοντος επηρεάζει την ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα, είτε μέσω της απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τη γη (που διαφορετικά, αν δηλαδή η ατμόσφαιρα ήταν ξηρή και χωρίς νέφωση, θα διέφευγε στο διάστημα), είτε μέσω της εκπομπής της λανθάνουσας θερμότητας συμπύκνωσης των υδρατμών, όταν η θερμοκρασία πέφτει στη θερμοκρασία δρόσου (Χαϊνά, 2014). Η μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα επηρεάζει τα

επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μιας περιοχής, αλλά σε μικρό βαθμό, συγκριτικά με άλλες μετεωρολογικές παραμέτρους. Η αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα οδηγεί στην αύξηση της ποσότητας των υδρατμών στην ατμόσφαιρα, οι οποίοι μέσω μιας σειράς χημικών αντιδράσεων αυξάνουν ή μειώνουν, έμμεσα, τη συγκέντρωση ορισμένων ατμοσφαιρικών ρύπων.

3) Οριακό Στρώμα

Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ) είναι το κατώτερο τμήμα της τροπόσφαιρας που συνορεύει με την επιφάνεια της γης και το οποίο επηρεάζεται ευθέως από την κατάσταση της επιφάνειας μέσω των τυρβώδων ροών ορμής, θερμότητας και υγρασίας. Η απόκριση του οριακού στρώματος στις εξωτερικές επιδράσεις, όπως είναι η αντίσταση τριβής, η μεταφορά θερμότητας και η εξατμισοδιαπνοή, γίνεται σε χρονικές κλίμακες λίγων ωρών ή μικρότερες (Ζάνης, 2014; Μελάς, 2007). Επειδή η κατακόρυφη αραίωση των ατμοσφαιρικών ρύπων συμβαίνει μέσα στο ΑΟΣ, το ύψος του (συνήθως της τάξης του 1-2km), είναι ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει άμεσα τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μιας περιοχής (Ζιώμας και Ρεμουντάκη, 2003; Κασσωμένος, 2017). Το υπόλοιπο τμήμα της τροπόσφαιρας (ελεύθερη ατμόσφαιρα, πάνω από το ΑΟΣ) επηρεάζεται σε σημαντικά μικρότερη κλίμακα. Σε πολλές περιπτώσεις, ρυπασμένης ατμόσφαιρας, τα δύο στρώματα (ΑΟΣ και ελεύθερη ατμόσφαιρα) μπορούν να γίνουν ορατά, ακόμη και δια γυμνού οφθαλμού, εξαιτίας της περιορισμένης ορατότητας (Ζάνης, 2014). Το ΑΟΣ σχηματίζεται σαν αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην ατμόσφαιρα και την υποκείμενη στερεά ή υγρή επιφάνεια μέσω των τυρβώδων στροβίλων, που είναι υπεύθυνοι για την κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας, υδρατμών, ορμής και ρύπων. Η επίδραση αυτής της μεταφοράς είναι αποτελεσματικότερη κατά τη διάρκεια της ημέρας (χρονικές κλίμακες της τάξης της μιας ώρας ή μικρότερες) και πιο αργή τη νύχτα (χρονικές κλίμακες πολλών ωρών) (Μελάς κ.ά., 2000). Όσο πιο ψηλά εκτείνεται το ΑΟΣ, τόσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων (που γίνεται με τη βοήθεια των τυρβωδών στροβίλων) και άρα οι συγκεντρώσεις αυτών των ρύπων κοντά στο έδαφος είναι μικρότερες. Αντίθετα, όταν το ύψος του ΑΟΣ είναι σχετικά μικρότερο, τότε και η αραίωση των ατμοσφαιρικών ρύπων είναι μικρότερη και επομένως οι συγκεντρώσεις τους κοντά στο έδαφος θα είναι μεγαλύτερες

(Παπαναστασίου, 2007). Το ύψος του οριακού στρώματος μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά από τις μεταβολές των τιμών της θερμοκρασίας του αέρα καθ' ύψος, αφού το ύψος ανάμιξης ταυτίζεται με τη βάση της θερμοκρασιακής αναστροφής (Φλόκας, 1997). Όμως, αυτές οι μετρήσεις της θερμοκρασίας δεν είναι πάντα αντιπροσωπευτικές, αφού ορισμένες φορές σε συνθήκες μεγάλης αστάθειας αλλοιώνονται από την ύπαρξη των θερμικών (ανοδικών κινήσεων του αέρα με μεγάλες ταχύτητες).

4) Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα επίπεδα των ατμοσφαιρικών ρύπων, αφενός με την καταλυτική συμβολή στην πραγματοποίηση μεγάλου αριθμού φωτοχημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα την παραγωγή δευτερογενών ρύπων (όζον, αιωρούμενα σωματίδια κλπ) και αφετέρου σχετίζεται με την ανάπτυξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (Ζερεφός, 1984). Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη εξαρτάται από το ύψος του ήλιου και από την απορροφητικότητα της ατμόσφαιρας. Ειδικότερα, η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει την κινητική ενέργεια των τυρβωδών στροβίλων, που καθορίζει το ύψος που θα φτάσουν οι στρόβιλοι αυτοί, το οποίο και ταυτίζεται με το ύψος του ΑΟΣ. Κατά τη διάρκεια μιας κανονικής (συνηθισμένης) ημέρας η ηλιακή ακτινοβολία είναι πιο μεγάλη τις μεσημεριανές ώρες, με συνέπεια η τυρβώδης κινητική ενέργεια να είναι μεγάλη και άρα η τύρβη πιο έντονη, οπότε το ΑΟΣ είναι πιο υψηλό. Αντίθετα, το βράδυ, η τυρβώδης κινητική ενέργεια ελαττώνεται σημαντικά (ή ακόμη και μηδενίζεται), με αποτέλεσμα να υπάρχουν μικροί στρόβιλοι (ή να μην υπάρχουν καθόλου), οπότε το ύψος του ΑΟΣ είναι σημαντικά μικρότερο (Παπαναστασίου, 2007).

5) Ατμοσφαιρική ευστάθεια και θερμοκρασιακή αναστροφή

Μέσα στην τροπόσφαιρα η θερμοκρασία του αέρα, γενικά, μειώνεται με το ύψος. Ο μέσος ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας με το ύψος, που ονομάζεται θερμοβαθμίδα, είναι 6.5 K/km (Φλόκας, 1997). Όμως, η ακριβής τιμή της, στο χώρο και στο χρόνο, παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές. Ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας με το ύψος είναι καθοριστικός σε πολλά καιρικά φαινόμενα και στη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων (Ζερεφός, 1984).

Ευστάθεια ονομάζεται η ευκολία με την οποία μετακινείται κατακόρυφα μια μικρή μάζα αέρα (πακέτο αέρα) στον περιβάλλοντα αέρα. Ευσταθές ονομάζουμε ένα ρευστό εάν ένα πακέτο τείνει να επιστρέψει στην αρχική του θέση, ύστερα από μια μικρή κατακόρυφη αδιαβατική μετατόπιση (προς τα πάνω ή προς τα κάτω). Αντίθετα, το ρευστό είναι σε κατάσταση αστάθειας όταν η αρχική μικρή μετατόπιση του πακέτου ενισχύεται, με αποτέλεσμα την περαιτέρω απομάκρυνσή του από την αρχική θέση. Τέλος, αν η μετατόπιση ούτε ενισχύεται, ούτε καταστέλλεται, τότε η κατάσταση λέγεται ουδέτερη (Μελάς κ.ά., 2000). Μεταξύ άλλων, η ατμοσφαιρική ευστάθεια επιδρά στην ανάπτυξη των νεφών. Έτσι, σε ευσταθή στρώματα αέρα οι κατακόρυφες κινήσεις καταστέλλονται και τα σύννεφα αναπτύσσουν οριζόντια στρωμάτωση, ενώ σε ασταθή ατμόσφαιρα οι κατακόρυφες κινήσεις ενισχύονται και τα σύννεφα αναπτύσσονται κατακόρυφα (Μελάς, 2007). Επίσης, σε περιοχές με ρύπανση, σε ευσταθή ατμόσφαιρα παρουσιάζονται συνθήκες κακής ορατότητας, λόγω κακής διασποράς των ατμοσφαιρικών ρύπων και ιδιαίτερα των σωματιδίων, ενώ σε ασταθή ατμόσφαιρα παρουσιάζεται σχετικά καλή ορατότητα εξαιτίας καλής διασποράς των ατμοσφαιρικών ρύπων.

Επομένως, οι κατακόρυφες κινήσεις του αέρα επηρεάζουν την ανάμειξη των ρύπων και συγκεκριμένα, οι ακανόνιστες ανοδικές και καθοδικές κινήσεις του αέρα, που επικρατούν στο στρώμα ανάμειξης, μπορούν γρήγορα και αποτελεσματικά να μεταφέρουν και να αναμείξουν τους ατμοσφαιρικούς ρύπους μειώνοντας τα επίπεδα της συγκέντρωσής τους. Οι κατακόρυφες κινήσεις στην ατμόσφαιρα μπορεί να προκληθούν από πολλές αιτίες. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι, όταν ο αέρας αναγκάζεται να ανέλθει εξαιτίας κάποιου τοπογραφικού εμπόδιου (ορογραφική ανύψωση) ή όταν εμφανίζονται ανοδικές/καθοδικές κινήσεις, που αναπτύσσονται σε συνδυασμό με βαρομετρικά χαμηλά/υψηλά (σύγκλιση/απόκλιση) ή όταν παρουσιάζεται συναγωγή (στη βιβλιογραφία αναφέρεται και σαν κατακόρυφη μεταφορά) που οφείλεται στη διαβατική θέρμανση του αέρα από το έδαφος (Μελάς, 2007). Όταν η ατμόσφαιρα τείνει να καταστείλει αυτές τις κινήσεις τότε, επικρατεί ευστάθεια, ενώ όταν αυτές οι κινήσεις ενισχύονται, τότε επικρατεί αστάθεια. Σύμφωνα με τη μεταβολή της θερμοκρασίας καθ' ύψος, όταν ο θερμός αέρας επικαλύπτει τον ψυχρό, τότε επικρατούν συνθήκες ευστάθειας, ενώ όταν ο ανερχόμενος ψυχρός αέρας βρεθεί σε ένα θερμότερο περιβάλλον και λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητάς του, επιστρέφει στην αρχική του θέση.

Αντίστοιχα, αν ο θερμότερος αέρας αναγκασθεί να κατέρθει, θα βρεθεί σε ψυχρότερο περιβάλλον και λόγω άνωσης θα επανέρθει στην αρχική του θέση. Αντίστοιχα, όταν η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται με το ύψος, τότε επικρατούν συνθήκες αστάθειας και οι κατακόρυφες κινήσεις του αέρα ενισχύονται (Μελάς κ.ά., 2000). Γενικά, η ατμοσφαιρική ευστάθεια μεταβάλλεται τόσο γεωγραφικά όσο και χρονικά.

Θερμοκρασιακή αναστροφή ονομάζεται το φαινόμενο, στο οποίο η θερμοκρασία τοπικά αυξάνεται με την αύξηση του ύψους (Ζερεφός, 1984). Συνήθως, η ατμόσφαιρα παρουσιάζει ευσταθή ισορροπία στο στρώμα της αναστροφής, με αποτέλεσμα να μην ευνοούνται ανοδικές ή καθοδικές κινήσεις αερίων μαζών. Έτσι, μέσα σ' ένα στρώμα αναστροφής, η κατακόρυφη διάχυση των ρύπων είναι περιορισμένη (οι κατακόρυφες κινήσεις καταστέλλονται σε σύγκριση με τις οριζόντιες κινήσεις) (Κασσωμένος, 2017). Το γεγονός αυτό μπορεί να αυξήσει τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μια περιοχή, εξαιτίας του εγκλωβισμού ρύπων στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (Ζάνης, 2014). Βέβαια, αυτό δεν οδηγεί πάντα σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων, ιδιαίτερα όταν οι ρύποι εκπέμπονται σε μεγάλο ύψος (Μελάς, 2007). Οι κυριότεροι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν στην εμφάνιση του φαινομένου της θερμοκρασιακής αναστροφής είναι:

- Αναστροφή ακτινοβολίας/νυχτερινές αναστροφές,
- Αναστροφή κατάπτωσης/καθίζησης,
- Μετωπική Αναστροφή,
- Αναστροφή μεταφοράς.

Ειδικότερα, οι θερμοκρασιακές αναστροφές ακτινοβολίας δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν τα στρώματα αέρα κοντά στο έδαφος ψύχονται λόγω της έντονης εκπομπής γήινης (υπέρυθρης) ακτινοβολίας από την εδαφική επιφάνεια και για αυτό, αποκτούν μικρότερη θερμοκρασία από τα υπερκείμενα στρώματα αέρα (Ζερεφός, 1984). Ο συνδυασμός του ψυχρού αέρα κοντά στο έδαφος και του θερμού αέρα σε μεγαλύτερα ύψη δημιουργούν ένα στρώμα αναστροφής. Έτσι, σε ένα ύψος μερικών εκατοντάδων μέτρων από το έδαφος εκτείνεται ένα θερμότερο στρώμα αέρα, το οποίο εμποδίζει την άνοδο των αερίων ρύπων προς τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των αερίων ρύπων στο στρώμα,

που υπάρχει ανάμεσα στο έδαφος και το στρώμα της θερμοκρασιακής αναστροφής. Οι αναστροφές ακτινοβολίας παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ένταση κατά τις πρωινές ώρες (ανατολή ήλιου) και σχηματίζονται κυρίως κατά τη διάρκεια ανέφελων νυχτών με χαμηλούς ανέμους ή άπνοιες (Κασσωμένος, 2017; Μελάς κ.ά., 2000). Η κατάπτωση (καθίζηση) του αέρα μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό αναστροφών κατάπτωσης εξαιτίας, είτε κατάπτωσης αέρα σε αντικυκλώνες, είτε κατάπτωσης αέρα στην υπήνεμη πλευρά τοπογραφικών εμποδίων. Η αργή καθίζηση (κατάπτωση) στρωμάτων αέρα, σε περιοχές με υψηλή πίεση, προκαλεί την αδιαβατική τους θέρμανση, με αποτέλεσμα το σχηματισμό υπερψωμένων αναστροφών στην ελεύθερη ατμόσφαιρα (Ζάνης, 2014; Μελάς, 2007). Το ψυχρό μέτωπο είναι η προπορευόμενη οριακή επιφάνεια μιας ψυχρής αέριας μάζας, που κινούμενη εκτοπίζει μια θερμή αέρια μάζα (Φλόκας 1997). Μια μετωπική αναστροφή προκύπτει στη ζώνη επαφής μεταξύ δύο αερίων μαζών με πολύ διαφορετικές θερμοκρασίες, υγρασίες και πιέσεις. Στο ψυχρό μέτωπο ο ψυχρός/πυκνός αέρας εξαναγκάζει τον αέρα στη ζεστή αέρια μάζα να ανέλθει δημιουργώντας μια μετωπική αναστροφή (ζεστός αέρας επάνω από τον ψυχρό). Ο ανερχόμενος θερμός αέρας οδηγεί σε συμπίκνωση των υδρατμών και βροχή (Κασσωμένος, 2017). Μια αναστροφή μεταφοράς, σχηματίζεται όταν θερμός αέρας ρέει πάνω από μια επιφάνεια με ψυχρότερο αέρα. Η αναστροφή μπορεί να είναι επιφανειακή, όταν ο θερμός αέρας ρέει πάνω από ψυχρές πεδιάδες, ή να είναι αναστροφή ύψους. Στην περίπτωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης περιβαλλοντική σημασία έχει κυρίως η δημιουργία μετωπικής θερμοκρασιακής αναστροφής από το τη διέλευση θερμού μετώπου, διότι αυτά (τα θερμά μέτωπα) έχουν μικρή κλίση και κινούνται πιο αργά από τα ψυχρά μέτωπα, με αποτέλεσμα σε μικρό ύψος και επάνω από εκτεταμένη επιφάνεια να εμφανίζεται αναστροφή (Ζάνης, 2014).

6) Υετός

Ο υετός, σ' όλες τις μορφές του (χιόνι, βροχή, κλπ), επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς με τη διαδικασία της υγρής απόθεσης μεταφέρει τους αιωρούμενους ατμοσφαιρικούς ρύπους στο έδαφος και τους απομακρύνει από την ατμόσφαιρα (Κουιμτζής και Σαμαρά, 1994). Με τον όρο υγρή απόθεση θεωρείται η μεταφορά αερίων και σωματιδιακών ρύπων στο έδαφος (ή στους ωκεανούς),

μέσω κάθε μορφής υετού. Τα είδη υγρής απόθεσης είναι η απόπλυση, που συμβαίνει όταν οι ρύποι που βρίσκονται κάτω από ένα σύννεφο σαρώνονται από κάποια μορφή υετού και μεταφέρονται μαζί του στο έδαφος και η βροχόπλυση ή χιονόπλυση, που γίνεται όταν οι ρύποι που βρίσκονται μέσα στο σύννεφο συσσωματώνονται με τα μικρά σταγονίδια του νέφους, τα όποια στη συνέχεια ενώνονται μεταξύ τους και δημιουργούν υετό (Φλόκας, 1997). Έτσι, με τους παραπάνω μηχανισμούς οι υδατοδιαλυτοί ρύποι εγκλωβίζονται μέσα στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, παρασύρονται από αυτά και μεταφέρονται στη γήινη επιφάνεια. Έχει εκτιμηθεί ότι 70-80% περίπου των ρύπων αποτίθεται στο έδαφος εξαιτίας μιας δυνατής και μεγάλης σε διάρκεια βροχής (Χαϊνά, 2014). Επομένως, η υγρή απόθεση συμβάλλει σημαντικά στην απομάκρυνση των ρύπων από την ατμόσφαιρα και άρα στη μείωση των επιπέδων των συγκεντρώσεων πολλών ατμοσφαιρικών ρύπων.

7) Νέφωση

Η αυξημένη νέφωση σε μια περιοχή, επηρεάζει σημαντικά την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους, αφού μπορεί, είτε να σκεδάσει, είτε να απορροφήσει, είτε να ανακλάσει διάφορα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, το υψηλό ποσοστό νέφωσης εμποδίζει μεγάλο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας να φτάσει στα χαμηλά στρώματα της τροπόσφαιρας και στο έδαφος. Πρέπει να σημειωθεί ότι το 30% της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα επιστρέφει αμέσως στο διάστημα από ανάκλαση και σκέδαση. (Κασσωμένος, 2017). Ωστόσο, σε ορισμένες χημικές αντιδράσεις, όπως στις φωτοχημικές αντιδράσεις, είναι καταλυτική η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, γιατί χωρίς αυτήν επηρεάζεται σημαντικά ο κύκλος αυτών των αντιδράσεων και άρα τα επίπεδα διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι, ότι η αυξημένη νέφωση, οδηγεί στη μείωση της συγκέντρωσης του όζοντος σε διάφορες περιοχές, ενώ στην περίπτωση των κυκλωνικών συστημάτων (υφέσεων), οδηγεί στη σημαντική μείωση της θερμοκρασίας του αέρα, η οποία είναι καθοριστικής σημασίας για την ύπαρξη και την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων στην ατμόσφαιρα, που είναι υπεύθυνες για την παραγωγή δευτερογενών αέριων ρύπων (Κουιμτζής και Σαμαρά, 1994; Παπαναστασίου, 2007).

8) Τοπικά συστήματα κυκλοφορίας

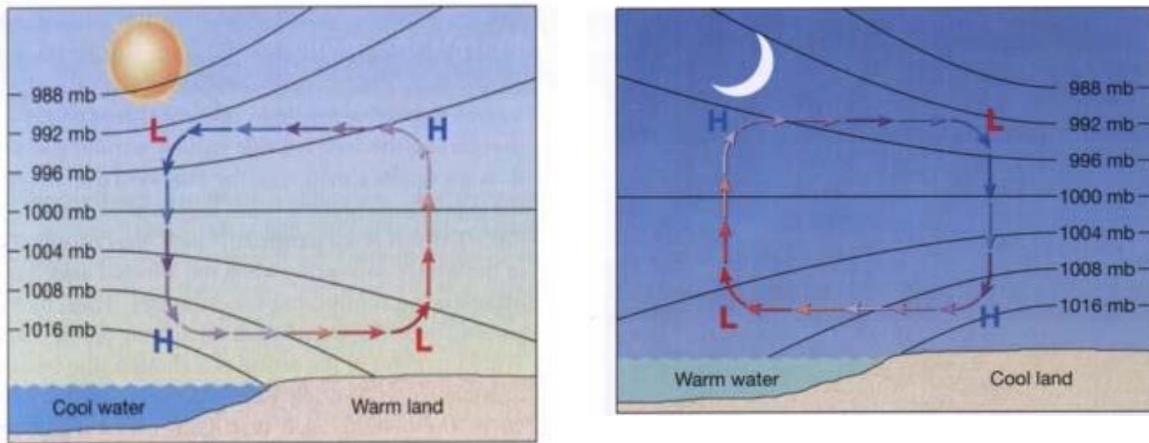
Οι περιοχές επιφανειακής υψηλής και χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσης, που δημιουργούνται καθώς η ατμόσφαιρα, είτε ψύχεται, είτε θερμαίνεται, ονομάζονται θερμικό υψηλό και θερμικό χαμηλό. Τα τοπικά συστήματα θερμικής πίεσης είναι γενικά ασθενή, εξασθενούν με το ύψος και ως επί το πλείστον διατηρούνται από τοπική θέρμανση και ψύξη. Αυτές οι τοπικές θερμικές κυκλοφορίες είναι συστήματα ανέμων, που προκαλούνται από τη διαφορική θέρμανση, η οποία επιτρέπει τοπικά τον ψυχρό αέρα να βυθίζεται και το θερμό αέρα να ανυψώνεται. Τα τοπικά συστήματα κυκλοφορίας επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό, τόσο το τοπικό κλίμα, όσο και το ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τοπικών συστημάτων κυκλοφορίας είναι η θαλάσσια και η απόγειος αύρα και οι αναβατικοί και οι καταβατικοί άνεμοι.

α) Θαλάσσια και απόγειος αύρα

Η θαλάσσια αύρα είναι ένα είδος θερμικής κυκλοφορίας. Οι άνισοι ρυθμοί θέρμανσης του εδάφους και του νερού προκαλούν αυτούς τους παράκτιους ανέμους μέσης κλίμακας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το έδαφος θερμαίνεται πιο γρήγορα από το γειτονικό νερό και η έντονη θέρμανση του αέρα πάνω από το έδαφος παράγει ένα ασθενές θερμικό χαμηλό. Ο αέρας πάνω από το νερό παραμένει πιο δροσερός από τον αέρα πάνω από το έδαφος. Έτσι, ένα ασθενές θερμικό υψηλό υπάρχει πάνω από το νερό. Το συνολικό αποτέλεσμα αυτής της διαφορετικής βαθμίδας πίεσης είναι μια θαλάσσια αύρα που πνέει από τη θάλασσα προς την ξηρά (Εικόνα 12α) (Μπαλαφούτης, 2010). Τη νύχτα, το έδαφος κρυώνει πιο γρήγορα από το νερό. Ο αέρας πάνω από το έδαφος γίνεται πιο ψυχρός από τον αέρα πάνω από το νερό, παράγοντας μια βαθμίδα πίεσης. Έτσι, με υψηλότερη επιφανειακή πίεση πάνω από την ξηρά, ο άνεμος αντιστρέφεται και γίνεται απόγειος αύρα, μια αύρα που πνέει από το έδαφος προς το νερό (Εικόνα 12β) (Κασσωμένος, 2017; Μπαλαφούτης, 2010).

Επομένως, ο μηχανισμός της θαλάσσιας αύρας αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ ο μηχανισμός της απόγειου αύρας κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ειδικότερα, κατά τη διάρκεια της ημέρας και όταν επικρατούν ασθενείς άνεμοι και έντονη ηλιοφάνεια, η ξηρά θερμαίνεται γρηγορότερα από τη θάλασσα με αποτέλεσμα να υπάρχει αντισταθμιστική ροή, δηλαδή κίνηση αερίων μαζών από τη θάλασσα προς την

ξηρά, κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Στη συνέχεια, παρατηρείται άνοδος αερίων μαζών πάνω από την ξηρά και κάθοδος αερίων μαζών πάνω από τη θάλασσα και κατ' επέκταση, σε μεγαλύτερο ύψος, παρατηρείται απόγειος ροή επιστροφής. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι συνθήκες αντιστρέφονται οπότε οι δυνάμεις έχουν την αντίθετη φορά και προκύπτει η ατμοσφαιρική κυκλοφορία της απόγειου αύρας (Ζερεφός, 1984). Η θαλάσσια αύρα αναπτύσσεται καλύτερα όταν υπάρχουν μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ εδάφους και νερού, ιδιαίτερα όταν οι συνοπτικοί άνεμοι είναι ασθενείς. Τέτοιες συνθήκες επικρατούν όλο το χρόνο σε πολλές τροπικές περιοχές, ενώ στα μεσαία γεωγραφικά πλάτη οι θαλάσσιες αύρες είναι πάντα ανοιξιάτικα και καλοκαιρινά φαινόμενα. Έτσι, η θαλάσσια αύρα εμφανίζεται κυρίως κατά του καλοκαιρινούς μήνες με αντικυκλωνικό καιρό και χωρίς ισχυρούς ανέμους. Η μεγαλύτερη βαθμίδα της θερμοκρασίας αναπτύσσεται κοντά στο όριο της θάλασσας με την ξηρά οπότε συνήθως οι ισχυρότεροι άνεμοι αναπτύσσονται κοντά στην παράκτια περιοχή και μειώνονται στην ενδοχώρα. Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ ξηράς και θάλασσας εμφανίζεται συνήθως τις απογευματινές ώρες, οπότε αυτές τις ώρες η ταχύτητα της θαλάσσιας αύρας φθάνει τη μέγιστη τιμή της (Μελάς, 2007).



Εικόνα 12. Σχηματικές απεικονίσεις της θαλάσσιας αύρας (αριστερά) και της απόγειος αύρας (δεξιά).

Πηγή: Μπαλαφούτης, 2010.

Η τυπική κατακόρυφη και οριζόντια διάσταση του κυττάρου κυκλοφορίας της θαλάσσιας αύρας είναι της τάξης του 1km και των 30km, αντίστοιχα και τυπικές τιμές της οριζόντιας ταχύτητας τα 2-5m/s. Η διεύθυνση της θαλάσσιας αύρας είναι κάθετη ως προς την ακτή και μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 40Km στην ενδοχώρα, όταν η θερμοκρασιακή διαφορά ξηράς - θάλασσας είναι μεγάλη και το ανάγλυφο είναι ομαλό. Το ύψος (συνήθως μικρότερο από 100m) και η ένταση (τυπικές τιμές της οριζόντιας ταχύτητας είναι <2m/s) της απόγειας αύρας είναι πολύ μικρότερα από τα αντίστοιχα της θαλάσσιας αύρας (Ζάνης, 2014).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η θαλάσσια αύρα μεταφέρει δροσερό αέρα από τη θάλασσα στην ξηρά και ειδικά στις παράκτιες αστικές περιοχές μπορεί να απομακρύνει τους ατμοσφαιρικούς ρύπους προς την ενδοχώρα. Ακόμη, η ύπαρξη πηγών εκπομπής ατμοσφαιρικών ρύπων σε παράκτιες περιοχές μπορεί να προκαλέσει σημαντική συγκέντρωση ρύπων, στα σημεία που σύγκλισης των αερίων ρευμάτων, όπου ανυψώνεται ο αέρας επάνω από την ξηρά και αποτρέπει τη συγκέντρωση ρύπων κοντά στο έδαφος (Ζάνης, 2014). Ακόμη, το καλοκαίρι ο αέρας κοντά στη θάλασσα είναι πολύ δροσερότερος από τον αέρα μερικά km από την ακτή και επίσης είναι υγρός με αποτέλεσμα να μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό νεφών. Ο μεταφερόμενος ρυπασμένος αέρας από την ξηρά καταλήγει στα ανώτερα στρώματα, όπου επικρατεί ρεύμα επιστροφής (Εικόνα 11), που μεταφέρει τους αέριους ρύπους πάνω από τη θάλασσα. Επιπλέον, η απόγειος αύρα μεταφέρει τους αέριους ρύπους από την πόλη στη θάλασσα αλλά σε μικρότερο βαθμό από αυτό της θαλάσσιας αύρας, καθώς οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ ξηράς και θάλασσας κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι μικρότερες. Στη συνέχεια, η θαλάσσια αύρα κατά τη διάρκεια της επόμενης μέρας επαναφέρει τους ρύπους στην πόλη και έτσι, τα συστήματα θαλάσσιας/απογείου αύρας οδηγούν σε μια συνεχή επανακύκλωση των αερίων ρύπων και στον εγκλωβισμό τους πάνω από παράκτιες αστικές περιοχές (Μελάς 2007; Μουσιόπουλος, 1997).

β) Αναβατικοί και καταβατικοί άνεμοι

Στις πλαγιές των βουνών αναπτύσσεται ένα σύστημα τοπικής κυκλοφορίας αρκετά όμοιο με αυτό της θαλάσσιας αύρας και ονομάζεται σύστημα αναβατικών και καταβατικών ανέμων (Εικόνα 13) (Μπαλαφούτης, 2010). Οι αναβατικοί και καταβατικοί άνεμοι

εμφανίζονται στις πλαγιές των βουνών εξαιτίας διαφορών στη χρονική διακύμανση της θέρμανσης τμημάτων της επιφάνειας του εδάφους από την ηλιακή ακτινοβολία την ημέρα και της ψύξης τους με την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας τη νύχτα. Ο αέρας της κοιλάδας θερμαίνεται γρήγορα και ανέρχεται κατά μήκος της πλαγιάς του βουνού σχηματίζοντας την αύρα της κοιλάδας, με τυπικό αναβατικό άνεμο περίπου 2-4m/s , ενώ, τη νύχτα ο αέρας κοντά στην επιφάνεια ψύχεται γρήγορα και ολισθαίνει στην πλαγιά του βουνού σχηματίζοντας την αύρα των βουνών, με τυπικό καταβατικό άνεμο της τάξης του 1m/s (Ζάνης, 2014).



Εικόνα 13. Άνεμοι πλαγιάς (μικρά κόκκινα και μπλε βέλη), κοιλάδας (μεγάλο κόκκινο βέλος) και βουνών (μεγάλο μπλε βέλος) κατά την ημέρα (αριστερά) και κατά τη νύχτα (δεξιά).

Πηγή: Μπαλαφούτης, 2010

Αν και οι άνεμοι αυτοί αναπτύσσονται εξαιτίας του ανάγλυφου των βουνών, η ανάπτυξή τους επιτυγχάνεται μέσω των θερμικών ανομοιογενιών οι οποίες οφείλονται στο ανάγλυφο, οπότε θεωρούνται θερμικές κυκλοφορίες (Φλόκας, 1997). Για τον ίδιο λόγο, εμφανίζονται συχνά άνεμοι βουνού και κοιλάδας, που έχουν διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της κοιλάδας και φορά ανοδική την ημέρα και καθοδική τη νύχτα. Επομένως, οι ορεινές εξάρσεις και οι κοιλάδες, ανάλογα με τη σχετική τους θέση, παίζουν σημαντικό ρόλο στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης μιας αστικής περιοχής. Έτσι, σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, το πεδίο ροής είναι κατά κανόνα πολύπλοκο, κάτι που δυσχεραίνει ιδιαίτερα τη διασπορά των αερίων ρύπων (Μουσιόπουλος, 1997).

9) Αστική θερμική νησίδα (ΑΘΝ)

Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (ΑΘΝ), όπως έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχει ως αποτέλεσμα την υπερθέρμανση των αστικών περιοχών, σε σχέση με τις παρακείμενες περιοχές. Γενικά η ΑΘΝ είναι ισχυρότερη, τη νύχτα (εξαιτίας της απουσίας της ηλιακής ενέργειας, που έχει την τάση να εξισορροπεί τις διαφορές εκτός και εντός μιας αστικής περιοχής) κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν σε μια πόλη οι νύχτες είναι μεγαλύτερες και υπάρχουν πολλές εστίες θέρμανσης και όταν σε μια περιοχή κυριαρχούν αντικυκλωνικά συστήματα, με ασθενείς ανέμους και καθαρό ουρανό (Ζάνης, 2014). Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της ΑΘΝ είναι η αύξηση του αντίκτυπου των κυμάτων καύσωνα και ταυτόχρονα, αύξηση φαινομένων, όπως το θερμοκρασιακό στρες και η θερμοπληξία, με αποτέλεσμα τόσο την αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων για ψύξη (Santamouris et al., 2001), όσο και την αύξηση της θνησιμότητας (Matzarakis et al., 2009). Ακόμη, η αυξημένη θερμοκρασία στις πόλεις επιταχύνει τους χημικούς μετασχηματισμούς στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι συγκεντρώσεις του επιφανειακού όζοντος, (Rosenfeld et al., 1998), γεγονός που έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

2.5 ΤΟ ΦΩΤΟΧΗΜΙΚΟ ΝΕΦΟΣ

Η φωτοχημική ρύπανση παρουσιάζεται όταν πραγματοποιούνται πολύπλοκες φωτοχημικές αντιδράσεις μεταξύ των οργανικών και ανόργανων αερίων ρύπων, παρουσία έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα την παραγωγή δευτερογενών ρύπων, που είναι επικίνδυνες για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Οι κυριότερες από αυτές τις φωτοχημικές αντιδράσεις, είναι μεταξύ δραστικών πτητικών υδρογονανθράκων, μονοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου και οδηγούν στη δημιουργία όζοντος, που είναι ένα από τα κύρια συστατικά και ο σημαντικότερος δείκτης φωτοχημικής ρύπανσης σε μια περιοχή, καθώς και στη δημιουργία υπεροξειδίου του υδρογόνου, νιτρικού υπεροξυλοακετύλιου (PAN) και υπεροξειδίων του αζώτου (μέσω μηχανισμών ελευθέρων ριζών) (Κουιμιτζής και Σαμαρά, 1994).

2.5.1 ΤΟ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΖΟΝ (O_3)

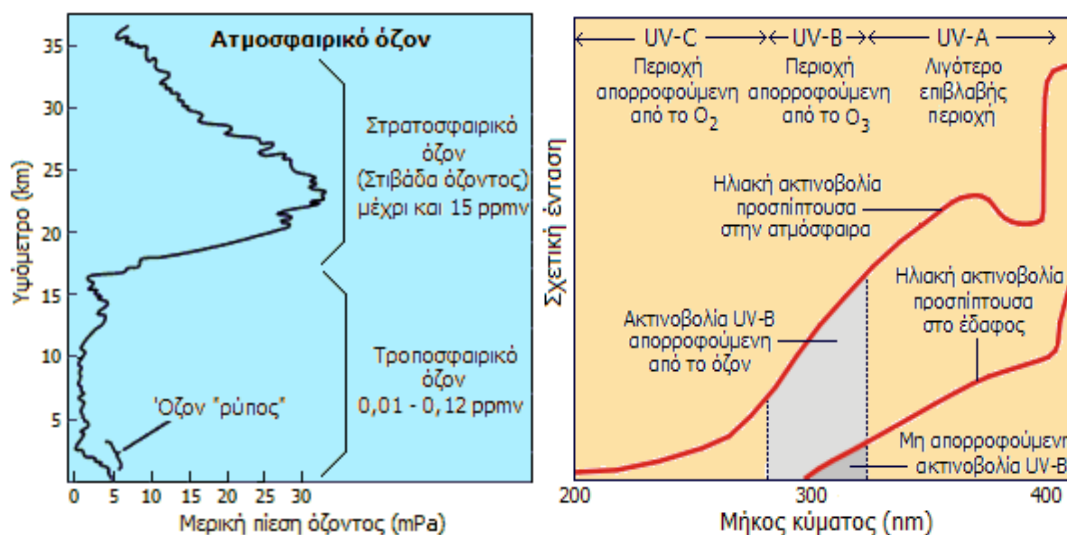
Το όζον (O_3), αποτελεί μία αλλοτροπική μορφή του οξυγόνου. Συγκεκριμένα, το όζον, είναι ένα άχρωμο αέριο, με έντονη οξειδωτική δράση, βαρύτερο του αέρα, με δριμύια οσμή, δεν εκπέμπεται απευθείας στην ατμόσφαιρα, αλλά παράγεται μετά από μία σειρά πολύπλοκων χημικών αντιδράσεων. Η ανακάλυψή του έγινε το 1840 από τον Ελβετό χημικό Schronbein, ο οποίος και του έδωσε την ονομασία αυτή από την ελληνική λέξη «όζειν» (οσμή) και η αναγνώρισή του στην κατώτερη ατμόσφαιρα έγινε από τον Houzeau το 1858 (Ζιώμας, 2005). Στη στρατόσφαιρα βρίσκεται, περίπου, το 90% του παραγόμενου όζοντος (Εικόνα 14α), που ονομάζεται στρατοσφαιρικό όζον (οζονόσφαιρα) και έχει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση μεταξύ 15 και 34-40km, το δε πάχος του στρώματος του στρατοσφαιρικού όζοντος μεταβάλλεται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος, την εποχή του χρόνου και τις μετεωρολογικές συνθήκες, ενώ η συγκέντρωση της κατακόρυφης κατανομής του παρουσιάζει, περίπου στα 20-26km, ένα τοπικό μέγιστο (Παπαγιάννης, 2005). Επίσης, από δορυφορικές μετρήσεις και μετρήσεις τηλεπισκόπησης (lidar) διαπιστώθηκε ότι το O_3 βρίσκεται σε μικρότερες συγκεντρώσεις στα 40-50km. Το στρώμα του στρατοσφαιρικού όζοντος δημιουργείται (μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης) με βάση το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, το οποίο φωτολύεται από την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, με μήκος κύματος $\lambda < 240\text{nm}$, σε ύψη $> 20\text{km}$ (το O_2 απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία με $\lambda < 240\text{nm}$). Η διαδικασία αυτή θα προκαλούσε καταστροφή του ατμοσφαιρικού O_2 μακροχρόνια. Όμως έχουμε διατήρηση του ισοζυγίου του O_2 εξαιτίας της συνεχούς παραγωγής του από τη βιόσφαιρα (χλωρίδα-πανίδα), στην επιφάνεια της γης, το οποίο διαχέεται κατακόρυφα (εντός δεκαετίας) προς τα επάνω. Στη συνέχεια τα μόρια του O_3 καταστρέφονται διότι απορροφούν την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, με $\lambda < 320\text{nm}$ και έτσι έχουμε διατήρηση του ισοζυγίου μεταξύ ατομικού οξυγόνου και όζοντος στην περιοχή 20-80km. Ακόμη, υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί, στα οποία εμπλέκονται τα αέρια Cl, Br, F και I, σε ατομική μορφή, που έχουν το ρόλο καταλύτη και παίζουν σημαντικό ρόλο στο ισοζύγιο του O_3 στη στρατόσφαιρα και ευθύνονται για την καταλυτική καταστροφή του. Τα αέρια αυτά, προέρχονται αντίστοιχα από τη φωτοδιάσπαση των ClO, BrO, FO, IO, τα οποία προέρχονται από τη φωτοδιάσπαση στη στρατόσφαιρα των αερίων CFC-11 (CCl_3F), CFC-12 (CCl_2F_2), Halons (Halon-

1211, δηλαδή CBrClF_2), βρωμιούχο μεθύλιο (CH_3Br), τετραχλωράνθρακας (CCl_4), HCl , ClONO_2 , κλπ (Παπαγιάννης, 2005).

Οι μεταβολές στα επίπεδα του O_3 στη στρατόσφαιρα οφείλονται, τόσο σε φυσικές αιτίες (ενδεκαετής κύκλος των ηλιακών κηλίδων, οι περιοδικές αλλαγές της διεύθυνσης του ανέμου στην περιοχή του ισημερινού, ηφαιστειακές εκρήξεις), όσο και σε ανθρωπογενείς εκπομπές από τη χρήση χημικών ενώσεων, όπως οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs), τα halons και ο τετραχλωράνθρακας. Αυτή, η μείωση του στρατοσφαιρικού O_3 όπως προαναφέρθηκε, οφείλεται στις καταλυτικές αντιδράσεις φωτοδιάσπασης χλωριούχων, βρωμιούχων και φθοριούχων ενώσεων, που εκπέμπονται εξαιτίας της χρήσης στη χημική βιομηχανία, στα μηχανήματα κλιματιστικών, στα ψυγεία και στην ευρεία χρήση τους σαν προωθητικά σε φιάλες σπρέι. Σε συνθήκες πολύ χαμηλών θερμοκρασιών (-80 έως -90°C) και με την παρουσία πολικών στρατοσφαιρικών νεφών (Polar Stratospheric Clouds (PSCs)), που δημιουργούνται όταν η θερμοκρασία του αέρα στους Πόλους πέσει κάτω από -78°C , οι ενώσεις αυτές οδηγούν στην απότομη καταλυτική καταστροφή του O_3 (Παπαγιάννης, 2005). Οι ενώσεις αυτές, που διαδραματίζουν το σημαντικότερο ρόλο στην καταστροφή του O_3 , εξαιτίας του μεγάλου χρόνου παραμονής τους στην ατμόσφαιρα (από μερικά χρόνια έως 100 χρόνια), αιωρούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα και σταδιακά μεταφέρονται στην στρατόσφαιρα, όπου και καταστρέφουν το στρώμα του O_3 . Πρέπει να επισημανθεί ότι οι ανθρωπογενείς εκπομπές των δύο πιο διαδεδομένων CFCs (CFC-11 και CFC-12), αυξήθηκαν από σχεδόν μηδενικές τη δεκαετία του 1950, σε περίπου 700000τόνους/έτος τη δεκαετία του 1970 και ότι ένα άτομο χλωρίου μπορεί να καταστρέψει ως 100000 μόρια O_3 πριν εξουδετερωθεί αντιδρώντας με άλλες ουσίες (Μελάς κ.ά., 2000).

Έτσι, στις τελευταίες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα, αυτή η μείωση του στρατοσφαιρικού O_3 (γνωστή και σαν *τρύπα του όζοντος*) εξαιτίας των ανθρωπογενών εκπομπών από τη χρήση των προαναφερθέντων χημικών ενώσεων, δημιούργησε ένα πρόβλημα παγκόσμιας κλίμακας (Ζάνης, 2008). Οι παραπάνω φυσικοί και χημικοί μηχανισμοί είχαν σαν αποτέλεσμα η μείωση του στρώματος του όζοντος στην Ανταρκτική να είναι πολύ μεγαλύτερη, σε σχέση με αυτήν σ' ολόκληρο τον πλανήτη. Την άνοιξη του

νότιου ημισφαιρίου του 1987, επάνω από την Ανταρκτική, είχε μείνει περίπου το μισό O_3 , ενώ η έκταση της *τρύπας του όζοντος της Ανταρκτικής* είχε καταλάβει εμβαδόν μεγαλύτερο από εκείνο της Ευρώπης. Η αιτία για την οποία η τρύπα του O_3 πρωτοεμφανίστηκε στο Νότιο Πόλο είναι το γεγονός ότι εκεί επικρατούν (κυρίως το χειμώνα) οι χαμηλότερες θερμοκρασίες του πλανήτη, για μεγάλα χρονικά διαστήματα και επομένως δημιουργούνται και πολλά PSCs και επιπλέον η ατμοσφαιρική κυκλοφορία το χειμώνα επιτρέπει τη συγκέντρωση μεγάλων ποσοτήτων αλογονούχων ενώσεων (αέριες μάζες μεταφέρουν μαζί τους χλωροφθοράνθρακες, οι οποίοι δεν διασπώνται, αλλά μοιάζουν με αποθήκες χλωρίου) στην ατμόσφαιρα, που την πολική άνοιξη φωτοδιασπώνται, οπότε και ξεκινά ο καταλυτικός κύκλος καταστροφής του όζοντος της στρατόσφαιρας (Ζιώμας, 2007). Προς το τέλος της άνοιξης του νότιου ημισφαιρίου η θερμοκρασία αυξάνει τοπικά και έτσι σταματά η δημιουργία των PSCs και αλλάζει η ατμοσφαιρική κυκλοφορία στη στρατόσφαιρα και αέρας πλούσιος σε O_3 , από μικρότερα γεωγραφικά πλάτη, αναμιγνύεται με τις αέριες μάζες που είχαν εγκλωβιστεί το χειμώνα και περιείχαν πολύ μικρότερες ποσότητες όζοντος, οπότε σταματά και ο κύκλος της καταλυτικής καταστροφής του στρατοσφαιρικού O_3 και η συγκέντρωση του επανέρχεται σε κανονικά επίπεδα (Παπαγιάννης, 2005).

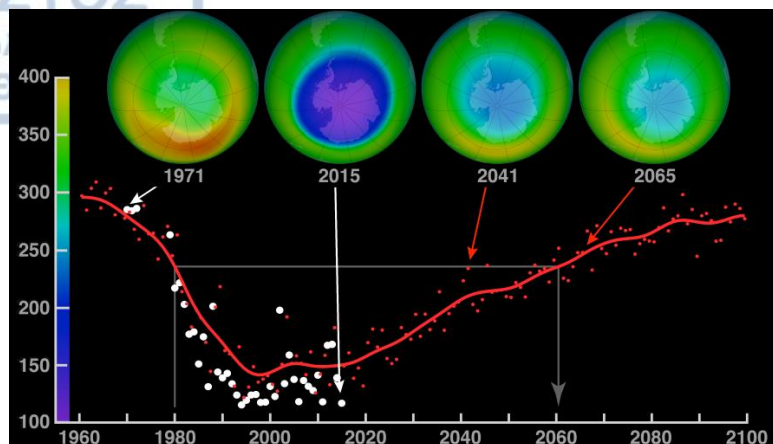


Εικόνα 14. (α) Σχηματική απεικόνιση τυπικής κατακόρυφης κατανομής της συγκέντρωσης-μερικής πίεσης- του ατμοσφαιρικού όζοντος σαν συνάρτηση με το ύψος. (β) Το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή του UV, που προσπίπτει στην ατμόσφαιρα και αυτού που προσπίπτει στο έδαφος, μετά την απορρόφηση τμημάτων της ακτινοβολίας από το O_2 και το O_3 .

Πηγή: http://www.chem.uoa.gr/chemicals/chem_ozone.htm

Το όζον απορροφά έντονα την υπεριώδη ηλιακή ακτινοβολία, δρα σαν «φίλτρο» στο υπεριώδες και προστατεύει τους ζωντανούς οργανισμούς της γης από την έκθεσή τους σ' αυτή την ακτινοβολία, που μπορεί να δημιουργήσει σοβαρές γενετικές διαταραχές. Η περιγραφή των βιολογικών συνεπειών της υπεριώδους ηλιακής ακτινοβολίας σχετίζεται με τρεις διαφορετικές περιοχές μηκών κύματος την UV-C (100-280nm), UV-B (280-315nm) και UV-A (315-400nm) (Εικόνα 14β). Η UV-C απορροφάται από τα μόρια του O₂ και του O₃ στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Ένα μέρος της UV-A (που είναι λιγότερο επικίνδυνη και είναι απαραίτητη στον άνθρωπο) και σε μικρότερο βαθμό της UV-B διεισδύει μέχρι το έδαφος. Η αυξημένη έκθεση στη UV-B είναι δυνατόν να δημιουργήσει σοβαρές βλάβες στον άνθρωπο (καρκίνο του δέρματος, εξασθένιση του ανοσοποιητικού συστήματος, καταρράκτη στους οφθαλμούς) και στα οικοσυστήματα. Μια μόνιμη μείωση, της τάξης του 1%, του στρατοσφαιρικού O₃ είναι πιθανόν να οδηγήσει σε αύξηση των περιπτώσεων καρκίνου του δέρματος (πλην του μελανώματος) της τάξης του 2% (Μελάς κ.ά., 2000).

Η αποτελεσματικότερη πράξη αντιμετώπισης, από την παγκόσμια κοινότητα, του φαινομένου της τρύπας του όζοντος, ήταν το 1987 η υπογραφή από 46 χώρες του πρωτόκολλου του Μόντρεαλ (στόχος του οποίου ήταν η σταδιακή εξάλειψη των CFCs και άλλων Ουσιών που Καταστρέφουν το Όζον (Ozone Depleting Substances-ODS). Το καλοκαίρι του 2009 η εφαρμογή του Πρωτοκόλλου του Μόντρεαλ, έγινε οικουμενική, καθώς υπέγραψε και η τελευταία από τις 196 χώρες μέλη του ΟΗΕ. Εξαιτίας αυτών των μέτρων η τρύπα του όζοντος (Εικόνα 15) έχει πλέον σταματήσει να μεγαλώνει, αλλαγή που βοήθησε και στη μείωση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Αν και τα αποτελέσματα αυτών των μέτρων είναι ενθαρρυντικά, δεν έχει ξεκινήσει ακόμα, σε ικανοποιητικούς ρυθμούς, η αποκατάσταση της τρύπας του όζοντος που σύμφωνα με εκτιμήσεις, θα έχουν επανέλθει στα επίπεδα του 1980, περίπου στο 2075 (<https://svs.gsfc.nasa.gov/30602>).



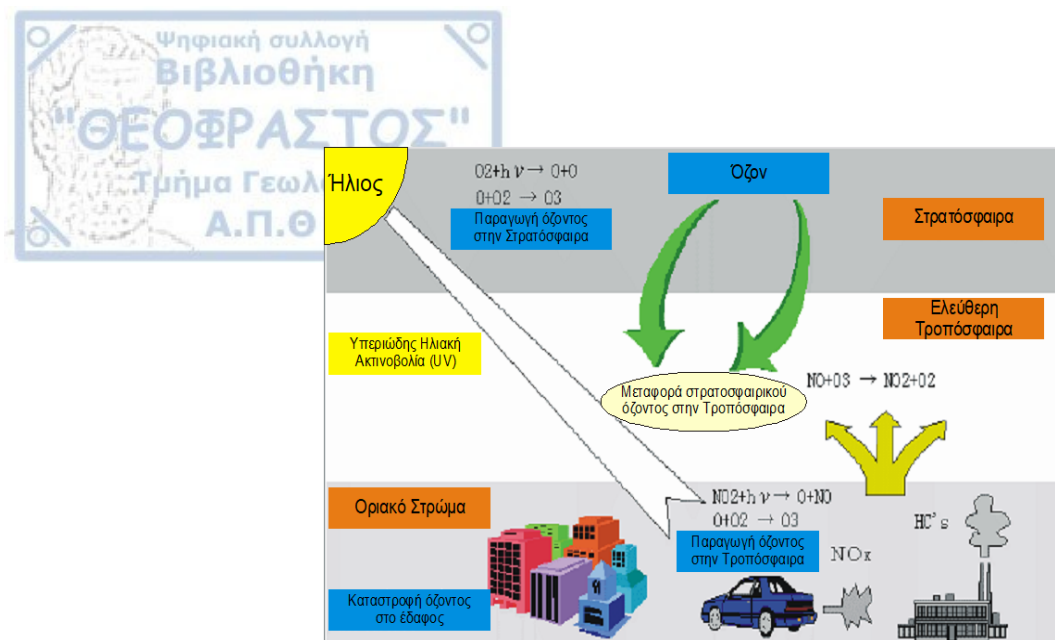
Εικόνα 15. Δορυφορικές εικόνες της Ανταρκτικής και εκτιμήσεις της NASA που δείχνουν την απώλεια όζοντος στην στρατόσφαιρα. Οι μονάδες μέτρησης είναι Dobson units (DU).

Πηγή: <https://svs.gsfc.nasa.gov/30602>

Το υπόλοιπο 10% του παραγόμενου όζοντος, βρίσκεται στο χαμηλότερο στρώμα της ατμόσφαιρας, στην τροπόσφαιρα και ονομάζεται τροποσφαιρικό όζον. Αυτό, το επιφανειακό όζον (surface ozone), αποτελεί δευτερογενή ρύπο, είναι κύριο συστατικό του φωτοχημικού νέφους σε αστικά κέντρα, όπου μπορεί να προκαλέσει, εξαιτίας του έντονου οξειδωτικού του χαρακτήρα, ποικίλα προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία, στη χλωρίδα και στην πανίδα, όταν ξεπεραστούν κάποιες οριακές τιμές.

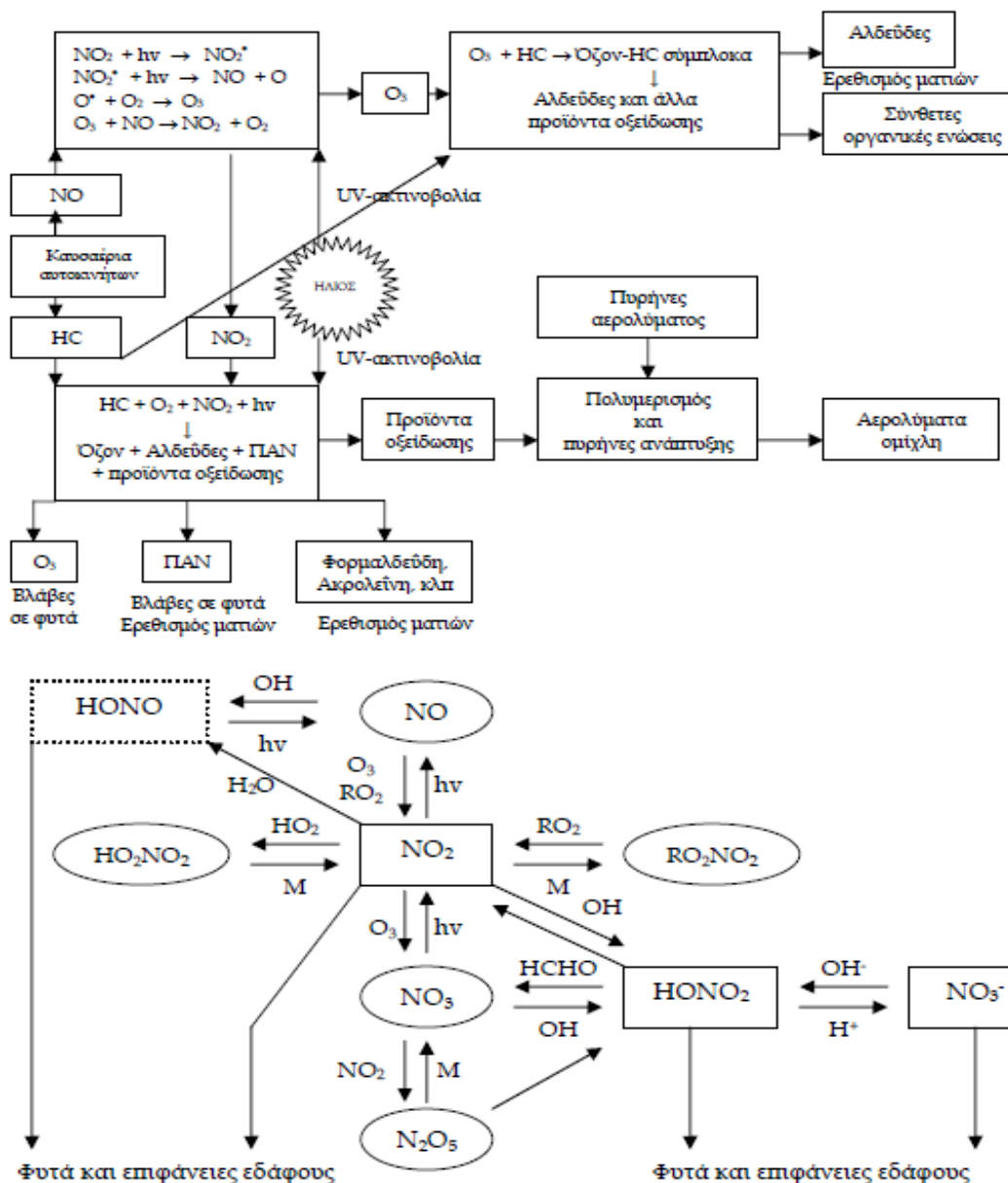
2.5.2 Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ (O_3)

Η παρουσία του τροποσφαιρικού O_3 (Εικόνα 16) οφείλεται, είτε στην παραγωγή του από πρωτογενείς ρύπους (πρόδρομες ενώσεις) σαν αποτέλεσμα αλυσίδας φωτοχημικών αντιδράσεων, που πραγματοποιούνται μόνο υπό την επίδραση ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και την επίδραση κατάλληλων μετεωρολογικών συνθηκών, είτε στη μεταφορά στρατοσφαιρικού όζοντος προς την τροπόσφαιρα (Ζάνης, 2014; Duenas et al., 2002).



Εικόνα 16. Σχηματική απεικόνιση της προέλευσης του ατμοσφαιρικού όζοντος.
Πηγή: Ζάνης, 2014.

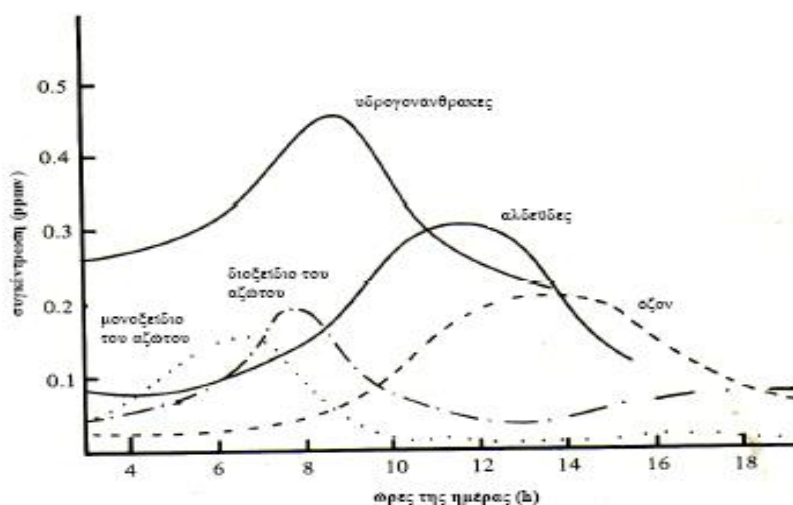
Σε αντίθεση με τα NO και NO₂, το O₃ δεν εμφανίζει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις του στο κέντρο αστικών περιοχών, αλλά στην περιφέρεια, γι' αυτό αποκαλείται και ρύπος των προαστίων. Το γεγονός αυτό οφείλεται, αφενός στο μηχανισμό καταστροφής του από το NO₂, που υπάρχει σε μεγάλες συγκεντρώσεις στα κέντρα των πόλεων και αφετέρου στο ότι οι χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στο σχηματισμό του χρειάζονται ορισμένο χρόνο για την ολοκλήρωσή τους και στο διάστημα αυτό το όζον μεταφέρεται με τη βοήθεια του ανέμου σε απόσταση κάποιων χιλιομέτρων από τον τόπο παραγωγής των πρόδρομων ενώσεων του (Πετρακάκης κ.ά., 2008).



Εικόνα 17. Σχηματική απεικόνιση πολυπλοκότητας μηχανισμών των αλυσιδωτών αντιδράσεων της φωτοχημικής ρύπανσης (παραγωγή μεγάλου αριθμού δευτερογενών αέριων ρύπων)
Πηγή: Βαλαβανίδης, 2008; http://195.134.76.37/old_site_10-7-2016/courses/organiki_1/oikotoxikologia/oikt_K03.pdf

Η δημιουργία του τροποσφαιρικού όζοντος στην ατμόσφαιρα, όπως προαναφέρθηκε, γίνεται μέσω μίας σειράς πολύπλοκων χημικών αντιδράσεων (Εικόνα 17). Αυτές οι φωτοχημικές αντιδράσεις ευνοούνται από την παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας και υψηλής θερμοκρασίας. Στις φωτοχημικές αντιδράσεις συμμετέχουν το οξυγόνο, διάφοροι πρωτογενείς ρύποι, όπως τα οξείδια του αζώτου, το μονοξείδιο του άνθρακα

και ένα μείγμα πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs). Το NO είναι πρωτογενής ρύπος, ενώ το NO₂ είναι πρωτογενής και δευτερογενής ρύπος, που προέρχεται από την αντίδραση του NO με το O₃. Συνήθως, για το άθροισμα των συγκεντρώσεων NO και NO₂ χρησιμοποιείται ο όρος NO_x (NO_x=NO+NO₂), καθώς η μετατροπή ανάμεσα στο NO και NO₂ γίνεται αρκετά γρήγορα (σε μερικά λεπτά). Η συγκέντρωση του O₃ εξαρτάται ευθέως από το λόγο NO₂/NO και επομένως η αύξηση του O₃ στην ατμόσφαιρα είναι σε άμεση συνάρτηση με το μετασχηματισμό του NO σε NO₂ (Γεντεκάκης, 2010). Ο βαθμός σχηματισμού (παραγωγή ή καταστροφή) του O₃ εξαρτάται επίσης από τον τύπο και τη συγκέντρωση των υδρογονανθράκων στην ατμόσφαιρα, αλλά και από τη συγκέντρωση των άλλων πρόδρομων ενώσεων, την αναλογία VOCs/NO_x στην ατμόσφαιρα και το χρόνο έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία (Ζάνης, 2008; Sillman and Samson, 1995).



Εικόνα 18. Σχηματική απεικόνιση τυπικής ημερήσιας πορείας των συγκεντρώσεων των αερίων ρύπων που σχηματίζουν το φωτοχημικό νέφος
Πηγή: Ζάνης, 2014.

Το τροποσφαιρικό όζον παράγεται σε ποσοστό 75% περίπου με τη βοήθεια της φωτοχημικής δράσης του ηλιακού φωτός, ενώ εκτιμάται ότι ο χρόνος παραμονής του στην ατμόσφαιρα είναι της τάξης των 3 εβδομάδων και το ποσοστό συνεισφοράς του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι περίπου 10–12% (Ζιώμας, 2007). Οι πηγές των πρωτογενών ρύπων που οδηγούν στη δημιουργία του O₃ είναι η κυκλοφορία των οχημάτων, οι βιομηχανίες, τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, η κεντρική θέρμανση

κτιρίων, οι χωματερές, μεταφορά και διακίνηση καυσίμων, τα χημικά διαλυτικά και άλλες μικρές πηγές, όπως αγροτικός εξοπλισμός, κλπ. Επιπροσθέτως, σημαντική πηγή VOCs αποτελεί και η βλάστηση (Symeonidis et al., 2008). Τα οξείδια του αζώτου (NO) και οι υδρογονάνθρακες (πρωτογενείς ρύποι) παρουσιάζουν μέγιστο τις πρώτες πρωινές ώρες (Εικόνα 18), όταν έχουμε το μέγιστο από τις εκπομπές των οχημάτων, ενώ το O₃ και οι αλδεύδες (δευτερογενή προϊόντα) παρουσιάζουν μέγιστο κατά τη διάρκεια της ημέρας (Ζάνης, 2014).

Το τροποσφαιρικό όζον έχει πολλαπλή σημασία καθώς αποτελεί τη βασική πηγή της ρίζας του υδροξυλίου (OH), του πιο σημαντικού οξειδωτικού μέσου στην τροπόσφαιρα, που αποτελεί το ισχυρότερο «απορρυπαντικό» της ατμόσφαιρας. Το OH καθορίζει την ικανότητα οξείδωσης της ατμόσφαιρας, που έτσι την καθαρίζει από μια σειρά οργανικών και ανόργανων ενώσεων, οι οποίες εκπέμπονται από πληθώρα φυσικών ή ανθρωπογενών πηγών. Η έλλειψη του OH θα προκαλούσε τη συσσώρευση όλων αυτών των ενώσεων, που έχουν πολύ μεγάλο χρόνο ζωής και έτσι θα συσσωρεύονταν στα ανώτερα στρώματα της τροπόσφαιρας. Με τον τρόπο αυτό θα δρούσαν επικουρικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Glavas, 1999). Επιπλέον, το τροποσφαιρικό όζον που βρίσκεται στα υψηλότερα στρώματα της τροπόσφαιρας είναι από μόνο του ένα θερμοκηπικό αέριο, που και αυτό δρα επικουρικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Πρέπει να επισημανθεί ότι η αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος παγκοσμίως συνεισφέρει περίπου κατά το 1/3 σε σχέση με το CO₂ στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου (Glavas, 1999).

Η αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος δεν είναι ένα πρόβλημα που αφορά μόνο τα αστικά κέντρα, αλλά ένα πρόβλημα που αφορά ευρύτερες περιοχές. Έτσι, εκτός από το όζον των αστικών περιοχών, ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον έχει δοθεί και στο υπόβαθρο O₃ της τροπόσφαιρας (όζον που δεν επηρεάζεται από κοντινές εκπομπές ανθρωπογενών ρύπων), που σχεδόν υπερδιπλασιάστηκε στο μεγαλύτερο μέρος του Βορείου Ημισφαιρίου, σε σχέση με το αντίστοιχο στα τέλη του 19^{ου} και στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, με το μεγαλύτερο ποσοστό της αύξησης να έχει συμβεί μετά το 1950 (Zanis, 1999). Η πιθανότερη αιτία για την αύξηση του υποβάθρου του τροποσφαιρικού όζοντος θεωρείται η φωτοχημική παραγωγή όζοντος, εξαιτίας της

σταδιακής αύξησης των εκπομπών πρωτογενών ρύπων απο ανθρωπογενείς πηγές και η σταθερή ανάμειξη αυτών των πρόδρομων ενώσεων σε ευρύτερες περιοχές (Ζανής, 2014). Επίσης, σε διάφορες τοποθεσίες στη Βόρεια Αμερική και στην Ευρώπη, έδειξαν ότι κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών υπάρχει σημαντική αύξηση του τροποσφαιρικού όζοντος (Mohnen et al., 1993; Yi and Prybutok, 1996).

Η φωτοχημική ρύπανση και το όζον, εξαιτίας της εξαιρετικά υψηλής ικανότητας οξειδωσης βιομορίων, προκαλεί σημαντικά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία των κατοίκων (ιδιαίτερα σε παιδιά και ηλικιωμένα άτομα με αναπνευστικές ασθένειες) στις αστικές περιοχές. Η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις O_3 σε αστικές περιοχές, ιδιαίτερα κατά τις ημέρες εμφάνισης της φωτοχημικής αιθαλομίχλης, αυξάνει τη θνησιμότητα και τη νοσηρότητα, ενώ παράλληλα προκαλεί εξάρσεις των κρίσεων άσθματος, φλεγμονώδεις καταστάσεις του αναπνευστικού συστήματος και άλλα πνευμονολογικά νοσήματα και πνευμονικές δυσλειτουργίες, όπως βήχα, δύσπνοια, άσθμα (Μελάς 2007; Παρασχά, 2014). Ακόμη, το τροποσφαιρικό όζον έχει φυτοτοξική δράση εξαιτίας της ικανότητάς να διεισδύει στα κύτταρα των φύλλων και να προκαλεί οξειδωτικές βλάβες στους φυτικούς ιστούς. Αυτές οι βλάβες, που είναι ανάλογες με τα επίπεδα των συγκεντρώσεών του, έχουν επιπτώσεις στην ανάπτυξη φυτών και δένδρων και αυξάνουν την καταστροφή των δασών. Επίσης, το O_3 εμφανίζεται σε μεγάλες αποστάσεις από τις αστικές περιοχές στις οποίες δημιουργείται και αυτό μπορεί να οδηγήσει στη ρύπανση της ατμόσφαιρας αγροτικών περιοχών, η οποία είναι δυνατόν να επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα στο μεταβολισμό και στη φυσιολογία των γεωργικών φυτών και τελικά να προκαλέσει μεγάλες επιπτώσεις στην παραγωγικότητα πολλών γεωργικών καλλιεργειών (Βαλαβανίδης, 2008). Επομένως, η φωτοχημική αιθαλομίχλη και η παραγωγή του τροποσφαιρικού όζοντος, που συνδέεται κυρίως με εκπομπές από τροχοφόρα (αν και υπάρχει συμβολή και από στάσιμες πηγές), εμφανίζεται σε πολλές αστικές περιοχές, σε περιόδους με αίθριο καιρό και μεγάλη ηλιοφάνεια, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αιτίες υποβάθμισης του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η Θεσσαλονίκη, πρωτεύουσα του ομώνυμου νομού είναι η μεγαλύτερη σε έκταση (19,31km²) και πληθυσμό πόλη της Μακεδονίας, με περισσότερο από 1 εκατομμύριο κάτοικους, στη μητροπολιτική της περιοχή, που αντιστοιχεί περίπου στο 10% του συνολικού ελληνικού πληθυσμού. Επίσης, είναι η δεύτερη μεγαλύτερη ελληνική πόλη και ταυτόχρονα αποτελεί το κύριο εμπορικό, οικονομικό και πολιτισμικό αστικό κέντρο της βόρειας Ελλάδας και ένα από τα μεγαλύτερα των Βαλκάνιων (Moussiopoulos et al., 2009; Petrakakis et al., 2007; Τσόγκας, 2021). Σε σχέση με τη γεωγραφική της θέση, η πόλη της Θεσσαλονίκης είναι κτισμένη, στις πλαγιές του Κέδρινου λόφου, στο μυχό του Θερμαϊκού κόλπου, προς τα βορειοδυτικά εκτείνεται η πεδιάδα της Θεσσαλονίκης (κοιλάδα του Αξιού), που τη διαπερνούν τρεις ποταμοί, Αξιός, Λουδίας και Γαλλικός, ενώ δυτικότερα εκβάλλει και ο Αλιάκμονας, στα ανατολικά της πόλης δεσπόζει το όρος Χορτιάτης, με υψόμετρο 1201m, βόρεια της πόλης υψώνεται το όρος Σιβρί, το δάσος του Σειχ Σου το συναντάμε στα βορειοανατολικά και τέλος ανατολικά βρίσκεται το αεροδρόμιο της πόλης, ενώ βοριοδυτικά η βιομηχανική περιοχή της Σίνδου (με χαρακτηριστικές δραστηριότητες όπως διύλιστήρια, παραγωγή πετροχημικών προϊόντων, παραγωγή σιδήρου και χάλυβα, παραγωγή τσιμέντου και λιπασμάτων, κλπ) (Giannaros et al., 2012; Τσόγκας, 2021; Χοστελίδου, 2012).

Η Θεσσαλονίκη επηρεάζεται ιδιαίτερα από το Θερμαϊκό κόλπο, που βρίσκεται νότια και το κλίμα της (με βάση την κλιματική κατάταξη Korppen ανήκει στα κλίματα τύπου CSA) χαρακτηρίζεται σαν μεσογειακό με ηπειρωτικά χαρακτηριστικά και χαρακτηρίζεται από θερμά και ξηρά καλοκαίρια και υγρούς ήπιους χειμώνες (Giannaros et al., 2012; Flocas et al., 2009; Χοστελίδου, 2012). Ο μέσος όρος της ετήσιας θερμοκρασίας για τη

Θεσσαλονίκη είναι 15,9°C με την αντίστοιχη σχετική υγρασία να βρίσκεται περίπου στο 67% και το ύψος της βροχόπτωσης να είναι περίπου στα 445mm, με το 69% αυτής της βροχόπτωσης να πέφτει στην πόλη από το Νοέμβριο έως το Μάιο (Giannaros et al., 2012; <https://el.wikipedia.org/>).

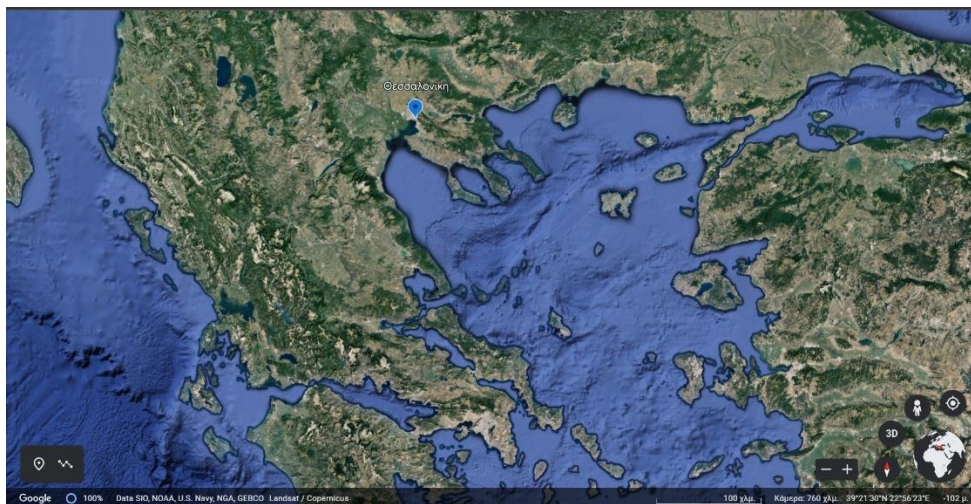
Πίνακας 5. Κλιματικά δεδομένα για τη Θεσσαλονίκη.

Πηγή: <https://el.wikipedia.org/>

Κλιματικά δεδομένα Αεροδρόμιο Μακεδονία Ε.Μ.Υ. 1959-2010 (ρεκόρ 1963-2019)													
Μήνας	Ιαν	Φεβ	Μάρ	Απρ	Μάι	Ιούν	Ιουλ	Αύγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Έτος
Υψηλότερη Μέγιστη °C	23	24	32	31	36	41.4	44	40.5	37.3	32.2	27	25.1	44
Μέση Μέγιστη °C	9.3	11	14.3	19.1	24.6	29.4	31.7	31.4	27.1	21.2	15.5	10.9	20,46
Μέση Μηνιαία °C	5.4	6.8	9.8	14.3	19.9	24.7	26.9	26.4	21.9	16.5	11.3	7	15,91
Μέση Ελάχιστη °C	1.5	2.3	4.7	7.9	12.6	17	19.3	19.1	15.4	11.3	7.1	3.2	10,12
Χαμηλότερη Ελάχιστη °C	-14.2	-10	-7	-2	2.8	6	10	7.8	3	-1	-6.2	-9.8	-14,2
Υετός mm	37,7	35	37,9	36,1	44,2	29,8	23,8	19,3	29,8	43	52,8	55,1	444,5
Σχ.υγρασία %	75.7	72	71	67.3	63	55.4	52.7	55	61.9	70.4	76.3	77.9	66,55
Μέσες ημέρες κατακρημνίσεων	11.5	10.7	12.1	11.1	11	7.9	6.7	5.1	7	9.3	11	12.7	116,1
Μέσες μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας	98.7	102.6	147.2	202.6	252.7	296.4	325.7	295.8	229.9	165.5	117.8	102.6	2.337,5
Πηγή: weatheronline.gr Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία UNdata													

Οι άνεμοι έχουν μεταβλητές διευθύνσεις κατά τη διάρκεια τους έτους. Τη θερινή περίοδο του έτους επικρατούν Νότιοι-Νοτιοδυτικοί και Νοτιοανατολικοί άνεμοι, ενώ σπανιότεροι είναι οι Βορειοδυτικοί άνεμοι. Το χειμώνα πνέουν Βορειοδυτικοί άνεμοι, με προέλευση την πεδιάδα του Αξιού (Βαρδάρης), που βοηθούν στη διασπορά των ατμοσφαιρικών ρύπων, αλλά ταυτόχρονα ευνοούν τη μεταφορά των ρύπων από τη βιομηχανική περιοχή προς την πόλη (Flocas et al., 2009; Petrakakis et al., 2007).

Τα παραπάνω γεωγραφικά χαρακτηριστικά ευνοούν τα τοπικά συστήματα κυκλοφορίας του ανέμου (θαλάσσια - απόγειος αύρα, άνεμοι κοιλάδας - βουνού) (Moussiopoulos et al., 2009; Petrakakis et al., 2007; Ζάνης 2014). Έτσι, η σύνθετη τοπογραφία σε συνδυασμό με τις έντονες ατμοσφαιρικές διεργασίες, οδηγούν στο σχηματισμό τοπικών ατμοσφαιρικών κυκλοφοριών, όπως οι θαλάσσιες αύρες (ιδιαίτερα την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου) που επηρεάζουν τη μεταφορά και διάχυση των ατμοσφαιρικών ρύπων (Flocas et al., 2009; Moussiopoulos et al., 2009; Petrakakis et al., 2007; Μελάς, 2007). Γενικά, στη Θεσσαλονίκη εμφανίζεται αρκετά υψηλό ποσοστό άπνοιας, το οποίο κατά τη διάρκεια της νύχτας ανεβαίνει ακόμα περισσότερο (Flocas et al., 2009; Πετρακάκης κ.ά., 2008). Ο πιο γνωστός τοπικός άνεμος, που παίζει ιδιαίτερο ρόλο στη διαμόρφωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας της Θεσσαλονίκης είναι ο Βαρδάρης, που είναι ένας βορειοδυτικός άνεμος με μέση ταχύτητα περίπου 10m/s, διάρκεια περίπου 2 ημέρες και συχνότητα εμφάνισης 40 ημέρες/έτος περίπου (Πετρακάκης κ.ά., 2005; 2008; Σαχσαμάνογλου, 1987; Petrakakis et al., 2007). Όμως, ο άνεμος που επηρεάζει περισσότερο το ατμοσφαιρικό περιβάλλον της Θεσσαλονίκης και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου του έτους, είναι το σύστημα της θαλάσσιας - απόγειου αύρας (Flocas et al., 2009; Σαχσαμάνογλου, 1987; Πετρακάκης κ.ά., 2008).



Εικόνα 19. Η θέση της Θεσσαλονίκης.

Πηγή: Google Maps, 2023.

Το φαινόμενο της θαλάσσιας αύρας αρχίζει να εμφανίζεται το πρωί με κατεύθυνση κάθετα προς την ακτογραμμή και σταδιακά αναπτύσσεται, από το Θερμαϊκό κόλπο, μια

εκτεταμένη με ομοιογενή ροή θαλάσσια αύρα, που διεισδύει στην ενδοχώρα μέχρι το βόρειο όριο της περιοχής μελέτης, με αποτέλεσμα τη μεταφορά των μαζών αέρα προς τα βορειοανατολικά. Τις πρώτες βραδυνές ώρες αναπτύσσεται ένα ασθενές αεράκι, που σε συνδυασμό με τους ανέμους που κατεβαίνουν από τους γύρω λόφους, δημιουργεί ένα ελαφρύ βόρειο ρεύμα πάνω από την αστική περιοχή, που μεταφέρουν τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, κατά τη διάρκεια της νύχτας, από τις αστικές και τις βιομηχανικές περιοχές της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης προς το Θερμαϊκό κόλπο. Έτσι, ο Θερμαϊκός κόλπος λειτουργεί σαν μια μεγάλη δεξαμενή συγκεντρώσεων ρύπων, οι οποίοι συλλέγονται με την απόγιο αύρα κατά τη διάρκεια της νύχτας και επιστρέφουν την επόμενη μέρα στην πόλη με τη θαλάσσια αύρα (Flocas et al., 2009; Moussioropoulos et al., 2009; Petrakakis et al., 2007). Η επικράτηση αυτών των τοπικών συστημάτων ανέμου, εξηγούν σε μεγάλο βαθμό την αυξημένη συγκέντρωση του όζοντος στη Άνω Πόλη και γενικότερα βορειοανατολικά της Θεσσαλονίκης, ιδιαίτερα τη θερινή περίοδο έτους, παρόλο που δεν υπάρχουν ιδιαίτερες πηγές εκπομπής στην περιοχή (Πετρακάκης κ.ά., 2008).

Η ρυμοτομία της αστικής περιοχής της Θεσσαλονίκης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, με το κέντρο της να είναι πυκνοκατοικημένο και πυκνοδομημένο και γενικά η χρήση γης μπορεί να χαρακτηριστεί σαν συνδυασμός οικιστικής και εμπορικής χρήσης (Giannaros et al., 2012). Μελέτες έδειξαν ότι, στο κέντρο της πόλης, οι κτιριακές-τεχνητές επιφάνειες καλύπτουν το 77% της επιφάνειας, το οδικό δίκτυο το 19%, ενώ μόνο το 4% οι ανοιχτοί χώροι πράσινου (Τσόγκας, 2021), ενώ διαπίστώθηκε ότι η αναλογία πράσινου στη Θεσσαλονίκη ήταν μόλις 2,15m² ανά κάτοικο (Moussioropoulos et al., 2009). Αντίθετα, σε άλλες αστικές περιοχές αυτά τα ποσοστά (πρασίνου ανά κάτοικο) είναι σημαντικά μεγαλύτερα, όπως αυτό στο Βερολίνο που είναι 13m² ανά κάτοικο, στη Ρώμη 9m² ανά κάτοικο, στο Άμστερνταμ 27m² ανά κάτοικο, στις Βρυξέλες 29m² ανά κάτοικο και στην Ουάσιγκτον 50m² ανά κάτοικο (Τσόγκας, 2021). Το οδικό δίκτυο, που αποτελείται από κύριες οδικές αρτηρίες και δευτερεύουσες οδούς, οι οποίες διατρέχουν κατά μήκος και κατά πλάτος την πόλη, καταλήγουν στην περιφερειακή οδό. Πολλές από τις δευτερεύουσες οδούς έχουν μικρό πλάτος, δυσανάλογο με τα ψηλά κτίρια που τις περιβάλλουν (ύπαρξη στενών δρόμων ανάμεσα σε ψηλά κτίρια). Στην περιοχή κινούνται καθημερινά περισσότερα από 750.000 οχήματα και περίπου 600 λεωφορεία, που

ανήκουν στο στόλο των αστικών συγκοινωνιών, τα οποία εξυπηρετούν το επιβατικό κοινό με μεγάλο αριθμό δρομολογίων (Mitsakis et al., 2013).

Πίνακας 6. Κλιματικά δεδομένα για τη Θεσσαλονίκη.

Πηγή: <https://www.meteo.gr/climatic.cfm>

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

	Ιαν.	Φεβ.	Μαρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιουλ.	Αύγ.	Σεπ.	Οκτ.	Νοέμ.	Δεκ.	ΕΤΟΣ
Ατμοσφαιρική πίεση (hPa)	1018.7	1016.8	1016.0	1013.1	1013.7	1013.0	1012.8	1013.3	1016.3	1018.9	1018.4	1017.9	1015.7
Μέση θερμοκρασία (°C)	5.0	6.7	9.6	14.2	19.5	24.2	26.5	25.8	21.8	16.	10.9	6.7	15.6
Μέση μέγιστη θερμοκρασία (°C)	9.1	11.0	14.2	19.2	24.5	29.1	31.4	30.9	27.3	21.2	15.4	10.9	20.4
Μέση ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	1.2	2.3	4.4	7.3	11.8	16.0	18.4	18.1	14.9	10.6	6.6	2.7	9.5
Απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία (°C)	20.8	22.0	25.8	31.2	36.0	39.8	42.0	38.2	36.2	30.0	26.6	20.6	
Απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	-14.0	-12.8	-7.2	-1.2	3.0	6.8	9.6	8.2	2.6	-1.4	-.6.2	-.9.2	
Μέση σχετική υγρασία (%)	76	74	73	69	64	56	53	56	62	70	77	78	67
Μέση βροχόπτωση (mm)	37	40	46	36	44	32	26	21	26	41	58	53	460
Μέσος αριθμ. ημερών βροχής μεγαλύτερης 1 mm	6	6	7	5	6	4	3	3	3	5	7	7	62
Μέση ένταση ανέμου (m/s)	1.5	1.6	1.5	1.4	1.3	1.6	1.8	1.5	1.5	1.3	1.3	1.5	1.5

3.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

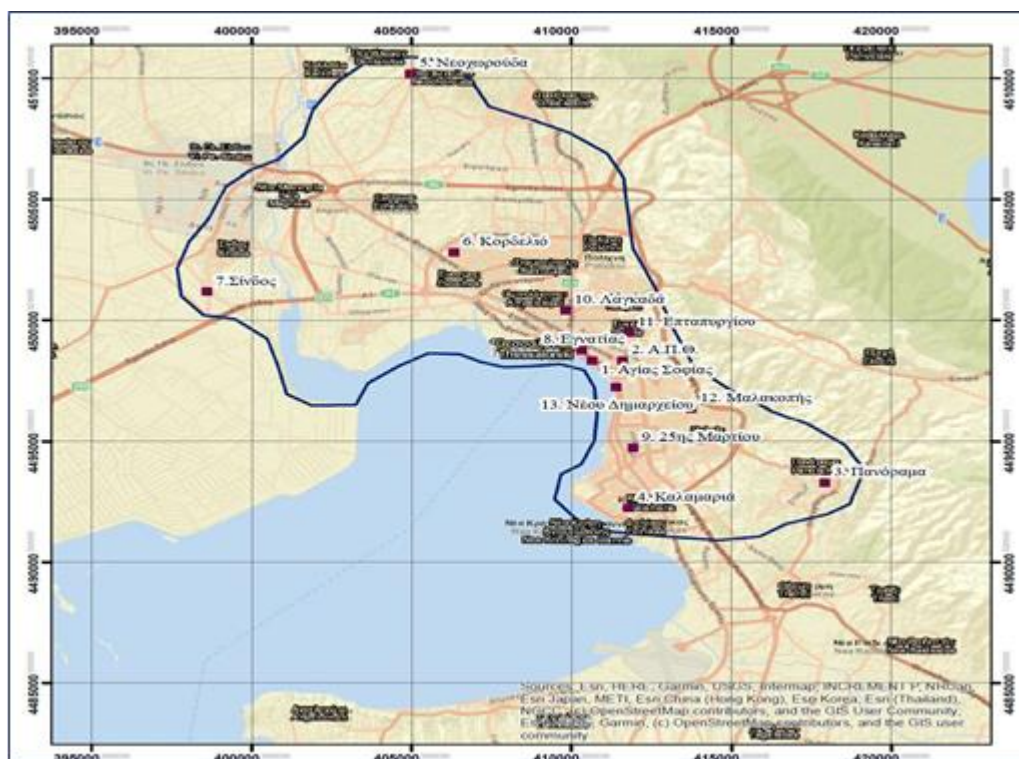
Η ατμοσφαιρική ρύπανση, στις πόλεις, αποτελεί μια από τις κυριότερες αιτίες πολλών προβλημάτων και κινδύνων που αφορούν την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες, που εκπέμπουν αυτούς τους αέριους ρύπους, στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές, αφορούν κυρίως τη χρήση και τη μετατροπή της ενέργειας και συνήθως είναι συγκεντρωμένες σε μικρή σχετικά έκταση, υποβαθμίζοντας το ατμοσφαιρικό περιβάλλον. Η αξιόπιστη εκτίμηση των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μια περιοχή, μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εγκατάσταση ενός Δικτύου Σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Οι Σταθμοί αυτοί είναι επανδρωμένοι με όργανα-αναλυτές, συνεχούς καταγραφής των διαφόρων ατμοσφαιρικών ρύπων, που μετρούν με πρότυπες μεθόδους, καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Τα Δίκτυα αυτά αναπτύσσονται χωρικά, στο κέντρο και στην περιφέρεια των

πόλεων, καθώς και στις γύρω βιομηχανικές και περιαστικές περιοχές, σε σχέση με την τοπογραφική και χωροταξική πολυπλοκότητα της κάθε περιοχής, αλλά και την ύπαρξη σ' αυτήν πηγών ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Ελληνα, 2020; Kassomenos et al., 2011). Έτσι, οι σταθμοί μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ανάλογα με τη θέση τους, αλλά και τις πηγές (εκπομπής) ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες (ΥΠΕΝ, 2001-2021):

- Αστικοί-Κυκλοφορίας: είναι σταθμοί που τοποθετούνται σε αστικά κέντρα και σε σημεία πολύ κοντά (περίπου 10m) με οδούς μεγάλης κυκλοφορίας οχημάτων.
- Αστικοί-Βιομηχανικοί: είναι σταθμοί εγκατεστημένοι σε απόσταση μικρότερη του 1km από βιομηχανικά κέντρα.
- Αστικοί-Υποβάθρου: είναι σταθμοί που τοποθετούνται σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων από αστικές πηγές, ώστε να μην επηρεάζονται άμεσα από τις πηγές αυτές και να δίνουν μια, όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική εικόνα, των επιπέδων των συγκεντρώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης της ευρύτερης αστικής περιοχής.
- Υποβάθρου: είναι σταθμοί εγκατεστημένοι σε μεγάλη απόσταση (μεγαλύτερη των 10Km από αστικά κέντρα, βιομηχανικές μονάδες, αυτοκινητόδρομους) από σημαντικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης, για να μετρούν τις συγκεντρώσεις, όχι μόνο των ρύπων της περιοχής που έχει εγκατασταθεί ο σταθμός, αλλά των ρύπων που μεταφέρονται από μεγάλες αποστάσεις.
- Περιαστικοί-Υποβάθρου: είναι σταθμοί εγκατεστημένοι στα όρια αστικών κέντρων και αρκετά μακριά από μεγάλες πηγές ατμοσφαιρικών ρύπων (πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, αυτοκινητόδρομους, εργοστάσια παραγωγής ενέργειας και άλλες βιομηχανίες). Έτσι, οι σταθμοί αυτοί καταγράφουν συγκεντρώσεις ρύπων που αφορούν εκπομπές από διάφορες πηγές, όχι μόνο της περιοχής εγκατάστασης του σταθμού, αλλά και ρύπους που μεταφέρονται από μεγάλες αποστάσεις.
- Περιαστικοί-Βιομηχανικοί: είναι σταθμοί εγκατεστημένοι σε βιομηχανικές περιοχές, σε απόσταση μικρότερη του 1km από τις κύριες πηγές εκπομπής ατμοσφαιρικών ρύπων αυτών των περιοχών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και προς συμμόρφωση με τις Κοινοτικές Οδηγίες, για να πραγματοποιηθεί η παρακολούθηση των επιπέδων, αλλά και της εξέλιξης της

ατμοσφαιρικής ρύπανσης, σε μια περιοχή, απαιτείται η εγκατάσταση Δικτύου Σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ανάλογα με τα προβλήματα και τις ανάγκες της κάθε περιοχή μελέτης. Έτσι, σήμερα στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν δύο Δίκτυα Σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, που έχουν στόχο την παρακολούθηση και αξιολόγηση των επιπέδων της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Το Εθνικό Δίκτυο Παρακολούθησης της Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ), του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), που λειτουργεί υπ' ευθύνη του Τμήματος Περιβάλλοντος, της Διεύθυνσης Περιβάλλοντος & Χωρικού Σχεδιασμού, της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (ΥΠΕΝ, 2001-2021) και το Δίκτυο, που ανήκει στο Δήμο Θεσσαλονίκης, που λειτουργεί υπό την επίβλεψη του Τμήματος Περιβάλλοντος και Προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή, της Διεύθυνσης Διαχείρισης Πρασίνου και Περιβάλλοντος, του Δήμου Θεσσαλονίκης (Πετρακάκης κ. ά., 2005; 2008; Petrakakis et al., 2007).



Εικόνα 20. Η θέση των εγκατεστημένων σταθμών μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Πηγή: Έλληνα, 2020, ESRI, <https://ypen.gov.gr/perivallon/>; <https://thessaloniki.gr/>; <https://envdimosthes.gr/>

Από την Εικόνα 20 (Ελληνα, 2020) προκύπτει ότι έχουν εγκατασταθεί σταθμοί αστικής κυκλοφορίας στο κέντρο της πόλης (Εγνατίας, Αγίας Σοφίας, 25^{ης} Μαρτίου, Λαγκαδά), σταθμοί αστικού υποβάθρου (Επταπυργίου, Α.Π.Θ., Καλαμαριά, Μαλακοπής και Νέου Δημαρχείου), σταθμοί περιφερειακά σε βιομηχανικές περιοχές (Κορδελιό, Σίνδο), καθώς και σταθμοί σε περιαστικές περιοχές (Πανόραμα, Νεοχωρούδα). Έτσι, διαπιστώνεται ότι, η κατανομή των Σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης καλύπτει ικανοποιητικά το σύνολο της περιοχής μελέτης, ώστε να είναι δυνατή η έγκυρη και έγκαιρη λήψη αποφάσεων από τις αρμόδιες αρχές, με σκοπό την αποφυγή επεισοδίων ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Πετρακάκης κ.ά., 2005; 2008; ΥΠΕΝ, 2001-2021).

Οι μετρήσεις των επιπέδων των ατμοσφαιρικών ρύπων, ενός Σταθμού, θεωρούνται αξιόπιστοι όταν γίνονται με τη χρήση πρότυπων μεθόδων και σύγχρονων επιστημονικών οργάνων-αναλυτών και γίνεται τακτικά βαθμονόμηση και συντήρηση αυτών των αναλυτών, ώστε να μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια ακόμη και πολύ μικρές μεταβολές των συγκεντρώσεων των ρύπων. Συνήθως, ένας μικροεπεξεργαστής, που βρίσκεται σε κάθε σταθμό μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, συνδέεται με τους αυτόματους αναλυτές και μεταβιβάζει τις τιμές των ατμοσφαιρικών ρύπων σε κεντρικό υπολογιστή της Υπηρεσίας, ώστε είναι δυνατή η συνεχής παρακολούθηση των επιπέδων ατμοσφαιρικής ρύπανσης της κάθε περιοχής. Επίσης, εκτός από τη συνεχή και αυτόματη καταγραφή των επιπέδων των συγκεντρώσεων των ρύπων (είτε σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, είτε σε data loggers) είναι χρήσιμο να γίνεται καταγραφή και μετεωρολογικών παραμέτρων (Πετρακάκης κ.ά., 2008; ΥΠΕΝ, 2001-2021).

3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ O₃ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στην ατμόσφαιρα μιας πόλης υπάρχει μεγάλος αριθμός χημικών ουσιών με μεγάλο βαθμό επικινδυνότητας για την ανθρώπινη υγεία. Όμως υπάρχει πρακτική δυσκολία για τη συνολική ανάλυση αυτού του σύνθετου μίγματος. Για το λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, αλλά και η Υπηρεσία Περιβάλλοντος των ΗΠΑ, έχουν θεσμοθετήσει όρια για ορισμένους ατμοσφαιρικούς ρύπους, εξαιτίας των

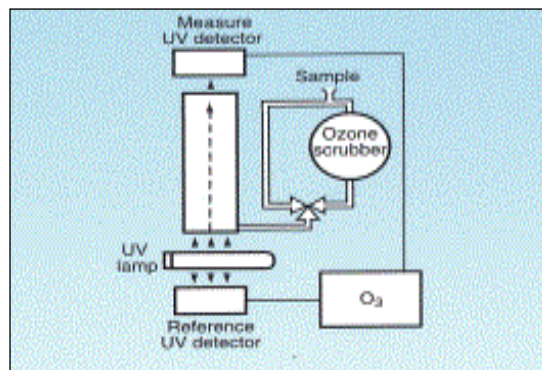
επιπτώσεών τους στην υγεία του γενικού πληθυσμού και στο περιβάλλον. Αυτοί οι ατμοσφαιρικοί ρύποι καλούνται ρύποι κριτήρια, για τους οποίους παραπάνω έγινε εκτενής αναφορά και είναι: το όζον (O_3), τα οξειδία του αζώτου (NO , NO_2), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM_{10} και $PM_{2,5}$), το βενζόλιο (C_6H_6), το διοξείδιο του θείου (SO_2) και τα βαρέα μέταλλα (ΥΠΕΝ, 2001-2021).

Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων των κλασμάτων PM_{10} και $PM_{2,5}$ πραγματοποιούνται μέσω της σταθμικής μεθόδου ή της μεθόδου της απορρόφησης της β-ακτινοβολίας, του O_3 με τη μέθοδο της απορρόφησης της υπεριώδους ακτινοβολίας UV, των NO_x με τη μέθοδο της χημειοφωταύγειας, του CO μέσω της αρχής της συγκριτικής υπέρυθρης φωτομετρίας και του SO_2 μέσω της αρχής φθορισμού της υπεριώδους ακτινοβολίας UV, ενώ για τη μέτρηση των αρωματικών υδρογονανθράκων BTEX, χρησιμοποιείται η μέθοδος της αέριας χρωματογραφίας (Petrakakis et al., 2007; Πετρακάκης κ.ά., 2005; 2008; ΥΠΕΝ, 2001-2021).

Η φωτοχημική αιθαλομίχλη, που όπως προαναφέρθηκε, σχηματίζεται από φωτοχημικές αντιδράσεις, παρουσία έντονης ηλιακής ακτινοβολίας, έχει αποτέλεσμα τη δημιουργία δευτερογενών ρύπων και κυρίως του τροποσφαιρικού όζοντος, το οποίο είναι ο σημαντικότερος δείκτης της φωτοχημικής ρύπανσης. Η φωτοχημική αιθαλομίχλη και η παραγωγή του τροποσφαιρικού όζοντος, εμφανίζεται σε πολλές αστικές περιοχές, εξαιτίας κυρίως εκπομπών από οχήματα, σε περιόδους με μεγάλη ηλιοφάνεια και αίθριο καιρό και είναι μια από τις σημαντικότερες αιτίες δημιουργίας επικίνδυνων προβλημάτων για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Επομένως, τα επίπεδα του όζοντος έχουν καθιερωθεί διεθνώς να χρησιμοποιούνται σαν μέτρο έντασης της φωτοχημικής ρύπανσης. Όμως για να δημιουργηθεί χρειάζεται ένα ορισμένο χρόνο (το καλοκαίρι περίπου 3 ώρες) και γι' αυτό το λόγο ανιχνεύεται συνήθως στις παρυφές των πόλεων, όπου μεταφέρονται οι πρόδρομες ουσίες σχηματισμού του, με ανέμους χαμηλής έντασης και έτσι αποκαλείται ρύπος των προαστίων (Ζάνης, 2014; Κανελλοπούλου 2015; Κασσωμένος, 2017; Παρασχά, 2014; Πετρακάκης κ.ά., 2005; ΥΠΕΝ, 2001-2021).

Οι μετρήσεις της συγκέντρωσης του O_3 , στα επίγεια Δίκτυα των Σταθμών μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιείται με αυτόματους

αναλυτές που χρησιμοποιούν την πρότυπη μέθοδο της απορρόφησης της υπεριώδους ακτινοβολίας UV.



Εικόνα 21. Σχηματικό διάγραμμα μέτρησης του όζοντος με τη μέθοδο της απορρόφησης της υπεριώδους ακτινοβολίας UV.

Πηγή: Κανελλοπούλου, 2015, <https://www.envea.global/solutions/ambient-monitoring-solutions/>

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εκλεκτική απορρόφηση της υπεριώδους ακτινοβολίας από την ποσότητα του O_3 που υπάρχει στο δειγματοληπτούμενο αέρα. Η συγκέντρωση του όζοντος είναι ανάλογη της μείωσης, που υφίσταται η δέσμη της υπεριώδους ακτινοβολίας, που εκπέμπεται από λάμπα Hg ($\lambda=245/253\text{nm}$), κατά τη διέλευσή της από το θάλαμο απορρόφησης του αναλυτή (οπτική διαδρομή στην Εικόνα 21), από τον οποίο περνά ο δειγματοληπτούμενος αέρας. Από τη μέτρηση της εξασθένησης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο δείγμα, υπολογίζεται η συγκέντρωση του όζοντος. Σαν αέριο αναφοράς ο αναλυτής χρησιμοποιεί ένα τμήμα του δειγματοληπτούμενου αέρα, που έχει προηγουμένως απαλλαγεί από το όζον (ozone scrubber). Για την αξιόπιστη βαθμονόμηση του αναλυτή χρησιμοποιείται μια εσωτερική ή εξωτερική γεννήτρια όζοντος, που μπορεί να παρέχει πολλά μίγματα γνωστής σύστασης (συγκέντρωσης) όζοντος και η οποία χρειάζεται συχνό εξωτερικό έλεγχο (Κανελλοπούλου, 2015; <https://www.envea.global/solutions/ambient-monitoring-solutions/>). Με τη βοήθεια του Εθνικού εργαστήριου αναφοράς για την ποιότητα της ατμόσφαιρας, του Εθνικού Δικτύου Παρακολούθησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης (ΕΔΠΑΡ) μπορεί να επιτευχθεί προσδιορισμός της σύστασης αερίων μιγμάτων, σε φιάλες αερίων, με τη μέθοδο της

3.4 ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ - ΕΠΙΤΡΕΠΤΑ ΟΡΙΑ

Οι τρεις σημαντικότεροι πυλώνες πολιτικής, που σήμερα δίνει έμφαση η Ευρωπαϊκή Ένωση αφορούν την κοινωνική συνοχή, την ανάπτυξη και το περιβάλλον, που έτσι, το καθιστά ισότιμο με τους άλλους δύο τομείς πολιτικής της ΕΕ. Γι' αυτό το λόγο, τις τελευταίες δεκαετίες, στην Ευρώπη, στην Ελλάδα, αλλά και σ' ολόκληρο τον κόσμο, γίνονται σημαντικές προσπάθειες για τη μείωση των επιτρεπτών συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων, με την εφαρμογή αυστηρών μέτρων/νομοθετημάτων για την ελάττωση των εκπομπών των ρύπων και γενικά τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Τα όρια που θεσπίζονται από την νομοθεσία αφορούν, όρια για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, όρια ενημέρωσης του κοινού και όρια συναγερμού ή λήψης εκτάκτων μέτρων. Η αρχική κύρια οδηγία πλαίσιο της ΕΕ για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα εκδόθηκε το 1996 (**Οδηγία 1996/ 62/ΕΚ**) και εναρμονίσθηκε με την ΚΥΑ 3277/209/2000, (ΦΕΚ 180/Β/17-2-2000) με την ελληνική νομοθεσία. Η οδηγία αυτή, είχε σαν στόχο τη μείωση-πρόληψη των επικίνδυνων επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον και όρισε τις βασικές αρχές μιας κοινής στρατηγικής για τη θέσπιση στόχων σχετικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα. Στη συνέχεια εκδόθηκε η Οδηγία **2002/3/ΕΚ** σχετικά με το όζον στον ατμοσφαιρικό αέρα, που εναρμονίσθηκε με την ΚΥΑ ΗΠ 38638/2016/2005 (ΦΕΚ 1334Β'/21.9.05) με την ελληνική νομοθεσία, για τον καθορισμό οριακών και κατευθυντήριων τιμών για τις συγκεντρώσεις όζοντος στον ατμοσφαιρικό αέρα και η Οδηγία **2004/107/ΕΚ** «Σχετικά με το αρσενικό, το κάδμιο, τον υδράργυρο, το νικέλιο και τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες στον ατμοσφαιρικό αέρα», που εναρμονίσθηκε με την Υ.Α. Η.Π. 22306/1075/Ε103/2007, με την ελληνική νομοθεσία για τον καθορισμό τιμών-στόχων και ορίων εκτίμησης των συγκεντρώσεων του αρσενικού,

του καδμίου, του υδραργύρου, του νικελίου και των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων στον ατμοσφαιρικό αέρα.

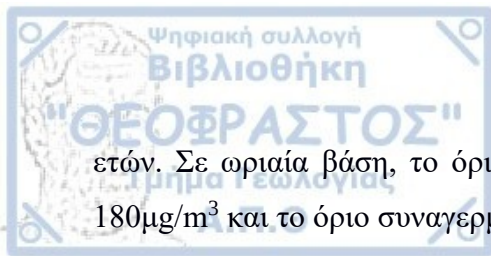
Πίνακας 7. Όρια εκτίμησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας από την Οδηγία 2008/50/ΕΚ.

Πηγή: <https://ypen.gov.gr/perivallon/> ΥΠΕΝ, 2021; Στογιάννης, 2019.

Ρύπος	Οριακή Τιμή	Όρια Έκτακτων Μέτρων – Συναγερμού
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	10 mg/m^3 – Μέγιστη ημερήσια οκτάωρη τιμή	
Διοξείδιο του θείου (SO_2)	350 $μg/m^3$ - Μέση ωριαία τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 24 φορές το χρόνο 125 $μg/m^3$ - Μέση ημερήσια τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 3 φορές το χρόνο	Όταν παρατηρείται υπέρβαση της μέσης ωριαίας τιμής των 500 $μg/m^3$ για τρεις συνεχόμενες ώρες
Διοξείδιο του αζώτου (NO_2)	200 $μg/m^3$ - Μέση ωριαία τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 18 φορές το χρόνο 40 $μg/m^3$ - Μέση ετήσια τιμή	Όταν παρατηρείται υπέρβαση της μέσης ωριαίας τιμής των 400 $μg/m^3$ για τρεις συνεχόμενες ώρες
Αιωρούμενα σωματίδια AS_{10}	50 $μg/m^3$ - Μέση ημερήσια τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 35 φορές το χρόνο 40 $μg/m^3$ - Μέση ετήσια τιμή	(Η κοινοτική νομοθεσία δεν διαθέτει όρια ενημέρωσης πληθυσμού και συναγερμού για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από αιωρούμενα σωματίδια. Έτσι εκδόθηκε η ΚΥΑ 70601 (ΦΕΚ 3272Β/23.12.13), η οποία θεσμοθετεί επίπεδα συγκεντρώσεων αιωρούμενων σωματιδίων AS_{10} , καθορίζοντας τα αντίστοιχα μέτρα.) Όταν παρατηρείται υπέρβαση της μέσης 24-ωρης τιμής των: 51-75 $μg/m^3$ συστάσεις για ευπαθείς ομάδες πληθυσμού. 76-100 $μg/m^3$ συστάσεις για το γενικό πληθυσμό 101-150 & >150 $μg/m^3$ μέτρα μείωσης των εκπομπών αιωρούμενων σωματιδίων από εστίες καύσης, βιομηχανικές-βιοτεχνικές δραστηριότητες και την κυκλοφορία
Αιωρούμενα σωματίδια $AS_{2,5}$	25 $μg/m^3$ - Μέση ετήσια τιμή	
Οζόν (O_3)	120 $μg/m^3$ - Μέγιστη ημερήσια 8ωρη μέση τιμή, της οποίας δεν πρέπει να σημειώνεται υπέρβαση περισσότερες από 25 φορές το χρόνο (κατά μέση τιμή) για διάστημα 3 ετών	180 $μg/m^3$ - Μέση ωριαία τιμή (όριο ενημέρωσης) 240 $μg/m^3$ - Μέση ωριαία τιμή (όριο συναγερμού)
Μόλυβδος (Pb)	0,5 $μg/m^3$ - Μέση ετήσια τιμή	
Βενζόλιο (C_6H_6)	5 $μg/m^3$ - Μέση ετήσια τιμή	
Αρσενικό (As)	6 ng/m^3 - Μέση ετήσια τιμή	
Κάδμιο (Cd)	5 $μg/m^3$ - Μέση ετήσια τιμή	
Νικέλιο (Ni)	20 $μg/m^3$ - Μέση ετήσια τιμή	
Βενζο(α)πυρένιο	1 $μg/m^3$ - Μέση ετήσια τιμή	

Το Μάιο του 2008 εγκρίθηκε η Οδηγία **2008/50/EK** για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη, που εναρμονίστηκε με την ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/E103 (ΦΕΚ 488B/30.3.11), με την ελληνική νομοθεσία. Η Οδηγία αυτή ενσωματώνει τις προηγούμενες οδηγίες αλλά και την απόφαση 97/101/EK που αφορά την καθιέρωση διαδικασίας για την αμοιβαία ανταλλαγή πληροφοριών και δεδομένα ατμοσφαιρικής ρύπανσης από σταθμούς και δίκτυα μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Επίσης, όρισε νέους στόχους σχετικά με την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα για τα $PM_{2.5}$. Ακόμη, το 2015 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε την Οδηγία **2015/1480/EK**, που εναρμονίστηκε με την ΚΥΑ 174505/607 (ΦΕΚ 1311B/13.4.17), με την ελληνική νομοθεσία, για την τροποποίηση ορισμένων παραρτημάτων των οδηγιών του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου (2004/107/EK και 2008/50/EK), οι οποίες ορίζουν τους κανόνες σχετικά με τις μεθόδους αναφοράς, την επικύρωση των δεδομένων και την τοποθεσία των σημείων δειγματοληψίας για την εκτίμηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Επίσης, επειδή η κοινοτική νομοθεσία δεν διαθέτει όρια ενημέρωσης πληθυσμού και συναγερμού για την αντιμετώπιση επεισοδίων από αιωρούμενα σωματίδια, εκδόθηκε η **ΚΥΑ 70601** (ΦΕΚ 3272B/23.12.13), που θεσμοθετεί επίπεδα επικινδυνότητας των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων σωματιδίων PM_{10} στην ατμόσφαιρα, η οποία καθορίζει και τα αντίστοιχα μέτρα στις περιπτώσεις υπερβάσεων των ορίων (ΥΠΕΝ, 2001-2021).

Έτσι, σύμφωνα με την Οδηγία **2008/50/EK** για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη, ισχύουν για τη χώρα μας τα νομοθετημένα όρια και στόχοι για τους βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους-κριτήρια: διοξείδιο του αζώτου (NO_2), όζον (O_3), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), αιωρούμενα σωματίδια (AS_{10} [PM_{10}] & $AS_{2.5}$ [$PM_{2.5}$]), διοξείδιο του θείου (SO_2), βενζόλιο (C_6H_6), βενζο(α)πυρένιο, καθώς και τα βαρέα μέταλλα [μόλυβδος (Pb), αρσενικό (As), κάδμιο (Cd) και Νικέλιο (Ni)]. Παραπάνω (Πίνακας 7) δίνονται τα όρια ποιότητας της ατμόσφαιρας από την Οδηγία 2008/50/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη για διάφορους αέριους και σωματιδιακούς ρύπους κριτήρια (ΥΠΕΝ, 2021). Ειδικότερα, θεσπίζεται ότι, για το όζον η μέγιστη μέση τιμή 8-ώρου, σε ημερήσια βάση, είναι τα $120\mu g/m^3$, ενώ αυτός ο στόχος της ΕΕ δεν πρέπει να υπερβαίνει σε συχνότητα τις 25 ημέρες ανά έτος, κατά μέσο όρο για διάστημα τριών



ετών. Σε ωριαία βάση, το όριο για την ενημέρωση-πληροφόρηση του κοινού είναι τα $180\mu\text{g}/\text{m}^3$ και το όριο συναγερμού τα $240\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ΥΠΠΕΝ, 2021).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΤΑ ΕΠΕΙΣΟΔΙΑ ΚΑΥΣΩΝΑ ΚΑΙ ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2020

4.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η ευρύτερη μητροπολιτική περιοχή της Θεσσαλονίκης είναι μια αστική περιοχή στην οποία οι εκπομπές οχημάτων, οι βιομηχανικές εκπομπές και οι εκπομπές από τη θέρμανση των κτιρίων (κατοικιών και επαγγελματικών χώρων) τους ψυχρούς μήνες του έτους, είναι ορισμένες από τις σημαντικότερες πηγές ατμοσφαιρικών ρύπων, που καθορίζουν την ποιότητα του αέρα της πόλης. Επιπλέον, σημαντικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης είναι και ο διεθνής αερολιμένας και το λιμάνι της πόλης. Γενικά, οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων διαφέρουν μεταξύ του ανατολικού και του δυτικού τμήματος της πόλης. Στην ανατολική πλευρά της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης καθοριστικότεροι παράγοντες είναι οι οδικές μεταφορές και η θέρμανση κατοικιών, ενώ σημαντικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης, στο πυκνοκατοικημένο δυτικό τμήμα της πόλης, επιπλέον θεωρούνται και οι βιομηχανίες, που βρίσκονται πλησίον αυτής της περιοχής (Πετρακάκης κ.ά., 2008; Έλληνα, 2020; Kassomenos et al., 2011; Markakis et al., 2010; Poupkou et al., 2007).

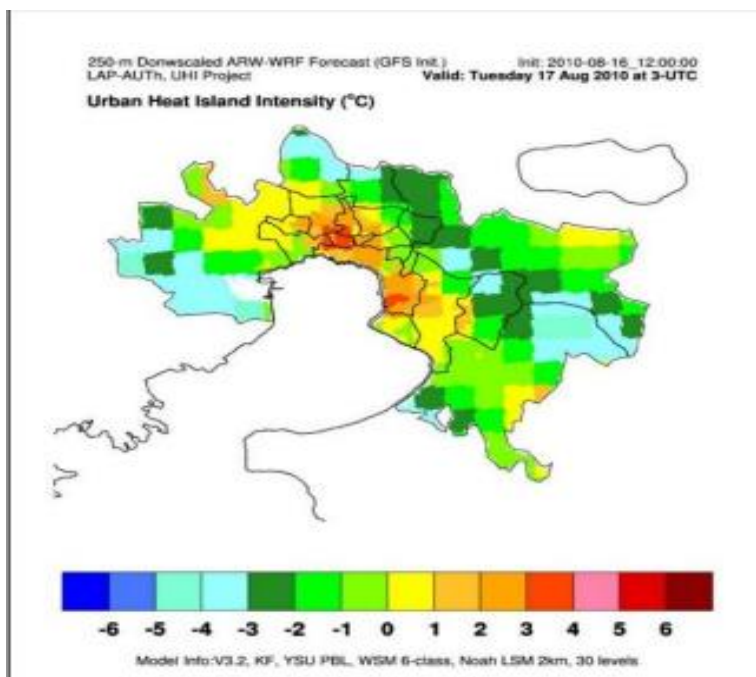
Η μορφολογία της πόλης, ο κακός πολεοδομικός σχεδιασμός και η σχεδόν απουσία πάρκων επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα του αέρα, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, καθώς αυτός δεν ανανεώνεται και διαμορφώνουν τις δυσμενείς συνθήκες ώστε να προκύπτουν υψηλές τιμές στατιστικών δεικτών ποιότητας της ατμόσφαιρας στην πόλη (Kassomenos et al., 2011). Επίσης, η παγίδευση της θερμότητας στα διάφορα συγκροτήματα κτιρίων πυκνοδομημένων περιοχών, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια ισχυρών επεισοδίων καύσωνα, σε συνδυασμό με την παγίδευση των ατμοσφαιρικών ρύπων στις οδικές χαράδρες της πόλης, έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος. Στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης

κινούνται καθημερινά περισσότερα από 750.000 οχήματα και περίπου 600 λεωφορεία (Mitsakis et al., 2013). Αυτός ο μεγάλος αριθμός και η συνεχής ροή των οχημάτων, που χρησιμοποιούνται στην πόλη, η απουσία εναλλακτικών δημόσιων μέσων μαζικής μεταφοράς (υπάρχουν μόνο λεωφορεία του ΟΑΣΘ), αλλά και η διεύρυνση της πόλης, αυξάνει συνεχώς τον αριθμό μετακινήσεων για υπηρεσίες, εμπορικές δραστηριότητες και ψυχαγωγία. Έτσι, συνεχώς αυξάνει ο αριθμός των οχημάτων, που καθημερινά μετακινούνται στην πόλη, ενώ ταυτόχρονα αυξάνονται και οι αποστάσεις που μετακινούνται οι πολίτες, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται συχνά φαινόμενα κυκλοφοριακής συμφόρησης και χαμηλές ταχύτητες και διακοπτόμενη πορεία μετακινήσεων, τα οποία έτσι συνεχώς αυξάνουν τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων και γενικότερα την επιβάρυνση του αστικού περιβάλλοντος (Kassomenos et al., 2012; Progiou & Ziomas, 2011).

Γενικά, από την παρακολούθηση των μετρήσεων ατμοσφαιρικής ρύπανσης και τη μελέτη της εξέλιξης των επιπέδων των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων, τις τελευταίες δεκαετίες, προκύπτει ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση στη Θεσσαλονίκη σταδιακά μετεξελίσσεται σε φωτοχημική (Πετρακάκης κ.ά., 2005; 2008). Στο σχηματισμό αυτού του φωτοχημικού νέφους παίζουν σημαντικό ρόλο τα οξειδία του αζώτου, το μονοξειδίο του άνθρακα και οι πτητικές οργανικές ενώσεις, που εκπέμπονται κυρίως από οχήματα (κινητήρες μηχανών εσωτερικής καύσης), από κεντρικές θερμάνσεις και βιομηχανικές δραστηριότητες.

Η προαναφερθείσα κατάσταση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος επιδεινώνεται εξαιτίας του φαινομένου της Αστικής Θερμικής Νησίδας (ΑΘΝ) στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης (Εικόνα 22). Η μελέτη των χαρακτηριστικών της Αστικής Θερμικής Νησίδας στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, έδειξε ότι η ΑΘΝ είναι ισχυρότερη κατά τη διάρκεια της νύχτας, με τις μεγαλύτερες εντάσεις να σημειώνονται τις πρώτες πρωινές ώρες και να είναι μέτρια κατά τη διάρκεια της ημέρας, αποκτώντας ελάχιστη ένταση νωρίς το απόγευμα (Giannaros & Melas, 2012; Parliari et al., 2019; Τσόγκας, 2021; Σάρας, 2020; Χοστελίδου, 2012). Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε ότι οι διαφορές των θερμοκρασιών μεταξύ του πολεοδομικού συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης και της γειτονικής υπαίθρου, κατά την διάρκεια όλου του εικοσιτετραώρου, εμφανίζονται

βαθμιαία αυξανόμενες από την έναρξη της θερινής περιόδου, διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα όλους τους καλοκαιρινούς μήνες και από τον Οκτώβριο, σταδιακά αρχίζουν να εμφανίζουν μείωση (Σάρας, 2020). Επίσης, προκύπτει ότι από τους δύο βασικούς φυσικούς μηχανισμούς, της νυκτερινής ακτινοβολίας και της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, που σχετίζονται με τη δημιουργία της ΑΘΝ, ο μηχανισμός της νυκτερινής ακτινοβολίας είναι πιο αποτελεσματικός, αφού συνοδεύεται από μεγαλύτερες εντάσεις (νύχτα – πρωί) της ΑΘΝ (Giannaros & Melas, 2012; Parliari et al., 2019; Σάρας, 2020).



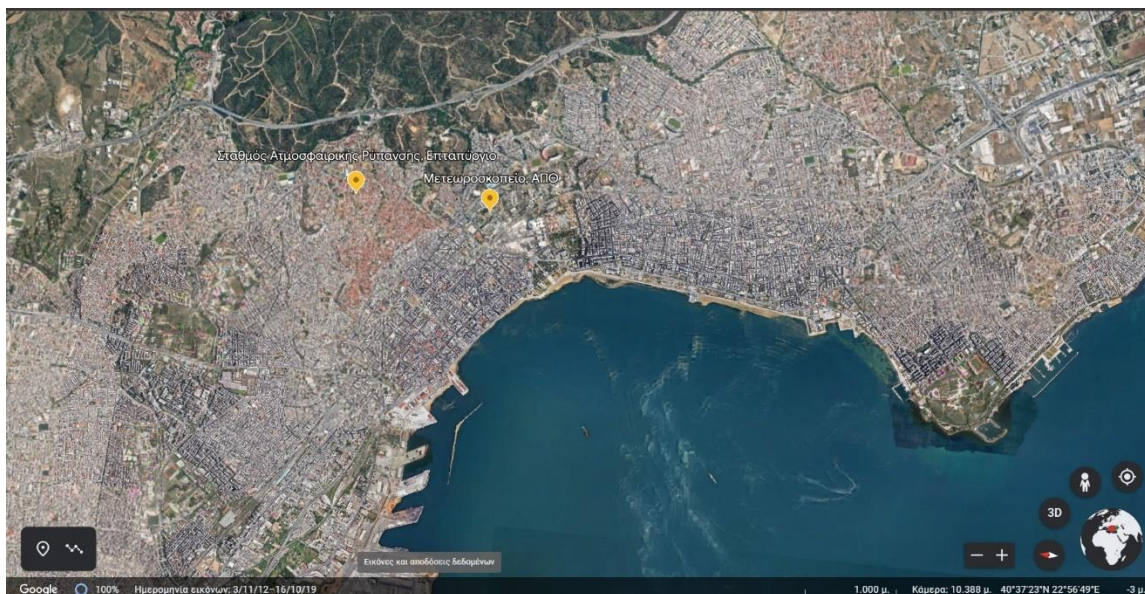
Εικόνα 22. Αστική Θερμική Νησίδα στη Θεσσαλονίκη.
Πηγή: <https://www.esa.int/esearch?q=heat+island+in+Thessaloniki>

Η επιβάρυνση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, εξαιτίας του φαινομένου της ΑΘΝ, είναι μια από τις συχνές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα σε αστικές περιοχές, που χαρακτηρίζονται από ένα πυκνοδομημένο περιβάλλον, με έλλειψη πρασίνου και υπερβολικής χρήσης ενέργειας (Rosenfeld et al., 1998), μια επιβάρυνση που είναι πολύ πιθανόν να ενταθεί, εάν υπάρξουν υψηλότερες θερμοκρασίες του αέρα, κάτι που μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θνησιμότητας, (Matzarakis et al., 2009). Επίσης, εκτός από την ΑΘΝ, που παγιδεύει τη θερμότητα μέσα στα πολεοδομικά

συγκροτήματα, όπως προαναφέρθηκε, παρατηρείται και το φαινόμενο της οδικής χαράδρας, δηλαδή της παγίδευσης των ατμοσφαιρικών ρύπων, μέσα στους στενούς δρόμους μεταξύ υψηλών κτιρίων σε πυκνοδομημένες αστικές περιοχές, που εκπέμπονται κυρίως από την κυκλοφορία των οχημάτων (Ζάνης, 2014; Κασσωμένος, 2017; Μελάς 2007). Έτσι, η συγκέντρωση των ατμοσφαιρικών ρύπων γίνεται μέγιστη κοντά στο έδαφος και ελαττώνεται περίπου εκθετικά με το ύψος, από το επίπεδο του δρόμου.

Οι παραπάνω περιβαλλοντικοί παράγοντες, σε συνδυασμό με τις μεταβολές διαφόρων μετεωρολογικών παραμέτρων, όπως ο άνεμος, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα, κλπ, επηρεάζουν τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και σε σχέση με διάφορους προσωπικούς παράγοντες των πολιτών (κατάσταση της υγείας, ηλικία, συνθήκες εργασίας, κλπ) διαμορφώνουν το θερμικό ισοζύγιο μεταξύ του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος και κατ' επέκταση το επίπεδο θερμικής καταπόνησης (δείκτες δυσφορίας) των κατοίκων. Κατά τη διάρκεια ισχυρών επεισοδίων καύσωνα η θερμική καταπόνηση γίνεται μεγαλύτερη και σε συνδυασμό με υψηλές συγκεντρώσεις φωτοχημικών ρύπων και αιωρούμενων σωματιδίων οδηγούν στην αύξηση των συνθηκών δυσφορίας των κατοίκων και στη γενικότερη υποβάθμιση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των πολιτών στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης. Επίσης, από την υπερθέρμανση του πλανήτη, εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, κατά τη διάρκεια των τεσσάρων τελευταίων δεκαετιών, έχει διαπιστωθεί ότι, υπάρχει μια προοδευτική άνοδος της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο (1850-1900). Έτσι, η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, την περίοδο 2010-2019, σε σχέση με την περίοδο 1850-1900, εξαιτίας των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, εκτιμάται ότι πιθανότατα κυμαίνεται από 0.8°C ως 1.3°C, με μέση εκτίμηση τους 1.07°C (IPCC, 2021; WMO, 2022). Επομένως, από τα παραπάνω προκύπτει ότι, στο άμεσο μέλλον, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος για δραματική αύξηση της συχνότητας των ισχυρών επεισοδίων καύσωνα, εξαιτίας της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη λόγω της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια να παρουσιασθούν τα επίπεδα συγκέντρωσης του όζοντος, κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, μιας από τις μεγαλύτερες ελληνικές πόλεις, την περίοδο της τελευταίας εικοσαετίας. Παίρνοντας υπόψη τα διαθέσιμα δεδομένα των μετρήσεων της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών ρύπων, που δείχνουν ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση, στην ευρύτερη περιοχή του πολεοδομικού συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης, την τελευταία εικοσαετία, σταδιακά μετεξελίσσεται σε φωτοχημική, αλλά και της προοδευτικής αύξησης της συχνότητας των επεισοδίων καύσωνα, εξαιτίας της πακόσμιας κλιματικής αλλαγής, η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη των επιπέδων των συγκεντρώσεων του κυριότερου δείκτη και μέτρου εμφάνισης της φωτοχημικής ρύπανσης (αιθαλομίχλης), του όζοντος (O_3), κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, μιας από τις μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδος. Η εξεταζόμενη περίοδος είναι η θερμή περίοδος Μαΐου-Σεπτεμβρίου και κυρίως οι καλοκαιρινοί μήνες, όταν εμφανίζονται και τα περισσότερα επεισόδια καύσωνα, κατά τη διάρκεια της περιόδου 2001-2020.



Εικόνα 23. Οι θέσεις των δύο αντιπροσωπευτικών σταθμών που επιλέχθηκαν στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.
Πηγή: Google Maps, 2023.

Για την αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης (Εικόνα 23), παίρνοντας υπόψη τα διαθέσιμα δεδομένα των μετρήσεων της συγκέντρωσης του όζοντος, επιλέχθηκε ο αντιπροσωπευτικός αστικός σταθμός υποβάθρου του Επταπυργίου (LCZ 6: Open low-rise), στην Άνω Πόλη (Εικόνα 24), του Δικτύου Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, του Δήμου Θεσσαλονίκης (<https://envdimosthes.gr/>; Κελέσης κ.ά, 2022; Πετρακάκης κ.ά, 2005; 2008). Η επιλογή αυτή έγινε καθώς ο παραπάνω αντιπροσωπευτικός σταθμός, αφενός παρουσιάζει τα μεγαλύτερα επίπεδα συγκέντρωσης του όζοντος (το O_3 εμφανίζει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις στην περιφέρεια των πόλεων, γι' αυτό αποκαλείται και ρύπος των προαστίων) και αφετέρου είχε την όσο δυνατόν πιο ολοκληρωμένη σειρά δεδομένων για την περίοδο (2001-2020) που εξετάζουμε (Κελέσης κ.ά, 2022; Πετρακάκης κ.ά, 2005; 2008). Πρέπει να επισημανθεί ότι, γενικά σε διάφορους σταθμούς μέτρησης ατμοσφαιρικής ρύπανσης παρατηρούνται διάφορα προβλήματα λειτουργίας στους αναλυτές, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ασυνέχειες στην καταγραφή των δεδομένων. Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες των δυο αντιπροσωπευτικών σταθμών, που επιλέχθηκαν στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.



Εικόνα 24. (α) Ο αστικός σταθμός υποβάθρου του Επταπυργίου, στην Άνω Πόλη, του Δικτύου Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, του Δήμου Θεσσαλονίκης. (β) Εσωτερικό Σταθμού Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, του Δήμου Θεσσαλονίκης.

Πηγή: <https://envdimosthes.gr/> ; <https://thessaloniki.gr/>

Πίνακας 8. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες των δύο αντιπροσωπευτικών σταθμών που επιλέχθηκαν στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Πηγή: <https://meteo.geo.auth.gr/>; <https://envdimosthes.gr/>

Σταθμός	Γεωγραφικό Πλάτος (Latitude)	Γεωγραφικό Μήκος (Longitude)	Υψόμετρο (Altitude)
Μετεωρολογικός Σταθμός Α.Π.Θ. Οροφή Μετεωροσκοπείου	40,63110	22,95812	50,0 m asl
Σταθμός Επταπυργίου	40,644223	22,958404	171,2 masl



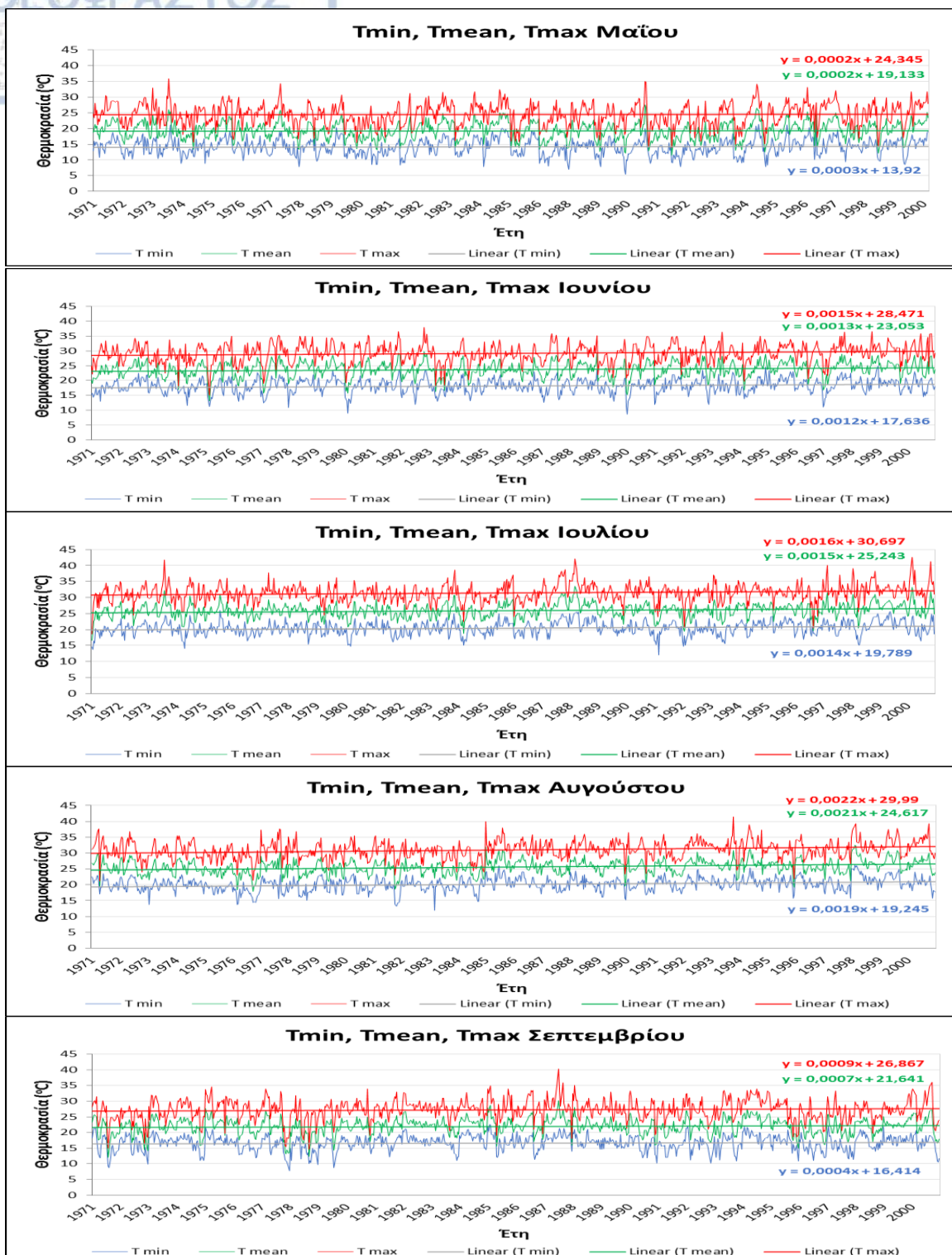
Εικόνα 25. Μετεωρολογικός Σταθμός Α.Π.Θ., Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ. – Οροφή Μετεωροσκοπείου, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Πηγή: <https://meteo.geo.auth.gr/> ; http://www.geo.auth.gr/gr_deps_gmc.htm

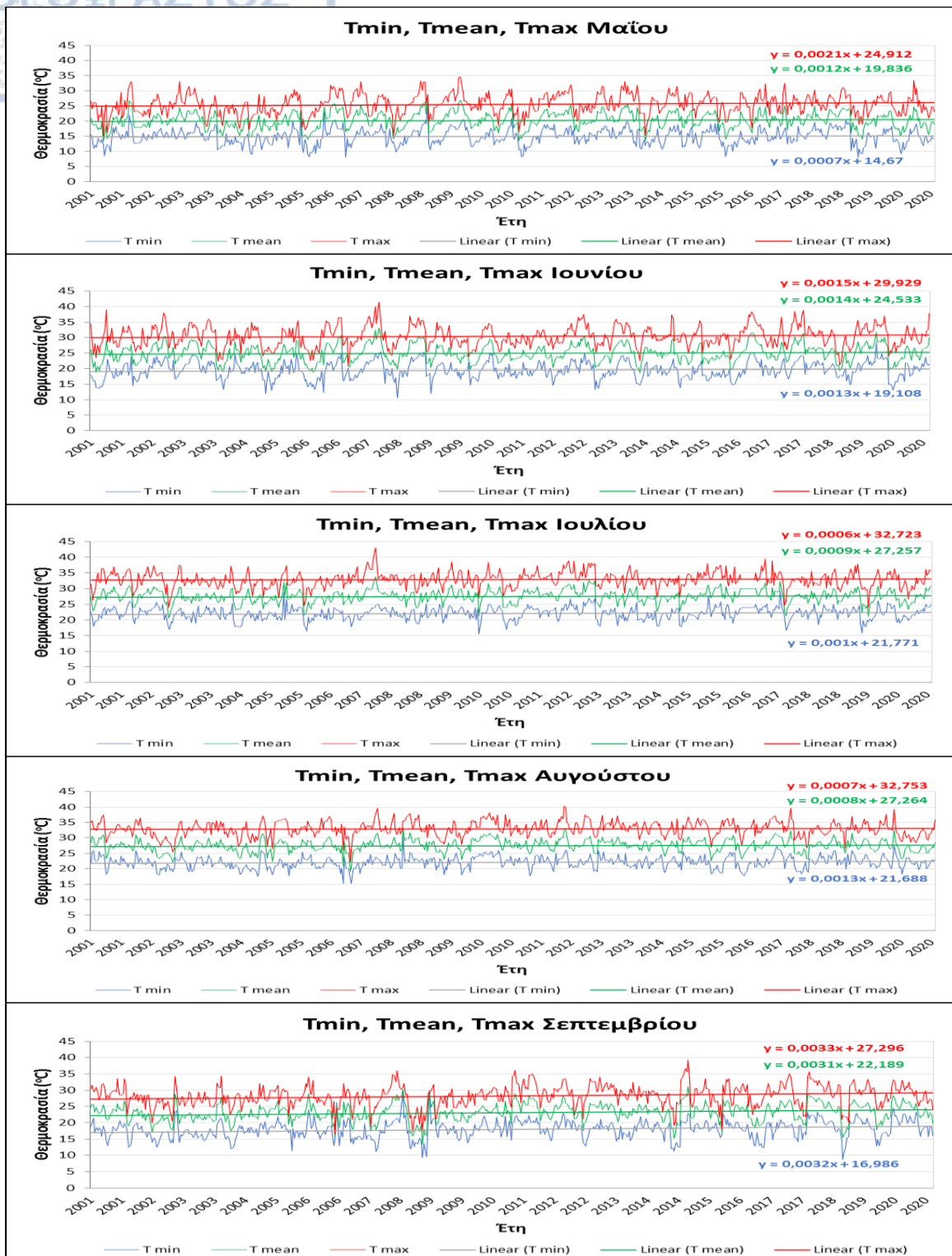
Όσον αφορά τις μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα, βάσει των οποίων έγινε εκτίμηση της συχνότητας εμφάνισης των επεισοδίων καύσωνα, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, παίρνοντας υπόψη τα διαθέσιμα δεδομένα των μετεωρολογικών παρατηρήσεων, για την εξεταζόμενη περίοδο 2001-2020, επιλέχθηκε ο αυτόματος αντιπροσωπευτικός Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ. (Εικόνα 25) στην Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ.–Οροφή Μετεωροσκοπείου, του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Α.Π.Θ. (<https://meteo.geo.auth.gr/>; http://www.geo.auth.gr/gr_deps_gmc.htm), που βρίσκεται στο γεωγραφικό κέντρο της πόλης. Επίσης, από τον ίδιο Μετεωρολογικό σταθμό χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα αναφοράς οι μετρήσεις θερμοκρασίας του αέρα για την περίοδο 1971-2000.

4.2 ΤΑ ΕΠΕΙΣΟΔΙΑ ΚΑΥΣΩΝΑ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2020

Στα διαγράμματα, που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι διαθέσιμες μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα από τον αντιπροσωπευτικό Μετεωρολογικό σταθμό του Α.Π.Θ. στην Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ.–Οροφή Μετεωροσκοπείου, του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Α.Π.Θ. (<https://meteo.geo.auth.gr/>; http://www.geo.auth.gr/gr_deps_gmc.htm), που βρίσκεται στο γεωγραφικό κέντρο της Θεσσαλονίκης, για την περίοδο 1971-2020. Έτσι, στα διαγράμματα 1 και 2 παρουσιάζονται οι ημερήσιες διακυμάνσεις των θερμοκρασιών T_{min} , T_{mean} , T_{max} , (ελάχιστη, μέση και μέγιστη θερμοκρασία) τους θερμούς μήνες Μάιος–Σεπτέμβριος, τόσο κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000, όσο και κατά την εξεταζόμενη περίοδο 2001-2020, στη Θεσσαλονίκη, ενώ στα διαγράμματα 3 και 4 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες μέσες ετήσιες διακυμάνσεις των θερμοκρασιών T_{min} , T_{mean} , T_{max} και οι αντίστοιχες γραμμές τάσεις, για κάθε έναν από τους θερμούς μήνες της περιόδου Μαΐου–Σεπτεμβρίου. Στη συνέχεια έγινε εκτίμηση της διακύμανσης της μέσης ετήσιας τιμής και των γραμμικών τάσεων, τόσο κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000, όσο και κατά την εξεταζόμενη περίοδο 2001-2020 (διάγραμμα 5), στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα επεισόδια καύσωνα στη Θεσσαλονίκη, κατά την περίοδο 2001-2020, η εκτίμηση των οποίων έγινε σύμφωνα με το κριτήριο του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (WMO), που ορίζει σαν «επεισόδιο καύσωνα» την περίοδο άνω των 5 συνεχόμενων ημερών με ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία, που υπερβαίνει κατά τουλάχιστον 5°C , τη μέση ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία της περιόδου Μαΐου–Σεπτεμβρίου, με περίοδο ελέγχου την περίοδο 1971-2000 (Frich et al., 2002; Jacob et al., 2014). Έτσι, στα διαγράμματα 6 και 7 παρουσιάζονται η ετήσια και η μηνιαία κατανομή των επεισοδίων καύσωνα στη Θεσσαλονίκη, τους θερμούς μήνες Μάιος–Σεπτέμβριος των ετών 2001-2020 και παρατίθεται η κατανομή της μέγιστης T_{max} , κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα στη Θεσσαλονίκη, την εξεταζόμενη χρονική περίοδο 2001-2020.

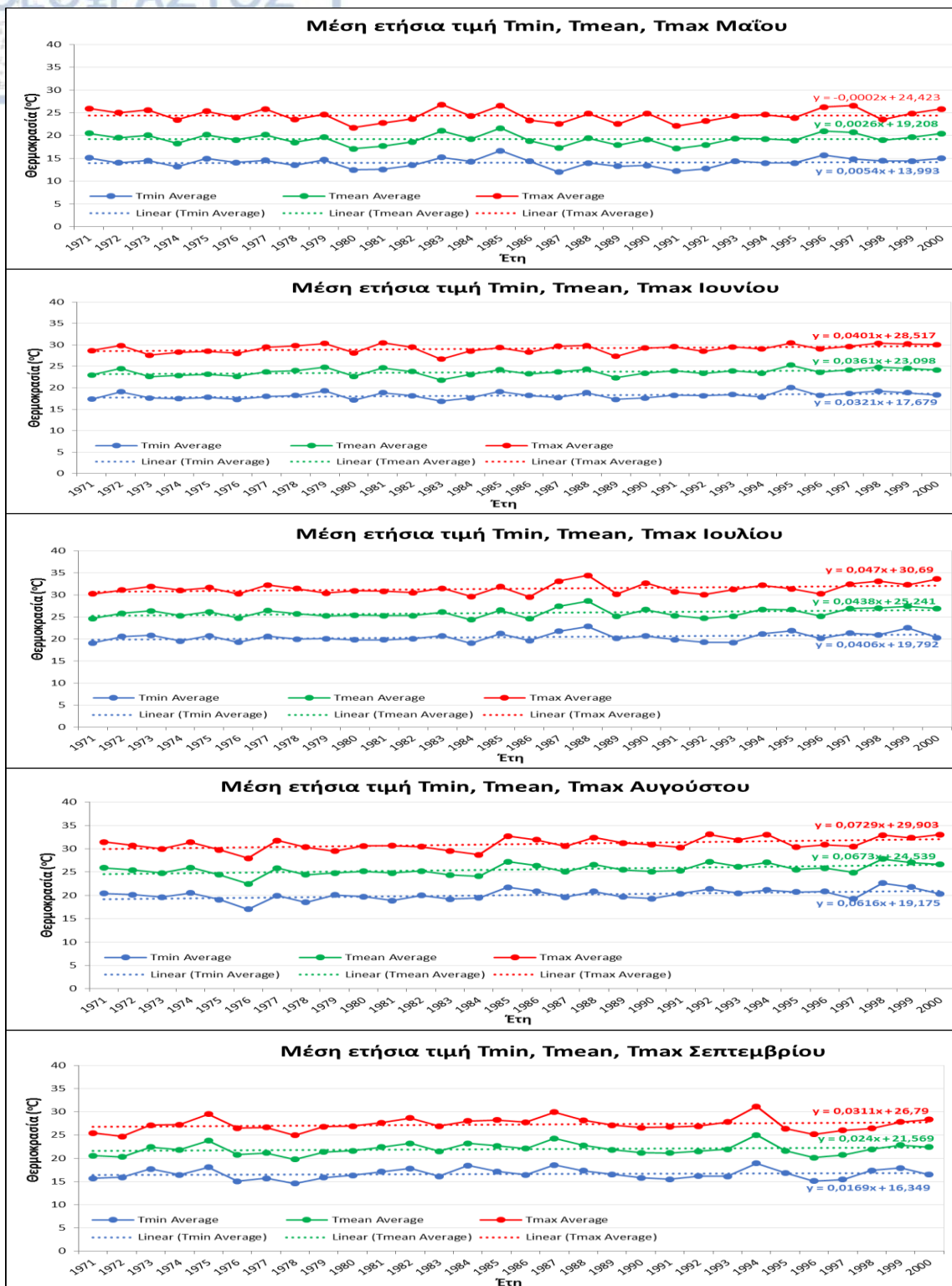


Διάγραμμα 1. Ημερήσια διακύμανση και γραμμική τάση των Tmin, Tmean, Tmax (°C), τους θερμούς μήνες Μάιος–Σεπτέμβριος, κατά την περίοδο αναφοράς 1971–2000, στη Θεσσαλονίκη. Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.



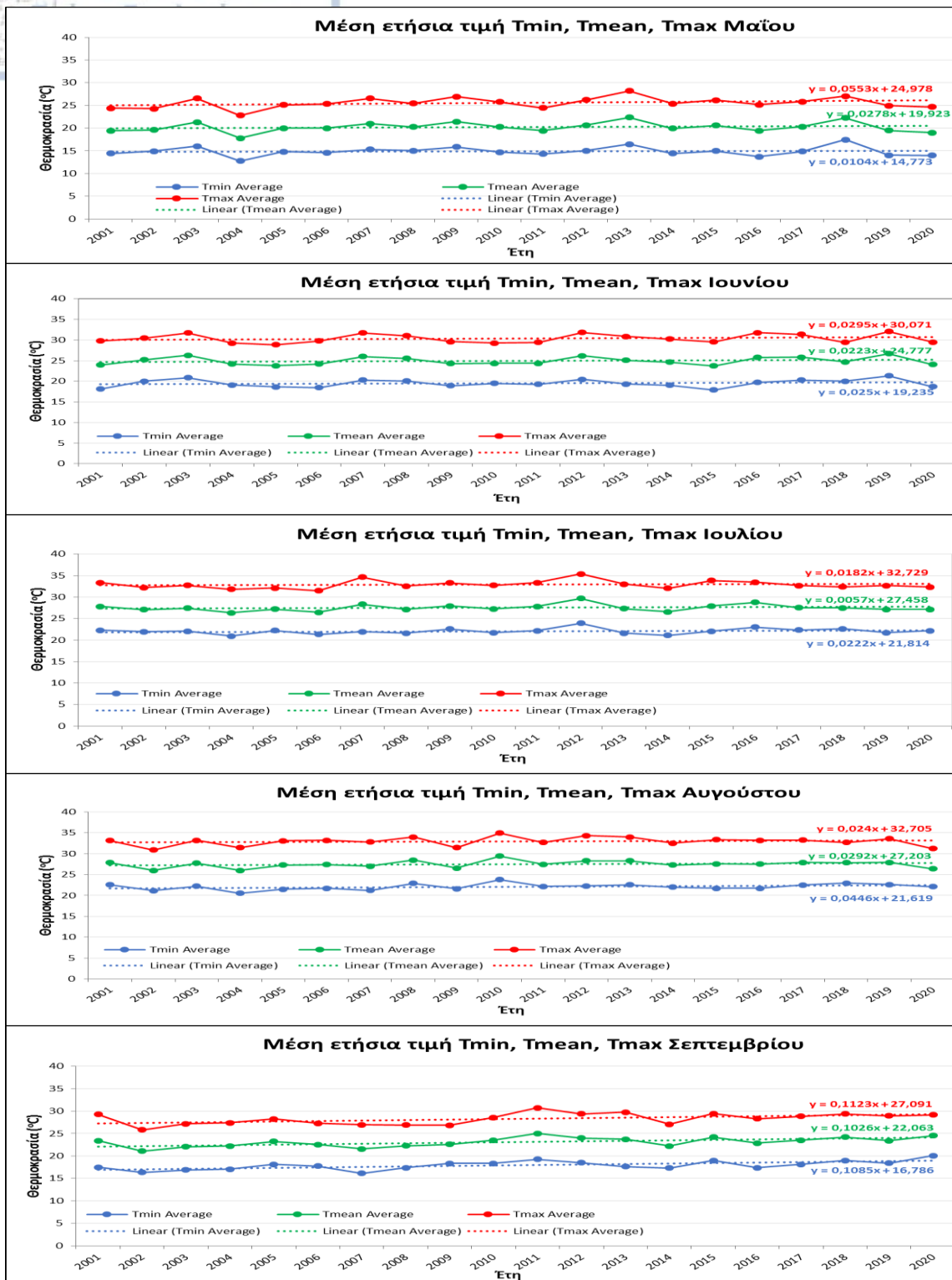
Διάγραμμα 2. Ημερήσια διακύμανση και γραμμική τάση των θερμοκρασιών Tmin, Tmean, Tmax (οC), τους θερμούς μήνες Μάιο–Σεπτέμβριος, κατά την περίοδο 2001-2020, στη Θεσσαλονίκη.

Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.

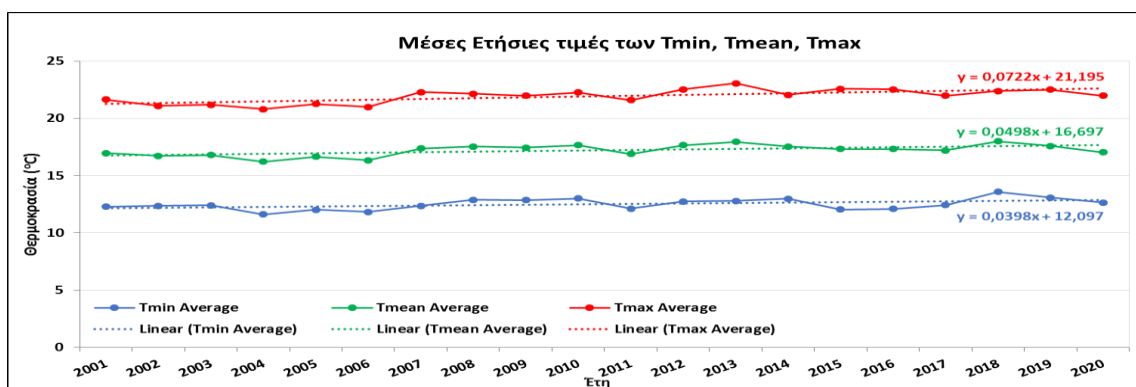
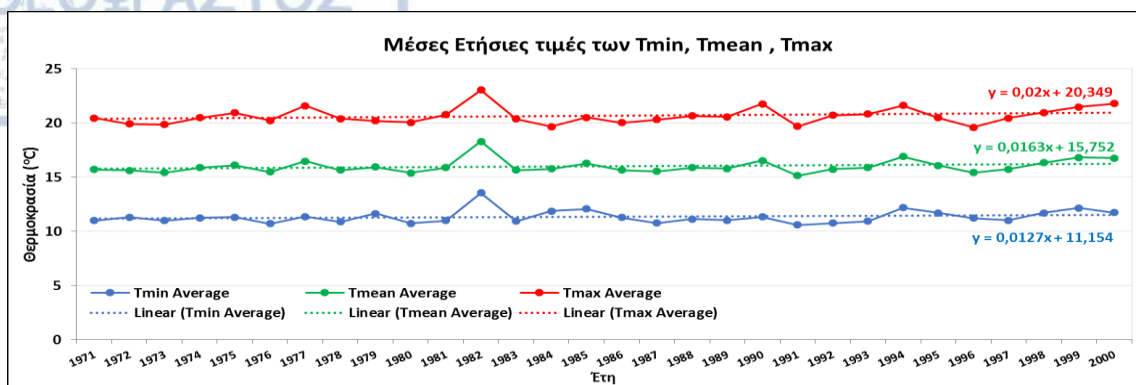


Διάγραμμα 3. Μέση ετήσια διακύμανση και γραμμική τάση των θερμοκρασιών Tmin, Tmean, Tmax, των θερμών μηνών Μαΐου–Σεπτεμβρίου, κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000, στη Θεσσαλονίκη.

Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.

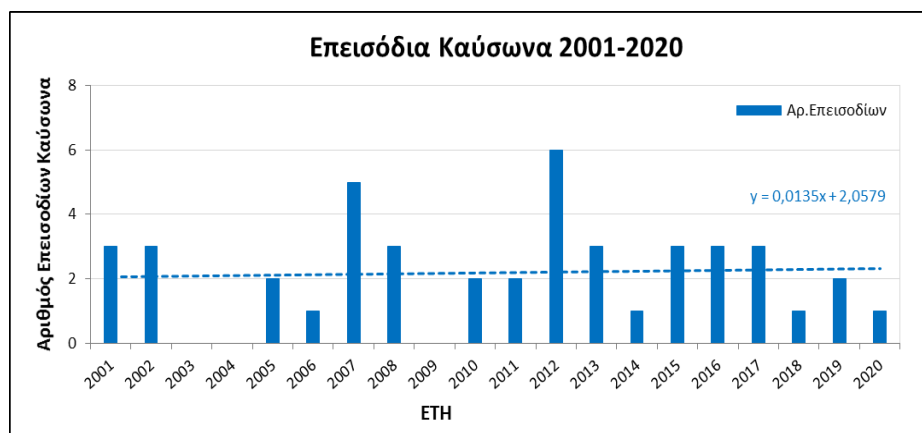


Διάγραμμα 4. Μέση ετήσια διακύμανση και γραμμική τάση των θερμοκρασιών Tmin, Tmean, Tmax, των θερμών μηνών Μαΐου–Σεπτεμβρίου, κατά την περίοδο 2001-2020, στη Θεσσαλονίκη. Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.



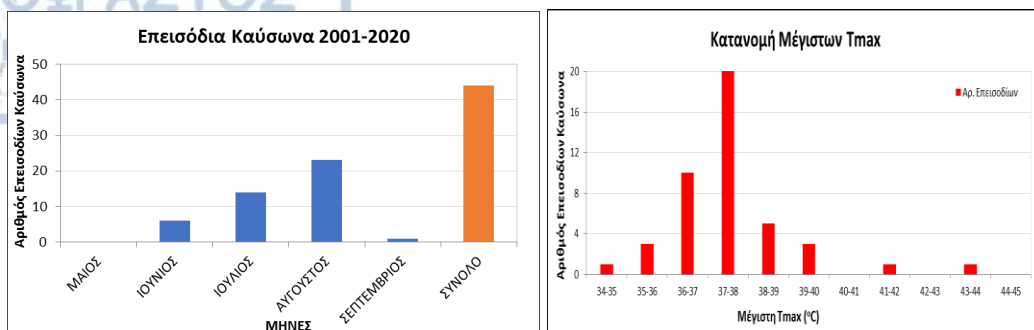
Διάγραμμα 5. Μέση ετήσια διακύμανση και γραμμική τάση των θερμοκρασιών Tmin, Tmean, Tmax (°C), κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000 (επάνω) και κατά την περίοδο 2001-2020 (κάτω), στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.

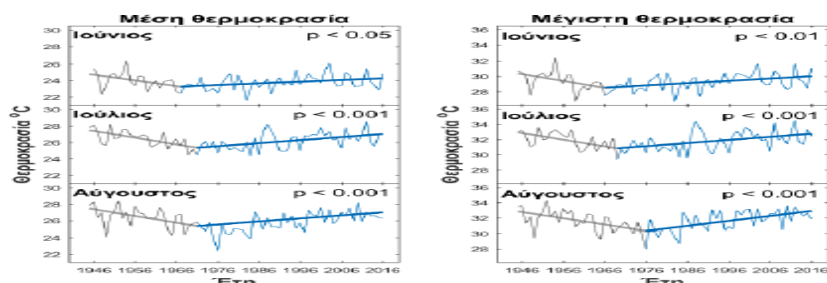


Διάγραμμα 6. Ετήσια κατανομή και γραμμική τάση των επεισοδίων καύσιων στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2001-2020.

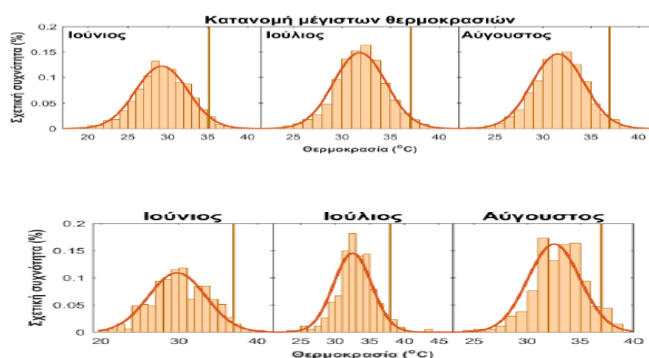
Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.



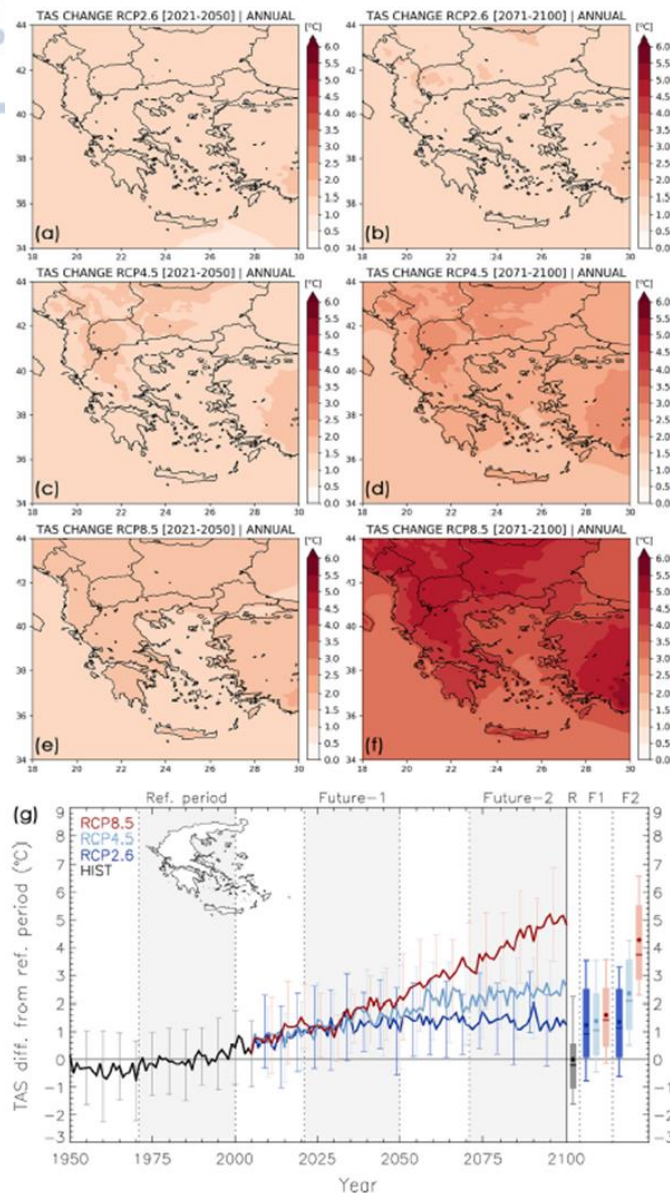
Διάγραμμα 7. (α) Μηνιαία κατανομή των επεισοδίων καύσωνα στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 2001-2020. (β) Κατανομή της μέγιστης Tmax (°C), κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα στη Θεσσαλονίκη, τα έτη 2001-2020.
Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.



Εικόνα 26. Μέση ετήσια διακύμανση των θερμοκρασιών (Tmin, Tmax, (°C)) και η ανάλυση της τάσης (με επιμέρους γραμμικά μοντέλα), για τους θερινούς μήνες (Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο), την περίοδο 1946–2016, για τη Θεσσαλονίκη, σύμφωνα με την ανάλυση του Ζουμάκη (2016).
Πηγές δεδομένων: Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης και Weather Underground – LGTS).

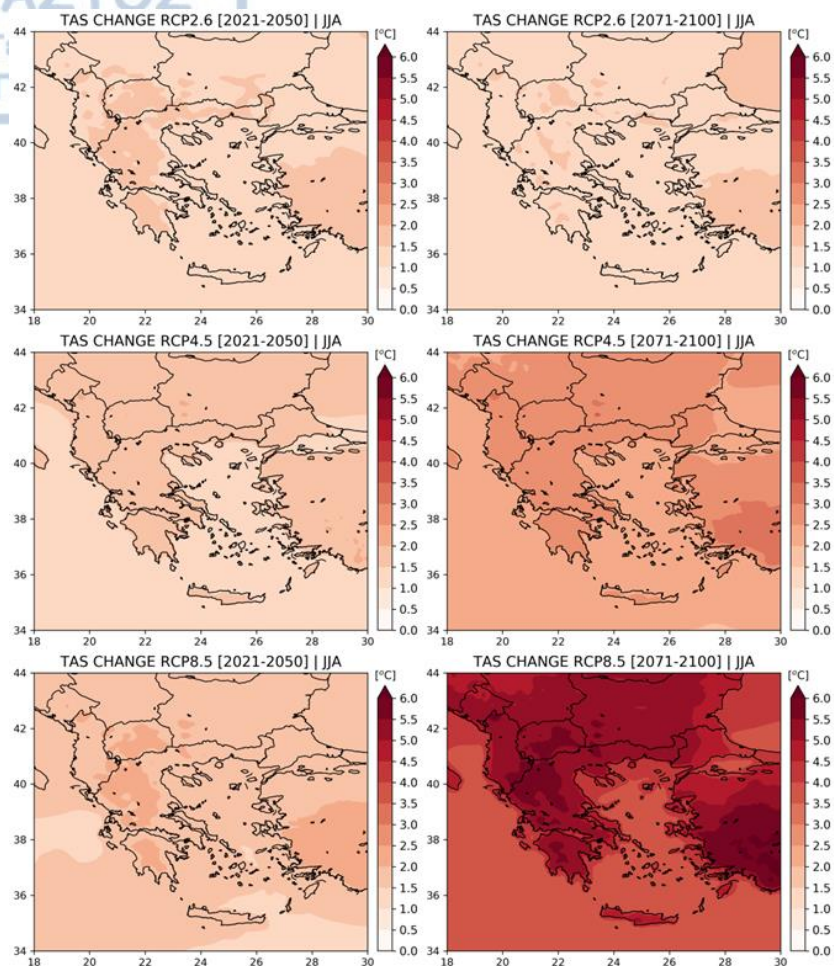


Εικόνα 27. Κατανομή των μέγιστων ημερήσιων θερμοκρασιών (°C), τους θερινούς μήνες (Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο), με τα αντίστοιχα όρια (97,5° εκατοστημόριο της κατανομής – η συνεχής καμπύλη απεικονίζει την αντίστοιχη κανονική κατανομή), τις περιόδους 1931–2016 (επάνω) και 2006-2016 (κάτω), για τη Θεσσαλονίκη, σύμφωνα με την ανάλυση του Ζουμάκη (2016).
Πηγές δεδομένων: Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης και Weather Underground – LGTS).



Εικόνα 28. Αποτελέσματα από τις μαθηματικές προσομοιώσεις του περιφερειακού κλιματικού μοντέλου EURO-CORDEX στις οποίες παρουσιάζεται η διαφορά των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών-TAS, μεταξύ του εγγύς μέλλοντος (2021–2050) και της περιόδου αναφοράς (1971–2000) για τη νοτιοανατολική Ευρώπη για το RCP2.6 (a). (b) το ίδιο με το (a), αλλά για τη διαφορά μεταξύ του τέλους του αιώνα (2071–2100) και της περιόδου αναφοράς. (c) και (d) τα ίδια με τα (a) και (b) αντίστοιχα, αλλά για το RCP4.5. (e) και (f) τα ίδια με τα (a) και (b) αντίστοιχα, αλλά για το RCP8.5. (g) χρονοσειρές (1950–2100) με τη διαφορά μεταξύ των μέσων ετήσιων TAS και των μέσων TAS για την περίοδο αναφοράς (1971–2000) για την Ελλάδα (μόνο χερσαίες περιοχές, τα όρια φαίνονται στο σχήμα). Οι ράβδοι σφάλματος υποδηλώνουν το $\pm 1\sigma$ από τους ετήσιους μέσους όρους των 11 προσομοιώσεων EURO-CORDEX και σχεδιάζονται ανά 5 έτη. Το πλαίσιο στα δεξιά δείχνει τη μέση διαφορά των περιόδων 1971–2000, 2021–2050 και 2071–2100 με την περίοδο αναφοράς.

Πηγές Αξομένων: Georgoulas et al., 2022; CLIMACT (National Network on Climate Change and its Impacts; <https://climact.gr>)



Εικόνα 29. Αποτελέσματα από τις μαθηματικές προσομοιώσεις του περιφερειακού κλιματικού μοντέλου EURO-CORDEX, στις οποίες παρουσιάζεται η διαφορά των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών TAS, για τους καλοκαιρινούς μήνες (JJA: Ιούνιος-Αύγουστος), μεταξύ του εγγύς μέλλοντος (2021-2050) και της περιόδου αναφοράς (1971-2000) για τη νοτιοανατολική Ευρώπη για το RCP2.6 (επάνω αριστερό πλαίσιο). Στο επάνω δεξιό πλαίσιο, το ίδιο με το επάνω αριστερό πλαίσιο, αλλά για τη διαφορά μεταξύ του τέλους του αιώνα (2071-2100) και της περιόδου αναφοράς. Στο μεσαίο αριστερό πλαίσιο και στο μεσαίο δεξί πλαίσιο, το ίδιο με το επάνω αριστερό πλαίσιο και το επάνω δεξιό πλαίσιο, αντίστοιχα, αλλά για το RCP4.5. Στο κάτω αριστερό πλαίσιο και στο κάτω δεξί πλαίσιο, το ίδιο με το επάνω αριστερό πλαίσιο και το επάνω δεξιό πλαίσιο, αντίστοιχα, αλλά για το RCP8.5.

Πηγές Δεδομένων: Georgoulas et al., 2022; CLIMACT (National Network on Climate Change and its Impacts; <https://climact.gr>)

Από τα διαγράμματα 1 έως 5, προκύπτει ότι υπάρχει μια συνεχής ανοδική τάση των ημερήσιων και μέσων ετήσιων διακυμάνσεων των θερμοκρασιών T_{min} , T_{mean} , T_{max} , σε όλους τους θερμούς μήνες της περιόδου Μαΐου-Σεπτεμβρίου του έτους, αλλά και στις διακυμάνσεις των μέσων ετήσιων τιμών των θερμοκρασιών T_{min} , T_{mean} , T_{max} , στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, τόσο κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000, όσο και κατά την εξεταζόμενη περίοδο 2001-2020. Χαρακτηριστικά οι μέσες θερμοκρασίες T_{min} ,

T_{mean} , T_{max} , όλης της περιόδου 2001-2020 αυξήθηκαν περίπου κατά $1,05^{\circ}\text{C}$ ($\sim 9\%$), $1,10^{\circ}\text{C}$ ($\sim 7\%$) και $1,18^{\circ}\text{C}$ ($\sim 6\%$), αντίστοιχα, σε σχέση με αυτές της περιόδου αναφοράς 1971-2000. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει από τη σύγκριση των ανοδικών γραμμικών τάσεων των μέσων ετήσιων θερμοκρασιών T_{min} , T_{mean} , T_{max} , της περιόδου 2001-2020, που ήταν και οι τρεις της τάξης του $0,5^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$ και ήταν όλες μεγαλύτερες, σε σχέση με αυτές της περιόδου αναφοράς 1971-2000, που ήταν και οι τρεις της τάξης του $0,2^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$. Σε παρόμοια συμπεράσματα καταλήγει πρόσφατη μελέτη για την περιοχή της Θεσσαλονίκης (Ζουμάκης, 2016), που βλέπουμε στην Εικόνα 26, στην οποία παρουσιάστηκε η μέση ετήσια διακύμανση των θερμοκρασιών (T_{min} , T_{max}) και η ανάλυση της γραμμικής τάσης, για τους θερινούς μήνες (Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο), την περίοδο 1946–2016 και η κατανομή των μέγιστων ημερήσιων θερμοκρασιών, που βλέπουμε στην Εικόνα 27, τους μήνες (Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο), με τα αντίστοιχα όρια ($97,5^{\circ}$ εκατοστημόριο της κατανομής – η συνεχής καμπύλη απεικονίζει την αντίστοιχη κανονική κατανομή), τις περιόδους 1931–2016 (επάνω) και 2006-2016 (κάτω), για τη Θεσσαλονίκη. Από την επιμέρους ανάλυσή του, προκύπτει ότι για κάθε μήνα της θερινής περιόδου, τις τελευταίες περίπου πέντε δεκαετίες (περίπου από τη δεκαετία του 1970 και μετά) προέκυψε μια σημαντική στατιστική αύξηση της μέσης και μέγιστης θερμοκρασίας στο κεντρικό πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης. Επίσης, προκύπτει ότι οι οριακές θερμοκρασίες (δηλαδή οι θερμοκρασίες κατωφλίου) για τους καύσωνες των μηνών Ιουνίου, Ιουλίου και Αυγούστου ήταν $T \approx 35^{\circ}\text{C}$, $T \approx 37^{\circ}\text{C}$ και $T \approx 37^{\circ}\text{C}$, αντίστοιχα, που υπολογίστηκαν από τις κατανομές των μέγιστων ημερήσιων θερμοκρασιών, κατά την περίοδο 1931–2016. Αντίστοιχα, από τις κατανομές των μέγιστων ημερήσιων θερμοκρασιών για τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, προκύπτουν οι οριακές θερμοκρασίες $T \approx 37^{\circ}\text{C}$, $T \approx 38^{\circ}\text{C}$ και $T \approx 37^{\circ}\text{C}$, κατά τη διάρκεια των ετών 2006–2016 για το κεντρικό πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης (Ζουμάκης, 2016).

Επίσης, σύμφωνα με το Συντονιστή της Επιτροπής Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, Χ. Ζερεφό (ΕΜΕΚΑ, 2011) με βάση δύο μαθηματικές προσομοιώσεις υπολογισμού της ανθρωπογενούς παρέμβασης στο κλίμα, αναμένεται ότι κατά το τέλος του 21^{ου} αιώνα, στο επίπεδο της ελληνικής επικράτειας λόγω της ανθρωπογενούς παρέμβασης, η θερμοκρασία του αέρα θα αυξηθεί μεταξύ $3,0^{\circ}\text{C}$ και $4,5^{\circ}\text{C}$, περίπου, ενώ η βροχή θα μειωθεί περίπου μεταξύ 5% και 19%. Ακόμη, αναμένεται ότι στα ηπειρωτικά

ο αριθμός των ημερών κατά τις οποίες η μέγιστη θερμοκρασία θα υπερβαίνει τους 35°C θα είναι μεγαλύτερος κατά 35-40 ημέρες, την περίοδο 2071-2100, σε σύγκριση με την εποχή διεξαγωγής της μελέτης (ΕΜΕΚΑ, 2011). Επίσης, από τη στατιστική επεξεργασία των παρατηρήσεων θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού της Ν. Φιλαδέλφειας στην Αττική, διαπιστώθηκε ότι, τα επεισόδια καύσωνα, τις τελευταίες δεκαετίες και ειδικότερα μετά τη δεκαετία του 1970, παρουσίασαν μια σημαντική προοδευτική αύξηση (Ζιακόπουλος κ.ά., 2008; Ζιακόπουλος & Φραγκούλη, 2015).

Από άλλες πρόσφατες μαθηματικές προσομοιώσεις των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών προέκυψαν ανάλογα αποτελέσματα. Έτσι, στο πλαίσιο του έργου CLIMPACT (National Network on Climate Change and its Impacts; <https://climpact.gr> - Εθνική εμβληματική δράση για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής) προέκυψαν σημαντικά αποτελέσματα για την κλιματική αλλαγή και τις επιπτώσεις της στην Ελλάδα και τις γύρω περιοχές, οι οποίες παρουσιάστηκαν στην ερευνητική εργασία των Georgoulia et al. (2022), καθώς και το Ηλεκτρονικό Συμπλήρωμα της εργασίας. Σ' αυτήν την εργασία, οι αλλαγές στις παραμέτρους, που σχετίζονται με το κλίμα στην Ελλάδα αναφέρονται σε δύο 30-ετείς περιόδους, στο εγγύς μέλλον (2021–2050) και στο τέλος του αιώνα (2071–2100), σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1971–2000). Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας και του Ηλεκτρονικού της Συμπληρώματος, προκύπτουν από μια ανάλυση, που βασίζεται σ' ένα σύνολο 11 μαθηματικών προσομοιώσεων του περιφερειακού κλιματικού μοντέλου EURO-CORDEX (<https://www.euro-cordex.net>) υψηλής ανάλυσης (RCM), που καλύπτουν την περίοδο 1950–2005 και τη μελλοντική περίοδο 2006–2100. Η ανάλυση στηρίζεται σε τρία αντιπροσωπευτικά σενάρια (Representative Concentration Pathway-RCP), τα οποία είναι σενάρια μεταβολών της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου (GHG), που προκαλούν μεταβολές στην ατμοσφαιρική σύνθεση. Το πρώτο σενάριο, RCP2.6, θεωρεί ότι θα υπάρξουν μέτρα που θα προκαλέσουν μεγάλες μεταβολές στη συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου (μείωση των GHG της τάξης του –70% την περίοδο 2010–2100), το δεύτερο σενάριο, RCP4.5, θεωρεί ότι θα υπάρξουν μέτριες μεταβολές (η μείωση των GHG θα αρχίσει μετά το 2040) και το τρίτο σενάριο, RCP8.5, θεωρεί ότι δεν θα υπάρξουν μελλοντικές περιβαλλοντικές και κλιματικές πολιτικές παρεμβάσεων και άρα με αυξητικές τάσεις στη συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου. Επίσης, στην ίδια εργασία

χρησιμοποιήθηκαν διάφορες προσομοιώσεις του μοντέλου EURO-CORDEX υψηλής ανάλυσης (RCM), για την εκτίμηση της μέσης ημερήσιας και της ελάχιστης και της μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας (TAS, TSMIN and TSMAX, σε °C).

Τα αποτελέσματα (Εικόνες 28 και 29) δείχνουν ότι σαφώς οδηγούμαστε σ' ένα πιο ζεστό μέλλον για την Ελλάδα στο πλαίσιο και των τριών σεναρίων RCP. Σύμφωνα με το σενάριο RCP8.5, η ετήσια θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια προβλέπεται να αυξηθεί κατά μέσο όρο κατά 1,6oC στο εγγύς μέλλον και 4,3oC στο τέλος του αιώνα. Ως συνέπεια αυτής της υπερθέρμανσης, ο ετήσιος αριθμός των ζεστών ημερών και των τροπικών νυχτών προβλέπεται να αυξηθεί σημαντικά και ο αριθμός των ημερών παγετού να μειωθεί. Ακόμη με βάση το σενάριο RCP2.6, προβλέπεται αύξηση 1–1,5oC σ' ολόκληρο τον τομέα της νοτιοανατολικής Ευρώπης στο εγγύς μέλλον (2021–2050), σε σχέση με την περίοδο αναφοράς (1971–2000) (Georgoulas et al., 2022). Ειδικά για τις χερσαίες περιοχές της Ελλάδας, στην Εικόνα 28(g) παρουσιάζονται οι χρονοσειρές της διαφοράς μεταξύ των ετήσιων TAS (μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών) της περιόδου αναφοράς (1971–200) και των μέσων TAS της περιόδου 1950–2100. Όπως φαίνεται στο ενσωματωμένο πλαίσιο, για το σενάριο RCP2.6, προβλέπεται μέση αύξηση 1,2oC και 1,4oC για το εγγύς μέλλον και το τέλος του αιώνα, αντίστοιχα. Για το σενάριο RCP4.5, η προβλεπόμενη αύξηση των TAS είναι 1,4oC και 2,3oC, αντίστοιχα, ενώ για το σενάριο RCP8,5, 1,6 oC και 4,3oC, αντίστοιχα (Georgoulas et al., 2022). Είναι προφανές ότι σύμφωνα με τα σενάρια RCP2.6 και RCP4.5 οι TAS (μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες), είτε σχεδόν σταθεροποιούνται από τα μέσα του 21ου αιώνα, είτε αυξάνονται με βραδύτερο ρυθμό, μετά τη σταδιακή μείωση των συγκεντρώσεων των GHG, σε σύγκριση με το σενάριο RCP8.5 όπου οι TAS αυξάνονται σταθερά εξαιτίας της αύξησης της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου (GHG) (Georgoulas et al., 2022).

Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο πρώτο κεφάλαιο, δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία ένας γενικά αποδεκτός ορισμός για ένα επεισόδιο καύσωνα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όλα τα κρίσιμα όρια της θερμοκρασίας του αέρα, κατά τη διάρκεια ενός καύσωνα, που επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία, εξαρτώνται άμεσα, όχι μόνο από τις τοπικές κλιματικές συνθήκες, αλλά και από τις κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες και από τις υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης, ασφάλισης και πρόνοιας κάθε τύπου.

Στην παρούσα εργασία έγινε εκτίμηση των επεισοδίων καύσωνα στη Θεσσαλονίκη, κατά την περίοδο 2001-2020, σύμφωνα με το κριτήριο του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (WMO), που ορίζει σαν «επεισόδιο καύσωνα» την περίοδο άνω των 5 συνεχόμενων ημερών με ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία, που υπερβαίνει κατά τουλάχιστον 5°C , τη μέση ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία της περιόδου Μαΐου-Σεπτεμβρίου, με περίοδο ελέγχου την περίοδο 1971-2000 (Frich et al., 2002; Jacob et al., 2014). Έτσι, στα διαγράμματα 6 και 7 παρουσιάζονται η ετήσια και η μηνιαία κατανομή των επεισοδίων καύσωνα, τους θερμούς μήνες Μάιος-Σεπτέμβριος, κατά την περίοδο 2001-2020, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, ενώ στο διάγραμμα 7 παρατίθεται η κατανομή της μέγιστης $T_{\max}$ ($^{\circ}\text{C}$), κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα, την εξεταζόμενη χρονική περίοδο (2001-2020). Ο συνολικός αριθμός των επεισοδίων καύσωνα, που υπολογίστηκαν την περίοδο 2001-2020 ήταν 44, αριθμός περίπου τριπλάσιος από τον αντίστοιχο αριθμό των επεισοδίων καύσωνα κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μια μικρή αυξητική τάση των επεισοδίων καύσωνα, την περίοδο 2001-2020, ενώ τα περισσότερα επεισόδια εμφανίστηκαν τα έτη 2007 και 2012, που όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το διάγραμμα 5 των μέσων ετήσιων τιμών των θερμοκρασιών $T_{\min}$, T_{mean} , $T_{\max}$, της περιόδου 2001-2020, ήταν μερικά από τα πιο θερμά έτη της συγκεκριμένης περιόδου. Τα περισσότερα επεισόδια καύσωνα, την εξεταζόμενη χρονική περίοδο 2001-2020, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης εμφανίστηκαν τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, σε ποσοστά περίπου 32% και 52%, αντίστοιχα, ενώ από την κατανομή της μέγιστης $T_{\max}$, κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα, παρατηρήθηκε ότι στο 50% των επεισοδίων η μέγιστη θερμοκρασία $T_{\max}$ έφθασε τους $37-38^{\circ}\text{C}$, την εξεταζόμενη χρονική περίοδο (2001-2020), συμπέρασμα που συμφωνεί με τις κατανομές των μέγιστων ημερήσιων θερμοκρασιών που παρουσιάζονται στην Εικόνα 27.

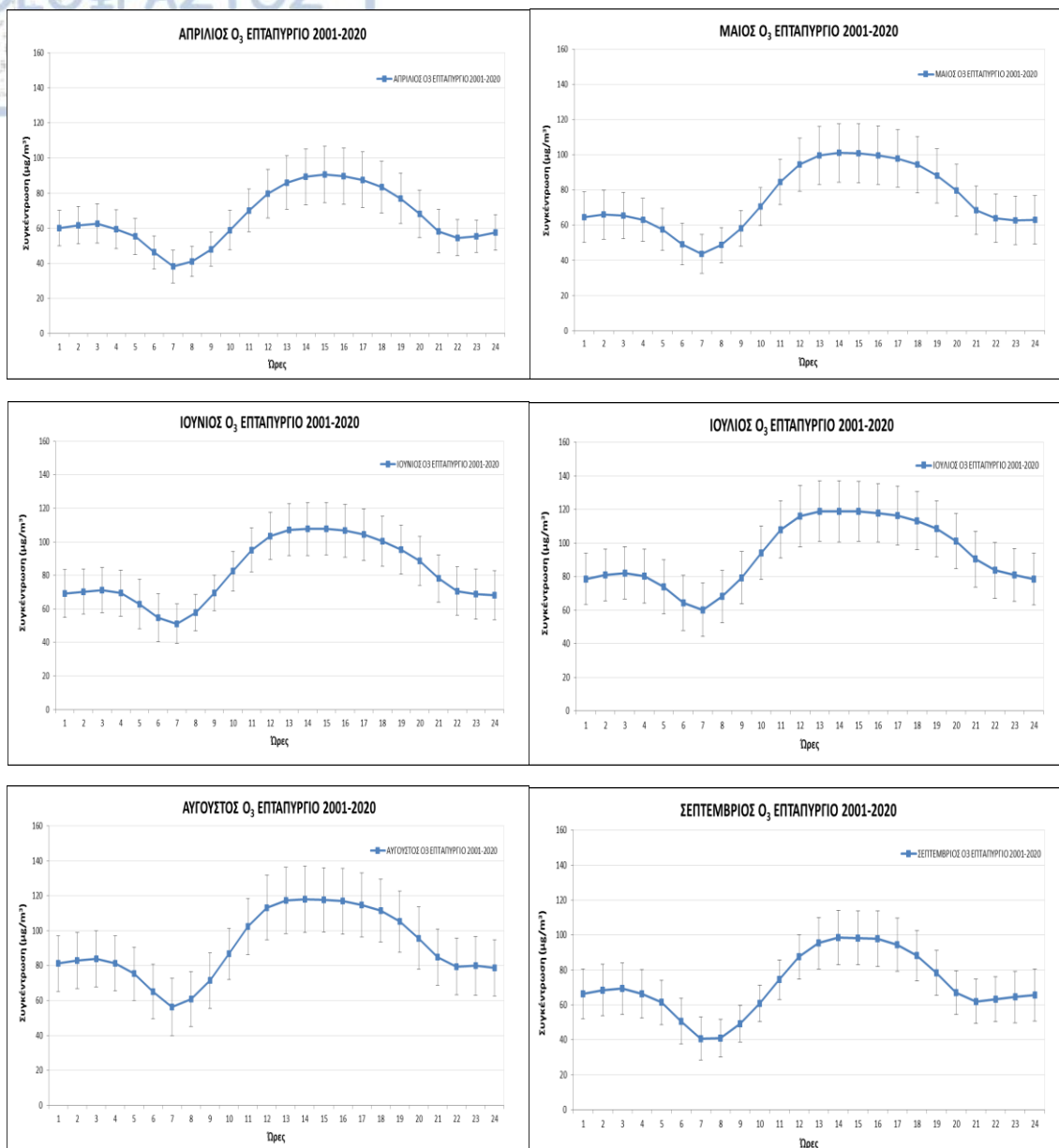
Επομένως, τόσο από τις διακυμάνσεις των ημερήσιων και ετήσιων θερμοκρασιών των $T_{\min}$, T_{mean} , $T_{\max}$, όσο και από τον αριθμό των επεισοδίων καύσωνα, κατά την εξεταζόμενη περίοδο 2001-2020, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, διαπιστώνεται ότι, υπάρχει μια ανοδική τάση των προαναφερόμενων παραμέτρων, που συμφωνεί με τη γενικότερη εκτίμηση ότι, η υπερθέρμανση του πλανήτη λόγω της κλιματικής αλλαγής εξαιτίας κυρίως των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, ενδέχεται να οδηγήσει σε συχνότερη

εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, καθώς και στην εκτίμηση ότι κατά τη διάρκεια των τεσσάρων τελευταίων δεκαετιών, υπάρχει μια προοδευτική άνοδος της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη, σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο, ενώ η τελευταία επταετία, 2015-2021, ήταν μια από τις θερμότερες από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα (IPCC, 2021; WMO, 2022).

4.3 ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΤΟ ΘΕΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2020

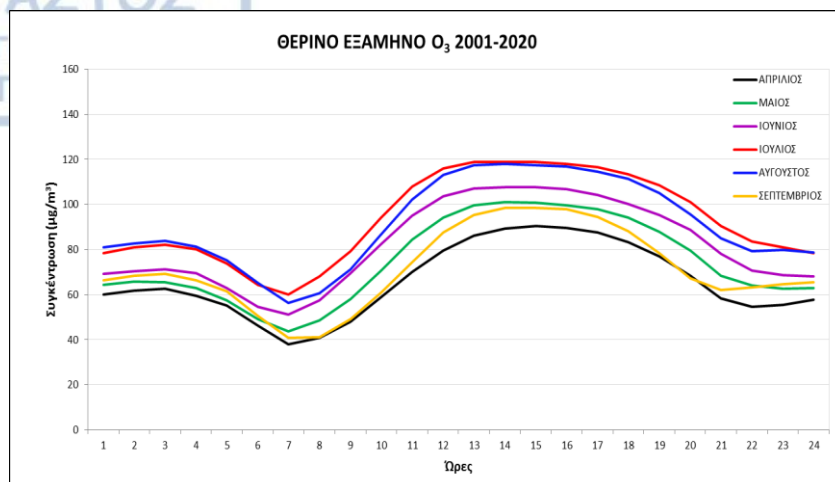
Στα διαγράμματα, που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι διαθέσιμες μετρήσεις των συγκεντρώσεων του κυριότερου δείκτη και μέτρου εμφάνισης της φωτοχημικής ρύπανσης, του επιφανειακού όζοντος (O_3), κατά τη διάρκεια της περιόδου 2001-2020, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, μιας από τις μεγαλύτερες ελληνικές πόλεις. Οι μετρήσεις του επιφανειακού O_3 προέρχονται από τον αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στην Άνω Πόλη, του Δικτύου Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, του Δήμου Θεσσαλονίκης, που παρουσιάζει τα μεγαλύτερα επίπεδα συγκέντρωσης του O_3 στην πόλη (το O_3 εμφανίζει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις στην περιφέρεια των πόλεων, γι' αυτό αποκαλείται και ρύπος των προαστίων) (<https://envdimosthes.gr/>; Κελέσης κ.ά, 2022; Πετρακάκης κ.ά, 2005; 2008).

Η εξεταζόμενη περίοδος είναι η θερμή περίοδος Μαΐου-Σεπτεμβρίου και κυρίως οι καλοκαιρινοί μήνες, όταν εμφανίζονται και τα περισσότερα επεισόδια καύσωνα, κατά τη διάρκεια των ετών 2001-2020. Έτσι, στα διαγράμματα 8 και 9 παρουσιάζεται η μέση ωριαία διακύμανση και η τυπική απόκλιση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού O_3 ($\mu g \cdot m^{-3}$) της περιόδου 2001-2020, κατά τη θερινή περίοδο του έτους, δηλαδή τους μήνες Απρίλιο-Σεπτεμβρίου, στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου. Στη συνέχεια στο διάγραμμα 10 παρατίθεται η μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων του O_3 ($\mu g \cdot m^{-3}$) κατά τη θερινή περίοδο του έτους, στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, τα έτη 2001-2020, στη Θεσσαλονίκη.

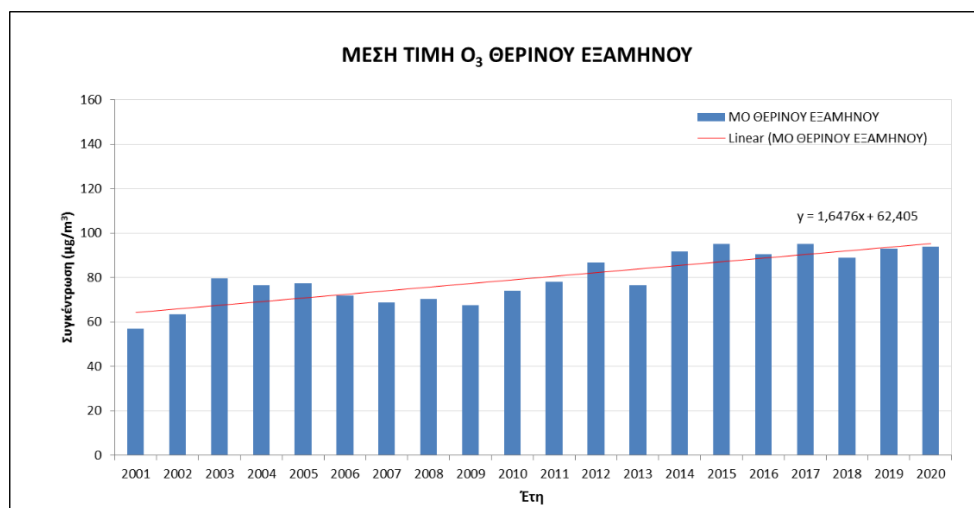


Διάγραμμα 8. Μέση ωριαία διακύμανση και τυπική απόκλιση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), της περιόδου 2001-2020, τους μήνες Απρίλιο-Σεπτέμβριο, στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου.

Πηγές δεδομένων: Δίκτυο μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης του Δήμου Θεσσαλονίκης.



Διάγραμμα 9. Μέση ωριαία διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) κατά τη θερινή περίοδο του έτους, στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, τα έτη 2001-2020.
Πηγές δεδομένων: Δίκτυο μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης του Δήμου Θεσσαλονίκης.



Διάγραμμα 10. Μέση ετήσια διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) κατά τη θερινή περίοδο του έτους, στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, τα έτη 2001-2020.
Πηγές δεδομένων: Δίκτυο μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης του Δήμου Θεσσαλονίκης.

Η μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων του O_3 , που απεικονίζεται στα παραπάνω διαγράμματα, επιβεβαιώνει την εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων O_3 στην περιφέρεια της πόλης της Θεσσαλονίκης. Επιπλέον, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις O_3 παρατηρήθηκαν τους θερινούς μήνες του έτους, Ιούλιο και Αύγουστο, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην αυξημένη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ηλιοφάνειας

κατά τη διάρκεια των μηνών αυτών, δεδομένου ότι το O_3 σχηματίζεται από φωτοχημικές διεργασίες στις οποίες καθοριστικό ρόλο παίζει η ηλιακή ακτινοβολία. Το γεγονός αυτό οφείλεται, αφενός στο μηχανισμό καταστροφής του από το NO_2 , που υπάρχει σε μεγάλες συγκεντρώσεις στα κέντρα των πόλεων και αφετέρου στο ότι οι χημικές αντιδράσεις που οδηγούν στο σχηματισμό του όζοντος χρειάζονται ορισμένο χρόνο για την ολοκλήρωσή τους και στο διάστημα αυτό το όζον μεταφέρεται με τη βοήθεια του ανέμου σε απόσταση κάποιων χιλιομέτρων από τον τόπο παραγωγής των πρόδρομων ενώσεων του (Πετρακάκης κ.ά, 2005; 2008; Kassomenos et al., 2012; Kelessis et al., 2006; Zanis 1999; Ziomas et al., 1998). Αντίθετα, όπως είναι γνωστό, τα ελάχιστα επίπεδα O_3 παρατηρούνται κατά τους χειμερινούς μήνες του έτους, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην μειωμένη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ηλιοφάνειας, κατά τη διάρκεια των μηνών αυτών (Ζάνης, 2014; Ζιώμας & Ρεμουντάκη, 2003; Μελάς 2007).

Επίσης, από τη διαχρονική εξέλιξη των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων του O_3 , κατά τη θερινή περίοδο του έτους, στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, τα έτη 2001-2020, προκύπτει ότι υπάρχει σαφής αναδική τάση των τιμών (διάγραμμα 10) και άρα φαίνεται ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση της Θεσσαλονίκης σταδιακά μετεξελίσσεται σε φωτοχημική. Οι αυξητικές αυτές τάσεις του O_3 μπορεί να οφείλονται στην αύξηση των επιπέδων και της διάρκειας των επεισοδίων υψηλών θερμοκρασιών και ηλιακής ακτινοβολίας, τα τελευταία έτη, που παρατηρούνται στην Ευρώπη και στη χώρα μας (Bais et al., 2013; Nastos & Kapsomenakis, 2015; Roupkou, et al., 2008). Στο σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους παίζουν σημαντικό ρόλο τα οξειδία του αζώτου, που παράγονται από οχήματα, από βιομηχανικές δραστηριότητες και συστήματα κεντρικής θέρμανσης. Η εξέλιξη των επιπέδων των NO_x , τις τελευταίες δεκαετίες, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, έδειξε ότι, στις περισσότερες περιοχές, οι συγκεντρώσεις τους παρουσίασαν, μια τάση μείωσης, που πιθανότατα οφείλονται σε παρεμβάσεις, όπως στην τεχνολογική αναβάθμιση των αυτοκινήτων, στη χρήση βελτιωμένων καυσίμων, στην αύξηση του κόστους αγοράς καυσίμων, στην ολοκλήρωση μεγάλων κυκλοφοριακών έργων (περιφερειακές οδοί), στη διεύθυνση του φυσικού αερίου στο βιομηχανικό και οικιακό τομέα, και μετά το 2009 στην ελληνική οικονομική κρίση, που άλλαξε τις κοινωνικο-οικονομικές συνθήκες (μείωση της καύσης ορυκτών καυσίμων, εξαιτίας της μείωσης των διανυόμενων οχηματοχιλιομέτρων, της

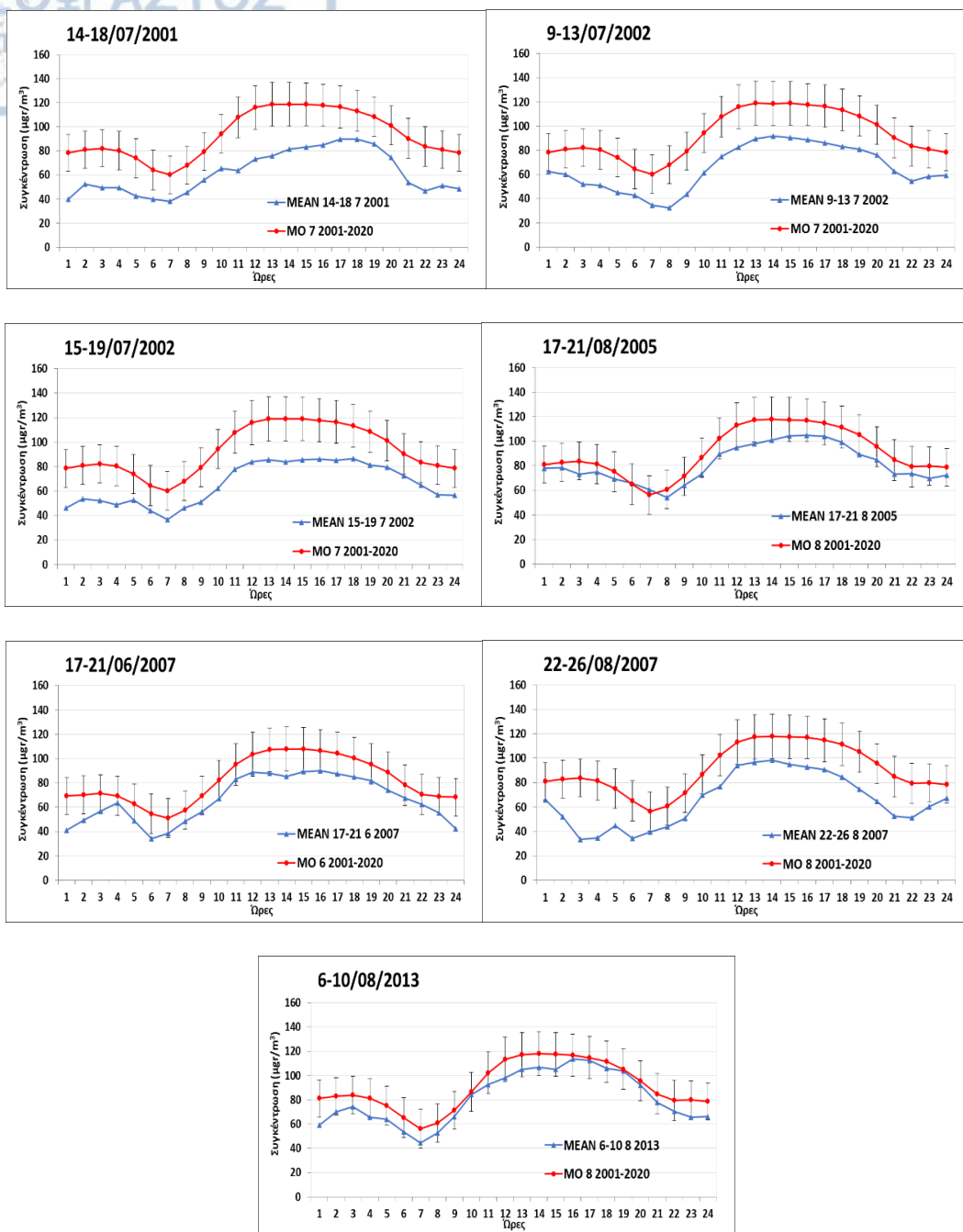
μείωσης καυσίμων για την κεντρική θέρμανση και της αποβιομηχάνισης) (Κανελλοπούλου, 2015; Παρασχά, 2014; Πετρακάκης κ.ά., 2008; Στογιάννης, 2019; <http://www.yren.gr>). Αντίστοιχα, παρά την αύξηση του αριθμού των οχημάτων και των διανυόμενων χιλιομέτρων, τουλάχιστον μεταξύ των ετών 1990 και 2009, οι εκπομπές CO και VOCs παρουσίασαν πτωτική τάση (Progiou and Ziomas, 2011). Ακόμη, στον τομέα της βιομηχανίας η συνεχώς μεταβαλλόμενη περιβαλλοντική νομοθεσία (βέλτιστων διαθέσιμων τεχνικών) επιβάλλει ολοένα και αυστηρότερα συστήματα ελέγχου των εκπεμπόμενων ρύπων. Βέβαια, παρά τη μείωση των επιπέδων των NO_x, κατά τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, έχει γενικότερα επισημανθεί ότι οι τάσεις του O₃ δεν απεικονίζουν τις πραγματικές μειώσεις των εκπεμπόμενων NO_x και VOCs από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, διότι λόγω των ακραία υψηλών θερμοκρασιών, ενώ οι εκπομπές τους μπορεί να μειώνονται, τα επίπεδα του όζοντος μπορεί να παραμένουν υψηλά (Wilson et al., 2011). Επιπλέον, ακόμη και αν περιοριστούν σημαντικά οι εκπομπές από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, των πρόδρομων ενώσεων του όζοντος στην Ελλάδα, μαθηματική προσομοίωση έδειξε ότι οι τιμές του δεν πρόκειται να μειωθούν σημαντικά, στην ευρύτερη περιοχή (Zerefos et al., 2002).

4.4 ΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΤΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΟΖΟΝΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ ΚΑΥΣΩΝΑ ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2001-2020

Στα διαγράμματα 11-14, που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι μετρήσεις της μέσης 24ωρης διακύμανσης των συγκεντρώσεων, του κυριότερου δείκτη της φωτοχημικής ρύπανσης, του επιφανειακού O₃ (μg.m⁻³), κατά τη διάρκεια κάθε επεισοδίου καύσωνα, που υπολογίστηκε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο (4.2), τα έτη 2001-2020, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση και την τυπική απόκλιση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (μg.m⁻³) (δηλαδή του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου καύσωνα, που υπολογίστηκε στο υποκεφάλαιο 4.3), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης. Οι μετρήσεις O₃ προέρχονται από τον αντιπροσωπευτικό σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στην Άνω Πόλη,

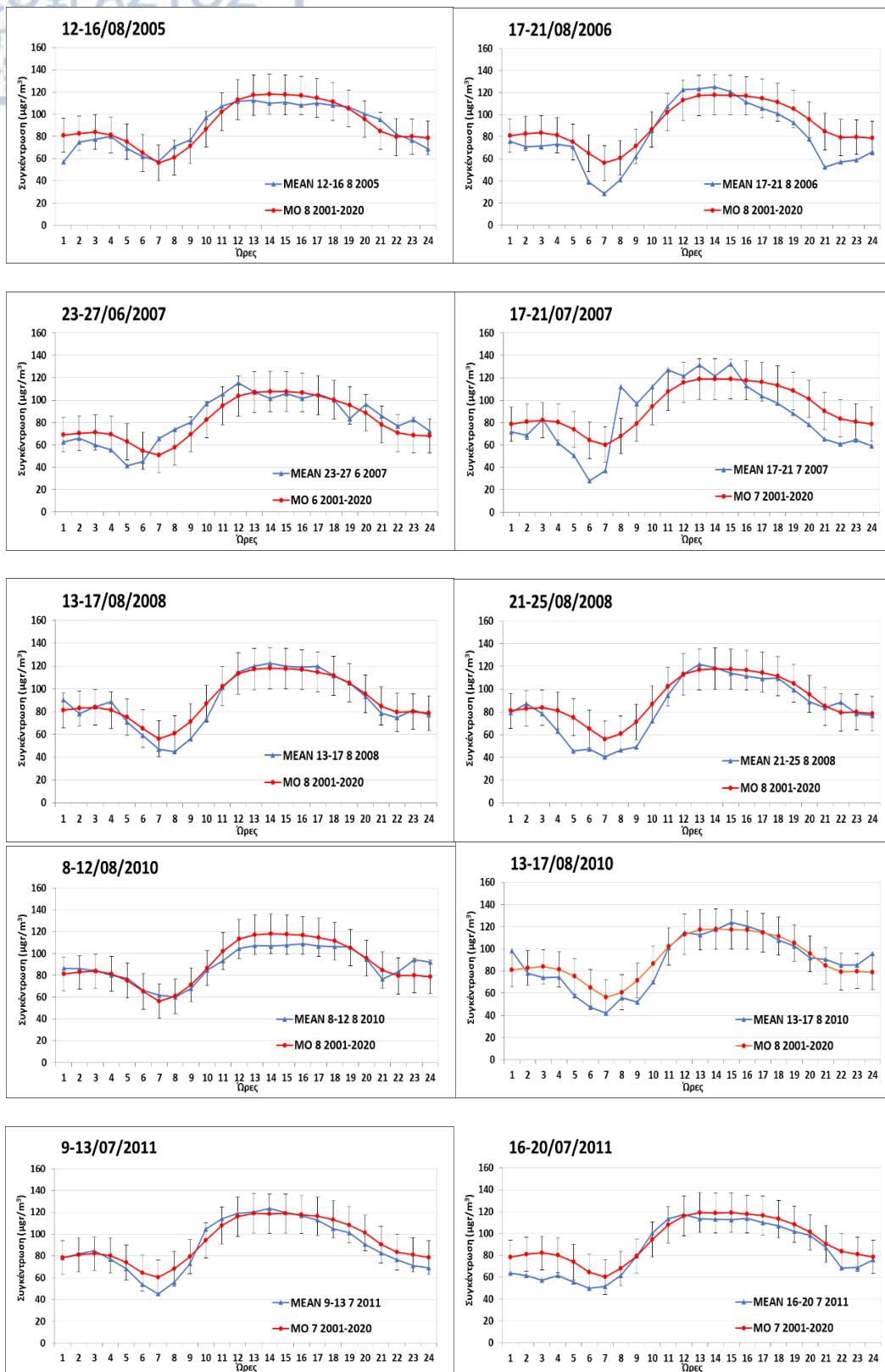
του Δικτύου Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, του Δήμου Θεσσαλονίκης (<https://envdimosthes.gr/>; Κελέσης κ.ά, 2022; Πετρακάκης κ.ά, 2005; 2008), ενώ οι μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα προέρχονται από τον αντιπροσωπευτικό Μετεωρολογικό σταθμό του Α.Π.Θ., του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, (<https://meteo.geo.auth.gr/>; http://www.geo.auth.gr/gr_deps_gmc.htm) του Τμήματος Γεωλογίας, του Α.Π.Θ., που βρίσκεται στο γεωγραφικό κέντρο της Θεσσαλονίκης.

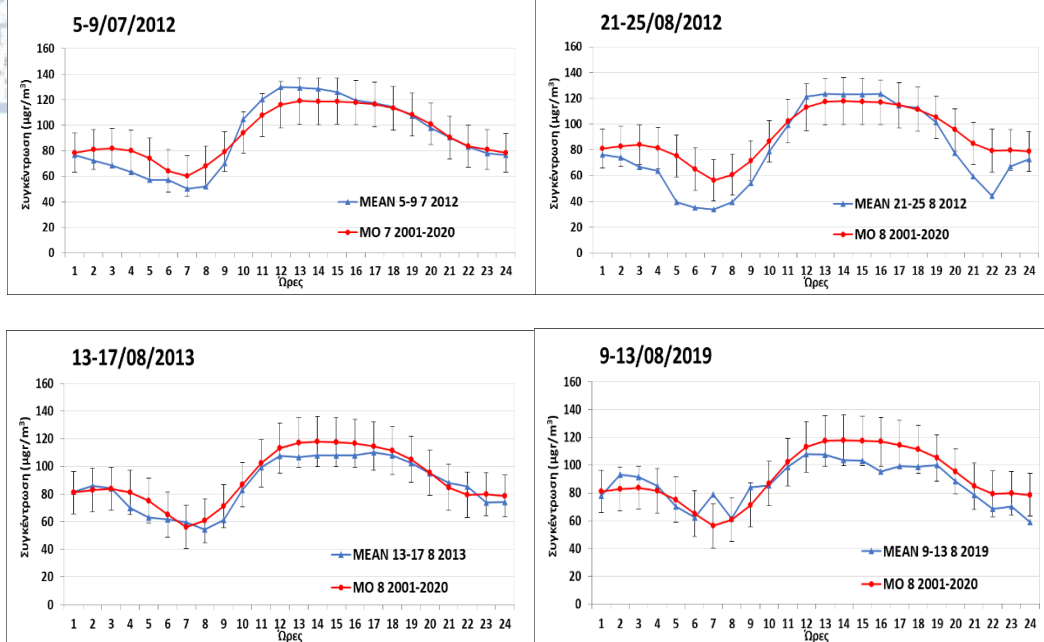
Τα διαγράμματα χωρίστηκαν σε τέσσερις κατηγορίες, σε σχέση με τα παρατηρούμενα επίπεδα της συγκέντρωσης του O_3 , κατά τη διάρκεια του κάθε επεισοδίου καύσωνα. Έτσι, στο διάγραμμα 11 παρατίθενται αυτά στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα, ήταν μικρότερη, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [Κατηγορία I]. Στο διάγραμμα 12 παρατίθενται αυτά στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα, ήταν στο ίδιο επίπεδο σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [Κατηγορία II]. Στο διάγραμμα 13 παρατίθενται αυτά στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα, ήταν σχετικά μεγαλύτερη, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [Κατηγορία III]. Τέλος, στο διάγραμμα 14 παρατίθενται αυτά στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα, ήταν σαφώς μεγαλύτερη, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [Κατηγορία IV].



Διάγραμμα 11. Μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαίας 24ωρης διακύμανσης και της τυπικής απόκλισης των συγκεντρώσεων του όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στη Θεσσαλονίκη. – Κατηγορία Ι

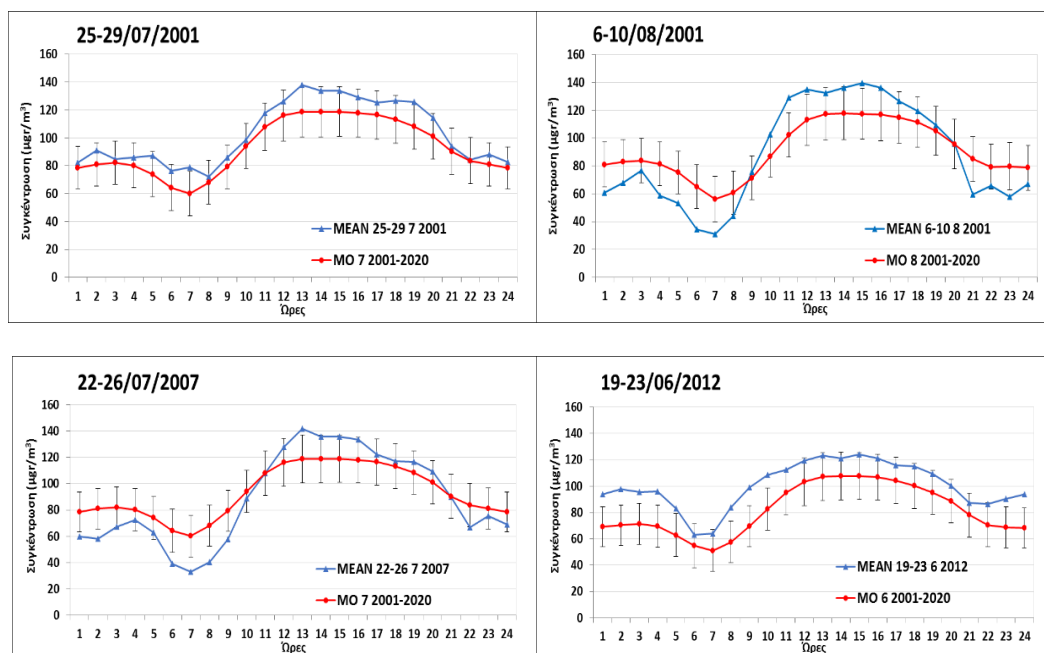
Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Α.Π.Θ. ; Δίκτυο μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης του Δήμου Θεσσαλονίκης.

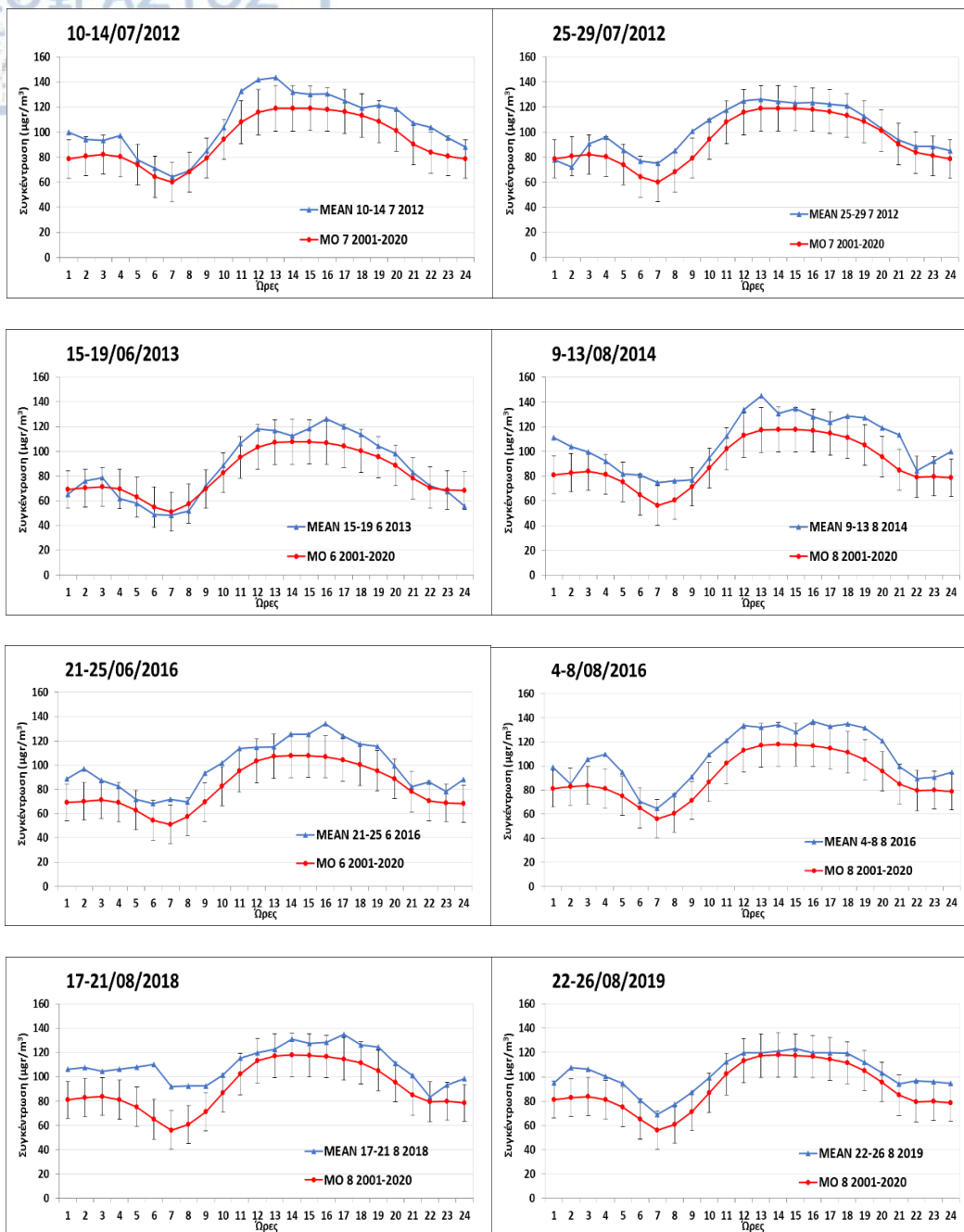




Διάγραμμα 12. Μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαίας 24ωρης διακύμανσης και της τυπικής απόκλισης των συγκεντρώσεων του όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στη Θεσσαλονίκη. – Κατηγορία II

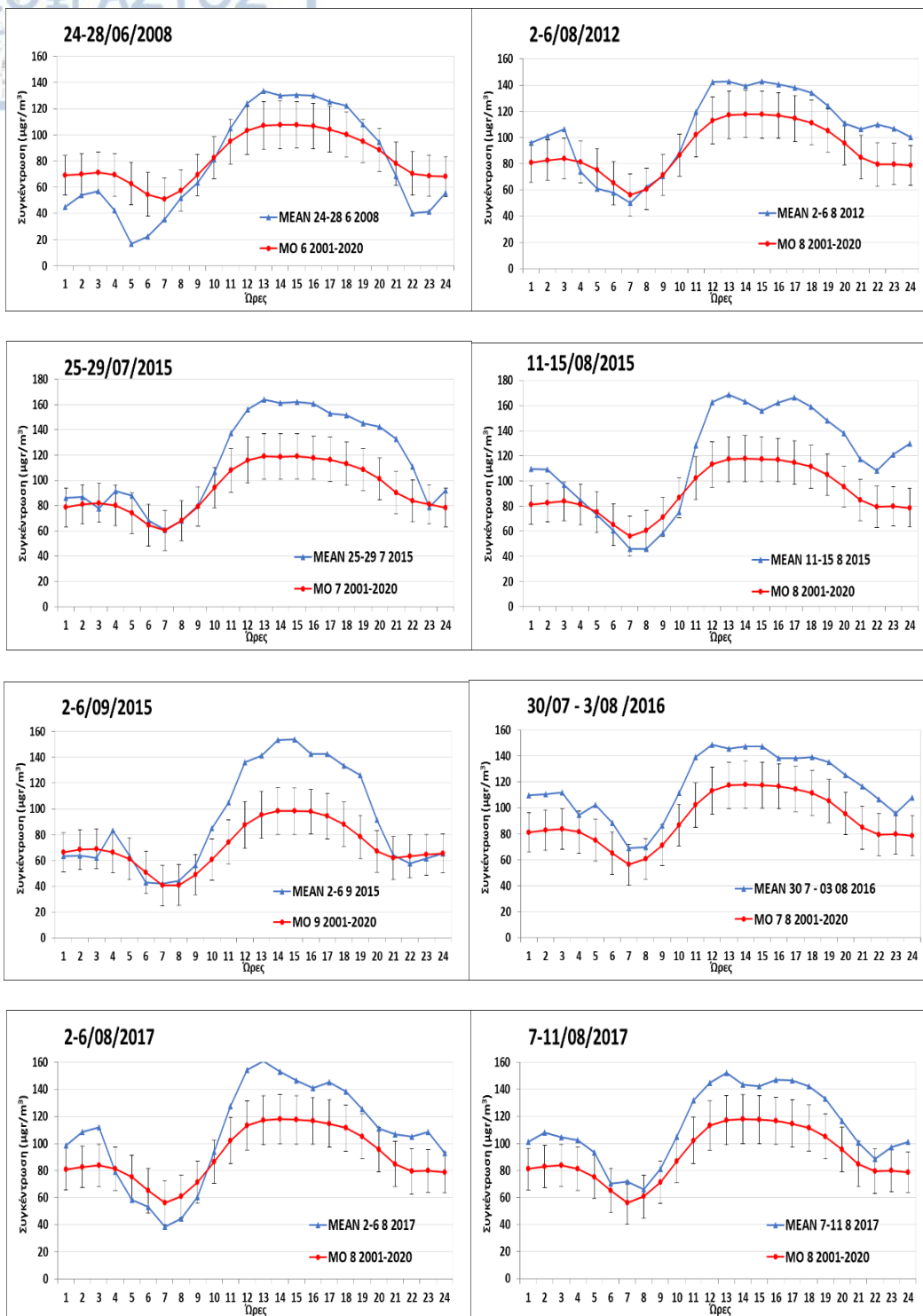
Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Α.Π.Θ. ; Δίκτυο μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης του Δήμου Θεσσαλονίκης.

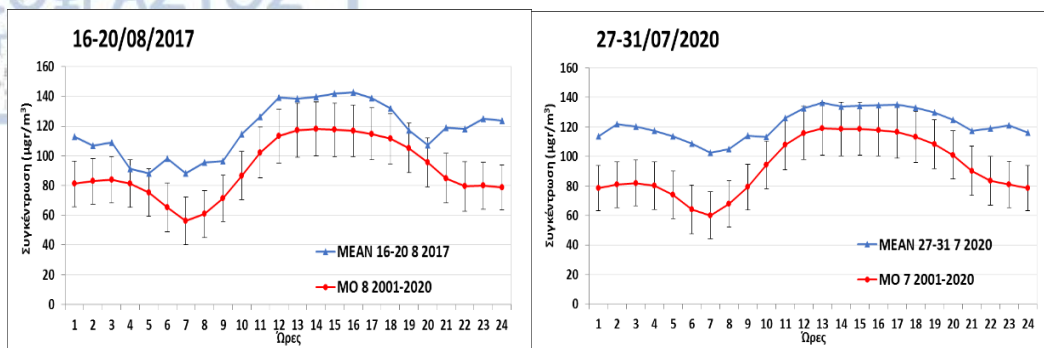




Διάγραμμα 13. Μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαίας 24ωρης διακύμανσης και της τυπικής απόκλισης των συγκεντρώσεων του όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταυργίου, στη Θεσσαλονίκη. – Κατηγορία III

Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Α.Π.Θ. ; Δίκτυο μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης του Δήμου Θεσσαλονίκης.





Διάγραμμα 14. Μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση και της τυπικής απόκλισης των συγκεντρώσεων του όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στη Θεσσαλονίκη. – Κατηγορία IV

Πηγές δεδομένων: Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ., Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Α.Π.Θ. ; Δίκτυο μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης του Δήμου Θεσσαλονίκης.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι, το ποσοστό εμφάνισης των επεισοδίων καύσωνα, στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα, ήταν μικρότερη, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [διάγραμμα 11-Κατηγορία I] ήταν περίπου της τάξης του 16%. Το ποσοστό εμφάνισης των επεισοδίων καύσωνα, στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα, ήταν στο ίδιο επίπεδο, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [διάγραμμα 12-Κατηγορία II] ήταν περίπου της τάξης του 33%. Το ποσοστό εμφάνισης των επεισοδίων καύσωνα, στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα, ήταν σχετικά μεγαλύτερη, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [διάγραμμα 13-Κατηγορία III] ήταν περίπου της τάξης του 28%. Τέλος, το ποσοστό εμφάνισης των επεισοδίων καύσωνα, στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα, ήταν

σαφώς μεγαλύτερη, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [διάγραμμα 14-Κατηγορία IV] ήταν περίπου της τάξης του 23%.

Επομένως, από τις παραπάνω εκτιμήσεις προέκυψε ότι, περίπου στο 50% των επεισοδίων καύσωνα, που εμφανίστηκαν την εξεταζόμενη χρονική περίοδο (2001-2020), τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα), ήταν σχετικά μεγαλύτερα, σε σχέση με τα επίπεδα της αντίστοιχης μέσης (της περιόδου 2001-2020) μηνιαίας 24ωρης διακύμανσης των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου. Επίσης, περίπου στο 25% αυτών των επεισοδίων καύσωνα, που εμφανίστηκαν την εξεταζόμενη χρονική περίοδο (2001-2020), τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα), ήταν σημαντικά μεγαλύτερα, σε σχέση με τα επίπεδα της αντίστοιχης μέσης (της περιόδου 2001-2020) μηνιαίας 24ωρης διακύμανσης των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.

Επομένως, από τις παραπάνω εκτιμήσεις προκύπτει ότι, η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως τα επεισόδια καύσωνα, ενδέχεται να οδηγήσουν σε σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας της ατμόσφαιρας αστικών περιοχών, όπως η αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ποιότητα της ατμόσφαιρας σε αστικές περιοχές είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επιδρούν στην υγεία και την ποιότητα της ζωής των ανθρώπων. Επιπλέον, το επιφανειακό όζον είναι ο σημαντικότερος φωτοχημικός ρύπος, που χρησιμοποιείται σαν δείκτης εμφάνισης της φωτοχημικής ρύπανσης στα αστικά κέντρα και ιδιαίτερα σ' αυτά του ευρωπαϊκού νότου. Στην Ευρώπη, περιοχές με μεσαίο γεωγραφικό πλάτος, όπως η Μεσόγειος, είναι πιθανό να αντιμετωπίσουν στο άμεσο μέλλον μια μη αναστρέψιμη άνοδο της θερμοκρασίας από την υπερθέρμανση του πλανήτη εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής. Η τελευταία έκθεση (Sixth Assessment Report) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC) αναφέρει ότι η μέση παγκόσμια θερμοκρασία της Γης, την περίοδο 1995-2014 ήταν αυξημένη κατά 0.85°C , σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή που αφορά τα επίπεδα της προβιομηχανικής περιόδου 1850–1900, ενώ η αντίστοιχη τιμή ήταν 0.99°C για την περίοδο 2001–2020 και 1.09°C για την πιο πρόσφατη δεκαετία (2011–2020). Αυτή η συνεχής αύξηση της θερμοκρασίας, σε παγκόσμια κλίμακα είναι πολύ πιθανόν να προκαλέσει τη συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι ισχυροί καύσωνες. Επομένως, από τα παραπάνω προκύπτει ότι, στο άμεσο μέλλον, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος για δραματική αύξηση της συχνότητας των ισχυρών επεισοδίων καύσωνα, εξαιτίας της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη λόγω της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Κατά τη διάρκεια ισχυρών επεισοδίων καύσωνα η θερμική καταπόνηση γίνεται μεγαλύτερη και σε συνδυασμό με υψηλές συγκεντρώσεις φωτοχημικών ρύπων και αιωρούμενων σωματιδίων οδηγούν στην αύξηση των συνθηκών δυσφορίας των κατοίκων και στη γενικότερη υποβάθμιση του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, με δυσμενέστερες επιπτώσεις στην υγεία των πολιτών.

Η Θεσσαλονίκη, είναι η μεγαλύτερη σε έκταση και πληθυσμό πόλη της Μακεδονίας, με περισσότερο από 1 εκατομμύριο κάτοικους, στη μητροπολιτική της περιοχή, που αντιστοιχεί περίπου στο 10% του συνολικού ελληνικού πληθυσμού. Επίσης, είναι η δεύτερη μεγαλύτερη ελληνική πόλη και ταυτόχρονα αποτελεί το κύριο εμπορικό, οικονομικό και πολιτισμικό αστικό κέντρο της βόρειας Ελλάδας και ένα από τα μεγαλύτερα των Βαλκάνιων. Η ευρύτερη μητροπολιτική περιοχή της Θεσσαλονίκης

είναι μια αστική περιοχή στην οποία οι εκπομπές οχημάτων, οι βιομηχανικές εκπομπές και οι εκπομπές από τη θέρμανση των κτιρίων (κατοικιών και επαγγελματικών χώρων) τους ψυχρούς μήνες του έτους, είναι ορισμένες από τις σημαντικότερες πηγές ατμοσφαιρικών ρύπων, που καθορίζουν την ποιότητα του αέρα της πόλης. Κατά τη διάρκεια επεισοδίων καύσωνα, σε πυκνοδομημένες αστικές περιοχές, όπως η Θεσσαλονίκη, μπορεί να προκληθεί σημαντική αύξηση της θνησιμότητας, σε μικρό χρονικό διάστημα, εξαιτίας της επιδείνωσης των συνθηκών δυσφορίας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια να παρουσιασθούν τα επίπεδα συγκέντρωσης του επιφανειακού όζοντος, κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, την περίοδο της τελευταίας εικοσαετίας. Παίρνοντας υπόψη τα διαθέσιμα δεδομένα των μετρήσεων της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών ρύπων, που δείχνουν ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση, στην ευρύτερη περιοχή του πολεοδομικού συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης, την τελευταία εικοσαετία, σταδιακά μετεξελίσσεται σε φωτοχημική, αλλά και της προοδευτικής αύξησης της συχνότητας των επεισοδίων καύσωνα, εξαιτίας της πακόσμιας κλιματικής αλλαγής, η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη των επιπέδων των συγκεντρώσεων του κυριότερου δείκτη της φωτοχημικής ρύπανσης, του όζοντος (O_3), κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, μιας από τις μεγαλύτερες πόλεις της Ελλάδος. Η εξεταζόμενη περίοδος είναι η θερμή περίοδος Μαΐου-Σεπτεμβρίου και κυρίως οι καλοκαιρινοί μήνες, όταν εμφανίζονται και τα περισσότερα επεισόδια καύσωνα, κατά τη διάρκεια της περιόδου 2001-2020.

Για την αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, παίρνοντας υπόψη τα διαθέσιμα δεδομένα των μετρήσεων της συγκέντρωσης του όζοντος, επιλέχθηκε ο αντιπροσωπευτικός αστικός σταθμός υποβάθρου του Επταπυργίου, στην Ανω Πόλη, του Δικτύου Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης, του Δήμου Θεσσαλονίκης. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς ο παραπάνω αντιπροσωπευτικός σταθμός, αφενός παρουσιάζει τα μεγαλύτερα επίπεδα συγκέντρωσης του όζοντος και αφετέρου είχε την όσο δυνατόν πιο ολοκληρωμένη σειρά δεδομένων για την περίοδο που εξετάζουμε. Όσον αφορά τις μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα, βάσει των οποίων έγινε εκτίμηση της συχνότητας εμφάνισης των επεισοδίων καύσωνα, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, παίρνοντας υπόψη

τα διαθέσιμα δεδομένα των μετεωρολογικών παρατηρήσεων, για την εξεταζόμενη περίοδο 2001-2020, επιλέχθηκε ο αυτόματος αντιπροσωπευτικός Μετεωρολογικός σταθμός του Α.Π.Θ. στην Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ., του Τομέα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, του Τμήματος Γεωλογίας, του Α.Π.Θ., που βρίσκεται στο γεωγραφικό κέντρο της πόλης. Επίσης, από τον ίδιο Μετεωρολογικό σταθμό χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα αναφοράς οι μετρήσεις θερμοκρασίας του αέρα για την περίοδο 1971-2000. Στην παρούσα εργασία η εκτίμηση των επεισοδίων καύσωνα στη Θεσσαλονίκη, κατά την περίοδο 2001-2020, έγινε σύμφωνα με το κριτήριο του Παγκόσμιου Μετεωρολογικού Οργανισμού (WMO), που ορίζει σαν «επεισόδιο καύσωνα» την περίοδο άνω των 5 συνεχόμενων ημερών με ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία, που υπερβαίνει κατά τουλάχιστον 5°C , τη μέση ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία της περιόδου Μαΐου-Σεπτεμβρίου, με περίοδο ελέγχου την περίοδο 1971-2000 (Frich et al., 2002; Jacob et al., 2014). Από την εξέταση όλων των παραπάνω δεδομένων προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Παρατηρήθηκε μια συνεχής ανοδική τάση των ημερήσιων και μέσων ετήσιων διακυμάνσεων των θερμοκρασιών $T_{\min}$, T_{mean} , $T_{\max}$, σ' όλους τους θερμούς μήνες της περιόδου Μαΐου-Σεπτεμβρίου του έτους, αλλά και στις διακυμάνσεις των μέσων ετήσιων τιμών των θερμοκρασιών $T_{\min}$, T_{mean} , $T_{\max}$, στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, τόσο κατά την περίοδο αναφοράς 1971-2000, όσο και κατά την εξεταζόμενη περίοδο 2001-2020.
- Οι ανοδικές γραμμικές τάσεις των μέσων ετήσιων θερμοκρασιών $T_{\min}$, T_{mean} , $T_{\max}$, της περιόδου 2001-2020, ήταν και οι τρεις της τάξης του $0,5^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$ και ήταν όλες μεγαλύτερες, σε σχέση με αυτές της περιόδου αναφοράς 1971-2000, που ήταν και οι τρεις της τάξης του $0,2^{\circ}\text{C}/\text{δεκαετία}$.
- Οι μέσες θερμοκρασίες $T_{\min}$, T_{mean} , $T_{\max}$, όλης της περιόδου 2001-2020 αυξήθηκαν περίπου κατά $1,05^{\circ}\text{C}$, $1,10^{\circ}\text{C}$ και $1,18^{\circ}\text{C}$, αντίστοιχα, σε σχέση με αυτές της περιόδου αναφοράς 1971-2000.
- Ο συνολικός αριθμός των επεισοδίων καύσωνα, που υπολογίστηκαν την περίοδο 2001-2020 ήταν 44, περίπου τριπλάσιος από τον αντίστοιχο αριθμό των επεισοδίων καύσωνα την περίοδο αναφοράς 1971-2000.

- Επίσης, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μια μικρή αυξητική τάση των επεισοδίων καύσωνα, την περίοδο 2001-2020, ενώ τα περισσότερα επεισόδια εμφανίστηκαν τα έτη 2007 και 2012, που ήταν μερικά από τα πιο θερμά έτη της συγκεκριμένης περιόδου.
- Τα περισσότερα επεισόδια καύσωνα, την εξεταζόμενη χρονική περίοδο 2001-2020, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης εμφανίστηκαν τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, σε ποσοστά περίπου 32% και 52%, αντίστοιχα, ενώ από την κατανομή της μέγιστης T_{max} , κατά τη διάρκεια των επεισοδίων καύσωνα, παρατηρήθηκε ότι στο 50% των επεισοδίων η μέγιστη θερμοκρασία T_{max} έφθασε τους 37-38°C, την εξεταζόμενη χρονική περίοδο (2001-2020).
- Η μεταβολή των μέσων ωριαίων συγκεντρώσεων του O_3 , επιβεβαιώνει την εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων O_3 στην περιφέρεια της πόλης της Θεσσαλονίκης.
- Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις O_3 παρατηρήθηκαν τους θερινούς μήνες του έτους, Ιούλιο και Αύγουστο, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην αυξημένη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και της ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια των μηνών αυτών, δεδομένου ότι το O_3 σχηματίζεται από φωτοχημικές διεργασίες στις οποίες καθοριστικό ρόλο παίζει η ηλιακή ακτινοβολία.
- Από τη διαχρονική εξέλιξη των μέσων ετήσιων συγκεντρώσεων του O_3 , κατά τη θερινή περίοδο του έτους, στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, τα έτη 2001-2020, προκύπτει ότι υπάρχει σαφής ανοδική τάση των τιμών και άρα φαίνεται ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση της Θεσσαλονίκης σταδιακά μετεξελίσσεται σε φωτοχημική. Οι αυξητικές αυτές τάσεις του O_3 μπορεί να οφείλονται στην αύξηση των επιπέδων και της διάρκειας των επεισοδίων υψηλών θερμοκρασιών και ηλιακής ακτινοβολίας, τα τελευταία έτη, που παρατηρούνται στην Ευρώπη και στη χώρα μας.
- Το ποσοστό εμφάνισης των επεισοδίων καύσωνα, στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα, ήταν μικρότερη, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [διάγραμμα 11-Κατηγορία Ι] ήταν περίπου της τάξης του 16%.
- Το ποσοστό εμφάνισης των επεισοδίων καύσωνα, στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου

καύσωνα, ήταν στο ίδιο επίπεδο, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [διάγραμμα 12-Κατηγορία II] ήταν περίπου της τάξης του 33%.

- Το ποσοστό εμφάνισης των επεισοδίων καύσωνα, στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα, ήταν σχετικά μεγαλύτερη, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [διάγραμμα 13-Κατηγορία III] ήταν περίπου της τάξης του 28%.
- Τέλος, το ποσοστό εμφάνισης των επεισοδίων καύσωνα, στα οποία η μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του όζοντος κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα, ήταν σαφώς μεγαλύτερη, σε σχέση με την αντίστοιχη μέση (της περιόδου 2001-2020) μηνιαία 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου) [διάγραμμα 14-Κατηγορία IV] ήταν περίπου της τάξης του 23%.
- Επομένως, από τις παραπάνω εκτιμήσεις προέκυψε ότι, περίπου στο 50% των επεισοδίων καύσωνα, που εμφανίστηκαν την εξεταζόμενη χρονική περίοδο (2001-2020), τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα), ήταν σχετικά μεγαλύτερα, σε σχέση με τα επίπεδα της αντίστοιχης μέσης (της περιόδου 2001-2020) μηνιαίας 24ωρης διακύμανσης των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.
- Επίσης, περίπου στο 25% αυτών των επεισοδίων καύσωνα, που εμφανίστηκαν την εξεταζόμενη χρονική περίοδο (2001-2020), τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (μέση 24ωρη διακύμανση των συγκεντρώσεων κατά τη διάρκεια του επεισοδίου καύσωνα), ήταν σημαντικά μεγαλύτερα, σε σχέση με τα επίπεδα της αντίστοιχης μέσης (της περιόδου 2001-2020) μηνιαίας 24ωρης διακύμανσης των συγκεντρώσεων του επιφανειακού όζοντος (του μήνα εμφάνισης

του κάθε επεισοδίου), στο σταθμό αστικού υποβάθρου του Επταπυργίου, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.

- Ακόμη, τόσο από τις διακυμάνσεις των ημερήσιων και ετήσιων θερμοκρασιών των T_{min} , T_{mean} , T_{max} , όσο και από τον αριθμό των επεισοδίων καύσωνα, κατά την εξεταζόμενη χρονική περίοδο 2001-2020, διαπιστώνεται ότι, υπάρχει μια ανοδική τάση των προαναφερόμενων παραμέτρων, στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, που συμφωνεί με τη γενικότερη εκτίμηση ότι, η υπερθέρμανση του πλανήτη λόγω της κλιματικής αλλαγής, εξαιτίας κυρίως των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, ενδέχεται να οδηγήσει σε συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων.
- Επομένως, από τις παραπάνω εκτιμήσεις προκύπτει ότι, η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως τα επεισόδια καύσωνα, ενδέχεται να οδηγήσουν σε σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας της ατμόσφαιρας αστικών περιοχών, όπως η αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης.

ΛΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

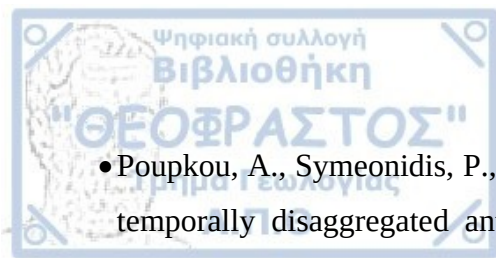
- Ahrens, D.C., 2009. *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment* (9th ed.). Belmont, California, U.S.A. Cengage Learning
- Aguiar, A.C., 2012. Urban heat islands: differentiating between the benefits and drawbacks of using native or exotic vegetation in mitigating climate, University of Wollongong, Access from: ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=4755&context=theses
- Anderson, G., Bell, M.L., 2011. Heat waves in the United States: mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U.S. communities. *Environ. Health Perspect.* 119, 210–218. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002313>.
- Bais, A.F., Drosoglou, Th., Meleti, C., Tourpali, K., & Kouremeti, N., 2013: Changes in surface shortwave solar irradiance from 1993 to 2011 at Thessaloniki (Greece). *Int. J. Climatol.* 33, 2871–2876, DOI: 10.1002/joc.3636.
- Balafoutis, Ch., and Arseni-Papadimitriou, A, 1998: Lengths of Very Warm and Very Cold Spells at Southern Balkans, Τμηματικός τόμος Gorczynski.
- Balafoutis, Ch. J. and Makrogiannis, 2007. T. J.: Analysis of a heat wave phenomenon over Greece and its implications for tourism and recreation. Proceedings of the First International Workshop on Climate, Tourism and Recreation, October 2001, Porto Carras, Greece, In Deshpande S. M. and Ernest Raj. P , A comparative study of structure of vertical motions in the lower troposphere over Pune, a tropical Indian station in March 2004 and 2005 using wind profiler data. [online at : <http://www.angeophys.net/25/2103/2007/angeo-25-2103-2007.pdf>
- Brazel, A., N. Selover, R. Vose, & G. Heisler, 2000. The tale of two climates Baltimore and Phoenix urban LTER sites. *Climate Research* 15: 123-135, online at: sevilleta.unm.edu/pub/vanderbi/Korea/Korea2007/brazel%20paper.pdf
- Brasseur, G., Orlando, J.J., & Tyndall, G.S. (Eds.), 1999. *Atmospheric chemistry and global change*. New York: Oxford University Press.
- Cassou, C., L. Terray, and A. S. Philips (2005), Tropical Atlantic influence on European heat waves, *J. Clim.*, 18(15), 2805 – 2811.

- Centers for Disease Control and Prevention (CDC), Morbidity and Mortality Weekly Report (MMWR): International Notes Heat-Related Mortality-Latium Region, Italy, Summer 1983. MMWR 33 91984), pp. 518-521. [online at: <http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/00000405.htm>]
- Doick, K., Hutchings, T. (2013). Air temperature regulation by urban trees and green infrastructure, Forestry Commission Uk, 2013. Access from: [www.forestry.gov.uk/pdf/FCRN012.pdf/\\$FILE/FCRN012.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/FCRN012.pdf/$FILE/FCRN012.pdf)
- Duenas C., Fernandez C. M., Canete S., Carretero J., Liger E., 2002. “Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean Coast”, The Science of the Total Environment, 299, 97–113.
- EEA (European Environmental Agency), 2013. “*Environment and human health*“, Joint EEA-JRC Report, European Union, Publications Office of the E.U., Luxembourg.
- Feidas, H., 2017. Trend analysis of air temperature time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: recent trends and an update to 2013. Theor. Appl. Climatol. 129, 1383–1406. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1854-2>.
- Flocas, A.A., 1972: Contribution to the Study of Warm Invasions in Greece, Meteorologika N° 19
- Flocas, A.A., 1976: Contribution to the Study of Frequency Distribution of Warm and Cold Months at Thessaloniki (1892-1973) and Larissa (1899-1973), Sci. Annals, Fac. Phys. & Mathem., University of Thessaloniki, 16,65-71
- Flocas, A.A., 1981: Persistence of Cold and Hot Spells at Thessaloniki, Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A, 30, 135-144.
- Flocas, H., Kelessis A., Helmis C., Petrakakis M., Zoumakis M. and Pappas K., 2009, «Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area», Theoretical and Applied Climatology, 95, 265-277.
- Founda, D., Katavoutas, G., Fragiskos Pierros, F., Mihalopoulos, N., 2022: Centennial changes in heat waves characteristics in Athens (Greece) from multiple definitions based on climatic and bioclimatic indices, Global and Planetary Change, 212(2022)103807, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103807>

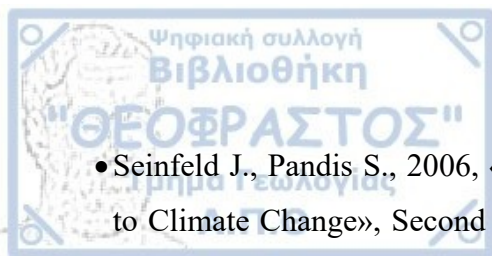
- Founda, D., Santamouris, M., 2017. Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece) during an extremely hot summer (2012). *Sci. Rep.* 7, 10973. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11407-6>.
- Georgoulas, A.K., Akritidis, D., Kalisoras, A., Kapsomenakis, J., Melas, D., Zerefos, C.S., Zanis, P., 2022: Climate change projections for Greece in the 21st century from high-resolution EURO-CORDEX RCM simulations, *Atmospheric Research* 271 (2022) 106049, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106049>
- Electronic Supplement of the paper: Climate change projections for Greece in the 21st century from high-resolution EURO-CORDEX RCM simulations, *Atmospheric Research* 271 (2022) 106049,
- Glavas, S., 1999. Surface ozone and NO_x concentrations at high altitude Mediterranean site Greece. *Atmospheric Environment*, 33, 3813-3820.
- Giannaros, T.M. and Melas, D., 2012: Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: The case study of Thessaloniki, Greece. *Atmos. Res.* 118, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.006>.
- Giles, B.D., and Flocas, A.A., 1984: Air Temperature Variations in Greece. Part 1. Persistence, Trend, and Fluctuations, *Journal of Climatology*, Vol. 4, 531-539.
- Helmis C., Asimakopoulos, D., Deligiorgi, D., Lalas, D., 1987, «Observations of sea-breeze fronts near the shoreline» *Bound.-Layer Meteor.*, 38, 395-410.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2021: Climate Change 2021.
- Kassomenos, P.A., Kelessis, A., Paschalidou, A.K., & Petrakakis, M., 2011. Identification of sources and processes affecting particulate pollution in Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment*, 45, 7293-7300 (doi:10.1016/j.atmosenv.2011.08.034).
- Kassomenos, P.A., Kelessis, A., Petrakakis, M., Zoumakis, N., Christidis, Th., Paschalidou, A.K., 2012: Air Quality assessment in a heavily-polluted urban Mediterranean environment through air quality indices, *Ecological Indicators*, 18, 259-268
- Katavoutas, G., Founda, D., 2019b. Response of urban heat stress to heat waves in Athens (1960-2017). *Atmosphere* 10, 483. <https://doi.org/10.3390/atmos10090483>.
- Katsafados, P., Papadopoulos, A., Varlas, G., Papadopoulou, E., and Mavromatidis, E., 2014: Seasonal predictability of the 2010 Russian heat wave. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1531-1542, doi:10.5194/nhess-14-1531-2014.

- Kelessis, A.G., Petrakakis, M.J., & Zoumakis, N.M., 2006. Determination of benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes in urban air of Thessaloniki, Greece. *Environmental Toxicology*, 440-443.
- Kueh, M.T., Lin, C.Y., Chuang, Y.J., Sheng, Y.F., Chien, Y.Y., 2017. Climate variability of heat waves and their associated diurnal temperature range variations in Taiwan. *Environ. Res. Lett.* 12, 074017, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa70d9>.
- Matzarakis A., De Rocco M., Najjar G., 2009, “Thermal bioclimate in Strasbourg-the 2003 heat wave”, *Theor. Appl. Climatol.* 98, 209–220.
- Mariolopoulos, E., Karapiperis, L., 1956: On the annual march of air temperatures in Athens and their anomalies, *Publications of Athens University Laboratory*, No 2, Athens.
- Maheras, P., 1979: *Climatologie de la mer Egée et de ses marges continentales* Doctorat d'Etat Université de Dijon, 784pp.
- Maheras, P., Arseni-Papadimitriou, A., 1988: Variations des températures durant la dernière période séculaire à Nicosie (Chypre), *Méditerranée* N° 1, 35-41.
- Markakis, K., Poupkou, A., Melas, D., Tzoumaka, P. and Petrakakis, M., 2010: A computational approach based on GIS technology for the development of an anthropogenic emission inventory of gaseous pollutants in Greece, *Water, Air & Soil Pollution*, 207, pp.157–180.
- Meehl, G.A., Tebaldi, C., 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* 305, 994–997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>.
- Metaxas, D., and G. Kallos, 1979: Heat waves from a synoptic point of view. Technical Rep. 14, Ioannina.
- Metaxas, D., and Kallos, G, 1980: Heat waves from a synoptic point of view, *Riv. Met. Aeronaut*, XL, n.2-3, 107-119.
- Milligan, J., 2010. Heatwaves: The developed world’s hidden disaster. In ENSURE Project (2010) "WP2: Integration and Connection of Vulnerabilities – Deliverable 2.1.2: Relation between systemic and physical vulnerability and relation between systemic, social, economic, institutional and territorial vulnerability", European Commission 7th Framework Programme, 38-39 [online at: http://www.ensureproject.eu/ENSURE_Del2.1.2.pdf]

- Mitsakis, E., Stamos, I., Grau, J.M.S., Chrysochoou, E., Iordanopoulos, P., & Aifadopoulou, G., 2013. Urban mobility indicators for Thessaloniki. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, 1, 148–152.
- Mohnen A.V., Goldstein W. & Wang C.W., 1993, “Tropospheric Ozone and Climate Change”, *Air & Waste*, 43:10, 1332-1334.
- Moussiopoulos, N., Vlachokostas, Ch., Tsilingiridis, G. Douros, I. Hourdakis, E. Naneris, C. Sidiropoulos, C. Air quality status in Greater Thessaloniki Area and the emission reductions needed for attaining the EU air quality legislation. *Science Direct*, 407, 1268 – 1285, 2009.
- Nastos P.T. and J. Kapsomenakis, 2015: Regional climate model simulations of extreme air temperature in Greece. Abnormal or common records in the future climate? *Atmospheric Research*, 152, 43-60.
- Oke, T.R., 1981: Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations, *Journal of Climatology*, 1(3), 237–254.
- Oke, T.R., 1982: The Energetic Basis of the Urban Heat Island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.
- Oke, T.R., 1988: "Street design and urban canopy layer climate". *Energy and Buildings*. **11** (1–3): 103–113. doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6
- Parliari D., Kontos S., Poupkou A., Papadogiannaki S., Tzoumaka P., Kelessis A., Melas D., Studying the Effects of Urban Heat Island during Hot Days: the Case of Thessaloniki, Greece. 9th International Symposium on Atmospheric Sciences (ATMOS 2019), October 23-26, 2019, Istanbul.
- Petrakakis M.I., Kelessis A.G., Samara C., Tzoumaka P., Zoumakis N.M., Iosifidis E., Effects of transport processes on particulate concentration in urban Thessaloniki, Greece, *Proc. of First Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 2007)*, (eds A. Kungolos, K. Aravossis, A. Karagiannidis and P. Samaras), June 24 – 28, Skiathos, Greece, 2471-2477, 2007.
- Pirard, P., 2003, Heat wave: a climatic deadly phenomena that can be prevented, *Enf Emerg* 2003;5(3):145-146, France.



- Poupkou, A., Symeonidis, P., Ziomas, I., Melas, D., Markakis, K., 2007: A spatially and temporally disaggregated anthropogenic emission inventory in the Southern Balkan region. *Water, Air, Soil Pollut.* 185, 355-348.
- Poupkou, A., Symeonidis, P., Lisaridis, I., Melas, D., Ziomas, I., Yay, O. D. and Balis, D., 2008: Effects of anthropogenic emission sources on maximum ozone concentrations over Greece, *Atmospheric Research*, 89, pp. 374–381.
- Progiou A., Ziomas I., 2011: Twenty-Year Road Traffic Emissions Trend in Greece. *Water Air Soil Pollut*, DOI 10.1007/s11270-011-0859-9.
- Preserakos, N.G., 1989: A contribution to the study of the extreme heat wave over the South Balkans in July 1987. *Met. Atmos. Phys.* (41) 261-271.
- Rizwan, A.M., L.Y.C. Dennis, & C. Liu, 2008: A review of the generation, determination and mitigation of urban heat island. *Journal of Environmental Sciences* 20: 1, 120-128. In ENSURE Project (2010) "WP2: Integration and Connection of Vulnerabilities – Deliverable 2.1.2: Relation between systemic and physical vulnerability and relation between systemic, social, economic, institutional and territorial vulnerability, European Commission 7th Framework Programme, 38-39 [online at: http://www.ensureproject.eu/ENSURE_Del2.1.2.pdf]
- Robine, J.M., Cheung, S.L.K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel J.P., Herrmann, F.R., 2008: Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003, *Comptes Rendus Biologies*, Volume 331, Issue 2, Pages 171–178. [online at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631069107003770/>]
- Robinson, P., 2001a. On the definition of a Heat Wave, *J. Appl. Meteor.*, 40, 762–775, [online at: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/15200450\(2001\)040%3C0762%3AOTDOAH%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/15200450(2001)040%3C0762%3AOTDOAH%3E2.0.CO%3B2)]
- Robinson, P.J., 2001b. On the Definition of a Heat Wave. *Journal Applied Meteorology*, 40, pp. 762-775.
- Rosenfeld A.H., Akbari H., Romn J.J., Pomerantz M., 1998, Cool communities: strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energ. Build.* 28, 51–62.
- Santamouris M., Papanikolaou N., Livada I., Koronakis I., Georgakis C., Asimakopoulos D.N., 2001: “On the impact of urban climate to the energy consumption of buildings”, *Sol. Energy* 70 (3), 201–216.

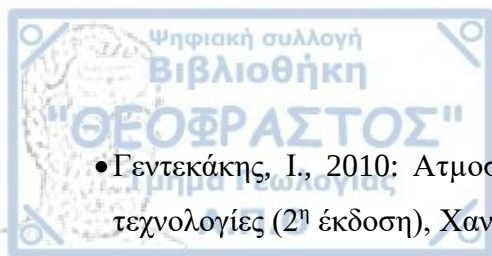


- Seinfeld J., Pandis S., 2006, «Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change», Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.
- Soltani A. and Sharifi E., 2017: Daily Variation of Urban Heat Island Effect and its Correlations to Urban Greenery: A Case Study of Adelaide, *Frontiers of Architectural Research*.
- Symeonidis P., Poupkou A., Gkantou A., Melas D., Yay O.D., Pouspourika, E., and Balis, D., 2008, “Development of a computational system for estimating biogenic NMVOCs emissions based on GIS technology, *Atmos. Environ.*, 42, 1777–1789
- Sillman S. and Samson P. J., 1995, Impact of temperature on oxidant photochemistry in urban, polluted rural and remote environments”, *J. Geophys. Res.*, 100(D6), 497–508.
- Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., Zhen, X., Yuan, D., Kalkstein, A.J., Li, F., Chen, H., 2010. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *Int. J. Biometeorol.* 54, 75–84. <https://doi.org/10.1007/s00484009-0256-x>.
- Tong, S., Wang, X.Y., Barnett, A.G., 2010. Assessment of heat-related health impacts in Brisbane, Australia: comparison of different heatwave definitions. *PLoS One* 5 (8), e12155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012155>.
- Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca N., 2003: Modelling air quality in street canyons: A review. *Atmospheric Environment*, 37 (2), pp.155-182.
- Wilson, R.C., Flemming, Z.L., Monks, R.S., Clain, G., Henne, S., Konovalov, I.B., Szopa, S., & Menut, L., 2011: Have primary emission reduction measures reduced ozone across Europe? An analysis of European rural background ozone trends 1996 – 2005. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11, 18433-18485.
- World Meteorological Organization and World Health Organization, 2015. In: McGregor, G.R., Bessemoulin, P., Ebi, K., Menne, B. (Eds.), *Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development*, 2015. WMO, Geneva, Switzerland, p. 96.
- World Meteorological Organization (WMO), 2022. *State of the Global Climate 2021*, WMO-No. 1290, ISBN 978-92-63-11290-3. Geneva, Switzerland.

- Yi, J., and 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.
- You, Q., Jiang, Z., Kong, L., Wu, Z., Bao, Y., Kang, S., Pepin, N., 2017. A comparison of heat wave climatologies and trends in China based on multiple definitions. *Clim. Dyn.* 48, 3975–3989. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3315-0>.
- Zanis P., 1999. In-situ photochemical control of ozone at the Jungfraujoch in the Swiss Alps [PhD]. University of Bern, School of Sciences.
- Zerefos, C.S., Kourtidis, K.A., Melas, D., Balis, D., Zanis, P., Katsaros, L., Mantis, H.T., Repapis, C., Isaksen, I., Sundet, J., Herman, J., Bhartia, P.K. and Calpini, B., 2002. Photochemical Activity and Solar Ultraviolet Radiation (PAUR) Modulation Factors: An overview of the project. *Journal of Geophysical Research*, 107 (doi: 10.1029/2000JD000134. ISSN: 0148-0227).
- Ziomas, I.C, Tzoumaka, P., Balis, D., Melas, D., Zerefos, C., Klemm, O., 1998: Ozone Episodes in Athens, Greece. A modelling approach using data from the MEDCAPHOT-TRACE, *Atmospheric Environment*, Volume 32, Issue 12, p.p. 2313-2321.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ανδρεάκος, Κ., 1978: Μαθήματα Κλιματολογίας. ΕΜΥ, Αθήνα.
- Ανδρεάκος, Κ., Μποζανάς Μ., 1980: Ο καύσωνας στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας: Περίοδοι συνεχών ημερών καύσωνα, Αναμνηστικός Τόμος στη μνήμη Η.Γ. Μαρσιολόπουλου, *Μετεωρολογικά* Ν° 69, 29-42.
- Αγγελίδης, Δ.Ι., 2010: Αριθμητική μελέτη χαρακτηριστικών ροής ανέμου και διασποράς ρυπαντών σε μια τυπική αστική οδική χαρά των Αθηνών, Διπλωματική Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Ρευστών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Βαλαβανίδης, Αθ., 2008, Οικοτοξικολογία και περιβαλλοντική τοξικολογία Ερευνητική Μεθοδολογία για την Εκτίμηση Οικολογικού Κινδύνου από Επικίνδυνες Χημικές Ουσίες, Εκδόσεις Σύγχρονα Θέματα, Αθήνα. ISBN:978-960-88130-6-9.



- Γεντεκάκης, Ι., 2010: Ατμοσφαιρική Ρύπανση: Επιπτώσεις, έλεγχος & εναλλακτικές τεχνολογίες (2^η έκδοση), Χανιά, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- Γκοντσεαρούκ, Α., 2013: Αστικός σχεδιασμός κατά κυμάτων καύσωνα. Περίπτωση της Αθήνας, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.
- ΕΜΕΚΑ - Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, 2011. Οι Περιβαλλοντικές, Οικονομικές Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στην Ελλάδα. Τράπεζα της Ελλάδος, Ευρωσύστημα, Αθήνα. ISBN 978-960-7032-49-2
- Έλληνα, Φ., 2020: Μελέτη των χρονικών και χωρικών μεταβολών των ατμοσφαιρικών ρύπων στο πολεοδομικό συγκρότημα της Θεσσαλονίκης με τη χρήση συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. ΕΑΠ, Πάτρα.
- Ζάνης, Π., 2008: “Σημειώσεις για την ρύπανση και χημεία της ατμόσφαιρας”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Ζάνης, Π., 2014: Σημειώσεις για την Ρύπανση και Χημεία της Ατμόσφαιρας. Θεσσαλονίκη. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας.
- Ζερεφός, Χ., 1984, Μαθήματα Φυσικής της Ατμόσφαιρας και Φυσικής Περιβάλλοντος, ΑΠΘ, Εκδόσεις Δεδούσης, Θεσσαλονίκη.
- Ζιακόπουλος, Δ., Α. Βλάσση, και Κ. Μεθενίτη, 2008: Εμφάνιση θερμών κυμάτων στην Ελλάδα κατά τη θερμή περίοδο και διαβάθμιση του κινδύνου που προέρχεται από τις υψηλές θερμοκρασίες. Πρακτικά του 9^{ου} Πανελλήνιου Επιστημονικού Συνεδρίου Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας, 28-31 Μαΐου 2008, Θεσσαλονίκη.
- Ζιακόπουλος, Δ. και Φραγκούλη, Π.Β., 2015: Το εγχειρίδιο του Μετεωρολόγου - Προγνώστη, Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ), ISBN 978-618-82094-0-4
- Ζιώμας Ι., 2005, “Το πρόβλημα του όζοντος στην Ελλάδα”, Ημερίδα με θέμα: Ποιότητα της ατμόσφαιρας σε αστικές περιοχές – Νέα δεδομένα και προοπτικές, ΤΕΕ, Αθήνα 18 Μαρτίου 2005.
- Ζιώμας Ι., Ρεμουντάκη Ε., 2003, Φυσικό Περιβάλλον και Ρύπανση: Η ατμόσφαιρα ως αποδέκτης Αποβλήτων» Τόμος Γ', Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα..

- Ζουμάκης, Μ.Ν., 2016, Μελέτη της θνησιμότητας που σχετίζεται με τα επεισόδια καύσωνα κατά τη θερινή περίοδο των ετών 1945-2010 στο Δήμο Θεσσαλονίκης, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ιατρικής, Σχολή Επιστημών Υγείας, ΑΠΘ.
- Κανελλοπούλου, Ζ., 2015: Διαχρονική Μεταβολή των Αέριων Ρύπων στην Πόλη της Θεσσαλονίκης. Αξιολόγηση της Ποιότητας της Ατμοσφαιράς κατά την Οικονομική Κρίση στην Ελλάδα, Διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.
- Κάραλης, Ιωάννης, 1969: Τύποι καιρού Ελλάδος, Διατριβή επί Διδακτορία, Αθήνα. σελ 82, 1969, *Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ)*.
- Καρτάλης, Κ., 1999: Μετεωρολογία. στο Αριανούτσου, Μ., Γεωργίου, Κ., Δημητρακόπουλος, Α., Καρτάλης Κ., Παναγιωτίδης Π., Σταματόπουλος, Κ., Εισαγωγή στο Φυσικό και Ανθρωπογενές Περιβάλλον: Το Φυσικό Περιβάλλον, σελ. 249, Πάτρα, ΕΑΠ.
- Κασσωμένος, Π., 2017, «Φυσική Περιβάλλοντος», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- Κελέσης, Α.Γ., Π.Ν. Τζουμάκα, Α. Τσακνιά, Ι. Τοτονίδης και Π. Τσιμενίδου, “Αποτελέσματα Μετρήσεων του Δημοτικού Δικτύου Σταθμών Μέτρησης Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης και Μετεωρολογικών Παραμέτρων”, Τεχνικές Εκθέσεις (Ηλ. Εκδ.), Τμήμα Περιβάλλοντος και Προσαρμογής στην Κλιματική Αλλαγή, Δήμος Θεσσαλονίκης, 2022.
- Κουμτζής, Θ., Σαμαρά, Κ., 1994: «Έλεγχος αέριας ρύπανσης», Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Κουτσουράκης, Ν., 2010: Ροή και Διασπορά Ρύπων σε Οδικές Χαράδρες: Ανασκόπηση, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, τεύχ. 1 2010.
- Λαβή, Α., 2016: Ο καύσωνας ως ένα ακραίο φυσικό φαινόμενο. Παραδείγματα από τον διεθνή και τον Ευρωπαϊκό χώρο, ΠΜΣ: Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου, Τμήμα Γεωγραφίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.
- Μελάς, Δ., 1997: Διασπορά Αερίων Ρύπων, Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 1997.
- Μελάς Δ., Αλεξανδροπούλου Α., Αμοιρίδης Β., Κακαρίδου Μ., Σουλακέλλης Ν., 2000, “Ατμοσφαιρική ρύπανση”, Οδηγός εκπαιδευτικών, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- Μελάς, Δ., 2007: «Φυσική ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος», Βοηθητικές Σημειώσεις Μαθήματος, Εργαστήριο Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2007.

- Μουσιόπουλος Ν., 1997, “Φαινόμενα Μεταφοράς στην Ατμόσφαιρα”, Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούδη, Θεσσαλονίκη.
- Μπαλαφούτης, Χρήστος, 2010: Σημειώσεις μαθήματος «Γενικής Κλιματολογίας», Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Παπαγιάννης Α., 2005: “Φυσική ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος”, Διατμηματικό Μάθημα «Περιβάλλον και Ανάπτυξη», Τομέας Φυσικής, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Παπαναστασίου Δ., 2007, «Ατμοσφαιρική Ρύπανση – Μετεωρολογία Σε Αστικό Περιβάλλον υπό Συνθήκες Υψηλού Υποβάθρου», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Φυσικής, Σχολή Θετικών Επιστημών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Παρασχά, Α., 2014. Η χωροχρονική εξέλιξη της φωτοχημικής ρύπανσης στην Ελλάδα. Συγκρίσεις με άλλες ευρωπαϊκές πόλεις. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Πετρακάκης Μ.Ι., Κελέσης Α.Γ., Τζουμάκα Π.Ν., Τσούγκας Μ.Α., Κανελλοπούλου Ζ.Δ., Ζουμάκης Ν.Μ., 2005, “Διαχρονική εξέλιξη των φωτοχημικών αέριων ρύπων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης”, Πρακτικά 2ου Περιβαλλοντικού Συνεδρίου Μακεδονίας, σελ.29, Ε.Ε.Χ., Θεσσαλονίκη.
- Πετρακάκης, Μ.Ι., Παπαγιαννόπουλος, Ν.Μ., Κελέσης, Α.Γ., Τζουμάκα, Π.Ν., Τζουρέλης, Α., Κανελλοπούλου, Ζ., Τσακνιά, Α., Κούτσαρη, Ε., & Ζουμάκης, Ν.Μ., 2008. Αξιολόγηση της διαχρονικής εξέλιξης των ατμοσφαιρικών ρύπων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. 3^ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη, 14-17 Μαρτίου
- Ρεμουντάκη Εμμανουέλα, 2010: Εισαγωγή στην Επιστήμη και Τεχνολογία Προστασίας του Περιβάλλοντος, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Ρεπαπής, Χ., 1975: Επί των θερμών εισβολών εις την κατωτέρα τροπόσφαιρα εν Ελλάδι, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, σελ. 26-27.
- Σάρας Χ., 2020: Αστική Θερμική Νησίδα στην Θεσσαλονίκη: Κλιματολογία, Διαχρονικές Τάσεις και Φυσικοί Μηχανισμοί, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Πρόγραμμα μεταπτυχιακών Σπουδών Φυσικής Περιβάλλοντος, Θεσσαλονίκη.

- Σαχσαμάνογλου, Χ.Σ., Μπλούτσος, Α.Α., Μακρυγιάννης, Τ.Ι., 1987: Δυνατότητα Πρόβλεψης Εξαιρετικά Θερμών ή Ψυχρών Μηνών, Αναμνηστικός τόμος στη μνήμη Γεωργίου Λιβαδά, Μετεωρολογικά Ν° 73, 225-228.
- Σταμάτη, Ξ., 2014: “Διακύμανση Μετεωρολογικών Παραμέτρων και Όζοντος στα Αστικά Κέντρα κατά τη θερμή περίοδο του έτους”, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΜΠΣ-Διαχείριση Αποβλήτων, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (ΕΑΠ), Πάτρα.
- Στογιάννης, Κ. 2019: *Χωρική και χρονική κατανομή των επιπέδων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μεγάλες Ελληνικές αστικές περιοχές*. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα.
- Σπύρου, Κ.Ν., 2000: Συνοπτική και δυναμική μελέτη του φαινομένου του καύσωνα στον ευρύτερο ελλαδικό χώρο, Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Σχολή Θετικών Επιστημών, ΑΠΘ.
- Τσόγκας, Λ., 2021: Διερεύνηση της αστικής νησίδας θερμότητας στην ευρύτερη αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΜΠΣ-Διαχείριση Αποβλήτων, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (ΕΑΠ), Πάτρα.
- Υ.Π.ΕΝ. (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας), 2001-2021: «*Ετήσιες Εκθέσεις Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 2001-2021*», Τμήμα Ποιότητας Ατμόσφαιρας-ΕΔΠΑΡ, Διεύθυνση Κλιματικής Αλλαγής και Ποιότητας της Ατμόσφαιρας, ΥΠΕΝ, Αθήνα.
- Φλόκας, Α.Α., 1970: Συμβολή εις τη μελέτη των θερμών εισβολών εν Ελλάδι, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.
- Φλόκας, Α.Α., 1985: Διακυμάνσεις των μηνιαίων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα κατά τη διάρκεια της περιόδου 1892-1981, στη Θεσσαλονίκη, Πρακτικά Συνεδρίου Δήμου Θεσσαλονίκης με θέμα: Περιβάλλον και Ποιότητα Ζωής στη Θεσσαλονίκη, 341-347, Θεσσαλονίκη.
- Φλόκας, Α.Α. 1997: Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας (2η έκδοση), Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Χαϊνά, Ε., 2014, Η σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε ελληνικά αστικά κέντρα. Η επίδραση της οικονομικής κρίσης στα επίπεδα της σωματιδιακής ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. ΕΑΠ, Πάτρα.



- Χοστελίδου Μ.Η., Μελέτη της Αστικής Νησίδας Θερμότητας στην Πόλη της Θεσσαλονίκης, Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης., Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Θεσσαλονίκη. 2012.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- <https://meteo.geo.auth.gr/> ; http://www.geo.auth.gr/gr_deps_gmc.htm
- <http://www.geo.auth.gr/courses/gmc/gmc318y/>
- <http://www.geo.auth.gr/courses/gmc/1000/synthesi.html>
- http://meteo.geo.auth.gr/askiseis/geniki_meteorologia.pdf
- http://www.emy.gr/emyl/el/meteorology/components/HNMS_MeteorologistBook.pdf
- http://www.emy.gr/emyl/el/pdf/heatwave_2021.pdf
- <https://estia.hua.gr/file/lib/default/data/16156/theFile>
- <https://estia.hua.gr/file/lib/default/data/14813/theFile>
- http://www.chem.uoa.gr/chemicals/chem_ozone.htm
- <http://umeteo.com/meteowiki/2860>
- <http://www.gscp.gr/ggpp/> (Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας)
- <https://civilprotection.gov.gr/>
- <https://ypen.gov.gr/perivallon/poiotita-tis-atmosfairas/aithalomichli/>
- <https://el.wikipedia.org/>
- <https://publish.uwo.ca/~javoogt/urban%20climate%20.htm>
- http://195.134.76.37/old_site_10-7-2016/courses/organiki_1/oikotoxikologia/oiktx_K03.pdf
- http://oldwww.arch.ntua.gr/sites/default/files/project/14369_/gkiokas_konstantinos.pdf
- <http://ikee.lib.auth.gr/record/320777/files/GRI-2020-28269.pdf>
- https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction: <http://www.unisdr.org/>
- <https://www.esa.int/esearch?q=heat+island+in+Thessaloniki>
- <https://lifeasti.eu/>. LIFE ASTI (Implementation of a forecasting System for urban heat Island effect for the development of urban adaptation strategies). 2020.



- <https://ypen.gov.gr/perivallon/>
- <https://envdimosthes.gr/> ; <https://thessaloniki.gr/>
- <https://www.euro-cordex.net>
- <https://climpact.gr>