



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ: ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ
ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Χαρτογράφηση με δορυφορικά δεδομένα της επίδρασης
του COVID-19 στη συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων
στην περιοχή της Θεσσαλονίκης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Ντράχας, ΑΕΜ:151459

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Αλεξάνδρα Γκεμιτζή, Καθηγήτρια

ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ: ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ
ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



**Χαρτογράφηση με δορυφορικά δεδομένα της επίδρασης
του COVID-19 στη συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων
στην περιοχή της Θεσσαλονίκης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Ντράχας, ΑΕΜ:151459

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Αλεξάνδρα Γκεμιτζή, Καθηγήτρια
2ο Μέλος: Κωνσταντίνος Κουρτίδης, Καθηγητής
3ο Μέλος: Λεωνίδας Καρακατσάνης, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό

XANTHI, 8 MARCH 2023



**DEMOCRITUS UNIVERSITY OF THRACE
SCHOOL: POLYTECHNIC
DEPARTMENT: ENVIRONMENTAL ENGINEERING**

**[Mapping with satellite data the effect of COVID-19
on the concentration of atmospheric pollutants in the
area of Thessaloniki]**

DIPLOMA THESIS

Athanasiros Ntrachas, Registration Number 151459

COMMITTEE OF EXAMINERS

Supervisor: Alexandra Gemitzi, Professor

Member 2: Konstantinos Kourtidis, Professor

Member 3: Leonidas Karakatsanis, Laboratory Teaching Staff Member

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία σε όλο τον κόσμο τα τελευταία χρόνια. Προκαλεί προβλήματα στην υγεία ανθρώπων, ζώων και φυτών και είναι πιθανό να προκαλέσει ζημιές σε κτίρια και μνημεία. Για τους λόγους αυτούς, έχουν θεσπιστεί νόμοι και έχουν επιβληθεί όρια εκπομπών για τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας. Για τη συμμόρφωση με αυτά τα όρια και την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, έχουν δημιουργηθεί σταθμοί μέτρησης σε όλη τη χώρα για την καταγραφή των ωριαίων τιμών κάθε ρύπου σε καθημερινή βάση και δορυφόροι παρακολουθούν περαιτέρω τις εκπομπές σε πραγματικό χρόνο.

Μαζί με όλες τις καταστροφές που συμβαίνουν στον πλανήτη, στα τέλη του 2019 εμφανίστηκε ο ίος COVID-19 σε μια επαρχία της Κίνας, ο οποίος εξαπλώθηκε σε όλο τον κόσμο και σε λίγους μήνες μετατράπηκε σε πανδημία. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας, μαζί με τους κυβερνητικούς μηχανισμούς κάθε χώρας, αποφάσισαν να επιβάλουν περιοριστικά μέτρα προκειμένου να σταματήσει η εξάπλωση της πανδημίας. Αυτά τα μέτρα περιορισμού είχαν ως αποτέλεσμα τη διακοπή των ταξιδιών, της εργασίας, της μεταφοράς και των υπαίθριων δραστηριοτήτων για μεγάλο χρονικό διάστημα, επηρεάζοντας έτσι τις εκπομπές ρύπων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία συλλέχθηκαν δεδομένα μετρήσεων των ρύπων (CO_2 , NO_2 , SO_2 , CO) για την περιοχή της Θεσσαλονίκης από τον δορυφόρο Sentinel-5P για τα έτη 2019, 2020 και 2021. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία παρουσιάστηκαν σε γραφήματα και οπτικούς χάρτες. Στη συνέχεια συγκρίθηκαν μεταξύ τους προκειμένου να διερευνηθεί η συσχέτιση μεταξύ των περιοριστικών μέτρων και οποιασδήποτε αλλαγής στις συγκεντρώσεις ρύπων. Σύμφωνα με τα στοιχεία που συλλέχθηκαν υπήρξε μεταβολή στις μέσες τιμές των ρύπων ιδιαίτερα στη βιομηχανική ζώνη της Δδυτικής Θεσσαλονίκης, η οποία είναι συνεπής με τις περιόδους περιορισμού. Ωστόσο, περαιτέρω διερεύνηση χρησιμοποιώντας τοπικούς σταθμούς μέτρησης μπορεί να δείξει με μεγαλύτερη ενασθησία τις διαφορές σε απόλυτες τιμές.

Λέξεις Κλειδιά: Ατμοσφαιρική Ρύπανση, Δορυφορικά Δεδομένα, Χρωματική Οπτικοποίηση, Πανδημία Κορωνοϊού.

SUMMARY

Air pollution has been of particular concern and continues to be a major concern around the world in recent years. It causes problems for the health of people, animals and plants and is likely to cause damage to buildings and monuments. For these reasons, laws have been enacted and emission limits have been imposed to ensure public health. In order to comply with these limits and to monitor air quality, measuring stations have been set up throughout the country to record the hourly values of each pollutant on a daily basis and satellite data monitor further real-time emissions.

Along with all the disasters occurring on the planet, at the end of 2019 the COVID-19 virus appeared in a province of China, which spread across the globe and in a few months turned into a pandemic. The World Health Organisation, together with the governmental mechanisms of each country, decided to impose restrictive measures in order to stop the spread of the pandemic. These containment measures have resulted in the interruption of travel, work, transportation and outdoor activities for a long period of time, thereby affecting emissions of pollutants.

In this thesis, measurement data of the pollutants (O_3, NO_2, CO, SO_2) were collected for the region of Thessaloniki from the satellite Sentinel-5P for the years 2019, 2020 and 2021. After appropriate processing they were presented in graphs and visual maps. They were then compared with each other in order to investigate the correlation between the restrictive measures and any change in pollutant concentrations. According to the data collected there was a change in the average values of pollutants especially in the industrial zone of the West Thessaloniki, which is consistent with the periods of confinement. However, further investigation utilizing local measurement stations can show with greater granularity the differences in absolute values.

Keywords: Air Pollution, Satellite Data, Colored Visualisation, COVID-19 Pandemic

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή	3
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	3
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	3
2 Ατμοσφαιρικοί Ρύποι	5
2.1 Ατμοσφαιρική Ρύπανση	5
2.1.1 Πηγές Ρύπων	6
2.1.2 Μονοξείδιο του άνθρακα CO	8
2.1.3 Διοξείδιο του θείου SO ₂	9
2.1.4 Διοξείδιο του αζώτου NO ₂	10
2.1.5 Όζον O ₃	11
2.2 Θεσμικό Πλαίσιο για τους Ατμοσφαιρικούς Ρύπους	13
2.3 Μέτρηση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης	13
3 Τεχνικό Θεωρητικό Υπόβαθρο	15
3.1 Δορυφόρος Sentinel-5P Copernicus	15
3.2 Google Earth Engine	16
3.2.1 Earth Engine Code Editor	17
3.3 Javascript	18
4 Ερευνητική Υπόθεση: Πανδημία και Ατμοσφαιρική Ρύπανση	19
4.1 COVID-19 και περιβαλλοντικές επιπτώσεις	19
4.2 COVID Lockdowns στη Θεσσαλονίκη	20
4.3 Ερευνητικές Ερωτήσεις	20
5 Μεθοδολογία	22
5.1 Απόκτηση Δεδομένων	22
6 Αποτελέσματα	27
6.1 Χρωματική οπτικοποίηση των συγκεντρώσεων των ρύπων 2019, 2020, 2021	27
6.1.1 Όζον	27
6.1.2 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	28
6.1.3 Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	29
6.1.4 Διοξείδιο του αζώτου (NO ₂)	30
6.2 Διαγράμματα πυμών των συγκεντρώσεων των ρύπων 2019, 2020, 2021	31
6.2.1 Διαγράμματα Όζοντος O ₃	31
6.2.2 Διαγράμματα Μονοξειδίου του Άνθρακα CO	32
6.2.3 Διαγράμματα Διοξειδίου του Θείου SO ₂	33

6.2.4 Διαγράμματα Διοξειδίου του Αζώτου NO2	34
6.3 Πίνακες μέσων, ελάχιστων και μέγιστων τιμών των συγκεντρώσεων των ρύπων	34
6.3.1 Συγκεντρώσεις ρύπων 2019	34
6.3.2 Συγκεντρώσεις ρύπων 2020 πρώτο και δεύτερο lockdown	35
6.3.3 Συγκεντρώσεις ρύπων 2021	35
7 Τεκμηρίωση Αποτελεσμάτων	36
7.0.1 Αποτελέσματα Διοξειδίου του Αζώτου NO2	36
7.0.2 Αποτελέσματα Όζοντος O3	37
7.0.3 Αποτελέσματα Διοξειδίου του Θείου SO2	37
7.0.4 Αποτελέσματα Μονοξειδίου του Άνθρακα CO	37
7.1 Περιορισμοί	38
8 Επίλογος	39
Α' Ακρωνύμια και συντομογραφίες	40

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική έρευνα μελετά την επίδραση των περιοριστικών μέτρων κατά τη διάρκεια των lockdown της πανδημίας COVID-19 στην ατμοσφαιρική ρύπανση της περιοχής τη Θεσσαλονίκης. Συγκεκριμένα, μελετάμε τις συγκεντρώσεις του Όζοντος (Ο3), Διοξειδίου του Αζώτου (NO2), Διοξειδίου του Θείου (SO2) και του Μονοξειδίου του Άνθρακα (CO) με την βοήθεια του εργαλείου του Earth Engine και του δορυφόρου Sentinel-5p TROPOMI. Συγκρίνουμε την περίοδο των δύο lockdown (2020) με τις αντίστοιχες περιόδους, πριν την πανδημία (2019) και μετά την πανδημία (2021) και βρίσκουμε τις διαφορές στις συγκεντρώσεις των ρύπων για την περιοχή της Θεσσαλονίκης. Δημιουργήθηκαν χρωματικές οπτικοποιήσεις αλλά και διαγράμματα τιμών με την χρήση της γλώσσας Javascript στο περιβάλλον του Earth Engine και αιτιολογήθηκαν οι διαφορές των συγκεντρώσεων των ρύπων και για τις τρείς χρονικές περιόδους. Αναζητήθηκαν συσχετίσεις της συμπεριφοράς των πολιτών και της λειτουργίας των βιομηχανιών με τις αυξομειώσεις που παρατηρήθηκαν.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Το υπόλοιπο αυτής της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε **7 ενότητες** που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2-8, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, αναλύονται οι πηγές ρύπων, τα χαρακτηριστικά τους και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Στη συνέχεια, περιγράφεται το ειδικό θεσμικό πλαίσιο των ορίων των ατμοσφαιρικών ρύπων και οι τρόποι μέτρησης τους.

Στο **Κεφάλαιο 3** έχουμε το θεωρητικό τεχνικό υπόβαθρο που είναι απαραίτητο στον αναγνώστη για τις έννοιες που παρουσιάζονται στη συνέχεια αναφορικά με τεχνικές και επιστημονικά εργαλεία (Google Earth Engine, Sentinel-5P, Earth Engine Editor) και η γλώσσα προγραμματισμού (Javascript).

Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται η πειραματική διαδικασία, και το πλαίσιο αναφοράς σχετικά με την πανδημία (COVID) και τις ερευνητικές υποθέσεις για την επίπτωσή της στην ατμοσφαιρική ρύπανση που θα μελετηθούν.

Στο **Κεφάλαιο 5** αναλύεται η μεθοδολογία από την προεπεξεργασία των δορυφορικών δεδομένων, στην εξαγωγή χαρακτηριστικών συγκεντρώσεων ρύπων και οπτικοποίηση των απαοτελεμάτων σε χάρτες.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας με τα ανάλογα διαγράμματα.

Τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και κατευθύνσεις για μελλοντικές ερευνητικές προεκτάσεις παρουσιάζονται στο **Κεφάλαιο 7**.

Το **Κεφάλαιο 8** περιλαμβάνει τον επίλογο.

Κεφάλαιο 2

Ατμοσφαιρικό Ρύποι

2.1 Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Σύμφωνα με το νόμο, ρύπος είναι κάθε ουσία που υπάρχει στον αέρα που έχει αρνητικό αντίκτυπο στην υγεία του πληθυσμού ή και του περιβάλλοντος συνολικά. Ως ατμοσφαιρικοί ρύποι ορίζονται τα αέρια ή τα αερολύματα που εντοπίζονται στην ατμόσφαιρα σε συγκεντρώσεις, που απειλούν την κανονική ζωή και την υγεία των οργανισμών ή παρεμποδίζουν και μεταβάλλουν την κανονική ροή λειτουργίας των οικοσυστημάτων [1]. Η παραγωγή αυτών των ρύπων προέρχεται από φυσικές αλλά και ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Όσον αφορά τις φυσικές διεργασίες οι ρύποι δημιουργούνται από πυρκαγιές, βιολογικές δραστηριότητες σε θάλασσα, ερήμους, γύρη και αποσάθρωση βράχων. Η ανθρωπογενής παραγωγή αφορά τις εκπομπές ρύπων από μηχανές κίνησης μέσων μεταφοράς, καυστήρες, παραγωγή ενέργειας, αγροτικές δραστηριότητες κλπ. Παρόλο που η παραγωγή αέριων ρύπων στη φύση είναι μεγαλύτερη σε ορισμένες περιπτώσεις, η συγκέντρωση στις αστικές και βιομηχανικές περιοχές δυσχεραίνει τις συνθήκες διαβίωσης [2].

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι χωρίζονται σε αέριους ή σωματιδιακούς ρύπους. Τα οξείδια αζώτου, θείου και άνθρακα αποτελούν τους αέριους ρύπους. Οι σωματιδιακοί είναι είτε υγρά είτε στερεά σωματιδια τα οποία αναλόγως το μέγεθός τους παραμένουν και αιωρούνται στην ατμόσφαιρα ή λόγω βάρους καταλήγουν πιο γρήγορα στο έδαφος [3]. Με βάση τον τρόπο σχηματισμού τους διακρίνονται σε πρωτογενείς ρύπους και σε δευτερογενείς. Ως πρωτογενείς χαρακτηρίζονται αυτοί που εκπέμπονται κατευθείαν από τις πηγές τους και επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα. Αυτοί είναι το μονοξείδιο του άνθρακα από τα καυσαέρια των οχημάτων, το διοξείδιο του θείου πό την καύση άνθρακα (άνθρακας-λιγνίτης), οι υδρογονάνθρακες, τα αιωρούμενα σωματίδια. Οι δευτερογενείς ρύποι προέρχονται από τις χημικές αντιδράσεις πρωτογενών ρύπων και άλλων στοιχείων της ατμόσφαιρας και είναι συνήθως υπαίτιοι για τον ερεθισμό στα μάτια και τη δημιουργία ομίχλης. Δευτερογενείς ρύποι είναι τα οξείδια του αζώτου, τα οξειδωτικά φωτοχημικά όπως το άζον και οι οξειδωμένες μορφές οργανικών ενώσεων όπως ορισμένες αλδεϋδες και άλατα υπεροξικού οξέος - νιτρικά ακετύλιο. Οι δευτερογενείς ατμοσφαιρικοί ρύποι είναι πιο επιβλαβείς για την υγεία και τα οικοσυστήματα από τους πρωτογενείς ατμοσφαιρικούς ρύπους [1].

Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί έναν κίνδυνο που δεν έχει εκτιμηθεί όπως του αρμόζει. Είναι υπεύθυνη για εκατομμύρια θανάτους και για τα αυξημένα ποσοστά ανα-

πνευστικών ασθενειών [4]. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας ο αριθμός των θανάτων που συνδέονται άμεσα με την ατμοσφαιρική ρύπανση ανέρχεται στα 4,6 εκατομμύρια ετησίως, ενώ ευθύνεται για περισσότερους θανάτους από ότι τα τροχαία ατυχήματα. Αυτά τα γεγονότα και οι μελέτες σχετικά με την επίδραση των ρυπαντών στην υγεία είχαν σαν αποτέλεσμα τη θέσπιση νόμων και την επιβολή επιτρεπτών ορίων για τις εκπομπές ρύπων. Σε περίπτωση υπέρβασης αυτών των ορίων για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα συνήθως λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών και αναλόγως το ρυπογόνο παράγοντα, δρομολογούνται οι απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες ούτως ώστε να διασφαλιστεί η υγεία των πολιτών και του περιβάλλοντος [5].

2.1.1 Πηγές Ρύπων

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας WHO, η εξωτερική ατμοσφαιρική ρύπανση προέρχεται από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές, ενώ οι φυσικές πηγές συμβάλλουν ουσιαστικά στην τοπική ατμοσφαιρική ρύπανση σε άνυδρες περιοχές, πιο επιρρεπείς σε δασικές πυρκαγιές και καταιγίδες σκόνης, η συμβολή των ανθρώπινων δραστηριοτήτων υπερβαίνει κατά πολύ τις φυσικές πηγές.

Ανθρωπογενείς Πηγές

α) Βιομηχανία: οι εκπομπές ρύπων από τη βιομηχανία είναι ένας συνδυασμός αερολυμάτων, σκόνης, καπνού και αέριων ρύπων οι οποίοι παράγονται κυρίως κατά τη βιομηχανική καύση και λιγότερο κατά τη διαδικασία παραγωγής. [6]. Οι κύριες βιομηχανίες που επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα είναι η χαρτοβιομηχανία και τα εργοστάσια πολτοποίησης, τα διυλιστήρια πετρελαίου, τα εργοστάσια λιπασμάτων και η χαλυβουργία. Από αυτές παράγονται και απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τριοξείδιο του θείου (SO₃), μονοξείδιο του αζώτου (NO) και υδρογονάνθρακες. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου η καύση δεν είναι τέλεια εμφανίζονται προϊόντα ατελούς καύσης όπως πιπερικές οργανικές ενώσεις (εκτός μεθανίου), αλκένια, αλδεϋδες, κετόνες, και πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH). [3].

β) Μεταφορές: τα μέσα μεταφοράς είτε χερσαία, θαλάσσια ή αέρια αποτελούν μια σημαντική και συνεχώς αυξανόμενη πηγή ρύπανσης η οποία προέρχεται από την καύση υγρών ορυκτών καυσίμων. Οι σημαντικότεροι από τους ρύπους που εκλύονται είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και υποξείδιο του αζώτου (N₂O) τα οποία προκαλούν και το φαινόμενο του θερμοκηπίου, μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NO_x) και πιπερικές οργανικές ενώσεις. Επιπρόσθετα αναλόγως με τις συνθήκες λειτουργίας της μηχανής εσωτερικής καύσης υπάρχει πιθανότητα παραγωγής αρωματικών πολυκυκλικών υδρογονανθράκων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα οδικά μέσα μεταφοράς θεωρούνται ιδιαιτέρως επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία καθώς η εκπομπή των ρύπων τους γίνεται πολύ κοντά στον άνθρωπο [7]. Σε πόλεις με πληθυσμό που υπερβαίνει τα 10 εκατομμύρια το 90% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλεται στα οχήματα [8].

γ) Θέρμανση και κλιματισμός κτιρίων: όσον αφορά την ψύξη των κτιρίων απαιτείται κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται η ατμόσφαιρα με αέρια υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Επίσης η χρήση χλωροφθορανθράκων (CFC's) στα κλιματιστικά τα προηγούμενα έτη είχε αρνητική επίδραση στο όζον της στρατόσφαιρας καθώς είναι η βασική αιτία δημιουργίας της τρύπας του όζοντος. Η θέρμανση των κτιρίων από την άλλη μεριά

μπορεί να γίνει με διάφορα μέσα. Είτε με στερεά καύσιμα (ξύλα, κάρβουνα), με υγρά (πετρέλαιο, μαζούτ, κηροζίνη), είτε με αέρια (φυσικό αέριο, υγραέριο). Κατά κύριο λόγο γίνεται χρήση υγρών καυσίμων τα οποία οδηγούν στην παραγωγή αέριων ρύπων [9].

δ) Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: η καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (λιθανθράκων, φυσικού αερίου, πετρελαίου και παραγώγων του) απελευθερώνει στο περιβάλλον μεγάλες ποσότητες υδρατμών και διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και άλλων παραπροϊόντων που αποτελούν ρύπους.

ε) Δημοτικοί και γεωργικοί χώροι και αποτέφρωση / καύση αποβλήτων.

Επίσης, ο κακός πολεοδομικός σχεδιασμός, που οδηγεί σε υπέρμετρη επέκταση και υπερβολική εξάρτηση από τις ιδιωτικές μεταφορές μέσω των οχημάτων κυκλοφορίας, είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας για την επιτάχυνση των εκπομπών ρύπανσης.

Φυσικές Πηγές

α) Ηφαίστεια: από τις ηφαιστειακές εκρήξεις, αλλά και κατά τη διάρκεια μη εκρηκτικής ηφαιστειακής δραστηριότητας εκλύονται στην ατμόσφαιρα σημαντικές ποσότητες αερίων και αιωρούμενων σωματιδίων οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν περιοχές που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από το ηφαίστειο. Το μεγαλύτερο ποσοστό που παράγεται είναι υδρατμοί, ενώ εκλύονται και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), υδρόθειο (H_2S), διοξείδιο του θείου (SO_2) και άλλες αλαγονούχες και θειούχες ενώσεις.

β) Βιολογική αποσύνθεση: κατά την αποσύνθεση της νεκρής οργανικής ύλης φυτικής ή ζωικής προέλευσης δημιουργούνται και ως κατάλοιπα αμμωνία (NH_3), υδρόθειο (H_2S) και υδρογονάνθρακες.

γ) Μεταβολικές διαδικασίες: κατά τη διαδικασία του φυσιολογικού μεταβολισμού ζωικών οργανισμών, φυτικών οργανισμών και μικροβίων παράγονται και εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα αέρια όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), υποξείδιο του αζώτου (N_2O), μεθάνιο (CH_4) καθώς και διάφοροι υδρογονάνθρακες.

δ) Δασικές πυρκαγιές: κατά τη διάρκεια δασικών πυρκαγιών, οι οποίες δεν οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα αλλά συνήθως σε κεραυνό, εκλύουν μεγάλες ποσότητες ρυπαντών με τη μορφή καπνού όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), πητυτικές οργανικές ενώσεις (εκτός από μεθάνιο) (NMVOCs), αζωτούχες και θειούχες ενώσεις και αιωρούμενα σωματίδια.

ε) Θαλάσσιες εκτάσεις: οι ωκεανοί εκλύουν συνεχώς στην ατμόσφαιρα αερολύματα. Κατά την εξάτμιση απελευθερώνονται αιωρούμενα σωματίδια από χλωριούχο νάτριο $[NaCl]$ και θειικό μαγνήσιο ($MgSO_4$). Επιπλέον οι ωκεανοί αποτελούν τη βασική πηγή χλωρίου στην ατμόσφαιρα καθώς απελευθερώνουν χλωρομεθάνιο (CH_4Cl) και άλλες αλογονούχες ενώσεις.

ζ) Αποσάθρωση του εδάφους: με τη σταδιακή και προοδευτική αποσύνθεση των υλικών του εδάφους απελευθερώνονται στο περιβάλλον αιωρούμενα σωματίδια.

η) Θερμές πηγές: από τις ιαματικές πηγές απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα θειώδη αέρια [1].

2.1.2 Μονοξείδιο του άνθρακα CO

Πρόκειται για ένα άοσμο και άχρωμο αέριο με μικρότερη μάζα από αυτή του αέρα και το οποίο έχει διάρκεια ζωής από 30 έως και 90 ημέρες στην τροπόσφαιρα. Προέρχεται από μηχανές ατελούς καύσης και συνήθως παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα σε κλειστούς χώρους στάθμευσης ή σε δρόμους με κυκλοφοριακή συμφόρηση. Υπολογίζεται πως το 75% του μονοξειδίου του άνθρακα προέρχεται από τα μέσα μεταφοράς, ενώ περίπου το 25% από ατελή καύση ορυκτών καυσίμων στη βιομηχανία. Η κυριότερη φυσική πηγή του μονοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα είναι η οξείδωση του ατμοσφαιρικού μεθανίου. Η απορρόφηση, η προσρόφηση, η συμπύκνωση και η καύση αποτελούν τις τέσσερις βασικές πηγές ελέγχου για το μονοξείδιο του άνθρακα. Προτιμάται ο έλεγχος στην πηγή, από τον έλεγχο με αραίωση στον αέρα. Όταν τα επίπεδα του μονοξειδίου του άνθρακα φτάσουν σε θανατηφόρα όρια για μικρή χρονική στιγμή ενεργοποιείται κατάσταση συναγερμού. Για την προστασία της υγείας έχουν υιοθετηθεί κάποια στάδια ελέγχου. Το πρώτο στάδιο ελέγχου αρχίζει αν σε μέσο όρο οχταώρου η τιμή του μονοξειδίου του άνθρακα φθάσει τα 34 mg/m³. Αν φθάσει τα 46 mg/m³ ενεργοποιείται πιο αυστηρή δράση, ενώ προβλέπεται κλείσιμο των εργοστασίων και απαγόρευση κυκλοφορίας στην περιοχή του περιστατικού [8].

Επιπτώσεις στην Υγεία

Τα συμπτώματα της δηλητηρίασης λόγω της έκθεσης στο μονοξείδιο του άνθρακα μπορούν να παρατηρηθούν σε οδηγούς εν ώρα κυκλοφοριακής συμφόρησης. Τέτοια είναι μεταξύ άλλων ο πονοκέφαλος, η ζάλη, η υπνηλία και η ναυτία. Σε περιπτώσεις μεγαλύτερης έκθεσης, μπορεί να προκληθεί εμετός, λιποθυμία, κώμα ή ακόμα και θάνατος, ανάλογα με τον βαθμό έλλειψης οξυγόνου. Η λειτουργία αυτοκινήτου σε μη αεριζόμενο (κλειστό) χώρο στάθμευσης, από ατύχημα ή από πρόθεση, μπορεί να προκαλέσει ακόμη και θάνατο. Η χρήση κακοσυντηρημένης συσκευής καύσης εσωτερικών χώρων μπορεί να οδηγήσει στην κατάρρευση του κεντρικού νευρικού συστήματος στο βαθμό που σταματάει η αναπνοή (respiratory arrest). Τα μέρη του σώματος που επηρεάζονται περισσότερο είναι εκείνα που εξαρτώνται από τη σταθερή παροχή οξυγόνου: ο εγκέφαλος, η καρδιά και το αναπτυσσόμενο έμβρυο στις έγκυες γυναίκες. Οι άνθρωποι που είναι εγγενώς ευάλωτοι στην δηλητηρίαση από μονοξείδιο του άνθρακα είναι εκείνοι με καρδιακές και πνευμονικές δυσλειτουργίες, όπως οι ηλικιωμένοι που υποφέρουν συνήθως από κάποιου βαθμού στένωση αρτηριών. Άλλες ευπαθείς ομάδες είναι τα έμβρυα και τα νήπια, που βρίσκονται σε κρίσιμο στάδιο ανάπτυξης του εγκεφάλου και του νευρικού συστήματος. Άτομα με χρόνια βρογχίτιδα και εμφύσημα, που αναπνέουν συχνότερα και με δυσκολία για να αντισταθμίσουν το μειωμένο οξυγόνο του αίματος καθώς και άλλοι με διάφορες δυσλειτουργίες στο αίμα, όπως η αναιμία [10].

Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Σε αντίθεση με το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα, το μονοξείδιο του άνθρακα που υπάρχει στην ατμόσφαιρα δεν επιβαρύνει την παγκόσμια θερμοκρασία. Ωστόσο παίζει σημαντικό ρόλο στη χημεία της ατμόσφαιρας καθώς επηρεάζει την ικανότητά της να καθαρίζει από πολλά άλλα ρυπογόνα αέρια. Σε συνδυασμό και με την ηλιακή ακτινοβολία συμβάλει στη δημιουργία αστικού νέφους (NASA). Το είδος που φαίνεται να έχει τη μέγιστη έκθεση αλλά και τη μέγιστη ευασθησία στα τυπικά επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα είναι ο άνθρωπος [11].

2.1.3 Διοξείδιο του θείου SO₂

Πρόκειται για ένα άχρωμο αέριο, το οποίο όταν βρίσκεται σε χαμηλή συγκέντρωση είναι άσημο ενώ όταν βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις έχει έντονη και ερεθιστική οσμή. Είναι ελαφρώς διαλυτό στο νερό και περίπου δύο φορές βαρύτερο από τον αέρα. Μπορεί να παραμείνει στην ατμόσφαιρα από 2 έως 4 ημέρες και να μεταφερθεί μέχρι και 1000 κμ. Στην ατμόσφαιρα το διοξείδιο του θείου αντιδρά για να σχηματίσει τριοξείδιο του θείου (SO₃) το οποίο εμφανίζει έντονη δραστικότητα με υδρατμούς και σχηματίζει ομίχλη θειικού οξέος το οποίο απαντάται στην πρόβλημα της ρύπανσης από όξινη βροχή. Το μεγαλύτερο ποσοστό παράγεται από φυσικές πηγές, συγκεκριμένα τα 2/3 προέρχονται από ηφαίστεια και θερμές πηγές. Το υπόλοιπο προέρχεται κυρίως από εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μεταφορές, κεντρικές θερμάνσεις κατοικιών, διυλιστήρια πετρελαίου, χαρτοβιομηχανίες [12]. Πλέον προτιμάται η χρήση καυσίμων αφότου έχει απομακρυνθεί από αυτά το θείο, η μεταβολή του άνθρακα με υγροποίηση, η κάθαρση των προϊόντων μετά την καύση και η χρήση υψηλών καμινάδων προκειμένου να διασπείρουν τα αέρια.

Επιπτώσεις στην Υγεία

Σε γενικές γραμμές οι συγκεντρώσεις του δεν ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια, μακροχρόνια όμως έκθεση μπορεί να προκαλέσει σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα, να επιβαρύνει τον αμυντικό μηχανισμό των πνευμόνων και να επιδεινώσει τυχόν υπάρχουσες καρδιοαγγειακές παθήσεις. Άτομα με χρόνιες αναπνευστικές παθήσεις, μικρά παιδιά και ηλικιωμένοι είναι ιδιαιτέρα ευπαθή σε τέτοιες συνθήκες. Η βραχυπρόθεσμη έκθεση στο διοξείδιο του θείου προκαλεί συστολή των αναπνευστικών αγγείων στους ασθματικούς αλλά και σε όσους έχουν ευαισθησία. Η χρόνια έκθεση στο διοξείδιο του θείου προκαλεί στένωση στην τραχεία, παρόμοια με την χρόνια βρογχίτιδα. Παράλληλα, τα σωματίδια και το διοξείδιο του θείου αντιδρούν προς τον σχηματισμό πιο επικίνδυνων όξινων θειϊκών σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά εισπνέονται βαθύτερα στους πνεύμονες από ότι το αέριο διοξείδιο του θείου και εγκαθίστανται εκεί. Το φαινόμενο ενισχύεται στα παιδιά και τους ενήλικους που αθλούνται, που καθότι βρίσκονται σε μεγαλύτερη κίνηση, αναπνέουν από το σόμα τους παρακάμπτοντας τους μηχανισμούς φιλτραρίσματος που βρίσκονται στις ρινικές διόδους. Συχνότητες θανάτου έχουν επίσης συσχετιστεί με επίπεδα συγκέντρωσης διοξειδίου του θείου και σωματίδιων. Η ομίχλη παρακινεί την μετατροπή του διοξειδίου του θείου σε όξινα θειικά αερολύματα (acid sulfate aerosols) τα οποία όπως και τα σωματίδια εισπνέονται βαθύτερα και είναι πιο επικίνδυνα από το αέριο διοξείδιο του θείου [13].

Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Τα φυτά είναι ιδιαιτέρα ευαίσθητα στο διοξείδιο του θείου κυρίως σε περιόδους έντονης ηλιοφάνειας, υψηλής σχετικής υγρασίας και μέτριας θερμοκρασίας. Το διοξείδιο του θείου μπορεί να προκαλέσει αποχρωματισμό των φυτών και καταστροφή των φύλλων τους. Ιδιαιτέρα ευάλωτα είναι οι λειχήνες και τα βρύα. Η χειρότερη ζημιά οφείλεται στη μετατροπή του διοξειδίου του θείου της ατμόσφαιρας σε θειικό οξύ και στην επακόλουθη εναπόθεσή του με τη μορφή όξινης βροχής, χιονιού και σωματίδιων οξέος. Η μετατροπή των οξειδίων του θείου σε θειικό οξύ διαρκεί αρκετές ημέρες. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, τα αέρια υλικά μπορούν ακόμη και να μεταφερθούν σε μεγάλη χιλιομετρική απόσταση, μακριά από την πηγή εκπομπών και η όξινη βροχή μπορεί να

πλήξει τοποθεσίες, όπου δεν βρίσκονται κοντά σε σημαντικές πηγές ρύπανσης. Το νερό σε πολλές λίμνες έχει γίνει όλο και πιο όξινο λόγω της όξινης βροχής. Πολλές δασικές περιοχές απειλούνται σοθαρά από την πίεση της οξύτητας, τη ρύπανση του όζοντος, τη ζέστη και την ξηρασία. Τέτοιες επιπτώσεις στα οικοσυστήματα μπορούν να επηρεάσουν την ισορροπία του εδάφους (π.χ. διάβρωση), να αλλάξουν την ατμοσφαιρική σύνθεση, να αλλάξουν το τοπικό κλίμα και να επηρεάσουν την ισορροπία της χλωρίδας και της πανίδας. Το θειικό οξύ πιστεύεται ότι είναι υπεύθυνο για το 60 τα εκατο του οξεός στις όξινες εναποθέσεις. Το διοξείδιο του θείου συνδέεται ιστορικά με τη διάβρωση του χάλυβα και άλλων μετάλλων, την υποβάθμιση (αποσύνθεση) ψευδάργυρου και άλλων προστατευτικών επικαλύψεων, την υποβάθμιση των δομικών υλικών (σκυρόδεμα και ασθεστόλιθο) και την υποβάθμιση της ποιότητας του χαρτιού, των δερμάτινων ειδών και των μνημείων [11].

2.1.4 Διοξείδιο του Αζώτου NO2

Τα σημαντικότερα οξείδια του αζώτου που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα είναι το μονοξείδιο (NO) και το διοξείδιο (NO2). Το μονοξείδιο του αζώτου αποτελεί πρωτογενή ρύποι ενώ το διοξείδιο του αζώτου δευτερογενή και προέρχεται από την αντίδραση μεταξύ μονοξειδίου του αζώτου και όζοντος. Όσον αφορά το διοξείδιο του αζώτου, πρόκειται για ένα αέριο με καφέ χρώμα, οξεία ερεθιστική οσμή, διαλυτό στο νερό και ισχυρό οξειδωτικό. Η ύπαρξη οξειδίων του αζώτου δημιουργεί μια σειρά αντιδράσεων στη ατμόσφαιρα και θεωρούνται υπεύθυνα για τη δημιουργία φωτοχημικής ρύπανσης. Όταν βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις προσδίδουν στην ατμόσφαιρα το χαρακτηριστικό καφέ χρώμα που συναντάται στις μεγαλουπόλεις με υψηλά ποσοστά ρύπανσης. Η βασική πηγή μονοξειδίου του αζώτου είναι η καύση ορυκτών καυσίμων και κυρίως η χρήση τους για μεταφορικά μέσα. Επιπρόσθετα η χρήση τους σε ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς και στη θέρμανση των κτιρίων εκλύει μεγάλα ποσά μονοξειδίου του αζώτου στον αέρα [14].

Επιπτώσεις στην Υγεία

Το διοξείδιο του αζώτου, όταν βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις, προκαλεί σε ευάλωτα άτομα, όπως άτομα με άσθμα και παιδιά, δυσκολία στην αναπνοή, ερεθίζει τους πνεύμονες προκαλώντας βλάβη στα ευαίσθητα κύτταρα που τους περιβάλλουν. Σε αντίθεση με ουσίες που προσδίδουν κυρίως το ανώτερο αναπνευστικό (όπως η αμμωνία), με βασικό χαρακτηριστικό της παρουσίας τους την πρόκληση βήχα και βλεννώδους συμφόρησης, το διοξείδιο του αζώτου προκαλεί ιδιαίτερα συμπτώματα μόνο όταν συναντάται σε υψηλές συγκεντρώσεις. Ο σημαντικός κίνδυνος εμφανίζεται περίπου 5 με 72 ώρες αργότερα, όταν είναι σε εξέλιξη η φλεγμονή που μπορεί να οδηγήσει σε πνευματικό οίδημα, αλλά ακόμη και στο θάνατο. Οι συγκεντρώσεις στον περιβάλλοντα αέρα εξαιρετικά σπάνια φτάνουν σε εκείνα τα όρια ώστε να προκληθούν τέτοια ακραία αποτελέσματα, όμως η έκθεση σε τέτοιες τιμές πραγματοποιείται σε μερικά επαγγέλματα. Οι αγρότες για παράδειγμα εκτίθενται στα επίπεδα που υπάρχουν στα σιλό του σιταριού (silo fillers' disease). Το μεγαλύτερο ποσοστό των λοιμώξεων φαίνεται να οφείλεται τόσο στη μειωμένη δυνατότητα των κυττάρων που έχουν υποστεί βλάβη να καθαρίσουν τα εισπνεόμενα βακτηρίδια και τους ιούς, όσο και σε βλάβη στα κύτταρα του ανοσοποιητικού συστημάτος που καταπολεμούν τη λοίμωξη. Οι ασθματικοί και οι άνθρωποι που πάσχουν από χρόνια βρογχίτιδα ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι όταν εκτίθενται συχνά στις υψηλές συγκεντρώσεις που εμφανίζονται στον αστικό αέρα [13].

Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Τα οξείδια του αζώτου προκαλούν δυσχερείς οικολογικές επιβαρύνσεις. Το χειρότερο από αυτά οφείλεται στο νιτρικό οξύ, το τελικό προϊόν της χημικής αντίδρασης του διοξειδίου του αζώτου στον αέρα. Η μετατροπή των οξειδίων του αζώτου λαμβάνει χώρα σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, επομένως η επίδραση εμφανίζεται σε μικρές έως μεσαίες αποστάσεις από την πηγή εκπομπής. Η οξίνιση του νερού έχει αρνητικό αντίκτυπο στον πληθυσμό των ψαριών και άλλων ειδών. Η οξίνη βροχή σε συνδυασμό με την καταστροφή του όζοντος, τις υψηλές θερμοκρασίες και τις ξηρασίες έχουν οδηγήσει σε απώλεια δασικής έκτασης σε διάφορες περιοχές. Σε ευαίσθητες εκβολές ποταμών και παράκτιες περιοχές, η αζωτούχα ρύπανση από την απορροή λιπασμάτων, τα λύματα και την ατμοσφαιρική εναπόθεση μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή επιβλαβών φυτών και οργανισμών. Ο μακροπρόθεσμος αντίκτυπος αυτών των αλλαγών είναι άγνωστος [11].

2.1.5 'Οζον Ο3

Πρόκειται για ένα τρατομικό μόριο το οποίο αποτελείται από τρία άτομα οξυγόνου. Έχει κυανό χρώμα σε μεγάλες συγκεντρώσεις, είναι ασταθές αέριο, ελαφρώς διαλυτό στο νερό, πολύ οξειδωτικό και τοξικό ενώ διαθέτει και χαρακτηριστική έντονη μυρωδιά. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 έχει χαρακτηριστεί ως παράγοντας ρύπανσης σε παγκόσμιο επίπεδο. Λαμβάνει μέρος στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, την τρύπα του όζοντος και το φωτοχημικό νέφος [15].

Το όζον είναι ένα αέριο το οποίο υπό κανονικές συνθήκες βρίσκεται σε απόσταση 15-50 km από την επιφάνεια της γης, δηλαδή στη στρατόσφαιρα. Το «καλό» όζον, όπως θεωρείται το στρατοσφαιρικό όζον, λειτουργεί ως ασπίδα για όλα τα έμβια όντα, καθώς μας προστατεύει από την υπεριώδη ακτινοβολία η οποία μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες όταν διαπερνά την ατμόσφαιρα αφιλτράριστη. Η χρήση χλωροφθορανθράκων (CFC's) ως ψυκτικό μέσο, διαλύτες ή προωθητικά αέρια είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση της στοιβάδας του όζοντος δημιουργώντας μια τρύπα η οποία δεν μπορούσε να αποκατασταθεί από τη φύση. Ενώ έχει γίνει αντικατάσταση των χλωροφθορανθράκων με άλλες ουσίες πιο φιλικές για το όζον σε πολλά προϊόντα, δεν έχει αποκατασταθεί πλήρως και σε ορισμένα σημεία του πλανήτη (όπως η Αυστραλία, η Βόρειος Αμερική) έχει τρομερές συνέπειες. Αντίθετα με την επικρατούσα άποψη, καθώς για πολλά χρόνια ο κόσμος πίστευε πως η ακτινοβολία UVA δεν προκαλεί μακροχρόνιες βλάβες, πλέον έχει επιβεβαιωθεί πως είναι υπεύθυνη για τη γήρανση του δέρματος αλλά και για πιο σοβαρές ασθένειες όπως ο καρκίνος του δέρματος. [14]

Ένα ποσοστό της τάξης του 10 τα εκατο της συνολικής ποσότητας του όζοντος, βρίσκεται σε απόσταση 0-15 km από την επιφάνεια της γης, δηλαδή στην τροπόσφαιρα και θεωρείται ρύπος. Το όζον είναι δευτερογενής ρύπος και παράγεται παρουσία ηλιακής ακτινοβολίας και ύστερα από αντίδραση του οξυγόνου, πτητικών οργανικών ενώσεων και οξειδίων του αζώτου. Οι πρωτογενείς ρύποι από τους οποίους παράγεται το τροποσφαιρικό όζον, προέρχονται από ανθρωπογενείς πηγές όπως τα μέσα μεταφοράς, τα χημικά εργοστάσια, λιπάσματα, χημικά διαλυτικά και πρατήρια βενζίνης. Κατά τις πρωινές ώρες παρατηρούνται οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις όζοντος στην ατμόσφαιρα. Αυτό εξηγείται καθώς εκείνες τις ώρες είναι αυξημένη η κίνηση στους δρόμους και κατά συνέπεια η έκλυση μονοξειδίου του αζώτου, το οποίο καταστρέφει το όζον, και υδρογονανθράκων. Στη συνέχεια της ημέρας, το μεσημέρι, υπάρχει αύξηση διοξειδίου του

αζώτου μετά από αντίδραση με τον ήλιο. Το διοξείδιο του αζώτου με τη σειρά του αντιδράει με τον ήλιο, φωτοδιασπάται και μειώνεται αυξάνοντας την παραγωγή του όζοντος. Έπειτα όταν ο ήλιος έχει δύσει, υπάρχει αύξηση του μονοξειδίου του αζώτου και κατά συνέπεια καταστροφή του όζοντος.

Το τροποσφαιρικό όζον επιδρά στην ατμόσφαιρα με διάφορους τρόπους. Αρχικά συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου καθώς απορροφά την υπέρυθρη ακτινοβολία. Παράλληλα όμως συντελεί στην παραγωγή ριζών υδροξυλίου (OH-) μέσω της φωτόλυσής του και παρουσία υδρατμών. Οι ρίζες υδροξυλίου θεωρούνται «απορρυπαντικό» για την ατμόσφαιρα καθώς οξειδώνουν αέριους ρύπους (μονοξείδιο του άνθρακα, υδροχλωροφθοράνθρακες, μεθάνιο κ.ά.) οι οποίοι σε άλλη περίπτωση θα παρέμεναν στην τροπόσφαιρα για πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, επιδεινώνοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Επιπλέον το όζον ως ισχυρό οξειδωτικό λαμβάνει μέρος στη δημιουργία θειικού οξέος. Συγκεκριμένα, οξειδώνει το διοξείδιο του θείου (SO₂) της ατμόσφαιρας σε τριοξείδιο του θείου (SO₃) το οποίο στη συνέχεια με τους υδρατμούς μετατρέπεται σε θειικό οξύ (H₂SO₄). Το θειικό οξύ αποτελεί το βασικό συστατικό της όξινης βροχής η οποία είναι ιδιαίτερα επιβλαβής για τους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς αλλά και για τα υλικά αγαθά.

Επιπτώσεις στην Υγεία

Τα συμπτώματα από την έκθεση σε υψηλά επίπεδα όζοντος περιλαμβάνουν πόνο στο στήθος, βήχα, άσθμα, πνευμονική και ρινική συμφόρηση, ερεθισμό στα μάτια και τη μύτη. Αυτά τα συμπτώματα εμφανίζονται σε επίπεδα όζοντος ελαφρώς πάνω από το όριο για την προστασία της ανθρώπινης υγείας, ένα όριο που πολλές περιοχές το πλησιάζουν αρκετά. Άλλες επιπτώσεις στην υγεία που έχουν αναφερθεί είναι η αύξηση των κρουσμάτων άσθματος, η καρδιακή δυσλειτουργία, η μείωση της αεροβικής ικανότητας καθώς επίσης και η διαταραχή στο κεντρικό νευρικό σύστημα, στο συκώτι, στο αίμα και στο ενδοκρινικό σύστημα. Ομάδες υψηλού κινδύνου είναι όσοι έχουν ήδη αναπνευστικά προβλήματα ή χρόνια πνευμονική πάθηση [10].

Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Τόσο το όζον, όσο και τα υπόλοιπα οξειδωτικά, προκαλούν σημαντικές ζημιές στις καλλιέργειες και στα δάση. Η κύρια επίπτωση στους φυτικούς οργανισμούς είναι τα φύλλα τους, ακολουθούμενη από βλάβη στην ανάπτυξή τους, η οποία βλάπτει ολόκληρη την καλλιέργεια. Η ζημιά στα δάση από τις τρέχουσες συγκεντρώσεις του όζοντος στο υπόβαθρο περιλαμβάνει ζημιά και πρόωρη πτώση των φύλλων, μειωμένη φωτοσυνθετική ικανότητα, περιορισμό ανάπτυξης και αυξημένη προσβολή από σκαθάρια. Άλλες λειτουργίες των οργανισμών και των οικοσυστημάτων όπως οι λειχήνες και ο κύκλος των θρεπτικών ουσιών, επηρεάζονται επίσης. Τα οξειδωτικά μπορούν επίσης να καταστρέψουν υλικά και αντικείμενα που χρειαζόμαστε καθημερινά. Προκαλούν ρωγμές πλαστικών και καουτσούκ (όπως τροχοί), υποβάθμιση και εξασθένηση των υφαντικών τιών και βαφών. Παράλληλα όταν βρίσκεται να υψηλές συγκεντρώσεις, οξειδώνει τις οργανικές ενώσεις που βρίσκονται σε υφάσματα, χαρτιά, πίνακες αλλά και κτίρια, προκαλώντας με αυτό τον τρόπο υποβίβαση της πολιτιστικής μας κληρονομιάς [16].

2.2 Θεσμικό Πλαίσιο για τους Ατμοσφαιρικούς Ρύπους

Στην Ελλάδα ισχύουν νομοθετημένα όρια και στόχοι για το διοξείδιο του θείου, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του αζώτου, και το όζον. Τα συγκεκριμένα όρια έχουν καθιερωθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση και έχουν ως στόχο την προστασία της ανθρώπινης υγείας αλλά και του οικοσυστήματος.

Η σχετική νομοθεσία είναι η ακόλουθη:

- 1) Οδηγία 2008/50/EK για την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και καθαρότερο αέρα για την Ευρώπη (ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/E103, ΦΕΚ 488B/30.3.11).
- 2) Κ.Υ.Α 11824 (ΦΕΚ 369B/24.5.93), Έκτακτα μέτρα για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην περιοχή της πρωτεύουσας, όπως ισχύει κατόπιν τροποποίησής της με την ΚΥΑ ΗΠ 14122/549/E103, ΦΕΚ 488B/30.3.11. [17]

Τα όρια ποιότητας ατμόσφαιρας για το διοξείδιο του θείου, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του αζώτου, και το όζον παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Στάδια	Προειδοποίηση	A Βαθμίδα Μέτρων	B Βαθμίδα Μέτρων
NO ₂	400 mg/m ³ max 1h	500 mg/m ³ max 1h	700 mg/m ³ max 1h
CO	20 mg/m ³ avg 8h	25 mg/m ³ avg 8h	35 mg/m ³ avg 8h
O ₃	250 mg/m ³ max 1h	300 mg/m ³ max 1h	500 mg/m ³ max 1h
SO ₂	250 mg/m ³ avg 24h	300 mg/m ³ avg 24h	400 mg/m ³ avg 24h

Πίνακας 2.1: Όρια ποιότητας ατμόσφαιρας

2.3 Μέτρηση Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Τα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης μπορούν να υπολογιστούν με διαφορετικές μεθόδους και εργαλεία:

1. Άμεση μέτρηση: Περιλαμβάνει τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού, όπως αναλυτές αερίων, για τη μέτρηση της συγκέντρωσης των ρύπων στον αέρα. Αυτή η μέθοδος θεωρείται η πιο ακριβής, αλλά μπορεί να είναι δαπανηρή και υλικοτεχνικά δύσκολη να εφαρμοστεί σε μεγάλη κλίμακα [18].
2. Παθητική δειγματοληψία: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί έναν δειγματολήπτη που συλλέγει ρύπους σε ένα φίλτρο ή προσροφητικό υλικό, το οποίο στη συνέχεια αναλύεται σε εργαστήριο. Είναι λιγότερο δαπανηρή από την άμεση μέτρηση, αλλά τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο στιγμιαία και μπορεί να επηρεαστούν από παράγοντες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία [19].
3. Τηλεπισκόπηση: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί δορυφόρους ή αεροσκάφη για τη μέτρηση των ρύπων στον αέρα από απόσταση, μπορεί να καλύψει μεγάλες περιοχές, αλλά οι μετρήσεις μπορεί να μην είναι τόσο ακριβείς όσο η άμεση ή παθητική δειγματοληψία [20].
4. Μοντελοποίηση: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα για την εκτίμηση της συγκέντρωσης των ρύπων στον αέρα με βάση παράγοντες όπως η μετεωρολογία, οι εκπομπές και η χρήση γης. Είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη

των επιπέδων ρύπανσης, αλλά οι προβλέψεις μπορεί να μην είναι τόσο ακριβείς όσο οι μετρήσεις από μεθόδους άμεσης, παθητικής ή τηλεπισκόπησης[20].

5. Βιοπαρακολούθηση: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί ζωντανούς οργανισμούς όπως λειχήνες, βρύα, φύλλα ή βελόνες δέντρων, έντομα για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη μέτρηση της μακροχρόνιας έκθεσης σε ρύπους και για την παρακολούθηση απομακρυσμένων ή δυσπρόσιτων περιοχών [21].

Σε κάθε περίπτωση η μέτρηση κάθε ρύπου ακολουθεί πρότυπα που σχετίζονται με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται: φωτομετρία ή φασματοσκοπία Υ" για το όζον, χημειοφωταύγεια για οξείδια του αζώτου, υπέρυθρη φασματοσκοπία για μονοξείδιο του άνθρακα είναι μερικά παραδείγματα των διαφορετικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται[22].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία βασιζόμαστε σε μεθόδους τηλεπισκόπησης αντί για τοπικούς σταθμούς και μεθόδους άμεσης μέτρησης. Η προσέγγιση αυτή έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός εργαλείου που μπορεί απρόσκοπτα να παρακολουθεί τα επίπεδα ρύπανσης και να τα συγκρίνει σε διαφορετικά χρονικά σημεία, ανανεώνοντας συνεχώς την πηγή πληροφορίας. Επιπλέον, οι δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης συλλέγουν πληροφορίες και για τους διάφορους παράγοντες σε αστικό περιβάλλον που επηρεάζουν τα επίπεδα ρύπανσης παρέχοντας και κατευθυντήριες γραμμές για τα κρίσιμα σημεία που επιζητούν παρέμβαση. Επιπλέον, τα χωρικά κενά των σταθμών επίγειας παρακολούθησης είναι αναπόφευκτα και τα δορυφορικά δεδομένα μπορούν να συμπληρώσουν πληροφορίες για την ποιότητα του αέρα σε περιοχές χωρίς επίγειο μόνιτορ. Η επιλογή δορυφορικών δεδομένων για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων ζητημάτων ποιότητας του αέρα εξαρτάται μεταξύ άλλων από την ακρίβεια των δεδομένων και τη χωρική και χρονική ανάλυση[23].

Κεφάλαιο 3

Τεχνικό Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Δορυφόρος Sentinel-5P Copernicus

Η αποστολή Copernicus Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P) είναι η πρώτη αποκλειστική αποστολή όπερνιζους για την παρακολούθηση της ατμόσφαιράς μας [24] και ο δορυφόρος εκτοξεύτηκε με επιτυχία στις 13 Οκτωβρίου 2017 από το κοσμοδρόμιο Plesetsk στη Ρωσία.

Ο κύριος στόχος της αποστολής Copernicus Sentinel-5P είναι να διεξάγει ατμοσφαιρικές μετρήσεις με υψηλή χωροχρονική ανάλυση για την ποιότητα του αέρα, το οζόν, την υπεριώδη ακτινοβολία και την παρακολούθηση και πρόβλεψη του κλίματος. Στο Sentinel-5P, υπάρχει ένα όργανο που ονομάζεται TROPOMI (TROPOSPHERIC Monitoring Instrument) και είναι ένα φασματόμετρο απεικόνισης που κυμαίνεται εντός του υπεριώδους και του υπέρυθρου βραχέων κυμάτων. Το όργανο χρησιμοποιεί τεχνικές παθητικής τηλεπισκόπησης για να εντοπίσει τον στόχο του μετρώντας την ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται και ακτινοβολείται από τη γη στην κορυφή της ατμόσφαιρας [25]. Έτσι ανακτά δεδομένα στηλών τροπόσφαιρας και στρατόσφαιρας NO₂, SO₂, CO, O₃ οι οποίες έχουν μια άνευ προηγουμένου βελτιωμένη χωρική ανάλυση από προηγούμενα σύνολα δεδομένων $7 \times 3,5$ km [36].

Σε αυτή την εργασία, χρησιμοποιούμε τις συνολικές κατακόρυφες στήλες των NO₂, SO₂, CO, O₃ (4.1).

Τα κύρια χαρακτηριστικά των δεδομένων Copernicus Sentinel-5P είναι [26]:

- Προσωρινή κάλυψη: από 30 Απριλίου 2018.
- Χωρική κάλυψη: περίπου 2600 χλμ. Πλήρης καθημερινή επιφανειακή κάλυψη μετρήσεων ακτινοβολίας και ανάκλασης για γεωγραφικά πλάτη άνω των 7 και κάτω των -7° και καλύτερη από 95% κάλυψη για γεωγραφικά πλάτη στο διάστημα [7°, 7°].
- Χωρική ανάλυση: $3,5 \times 7,0$ km (σε όλη τη διαδρομή), στην αρχή της αποστολής και $3,5 \times 5,5$ km (σε όλη τη διαδρομή), από τις 6 Αυγούστου 2019.
- Τροχιά: σχεδόν πολική, σύγχρονη τροχιά του ήλιου με ανιούσα ισημερινή διασταύρωση κόμβου στις 13:30 Μέση Τοπική Ηλιακή ώρα. Η επιφάνεια φωτίζεται πάντα με την ίδια γωνία του ήλιου σε μια ηλιακή-σύγχρονη τροχιά

Η κύρια χρήση του Sentinel-5P είναι η παροχή δεδομένων για την υποστήριξη της πρόβλεψης και παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, καθώς και η υποστήριξη της ανάπτυξης και εφαρμογής πολιτικών για την ποιότητα του αέρα σε εθνικό και διεθνές επίπεδο [24]. Τα δεδομένα που παρέχονται από το Sentinel-5P χρησιμοποιούνται για:

1. Παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα και παρακολούθηση της συγκέντρωσης των ρύπων στην ατμόσφαιρα.
2. Προσδιόριση πηγών ρύπανσεως, όπως εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, εργοστάσια και μεταφορές.
3. Πρόβλεψη της ποιότητας του αέρα και παροχή έγκαιρων προειδοποιήσεων για πιθανούς κινδύνους για την υγεία.
4. Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των πολιτικών και των κανονισμών για την ποιότητα του αέρα.
5. Παροχή δεδομένων για την έρευνα για το κλίμα και για την παρακολούθηση της κλιματικής αλλαγής.
6. Δημιουργία λεπτομερών χαρτών της ατμόσφαιρας της Γης, βοηθώντας στη βελτίωση της κατανόησής μας για τη χημεία και την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας

Τα δεδομένα Sentinel-5P χρησιμοποιούνται από ένα ευρύ φάσμα χρηστών, συμπεριλαμβανομένων των κρατικών υπηρεσιών, των ερευνητικών ιδρυμάτων και του ιδιωτικού τομέα. Τα δεδομένα είναι ελεύθερα διαθέσιμα στο κοινό και χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη ενός ευρέος φάσματος εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της πρόβλεψης και παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα, της έρευνας για το κλίμα και της ανάπτυξης περιβαλλοντικής πολιτικής [24].

3.2 Google Earth Engine

Το Google Earth Engine (GEE) ή το Earth Engine (EE) είναι μια πλατφόρμα που βασίζεται στο cloud με έναν τεράστιο κατάλογο δεδομένων. Επιτρέπει την επεξεργασία δορυφορικών εικόνων μεγάλης κλίμακας για την εκτέλεση διαφορετικών αναλύσεων υψηλού αντίκτυπου στην επιφάνεια της Γης που σχετίζονται για παραδειγμα με την αποφίλωση των δασών, τις αλλαγές στη θερμοκρασία της επιφάνειας της γης, την ξηρασία και άλλα.

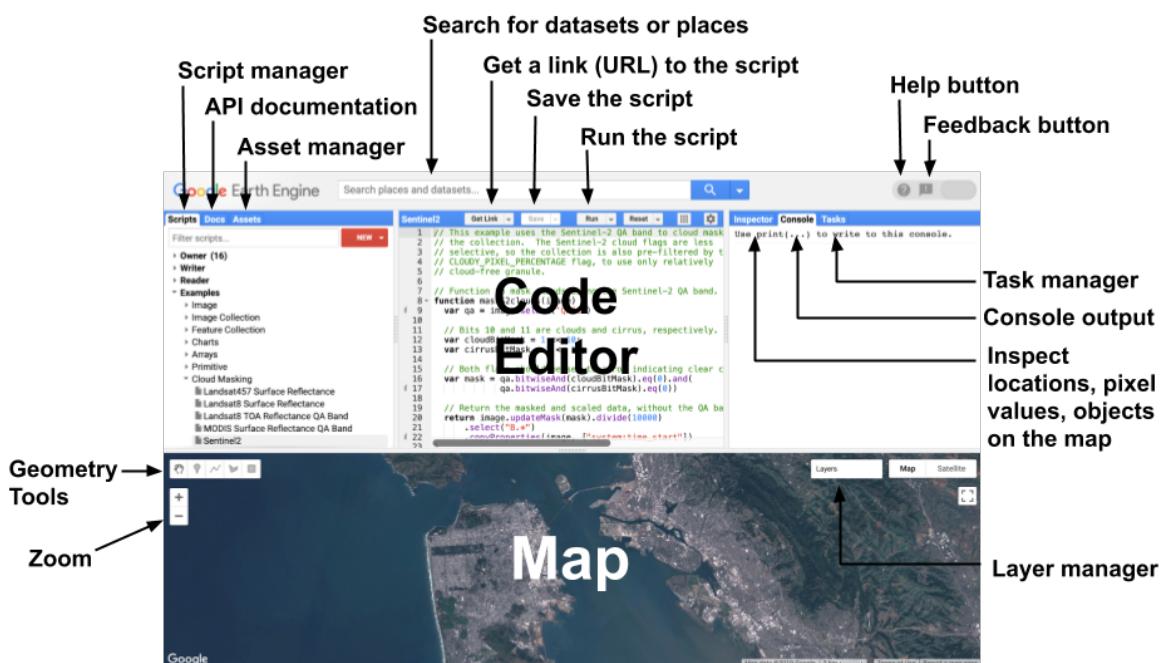
Σχεδιασμένο κυρίως για ανάλυση περιβαλλοντικών δεδομένων πλανητικής κλίμακας συνδυάζει έναν κατάλογο πολλών πεταβψτε δορυφορικών εικόνων και γεωχωρικών δεδομένων, τα οποία ενημερώνονται και επεκτείνονται καθημερινά [27] και επιτρέπουν στους χρήστες να οπτικοποιούν, να χειρίζονται, να επεξεργάζονται και να δημιουργούν χωρικά δεδομένα με εύκολο και γρήγορο τρόπο. Ενσωματώνει ένα ευρύ φάσμα εργαλείων χωρικής χειραγώησης που επιτρέπει σε επιστήμονες, ερευνητές και προγραμματιστές να ανιχνεύουν αλλαγές, να χαρτογραφούν τάσεις και να ποσοτικοποιούν τις διαφορές στην επιφάνεια της Γης. Το GEE έχει επίσης σχεδιαστεί για να βοηθά τους ερευνητές να μοιράζονται εύκολα την εργασία τους με άλλους ερευνητές, μη κερδοσκοπικούς οργανισμούς και το ευρύ κοινό. Η δυνατότητα ανάλυσης και χειρισμού δεδομένων σύμφωνα με τις ανάγκες των χρηστών, διαφοροποιεί αυτήν την εφαρμογή

από το παραδοσιακό Google Earth. Η διεπαφή επιτρέπει τη γρήγορη σχεδίαση αλγορίθμων, δοκιμή και εφαρμογή για τις εικόνες που εκτελούνται σε περιβάλλον Python και Java.

3.2.1 Earth Engine Code Editor

Το πρόγραμμα επεξεργασίας κώδικα Earth Engine (EE) είναι ένα web-based IDE για το API JavaScript του Earth Engine. Οι λειτουργίες του Code Editor έχουν σχεδιαστεί για να κάνουν την ανάπτυξη πολύπλοκων γεωχωρικών ροών εργασίας γρήγορη και εύκολη. Ο Επεξεργαστής κώδικα έχει τα ακόλουθα στοιχεία [28] (που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.1):

1. Πρόγραμμα επεξεργασίας κώδικα JavaScript
2. Εμφάνιση χάρτη για οπτικοποίηση γεωχωρικών συνόλων δεδομένων
3. Τεκμηρίωση αναφοράς API (καρτέλα Έγγραφα)
4. Διαχειριστής σεναρίων που βασίζεται σε Git (καρτέλα Σενάρια)
5. Έξοδος κονσόλας (καρτέλα Κονσόλα)
6. Task Manager (καρτέλα Tasks) για τη διαχείριση μακροχρόνιων ερωτημάτων
7. Διαδραστικό ερώτημα χάρτη (καρτέλα Επιθεωρητής)
8. Αναζήτηση του αρχείου δεδομένων ή των αποθηκευμένων σεναρίων
9. Εργαλεία σχεδίασης γεωμετρίας [28]



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ιδιοτήτων του Code Editor του Earth Engine

3.3 Javascript

Η JavaScript είναι μια αντικειμενοστρεφής γλώσσα, για πολλές πλατφόρμες που χρησιμοποιείται για να κάνει τις ιστοσελίδες διαδραστικές. Η JavaScript περιέχει μια τυπική βιβλιοθήκη αντικειμένων, όπως Array, Date, Math, και ένα βασικό σύνολο στοιχείων γλώσσας όπως τελεστές, δομές ελέγχου και δηλώσεις [29]. Ο επεξεργαστής JavaScript στο Google Earth Engine:

1. Μορφοποιεί και επισημαίνει τον κώδικα καθώς πληκτρολογούμε
2. Υπογραμμίζει τον κώδικα με προβλήματα, προσφέρει επιδιορθώσεις και άλλες συμβουλές για σωστή σύνταξη
3. Αυτόματη συμπλήρωση ζευγών εισαγωγικών, αγκύλων και παρενθέσεων
4. Προσφέρει υποδείξεις συμπλήρωσης κώδικα για λειτουργίες Earth Engine

Πάνω από το πρόγραμμα επεξεργασίας υπάρχουν κουμπιά για την εκτέλεση του αρχείου κώδικα, την αποθήκευση του, την επαναφορά του χάρτη και της κονσόλας εξόδου και τη λήψη ενός συνδέσμου προς το αρχείο [28].

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, η Javascript χρησιμοποιήθηκε σε αρχεία κώδικα για τη φόρτωση των δορυφορικών δεδομένων, την επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος και των κατάλληλων χρονικών στιγμών, την εξαγωγή των χαρακτηριστικών ρύπων, και την οπτικοποίηση τους σε χάρτες και διαγράμματα.

Κεφάλαιο 4

Ερευνητική Υπόθεση: Πανδημία και Ατμοσφαιρική Ρύπανση

4.1 COVID-19 και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Σοβαρός οξύς αναπνευστικός σύνδρομος κορονοϊός 2 (SARS-CoV-2), ο ιός που ευθύνεται για τη νόσο του κορωνοϊού 2019 COVID-19 [30], αναφέρθηκε για πρώτη φορά στη Γουχάν της Κίνας στα τέλη Δεκεμβρίου 2019. Η υψηλή μεταδοτικότητα του [30] και οι σημαντικές πρώτες μη καταγεγραμμένες λοιμώξεις διευκόλυναν την ταχεία παγκόσμια εξάπλωση του COVID-19, η οποία επιβεβαιώθηκε ως πανδημία από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ) τον Μάρτιο του 2020 [30]. Ελλείψει εμβολιασμών και για τον έλεγχο της επιδημίας COVID-19, επιβλήθηκαν σταδιακά αρκετοί κοινωνικοί, εργασιακοί και συγκοινωνιακοί περιορισμοί σε όλο τον κόσμο [31], με την αυστηρότητα και τη διάρκεια των λεγόμενων lockdowns να ποικίλλουν ανά χώρα.

Η απότομη μείωση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, ως αποτέλεσμα των περιοριστικών μέτρων, είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των κύριων ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) [31] και το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) [32]. Η αξιολόγηση του αντίκτυπου της μείωσης των ανθρωπογενών εκπομπών που σχετίζονται με το COVID-19 στην ποιότητα του αέρα είναι ένα δύσκολο έργο, καθώς θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η μεταβλητότητα του καιρού [33], προτού αποδοθούν αλλαγές στη συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων μόνο στους περιορισμούς του COVID-19 [34]. Πρόσφατα, αρκετές μελέτες έχουν διερευνήσει τα πιθανά οφέλη NO₂ και O₃ που αποδίδονται στις μειώσεις εκπομπών που σχετίζονται με τον COVID-19 χρησιμοποιώντας στατιστικά (μηχανική εκμάθηση, πολυμεταβλητή παλινδρόμηση, διαφορά στη διαφορά, γενικευμένα μοντέλα πρόσθετων) ή/και μοντελοποίηση προσεγγίσεις [35]. Συνολικά, σε αστικά περιβάλλοντα, οι μειώσεις των NO_x κατά τη διάρκεια του lockdown για τον COVID-19 ακολουθήθηκαν από αυξήσεις O₃ [36]. Εκτός από τη μειωμένη τιτλοδότηση του O₃ από NO_x, η αυξανόμενη ρύπανση από O₃ υπόκειται επίσης σε διακυμάνσεις των εκπομπών πιττικών οργανικών ενώσεων (VOC) [37].

Έχουν διεξαχθεί διαφορετικές μελέτες σε διαφορετικές πόλεις σε όλο τον κόσμο που σχετίζονται με τη συγκέντρωση των ατμοσφαιρικών ρύπων και το λογκδονικό COVID-19. Για παράδειγμα, αναλύθηκαν 44 πόλεις στην Κίνα και διαπιστώθηκε ότι τα επίπεδα NO₂ μειώθηκαν κατά 25% ενώ τα PM₁₀ παρουσίασαν τη δεύτερη μεγαλύτερη μείωση,

της τάξης του 14% [10]. Άλλα παραδείγματα μπορούν να βρεθούν στην Ευρώπη, όπου το NO₂ ήταν ο ρύπος με τη μεγαλύτερη μείωση, με 58% και 51% στο Μιλάνο της Ιταλίας και στη Βαρκελώνη της Ισπανίας, αντίστοιχα [38],[39].

4.2 COVID Lockdowns στη Θεσσαλονίκη

Η Θεσσαλονίκη, που βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της Ελλάδας, είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της χώρας, με πάνω από ένα εκατομμύριο κατοίκους στη μητροπολιτική της περιοχής. Επιπλέον, η πόλη βρίσκεται σε ένα τοπικό hot spot ρύπανσης [40]. Σύμφωνα με τους εθνικούς περιορισμούς που επιβλήθηκαν κατά την έξαρση του COVID-19, οι κάτοικοι της Θεσσαλονίκης περιόρισαν αυστηρά τις κοινωνικές, εργασιακές και εκπαιδευτικές τους δραστηριότητες. Ειδικότερα, και μετά το πρώτο επιβεβαιωμένο κρούσμα COVID-19 στη Θεσσαλονίκη (πρώτο και στην Ελλάδα) στις 26 Φεβρουαρίου 2020, έγιναν οι ακόλουθες ενέργειες:

1. 11 Μαρτίου 2020: Ανεστάλη η λειτουργία των εκπαιδευτικών ιδρυμάτων, σε όλες τις βαθμίδες πανελλαδικά.
2. 14 έως 18 Μαρτίου 2020: Καφετέριες, εστιατόρια, μπαρ, αγορές, τουριστικές υπηρεσίες και μουσεία έκλεισαν και πραγματοποιήθηκαν πολλές κοινωνικές δραστηριότητες.
3. 23 Μαρτίου 2020: Εφαρμόστηκε αυστηρό lockdown με σημαντικούς περιορισμούς στις μετακινήσεις πολιτών σε όλη την επικράτεια.

Η αντίστροφη διαδικασία - όσον αφορά την άρση των περιορισμών - εφαρμόστηκε ως εξής:

4. 5 Μαΐου 2020: Εισήχθη σταδιακή άρση των περιορισμών.
5. 11 Μαΐου 2020: Επαναλειτουργία των αγορών.
6. 25 Μαΐου 2020: Επαναλειτουργία καφετεριών, εστιατορίων και μπαρ.
7. 1 Ιουλίου 2020: Επαναλειτουργία των τουριστικών υπηρεσιών. Καθώς τα κρούσματα COVID-19 αυξήθηκαν στα τέλη Οκτωβρίου 2020 και λαμβάνοντας υπόψη τα διαθέσιμα επιδημιολογικά δεδομένα, η κυβέρνηση ανακοίνωσε δεύτερο αυστηρό lockdown στη Θεσσαλονίκη, το οποίο σύντομα επιβλήθηκε σε ολόκληρη τη χώρα.
8. 7 Νοεμβρίου 2020 : Ανακοίνωση καθολικού lockdown σε όλη την χώρα
9. 30 Νοεμβρίου 2020 : Άρση του καθολικού lockdown

4.3 Ερευνητικές Ερωτήσεις

Σε αυτή την διπλωματική εργασία θα απαντήσουμε στα παρακάτω ερωτήματα:

1. Ποιες είναι οι συγκεντρώσεις των CO, SO₂, NO₂, O₃ για την περιοχή της Θεσσαλονίκης τις χρονικές περιόδους 2019,2020,2021 για τις σχετικές ημερομηνίες στις οποίες θα βασιστούμε (πριν τον COVID-19, το Lockdown και μετά).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ: ΠΑΝΔΗΜΙΑ ΚΑΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ21

2. Πώς οπτικοποιούμε τα αποτελεσμάτα μας για να δούμε την διαφορά των συγκεντρώσεων των ρύπων για τη κάθε χρονική περίοδο (2019,2020,2021).
3. Πως ερμηνεύονται τα αποτελέσματα και πως συσχετίζονται οι συμπεριφορικές διαφορές των πολιτών λόγω των περιοριστικών μέτρων με τις αυξομειώσεις των συγκεντρώσεων των ρύπων.
4. Είναι τελικά το GEE (Google Earth Engine) και ο Sentinel-5P TROPOMI χρήσιμα εργαλεία για την ανίχνευση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και οπτικοποίηση των διαφορών σε βάθος χρονικών περιόδων.

Κεφάλαιο 5

Μεθοδολογία

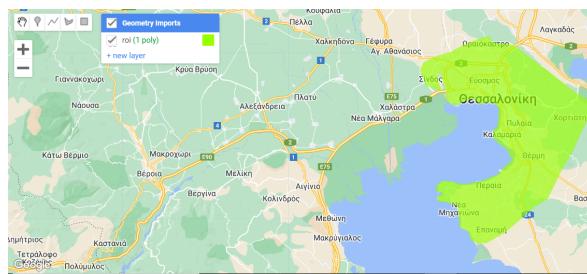
5.1 Απόκτηση Δεδομένων

Τα δεδομένα αυτής της διπλωματικής εργασίας προέρχονται από τις βάσεις δεδομένων του Sentinel-5P για τους ατμοσφαιρικούς ρύπους (CO, SO₂, NO₂, O₃) μέσω του Google Earth Engine. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι κάθετες ενσωματωμένες στήλες των συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων [28] (NO₂, SO₂, O₃, CO), με τα χαρακτηριστικά και την ανάλυση που υποδεικνύονται στην υποενότητα [3.1].

Πριν την ανάλυση της περιοχής της Θεσσαλονίκης, έγινε ο σχεδιασμός της γεωμετρίας της στο Earth Engine Editor και η δημιουργία του Shapefile της.

Για τον σχεδιασμό της χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο σχεδιασμού πολυγώνου του Earth Engine Editor σχεδιάζοντας γραμμές στα σύνορα του Νομού και ορίζοντας 80 σημεία ενδιαφέροντος πάνω στον χάρτη. Τα σημεία επιλέχθηκαν σύμφωνα με βασικές περιοχές και δήμους της πόλης (πχ. Καλαμαριά, Πυλαία, Εύοσμος) και συνοριακές περιοχές (πχ. Σίνδος, Χορτιάτης).

Η γεωμετρία της πόλης φαίνεται και στο (Σχήμα 5.1) με έντονο πράσινο χρώμα.



Σχήμα 5.1: Γεωμετρία της Θεσσαλονίκης -Thessaloniki Geometry

Στην συνέχεια έγινε ο ορισμός αυτής της γεωμετρίας ως μεταβλητή roi στο Code Editor (5.2) για να μπορέσει να γίνει η αναγνώριση της και αργότερα η εξαγωγή σε μορφή αρχείου SHP - Shapefile, ώστε να είναι μετέπειτα διαθέσιμη χωρίς να χρειαστεί να ξανασχεδιαστεί (Σχήμα 5.3). Έγινε η εξαγωγή της στο Drive και ορίστηκε ένα link για να πραγματοποιηθεί η λήψη της. Το link εμφανίστηκε στην περιοχή της κονσόλας και έγινε η λήψη της γεωμετρίας (Σχήμα 5.4).

```
var roinewCollection = ee.FeatureCollection([roi]);
```

Σχήμα 5.2: Ορισμός Γεωμετρίας

```
Export.table.toDrive({
  collection:roinewCollection,
  description: 'Shapefile',
  fileFormat: 'SHP'
});
```

Σχήμα 5.3: Εξαγωγή Γεωμετρίας

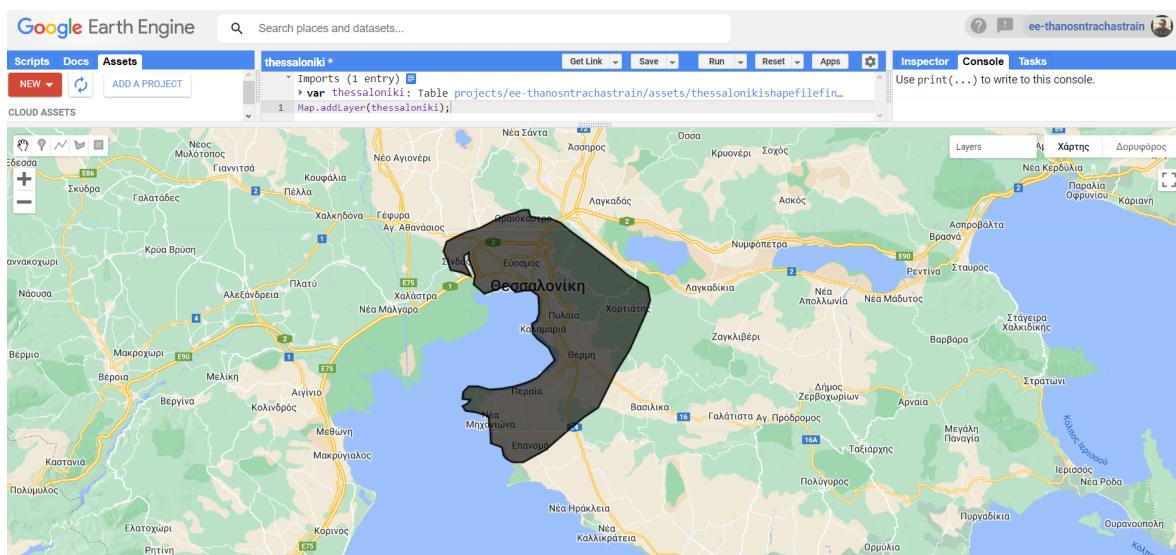
```
var roiURL = roinewCollection.getDownloadURL({
  format: 'SHP',
  filename: 'Shapefile'
});

print('Click to download this shapefile', roiURL)
```

Σχήμα 5.4: Ορισμός link για την λήψη της γεωμετρίας

Κατόπιν για να χρησιμοποιείται εύκολα η γεωμετρίας της Θεσσαλονίκης έγινε η εισαγωγή του αρχείου SHP - Shapefile στο τομέα Assets του Earth Engine Editor.

Για την οπτικοποίηση της επιλεγμένης γεωμετρίας που αναπαριστά την πόλη της Θεσσαλονίκης χρησιμοποιούμε τον κώδικα στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Εισαγωγή γεωμετρίας και οπτικοποίηση της περιοχής της θεσσαλονίκης

Στην συνέχεια έγινε η εισαγωγή των δεδομένων του Sentinel - 5P στο Earth Engine Editor και ορίστηκαν σαν μεταβλητές οι 3 χρονικές περίοδοι που θέλουμε να αναλύσουμε

(χρονιές 2019, 2020 και 2021). Στο Σχήμα 5.6 έχει καταγραφεί ο κώδικας που ορίζει τις 3 χρονικές περιόδους, επιλέγοντας ενδεικτικά τον μέσο όρο των τιμών της κάθετης στήλης τιμών των συγκεντρώσεων του 'Οζοντος(O3) για την επιλεγμένη φιλτραρισμένη περιοχή μας.

```
var period2019 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_03")
    .select('O3_column_number_density')
    .filterDate('2019-03-11', '2019-05-30')
    .filterBounds(roi)
    .mean();

var period2020FirstLockdown= ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_03")
    .select('O3_column_number_density')
    .filterDate('2020-03-11', '2020-05-30')
    .filterBounds(roi)
    .mean();

var period2021 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_03")
    .select('O3_column_number_density')
    .filterDate('2021-03-11', '2021-05-30')
    .filterBounds(roi)
    .mean();
```

Σχήμα 5.6: Εισαγωγή δεδομένων 'Οζοντος (O3) Sentinel -5P

Έπειτα, για την χρωματική οπτικοποίηση των συγκεντρώσεων του όζοντος (O3) ορίστηκε η χαμηλότερη και η υψηλότερη τιμή των συγκεντρώσεων (στην προκειμένη 0.12 - 0.17 mol/m²) καθώς και μια παλέτα χρωμάτων (εδώ σε μαύρο, μπλέ, μάθ, κυανό, πράσινο, κίτρινο, κόκκινο) που να αντιστοιχούν σε μια αύξουσα κλίμακα τιμών (Σχήμα 5.7).

```
var band_viz = {
  min: 0.12,
  max: 0.17,
  palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']
};
```

Σχήμα 5.7: Μεταβλητή χρωματικής οπτικοποίησης

Οι δορυφορικές εικόνες των συγκεντρώσεων "κόπηκαν" ώστε να παρουσιάζουν τιμές μόνο στην ορισμένη γεωμετρική περιοχή ενδιαφέροντος (Σχήμα 5.8).

```
var clip1 = (period2019.clip(roi));
var clip2 = (period2020FirstLockdown.clip(roi));
var clip3 = (period2021.clip(roi));
```

Σχήμα 5.8: Κοπή δεδομένων για την επιλεγμένη γεωμετρική περιοχή

Για την εμφάνιση της συγκέντρωσης του 'Οζοντος στον χάρτη του Earth Engine και για τις 3 χρονικές περιόδους, χρησιμοποιήθηκε η εντολή Map.addlayer στην οποία

εισάγουμε δύο μεταβλητές, την περιοχή της γεωμετρίας και την μεταβλητή χρωματικής οπτικοποίησης και ορίζουμε την χρονική περίοδο ενδιαφέροντος (Σχήμα 5.9).

```
Map.addLayer(clip1, band_viz, '2019-03-11,2019-05-30 03');
Map.addLayer(clip2, band_viz, '2020-03-11,2020-05-30 03');
Map.addLayer(clip3 ,band_viz, '2021-03-11 , 2021-05-30 03');
```

Σχήμα 5.9: Εντολή χρωματικής οπτικοποίησης

Ορίζονται οι ιδιότητες των διαγραμμάτων, συμπεριλαμβανομένων των τίτλων των αξόνων και της μορφής των γραμμών, καθώς και οι χρονικές περίοδοι αναφοράς (Σχήματα 5.10, 5.11).

```
var chartStyle = {
  title:'03 Graph Thessaloniki',
  hAxis: {
    title: 'Time Period',
  },
  vAxis: {
    title: '03 mol/m2',
  },
  series: [
    0:{lineWidth:3, pointSize:7},
    1:{lineWidth:7, lineDashStyle: [4,4]}
  ],
  chartArea: {backgroundColor:'EBEBEB'}
};
```

Σχήμα 5.10: Ιδιότητες γραφήματος

```
var Timeperiod = ['2019','2020 First Lockdown','2021'];
```

Σχήμα 5.11: Χρονική περίοδος γραφήματος

Επίσης για να προσθέσουμε την συγκέντρωση του Όζοντος και των τριών χρονικών περιόδων στο διάγραμμα χρειάστηκε να οριστεί μια μεταβλητή ένωσης για να εμφανίζονται οι τιμές της ζώνης και των τριών περιόδων (Σχήμα 5.12).

```
var stacked_composite = period2019.addBands(period2020FirstLockdown).addBands(period2021);
print('03', stacked_composite.bandNames());
```

Σχήμα 5.12: Μεταβλητή ένωσης και των τριών χρονικών περιόδων

Τέλος χρησιμοποιούμε την εντολή ui.Chart.image.regions η οποία δημιουργεί ένα γράφημα, εξάγοντας και σχεδιάζοντας την τιμή της συγκέντρωσης του ρύπου στην περιοχή ενδιαφέροντος από κάθε δορυφορική εικόνα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται η μεταβλητή ένωσης για το σύνολο των τιμών και των τριών περιόδων, η περιοχή που ορίσαμε, μια μεταβλητή για τη μείωση διαστασιμότητας δημιουργεί

τις τιμές για τον άξονα γ (στην δικία μας περίπτωση παίρνουμε τον μέσο όρο του συνόλου τιμών), η κλίμακα των pixel σε μέτρα και η χρονική περίοδος (Σχήμα 5.13). Για την εμφάνιση του γραφήματος στην περιοχή της κονσόλας χρησιμοποιούμε την εντολή print().

```
var chart = ui.Chart.image.regions(stacked_composite,roi,ee.Reducer.mean(), 30,'label',Timeperiod)
    .setChartType('LineChart')
    .setOptions(chartStyle);

print(chart);
```

Σχήμα 5.13: Εντολή δημιουργίας γραφήματος

Αυτή η διαδικάσια πραγματοποιήθηκε επαναληπτικά και για τους 4 ρύπους O3, NO2, CO, SO2 και για τις τρείς χρονικές περιόδους κατά την διάρκεια και των 2 Lockdown COVID - 19 (11 Μαρτίου - 30 Μαΐου) και (7 Νοεμβρίου - 1 Δεκεμβρίου).

Συμπληρωματικά, για την εύρεση των μέγιστων ελάχιστων και μέσων τιμών των ρυπών δημιουργήθηκαν 3 μεταβλητές για κάθε χρονική περίοδο mean,max,min που απεικονίζουν σε διάγραμμα τις εν λόγω τιμές. Υπολογίστηκαν μέσω της εντολής ui.Chart.image.series με είσοδο το σύνολο των δεδομένων της χρονικής περιοχής που έχουμε δηλώσει, την γεωμετρία της περιοχής, τον μειωτή - ee.Reducer και την κλίμακα των pixel (Σχήμα 5.14) .

```
var mean2019=ui.Chart.image.series(period2019, table, ee.Reducer.mean(), 30).setOptions({title: 'CO mean 2019'});
var max2019=ui.Chart.image.series(period2019, table, ee.Reducer.max(), 30).setOptions({title: 'CO max 2019'});
var min2019=ui.Chart.image.series(period2019, table, ee.Reducer.min(), 30).setOptions({title: 'CO min 2019'});

var mean2020=ui.Chart.image.series(period2020, table, ee.Reducer.mean(), 30).setOptions({title: 'CO mean 2020'});
var max2020=ui.Chart.image.series(period2020, table, ee.Reducer.max(), 30).setOptions({title: 'CO max 2020'});
var min2020=ui.Chart.image.series(period2020, table, ee.Reducer.min(), 30).setOptions({title: 'CO min 2020'});

var mean2021=ui.Chart.image.series(period2021, table, ee.Reducer.mean(), 30).setOptions({title: 'CO mean 2021'});
var max2021=ui.Chart.image.series(period2021, table, ee.Reducer.max(), 30).setOptions({title: 'CO max 2021'});
var min2021=ui.Chart.image.series(period2021, table, ee.Reducer.min(), 30).setOptions({title: 'CO min 2021'});
```

Σχήμα 5.14: Εντολή δημιουργίας γραφήματος για την εύρεση των μέγιστων ελάχιστων και μέσων τιμών

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα

6.1 Χρωματική οπτικοποίηση των συγκεντρώσεων των ρύπων 2019, 2020, 2021

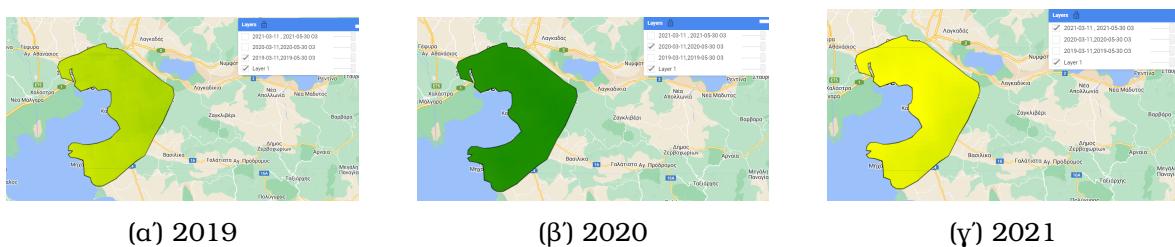
Τη χρονική περίοδο 11 Μαρτίου με 30 Μαΐου 2020 και 7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου 2020, πραγματοποιήθηκαν lockdown λόγω της πανδημίας COVID-19. Λόγω των περιοριστικών μέτρων που περιγράφονται στην ενοτητα **4.1**, αναμένουμε αλλαγές στις συγκεντρώσεις των ρύπων συγκριτικά με τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα της προηγούμενης και της επόμενης χρονις. Με τη χρωματική οπτικοποίηση των μέσων τιμών των συγκεντρώσεων των ρύπων της κάθε υποεριοχής της γεωμετρίας της πόλης, θα γίνει πιο ευκρινώς αντιληπτό κατα πόσο μειώθηκαν ή αυξήθηκαν οι ρύποι. Όσο πιο σκούρη η χρωματική παλέτα, τόσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση του εκάστοτε ρύπου **6.1**. Η χρωματική παλέτα μας βοηθάει να κατλάβουμε πόσο σημαντικές και έντονες είναι οι αυξιομειώσεις των συγκεντρώσεων των ρύπων ανεξάρτητα από την μονάδα μέτρησης.



Σχήμα 6.1: Χρωματική Παλέτα

6.1.1 'Ozov

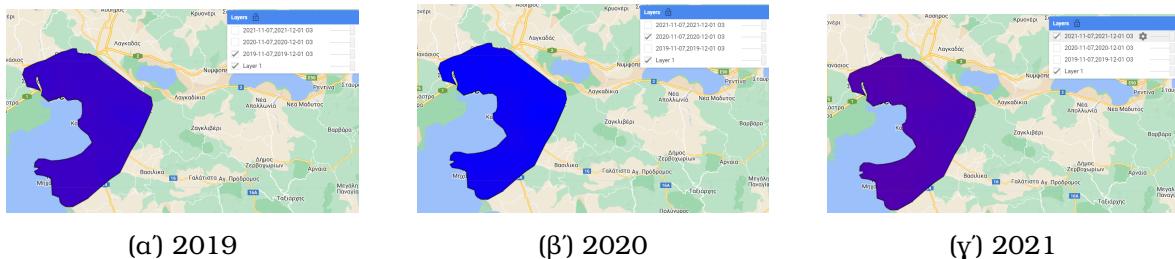
11 Μαρτίου με 30 Μαΐου πρώτο lockdown COVID-19



Σχήμα 6.2: Οπτικοποίηση συγκεντρώσεων όζοντος Άνοιξη

Παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια του πρώτου lockdown (6.2β') η συγκέντρωση των ρύπων είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη χρονική περίοδο το 2019 (6.2α) και το 2021 (6.2γ), όπως αποδεικνύεται και από τη σκουροπράσινη χρωματική απεικόνιση. Το 2021 η συγκέντρωση είναι η πιο αυξημένη.

7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου δεύτερο lockdown COVID-19

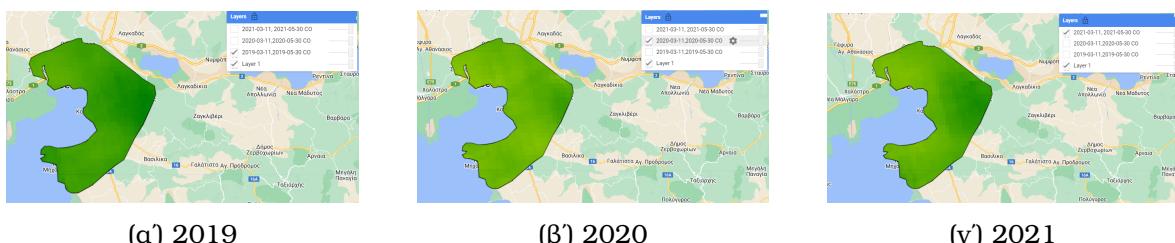


Σχήμα 6.3: Οπτικοποίηση συγκεντρώσεων όζοντος Φθινόπωρο

Παρατηρούμε ότι και κατά τη διάρκεια του δεύτερου lockdown (6.3β') η συγκέντρωση των ρύπων είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη χρονική περίοδο το 2019 (6.3α) και το 2021 (6.3γ), σύμφωνα με την ορισμένη χρωματική παλέτα. Το 2021 η συγκέντρωση είναι πάλι η πιο αυξημένη.

6.1.2 Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)

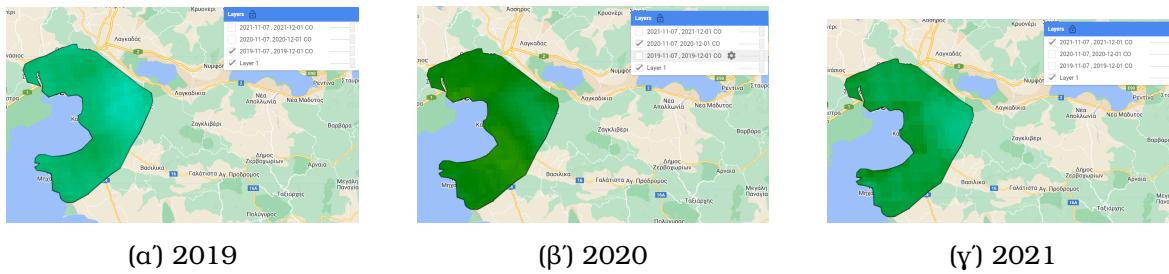
11 Μαρτίου με 30 Μαΐου πρώτο lockdown COVID-19



Σχήμα 6.4: Οπτικοποίηση συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα Άνοιξη

Παρατηρούμε ότι το 2020 (6.4β') κατά την διάρκεια του πρώτου lockdown η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα είναι υψηλότερη σε σχέση με την χρονική περίοδο του 2019 (6.4α) και σχετικά παρόμοια με το 2021 (6.4γ') εκτός από την περιοχή της ανατολικής Θεσσαλονίκης, όπου εμφανίζει ελάχιστα πιο αυξημένη συγκέντρωση το 2020.

7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου δεύτερο lockdown COVID-19

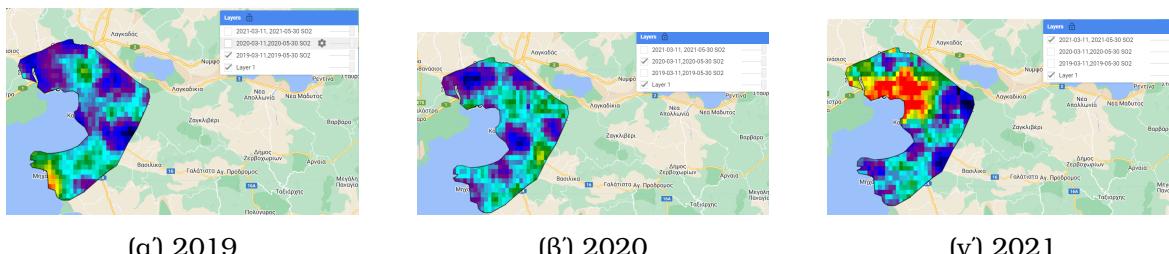


Σχήμα 6.5: Οπτικοποίηση συγκεντρώσεων μονοξειδίου του άνθρακα Φθινόπωρο

Παρατηρούμε ότι και κατά τη διάρκεια του δεύτερου lockdown η συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα αυξήθηκε το 2020 (6.5β') σε σχέση με το 2019 (6.5α') σε όλη την περιοχή της Θεσσαλονίκης και μειώθηκε πάλι λίγο το 2021 (6.5γ') αλλά όχι στα επίπεδα του 2019. Παρατηρούμε ιδιαίτερα μικρές μειώσεις στις συγκεντρώσεις στην κεντρική και βόρεια Θεσσαλονίκη.

6.1.3 Διοξείδιο του θείου (SO₂)

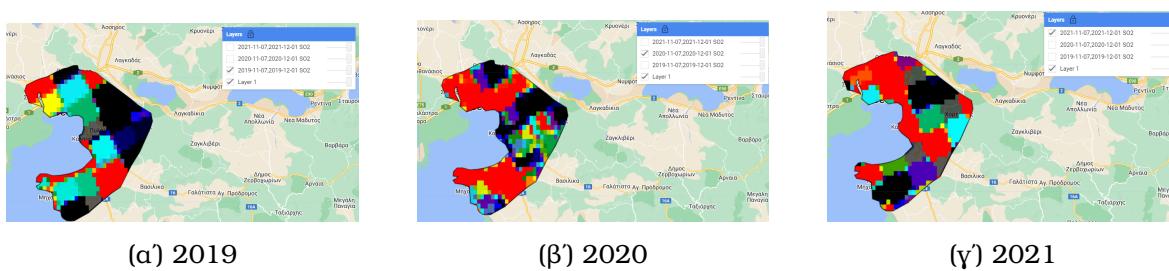
11 Μαρτίου με 30 Μαΐου πρώτο lockdown COVID-19



Σχήμα 6.6: Οπτικοποίηση συγκεντρώσεων διοξειδίου του θείου Άνοιξη

Παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου είναι μεγαλύτερη την περίοδο του 2021 (6.6γ) και ιδιαίτερα στην δυτική περιοχή της Θεσσαλονίκης που περιλαμβάνει την εργοστασιακή ζώνη. Ανάμεσα στις περιόδους του 2019 (6.7α') και του 2020 (6.6β') υπάρχουν ελάχιστες διαφορές και οι συγκεντρώσεις παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα.

7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου δεύτερο lockdown COVID-19

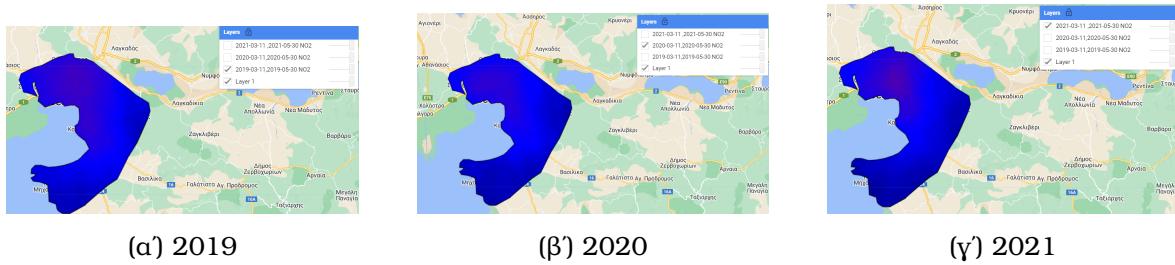


Σχήμα 6.7: Οπτικοποίηση συγκεντρώσεων διοξειδίου του θείου Φθινόπωρο

Παρατηρούμε ότι οι τιμές των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του θείου το φθινόπωρο είναι διαφορετικές για τις διάφορες περιοχές της Θεσσαλονίκης. Ιδιαίτερα, οι περιοχές με μαύρη χρωματική απεικόνιση κυρίως στην κεντρική και βόρεια Θεσσαλονίκη έχουν πολύ χαμηλούς ρύπους, ενώ οι περιοχές με κόκκινη σκιαγράφηση στα άκρα Ανατολικής και Δυτικής Θεσσαλονίκης έχουν πολύ υψηλή συγκέντρωση ρύπων. Το 2020 (6.7β) η συγκέντρωση των ρύπων του διοξειδίου του θείου αυξήθηκε αισθητά σε σχέση με το 2019 (6.7α) και ξαναμειώθηκε ελάχιστα το 2021 (6.7γ) παραμένοντας σε σχετικά παρόμοια επίπεδα.

6.1.4 Διοξείδιο του αζώτου (NO2)

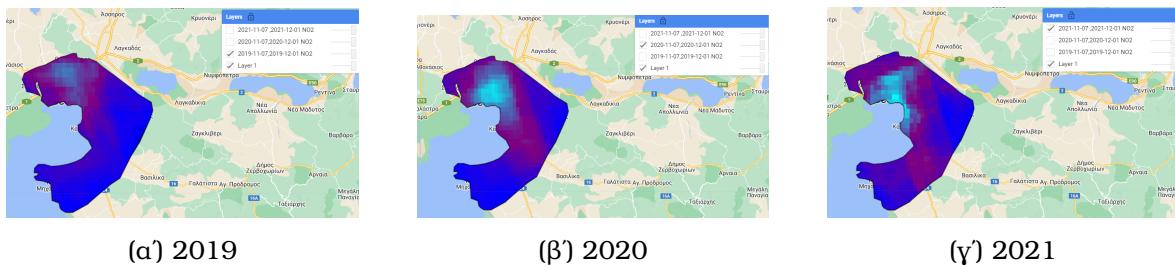
11 Μαρτίου με 30 Μαΐου πρώτο lockdown COVID-19



Σχήμα 6.8: Οπτικοποίηση συγκεντρώσεων διοξειδίου του αζώτου Άνοιξη

Παρατηρούμε οτί η συγκέντρωση του διοξειδίου του αζώτου μειώθηκε αισθητά το 2020 (6.8β) σε σχέση με το 2019 (6.8α) και ξαναυξήθηκε ελάχιστα το 2021 (6.8γ). Τα πιο χαμηλά επίπεδα ρύπων εμφανίζονται ανατολικά και βόρεια στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου δεύτερο lockdown COVID-19



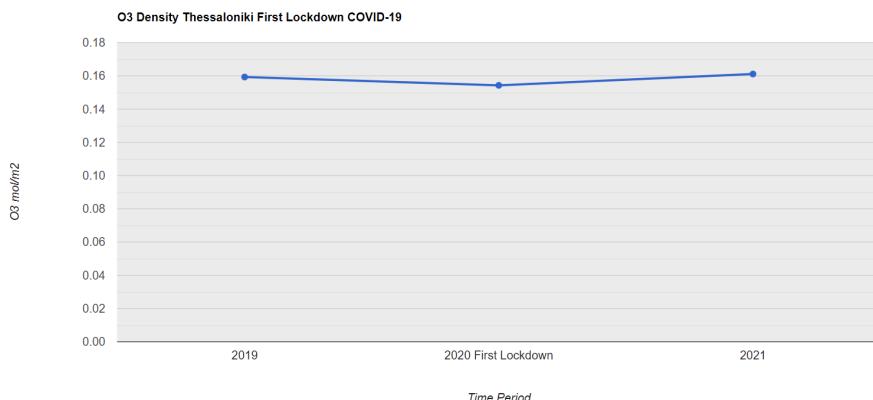
Σχήμα 6.9: Οπτικοποίηση συγκεντρώσεων διοξειδίου του αζώτου Φθινόπωρο

Παρατηρούμε ότι η συγκέντρωση του διοξειδίου του αζώτου είναι χαμηλότερη την περίοδο του 2019 (6.9α). Την περίοδο του 2020 (6.9β) παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση ιδιαίτερα στην περιοχή της δυτικής Θεσσαλονίκης και στο κέντρο της πόλης ενώ την περίοδο του 2021 (6.9γ) αυξάνεται ακόμη παραπάνω η συγκέντρωση και στην ανατολική Θεσσαλονίκη.

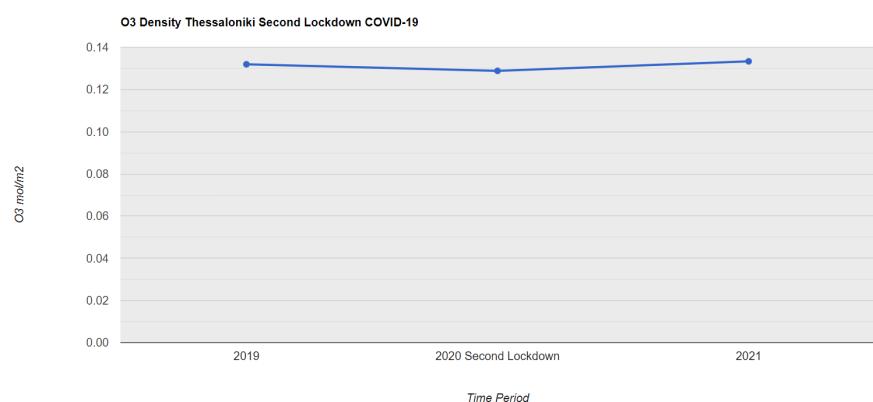
6.2 Διαγράμματα τιμών των συγκεντρώσεων των ρύπων 2019, 2020, 2021

Παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των ρύπων τις περιόδους Άνοιξης και Φθινοπώρου 2019, 2020, 2021 με τη μορφή αριθμητικών διαγραμμάτων σε αντίθεση με τις χρωματικές οπτικοποιήσεις στην προηγούμενη υποενότητα. Η μονάδα μέτρησης της συγκέντρωσης των ρύπων στον κατακόρυφο άξονα είναι mol/m².

6.2.1 Διαγράμματα 'Οξοντος O3

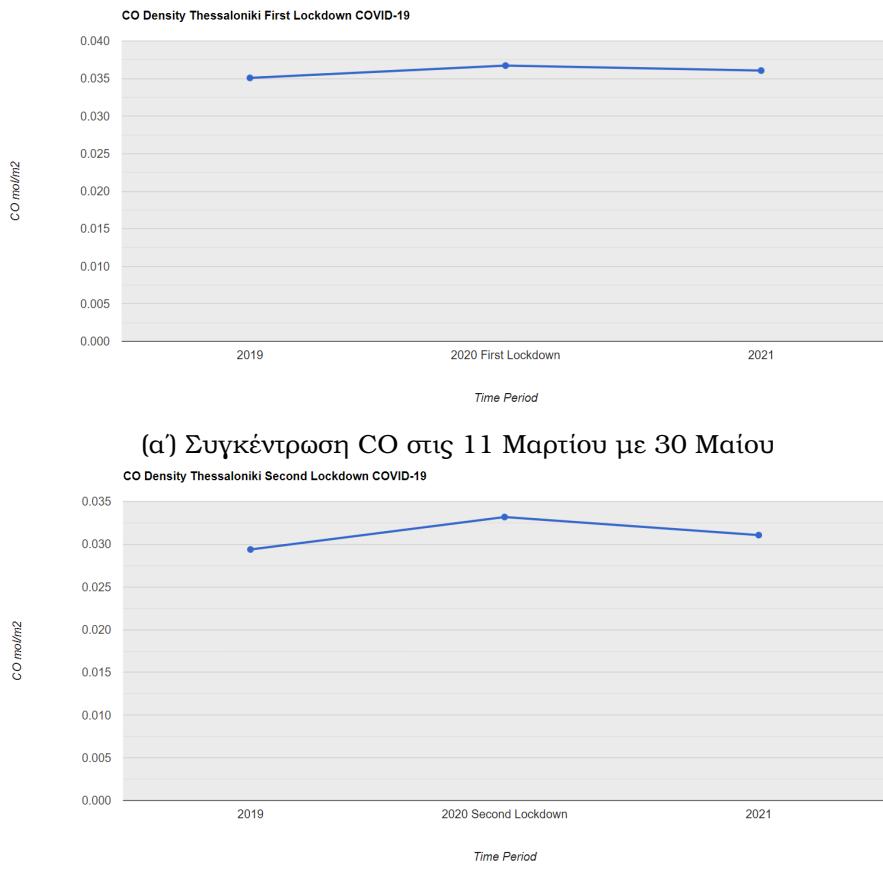


(α') Συγκέντρωση O3 στις 11 Μαρτίου με 30 Μαΐου



(β') Συγκέντρωση O3 στις 7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου

6.2.2 Διαγράμματα Μονοξειδίου του Άνθρακα CO

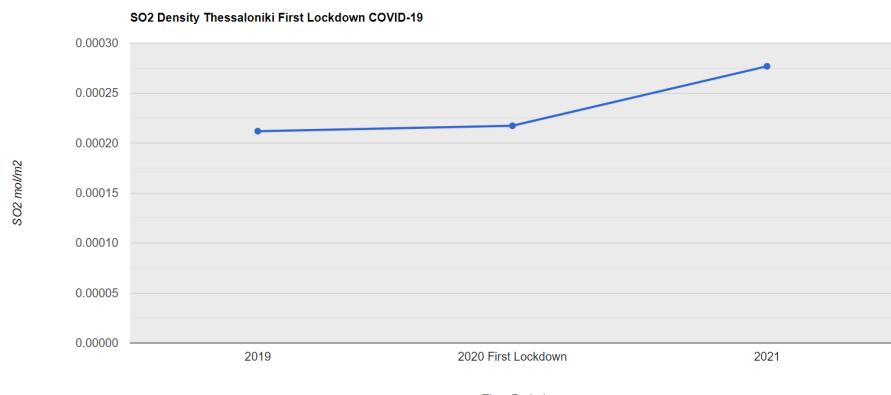


(α') Συγκέντρωση CO στις 11 Μαρτίου με 30 Μαΐου

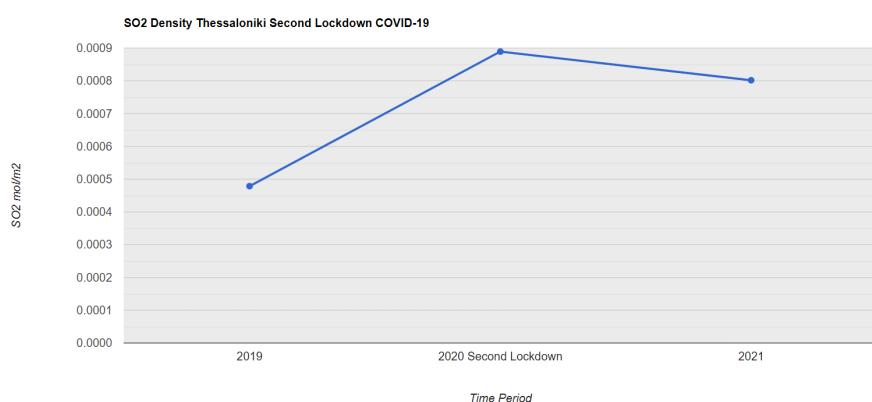
CO Density Thessaloniki Second Lockdown COVID-19

(β') Συγκέντρωση CO στις 7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου

6.2.3 Διαγράμματα Διοξειδίου του Θείου SO2

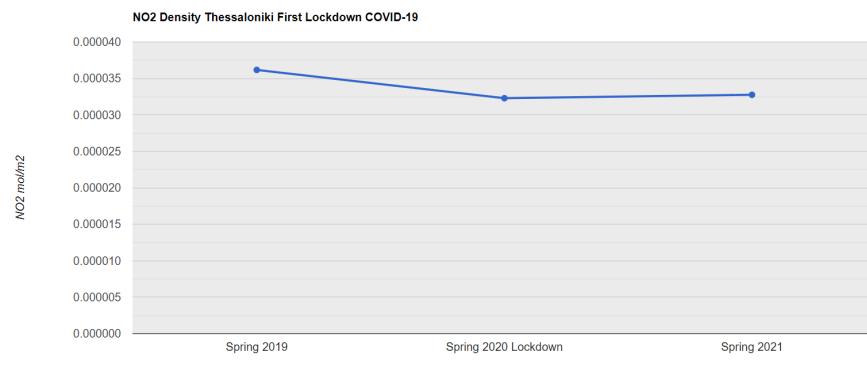


(α') Συγκέντρωση SO₂ στις 11 Μαρτίου με 30 Μαΐου

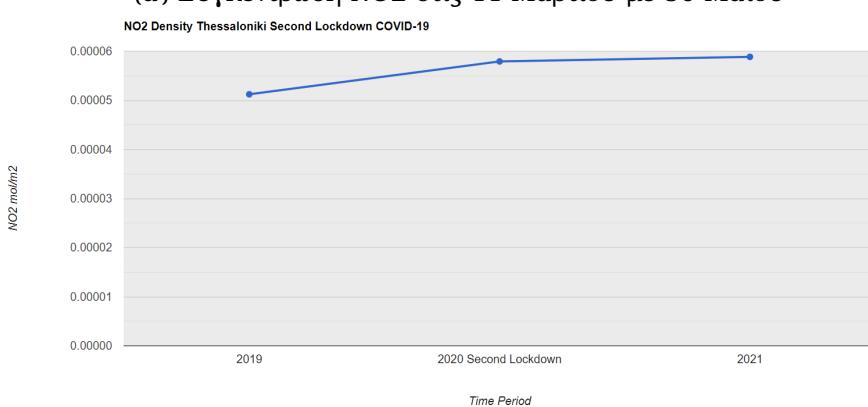


(β) Συγκέντρωση SO₂ στις 7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου

6.2.4 Διαγράμματα Διοξειδίου του Αζώτου NO₂



(α) Συγκέντρωση NO₂ στις 11 Μαρτίου με 30 Μαΐου



(β) Συγκέντρωση NO₂ στις 7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου

6.3 Πίνακες μέσων, ελάχιστων και μέγιστων τιμών των συγκεντρώσεων των ρύπων

6.3.1 Συγκεντρώσεις ρύπων 2019

Pύποι	MIN mol/m ²	MEAN mol/m ²	MAX mol/m ²
NO ₂	0.02e-3	0.16e-3	0.30e-3
CO	0.023	0.035	0.047
O ₃	0.13	0.16	0.195
SO ₂	0.1e-3	2.2e-3	5.5e-3

Πίνακας 6.1: Τιμές συγκεντρώσεων, 11 Μαρτίου με 30 Μαΐου 2019

Ρύποι	MIN mol/m²	MEAN mol/m²	MAX mol/m²
NO ₂	0.03e-3	0.09e-3	0.20e-3
CO	0.020	0.029	0.038
O ₃	0.115	0.134	0.153
SO ₂	0.3e-3	1.6e-3	3.2e-3

Πίνακας 6.2: Τιμές συγκεντρώσεων, 7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου 2019

6.3.2 Συγκεντρώσεις ρύπων 2020 πρώτο και δεύτερο lockdown

Ρύποι	MIN mol/m²	MEAN mol/m²	MAX mol/m²
NO ₂	0.03e-3	0.105e-3	0.21e-3
CO	0.024	0.037	0.054
O ₃	0.126	0.155	0.185
SO ₂	0.1e-3	2.95e-3	5.95e-3

Πίνακας 6.3: Τιμές συγκεντρώσεων, 11 Μαρτίου με 30 Μαΐου 2020, πρώτο lockdown

Ρύποι	MIN mol/m²	MEAN mol/m²	MAX mol/m²
NO ₂	0.03e-3	0.15e-3	0.27e-3
CO	0.0258	0.033	0.0412
O ₃	0.110	0.126	0.1425
SO ₂	0.1e-3	6e-3	12e-3

Πίνακας 6.4: Τιμές συγκεντρώσεων, 7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου 2020 δεύτερο lockdown

6.3.3 Συγκεντρώσεις ρύπων 2021

Ρύποι	MIN mol/m²	MEAN mol/m²	MAX mol/m²
NO ₂	0.032e-3	0.14e-3	0.250e-3
CO	0.0245	0.031	0.0365
O ₃	0.132	0.173	0.215
SO ₂	0.2e-3	4.45e-3	8.7e-3

Πίνακας 6.5: Τιμές συγκεντρώσεων, 11 Μαρτίου με 30 Μαΐου 2021 πρώτο lockdown

Ρύποι	MIN mol/m²	MEAN mol/m²	MAX mol/m²
NO ₂	0.027e-3	0.138e-3	0.250e-3
CO	0.024	0.0345	0.045
O ₃	0.115	0.14	0.165
SO ₂	0.1e-3	1.75e-3	3.4e-3

Πίνακας 6.6: Τιμές συγκεντρώσεων, 7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου 2021 δεύτερο lockdown

Κεφάλαιο 7

Τεκμηρίωση Αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ενότητας (6) παρατηρήθηκαν αλλαγές (αυξομειώσεις) στις συγκεντρώσεις των ρύπων κατά την διάρκεια των τριών χρονικών περιόδων. Ειδικότερα οι διαφορές φαίνονται στις μέσες, ελάχιστες και μέγιστες τιμές των ρύπων στα πινακάκια της υπο ενότητας (6.3). Στη συνέχεια, θα αναλυθούν και θα αιτιολογηθούν γιατί έγιναν αυτές οι αυξομειώσεις στις συγκεντρώσεις του κάθε ρύπου και αν τα περιοριστικά μέτρα μεταφοράς του COVID-19 οδήγησαν στην αλλαγή της συγκέντρωσης των ρύπων στην περιοχή της Θεσσαλονίκης.

7.0.1 Αποτελέσματα Διοξειδίου του Αζώτου NO₂

Σύμφωνα με την χρωματική οπτικοποίηση των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του αζώτου (6.1.4), των διαγραμμάτων (6.2.4) αλλά και των πινάκων μεγίστων, ελάχιστων και μέσων τιμών (6.3) παρατηρήθηκε μείωση της μέσης τιμής της συγκέντρωσης του NO₂ κατά την χρονική περίοδο του πρώτου lockdown το 2020 συγκριτικά με την αντίστοιχη μέση συγκέντρωση την περίοδο του 2019.

Η κύρια πηγή παραγωγής διοξειδίου του αζώτου είναι η χρήση των ορυκτών καυσίμων (41) για θέρμανση, μετακίνηση και εργοστασική λειτουργία. Επομένως η μείωση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου κατά την περίοδο του πρώτου lockdown (11 Μαρτίου με 30 Μαΐου) μπορεί να συσχετιστεί με τους κοινωνικούς, εργασιακούς και συγκοινωνιακούς περιορισμούς και κατ' επέκταση της μειωμένης καύσης. Ιδιαίτερα ανατολικά και βόρεια όπου δεν υπάρχουν εργοστασιακές ζώνες και είναι πιο αραιοκατοικημένες περιοχές, παρατηρούνται ακόμη πιο μειωμένοι ρύποι με την επιβολή των περιοριστικών μέτρων. Υποθέτουμε ότι οι άνθρωποι συνήθισαν στη νέα αυτή καθημερινότητα και προσάρμοσαν ανάλογα τις μετακινήσεις και δουλειές τους (πχ. τηλεργασία) ώστε και το 2021 η συγκέντρωση των ρύπων να παραμείνει σχετικά πιο χαμηλή από το 2019, ακόμη και μετά το πέρας των περιοριστικών μέτρων.

Αντίθετα κατά τη περίοδο του δεύτερου lockdown παρατηρήθηκε μια αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του αζώτου (7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου). Αυτή η τάση μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι τα περιοριστικά μέτρα σε αυτήν την περίπτωση δεν ήταν τόσο αυστηρά και οι πολίτες δεν έδειξαν κατάλληλη συμμόρφωση. Επιπλέον, εφόσον είναι χειμερινή περίοδος, αυξάνονται οι ανάγκες σε θέρμανση στα νοικοκυριά και χρήση αυτοκινήτων για μετακίνηση και επομένως εντείνεται η καύση ορυκτών υλών. Τέλος αυτήν την περίοδο, αυξάνεται η λειτουργία μονάδων παραγωγής καταναλωτικών

προιόντων.

7.0.2 Αποτελέσματα 'Οζοντος Ο3

Σύμφωνα με την χρωματική οπτικοποίηση των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του αζώτου (6.1.1, 6.1.1), των διαγραμμάτων (6.2.1) αλλά και των πινάκων μεγίστων, ελάχιστων και μέσων τιμών (6.3) παρατηρήθηκε μικρή μείωση της συγκέντρωσης του Ο3 κατά την χρονική περίοδο του πρώτου και του δεύτερου lockdown. Σύμφωνα με την υποενόητα 2.1.5 το όζον σχηματίζεται στην ατμόσφαιρα μέσω χημικών αντιδράσεων μεταξύ των ρύπων που εκπέμπονται από οχήματα, εργοστάσια και άλλες βιομηχανικές πηγές καύσης ορυκτών καυσίμων και παραγωγής καταναλωτικών προϊόντων. Το μονοξείδιο του αζώτου που παράγεται από την κίνηση των αμαξιών γενικά μειώνει το όζον, αλλά το μεσημέρι όταν αντιδράσει με τον ήλιο δημιουργεί το διοξείδιο του αζώτου που αυξάνει το όζον. Επομένως οι τιμές των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του αζώτου και του όζοντος παρουσιάζουν μια γραμμική αναλογία. Επιπλέον, η περιορισμένη κίνηση των συγκοινωνιών και των αμαξιών στην περιοχή της Θεσσαλονίκης λόγω των μέτρων κατά τη διάρκεια των lockdown μείωσαν ελάχιστα την συγκέντρωση του όζοντος στην ατμόσφαιρα. Το 2021 οι τιμές των ρύπων επανήλθαν σε αντίστοιχα επίπεδα με το 2019.

7.0.3 Αποτελέσματα Διοξειδίου του Θείου SO2

Σύμφωνα με την χρωματική οπτικοποίηση των συγκεντρώσεων του διοξειδίου του θείου (6.1.3, 6.1.3), των διαγραμμάτων (6.2.3) αλλά και των πινάκων μεγίστων, ελάχιστων και μέσων τιμών (6.3) παρατηρήθηκε ελάχιστη αύξηση στην συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου από το 2019 στο 2020 για το πρώτο lockdown ενώ το 2021 αυξήθηκε. Επιπροσθέτως κατα την διάρκεια του δεύτερου lockdown αυξήθηκε η συγκέντρωση του διοξειδίου του θείου με το 2020 να παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή σε σχέση με τις περιόδους του 2019, 2021 στην περιοχή της δυτικής Θεσσαλονίκης.

Σύμφωνα με την υποενόητα (2.1.3) κύριες πηγές έκλυσης διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα είναι τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι κεντρικές θερμάνσεις κατοικιών, τα διυλιστήρια πετρελαίου και οι χαρτοβιομηχανίες. Η περιοχή της δυτικής Θεσσαλονίκης βρίσκεται κοντά στην βιομηχανική ζώνη και αυτό εξηγεί τις αυξημένες ποσότητες του διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα εκεί. Επίσης στην περίοδο του δέυτερου lockdown (7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου) υπήρξε αυξημένη χρήση της κεντρικής θέρμανσης των κτιρίων, με τους πολίτες να περνούν αρκετές ώρες στις κατοικίες τους καθώς ήταν περιορισμένες οι μετακινήσεις σε εξωτερικό χώρο.

7.0.4 Αποτελέσματα Μονοξειδίου του Άνθρακα CO

Σύμφωνα με την χρωματική οπτικοποίηση των συγκεντρώσεων του μονοξειδίου του άνθρακα (6.1.2, 6.1.2), των διαγραμμάτων (6.2.2) αλλά και των πινάκων μεγίστων ελάχιστων και μέσων τιμών (6.3) παρατηρήθηκε μικρή αύξηση στην συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα και στα δύο lockdown σε σχέση με τις χρονιές 2019 και 2020.

Σύμφωνα με την υποενόητα (2.1.2) κύριες πηγές έκλυσης του μονοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα είναι οι μηχανές ατελούς καύσης και τα εργοστάσια παραγωγής μετάλλων και χημικών. Οι υψηλότερες τιμές μονοξειδίου του άνθρακα εμφανίστηκαν πάλι στην περιοχή της δυτικής Θεσσαλονίκης, κοντά στη βιομηχανική ζώνη, κυρίως για

την περίοδο του δεύτερου lockdown(7 Νοεμβρίου με 1 Δεκεμβρίου) ενώ για την περίοδο του πρώτου lockdown οι χρονιές 2020 και 2021 είναι σχετικά ίδιες.

7.1 Περιορισμοί

Η συγκεκριμένη μελέτη διέπεται από συγκεκριμένους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψιν στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της. Αρχικά οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων ρύπων από δορυφορικά δεδομένα έχουν περιθώρια λάθους και ακρίβειας σε σύγκριση με τοπικούς αισθητήρες. Η μελέτη θα μπορούσε μελλοντικά να βελτιωθεί συγκρίνοντας τις συγκεντρώσεις των ρύπων από δορυφορικά δεδομένα με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις των τοπικών σταθμών μέτρησης. Έτσι, θα είναι και πιο εύκολη η αναγνώριση των μη υγιειών επιπέδων ρύπων σε μικρογραμμάρια ανά κυβικά εκατοστά αντί για τολ ανά τετραγωνικό μέτρο, καθώς δεν υπάρχει έυκολη μέθοδος μετατροπής των διαστάσεων αυτών. Παρόλαυτά ξεπεράστηκε εν μέρει αυτός ο περιορισμός με τη χρωματική οπτικοποίηση των συγκεντρώσεων για την πιο εύκολη κατανόηση των αλλαγών. Επιπλέον, στο χάρτη της πόλης δεν έχουν εντοπιστεί ακριβώς οι διάφορες πηγές έκλυσης των ρύπων παρά μόνο προσεγγιστικά με την παραδοχή ότι στη δυτική Θεσσαλονίκη έχουμε την πιο εκτεταμένη βιομηχανική ζώνη. Επιπλέον, το χρονικό διάστημα που επιλέχτηκε είναι σχετικά μικρό για να παρουσιαστούν μεγάλες αλλαγές αλλά καταδεικνύει τουλάχιστον εστιασμένα την επιρροή των lockdown στην ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα. Τέλος, η έλλειψη πληροφοριών και μελετών σχετικά με την επίδραση των περιοριστικών μέτρων κατά τη διάρκεια της πανδημίας, δυσχεραίνει την εξαγωγή συσχετίσεων ανάμεσα στις συμπεριφορές των πολιτών και τη συγκέντρωση των ρύπων. Λαμβάνοντας υπόψιν αυτούς τους περιορισμούς, προσεγγίστηκε μια ενδεχόμενη συσχέτιση με βάση αναφορές που έγιναν σε μέσα επικοινωνίας και αντίστοιχες μελέτες για το κατά πόσο ακολουθήθηκαν τα περιοριστικά μέτρα.

Κεφάλαιο 8

Επίλογος

Αυτή η μελέτη διερεύνησε την επίδραση των περιοριστικών μέτρων του "Ο"ΙΔ-19 στην ποιότητα του αέρα της πόλης της Θεσσαλονίκης. Δημιουργήθηκαν χρωματικές οπτικοποιήσεις και διαγραμματα συγκεντρώσεων των τεσσάρων ρυπών(O3,NO2,SO2,CO) και συγκρίθηκε η αστική ποιότητα του αέρα της Θεσσαλονίκης για τρείς χρονικές περιόδους το φθινόπωρο και την άνοιξη του 2019, 2020, 2021. Τα δεδομένα αποκτήθηκαν από το δορυφόρο Sentinel-5P. Παρατηρούμε άμεση συσχέτιση της εφαρμογής των περιοριστικών μέσων με την αυξομείωση των ρύπων ανάλογα με την επίδραση στις βιομηχανικές δραστηριότητες (κυρίως στη Δυτική Θεσσαλονίκη), της χρήσης ορυκτών καυσίμων για θέρμανση και μετακίνηση ανάλογα με τις συμπεριφορές των πολιτών. Οι τιμές του διοξειδίου του αζώτου μειώθηκαν κατά τη διάρκεια του πρώτου lockdown και αυξήθηκαν στο δεύτερο, οι τιμές του όζοντος μειώθηκαν και στις δύο περιπτώσεις και οι τιμές του διοξειδίου του θείου και του μονοξειδίου του άνθρακα αυξήθηκαν και στις δύο περιπτώσεις. Τα επίπεδα των ρύπων δεν έφτασαν πάντως σε επικίνδυνα επίπεδα ώστε να επηρεάσουν την υγεία των πολιτών και οι διαφορές, όπως καταδεικνύεται από τη χρωματική παλέτα των οπτικοποιήσεων, δεν ήταν ιδιαίτερα έντονες για τα συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Η χρήση δορυφορικών δεδομένων για τη συνεχή παρακολούθηση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα συμπληρωματικά με μετρήσεις τοπικών σταθμών, θα είναι πολύ σημαντική μελλοντικά για να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα και οι αποφάσεις που θα βελτιώσουν τη ζωή των πολιτών. Με τη χρωματική οπτικοποιήση μπορούμε να εστιάσουμε σε συγκεκριμένες προβληματικές ζώνες και να χρησιμοποιήσουμε τους τοπικούς αισθητήρες για μεγαλύτερη ακρίβεια και ευαισθησία μετρήσεων.

Παράρτημα Α'

Ακρωνύμια και συντομογραφίες

ΝΟ2 Διοξείδιο του Αζώτου

SO2 Διοξείδιο του Θείου

CO Μονοξείδιο του Άνθρακα

O3 Όζον

WHO World Health Organization

COVID-19 Coronavirus disease 2019

GEE Google Earth Engine

UNCFF United Nations Framework Convention On Climate Change

GHGs Greenhouse Gases

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

COP27 The 27th United Nations Climate Change conference

CO2 Διοξείδιο του Άνθρακα

UVA Ακτίνα υπεριώδους ακτινοβολίας

TROPOMI TROPOSPHERIC Monitoring Instrument

API Application Programming Interface

SHP Shapefile format

Bibliography

- [1] Richard W Boubel et al. *Fundamentals of air pollution*. Elsevier, 2013.
- [2] John Seinfeld and Spyros Pandis. “Atmospheric chemistry and physics. 1997”. In: *New York* (2008).
- [3] Kalpana Balakrishnan et al. “The impact of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across the states of India: the Global Burden of Disease Study 2017”. In: *The Lancet Planetary Health* 3.1 (2019), e26–e39.
- [4] Michael Brauer. “How much, how long, what, and where: air pollution exposure assessment for epidemiologic studies of respiratory disease”. In: *Proceedings of the American Thoracic Society* 7.2 (2010), pp. 111–115.
- [5] Aaron J Cohen et al. “Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015”. In: *The Lancet* 389.10082 (2017), pp. 1907–1918.
- [6] Ι Γεντεκάκης. Φυσικές διεργασίες. 1998.
- [7] RN Colvile et al. “The transport sector as a source of air pollution”. In: *Atmospheric environment* 35.9 (2001), pp. 1537–1565.
- [8] Selahattin Incecik and Ulaş Im. “Air pollution in mega cities: a case study of istanbul”. In: *Air Pollution-Monitoring, Modelling and Health, Croatia, InTech* (2012), pp. 77–116.
- [9] Philip J Landrigan et al. “Health and environmental consequences of the world trade center disaster.” In: *Environmental health perspectives* 112.6 (2004), pp. 731–739.
- [10] Ling Li, Anna Hsu, and Philip K Moore. “Actions and interactions of nitric oxide, carbon monoxide and hydrogen sulphide in the cardiovascular system and in inflammation—a tale of three gases!” In: *Pharmacology & therapeutics* 123.3 (2009), pp. 386–400.
- [11] Air Pollutants, Dispersion Scales. URL: <http://lap.physics.auth.gr/atmdiasp/simeiwseis/chapter2.pdf>.
- [12] I Lagzi et al. *Atmospheric Chemistry*. Eötvös Loránd University. 2013.
- [13] World Health Organization. *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide*. World Health Organization, 2006.
- [14] Gourav Kumar SINGH, RAI Swapnil, and Nimisha JADON. “Major Ambient Air Pollutants and Toxicity Exposure on Human Health and Their Respiratory System: A Review”. In: *Journal of Environmental Management and Tourism* 12.7 (2021), pp. 1774–1788.
- [15] Urs Von Gunten. “Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation”. In: *Water research* 37.7 (2003), pp. 1443–1467.

- [16] David Tarasick et al. "Tropospheric Ozone Assessment Report: Tropospheric ozone from 1877 to 2016, observed levels, trends and uncertainties". In: *Elementa: Science of the Anthropocene* 7 (2019).
- [17] *Greek legislation for air pollution*. URL: <https://ypen.gov.gr/periavallon/poiotita-tis-atmosfairas/nomothesia/>.
- [18] Mark Z Jacobson. *Air pollution and global warming: history, science, and solutions*. Cambridge University Press, 2012.
- [19] Zih-Hua Tina Fan. "Passive air sampling: Advantages, limitations, and challenges". In: *Epidemiology* 22.1 (2011), S132.
- [20] Robert L Byer. "Remote air pollution measurement". In: *Optical and Quantum Electronics* 7 (1975), pp. 147–177.
- [21] Marcelo Enrique Conti and Gaetano Cecchetti. "Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment—a review". In: *Environmental pollution* 114.3 (2001), pp. 471–492.
- [22] *Plume Labs - Methods for measurement of air pollution*. URL: <https://air.plumelabs.com/learn/en/how-do-you-measure-air-pollution>.
- [23] *Air quality research using satellite remote sensing*. URL: <https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/air-quality-research-using-satellite-remote-sensing>.
- [24] *Sentinel5p*. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>.
- [25] *Sentinel5pTROPOMI*. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-5p-tropomi>.
- [26] *TROPOMIPROD*. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p/data-products>.
- [27] Fatemeh Ghasempour, Alihsan Sekertekin, and Senol Hakan Kutoglu. "Google Earth Engine based spatio-temporal analysis of air pollutants before and during the first wave COVID-19 outbreak over Turkey via remote sensing". In: *Journal of Cleaner Production* 319 (2021), p. 128599.
- [28] *Earth Engine Editor Developer's Guide*. URL: <https://developers.google.com/earth-engine/guides/playground>.
- [29] *Javascript*. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript/Guide/Introduction>.
- [30] *WHO Guidance for COVID-19*. URL: [https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/technical-guidance/naming-the-coronavirus-disease-%20\(covid-2019\)-and-the-virus-that-causes-it](https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/technical-guidance/naming-the-coronavirus-disease-%20(covid-2019)-and-the-virus-that-causes-it).
- [31] Corinne Le Quéré et al. "Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement". In: *Nature climate change* 10.7 (2020), pp. 647–653.
- [32] M Bauwens et al. "Impact of coronavirus outbreak on NO₂ pollution assessed using TROPOMI and OMI observations". In: *Geophysical Research Letters* 47.11 (2020), e2020GL087978.
- [33] Stuart K Grange and David C Carslaw. "Using meteorological normalisation to detect interventions in air quality time series". In: *Science of the Total Environment* 653 (2019), pp. 578–588.

- [34] Stuart K Grange et al. "COVID-19 lockdowns highlight a risk of increasing ozone pollution in European urban areas". In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 21.5 (2021), pp. 4169–4185.
- [35] Marc Guevara et al. "Time-resolved emission reductions for atmospheric chemistry modelling in Europe during the COVID-19 lockdowns". In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 21.2 (2021), pp. 773–797.
- [36] Pierre Sicard et al. "Amplified ozone pollution in cities during the COVID-19 lockdown". In: *Science of the Total Environment* 735 (2020), p. 139542.
- [37] Ke Li et al. "Ozone pollution in the North China Plain spreading into the late-winter haze season". In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118.10 (2021), e2015797118.
- [38] Maria Cristina Collivignarelli et al. "Lockdown for CoViD-2019 in Milan: What are the effects on air quality?" In: *Science of the total environment* 732 (2020), p. 139280.
- [39] Aurelio Tobias et al. "Changes in air quality during the lockdown in Barcelona (Spain) one month into the SARS-CoV-2 epidemic". In: *Science of the total environment* 726 (2020), p. 138540.
- [40] Georgia Alexandri, Aristeidis K Georgoulias, and Dimitris Balis. "Effect of Aerosols, Tropospheric NO₂ and Clouds on Surface Solar Radiation over the Eastern Mediterranean (Greece)". In: *Remote Sensing* 13.13 (2021), p. 2587.
- [41] .