



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

*Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ  
ΡΥΠΑΝΣΗ ΕΥΡΩΠΑΪΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ*

υπό

**ΓΙΑΝΝΗ ΒΙΤΟΛΙΑΝΟΥ**

**Μεταπτυχιακή Εργασία**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στο  
ΠΜΣ «Ανάλυση κ' Διαχείριση ενεργειακών Συστημάτων»

**ΒΟΛΟΣ 2022**



© 2022 ΓΙΑΝΝΗΣ ΒΙΤΟΛΙΑΝΟΣ

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Δημήτριος Βαλουγεώργης Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Ολυμπία Ζώγου Διδάσκουσα, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Μεταπτυχιακού Προγράμματος με τίτλο: **Ανάλυση κ Διαχείριση Ενεργειακών Συστημάτων.**

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της επιτροπής αξιολόγησης κ. **Βαλουγεώργη Δημήτριο.** και την κ. **Ζώγου Ολυμπία.**

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. **Ανδρίτσο Νικόλαο.**

# ***Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΕΥΡΩΠΑΪΚΩΝ ΠΟΛΕΩΝ***

**ΒΙΤΟΛΙΑΝΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2022

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος

## **Περίληψη**

*Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση της κατάστασης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σήμερα, η περιγραφή των επιμέρους στοιχείων που συμβάλουν σε αυτή, η ανασκόπηση των μεθόδων για την καταπολέμηση της και τέλος η συμβολή της βιομηχανίας σε αυτή. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην αστική ρύπανση και αναφέρονται επιγραμματικά οι τύποι αστικής ρύπανσης που υπάρχουν σήμερα. Ακολούθως στο επόμενο κεφάλαιο τα αιωρούμενα σωματίδια, τα αέρια του θερμοκηπίου και η όξινη βροχή αναλύονται, κάνοντας αναφορά στις πηγές προέλευσης του κάθε τύπου ρύπανσης, τις επιπτώσεις τους αλλά και σε στατιστικά στοιχεία. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι τρόποι και οι τεχνολογίες με τους οποίους μπορούν να καταπολεμηθούν και να μετριαστούν οι ανωτέρω πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην επίδραση των διάφορων τομέων της βιομηχανίας στην ατμοσφαιρική ρύπανση. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε έξι ευρωπαϊκές χώρες οι οποίες έχουν την καλύτερη και τη χειρότερη μέση ετήσια ποιότητα αέρα αστικού περιβάλλοντος και γίνεται προσπάθεια να εξακριβωθεί κατά πόσο ο βιομηχανικός τομέας και άλλοι παράγοντες συνέβαλλαν στη δημιουργία του φαινομένου αυτού. Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα της διπλωματικής.*

**Λέξεις κλειδιά:** Ατμοσφαιρική ρύπανση, Αέρια του θερμοκηπίου, Αιωρούμενα σωματίδια, Όξινη βροχή

# THE CONTRIBUTION OF INDUSTRY TO THE AIR POLLUTION OF EUROPEAN CITIES

Vitolianos Ioannis

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2022

Supervisor: Dr Nikolaos Andritsos

## Abstract

*The purpose of this dissertation is the bibliographic review of the state of air pollution today, the description of the individual elements that contribute to it, the review of methods to combat it and finally the contribution of industry to it. The first chapter refers to urban pollution and outlines the types of urban pollution that exist today. Then in the next chapter the particulate matter, the greenhouse gases and the acid rain are analyzed, referring to the sources of each type of pollution, their effects and statistics. The third chapter describes the ways and technologies by which the above sources of air pollution can be combated and mitigated. The next chapter refers to the impact of various sectors of industry on air pollution. The fifth chapter refers to six European countries that have the best and worst average annual air quality in urban areas and tries to determine whether the industrial sector and other factors contributed to this phenomenon. Finally the last chapter presents the conclusions.*

**Keywords:** Air pollution, Greenhouse gases, Particulate matter, Acid rain

# Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	1
<b>1.1 Εισαγωγή</b> .....	1
<b>1.2 Τύποι αστικής ρύπανσης</b> .....	1
1.2.1 Μόλυνση του αέρα .....	2
1.2.2 Ρύπανση γλυκού ύδατος, θαλάσσια και παράκτια ρύπανση .....	4
1.2.3 Ρύπανση εδάφους .....	6
1.2.4 Ρύπανση αποβλήτων .....	7
1.2.5 Ηχορύπανση .....	8
<b>1.3 Ατμοσφαιρική ρύπανση πόλεων</b> .....	8
1.3.1 Αιωρούμενα σωματίδια .....	11
1.3.2 Οξειδία του θείου (SO <sub>x</sub> ) .....	11
1.3.3 Οξειδία του αζώτου (NO <sub>x</sub> ) .....	12
1.3.4 Πτητικές οργανικές ενώσεις ( VOCs ) .....	13
<b>1.4 Τεχνολογίες ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης</b> .....	14
<b>1.5 Μείωση ρύπων της ατμόσφαιρας</b> .....	14
<b>1.6 Σκοπός εργασίας</b> .....	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	19
<b>2.1 Αιωρούμενα σωματίδια - Εισαγωγή</b> .....	19
2.1.1 Τι είναι η τα αιωρούμενα σωματίδια; .....	20
2.1.2 Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων .....	23
2.1.3 Επίδραση της σωματιδιακής ρύπανσης .....	27
<b>2.2 Αέρια του θερμοκηπίου (Green House Gases)</b> .....	30
2.2.1 Πηγές Εκπομπών Αερίων Θερμοκηπίου .....	33
2.2.2 Αέρια θερμοκηπίου και υπερθέρμανση του πλανήτη .....	35
<b>2.3 Όξινη βροχή</b> .....	36
2.3.1 Ιστορία της όξινης βροχής .....	37
2.3.2 Αιτίες και τύποι όξινης βροχής .....	38
2.3.3 Επιπτώσεις όξινης βροχής .....	39



2.4 Στατιστικά στοιχεία.....	41
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....</b>	<b>51</b>
3.1 Τρόποι περιορισμού αερίων του θερμοκηπίου .....	51
3.1.1 Αφαίρεση και αποθήκευση αερίων του θερμοκηπίου .....	52
3.1.2 Αναδάσωση και διαχείριση δασών .....	54
3.1.3 Αποκατάσταση υγροτόπων και παράκτιων οικοτόπων .....	55
3.1.4 Δέσμευση άνθρακα στο έδαφος .....	57
3.1.5 Βιοενέργεια με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα .....	58
3.1.6 Κτίρια με βιομάζα.....	60
3.1.7 Ανθράκωση ορυκτών .....	61
3.1.8 Άμεση δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (DACCS) .....	62
3.2 Διαδικασίες και συσκευές ελέγχου ρύπανσης αιωρούμενων σωματιδίων.....	64
3.2.1 Συσκευές βαρυτικής καθίζησης.....	65
3.2.2 Υφασμάτινα φίλτρα (Σακκόφιλτρα - Baghouses) .....	66
3.2.3 Διαχωριστές Κυκλώνα (Φυγόκεντροι).....	67
3.2.4 Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές (ESP) .....	68
3.2.5 Πλυντρίδες (Scrubbers).....	69
3.3 Έλεγχος όξινης βροχής .....	72
3.3.1 Ασβεστοποίηση - Liming .....	72
3.3.2 Μείωση των εκπομπών ρύπων .....	72
3.3.3 Πολιτική παρέμβαση – Θέσπιση νομοθετικού πλαισίου .....	72
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>73</b>
4.1 Τομείς βιομηχανίας και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου .....	73
4.1.1 Εκπομπές του τομέα ηλεκτρικής ενέργειας .....	73
4.1.2 Εκπομπές του τομέα των μεταφορών .....	75
4.1.3 Εκπομπές του βιομηχανικού τομέα .....	76
4.1.4 Εκπομπές του αγροτικού τομέα .....	78
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....</b>	<b>80</b>
5.1 Εισαγωγή .....	80
5.2 Δεδομένα -Ανάλυση.....	80
5.2.1 Βουλγαρία.....	81
5.2.2 Πολωνία.....	84
5.2.3 Ρουμανία.....	86
5.2.4 Εσθονία.....	88
5.2.5 Φινλανδία.....	91
5.2.6 Σουηδία.....	93

5.2.7 Μοντέλο Ενεργειακής κατανάλωσης, προστασία του περιβάλλοντος.....	96
5.3 Συμπεράσματα -Συζήτηση.....	98
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b> .....	101
6.1 Συμπεράσματα .....	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	106

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.1 Εισαγωγή

Οι αξιολογήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (UNEP) το 2016 αποκάλυψαν την έκταση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Η ρύπανση επηρεάζει τον αέρα, το νερό, τη γη, τους ωκεανούς, ακόμη και το κλίμα, επηρεάζοντας την ποιότητά τους και διαταράσσοντας τους ανθρώπους και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι πόλεις συμβάλλουν σημαντικά στα προβλήματα ρύπανσης επειδή υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της πληθυσμιακής πυκνότητας και των επιπέδων ρύπανσης. Τα Ηνωμένα Έθνη (ΟΗΕ) εκτιμούν ότι έως το 2050, περισσότερα από τα δύο τρίτα του παγκόσμιου πληθυσμού θα ζουν σε πόλεις. Οι συνέπειες αυτής της αύξησης περιλαμβάνουν μια δραματική μεταμόρφωση του φυσικού αστικού χώρου και των παρακείμενων περιοχών του.

Είναι ενδιαφέρον ότι οι πόλεις αποτελούν και πρόκληση και ευκαιρία για περιβαλλοντικά προβλήματα: πρόκληση επειδή οι πόλεις αποτελούν κύριο επίκεντρο της ρύπανσης. Για παράδειγμα, οι πόλεις καταναλώνουν το 75% της παγκόσμιας ενέργειας και ευθύνονται για περισσότερο από το 80% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, η αυξανόμενη συγκέντρωση του παγκόσμιου πληθυσμού στις πόλεις αποτελεί επίσης μια ευκαιρία επειδή μπορούν να προσφέρουν έναν βιώσιμο τρόπο ζωής και επειδή το μέγεθος και η πυκνότητά τους επιτρέπει την εφαρμογή οικονομιών μεγάλης κλίμακας.

## 1.2 Τύποι αστικής ρύπανσης

Η έκθεση του UNEP του 2017 [1] όρισε τα πιο σημαντικά ζητήματα ρύπανσης σε όλες τις περιοχές όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, η ρύπανση των υδάτων, τα χημικά και τα απόβλητα. Αυτές οι μορφές ρύπανσης είναι παρούσες και επιδεινώνονται στις πόλεις.

Επιπλέον, όπως αναφέρει ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ), η αστική ηχορύπανση είναι ο τρίτος πιο επικίνδυνος τύπος περιβαλλοντικής ρύπανσης στις πόλεις.

### 1.2.1 Μόλυνση του αέρα

Ο αστικός αέρας μολύνεται συνεχώς από φυσικές πηγές όπως ηφαίστεια, πυρκαγιές, καταιγίδες σκόνης και ψεκασμό θαλάσσιου αλατιού ή από πηγές που σχετίζονται με ανθρώπινες δραστηριότητες όπως σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, βιομηχανία, νοικοκυριά, μεταφορές, γεωργία και επεξεργασία απορριμμάτων (UNEP 2017). Η ατμοσφαιρική ρύπανση εντείνεται στις πόλεις λόγω της στέγασης, της πυκνότητας του πληθυσμού, της συσσώρευσης βιομηχανίας και της κυκλοφορίας. Όσον αφορά τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, υπάρχουν δύο μεγάλες ομάδες ανάλογα με την προέλευσή τους. Πρωτογενείς ρύποι είναι εκείνοι που εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα (μονοξείδιο του άνθρακα ή διοξείδιο του θείου) και δευτερογενείς ρύποι, όπως το όζον, σχηματίζονται λόγω χημικών αντιδράσεων μεταξύ άλλων ρύπων και ατμοσφαιρικών αερίων [2]. Είναι σημαντικό να γίνεται διάκριση των τύπων ρύπων κατά την αντιμετώπιση προβλημάτων ατμοσφαιρικής ρύπανσης, προκειμένου να επιλεγεί το σωστό μέτρο που θα εφαρμοστεί, διότι η μείωση σε ορισμένες από τις επιβλαβείς εκπομπές θα μπορούσε να συνεπάγεται αύξηση των συγκεντρώσεων σε άλλες. Για παράδειγμα, η μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των τοπικών συγκεντρώσεων του όζοντος [2] και του μεθανίου[54].

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας [3], οι ατμοσφαιρικοί ρύποι που επηρεάζουν κυρίως την ανθρώπινη υγεία είναι τα αιωρούμενα σωματίδια (PM), το όζον (O<sub>3</sub>), το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>), το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO).

Τα αιωρούμενα σωματίδια θεωρούνται τα πιο σημαντικά, καθώς επηρεάζουν περισσότερο τους ανθρώπους από οποιονδήποτε άλλο ατμοσφαιρικό ρύπο. Τα PM αναφέρονται σε επιβλαβή σωματίδια διαφορετικών στοιχείων που μπορούν να εισπνευστούν. Αυτά τα σωματίδια περιλαμβάνουν εκείνα των οποίων η διάμετρος είναι μικρότερη από 10 μm (PM<sub>10</sub>) και τα λεπτότερα σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από 2,5 μm (PM<sub>2,5</sub>), τα οποία παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο για την υγεία λόγω της ικανότητάς τους να εισέρχονται στους πνεύμονες και στην κυκλοφορία του αίματος .

Ο ΠΟΥ καθόρισε τις κατευθυντήριες γραμμές για τα PM που πρέπει να πληρούν οι πόλεις όσον αφορά την ποιότητα του αέρα, οι οποίες προσδιορίζονται παρακάτω στον Πίνακα 1.1. Το 2016, αυτές οι οδηγίες δεν πληρούνταν από το 98% των πόλεων σε χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος και από το 56% των πόλεων σε χώρες υψηλού εισοδήματος με περισσότερους από 100.000 κατοίκους . Ο μαύρος άνθρακας είναι το κύριο συστατικό των PM<sub>2,5</sub> και είναι επίσης γνωστός ως «βραχύβιος ρύπος του κλίματος» επειδή εγκαθίσταται στην ατμόσφαιρα σε συντομότερο χρόνο από το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Ο μαύρος άνθρακας είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παράγοντας στην κλιματική αλλαγή (μετά το CO<sub>2</sub>), ακόμη και με τη σύντομη διάρκεια ζωής του.

Το όζον στο επίπεδο του εδάφους είναι δευτερεύων ρύπος επειδή δεν εκπέμπεται απευθείας στον αέρα, αλλά σχηματίζεται λόγω χημικών αντιδράσεων παρουσία ηλιακού φωτός. Επομένως, ανάλογα με την περιοχή, οι μηχανισμοί σχηματισμού όζοντος μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τις υπάρχουσες ουσίες και την ένταση του ηλιακού φωτός . Αυτός ο ρύπος είναι υπεύθυνος για μια ποικιλία αναπνευστικών προβλημάτων και αναπνευστικών ασθενειών όπως το άσθμα. Το όζον καταστρέφει τα φυτά και τα υλικά και λειτουργεί ως «αέριο του θερμοκηπίου» συμβάλλοντας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα υψηλά του επίπεδα συχνά σχετίζονται και με προβλήματα ορατότητας.

**Πίνακας 1.1** Ετήσιες κατευθυντήριες γραμμές του ΠΟΥ ανά ατμοσφαιρικό ρύπο [4]

Ρύπος	Ετήσιες οδηγίες του ΠΟΥ (µg/m <sup>3</sup> )
Αιωρούμενα σωματίδια PM <sub>10</sub>	20
Αιωρούμενα σωματίδια PM <sub>2.5</sub>	10
Όζον O <sub>3</sub>	100 (8-h mean)
Διοξείδιο του αζώτου	40
Διοξείδιο του θείου	20 (24-h mean)

Ένας άλλος σημαντικός ατμοσφαιρικός ρύπος εκτός του όζοντος και των σωματιδίων είναι το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>). Αυτό το αέριο δημιουργείται κυρίως από τη βιομηχανία και τις μεταφορές αφού εκπέμπεται στον αέρα ως αποτέλεσμα της καύσης καυσίμου. Όταν το NO<sub>2</sub> αλληλεπιδρά με το νερό, το οξυγόνο και άλλες χημικές ουσίες, προκαλεί όξινη βρογχίτιδα και μουντό αέρα, που μπορεί να βλάψει τις λίμνες, τα δάση, τα φυσικά πάρκα και τα παράκτια ύδατα. Ορισμένες μελέτες υποδηλώνουν ότι αυτός ο ρύπος σχετίζεται με προβλήματα άσθματος και συριγμού (π.χ. [5]).

Επίσης σημαντικός ατμοσφαιρικός ρύπος είναι διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), το οποίο δημιουργείται από την καύση καυσίμων που περιέχουν θείο. Αυτή η ένωση μπορεί να βλάψει το αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου. Επιπλέον, η παραγωγή SO<sub>2</sub> έχει ως αποτέλεσμα την εναπόθεση οξέος, η οποία μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του εδάφους και του νερού, βλάπτοντας τις λίμνες, τα δάση και τη βλάστηση. Το διοξείδιο του θείου είναι επίσης πρόδρομος των PM.

Τέλος το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) το οποίο είναι ένα άχρωμο, άοσμο, άγευστο, μη διαβρωτικό και εξαιρετικά δηλητηριώδες αέριο που έχει παρόμοια πυκνότητα με αυτή του αέρα. Το CO είναι πολύ εύφλεκτο και απελευθερώνεται κατά την καύση. Δεν είναι συνηθισμένο να βρίσκουμε πολύ υψηλά επίπεδα CO σε εξωτερικούς χώρους, αλλά όταν υπάρχει, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο για άτομα με καρδιακές παθήσεις λόγω της δημιουργίας καρβοξυαιμοσφαιρίνης (COHb) στο αίμα

Το 2005, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας θέσπισε τις «Οδηγίες ποιότητας του αέρα του ΠΟΥ» προκειμένου να καθορίσει τα όρια για βασικούς ατμοσφαιρικούς ρύπους που ενέχουν κινδύνους για την υγεία. Αυτά τα όρια έχουν αναθεωρηθεί ώστε να είναι πιο περιοριστικά. Οι κατευθυντήριες γραμμές καθορίζονται από ειδικούς με βάση στοιχεία που προέρχονται από τρέχουσες επιστημονικές αξιολογήσεις για τα σωματίδια, το όζον, το διοξείδιο του αζώτου και το διοξείδιο του θείου σε όλες τις περιοχές του ΠΟΥ. Σύμφωνα με τον ΠΟΥ, εάν υπάρξει μείωση των εκπομπών σωματιδίων (PM<sub>10</sub>) από 70 σε 20 μg/m<sup>3</sup>, οι θάνατοι που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση θα μειωθούν κατά περίπου 15%.

### **1.2.2 Ρύπανση γλυκού ύδατος, θαλάσσια και παράκτια ρύπανση**

Το μεγαλύτερο μέρος του νερού στη Γη περιέχεται στους ωκεανούς και στους πάγους. Το γεγονός αυτό εμποδίζει τη δυνατότητα εκμετάλλευσής του. Για το λόγο αυτό, το μεγαλύτερο μέρος της ανθρώπινης ζήτησης για νερό ικανοποιείται από όμβριους και υπόγειους υδάτινους πόρους, παρόλο που αυτή η ποσότητα είναι πολύ περιορισμένη.

Επιπλέον, στις πόλεις, η εκβιομηχάνιση και η αύξηση του πληθυσμού αυξάνουν την κατανάλωση νερού και υποβαθμίζουν την ποιότητα του. Στις αστικές περιοχές, το νερό μπορεί να υπάρχει τόσο στην επιφάνεια, όσο και στο υπέδαφος. Το πρώτο βρίσκεται σε

λίμνες, ταμιευτήρες, ποτάμια και ρυάκια, ενώ τα υπόγεια ύδατα υπάρχουν σε πορώδες και βραχώδες υπέδαφος. Η ρύπανση του νερού εξαρτάται από τον τύπο του νερού που επηρεάζεται, καθώς οι διαφορετικοί τύποι έκθεσης σε ρύπους θα καθορίσουν τη ρύπανση που προκαλείται [6]. Φυσικοί παράγοντες, όπως η θερμότητα ή η ακτινοβολία, μπορούν να προάγουν τη δημιουργία βιορρύπων στο νερό. Ωστόσο, οι κύριες πηγές ρύπανσης των υδάτων είναι χημικές ουσίες που παραμένουν διαλυμένες ή αιωρούμενες στο νερό και προκαλούν περιβαλλοντικές αντιδράσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε μόλυνση του νερού [7]. Μερικά παραδείγματα των πιθανών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία που προκαλούνται από χημικές ουσίες είναι η μεταλλαξιογένεση κυττάρων ή η εμφάνιση βακτηρίων ανθεκτικών στα αντιβιοτικά [1].

Ο άνθρωπος και το περιβάλλον εκτίθενται σε μόλυνση όχι μόνο μέσω του νερού αλλά και μέσω των μολυσμένων τροφίμων, των μολυσμένων εργασιακών χώρων, των σπρέι, των απορρυπαντικών, των υφασμάτων, των καλλυντικών, των δομικών υλικών και των επίπλων[8].

Οι Schweitzer και Noblet [6] χώρισαν τις πηγές ρύπανσης του νερού σε δύο μεγάλες ομάδες: σημειακές και μη σημειακές πηγές. Οι σημειακές πηγές είναι εντοπισμένες και αναγνωρίσιμες πηγές ρύπων (ορυχεία, εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής, βιομηχανία κ.λπ.). Μη σημειακές πηγές είναι αυτές που εκτείνονται σε μεγάλη γεωγραφική περιοχή (αστική απορροή, οχήματα κ.λπ.).

Οι σημειακές πηγές περιλαμβάνουν τα ακόλουθα: λύματα (δημοτικά και βιομηχανικά), απορροές και στραγγίσματα από χώρους διάθεσης απορριμμάτων, απορροή και διείσδυση από ζωοτροφές, απορροές από ορυχεία, κοιτάσματα πετρελαίου, βιομηχανικές εγκαταστάσεις χωρίς αποχέτευση, εκροές υπονόμων από πόλεις με πληθυσμό κάτω των 100.000 κατοίκων, υπερχειλίσεις συνδυασμένων όμβριων και υγειονομικών υπονόμων και απορροές από εργοτάξια κάτω των 2 εκταρίων.

Οι μη σημειακές πηγές περιλαμβάνουν τα ακόλουθα: απορροή από τη γεωργία (συμπεριλαμβανομένης της ροής επιστροφής από αρδευόμενη γεωργία), απορροή από βοσκοτόπια και ορεινές περιοχές, αστική απορροή από περιοχές χωρίς αποχέτευση και αποχετευτικές περιοχές με πληθυσμό άνω των 100.000 κατοίκων, στραγγίσματα σηπτικών δεξαμενών και απορροή από αποτυχημένα σηπτικά συστήματα. απορροή από εργοτάξια άνω των 2 εκταρίων, απορροή από εγκαταλελειμμένα ορυχεία, ατμοσφαιρική εναπόθεση πάνω

από μια υδάτινη επιφάνεια και δραστηριότητες στη γη που δημιουργούν ρύπους, όπως υλοτόμηση, μετατροπή υγροτόπων, κατασκευή και ανάπτυξη γης ή υδάτινων οδών.

Οι ρυπαντές του νερού προέρχονται από ανθρωπογενείς πηγές οργανικών χημικών ουσιών, θαλάσσια υπολείμματα και πλαστικά στο περιβάλλον, μέταλλα και μεταλλοειδή, βακτηριακή μόλυνση και άλλα παθογόνα του νερού και τοξίνες φυκιών.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας καθόρισε κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με τους τύπους νερού, επειδή οι ανάγκες ποιότητας νερού ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο νερού: πόσιμο νερό, νερό από επαναχρησιμοποίηση λυμάτων και νερό αναψυχής. Οι οδηγίες για το πόσιμο νερό είναι αυστηρότερες από αυτές του νερού από επαναχρησιμοποίηση λυμάτων ή του νερού αναψυχής.

### 1.2.3 Ρύπανση εδάφους

Το έδαφος και η γη είναι η βάση για κάθε σύστημα φυσικής ή ανθρώπινης προέλευσης. Στις πόλεις, το έδαφος έχει δύο βασικούς ρόλους: να υποστηρίζει την αστική ανάπτυξη και να παρέχει χώρο για τα πάρκα και τους κήπους, που παίζουν σημαντικό περιβαλλοντικό ρόλο στις αστικές κοινότητες [9].

Τα εδάφη που χρησιμοποιούνται για αστική ανάπτυξη ή υποδομές μεταφορών χάνουν το μεγαλύτερο μέρος των λειτουργιών τους. Η αστική ρύπανση του εδάφους και της γης μπορεί να προκληθεί από φυσικές πηγές (γεωχημεία εδάφους, γεωλογία, αλάτι, κατολισθήσεις) ή από ανθρωπογενείς πηγές (γεωργία, βιομηχανία, εξορυκτικά, απόβλητα, λύματα, μεταφορές, παραγωγή ενέργειας) [1]. Η αξιολόγηση της ποιότητας του εδάφους εξαρτάται από τη χρήση του. Αυτή η αξιολόγηση πραγματοποιείται μέσω χημικών, φυσικών και βιολογικών δεικτών.

Σύμφωνα με την Περιβαλλοντική Έκθεση του 2010 του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, η υποβάθμιση του αστικού εδάφους αυξάνεται λόγω των ακόλουθων αιτιών:

- Σφράγιση εδάφους (η μόνιμη επικάλυψη του εδάφους με αδιαπέραστο υλικό).
- Διάβρωση του εδάφους (που έχει επίδραση σε υδάτινα σώματα όπως το γλυκό νερό).
- Ερημοποίηση.
- Οξίνιση του εδάφους (που προκαλείται από την εναπόθεση οξινιστικών ατμοσφαιρικών ρύπων).
- Απειλές για τη βιοποικιλότητα του εδάφους.



- Μόλυνση του εδάφους.
- Διατάραξη κύκλων νερού, θρεπτικών και βιολογικών ουσιών

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους έχουν άμεση επίδραση στην ποιότητα του νερού και της ατμόσφαιρας, καθώς η επιφάνεια του εδάφους αντιπροσωπεύει τη διεπαφή μεταξύ της βιόσφαιρας, της ατμόσφαιρας και της υδρόσφαιρας. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους κατά συνέπεια επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία [9].

#### **1.2.4 Ρύπανση αποβλήτων**

Η παραγωγή αποβλήτων διπλασιάστηκε μεταξύ 1970 και 2000 και αυξάνεται συνεχώς [1]. Επιπλέον, το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (2017) δείχνει μια σαφή και άμεση σχέση μεταξύ της ποσότητας των στερεών αποβλήτων των ατόμων και του επιπέδου εισοδήματος των αντίστοιχων χωρών τους.

Σε ορισμένες χώρες (κυρίως εκείνες με αναπτυσσόμενες ή υπανάπτυκτες οικονομίες), ο εξοπλισμός και οι δεξιότητες για τη διαχείριση διάφορων τύπων αποβλήτων είναι σπάνιες. Κατά συνέπεια, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και οι κίνδυνοι για την υγεία είναι μεγαλύτεροι από εκείνους στις ανεπτυγμένες χώρες. Επιπλέον, μια τέτοια κατάσταση συνεπάγεται την απώλεια της αξίας πολλών ανακυκλώσιμων υλικών, καθώς επαναχρησιμοποίησή τους δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι απορριμμάτων: απόβλητα τροφίμων, εμπορικά και βιομηχανικά απόβλητα, απόβλητα κατασκευών και κατεδαφίσεων, γεωργικά απόβλητα, απόβλητα δασοκομίας, απόβλητα ορυχείων και απόβλητα λατομείων. Οι φυσικές καταστροφές συμβάλλουν επίσης στη δημιουργία αποβλήτων.

Τα απόβλητα που προέρχονται από χημικές ουσίες είναι πολύπλοκος ρύπος επειδή η επίδραση τους καλύπτει διαφορετικές μορφές ρύπανσης (π.χ., τα χημικά μπορούν να συμβάλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση καθώς και στη ρύπανση των υδάτων και τα απόβλητα μπορούν να συμβάλουν στη ρύπανση του εδάφους και των υδάτων). Ως εκ τούτου, οι επιπτώσεις των αποβλήτων για το περιβάλλον και την υγεία είναι πολύπλευρες και συνυφασμένες με πολλές άλλες πηγές ρύπανσης.

### 1.2.5 Ηχορύπανση

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας, η ηχορύπανση είναι ένας από τους τρεις πιο επιβλαβείς τύπους περιβαλλοντικής ρύπανσης στις πόλεις . Ο θόρυβος είναι ένας πολύ διεισδυτικός ρύπος που επηρεάζει την υγεία και την ευημερία των εκτεθειμένων ανθρώπων. Καθώς ο πληθυσμός μιας πόλης αυξάνεται, η πόλη γίνεται πιο θορυβώδης, δημιουργώντας ένα μεγαλύτερο πρόβλημα. Πηγές ηχορύπανσης είναι κυρίως οι μεταφορές και η βιομηχανική δραστηριότητα. Η ηχορύπανση αυξάνεται λόγω της αυξανόμενης ζήτησης της κοινωνίας για μεγαλύτερη κινητικότητα και παραγωγικότητα . Ωστόσο, ο θόρυβος από την οδική κυκλοφορία είναι η πιο σημαντική απειλή για τους πολίτες, διότι καλύπτει μεγάλη έκταση και επηρεάζει πολλούς ανθρώπους.

Οι Fisher et al. [10] ταξινόμησαν ως πιο ενοχλητικούς περιβαλλοντικούς θορύβους τους θορύβους από την οδική κυκλοφορία, τους σιδηρόδρομους και τα αεροδρόμια, που έχουν ως αποτέλεσμα διάφορα προβλήματα υγείας σε άτομα που ζουν σε αυτά τα περιβάλλοντα.

Σύμφωνα με τον Maschke [11], η ηχορύπανση και οι συνέπειές της προκαλούν άγχος και έχουν ψυχοκοινωνικό αντίκτυπο στην κατάσταση των ανθρώπων. Τα κύρια ειδικά ζητήματα υγείας που σχετίζονται με την ηχορύπανση είναι τα προβλήματα ακοής, οι καρδιαγγειακές παθήσεις, η γνωστική εξασθένηση, οι διαταραχές ύπνου, οι εμβοές και η όχληση .

Η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης που ελέγχει την ηχορύπανση είναι η Environmental Noise Directive (END). Για την εφαρμογή END η Ρυθμιστική Επιτροπή Θορύβου (Noise Regulatory Committee) μετρά και παρακολουθεί τις δράσεις που αναπτύχθηκαν για την αντιμετώπιση των εκπομπών θορύβου στην ξηρά.

### 1.3 Ατμοσφαιρική ρύπανση πόλεων

Οι δυσμενείς επιπτώσεις της αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχουν μελετηθεί εκτενώς και έχουν αναφερθεί παγκοσμίως. Μπορούν να εντοπιστούν αρχικά στη βιομηχανική επανάσταση του 18ου αιώνα στην Αγγλία. Τον Δεκέμβριο του 1952, το πιο γνωστό περιστατικό, η Μεγάλη αιθαλομίχλη (Great Smog of London) συνέβη στο Λονδίνο και διήρκεσε 5 ημέρες. Αυτό το καταστροφικό φαινόμενο οδήγησε πάνω από 4000 ανθρώπους στο θάνατο και δεκάδες χιλιάδες να αρρωστήσουν. Προκλήθηκε από ένα ασυνήθιστα ισχυρό

ψυχρό κύμα που ανάγκασε τους Λονδρέζους να καίνε πολύ περισσότερο άνθρακα από το συνηθισμένο για να ζεσταθούν. Ο μεταπολεμικός εγχώριος άνθρακας, εκείνη την εποχή στην Αγγλία ήταν χαμηλής ποιότητας, την υψηλή ποιότητα την εξήγαγαν για να καλύψουν τα χρέη του πολέμου. Ήταν παρόμοιος με τον λιγνίτη, με μεγάλη περιεκτικότητα σε θείο, πράγμα που αύξησε την ποσότητα του διοξειδίου του θείου στον καπνό. Υπήρχαν επίσης σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα στην περιοχή του ευρύτερου Λονδίνου, συμπεριλαμβανομένων των *Fulham, Battersea, Bankside, Greenwich* και *Kingston upon Thames*, οι οποίοι με τις εκπομπές τους επιδείνωσαν δραματικά το φαινόμενο.[47]



**Εικόνα 1.1** Η Μεγάλη Ομίχλη του Λονδίνου Πηγή: Bikeworldtravel / Fotolia

Από τη δεκαετία του 1940 έως τη δεκαετία του 1960, οι άνθρωποι στο Λος Άντζελες ανέπνεαν τον πιο βρώμικο αέρα στον κόσμο λόγω της φωτοχημικής αιθαλομίχλης. Το νέφος του Λος Άντζελες οφείλονταν κυρίως στην υπερβολική έκλυση καυσαερίων από τα αυτοκίνητα σε συνδυασμό με την τοπογραφία και τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής (εδώ υπάρχουν πολλές ομοιότητες με την περίπτωση του νέφους της Αθήνας).

Οι χώρες αυτές στη συνέχεια θεσπίζουν πρότυπα και κανονισμούς για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Στην Αγγλία ψηφίστηκε το 1956 ο «Νόμος για τον καθαρισμό της ατμόσφαιρας» με βάση τον οποίο απαγορεύτηκε η χρήση ανθρακίτη στα σπίτια, αντικαταστάθηκε το κάρβουνο από το πετρέλαιο στους βρετανικούς σιδηροδρόμους και μεταφέρθηκαν πολλές βιομηχανίες στον βορρά. Επί του παρόντος, οι αναπτυσσόμενες χώρες (π.χ. Κίνα, Ινδία και χώρες της Νοτιοανατολικής Ασίας) έχουν επαναλάβει την ίδια κατάσταση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που σχετίζεται με την ταχεία εκβιομηχάνιση και αστικοποίηση, η οποία συνέβαλε επίσης στην αύξηση της παραγωγής βιομηχανικών αποβλήτων και της κατανάλωσης ενέργειας. Η μη ορθολογικά σχεδιασμένη αστικοποίηση και η αυξανόμενη πληθυσμιακή ένταση έχουν ενισχύσει τόσο τις εκπομπές όσο και τις συγκεντρώσεις σημαντικών ατμοσφαιρικών ρύπων σε αυτές τις χώρες. Αν και υπάρχουν

διάφοροι ρύποι τα PM, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και VOCs θεωρούνται οι κύριοι τύποι ρύπων στην αστική ατμόσφαιρα, επειδή αποτελούν μεγάλες απειλές για την υγεία του ανθρώπου, τη βλάστηση (ιδίως τη γεωργία), το παγκόσμιο ατμοσφαιρικό περιβάλλον (π.χ. κλιματική αλλαγή, φωτοχημική αιθαλομίχλη, καταστροφή του όζοντος, όξινη βροχή κ.λπ.) και ανθρώπινη περιουσία. Οι επιβλαβείς επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε αυτούς τους ατμοσφαιρικούς ρύπους είναι πολύ ανησυχητικές για το κοινό.

Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι εισέρχονται στο ανθρώπινο σώμα κυρίως μέσω της αναπνοής, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της πνευμονικής λειτουργίας, αναπνευστικές παθήσεις (π.χ. καρδιαγγειακά, βρογχίτιδα, πνευμονία κ.λπ.) και να προκαλέσει βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη μείωση του προσδόκιμου ζωής ή ακόμη και πρόωρο θάνατο.

Η μείωση της ορατότητας του αστικού περιβάλλοντος είναι μια άλλη επίδραση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η οποία προκύπτει από σκέδαση και απορρόφηση φωτός, λόγω σωματιδίων και αέριων μορίων που αιωρούνται. Επιπλέον, οι καλλιέργειες και τα οπωροφόρα δέντρα δέχονται μικρότερη ηλιακή ακτινοβολία λόγω των μακροχρόνιων φαινομένων ομίχλης, η οποία τελικά θέτει σε κίνδυνο τη διαδικασία φωτοσύνθεσης και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της γεωργικής παραγωγής.

Η παγκόσμια κλιματική αλλαγή (ιδιαίτερα το φαινόμενο του θερμοκηπίου) είναι μια άλλη περιβαλλοντική επίπτωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Καθώς τα αέρια του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub> και CH<sub>4</sub>) αυξάνουν τις συγκεντρώσεις τους στην ατμόσφαιρα, η θερμική ακτινοβολία του υπέρυθρου φάσματος μακρών κυμάτων δεν μπορεί να επανακτινοβοληθεί και παγιδεύεται στην ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας σημαντικά στην αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Το στρώμα του όζοντος, που περιέχεται στη στρατόσφαιρα, προστατεύει τους ζωντανούς οργανισμούς από την επιβλαβή υπεριώδη ακτινοβολία (UV) του ήλιου. Ωστόσο, έχει μειωθεί κατά 3,4% στο μέσο συνολικό όζον στο μέσο γεωγραφικό πλάτος του Βόρειου Ημισφαιρίου από το 1979. Όσο πιο λεπτό είναι το στρώμα του όζοντος, τόσο περισσότερη υπεριώδης ακτινοβολία μπορεί να φτάσει στη Γη. Η υπεριώδης ακτινοβολία καταστέλλει το ανοσοποιητικό σύστημα και προκαλεί καρκίνο του δέρματος. Η καταστροφή της ανθρώπινης περιουσίας είναι μια άλλη παρενέργεια της αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης καθώς η εναπόθεση όξινων αερολυμάτων/αερίων μπορεί να διαβρώσει πολιτιστικούς θησαυρούς της εθνικής κληρονομιάς, όπως η υπαίθρια τέχνη (αγάλματα και γλυπτά) και η ιστορική αρχιτεκτονική.

### 1.3.1 Αιωρούμενα σωματίδια

Τα αιωρούμενα σωματίδια (PMs) είναι τα πολύπλοκα μείγματα που υπάρχουν σε στερεή ή υγρή μορφή, τα οποία αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Μερικά από αυτά είναι αρκετά μεγάλα ώστε να φαίνονται, όπως καπνός, αιθάλη, σκόνη και σταγονίδια υγρού, ωστόσο, άλλα είναι τόσο μικρά που πρέπει να ανιχνευθούν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Τα PM χωρίζονται σε χονδρόκοκκα (coarse mode) και λεπτόκοκκα (fine mode). Τα χονδρόκοκκα σωματίδια είναι τα σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο ίση ή μικρότερη από 10  $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>) και μεγαλύτερη από 2,5  $\mu\text{m}$  ενώ τα λεπτά σωματίδια είναι συνήθως αυτά με αεροδυναμική διάμετρο μικρότερη από 2,5  $\mu\text{m}$  (PM<sub>2,5</sub>). Η έκθεση στον αέρα με σωματίδια υψηλής συγκέντρωσης, ειδικά PM<sub>2,5</sub>, προκαλεί σοβαρές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, καθώς μπορούν να διεισδύσουν στο αναπνευστικό μας σύστημα και να προκαλέσουν βλάβη.

Τα PM στις αστικές περιοχές προέρχονται από διάφορες πηγές εκπομπών. Τα λεπτά σωματίδια προέρχονται από μονάδες παραγωγής ενέργειας, βιομηχανικές εγκαταστάσεις και καυσαέρια οχημάτων από την καύση καυσίμου. Πηγές χονδροειδών σωματιδίων περιλαμβάνουν σκόνη προερχόμενη από τους δρόμους, σκόνη από κατασκευαστικές εφαρμογές και σκόνη από τον άνεμο. Μερικά από αυτά που εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα από τις πηγές τους, όπως ο μαύρος άνθρακας θεωρούνται οι κύριοι ρύποι, ενώ άλλοι ρύποι, όπως το SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOCs, μπορούν να αντιδράσουν με υπάρχοντες πρωτογενείς ρύπους στον αέρα για να σχηματίσουν λεπτά σωματίδια που θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν ως δευτερογενή αερολύματα ρύπων.

### 1.3.2 Οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>)

Τα SO<sub>x</sub> είναι ένας τύπος άχρωμων και όξινων αερίων με έντονη οσμή. Το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>) είναι ο πρόδρομος της όξινης βροχής και των ατμοσφαιρικών PM. Μπορεί εύκολα να οξειδωθεί σε τριοξείδιο του θείου (SO<sub>3</sub>) φωτοχημικά ή καταλυτικά στην ατμόσφαιρα. Το SO<sub>3</sub> μπορεί στη συνέχεια να μετατραπεί σε ομίχλη θειικού οξέος σε κατάσταση υδρατμών και να σχηματίσει θειικά αερολύματα σε συνδυασμό με άλλα βασικά οξείδια. Τα σταγονίδια που περιέχουν θειικά άλατα και θειικό οξύ (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) συνεισφέρουν το 5% έως 20% των συνολικών αιωρούμενων σωματιδίων στον αστικό αέρα. Τα SO<sub>2</sub> παράγονται κυρίως από την καύση (καύση ορυκτών καυσίμων που περιέχουν S), την τήξη

μεταλλευμάτων που περιέχουν S, την παραγωγή θειικού οξέος και τη διύλιση πετρελαίου. Η καύση ορυκτών καυσίμων σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, ιδιαίτερα ο άνθρακας, εκπέμπει το μεγαλύτερο μέρος του SO<sub>2</sub>. Η έκθεση στο SO<sub>2</sub> μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας μέσω εισπνοής, επαφής με το δέρμα/μάτια κ.λπ. καθώς είναι όξινο, αντιδραστικό και ερεθιστικό.

### 1.3.3 Οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>)

Υπάρχουν επτά γνωστά οξείδια του αζώτου: NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Με τον γενικό όρο οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) γίνεται αναφορά κυρίως στο αέριο μείγμα μονοξειδίου του αζώτου (NO) και διοξειδίου του αζώτου (NO<sub>2</sub>) που υπάρχει στην γήινη ατμόσφαιρα, αποτελώντας έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες ρύπανσής της. Το NO είναι ένα αέριο άχρωμο και θεωρείται σημαντικό μέσο στη χημική βιομηχανία, ενώ το NO<sub>2</sub> είναι ένα κοκκίνοκαφέ τοξικό και εξαιρετικά δραστικό αέριο με έντονη οσμή που προέρχεται από οξείδωση του NO. Το NO<sub>2</sub> δεν θεωρείται μόνο ως κύριος ατμοσφαιρικός ρύπος από μόνο του, αλλά παίζει επίσης βασικό ρόλο στη φωτοχημική αιθαλομίχλη. Τα NO<sub>x</sub> που οξειδώνονται στην ατμόσφαιρα και δεσμεύονται από την υγρασία σχηματίζουν όξινη βροχή και μπορούν επίσης να αντιδράσουν με ατμοσφαιρικές πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) παρουσία υπεριώδους ακτινοβολίας για να σχηματίσουν όζον. Οι διεργασίες καύσης με υψηλή θερμοκρασία, που συμβαίνουν σε αυτοκίνητα και βιομηχανικούς λέβητες, είναι οι κύριες πηγές εκπομπών NO<sub>x</sub> στις πόλεις. Επιπλέον, οι εκπομπές σε εσωτερικούς χώρους, όπως οι σόμπες αερίου και οι οικιακές θερμάστρες, παράγουν επίσης σημαντικές ποσότητες NO<sub>x</sub>. Εκτός από το άζωτο που περιέχεται στο καύσιμο, το N<sub>2</sub> στον αέρα είναι η κύρια στοιχειώδης πηγή αζώτου για το σχηματισμό NO<sub>x</sub>.

Νέα μελέτη [54] χρησιμοποίησε δορυφορικές μετρήσεις μιας ποικιλίας ρύπων για να αποκαλύψει μια λιγότερο θετική επίδραση του περιορισμού των NO<sub>x</sub>. Αυτός ο ρύπος αντιδρά για να σχηματίσει ένα βραχύβιο μόριο που ονομάζεται ρίζα υδροξυλίου (-OH), το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στη διάσπαση των μακρόβιων αερίων στην ατμόσφαιρα. Η μείωση των εκπομπών NO<sub>x</sub> –τόσο ευεργετική για τον καθαρισμό της ρύπανσης– περιόρισε την ικανότητα της ατμόσφαιρας να καθαριστεί από ένα άλλο σημαντικό αέριο του θερμοκηπίου: το μεθάνιο. Με λιγότερα NO<sub>x</sub>, υπάρχουν λιγότερες ρίζες υδροξυλίου για την απομάκρυνση του μεθανίου, οπότε αυτό παρέμεινε στην ατμόσφαιρα περισσότερο.

Η έκθεση στα ατμοσφαιρικά NO<sub>x</sub> υψηλής συγκέντρωσης μπορεί να βλάψει την αναπνευστική οδό και το ανοσοποιητικό σύστημα του σώματος, αυξάνοντας την ευαισθησία του ατόμου σε λοιμώξεις.

#### 1.3.4 Πτητικές οργανικές ενώσεις ( VOCs)

Οι πτητικές οργανικές ενώσεις είναι οργανικές ενώσεις με υψηλή τάση ατμών σε συνηθισμένη ατμοσφαιρική θερμοκρασία, οι οποίες θα μπορούσαν εύκολα να εξατμιστούν από την υγρή ή στερεή μορφή αυτής της ένωσης για να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις συμπεριλαμβανομένων των μη μεθανικών υδρογονανθράκων (NMHCs) είναι ενώσεις που όταν υπάρχουν στο περιβάλλον, προκαλούν την αλλοίωση της ατμοσφαιρικής χημείας. Σε παγκόσμια κλίμακα οι φυσικές εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων υπερβαίνουν τις ανθρωπογενείς εκπομπές, αν και οι τελευταίες κυριαρχούν συνήθως στις αστικές περιοχές. Μεταξύ των φυσικών πηγών, η βλάστηση είναι η κυρίαρχη πηγή και η σημαντικότερη ένωση είναι το ισοπρένιο (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>). Το ίδιο το ισοπρένιο, κανονικά, δεν θεωρείται ως ρύπος, επειδή είναι ένα φυσικό προϊόν των φυτών. Κύριοι παραγωγοί ισοπρενίου είναι οι βελανιδιές, οι λεύκες, οι ευκάλυπτοι και μερικά λαχανικά. Η ετήσια παραγωγή των εκπομπών ισοπρενίου από τη βλάστηση είναι γύρω στα 600 εκατομμύρια τόνοι. Αυτό είναι περίπου ισοδύναμο με την εκπομπή μεθανίου στην ατμόσφαιρα και θεωρείται ως περίπου το 1/3 όλων των υδρογονανθράκων που ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα [48]. Ένα αποτέλεσμα της συγκέντρωσης ισοπρενίου στην ατμόσφαιρα είναι ότι παρουσία των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) συνεισφέρει στον σχηματισμό του τροποσφαιρικού όζοντος, που είναι ένας από τους βασικούς ρυπαντές του αέρα σε πολλές χώρες.[49].

Τα υπόλοιπα (VOCs) προέρχονται από ζώα, μικρόβια, μύκητες κ.λπ. Οι κύριες ανθρωπογενείς πηγές εκπομπών πτητικών οργανικών ενώσεων είναι η καύση βιομάζας, οι μεταφορές, οι βιομηχανικές διεργασίες, οι οργανικοί διαλύτες. Κύρια πηγή των πτητικών οργανικών ενώσεων βρέθηκε να είναι οι εξατμίσεις κινητήρων βενζίνης σύμφωνα με τις μελέτες σε 43 κινεζικές πόλεις που διεξήχθησαν το 2001. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις, των μη μεθανικών υδρογονανθράκων (NMHC), εκτός από τον πολύ σημαντικό ρόλο τους στην παραγωγή ατμοσφαιρικού όζοντος (O<sub>3</sub>), θεωρούνται ως ερεθιστικά αέρια, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν βραχυπρόθεσμα ερεθισμό των ματιών, της μύτης, του λαιμού, ζάλη και πονοκεφάλους, ενώ μακροπρόθεσμα μπορεί να προκαλέσουν καρκίνο ή κάποιες άλλες χρόνιες ασθένειες.

## 1.4 Τεχνολογίες ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης

Η ατμόσφαιρα διαθέτει μηχανισμό αυτοκαθαρισμού και δυνατότητα διασποράς ή απομάκρυνσης ρύπων από τη στιγμή που εκπέμπονται. Η διασπορά δεν εξαλείφει πραγματικά τους ρύπους, αλλά εξακολουθεί να είναι ευεργετική για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα λόγω της μείωσης της συγκέντρωσης διαφόρων ρύπων κοντά στο επίπεδο του εδάφους. Η διασπορά εξαρτάται γενικά από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Όσον αφορά τον αυτοκαθαρισμό, υπάρχουν κυρίως δύο διαδικασίες που εμπλέκονται στην ατμόσφαιρα, συμπεριλαμβανομένης της φυσικής εναπόθεσης και της μετατροπής των ρύπων σε άλλες μορφές μέσω φυσικών ή φυσικοχημικών αντιδράσεων.

Ωστόσο, ένας τέτοιος μηχανισμός λειτουργεί μόνο όταν η ένταση και η ποσότητα εκπομπών είναι χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική ικανότητα αυτοκαθαρισμού, κάτι που στην πραγματικότητα δεν ισχύει τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες περιοχές και χώρες. Ως εκ τούτου, για την προστασία της ποιότητας του αέρα, μια σειρά από τεχνολογίες ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία, για τις οποίες κάποιες βασικές αρχές που έχουν εφαρμοστεί είναι οι εξής.

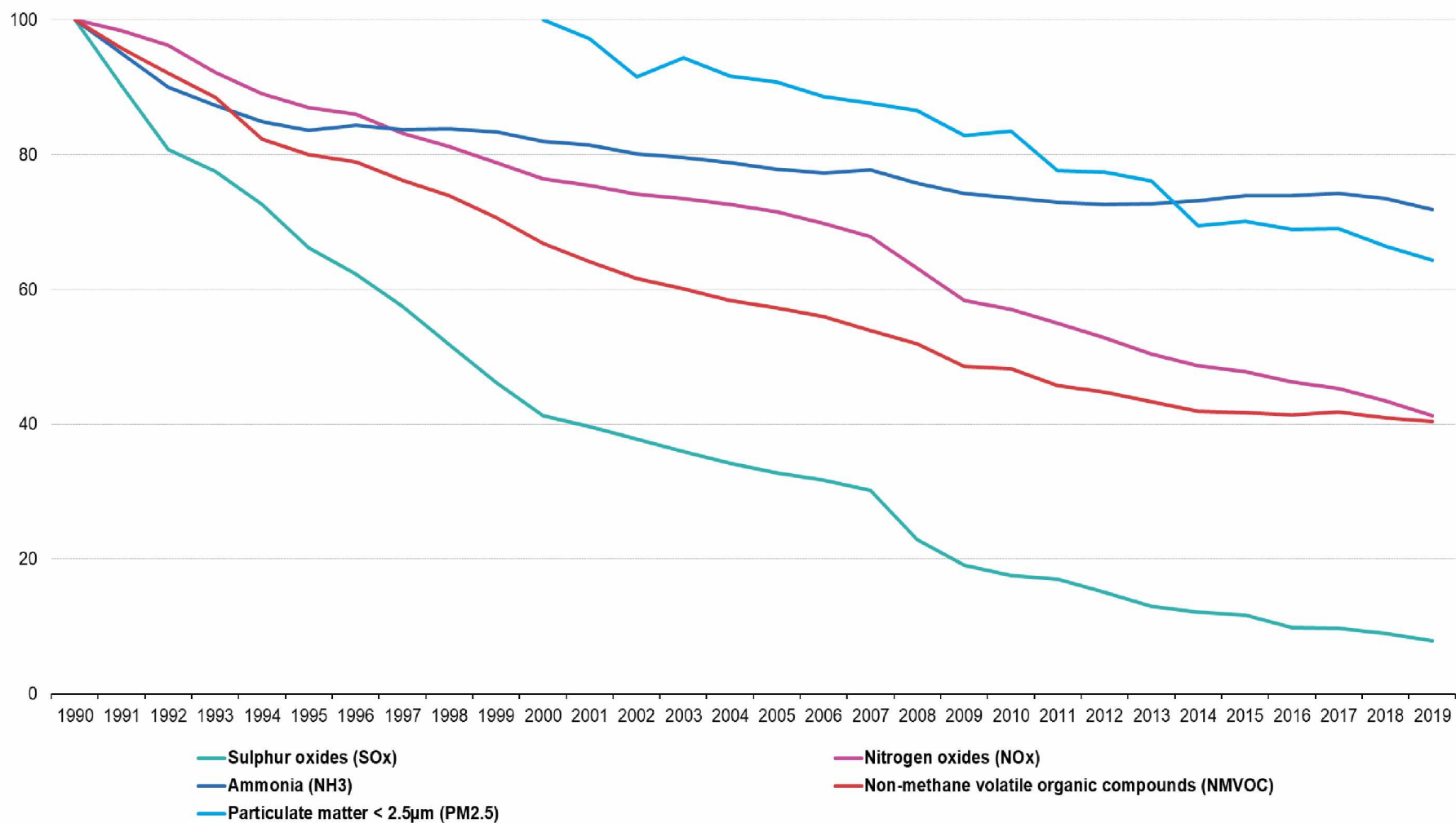
Η πρώτη είναι η ελαχιστοποίηση της παραγωγής ρύπων στην αρχή των βιομηχανικών διεργασιών, ή αλλιώς πρόληψη της ρύπανσης. Η δεύτερη είναι ο χημικός μετασχηματισμός ή η καταστροφή τους, αφού τα είδη ρύπων έχουν ήδη σχηματιστεί. Αυτή η διαδικασία είναι η μετατροπή των ρύπων σε λιγότερο δραστικά ή αδρανή είδη πριν από την εκπομπή τους. Ένας αριθμός μεθόδων για τον έλεγχο των πτητικών οργανικών ενώσεων μέσω θερμικής/καταλυτικής οξειδωσης βασίζονται σε αυτήν την αρχή. Η τρίτη είναι η δέσμευση ή ο διαχωρισμός, που απομακρύνουν τους ρύπους από τα καυσαέρια πριν την εκπομπή τους στην ατμόσφαιρα, όπως οι τεχνολογίες απορρόφησης και προσρόφησης.

## 1.5 Μείωση ρύπων της ατμόσφαιρας

Η ατμοσφαιρική ρύπανση βλάπτει την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Το διοξείδιο του αζώτου και η ρύπανση από σωματίδια αποτελούν σοβαρούς κινδύνους για την υγεία, ενώ οι ευαίσθητες περιοχές του οικοσυστήματος επηρεάζονται από την εναπόθεση οξέων περίσσειας θείου και ενώσεων αζώτου (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>).



Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι εκπέμπονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων. Χάρη σε ένα ευρύ φάσμα μέτρων περιβαλλοντικής πολιτικής, οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων στην Ευρώπη μειώθηκαν σημαντικά τα τελευταία 30 χρόνια. Η μείωση αυτή φαίνεται καθαρά στη γραφική παράσταση εκπομπών ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την περίοδο 1990-2019.



Εικόνα 1.2: Γραφική παράσταση εκπομπών ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την περίοδο 1990-2019 [12]

Πίνακας 1.2 Στατιστικά στοιχεία για ατμοσφαιρική ρύπανση σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης [12]

	SOx (Τόνοι)	Sulphur oxides (SOx) (%)	NOx (Τόνοι)	Nitrogen oxides (NOx) (%)	NH3 (Τόνοι)	Ammonia (NH3) (%)	NMVOC (Τόνοι)	Non-methane volatile organic compounds (NMVOC) (%)	PM2.5 (Τόνοι) (%)	Particulate matter < 2.5µm (PM2.5) (%)
1990	21.027.390,0	100,0	14.901.060,0	100,0	4.916.130,0	100,0	15.869.850,0	100,0	-	-
1991	18.962.410,0	90,2	14.661.480,0	98,4	4.668.480,0	95,0	15.203.760,0	95,8	-	-
1992	16.986.670,0	80,8	14.330.450,0	96,2	4.424.300,0	90,0	14.611.660,0	92,1	-	-
1993	16.290.640,0	77,5	13.732.310,0	92,2	4.290.110,0	87,3	14.044.140,0	88,5	-	-
1994	15.257.280,0	72,6	13.271.010,0	89,1	4.174.810,0	84,9	13.053.260,0	82,3	-	-
1995	13.904.350,0	66,1	12.956.820,0	87,0	4.107.060,0	83,5	12.702.510,0	80,0	-	-
1996	13.087.430,0	62,2	12.819.520,0	86,0	4.146.200,0	84,3	12.516.040,0	78,9	-	-
1997	12.095.900,0	57,5	12.384.550,0	83,1	4.113.820,0	83,7	12.086.710,0	76,2	-	-
1998	10.903.730,0	51,9	12.092.420,0	81,2	4.122.610,0	83,9	11.730.360,0	73,9	-	-
1999	9.708.620,0	46,2	11.747.860,0	78,8	4.099.850,0	83,4	11.205.560,0	70,6	-	-
2000	8.685.400,0	41,3	11.391.420,0	76,4	4.031.680,0	82,0	10.598.430,0	66,8	1.726.970,0	100,0
2001	8.335.780,0	39,6	11.241.240,0	75,4	4.000.790,0	81,4	10.177.200,0	64,1	1.678.280,0	97,2
2002	7.951.150,0	37,8	11.044.840,0	74,1	3.938.270,0	80,1	9.772.590,0	61,6	1.581.490,0	91,6
2003	7.551.640,0	35,9	10.943.580,0	73,4	3.912.460,0	79,6	9.535.470,0	60,1	1.630.460,0	94,4
2004	7.189.600,0	34,2	10.816.840,0	72,6	3.872.030,0	78,8	9.258.790,0	58,3	1.581.740,0	91,6
2005	6.880.950,0	32,7	10.649.440,0	71,5	3.824.300,0	77,8	9.080.750,0	57,2	1.566.730,0	90,7
2006	6.670.110,0	31,7	10.396.420,0	69,8	3.798.120,0	77,3	8.887.150,0	56,0	1.529.890,0	88,6
2007	6.342.450,0	30,2	10.102.010,0	67,8	3.822.240,0	77,7	8.542.590,0	53,8	1.513.250,0	87,6
2008	4.809.430,0	22,9	9.404.150,0	63,1	3.725.190,0	75,8	8.234.930,0	51,9	1.493.770,0	86,5
2009	4.006.880,0	19,1	8.701.210,0	58,4	3.646.960,0	74,2	7.696.650,0	48,5	1.431.120,0	82,9
2010	3.685.760,0	17,5	8.500.370,0	57,0	3.614.760,0	73,5	7.648.970,0	48,2	1.441.970,0	83,5
2011	3.581.300,0	17,0	8.189.730,0	55,0	3.584.500,0	72,9	7.262.400,0	45,8	1.339.340,0	77,6
2012	3.158.480,0	15,0	7.869.350,0	52,8	3.571.470,0	72,6	7.095.560,0	44,7	1.336.910,0	77,4
2013	2.734.880,0	13,0	7.514.780,0	50,4	3.571.760,0	72,7	6.874.490,0	43,3	1.314.470,0	76,1
2014	2.540.260,0	12,1	7.253.620,0	48,7	3.594.520,0	73,1	6.649.600,0	41,9	1.199.310,0	69,4
2015	2.440.410,0	11,6	7.113.550,0	47,7	3.635.460,0	73,9	6.615.750,0	41,7	1.210.760,0	70,1
2016	2.068.400,0	9,8	6.899.690,0	46,3	3.633.290,0	73,9	6.571.950,0	41,4	1.190.330,0	68,9
2017	2.029.410,0	9,7	6.751.610,0	45,3	3.647.290,0	74,2	6.634.580,0	41,8	1.190.870,0	69,0
2018	1.884.460,0	9,0	6.475.440,0	43,5	3.613.460,0	73,5	6.498.640,0	40,9	1.146.380,0	66,4
2019	1.649.110,0	7,8	6.140.700,0	41,2	3.532.320,0	71,9	6.408.660,0	40,4	1.111.440,0	64,4
	92,16%	92,16%	58,79%	58,79%	28,15%	28,15%	59,62%	59,62%	35,64%	35,64%

## 1.6 Σκοπός εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βιβλιογραφική ανασκόπηση της κατάστασης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σήμερα, η περιγραφή των επιμέρους στοιχείων που συμβάλουν σε αυτή καθώς επίσης και η ανασκόπηση των μεθόδων για την καταπολέμηση της.

Τα βασικά στοιχεία, που απαρτίζουν τους καταλυτικούς παράγοντες για την επιδείνωση της κατάστασης σήμερα στην ατμόσφαιρα, είναι τα αέρια του θερμοκηπίου, τα αιωρούμενα σωματίδια καθώς και η όξινη βροχή. Όλα τα ανωτέρω αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια όπου παρατίθενται ορισμοί, γενικά στοιχεία καθώς επίσης και στατιστικά στοιχεία.

Θα διερευνηθεί επίσης το γεγονός ότι για το έτος 2019 οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>2,5</sub> είναι υψηλότερες στις αστικές περιοχές της Βουλγαρίας (19,6 μg/m<sup>3</sup>) και της Πολωνίας (19,3 μg/m<sup>3</sup>), ακολουθούμενες από τη Ρουμανία (16,4 μg/m<sup>3</sup>), ενώ καλύτερη ποιότητα αέρα παρατηρείται στις αστικές περιοχές της Εσθονίας (4,8 μg/m<sup>3</sup>), της Φινλανδίας (5,1 μg/m<sup>3</sup>) και της Σουηδίας (5,8 μg/m<sup>3</sup>). Ανατρέχοντας στα δεδομένα εκπομπών από το Ευρωπαϊκό Μητρώο Έκλυσης και Μεταφοράς Ρύπων (E-PRTR), στα στατιστικά στοιχεία της Eurostat, αλλά και στη διεθνή βιβλιογραφία για κάθε μία από τις παραπάνω Ευρωπαϊκές χώρες θα προσπαθήσουμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τα επίπεδα ρύπανσης που επικρατούν εκεί, την προέλευση της ρύπανσης αλλά και για τη συμβολή του βιομηχανικού τομέα σε αυτή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 Αιωρούμενα σωματίδια - Εισαγωγή

Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM), ή αλλιώς «σωματιδιακή ρύπανση» είναι ένα σύνθετο μείγμα μικροσκοπικών ουσιών που αιωρούνται στον αέρα. Ο Li et al. [13] ορίζουν τα αιωρούμενα σωματίδια του περιβάλλοντος ως *«περιβαλλοντικό παράγοντα που σχετίζεται με αυξημένη αναπνευστική νοσηρότητα και θνησιμότητα»*. Τα συστατικά της σωματιδιακής ρύπανσης, σύμφωνα με την Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας των Ηνωμένων Πολιτειών, περιλαμβάνει οξέα (όπως νιτρικά και θειικά άλατα), οργανικές χημικές ουσίες, μέταλλα και σωματίδια εδάφους ή σκόνης.

Οι πρωτογενείς πηγές σωματιδίων είναι είτε φυσικές είτε ανθρωπογενείς. Τέτοιες πηγές μπορεί να είναι: δραστηριότητες όπως οι κατασκευές, η καύση ορυκτών καυσίμων, η καύση ξυλείας (πυρκαγιές), η γεωργία, η βιομηχανία και η εξόρυξη. Σύμφωνα με τους Kamra και Castanas [14], η αυξημένη καύση ορυκτών καυσίμων τον περασμένο αιώνα είναι υπεύθυνη για αλλαγές στην ατμοσφαιρική σύνθεση των αερίων ρύπων. Οι δραστηριότητες εξόρυξης γενικά δημιουργούν αιωρούμενα σωματίδια από την ανατίναξη, την εκσκαφή και τη φόρτωση, την ανάσυρση, τη σύνθλιψη και τη λείανση ορυκτών πετρωμάτων.

Πολυάριθμες επιδημιολογικές μελέτες έχουν δείξει δυσμενείς επιπτώσεις της έκθεσης σε σωματίδια στην ανθρώπινη υγεία. Αν και τα υγιή άτομα μπορεί να εμφανίσουν προσωρινά συμπτώματα από την έκθεση σε υψηλά επίπεδα σωματιδιακής ρύπανσης, τα άτομα με καρδιακές ή πνευμονικές παθήσεις, τα παιδιά και οι μεγαλύτεροι ενήλικες είναι πιο πιθανό να επηρεαστούν από την έκθεση στη σωματιδιακή ρύπανση (US EPA, 2015). Οι Li et al. [13] αναφέρουν τη σημαντική επίδραση των PM περιβάλλοντος στο πνευμονικό σύστημα ως έξαρση φλεγμονής, ειδικά σε ευαίσθητα άτομα. Οι van Berlo et al. [15] υποδεικνύουν ότι η έκθεση με εισπνοή σε σωματίδια μπορεί να οδηγήσει ή να επιδεινώσει διάφορες ασθένειες που δεν περιορίζονται στους πνεύμονες αλλά μπορούν να επεκταθούν στο καρδιαγγειακό σύστημα και σε άλλα όργανα και ιστούς. Οι Pope et al. [16] έχουν δείξει ότι όσοι ζουν σε λιγότερο μολυσμένες πόλεις ζουν περισσότερο από εκείνους που ζουν σε πιο μολυσμένες πόλεις. Οι

Mechler et al. [17] επιβεβαιώνουν τα ευρήματα των Pope et al.[16] σχετικά με τη σχέση μεταξύ του προσδόκιμου ζωής και της σωματιδιακής ρύπανσης και εισάγουν μια μεθοδολογία για την εκτίμηση του μειωμένου προσδόκιμου ζωής λόγω της σωματιδιακής ρύπανσης στην Ευρώπη. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των PM αναφέρεται ότι περιλαμβάνουν αισθητικές βλάβες, εξασθένηση της ορατότητας και μόλυνση του περιβάλλοντος.

Για τον μετριασμό των επιπτώσεων της σωματιδιακής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, χρησιμοποιούνται αρκετοί τεχνολογικοί μηχανισμοί ελέγχου εκπομπών. Οι τεχνολογίες αφαίρεσης σωματιδίων που έχουν εφαρμοστεί στον έλεγχο των εκπομπών περιλαμβάνουν αδρανειακούς διαχωριστές, ηλεκτροστατικούς κατακρημνιστές (ξηρούς), πλυντρίδες και σακκόφιλτρα. Οι Cooper and Alley [18] περιγράφουν διεξοδικά βιομηχανικές διατάξεις για τον έλεγχο των σωματιδίων. Οι μέθοδοι ελέγχου σωματιδίων για δραστηριότητες εξόρυξης και κατασκευής μπορεί να περιλαμβάνουν ανεμοφράκτες, ελαχιστοποίηση της διαταραχής του εδάφους, χημική επεξεργασία και ψεκάσμο νερού.

### **2.1.1 Τι είναι τα αιωρούμενα σωματίδια**

Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) είναι ένα μείγμα αιωρούμενων μικροσκοπικών στερεών σωματιδίων και υγρών σταγονιδίων. Αυτά τα σωματίδια, κυρίως γύρη, τέφρα, αιθάλη, μέταλλα, σκόνη, βρωμιά, και καπνός, έχουν ποικίλα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά με βάση την πηγή τους. Τα κύρια συστατικά του PM είναι τα θειικά άλατα, τα νιτρικά άλατα, ο στοιχειακός άνθρακας, ο οργανικός άνθρακας και το υλικό του γεωφλοιού. Χημικές ενώσεις και ουσίες όπως αμμώνιο, ανόργανα ιόντα, μέταλλα, νερό που συνδέεται με σωματίδια, πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH) και βιολογικά συστατικά (π.χ. αλλεργιογόνα και μικροβιακές ενώσεις) βρίσκονται επίσης στην κατηγορία PM.

Τα PM διατίθεται σε διάφορα μεγέθη. Η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (US EPA) κατηγοριοποιεί τα PM σε δύο κύριες ομάδες: χονδρόκοκκα (coarse mode) και λεπτόκοκκα (fine mode). Τα χονδροειδή (χονδρόκοκκα) σωματίδια (PM<sub>10</sub>) έχουν αεροδυναμική διάμετρο μεγαλύτερη από 2,5 μm και μικρότερα από 10 μm. Τέτοια σωματίδια μπορεί να βρεθούν κοντά σε δρόμους και βιομηχανίες με σκόνη. Τα λεπτά σωματίδια (PM<sub>2,5</sub>) έχουν διάμετρο 2,5 μm και μικρότερα, και μπορούν να βρεθούν στον καπνό και την ομίχλη, για παράδειγμα.

Η ΕΕ στις σχετικές οδηγίες αναφέρει τους παρακάτω ορισμούς:

“ *PM10* νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους το οποίο συγκρατεί το 50% των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου  $10\mu\text{m}$ ”

“*PM2.5* νοούνται τα σωματίδια που διέρχονται δια στομίου επιλεγέντος μεγέθους το οποίο συγκρατεί το 50% των σωματιδίων αεροδυναμικής διαμέτρου  $2.5\mu\text{m}$ ”.

Τα *PM2.5* χωρίζονται με τη σειρά τους σε δύο κατηγορίες.

### **I. Κατηγορία πυρήνα (nucleation mode)**

Μέγεθος 0.01 έως  $0.1\mu\text{m}$ . Τα σωματίδια αυτά προέρχονται άμεσα από πηγές καύσης ή είναι συμπυκνώματα προϊόντων καύσης, έχουν μικρό χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα γιατί συσσωματώνονται μεταξύ τους και σχηματίζουν σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου. Η ανάπτυξη του μεγέθους των σωματιδίων σε  $0.1\text{nm}$ , σε συνήθεις συνθήκες αστικής ρύπανσης, απαιτεί λιγότερο από μια μέρα.

Η υποκατηγορία πυρήνα χωρίζεται στις επόμενες δύο υποομάδες :

*Μεταβατικά σωματίδια πυρήνα* (Aitken mode particles) με μέγεθος πάνω από τα  $15\text{nm}$ .

*Υπερλεπτόκοκκα σωματίδια πυρήνα* (Ultra-fine Nuclei) με μέγεθος κάτω από τα  $15\text{nm}$

### **II. Κατηγορία συσσώρευσης (accumulation range)**

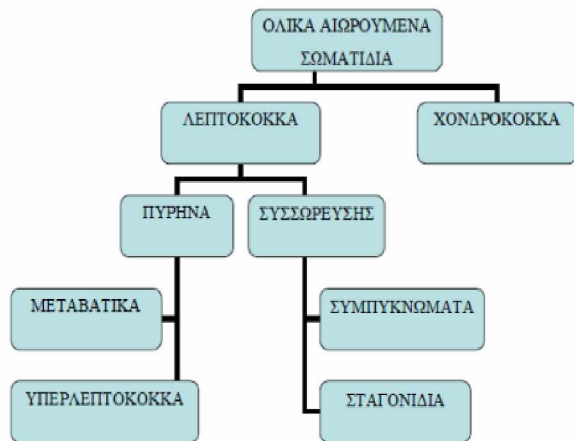
Μέγεθος 0.1 έως  $2.5\mu\text{m}$ . Τα σωματίδια αυτά δημιουργούνται από συσσωματώσεις μικρότερων σωματιδίων (υποκατηγορίας πυρήνα) και από συμπυκνώσεις επιπρόσθετου υλικού στις συσσωματώσεις αυτές.

Τα σωματίδια της κατηγορίας συσσώρευσης χωρίζονται σε δυο υποομάδες:

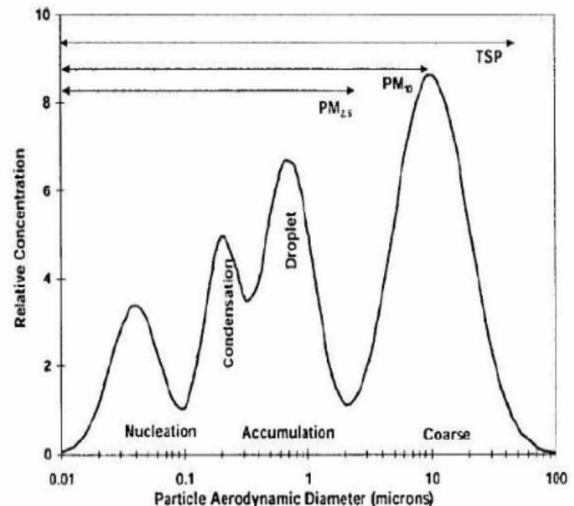
*Συμπυκνώματα* (condensation mode) Πρόκειται για τα μικρότερα σωματίδια της κατηγορίας με μέγεθος έως  $0.2\mu\text{m}$ .

*Σταγονίδια* (droplet mode) με μέγεθος από  $0.2\mu\text{m}$  έως  $0.7\mu\text{m}$ .

Τα σωματίδια κατηγορίας συσσώρευσης έχουν χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα από 7 έως 30 ημέρες.



**Εικόνα 2.1:**Κατηγορίες με βάση το μέγεθος αιωρούμενων σωματιδίων



**Εικόνα2.2:**Τυπική κατανομή PM κατά μέγεθος

Στην ατμόσφαιρα τα μεγαλύτερα σωματίδια, π.χ. εκείνα με διάμετρο έως 10 $\mu\text{m}$ , είναι δυνατόν να μείνουν σε αιώρηση 10 με 20 ώρες και ταξιδέψουν έως 20 με 30 χιλιόμετρα πριν την καθίζησή τους. Τα μικρότερα σωματίδια (διαμέτρου 0.1 έως 1 $\mu\text{m}$ ) μπορούν να απομακρυνθούν έως και αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα από το σημείο εκπομπής τους και να μείνουν σε αιώρηση για μεγάλους χρόνους (έως και 1 έτος).

Ένας άλλος τρόπος κατάταξης των σωματιδίων είναι με βάση την διεισδυτικότητά τους στον ανθρώπινο οργανισμό, η οποία είναι ένα θέμα που έχει απασχολήσει έντονα την επιστημονική κοινότητα και που ακόμη μελετάται. Έτσι έχουμε τις εξής υποομάδες των αιωρούμενων σωματιδίων[51]:

**Εισπνεύσιμα σωματίδια** (inhalable particles) είναι τα αιωρούμενα σωματίδια που εισέρχονται στο ανώτερο σύστημα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας). Αυτή η υποομάδα περιλαμβάνει σωματίδια με διαμέτρους μικρότερες από 10 $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>), καθώς η πλειοψηφία των σωματιδίων με διαμέτρους μεγαλύτερες από 10 $\mu\text{m}$  κατακρατούνται στην στοματική και τη ρινική κοιλότητα

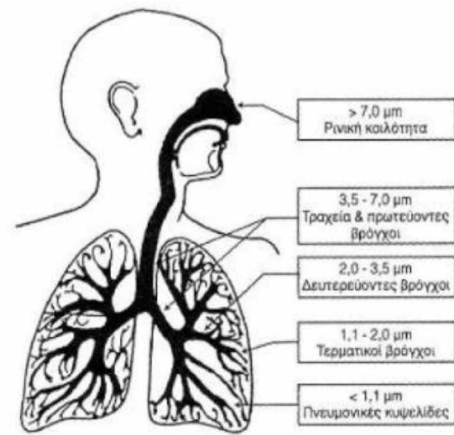
**Θωρακικά σωματίδια** (thoracic particles) είναι τα σωματίδια (κλάσμα των PM<sub>10</sub>) που καταφέρνουν να διαπερνούν το ανώτερο τμήμα της αναπνευστικής οδού (ρινοφάρυγγας) και συνήθως έχουν μέγεθος μικρότερο των 7 $\mu\text{m}$ .



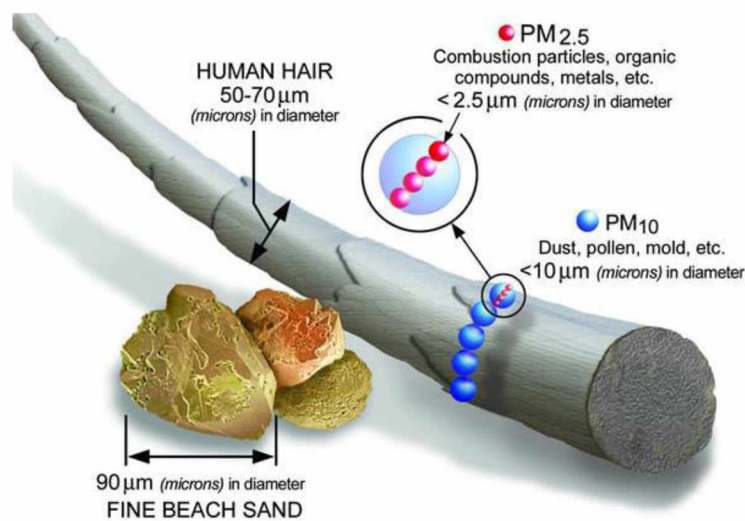
**Αναπνεύσιμα σωματίδια** (respirable particles ) είναι τα σωματίδια με μέγεθος αεροδυναμικής διαμέτρου έως περίπου 2.5 $\mu\text{m}$  και είναι τα πιο σημαντικά από άποψη επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία γιατί σωματίδια αυτά καταφέρνουν γενικά να διεισδύσουν έως τα βάθη των πνευμόνων.

Τα σωματίδια μπορούν να εκπέμπονται απευθείας από πηγές όπως δασικές πυρκαγιές (πρωτογενείς πηγές) ή δευτερογενείς πηγές ως αποτέλεσμα ατμοσφαιρικών αντιδράσεων.

Δευτερεύοντα σωματίδια μπορούν να σχηματιστούν όταν τα αέρια που εκπέμπονται από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, βιομηχανίες και αυτοκίνητα υφίστανται χημική αντίδραση στην ατμόσφαιρα. Η εικ. 2.4 είναι μια σύγκριση μεγέθους μεταξύ PM και ανθρώπινης τρίχας.



Εικόνα 2.3 : Διεισδυτικότητα αιωρούμενων σωματιδίων στον ανθρώπινο οργανισμό ανάλογα με το μέγεθός τους



Εικ. 2.4 Σωματίδια και Άνθρωπος [27]

### 2.1.2 Πηγές αιωρούμενων σωματιδίων

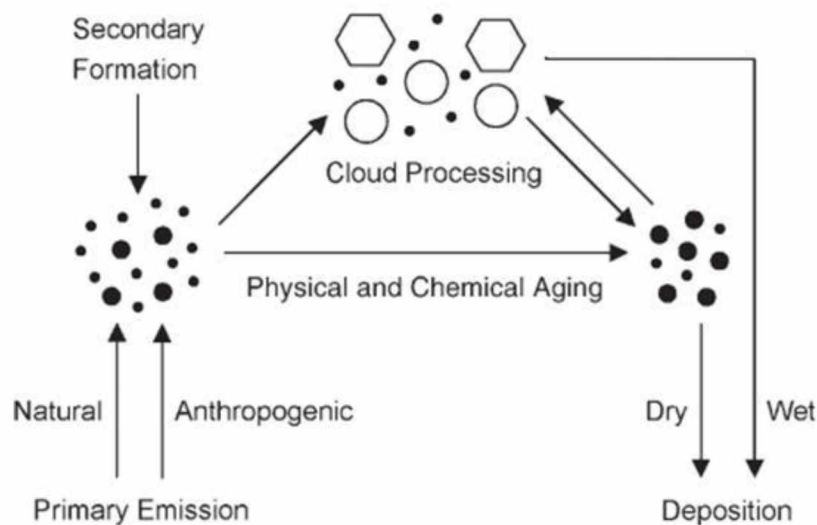
Τα αιωρούμενα σωματίδια προέρχονται από μεγάλη ποικιλία πηγών (βλ. Πίνακα 2.1), αλλά γενικά συνδέονται με την καύση υλικών ή με οποιεσδήποτε δραστηριότητες δημιουργούν σκόνη. Οι πηγές παραγωγής ταξινομούνται ευρέως σε φυσικές πηγές και σε ανθρωπογενείς.

**Πίνακας 2.1** Εκτιμήσεις παγκόσμιων εκπομπών για μεγάλες κατηγορίες PM [27]

Πηγή	Ροή (Tgyr-1)	
Φυσικά	Κύρια	
	Μεταλλική Σκόνη	
	0.1 – 1.0 μm	48
	1.0 – 2.5 μm	260
	2.5 – 5.0 μm	609
	5.0 – 10.0 μm	573
	0.1 – 10.0 μm	1490
	Θαλασσινό αλάτι	10 100
	Ηφαιστειακή σκόνη	30
	Βιολογικά σωματίδια	50
	Δευτερεύοντα	
	Θεικό από DMS (θειικός διμεθυλεστέρας)	12,4
	Θεικό από ηφαιστειακό SO <sub>2</sub>	20
	Οργανικό αεροζόλ από βιογενή VOC	11,2
Ανθρωπογενή	Κύρια	
	Βιομηχανική σκόνη	100
	Μαύρος άνθρακας	12
	Οργανικό αεροζόλ	81
	Δευτερεύοντα	
	Θεικό από Sox	48,6
	Νιτρικό από Nox	21,3

Αυτές οι πηγές μπορεί να εκπέμπουν PM απευθείας στο περιβάλλον ή να εκπέμπουν πρόδρομες ουσίες όπως το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>), το διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs), οι οποίες μετασχηματίζονται μέσω της ατμοσφαιρικής χημικής αντίδρασης σε PM.

Σύμφωνα με τους Pöschl [19], τα εκπεμπόμενα σωματίδια ομαδοποιούνται σε πρωτογενή σωματίδια (δηλαδή άμεση εκπομπή στην ατμόσφαιρα) και δευτερεύοντα σωματίδια (δηλαδή με μετασχηματισμό των εκπεμπόμενων πρόδρομων αερίων). Πρωτογενή σωματίδια από ορυκτή σκόνη, θαλάσσιο άλας, καύση βιομάζας, ηφαιστειακές εκρήξεις, αιωρούμενη οδική σκόνη που προκαλείται από τον άνεμο ή την κυκλοφορία οχημάτων, την καύση ορυκτών καυσίμων, το έδαφος και βιολογικά υλικά (θραύσματα φυτών, μικροοργανισμοί, κόκκοι γύρης κ.λπ.) εκπέμπονται άμεσα ως υγρά ή στερεά από την πηγή, ενώ δευτερογενή σωματίδια όπως τα θειικά και τα νιτρικά (Εικ. 2.5) σχηματίζονται με τη μετατροπή αερίου σε σωματίδιο στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα.: 2.5 Ατμοσφαιρικός κύκλος PM [27]

Ο σχηματισμός δευτερογενών σωματιδίων προκύπτει από την ατμοσφαιρική γήρανση (φυσικές και χημικές αλληλεπιδράσεις και μετασχηματισμοί) των αιωρούμενων σωματιδίων. Τα σωματίδια υφίστανται αλλαγές στη χημική σύνθεση, το μέγεθος και τη δομή μέσω της πήξης, της αναδιάρθρωσης, της πρόσληψης αερίου και της χημικής αντίδρασης. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται στα σύννεφα. Η συμβολή αυτών των πηγών στα συνολικά ατμοσφαιρικά PM είναι καλά τεκμηριωμένη, με τις ανθρωπογενείς πηγές να συμβάλλουν σε μεγαλύτερο ποσοστό σε σύγκριση με τις φυσικές πηγές

### ➤ Φυσικές Πηγές

Οι φυσικές πηγές PM περιλαμβάνουν υπολείμματα εδάφους και πετρωμάτων, ηφαιστειακή δράση, θαλάσσιο ψεκασμό, καύση βιομάζας, βιογενείς εκπομπές και αντιδράσεις μεταξύ των φυσικών εκπομπών αερίων. Η χημική σύνθεση και η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων εξαρτώνται από τις πηγές.

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (EEA) το 2008 και το 2009 διαπίστωσε ότι παρόλο που οι ανθρώπινες δραστηριότητες συμβάλλουν πάρα πολύ στις εκπομπές PM, οι φυσικές πηγές εκπέμπουν επίσης σημαντικό μέρος των ατμοσφαιρικών ρύπων που συμβάλλουν στην έκθεση των ευρωπαίων πολιτών και του οικοσυστήματος σε κακή ποιότητα αέρα. Ο οργανισμός εντόπισε μια σειρά από φυσικές πηγές που συμβάλλουν στην παρουσία PM στα κράτη μέλη. Αυτά περιλαμβάνουν σωματίδια σκόνης της ερήμου που μεταφέρει ο αέρας (αφρικανική σκόνη), αερολύματα θαλάσσιου ψεκασμού, σωματίδια ηφαιστειακής σκόνης και σωματίδια δασικής πυρκαγιάς. Η κύρια φυσική πηγή που συνέβαλε στις υπερβάσεις οριακών

συγκεντρώσεων ήταν η μεταφορά φυσικών σωματιδίων (σκόνη της Σαχάρας) από ξηρές περιοχές εκτός των κρατών μελών, ακολουθούμενη από θαλάσσιο ψεκασμό και δασικές πυρκαγιές.

### ➤ **Ανθρωπογενείς Πηγές**

Οι ανθρωπογενείς πηγές εκπομπής PM περιλαμβάνουν την καύση ορυκτών καυσίμων, τα εργοτάξια, εξορυκτικές εργασίες, βιομηχανικές και γεωργικές δραστηριότητες, μεταφορές (διάβρωση του οδοστρώματος από την οδική κυκλοφορία και τριβή φρένων και ελαστικών). Οι ανθρωπογενείς πηγές είναι εξαιρετικά μεταβλητές και προκαλούν μεγάλη ανησυχία σε περιβαλλοντικούς οργανισμούς, ερευνητές, κυβερνήσεις και γενικά τον ανθρώπινο πληθυσμό, καθώς συνεισφέρουν μεγάλο μέρος των ατμοσφαιρικών ρύπων. Αν και οι κύριες εκπομπές ανθρωπογενών PM γενικά αποδίδονται σε καυσαέρια που παράγονται από βιομηχανικές ή κινητές πηγές, οι ανεξέλεγκτες εκπομπές από γεωργικές πρακτικές, η κυκλοφοριακή συμφόρηση στα μεγάλα αστικά κέντρα, η κατασκευή κτιρίων ή βιομηχανικών χώρων αποτελούν επίσης σημαντικές πηγές.

Σύμφωνα με τους Fuzzi et al. [20], τα σωματίδια σκόνης που προέρχονται από εξορυκτικές και κατασκευαστικές δραστηριότητες είναι τα κυρίαρχα PM περιβάλλοντος που καλύπτουν σημαντικό ποσοστό του πλανήτη. Ωστόσο, το 75% των παγκόσμιων σωματιδίων σκόνης που εκπέμπονται αποδίδονται σε φυσικές εκπομπές, ενώ οι ανθρωπογενείς εκπομπές αντιπροσωπεύουν το 25%. Η κυκλοφορία των οχημάτων είναι μια από τις σημαντικότερες ανθρωπογενείς πηγές PM. Αυτή περιλαμβάνει την εξάτμιση του οχήματος, τη φθορά των εξαρτημάτων του οχήματος όπως ελαστικά και φρένα, τη σκόνη που προκαλείται από το δρόμο. Η τριβή του οδοστρώματος μπορεί να εκτοξεύσει ανόργανα σωματίδια που μπορεί να περιέχουν κάδμιο (Cd), αλουμίνιο (Al), πυρίτιο (Si), ασβέστιο (Ca) κάλιο (K) και νάτριο (Na), ενώ μέταλλα όπως ο μόλυβδος (Pb), ο χαλκός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn) και το αντιμόνιο (Sb) μπορούν να ανιχνευθούν στα σωματίδια φθοράς των φρένων και των ελαστικών. Τα σωματίδια είναι αερομεταφερόμενα και μπορούν να ταξιδέψουν για μεγάλες αποστάσεις λόγω των μικρών μεγεθών τους. Οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων μπορεί να ποικίλλουν ανά ώρα ή ημέρα λόγω μεταβολών στο κυκλοφοριακό φορτίο των οχημάτων αλλά και στην ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου ή στην ατμοσφαιρική αστάθεια.

Γενικά, οι εκπομπές σωματιδίων του περιβάλλοντος έχουν αποδοθεί σε υπαίθριες δραστηριότητες. Εσωτερικές δραστηριότητες όπως το μαγείρεμα, το σκούπισμα με ηλεκτρική σκούπα, το κάπνισμα, το περπάτημα στα χαλιά και τα προϊόντα οικιακής χρήσης και ο

εξοπλισμός γραφείου (υπολογιστές, εκτυπωτές και φωτοτυπικά μηχανήματα, κ.λπ.) έχουν επίσης βρεθεί ότι προκαλούν εκπομπές PM. Ωστόσο, οι εκπομπές σωματιδίων από εσωτερικές πηγές είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με εκείνες του εξωτερικού περιβάλλοντος. Παράγοντες σχεδιασμού σπιτιού (υλικά κατασκευής του σπιτιού, μέγεθος και διάταξη δωματίων και αριθμός παραθύρων για αερισμό κτλ) επηρεάζουν τις διαδικασίες εσωτερικής εκπομπής PM.

### **2.1.3 Επίδραση της σωματιδιακής ρύπανσης**

Η ρύπανση από σωματίδια είναι γνωστό ότι παρουσιάζει αρκετές δυσμενείς συνέπειες τόσο για τους ζωντανούς οργανισμούς όσο και για το περιβάλλον φυσικό ή αστικό. Αυξάνεται ο αριθμός των ενδείξεων πολυάριθμων δυσμενών επιπτώσεων ρύπανσης PM στην ανθρώπινη υγεία, στα φυτά και ζώα και στην ατμόσφαιρα. Τα αιωρούμενα σωματίδια επηρεάζουν επίσης την ορατότητα, αλλάζουν τις τοπικές καιρικές συνθήκες και υποβαθμίζουν την αισθητική αξία των κτιριακών κατασκευών και των μνημείων.

#### **➤ Επίδραση στην υγεία**

Η σωματιδιακή ρύπανση έχει συνδεθεί με πολλά περιστατικά οξείας νόσησης και θανάτων. Τα στοιχεία στη βιβλιογραφία δείχνουν ότι η έκθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις PM είναι υπεύθυνη για συχνή νοσηρότητα και εισαγωγές στο νοσοκομείο, καρδιαγγειακές παθήσεις, αναπνευστικές διαταραχές, αθηροσκλήρωση και θνησιμότητα.

Τα σημαντικότερα επεισόδια περιλαμβάνουν: την περίπτωση της κοιλάδας Meuse στο Βέλγιο το 1930, όπου οι επιβλαβείς εκπομπές από τοπικά εργοστάσια σχημάτισαν μια πυκνή ομίχλη πάνω από την κοιλάδα Meuse, που οδήγησε σε οξείες αναπνευστικές διαταραχές και θάνατο 60 ατόμων μέσα σε τρεις ημέρες. Η αιθαλομίχλη Donora το 1948 είχε ως αποτέλεσμα 20 θανάτους και περισσότερες από 6.000 περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης νοσοκομείων και η καταστροφή της αιθαλομίχλης του Λονδίνου που σημειώθηκε τον Δεκέμβριο του 1952 στο Λονδίνο, με αποτέλεσμα περισσότερους από 4.000 θανάτους μέσα σε τρεις εβδομάδες και περίπου 12.000 θανάτους έως τον Φεβρουάριο του 1953. Οι Anderson et al. [21] αποδίδουν κατ' εκτίμηση 800.000 πρόωρους θανάτους ετησίως στην ατμοσφαιρική ρύπανση από PM.

Τα σωματίδια του περιβάλλοντος με αεροδυναμική διάμετρο  $\leq 10 \mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>) βρέθηκε ότι δημιουργούν επιβλαβή ζητήματα για την ανθρώπινη υγεία. Υποδεικνύεται ως σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στην αυξημένη θνησιμότητα και περιπτώσεις νοσηρότητας που καταγράφονται σε αστικά περιβάλλοντα και αγροτικές περιοχές.

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας το έτος 2000 αναφέρει ότι «τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με την μακροχρόνια και βραχυχρόνια έκθεση του πληθυσμού σε σωματίδια  $PM_{10}$  και  $PM_{2.5}$  δεν επιτρέπουν τον καθορισμό συγκεκριμένων οριακών τιμών συγκέντρωσης, κάτω από τις οποίες η έκθεση σε σωματιδιακή ρύπανση δεν παρουσιάζει καμία επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία». Γενικά, το αναπνευστικό και το καρδιαγγειακό σύστημα υφίστανται κατά κύριο λόγο δυσμενείς επιπτώσεις από την έκθεση σε PM. Μελέτες δείχνουν επίσης ότι τα PM σχετίζονται με την αθηροσκλήρωση που οδηγεί σε δυσμενείς επιπλοκές κατά τη γέννηση. Επίσης, τα παιδιά, οι ηλικιωμένοι και τα άτομα με χρόνιες παθήσεις του αναπνευστικού βρέθηκε ότι είναι πιο ευαίσθητα και ευάλωτα στην έκθεση στα PM. Τα παιδιά που εκτίθενται σε PM είναι γνωστό ότι αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην ανάπτυξη και λειτουργία των πνευμόνων που τελικά καθυστερούν την ανάπτυξη τους. Οι Delfino et al. [22] στην έρευνά τους για ασθματικά παιδιά, συνειδητοποίησαν ότι η έκθεση στην ατμοσφαιρική ρύπανση με PM επιδεινώνει την ασθματική κατάσταση τους.

Οι Boldo et al. [23] μελέτησαν τον αντίκτυπο της μακροχρόνιας έκθεσης σε σωματίδια  $<2,5 \mu m$  ( $PM_{2,5}$ ) στην ανθρώπινη υγεία σε σχέση με τη θνησιμότητα και το προσδόκιμο ζωής στις ευρωπαϊκές πόλεις. Η μελέτη έδειξε ότι εκτιμάται ότι 16.926 πρόωροι θάνατοι συμπεριλαμβανομένων 11.612 θανάτων από καρδιοπνευμονικό και 5.314 θανάτους από καρκίνο του πνεύμονα οφείλονταν σε μακροχρόνια ετήσια έκθεση. Αυτοί οι θάνατοι βρέθηκαν να αποτρέπονται με  $15 \mu g/m^3$  μείωση του επιπέδου έκθεσης, ενώ παράλληλα βελτιώνεται το προσδόκιμο ζωής κατά ένα μήνα έως δύο ή περισσότερα χρόνια. Οι Miller et al. [24] μελέτησαν επίσης 65.000 μετεμμηνοπαυσιακές γυναίκες χωρίς προηγούμενη καρδιαγγειακή νόσο σε 36 μητροπολιτικές περιοχές των ΗΠΑ για 6 χρόνια. Ο κίνδυνος εμφάνισης καρδιαγγειακών επεισοδίων και η καρδιαγγειακή θνησιμότητα βρέθηκε ότι αυξήθηκαν κατά 24% και 76% αντίστοιχα για μια αύξηση  $10 \mu g/m^3$  στα  $PM_{2,5}$

### ➤ Περιβαλλοντική Επίδραση

Οι επιπτώσεις της ρύπανσης από PM συνεχίζουν να απειλούν την αρμονική ύπαρξη ζωντανών οργανισμών και του περιβάλλοντος τους. Σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στην καταπολέμηση των επιπτώσεων στην υγεία από την έκθεση στα PM παρά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της. Πρόσφατα, ωστόσο, οι επιπτώσεις της ρύπανσης από PM στα υδάτινα και χερσαία οικοσυστήματα έχουν κερδίσει την προσοχή. Ορισμένες σημαντικές

περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ρύπανσης που αναφέρεται ότι προκλήθηκαν από PM είναι η εναπόθεση οξέος, η κακή ορατότητα και το όζον. Η εναπόθεση οξέος είναι συσσώρευση όξινων ενώσεων στο έδαφος, αφού έχουν υποστεί χημική αντίδραση και καθίζηση στην ατμόσφαιρα. Υπάρχουν δύο μορφές εναπόθεσης οξέος, υγρή εναπόθεση (χιόνι, βροχή και ομίχλη) και ξηρή εναπόθεση (καθίζηση αερίων και σωματιδίων από την ατμόσφαιρα). Σύμφωνα με τους Kucera και Fitz [25], η ζημιά που προκαλείται από την εναπόθεση οξέος μπορεί να ταξινομηθεί σε ατμοσφαιρική διάβρωση ως αποτέλεσμα υγρής και ξηρής εναπόθεσης και διάβρωση νερού και εδάφους που προκύπτει από την οξίνιση του εδάφους και του νερού.

Επίσης τα αιωρούμενα σωματίδια μειώνουν τη χρησιμότητα και την αισθητική αξία των δομικών υλικών (π.χ. τα σωματίδια στις επιφάνειες μπορούν να καταλύσουν τη χημική αποικοδόμηση των υλικών όταν έρθουν σε επαφή με την υγρασία, τον αέρα και τη θερμότητα). Τα σωματίδια χρησιμεύουν ως θέση πυρήνων για όξινα αέρια όπως το SO<sub>2</sub> και το NO<sub>2</sub>, αυξάνοντας την αεροδυναμική τους διάμετρο και τις ταχύτητες καθίζησης, και καταλήγοντας σε αυξημένη αισθητική επίδραση. Διάφορες μελέτες έχουν επιβεβαιώσει ότι η έκθεση σε PM που σχηματίζουν οξύ επιδεινώνει τη διάβρωση μετάλλων πέρα από τον κανονικό ρυθμό διάβρωσης. Η μείωση της διάρκειας ζωής των χρωμάτων λόγω ρύπανσης, αποχρωματισμών, απώλειας γυαλάδας και απώλειας πάχους του στρώματος μεμβράνης βαφής από σωματίδια που σχηματίζουν οξύ συζητείται στη βιβλιογραφία. Υπάρχουν πολυάριθμες αναφερόμενες δυσμενείς επιπτώσεις της εναπόθεσης οξέος στα χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα. Αυτές περιλαμβάνουν επιπτώσεις στο έδαφος, τα δάση, τα ζώα, τα ποτάμια, τα ρέματα, τις λίμνες και τους υδρόβιους οργανισμούς.

Μια άλλη καλά τεκμηριωμένη σημαντική επίπτωση της ρύπανσης από PM είναι η μείωση της ορατότητας. Τα λεπτά σωματίδια (PM<sub>2,5</sub>) που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα έχουν σημειωθεί ότι μειώνουν την ορατότητα μέσω της σκέδασης και της απορρόφησης της ορατής ακτινοβολίας. Οι Tao et al. [26] εξέτασε τη συσχέτιση μεταξύ της ορατότητας και της χημικής σύνθεσης των PM<sub>2,5</sub> στο Guangzhou της Κίνας. Η μελέτη έδειξε ότι το θειικό άλας είναι το κύριο στοιχείο που επηρεάζει τόσο τη σκέδαση του φωτός όσο και την ορατότητα. Η μέση ποσοστιαία συμβολή των στοιχείων που υποβαθμίζουν την ορατότητα στον συντελεστή σκέδασης φωτός ήταν 40% για τα θειικά, 16% για τα νιτρικά, 22% για τα οργανικά και 22% για τον στοιχειακό άνθρακα. Έτσι, μια μείωση της συγκέντρωσης αιωρούμενων θειικών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ορατότητα.

Ο μαύρος άνθρακας (BC) έχει αναδειχθεί ως ένας σημαντικός βραχύβιος παράγοντας του κλίματος. Λόγω των ιδιοτήτων απορρόφησης φωτός, τα σωματίδια μαύρου άνθρακα μπορεί να σκουρύνουν την επιφάνεια του χιονιού/πάγου, μειώνοντας τη λευκαύγεια τους (το μέτρο της ανακλαστικότητας μιας επιφάνειας, ο λόγος της ανακλώμενης προς την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στην επιφάνεια), να επηρεάσουν την ενεργειακή ισορροπία και να οδηγήσουν περαιτέρω σε επιτάχυνση της τήξης της κρυόσφαιρας (π.χ. παγετώνες, χιονοκάλυψη και θαλάσσιο πάγο)[56]. Αποτέλεσμα της τήξης αυτής είναι να αυξηθεί κατά  $27 \pm 22$  χιλιοστά η παγκόσμια μέση στάθμη της θάλασσας από το 1961 έως το 2016 [57].

Καθώς οι πάγοι της Αρκτικής λιώνουν, συναντάται όλο και πιο έντονη ναυσιπλοΐα στην περιοχή. Σύμφωνα με την Επιτροπή για το Σύστημα Θαλάσσιων Μεταφορών, η ναυτιλία στα χωρικά ύδατα των ΗΠΑ της Αρκτικής θα πενταπλασιαστεί έως το 2025 καθιστώντας πολύ πιθανό ότι οι εκπομπές μαύρου άνθρακα από τα πλούμια των πλοίων που καίνε βαρέα ναυτικά καύσιμα θα αυξηθούν δραματικά στο μέλλον.

Στον πίνακα που ακολουθεί (2.2) βλέπουμε μια συσχέτιση ανάμεσα στην ορατότητα και στη συγκέντρωση σωματιδίων σε διάφορα τυπικά περιβάλλοντα.

Πίνακας 2.2 : Συγκέντρωση σωματιδίων και ορατότητα.

Περιοχή	Αιωρούμενα σωματίδια ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Ορατότητα (km)
Υπαιθρος	30	40
Προάστια	100	12
Κέντρο Πόλης	200	6
ΒΙ.ΠΕ.	700	1,6

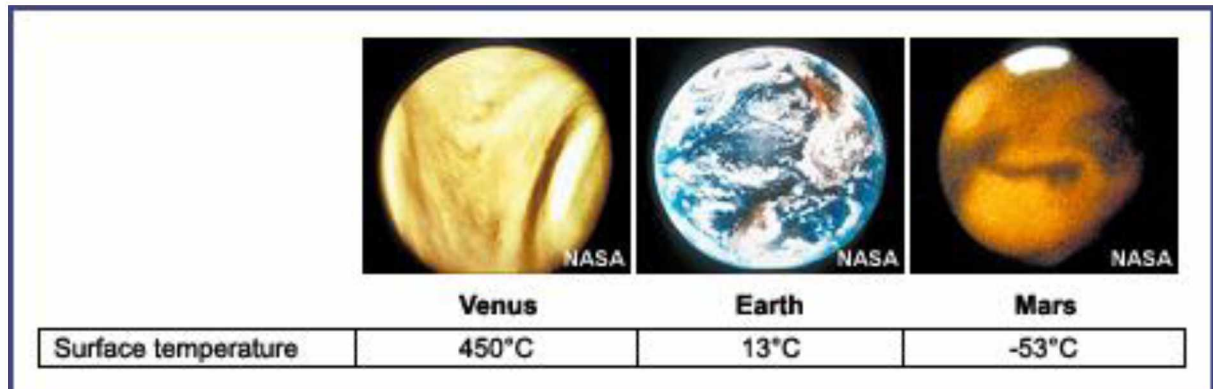
## 2.2 Αέρια του θερμοκηπίου (Green House Gases)

Το γεγονός ότι η Γη έχει μέση θερμοκρασία μεταξύ του σημείου βρασμού και του σημείου πήξης του νερού, επομένως είναι κατάλληλη για το είδος της ζωής μας, δεν οφείλεται μόνο στο ότι ο πλανήτης περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο και γύρω από τον άξονά του με συγκεκριμένο τρόπο και σε συγκεκριμένο χρόνο για να απορροφήσει τη σωστή ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας και να διατηρήσει τις θερμοκρασίες αυτές. Οι μέτριες θερμοκρασίες είναι επίσης το αποτέλεσμα της ύπαρξης ακριβώς της Γήινης ατμόσφαιρας.

Μέρη της ατμόσφαιρας της γης λειτουργούν ως προστατευτική μεμβράνη με το σωστό πάχος, λαμβάνοντας την κατάλληλη ηλιακή ενέργεια για να διατηρήσει την παγκόσμια μέση θερμοκρασία σε ένα σωστό εύρος. Η ατμόσφαιρα του Άρη είναι πολύ λεπτή και της Αφροδίτης είναι πολύ παχιά. Η «ατμόσφαιρα» όπως αναφέρεται εδώ, ονομάζεται μια



συλλογή ατμοσφαιρικών αερίων, κυρίως υδρατμοί, διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και υποξείδιο του αζώτου, τα οποία λειτουργούν ως αποτελεσματικοί μονωτές. Αυτά τα αέρια ονομάζονται αέρια θερμοκηπίου με βάση το γεγονός ότι δεσμεύουν επίσης θερμότητα όμοια με τα γυάλινα τοιχώματα ενός θερμοκηπίου.



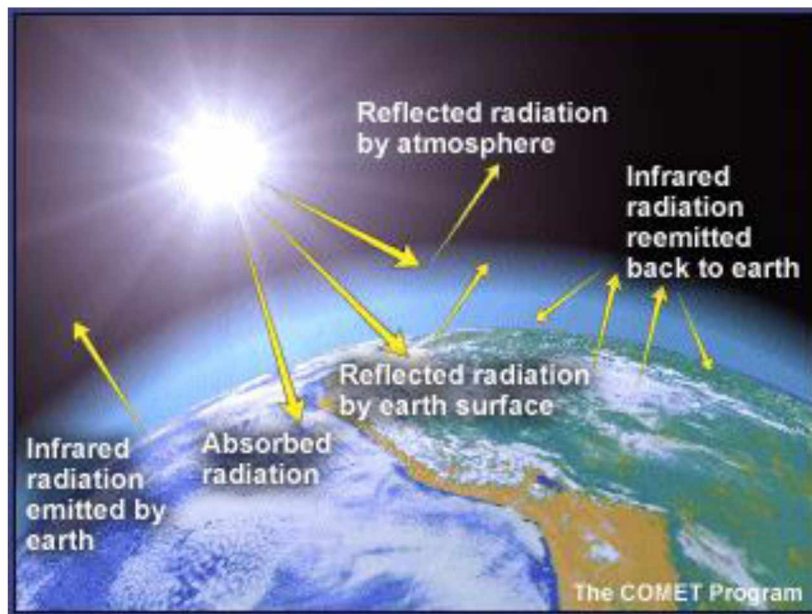
Εικόνα 2.6: Μέση θερμοκρασία ορισμένων πλανητών: Άρης, Γη και Αφροδίτη [29]

Το φαινόμενο της εισερχόμενης και της εξερχόμενης, μέσω της ατμόσφαιρας, ακτινοβολίας που θερμαίνει τη Γη αναφέρεται συχνά ως φαινόμενο του θερμοκηπίου επειδή ένα θερμοκήπιο λειτουργεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο.

Η εισερχόμενη υπεριώδης ακτινοβολία (UV) περνά εύκολα από τους γυάλινους τοίχους ενός θερμοκηπίου και απορροφάται από τα φυτά και τις επιφάνειες στο εσωτερικό. Η μεγαλύτερου μήκους κύματος υπέρυθη ακτινοβολία (IR) που εκπέμπεται από το εσωτερικό, ωστόσο, δυσκολεύεται να περάσει μέσα από τους γυάλινους τοίχους και εγκλωβίζεται μέσα.. Αυτό το γεγονός επιτρέπει στα τροπικά φυτά να ανθίσουν μέσα σε ένα θερμοκήπιο, ακόμη και κατά τη διάρκεια ενός κρύου χειμώνα.

Η επίδραση του θερμοκηπίου αυξάνει τη θερμοκρασία της Γης παγιδεύοντας θερμότητα στην ατμόσφαιρά μας. Αυτό διατηρεί τη θερμοκρασία της Γης υψηλότερη από ότι θα ήταν αν η άμεση θέρμανση από τον Ήλιο ήταν η μόνη πηγή θέρμανσης. Όταν το ηλιακό φως φθάνει στην επιφάνεια της Γης, ένα μέρος του απορροφάται και θερμαίνει το έδαφος και ένα μέρος εκπέμπεται πίσω στο διάστημα ως υπέρυθη ακτινοβολία. Τα περισσότερα αέρια του θερμοκηπίου που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα παγιδεύουν και στη συνέχεια μεταδίδουν μέρος αυτής της ακτινοβολίας πίσω προς τη Γη. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι κυρίαρχος παράγοντας για τη διατήρηση της θερμοκρασίας της Γης, επειδή διατηρεί μέρος της

θερμότητας του πλανήτη που διαφορετικά θα διάφευγε από την ατμόσφαιρα στο διάστημα. Στην πραγματικότητα, χωρίς το φαινόμενο του θερμοκηπίου η μέση παγκόσμια θερμοκρασία της Γης θα ήταν πολύ πιο κρύα και η ζωή στη Γη όπως αναγνωρίζουμε δεν θα ήταν δυνατή. Η διαφορά μεταξύ της πραγματικής μέσης θερμοκρασίας της Γης  $14^{\circ}\text{C}$  ( $57,2^{\circ}\text{F}$ ) και της αναμενόμενης πραγματικής θερμοκρασίας μόνο με την ακτινοβολία του Ήλιου  $-19^{\circ}\text{C}$  ( $-2,2^{\circ}\text{F}$ ) μας δίνει την επιρροή του φαινομένου του θερμοκηπίου, ( $+33^{\circ}\text{C}$ ).

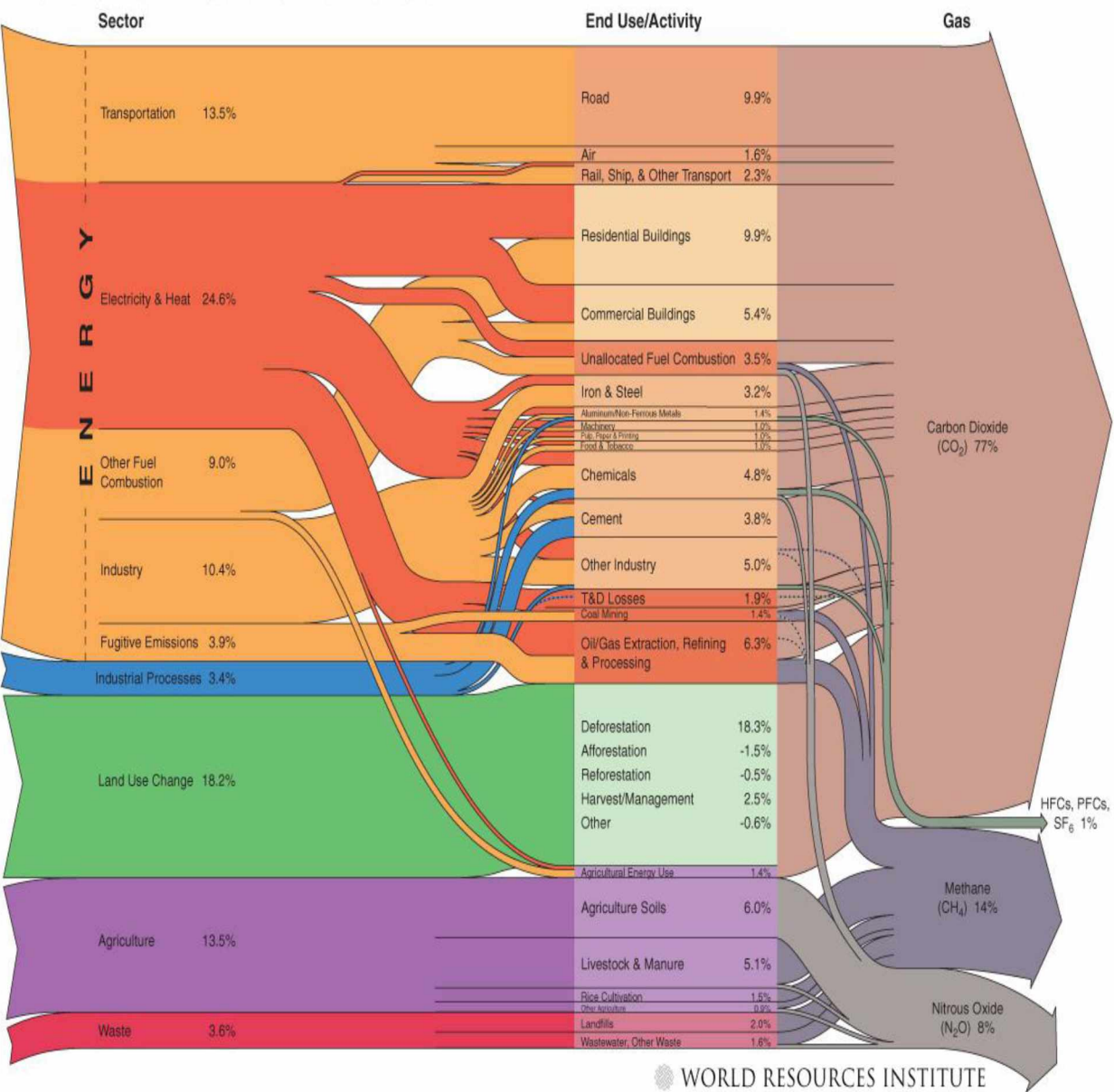


Εικόνα 2.7: Απορρόφηση και εκπομπή ακτινοβολίας από αέρια θερμοκηπίου [29]

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μια φυσική διαδικασία εκατομμυρίων ετών. Παίζει κρίσιμο ρόλο στη μεταβολή της συνολικής θερμοκρασίας της Γης. Ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά από τον Joseph Fourier το 1827, επαληθεύτηκε πειραματικά από τον John Tyndall το 1861 και ποσοτικοποιήθηκε από τον Svante Arrhenius το 1896 ο οποίος έχει δημοσιεύσει μια εργασία για το θέμα [28].

Στο διάγραμμα sankey που ακολουθεί (Εικόνα 2.8) βλέπουμε με πολύ παραστατικό τρόπο όλες τις ανθρωπογενείς πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την ακριβή ποσοστιαία συμβολή της καθεμιάς στις εκπομπές του κάθε αερίου ξεχωριστά.

## World GHG Emissions Flow Chart



Εικόνα 2.8: Διαγράμματα ποής ανθρωπογενών εκπομπών GHG ανά τομέα και δραστηριότητα. Πηγή [www.wri.org](http://www.wri.org)

### 2.2.1 Πηγές Εκπομπών Αερίων Θερμοκηπίου

Τα τελευταία χρόνια, μία από τις κύριες πηγές εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) είναι από εγκαταστάσεις ανάκτησης υδατικών πόρων (εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων ή Waste Water Treatment Plants). Οι WWTP εκτελούν αέρια όπως οξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O),

διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και μεθάνιο (CH<sub>4</sub>). Η αυξανόμενη εκπομπή GHG από αυτήν την πηγή μπορεί να βλάψει το κλίμα.

Οι βιολογικοί μηχανισμοί όπως οι εκπομπές CO<sub>2</sub> λόγω μικροβιακής αναπνοής, η εκπομπή N<sub>2</sub>O από τη νιτροποίηση και την απονιτροποίηση και η εκπομπή CH<sub>4</sub> από τις διαδικασίες αναερόβιας χώνευσης είναι άμεσες εκπομπές από WWTP. Πηγές που δεν ρυθμίζονται απευθείας στο πλαίσιο του WWTP είναι έμμεσες εσωτερικές πηγές εκπομπών (κατανάλωση θερμικής ενέργειας) και έμμεσες εξωτερικές πηγές εκπομπών (συλλογή βιοστερεών τρίτων, χημικές παραγωγές και μεταφορά τους στο εργοστάσιο κ.λπ).

Ο αυξανόμενος ρυθμός εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου οφείλεται στις αλλαγές στην οικονομική παραγωγή, στην εκτεταμένη κατανάλωση ενέργειας, στις αυξανόμενες εκπομπές από χωματερές, στην κτηνοτροφία, στην ρυζοκαλλιέργεια, στις σηπτικές διεργασίες και στα λιπάσματα καθώς και σε άλλους παράγοντες. Η ένταση της εκβιομηχάνισης, η χρήση λιπασμάτων, η καύση ορυκτών καυσίμων και άλλες ανθρώπινες και φυσικές δραστηριότητες έχουν ως αποτέλεσμα αύξηση πάνω από την κανονική μέση ατμοσφαιρική θερμοκρασία. θέτοντας έτσι υπό απειλή το περιβάλλον μας.

Οι έρευνες προσδιορίζουν το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα ως τα κύρια αέρια του θερμοκηπίου. Ως εκ τούτου, η μείωση της συγκέντρωσης μεθανίου στην ατμόσφαιρα, τόσο από φυσικές όσο και από ανθρωπογενείς πηγές, είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση των αρνητικών αποτελεσμάτων της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

Ενώ οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) μειώθηκαν κατά 5,4% το 2020, λόγω των επιπτώσεων της πανδημίας Covid19 στην οικονομική και κοινωνική δραστηριότητα, η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα συνέχισε να αυξάνεται με περίπου τον ίδιο ρυθμό όπως τα προηγούμενα χρόνια. *«Κατά τη διάρκεια προηγούμενων κοινωνικοοικονομικών επιπλοκών, όπως αυτές της πετρελαϊκής κρίσης του 1973, θα μπορούσατε να δείτε αμέσως μια αλλαγή στον ρυθμό αύξησης του CO<sub>2</sub>»,* δήλωσε ο David Schimel, επικεφαλής της ομάδας άνθρακα της JPL και συν-συγγραφέας της μελέτης. *«Όλοι περιμέναμε να το δούμε και αυτή τη φορά»*[54].

Δηλαδή, ενώ η πτώση των εκπομπών κατά 5,4% ήταν σημαντική, η αύξηση (και όχι η μείωση όπως θα περίμενε κανείς) των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων ήταν εντός του συνηθισμένου εύρους διακύμανσης από έτος σε έτος που προκαλείται από φυσικές διεργασίες. Αιτία για το γεγονός αυτό είναι ότι πιθανόν ο ωκεανός δεν απορρόφησε τόσο CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα

όσο τα τελευταία χρόνια λόγω της μειωμένης μερικής πίεσης του CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα , κοντά στην επιφάνεια του ωκεανού.

### 2.2.2 Αέρια θερμοκηπίου και υπερθέρμανση του πλανήτη

Τα αέρια του θερμοκηπίου (GHGs) όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, το υποξείδιο του αζώτου και οι εκπομπές αλογονωμένων ενώσεων υδρογονανθράκων. εκλύονται από ανθρώπινες δραστηριότητες αλλά και από φυσικές διεργασίες.. Από την Βιομηχανική Επανάσταση στις αρχές του 1800, η καύση ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και η βενζίνη έχουν αυξήσει σημαντικά τη συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, ειδικά του CO<sub>2</sub>. Οι συγκεντρώσεις του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub> έχουν αυξηθεί κατά περισσότερο από 40% τα τελευταία 200 χρόνια, από περίπου 280 ppm το 1800 σε 400 ppm σήμερα. Η τελευταία φορά που τα επίπεδα CO<sub>2</sub> της Γης στην ατμόσφαιρα έφτασαν τα 400 ppm ήταν κατά την εποχή του Πλειόκαινου, μεταξύ 5 και 3 εκατομμυρίων ετών πριν, σύμφωνα με τα Ινστιτούτα Ωκεανογραφίας Scripps του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια. Αυτή η αύξηση της συγκέντρωσης GHG της ατμόσφαιρας οδήγησε στην κλιματική αλλαγή και στην επίδραση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, κάτι που δίνει κίνητρο σε διεθνείς προσπάθειες όπως το Πρωτόκολλο του Κιότο, η υπογραφή της Συμφωνίας του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή και άλλες πρωτοβουλίες για τον έλεγχο των αρνητικών αποτελεσμάτων του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η συμβολή ενός αερίου θερμοκηπίου στην υπερθέρμανση του πλανήτη εκφράζεται συνήθως από το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential ) που επιτρέπει τη σύγκριση των επιπτώσεων του αερίου στην υπερθέρμανση του πλανήτη και του αερίου αναφοράς, συνήθως διοξειδίου του άνθρακα. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, συλλογικά με αυξανόμενα επίπεδα αερίων του θερμοκηπίου και την επακόλουθη υπερθέρμανση του πλανήτη, αναμένεται να έχει βαθιές συνέπειες, σύμφωνα με την σχεδόν καθολική γνώμη των επιστημόνων. Εάν μέση παγκόσμια θερμοκρασία της Γης υποστεί μεταβολή, θα προκαλέσει αξιοσημείωτη κλιματική αλλαγή, άνοδο της στάθμης της θάλασσας, αυξανόμενη οξίνιση των ωκεανών, απειλητικά καιρικά φαινόμενα και άλλες σοβαρές φυσικές και κοινωνικές επιπτώσεις, σύμφωνα με τη NASA, την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) και άλλους επιστημονικούς και κυβερνητικούς φορείς.

Ωστόσο μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα μελέτης που διεξήχθη από ερευνητές του Ιδρύματος Ωκεανογραφίας Scripps στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια.

Ένα περιοδικό ηλιακό γεγονός που ονομάζεται "Grand Minimum" θα ξεκινήσει στον ήλιο ίσως το 2020 και θα διαρκέσει έως το 2070, με αποτέλεσμα μειωμένο μαγνητισμό, ελάχιστη παραγωγή ηλιακών κηλίδων και λιγότερη υπεριώδη ακτινοβολία (UV) που φτάνει στη Γη - όλα αυτά φέρνουν μια πιο δροσερή περίοδο στον πλανήτη που μπορεί να διαρκέσει 50 χρόνια. Το τελευταίο μεγάλο-ελάχιστο γεγονός - μια διακοπή του 11ετούς κύκλου της μεταβλητής δραστηριότητας των ηλιακών κηλίδων του ήλιου - συνέβη στα μέσα του 17ου αιώνα. Γνωστό ως το Maunder Minimum συνέβη μεταξύ 1645 και 1715.

Από το Maunder Minimum, οι παγκόσμιες μέσες θερμοκρασίες αυξάνονται, λόγω της κλιματικής αλλαγής. Αν και μια νέα πτώση της ηλιακής ακτινοβολίας για δεκαετίες θα μπορούσε να επιβραδύνει κάπως την υπερθέρμανση του πλανήτη, όπως, έδειξαν οι προσομοιώσεις των ερευνητών.

Η παραγωγή ηλιακής ακτινοβολίας συνήθως πέφτει κατά τη διάρκεια ενός κανονικού ηλιακού ελάχιστου, αν και όχι αρκετά για να διαταράξει τα κλιματικά πρότυπα στη Γη. Ωστόσο, η παραγωγή υπεριώδους ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός μεγάλου ελάχιστου θα μπορούσε να σημαίνει πτώση της δραστηριότητας κατά ένα επιπλέον 7 %, έγραψαν οι ερευνητές στη μελέτη. Ως αποτέλεσμα, οι θερμοκρασίες του αέρα στην επιφάνεια της Γης θα πέφτουν έως και αρκετά δέκατα του βαθμού Κελσίου.[53]

## 2.3 Όξινη βροχή

Για να κάνουν τη ζωή ευκολότερη, οι άνθρωποι εκμεταλλεύονται φυσικούς πόρους. Έχουν φτιάξει εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν την ενέργεια των πόρων της γης. Η καύση καυσίμων όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο άνθρακας παράγουν αυτήν την ενέργεια. Από τη μία, αυτή η εξέλιξη έχει κάνει τη ζωή ευκολότερη, αλλά από την άλλη πλευρά, απελευθερώνει πολλές επικίνδυνες ουσίες στο περιβάλλον που οδηγούν σε ρύπανση. Η βιομηχανοποίηση, η αστικοποίηση αυξάνουν τις ποσότητες των ρύπων αυτών. Η όξινη βροχή είναι ένα από τα πιο σοβαρά προβλήματα του περιβάλλοντος που προέκυψε λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Κάθε είδος υετού που έχει όξινη φύση ονομάζεται όξινη βροχή. Η όξινη βροχή έχει pH μικρότερο από 5,6.

Η όξινη βροχή προκαλείται όταν από διάφορες πηγές, λαμβάνουν χώρα εκπομπές διοξειδίου του θείου και οξειδίου του αζώτου, στη συνέχεια οι ρύποι αυτοί αναμιγνύονται με το οξυγόνο,

τον άνθρακα και άλλες χημικές ουσίες και σχηματίζουν όξινες ενώσεις όπως το θειικό οξύ και το νιτρικό οξύ στην ατμόσφαιρα τα οποία με τη σειρά τους καθιζάνουν προς το έδαφος μέσω υετού.

Στις βιομηχανίες και τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, οι χρήσεις ψηλών καπναγωγών έχουν αυξήσει την παραγωγή ατμοσφαιρικών ρύπων που μεταφέρονται τοπικά και παγκοσμίως, εξαπλώνοντας την όξινη βροχή. Η όξινη βροχή αναγνωρίζεται ως ένα από τα σοβαρότερα περιβαλλοντικά προβλήματα στην Ανατολική Ασία, τη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη. Έχει απειλήσει τη βιωσιμότητα της τροφικής αλυσίδας και την περιβαλλοντική σταθερότητα, με άλλα λόγια έχει υποβαθμίσει την ποιότητα της ανθρώπινης ζωής.

### **2.3.1 Ιστορία της όξινης βροχής**

Η όξινη βροχή παρατηρήθηκε για πρώτη φορά στην Ευρώπη στα μέσα του 19ου αιώνα,. Το 1845, ο Ducros ήταν ο πρώτος επιστήμονας που αναγνώρισε την όξινη βροχή [30]. Το 1853 δημιουργήθηκε ο ορισμός της η όξινης βροχής. Το 1852, ο όρος Όξινη βροχή αναπτύχθηκε από έναν Άγγλο χημικό Robert Angus Smith [31] ο οποίος παρατήρησε φύλλα που είχαν καταστραφεί από αυτή. Οι μελέτες του συνέδεσαν τις βιομηχανικές εκπομπές με την αιτία της όξινης βροχής και περιείχαν επίσης την έγκαιρη επισήμανση των επιβλαβών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Μέχρι τον 20ο αιώνα, η δουλειά του Smith είχε ως ξεχαστεί, έως ότου νέες μελέτες άρχισαν να συσχετίζουν την εναπόθεση θεικών και άλλων χημικών συστατικών της ατμόσφαιρας με την ατμοσφαιρική ρύπανση κοντά σε μεταλλουργείο στον Καναδά. Στη δεκαετία του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970 στη Σουηδία, οι παρατηρήσεις αποκάλυψαν ότι οι εκπομπές νιτρικού οξειδίου και διοξειδίου του θείου προκαλούν όξινη βροχή. Αργότερα το ίδιο παρατηρήθηκε και στη Βόρεια Αμερική.

Στη συνέχεια, αναγνωρίστηκαν επίσης διάφορες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της όξινης βροχής σε υδρόβια ζώα και φυτά και εντοπίστηκε ότι η οξίνιση στα ψάρια οφειλόταν στη μεταφορά ρύπων θείου σε μεγάλη απόσταση. Το 1936 έγινε το πρώτο βήμα στο Λονδίνο για τον έλεγχο της όξινης βροχής. Ωστόσο, το πρόβλημα επιδεινώθηκε μετά το 1970 λόγω της υψηλής συγκέντρωσης διοξειδίου του θείου στην ατμόσφαιρα που προέκυψε από την αυξημένη χρήση καυσίμου άνθρακα. Ο νόμος εναπόθεσης οξέος το 1980 εγκρίθηκε από το Κογκρέσο των ΗΠΑ. Αυτός εστιάζει στις επιπτώσεις ξηρής εναπόθεσης και όξινης βροχής σε

κτίρια, υδάτινα οικοσυστήματα και μνημεία. Στα μέσα της δεκαετίας του 1990 ήταν προφανές ότι η όξινη βροχή αλληλεπιδρά επίσης με την υπερθέρμανση του κλίματος και την καταστροφή του στρώματος του όζοντος που αποτελούν άλλα μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα.

Για δημιουργία προγραμμάτων ελέγχου, υλοποιήθηκαν χρηματοδοτούμενες μελέτες. Το Κογκρέσο των ΗΠΑ ενέκρινε βελτιώσεις στον νόμο για τον καθαρό αέρα το 1990, ο οποίος περιέχει προληπτικά μέτρα για το διοξείδιο του θείου και το μονοξείδιο του αζώτου. Αυτός προέβλεπε 2 φάσεις εφαρμογής με στόχο τη σταδιακή μείωση εκπομπών. Στη φάση I (από το 1995), από τις 110 μεγαλύτερες εγκαταστάσεις περιορίστηκαν οι εκπομπές διοξειδίου του θείου. Οι περισσότεροι από τους υπόλοιπους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής επηρεάστηκαν από τη Φάση II (από το 2000). Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου μειώθηκαν κατά 54% από το 2000 έως το 2006. Ομοίως, από το 1999, εφαρμόστηκαν αρκετά προγράμματα για τη μείωση των εκπομπών οξειδίου του αζώτου από αυτοκίνητα και εργοστάσια. Τον Μάρτιο του 2005, ο Διακρατικός Κανόνας για τον Καθαρό Αέρα εκδόθηκε από την EPA των ΗΠΑ για τη μείωση της ρύπανσης από τις εκπομπές των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.

### **2.3.2 Αιτίες και τύποι όξινης βροχής**

Η όξινη βροχή ονομάζεται επίσης όξινη εναπόθεση. Αυτή η εναπόθεση οξέων μπορεί να είναι ξηρή ή υγρή. Το χιόνι, η βροχή και η ομίχλη είναι υγρή εναπόθεση. Όταν ο αέρας μεταφέρει τα όξινα χημικά σε μια περιοχή που έχει υγρό καιρό, τότε το οξύ πέφτει στο έδαφος με τη μορφή χιονιού, ομίχλης και βροχής. Αυτό το όξινο νερό ρέει μέσα από το έδαφος και επηρεάζει την ποικιλία των ζώων και των φυτών αλλά και το υπέδαφος.

Η εναπόθεση όξινων σωματιδίων από τον αέρα είναι η ξηρή εναπόθεση. Αυτά τα όξινα σωματίδια διοχετεύονται από τον άνεμο, επάνω σε κτίρια, σπίτια, δέντρα και αυτοκίνητα, με αποτέλεσμα να κολλάνε στις επιφάνειες. Λόγω βροχοπτώσεων, αυτά τα ξηρά εναποτιθέμενα σωματίδια μπορούν να ξεπλυθούν από τις επιφάνειες. Όταν συμβεί αυτό, τότε τα όμβρια ύδατα έχουν ιδιαίτερα υψηλή οξύτητα.

Οι κύριες αιτίες της όξινης βροχής είναι η εκπομπή διοξειδίου του θείου και οξειδίου του αζώτου. Αυτοί οι περιβαλλοντικοί ρύποι προέρχονται από δραστηριότητες του ανθρώπου όπως η καύση ορυκτών καυσίμων σε αυτοκίνητα και θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, η τήξη σιδήρου και μεταλλευμάτων και άλλες βιομηχανικές διεργασίες. Οι ρύποι του θείου προέρχονται από διάφορες φυσικές πηγές όπως ηφαιστειακές εκρήξεις και ωκεανοί. Πολλές βιολογικές διεργασίες αποτελούν φυσικές πηγές ρύπων του οξειδίου του αζώτου. Το θείο στην



ατμόσφαιρα αντιδρά με το υπεροξείδιο του υδρογόνου και σχηματίζει διοξείδιο του θείου, ενώ η οξειδωση του διοξειδίου του αζώτου παράγει νιτρικό οξύ. Όταν αυτές οι χημικές ουσίες αναμιγνύονται με το νερό της βροχής στην ατμόσφαιρα, τότε πέφτουν στο έδαφος με τη μορφή όξινης βροχής.

### 2.3.3 Επιπτώσεις όξινης βροχής

#### ➤ Δάση

Τα δάση έχουν υποστεί σοβαρές ζημιές από την όξινη βροχή. Τα δέντρα σε μεγάλα υψόμετρα διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο επειδή έρχονται σε επαφή με όξινα σύννεφα, (π.χ. δάση ελάτης μειώνονται στις υψηλότερες οροσειρές των Αππαλαχίων Ορέων). Στις ρίζες των φυτών, τα βαρέα μέταλλα συσσωρεύονται και μειώνουν τη φωτοσύνθεση λόγω της απώλειας της χλωροφύλλης. Η βλάστηση των σπόρων στα πεύκα δεν συμβαίνει στο χαμηλό pH της όξινης βροχής. Στα φυτά, η συγκέντρωση πρωτεΐνης μειώνεται από την όξινη βροχή.

Το θείο και το άζωτο που υπάρχουν στην όξινη ομίχλη επηρεάζουν την ανάπτυξη του στελέχους των φυτών και τα νεότερα φυτά επηρεάζονται περισσότερο από τα μεγαλύτερα φυτά. Η μείωση του αριθμού των δασών λόγω της όξινης βροχής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της βιομάζας. Οι ρίζες και τα φύλλα των φυτών καταστρέφονται άμεσα από την όξινη βροχή. Προκαλείται αλλαγή στη δομή των φύλλων και των βελονών, γίνονται καφέ και πέφτουν. Η βλάβη στις ρίζες των δέντρων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της γονιμότητας του εδάφους.

#### ➤ Κτίρια και μνημεία

Το μάρμαρο και ο ασβεστόλιθος των μνημείων και τα κτιρίων αποτελούνται από ανθρακικό ασβέστιο που φθείρεται από την όξινη βροχή. Στην όξινη βροχή, το διοξείδιο του θείου παρέχει υδατικά ιόντα με τη διάλυση των ανθρακικών ασβεστίου που ξεπλένονται στη ροή του νερού. Στο μνημείο ή στην επιφάνεια του κτιρίου εμφανίζεται αυτό το φαινόμενο. Το θείο και το νιτρικό οξύ στη βροχή προκαλούν εναποθέσεις στην επίστρωση και ξεθωριάζουν το χρώμα καταστρέφοντας έτσι ιστορικά κτίρια. Ένα πασίγνωστο μνημείο στην Ινδία, το Ταζ Μαχάλ και το Άγαλμα της Ελευθερίας της Νέας Υόρκης, έχουν υποστεί διάβρωση από την όξινη βροχή [32] Στην αστική περιοχή, λόγω της συγκέντρωσης διοξειδίου του θείου, ο ρυθμός

διάβρωσης είναι πολύ υψηλός . έτσι η όξινη βροχή με πολύ χαμηλό pH έχει επηρεάσει κτίρια που αποτελούνται από σκυρόδεμα μέταλλο και γυαλί.

#### ➤ Έδαφος - φυτά

Η όξινη βροχή καταστρέφει τη χημεία του εδάφους και αλλάζει την ποιότητα του . Ορισμένα μέταλλα όπως το αλουμίνιο και ο υδράργυρος υπάρχουν στο έδαφος, αλλά τα φυτά δεν μπορούν να απορροφήσουν και παραμένουν αβλαβή. Όταν όμως αντιδρούν με τα οξέα, γίνονται εύκολα απορροφήσιμα προκαλώντας επιβλαβείς επιπτώσεις. Στη συνέχεια ζώα θα τραφούν με αυτά τα φυτά και με τον τρόπο αυτό τα μέταλλα εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα . Η όξινη βροχή μετουσιώνει τα ένζυμα των μικροβίων στο έδαφος και τα σκοτώνει λόγω της δυσανεξίας τους σε χαμηλό pH. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από το έδαφος μεταβάλλονται από την όξινη βροχή αλλάζοντας τη σύνθεση και τη βιομάζα της μικροβιακής κοινότητας. Ως αποτέλεσμα η όξινη βροχή κάνει αλλαγές στη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών και στις εδαφικές ιδιότητες του εδάφους όπως το pH κ.λπ. Οι όξινες βροχές απομακρύνουν τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά από το έδαφος και μειώνουν τη γονιμότητα του εδάφους με αποτέλεσμα τη μειωμένη ανάπτυξη των φυτών. Το χαμηλό pH μειώνει τη φωτοσύνθεση και έτσι μειώνει την παραγωγικότητα φυτών όπως η σόγια. Οξίνιση του εδάφους έχει παρατηρηθεί στην Ανατολική Βόρεια Αμερική, στην Κίνα και στην Ευρώπη. Από το 1982 έως το 1983, στα δάση της Ευρώπης, παρατηρήθηκε μεγάλη αύξηση της οξύτητας σε όλο το προφίλ του εδάφους. Στο στρώμα του χούμου, παρατηρήθηκε μέγιστη οξύτητα και οφειλόταν στην εναπόθεση όξινων χημικών ουσιών από την ατμόσφαιρα. Οι λειχήνες, οι μύκητες και τα φύκια που είναι κατώτερα φυτά, η όξινη βροχή τα επηρεάζει επίσης ,καθώς επηρεάζει τις μικροβιακές δραστηριότητες.

#### ➤ Υδατικό οικοσύστημα

Τα βαρέα μέταλλα που ξεπλένονται από το έδαφος μέσω της όξινης βροχής, φτάνουν σε κοντινές λίμνες και ρυάκια και προκαλούν ρύπανση των υδάτων. Αυτά τα οξέα μειώνουν το pH των υδατινών σωμάτων, λόγω του οποίου επηρεάζεται και η αναπαραγωγή φυτών ,ζώων και ψαριών. Τα οξέα δεν επιτρέπουν στα ψάρια να αναπνεύσουν, και η συσσώρευση βαρέων μετάλλων συμβαίνει στο σώμα τους τα οδηγεί στο θάνατο . Όταν τα πουλιά τρώνε αυτά τα δηλητηριασμένα ψάρια, τότε τα χημικά εισέρχονται επίσης στο σύστημά τους και όταν άλλα ζώα τρώνε αυτά τα πουλιά τότε τα βαρέα μέταλλα εισάγονται σε αυτά τα ζώα. Με αυτόν τον

τρόπο οι χημικές ουσίες εισάγονται σε κάθε επίπεδο της τροφικής αλυσίδας, και αυξάνουν σταδιακά τις συγκεντρώσεις τους.

#### ➤ Ανθρώπινη υγεία

Η εμφάνιση και η γεύση της όξινης βροχής είναι ακριβώς όπως το καθαρό νερό. Έχει έμμεσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Η όξινη βροχή προκαλεί την έκπλυση τοξινών από το έδαφος, αυτές οι τοξίνες περιλαμβάνουν το Al, Mn, Fe, Pb και Hg, που διαλύονται στο έδαφος και φτάνουν στα υπόγεια ύδατα, ο άνθρωπος πίνει αυτό το νερό εξαιτίας του οποίου διάφορα βαρέα μέταλλα συσσωρεύονται στο σώμα του και έχουν ως αποτέλεσμα πονοκέφαλο, βήχα, ερεθισμό του λαιμού και της μύτης. Αυτές οι τοξίνες απορροφώνται από ζώα και φυτά, που καταναλώνει ο άνθρωπος, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται προβλήματα στα νεφρά, βλάβες στον εγκέφαλο, καρδιακές παθήσεις καθώς και πνευμονικές παθήσεις όπως βρογχίτιδα και άσθμα. Είναι πολύ επικίνδυνο να κολυμπάς σε μια όξινη λίμνη ή να περπατάς σε όξινη βροχή. Ο άνεμος μεταφέρει σωματίδια νιτρικών και θεικών που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα τα οποία εισπνέονται κατά την αναπνοή και οδηγούν σε καρκίνο. Στο Τόκιο, έχει παρατηρηθεί ερεθισμός του δέρματος και των ματιών λόγω μολυσμένων σταγονιδίων.

## **2.4 Στατιστικά στοιχεία**

Παρακάτω παρατίθενται στοιχεία τα οποία επικεντρώνονται στον προσδιορισμό των βασικών τάσεων και των κύριων άμεσων παραγόντων που καθορίζουν τις αλλαγές στην ποσότητα των εκπομπών CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O, παγκοσμίως. Αυτά τα αέρια, επί του παρόντος, συνεισφέρουν αντίστοιχα 72%, 19% και 6% στις παγκόσμιες συνολικές εκπομπές GHG εξαιρουμένης της χρήσης γης, με τα φθοριούχα αέρια να αντιπροσωπεύουν το υπόλοιπο 3%.

Ο Πίνακας 2.3 συνοψίζει τους κύριους παράγοντες των εκπομπών και το μερίδιό τους στις παγκόσμιες εκπομπές.

Η κύρια ανθρωπογενής πηγή του CO<sub>2</sub> είναι η καύση άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου, που αντιπροσωπεύουν το 88% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub>, με αντίστοιχα μερίδια 39%, 31% και 18%. Η ασβεστοποίηση στην παραγωγή κλίνκερ τσιμέντου αντιπροσωπεύει 4% (Πίνακας 2.3).

Πίνακας 2.3 Βασικοί παράγοντες για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου .[33]

Τύπος αερίου	Μερίδιο σε GHG	Κύρια προέλευση	Μερίδιο στο σύνολο των αερίων	Έτος στατιστικών
CO <sub>2</sub>	72%	Καύση άνθρακα	39%	2018
		Καύση πετρελαίου	31%	2018
		Καύση φυσικού αερίου	18%	2018
		Παραγωγή τσιμέντου κλίνκερ	4%	2017
		Υποσύνολο CO <sub>2</sub>	<b>92%</b>	
CH <sub>4</sub>	19%	Βοοειδή	21%	2017
		Παραγωγή ρυζιού	10%	2018
		Παραγωγή φυσικού αερίου (συμπεριλαμβανομένης της διανομής)	14%	2018
		Παραγωγή πετρελαίου (συμπεριλαμβανομένου του σχετικού εξαερισμού αερίου)	9%	2018
		εξόρυξη άνθρακα	10%	2018
		ΧΥΤΑ: παραγωγή αστικών στερεών απορριμμάτων ~ κατανάλωση τροφίμων	10%	2013
		Απόβλητα νερά	11%	
Υποσύνολο CH <sub>4</sub>	<b>85%</b>			
N <sub>2</sub> O	6%	Βοοειδή (περιττώματα σε βοσκότοπους, βοσκή και μάντρα) *	23%	2017
		Συνθετικά λιπάσματα (περιεκτικότητα σε N) *	13%	2017
		Ζωική κοπριά που εφαρμόζεται σε εδάφη *	5%	2017
		Καλλιέργειες (μερίδιο φυτών που δεσμεύουν το N, υπολείμματα καλλιεργειών και ιστοσόλια)	11%	2017
		Καύση ορυκτών καυσίμων	11%	2018
		Διαχείριση κοπριάς (περιορισμένη)	4%	2017
		Έμμεσο: ατμοσφαιρική εναπόθεση & έκλυση και απορροή (NH <sub>3</sub> )*	9%	2017
		Έμμεσο: ατμοσφαιρική εναπόθεση (NO <sub>x</sub> από την καύση καυσίμου)	7%	2018
		Υποσύνολο N <sub>2</sub> O, incl. other, related drivers (*)	<b>83%</b>	
F-gases	3%	Χρήση HFC (εκπομπές σε ισοδύναμα CO <sub>2</sub> )	61%	NA/2017 **
		HFC-23 από παραγωγή HCFC-22 (εκπομπές σε ισοδύναμα CO <sub>2</sub> )	22%	NA/2017 **
		Χρήση SF <sub>6</sub> (εκπομπές σε ισοδύναμα CO <sub>2</sub> )	14%	NA/2017 **
		Χρήση PFC και υποπροϊόν (εκπομπές σε ισοδύναμα CO <sub>2</sub> )	3%	NA/2017 **
		Υποσύνολο F-gases	<b>100%</b>	

\* Στοιχεία δραστηριότητας που συγκεντρώθηκαν από τον FAO βλ. Ορισμοί κατηγορίας πηγής IPCC.

\*\* Στατιστικά στοιχεία μόνο για τις χώρες του Παραρτήματος Ι, με ετήσια αναφορά στην UNFCCC (αρχεία CRF): έως το έτος t-1. Πηγές: EDGAR v5.0 για CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O (1970–2015). EDGARv4.2 FT2010 για F-gases (1970–2010); FT2018 για όλους.

Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> που σχετίζονται με τα ορυκτά καύσιμα μπορούν να μειωθούν σημαντικά μόνο με τη μετάβαση σε άλλες πηγές ενέργειας, ιδίως σε ανανεώσιμες πηγές όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια, η αιολική, η ηλιακή, η πυρηνική και τα βιοκαύσιμα που παράγονται με βιώσιμο τρόπο. Μπορούν να επιτευχθούν πρόσθετες μειώσεις μέσω βελτιώσεων ενεργειακής απόδοσης. Επιπλέον, η δέσμευση CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια και η υπόγεια αποθήκευση (CCS) μπορεί να συμβάλει στη μείωση των φαινομενικά αυξανόμενων συγκεντρώσεων CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα.

Για το CH<sub>4</sub>, υπάρχουν τρεις μεγάλες ομάδες πηγών: γεωργία/κτηνοτροφία, παραγωγή ορυκτών καυσίμων και απόβλητα/λύματα. Η κτηνοτροφία μηρυκαστικών, ιδιαίτερα τα βοοειδή, και η παραγωγή ρυζιού είναι οι μεγαλύτερες παγκόσμιες πηγές. Οι εκπομπές CH<sub>4</sub> μόνο από τα βοοειδή ευθύνονται για το 21% των σημερινών παγκόσμιων εκπομπών CH<sub>4</sub>. Η καλλιέργεια ρυζιού σε πλημμυρισμένους ορυζώνες είναι μια άλλη γεωργική πηγή, όπου η αναερόβια αποσύνθεση οργανικής ύλης παράγει μεθάνιο, που ευθύνεται για το 10% των εκπομπών CH<sub>4</sub>.

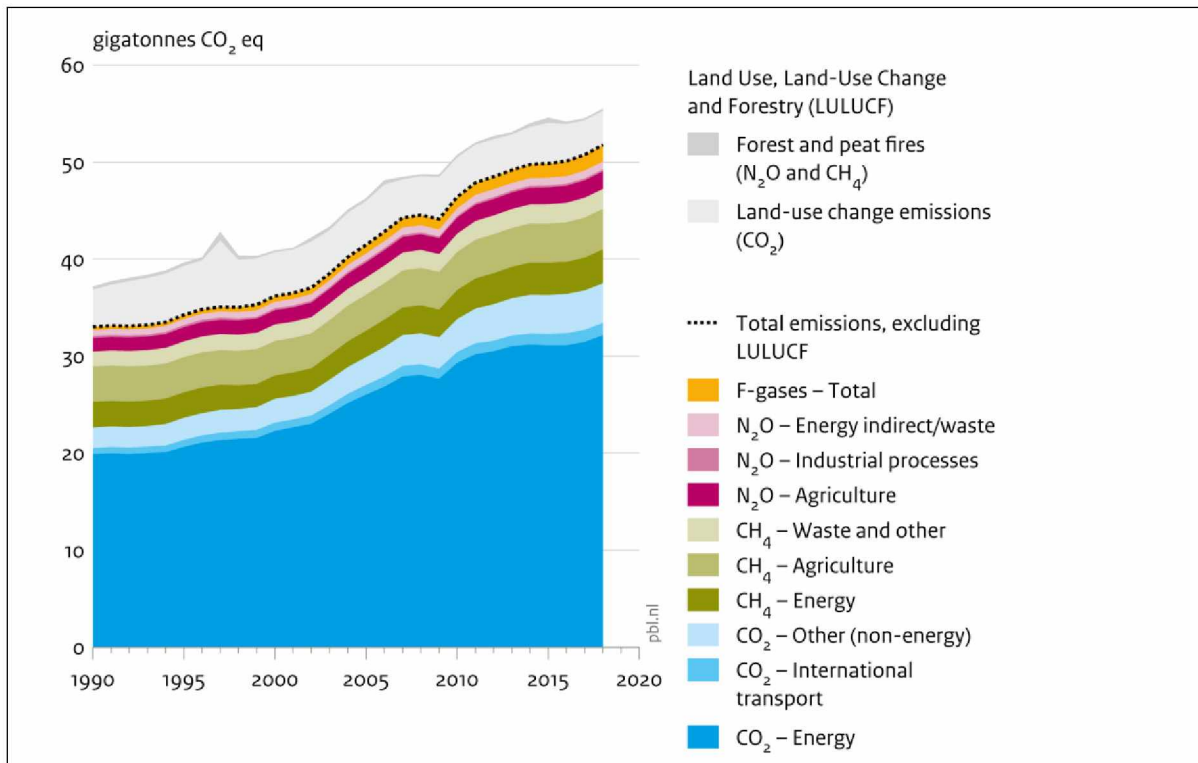
Άλλες μεγάλες πηγές CH<sub>4</sub> είναι η παραγωγή άνθρακα, η παραγωγή και μεταφορά φυσικού αερίου καθώς και η παραγωγή πετρελαίου (συμπεριλαμβανομένου του συναφούς αερίου που αποτελείται κυρίως από CH<sub>4</sub>, εάν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί). Μαζί, η παραγωγή και η μεταφορά ορυκτών καυσίμων αντιπροσωπεύουν ένα άλλο τρίτο των παγκόσμιων εκπομπών μεθανίου, με κάθε καύσιμο να έχει περίπου ίσο μερίδιο. Η τρίτη μεγαλύτερη πηγή είναι τα ανθρώπινα απόβλητα και τα λύματα. Αυτές είναι άλλες πηγές όπου η αναερόβια αποσύνθεση οργανικού υλικού παράγει μεθάνιο. Όταν τα απόβλητα βιομάζας στις χωματερές και οι οργανικές ουσίες στα οικιακά και βιομηχανικά λύματα αποσυντίθενται από βακτήρια σε αναερόβιες συνθήκες, δημιουργούνται σημαντικές ποσότητες μεθανίου. Η υγειονομική ταφή και τα λύματα υπολογίζονται αμφότερα σε μερίδια περίπου 10%. Για αυτές τις εκπομπές, η κατανάλωση τροφίμων ως πηγή θα ήταν ένας καλός δείκτης. Ωστόσο, οι στατιστικές του FAO (Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας του ΟΗΕ) για τα ισοζύγια τροφίμων υστερούν αρκετά χρόνια.

Για το N<sub>2</sub>O, οι γεωργικές δραστηριότητες είναι η κύρια πηγή εκπομπών, με μερίδιο σχεδόν 65%. Τα περιττώματα των ζώων σε βοσκοτόπια και λιβάδια είναι μακράν η μεγαλύτερη παγκόσμια πηγή οξειδίου του αζώτου, με εκτιμώμενο μερίδιο 23%, και η χρήση συνθετικού

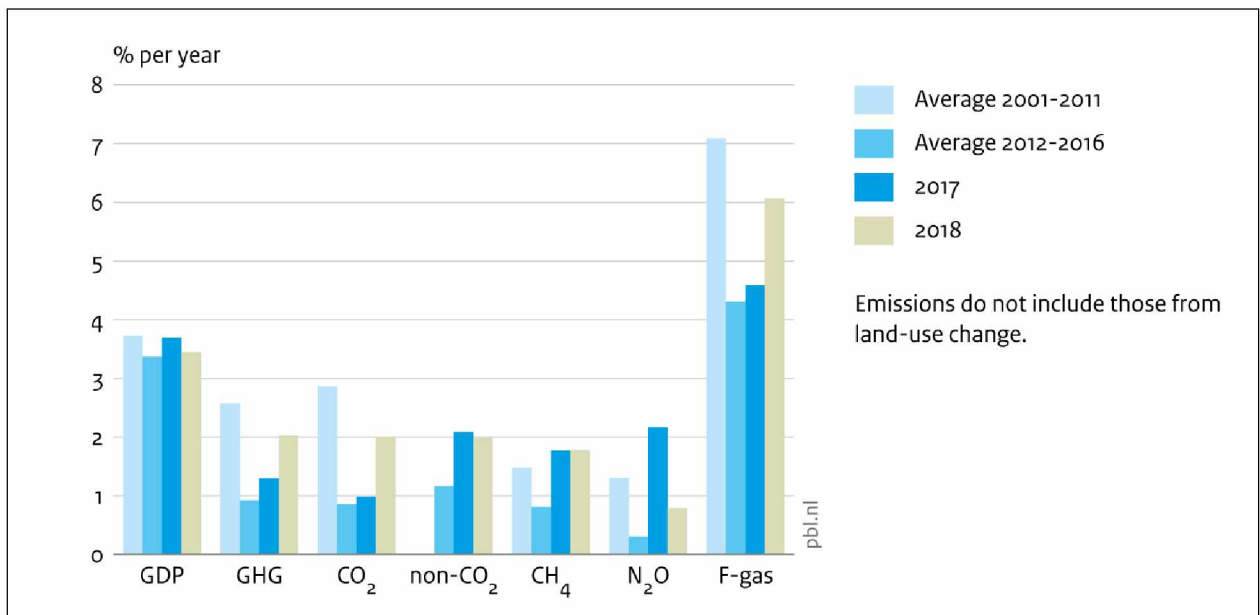
αζωτούχου λιπάσματος είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή, με ποσοστό 13% επί του παρόντος. Οι έμμεσες εκπομπές N<sub>2</sub>O από γεωργικές δραστηριότητες συμβάλλουν ακόμη 9%. Μαζί, αυτές οι πηγές αντιπροσωπεύουν το 50% των παγκόσμιων εκπομπών, συμπεριλαμβανομένου του 4% από την ζωική κοπριά που χρησιμοποιείται σε γεωργικά εδάφη ως λίπασμα.

Οι εκπομπές φθοριούχων αερίων αποτελούνται από HFC, PFC, SF<sub>6</sub> και NF<sub>3</sub>. Με μερίδιο σχεδόν τα τρία τέταρτα, οι εκπομπές από τη χρήση αυτών των αερίων είναι μακράν η μεγαλύτερη πηγή. Άλλες πηγές είναι οι ακούσιες εκπομπές υποπροϊόντων HFC-23 κατά την παραγωγή HCFC-22 και οι εκπομπές PFC που προκύπτουν από την πρωτογενή παραγωγή αλουμινίου. Επί του παρόντος, οι εκπομπές HFC και SF<sub>6</sub> είναι οι μεγαλύτερες παγκόσμιες πηγές φθοριούχων αερίων με μερίδια 81% και 13% (PFC μόνο 6%). Οι συνολικές εκπομπές φθοριούχων αερίων από τη χρήση τους, ιδιαίτερα των HFC, έχουν αυξηθεί σημαντικά από το 2005 με περίπου 4% ετησίως, όπως δείχνουν οι βιομηχανικές χώρες στις λεπτομερείς εκθέσεις τους για την τάση των εκπομπών GHG έως το 2017. Αυτή είναι μια σημαντική πηγή δεδομένων για τα φθοριούχα αέρια, καθώς δεν υπάρχουν παγκόσμιες στατιστικές για τη χρήση και τις εκπομπές τους.

Εκτός από τη μείωση του όγκου του ζωικού κεφαλαίου και των λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται, οι εκπομπές CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O μπορούν επίσης να μειωθούν εν μέρει με αλλαγές στην κατανάλωση ζωοτροφών, βελτιστοποίηση της χρήσης αζωτούχων λιπασμάτων σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις και αλλαγές στις διατροφικές συνήθειες των ανθρώπων. Επιπλέον, το μεθάνιο που εκλύεται στην παραγωγή ορυκτών καυσίμων και σε χώρους υγειονομικής ταφής και λυμάτων μπορεί να μειωθεί με την ανάκτηση του και χρήση του ως βιοαέριο για ενεργειακούς σκοπούς είτε με καύση του.



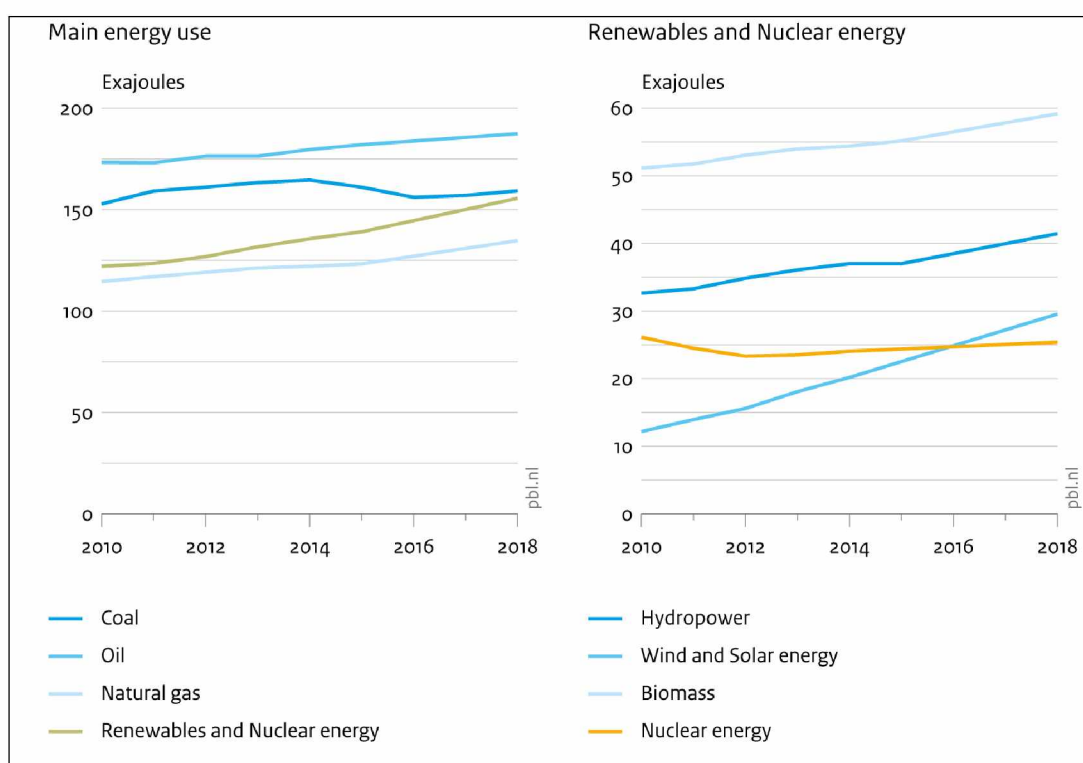
Εικόνα 2.9: Παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ανά τύπο αερίου και πηγή [33]



Εικόνα 2.10: Ετήσιες αλλαγές στο παγκόσμιο ΑΕΠ και τις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, 2001-2018 [33]

Οι εικ.2.9 - 2.10 δείχνουν τις ετήσιες αλλαγές, για την περίοδο 2010–2018, στο παγκόσμιο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ) και στις παγκόσμιες εκπομπές συνολικών αερίων θερμοκηπίου και για κάθε αέριο (τα φθοριούχα αέρια είναι συγκεντρωμένα σε μια ομάδα). Φαίνεται ότι, ενώ η μέση ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας είναι αρκετά σταθερή από το 2010, η ετήσια αύξηση των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου σημείωσε σαφή πτώση στο 0,2% το 2015. Αντίθετα, το 2011 σημειώθηκε μεγάλη ετήσια αύξηση των παγκόσμιων

εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου 3,1%, ενώ το παγκόσμιο ΑΕΠ παρουσίασε ελαφρώς αυξημένη ετήσια αύξηση (3,9%). Το 2018, η σχετικά υψηλή αύξηση των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 2,0% δεν συνοδεύτηκε από πολύ υψηλή αύξηση του ΑΕΠ (3,4%). Η ετήσια αύξηση του CO<sub>2</sub>, αυτή τη δεκαετία, ήταν παρόμοια με την αύξηση του ετήσιου συνόλου των αερίων του θερμοκηπίου. Για τις εκπομπές αερίων εκτός CO<sub>2</sub>, αυτή ήταν μικρότερη για αρκετά χρόνια, εκτός από το 2017 και το 2018, όταν ήταν επίσης 2,0%.



Εικόνα 2.11: Τάσεις στην παγκόσμια χρήση ενέργειας, 2010-2018 [33]

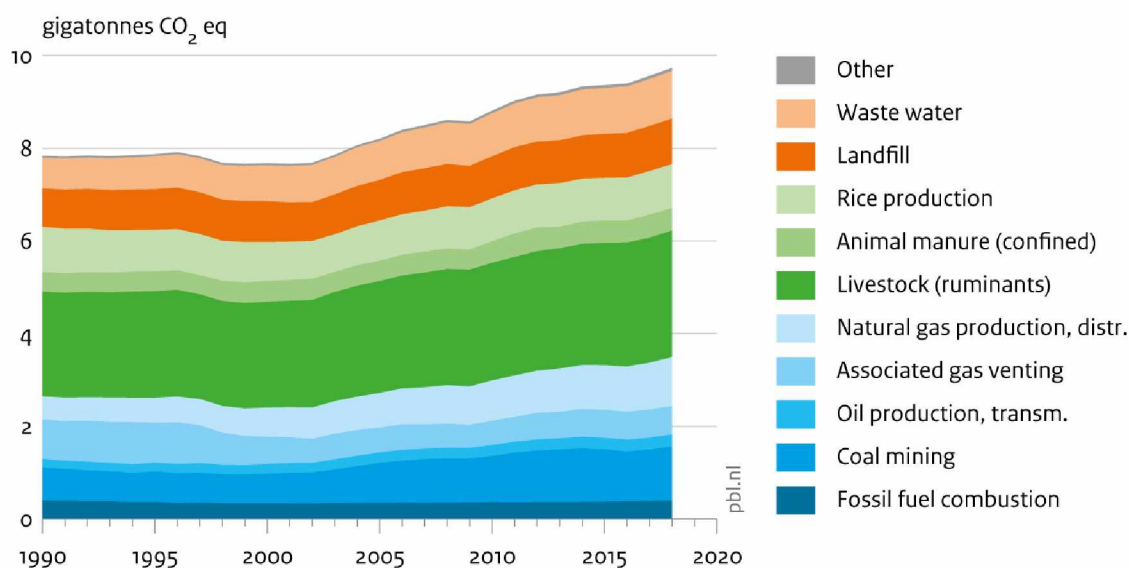
### Εκπομπές μεθανίου

Η τάση στις παγκόσμιες εκπομπές μεθανίου (CH<sub>4</sub>) από το 1990 παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12. Δείχνει ότι οι μεγαλύτερες πηγές είναι η παραγωγή και η μεταφορά άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου. Άρα, είναι η παραγωγή ορυκτών καυσίμων, όχι η καύση ορυκτών καυσίμων, που είναι μια μεγάλη πηγή εκπομπών CH<sub>4</sub>.

Από την αρχή του 21ου αιώνα οι παγκόσμιες εκπομπές CH<sub>4</sub> άρχισαν να αυξάνονται ξανά. Από το 2004 έως το 2014 αυξήθηκαν κατά 15,7%, δηλαδή 1,6% ετησίως κατά μέσο όρο. Οι πηγές που συνέβαλαν περισσότερο σε αυτή την αύξηση ήταν η εξόρυξη άνθρακα (+4,7% ετησίως κατά μέσο όρο), η παραγωγή και διανομή φυσικού αερίου (+3,1%) και η κτηνοτροφία (+0,9%). Οι χώρες με τη μεγαλύτερη απόλυτη αύξηση τα τελευταία 10 χρόνια είναι η Κίνα, η



Ινδονησία, η Ινδία και η Βραζιλία, ενώ οι μεγαλύτερες μειώσεις σημειώθηκαν στην Ευρωπαϊκή Ένωση (κυρίως στο Ηνωμένο Βασίλειο και τη Γερμανία), αλλά και στην Αργεντινή, την Ουκρανία και τη Νιγηρία.



Εικόνα 2.12: Παγκόσμιες εκπομπές μεθανίου ανά κύρια πηγή [33]

Το 2018, ο ρυθμός αύξησης των εκπομπών μεθανίου εκτιμάται σε 1,8% σε σύνολο 9,7 GtCO<sub>2</sub> eq, που αποτελεί συνέχεια της αύξησης 1,8% το 2017, αλλά σημαντικά υψηλότερο από το 2015 και το 2016 που σημείωσαν και τους δύο ρυθμούς αύξησης 0,4%. , αλλά είναι παρόμοιος με τον ρυθμό αύξησης το 2012 1,5% (Εικόνα 2.8). Οι σημερινές εκπομπές είναι 24% υψηλότερες από το 1990, όταν ήταν 7,8 GtCO<sub>2</sub> eq. Οι αυξήσεις στις εκπομπές από την κτηνοτροφία και την παραγωγή φυσικού αερίου συνέβαλαν περισσότερο στην παγκόσμια αύξηση των εκπομπών κατά 4,3% από το 2014, υποβοηθούμενη περαιτέρω από τις αυξήσεις των εκπομπών από τη διαχείριση των λυμάτων και τους χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ ορισμένες μειώσεις παρατηρήθηκαν στις εκπομπές από απόρριψη ανεπιθύμητων αερίων εξόρυξης υδρογονάνθρακα .

### Εκπομπές υποξειδίου του αζώτου

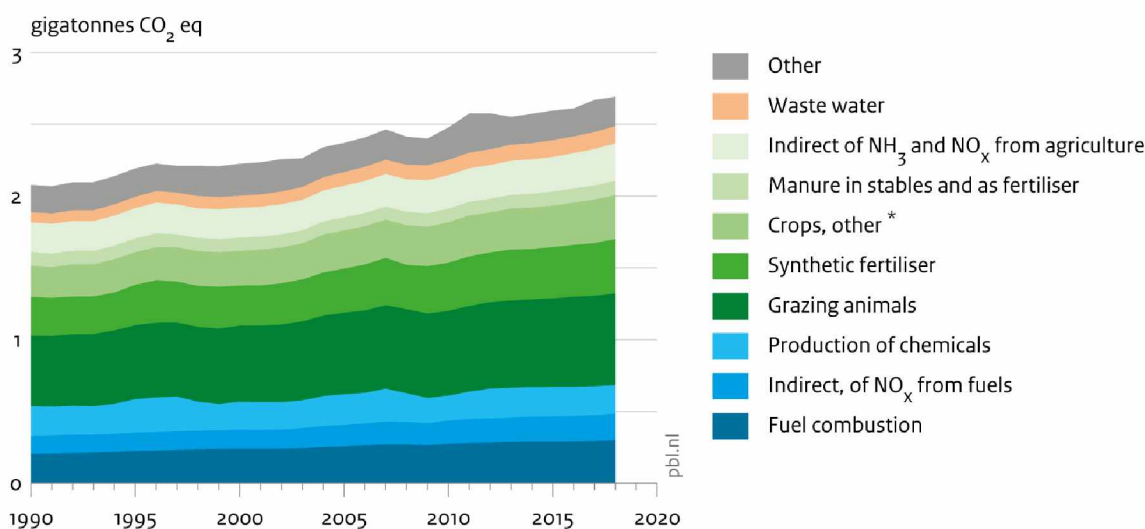
Η τάση στις παγκόσμιες εκπομπές υποξειδίου του αζώτου (N<sub>2</sub>O) από το 1990 παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9 και 2.13 . Δείχνει ξεκάθαρα ότι οι γεωργικές δραστηριότητες είναι οι μεγαλύτερες πηγές N<sub>2</sub>O που αντιπροσωπεύουν περίπου τα δύο τρίτα. Οι κύριες παγκόσμιες

πηγές εκπομπών N<sub>2</sub>O είναι από την κοπριά που ρίχνεται σε βοσκοτόπια, λιβάδια κτλ. (23%) και τη χρήση συνθετικών αζωτούχων λιπασμάτων (13%). Περισσότερο από το ήμισυ της παγκόσμιας χρήσης λιπασμάτων N είναι ουρία. Κάπως μικρότερες πηγές είναι οι άλλες εκπομπές που σχετίζονται με τις καλλιέργειες (από καλλιέργειες που δεσμεύουν N, υπολείμματα καλλιεργειών που αφήνονται στα χωράφια [16] (μαζί 11%), οι έμμεσες εκπομπές N<sub>2</sub>O που σχετίζονται με τις εκπομπές NH<sub>3</sub> από τη γεωργία (9%) και η ζωική κοπριά που εφαρμόζεται σε εδάφη (5%). Η μεγαλύτερη μη γεωργική πηγή είναι η καύση καυσίμων (17%, όταν περιλαμβάνονται οι έμμεσες εκπομπές N<sub>2</sub>O από εκπομπές NO<sub>x</sub>), ακολουθούμενη από την παραγωγή χημικών (7%) και λυμάτων (4%).

Για το 2018, η αύξηση των παγκόσμιων εκπομπών N<sub>2</sub>O υπολογίστηκε σε 0,8%, σε σύνολο 2,8 GtCO<sub>2</sub> eq, που είναι παρόμοια με εκείνα του 2015 και του 2016, που παρουσίασαν ρυθμούς αύξησης 0,9% και 0,6%, αντίστοιχα (Εικόνα 2.9). Το 2018, οι εκπομπές ήταν 28% υψηλότερες από το 1990, όταν ήταν 2,2 GtCO<sub>2</sub> eq. Οι αυξήσεις στις εκπομπές N<sub>2</sub>O από τις μεγαλύτερες πηγές, ιδίως η κοπριά που έπεσε στα χωράφια, η χρήση συνθετικών αζωτούχων λιπασμάτων και οι έμμεσες εκπομπές N<sub>2</sub>O από τη γεωργία, συνέβαλαν περισσότερο στην αύξηση των εκπομπών 4,5% παγκοσμίως από το 2014, ενώ ορισμένες παγκόσμιες μειώσεις N<sub>2</sub>O παρατηρήθηκαν στην παραγωγή χημικών ουσιών και λόγω της καύσης σαβάνας (εκούσια προληπτική καύση επιλεγμένων ακαλλιέργητων εκτάσεων κατά την ψυχρή και ξηρή περίοδο του έτους ,με σκοπό την μείωση των εκλυόμενων αερίων σε σχέση με αυτά της φυσικής δασικής πυρκαγιάς.[52]).

Οι παγκόσμιες εκπομπές N<sub>2</sub>O των περισσότερων πηγών γενικά αυξήθηκαν μάλλον ομαλά από το 1990 έως το 2018. Εξάιρεση αποτελεί το N<sub>2</sub>O από την παραγωγή χημικών ουσιών, όπως το αδιπικό οξύ (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>4</sub>-πρώτη ύλη για τη παραγωγή nylon) και το νιτρικό οξύ, όπου η τεχνολογία μείωσης του N<sub>2</sub>O έχει εφαρμοστεί σε πολλά χημικά εργοστάσια, με αποτέλεσμα τη μείωση των παγκόσμιων εκπομπών τους N<sub>2</sub>O κατά 48% από τότε που οι εκπομπές τους κορυφώθηκαν το 1979 και μετά μικρές «κορυφές» το 1997 και το 2007. Από το 2004 έως το 2014, οι παγκόσμιες εκπομπές N<sub>2</sub>O αυξήθηκαν κατά 10%, που είναι 1,2% ετησίως, κατά μέσο όρο. Οι πηγές που συνέβαλαν περισσότερο σε αυτήν την αύξηση ήταν η καύση καυσίμων (+1,3% ετησίως, κατά μέσο όρο), τα συνθετικά λιπάσματα (+1,6%), τα περιττώματα ζώων (+0,9%), οι άλλες εκπομπές που σχετίζονται με τις καλλιέργειες (+0,9%) και οι έμμεσες N<sub>2</sub>O εκπομπές από εκπομπές NO<sub>x</sub> από την καύση καυσίμου (+1,8%). Οι χώρες με τη μεγαλύτερη απόλυτη αύξηση τα τελευταία δέκα χρόνια είναι η Ινδία, η Κίνα, η Βραζιλία και το Μεξικό,

ενώ η μεγαλύτερη μείωση σημειώθηκε στην Ευρωπαϊκή Ένωση ακολουθούμενη από το Ιράν και τις Ηνωμένες Πολιτείες.

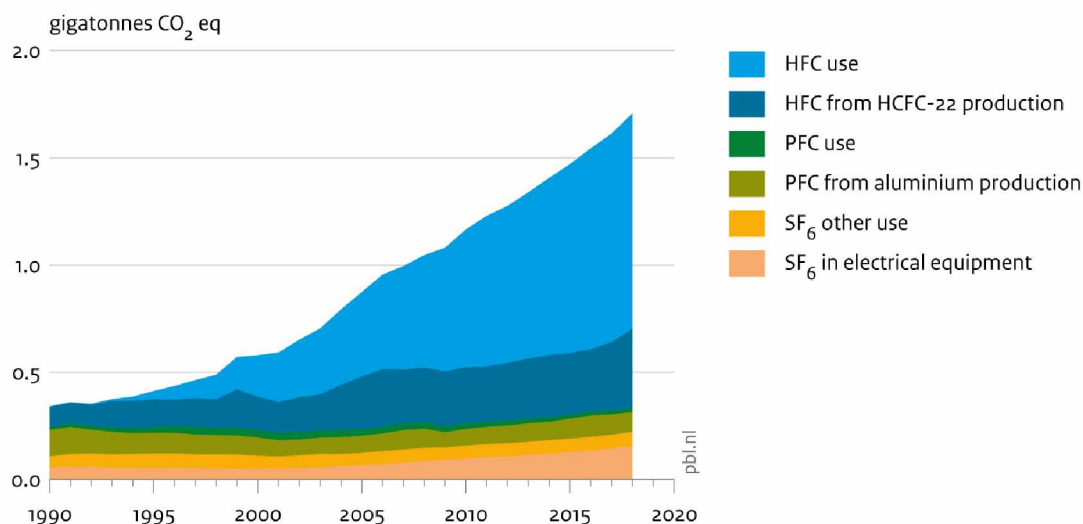


Εικόνα 2.13: Παγκόσμιες εκπομπές υποξειδίου του αζώτου, ανά κύρια πηγή [33]

### Εκπομπές φθοριούχων αερίων

Η τάση στις εκπομπές φθοριούχων αερίων παρουσιάζεται Εικόνα 2.9 και 2.14. Αν και αποτελούν τη μικρότερη κατηγορία των αερίων θερμοκηπίου που δεν περιέχουν CO<sub>2</sub>, η ομάδα παρουσιάζει την ισχυρότερη αύξηση των εκπομπών με εκτιμώμενους ετήσιους ρυθμούς παγκόσμιας αύξησης 6,5% κατά μέσο όρο, την περίοδο 2004–2014, και κάπως επιβράδυνση κατά τα έτη 2015- 2017 σε 4,5%, 5,0% και 4,4% αντίστοιχα.

Πρέπει αν ληφθεί υπόψη ότι οι εκπομπές φθοριούχων αερίων στο EDGAR v4.2 FT2018 εκτιμήθηκαν από το 2010 και μετά χρησιμοποιώντας την τάση εκπομπών 2010–2017 των πιο εκπεμπόμενων φθοριούχων αερίων, όπως αναφέρεται από τις βιομηχανικές χώρες στην UNFCCC (2019) και με παρέκταση της μέσης ετήσιας τάσης 2007–2010 για όλες τις άλλες χώρες. Χρησιμοποιώντας αυτές τις μεθόδους εκτίμησης, οι παγκόσμιες συνολικές εκπομπές φθοριούχων αερίων, το 2018, ανήλθαν σε 1,7 GtCO<sub>2</sub> eq, παγκοσμίως, σχεδόν τέσσερις φορές τις εκπομπές του 1990, οι οποίες υπολογίστηκαν σε 0,35 GtCO<sub>2</sub> eq.



Εικόνα 2.14: Παγκόσμιες εκπομπές φθοριούχων αερίων, ανά κύρια πηγή [33]

Ο κύριος λόγος για αυτήν την πολύ υψηλή ανάπτυξη είναι η εισαγωγή HFC στις αρχές της δεκαετίας του 1990 για να αντικαταστήσει τη χρήση των CFC, καθώς καταργήθηκαν για πρώτη φορά από τις βιομηχανικές χώρες για να συμμορφωθούν με το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ για την προστασία της στιβάδας του όζοντος στη στρατόσφαιρα, ενώ οι αναπτυσσόμενες χώρες θα ακολουθούσαν αργότερα. Αυτό αντιπροσωπεύει περίπου 1,0 GtCO<sub>2</sub> eq της παγκόσμιας αύξησης και αυτές οι εκπομπές HFC αντιπροσωπεύουν τώρα περίπου το 60% όλων των εκπομπών F-αερίων (Εικόνα 2.14) και οι εκπομπές HFC-134a, HFC-143a και HFC-125 αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος από αυτούς (περίπου το 90%). Επιπλέον, το HFC-23 ως υποπροϊόν προσθέτει το ένα πέμπτο στις συνολικές εκπομπές φθοριούχων αερίων. Σημειώνουμε ότι πρόκειται για πολύ ετερογενείς κατηγορίες πηγών, με μεγάλες διαφορές στους ρυθμούς αύξησης για τα διάφορα συστατικά, και συχνά με πολύ μεγάλες αβεβαιότητες στις εκπομπές, σε επίπεδο χώρας και ανά αέριο της τάξης του 100% ή περισσότερο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 Τρόποι περιορισμού αερίων του θερμοκηπίου

Η Συμφωνία του Παρισιού του 2015, που υπογράφηκε από 194 χώρες και την Ευρωπαϊκή Ένωση, απέδειξε τη διεθνή αναγνώριση των προκλήσεων που επιβάλλει η κλιματική αλλαγή και την ανάγκη δράσης για τον περιορισμό των επιπτώσεών της στην ανθρωπότητα και τον πλανήτη μας. Η συμφωνία επιδιώκει να περιορίσει τη μελλοντική αύξηση σε λιγότερο από 2°C πάνω από τις προβιομηχανικές θερμοκρασίες και να προσπαθήσει να διατηρηθεί κάτω από τους 1,5°C.

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, δηλώνει: *«Τα μέρη στοχεύουν να φτάσουν το συντομότερο δυνατό σε παγκόσμιο επίπεδο κορύφωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αναγνωρίζοντας ότι η κορύφωση θα διαρκέσει περισσότερο για τις αναπτυσσόμενες χώρες και στη συνέχεια να προβούν σε ταχείες μειώσεις, ώστε να επιτευχθεί ένα ισοζύγιο μεταξύ της εκπομπής από ανθρωπογενείς πηγές και αποθήκευσης σε ταμειυτήρες αερίων του θερμοκηπίου το δεύτερο μισό αυτού του αιώνα, στη βάση της δικαιοσύνης και στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης και των προσπαθειών για την εξάλειψη της φτώχειας».*

Ακόμη και με τις μειώσεις των εκπομπών στο μέγιστο ποσοστό που κρίνεται λογικό, είναι δύσκολο ή αδύνατο να επιτευχθεί αυτός ο στόχος των «καθαρών μηδενικών» εκπομπών – εξισορροπώντας την εκπομπή και την αποθήκευση – στο απαιτούμενο χρονοδιάγραμμα, καθώς και τους στόχους θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, ορισμένες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των αεροπορικών μεταφορών και της γεωργίας, παράγουν εκπομπές που μπορούν να μειωθούν, αλλά δεν είναι πιθανό να εξαλειφθούν εντελώς. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι εκπομπές θα απαιτηθεί, να εφαρμοστούν τεχνολογίες αφαίρεσης αερίων θερμοκηπίου (greenhouse gas removal GGR) και παράλληλα αποθήκευση σε ταμειυτήρες. Χρησιμοποιούμε τον γενικότερο όρο GGR για πληρότητα, αλλά στην πράξη αυτό είναι κυρίως αφαίρεση διοξειδίου του άνθρακα.

Ένας τρόπος με τον οποίο αξιολογούνται οι μελλοντικές εκπομπές είναι μέσω των λεγόμενων ολοκληρωμένων μοντέλων αξιολόγησης. Αυτά εξετάζουν τις μελλοντικές ενεργειακές

απαιτήσεις και παρέχουν σενάρια για δυνητικά ενεργειακά συστήματα (συμπεριλαμβανομένων μειγμάτων διαφορετικών μορφών ενέργειας και ανάπτυξης διαφορετικών τεχνολογιών) στη βάση διαφορετικών οικονομικών, περιβαλλοντικών, κοινωνικών και βιομηχανικών περιορισμών. Από τα σενάρια ολοκληρωμένων μοντέλων αξιολόγησης που εξετάστηκαν κατά την περίοδο της Συμφωνίας του Παρισιού, το 87% αυτών που αναμένουν να επιτύχουν 2°C και όλα εκείνα που αναμένουν 1,5°C, αφορούσαν GGR καθώς και μειώσεις εκπομπών. Μεταγενέστερα μοντέλα υποστήριζαν αυτήν την άποψη. Μόνο η δραστική και ταχεία μείωση των εκπομπών θα επιτρέψει την επίτευξη του στόχου των 2°C χωρίς GGR και δεν υπάρχουν αναγνωρισμένες διαδρομές για την επίτευξη 1,5°C χωρίς GGR. Η ανάγκη για GGR, εκτός από τις γρήγορες μειώσεις των εκπομπών, καθιστά σημαντική την αξιολόγηση και την ανάπτυξη βιώσιμων προσεγγίσεων για GGR μεγάλης κλίμακας. Αυτό έχει αναγνωριστεί σε εθνικό επίπεδο σε πολλές χώρες, συμπεριλαμβανομένου του Ηνωμένου Βασιλείου, όπου η κυβερνητική στρατηγική για την καθαρή ανάπτυξη (Οκτώβριος 2017) αναγνωρίζει την ανάγκη ανάπτυξης διαφορετικών προσεγγίσεων για την GGR.

Η κλίμακα του GGR που απαιτείται είναι μεγάλη. Τα περισσότερα παγκόσμια σενάρια δείχνουν ότι αρκετές εκατοντάδες GtCO<sub>2</sub> πρέπει να αφαιρεθούν μέχρι το τέλος του αιώνα για να φτάσουν οι 2°C και κοντά στους χίλιους GtCO<sub>2</sub> για 1,5°C. Αυτό συγκρίνεται με τις τρέχουσες ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub> της τάξης του 40 GtCO<sub>2</sub>, που υποδεικνύει την κλίμακα της δραστηριότητας που απαιτείται για την επίτευξη επαρκούς GGR. Αυτά τα σενάρια υποδεικνύουν επίσης ότι η GGR θα πρέπει να ξεκινήσει τώρα και να αναπτυχθεί γρήγορα τις επόμενες δεκαετίες.

Πολλά μοντέλα έχουν υποθέσει ότι το απαιτούμενο GGR θα καλυφθεί με την ανάπτυξη των δασών και τη χρήση βιοενέργειας σε συνδυασμό με τη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (BECCS). Ωστόσο, υπάρχει ένα ευρύ φάσμα άλλων προσεγγίσεων για το GGR, οι οποίες βασίζονται στη βιολογία, στην επιτάχυνση των φυσικών ανόργανων αντιδράσεων ή στις μηχανικές βιομηχανικές προσεγγίσεις. Η αξιολόγηση του τι μπορεί να περιλαμβάνει μια βιώσιμη σειρά μεθόδων GGR απαιτεί εξέταση των δυνατοτήτων, των περιορισμών και των κινδύνων όλων αυτών των διαφόρων προσεγγίσεων .

### **3.1.1 Αφαίρεση και αποθήκευση αερίων του θερμοκηπίου**

Η GGR πρέπει να περιλαμβάνει δύο διαδικασίες:

- i. Σκόπιμη δέσμευση και απομάκρυνση αερίου θερμοκηπίου από την ατμόσφαιρα.

ii. Αποθήκευση αυτού του αερίου του θερμοκηπίου σε μορφή που το εμποδίζει να επιστρέψει στην ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Ορισμένες προσεγγίσεις GGR συνδυάζουν αυτές τις διαδικασίες, με αποτέλεσμα την άμεση ενσωμάτωση του αερίου θερμοκηπίου στον κύκλο του άνθρακα. Άλλες απλά δεν παράγουν CO<sub>2</sub> που στη συνέχεια πρέπει να αποθηκευτεί με ξεχωριστή δραστηριότητα. Υπάρχουν τρεις ευρείες προσεγγίσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση των αερίων θερμοκηπίου από την ατμόσφαιρα:

- (1) αύξηση της βιολογικής πρόσληψης,
- (2) αύξηση των ανόργανων αντιδράσεων με πετρώματα ή
- (3) μηχανική άμεση δέσμευση από την ατμόσφαιρα

Τα βασικά χαρακτηριστικά καθενός από αυτά είναι τα εξής:

(1) Η ενίσχυση της βιολογικής πρόσληψης είναι επιφανειακά ελκυστική, αλλά μπορεί να αλλάξει τα οικοσυστήματα με ανεπιθύμητους τρόπους. Επιπλέον, η απαίτηση για μακροπρόθεσμη αποθήκευση άνθρακα σημαίνει ότι σημαντική έκταση γης πρέπει να αφιερωθεί σε μόνιμα δάση ή ο άνθρακας που δεσμεύεται πρέπει να αποθηκεύεται σε κάποιο άλλο περιβάλλον ή μέσο. Αυτή η αποθήκευση μπορεί να είναι σε εδάφη (για παράδειγμα βιοκάρβουνο), στον ωκεανό (λίπανση ωκεανών) ή στο δομημένο περιβάλλον. Εναλλακτικά, το φυτικό υλικό μπορεί να καεί για την παραγωγή ενέργειας και το CO<sub>2</sub> που προκύπτει να δεσμεύεται και να αποθηκεύεται (BECCS), απαιτώντας και πάλι βιώσιμη υποδομή αποθήκευσης CO<sub>2</sub>.

(2) Οι φυσικές ανόργανες αντιδράσεις που εμπλέκονται στη διάβρωση των πετρωμάτων ενδέχεται να επιταχυνθούν για το GGR. Αυτό είναι δύσκολο σε μεγάλη κλίμακα γιατί αυτές οι διαδικασίες είναι φυσικά πολύ αργές. Οι προσεγγίσεις για την επιτάχυνση των ανόργανων αντιδράσεων προϋποθέτουν τη χρήση λεπτόκοκκων ορυκτών σε μεγάλες εκτάσεις γης ή τη χρήση αποβλήτων από τη βιομηχανία. Η συγκεκριμένη αποθήκευση άνθρακα θα γινόταν σε σταθερά ανθρακικά ορυκτά στην επιφάνεια της γης ή ως σταθερά διττανθρακικά ιόντα στον ωκεανό.

(3) Η μηχανική αφαίρεση περιλαμβάνει τη διέλευση μεγάλων όγκων αέρα πάνω από μια χημική ουσία ή υλικό που προσροφά CO<sub>2</sub> (άμεση σύλληψη αέρα ή direct air capture - DAC), ακολουθούμενη από απελευθέρωση του διαχωρισμένου και πιο συγκεντρωμένου CO<sub>2</sub> και την

αποθήκευση του. Επομένως, αυτές οι προσεγγίσεις απαιτούν επίσης βιώσιμη υποδομή αποθήκευσης CO<sub>2</sub>, εκτός εάν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα στην παραγωγή τσιμέντου για κατασκευαστικούς σκοπούς.

### 3.1.2 Αναδάσωση και διαχείριση δασών

Καθώς μεγαλώνουν τα δέντρα απορροφούν CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα και το αποθηκεύουν σε ζωντανή βιομάζα, νεκρή οργανική ύλη και στα εδάφη. Η αναδάσωση διευκολύνει αυτή τη διαδικασία απομάκρυνσης του άνθρακα με τη δημιουργία ή την αποκατάσταση δασικών εκτάσεων. Μόλις ένα δάσος ωριμάσει, η καθαρή απορρόφηση CO<sub>2</sub> επιβραδύνεται. Μόλις ωριμάσουν, τα δασικά προϊόντα μπορούν να συλλεχθούν και η βιομάζα να αποθηκευτεί σε προϊόντα ξύλου με μεγάλη διάρκεια ζωής ή να χρησιμοποιηθεί για βιοενέργεια ή βιοαπανθράκωση. Η επακόλουθη αναγέννηση των δασών επιτρέπει στη συνέχεια τη συνέχιση της απομάκρυνσης του CO<sub>2</sub>. Η αναδάσωση και η διαχείριση των δασών εφαρμόζονται ήδη ευρέως σε όλο τον κόσμο.

Η δυνατότητα απομάκρυνσης του άνθρακα ποικίλλει ανάλογα με την υποτιθέμενη διαθεσιμότητα γης, την τοποθεσία, τον τύπο και τη διαχείριση του δάσους, καθώς και τους οικονομικούς και βιοφυσικούς περιορισμούς. Οι περισσότερες εκτιμήσεις συνήθως περιορίζουν την αλλαγή χρήσης γης για τη διασφάλιση των μελλοντικών συστημάτων τροφίμων, φυτικών ινών και, σε κάποιο βαθμό, των συστημάτων οικοτόπων. Οι δυνατότητες για GGR από τη δασοκομία ποικίλλουν από 3 έως 18 GtCO<sub>2</sub> ετησίως, ανάλογα κυρίως με τους υποτιθέμενους περιορισμούς στη διαθεσιμότητα της γης (350 έως 1780 Mha). Μέχρι το 2100 έχει εκτιμηθεί μια μέγιστη απομάκρυνση 12 GtCO<sub>2</sub> ετησίως ή μόλις 4 GtCO<sub>2</sub> ετησίως με μια πιο συντηρητική εκτίμηση. Μόνο οι δυνατότητες για βελτιωμένη διαχείριση των δασών υπολογίζονται σε 1 έως 2 GtCO<sub>2</sub> ετησίως έως το 2030 [35].

Τα δάση χρειάζονται περίπου 10 χρόνια για να αυξηθούν στο μέγιστο ποσοστό δέσμευσης και ανάλογα με το είδος, τα δέντρα θα ωριμάσουν μετά από περίπου 20 έως 100 χρόνια, και στη συνέχεια θα κορεστούν ως προς την απομάκρυνση του CO<sub>2</sub>, μετά την οποία δεν θα έχουν πλέον καθαρό ρόλο GGR. Ο άνθρακας μπορεί να αποθηκευτεί στα δάση επ' αόριστον, αλλά η μονιμότητα αυτής της αποθήκευσης θα μπορούσε να μειωθεί με την επανέναρξη της αποψίλωσης των δασών ή από φυσικές διαταραχές που μπορεί να επηρεαστούν περαιτέρω από την κλιματική αλλαγή - για παράδειγμα, πυρκαγιά, ασθένειες ή ξηρασία.



Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της δάσωσης και της αναδάσωσης εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως η φύτευση, η αραίωση και άλλες δραστηριότητες διαχείρισης. Ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα είναι η χρήση της γης που αντικαθίσταται. Για παράδειγμα, η αντικατάσταση των φυσικών δασών ή άλλων φυσικών οικοσυστημάτων με φυτείες δέντρων ταχύτερης ανάπτυξης ή υψηλότερης βιομάζας θα μπορούσε να μειώσει τη βιοποικιλότητα. Από την άλλη πλευρά, η αντικατάσταση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων ή των υποβαθμισμένων εκτάσεων με δάση θα μπορούσε να ενισχύσει τη βιοποικιλότητα και να έχει άλλες θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η βελτίωση της ποιότητας του εδάφους και η μείωση των πλημμυρών, της διάβρωσης και του ευτροφισμού. Οι δραστηριότητες διαχείρισης των δασών θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε διάφορες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη βάση του κύκλου ζωής, από τη φύτευση έως τη συγκομιδή και τη χρήση. Αυτές περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις από τη χρήση καυσίμων, λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, και τις εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων.

Η αναδάσωση μεγάλης κλίμακας μπορεί να επηρεάσει άμεσα τη θερμοκρασία και τη βροχόπτωση τοπικά, περιφερειακά και σε μακρινές περιοχές μέσω φυσικών αλλαγών που μπορεί να ενισχύσουν ή να μετριάσουν την κλιματική αλλαγή που προκαλείται από το CO<sub>2</sub>. Η επιλογή της τοποθεσίας είναι σημαντική, καθώς η φύτευση δασών σε χιονισμένες βόρειες εκτάσεις μπορεί να ενισχύσει την υπερθέρμανση σε τοπική ή περιφερειακή κλίμακα [36]. Τα τροπικά δάση, από την άλλη πλευρά, έχουν ως αποτέλεσμα την τοπική ψύξη και την ανακύκλωση των βροχοπτώσεων και λειτουργούν ως φίλτρα αέρα και νερού.

### **3.1.3 Αποκατάσταση υγροτόπων και παράκτιων οικοτόπων**

Η αποκατάσταση των υγροτόπων, των τυρφώνων και των παράκτιων οικοτόπων βασίζεται στην αποκατάσταση ή την κατασκευή οικοσυστημάτων υψηλής πυκνότητας άνθρακα ως μηχανισμού δέσμευσης CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα. Παραδείγματα τέτοιων οικοσυστημάτων, όπως καταγράφονται από τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), περιλαμβάνουν «εσωτερικά οργανικά εδάφη και υγροτόπους σε ορυκτά εδάφη, παράκτιους υγροτόπους (όπως μαγκρόβια δάση, παλιρροϊκά έλη και λιβάδια με θαλάσσια χόρτα) και κατασκευασμένους υγροτόπους για επεξεργασία λυμάτων » [37]. Οι λύσεις αυτές αναφέρονται στο εξής συλλογικά ως υγρότοποι. Οι τυρφώνες και οι παράκτιοι υγρότοποι έχουν υπολογιστεί ότι αποθηκεύουν το 44% έως 71% του παγκόσμιου επίγειου βιολογικού άνθρακα. Ενώ τα

αποθέματα άνθρακα σε τυρφώνες και παράκτιους υγροτόπους είναι πλέον ευάλωτα στην απελευθέρωση ως αποτέλεσμα της υποβάθμισης, της αποστράγγισης και της εκμετάλλευσης, αυτά τα οικοσυστήματα έχουν επίσης σημαντική μελλοντική ικανότητα δέσμευσης άνθρακα. Η αποκατάσταση των υγροτόπων και των τυρφώνων συνήθως επικεντρώνεται στην εκ νέου διαβροχή των οικοσυστημάτων εμποδίζοντας την αποστράγγιση, μεταξύ των υπόλοιπων μέτρων.

Δεδομένου ότι οι υγροτόποι και οι τυρφώνες διαχειρίζονται από τον άνθρωπο εδώ και πολλά χρόνια, υπάρχει υψηλό επίπεδο γνώσης και ετοιμότητας για την εφαρμογή μέτρων αποκατάστασης. Η τρέχουσα εφαρμογή των τεχνικών αποκατάστασης υγροτόπων έχει οδηγήσει σε σημαντική γνώση, αν και ορισμένα ερωτήματα παραμένουν που αφορούν την μέγιστη εφικτή κλίμακα, το κόστος, τις αντισταθμίσεις χρήσης γης και την μονιμότητα ενόψει της κλιματικής αλλαγής.

Η αποκατάσταση των οικοτόπων συχνά δρα τόσο στην ενεργή δέσμευση νέου άνθρακα όσο και στην πρόληψη περαιτέρω απώλειας μέσω της υποβάθμισης. Αν και μόνο το πρώτο είναι GGR, και τα δύο έχουν σαφώς αξία. Οι αξιολογήσεις του μακροπρόθεσμου παγκόσμιου δυναμικού GGR από την αποκατάσταση υγροτόπων κυμαίνονται από 0,4 έως 18 tCO<sub>2</sub> ανά εκτάριο ετησίως. Εκτός από αυτή τη δέσμευση, η αποκατάσταση μπορεί επίσης να μειώσει τις εκπομπές από τυρφώνες και παράκτιους υγροτόπους, με παγκόσμιο αντίκτυπο στην τάξη του 1 GtCO<sub>2</sub> ετησίως έως το 2030.

Η αποκατάσταση υγροτόπων έχει τη δυνατότητα να συμβάλει σε άλλους παγκόσμιους στόχους βιωσιμότητας, όπως η βελτίωση της ποιότητας του νερού, η προστασία από τις πλημμύρες, η αποκατάσταση των οικοσυστημάτων, η διατήρηση της βιοποικιλότητας και η δημιουργία θέσεων εργασίας. Επίσης μπορεί να προσφέρει πρόσθετα περιβαλλοντικά οφέλη παρέχοντας προστασία από φυσικές καταστροφές. για παράδειγμα, αλμυρά έλη που λειτουργούν ως αντιπλημμυρικά. Ωστόσο, ανάλογα με την προηγούμενη χρήση της αποκατεστημένης γης, η αποκατάσταση υγροτόπων θα μπορούσε είτε να βελτιώσει είτε να μειώσει τις ικανότητες ανάκλασης της θερμότητας αυτών των περιοχών, παρέχοντας πιθανώς ένα πρόσθετο όφελος ή ζημία για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για υγροτόπους που έχουν επιφανειακή βλάστηση από βρύα, χόρτα και θάμνους, αντί για δασικούς υγροτόπους όπως τα μαγκρόβια [38].

### 3.1.4 Δέσμευση άνθρακα στο έδαφος

Η δέσμευση άνθρακα του εδάφους είναι η διαδικασία απομάκρυνσης του CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα αλλάζοντας τις πρακτικές διαχείρισης της γης με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξάνεται η περιεκτικότητα του εδάφους σε άνθρακα. Το επίπεδο άνθρακα στο έδαφος καθορίζεται από μια ισορροπία εισροών άνθρακα (για παράδειγμα, από απορρίμματα, υπολείμματα, ρίζες ή κοπριά) και απώλειες άνθρακα (κυρίως μέσω της αναπνοής, αυξημένες από τη διαταραχή του εδάφους). Επομένως, πρακτικές που είτε αυξάνουν τις εισροές είτε μειώνουν τις απώλειες μπορούν να προάγουν τη δέσμευση άνθρακα στο έδαφος. Ένας μεγάλος αριθμός πρακτικών διαχείρισης της γης χρησιμοποιείται για την αύξηση του συνολικού άνθρακα του εδάφους.

Οι πρακτικές αυτές είναι:

- Διαχείριση καλλιεργειών: βελτιωμένες ποικιλίες χρήση «καλυπτικών καλλιεργειών», συστήματα πολυετούς καλλιέργειας, γεωργική βιοτεχνολογία.
- Διαχείριση θρεπτικών συστατικών: βελτιστοποιημένος τύπος λιπάσματος, ρυθμός εφαρμογής, χρονισμός, εφαρμογή ακριβείας.
- Μειωμένη ένταση άροσης και κατακράτηση υπολειμμάτων.
- Βελτιωμένη διαχείριση των υδάτων: συμπεριλαμβανομένης της αποστράγγισης εμποτισμένων ορυκτών εδαφών.
- Διαχείριση βλάστησης: βελτιωμένες ποικιλίες χόρτου, αυξημένη παραγωγικότητα και διαχείριση θρεπτικών ουσιών.
- Διαχείριση ζώων: πυκνότητα εκτροφής, βελτιωμένη διαχείριση βόσκησης, βελτιωμένη παραγωγή ζωοτροφών.

Η δέσμευση άνθρακα στο έδαφος είναι έτοιμη για εφαρμογή και πολλές από τις πρακτικές χρησιμοποιούνται ήδη σε ορισμένα μέρη. Οι απαιτούμενες γεωργικές πρακτικές και πρακτικές διαχείρισης γης είναι γενικά γνωστές από τους αγρότες και τους διαχειριστές γης και ως επί το πλείστον δεν απαιτούν πρόσθετα μηχανήματα ή υποδομές.

Τα ποσοστά δέσμευσης άνθρακα στο έδαφος ποικίλλουν σημαντικά, ανάλογα με τις προσεγγίσεις διαχείρισης γης, τον τύπο του εδάφους και την κλιματική περιοχή. Όταν κλιμακωθεί σε παγκόσμιο επίπεδο, το τεχνικό δυναμικό για τη δέσμευση άνθρακα του εδάφους εκτιμάται μεταξύ 1,1 και 11,4 GtCO<sub>2</sub> ετησίως, με πιο συντηρητικές εκτιμήσεις να

υποδηλώνουν ανώτατο όριο 6,9 GtCO<sub>2</sub>. [38]. Ωστόσο, αυτοί οι ρυθμοί δέσμευσης άνθρακα δεν θα είναι βιώσιμοι επ' αόριστον, με κορεσμό να αναμένεται μετά από μια ή δύο δεκαετίες, καθώς τα εδάφη πλησιάζουν σε μια νέα, υψηλότερη, ισορροπημένη συγκέντρωση άνθρακα. Μετά από αυτό το σημείο, η πρόσθετη δέσμευση μειώνεται στο μηδέν. Επιπλέον, η δέσμευση είναι αναστρέψιμη και οι πρακτικές πρέπει να διατηρούνται επ' αόριστον, με ετήσιο κόστος. Το χρονικό διάστημα για την επίτευξη κορεσμού εξαρτάται από τη μεθοδολογία δέσμευσης, τον τύπο του εδάφους και την κλιματική ζώνη (πιο αργό σε ψυχρότερες περιοχές). Η IPCC (Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος) χρησιμοποιεί προεπιλεγμένο χρόνο κορεσμού 20 ετών.

Η αύξηση της περιεκτικότητας σε οργανικό άνθρακα του εδάφους αποφέρει μια σειρά από περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά συν-οφέλη, συμβάλλοντας σε ορισμένους από τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (SDGs). Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν βελτιωμένη γονιμότητα του εδάφους, αυξημένη απόδοση και σταθερότητα απόδοσης, βελτιωμένη ικανότητα συγκράτησης νερού και βελτιωμένη δομή, ανάλογα με τις πρακτικές που χρησιμοποιούνται. Ωστόσο, η αύξηση της οργανικής ύλης του εδάφους μέσω της δέσμευσης άνθρακα μπορεί επίσης να αυξήσει άλλες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ενώ η δέσμευση άνθρακα του εδάφους αναμένεται να έχει μόνο μικρό ή αμελητέο αντίκτυπο στις εκπομπές μεθανίου του εδάφους, πράγματι αυξάνει τα επίπεδα οργανικού αζώτου στο έδαφος. Το αυξημένο άζωτο του εδάφους θα μπορούσε να ανοργανοποιηθεί για να γίνει υπόστρωμα για την παραγωγή N<sub>2</sub>O, αν και το αποτέλεσμα είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί.

### **3.1.5 Βιοενέργεια με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα**

Η τεχνική BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) είναι ο συνδυασμός δύο επιλογών μετριασμού: καύση βιομάζας για παραγωγή ενέργειας –συνήθως με τη μορφή ισχύος, αλλά ενδεχομένως και ως θερμότητα ή υγρό καύσιμο– και δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CCS). Η βιομάζα περιλαμβάνει ενεργειακές καλλιέργειες και απόβλητα, όπως εκείνα από δασικές, γεωργικές και δημοτικές πηγές. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως η μοναδική πηγή καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (αποκλειστική χρήση) ή σε συνδυασμό με άλλα συμβατικά ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας και το φυσικό αέριο (παραγωγή συν-καύσης).

Το CCS αναφέρεται στις τεχνολογίες που:

- Δεσμεύουν CO<sub>2</sub> από τα καυσαέρια των σταθμών παραγωγής ενέργειας ή άλλων βιομηχανικών πηγών
- Μεταχειρίζονται και μεταφέρουν CO<sub>2</sub>. και
- Αποθηκεύουν το CO<sub>2</sub> (για παράδειγμα με έγχυση σε υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς).

Ο συνδυασμός βιοενέργειας και CCS επιτυγχάνει GGR λαμβάνοντας ατμοσφαιρικό CO<sub>2</sub> προσωρινά αποθηκευμένο σε φυτά και μεταφέροντας το μόνιμα σε γεωλογικούς σχηματισμούς, ενώ χρησιμοποιεί τη βιομάζα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Επί του παρόντος, η ενέργεια γίνεται αντιληπτή ως το κύριο προϊόν και ο άνθρακας αφαιρείται και αποθηκεύεται ως υποπροϊόν, αν και αυτή η αντίληψη μπορεί να αντιστραφεί μακροπρόθεσμα..

Η βιοενέργεια από σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με βάση τη βιομάζα είναι μια ώριμη τεχνολογία, ενώ η CCS βρίσκεται σε μεγάλο βαθμό στο στάδιο της εφαρμογής με παραδείγματα όπως το έργο Boundary Dam στον Καναδά και η Petra Nova στο Τέξας.

Το BECCS έχει υπολογιστεί από ορισμένους ότι έχει παγκόσμιο δυναμικό αφαίρεσης CO<sub>2</sub> περίπου 10 GtCO<sub>2</sub> ετησίως (μέσος όρος των σεναρίων IPCC WGIII AR5109). Οι δυνατότητες αποθήκευσης και η μακροζωία για το BECCS ευθυγραμμίζονται με αυτές του CCS. Οι παγκόσμιες εκτιμήσεις του δυναμικού CCS υποδεικνύουν χωρητικότητα αποθήκευσης της τάξης των 900 GtCO<sub>2</sub>, που δεν θα περιόριζε την εφαρμογή του BECCS.

Η παραγωγή, η καύση, η δέσμευση και η αποθήκευση βιομάζας αποτελούν διαφορετικές περιβαλλοντικές προκλήσεις. Για παράδειγμα, η αλλαγή χρήσης γης που σχετίζεται με την ανάπτυξη αποκλειστικά ενεργειακών καλλιεργειών, καθώς και η διαδικασία καλλιέργειας και συγκομιδής, θα έχει αντίκτυπο στο τοπικό περιβάλλον. Αυτές οι προκλήσεις είναι παρόμοιες με εκείνες οποιωνδήποτε άλλων πρακτικών μετριασμού που βασίζονται στη βιομάζα και εξαρτώνται από τη φύση της πρώτης ύλης. Επιπλέον, η ευρεία εφαρμογή του BECCS αναμένεται επίσης να έχει σημαντικό αντίκτυπο στον παγκόσμιο κύκλο αζώτου. Οι τεχνολογίες σύλληψης που χρησιμοποιούνται στο CCS αναμένεται να μετριάσουν ορισμένα προβλήματα ποιότητας του αέρα από την καύση, ιδίως τις εκπομπές διοξειδίου του θείου. Ωστόσο, το CCS με βάση τις αμίνες μπορεί να χρειάζεται πρόσθετο μετριασμό για την αποφυγή εκπομπών προϊόντων αποδόμησης (για παράδειγμα, νιτραμίνες και νιτροζαμίνες). Θα απαιτηθεί επίσης έλεγχος των σωματιδίων και των εκπομπών NO<sub>x</sub> από το στάδιο της καύσης. Περαιτέρω περιβαλλοντικές επιπτώσεις θα δημιουργηθούν σε όλο τον κύκλο ζωής του

BECCS, συμπεριλαμβανομένης της καλλιέργειας, επεξεργασίας και συλλογής πρώτης ύλης καθώς και για δραστηριότητες CCS.

### 3.1.6 Κτίρια με βιομάζα

Ο άνθρακας δεσμεύεται μέσω της φωτοσύνθεσης στον φυσικό κόσμο στα φυτά και τα δέντρα. Τα φυτικά υλικά όπως η ξυλεία και το άχυρο μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις κατασκευές, επιτρέποντας την αποθήκευση άνθρακα στην υποδομή. Η συγκομιδή ξυλείας από ώριμα δάση επιτρέπει χώρο για νέα φύτευση και τη συνεχή πρόσληψη άνθρακα σε δάση που διαφορετικά δεν θα παρείχαν πλέον καθαρή πρόσληψη άνθρακα. Τα υλικά μπορούν να εκτελέσουν διάφορες λειτουργίες στη διαδικασία κατασκευής. Για παράδειγμα, η ξυλεία και το μπαμπού μπορούν να παρέχουν δομικά θεμέλια ενώ η κάνναβη και άλλες μορφές ινών κυτταρίνης μπορούν να παρέχουν μόνωση. Κάθε εφαρμογή θα ποικίλλει ως προς τη διάρκεια ζωής και, ενώ δεν αποτελεί μόνιμη λύση αποθήκευσης, τα προϊόντα βιομάζας μπορούν ενδεχομένως να δεσμεύσουν τον άνθρακα για αρκετές δεκαετίες. Υπάρχουν επίσης νέοι τύποι επεξεργασμένων προϊόντων ξυλείας, όπως glulam, ξυλοπλάκες OSB και μοριοσανίδες, τα οποία κατασκευάζονται από ξύλο και παρέχουν περισσότερες κατασκευαστικές δυνατότητες από ότι η χρήση «κανονικού» ξύλου.

Το ξύλο χρησιμοποιείται στην κατασκευή για περισσότερα από 10.000 χρόνια. Το σκληρό ξύλο χρησιμοποιείται συχνά για την αντοχή του, αλλά αργεί να αναπτυχθεί, γεγονός που περιορίζει τη βιωσιμότητά του για το σκοπό αυτό. Πιο πρόσφατα, έχουν αναπτυχθεί θερμικές και χημικές επεξεργασίες που μπορούν να βελτιώσουν τις ιδιότητες του μαλακού ξύλου και να επωφεληθούν από τον ταχύτερο κύκλο ανάπτυξής του. Η πιο ανεπτυγμένη επεξεργασία μαλακού ξύλου είναι η ακετυλίωση, όπου ο οξικός ανυδρίτης χρησιμοποιείται για να προκαλέσει μια χημική αντίδραση στο κυτταρικό τοίχωμα των φυτών, η οποία μειώνει την δραστηριότητα του ξύλου. Αυτή η διαδικασία ενισχύει τη σταθερότητα, την ανθεκτικότητα και την αντοχή του υλικού στη φθορά των μυκήτων και στη φωτιά.

Η κατασκευή με βιομάζα μπορεί τόσο περιορίσει νέες εκπομπές όσο και να παρέχει αποθήκευση για το CO<sub>2</sub> που δεσμεύεται στη δασοκομία. Το δυναμικό GGR από την κατασκευή με βιομάζα μέσω της αντικατάστασης συμβατικών δομικών υλικών εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 0,5 έως 1 GtCO<sub>2</sub>. Έχει υποστηριχθεί ότι αυτό θα μπορούσε να εξοικονομήσει

14 – 31% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub> και 12% έως 19% της παγκόσμιας κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτή η κλίμακα, θα απαιτούνταν το 34% έως το 100% της αειφόρου ανάπτυξης του ξύλου στον κόσμο. Ο άνθρακας παραμένει δεσμευμένος για τη διάρκεια χρήσης του κτιρίου ή της ξυλείας. Γενικά, η διάρκεια ζωής των ξύλινων κτιρίων και οι εκπομπές καθ' όλη τη διάρκεια ζωής που σχετίζονται με το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης είναι συγκρίσιμες με αυτές των κατασκευών από σκυρόδεμα και χάλυβα.

Αυτά τα υλικά με βάση την ξυλεία παρέχουν μια εναλλακτική λύση στα τυπικά δομικά υλικά, συμπεριλαμβανομένου του χάλυβα και του σκυροδέματος, τα οποία είναι συνήθως υψηλής εντάσεως άνθρακα στην παραγωγή. Η ξυλεία πιστεύεται ότι έχει μακροπρόθεσμα οφέλη για ψηλά κτίρια καθώς είναι ελαφρύ δομικό υλικό, με αποτέλεσμα να μειώνει την επιβάρυνση τόσο της κατασκευής όσο και των θεμελίων, εξοικονομώντας επιπλέον χάλυβα και σκυρόδεμα. Η δημιουργία μιας μαζικής αγοράς προϊόντων ξύλου θα μπορούσε επίσης να βοηθήσει στην παροχή κινήτρων για την αναδάσωση. Η καλή διαχείριση των δασών είναι ένα απαραίτητο στοιχείο στην παραγωγή ξύλου για τον κατασκευαστικό κλάδο, ωστόσο, υπάρχουν κίνδυνοι κακής διαχείρισης. Υπάρχουν επίσης κίνδυνοι βιοποικιλότητας εάν όλα τα δέντρα που καλλιεργούνται είναι του ίδιου είδους. Επιπλέον, στο τέλος της ζωής τους, τα ξύλινα δομικά υλικά θα πρέπει να επαναχρησιμοποιηθούν για να παραμείνει δεσμευμένος ο άνθρακας, κάτι που είναι πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί σε κλίμακα.

### **3.1.7 Ανθράκωση ορυκτών**

Η μετατροπή των πυριτικών πετρωμάτων σε ανθρακικά μπορεί να επιταχυνθεί με βιομηχανικές διεργασίες πάνω από το έδαφος (*ex situ*) ή σε πυριτικά πετρώματα κάτω από την επιφάνεια (*in situ*). Οι περισσότερες διεργασίες ενανθράκωσης ορυκτών βασίζονται σε ένα αέριο πλούσιο σε CO<sub>2</sub> και, ως εκ τούτου, θεωρούνται καλή εναλλακτική λύση έναντι του συμβατικού CCS. Στις διεργασίες *ex situ* επιταχύνουν καταλυτικά τις αντιδράσεις προεπεξεργασίας των ορυκτών πριν από την αντίδραση με το CO<sub>2</sub>. Οι *in situ* διεργασίες βασίζονται στην έγχυση CO<sub>2</sub> σε διαπερατό ορυκτό και στην επιτάχυνση των αντιδράσεων από υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις σε βάθος. Το προκύπτον προϊόν και των δύο αυτών διεργασιών είναι ένα σταθερό ανθρακικό ορυκτό, το οποίο μπορεί να έχει εμπορική χρήση ως δομικό υλικό ή για παραγωγή

χάλυβα. Είναι επίσης πιθανό τα προϊόντα, όπως το ανθρακικό μαγνήσιο, να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της αλκαλικότητας των ωκεανών για περαιτέρω GGR.

Πολλές ομάδες, που χρηματοδοτούνται από τις κυβερνήσεις και τη βιομηχανία, έχουν πραγματοποιήσει ex situ διεργασίες για την ενανθράκωση ορυκτών. Παρά τις υψηλές απαιτήσεις για πρώτες ύλες και ενέργεια, ορισμένες εταιρείες έχουν εμπορευματοποιήσει τις διαδικασίες ενανθράκωσης σε μικρή κλίμακα (για παράδειγμα η Calera στις ΗΠΑ). Το Ηνωμένο Βασίλειο φιλοξενεί μια από τις λίγες εταιρείες που εμπορευματοποιούν ex situ ανθρακούχο ορυκτό που χρησιμοποιείται επί του παρόντος για την επεξεργασία επικίνδυνων βιομηχανικών αποβλήτων.

Τα κατάλληλα πυριτικά άλατα για την ενανθράκωση ορυκτών όπως ο βασάλτης και παρόμοια πετρώματα υπάρχουν σε πολύ μεγάλες ποσότητες σε πολλές περιοχές του κόσμου. Οι θεωρητικές δυνατότητες αποθήκευσης της ενανθράκωσης ορυκτών είναι επομένως ουσιαστικά απεριόριστες. Οι περιορισμοί προκύπτουν από το κόστος και την επεκτασιμότητα της διεργασίας. Τα ανθρακικά ορυκτά που προκύπτουν είναι σταθερά και παρέχουν ίσως την πιο ασφαλή μέθοδο από κάθε άλλη μορφή δέσμευσης CO<sub>2</sub>.

### **3.1.8 Άμεση δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (DACCS)**

Άμεση δέσμευση αέρα και αποθήκευση άνθρακα (Direct Air Capture and Carbon Storage) είναι το όνομα που δόθηκε σε μια οικογένεια διαφορετικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούν χημικούς δεσμούς για την απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> απευθείας από την ατμόσφαιρα και στη συνέχεια για την αποθήκευση του. Το CO<sub>2</sub> δεσμεύεται από τον αέρα σε έναν «διαχωριστικό παράγοντα» που στη συνέχεια αναγεννάται με θερμότητα, νερό ή και τα δύο, απελευθερώνοντας το CO<sub>2</sub> ως ρεύμα υψηλής καθαρότητας για επακόλουθη γεωλογική αποθήκευση, ανοργανοποίηση ή αξιοποίηση. Δύο βασικά προβλήματα στο DACCS είναι οι μεγάλες ροές αέρα που απαιτούνται για μια σχετικά μικρή ποσότητα CO<sub>2</sub> που δεσμεύεται και οι πόροι που απαιτούνται για την αναγέννηση του μέσου διαχωρισμού. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών τεχνολογιών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό.

Τα λεγόμενα «τεχνητά δέντρα», που χρησιμοποιούν μια μεγάλη εκτεθειμένη επιφάνεια υλικού προσρόφησης άνθρακα για την παθητική αφαίρεση του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Μόλις κορεστεί, το προσροφητικό υγραίνεται ή εμποτίζεται σε νερό σε χαμηλή πίεση. Αυτό



απελευθερώνει το CO<sub>2</sub> και επιτρέπει στο προσροφητικό να στεγνώσει και να ξαναχρησιμοποιηθεί. Αυτή η διαδικασία διατίθεται σε μικρής κλίμακας εμπορική χρήση, για παροχή CO<sub>2</sub> σε θερμοκήπια.

Μια δεύτερη τεχνολογία, η «Υποστηριζόμενη απορρόφηση αμινών», στην οποία οι αζωτούχες οργανικές ενώσεις που ονομάζονται αμίνες (που χρησιμοποιούνται επίσης συνήθως για CCS) συγκρατούνται σε ένα πορώδες υλικό με μεγάλη επιφάνεια. Στη συνέχεια, ο αέρας διέρχεται από αυτό το υλικό και οι αμίνες αντιδρούν με το CO<sub>2</sub>. Μόλις κορεστεί, αυτό το υλικό θερμαίνεται απελευθερώνοντας το CO<sub>2</sub> και ταυτόχρονα αναγεννάται για περαιτέρω χρήση.

Αυτή η διαδικασία εφαρμόστηκε πρόσφατα σε ένα μικρό εμπορικό εργοστάσιο από την Climeworks [39]. Μια παρόμοια διαδικασία βασισμένη σε αμίνες που υποστηρίζονται με κεραμικά στηρίγματα μονόλιθου έχει εφαρμοστεί από την Global Thermostat, η οποία, παρόμοια με την Climeworks, χρησιμοποιεί χαμηλής ποιότητας θερμότητα προερχόμενη από άλλες εφαρμογές για την αναγέννηση της αμίνης.

Τέλος στην «διεργασία lime-soda process» που χρησιμοποιείται από την Carbon Engineering, το υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) απορροφά CO<sub>2</sub> από την ατμόσφαιρα δημιουργώντας ανθρακικό νάτριο (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) και νερό (H<sub>2</sub>O). Στη συνέχεια προστίθεται ασβέστης (CaO) για την αναγέννηση του υδροξειδίου του νατρίου, αφήνοντας ένα ίζημα ανθρακικού ασβεστίου (CaCO<sub>3</sub>) το οποίο θερμαίνεται για να αναγεννηθεί ο ασβέστης και να παραχθεί CO<sub>2</sub>.

Όλες αυτές οι διαδικασίες έχουν υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια που μπορεί να είναι απαγορευτικές, αλλά θα μπορούσαν να βελτιστοποιηθούν εάν ενσωματωθούν σε άλλα συστήματα.

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα διαδικασιών DACCS σε διάφορα στάδια ωρίμανσης. Οι εφαρμογές σε εργαστηριακή και πιλοτική κλίμακα αυξάνονται, και προσανατολίζονται στη διερεύνηση εναλλακτικών μεθόδων μείωσης των ενεργειακών απαιτήσεων των διεργασιών, κάτι το οποίο αποτελεί ένα από τα κύρια εμπόδια στην υιοθέτηση των συγκεκριμένων τεχνολογιών. Εν τω μεταξύ, πιο ώριμες τεχνολογίες, όπως η απορρόφηση αμινών, είναι πιο κοντά στην πρακτική εφαρμογή, με τουλάχιστον τέσσερα εργοστάσια να λειτουργούν πλέον σε ημιεμπορική κλίμακα. Εκτιμάται ότι αυτές οι τεχνολογίες βρίσκονται επί του παρόντος μεταξύ της ανάπτυξης πιλοτικών μονάδων και της επίδειξης πρωτοτύπων στο πεδίο.

Το δυναμικό αποθήκευσης και η μακροζωία του DACCS εξαρτάται από το δυναμικό αποθήκευσης που σχετίζεται με την επιλεγμένη μέθοδο απομόνωσης. Εάν χρησιμοποιείται

γεωλογική αποθήκευση, τότε είναι δυνατή η μακροχρόνια αποθήκευση (που πλησιάζει σε αόριστο χρονικό διάστημα). Σε παγκόσμιο επίπεδο, ακόμη και αν ληφθούν υπόψη για χρήση μόνο εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, εκτιμάται ότι υπάρχει χωρητικότητα αποθήκευσης της τάξης των 900 GtCO<sub>2</sub>.

Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι παθητικές διεργασίες μπορεί να απαιτήσουν σημαντική χρήση γης και να οδηγήσουν σε αλλαγές του γεωλογικού τοπίου. Άλλες διεργασίες ενδέχεται να απαιτούν καύση καυσίμου για τη θερμική αναγέννηση του παράγοντα δέσμευσης CO<sub>2</sub>. Οι διαδικασίες δέσμευσης άνθρακα με βάση τις αμίνες θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να αποφεύγεται η απελευθέρωση προϊόντων αποδόμησης (όπως νιτραμίνες και νιτροασαμίνες).

Η εφαρμογή DACCS αντιμετωπίζει δύο σημαντικά τεχνικά ζητήματα: πρόσβαση σε επαρκή ενέργεια και νερό με χαμηλές εκπομπές άνθρακα για την προώθηση της δέσμευσης και της αναγέννησης και την αντιμετώπιση του προκύπτοντος ρεύματος CO<sub>2</sub> υψηλής καθαρότητας. Ωστόσο, ένα από τα πλεονεκτήματά της είναι ότι μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε, ώστε να είναι βολική η πρόσβαση στους απαραίτητους πόρους. Οι απαιτήσεις τεχνολογίας και αποθήκευσης του DACCS είναι αντίστοιχες με εκείνες του CCS και έτσι το χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης και εφαρμογής τους θα είναι επίσης παρόμοιο. Η ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας έως το 2050, με πρόωρη ανάπτυξη το 2030, είναι δυνατή από τεχνικής άποψης. Οι εκτιμήσεις κόστους για τη διαδικασία δέσμευσης (χωρίς την αποθήκευση) για έργα πρώιμου σταδίου κυμαίνονται συνήθως από 200 έως 600 \$ ανά tCO<sub>2</sub>, με εταιρείες όπως η Carbon Engineering, να στοχεύουν στα 100 \$ ανά tCO<sub>2</sub>.

Οι κύριοι κίνδυνοι του DACCS σχετίζονται με την απαίτηση αποθήκευσης και τη μεταφορά CO<sub>2</sub> σε υψηλή πίεση και με την ακεραιότητα της αποθήκευσης του.

### **3.2 Διαδικασίες και συσκευές ελέγχου ρύπανσης αιωρούμενων σωματιδίων**

Στρατηγικές και μηχανισμοί έχουν αναπτυχθεί για τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τις εκπομπές των PM. Κάποιες είναι απλές εφαρμογές, πολύ χαμηλού κόστους ενώ κάποιες άλλες απαιτούν υψηλές επενδύσεις κεφαλαίου. [67]. Οι μηχανισμοί περιλαμβάνουν αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς, πρακτικές διαχείρισης

(βελτιωμένος σχεδιασμός διεργασιών, λειτουργία, συντήρηση και καθαριότητα), διατάξεις ελάττωσης της σκόνης και χρήση καθαρότερου καυσίμου. Περαιτέρω μέτρα ελέγχου απαιτούν τη χρήση ειδικού εξοπλισμού όπως μηχανικοί διαχωριστές, υφασμάτινα φίλτρα και ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές, που απαιτούν υψηλές επενδύσεις κεφαλαίου.

Ο έλεγχος των σωματιδίων στην πηγή μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, για παράδειγμα μέσω αλλαγών πρώτων υλών, λειτουργικών αλλαγών, τροποποιήσεων ή αντικατάστασης εξοπλισμού διεργασιών. Όταν η διόρθωση της πηγής δεν μπορεί να επιτύχει τον επιθυμητό στόχο του ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, χρησιμοποιούνται τεχνικές καθαρισμού των εκροών αερίων. Τα σωματίδια που απορρίπτονται μειώνονται με την εφαρμογή εξοπλισμού ελέγχου. Ο εξοπλισμός για τον έλεγχο των σωματιδίων έχει σχεδιαστεί για την αφαίρεση στερεών και υγρών σωματιδίων από το ρεύμα αερίου. Η επιλογή της συσκευής συλλογής εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων όπως η ποσότητα του προς επεξεργασία αερίου, η φύση και η συγκέντρωση των σωματιδίων, τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων, η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία του αερίου μέσου.

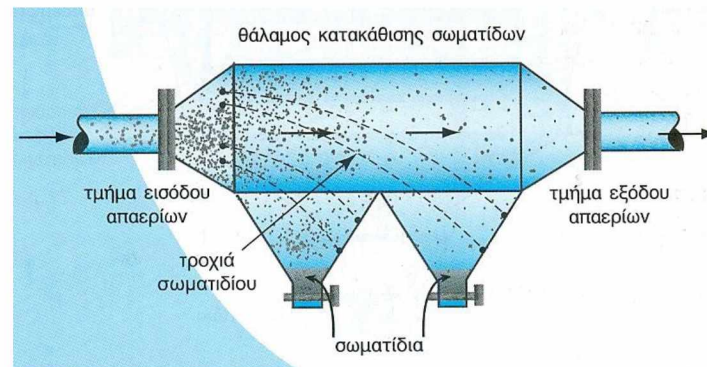
Οι κύριοι στόχοι της χρήσης του εξοπλισμού ελέγχου είναι οι εξής:

1. Πρόληψη όχλησης και βλάβης σε περιουσίες.
2. Εξάλειψη των κινδύνων για την υγεία τόσο του προσωπικού του εργοστασίου όσο και του γενικού πληθυσμού
3. Ανάκτηση πολύτιμων απορριμμάτων
4. Ελαχιστοποίηση των οικονομικών απωλειών μέσω της μείωσης της συντήρησης των εγκαταστάσεων
5. Βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων.

### **3.2.1 Συσκευές βαρυτικής καθίζησης**

Ο θάλαμος καθίζησης βαρύτητας είναι η απλούστερη συσκευή που χρησιμοποιείται για τη συλλογή σωματιδίων. Απαιτεί καθαρισμό δια χειρός σε τακτά χρονικά διαστήματα. Αποτελείται από έναν μακρύ θάλαμο μέσα από τον οποίο το μολυσμένο αέριο διέρχεται αργά, αφήνοντας χρόνο στα σωματίδια να καθιζάνουν λόγω βαρύτητας. Χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση μεγάλων σωματιδίων ( $\geq 50\mu\text{m}$ ). Προκαλούν χαμηλή πτώση πίεσης και δεν απαιτούν

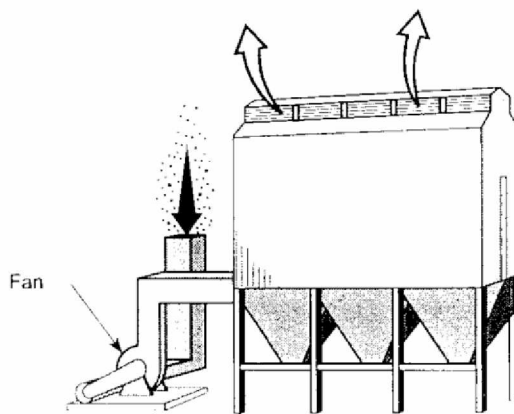
ιδιαίτερη συντήρηση, αλλά η απόδοσή τους είναι αρκετά χαμηλή για τα λεπτά σωματίδια. Χρησιμοποιούνται ευρέως για την αφαίρεση μεγάλων στερεών σωματιδίων. Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούνται συνήθως ως προ-καθαριστικά πριν από τη διέλευση του αερίου από συσκευές συλλογής υψηλής απόδοσης. Μερικές φορές χρησιμοποιούνται ως πρώτο βήμα στον έλεγχο της σκόνης στις βιομηχανίες επεξεργασίας, ιδιαίτερα για μεταλλουργία και μεταλλουργικές διεργασίες. [40,41]



Εικόνα 3.1: Συσκευή βαρυτικής καθίζησης [43]

### 3.2.2 Υφασμάτινα φίλτρα (Σακκόφιλτρα - Baghouses)

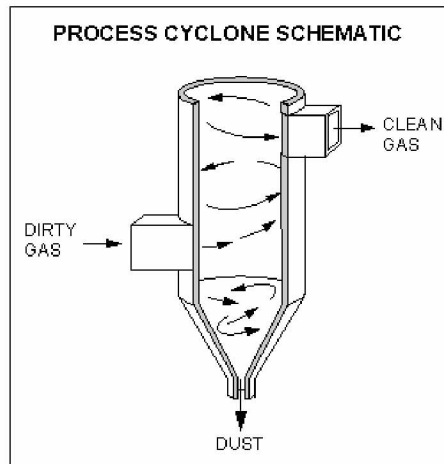
Τα υφασμάτινα φίλτρα είναι κατασκευασμένα από νήμα φυσικών ινών ή από συνθετικό συνεχές μονό νήμα. Συνήθως σχηματίζονται σε κυλινδρικούς σωλήνες και κρέμονται σε πολλαπλές σειρές για να παρέχουν μεγάλη επιφάνεια για τη διέλευση αερίου, διάταξη γνωστή ως baghouse. Αυτά είναι συνήθως κατασκευασμένα από βαμβάκι, μαλλί, συνθετικές ή γυάλινες ίνες και μπορεί να υπάρχουν εκατοντάδες σακούλες σε μια τέτοια συσκευή. Το φιλτράρισμα υφάσματος είναι μια πολύ γνωστή και πρακτική μέθοδος για τον διαχωρισμό ξηρών σωματιδίων από ένα ρεύμα αερίων (συνήθως αέρα ή αέρια καύσης). Το αέριο ρέει μέσα από το ύφασμα, αφήνοντας τη σκόνη στο εσωτερικό του σάκου, ενώ το καθαρισμένο αέριο εξέρχεται της σακούλας στην άλλη πλευρά. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι υφασμάτων, διαφορετικά μεγέθη σάκων, διαφορετικοί τρόποι ροής των αερίων μέσα από αυτούς και διαφορετικοί τρόποι καθαρισμού τους. Η εκτεταμένη λειτουργία ενός baghouse απαιτεί ότι οι σακούλες πρέπει να καθαρίζονται τακτικά. [40,42]



Εικόνα 3.2: Απεικόνιση διάταξης σακκόφιλτρων [44]

### 3.2.3 Διαχωριστές Κυκλώνα (Φυγόκεντροι).

Οι διαχωριστές κυκλώνα είναι συσκευές που χρησιμοποιούν τη φυγόκεντρη δύναμη που παράγεται από ένα περιστρεφόμενο ρεύμα αερίου για να διαχωρίσει τα σωματίδια από το φέρων αέριο. Η είσοδος της ροής στον κυκλώνα είναι αξονική ή εφαπτομενική μέσω του τμήματος εισόδου, το οποίο μπορεί να έχει διαφορετικά σχήματα για κάθε κυκλώνα. Ο απλός σχεδιασμός, το χαμηλό κόστος συντήρησης και η προσαρμοστικότητα σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας, όπως μεγέθη και ρυθμοί ροής, καθιστούν τους κυκλώνες μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες συσκευές αφαίρεσης σωματιδίων. Οι μικροί κυκλώνες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή σωματιδίων στον τομέα του ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης για δειγματοληψία περιβάλλοντος, ενώ οι μεγάλοι κυκλώνες χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση σωματιδίων από βιομηχανικά ρεύματα αερίου. Οι κυκλώνες είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης λόγω του στιβαρού σχεδιασμού τους και των ανθεκτικών υλικών τους. Χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο των σωματιδίων που προέρχονται από βιομηχανικές εργασίες όπως η παραγωγή τσιμέντου, η επεξεργασία ζωοτροφών και σιτηρών, η επεξεργασία τροφίμων και ποτών, οι βιομηχανίες χαρτιού και κλωστοϋφαντουργίας και οι βιομηχανίες επεξεργασίας ξύλου. [40]



Εικόνα 3.3: Διάταξη συστήματος κυκλώνα [43]

### 3.2.4 Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές (ESP)

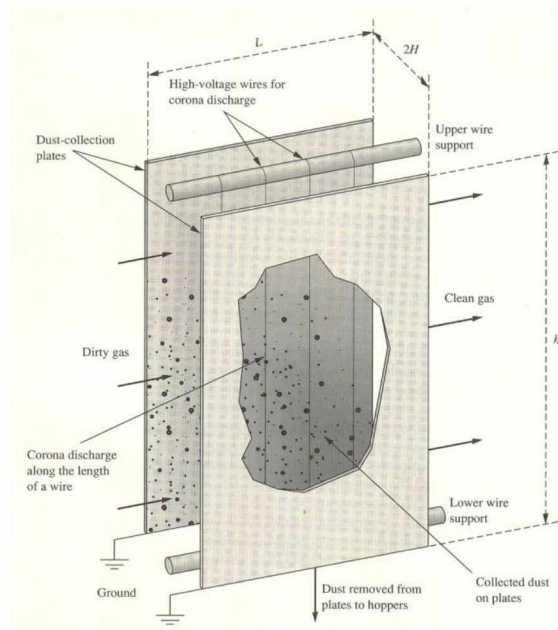
Ο ηλεκτροστατικός κατακρημνιστήρας (Electrostatic Precipitator ESP) ή ηλεκτρο-φιλτράρισμα είναι η πιο αποτελεσματική και ευρέως χρησιμοποιούμενη συσκευή για τον έλεγχο των εκπομπών σωματιδίων σε εγκαταστάσεις, από εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εργοστάσια τσιμέντου, εργοστάσια χαρτοπολλτού και χαρτιού έως διυλιστήρια πετρελαίου. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για καθαρισμό αέρα σε δημόσια κτίρια, θέατρα, σιδηροδρομικές γραμμές, αυτοκίνητα κ.λπ. Τα σωματίδια φορτίζονται ηλεκτρικά και έλκονται από τις επιφάνειες του συλλέκτη.

Η διαδικασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

1. Ο ιονισμός των μολυσμένων σωματιδίων του αέρα που ρέει μεταξύ των ηλεκτροδίων
2. Η μεταφορά και η συλλογή των σωματιδίων σε αντίθετα φορτισμένες πλάκες
3. Εκτόξευση σωματιδίων από τις πλάκες σε χοάνες
4. Η αφαίρεση του συλλεγμένου υλικού από τις χοάνες.

Ο αέρας ρέει ελεύθερα μέσω του ESP, αλλά τα σωματίδια μένουν πίσω στις πλάκες. Το υλικό που συλλέγεται απομακρύνεται περιοδικά ή ξεπλένεται από τις πλάκες και κατακάθεται στον πυθμένα. Το ESP είναι το μοναδικό μεταξύ των συσκευών ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που οι δυνάμεις συλλογής δρουν μόνο στα σωματίδια και όχι σε ολόκληρο το ρεύμα αέρα. Αυτό το φαινόμενο συνήθως οδηγεί σε υψηλή απόδοση συλλογής με πολύ χαμηλή πτώση πίεσης αέρα. Οι ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές μπορούν να είναι είτε μονοβάθμιοι

είτε δύο σταδίων. Το ESP μπορεί επίσης να ταξινομηθεί, ως ξηρό και υγρό ESP, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας [40].



Εικόνα 3.4: Διάταξη ηλεκτροστατικών κατακρημνιστών [45]

### 3.2.5 Πλοντρίδες (Scrubbers)

Στην τεχνολογία ελέγχου της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ο όρος scrubber σημαίνει μια συσκευή για τη συλλογή λεπτών σωματιδίων σε σταγόνες υγρού. Οι υγροί συλλέκτες είναι συσκευές, οι οποίες χρησιμοποιούν ένα υγρό για να βοηθήσουν στην απομάκρυνση των σωματιδίων από το ρεύμα φέροντος αερίου. Κυρίως, το νερό χρησιμοποιείται ως υγρό καθαρισμού. Σε έναν υγρό συλλέκτη, η σκόνη συσσωματώνεται με νερό και στη συνέχεια διαχωρίζεται από το αέριο μαζί με το νερό. Οι υγροί καθαριστές περιλαμβάνουν τέσσερα βασικά βήματα στη συλλογή σωματιδίων.

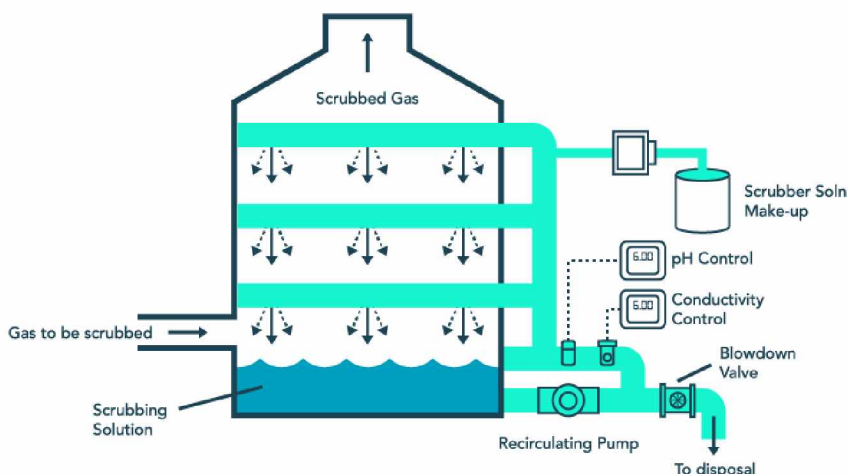
Το πρώτο από αυτά είναι οι μεταφορά. Τα σωματίδια πρέπει να μετακινηθούν κοντά στα σταγονίδια νερού που είναι συνήθως 10 έως 1000 φορές μεγαλύτερα.

Το δεύτερο βήμα είναι η σύγκρουση. Το σωματίδιο πρέπει να συγκρουστεί με το σταγονίδιο.

Το τρίτο βήμα είναι η προσκόλληση.

Τελευταίο βήμα είναι η καθίζηση ή η αφαίρεση του σταγονιδίου που περιέχει το σωματίδιο σκόνης.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι υγρών συλλεκτών, όπως πύργοι ψεκασμού, πλυντρίδες venturi, κυκλωνικές πλυντρίδες και πλυντρίδες με πληρωτικό υλικό. [40].



Εικόνα 3.5: Πλυντρίδα (Scrubber) [46]

Στη συνέχεια (Πίνακας 3.1) παρουσιάζονται πινακοποιημένα τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των κυριότερων τύπων συσκευών διαχωρισμού [55].

Πίνακας 3.1: Συσκευές διαχωρισμού αιωρούμενων σωματιδίων [55]

<i>πλεονεκτήματα</i>	<i>μειονεκτήματα</i>
<b>Διαχωριστές αδράνειας (κυκλώνες)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χαμηλό κόστος κατασκευής</li> <li>• Απλότητα κατασκευής και ευκολία συντήρησης</li> <li>• Χαμηλή πτώση πίεσης λειτουργίας 5–15 mb</li> <li>• Περιορισμοί θερμοκρασίας και πίεσης επιβάλλονται μόνο από τα υλικά κατασκευής</li> <li>• Ήρεη συλλογή και απόρριψη</li> <li>• Σχετικά μικρές απαιτήσεις χώρου</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Σχετικά χαμηλή συνολική απόδοση συλλογής σωματιδίων, ειδικά για μεγέθη σωματιδίων κάτω των 10 μm</li> <li>-Αδυναμία χειρισμού κολλωδών υλικών</li> </ul>
<b>Πλυντρίδες</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Χωρίς δευτερεύουσες πηγές σκόνης</li> <li>• Απαιτήση σχετικά μικρού χώρου</li> <li>• Δυνατότητα συλλογής αερίων, καθώς και κολλωδών σωματιδίων</li> <li>• Δυνατότητα χειρισμού ροών αερίων υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας</li> <li>• Χαμηλό κόστος κατασκευής (εάν δεν απαιτείται σύστημα επεξεργασίας λυμάτων)</li> <li>• Ασήμαντη πτώση πίεσης για διεργασίες όπου το ρεύμα αερίου βρίσκεται ήδη σε υψηλή πίεση</li> <li>• Υψηλή απόδοση συλλογής λεπτών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Πιθανό πρόβλημα διάθεσης νερού/επεξεργασίας λυμάτων</li> <li>- Προβλήματα διάβρωσης (πιο σοβαρά από ότι με συστήματα ξηρού αέρα)</li> <li>- Υψηλή πτώση πίεσης περίπου 25 mb</li> <li>- Υψηλή απαίτηση ισχύος</li> <li>- Πρόβλημα συσσώρευσης στερεών στο γρή-στεγνή διεπιφάνεια</li> <li>- Υψηλό κόστος συντήρησης</li> </ul>



σωματιδίων (αν και με κόστος της πτώσης πίεσης)	
<b><i>Ηλεκτροστατικοί κατακρημνιστές(ESP)</i></b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αποδοτικότητα συλλογής 99,9% για χονδροειδή και λεπτά σωματίδια με σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας</li> <li>• Στεγνή συλλογή και απόρριψη σκόνης</li> <li>• Χαμηλή πτώση πίεσης συνήθως μικρότερη από 1–2 mb</li> <li>• Συνεχής λειτουργία με ελάχιστη συντήρηση</li> <li>• Χαμηλό κόστος λειτουργίας</li> <li>• Δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες (έως 700 °C), και υψηλή πίεση (έως 10 bar) ή υπό κενό</li> <li>• Δυνατότητα χειρισμού μεγάλων ρυθμών ροής αερίου</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Υψηλό κόστος κατασκευής</li> <li>- Υψηλή ευαισθησία στις διακυμάνσεις των συνθηκών ροής αερίου (ρυθμοί ροής, θερμοκρασία, σωματίδια και σύνθεση αερίου ιόντων και φορτίων σωματιδίων)</li> <li>- Δυσκολίες στη συλλογή σωματιδίων με υψηλή ή χαμηλή ειδική αντίσταση</li> <li>- Σχετικά μεγάλη απαίτηση χώρου για εγκατάσταση</li> <li>- Κίνδυνος έκρηξης όταν λειτουργεί με εύφλεκτα αέρια</li> <li>- Ειδικές απαιτήσεις ασφαλείας για την προστασία του προσωπικού από υψηλή τάση κατά τη συντήρηση και λειτουργία του ESP</li> <li>- Παραγωγή όζοντος από τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόδια κατά τον ιονισμό αερίου</li> <li>- Απαιτηση ειδικά εκπαιδευμένου προσωπικού συντήρησης</li> </ul>
<b><i>Συστήματα υφασμάτων φίλτρων (σακκόφιλτρα)</i></b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Πολύ υψηλή απόδοση συλλογής (99,9%) και για χονδροειδή και λεπτά σωματίδια</li> <li>• Ανταπόκριση σεδιακυμάνσεις του ρεύματος αερίου και μεγάλες αλλαγές στα φορτία σκόνης εισόδου (φίλτρα για συνεχή καθαρισμό)</li> <li>•Ανακυκλοφορία αέρα εξόδου φίλτρου</li> <li>• Ξηρή ανάκτηση του συλλεγόμενου υλικού για μετέπειτα απόρριψη και διάθεση</li> <li>• Χωρίς προβλήματα διάβρωσης</li> <li>• Απλή συντήρηση</li> <li>• Υψηλή απόδοση συλλογής καπνού και αερίου υπομικρών ρυπαντών με χρήση επιλεγμένων ινωδών φίλτρων ή φίλτρων με κοκκώδη υφή</li> <li>• Διάφορες διαμορφώσεις και διαστάσεις συλλεκτών φίλτρων</li> <li>• Σχετικά απλή λειτουργία</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Απαιτηση δαπανηρών πυρίμαχων ορυκτών ή μεταλλικών υλικών σε θερμοκρασίες άνω των 290°C</li> <li>- Ανάγκη επεξεργασίας υφάσματος για την αφαίρεση της συλλεγόμενης σκόνης</li> <li>- Υψηλές απαιτήσεις συντήρησης</li> <li>- Κίνδυνος έκρηξης και πυρκαγιάς ορισμένων ειδών σκόνης παρουσία σπινθήρα</li> <li>- Μείωση διάρκειας ζωής του υφάσματος σε υψηλές θερμοκρασίες ή παρουσία όξινων ή αλκαλικών σωματιδίων ή αερίου</li> <li>-Πιθανός σχηματισμός κρούστας ή απόφραξη του υφάσματος, ή ανάγκη για ειδικά πρόσθετα λόγω υγροσκοπικών υλικών, ή συμπτύκνωσης υγρασίας</li> <li>- Απαιτηση αναπνευστικής προστασίας για την αντικατάσταση υφάσματος</li> <li>- Απαιτήσεις μεσαίας πτώσης πίεσης συνήθως 10–25 mb</li> </ul>

### **3.3 Έλεγχος όξινης βροχής**

Η όξινη βροχή μπορεί να ελεγχθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

#### **3.3.1 Ασβεστοποίηση – Liming**

Η ασβεστοποίηση είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για την εξουδετέρωση του οξέος με την προσθήκη ασβεστόλιθου στις λίμνες, το νερό και τα εδάφη και μειώνει τις θανατηφόρες συνέπειες των βαρέων μετάλλων. Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε μια συγκεκριμένη περιοχή και επιτρέπει την επιβίωση του γηγενούς πληθυσμού των ψαριών σε λίμνες. Η προσθήκη ασβέστη μειώνει τη ζημιά στα υδάτινα σώματα. Το pH του όξινου νερού αυξάνεται με την προσθήκη ασβέστη, καυστικής σόδας, ασβεστόλιθου και ανθρακικού νατρίου. Στα υδάτινα σώματα με αυτήν την προσθήκη βελτιώνεται η ποιότητα του νερού και αυξάνεται η παραγωγικότητα των φυτών και των ζώων που εξαρτώνται από αυτά. Η ασβεστοποίηση δεν είναι μια εφάπαξ διαδικασία αλλά θα πρέπει να επαναλαμβάνεται περιοδικά για να διατηρούνται το pH ουδέτερο και να αποτελέσει πραγματική θεραπεία.

#### **3.3.2 Μείωση των εκπομπών ρύπων**

Η όξινη βροχή μπορεί να ελεγχθεί με τη μείωση της εκπομπής ρύπων όπως το διοξείδιο του θείου και το οξείδιο του αζώτου. Για τη μείωση των εκπομπών αυτών έχουμε αναφερθεί διεξοδικά

#### **3.3.3 Πολιτική παρέμβαση – Θέσπιση νομοθετικού πλαισίου**

Στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες, κατά τις δεκαετίες του 1970 και του 1980, οι επιπτώσεις της όξινης βροχής σε διάφορους φυσικούς πόρους ήταν ένα σοβαρό ζήτημα. Το 1980, η υπηρεσία προστασίας του περιβάλλοντος του Καναδά ανέλαβε τη δράση για τον έλεγχο της εκπομπής χημικών ουσιών που προκαλούν όξινη βροχή. Το 1990, εισήχθησαν επίσης νομοθετικές ρυθμίσεις για τον έλεγχο των επιπτώσεων της όξινης βροχής και πρόγραμμα ελέγχου της όξινης βροχής. Ο κύριος στόχος αυτού του προγράμματος ήταν να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του θείου και οξειδίου του αζώτου για να επιτευχθούν οφέλη για την υγεία για το περιβάλλον και το κοινό.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 Τομείς βιομηχανίας και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

Στην επόμενη ενότητα περιγράφονται οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά βιομηχανικό τομέα και παρατίθενται κάποια στατιστικά στοιχεία καθώς επίσης και ενδεικτικοί τρόποι που δυνητικά θα μπορούσαν να μειώσουν τις εκάστοτε εκπομπές.

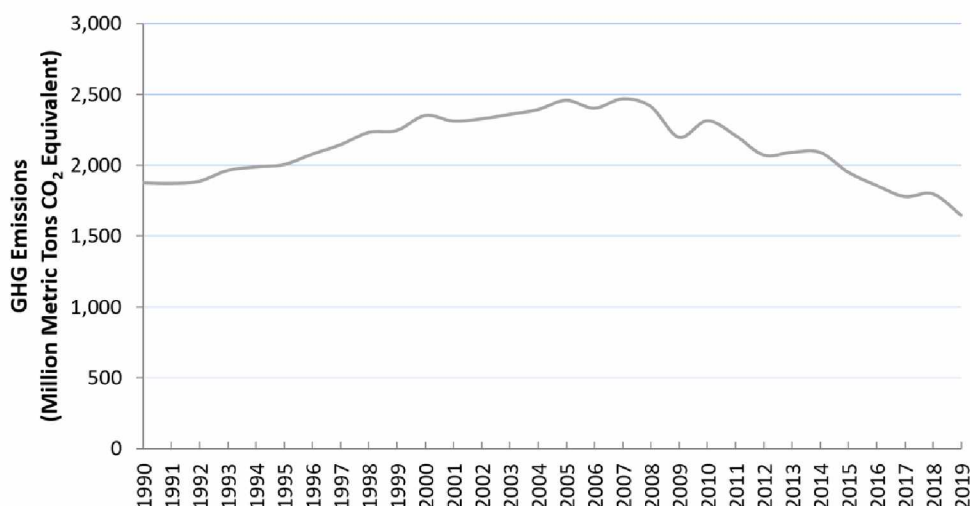
#### 4.1.1 Εκπομπές του τομέα ηλεκτρικής ενέργειας

Ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) αποτελεί τη συντριπτική πλειονότητα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα, αλλά εκπέμπονται επίσης μικρότερες ποσότητες μεθανίου (CH<sub>4</sub>) και οξειδίου του αζώτου (N<sub>2</sub>O). Αυτά τα αέρια απελευθερώνονται κατά την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Λιγότερο από το 1% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα προέρχεται από εξαφθοριούχο θείο (SF<sub>6</sub>), ένα εξαιρετικά ισχυρό και ανθεκτικό αέριο θερμοκηπίου που χρησιμοποιείται κυρίως ως ηλεκτρικός μονωτήρας επειδή είναι περίπου 100 φορές αποτελεσματικότερο από τον αέρα στην απόσβεση βολταϊκών τόξων. Το SF<sub>6</sub> χρησιμοποιείται επίσης στη μεταλλουργία του μαγνησίου ως προστατευτικό αδρανές αέριο για να προλαμβάνεται η ανάφλεξη κατά τη χύτευσή του[58].

Η καύση άνθρακα είναι δυσμενέστερη από την καύση φυσικού αερίου ή πετρελαίου για ηλεκτρική ενέργεια. Για παράδειγμα αν και η χρήση άνθρακα αντιπροσώπευε περίπου το 61% των εκπομπών CO<sub>2</sub> από τον τομέα, αντιπροσώπευε μόνο το 24% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες το 2019. Η χρήση φυσικού αερίου αντιπροσώπευε το 37% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το 2019 και η χρήση πετρελαίου αντιπροσώπευε

λιγότερο από 1%. Η υπόλοιπη παραγωγή το 2019 προήλθε από πηγές μη ορυκτών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων των πυρηνικών (20%) και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (18%), οι οποίες περιλαμβάνουν την υδροηλεκτρική ενέργεια, τη βιομάζα, τον άνεμο και την ηλιακή ενέργεια. Οι ανανεώσιμες πηγές και τα πυρηνικά εργοστάσια, δεν εκπέμπουν άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Το 2019, ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας ήταν η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στις ΗΠΑ, αντιπροσωπεύοντας το 25 % του συνόλου. Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από την ηλεκτρική ενέργεια έχουν μειωθεί κατά περίπου 12% από το 1990 λόγω της στροφής της παραγωγής σε πηγές με χαμηλές ή καθόλου εκπομπές και της αύξησης της ενεργειακής απόδοσης τελικής χρήσης.



**Εικόνα 4.1:** Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από την ηλεκτρική ενέργεια, 1990-2019 [42]

Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται από άλλους τομείς -σε σπίτια, επιχειρήσεις και εργοστάσια. Ως εκ τούτου, είναι δυνατό να αποδοθούν οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στους τομείς που χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια. Η εξέταση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου ανά τομέα τελικής χρήσης μπορεί να μας βοηθήσει να κατανοήσουμε τη ζήτηση ενέργειας σε όλους τους τομείς και τις αλλαγές στη χρήση ενέργειας με την πάροδο του χρόνου.

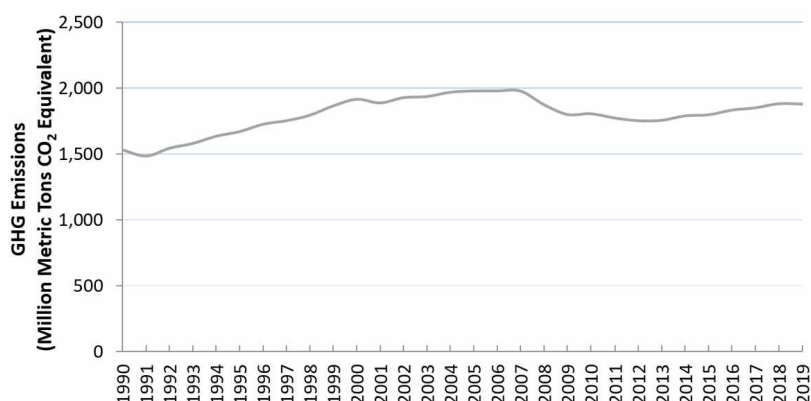
Όταν οι εκπομπές από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατανέμονται στον βιομηχανικό τομέα τελικής χρήσης, οι βιομηχανικές δραστηριότητες αντιπροσωπεύουν πολύ μεγαλύτερο μερίδιο των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου των ΗΠΑ. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

από εμπορικά και οικιστικά κτίρια αυξάνονται επίσης σημαντικά όταν περιλαμβάνονται οι εκπομπές από ηλεκτρική ενέργεια τελικής χρήσης, λόγω του σχετικά μεγάλου μεριδίου χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. θέρμανση, εξαερισμός και κλιματισμός, φωτισμός και συσκευές) σε αυτούς τους τομείς. Ο τομέας των μεταφορών έχει επί του παρόντος ένα σχετικά χαμηλό ποσοστό χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά αυξάνεται λόγω της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων.

#### 4.1.2 Εκπομπές του τομέα των μεταφορών

Ο τομέας των μεταφορών περιλαμβάνει τη μετακίνηση ανθρώπων και εμπορευμάτων με αυτοκίνητα, φορτηγά, τρένα, πλοία, αεροπλάνα και άλλα οχήματα. Η πλειονότητα των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τις μεταφορές είναι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) που προκύπτουν από την καύση προϊόντων με βάση το πετρέλαιο, σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Οι μεγαλύτερες πηγές εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που σχετίζονται με τις μεταφορές προέρχονται από επιβατικά αυτοκίνητα, ελαφρά φορτηγά, φορτηγά μεσαίου και βαρέως τύπου, λεωφορεία και αγωνιστικά οχήματα. Αυτές οι πηγές αντιπροσωπεύουν πάνω από το ήμισυ των εκπομπών από τον τομέα των μεταφορών. Οι υπόλοιπες εκπομπές του τομέα προέρχονται από άλλους τρόπους μεταφοράς, συμπεριλαμβανομένων εμπορικών αεροσκαφών, πλοίων, μικρών σκαφών, τρένων κτλ.

Σχετικά μικρές είναι οι ποσότητες μεθανίου (CH<sub>4</sub>) και υποξειδίου του αζώτου (N<sub>2</sub>O) που εκπέμπονται από τον τομέα. Επιπλέον, μια μικρή ποσότητα εκπομπών υδροφθορανθράκων (HFC) προκύπτουν από τη χρήση κινητών κλιματιστικών και ψυγείων.



Εικόνα: 4.2 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τον τομέα μεταφορών, 1990-2019 [42]

Το 2019, οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τις μεταφορές αντιπροσώπευαν περίπου το 29 τοις εκατό των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου των ΗΠΑ, καθιστώντας τις τον

μεγαλύτερο παράγοντα που συμβάλλει στις εκπομπές των ΗΠΑ. Όσον αφορά τη συνολική τάση, από το 1990 έως το 2019, οι συνολικές εκπομπές από τις μεταφορές έχουν αυξηθεί λόγω της αυξημένης ζήτησης για ταξίδια. Ο αριθμός των μιλίων οχημάτων που διανύθηκαν (vehicle miles traveled - VMT) από ελαφρά μηχανοκίνητα οχήματα (επιβατικά και ελαφρά φορτηγά) αυξήθηκε κατά 48% από το 1990 έως το 2019, ως αποτέλεσμα μιας συρροής παραγόντων όπως η πληθυσμιακή αύξηση, η οικονομική ανάπτυξη, η αστική εξάπλωση, και περιοδική πτώση τιμών των καυσίμων. Μεταξύ 1990 και 2004, η μέση κατανάλωση καυσίμου μεταξύ των νέων οχημάτων που πωλούνταν ετησίως αυξήθηκε καθώς αυξήθηκαν οι πωλήσεις ελαφρών οχημάτων. Ξεκινώντας το 2005, η μέση κατανάλωση καυσίμου νέων οχημάτων άρχισε να μειώνεται, ενώ το VMT αυξήθηκε μόνο λίγο, για μεγάλο μέρος της περιόδου. Η μέση κατανάλωση καυσίμου νέων οχημάτων βελτιώνεται σχεδόν κάθε χρόνο από το 2005, επιβραδύνοντας τον ρυθμό αύξησης των εκπομπών CO<sub>2</sub> και το μερίδιο των βαρέων οχημάτων είναι περίπου 56 % στο σύνολο των νέων οχημάτων του έτους 2019.

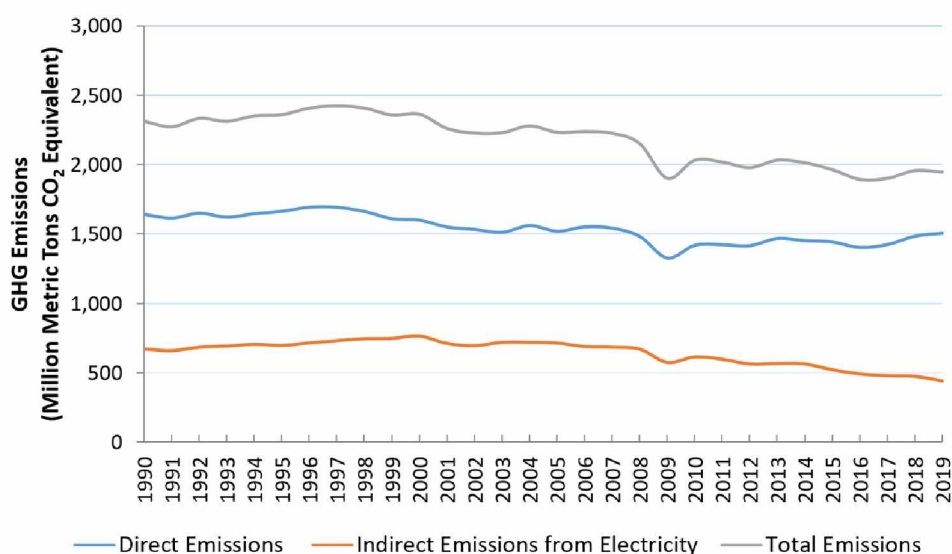
#### **4.1.3 Εκπομπές του βιομηχανικού τομέα**

Ο κλάδος της βιομηχανίας παράγει τα αγαθά και τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούμε καθημερινά. Τα αέρια του θερμοκηπίου που εκπέμπονται κατά τη βιομηχανική παραγωγή χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: άμεσες εκπομπές που παράγονται στις εγκαταστάσεις παραγωγής και έμμεσες εκπομπές που εμφανίζονται εκτός του εργοστασίου, αλλά συνδέονται με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από τη μονάδα.

Οι άμεσες εκπομπές παράγονται με την καύση για ισχύ ή θερμότητα, μέσω χημικών αντιδράσεων και από διαρροές βιομηχανικών διεργασιών ή εξοπλισμού. Οι περισσότερες άμεσες εκπομπές προέρχονται από την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων για ενέργεια. Μια μικρότερη ποσότητα άμεσων εκπομπών, λιγότερο από το ένα τρίτο, προέρχεται από διαρροές συστημάτων μεταφοράς φυσικού αερίου και πετρελαίου, τη χρήση καυσίμων στην παραγωγή (π.χ. προϊόντα πετρελαίου που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πλαστικών) και χημικές αντιδράσεις κατά την παραγωγή βιομηχανικών χημικών ουσιών, σιδήρου και χάλυβα και τσιμέντου.

Οι έμμεσες εκπομπές παράγονται με την καύση ορυκτών καυσίμων σε μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία στη συνέχεια

χρησιμοποιείται από μια βιομηχανική εγκατάσταση για την τροφοδοσία βιομηχανικών κτιρίων και μηχανημάτων.



Εικόνα 4.3: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τον τομέα της βιομηχανίας, 1990-2019 [42]

Το 2019, οι άμεσες βιομηχανικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου αντιπροσώπευαν το 23 % των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου των ΗΠΑ, καθιστώντας τις τον τρίτο μεγαλύτερο παράγοντα εκπομπής αερίων, μετά τους τομείς των μεταφορών και της ηλεκτρικής ενέργειας. Συμπεριλαμβανομένων τόσο των άμεσων εκπομπών όσο και των έμμεσων εκπομπών που σχετίζονται με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, το μερίδιο της βιομηχανίας στις συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου των ΗΠΑ το 2019 ήταν 30%, γεγονός που καθιστά τη συνεισφορά τους μεγαλύτερη από οποιονδήποτε άλλο κλάδο. Οι συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου των ΗΠΑ από τη βιομηχανία, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν μειωθεί κατά 16 % από το 1990.

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία βιομηχανικών δραστηριοτήτων που προκαλούν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και πολλές δυνατότητες για μείωση τους. Ο παρακάτω πίνακας (Πίν.4.1 ) παρέχει ορισμένα παραδείγματα μέτρων, δράσεων και ενεργειών για τη μείωση των εκπομπών στη βιομηχανία .

Πίνακας 4.1 Τρόποι μείωσης εκπομπών για τον Τομέα της Βιομηχανίας [42]

Τύπος	Πώς μπορούν να μειωθούν οι εκπομπές	Παραδείγματα
Ενεργειακή απόδοση	Αναβάθμιση σε πιο αποδοτική βιομηχανική τεχνολογία.	Προσδιορισμός των τρόπων με τους οποίους οι κατασκευαστές μπορούν να χρησιμοποιούν λιγότερη ενέργεια για τον φωτισμό και τη θέρμανση εργοστασίων ή για τη λειτουργία εξοπλισμού.
Εναλλαγή καυσίμου	Μετάβαση σε καύσιμα που έχουν ως αποτέλεσμα λιγότερες εκπομπές CO <sub>2</sub> αλλά την ίδια ποσότητα ενέργειας, όταν καίγονται.	Χρήση φυσικού αερίου αντί άνθρακα για τη λειτουργία μηχανημάτων.
Ανακύκλωση	Παραγωγή βιομηχανικών προϊόντων από υλικά που είναι ανακυκλωμένα ή ανανεώσιμα, αντί για παραγωγή νέων προϊόντων από πρώτες ύλες.	Χρήση scrap χάλυβα και scrap αλουμινίου σε αντίθεση με την τήξη νέου αλουμινίου ή τη σφυρηλάτηση νέου χάλυβα.
Κατάρτιση και Ευαισθητοποίηση	Ενημέρωση των εταιρειών και των εργαζομένων σχετικά με τα βήματα για τη μείωση ή την πρόληψη διαρροών εκπομπών από εξοπλισμό. Η ΕΡΑ έχει μια ποικιλία εθελοντικών προγραμμάτων που παρέχουν πόρους για εκπαίδευση και άλλα βήματα για τη μείωση των εκπομπών. Η ΕΡΑ υποστηρίζει προγράμματα για τις βιομηχανίες αλουμινίου, ημιαγωγών και μαγνησίου.	Θέσπιση πολιτικών και διαδικασιών χειρισμού για υπερφθοράνθρακες (PFC), υδροφθοράνθρακες (HFC) και εξαφθοριούχο θείο (SF <sub>6</sub> ) που μειώνουν τα περιστατικά τυχαίας απελευθέρωσης και διαρροών από δεξαμενές, δίκτυα και εξοπλισμό.

#### 4.1.4 Εκπομπές του αγροτικού τομέα

Οι αγροτικές δραστηριότητες — φυτική και κτηνοτροφική παραγωγή τροφίμων — συμβάλλουν στις εκπομπές με διάφορους τρόπους:

➤ Πρακτικές διαχείρισης σε γεωργικά εδάφη μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένη συγκέντρωση αζώτου στο έδαφος και τελικά σε εκπομπές οξειδίου του αζώτου (N<sub>2</sub>O) στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένες δραστηριότητες που συμβάλλουν στις εκπομπές N<sub>2</sub>O από γεωργικές εκτάσεις είναι η χρήση συνθετικών και οργανικών λιπασμάτων, η καλλιέργεια αζωτοδεσμευτικών φυτών, η αποστράγγιση οργανικών εδαφών και οι πρακτικές άρδευσης. Η διαχείριση των γεωργικών εδαφών ευθύνεται για το ήμισυ περίπου των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα της γεωργίας.

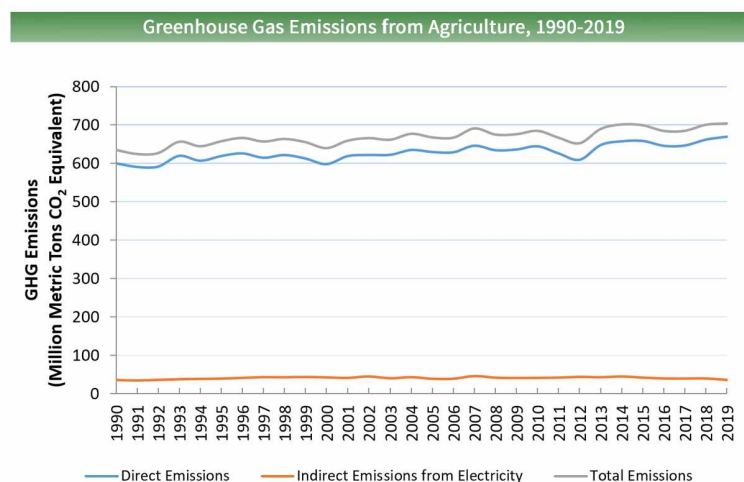


➤ Τα ζώα, ιδιαίτερα τα μηρυκαστικά όπως τα βοοειδή, παράγουν μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) ως μέρος των κανονικών πεπτικών διαδικασιών τους. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται εντερική ζύμωση και αντιπροσωπεύει πάνω από το ένα τέταρτο των εκπομπών από τομέα της γεωργίας.

➤ Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η διαχείριση της κοπριάς από τα ζώα συμβάλλει επίσης στις εκπομπές CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O. Οι διαφορετικές μέθοδοι επεξεργασίας και αποθήκευσης κοπριάς επηρεάζουν την ποσότητα αυτών των αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται. Η διαχείριση της αντιπροσωπεύει περίπου το 12 % των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου από τον οικονομικό τομέα της γεωργίας στις Ηνωμένες Πολιτείες.

➤ Μικρότερες πηγές γεωργικών εκπομπών περιλαμβάνουν το CO<sub>2</sub> από την εφαρμογή ασβέστη και ουρίας, το CH<sub>4</sub> από την καλλιέργεια ρυζιού και την καύση υπολειμμάτων καλλιεργειών, που παράγει CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O.

Το 2019, οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τον αγροτικό οικονομικό τομέα αντιπροσώπευαν το 10% των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου των ΗΠΑ. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη γεωργία έχουν αυξηθεί κατά 12 % από το 1990. Οι παράγοντες για αυτήν την αύξηση περιλαμβάνουν μια αύξηση 9 % στο N<sub>2</sub>O από τη διαχείριση των εδαφών, μαζί με μια αύξηση κατά 60 % στις συνδυασμένες εκπομπές CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O από συστήματα διαχείρισης κοπριάς ζώων, αντανακλώντας την αυξημένη χρήση συστημάτων υγρών υψηλής έντασης εκπομπών κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου. Οι εκπομπές από άλλες γεωργικές πηγές παρέμειναν γενικά σταθερές ή μεταβλήθηκαν σε σχετικά μικρό ποσοστό από το 1990.



Εικόνα 4.4 Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τον αγροτικό τομέα 1990-2019 [42]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

### 5.1 Εισαγωγή

Το Δελχί, είναι η πιο μολυσμένη πόλη στον κόσμο με μέση συγκέντρωση PM<sub>2,5</sub> 84,1 μg/m<sup>3</sup>. Ενώ και στην Ευρώπη αρκετές πόλεις έχουν κακή ποιότητα αέρα. Οι μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>2,5</sub> είναι υψηλότερες στις αστικές περιοχές της Βουλγαρίας (19,6 μg/m<sup>3</sup>) και της Πολωνίας (19,3 μg/m<sup>3</sup>), ακολουθούμενες από τη Ρουμανία (16,4 μg/m<sup>3</sup>). Καλύτερη ποιότητα αέρα παρατηρείται στις αστικές περιοχές της Εσθονίας (4,8 μg/m<sup>3</sup>), της Φινλανδίας (5,1 μg/m<sup>3</sup>) και της Σουηδίας (5,8 μg/m<sup>3</sup>), οι οποίες είχαν τη χαμηλότερη συγκέντρωση PM<sub>2,5</sub> για το έτος 2019[59].

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (ΕΕΑ) διατηρεί μια τεράστια βάση με τα δεδομένα εκπομπών από το Ευρωπαϊκό Μητρώο Έκλυσης και Μεταφοράς Ρύπων (E-PRTR). Ανατρέχοντας σε αυτά τα δεδομένα για κάθε μία από τις παραπάνω Ευρωπαϊκές χώρες μπορούμε ίσως να βγάλουμε πολύτιμα συμπεράσματα για τα επίπεδα ρύπανσης που επικρατούν εκεί, την προέλευση της ρύπανσης αλλά και για τη συμβολή του βιομηχανικού τομέα σε αυτή.

### 5.2 Δεδομένα-Ανάλυση

Για κάθε μία από τις παραπάνω Ευρωπαϊκές χώρες αναζητήθηκαν δεδομένα από το E-PRTR και άλλες πηγές, σχετικά με τα επίπεδα ρύπανσης τα τελευταία χρόνια, την προέλευση των ρύπων, το ποσοστό συμμετοχής της βιομηχανίας και κάθε τομέα της ξεχωριστά στις εκπομπές του κάθε ρύπου, αλλά και στοιχεία για τις συγκεντρώσεις ρυπαντών, μόνο από σταθμούς μέτρησης εντός αστικών περιοχών [61],[62]. Επίσης από τη Eurostat αναζητήθηκαν στοιχεία για την έκταση, τον πληθυσμό, την οικονομική ανάπτυξη, το ΑΕΠ, τους φυσικούς πόρους, την κατανάλωση ενέργειας, το μερίδιο κάθε τομέα της βιομηχανίας στη κατανάλωση αυτή και στο παραγόμενο εγχώριο προϊόν, την ένταση ενέργειας, τη διείσδυση των ΑΠΕ. Στόχος είναι να διερευνηθεί εάν υπάρχει κάποιου είδους συσχέτιση ανάμεσα στα χαρακτηριστικά αυτά

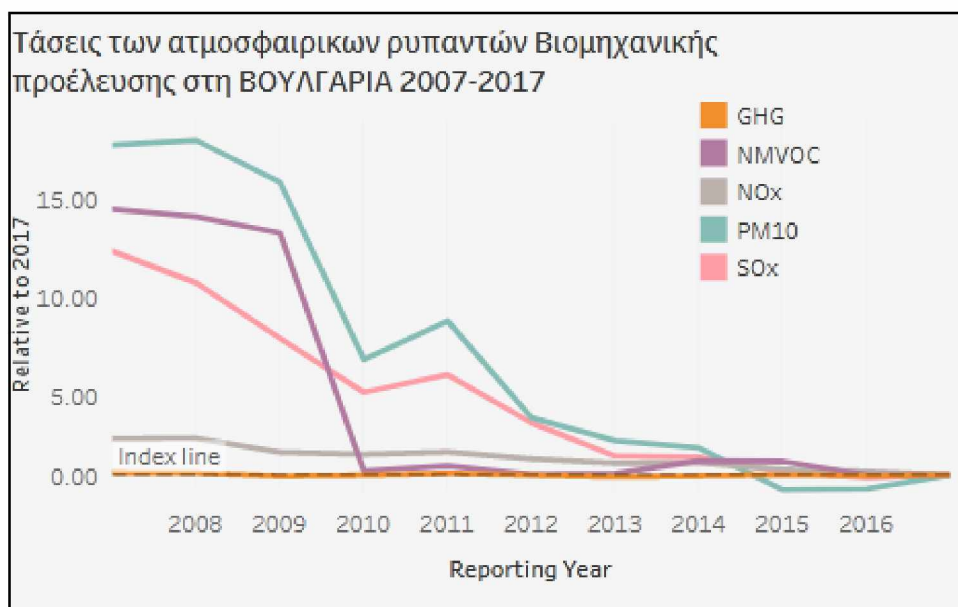
στοιχεία και δεδομένα της κάθε χώρας και στο αποτέλεσμα που είναι οι καλές ή οι κακές επιδόσεις της στο ζήτημα της αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

### 5.2.1 Βουλγαρία

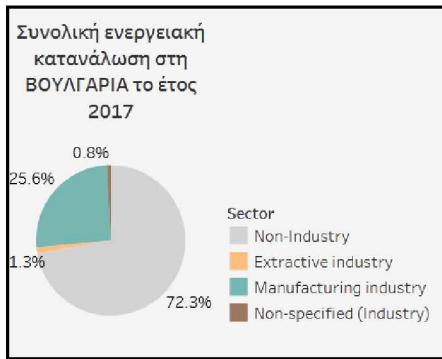
Η Βουλγαρία είναι χώρα της νοτιοανατολικής Ευρώπης με έκταση 110.994 Km<sup>2</sup> και πληθυσμό 7.351.234 .Ο πληθυσμός της είναι κατά κύριο λόγο αστικός και συγκεντρωμένος στα διοικητικά κέντρα των 28 επαρχιών της. Η Πυκνότητα του είναι 62,3 κατ./km<sup>2</sup>.Είναι μέλος της ΕΕ από το 2007

Οι ισχυρότεροι τομείς της οικονομίας είναι η βαριά βιομηχανία, η παραγωγή ενέργειας και η γεωργία, που στηρίζονται όλοι σε τοπικούς φυσικούς πόρους. Η Βουλγαρία έχει μια αναδυόμενη οικονομία ,στην ανώτερη μεσαία σειρά εισοδήματος και είναι η έκτη μεγαλύτερη παραγωγός άνθρακα στην Ευρώπη. Το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν της είναι 52,418 δις.\$ (73η)και το Κατά κεφαλή 7.368 \$ (49η)[Eurostat].

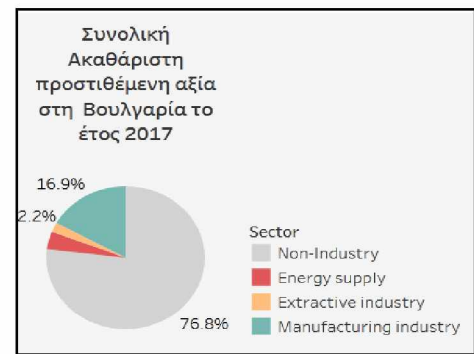
Ο Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης (Human Development Index είναι στατιστικός δείκτης ο οποίος χρησιμοποιείται για να κατατάσσει μια χώρα ως υπανάπτυκτη, αναπτυσσόμενη ή αναπτυγμένη.), είναι 0,816 (56η – πολύ υψηλός) [60].



Εικόνα 5.1:Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές βιομηχανικής προέλευσης 2007-17



Εικόνα 5.2: Ενεργειακή κατανάλωση ανά βιομηχανικό τομέα το 2017

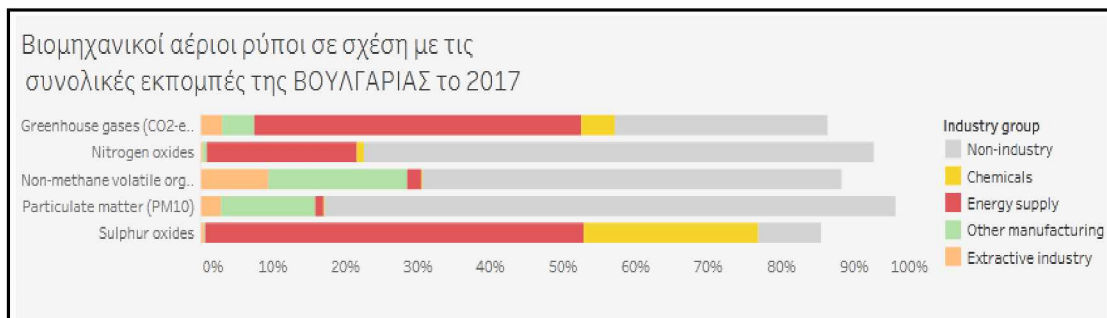


Εικόνα 5.3: ΑΠΑ ανά βιομηχανικό τομέα το 2017

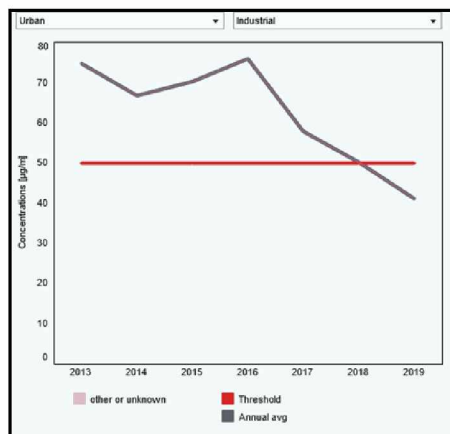
Στην Εικόνα 5.1 βλέπουμε τις τάσεις των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρυπαντών (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) βιομηχανικής προέλευσης για τη περίοδο 2007-2017.

Στην Εικόνα 5.2 βλέπουμε το μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα ξεχωριστά στη συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας της χώρας το 2017.

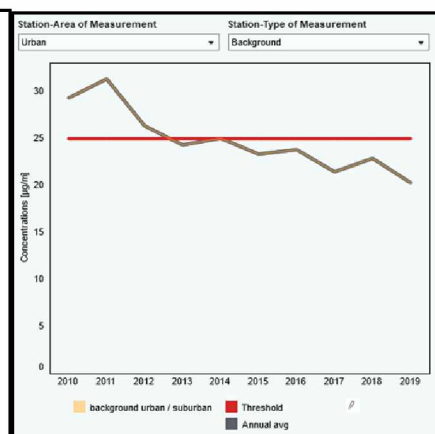
Στην Εικόνα 5.3 βλέπουμε το μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα ξεχωριστά, στη συνολική ετήσια Ακαθάριστη Προστιθέμενη Αξία της χώρας το 2017 (η Ακαθάριστη Προστιθέμενη Αξία είναι στην ουσία η αξία του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος).



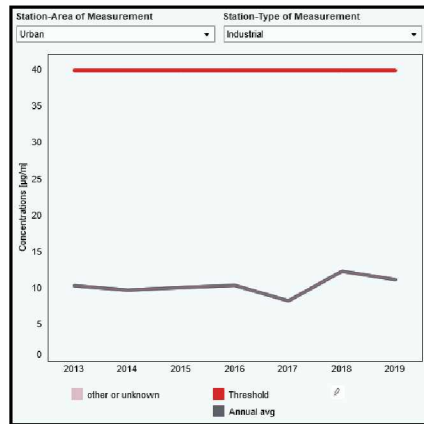
Εικόνα 5.4: Μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές της χώρας το 2017



Εικόνα 5.5: PM 10



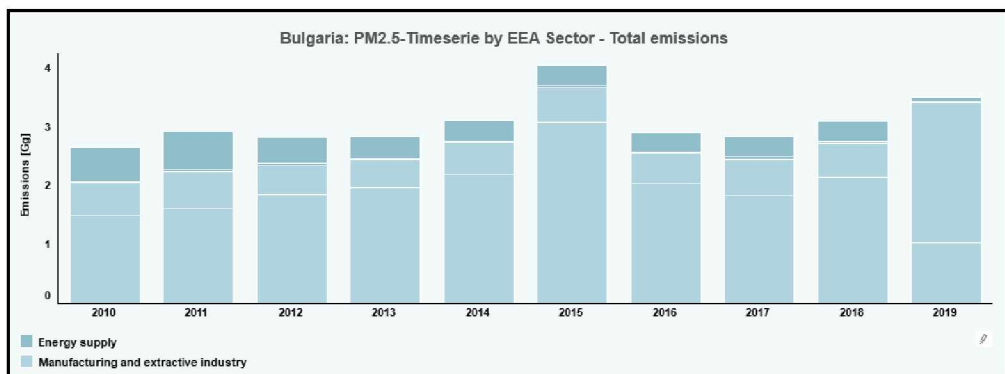
Εικόνα 5.6: PM2,5



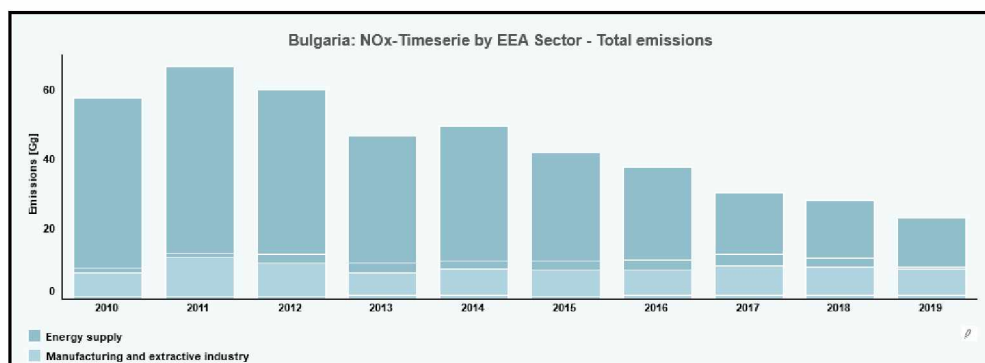
Εικόνα 5.7:NO<sub>2</sub>

Στην Εικόνα 5.4 βλέπουμε το μερίδιο του κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) ξεχωριστά, της χώρας το 2017

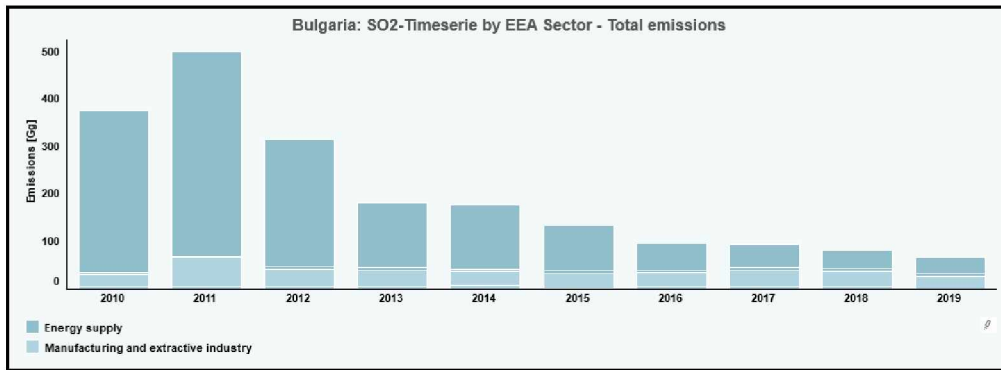
Στις εικόνες 5.5-6-7 βλέπουμε τις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> και NO<sub>2</sub> αντίστοιχα όπως αυτές μετρήθηκαν εντός αστικών περιοχών της χώρας την περίοδο 2010-2019 καθώς και τα ανώτατα Ευρωπαϊκά επιτρεπτά όρια των συγκεντρώσεων αυτών\*.



Εικόνα 5.8: PM<sub>2,5</sub>



Εικόνα 5.9:NO<sub>x</sub>



Εικόνα 5.10:SO<sub>2</sub>

Στις εικόνες 5.8-9-10 βλέπουμε τις συνολικές εκπομπές βιομηχανικού τομέα PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub> και SO<sub>x</sub> αντίστοιχα για την περίοδο 2010-2019\*\*

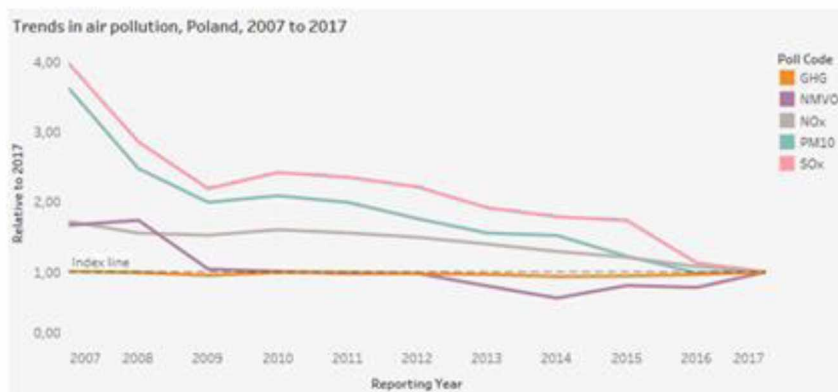
\*. Τα δεδομένα για την ποιότητα του αέρα βασίζονται σε αναφορές παρακολούθησης και μετρήσεων της που υποβλήθηκαν από τις χώρες μέλη του ΕΟΠ δυνάμει της εκτελεστικής απόφασης 2011/850/ΕΕ της Επιτροπής.

\*\*Τα δεδομένα εκπομπών προέρχονται από καταλόγους εκπομπών που υποβάλλονται από τα κράτη μέλη της ΕΕ-28 βάσει της Οδηγίας NEC.

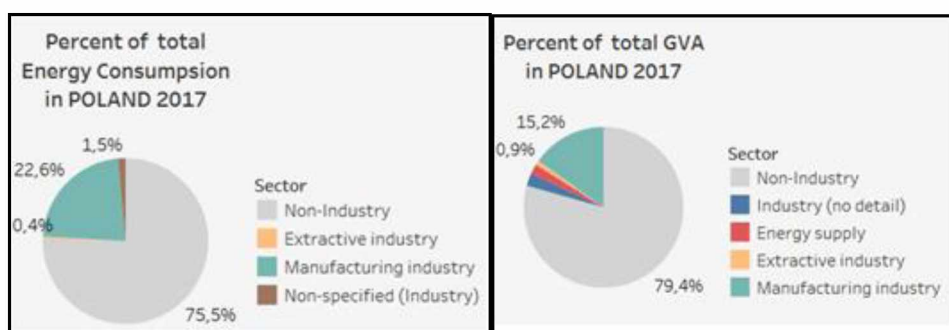
### 5.2.2 Πολωνία

Η Πολωνία, είναι χώρα στην Κεντρικής Ευρώπης με έκταση 312.696 km<sup>2</sup> και πληθυσμό 38.511.824. Η Πυκνότητα του είναι 122 κατ./km<sup>2</sup>. Είναι μέλος της ΕΕ από το 2004.

Η Πολωνία είναι κατά κύριο λόγο χώρα βιομηχανική, γεγονός που οφείλεται κυρίως στις τεράστιες ποσότητες γαιανθράκων που έχει και που χρησιμοποιούνται ως κύρια πηγή ενέργειας. Οι σημαντικότεροι κλάδοι της πολωνικής βιομηχανίας είναι η μεταλλουργία, η χαλυβουργία, η μηχανουργία, η υφαντουργία και ακολουθούν οι βιομηχανίες χημικών προϊόντων, ειδών διατροφής, χαρτοποιίας, ηλεκτρικών ειδών, επεξεργασίας ελαστικού και τσιμέντου. Το Α Ε Π της είναι 614,190 δισ. \$[και το Κατά κεφαλή 16.179 \$[Eurostat]. Ο Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης είναι 0,880 (35η – πολύ υψηλός) [60].



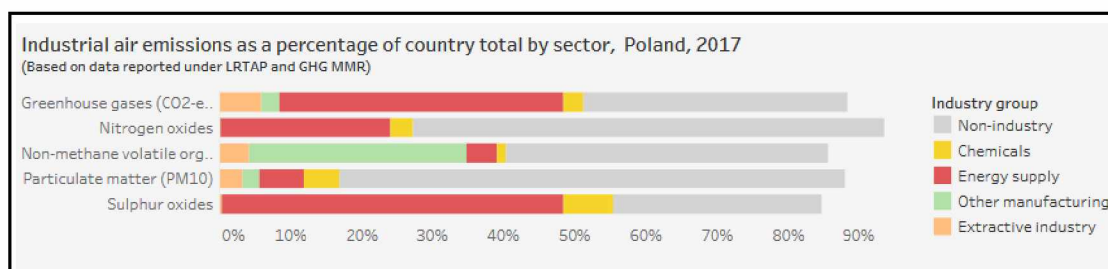
Εικόνα 5.11::Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές βιομηχανικής προέλευσης 2007-17



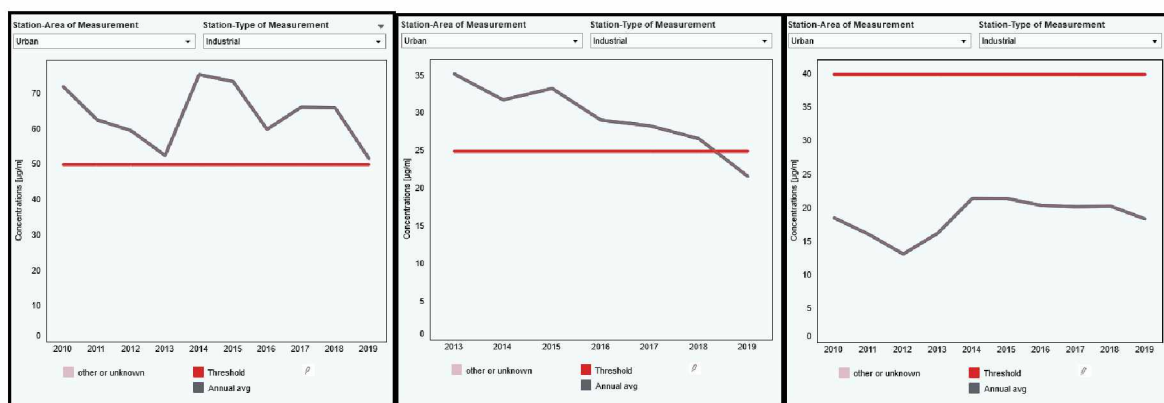
Εικόνα 5.12: Ένεργειακή κατανάλωση και ΑΠΑ ανά βιομηχανικό τομέα το 2017

Στην Εικόνα 5.11 βλέπουμε τις τάσεις των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρυπαντών (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) βιομηχανικής προέλευσης για τη περίοδο 2007-2017.

Στην Εικόνα 5.12 βλέπουμε το μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα ξεχωριστά στη συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας και στην Ακαθάριστη Προστιθέμενη Αξία της χώρας το 2017.



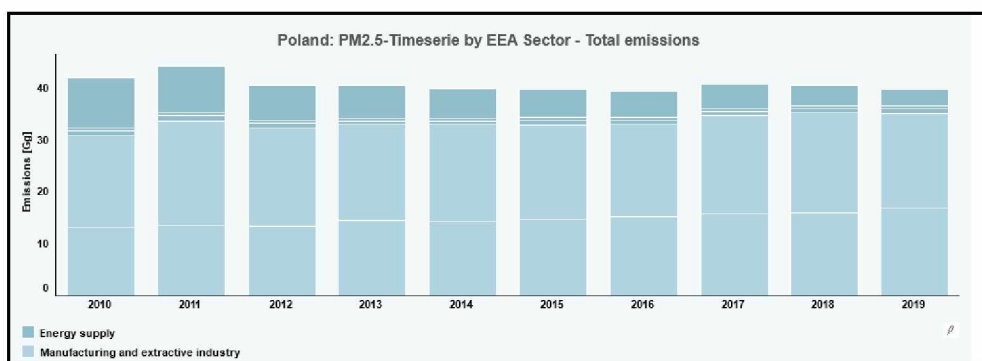
Εικόνα 5. 13: Μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές της χώρας το 2017



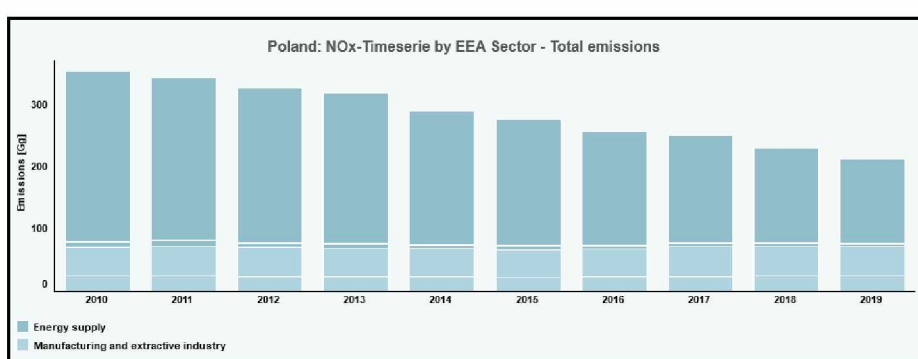
Εικόνα 5.14: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> και NO<sub>2</sub> αντίστοιχα σε αστικό περιβάλλον 2010-2019

Στην Εικόνα 5.13 βλέπουμε το μερίδιο του κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) ξεχωριστά, της χώρας το 2017

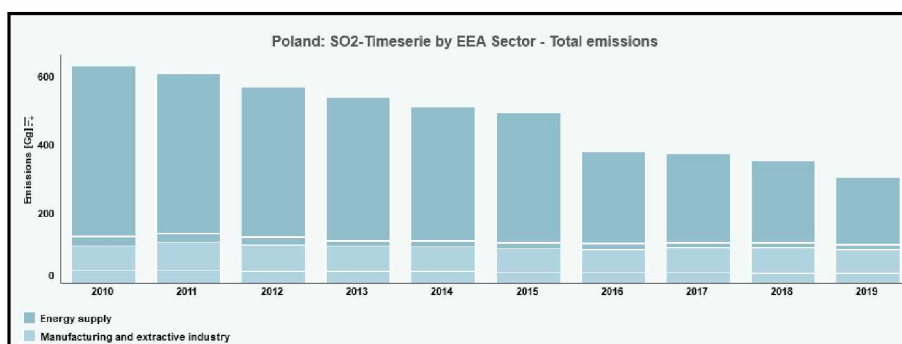
Στην Εικόνα 5.14 βλέπουμε τις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> και NO<sub>2</sub> αντίστοιχα όπως αυτές μετρήθηκαν εντός αστικών περιοχών της χώρας την περίοδο 2010-2019 καθώς και τα ανώτατα Ευρωπαϊκά επιτρεπτά όρια των συγκεντρώσεων αυτών.



Εικόνα 5.15:PM2,5



Εικόνα 5. 16: NO<sub>x</sub>



Εικόνα 5.17:SO<sub>2</sub>

Στις εικόνες 5.15-16-17 βλέπουμε τις συνολικές εκπομπές βιομηχανικού τομέα PM2,5, NO2 και SO2 αντίστοιχα για την περίοδο 2010-2019.

### 5.2.3 Ρουμανία

Η Ρουμανία χώρα της Νοτιοανατολικής-Κεντρικής Ευρώπης, με έκταση 238.391 Km<sup>2</sup> και πληθυσμό 19.186.000. Η Πυκνότητα του είναι 80,5 κατ./km<sup>2</sup>. Είναι μέλος της ΕΕ από το 2007. Η Ρουμανία έχει οικονομία που βασίζεται κυρίως στις υπηρεσίες και είναι παραγωγός και

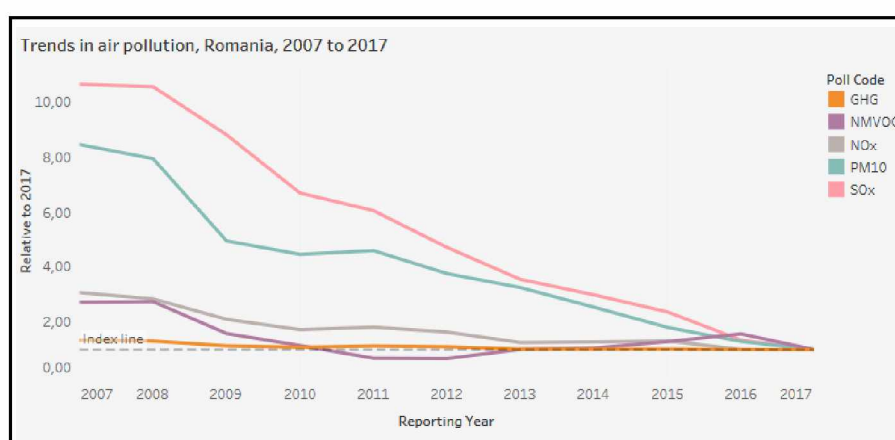


εξαγωγέας μηχανών και ηλεκτρικής ενέργειας. Λειτουργούν ακόμα χημικές βιομηχανίες, βιομηχανίες ηλεκτρονικών, μηχανοκατασκευών, αυτοκινητοβιομηχανίες, ναυπηγεία κ.ά.

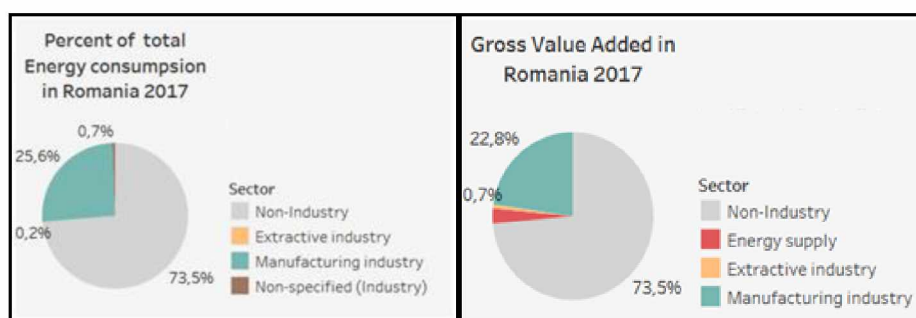
Το Α Ε Π της είναι 187,039 δις. \$ και το Κατά κεφαλή 9.465 \$ [Eurostat]. Ο Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης είναι 0,828 (49η – πολύ υψηλός) [60].

Στην Εικόνα 5.18 βλέπουμε τις τάσεις των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρυπαντών (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) βιομηχανικής προέλευσης για τη περίοδο 2007-2017.

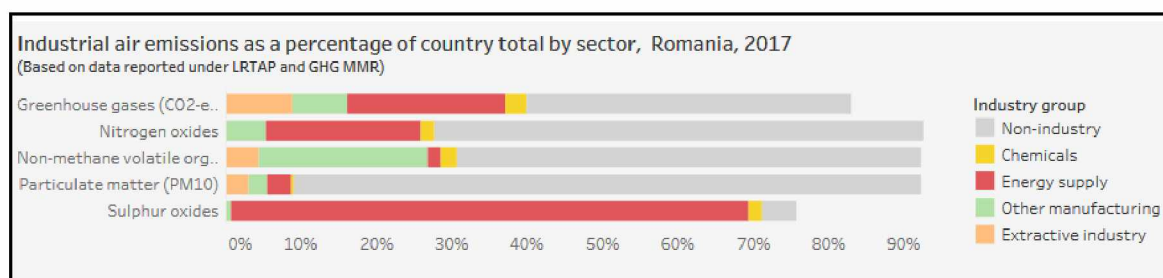
Στην Εικόνα 5.19 βλέπουμε το μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα ξεχωριστά στη συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας και στην Ακαθάριστη Προστιθέμενη Αξία της χώρας το 2017.



Εικόνα 5.18: Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές βιομηχανικής προέλευσης 2007-17



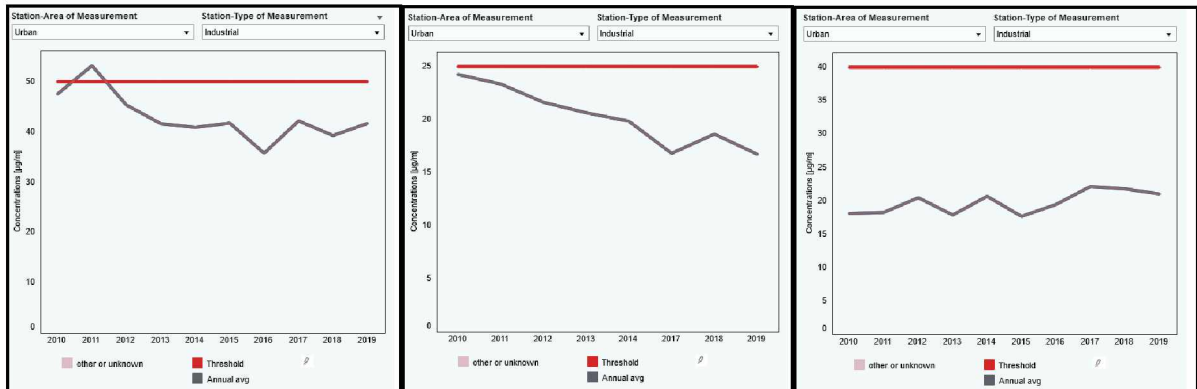
Εικόνα 5.19: Ενεργειακή κατανάλωση και ΑΠΑ ανά βιομηχανικό τομέα το 2017



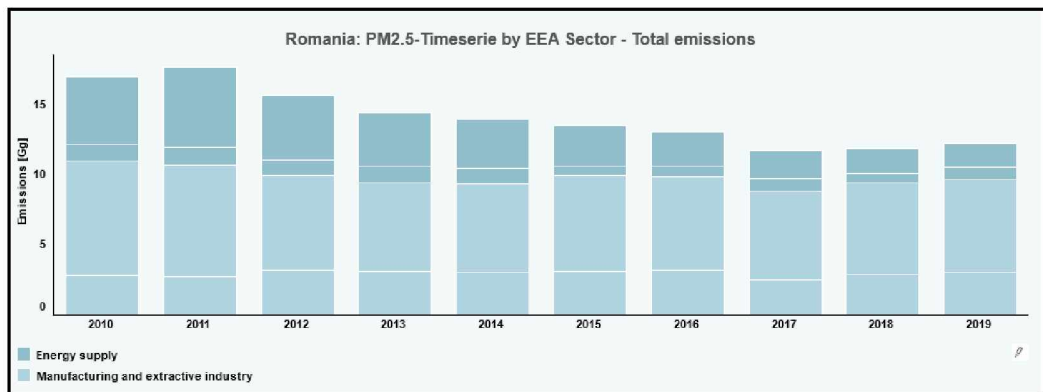
Εικόνα 5.20:Μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές της χώρας το 2017

Στην Εικόνα 5.20 βλέπουμε το μερίδιο του κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) ξεχωριστά, της χώρας το 2017

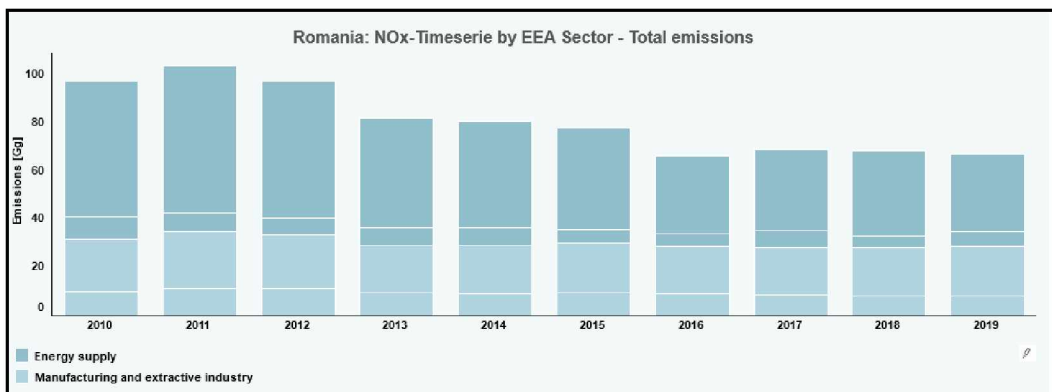
Στην Εικόνα 5.21 βλέπουμε τις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  και  $NO_2$  αντίστοιχα όπως αυτές μετρήθηκαν εντός αστικών περιοχών της χώρας την περίοδο 2010-2019 καθώς και τα ανώτατα Ευρωπαϊκά επιτρεπτά όρια των συγκεντρώσεων αυτών.



Εικόνα 5.21: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  και  $NO_2$  αντίστοιχα σε αστικό περιβάλλον 2010-2019

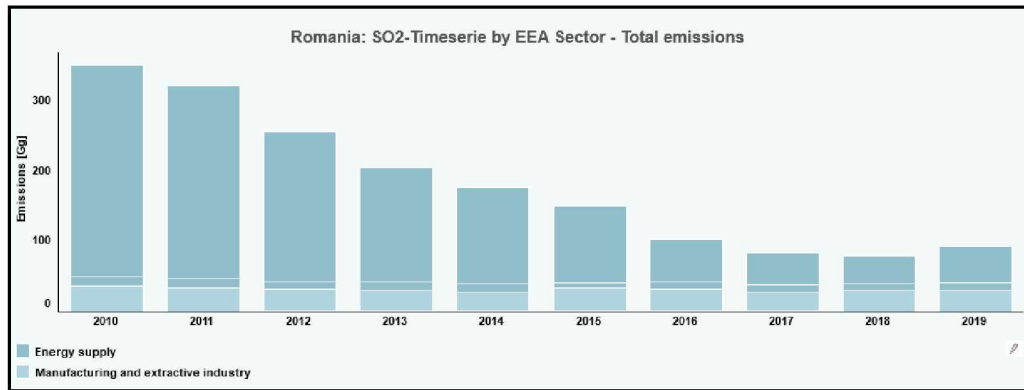


Εικόνα 5. 22:  $PM_{2,5}$



Εικόνα 5.23:  $NO_x$

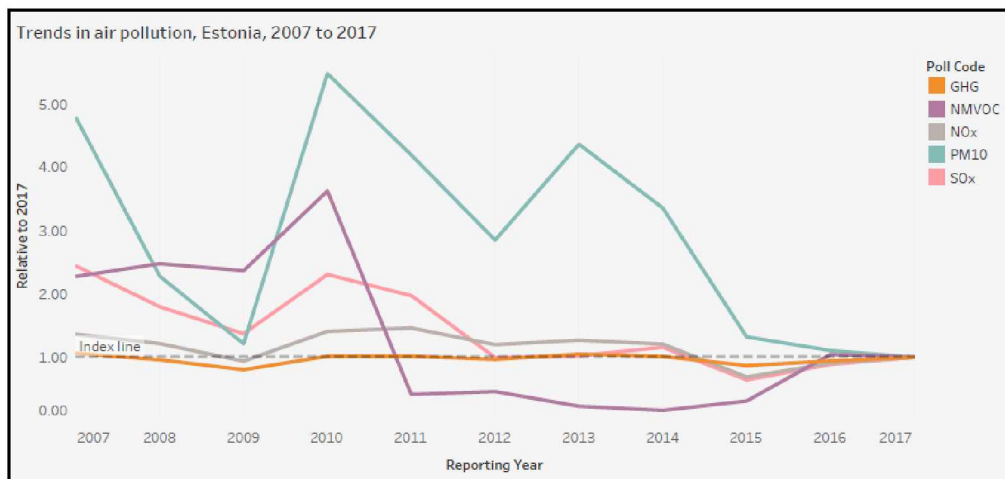
Στις εικόνες 5.22-23-24 βλέπουμε τις συνολικές εκπομπές βιομηχανικού τομέα  $PM_{2,5}$ ,  $NO_2$  και  $SO_2$  αντίστοιχα για την περίοδο 2010-2019.



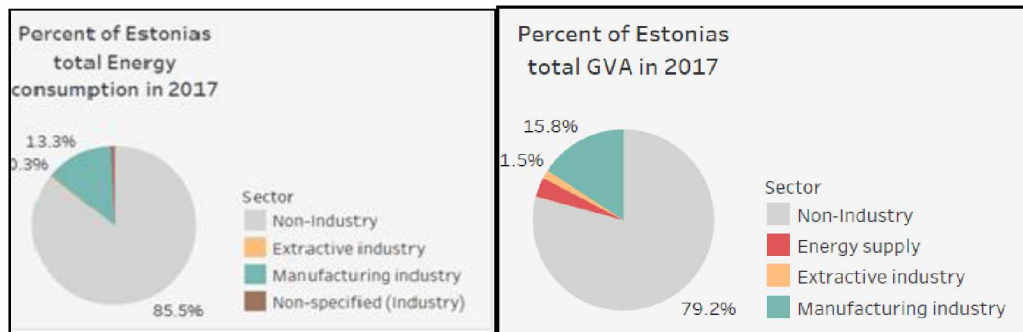
Εικόνα 5.24: SO<sub>2</sub>

### 5.2.4 Εσθονία

Η Δημοκρατία της Εσθονίας είναι χώρα της βορειοανατολικής Ευρώπης και μία από τις τρεις βαλτικές χώρες. Έχει έκταση 45.339 km<sup>2</sup>. και πληθυσμό 1.328.439[1] κατοίκους, Η πυκνότητα της είναι 29,3 κατ./km<sup>2</sup>.Είναι μέλος της ΕΕ από το 2004.Η βιομηχανία αποτελεί τη σημαντικότερη οικονομική πηγή της χώρας, οι κυριότεροι κλάδοι της οικονομίας της χώρας είναι ο ενεργειακός, οι τηλεπικοινωνίες, οι κλωστοϋφαντουργίες, τα χημικά προϊόντα.Το ΑΕ Π της είναι 31,038 δισ. \$ και το Κατά κεφαλή 23.523\$ [Eurostat].Η Εσθονία είναι μια ανεπτυγμένη χώρα με προηγμένη οικονομία υψηλού εισοδήματος και το 2011 ήταν μεταξύ των ταχύτερα αναπτυσσόμενων στην ΕΕ ,ο Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης είναι 0,892 (29η – πολύ υψηλός) [60].

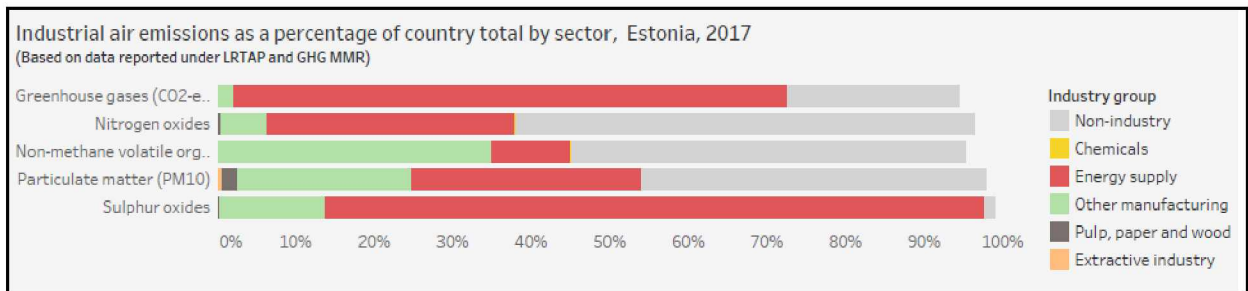


Εικόνα 5.25:Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές βιομηχανικής προέλευσης 2007-17

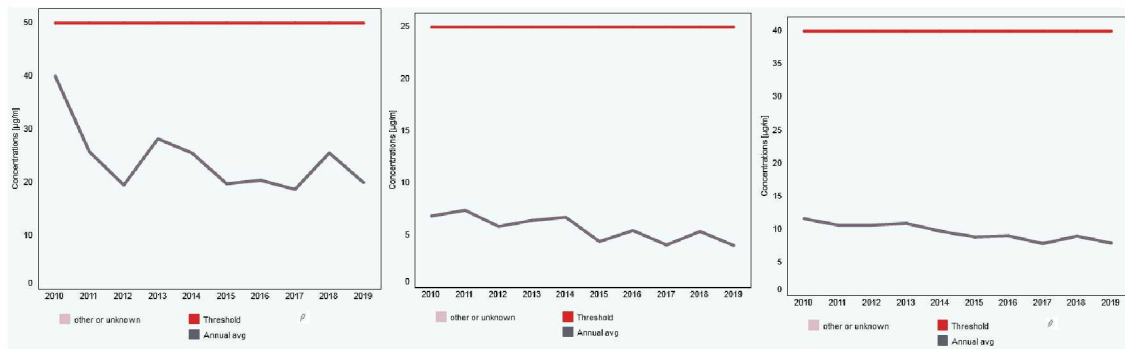


Εικόνα 5.26: Ενεργειακή κατανάλωση και ΑΠΑ ανά βιομηχανικό τομέα το 2017

Στην Εικόνα 5.25 βλέπουμε τις τάσεις των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρυπαντών (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) βιομηχανικής προέλευσης για τη περίοδο 2007-2017. Στην Εικόνα 5.26 βλέπουμε το μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα ξεχωριστά στη συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας και στην Ακαθάριστη Προστιθέμενη Αξία της χώρας το 2017.



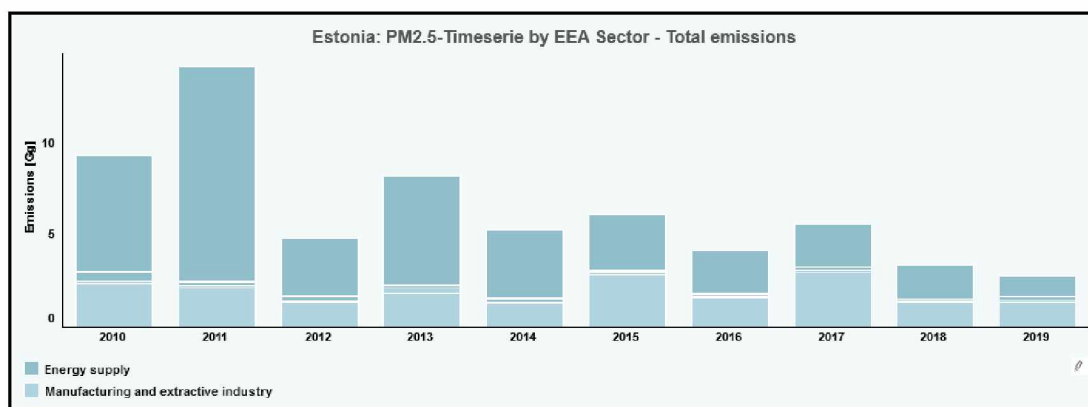
Εικόνα 5.27: Μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές της χώρας το 2017



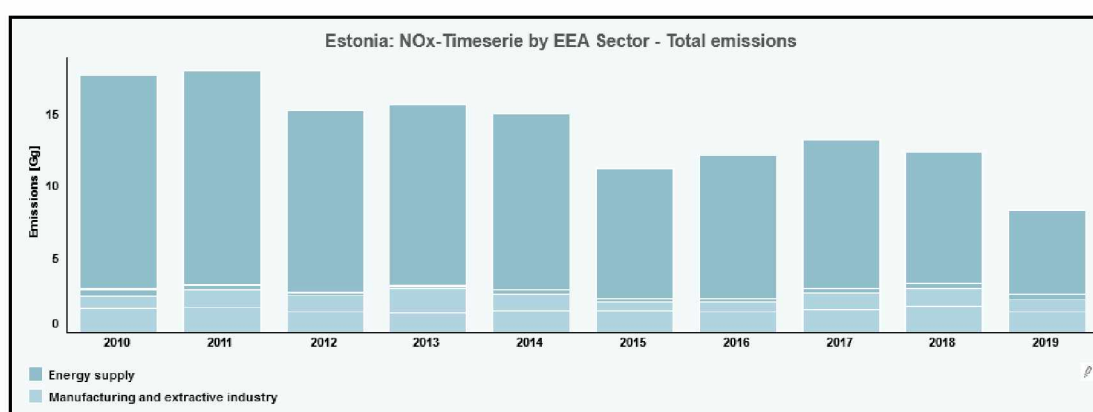
Εικόνα 5.28: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> και NO<sub>2</sub> αντίστοιχα σε αστικό περιβάλλον 2010-2019

Στην Εικόνα 5.27 βλέπουμε το μερίδιο του κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) ξεχωριστά, της χώρας το 2017

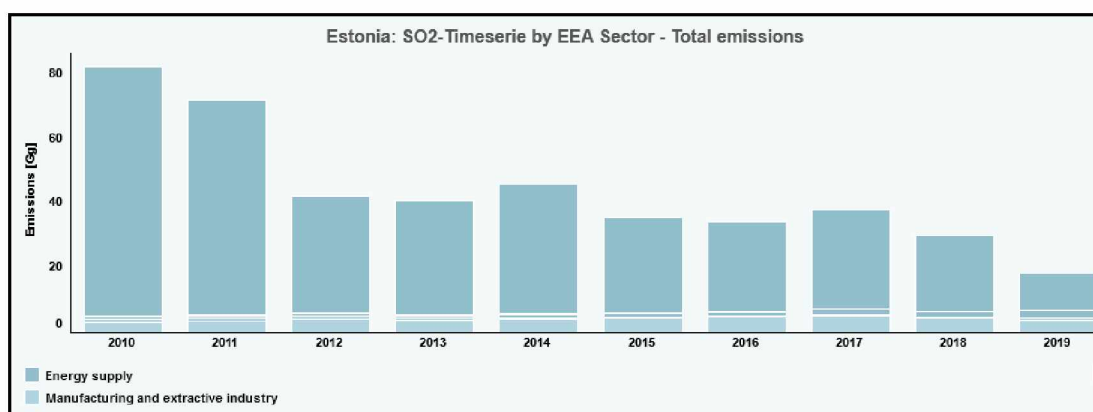
Στην Εικόνα 5.28 βλέπουμε τις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> και NO<sub>2</sub> αντίστοιχα όπως αυτές μετρήθηκαν εντός αστικών περιοχών της χώρας την περίοδο 2010-2019 καθώς και τα ανώτατα Ευρωπαϊκά επιτρεπτά όρια των συγκεντρώσεων αυτών.



Εικόνα 5.29: PM<sub>2,5</sub>



Εικόνα 5.30: NO<sub>x</sub>



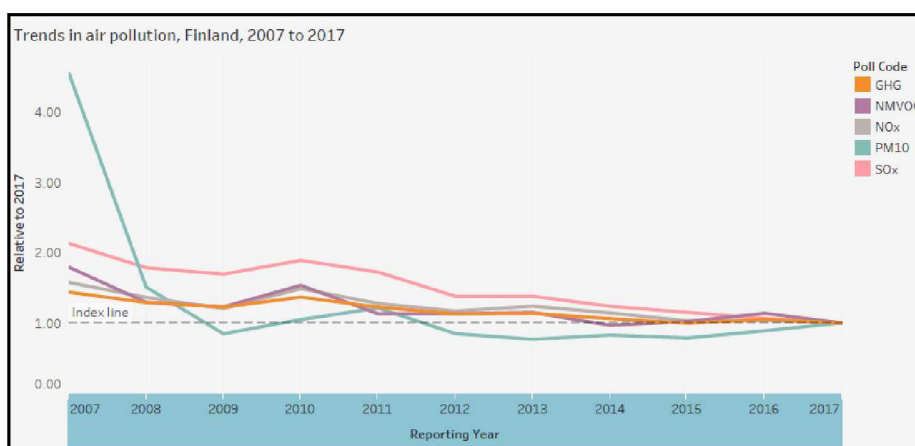
Εικόνα 5.31: SO<sub>2</sub>

Στις εικόνες 5.29-30-31 βλέπουμε τις συνολικές εκπομπές βιομηχανικού τομέα PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub> αντίστοιχα για την περίοδο 2010-2019.

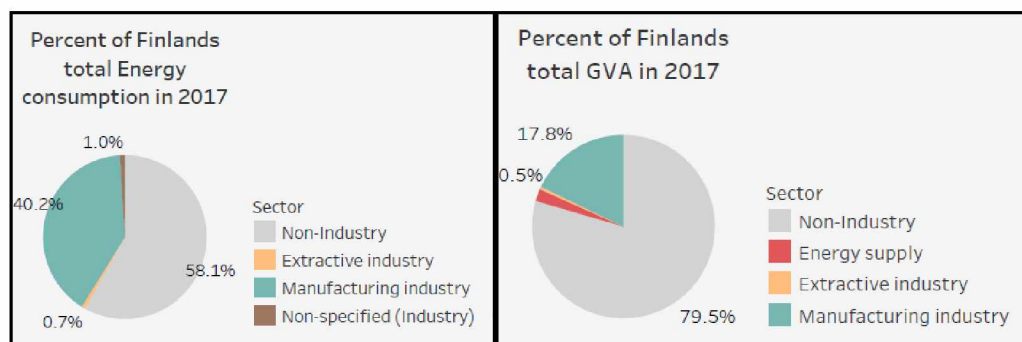
### 5.2.5 Φινλανδία

Η Φινλανδία είναι χώρα της βόρειας Ευρώπης, έχει έκταση 338.145 km<sup>2</sup> και πληθυσμό 5.543.659 κατοίκους. Η πυκνότητα της είναι πάρα πολύ χαμηλή με 16,4 κατ./km<sup>2</sup>. Είναι μέλος της ΕΕ από το 1995. Η οικονομία της Φινλανδίας στηρίζεται στην εκμετάλλευση του

δασικού πλούτου. Η βιομηχανική της ανάπτυξη, μεταλλουργία, μηχανουργία και σιδηρουργία βασίζεται στις αξιόλογες ποσότητες τύρφης του υπεδάφους που συνιστούν την κυριότερη από τις ενεργειακές πηγές της χώρας. Η Φινλανδία στηρίζεται ακόμη στα υδροηλεκτρικά αλλά και στα πυρηνικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το ΑΕΠ της είναι 236,883 δισ. \$ και το Κατά κεφαλή 43.169 \$ [Eurostat]. Ο Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης είναι 0,938 (11η – πολύ υψηλός) [60].



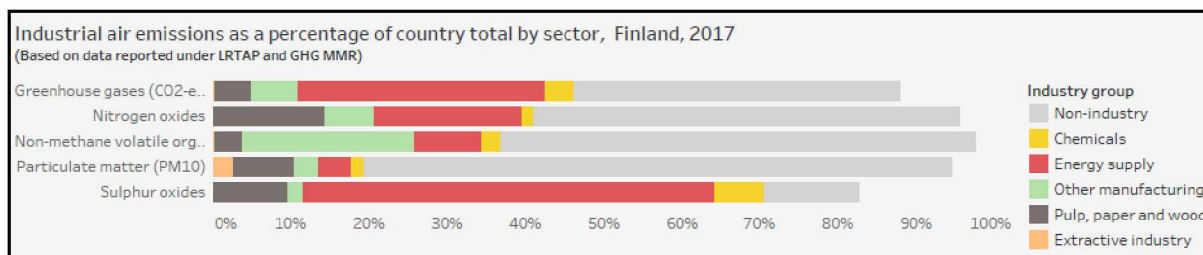
Εικόνα 5.32: Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές βιομηχανικής προέλευσης 2007-17



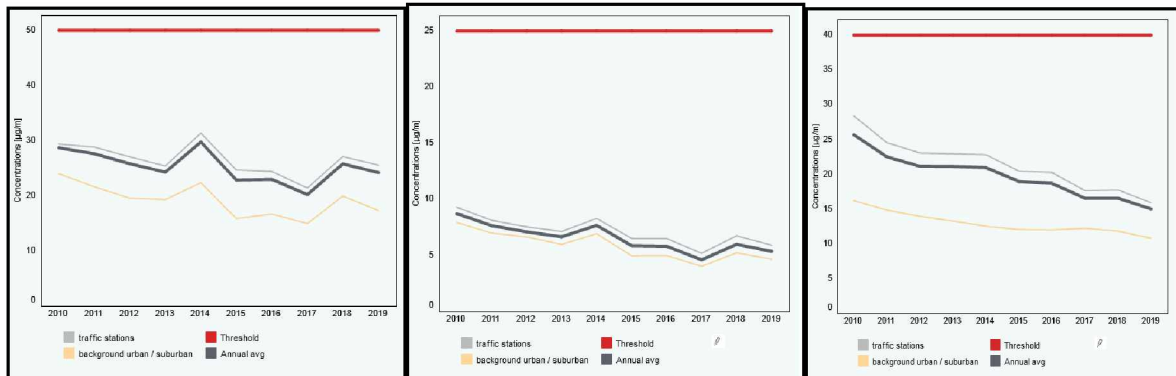
Εικόνα 5.33: Ενεργειακή κατανάλωση και ΑΠΑ ανά βιομηχανικό τομέα το 2017

Στην Εικόνα 5.32 βλέπουμε τις τάσεις των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρυπαντών (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) βιομηχανικής προέλευσης για τη περίοδο 2007-2017.

Στην Εικόνα 5.33 βλέπουμε το μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα ξεχωριστά στη συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας και στην Ακαθάριστη Προστιθέμενη Αξία της χώρας το 2017.



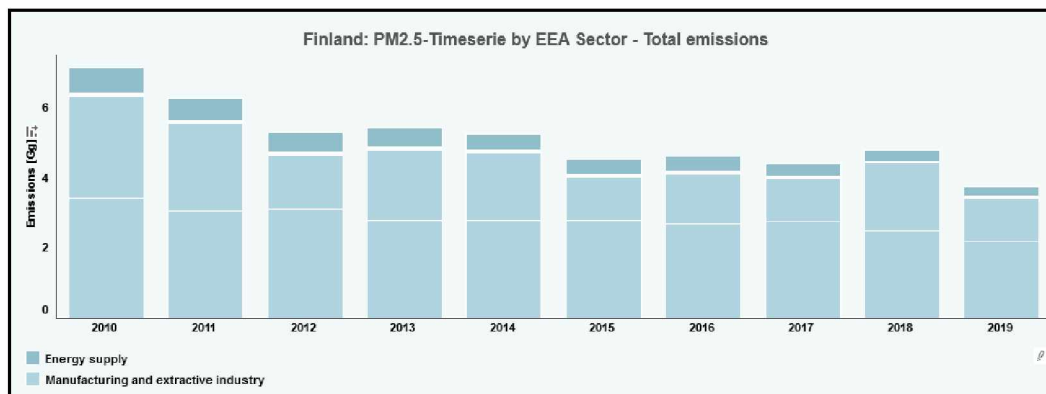
Εικόνα 5.34: Μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές της χώρας το 2017



Εικόνα 5.35: Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> και NO<sub>2</sub> αντίστοιχα σε αστικό περιβάλλον 2010-2019

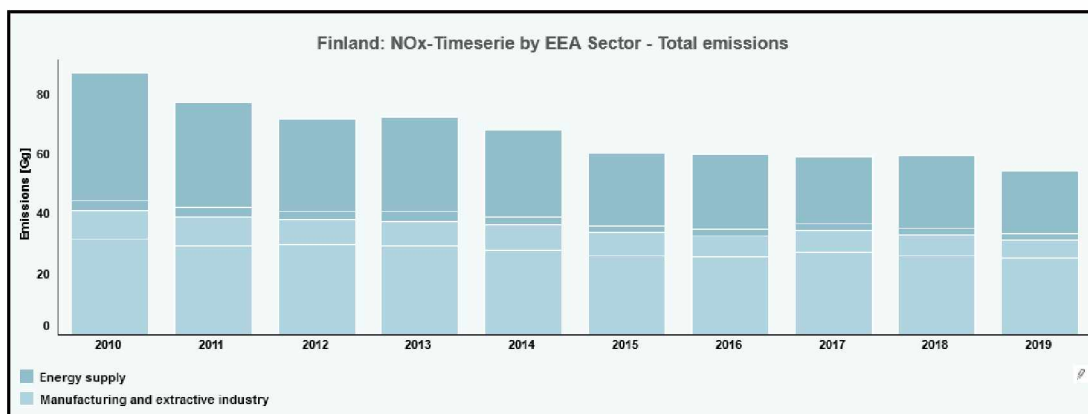
Στην Εικόνα 5.34 βλέπουμε το μερίδιο του κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) ξεχωριστά, της χώρας το 2017

Στην Εικόνα 5.35 βλέπουμε τις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> και NO<sub>2</sub> αντίστοιχα όπως αυτές μετρήθηκαν εντός αστικών περιοχών της χώρας την περίοδο 2010-2019 καθώς και τα ανώτατα Ευρωπαϊκά επιτρεπτά όρια των συγκεντρώσεων αυτών.

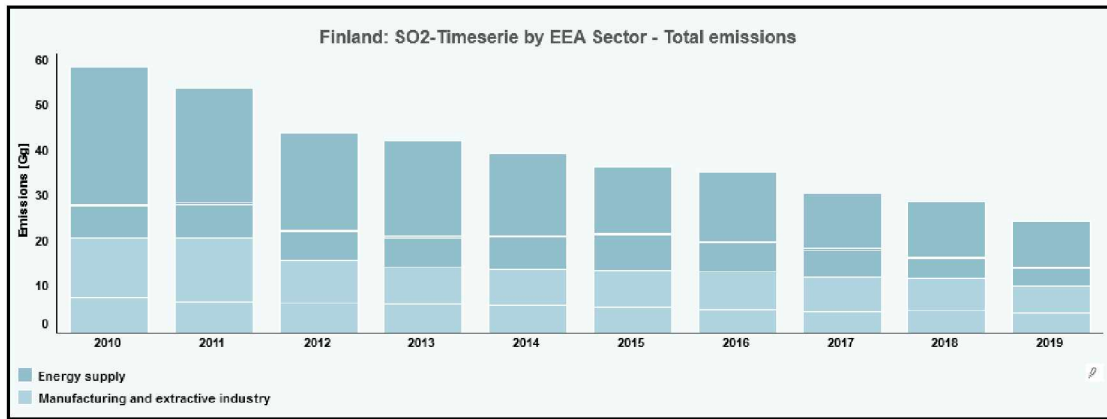


Εικόνα 5.36: PM<sub>2,5</sub>

Στις εικόνες 5.36-37-38 βλέπουμε τις συνολικές εκπομπές βιομηχανικού τομέα PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub> αντίστοιχα για την περίοδο 2010-2019.



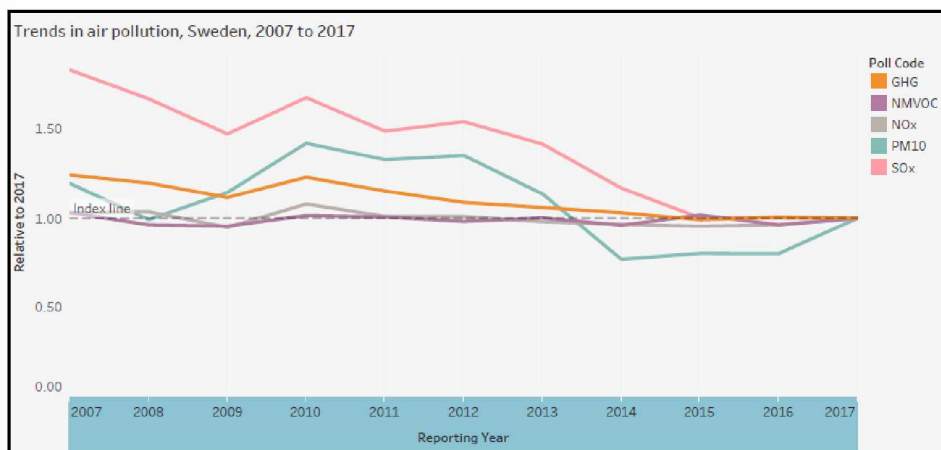
Εικόνα 5.37: NO<sub>x</sub>



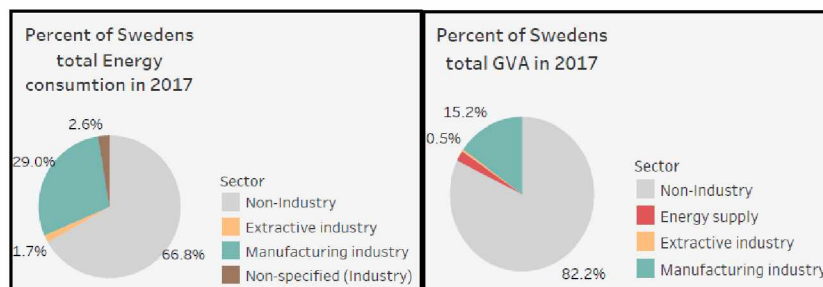
Εικόνα 5.38:SO<sub>2</sub>

### 5.2.6 Σουηδία

Η Σουηδία, είναι σκανδιναβική χώρα στη Βόρεια Ευρώπη, έχει έκταση 450.295 km<sup>2</sup> και πληθυσμό 10.409.248 κατοίκους. Έχει χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα 23,1 κατ./km<sup>2</sup>, με το 87% των Σουηδών να ζουν σε αστικές περιοχές που καλύπτουν το 1.5% της έκτασης της Σουηδίας. Είναι μέλος της ΕΕ από το 1995. Ο ορυκτός πλούτος της χώρας είναι ιδιαίτερα σημαντικός και την καθιστά έναν από τους μεγαλύτερους εξαγωγείς σιδήρου, χαλκού και ξυλείας στη Ευρώπη. Το Α Ε Π της είναι 563 δις. \$ και έχει το ενδέκατο υψηλότερο κατά κεφαλήν εισόδημα 54.135\$[Eurostat]. Ο Δείκτης Ανθρώπινης Ανάπτυξης είναι 0,945[4] (7η – πολύ υψηλός).



Εικόνα 5.39:Ατμοσφαιρικοί ρυπαντές βιομηχανικής προέλευσης 2007-17

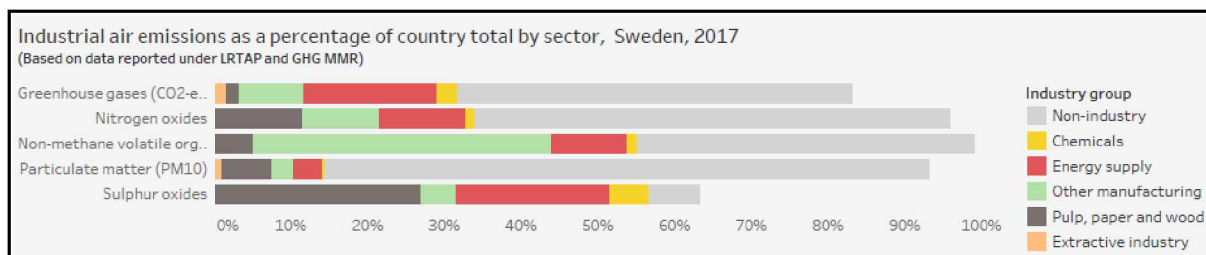


Εικόνα 5.40:Ενεργειακή κατανάλωση και ΑΠΑ ανά βιομηχανικό τομέα το 2017



Στην Εικόνα 5.39 βλέπουμε τις τάσεις των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρυπαντών (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) βιομηχανικής προέλευσης για τη περίοδο 2007-2017.

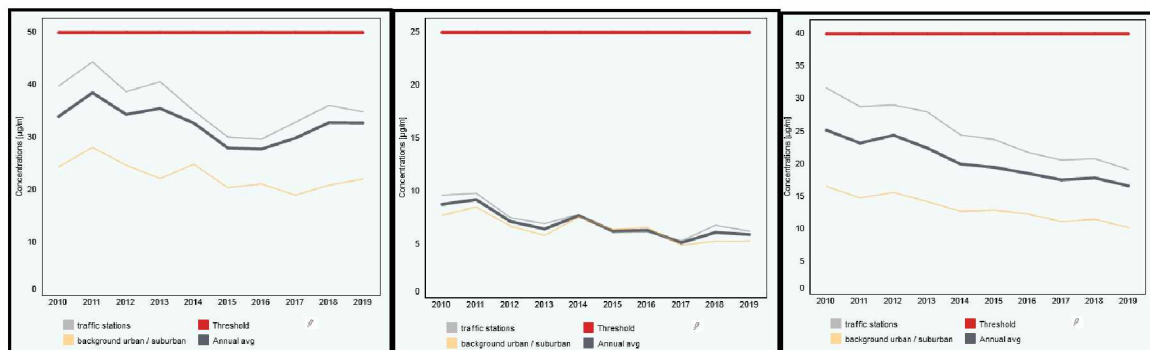
Στην Εικόνα 5.40 βλέπουμε το μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα ξεχωριστά στη συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας και στην Ακαθάριστη Προστιθέμενη Αξία της χώρας το 2017.



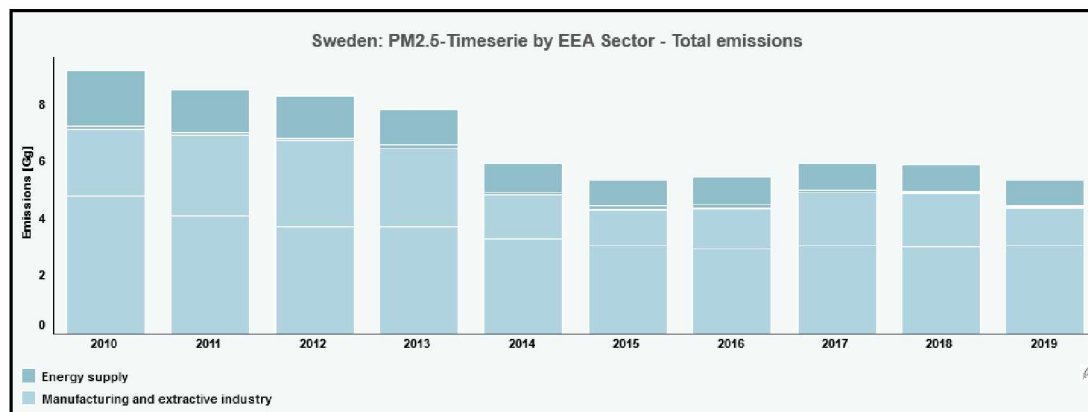
Εικόνα 5. 41:Μερίδιο κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές της χώρας το 2017

Στην Εικόνα 5.41 βλέπουμε το μερίδιο του κάθε βιομηχανικού τομέα στις συνολικές ετήσιες εκπομπές (GHG, VOCs, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>x</sub>) ξεχωριστά ,της χώρας το 2017

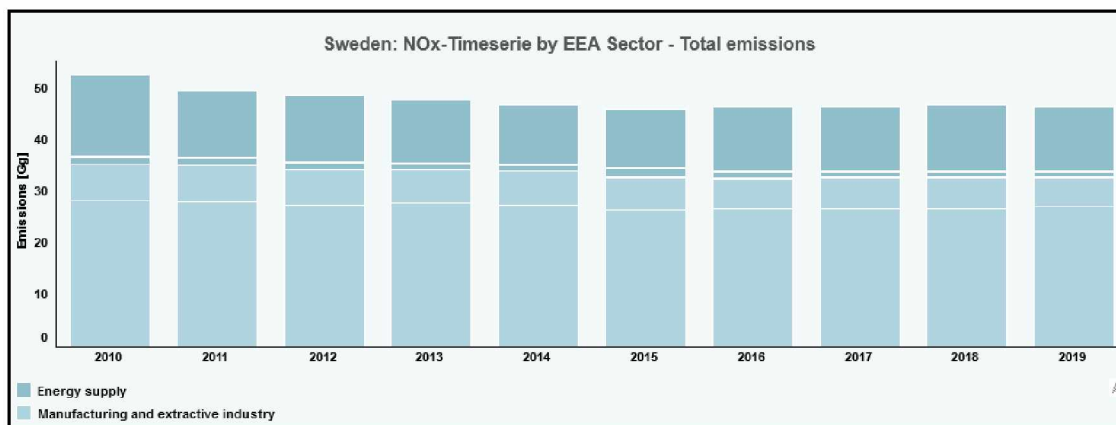
Στην Εικόνα 5.42 βλέπουμε τις μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> και NO<sub>2</sub> αντίστοιχα όπως αυτές μετρήθηκαν εντός αστικών περιοχών της χώρας την περίοδο 2010-2019 καθώς και τα ανώτατα Ευρωπαϊκά επιτρεπτά όρια των συγκεντρώσεων αυτών.



Εικόνα 5.42:Μέσες ετήσιες συγκεντρώσεις PM<sub>10</sub>,PM<sub>2,5</sub>και NO<sub>2</sub> αντίστοιχα σε αστικό περιβάλλον 2010-2019

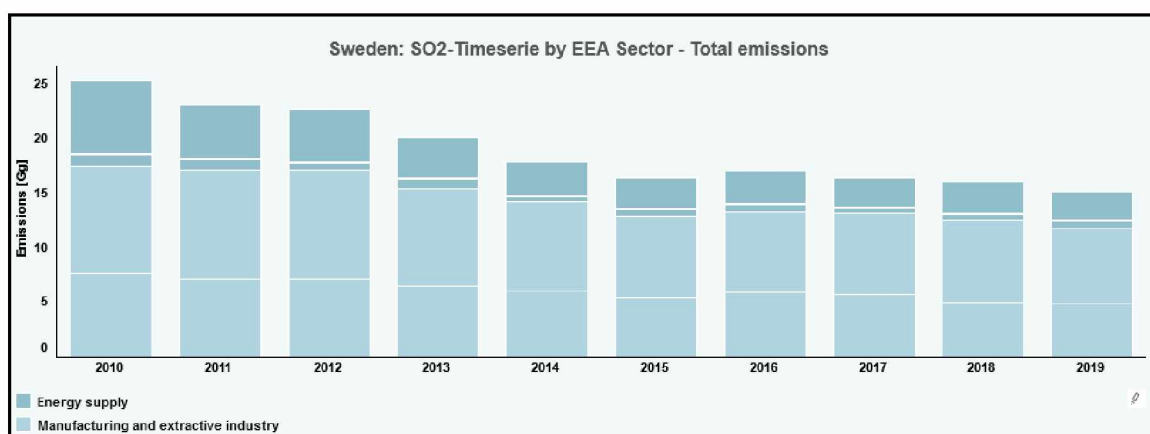


Εικόνα 5.43: PM<sub>2,5</sub>



Εικόνα 5.44: NO<sub>x</sub>

Στις εικόνες 5.43-44-45 βλέπουμε τις συνολικές εκπομπές βιομηχανικού τομέα PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub> και SO<sub>2</sub> αντίστοιχα για την περίοδο 2010-2019.



Εικόνα 5.45: SO<sub>2</sub>

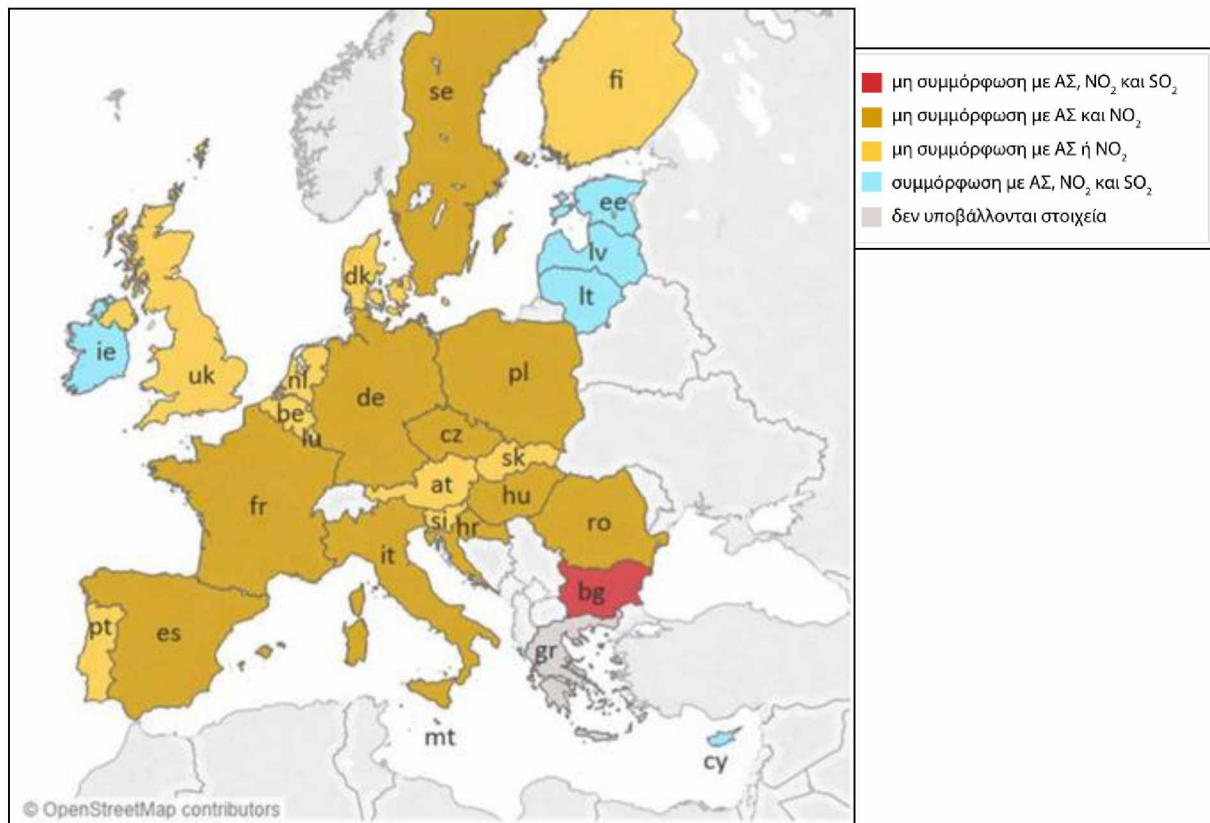
### 5.2.7 Μοντέλο Ενεργειακής κατανάλωσης, προστασία του περιβάλλοντος

Η ΕΕ για να αντιμετωπίσει την ατμοσφαιρική ρύπανση έθεσε οριακές τιμές συγκέντρωσης ρύπων στον τον αέρα και πρότυπα για τις πηγές εκπομπών ρύπων. Η οδηγία για την ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος AAQ του 2008 (AAQ Directive: Ambient Air Quality Directive (Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe (OJ L 152, 11.6.2008, p. 1)) ορίζει πρότυπα ποιότητας του αέρα (συμπεριλαμβανομένων των οριακών τιμών) για τις συγκεντρώσεις ατμοσφαιρικών ρύπων με τις μεγαλύτερες επιπτώσεις στην υγεία και περιέχει κριτήρια τόσο για τη θέση όσο και για τον ελάχιστο αριθμό σημείων δειγματοληψίας. Τα περισσότερα κράτη μέλη δεν εφάρμοσαν αποτελεσματικά την οδηγία AAQ .Το 2016, 13 κράτη μέλη παραβίασαν τις οριακές τιμές PM, 19 οριακές τιμές NO<sub>2</sub> και μία οριακές τιμές SO<sub>2</sub>.Και τα 28 κράτη μέλη

της ΕΕ εκτός από την Εσθονία, την Ιρλανδία, την Κύπρο, τη Λετονία, τη Λιθουανία και τη Μάλτα παραβίασαν μία ή περισσότερες από αυτές τις οριακές τιμές (βλ. εικόνα 5.46)[64].

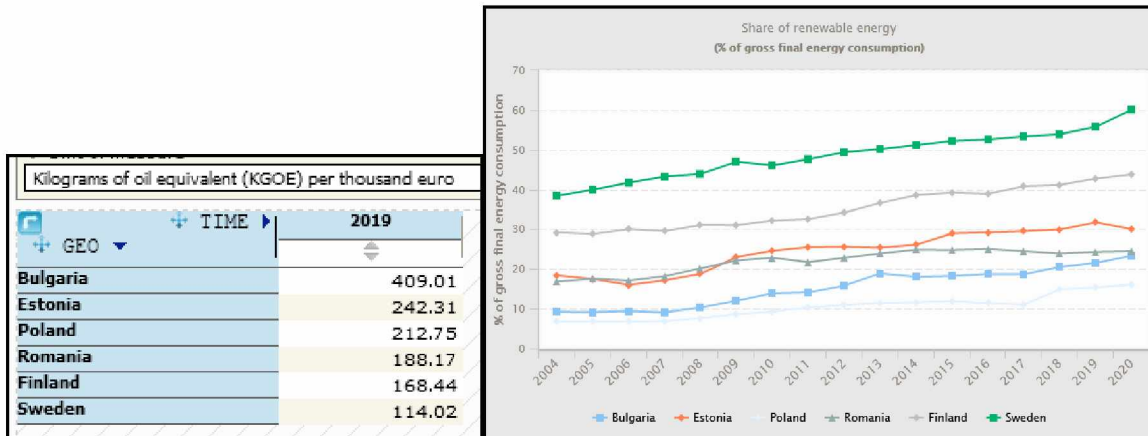
Στην Εικόνα 5.47 μπορούμε να δούμε την ενεργειακή ένταση κάθε χώρας σε κιλά ισοδύναμου πετρελαίου ανά 1000€ ΑΕΠ. Οι λιγότερο εντατικές οικονομίες το 2019, δηλαδή εκείνες που χρησιμοποιούν τη λιγότερη ποσότητα ενέργειας σε σχέση με το συνολικό τους οικονομικό μέγεθος (ΑΕΠ), ήταν η Ρουμανία, η Πολωνία και η Σουηδία. Οι πιο ενεργοβόρες ήταν η Φινλανδία η Βουλγαρία και η Εσθονία.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η οικονομική δομή μιας χώρας παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της ενεργειακής έντασης, καθώς οι οικονομίες που βασίζονται στις υπηρεσίες θα εμφανίζουν, α priori, σχετικά χαμηλές εντάσεις ενέργειας, ενώ οι οικονομίες με βαριές βιομηχανίες (όπως η παραγωγή σιδήρου και χάλυβα) μπορεί να έχουν σημαντικό ποσοστό της οικονομικής τους δραστηριότητας στους βιομηχανικούς τομείς, οδηγώντας έτσι σε υψηλότερη ενεργειακή ένταση. Στη συνέχεια στην Εικόνα 5.48 βλέπουμε τη Διείσδυση των ΑΠΕ στο μοντέλο ενεργειακής κατανάλωσης κάθε χώρας την περίοδο 2004-2020.



Εικόνα 5.46: Συμμόρφωση των κρατών μελών με τις οριακές τιμές το 2016

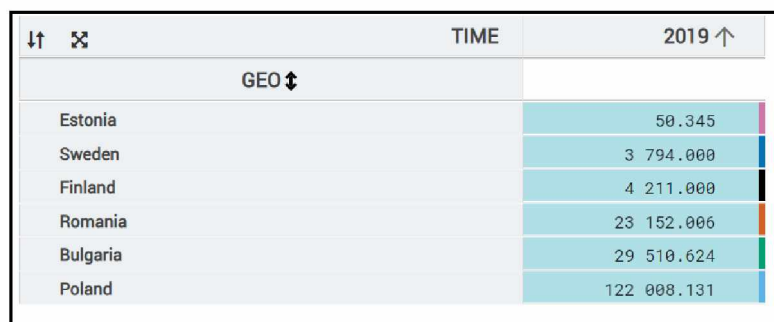
Στην Εικόνα 5.49 μπορούμε να δούμε την δαπάνη κάθε χώρας για την προστασία του περιβάλλοντος, ως ποσοστό του ΑΕΠ, το έτος 2018. Τέλος στην Εικόνα 5.50 μπορούμε να δούμε τη συνολική κατανάλωση στερεών ορυκτών καυσίμων για το έτος 2019.



Εικόνα 5.47: Ένταση Ενέργειας (Πηγή Eurostat). Εικόνα 5.48: Διείσδυση ΑΠΕ (Πηγή Eurostat).



Εικόνα 5.49: Εθνικές δαπάνες για την προστασία του περιβάλλοντος 2018(%ΑΕΠ) (Πηγή Eurostat).



Εικόνα 5.50: Κατανάλωση στερεών ορυκτών καυσίμων σε χιλιάδες τόνους (Πηγή Eurostat).

### 5.3 Συμπεράσματα-Συζήτηση

Το πρόβλημα της αστικής ατμοσφαιρικής ρύπανσης μιας χώρας είναι εξαιρετικά πολύπλοκο και πολυπαραγοντικό. Δεν έχει να κάνει μόνο με τη φύση, την ένταση και τη θέση των πηγών, αλλά και με άλλους παράγοντες όπως η ταχύτητα εναπόθεσης [65], οι μετεωρολογικές

συνθήκες, το μικροκλίμα, το ανάγλυφο και η τοπογραφία. Έχει να κάνει επίσης και με κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες ,όπως η κουλτούρα και η περιβαλλοντική συνείδηση των κατοίκων, η νομοθεσία για τη ρύπανση κ.ά.

Όλες οι παραπάνω χώρες είναι αρκετά αναπτυγμένες βιομηχανικά , με περίπου ίδια ποσοστά συμμετοχής της βιομηχανίας τους στο ΑΕΠ και στη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες- παγκοσμίως, το 25% της ρύπανσης του αστικού περιβάλλοντος από τα PM 2,5 οφείλεται στην κυκλοφορία, 20% από καύση οικιακών στερεών καυσίμων, 22% από μη καθορισμένες πηγές ανθρώπινης προέλευσης και 18% από φυσική σκόνη και αλάτι και μόλις το 15% από τις βιομηχανικές δραστηριότητες. Για την βορειοανατολική Ευρώπη και τα Βαλκάνια το ποσοστό αυτό είναι ακόμη μικρότερο , 11 με 13% [63].Οι βιομηχανικές πηγές φαίνεται να είναι ο παράγοντας με τη μικρότερη συμβολή. Άρα μάλλον δεν μπορούμε να αναζητήσουμε εκεί τους λόγους για τούς οποίους υπάρχει τόσο μεγάλη διαφορά στην ποιότητα του αέρα της αστικής ατμόσφαιρας ,ανάμεσά τους.

Η καύση στερεών καυσίμων για τη θέρμανση και το μαγείρεμα των νοικοκυριών και για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι κυρίαρχη πηγή PM στην αστική ατμόσφαιρα . Εκτιμήσεις δείχνουν ότι η πυκνότητα και το μέγεθος του πληθυσμού, η εισοδηματική ανισότητα και η παραγωγή άνθρακα συνδέονται θετικά με τη χρήση στερεών καυσίμων των χωρών, ενώ το κατά κεφαλήν ΑΕΠ έχει το αντίθετο αποτέλεσμα. Η οικονομική ανάπτυξη, μετρούμενη ως κατά κεφαλήν ΑΕΠ, έχει την ισχυρότερη σχέση με τη χρήση στερεών καυσίμων. Επίσης τα κίνητρα των κυβερνήσεων για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνδέονται με τη χαμηλότερη εξάρτηση από στερεά καύσιμα[66].

Πράγματι εάν συγκρίνουμε την πυκνότητα πληθυσμού ,το κατά κεφαλήν ΑΕΠ, τη διείδυση των ΑΠΕ (Εικ. 5.48), τις εθνικές δαπάνες για την προστασία του περιβάλλοντος (Εικ. 5.49) και τη συνολική κατανάλωση στερεών ορυκτών καυσίμων (Εικ. 5.50), εξηγούνται απόλυτα οι συνθήκες αστικής ατμόσφαιρας που επικρατούν σε κάθε χώρα που εξετάζουμε Σε παρόμοιο συμπέρασμα θα καταλήξουμε εάν δούμε και την ενεργειακή ένταση των χωρών αυτών (Εικ. 5.48). Οι χώρες με τη μικρότερη ενεργειακή ένταση ( πλην Εσθονίας), δηλαδή οι χώρες που καταναλώνουν πιο αποδοτικά την ενέργειά τους, έχουν και την πιο καθαρή ατμόσφαιρα.

Η πυκνότητα πληθυσμού μιας χώρας είναι κάτι στο οποίο δίνουν ιδιαίτερη σημασία όλοι όσοι μελετούν θέματα αέριας ρύπανσης και εκπομπών γιατί αφενός είναι ένας δείκτης της διασποράς των πηγών, αφετέρου του πλήθους των κατοίκων που εκτίθενται στη ρύπανση . Από κατά κεφαλήν ΑΕΠ της χώρας θα μπορούσε να καταλάβει κανείς τις δυνατότητες της

χώρας αυτής να επενδύσει στις αρκετά κοστοβόρες τεχνολογίες αντιρρύπανσης και προστασίας του περιβάλλοντος αλλά και στην εκτεταμένη χρήση ΑΠΕ για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών . Η Εσθονία ,Φινλανδία και Σουηδία , υπερέχουν στα προηγούμενα σε αντίθεση με τη Βουλγαρία ,Ρουμανία και Πολωνία οι οποίες έχουν τη μεγαλύτερη κατανάλωση στερεών ορυκτών καυσίμων, τις χαμηλότερες δαπάνες για τη προστασία του περιβάλλοντος και τη χαμηλότερη διείσδυση ΑΠΕ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6.1 Συμπεράσματα

Η αστική ρύπανση είναι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει το ανθρώπινο είδος στις μέρες μας. Η ρύπανση επηρεάζει άμεσα την υγεία και την ευημερία των ανθρώπων. Επιπλέον, η δημιουργία ρύπανσης και οι συνέπειές της συνήθως επιδεινώνονται στις πόλεις λόγω της πυκνότητας πληθυσμού και οικονομικής δραστηριότητας. Στα αστικά κέντρα, που φιλοξενούν το 50% του παγκόσμιου πληθυσμού, παράγεται το 71% των αερίων του θερμοκηπίου.

Ωστόσο, και στις πόλεις δίνονται οι λύσεις. Η γεωγραφική συγκέντρωση επιτρέπει μια πιο αποτελεσματική κατανομή πόρων και πρωτοβουλιών για την αντιμετώπιση προβλημάτων αστικής ρύπανσης. Καλώς ή κακώς, σχετικά μικρές βελτιώσεις στη διαχείριση της αστικής ρύπανσης μπορεί να συνεπάγονται τεράστιες επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Βασική αρχή μας θα πρέπει να είναι: αντιμετώπιση της αστικής ρύπανσης στην πηγή και παρέμβαση στην διαδικασία παραγωγής της. Δηλαδή θα πρέπει να παρθούν:

Μέτρα για χωρική κατανομή των πηγών της ρύπανσης από βιομηχανίες.

Μέτρα για την κυκλοφορία των οχημάτων και τη βελτίωση των μέσων μαζικής μεταφοράς.

Πολεοδομικά μέτρα (όπως Συντελεστής και γενική πυκνότητα δόμησης) για την βελτίωση της κυκλοφορίας του αέρα και τον αυτοκαθαρισμό της ατμόσφαιρας.

Μέτρα για το πράσινο, δεντροφύτευση μέσα στην πόλη και δάση στον περιαστικό χώρο.

Μέτρα για την κατανάλωση ενέργειας από τα κτήρια.

Μέτρα για την Αποκέντρωση.

Για να εισαγάγουμε τέτοιες βελτιώσεις, θα πρέπει όλοι να συνεργαστούμε γιατί η καταπολέμηση της αστικής ρύπανσης είναι πιο αποτελεσματική όταν κάθε θεσμός και φορέας της κοινωνίας (π.χ. πολίτες, εταιρείες και τοπική αυτοδιοίκηση) έχουν επίγνωση και εμπλοκή στο πρόβλημα. Η ατμοσφαιρική ρύπανση σκοτώνει περίπου 3εκατομμύρια ανθρώπους ετησίως και επηρεάζει όλες τις περιοχές του κόσμου, αν και ο Δυτικός Ειρηνικός και η Νοτιοανατολική Ασία επηρεάζονται περισσότερο. Περίπου το 90% των ανθρώπων αναπνέουν αέρα που δεν συμμορφώνεται με τις κατευθυντήριες οδηγίες της ΠΟΥ για την ποιότητα του αέρα.

Στην συνέχεια στην διπλωματική εργασία έγινε αναφορά στα αέρια του θερμοκηπίου. Αυτό το φυσικό φαινόμενο θερμαίνει την ατμόσφαιρα και καθιστά δυνατή τη ζωή στη γη, χωρίς αυτό η χαμηλή θερμοκρασία θα έκανε αδύνατη τη ζωή στη γη. Τα αέρια του θερμοκηπίου (GHGs - Greenhouse gases) όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, το υποξείδιο του αζώτου και οι αλογονωμένες ενώσεις παράγονται από ανθρώπινες δραστηριότητες ή δημιουργούνται από φυσικές πηγές στο περιβάλλον.

Οι φυσικές πηγές παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπεμπόμενων αερίων ρύπων αλλά δεν οδηγούν σε υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων (εκτός από ελάχιστες εξαιρέσεις). Οι ανθρωπογενείς πηγές παράγουν γενικά μικρότερο ποσοστό των εκπεμπόμενων αερίων ρύπων αλλά επειδή συνήθως είναι εντοπισμένες και μεγάλης έντασης, οδηγούν σε υψηλές συγκεντρώσεις (ατμοσφαιρικά επεισόδια). Τα GHG απορροφούν την υπέρυθη ακτινοβολία και παγιδεύουν τη θερμότητα στην ατμόσφαιρα, ενισχύοντας έτσι το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση του πλανήτη. Ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η παραγωγή και η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, η χρήση διαφόρων χημικών ουσιών, τα απόβλητα από διεργασίες αποτέφρωσης και άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες έχουν αυξήσει τη συγκέντρωση αερίων θερμοκηπίου (GHG), ιδιαίτερα CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O στην ατμόσφαιρα, καθιστώντας τα επιβλαβή.

Αυτή η αύξηση της συγκέντρωσης GHGs της ατμόσφαιρας οδήγησε στην κλιματική αλλαγή και στην επίδραση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, κάτι που έδωσε κίνητρο σε διεθνείς προσπάθειες όπως το Πρωτόκολλο του Κιότο, η υπογραφή της Συμφωνίας του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή και άλλες πρωτοβουλίες για τον έλεγχο των αρνητικών αποτελεσμάτων του φαινομένου.

Η πανδημία COVID-19 και οι περιορισμοί σε όλες τις οικονομικές και κοινωνικές δραστηριότητες σε όλο τον κόσμο μείωσαν δραστικά την ατμοσφαιρική ρύπανση και τις



εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μέσα σε λίγες μόνο εβδομάδες στις αρχές του 2020. Αυτό το ξαφνικό γεγονός έδωσε στους επιστήμονες μια άνευ προηγουμένου ευκαιρία να μελετήσουν και να εξάγουν συμπεράσματα. Παρατήρησαν συγκεκριμένα, ότι οι εκπομπές επέστρεψαν στα επίπεδα σχεδόν προ της πανδημίας έως το δεύτερο εξάμηνο του 2020, παρά τη μειωμένη δραστηριότητα σε όλους τους τομείς της οικονομίας. Υποστηρίζουν ότι αυτή η ανάκαμψη των εκπομπών ήταν πιθανώς απαραίτητη για τις επιχειρήσεις και τα άτομα για να διατηρήσουν ζωντανή ακόμη και την περιορισμένη οικονομική δραστηριότητα. «Αυτό υποδηλώνει ότι η μείωση της δραστηριότητας στους βιομηχανικούς και οικιακούς τομείς δεν αποτελεί μακροπρόθεσμη στρατηγική» ως μέσο μείωσης των εκπομπών, «Η μόνιμη μείωση των εκπομπών αυτών των τομέων θα απαιτήσει τη μετάβασή τους σε νέες τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών άνθρακα».[54]

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, και η επακόλουθη υπερθέρμανση του πλανήτη, αναμένεται να έχει δυσάρεστες συνέπειες, σύμφωνα με την σχεδόν καθολική άποψη των επιστημόνων.

Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι μερίδα της επιστημονικής κοινότητας συμφωνεί με τα προηγούμενα ως προς τις συνέπειες κ.τ.λ. αλλά εκφράζει την άποψη ότι οι φυσικές πηγές αερίων του θερμοκηπίου (κυρίως CO<sub>2</sub>) και όχι οι ανθρωπογενείς είναι αυτές που δημιουργούν το μεγάλο πρόβλημα και ότι οι συγκεντρώσεις των αερίων αυτών στη γήινη ατμόσφαιρα παρουσιάζουν μια περιοδικότητα σε βάθος χρόνου, ανεξάρτητα από την ανθρώπινη παρέμβαση.

Ακολούθως λόγος έγινε για τα αιωρούμενα σωματίδια. Ενώ η ορυκτή σκόνη και το θαλασσινό αλάτι είναι σημαντικές φυσικές πηγές αιωρούμενων σωματιδίων, η βιομηχανική σκόνη αναφέρεται ως κύριος παράγοντας των ανθρωπογενών αιωρούμενων σωματιδίων. Το μέγεθος των σωματιδίων, η χημική σύνθεση, η διάρκεια της έκθεσης, η συγκέντρωση και η ευαισθησία του ατόμου συνδέονται με πιθανές επιπτώσεις της έκθεσης σε σωματίδια στον άνθρωπο. Οι επιπτώσεις στην υγεία περιλαμβάνουν σοβαρά αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα και πρόωρους θανάτους. Η διαμόρφωση κανονισμών ή πολιτικών και η επιβολή, μεθόδων και στρατηγικών ελέγχου των εκπομπών από την πηγή αποτελούν τους κύριους μηχανισμούς για τον μετριασμό της σωματιδιακής ρύπανσης.

Τα βασικά μέτρα μείωσης εκπομπών από τη βιομηχανία είναι[55]:

*Βέλτιστος σχεδιασμός.* Βελτιστοποίηση των διαδικασιών, λειτουργίας, συντήρησης, καθαριότητας, και καύσης καυσίμου (πχ διαμόρφωση ζώνης καύσης, με επαρκή περίσσεια αέρα και κατάλληλη θερμοκρασία),

*Επιλογή καυσίμου.* Το Φυσικό αέριο και άλλα ελαφρά κλάσματα πετρελαίου παράγουν αμελητέες ποσότητες σωματιδίων

*Καθαρισμός καυσίμου.* Φυσικός καθαρισμός του άνθρακα μέσω πλύσης και εμπλουτισμού μπορεί να μειώσει την περιεκτικότητά του σε τέφρα και θείο, υπό την προϋπόθεση ότι λαμβάνεται μέριμνα για το χειρισμό των μεγάλων ποσοτήτων στερεών και υγρών αποβλήτων που παράγονται κατά τη διαδικασία καθαρισμού.

*Επιλογή Τεχνολογίας και Διεργασιών.* Η χρήση πιο αποτελεσματικών τεχνολογιών ή διεργασιών μπορεί να μειώσει τις εκπομπές. Σύγχρονες τεχνολογίες καύσης όπως η αέριοποίηση άνθρακα και η καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη μπορεί να μειώσουν τις εκπομπές κατά περίπου 10%. Εσωτερικοί θραυστήρες και μύλοι άνθρακα εκπέμπουν χαμηλότερα PM.

Τέλος αναλύθηκε το φαινόμενο της όξινης βροχής το οποίο είναι και αυτό ένα από τα σοβαρά περιβαλλοντικά ζητήματα. Η όξινη βροχή έχει pH αρκετά χαμηλότερο από 5,6 που είναι το φυσιολογικό (συνήθως 4,2 με 4,4). Εμφανίζεται λόγω της ύπαρξης διοξειδίου του θείου και μονοξειδίου του αζώτου που αντιδρούν με το νερό και παράγουν θειικό και νιτρικό οξύ που στη συνέχεια πέφτουν στο έδαφος με τη μορφή υετού. Αυτοί οι περιβαλλοντικοί ρύποι προέρχονται από διάφορες δραστηριότητες του ανθρώπου.

Δεδομένου ότι είμαστε η κύρια αιτία της, η λύση στο πρόβλημα της οξίνισης του περιβάλλοντος βρίσκεται στα χέρια μας: για να μετριαστεί το πρόβλημα, είναι απαραίτητο να μειωθούν οι εκπομπές ρύπων.

Για αυτό, πρέπει να υπάρξει δέσμευση σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο για την εφαρμογή μιας σειράς μέτρων:

Φιλτράρισμα εξουδετέρωση του βιομηχανικού νερού πριν αυτό απορριφθεί στους τελικούς αποδέκτες (ποτάμια, λίμνες κτλ).

Μείωση στις εκπομπές ρυπογόνων αερίων από τη βιομηχανία.

Ενθάρρυνση της παραγωγής και χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αντί ορυκτών καυσίμων.

Προώθηση της καινοτομίας και των νέων τεχνολογιών με στόχο τη ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Δεντροφύτευση για περισσότερη απορρόφηση του μολυσμένου αέρα.

Ενημέρωση του πληθυσμού για τη σημασία της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας στα νοικοκυριά.

Ενθάρρυνση της χρήσης μέσων μαζικής μεταφοράς και άλλων μη ρυπογόνων οχημάτων, όπως ποδηλάτων αντί ΙΧ αυτοκινήτων κ.α..

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. United Nations Environment Programme (2017) Towards a pollution-free planet background report. United Nations Environment Programme, Nairobi United Nations Environment Programme and International Solidarity Centre
- [2]. Holman C (1999) Sources of air pollution. Air pollution and health, Academic Press, London, pp 115–148
- [3]. World Health Organisation (2017a) Ambient air pollution: pollutants. <http://www.who.int/airpollution/ambient/pollutants/en/>. Accessed Dec 2017
- [4]. M. Martínez-Bravo and J. Martínez-del-Río Business and Economics Department, University of Almeria, Almería, Spain Urban Pollution and Emission Reduction,
- [5]. Gauderman WJ, Avol E, Lurmann F, Kuenzli N, Gilliland F, Peters J, McConnell R (2005) Childhood asthma and exposure to traffic and nitrogen dioxide. *Epidemiology* 16(6):737–743
- [6]. Schweitzer L, Noblet J (2018) Water Contamination and Pollution. In *Green Chemistry*, Elsevier, Amsterdam
- [7]. Goel PK (2006) Water pollution: causes, effects and control. New Age International, New Delhi Hoffman AJ, Woody JG (2008) Climate change: what's your business strategy? Harvard Business Press, Boston
- [8]. Ke S, Cheng X-Y, Zhang N, Hu H-G, Yan Q, Hou L-L et al (2015) Cadmium contamination of rice from various polluted areas of China and its potential risks to human health. *Environ Monit Assess* 187(7):408
- [9]. Cachada A, Rocha-Santos T, Duarte AC (2018) Chapter 1: Soil and pollution: an introduction to the Main Issues. In: *Soil pollution*, American Press, Cambridge, Massachusetts
- [10]. Fisher JE, Andersen ZJ, Loft S, Pedersen M (2017) Opportunities and challenges within urban health and sustainable development. *Curr Opin Environ Sustain* 25:77–83
- [11]. Maschke C (1999) Preventive medical limits for chronic traffic noise exposure. *Acust* 85:448
- [12]. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2021/sources-and-emissions-of-air>
- [13]. Li, N., Xia, T. and Nel, A. E. (2008), “The Role of Oxidative Stress in Ambient Particulate Matter-Induced Lung Diseases and its Implications in the Toxicity of Engineered Nanoparticles”, *Free Radical Biology and Medicine*, Vol. 44, Issue 9, pp.1689-1699.
- [14]. Kampa, M., and Castanas, E. (2008), “Human Health Effects of Air Pollution”, *Environmental Pollution*, Vol. 151, Issue 2, pp. 362-367. 43
- [15]. Van Berlo, D., Maja, H. and Roel, P. F. S. (2012), “Toxicology of Ambient Particulate Matter, “Molecular, Clinical and Environmental Toxicology”, Springer Basel, pp. 165-217.
- [16]. Pope 3rd, C. A., Bates, D. V., and Raizenne, M. E. (1995), “Health Effects of Particulate Air Pollution: Time for Reassessment?”, *Environmental Health Perspectives*, Vol. 103, Issue 5, pp. 472.

- [17]. Mechler, R., Amann, M., and Schöpp, W. (2002), "A Methodology to Estimate Changes in Statistical Life Expectancy Due to the Control of Particulate Matter Air Pollution", Interim Report, Laxenburg, Austria, International Institute for Applied System Analysis (IIASA), 43 p. 60
- [18]. Cooper, C. D. and Alley, F. C. (2002), *Air Pollution Control, A Design Approach*, Waveland Press, Inc. Long Grove, Illinois, Third Edition, 738p. 15
- [19]. Pöschl, U. (2005), "Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects", *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 44, Issue 46, pp. 7520-7540.
- [20]. Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier Van Der Gon, H., Facchini, M.C., Fowler, D., Koren, I., Langford, B., Lohmann, U. and Nemitz, E., (2015), "Particulate Matter, Air Quality and Climate: Lessons Learned and Future Needs", *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 15, Issue 14, pp.8217-8299. 28
- [21]. Anderson, J. O., Thundiyil, J. G. and Stolbach, A. (2012), "Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health", *Journal of Medical Toxicology*, Vol. 8, No. 2, pp. 166-175.
- [22]. Delfino, R.J., Quintana, P.J., Floro, J., Gastañaga, V.M., Samimi, B.S., Kleinman, M.T., Liu, L.S., Bufalino, C., Wu, C.F. and McLaren, C.E. (2004), "Association of FEV1 in Asthmatic Children with Personal and Microenvironmental Exposure to Airborne Particulate Matter", *Environmental Health Perspectives*, Vol. 112, Issue 8, p. 932.
- [23]. Boldo, E., Medina, S., Le Tertre, A., Hurley, F., Mücke, H. G., Ballester, F., and Aguilera, I. (2006), "Aphis: Health Impact Assessment of Long-term Exposure to PM2.5 in 23 European Cities", *European Journal of Epidemiology*, Vol. 21, Issue 6, pp. 449-458.
- [24]. Miller, K. A., Siscovick, D. S., Sheppard, L., Shepherd, K., Sullivan, J. H., Anderson, G. L. and Kaufman, J. D. (2007), "Long-term Exposure to Air Pollution and Incidence of Cardiovascular Events in Women", *New England Journal of Medicine*, Vol. 356, Issue 5, pp. 447-458.
- [25]. Kucera, V. and Fitz, S. (1995), "Direct and Indirect Air Pollution Effects on Materials including Cultural Monuments", *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 85, Issue 1, pp. 153-165.
- [26]. Tao, J., Ho, K. F., Chen, L., Zhu, L., Han, J. and Xu, Z. (2009), "Effect of Chemical Composition of PM2.5 on Visibility in Guangzhou, China, 2007 Spring", *Particuology*, Vol 7, Issue 1, pp. 68-75.
- [27]. Bansah, K. J., Dumakor-Dupey, N. K. and Assan, E. (2016), "Ambient Particulate Matter - A Review", 4th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference, pp. ES 44-54.
- [28]. Mohammed YS, Mokhtar AS, Bashir N, Abdullahi UU, Kaku SJ, Umar U. A synopsis on the effects of anthropogenic greenhouse gases emissions from power generation and energy consumption. *International Journal of Scientific and Research Publications*. ISSN 2250-3153,1- 7 [4]; 2012.
- [29]. Darkwah Williams Kweku<sup>1,2</sup>, Odum Bismark<sup>3</sup>, Addae Maxwell<sup>4</sup>, Koomson Ato Desmond<sup>2</sup>, Kwakye Benjamin Danso<sup>5</sup>, Ewurabena Asante Oti-Mensah<sup>4</sup>, Asenso Theophilus Quachie<sup>5</sup> and Buanya Beryl Adormaa<sup>4</sup> (2018) *Greenhouse Effect:*

- Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming Department of Environmental Engineering, College of Environment, Hohai University, Nanjing,
- [30]. Ducros M (1845). Observation d'une pluie acide. *J Pharma Chem* 3: 273-277.
- [31]. Smith RA (1852). On the air and rain of Manchester. *Mem Manch Lit Philos Soc Ser 1*: 207e217.
- [32]. Okochi H, Kameda H, Hasegawa SI, Saito N, Kubota K & Igawa M. (2000). Deterioration of concrete structures by acid deposition—an assessment of the role of rainwater on deterioration by laboratory and field exposure experiments using mortar specimens. *Atmos Environ* 34(18): 2937-2945.
- [33]. J.G.J. Olivier and J.A.H.W. Peters (2020) Trends in global co2 and total greenhouse gas emissions 2019, Report PBL Netherlands Environmental Assessment Agency
- [34]. Griscom BW, Adams J, Ellis PW, Houghton RA, Lomax G, Miteva DA, et al. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017 Oct 16;114(44):11645–50. Available from: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- [35]. Perugini L, Caporaso L, Marconi S, Cescatti A, Quesada B, de Noblet-Ducoudré N, et al. Biophysical effects on temperature and precipitation due to land cover change. *Environmental Research Letters*. 2017 May 1;12(5):53002. Available from: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b3f>
- [36]. IPCC 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland
- [37]. Rouse WR. The energy and water balance of high-latitude wetlands: controls and extrapolation. *Global Change Biology*. 2000 Dec;6(S1):59–68. Available from: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.06013>.
- [38]. Smith P, Haszeldine RS, Smith SM. Preliminary assessment of the potential for, and limitations to, terrestrial negative emission technologies in the UK. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2016;18(11):1400–5. Available from: <http://dx.doi.org/10.1039/C6EM00386A>
- [39]. Climeworks, <http://www.climeworks.com/our-technology/> (accessed 30 May 2018).
- [40]. Noel de Nevers, “Air Pollution Control Engineering,” Mc Graw Hill, Inc., New York (1995).
- [41]. H. T. Kim, K. W. Lee and M. R. Kuhlman, “Exploratory Design Modifications for Enhancing Cyclone Performance,” *Aerosol Science*, vol. 32, pp. 1135-1146, (2001).
- [42]. <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>
- [43]. Ραψομανίκης & Καστρινάκης, Ν. Ανδρίτσος: Έλεγχος Α.Σ. - Κυκλώνες
- [44]. EPA, Ν. Ανδρίτσος: Σακόφιλτρα
- [45]. Ν. Ανδρίτσος- Ηλεκτροστατικοί Κατακρημνιστές
- [46]. <https://sensorex.com/wet-scrubbers/odor-scrubber-diagram/>
- [47]. Matthew Wills (24 August 2015). "Old Smoke: London's Famous Fog". *JSTOR Daily*.
- [48]. Guenther, A.; T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P. I. Palmer and C. Geron (2006). «Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)». *Atmos. Chem. Phys.* 6 (11): 3181–3210. doi:10.5194/acp-6-3181-2006.
- [49]. A source of Haze, *ScienceNews*, August 6th, 2009

- [50]. Γεώργιος Σαρηγιάννης ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ Σημειώσεις για το μάθημα «Ειδικά θέματα περιβάλλοντος» Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχ. ΕΜΠ
- [51]. Απόστολος Βλυσίδης “ Βιομηχανική Ρύπανση“ εκδ.ΣΙΔΕΡΗΣ 2015
- [52]. <https://www.abcfoundation.org.au/carbon-farming/savanna-burning>
- [53]. Dan Lubin et al. Ultraviolet Flux Decrease Under a Grand Minimum from IUE Short-wavelength Observation of Solar Analogs, *The Astrophysical Journal* (2017). DOI: 10.3847/2041-8213/aaa124
- [54]. Laughner, J.L., et al. "Societal shifts due to COVID-19 reveal large-scale complexities and feedbacks between atmospheric chemistry and climate change." *PNAS*, 118, e2109481118, doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2109481118>, 2021
- [55]. Bounicore, Anthony J., and Wayne T. Davis, eds. 1992. *Air Pollution Engineering Manual*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- [56]. Shichang Kang et al.: A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103346>
- [57]. M. Zemp et al. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature* <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0> Published online 08 April 2019
- [58]. "SF6 Emission Reduction Partnership for Electric Power Systems" Environmental Protection Agency (2006)
- [59]. <https://www.weforum.org/agenda/2021/06/air-pollution-health-europe-urban/>
- [60]. «Human Development Report 2020». United Nations Development Programme. 2019.
- [61]. <https://www.eea.europa.eu/themes/industry/industrial-pollution/2020-industrial-pollution-country-profiles>
- [62]. <https://www.eea.europa.eu/themes/air/country-fact-sheets/2021-country-fact-sheets>
- [63]. Federico Karagulian, Claudio A. Belis et al. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level.
- [64]. European Court of Auditors Special report “Air pollution: Our health still insufficiently protected (23/2018)”
- [65]. Sanchez Gacita, Madeleine, Turtos Carbonell, Leonor, & Rivero Oliva, Jose de Jesus (2005). Depletion velocities for atmospheric pollutants oriented To improve the simplified regional dispersion modelling. *Nucleus (Havana)*, (38), 39-44.
- [66]. McLean et al. 2019 "Country-level analysis of household fuel transitions" DOI:10.1016/j.worlddev.2018.10.006
- [67]. Diane Bailey Gina Solomon Pollution prevention at ports: clearing the air <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.06.005>