

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήματα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής
Ανάπτυξης (ΤΜΧΠΠΑ)
ΔΠΜΣ-Βιώσιμη Διαχείριση Περιβαλλοντικών Αλλαγών και Κυκλική
Οικονομία (ΒΙΒΠΑΚΟ)



Μικρόπλαστικά σε εδάφη και φυτά. Μελέτη επίδρασης της κλιματικής κρισης.

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: **Γκόλια Ευαγγελία**

Ονοματεπώνυμο φοιτήτριας: **Τζήτζηρα Ειρήνη**

ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2025

Περιεχόμενα εργασίας

Περίληψη

Σκοπός

Εργαλεία και Μέθοδοι της Πτυχιακής Εργασίας

1. Εισαγωγή στο Θέμα
2. Ιστορική Εξέλιξη του Πλαστικού και τα Ζητήματα με την Εισαγωγή του στο Περιβάλλον
3. Πλαστικά και Μικροπλαστικά: Τα Πολυμερή Σωματίδια στον Πλανήτη μας
4. Ποσότητες πλαστικών και μικροπλαστικών ανα περιοχές του πλανήτη
5. Τι Είναι τα Μικρο-Νανο-Μακρο Πλαστικά ;
 - 5.1. Κατηγορίες Μικροπλαστικών
 - 5.2. Τα μικροπλαστικά ως Παράγοντας Ρύπανσης
 - 5.3. Οι Ιδιότητες των Μικροαστικών και οι Επιρροές τους ως προς τα Εδαφικό Οικοσύστημα
6. Οι Πηγές των Μικροπλαστικών: Γενικό Πλαίσιο
 - 6.1. Εισαγωγή στην Ατμόσφαιρα
 - 6.2. Εισαγωγή στο Υδάτινο Περιβάλλον
 - 6.3. Εισαγωγή στο χερσαίο περιβάλλον
 - 6.3.1. Πηγές Μικροπλαστικών στο Έδαφος: Γενικό πλαίσιο
 - 6.4. Πηγές Πλαστικών στα Αγροτικά εδάφη
 - 6.4.1. Βελτιώσεις εδάφους (κομποστοποίηση & ιλύς αποβλήτων)
 - 6.4.2. Κομποστοποίηση
 - 6.4.3. Λυματολάσπη (ιλύς αποβλήτων)
 - 6.4.4. Πλαστικά καλύμματα εδάφους (Plastic mulching)
 - 6.4.5. Άρδευση και πλημμύρες
 - 6.5. Η Επιρροή των Απορριμμάτων
 - 6.6. Παρουσία και Πηγές Μικροπλαστικών στο Έδαφος: Επισκόπηση Ανθρωπογενών Επιρροών
7. Διάσπαση και Αποικοδόμηση των Μικροπλαστικών στο Φυσικό Περιβάλλον
 - 7.1. Η Διάσπαση και Αποικοδόμηση στο Έδαφος
 - 7.2. Μεταφορά κατά Μήκος της Τροφικής Αλυσίδας
 - 7.3. Η Απελευθέρωση στην Ατμόσφαιρα και η Σύνδεση με τη Κλιματική Αλλαγή
8. Επιπτώσεις των ΜΠ και της κλιματικής αλλαγής στα εδάφη και φυτά
 - 8.1. Τα μικροπλαστικά και οι επιπτώσεις για τα αστικά, αγροτικά και δασικά εδάφη
 - 8.2. Τα Μικροπλαστικά και οι Επιστρώσεις στη Βλάστηση
 - 8.3. Τα Μικροπλαστικά και οι Επιπτώσεις στους Μικροοργανισμούς
 - 8.4. Τα Μικροπλαστικά και οι Επιδράσεις στις Εκπομπές των Ρύπων του Φαινομένου του Θερμοκηπίου
9. Κλιματική Αλλαγή: Παρούσα Κατάσταση και Συνέπειες που Επέρχονται
 - 9.1. Η Απειλή των ΜΠ και η Σύνδεση με τις Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου
10. Τα Αποτελέσματα, οι Λύσεις και Προτάσεις της Μετα Ανάλυσης
11. Συμπεράσματα

Βιβλιογραφία

Περίληψη

Τα μικροπλαστικά είναι υλικά βασισμένα στα πολυμερή, ως επί το πλείστον η σύστασή τους οφείλεται στον άνθρακα, επιφέρει αρνητικές συνέπειες σε κάθε είδους οικοσύστημα. Στην μετα ανάλυση θα γίνει επεξήγηση εννοιών και τη σημασίας των μικροπλαστικών. Αποτελώντας έναν αναδυόμενο ρύπο με πολυσύνθετες προεκτάσεις στα οικοσυστήματα και τους οργανισμούς. Στην εργασία εστιάζουμε στην παρουσία των μικροπλαστικών σε συνδυασμό με τις συγκεντρώσεις στοιχείων που θα μας επιτρέψουν να αντιληφθούμε τη διάσταση της ρύπανσης που επιφέρουν, σε συνδυασμό με τις διαφοροποιήσεις που υπάρχουν στα εδάφη, με κατά κύριο λόγο οι περιπτώσεις να αποτελούν: Τα αγροτικά, τα αστικά και τα δασικά εδάφη και μια αναφορά στην πλήθος των ευρημάτων άλλων περιοχών, με σκοπό την διερεύνηση των συνεπειών των μικροπλαστικών. Όμως οι προεκτάσεις είναι γνωστό πως επεκτείνονται και τους έμβιους παράγοντες, δηλαδή τη βλάστηση. Σαφώς θα γίνει αναφορά και στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος και τις αντιδράσεις των μικροοργανισμών που περιβάλλονται σε αυτό. Τέλος θα βρούμε την αλληλοσύνδεση της πλαστικής ρύπανσης με την κλιματική αλλαγή, διότι η συμβολή της κατά κύριο λόγο είναι οι αύξηση των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου. Έπειτα θα αναλυθούν οι προτάσεις και λύσεις που είναι δυνατόν να μειώσουν την πλαστική ρύπανση.

Σκοπός

Ο σκοπός της μετα ανάλυσης οφείλεται στην αξιοποίηση των πολυάριθμων πηγών και δημοσιεύσεων που στόχευσαν στην διερεύνηση των εδαφικών οικοσυστημάτων αλλά και της βλάστησης υπό την επίδραση της πλαστικής ρύπανσης. Η ύπαρξη των ελάχιστων δημοσιεύσεων επι του θέματος προκαλεί το ενδιαφέρον ως προς την απασχόληση του. Παράλληλα η σύνδεση μεταξύ μικροπλαστικών σωματιδίων με την υπερθέρμανση του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή, είναι ζητήματα που μελετήθηκαν ξεχωριστά. Ελάχιστες είναι η έρευνες που προσεγγίζουν το θέμα συνολικά. Για αυτό το λόγο υπάρχουν αρκετές προοπτικές εξαιτίας της πολυσύνθετης πλευράς του ως προς τη διερεύνηση του. Αυτό ήταν λοιπόν το έναυσμα ώστε να το προσεγγίσουμε ουσιαστικά, καθώς πολλά ερωτήματα και προβληματισμοί έχουν δημιουργηθεί το τελευταίο χρονικό διάστημα. Η σχέση: μικροπλαστικά σωματίδια – έδαφος – βλάστηση – κλιματική αλλαγή, με τις αλυσιδωτές αντιδράσεις να πυροδοτούνται από τα πλαστικά σωματίδια ήταν το επίκεντρο της μελέτης και ερευνάς, στην παρούσα μετα ανάλυση θα παρουσιαστούν οι συνολικές συνέπειες που παρατηρήθηκαν.

Εργαλεία και Μέθοδοι της Πτυχιακής Εργασίας

Τα πρώτα βήματα της μετα ανάλυσης είχαν ως στόχο την εύρεση πλήθους δημοσιεύσεων, οι πολυάριθμες έρευνες και εργασίες ταξινομήθηκαν ανά κατηγορία: εδάφη και μικροπλαστικά, φυτά και μικροαστικά, κλιματική αλλαγή και μικροπλαστικά, στο σύνολο αυτό περιλαμβανότανε τόσο πληροφορίες και έννοιες, όσο και πειράματα και διαπιστώσεις από τις εκάστοτε μελέτες. Οι πηγές μας συγκεντρωθήκαν από βάσεις περιοδικά και βάσεις δεδομένων όπως το ScienceDirect, Google Scholar, SpringerLink, Nature (<https://www.nature.com>), Science (<https://www.science.org>), Environmental Research (Elsevier). Με τις λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν να είναι microplastics, microplastics in soils, microplastics on plants, microplastics and plants Europe, microplastics in urban soils, microplastics in forest soils, microplastics and plants Mediterranean, response of plants microplastics on soil, soil carbon loss with warming, global warming and climate change καθώς και αντίστοιχες λέξεις κλειδιά με τις χώρες έτσι ώστε να βρεθούν περισσότερα αποτελέσματα. Έπειτα ακολουθήσε κατηγοριοποίηση των στοιχείων που βρέθηκαν στο Microsoft office excel, με τις ποσότητες των πλαστικών σωματιδίων, τα μεγέθη, τις μορφές, τους τύπους των πολυμερών, τα είδη εδαφών, τις επιδράσεις – επιπτώσεις, τα είδη των φυτών και τις αυξήσεως των εκπομπών ρύπων του θερμοκηπίου που προκαλούνται από τα μικροπλαστικά σωματίδια. Μετα δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα που θα αποκαλυφθούν στο κεφάλαιο με τις επιπτώσεις των ΜΠ και της κλιματικής αλλαγής στα εδάφη και φυτά. Με το τέλος της εργασίας να προτείνονται τρόποι λύσεις για την αντιμετώπιση του, καθώς κατά τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας μας.

1. Εισαγωγή στο Θέμα

Η μελέτη για την ύπαρξη των μικροπλαστικών στα χερσαία οικοσυστήματα είναι χρονικά αρκετά πρόσφατη, καθώς τα μικροαστικά σε υδάτινα περιβάλλοντα έχουν ερευνηθεί αρκετά για τις επιπτώσεις που προκαλούν τόσο στα ιδιά, όσο και στη βιοκοινότητα τους. Οι γνώσεις είναι αρκετά ανομοιογενής σχετικά με τα εδαφικά οικοσυστήματα και ακόμα διευρύνονται, με την προσπάθεια που καταβάλλεται να διαφέρει από χωρά σε χωρά. Όπως παρατηρήθηκε υπάρχει αρκετό υλικό του θέματος στην Κίνα, αρκετή πρόοδος στην Ευρώπη και λιγότερες πληροφορίες στην Αμερική (Kedzierski et al., 2023). Ο τομέας αυτός βρίσκεται σε ένα ανερχόμενο στάδιο, με τις έρευνες να εστιάζουν στα αγροτικά και αστικά εδάφη, και λιγότερο στα δασικά ή αλλά εδάφη με τις πληροφορίες μας να είναι κάπως ελλιπής σε κάποια σημεία (Beriot et al., 2021; Haixin et al., 2022; Liu et al., 2018; Tagg et al., 2022).

Η αυξανόμενη παραγωγή πλαστικών που οδηγεί στην δημιουργία ρυπαντών του περιβάλλοντος, με αυξημένο ενδιαφέρον διερεύνησης να στρέφεται στα μικροπλαστικά και στις αρνητικές συνέπειες ως προς τα εδάφη και τους οργανισμούς γίνεται όλο και πιο επίκαιρο και μείζον θέμα. Η βιοποικιλότητα του εδάφους και τα εδάφη που εκτείνουν μια μεγάλη κλίματα από αλληλεπιδράσεις και συνιστώσες που είναι μεταβαλλόμενες σε σύνδεση με τους αβιοτικούς παράγοντες, δημιουργούν πολλά ερωτηματικά ως προς τις επιπτώσεις που προκαλούνται (Corradini et al., 2021).

Έτσι τα τελευταία χρονιά η επιστημονική κοινότητα έχει αναγνωρίσει την πλαστική ρύπανση ως μια από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές απειλές (Isobe et al., 2019). Παράλληλα μια ακόμα απειλή για τον πλανήτη μας είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής, είναι πεδία που έχουν ερευνηθεί σε μεγάλο βαθμό όσο αφορά τις συνέπειες και προεκτάσεις, καθώς και τις εκτιμήσεις σε μελλοντικό βαθμό. Με τα εμφανή αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής να γίνονται όλο και πιο εμφανή, όπως είναι οι συχνές και έντονες καιρικές συνθήκες, η υπερθέρμανση του πλανήτη, η τήξη των πάγων, η αύξηση της στάθμης του νερού, η αύξηση της χρήσης καυσίμων υλών με την απελευθέρωση των αέριων ρύπων αποτελούν από τις λίγες συνέπειες που συναντάμε. Σε μεγάλο βαθμό γνωρίζουμε τους παράγοντες που συμβάλουν αλλά έχει προστεθεί και ένας ακόμα, με την εξόρυξη των ορυκτών καυσίμων, τη μεταφοράς τους, την συμβολή στην δημιουργία και παραγωγή των πολυμερών, σαφώς και όλης της διάρκειας ζωής των πλαστικών δημιουργούνται εκπομπές ρύπων του φαινομένου του θερμοκηπίου (Ford et al., 2022; Kakar et al., 2023).

Με την γιγάντια αύξηση της παραγωγής των πλαστικών μετέπειτα της μεταβιομηχανικής εποχής μέχρι σήμερα, τα πλαστικά μικροσωματίδια έχουν κάνει πανταχού παρούσα την εμφάνισή τους σε όλα τα σύνολα των οικοσυστημάτων, ακόμα και σε απομακρυσμένα και δυσπρόσιτα μέρη (Helcoski et al., 2020). Στα χερσαία περιβάλλοντα τα μικροπλαστικά παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες αντιδράσεις τόσο στη δομή και λειτουργία του εδάφους, όσο στην ανάπτυξη της βλάστησης. Με το που εισέλθουν στο έδαφος έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα προκαλούνται φυσικοχημικές αλλοιώσεις και κα επέκταση ποικίλες επιδράσεις στους οργανισμούς που εξαρτώνται από το εδαφικό οικοσύστημα και τις λειτουργίες του, με επιδράσεις τόσο στην ανάπτυξη των φυτών, όσο και τη λειτουργία των μικροβιακών κοινοτήτων. Το σύνολο των επιδράσεων μπορεί να έχει μακροχρόνιες συνέπειες, δηλαδή όσο και η διάρκεια ζωής των πλαστικών που μπορεί να διαρκέσει έως και εκατοντάδες χρονιά ή διαφορετικά πάρα μόνο με την απομάκρυνση τους από το

εκάστοτε οικοσύστημα και μεταφοράς του σε άλλο με την συνέχεια των επιδράσεων εκεί (Khalid et al., 2020)(Qi et al., 2020).

2. Ιστορική Εξέλιξη του Πλαστικού και τα Ζητήματα με την Εισαγωγή του στο Περιβάλλον

Ιστορικά το πρώτο συνθετικό που δημιουργήθηκε ήταν στις αρχές του 20ου αιώνα, ονομάστηκε μπακελίτης με τη χρήση του να μην ήταν ιδιαίτερα ευρεία πάρα μόνο στον στρατό, αυτό συνέβαινε μέχρι τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο με τη παραγωγή τους να αυξάνεται σταθερά (Geyer et al., 2017).

Λίγα χρόνια πριν δηλαδή τη δεκαετία του 1930 με συνέχεια το 1940 αποτέλεσε η έναρξη της εμπορικής παραγωγής του, η αρχή της παραγωγής των συνθετικών πολυμερών αυξήθηκε με ταχείς ρυθμούς με την χρήση του να επεκτείνεται και σε άλλους τομείς. Η παγκόσμια παραγωγή πλαστικού μετράει ήδη 1,5 εκατομμύρια τόνους τη δεκαετία του 1950 (Shen et al., 2020). Με την τεράστια αύξηση του ποσοστού 728% από το 1976 μέχρι το 2023 (PlasticsEurope, 2024). Με την τεράστια ζήτηση που υπάρχει για το υλικό αυτό και βάση της ταχύτητας παραγωγής, είναι αναμενόμενο η παραγωγή του να τετραπλασιαστεί μέχρι το 2050 (Suaria et al., 2016).

Τα πλαστικά έχουν γίνει αναντικατάστατα υλικά στην ζωή μας με ευρεία χρήση σε παγκόσμιο επίπεδο, λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν μερικά από τα οποία είναι: το χαμηλό τους βάρος, η αντοχή και ανθεκτικότητα, η ευχρηστία, η ποικιλία των προϊόντων που μπορούν να παραχθούν από αυτά, επίσης εργονομίας τους και σαφώς το οικονομικό τους κόστος είναι ελάχιστο (Geyer et al., 2017; Thompson et al., 2004).

Το πλαστικό αποτελεί ένα συνθετικό υλικό και απαρτίζεται από άτομα άνθρακα και υδρογόνου, τα στοιχεία βρίσκονται σε αλυσίδες - μεγάλες ενώσεις, οι οποίες ονομάζονται πολυμερή. Το μήκος των περιπλεγμένων αλυσίδων που σχηματίζονται, καθορίζει την χημική σύνθεση των πλαστικών (Rafique et al., 2020).

Το πλαστικό αποτελείται από συνθετικά οργανικά πολυμερή, τα οποία συνδέονται με δεσμούς C-C και C-H, κατά κύριο λόγο οι πρωταρχικές του ύλες είναι ορυκτά καύσιμα, δηλαδή άνθρακα, πετρέλαιο ή και φυσικό αέριο. Έτσι απελευθερώνονται σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα στην διάρκεια της αποικοδόμησης του (Ahmed et al. 2018).

Η κατασκευή τους περιλαμβάνει ποικίλες μονομερείς ενώσεις και προσθετά στοιχεία που αναμειγνύονται μέσω προσθετικών και συμπυκνωτικών υλικών και αντιδράσεων (Bucknall, 2020). Τα πιο γνωστά δηλαδή αυτά που συναντάμε ως συνήθως είναι: Το πολυστυρένιο, το πολυαιθυλενοτερεφθαλικό, το πολυτετραφθοροαιθυλένιο, ο πολυεστέρας (Rochman et al. 2013; Wang et al. 2021).

Η παραγωγή σε μεγάλη κλίμακα έχει γιγαντωθεί, διότι πλέον το πλαστικό λειτουργεί ως αντικαταστάτης άλλων υλικών, δηλαδή το γυαλί, το ξύλο και το σίδηρο, με πολλές βιομηχανίες και προϊόντα να παράγονται αποκλειστικά από αυτό εξαιτίας των πλεονεκτημάτων του. Κάτι που δεν υπολογιζόταν παλαιότερα είναι πως τα πλαστικά έχουν συσσωρευτεί και όλο και περισσότερο θα συσσωρεύονται στο φυσικό περιβάλλον, αν ακολουθήσουμε αυτούς τους ρυθμούς παραγωγής. Αυτό συνέβη λόγω των μη κατάλληλων μεθόδων διαχείρισης των αποβλήτων, περιορισμένης ανακύκλωσης και δυσκολία στην

αποικοδόμηση τους. Με τη χρονική φθορά ή απλά τη φθορά της χρήσης που δέχονται είναι πολύ πιθανό μετρά τη παραμονή τους στο περιβάλλον να οδηγήσει στη δημιουργία σωματιδίων, τα δευτερογενή μικροπλαστικά με το μικρό μέγεθος τους να διευκολύνει στην είσοδό τους σε διάφορα περιβάλλοντα (Monikh et al., 2022).

Κατά τη διάρκεια κατασκευής των πλαστικών γίνεται προσθήκη διάφορων προσθέτων ουσιών και ενώσεων με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητάς τους και της απόδοσης τους, κάτι που συντελεί στην δημιουργία δυνητικών οργανικών ρύπων, οι οποίοι μπορεί να είναι τοξικές χημικές ουσίες ή και βαρέα μέταλλα σε υψηλές συγκεντρώσεις (Hahladakis et al., 2018). Συχνά γινείτε προσθήκη από πλαστικοποιητές, αντιοξειδωτικά, φλογοστερεωτικά και βαρέα μέταλλα, τα οποία δεν συνδέονται χημικά με το πολυμερές και συνεπώς να αποδεσμευτούν κατά την αποδόμηση και σταδιακή φθορά του πολυμερούς πλαστικών (Hermabessiere et al., 2017). Συνεπώς πυροδοτούν την σοβαρότητα της ρύπανσης καθώς με τη διάσπαση τους στο περιβάλλον αποτελούν μεγαλύτερο κίνδυνο, με αρνητικές συνέπειες για τα διαχειριζόμενα και φυσικά οικοσυστήματα (Alimba και Faggio, 2019)

Σε βάθος χρόνου αν ανατρέξουμε θα παρατηρήσουμε πως υπάρχει σύνδεση μεταξύ επιβλαβών επιδράσεων στους έμβιους οργανισμούς και προσθέτων στοιχείων στα πολυμερή. Παραδείγματος χάρη η βιοσυσσώρευση από τα φλογοαναστολέα PBDE και τα διφαινόλια σχετιστήκαν με διαταραχές του ενδοκρινολογικού συστήματος, κάτι που οδήγησε στο νομοθετικό πλαίσιο του περιορισμού της παραγωγής αλλά και της χρήσης τους το 1990, με το πλαίσιο αυτό να ισχύει μέχρι το 2010 περίπου (Ευρωπαϊκή Ένωση, 2011; Oakdene Hollins, 2010).

Σε πιο πρόσφατα γεγονότα υπήρξε ανησυχία για τους πλαστικοποιητές φαλλικού εξαιτίας του ενδεχομένου της διαταραχής του ενδοκρινολογικού συστήματος των οργανισμών. Τα μετρά που λήφθηκαν οδήγησαν στον περιορισμό χρήσης ορισμένων από αυτών τα οποία προερχόταν από την Ευρωπαϊκή ένωση. Πρόσφατα, δόθηκε μεγαλύτερη προσοχή στους πλαστικοποιητές φαλλικού, λόγω της υποψίας ότι διαταράσσουν το ενδοκρινικό σύστημα (ECHA, 2018; ECHA, 2022). Οι φαλλικές ενώσεις που εμπεριέχονται στους πλαστικοποιητές έχουν ανιχνευτεί σε υδάτινα περιβάλλοντα με τη παρουσία του να βρίσκεται πολύ συχνά και να χαρακτηρίζεται ως ρύπος (Gao και Wen, 2016; Hermabessiere et al., 2017), όμως στα χερσαία περιβάλλοντα οι έρευνες που το αποδεικνύουν είναι περιορισμένες (Billings et al., 2021).

Συγκεκριμένα η παρουσία τους στα εδαφικά οικοσυστήματα έχει συνδεθεί με ορισμένες πηγές, δηλαδή μπορεί να προέρχεται από τον αγροτικό τομέα και τις πρακτικές τους, όπως αποτελεί η εφαρμογή ιλύς στις καλλιέργειες ή ακόμα από την καύση και επεξεργασία αποβλήτων. Αν και ο ρόλος του ανάλογα με τις συγκεντρώσεις δεν έχει προσδιοριστεί επακριβώς (Zeng et al., 2020; Chakraborty et al., 2019; Billings et al., 2023). Οι υποψίες των κινδύνων που θα επέφερε δημιουργήσαν κατάλληλες δράσεις πέρα από το περιορισμό, στην αντικατάσταση με τους μη φθαλικούς πλαστικοποιητές τα τελευταία 15 χρόνια (CEFIC, 2018). Σε αντικατάσταση αυτών προτιμώνται πλέον: οι τριμελλατιτάτες, οι κιτρικές και οι αδιπάτες. Ωστόσο οι γνώσεις για τις επιδράσεις και την πορεία τους στο περιβάλλον δεν είναι τόσο επαρκής, διότι έχουν ερευνηθεί λιγότερο σε σχέση με τους φθαλικούς πλαστικοποιητές μέχρι σήμερα. Στις μελέτες που έχουν πραγματοποιεί μέχρι τώρα η παρουσία τους βρίσκεται σε διάφορα στοιχεία του περιβάλλοντος, όπως ο αέρας, η οικιακή και βιομηχανική σκόνη, καθώς και τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα (Fromme et al., 2016; Lee et al., 2019).

Σε διαφορετική κατηγορία μπορούμε να αναφέρουμε αυτά που συμβάλουν στην δημιουργία εγχρώμων πλαστικών όπως είναι διάφορες χρωστικές προσθήκες, παραδείγματος χάρη διοξείδιο του τιτανίου, οξείδιο του σιδήρου. Κατά τη διάρκεια των ετών εμφανίζεται σταδιακή απελευθέρωση τους από τα πλαστικά και η πορεία τους συνεχίζει στο νερό, στα ιζήματα ή και στους μικροοργανισμούς (Lithner et al., 2009; Ng et al., 2018).

Δεδομένου της αυξημένης χρήσης των φθαλικών πλαστικοποιητών αλλά και χρωστικών, με την έντονη χρήση των πλαστικών προϊόντων και παραγώγων του, είναι αρκετά πιθανό σενάριο ότι αυτοί οι χημικοί παράγοντες θα είναι σε μεγάλο βαθμό παρόντες στο μέλλον. Αν και όπως αποδεικνύεται από μελέτες τα συστήματα που αναγνωρίζονται ως κυρίαρχη ροή εισόδου τέτοιων προϊόντων αποτελεί τα χερσαία οικοσυστήματα του πλανήτη μας (Horton et al., 2017).

Αν και οι λόγοι της παρουσίας των μικροπλαστικών είναι πολυάριθμοι και αρκετές φορές αλληλένδετοι τα πλαστικά αυξάνονται μέρα με τη μέρα με διαφοροποιήσεις στις χώρες που βρίσκονται ακόμα και στις περιοχές. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό στη βιομηχανία της συσκευασίας, η χρήση του πλαστικού αν και είναι αυξημένη, έγινε προσπάθεια τόσο των βιομηχανιών, όσο και του κόσμου να στραφεί στα ανακυκλώσιμα πλαστικά και στα πλαστικά μια χρήσης. Βέβαια αυτό αν αποτέλεσε ένα σημαντικό τρόπο διαχείρισης, τελικά αρκετή από τη ποσότητα των ανακυκλωμένων κατέληξαν στα αστικά στερεά λύματα. Αποτελώντας ακόμα και έτσι έναν τρόπο εισροής τους στο περιβάλλον (Law και Thompson, 2014; Wang et al., 2021).

Επιπροσθέτως οι μεγάλες ποσότητες των πλαστικών ενδέχεται να καούν ή να μεταφερθούν σε χώρους υγειονομικής ταφής, σε περίπτωση που δεν είναι ανακυκλώσιμες. Διαφορετικά, λόγω υπερπλήρωσης των χωματερών ή λόγω ατυχημάτων και απωλειών κατά τη μεταφορά ή απλά εγκατάλειψής τους να καταλήξουν στο χερσαίο ή στο υδάτινο περιβάλλον (Acquah et al., 2021). Αλλά και πάλι όσο και να εφαρμοστούν αυτοί οι τρόποι διαχείρισης κάποια από αυτά καταλήγουν στο περιβάλλον. Δημιουργώντας με αυτό το τρόπο έναν αναδυόμενο και σχεδόν μόνιμο παράγοντα ρύπανσης, με τα μικροπλαστικά να απασχολούν ως προς τις επιπτώσεις τους στα διαφορά οικοσυστήματα, αποτελώντας έτσι ζήτημα παγκόσμιας περιβαλλοντικής ανησυχίας (Galloway και Lewis, 2016; Law και Thompson, 2014; Wilcox et al., 2015).

Σαφώς οι πηγές των μικροαστικών θα αναφερθούν εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο, όμως για μια καλύτερη εικόνα θα μπορούμε να αναφέρουμε μερικές ενδεικτικά. Σε προηγούμενο σημείο έγινε αναφορά της εισροής στο περιβάλλον από λύματα, έτσι τα βιομηχανικά και τα αστικά λύματα αποτελούν ένα από αυτές, επίσης οι ίνες από τα υφάσματα τα οποία μπορεί να καταλήξουν στα απορρίμματα, τα βιολύματα και τα διαφορά απορρίμματα που καταλήγουν στους χώρους υγειονομικής ταφής από τα αστικά ή βιομηχανικά κέντρα (Carr et al., 2016; Zubris & Richards, 2005). Ακόμα η σταδιακή αποδόμηση τους των κοινών καθημερινών προϊόντων, όπως σακούλες ή μπουκάλια, και πλαστικά που απελευθερώνονται από την φθορά των ελαστικών ή το πλύσιμο ρούχων, οδηγούν στην είσοδο μικρών σωματιδίων στο περιβάλλον (Scalenghe, 2018; Qiu et al., 2020).

Επιπλέον η εντατικοποίηση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων έχει αυξηθεί σε μεγάλο ποσοστό εξίσου, ειδικά οι βιομηχανικές και γεωργικές δραστηριότητες συμβάλουν στην πλαστική ρύπανση. Με αλληλεσύνδεση με άλλους παράγοντες ρύπανσης όπως τα βαρέα

μέταλλα. Έτσι η ρύπανση γίνεται ακόμα και πιο συνθέτη ως προς τους τρόπους λύσεις της, λαμβάνοντας έτσι περισσότερο προσοχή με σκοπό τη διερεύνηση τους (Yang et al., 2019).

Η παρουσία των μικροπλαστικών είναι πανταχού παρόντα συμμετέχοντας παράλληλα και οι αβιοτικοί και οι βιοτικοί παράγοντες, δηλαδή μπορεί να βρεθούν στην επιφάνεια των φύλλων δέντρων καθώς είχαν μεταφερθεί μέσω του ανέμου, να καταλήξουν στα ποταμιά από τα κατακρημνίσματα, να βρεθούν σε προφίλ εδάφους λόγω πλαστικών κάλυψης εδάφους, να ακολουθήσουν τους κύκλους υγρασίας και ξηρασίας μέσω της μεταφοράς τους στα υπόγεια ύδατα. Κατανοούμε λοιπόν με αυτές τις ενδεικτικές περιπτώσεις πως αποτελεί ένα πολυσύνθετο παράγοντα ρύπανσης. Με επιβεβαιωμένα στοιχεία μελετών πλέον να αναγνωρίζονται τα εδαφικά οικοσυστήματα και ακόμα περισσότερο τα αγροτικά πως αποτελούν τις βασικές πηγες, διότι οι συγκεντρώσεις που συναντιούνται είναι υψηλότερες σε σχέση με αλλού είδους περιβάλλοντα (De Souza Machado et al., 2018; Woodward et al., 2021; Lian et al., 2022).

Το σίγουρο αποτέλεσμα είναι πως τα πλαστικά βλάπτουν τα χερσαία και τα θαλασσιά οικοσυστήματα στον πλανήτη μας, ειδικά τα μη βιοδιασπώμενα τα οποία μπορούν να παραμείνουν για αρκετές γενιές στο περιβάλλον (Thompson, 2015). Αν και η πλειονότητα των μελετών επικεντρώθηκε τα προηγούμενα χρόνια στις επιπτώσεις και στην διάδοση των ΜΠ στα υδάτινα οικοσυστήματα (Horton et al., 2017; Maity και Pramanick, 2020). Τα σωματίδια εκτελούν φυσιολογικές βλάβες με επιπτώσεις στην υγεία αλλά και τον μεταβολισμό την οργανισμών της πανίδας και σαγής επιπτώσεις συναντιούνται και στην χλωρίδα (Huang et al. 2023; Smith et al. 2018).

Οι γνώσεις της ποσότητας που εισέρχονται στα εδάφη δεν είναι πλήρως γνωστές καθώς οι μελέτες που πραγματοποιούνται για τα εδάφη πραγματοποιούνται τη τελευταία δεκαετία περίπου, δε πρόσφατη μετα ανάλυση των Rillig και Lehmann (2020), έπειτα από τη συγκέντρωση των στοιχείων συμπεραίνουν ότι περίπου το 32% των πλαστικών απορριμμάτων διεισδύει στο έδαφος. Με τις γεωργικές και αστικές περιοχές να χαρακτηρίζονται ως περιοχές έντονης περιβαλλοντικής ρύπανσης. Σε πιο πρόσφατη ερευνητική ανασκόπηση αναφέρεται πως το 80% της ποσότητας των πλαστικών που υπάρχει στο υδάτινο περιβάλλον οφείλεται στις πηγες από τα εδαφικά οικοσυστήματα (Rochman, 2018; Järlskog et al., 2024).

Το φορτίο ή διαφορετικά θα λέγαμε τη δεξαμενή των μικροαστικών που βρίσκεται στο έδαφος συνεχίζει να συσσωρεύει και να αυξάνει τις ποσότητες τους, καθώς είναι φανερό ότι η παραγωγή και η απόρριψη με κάθε τρόπο συμβαδίζουν στα ίδια επίπεδα. Δυσκολεύοντας με αυτό το τρόπο τον επαρκή και κατάλληλο έλεγχο των προσθηκών στο οποιοδήποτε είδος περιβάλλοντος (Costa et al., 2020). Ακόμα και σήμερα δεν έχουν βρεθεί επαρκής λύσεις τόσο της αποκατάστασης των περιβαλλόντων που δέχονται τις μεγαλύτερες πιέσεις ρύπανσης ή μέθοδοι όσο το δυνατόν εξάλειψης των μικροαστικών (Canopoli et al., 2020; Ali et al., 2021).

Ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ανησυχία από την ερευνητική και την πολιτική κοινότητα για τη διάσταση που μπορεί να λάβει η πλαστική ρύπανση. Παρά ταύτα, υπάρχει εάν αρκετά σημαντικό φαινόμενο που επηρεάζεται από την ύπαρξη των μικροπλαστικών στο περιβάλλον και αυτό δεν είναι άλλο από την υπερθέρμανση του πλανήτη μας και την κλιματική αλλαγή. Οι συνέχεις εκπομπές των αέριων του θερμοκηπίου αποτελούν βασικό ζήτημα ενασχόλησης της επιστημονικής κοινότητας, όμως δεν υπάρχουν επαρκείς αναφορές στην σχέση με τα μικροπλαστικά και την πιθανή αλληλεξάρτηση τους σε

περίπτωση που υπάρχει. Η κλιματική αλλαγής και η πλαστική ρύπανση βάζουν σε κίνδυνο το περιβάλλον και τον άνθρωπο, σε περίπτωση του συνδυασμού και των δυο με μακροπρόθεσμες εκτιμήσεις θα επιφέρει καταστροφικές συνέπειες (Parvez et al., 2023)

Ο αριθμός των ερευνών με πιο επίκαιρα δεδομένα επιώ του θέματος εστιάζουν στην αδιαμφισβήτητη πλέον συμβολή των πλαστικών στους ρύπους του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής (Li et al. 2022c). Με την ταχεία συγκέντρωση των ΜΠ στο πλανήτη μας αυτά τα χρονιά ήταν αναμμένο πως κάποια στιγμή θα μεταβαλλόταν έστω και σταδιακά η δομή και οι λειτουργίες των οικοσυστημάτων, κάποιων λιγότερο κάποιων περισσότερο. Παράλληλα διαταράσσοντας τις λειτουργίες και τις υπηρεσίες των οικοσυστημάτων, με ενδεχόμενο την αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου, καθώς και της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας (Zhou et al., 2023).

Με την πανταχού παρουσία της ρύπανσης από τα μικροπλαστικά είναι πλέον σημαντική απειλή για την εύρυθμη λειτουργία των οικοσυστημάτων σε πολλαπλά επίπεδα. Με τις μελέτες για τις πηγές δηλαδή την εισροή στο εκάστοτε περιβάλλον και την πορεία του σε αυτό, μέχρι την αποδόμηση του, να παρέχουν τις βάσεις ως προς το θεωρητικό σκέλος της αντιμετώπισης της πλαστικής ρύπανσης. Θεωρείται μια καλή αφορμή για περαιτέρω δοκιμές στο πρακτικό επίπεδο της ουσιαστικής αντιμετώπισης του θέματος. Παράλληλα αλλά ζητήματα που είναι αναγκαίο να διερευνηθούν είναι το οικοτοξικολογικό πρόβλημα και οι επιπτώσεις που επιφέρει, όπως και σαφώς την ενδεχομένη αλληλοσυνδέσει με την κλιματική αλλαγής και τις επακόλουθες συνέπειες τους (Huang et al., 2020; Xiao et al., 2021; Greenfield et al., 2022).

3. Πλαστικά και Μικροπλαστικά: Τα Πολυμερή Σωματίδια στον Πλανήτη μας

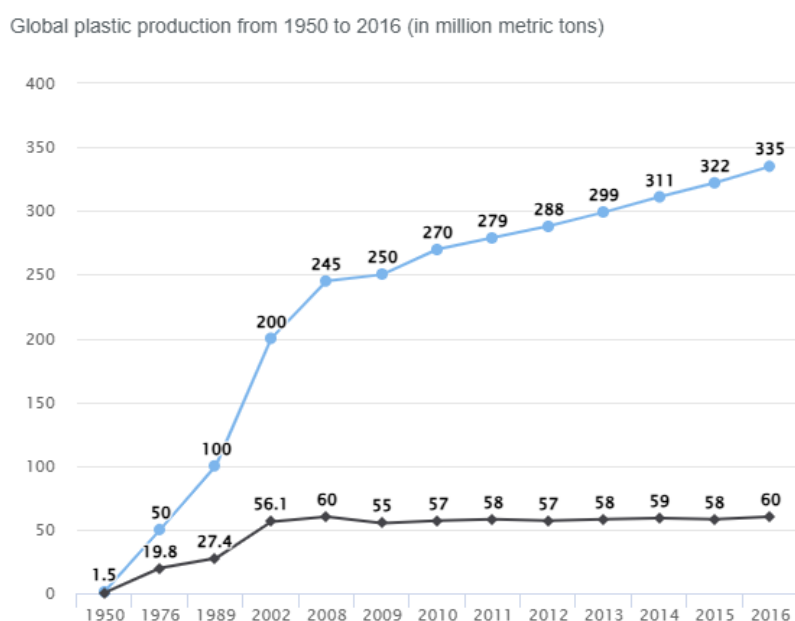
Με την ρύπανση από τα πλαστικά και τα μικροπλαστικά να αυξάνεται όλο και περισσότερο, αποτελώντας πλέον μια γιγαντία περιβαλλοντική πρόκληση, απαιτεί αρκετή προσοχή (Syberg et al., 2021). Συμφώνα με έρευνες μόνο το 60% συλλέγεται, από τα 250 εκατομμύρια τόνων πλαστικού που παράγονται σε ετήσιο επίπεδο (Skoczinski et al., 2021).

Λαμβάνοντας υπόψη τις εκτιμήσεις των ερευνών η παραγωγή των παγκοσμίων ποσοτήτων πλαστικού μπορούν να φτάσουν τους 33 δισεκατομμύρια τόνους σε ετήσια βάση μέχρι το 2050 (Grujić et al., 2025). Όμως μόνο το 20% των πλαστικών είναι δυνατόν να ανακυκλωθεί, διότι το υπόλοιπο 80% καταλήγει στο περιβάλλον με την πορεία του να ακολουθεί την εναπόθεση και κατόπιν συσσώρευση τόσο στο χερσαίο, όσο και στο υδάτινο περιβάλλον (Letcher, 2020).

Συμφώνα με την παγκόσμια παράγωγη από το 1950 μέχρι το 2015 υπάρχει εκτίμηση πως 8,3 δισεκατομμύρια τόνοι από τους οποίους περίπου το 60% που απορρίπτεται και καταλήγει στους χώρους υγειονομικής ταφής ή σε διαφορετική περίπτωση καταλήγει στο περιβάλλον μολύνοντας το (Geyer et al., 2017). Έπειτα έως το 2018 η παγκόσμια ετησία παράγωγη αυξήθηκε και έφτασε στους 360 εκατομμύριο τόνους. Από αυτό το ποσό περίπου το 50% της παράγωγης και παραπάνω να προέρχεται από την Ασία. Παρά την αύξηση της παραγωγής, ο ρυθμός ανακύκλωσης των πλαστικών παραμένει γενικά χαμηλός, με κάποια πλαστικά απόβλητα να καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής ή να απορρίπτονται στα εδάφη (Plastics Europe, 2019).

Τα πλαστικά απορρίμματα έχουν καταλήξει να είναι πανταχού παρόντα με την παγκόσμια ρύπανση να προκαλείται από το 1950 και έπειτα, εισέχοντας σε υδάτινα και χερσαία οικοσυστήματα προκαλώντας έτσι αλλαγές και διαταράσσοντας τις διάφορες λειτουργίες τους (Klein et al., 2018) (Geyer et al., 2017). Προκαλώντας παράλληλα περιβαλλοντική ανησυχία (Wanner, 2021). Έτσι και συμβαίνει και με τα μικροπλαστικά, τόσο τα πρωτογενή όσο και τα δευτερογενή, τα οποία εισέρχονται στα οικοσυστήματα μέσω διαφορετικών τρόπων, καθώς αποτελούν προϊόν διάσπασης τους (Horton et al., 2017; Iqbal et al., 2020).

Το 1950 η παραγωγή πλαστικού ανήλθε στους 2 εκατομμύρια τόνοι (Mt), με τη μετέπειτα ετήσια αύξηση του 8,4% μέχρι το 2018 που η παραγωγή βρισκόταν στους 359 εκατομμύρια τόνους (Kim et al. 2020b). Με τα πιο πρόσφατα δεδομένα η παγκόσμια παραγωγή του 2019 βρισκόταν στους 370 εκατομμύρια τόνοι, το 2022 έφτασε τους 400,4 εκατομμύρια τόνοι και με τα τελευταία διαθέσιμα δεδομένα του 2023 να υπολογίζουν την αύξηση στους 413,8 εκατομμύρια τόνους (Plastic Europe, 2024). Συνεχίζοντας με αυτή την αύξηση δημιουργούνται ερωτήματα ως προς την πορεία των πλαστικών στον πλανήτη μας, παρατηρώντας ανά δεκαετία την εξέλιξη της αύξησης στο παρακάτω διάγραμμα μπορούμε να σχηματίσουμε καλύτερη εικόνα για το ποσοστό που πλέον ενέχεται.

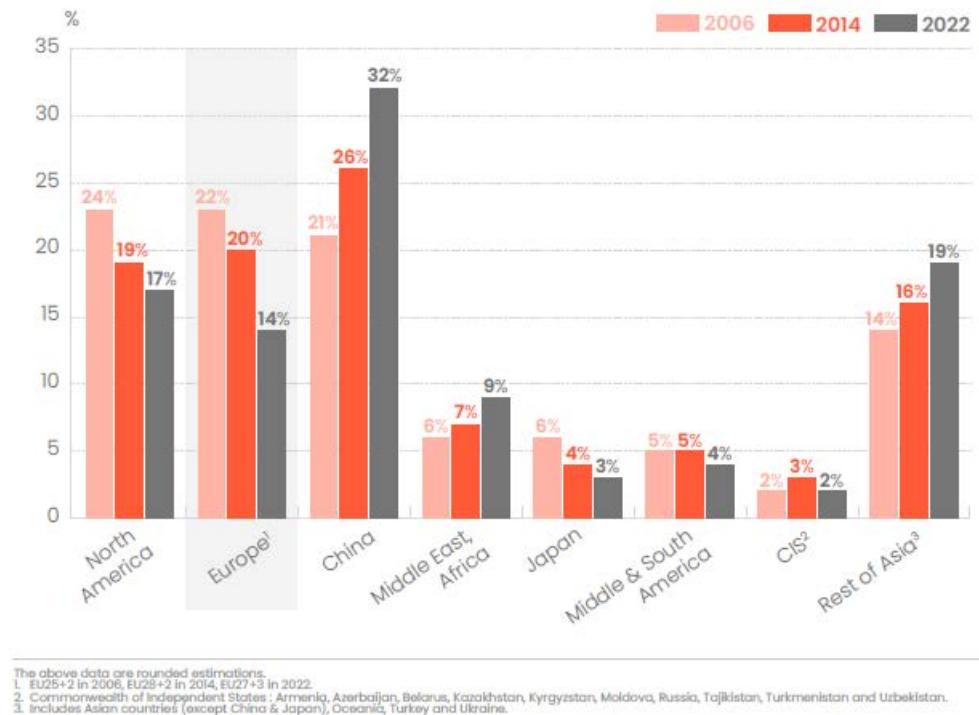


Εικ. 1.: Η παγκόσμια παραγωγή πλαστικού ανα τα χρονιά από το 1950 έως το 2016

Σε μια σύγκριση της ευρωπαϊκής ζήτησης για πλαστικά το ποσοστό των 81,2% αφορά τα PP, PE, PVS, PU, PET και PS (Plastic Europe, 2019, 2020). Με τα πρόσφατα δεδομένα του να προέρχονται από 90,4% συμβατικά, πετροχημικά πλαστικά, όπως PE, PP, PVC, PET κ.λπ. Μόλις το 8,7% να είναι πιεστικά ανακυκλωμένα (μηχανικά ή χημικά), ενώ μόνο 0,7% είναι βιο-βασισμένα και 0,1% χημικά ανακυκλωμένα (Plastic Europe, 2024).

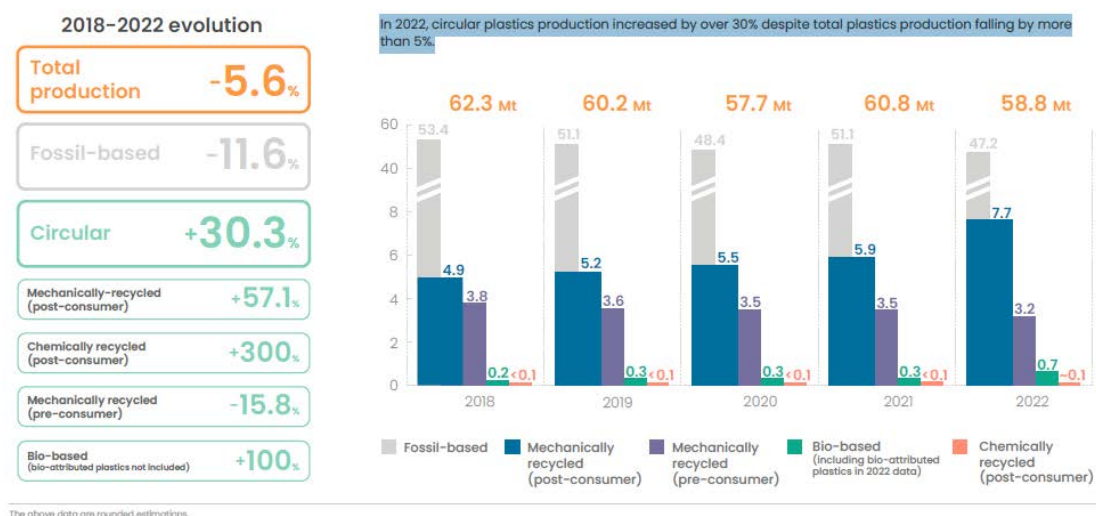
Θα συνεχίσουμε με στοιχεία στο ευρωπαϊκό επίπεδο με τη παραγωγή τους να ανέρχεται στους 54 εκατομμύρια τόνοι, από παραγωγή αυτή περίπου το 31% μόνο ανακυκλώθηκε και αξιοποιήθηκε για τη δημιουργία νέων προϊόντων (PlasticEurope, 2022). Από την ευρωπαϊκή

παραγωγή οι 42,9 εκατομμύρια τόνοι να αποτελούνται από συμβατικά άνθρακα-βασισμένα προϊόντα, περίπου 7,2 εκατομμύρια τόνοι ανακυκλώσιμων πλαστικών είτε μηχανικά είτε χημικά και μόλις 0,3 εκατομμύρια τόνοι να είναι βιο-βασισμένα πλαστικά. Πλέον η Ευρώπη αντιπροσωπεύει γύρω στο 12% της παγκόσμιας παραγωγής (Financial Times, 2024).



Εικ. 2: Επίπεδο παράγωγης και αξιοποίησης σε παγκόσμια κλίμακα

European plastics production evolution



Εικ.3: Επίπεδο παράγωγης και αξιοποίησης σε ευρωπαϊκή κλίμακα

Συμφώνα με τα τρέχοντα στοιχεία όπως παρουσιάζονται στο πρώτο και δεύτερο γράφημα σχετικά με την παραγωγή των πλαστικών σε διαφορά σημεία του πλανήτη. Ακόμα βλέπουμε ότι το επίπεδο παράγωγης και διάθεσης αξιοποίησης αλλά και τον χαμηλό ρυθμό ανακύκλωσης, που σημαίνει την αύξηση της συσσώρευσης απόβλητων πλαστικού στο περιβάλλον σε σχέση με παλαιότερα, αλλά στο τρίτο γράφημα παρατηρούμε μια στροφή στην αύξηση της ανακύκλωσης από το 2018 μέχρι το 2022, το οποίο αποτελεί θετικό στοιχείο ως προς την κατάλληλη διαχείριση των πλαστικών, έκτοτε δεν έχουμε νέα δεδομένα. (Dahlbo et al., 2018; Hahladakis et al., 2018a; Hahladakis και Iacovidou, 2018; van Velzen et al. 2019; Plastics Europe, 2024).

Για να κατανοήσουμε καλύτερα το ρυθμό της ρύπανσης και της ποσότητας συγκέντρωσης των πλαστικών, χρειάζεται πρώτα να γνωρίζουμε πως απαιτούνται εκατό περίπου χρόνια και παραπάνω για να γίνει η αποσύνθεση τους, κατά τη διάρκεια αυτή προκαλούνται σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα. Η εξήγηση που δίνεται εδώ, είναι πως τα πλαστικά με τη πάροδο του χρόνου γίνονται ακόμα πιο εύθραυστα καθώς στην επιφάνειά τους παρουσιάζονται μικρές ρωγμές και ραγίσματα. Τα οποία δημιουργούνται από τις υπάρχουσες συνθήκες, όπως τα διάφορα καιρικά φαινόμενα και τους μικροοργανισμούς, αλλά και την υπεριώδη ακτινοβολία (UV) και την υδρολυτική διάσπαση. Όλα έχουν το ρολό τους και έτσι με αυτόν τον τρόπο επέρχεται η αποσύνθεσή τους και η μετέπειτα μετατροπή τους σε θραύσματα, ίνες, σωματίδια και αλλά, τα λεγόμενα μικροπλαστικά (Andrady, 2011) (Auta et al., 2017).

Παγκοσμίως οι πρόσφατες μελέτες των συγκεντρώσεων των μικροπλαστικών στα εδάφη διαφέρουν αρκετά και βρίσκονται από ποσότητες $<100 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ για εδάφη που δεν χρησιμοποιούνται εντατικά, μέχρι $>10,000 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ σε εδάφη με εντατική, συμβατική γεωργική πρακτική (Büks και Kaupenjohann, 2020). Ωστόσο, τα δεδομένα στοιχεία για τα ΜΡ στα εδάφη είναι δύσκολο να συγκριθούν μεταξύ των μελετών λόγω των πολύ διαφορετικών πρωτοκόλλων εξαγωγής και ανάλυσης των μικροπλαστικών που χρησιμοποιούνται, ιδιαίτερα όσον αφορά την ανάκτηση και τρόπου εξαγωγής και το κατώτερο όριο ανίχνευσης μεγέθους σωματιδίων (Möller et al., 2020).

Σε γενικότερο πλαίσιο τα μικροπλαστικά σε χερσαία περιβάλλοντα θεωρούνται σαν εάν στιγμιότυπο της εικόνας της ρύπανσης στο περιβάλλον, καθώς τα δεδομένα λαμβάνονται σε συγκεκριμένο τόπο και χρόνο. Αυτό βεβαίως συμβαίνει διότι οι περισσότερες μελέτες ποσοτικοποιούν και αναφέρονται στα φυσικοχημικά στοιχεία των μικροπλαστικών σε ένα περιορισμένο χωρικό πεδίο, αλλά και σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή (Büks και Kaupenjohann, 2020; Weber και Bigalke, 2022). Μέχρι τώρα όμως τα δεδομένα που υπάρχουν είναι αρκετά περιορισμένα όσο αφορά τη ρύπανση σε ποικίλους τύπους εδάφους, αλλά και σε ποικίλες χρονικές στιγμές με αρκετά ελλιπή στοιχεία για τις μεταβολές των μικροπλαστικών κατά τη διάρκεια του χρόνου. Αυτό αποτελεί ένα αρκετά σημαντικό κομμάτι διερεύνησης, το οποίο θα μας επιτρέπει να εξετάσουμε τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών εις βάθος. (Weber, et al., 2024)

Αν και οι έρευνες που έχουν γίνει στο μεγαλύτερο μέρος τους αφορούν τα αγροτικά εδάφη και ως συνήθως έχουν εφαρμοστεί υλικά εδαφοκάλυψης και βελτίωσης του εδάφους, όπως είναι το κομπόστ (Meng et al., 2020; Sajjad et al., 2022). Ωστόσο, η έρευνα που επικεντρώνεται στην εμφάνιση μικροπλαστικών στο έδαφος παραμένει περιορισμένη, αν και έχει τα μεγαλύτερα ποσοστά συγκέντρωσης μικροπλαστικών σε σχέση με τα ύδατα (Horton et al., 2017).

Πέρα από την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα, υπάρχει μια ακόμα πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπίσει η ερευνητική κοινότητα και έχει σχέση με τον διαχωρισμό των μικροαστικών από την οργανική ύλη του εδάφους (SOM), αλλά και τα ορυκτά. Ενώ πολλές μελέτες έχουν διερευνήσει την εμφάνιση και την αφθονία των μικροπλαστικών σε θαλάσσια και υδάτινα περιβάλλοντα και δεν έχουν εστιάσει στα χερσαία περιβάλλοντα (Horton et al., 2017; Bergmann et al., 2017; Klein και Fischer, 2019; Chandrakanthan et al., 2023). Περίπου το 2012 δόθηκε προσοχή με παρότρυνση για έρευνα από τον Rillig (2012), και κάπως έτσι ξεκίνησε η έρευνα για τα μικροπλαστικά στα εδάφη. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν παραπάνω έρευνες και σε είδη εδαφών πιο συγκεκριμένα, όπως αγροτικά εδάφη, αστικά εδάφη, θερμοκήπια, παράκτιες και βιομηχανικές περιοχές αλλά και σε εδάφη τα οποία είχαν πλημμυρίσει με σκοπό την περαιτέρω διερεύνηση των συγκεντρώσεων. (Chen et al., 2024) Ακόμα η έρευνα στα χερσαία οικοσυστήματα παραμένει λιγότερο αναπτυγμένη και αντιπροσωπεύει περίπου το 5% της έρευνας για τα μικροπλαστικά (Ding et al., 2022), παρά το γεγονός ότι η πλειονότητα των πλαστικών απορριμμάτων που φτάνουν στους ωκεανούς προέρχεται από την ξηρά (Lebreton et al., 2022).

Τη τελευταία περίπου δεκαετία το χερσαίο περιβάλλον λειτουργεί ως δεξαμενή για τα ΜΠ, καθώς δέχεται περίπου 4-23% περισσότερα πλαστικά απόβλητα ετησίως σε σύγκριση με το θαλάσσιο περιβάλλον (De Souza Machado et al., 2018) (Nizzetto et al., 2016; Horton et al., 2017). Με την αυξανόμενη χρήση πλαστικών στη γεωργία (όπως αυτή της κάλυψης του εδάφους και κομπόστ), ένα σημαντικό ποσοστό των ΜΠ που βρίσκεται σε ποσοστό 48%–52%, και έπειτα εισέρχεται στις παγκόσμιες καταβόθρες, συγκεκριμένα αυτό προέρχεται κυρίως από τα γεωργικά εδάφη (Nizzetto et al., 2016; Boucher και Friot, 2017; Bethanis και Golia, 2024). Συνεπώς, η παρουσία των ΜΠ σε καλλιεργήσιμα εδάφη έχει γίνει ένα ακόμα μεγαλύτερο πρόβλημα από ότι η ρύπανση των υδάτινων από αυτά (Iqbal et al., 2020).

Συμφωνά με εκτιμήσεις ερευνών προβλέπεται ότι οι παγκόσμιες συγκεντρώσεις των μικροπλαστικών συμφώνα με στοιχεία από μελέτες στα χερσαία περιβάλλοντα, κυμαίνεται από τα βασικά επίπεδα τους μέχρι και 20 mg kg⁻¹ σε κατοικημένες περιοχές και φθάνουν τα έως και 67.500 mg kg⁻¹ σε βιομηχανικές περιοχές (Εικ. 1 και Εικ. 2). Βεβαίως σε ορισμένες μελέτες συναντώνται και πιο υψηλά επίπεδα συγκεντρώσεων, τα οποία μπορούν να εμφανιστούν σε συγκεκριμένα εδάφη που έχουν ακόμη πιο σοβαρά επίπεδα μόλυνσης (Lwanga et al., 2017). Εφόσον παρατηρούμε αυτά τα δεδομένα μπορούμε να συμπεράνουμε πως πέρα από τη δραματική αύξηση των πλαστικών απόβλητων τις τελευταίες δεκαετίες, είναι εφικτό με αυτά τα ποσοστά να γίνει εκτίμηση πως τα παγκόσμια πλαστικά απόβλητα θα τριπλασιαστούν από το 2015 έως το 2060, φτάνοντας τους 270 εκατομμύρια τόνους (Li et al., 2020).

Σε γενικό πλαίσιο τώρα το ποσοστό των πλαστικών που πολλές φορές καταλήγει εκτός των χωματερών, μπορεί να αποτελείται από πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο και πολυστυρένιο, σε μορφές ινών, θραυσμάτων, αφρού και νιφάδων, είναι από τα κοινά μικροπλαστικά που βρίσκονται σε εδάφη από οικιακούς κήπους μέχρι γεωργικές εκτάσεις, σε συγκεντρώσεις που φτάνουν τα 67,5 g·kg⁻¹ εδάφους ή 236.000 σωματίδια ανά κιλό εδάφους (Xu et al., 2020). Βεβαίως δεν αποτελούνται μόνο από αυτά καθώς περίπου το ήμισυ αυτών των αποβλήτων σε παγκόσμιο επίπεδο αποτελείται από πλαστικά μίας χρήσης, κυρίως πλαστικές σακούλες και μπουκάλια PET. Οι δραστηριότητες ανακύκλωσης πλαστικών περιορίζονται μόνο σε οικονομικά βιώσιμα πλαστικά αντικείμενα, όπως μπουκάλια PET και μεγάλα πλαστικά σκεύη που ανακτώνται κατά τη συλλογή των απορριμμάτων. Ταυτόχρονα, όταν ανακυκλώνεται το ανακτηθέν πλαστικό, πολλά από τα

πλαστικά μίας χρήσης καταλήγουν στο έδαφος, στις αποχετεύσεις, στους χώρους απόρριψης, στους σκουπιδότοπους και ακόμη και σε γεωργικές εκτάσεις μετά τη διάχυση από τους ανέμους (Gul, 2020). Αυτά τα μεγάλα πλαστικά προκαλούν τελικά ρύπανση από ΜΠ και λόγω της ανεπαρκούς διαχείρισης των αποβλήτων, τα ποτάμια στην Ασία και την Αφρική είναι τα πιο ευάλωτα στην ρύπανση (Mahat, 2017). Τα σωματίδια πλαστικού επηρεάζουν εξίσου την εδαφική βιομάζα και τις ιδιότητες του εδάφους. Για παράδειγμα, εμποδίζουν την κίνηση των μικροοργανισμών που ζουν στο έδαφος (Kim και An, 2019). Τα ΜΠ παραμένουν στο οικοσύστημα για παρατεταμένο χρονικό διάστημα και λειτουργούν ως υπόστρωμα για άλλους ρυπογόνους παράγοντες, καθιστώντας τους διαθέσιμους στη βιομάζα του εδάφους, αυξάνοντας τελικά τους οικολογικούς κινδύνους (Cole et al., 2011).

Παρακάτω μπορούμε να δούμε τις συγκεντρώσεις των μικροπλαστικών σε διαφορετικές χώρες του πλανήτη, αυτό ίσως θα μας βοηθήσει να δημιουργήσουμε μια καλύτερη εικόνα. Σε ένα γενικό πλαίσιο μπορούμε να αναφέρουμε πως στα εδάφη της Κίνας, Αυστραλίας, Ελβετίας, Ισπανίας, Χιλής κ.ά. που έχουν μελετηθεί (Bueks and Kaupenjohann, 2020), με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση να βρίσκεται στα 67,5 g/kg (Fuller και Gautam, 2016). Έχει παρατηρηθεί ότι η επιφανειακή στρώση του εδάφους κοντά σε δρόμους σε βιομηχανικές περιοχές μπορεί να περιέχει έως και 7% μικροπλαστικά κατά βάρος (Fuller και Gautam, 2016), ενώ μερικοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι επίπεδα έως 60% κατά βάρος μπορεί να είναι ρεαλιστικά σε περιοχές με υψηλή ρύπανση (Lwanga et al., 2016).

Στην Κίνα υπάρχει αρκετό υλικό πληροφορίας με σχετικές έρευνες και επομένως ο αριθμός των δεδομένων είναι μεγάλος. Για παράδειγμα θα μπορούσαμε να πούμε πως η κατανομή των MPs σε τρεις διαφορετικές χρήσεις γης που ερευνήθηκαν (δάσος, καλλιεργήσιμη γη και ακαλλιεργήγη γη) κυμαίνεται από 22.000 έως 690.000 σωματίδια ανα κιλό στην κεντρική Κίνα (Zhou et al., 2019). Θα μπορούσαμε να αναφερθούμε επίσης στη πλαστική μεμβράνη που η χρήση της έχει αυξηθεί στο τομέα της γεωργίας 230 φορές, και συγκεκριμένα από 600.000 τόνους το 1981, σε 137,9 εκατομμύρια τόνους το 2019 (Xue et al., 2021). Ωστόσο, το ποσοστό ανάκτησης των υπολειμμάτων σε ορισμένες περιοχές είναι λιγότερο από τα 2/3, καθιστώντας την κατάσταση της ανακύκλωσης μη αισιόδοξη και προκαλώντας σοβαρή πλαστική ρύπανση (Ding et al., 2020; Liu et al., 2014; Yu et al., 2021). Ως έννοια η λευκή ρύπανση προσδιορίζει την ρύπανση που προέρχεται από τη χρήση πλαστικών, το οποίο καταλήγει στο περιβάλλον με επακόλουθο τους πολυάριθμους κινδύνους. Σύμφωνα με τους Liu et al, (2014) προέρχεται από τη χρήση πλαστικών επικάλυψης εδάφους (mulcting) στην γεωργία και αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα για το περιβάλλον, ποσό μάλλον την ποιότητα και τις λειτουργίες του εδάφους που έχει άμεσο κίνδυνο, καθώς οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις βρίσκονται εκεί, με τους πιο συνήθεις τύπους πλαστικού να είναι: LDPE και PP, τα οποία βρίσκονται κυρίως στα πλαστικά μουλτσινγκ. (Liu et al., 2014b).

Ένα παράδειγμα που μπορούμε να αναφέρουμε είναι το Πακιστάν, το οποίο αντιμετωπίζει επίσης περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω κακής διαχείρισης αποβλήτων πλαστικών. Περίπου 4,32 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων πλαστικών παράγονται στο Πακιστάν με μέση ετήσια κατανάλωση πλαστικού 5,5 κιλά/άτομο (Umar 2020). Συνεπώς οι συγκεντρώσεις των πλαστικών και μικροπλαστικών, πόσο μάλλον με μη κατάλληλη διαχείριση τους, θέτουν σε κίνδυνο τα χερσαία οικοσυστήματα σε περισσότερες και πιο σοβαρές απειλές από τις ήδη υπάρχουσες (Li et al. 2020a).

Σε παγκόσμιο επίπεδο η συγκέντρωση των μικροπλαστικών στα εδάφη παρατηρείται να είναι υψηλότερη κοντά σε δρόμους και σε γεωργικά περιβάλλοντα. Οι εκτιμήσεις για τις συγκεντρώσεις μικροπλαστικών διαφέρουν, με τα βιομηχανικά επιφανειακά εδάφη να

περιέχουν έως και 7% πλαστικά σωματίδια ανά κιλό, αν και πολύ συχνά είναι χαμηλότερα (Büks et al., 2020; De Souza Machado et al., 2018). Σε πιο απομακρυσμένες περιοχές, η ποσότητα και το εύρος των μικροπλαστικών σε αστικά δάση παραμένει με ελάχιστα στοιχεία και δεδομένα στη διάθεση μας (Rillig et al., 2019), αν και έχουν ανιχνευτεί σε δάση (Choi et al., 2020) αλλά και σε περιαστικά τόπια/πάрка δεδομένα που μας δείχνουν την ύπαρξη τους έστω και μειωμένη (Helcoski et al., 2020).

4. Ποσότητες πλαστικών και μικροπλαστικών ανά περιοχές του πλανήτη

Διαπιστώνουμε πως η παρουσία των μικροπλαστικών δεν βρίσκεται μόνο στα εδάφη και τα ύδατα, αλλά και στην ατμόσφαιρα, επομένως υπάρχουν παντού, ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές που δε το περιμένουμε (Wilcox et al., 2020; Rillig και Lehmann, 2020). Διότι η χωρική του κατανομή βασίζεται σε διάφορους παράγοντες όπως είναι η ανθρωπογενής δραστηριότητες και η παρουσία τους ανθρώπου, η εκροή λυμάτων και η απόσταση από την πηγή της πλαστικής ρύπανσης (Ogonowski et al. 2018). Μπορούμε σε αυτό το σημείο να δούμε σε ποιες περιοχές τα συναντούμε σε μεγαλύτερο βαθμό. Αναφέροντας ότι σύμφωνα με στοιχεία το 79% των πλαστικών αποβλήτων σε παγκόσμιο επίπεδο βρίσκεται σε χωματερές (Geyer et al., 2017; Ng et al., 2018).

Σύμφωνα με άλλες μελέτες τα μικροπλαστικά σε αγροτικές εκτάσεις βρίσκονται από 63 έως 430 χιλιάδες τόνους στην Ευρώπη και από 44 έως 300 χιλιάδες τόνους στη Βόρεια Αμερική, και οι δύο ποσότητες υπερβαίνουν σε μεγάλο βαθμό τις ετήσιες εκπομπές μικροπλαστικών προς τα επιφανειακά ύδατα των ωκεανών (Nizzetto et al., 2016a, 2016b), κάτι που είναι πολύ μεγαλύτερο από τη παγκόσμια ετήσια εισροή (93.000–236.000 τόννοι) μικροπλαστικών στον ωκεανό (Sebillle et al., 2015). Συνεπώς ως τεχνητό προϊόν, τα πλαστικά είναι πανταχού παρόντα στα εδάφη λόγω των καθημερινών δραστηριοτήτων των ανθρώπων και αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το έδαφος αποτελεί μια γιγάντια δεξαμενή μικροπλαστικών.

Η υπάρχουσα έρευνα δείχνει ότι τα μικροπλαστικά βρίσκονται σε πολυάριθμα και διαφορετικά περιβάλλοντα, από την Αρκτική έως την Ανταρκτική, περιλαμβανομένων των βαθυτήτων των ωκεανών, υδάτινων σωμάτων, ατμοσφαιρικής κατάθεσης και εδαφικών οικοσυστημάτων (Patil et al., 2022; Li et al., 2023; Zhao et al., 2023).

Μερικά παραδείγματα των ποσοτήτων που βρέθηκαν αποτελούν δείγμα των εκτιμήσεων, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν από διάφορες έρευνες. Έτσι με αυτό το τρόπο θα αντιληφθούμε καλύτερα τη διάσταση της έκτασης που καταλαμβάνουν τα ΜΠ. Σε μια από αυτές τις έρευνες ανιχνεύθηκαν σε κήπους σπιτιών στην Campeche του Μεξικού, μέση συγκέντρωση $0,87 \pm 1,9$ σωματίδια g^{-1} (Lwanga et al., 2017a). Επιπλέον, οι Scheurer και Bigalke (2018) βρήκαν μικροπλαστικά σε περίπου το 90% των εδαφών πλημμυρών στην Ελβετία σε βάθη εδάφους μεταξύ 0 - 5 cm και προσδιόρισαν τη μέση συγκέντρωση στα 5 $mg\ kg^{-1}$, με μέγιστη τιμή τα 55,5 $mg\ kg^{-1}$. Τα μικροπλαστικά έχουν επίσης βρεθεί να αποτελούν έως και το 0,002% του ξηρού βάρους του εδάφους σε μη αστικά εδαφικά αποθέματα, όπως απομακρυσμένες περιοχές υψηλών βουνών (Scheurer και Bigalke, 2018), ενώ οι Fuller και Gautam (2016) ανέφεραν ότι τα εδάφη από βιομηχανική περιοχή στην Αυστραλία περιείχαν 0,03–6,7% μικροπλαστικά, με συγκεντρώσεις που κυμαίνονταν από 300 έως 67.500 $mg\ kg^{-1}$.

Ανεξάρτητα από τις αστικές ρυθμίσεις και τις σχετικές ανθρώπινες δραστηριότητες, τα MPs σε αντίστοιχη ερευνά ήταν παρόντα σε όλες τις επιλεγμένες θέσεις με τη μέση συγκέντρωση να βρίσκεται στα 4483 ± 2315 MPs/kg. Αυτά τα αποτελέσματα ήταν συναφή με μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη Γερμανία, όπου τα δείγματα εδάφους περιείχαν 24.000 MPs/kg (Bläsing και Amelung, 2018). Ομοίως, εδάφη από την περιοχή της Κίνας ανέφεραν μέση συγκέντρωση 18.760 MPs/kg με εύρος 7100–42.960 MPs/kg (He et al. 2018). Οι λόγοι για τον μεγάλο αριθμό MPs σε αυτές τις περιοχές ήταν το πλαστικό mulch και η χρήση ιλύος από βιολογικούς καθαρισμούς ως λιπάσματος σε γεωργικά χωράφια. Επίσης οι Li et al. (2018) ανέφεραν μέση συγκέντρωση MPs $84,75 \pm 13,22$ και $65,75 \pm 13,92$ MPs/kg για τα δείγματα επιφανειακού και βαθιού εδάφους, αντίστοιχα. Οι Scheurer και Bigalke (2018) πραγματοποίησαν μια μελέτη σε ελβετικές πλημμυρικές πεδιάδες και βρήκαν μέση συγκέντρωση 593 MPs/kg. Αυτές οι συγκεντρώσεις ήταν αρκετά χαμηλές σε σχέση με τα τρέχοντα αποτελέσματα, καθώς στις πλημμυρικές πεδιάδες οι MPs εναποτίθενται μόνο από τα ποτάμια, ενώ σε επιλεγμένη περιοχή υπάρχουν πολλαπλές πηγές MPs, λόγω της εκτεταμένης χρήσης πλαστικών στην κοινωνία από τους ανθρώπους (Rafique et al., 2020).

Βέβαια οι αντίστοιχες εκτιμήσεις δεν μπορούν να γίνουν στις αγροτικές περιοχές, διότι δεν υπάρχουν ακριβείς ποσότητες, οι οποίες έχουν υπολογιστεί καθώς η αφθονία των ΜΠ στα γεωργικά εδάφη διαφέρει σημαντικά και υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν τις ποσότητες αυτές.

Οι κύριες πηγές αλλά και παράγοντες που επηρεάζουν την υψηλή κατανομή μικροπλαστικών στο χερσαίο περιβάλλον αποτελούν η εφαρμογή πλαστικού καλύμματος, κομπόστ, σιτάρων, λιματολόσσης, σάκων λιπασμάτων και σκίασης, οι πλημμύρες και οι απορροές δρόμων, καθώς και η ατμοσφαιρική ρύπανση έχουν εξίσου σημαντικό ρόλο (Bläsing και Amelung, 2018; Berg et al., 2020; Yang et al., 2021). Μεταξύ αυτών, το πλαστικό κάλυμμα είναι η κύρια πηγή λόγω της παγκόσμιας πρακτικής του στη γεωργία (Ali et al., 2021; Huang et al., 2020). Η χρήση του είναι εκτενώς διευρυμένη στη γεωργία για τη βελτίωση των μικροκλιματικών παραμέτρων που είναι κατάλληλες για την ενίσχυση της ανάπτυξης της παραγωγής και για την αποδοτική χρήση του νερού στις καλλιέργειες (Guo et al., 2020).

Αναφέρεται ότι η μέση περιεκτικότητα των MPs σε εδάφη γεωργικών εκτάσεων με 30 χρόνια εφαρμογής μεμβράνης φιλμ φτάνει τα 83.6 kg hm^{-2} (Huang et al., 2020). Έχουν αναφερθεί συγκεντρώσεις MPs έως και 67.5 g kg^{-1} στο έδαφος (Sajjad et al., 2022), ενώ το ανώτατο όριο ρύπανσης από MPs καθορίζεται στο 0.1% του βάρους του εδάφους (Wang et al., 2019). Επίσης στις γεωργικές εκτάσεις της Σαγκάης στην Κίνα, βρέθηκαν 62,5 σωματίδια μικροπλαστικών ανά κιλό βαθιού εδάφους και 78,0 σωματίδια kg^{-1} σε ρηχά εδάφη (Liu et al., 2018). Ακόμα ο Piehl et al. (2018) εξέτασε 0,5 εκτάρια καλλιεργήσιμης γης στη νότια Γερμανία και ανέφερε 0,34 MP ανά κιλό εδάφους, ενώ ο Liu et al. (2018) βρήκε 78 ΜΠ ανά κιλό εδάφους σε 20 αγροκτήματα λαχανικών γύρω από τα προάστια της Σαγκάης, Κίνα. Αυτή η τεράστια διαφορά πιθανόν να οφείλεται στις τεχνικές διαχείρισης των καλλιεργειών. Για παράδειγμα, η γεωργική γη που εξετάστηκε από τον Liu et al. (2018) χρησιμοποιήθηκε για εντατική καλλιέργεια λαχανικών με πλαστική επικάλυψη.

Η αφθονία των μικροπλαστικών που παρατηρήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη ήταν σχετικά υψηλότερη από άλλες γεωργικές περιοχές στις προηγούμενες αναφορές, ενώ η υψηλότερη συγκέντρωση μικροπλαστικών, περίπου 7100–42,960 τεμάχια/kg, παρατηρήθηκε σε εδάφη με φυτευμένα δέντρα (Zhang και Liu, 2018). Επίσης μικροπλαστικά βρέθηκαν και σε άλλους

τύπους εδάφους. Αντίθετα, ο Piehl et al. (2018) εξέτασε χωράφια με χειμερινό σιτάρι που δεν είχαν καλυφθεί με πλαστικό ή υποστεί επεξεργασία με ενδεχομένως μολυσμένη ιλύ από λύματα. Έτσι, η τρέχουσα εικόνα της ρύπανσης των γεωργικών εκτάσεων με ΜΠ είναι ατελής και απαιτούνται περισσότερες πληροφορίες για να γίνει μια έγκυρη και ακριβής αξιολόγηση της ρύπανσης των γεωργικών συστημάτων με ΜΠ.

Άλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τις ποσότητες των μικροπλαστικών αναφέρονται παρακάτω όπως είναι οι αβιοτικοί παράγοντες, η τοποθεσία, το υψόμετρο, ο ανθρωπογενής παράγοντας, τα βαρέα μέταλλα και αλλά. Σε προηγούμενες μελέτες που επικεντρώθηκαν σε διαφορετικούς ρυπαντές, όπως είναι τα βαρέα μέταλλα, βρήκαν επίσης υψηλότερες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων σε πολυσύχναστους χώρους, όπως τα πράσινα πάρκα σε σύγκριση με τα δάση (Curran-Courhane et al., 2015). Επιπλέον, το γεγονός ότι τα πάρκα μπορεί να είναι πιο συχνά επισκεπτόμενα από τον πληθυσμό, αποτελεί άλλο ένα παράγοντα που μπορεί να εξηγήσει τις υψηλότερες μετρημένες συγκεντρώσεις εκεί από ότι στα δάση. Μπορεί να είναι η μεγάλη κάλυψη δέντρων των δασών που προστατεύει το έδαφος από ατμοσφαιρικούς ρυπαντές, όπως τα μικροπλαστικά ή τα βαρέα μέταλλα, λόγω της ικανότητας της βλάστησης να συγκρατεί ρύπους (Diener και Mudu, 2021). Υψηλά επίπεδα μικροπλαστικών εντοπίστηκαν επίσης στην περιοχή των ελών, κάτι που συμφωνεί με τους Qian et al. (2021), οι οποίοι θεωρούν τους υδροβιότοπους ως σημεία συσσώρευσης μικροπλαστικών, δεδομένου ότι βρίσκονται σε χαμηλά υψόμετρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι υδροβιότοποι να δέχονται μικροπλαστικά από διάφορες πηγές μέσω διαφορετικών οδών (παραδείγματος χάρη αποβλήτων αποχέτευσης, αποβλήτων υδατοκαλλιέργειας, απορροή) (Liu et al., 2022).

Αντίθετα, το χαμηλότερο επίπεδο μόλυνσης από μικροπλαστικά βρίσκεται στα δάση υποδηλώνει ότι ο κίνδυνος της μόλυνσης από μικροπλαστικά είναι υψηλότερος σε περιοχές που υπόκεινται σε ανθρώπινη παρέμβαση, παρά σε περιοχές με ελάχιστη έως καθόλου ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Αυτές οι παρατηρήσεις, αν και υποστηρίζονται από μικρό αριθμό δειγμάτων για τα δάση, είναι παρόμοιες με αυτές των Corradini και άλλων ερευνητών στη Χιλή (Corradini et al., 2019). Η μελέτη τους, η οποία παρουσιάζει δεδομένα σε περιφερειακή κλίμακα για την παρουσία των μικροπλαστικών σε εδάφη που υπόκεινται σε διαφορετικές χρήσεις, βρέθηκαν στοιχεία μόλυνσης σε καλλιέργειες και σε βοσκοτόπια, αλλά όχι σε φυσικά λιβάδια και χορτολιβάδια. Αν και τα αποτελέσματα για τα δασικά εδάφη είναι μειωμένα σε τέτοιου είδους μόλυνσης, θα ήταν ανώφελο να ισχυριστούμε ότι δασικά εδάφη δεν έχουν μολυνθεί καθόλου από μικροπλαστικά. Σε περιοχές απομακρυσμένες από ανθρώπινη παρέμβαση πόσο μάλλον δραστηριότητα, η αερομεταφορά μικροπλαστικών είναι εξίσου μια σημαντική πηγή μικροπλαστικών (Evangelidou et al., 2020).

Παρατηρούμε ότι οι έρευνες για τα ΜΠ στα εδάφη, έχουν εστιάσει στην συγκέντρωση των μικροπλαστικών σε γεωργικές περιοχές και λιγότερο σε αλλού είδους (Büks και Kaupenjohann, 2020). Στη μειοψηφία των ερευνών αυτών αναφέρονται ως επί το πλείστον οι αστικές περαστικές και οι βιομηχανικές περιοχές. Αυτό βέβαια μπορεί να οφείλεται παραδείγματος χάρη στην κυριαρχία του πολυπροπυλενίου και του πολυαιθυλενίου, έτσι τα πολυμερικά προφίλ που αναφέρονται σε κάποιες έρευνες για αστικές περιοχές και χωματερές είναι ευρέως παρόμοια με εκείνα που αναφέρονται στις γεωργικές περιοχές (Liu et al., 2018; Piehl et al., 2018; Vollertsen και Hansen, 2017). Αυτό αποδεικνύει ότι οι συγκεντρώσεις των ΜΠ σχετίζονται άμεσα με τις χρήσεις γης. Σε συνέχεια αντικατοπτρίζει την πανταχού παρουσία εύκολα θραυσμάτων και ινών, οι οποίες οφείλονται είτε σε

γεωργικές, είτε σε καταναλωτικές εφαρμογές όπως είναι οι διάφορες συσκευασίες, οι οποίες μπορεί να είναι ευάλωτες στη διασπορά από τον άνεμο (Billings et al., 2023).

Σε άλλη ερευνά σύμφωνα με τους Zhang et al. (2015) ανέφεραν ότι υπάρχουν εποχικοί παράγοντες, οι οποίες συνδέονται άμεσα και με τις γεωργικές πρακτικές που ακολουθούνται, αποτελεί κάτι που συναντάται σε γεωργικά εδάφη κυρίως και όχι σε μη γεωργικά. Βέβαια αυτή αποτελεί μια περίπτωση, εξετάστηκαν και άλλες περιπτώσεις, όπως αστικές, περαστικές ή και άλλες περιοχές, που η ζήτηση των χωρών αναψυχής αυξάνεται κυρίως στους θερμότερους μήνες και οι διαφορές στο κλίμα που επηρεάζουν τη μεταφορά προς και από τους χώρους εναπόθεσης. Εποχικές διαφορές στις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους, ενδέχεται να τροποποιήσουν τα ποσοστά αποικοδόμησης των πλαστικοποιητών και να τροποποιήσουν τη διήθηση από τα πλαστικά αντικείμενα. Για παράδειγμα, η θερμοκρασία μπορεί να επιταχύνει την αποικοδόμηση, αλλά και να επιταχύνει τη διάσπαση των ουσιών των πλαστικών στο έδαφος και όχι μόνο. Ακόμα η εποχικότητα των συγκεντρώσεων μικροπλαστικών στο ευρύτερο χερσαίο περιβάλλον παραμένει σχετικά άγνωστη και προς διερεύνηση (Billings et al., 2023).

Σχετικά με τις κατοικημένες περιοχές αντιμετωπίζεται και ένα ακόμα προφανές πρόβλημα, δηλαδή τα οικιακά απορρίμματα όπως είναι πλαστικές σακούλες, συσκευασίες χάρτινες ή πλαστικές και αλλά πολλά. Λόγω του υπερπληθυσμού και των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, η απόθεση των απορριμμάτων στο περιβάλλον (αστικό, αγροτικό, δασικό) και η μετέπειτα αποσύνθεση τους αποτελεί κατά κύριο λόγο πηγή μικροπλαστικών σε κατοικημένες περιοχές (Wagner et al., 2014). Ποσό μάλλον και αλλά προϊόντα αποτελούν πηγή ΜΠ όπως είναι τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας, όπως καθαριστικά προσώπου, καθαριστικά χεριών και οδοντόκρεμες, τα οποία εισέρχονται στο περιβάλλον μέσω των οικιακών λυμάτων (Duis και Coors, 2016). Τα ΜΠ μπορούν να δημιουργηθούν άμεσα από την παραγωγή καλλυντικών για διάφορους σκοπούς όπως είδαμε. με την συχνότητα της κατανάλωσης τέτοιων προϊόντων υπολογίστηκε πως περίπου 1 γρ. μικροπλαστικών καταναλώνονται ετησίως ανά Αμερικανό μέσω προσωπικών προϊόντων περιποίησης (Bouwmeester et al., 2015). Όσο αφορά την Ευρωπαϊκή Ένωση, συγκεκριμένα στην Ελβετία και στη Νορβηγία, αναφέρθηκε ότι περίπου το 6% των υγρών προϊόντων καθαρισμού δέρματος περιείχαν ΜΠ και το 93% από αυτά ήταν κατασκευασμένα από PE (Gouin et al., 2015).

Εν τω μεταξύ ένας άλλος τομέας που η χρήση του πλαστικού έχει αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό είναι αυτό της βιομηχανίας της μόδας, τα συνθετικά υφάσματα είναι εξίσου σημαντικές πηγές μικροπλαστικών, τα οποία έχουν βρεθεί σε οικοσυστήματα σε όλο τον κόσμο (Eunomia, 2016; Boucher και Friot, 2017; Henry et al., 2019). Περίπου τα δύο τρίτα όλων των υφασμάτων είναι συνθετικά, κατασκευασμένα από οργανικούς πολυμερείς που βασίζονται στο πετρέλαιο, όπως πολυαμίδιο, πολυεστέρας και ακρυλικό (Henry et al., 2019). Αυτά ενδέχεται να εκλύονται στον αέρα και στη σκόνη, προκαλώντας φθορά κατά τη διάρκεια κανονικής χρήσης (Rillig, 2012). Ο Sundt et al. (2014) ανέφεραν ότι υπήρχαν 0.08 κιλά/κάτοικο/έτος μικροΐνες υφασμάτων στον αέρα και 0.12 κιλά/κάτοικο/έτος ίνες στα απόβλητα πλυντηρίων σε σπίτια της Νορβηγίας.

Αυξανόμενα στοιχεία επιβεβαιώνουν την παρουσία των MPs σε διάφορους τύπους εδαφών, και έτσι τα οικοσυστήματα των εδαφών έχουν αποδειχθεί ως μια σημαντική μακροχρόνια δεξαμενή των ΜΠ (Yang et al., 2021a).

Ως σύνολο αυτή η κατάσταση δεν θα έπρεπε να μας προκαλεί έκπληξη ότι υπήρξαν ευρήματα μικροπλαστικών ακόμα και στον πυθμένα της τάφρου των Μαριανών (Peng et al., 2018) ή ακόμα και στην κορυφή του Έβερεστ (Napper et al., 2020). Αυτό που θα έπρεπε βεβαίως να μας προβληματίσει είναι πως για τους έμβιους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων, που βρίσκονται σε ένα περιβάλλον που έχουν συσσωρεύει όλο και περισσότερα ΜΠ, οι επιπτώσεις είναι βέβαιο πως στις φυσιολογικές, μορφολογικές, συμπεριφορικές και βιοχημικές λειτουργίες, οι επιπτώσεις των μικροπλαστικών έχουν αρχίζει τα τελευταία χρόνια να διερευνώνται (Petersen και Hubbart, 2021).

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθούμε ότι πλέον τα ΜΠ αποτελούν μέρος του (υπο-)στρώματος του εδάφους, καθώς επηρεάζουν τον τρόπο λειτουργίας των μικροοργανισμών στα εδαφικά περιβάλλοντα, με αυτό το τρόπο που θα επιτρέψει την δημιουργία ενός νέου μοναδικού στρώματος που ονομάζεται πλαστίσφαιρα (plastisphere) (Rillig et al. 2023). Με τη πάροδο των ετών παρατηρηθήκαν αξιοσημείωτες αλλαγές στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους μεταξύ των ΜΠ, αλλά και του περιβάλλοντος του εδάφους. Για παράδειγμα, η ύπαρξη της επιφάνειας των μικροπλαστικών ΡΕ βρέθηκε να φιλοξενεί περισσότερα βακτήρια που αποικοδομούν το πλαστικό και τους παθογόνους μικροοργανισμούς, σε σχέση με τα γύρω εδάφη (Huang et al., 2019). Παρόμοια αντίδραση συνέβη και στα βακτήρια που αποικοδομούν την επιφάνεια των μικροπλαστικών κάτι το οποίο παρατηρήθηκε επίσης σε τομέα αποσυναρμολόγησης ηλεκτρονικών αποβλήτων (Chai et al., 2020). Το φαινόμενο των διάφορων μικροπλαστικών εντός της βιομάζας του εδάφους ρίχνει φως στην επιλογή αλλά και αλληλεπίδραση που αναπτύσσεται μεταξύ των μικροοργανισμών με σκοπό την βιοδιάσπαση των μικροπλαστικών.

Μια ποικιλία ανθρώπινων δραστηριοτήτων και περιβαλλοντικών πηγών, όπως η χρήση πλαστικού σε εδαφοκάλυψη, η διάθεση ακατέργαστων λυμάτων, η προσθήκη ιλύος αποχέτευσης, η κομποστοποίηση και η ατμοσφαιρική εναπόθεση, η βροχόπτωση, μπορεί να συμβάλει στη μόλυνση του εδάφους από μικροπλαστικά (Corradini et al., 2019; Horton et al., 2017; Weithmann et al., 2018). Για παράδειγμα, οι Corradini et al. (2019) ανέφεραν ότι οι συγκεντρώσεις μικροπλαστικών στα εδάφη φτάνουν τα 10.400 σωματίδια/κιλό στην περιοχή Metropolitana της Χιλής, και οι μετρήσεις αυξάνονταν με τον ρυθμό εφαρμογής ιλύος. Από αυτές τις πηγές, η χρήση πλαστικού για εδαφοκάλυψη, που έχει γίνει μια παγκοσμίως διαδεδομένη γεωργική πρακτική, θα μπορούσε ενδεχομένως να αποτελέσει μια σημαντική πηγή μικροπλαστικών στο χερσαίο περιβάλλον (Astner et al., 2019; Piehl et al., 2018). Περίπου 20 εκατομμύρια εκτάρια γεωργικής γης σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν εδαφοκάλυψη με πλαστικό, με την Κίνα να κατέχει τη μεγαλύτερη αναλογία (~90%) (Steinmetz et al., 2016). Η αφαίρεση όλων των πλαστικών από τα χωράφια απαιτεί πολύ χρόνο και εργατοδύναμη, και έτσι τα πλαστικά φύλλα ή τα μέρη τους συχνά παραμένουν σκόπιμα ή ακούσια στα γεωργικά εδάφη, όπου μπορεί να γίνουν εύθραυστα και να διασπαστούν σε μικρότερα μεγέθη σωματίδια (Astner et al., 2019). Επομένως, η ακατάλληλη απόρριψη γεωργικών πλαστικών ταινιών μπορεί να οδηγήσει στη συσσώρευση μικροπλαστικών στα γεωργικά εδάφη, θέτοντας σε κίνδυνο τη χερσαία άγρια ζωή και την επισιτιστική ασφάλεια (Ramos et al., 2015).

5. Τι Είναι τα Μικρο-Νανο-Μακρο Πλαστικά ;

Με την εισαγωγή του ορού να προέρχεται από τον Thompson το 2004, αναφερόμενος στα πλαστικά με μέγεθος σωματιδίου <5 mm (Arthur et al., 2008). Παράλληλα λαμβάνοντας προσοχή από την επιστημονική κοινότητα για τις επιπτώσεις που επιφέρουν στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία, (Thompson et al., 2004). Η αρχή της ερευνάς στο αντικείμενο των μικροπλαστικών είχε ξεκινήσει με μικρά βήματα.

Σύμφωνα με τους Moore et al. (2011), οι οποίοι κατηγοριοποίησαν τα πλαστικά σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθός τους. Τα μακροπλαστικά είναι μεγαλύτερα από 5 mm, ενώ τα μικροπλαστικά είναι μικρότερα από 5 mm. Οι Horton και Barnes (2020) και Betts (2008) περιέγραψαν τα μικροπλαστικά ως έχοντα διάμετρο μικρότερη από 5 mm, ενώ οι Thompson et al. (2015) τα καθόρισαν με διάμετρο μικρότερη από 10 mm. Ο Derraik (2002) εκτίμησε το μέγεθος τους να είναι μεταξύ 2 και 6 mm, οι Van Ryan et al. (2021) πρότειναν διαμέτρους μικρότερες από 2 mm, και ορισμένες έρευνες πρότειναν το μέγεθος να είναι μικρότερο από 1 mm για αυτά τα σωματίδια. Αν και οι επιστήμονες θεωρούν τα μικροπλαστικά ως σωματίδια πλαστικού μικρότερα από 5000 μm (Hartmann et al., 2019), διάφοροι συγγραφείς δείχνουν ότι τα περισσότερα ή όλα τα σωματίδια που εξάγονται από διαφορετικά περιβαλλοντικά συμπλέγματα είναι κάτω από 1000 μm είναι πιο αποδεκτά (Rezaei et al., 2019; Yang et al., 2021; Li et al., 2022). Ακόμα πρόσφατες μελέτες αναφέρουν, κάποια πλαστικά σωματίδια στο περιβάλλον εκτιμήθηκαν να είναι σημαντικά μικρότερα ή σε νανομετρική κλίμακα (1 μm) δηλαδή μικρότερο από 0,1 χιλιοστό και αναφέρθηκαν (100 nm ή 1000 nm) (NPs) ως "Νανοπλαστικά" (Percival et al., 2014) (Costa et al., 2016).

Ως μια πιο ευρεία και αποδεκτή διατύπωση τα μικροπλαστικά ορίζονται ως πλαστικά ρυπογόνα με μέγεθος σωματιδίου μικρότερο από 5 mm. Από την αρχή του αιώνα, τα μικροπλαστικά έχουν καταταγεί ως ρυπαντές. Τα οποία συναντώνται σε μικροσκοπικές μορφές/σχήματα όπως ίνες, κόκκους και πλαστικά σωματίδια, επίσης ακανόνιστα σχήματα ως θραύσματα, φιλμ, σφαίρες/σφαιρίδια και άλλες μορφές (Zhu et al. 2019, Lindeque et al., 2020) (Andrady, 2011). Αντίστοιχα η μέτρηση τους εκφράζεται ως σωματίδια/κίλο (Khana et al., 2023).

Συγκεκριμένα τα μικρά πλαστικά αντικείμενα που συναντώνται περισσότερο, προέρχονται από πλαστικά διαφόρων τύπων και χημικών συνθέσεων. Τα οποία περιλαμβάνουν το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS), το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), το πολυαμίδιο (PA), το πολυαιθυλένιο-τερεφθαλικό (PET), το νάιλον (Nylon), Πολυαιθυλένιο Χαμηλής Πυκνότητας (LDPE) και είναι οι κυριότεροι τύποι πλαστικών που εντοπίζονται στο περιβάλλον (Issac & Kandasubramanian, 2021; Zhu et al., 2019).

Όμως σε αυτό το σημείο είναι βασικό να αναφέρουμε την πορεία της δημιουργίας των μικροπλαστικών, τα όποια δημιουργούνται από συγκεκριμένες διαδικασίες που εξαρτώνται από την αποσύνθεση των πλαστικών (Wang et al., 2022). Οι μηχανισμοί

της αποικοδόμησης τους διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τη φυσική, τη χημική και την βιοαποικοδόμηση. Στην πρώτη κατηγορία δηλαδή της φυσικής αποικοδόμησης μπορούν να πραγματοποιηθούν διαδικασίες όπως οι θερμικές μεταβολές, η μηχανική θραύση, η έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία και φυσικά η μηχανική θραύση. Όσο αφορά τη χημική αποσύνθεση οφείλεται στο όζον και την καταλυτική αποικοδόμηση. Για τη τελευταία κατηγορία η αποσύνθεση των μικροαστικών εξαρτάται από τις ενζυμικές δράσεις των μικροοργανισμών (Lin et al. 2022).

Βεβαία η (φωτο)διάσπαση της επιφάνειας του πολυμερούς μέσω της δράσης του υπεριώδους φωτός, εκτός από τις διακυμάνσεις στη θερμοκρασία, θεωρείται ότι είναι οι κυριότερες διαδικασίες που ελέγχουν τη θραύση των πλαστικών, και συνεπώς τον σχηματισμό μικροπλαστικών σε χερσαία συστήματα (Horton et al., 2017b).

Στην πλειοψηφία τους τα πολυμερή διασπώνται σε μικρότερα σωματίδια και καταλήγουν σε μικροπλαστικά. Βεβαία με την περαιτέρω αποδόμηση τους μπορούν να φτάσουν και σε νανοεπίπεδη διάσταση, τα λεγόμενα νανοπλαστικά (Waring et al., 2018). Η αλλαγή στην διάσταση και το σχήμα επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες, όπως είναι η μηχανική τριβή, η βιολογική αποδόμηση, η υπεριώδης ακτινοβολία και μεταβολές της θερμοκρασίας, αυτά πραγματοποιούνται κυρίως κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (Andrady 2011, Rillig 2012) (Masura et al., 2015).

Στα πολυμερή γίνονται προσθήκες κατά τη διαδικασία παραγωγής περιλαμβάνοντας κυρίως οξυνιστές, λιπαντικά, σταθεροποιητές φωτός, σταθεροποιητές θερμότητας, χρωστικές ουσίες, αντιστατικούς παράγοντες, αντιοξειδωτικά και πλαστικοποιητές, μεταξύ άλλων (Sridharan et al. 2022). Αυτές οι ουσίες δεν συνδέονται χημικά με το πολυμερές υλικό, οπότε μπορούν να αποδεσμευτούν αρκετά ευκολά (Boots et al. 2019; Mishra et al. 2023; Zhang et al. 2020a). Καθώς τα μικροπλαστικά γερνούν και αποικοδομούνται, οι τοξικές προσθήκες πλαστικού εκλύονται στο περιβάλλον του εδάφους, προκαλώντας πολυάριθμες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Παραδείγματα αυτών των προσθέτων περιλαμβάνουν το ευρέως χρησιμοποιούμενο Bisphenol A (De Souza Machado et al. 2018) και τα Βρωμιωμένα καθυστερητικά φλόγας (Br-PS flame retardants) (Gulizia et al. 2023), τα οποία έχουν αποδειχθεί ότι έχουν τοξικές επιπτώσεις στους οργανισμούς. Η διάσπαση των πλαστικών στο περιβάλλον, σε συνδυασμό με την απελευθέρωση χημικών προσθέτων από αυτά τα πλαστικά, μπορεί να οδηγήσει σε εκθετική αύξηση του τοξικού φορτίου, δημιουργώντας ένα λεγόμενο "τοξικό φορτίο μικροπλαστικών" (Rillig et al. 2021).

Η αναγνώριση και η κατηγοριοποίηση τους στο περιβάλλον είναι οι πιο δύσκολες διαδικασίες της αντιμετώπισης των μικροπλαστικών. Αυτό συμβαίνει επειδή είναι εύκολα να καλυφθούν χρησιμοποιώντας οργανικά ή άλλα χημικά στοιχεία. Ένα ακόμα δύσκολο έργο είναι η απομάκρυνση τους από το ίδιο το περιβάλλον (Barcelo & Pico, 2019).

Σχετικά με τις ιδιότητες τους είναι αδιάλυτα στο νερό, μη διασπώμενα, επίσης μπορούν να μετακινούνται με ευκολία στην επιφάνεια του εδάφους και διαθέτουν διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες, οι οποίες είναι καθοριστικές για την βιοδιαθεσιμότητά τους στους οργανισμούς (Leslie, 2014; Rocha-Santos και Duarte, 2015).

Κατανοούμε πλέον πως οι διεργασίες που πραγματοποιούνται επηρεάζουν και την οργανική ύλη του εδάφους, καθώς υπάρχει αλληλεπίδραση με τα διαφορά ΜΠ και αυτό αποτελεί ακόμα ένα παράγοντα απορρόφησης εξωτερικών ρύπων, καθιστώντας τα με αυτό το τρόπο φορείς ρύπων (Sun et al., 2020) (Yu et al., 2019). Αλλά όχι μόνο καθώς λειτουργούν ως φορείς για βακτήρια, επιβλαβείς ενώσεις και βαρέα μέταλλα (Prata et al., 2020; Zha et al., 2022). Συνεπώς, είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί η περιβαλλοντική έκθεση των ΜΠ και η ικανότητα τους να προκαλέσουν οικολογικές επιπτώσεις που οδηγούν σε τοξικότητα και βιοσυσσώρευση. Για το λόγο αυτό οι κίνδυνοι που επιφέρουν στα οικοσυστήματα, αποτελούνται από μια σειρά κλιμακωτών επιπτώσεων (Browne et al., 2015). Ποσό μάλλον με την ευρεία χρήση του πλαστικού και την συσσώρευση του η ανησυχία των επιπτώσεων μεγεθύνεται και κατ' επέκταση εξαπλώνεται δυνητικά και στους οργανισμούς (He et al., 2018; Lwanga et al., 2018; Meng et al., 2023). Αποτελώντας κίνδυνο ακόμα και για την ανθρώπινη υγεία σε ορισμένες περιπτώσεις (Liu et al., 2022).

Οι καταστροφικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών αποτελούν μια αυξανόμενη ανησυχία για την υγεία του ανθρώπου λόγω της ρύπανσης του περιβάλλοντος, από το νερό, από το έδαφος έως και τον αέρα. Φυσικά θα πρέπει να εξεταστεί και να αξιολογηθεί η διαδικασία της βιοσυσσώρευσης των μικροπλαστικών από τα φυτά που καλλιεργούνται σε τέτοια περιβάλλοντα, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της έκθεσης των καταναλωτών σε μικροπλαστικά και η πιθανή πρόσληψη τους μέσω της τροφικής αλυσίδας (Canha et al., 2023). Βέβαια σε επόμενο κεφάλαιο θα αναπτυχθούν λεπτομερώς οι πηγές και οι επιπτώσεις των ΜΠ που εισέρχονται στο οικοσύστημα.

5.1. Κατηγορίες Μικροπλαστικών

Τα μικροπλαστικά εμφανίζονται στο φυσικό περιβάλλον με δύο βασικές μορφές. Η πρώτη κατηγορία αφορά τα πρωτογενή μικροπλαστικά, τα οποία κατασκευάζονται εξ αρχής σε μικροσκοπικά μεγέθη. Παραδείγματα αυτών είναι οι μικροσκοπικοί κόκκοι που χρησιμοποιούνται σε καλλυντικά προϊόντα ή και προϊόντα καθαρισμού δέρματος, ακόμα σε αυτή τη κατηγορία βρίσκονται τα συνθετικά σωματίδια που απαντώνται σε βιομηχανικά καθαριστικά (Galloway et al., 2017; De Souza Machado et al., 2018). Η δεύτερη μορφή, που είναι και η πιο συνηθισμένη που συναντάμε στο περιβάλλον και προέρχεται από την αποδόμηση πλαστικών απορριμμάτων. Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει φθαρμένα υλικά όπως παλιά ελαστικά, υφάσματα, πλαστικά είδη μιας χρήσης, βινύλια και ηλεκτρονικές συσκευές (Browne et al., 2011; Horton et al., 2018; Townsend et al., 2019).

Επιπλέον, τα μικροπλαστικά διακρίνονται σε τρεις επιμέρους τύπους με βάση την προέλευσή τους ως εξής: πρωτογενή, δευτερογενή και νανοπλαστικά (Chubarenko et al., 2020).

i. Πρωτογενή μικροπλαστικά

Τα πρωτογενή μικροπλαστικά είναι σωματίδια που κατασκευάζονται σκόπιμα σε μικροσκοπικό μέγεθος και εντοπίζονται είτε σε καταναλωτικά προϊόντα όπως τα καλλυντικά, είτε σε πρώτες ύλες για τη βιομηχανία, όπως η παραγωγή ακατέργαστων πελλετών ρητίνης (γνωστά και ως *nurdles*) τα οποία χρησιμοποιούνται στην παραγωγή πλαστικών υλικών (Everaert et al., 2018; Li et al., 2021; Phuong et al., 2021). Οι βασικές πηγές αυτών των μικροπλαστικών περιλαμβάνουν τα λύματα από πλυντήρια που μεταφέρουν ακρυλικές ίνες από ρούχα, μικροσωματίδια από καλλυντικά, καθώς και τις βιομηχανικές πρώτες ύλες (Klages et al., 2015; Anderson et al., 2016).

Τα μικροαπορρίμματα διακρίνονται σε δύο βασικές ομάδες: (i) τα θερμοπλαστικά υλικά σε μορφή σκόνης ή πελλετών και (ii) τα μικρά θραύσματα από αποσπασμένα πλαστικά αντικείμενα (Koelmans et al., 2014). Η ποσότητα των πρωτογενών μικροπλαστικών που καταλήγουν στο περιβάλλον εξαρτάται από παράγοντες όπως ο πληθυσμός και η οικονομική δραστηριότητα κάθε χώρας. Για παράδειγμα, σύμφωνα με μελέτη των Wang et al. (2019), η Κίνα εμφανίζει τη μεγαλύτερη παραγωγή τέτοιων σωματιδίων, με κάθε πολίτη να υπολογίζεται ότι χρησιμοποιεί μέχρι και 538 γραμμάρια μικροπλαστικών ετησίως. Η πηγή τους εντοπίζεται κυρίως στη βιομηχανική παραγωγή, όπου πλαστικά αντικείμενα δημιουργούν σκόνη ή άλλα μικροσωματίδια (Sharma & Chatterjee, 2017). Πολλά από τα προϊόντα καθημερινής χρήσης αντιλαμβανόμαστε πως περιέχουν πρωτογενή μικροπλαστικά (Li, 2018; Li et al., 2021).

ii. Δευτερογενή μικροπλαστικά

Σε αντίθεση με τα πρωτογενή, τα δευτερογενή μικροπλαστικά προέρχονται από τη διάσπαση μεγαλύτερων πλαστικών απορριμμάτων λόγω φυσικών, χημικών, θερμικών ή βιολογικών διεργασιών (Li, 2018; Llorca et al., 2020). Αυτά τα σωματίδια είναι φθαρμένα, ευθραστα και με ακανόνιστα σχήματα, περιγράφονται επίσης ως έχοντα αιχμηρές, ακανόνιστες και σπασμένες άκρες (Corrock et al., 2017) (Gregory, 1983; Corrock et al., 2017). Έχουν ποικιλία σχημάτων – όπως γωνιώδη ή υποστρογγυλά – και προκύπτουν από την έκθεση πλαστικών στην υπεριώδη ακτινοβολία, σε υψηλές θερμοκρασίες ή σε μηχανική καταπόνηση (Klages et al., 2015). Μπορεί επίσης να οφείλονται σε συνδυασμό μηχανικών δυνάμεων και φωτοχημικών αντιδράσεων που προκαλούνται από την ηλιακή ακτινοβολία (Klages et al., 2015). Οι συνδυασμένες μηχανικές και χημικές διαδικασίες φθοράς έχουν ακόμη μεγαλύτερη επίδραση, οδηγώντας στην εύθραυστη διάσπαση των πρωτογενών και στην μετέπειτα δημιουργία δευτερογενών μικροπλαστικών (Brandon et al., 2016; Sharma & Chatterjee, 2017).

Καθώς διασπώνται, η επιφάνειά τους αυξάνεται, διευκολύνοντας την ανάπτυξη των βιοφίλμ (Oberbeckmann et al., 2015). Σύμφωνα με έρευνες, πολυμερή όπως το πολυαιθυλένιο είναι πιο επιρρεπή σε φθορά από άλλα, όπως το πολυπροπυλένιο (Brandon et al., 2016).

Τα μικροπλαστικά, είτε πρωτογενή είτε δευτερογενή, θεωρούνται σήμερα σημαντικός περιβαλλοντικός ρύπος. Ενώ τα πρωτογενή είναι σκόπιμα κατασκευασμένα σε μικρό μέγεθος και έχουν συνήθως σφαιρική μορφή – όπως σε προϊόντα προσωπικής φροντίδας ή

καθαριστικά –, τα δευτερογενή προκύπτουν από την αποδόμηση μεγαλύτερων πλαστικών και εμφανίζουν πιο ποικιλόμορφα και ακανόνιστα σχήματα (Revell et al., 2021).

iii. Νανοπλαστικά

Τα νανοπλαστικά είναι τα μικρότερα σε μέγεθος πολυμερή σωματίδια, με διάμετρο κάτω των 100 νανομέτρων. Δημιουργούνται ως προϊόν περαιτέρω αποδόμησης που εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία επιταχύνει τον ρυθμό φωτοοξείδωσης, κάνοντάς το πιο εύθραυστο. Τα πολυμερή υποβάλλονται περαιτέρω σε αποδόμηση από τη φθορά και την κίνηση των κυμάτων της ακτινοβολίας ή άλλων φυσικών διεργασιών, γεγονός που τα θρυμματίζει σε μικροσκοπικά (0,1 - 1000 μm) και νανομετρικά (0,1 μm) σωματίδια (Cózar et al., 2014). Η βασική πρόκληση με τα νανοπλαστικά είναι ότι, λόγω του απειροελάχιστου μεγέθους τους, δεν είναι δυνατό να φιλτραριστούν ή να ανιχνευθούν με τις συμβατικές τεχνικές. Για το λόγο αυτό, η δημιουργία τυποποιημένων τεχνικών για την αναγνώριση αυτών των νανοσωματιδίων στο περιβάλλον είναι ιδιαίτερη πρόκληση (Gaylarde et al., 2021).

Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι παραμένει ασαφές πώς αυτά τα νανοσωματίδια επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. Μερικές αναπάντητες ερωτήσεις σχετικά με τα νανοσωματίδια περιλαμβάνουν την επίδρασή τους στην προετοιμασία τροφίμων, επίσης αν μπορούν να μετατραπούν από μικροπλαστικά σε νανοπλαστικά μετά την κατάποση και τι μπορεί να συμβεί με αυτά αφού εισέλθουν στο σώμα. Ο λόγος για αυτό είναι οι κίνδυνοι που συνδέονται με ορισμένα παραγόμενα νανοσωματίδια. Επιπλέον, δεν υπάρχουν αναγνωρισμένες διαδικασίες ή μέθοδοι για την ανίχνευση των νανοπλαστικών στα τρόφιμα, ιδιαίτερα στα θαλασσινά, με τα παρόντα δεδομένα (Iñiguez et al., 2018).

5.2. Τα μικροπλαστικά ως Παράγοντας Ρύπανσης

Από τους μεγαλύτερους παράγοντες ρύπανσης θεωρούνται τα πλαστικά, καθώς είναι αρκετά διαδεδομένα υλικά στη χρήση τους με αρκετά δύσκολη να είναι η διάσπαση και η καταστροφή τους. Επόμενο είναι η συσσώρευση τους στον πλανήτη μας, προκαλώντας έντονη ανησυχία τόσο ως προς τους τρόπους αντιμετώπισης της ρύπανσης που προκαλούν, όσο και τη συσσώρευση τους λόγω των χαμηλών ποσοστών της ανακύκλωσης, η οποία εξαρτάται από την αυξημένη ανθεκτικότητα που έχουν ως ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους. Αφού επέλθει η διάσπαση του πλαστικού στο περιβάλλον, όπως αναφέραμε αργότερα προκύπτει η διάσπαση του στα λεγόμενα μικροπλαστικά (Yang et al., 2021). Με τη σειρά τους να έχουν πλέον αναγνωριστεί ως οργανικοί ρύποι, τόσο στο υδάτινο όσο και στο χερσαίο περιβάλλον (Bouaicha et al., 2022).

Ως ρυπαντικός παράγοντας στο περιβάλλον, η ερευνά των μικροπλαστικών σε διαφορετικά περιβάλλοντα μεταξύ τους, όπως είναι τα ύδατα, τα εδάφη και η ατμόσφαιρα έχει αναπτυχθεί αρκετά τα τελευταία έτη. Με τον έντονο προβληματισμό, προέκυψε η ερευνά με σκοπό τη καλύτερη διερεύνηση των συνέπειων που επιφέρουν τόσο στο περιβάλλον, όσο και σε ποίκιλα υγειονομικά ζητήματα, τα οποία χρήζουν απαραίτητη προσοχή καθώς σε πολλές περιπτώσεις εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα (Ren et al., 2022).

Η ρύπανση από τα πλαστικά υλικά αναγνωρίστηκε όπως γνωρίζουμε πρώτα σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία πληθώρας ερευνών που στόχευαν στη διερεύνηση της παρουσίας, της προέλευσης και της πορείας που θα είχαν τα πλαστικά

στα θαλασσιά ύδατα, συγκεκριμένα στα ιζήματα, τους οργανισμούς και μικροοργανισμούς, όπως και στις ακτές (Lusher, 2015). Βέβαια τα στοιχεία για τα μέρη που ρέει γλυκό νερό είναι ελάχιστα με λίγα δεδομένα για ρύπανση τους (Eerkes-Medrano et al., 2015; Dris et al., 2015b; Horton et al., 2017). Ακόμα λιγότερα είναι όμως τα δεδομένα ρύπανσης από τα πλαστικά και τα μικροπλαστικά που τα τελευταία χρόνια γίνονται έρευνες ως προς τις επιπτώσεις που επιφέρουν. Πιο συγκεκριμένα ο αριθμός των δημοσιεύσεων για τη ρύπανση από μικροπλαστικά αυξάνεται ταχέως τα τελευταία χρόνια, ειδικά μετά το 2014 (He et al., 2018).

Σύμφωνα με μελέτες στις ήπειρους της Αφρικής, της Ασίας, της Βόρειας Αμερικής, της Ευρώπης και της Νότιας Αφρικής έχουν παρατηρηθεί συνέπειες της συσσώρευσης των μικροπλαστικών (Li, 2018). Αυτό συμβαίνει λόγω της ευκολίας της μετακίνησης των μικροπλαστικών, της δυνατότητας βιοσυσσώρευσης από το ίδιο το περιβάλλον αλλά και από τα έμβια οντά, ακόμα και της ανθρώπινης πρόσληψης τους. Συνεπώς των άγνωστων επιπτώσεων που θα ακολουθήσουν στην ανθρώπινη υγεία (Canha et al., 2023).

Ως μια ιδιότητα που χαρακτηρίζει τα πολυμερή, είναι ότι θεωρούνται βιομηχανικά αδρανή, αυτό σημαίνει πως υπάρχει έντονη ενίσχυση της αντίστασης τους στην πλήρη αποδόμηση και φθορά από την συνηθισμένη διαδικασία της διάβρωσης, αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει στα πολυμερή να έχουν διάρκεια ζωής ακόμα και αιώνες χωρίς να διασπώνται πλήρως με τη πάροδο του χρόνου (Li et al., 2018). Βέβαια αυτό δεν εξαιρεί το γεγονός ότι μπορεί να αποτελέσουν απειλή για το περιβάλλον, λόγω της τοξικότητας των προσθέτων που εμπεριέχει η σύστασή τους, καθώς κατά την δημιουργία τους απαιτούνται ποικίλα προσθετά και χημικά συστατικά που ενδέχεται σε πολλές περιπτώσεις να είναι τοξικά και να απορροφώνται από το περιβάλλον καθιστώντας τα αρκετά επιβλαβή (Besseling et al., 2012; Karbalaee et al., 2018; Rillig, 2012; Huerta Lwanga et al., 2016).

Όταν αναφερόμαστε στο περιβάλλον δεν αποτελεί μόνο το φυσικό αλλά και το ανθρωπογενές, παραδείγματος χάρη το αστικό, περιαστικό, γεωργικό ακόμα και πάρκα ή τα άλση. Είναι πιθανό ότι τα περισσότερα γεωργικά και αστικά εδάφη να είναι τώρα μολυσμένα από πλαστικά καθώς όπως έχει παρατηρηθεί υπάρχουν αρκετές ανθρώπινες δραστηριότητες που επιφέρουν κίνδυνο ρύπανσης.

Η διακύμανση της αφθονίας των μικροπλαστικών σε διαφορετικές περιοχές μπορεί να εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως οι πρακτικές που χρησιμοποιούνται στη γεωργία, η λίπανση των φυτών σε κήπους ή αγρούς και η παρουσία άλλων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όπως φυσικά και τα σημεία δειγματοληψίας που διαφέρουν. Επιπλέον, η πηγή ρύπανσης και η συγκεντρώσεις σε πλαστικό επηρεάζουν εξίσου την κατανομή της μικροπλαστικής ρύπανσης. Αναμενόμενο είναι λοιπόν να υπάρχουν πολλές πηγές μικροπλαστικής ρύπανσης (MPs) γύρω από προαστιακούς δρόμους και κατοικημένες περιοχές (Kole et al., 2023; Wagner et al., 2018). Οι πόλεις πιο συγκεκριμένα ενδέχεται να έχουν σημαντικά επίπεδα ρύπανσης ή "σημεία ρύπανσης", όπως λέγονται διαφορετικά λόγω συγκεκριμένων πηγών ρύπανσης.

Παραδείγματος χάρη ύπαρξη διάφορων επιχειρήσεων, όπως για παράδειγμα αποτελούν τα συνεργεία πλυσίματος αυτοκινήτων και τα καταστήματα υλικών κατασκευής κοντά στους τόπους δειγματοληψίας στις προαστιακές οδούς, τα οποία ενδέχεται να απορρίπτουν πλαστικά απορρίμματα ή και να εκκρίνουν λύματα που εμπεριέχουν ΜΠ στις γεωργικές εκτάσεις αποτελούν αποδείξεις ύπαρξης την υψηλής συγκέντρωσης τους. Ακόμα τα δίκτυα

πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας ήταν διαδεδομένα δίπλα στις προαστιακές οδούς αλλά και στις γεωργικές εκτάσεις για να καλύψουν το γυμνό έδαφος. Μετά από παρατεταμένη έκθεση στον ήλιο, μπορεί να διαλυθούν και να σχηματίσουν μικρές ίνες λόγω φωτοοξείδωσης που υφίστανται, οι οποίες στη συνέχεια διασπείρονται στο έδαφος. Για να αντιληφθούμε καλύτερα τους λογούς που βρίσκονται τα ΜΠ στις προαστιακές οδούς και δρόμους με κυκλοφορία, τα σωματίδια από τα ελαστικά των αυτοκινήτων έχουν αναγνωριστεί σε αρκετά σημεία τα τελευταία χρόνια, κυρίως αυτό συμβαίνει λόγω της τριβής της επιφάνειας των ελαστικών με το οδόστρωμα (Kole et al. 2023; Wagner et al., 2018).

Δε θα μπορούσαμε να παραβλέψουμε το γεγονός ότι η ρύπανση από μικροπλαστικά μπορεί να προέλθει από τα λύματα και τους ποταμούς, καθώς και από την ατμοσφαιρική καθίζηση, διότι υπάρχουν σωματίδια ΜΠ στην ατμόσφαιρα. (Qiu et al., 2020; Wright et al., 2020). Οι πηγές και η μεταφορά, καθώς και οι περιβαλλοντικές αλληλεπιδράσεις που σχετίζονται με την παρουσία τους, παραμένουν επίσης ελάχιστα κατανοητές (Akdogan και Guven, 2019).

Επομένως τα μικροπλαστικά είναι αναμενόμενο να αποτελών από τους κυρίαρχους ρυπογόνους παράγοντες στον πλανήτη μας και αποτελούν μέζον θέμα προσοχής όπως και περισσότερης ερευνάς, όπως φυσικά και εύρεση αμέσων μέτρων αντιμετώπισης της ρύπανσης που προκαλούν (Bessa et al., 2019; Braun et al., 2021; Canha et al., 2023).

Για να ελαττωθεί η μόλυνση από τα μικροπλαστικά, τα βιοδιασπώμενα μικροπλαστικά έχουν λάβει τη θέση τους με εκτεταμένη προσοχή και χρήση. Επειδή τα βιοδιασπώμενα μικροπλαστικά έχουν μικρότερη διάρκεια, αναμένεται να έχουν πιο σημαντικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα του εδάφους, όσον αφορά τις μεταβολές στη βιομάζα του εδάφους, τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, την απόδοση των φυτών κ.λπ. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκαν περισσότερο σημαντικές επιδράσεις στην ανάπτυξη του σιταριού για τα βιοδιασπώμενα μικροπλαστικά σε σύγκριση με τα συμβατικά μικροπλαστικά PE, ίσως λόγω της μικροβιακής ακινητοποίησης (Qi et al. 2018).

5.3. Οι Ιδιότητες των Μικροαστικών και οι Επιρροές τους ως προς τα Εδαφικό Οικοσύστημα

Με την προσθήκη των ΜΠ στα εδάφη και στα ύδατα οι ιδιότητες τους αλλάζουν καθώς εισέρχονται τα πολυμερή στοιχεία, αναμενόμενο είναι να υπάρχει διαφορετική συμπεριφορά στα χερσαία οικοσυστήματα, καθώς αποτελεί ένα σύνθετο σύστημα. Λόγω αυτής της πολυπλοκότητας, οι διεργασίες και οι ιδιότητες του εδάφους επηρεάζονται, καθώς επίσης και η δομή του, αλλά και οι μικροοργανισμοί που περιλαμβάνονται στο εδαφικό οικοσύστημα επηρεάζονται από την ύπαρξη του ρυπογόνου στοιχείου. Παραδείγματος χάρη είναι πιθανό να διατάξουν τον κύκλο απορρόφησης των θρεπτικών ουσιών ή τον κύκλο του άνθρακα (Nizzetto et al. 2016b). Ακόμα μπορούν να επιδεινώσουν την ποιότητα του εδάφους αλλά και την παραγωγή καλλιεργειών (Ali et al., 2021; Huang et al., 2021). Είναι επόμενο λοιπόν τα ΜΠ να αποτελέσουν σημαντικές απειλές όχι μόνο στο ίδιο το έδαφος, αλλά και σε άλλους οργανισμούς όπως είναι τα φυτά και λοιπά έμβια οντά (Liu et al., 2022c) Οι αλλαγές που επέρχονται μετά την εισαγωγή των μικροπλαστικών είναι βέβαιο πως θα έχουν επήρεια στην μικροβιακή δραστηριότητα, όπως ακόμα και αλλαγή στην μικροβιακή κοινότητα του εδάφους (De Souza Machado et al., 2019).

Βασικό είναι να επισημάνουμε πως τα χαρακτηριστικά των μικροαστικών έχουν ρολό σε όλες τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται. Μερικά χαρακτηριστικά αποτελούν το σχήμα, το μέγεθος, ο τύπος του πολυμερούς και η συγκέντρωση, επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό από όσο θα πιστεύαμε (Zhao et al., 2022).

Βρέθηκε πως τα σωματίδια μικρού μεγέθους προκαλούν σημαντικές επιπτώσεις στους οργανισμούς του εδάφους όταν καταναλώνονται από αυτούς. Για παράδειγμα, μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή των οργανισμών, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο αντιδράσεις οξειδωτικού στρες και βιολογική τοξικότητα (Chae και An, 2018· Ali et al., 2021). Επιπλέον, προκαλούν βλάβες στο έντερο και στη μικροβιακή δομή του, όταν απορροφούνται από ζωντανούς οργανισμούς (Huerta Lwanga et al., 2016· Rodríguez-Seijo et al., 2018· Jin et al., 2019).

Αυτό συμβαίνει επειδή είναι αρκετά εύκολο να καταναλωθούν λόγω του μικρού τους μεγέθους. Όμως από μόνο του ένα τέτοιο δεδομένο δε μπορεί να μας οδηγήσει αυτόματα στο συμπέρασμα πως μπορεί να αυξηθεί η βιοδιαθεσιμότητα των ΜΠ και αποτελεί σημείο προβληματισμού (Bergmann et al., 2017; Tsang et al., 2017).

Επιπλέον ένας λόγος είναι πως δεν υπάρχουν επαρκείς έρευνες σχετικά με τη σύγκριση της περιεκτικότητας με τη διαφορετική κατανομή του μεγέθους των μικροπλαστικών. Οι σπάνιες έρευνες όμως περιέχουν και διαφορετικά δεδομένα, καθώς η χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων μικροπλαστικών διαφέρει ανάλογα με τον τύπο και τη σύσταση του εδάφους. Σύμφωνα με τις έρευνες που υπάρχουν στην διάθεση μας, συμπεραίνουμε πως τα χαλαρά αμμώδη εδάφη περιείχαν λιγότερα μικροπλαστικά από τα εδάφη με άργιλο και πηλό. Αυτά τα στοιχεία υποδηλώνουν ότι τα μικροπλαστικά σε εδάφη με περισσότερα κλάσματα πηλού και πηλού, τα οποία είναι πιο σταθερά εδάφη έχουν την ιδιότητα να είναι λιγότερο επιρρεπή στη απορροή, καθώς συγκρατούν το έδαφος και τα στοιχεία του. Σε αντίθεση με τα αμμώδη εδάφη, που η κίνηση των σωματιδίων είναι πιο εύκολη λόγω της σύστασης του, προκαλώντας πιο γρήγορη κίνηση των στοιχείων που βρίσκονται σε τέτοια εδάφη. Αυτό σημαίνει πως τα μικροπλαστικά θα μετακινηθούν κάθετα πιο ευκολά στα βαθύτερα στρώματά του εδάφους. Το αποτέλεσμα φαίνεται πως θα είναι, η διάθεση των μικροπλαστικών να είναι μειωμένη στα επιφανειακά στρώματά του εδάφους (Rillig et al., 2017).

Αναμενόμενο είναι λοιπόν τα πλαστικά και μικροπλαστικά να επηρεάζουν εξίσου τον εδαφικό βιόκοσμο και τις ιδιότητες του, παραδείγματος χάρη εμποδίζοντας την κίνηση των οργανισμών που ζουν σε έδαφος (Kim and An 2019).

Μια άλλη ικανότητα των ΜΠ αποτελεί η μεταβολή των βασικών χαρακτηριστικών του εδάφους όπως είναι η συνοχή, η πυκνότητα, η πορωτικότητα και η ικανότητα συγκράτησης νερού, όλα αυτά επηρεάζουν σταδιακά την κατανομή των πλαστικών σωματιδίων στο εδαφικό προφίλ. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά έχουν τη δυνατότητα να μιμούνται λειτουργίες της οργανικής ύλης στο έδαφος όπως η συγκράτηση του εδάφους και η σταθερότητα των αδρανών (O'Connor et al., 2019). Αρκετά πιθανό αποτελεί ότι ορισμένα σχήματα και μεγέθη μικροπλαστικών έχουν περισσότερο αντίκτυπο σε τέτοιες είδους διαδικασίες (Lehmann et al., 2021).

Άλλες φυσικές ιδιότητες του εδάφους που επηρεάζονται αποτελούν τη μείωση της πυκνότητας του εδάφους (De Souza Machado et al., 2019; Ingraffia et al., 2022), την αύξηση της απορροής και της συγκράτησης του νερού (Ng et al., 2021) ή και ακόμα αλλαγές στη

ποσότητα υγρασίας (Dang et al., 2019), εξίσου και η μείωση της οργανικής ύλης (Feng et al., 2022; Liang et al., 2021).

Από χημική άποψη έχει παρατηρηθεί ότι η ρύπανση από μικροπλαστικά τείνει, να αυξάνει τα επίπεδα του pH (Zhao et al., 2021). Να αλλάζει τα επίπεδα θρεπτικών ουσιών όπως: άνθρακας, άζωτο, φώσφορος (C, N και P) (Dang et al., 2019), προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο σύμφωνα με τους Sooriyakumar et al. (2022) την απώλεια των θρεπτικών ουσιών του έδαφους. Συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί η μείωση του διαθέσιμου φώσφορου (Li και Liu, 2022) ή ακόμα τροποποίηση του κύκλου του αζώτου στα εδάφη (Rong et al., 2021).

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να εστιάσουμε στις διεργασίες του άνθρακα του εδάφους που επηρεάζεται. Ως γνωστόν τα μικροπλαστικά αποτελούνται κατά κύριο λόγο από τον άνθρακα και έτσι έχουν το ρολό της αποθήκευσης του στο έδαφος, επηρεάζοντας παράλληλα το περιεχόμενο του και τη σύνθεση της οργανικής ύλης του εδάφους (Rillig και Lehmann 2020). Αυτό σημαίνει πως τα ΜΠ είναι αμέσως επόμενο να μεταβάλουν τη σύνθεση των δεξαμενών του άνθρακα, καθώς εισάγονται ανακυκλώσιμα και ευάλωτα κλάσματα άνθρακα, όπως τα διαλυτά πρόσθετα. Κατά αυτό το τρόπο συνεισφέρουν στην συνεισφορά της ενεργοποίησης της δεξαμενής του άνθρακα. Ωστόσο ο ρυθμός της εισαγωγής των ΜΠ και του άνθρακα στο έδαφος επιφέρει αρκετές επιδράσεις στην εδαφική οργανική ύλη του εδάφους. Οι επιδράσεις αυτές βέβαια μπορούν να είναι είτε θετικές είτε αρνητικές στην ανοργανοποίηση της οργανικής ύλης του εδάφους, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται και η σταθερότητα του εδαφικού άνθρακα (Zhang et al. 2023a). Έτσι το περιεχόμενο της οργανικής ύλης είναι αρκετά πιθανό να αυξηθεί μετά την εισαγωγή των μικροπλαστικών στο εδαφικό οικοσύστημα. Ένα αξιοσημείωτο στοιχείο αποτελεί πως τα μικροπλαστικά μπορούν να αναγνωριστούν και να ανιχνευτούν ως άνθρακας με τις τρέχουσες σύγχρονες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να ποσοτικοποιήσουν την εδαφική οργανική ύλη (Kim et al. 2021; Li et al. 2022a).

Είναι εφικτό λοιπόν να επηρεαστούν διάφοροι παράμετροι, όπως να γίνει αύξηση ή μείωση τους, (Lozano et al., 2021), ή απλώς αυτοί οι παράγοντες να παραμείνουν αμετάβλητοι (Li et al., 2021). Ακόμα σημαντικό ρολό έχουν ο τύπος, το σχήμα, η δόση, το μέγεθος και η διάρκεια έκθεσης των πολυμερών αυτών. Βέβαια θα πρέπει να γνωρίζουμε πως υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ όλων των συνιστωσών που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος, όπως λογού χάρη θα μπορούσε η αυξημένη μικροβιακή δραστηριότητα να προκληθεί από μεγάλες αλλαγές στο pH του εδάφους (Santini et al., 2022). Αυτό εξηγείται από την ποικιλία των οργανικών χημικών ενώσεων που μπορούν να επηρεάσουν σοβαρά τη δομή (Lang et al., 2020) και τις δραστηριότητες των μικροβιακών κοινοτήτων (Shen et al., 2019).

Σύμφωνα με τους De Souza Machado et al. (2018) παρατήρησαν ότι τα σφαιρικά θραύσματα πολυαιθυλενίου (PE) δεν προσκολλώνται σταθερά στα εδαφικά σωματίδια, σε αντίθεση το PET, το οποίο είναι γραμμικό και λειτουργεί ως δομικό πλαίσιο για τον σχηματισμό μακροσυσσωματωμάτων. Επιπλέον, παρατηρήθηκε μείωση της ογκομετρικής πυκνότητας, ιδιαίτερα στα δείγματα με PET, ενώ δεν καταγράφηκε αντίστοιχη μεταβολή στα εδάφη που είχαν δεχθεί πολυαιθυλένιο. Σε διαφορετική μελέτη, οι Zhang και Liu (2018) ανέφεραν ότι το 72% των πλαστικών που συλλέχθηκαν από γεωργικά εδάφη ήταν ενσωματωμένα σε συσσωματώματα. Τα ινώδη μικροπλαστικά βρέθηκαν σε διπλάσια ποσότητα στα μικροσυσσωματώματα συγκριτικά με τα μακροσυσσωματώματα, ενώ οι μεμβράνες και τα πλαστικά θραύσματα εντοπίζονταν κυρίως στα μεγάλα και μικρά μακροσυσσωματώματα.

Σχετικά με τις βιολογικές ιδιότητες τα πολυμερή είναι εφικτό να μεταβάλλουν ακόμα και την αναπνοή το εδάφους εδάφους (Zhang et al., 2022; Zhao et al., 2021). Ακόμα είναι εφικτό να πραγματοποιήσουν μεταλλοποίηση του εδαφικού άνθρακα (Rillig et al., 2021; Xiao et al., 2022). Με τα παρόντα στοιχεία των ερευνών καθώς πρόκειται για πεδίο προς διερεύνηση, δεν έχουν παρατηρηθεί αλλαγές ή αλλοιώσεις στην σύσταση, υφή, πυκνότητα του εδάφους (Lehmann et al., 2019; Yan et al., 2021) ή στην ηλεκτρική αγωγιμότητα του (Brown et al., 2022; Qi et al., 2020).

Αρκετές έρευνες έχουν συμπεράνει πως τα πολυμερή αποτελούν τοξικό παράγοντα σε ένα περιβάλλον όταν οι συγκεντρώσεις τους είναι αυξημένες. Ποσό μάλλον έχοντας οξεία τοξική επίδραση στους οργανισμούς του εδάφους, όπως οι νηματώδεις (Kim et al., 2020).

Αυτό αποδεικνύεται από μελέτες όπως αυτή σε συγκεκριμένο είδος γεωσκόλικα του *Eisenia fetida*, στη περίπτωση αυτή προκλήθηκε οξειδωτικό στρες και ευρήματα συγκεντρώσεων πολυ(αιθυλενίου) σε επίπεδα μεταξύ 62 και 1000 mg.kg⁻¹ (Rodríguez-Seijo et al., 2018). Ακόμα παραπάνω έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο είδος γεωσκόλικα, αποδεικνύουν μη ύπαρξη οξειδωτικού στρες αλλά υπήρξαν νευροτοξικές αποκρίσεις με τις συγκεντρώσεις πολυ(αιθυλενίου) στα εδάφη να κυμαίνονται 100 και 500 mg.kg⁻¹ (Chen et al., 2020b). Επιπρόσθετα σε είδος σαλιγκαριού (*Achatina fulica*), παρατηρήθηκε μείωση της πρόσληψης τροφής και εκκρίσεων του με τις συγκεντρώσεις να βρίσκονται περίπου 140 mg.kg⁻¹. Σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών φαίνεται πως οι επιπτώσεις που ακολουθήσαν μπορεί να μην ήταν θανατηφόρες για τους οργανισμούς αλλά αρκετά επικίνδυνες και αυτές αφορούν ειδικά σε διάφορα είδη δακτυλιοσκωλήκων και νηματωδών (Ya et al., 2021b). Όμως λιγότερες μελέτες δείχνουν την τοξικότητα σε αρθρόποδα και φυτά με εξίσου αρκετές επιπτώσεις (Qi et al., 2018· Selonon et al., 2020).

Επιπλέον τα MPs στο εδαφικό οικοσύστημα μπορούν να απορροφήσουν ανόργανους και οργανικούς ρύπους (Cao et al., 2021a; Qi et al., 2020). Επόμενο είναι λοιπόν και τα βακτήρια να προσκολληθούν στην επιφάνεια των μικροπλαστικών, λόγω της μεγάλης τους επιφάνειας. σε αντίθετη περίπτωση όταν τα επίπεδα των θρεπτικών ουσιών βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα να μην δημιουργείται προσκόλληση των βακτηρίων. Ακόμα επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό οι βιογεωχημικοί κύκλοι, όπως είναι ο κύκλος του αζώτου, προκαλώντας μεταβολή της αφθονίας και της δραστηριότητας των μικροβίων του εδάφους και παράλληλα περιορίζοντας τη δραστηριότητα των ενζύμων (Dong et al., 2021).

Μια αξιοσημείωτη ιδιότητα των ΜΠ είναι πως ως φορείς των ρυπαντών ουσιών, διατίθενται στη βιοκοινότητα του εδάφους (Hüffer et al. 2019). Ως συνέπεια οι επιπτώσεις που επέρχονται με την αύξηση των ρύπων έχουν ακόμα μεγαλύτερο αντίκτυπο στο περιβάλλον του εδάφους. Επιπλέον, το πλαστικό σε οποία μορφή και σχήμα να είναι, λειτουργεί ως προσροφητής και άλλων τοξικών ρύπων, όπως τα βαρέα μέταλλα, τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs) (Wang et al., 2017) τους πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs) (Hildebrandt et al., 2021; Hu et al., 2022a, 2022b). τα φάρμακα και φυτοφάρμακα, αλλά επίσης τα νανοσωματίδια και τα οργανικά αλογονίδια στην επιφάνειά τους, μαζί και άλλους οργανικούς ρύπους (Müller et al., 2018; Xu et al., 2018). Λειτουργώντας έτσι ως κύριοι φορείς για την εξάπλωση αυτής της ρύπανσης (Bhagat et al. 2021; Brennecke et al. 2016; Hildebrandt et al. 2020).

Βέβαια η παρουσία των ΜΠ στο έδαφος μπορεί να συγκεντρώσει φυτοφάρμακα λόγω της απορρόφησης στην επιφάνειά τους, οδηγώντας στη μεταφορά τους στο έδαφος, κάτι που

σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να έχει και θετικό αποτέλεσμα για τις καλλιέργειες στις αγροτικές εκτάσεις (Hüffer et al., 2019; Ramos et al., 2015)

Συγκεκριμένα το πολυμερή της κατηγορίας PVC ενδέχεται να δημιουργούν δυνητικές επιπτώσεις όσο αναφορά τις οικοσυστημικές υπηρεσίες, διαταράσσοντας σε μεγαλύτερο βαθμό τη μικροβιακή κοινότητα λειτουργώντας ως διαμεσολαβητής του άνθρακα και των θρεπτικών συστατικών του εδάφους. Έχει παρατηρηθεί πως ιδιότητα της ανθεκτικότητας του στο χρόνο, δεν επιτρέπει την αποδόμηση του και επομένως τη διάσπαση του στο έδαφος (Meng et al., 2021). Αυτό το γεγονός γεγονός επιφέρει σημαντικές συνέπειες στο χερσαίο περιβάλλον (Jayasekara et al., 2005). Εξαιρετικά σημαντικό να κατανοήσουμε τις περιβαλλοντικές συνέπειες των μικροπλαστικών PVC στις υπηρεσίες οικοσυστημάτων του χερσαίου περιβάλλοντος, ιδιαίτερα στη βιοποικιλότητα του εδάφους και στις συναφείς βιογεωχημικές διαδικασίες που εξελίσσονται.

Συνολικά παρατηρούνται πολυάριθμες και σε μεγάλο βαθμό αλλαγές στους μικροοργανισμούς του εδάφους, αφού είναι πλέον πιθανό να αναπτυχθούν και αποικίες στα μικροπλαστικά ζώντας, στην πλαστικόσφαιρα. Αυτό το περιβάλλον, πλέον ενισχύει τον ρολό των ΜΠ πέρα από φορέα ρυπαντών, πλέον ως φορέα ανθεκτικότητας των ρυπαντών στο έδαφος. Το αποτέλεσμα είναι να επηρεαστεί και ο κύκλος της βιοαποικοδόμησης των ΜΠ (Liu et al., 2022c; Wang et al., 2022; Ya et al., 2022)

Η εξήγηση που θα μπορούσε να δοθεί για αυτή την ιδιότητα της προσρόφηση θα μπορούσε να απαντηθεί ότι λόγω της επιφάνειας των μικροπλαστικών μπορούν να συγκεντρώσουν επάνω τους αλλά στοιχεία και μικροοργανισμούς, ακόμα η υδρόφοβη φύση τους επιτρέπει τη συγκέντρωση και άλλων τοξικών χημικών ουσιών. Δε θα μπορούσαμε να παραλείψουμε φυσικά πως η αντίσταση στην αποικοδόμηση τους, τα καθιστά για ακόμα ένα λόγο ιδανικά ως φορείς (Bradney et al., 2019), θέτοντας μια μακροπρόθεσμη απειλή για την περιβαλλοντική - οικολογική ασφάλεια και την ασφάλεια των τροφίμων (Sridharan et al., 2021).

Αυτό το σημείο είναι κατάλληλο για να εξηγήσουμε τη διαδικασία της αποδόμησης, η οποία προέρχεται από τις μικροβιακές δράσεις στην προκείμενη περίπτωση. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα μικροπλαστικά αξιοποιούν τον άνθρακα που βρίσκεται στο έδαφος στις πολυμερείς αλυσίδες για την ανάπτυξη τους (Mohanani et al., 2020; Huang et al., 2023).

Συγκεκριμένα στην περίπτωση ξηρών περιοχών τα επίπεδα της οργανικής ύλης είναι χαμηλά, εξαιτίας αυτών των συνθηκών οι μικροοργανισμοί σε αυτές τις περιοχές καταφεύγουν καταφεύγουν στη μεταβολική χρήση ανθρωπογενών πηγών άνθρακα, όπως τα μικροπλαστικά (Marusenko et al., 2011).

Πιο λεπτομερώς τα μικροπλαστικά δημιουργούν τη πλαστίσφαιρα με αυτό να σημαίνει πως τα ΜΠ δημιουργούν κοινότητες από τη συγκρότηση των μικροοργανισμών γύρω τους και διαφέρουν από το περιβάλλον γύρω τους (Huang et al., 2019). Η σύνθεση αυτής της αποικίας των ΜΠ συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με την ποιότητα του εδάφους, καθώς αυτή η αλλαγή είναι εφικτή να διαταράξει το νιτρικό κύκλο στο έδαφος (Zhang et al., 2021). Υπάρχουν καθοριστικοί παράγοντες με κατάλληλους μηχανισμούς που οδηγούν στην διαμόρφωση της της μικροβιακής κοινότητας (Chen et al., 2021; Stegen et al., 2013). Τροποποιώντας έτσι τη σύνθεση και τη συγκρότηση της κοινότητας με τις αντιδράσεις που προκαλούνται. Παρ' όλα αυτά, οι σχέσεις και οι αλληλεπιδράσεις στην πλαστίσφαιρα της

μικροβιακής κοινότητας, παραμένουν μέχρι και σήμερα σε αρκετά σημεία μη κατανοητές (Li και Xiao, 2023).

Με τις έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί διαπιστώνεται πως τα βακτήρια αποτελούν την κυρίαρχη ομάδα μικροοργανισμών που έχουν την ικανότητα να διασπασουν οργανικού ή και ανόργανους ρύπους. Έτσι η ενίσχυση των δυνητικών παθογόνων βακτηρίων στην επιφάνεια των ΜΠ φαίνεται πως αποτελεί έναν αρκετά πιθανό παράγοντα στην διάδοση και ενίσχυση των γονιδίων ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά και στα γονίδια ανθεκτικότητας στα μέταλλα. η ικανότητα αυτή έχει καθοριστικό και σημαντικό ρολό στην φυσική επιλογή αλλά και διάδοση των γονιδίων ανθεκτικότητας (Liu et al., 2022; Song et al., 2019; Wang et al., 2020).

Συμπερασματικά ένα χερσαίο περιβάλλον που αποτελεί αποδέκτης των ΜΠ όπως το έδαφος, ενδέχεται μετά από χρονιά καθώς βρισκόταν στην θέση του αποδεκτή των μικροπλαστικών. Να δημιουργηθούν έπειτα ποικίλες εδαφικές σχέσεις με τις αντίστοιχες γνωστές αλλά και άγνωστες προς εμάς ακόμα συνέπειες. Τα μικρά σωματίδια πλαστικού πλέον ενδέχεται να αρχίσουν να υποδομούνται με τη πάροδο του χρόνου σε νανοπλαστικά είτε να επανεκκινηθούν (Hueffer et al., 2019; Hurley et al., 2018; Liu et al., 2014). Όταν αναφερόμαστε στην χρονική διάρκεια παραμονής τους στο έδαφος είναι δεδομένο πως η ικανότητα τους να παραμείνουν ανθεκτικά και ανεπηρέαστα στο χρόνο, τα επιτρέπει να παραμείνουν για μεγάλα εκτεταμένα χρονικά διαστήματα εκεί.

6. Οι Πηγές των Μικροπλαστικών: Γενικό Πλαίσιο

Γενικά τα μικρά σωματίδια πολυμερών μπορούν να εισέλθουν σε ποίκιλα περιβάλλοντα με διάφορους τρόπους. Οι πηγές που προέρχονται ξεκινάνε από την αυξημένη παραγωγή και έπειτα χρήση των πλαστικών προϊόντων μέχρι ακόμα και τη μη σωστή διαχείριση του με την δημιουργία γιγάντιων ποσοτήτων απορριμμάτων, τα οποία συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στη παρουσία τους στο περιβάλλον. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των μικροπλαστικών, όπως η αντίστασή τους στην αποικοδόμηση αλλά και ότι αποτελούν ρυπαντές στο περιβάλλον, μπορούν να αποτελούν τοξικό παράγοντα στο οικοσύστημα και στους οργανισμούς που περιβάλλονται σε αυτό. Επομένως, η κατανόηση των πηγών και των χαρακτηριστικών ρύπανσης των μικροπλαστικών αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την εφαρμογή αποτελεσματικών μέτρων προστασίας του περιβάλλοντος και τη μείωση της ρύπανσης από μικροπλαστικά (Guo et al., 2020).

Τα πλαστικά εφόσον εναποτεθούν στο περιβάλλον διασπώνται μετά από ποικίλες διεργασίες είτε αυτές αποτελούν φυσικές, είτε χημικές ή και βιολογικές καταλήγουν μετά από τη πάροδο του χρόνου να διασπώνται σε μικρότερα σωματίδια, ιδίου μεγέθους, με διαφορετικά ή και με ίδια σχήματα μεταξύ τους. Έτσι οι κατηγορίες που κατατάσσονται τα ΜΠ είναι τα πρωτογενή και δευτερογενή μικροπλαστικά (Duis και Coors, 2016; Thompson 2015). Για την ακρίβεια τα πρωτογενή τα οποία κατασκευάζονται για συγκεκριμένες εφαρμογές, στην κατηγορία αυτή βρίσκουμε προϊόντα όπως καλλυντικά, συσκευασίες φαρμάκων και βιομηχανικές και μηχανικές εφαρμογές (Auta et al., 2017). Αυτά τα σωματίδια πλαστικών που έχουν δημιουργηθεί πλέον είναι δύσκολο όχι μόνο να καταστραφούν αλλά είναι και δύσκολο να απομακρυνθούν από τα λύματα ακόμα και με τη χρήση διάφορων τεχνολογιών αποχέτευσης. Έτσι εφόσον εισέλθουν στα λύματα, είναι επόμενο να μεταφερθούν και να συσσωρευτούν στο περιβάλλον (Castañeda et al., 2014)

Με την δευτερογενή κατηγορία των μικροπλαστικών, η δόμηση τους προέρχεται από τη σταδιακή διάσπαση των μεγαλύτερων πλαστικών σε μικρότερα σωματίδια σε ποικιλία πολύπλοκων περιβαλλοντικών διεργασιών, που περιλαμβάνουν τους αβιοτικούς παράγοντες: άνεμο, θερμοκρασία, υπεριώδης ακτινοβολία. Αυτοί οι περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορεί να προκαλέσουν χημικές αλλαγές στα πλαστικά, κάνοντάς τα πιο εύθραυστα και τελικά οδηγώντας τα στη μεγαλύτερη συσσώρευση τους στο έδαφος (Cole et al., 2011; Rocha-Santos και Duarte, 2015). Μια ακόμα αίτια δημιουργίας δευτερογενών πλαστικών είναι η επαναλαμβανομένη ή και συνεχόμενη χρήση των πλαστικών, τα οποία είναι αρκετά πιθανό κατά τη χρήση να γίνει θραύση με αποτέλεσμα τη δημιουργία δευτερογενών μικροπλαστικών.

Σε γενικό πλαίσιο οι περιοχές που πλήττονται έντονα από τις ανθρωπογενής δραστηριότητες είναι οι αστικές και αγροτικές, με την ρύπανση να βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα (Büks και Kaupenjohann, 2020). Από τη μια τα μεταφορικά μέσα γενικότερα, ποσό μάλλον οι δρόμοι κυκλοφορίας είναι βασική αίτια πλαστικής ρύπανσης με την φθορά των ελαστικών και άλλων εξαρτημάτων των οχημάτων και σκαφών. Σε πρόσφατη σχετική αναφορά των Chen et al. (2020) παρουσιάζεται η κυκλοφορία των οχημάτων, η εκτεταμένη περιοχή και η μεγάλη κινητικότητα στους δρόμους ότι προκαλούν υψηλές συγκεντρώσεις ΜΠ, ως μια πηγή στα κοντινά εδάφη.

Σχετική ερευνά στην ολλανδικά αναφέρει πως με τις φθορές των ελαστικών των αεροπλάνων εκπέμπεται το 2% των συνολικών εκπομπών των μικροπλαστικών (Kole et al., 2017). Από την άλλη οι βιομηχανίες και οι χωματερές αποτελούν τις κυριότερες πηγές μικροπλαστικών (Fuller και Gautam, 2016; Qiu et al., 2020). Ως επι το πλείστον όμως τα δυο τελευταία συμβάλουν σε τεράστιο βαθμό. Οι πιθανές πηγές μπορεί να είναι η παραγωγή πλαστικών προϊόντων και παραπροϊόντων και τα υλικά συσκευασίας και κάθε άλλου προϊόντος στην βιομηχανική περιοχή. Εξαιτίας της ταχείας παραγωγής και κατόπιν απώλειας των πλαστικών σωματιδίων μέσω της παράνομης απόθεσης ή και της μη κατάλληλης διαχείρισης και ενδεχόμενος αξιοποίησης του γιγάντιου όγκου απορριμμάτων (De Souza Machado et. al. 2018).

Μέρη όπως χωματερές να περιέχουν τεράστιες ποσότητες από πλαστικά υφάσματα, συσκευασίες λιπασμάτων και μολυσμένοι ιλύες αποβλήτων και αστικά οργανικά απόβλητα (όπως κομπόστ και αλλά απόβλητα). Το σύνολο των αποβλήτων επιτρέπει την εισχώρηση των μικροπλαστικών και νανοπλαστικών στο φυσικό περιβάλλον. Επίσης η χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων με σκοπό την άρδευση, όπως επίσης η εναπόθεση τους μέσω της ατμοσφαιράς δηλαδή ξηρή ή και υγρή καθίζηση (δηλαδή βροχή και χιόνι) από την ατμόσφαιρα, αλλά και της επιφανειακής απορροής, επιδεινώνουν τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Δηλαδή μέσω της πορείας του νερού δημιουργούνται αμέσως διαδρομές για τα μικροπλαστικά (Dris et al., 2017; Sun et al., 2019; Oladoja και Unuabonah, 2021).

Μπορούμε να παραθέσουμε μερικά παραδείγματα για τις ποσότητες των ΜΠ και από που προέρχονται αυτές. Αρχικά λαμβάνοντας υπόψη την ερευνά των Hartline et al. (2016) βρέθηκαν ότι υπήρχαν στοιχεία από μικροΐνες σε πλυντήρια ρούχων με συγκέντρωση 1471–2121 μικροΐνες (σωματίδιο) ανά ένδυμα. Σε μια πρόσφατη μελέτη αναφέρεται πως βρέθηκαν 30.000–465.000 μικροΐνες ανά τετραγωνικό μέτρο (m²) (ή 175–560 μικροΐνες/γραμμάριο) από ενδύματα υφασμάτων (Belzagui et al., 2019). Επιπλέον οι τεχνητοί τάπητες γρασιδιού που είτε προστίθενται σε κήπους είτε σε γήπεδα δραματίζουν έναν αρκετά σημαντικό ρόλο στην παραγωγή των δευτερογενών μικροπλαστικών, με την εκτίμηση να κυμαίνεται από 760 έως 4500 τόνους/έτος (Kole et al.,

2017; Lassen et al., 2015; Magnusson et al., 2016). Επομένως, διάφοροι τύποι μικροπλαστικών εκλύονται σε διάφορους φυσικούς βιότοπους και οικοσυστήματα. Σε εκτίμησης μελετών που έχουν προηγηθεί αναφέρθηκαν συγκεντρώσεις στο επιφανειακό έδαφος βιομηχανικής περιοχής στην Αυστραλία φτάνουν το 0,03-6,7% (Fuller και Gautam, 2016). Επιπροσθέτως στην Κίνα πάνω από 80% των εκπομπών που περιέχουν 209,7 τρισεκατομμύρια σφαιρίδια μικροαστικών προέρχονται από εκροές των Μονάδων Επεξεργασίας Λυμάτων και καταλήγουν μετέπειτα στο υδάτινο περιβάλλον (Horton et al., 2017).

Ως κυρίαρχες πηγές μικροπλαστικών με βασικό παράγοντα τις ανθρώπινες δραστηριότητες αποτελεί ο τομέας της γεωργίας. Με την προσθήκη οργανικών αποβλήτων όπως είναι το κομποστ, τα οργανικά λιπάσματα αποτελούν αρκετά πιθανό ενδεχόμενο να περιέχουν μολυσμένα μικροσωματίδια. Φυσικά και αλλά αγροτικά προϊόντα, όπως είναι σχοινιά, δοχεία και αλλά εργαλεία. Εξίσου η χρήση των καλυμμάτων πλαστικού, το λεγόμενο mulch (4-8 μm πάχος) εφαρμόζεται ευρέως για τη βελτίωση της ανάπτυξης των φυτών και της αποδοτικότητας χρήσης νερού (Qi et al., 2018). Αν και η χρήση τους είναι εξαιρετικά αποτελεσματική, μετά το πέρας της συγκομιδής των καλλιεργειών είναι πολύ δύσκολο να ανακτηθούν από το έδαφος και σπάνια ανακυκλώνονται. Το σύνολο αυτών των μεθόδων βελτίωσης της γεωργίας συμπεριλαμβάνονται στους πιο συνηθισμένους τρόπους εισόδου των ΜΠ στο έδαφος (Steinmetz et al., 2016; Huerta Lwanga et al., 2016; Mahon et al., 2017).

Το έδαφος αποτελεί πλέον μια γιγάντια δεξαμενή μικροπλαστικών με ποικίλες πηγές όπως τα μολυσμένα ύδατα, η εφαρμογή λυματολάσπης, οι συσκευασίες λιπασμάτων και διάφορων αγροτικών προϊόντων, το νερό που χρησιμοποιείται για την άρδευση. Επόμενο είναι η επιφανειακή απορροή των υδάτων συγκαταλεγόμενων και των πλημμυρών που σε πολλές περιπτώσεις κατευθύνονται στους δρόμους και σε κατοικήσιμες περιοχές (Bläsing και Amelung, 2018; He et al., 2018). Πηγές έπειτα περιλαμβάνουν τη κακή διαχείριση των εκροών από μονάδες καθαρισμού αστικών λυμάτων ή από διάφορες εγκαταστάσεις απόθεσης και επεξεργασίας απορριμμάτων, καθώς και τα εργοστάσια επεξεργασίας πλαστικών. Βέβαια μεγάλες ποσότητες συγκεντρώσεων προέρχονται από τις συνθετικές ίνες υφασμάτων από τις παράγωγες του fast fashion και κατά το πλύσιμο και το στέγνωμα των ρούχων μεταφέρονται στο περιβάλλον. Παράλληλα τα προσωπικά προϊόντα περιποίησης και καθαρισμού εμπεριέχουν εξίσου πλαστικά σωματίδια που μεταφέρονται στο περιβάλλον μέσω της έκκρισης των λυμάτων (Chen et al. 2022c; Chen et al. 2020; Chen et al. 2023a; Feng et al. 2020; van den Berg et al. 2020).

Στο περιβάλλον μπορούν να εισέλθουν λοιπόν είτε άμεσα από τις αντίστοιχες πηγές καθώς έχουν παραχθεί, είτε έμμεσα από την αποδόμηση των πλαστικών και μακροπλαστικών, την ατμοσφαιρική απόθεση στο υδάτινο ή χερσαίο περιβάλλον (Qi et al., 2020). Το αποτέλεσμα σε αυτή τη περίπτωση είναι κοινό, διότι τα περιβάλλοντα επιβαρύνονται και γίνονται σταδιακά δεξαμενές μικρο- και νανοπλαστικών (Blasing and Amelung, 2018; Ng et al., 2018; Zhu et al., 2019).

Ακόμα και χώροι του φυσικού περιβάλλοντος όπως δάση, προστατευόμενες περιοχές, καταφύγια που αποτελούν σχεδόν ανεπηρέαστα από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, έχουν βρεθεί συγκεντρώσεις μικροπλαστικών έως και 0,002% (Scheurer και Bigalke, 2018). Βέβαια με τη πλούσια βλάστηση που βρίσκεται στο φυσικό περιβάλλον μπορεί να θεωρηθεί ως ένα φυσικό φίλτρο, βέβαια δεν περιορίζονται μόνο εκεί καθώς στο αστικό περιβάλλον μπορούν να επιδράσουν εξίσου ως ένας μηχανισμός κατά της ρύπανσης (Diener και Mudu, 2021). Οι κώμες των δέντρων, οι βλαστοί, οι ρίζες μπορούν να

συγκρατήσουν μέρος των μικροπλαστικών και να συμβάλουν στην μείωση της μεταφοράς τους μέσω της απορροής του νερό ή της διάβρωσης από τον άνεμο ή άλλους αβιοτικούς παράγοντες της εκάστοτε περιοχής (Müller et al., 2020).

Οι συγκράτηση και η μεταφορά στο περιβάλλον όμως δεν αποτελεί τρόπο μείωσης των μικροπλαστικών, καθώς ως βασική ιδιότητα όπως αναφέραμε σε προηγούμενο σημείο αποτελεί η εξαιρετική αντοχή τους. Για το λόγω αυτό το πλαστικό αποτελεί ένα τόσο δημοφιλή υλικό, το οποίο ακόμα και στην διαδικασία της αποικοδόμησης που πραγματοποιείται στο περιβάλλον παρουσιάζει σταθερότητα και δε βιοδιασπάται ευκολά (He et al. 2023). Παραμένει έτσι στο φυσικό περιβάλλον για αρκετά χρονιά, με ελάχιστες αλλοιώσεις, προκαλώντας πολυεπίπεδες επιπτώσεις (Ng et al., 2018; Rillig και Lehmann, 2020; Pan et al. 2023).

Αν ανατρέξουμε ιστορικά και παρατηρήσουμε τις έρευνες που προηγήθηκαν σχετικά με τις επιπτώσεις που προκαλούνται από τα πλαστικά, θα παρατηρήσουμε ότι τα αποτελέσματα αφορούν σε μεγάλο βαθμό την ρύπανση από την απόρριψη πλαστικών απορριμμάτων και αποβλήτων, καθώς και την κακή διαχείριση των χωματερών και των χώρων υγειονομικής ταφής (Duis και Coors, 2016).

Ωστόσο τα τελευταία έτη το επίκεντρο στρέφεται στις ανησυχίες που θα επέλθουν στο περιβάλλον από τις τεχνικές και πρακτικές του αγροτικού τομέα. Με τις τεράστιες ποσότητες παραγόμενων καλλιεργειών βρίσκονται σε προτίμηση πρακτικές που θα έχουν όσο το δυνατόν πιο σίγουρο αποτέλεσμα, με τις εφαρμογές πλαστικών καλυμμάτων πολυαιθυλενίου, σωλήνων νερού και πλαστικών καλυμμάτων θερμοκηπίων να έχουν αρχίσει ήδη να προκαλούν ανησυχίες (Steinmetz et al., 2016; Brodhagen et al., 2017; Zhang και Liu, 2018).

Ερωτήματα δημιουργήθηκαν για τις συνέπειες που θα προκληθούν από την στιγμή που τα μικροπλαστικά βρεθούν στο περιβάλλον, ποσό μάλλον στα εδαφικά το οποία είχε την λιγότερη προσοχή και τα τελευταία χρονιά υπάρχει μεγαλύτερη διερεύνηση επι του θέματος (Ya et al., 2021a, 2021b; Zhang et al., 2022). Τα εδάφη που έχουν δεχτεί ρύπανση με ποικίλες διεργασίες να συμβαίνουν στα στρώματά του, όπως και αυτή των πλαστικών σωματιδίων με οργανικούς ρύπους, βαρέα μέταλλα, μικροοργανισμούς είναι αρκετά σημαντικό να κατανοήσουμε. Με τις προσθήκες των πολυμερών στοιχείων στο έδαφος είναι εφικτό να απελευθερωθούν περισσότεροι ρύποι, όπως μπορεί να συμβεί με ορισμένα μόρια που ανήκουν στις οικογένειες των φθαλατών ή των διφαινυλοεξόλων, δημιουργούν περιβαλλοντικά προβλήματα (Li et al., 2021). Παρακάτω θα διερευνηθούν αναλυτικότερα οι κυρίες πηγές εισαγωγής στο ατμοσφαιρικό, υδάτινο και χερσαίο περιβάλλον με επεξήγηση των τρόπου εισαγωγής τους και κατόπιν κίνησης τους στο περιβάλλον. Με την παρουσία τους να είναι πανταχού παρόντα είναι σίγουρο πως η πρόληψη αποτελεί την μεγαλύτερη προτεραιότητα που θα έπρεπε να ενισχύσουμε, διαφορετικά δεν θα επιτευχθεί όσο υπάρχουν σε τέτοιο βαθμό και έκταση οι ανθρωπογενής δραστηριότητες.

6.1. Εισαγωγή στην Ατμόσφαιρα

Αρχικό σημείο της κατανομής των ΜΠ στο πλανήτη μας είναι η ατμόσφαιρα, κάτι που προκαλεί προβληματισμό είναι η ρύπανση που προκαλείται ακόμα και από αυτό το τρόπο διάδοσης των σωματιδίων στο αέρα. Τα τελευταία χρονιά δόθηκε αυτή η αφορμή για

περαιτέρω ερευνά σχετικά με τις επιπτώσεις των πλαστικών σωματιδίων που βρίσκονται στο αέρα και κατ' επέκταση στον άνθρωπο (Jenner et al., 2022).

Σε μια περίπτωση μελέτης με θερμικό αναπνευστικό μοντέλο με όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση την εισπνοή μικροπλαστικών σε εσωτερικό χώρο. Βρέθηκαν σωματίδια μεγέθους 11 έως 237 μm και με τις συγκεντρώσεις τους να κυμαίνονται από 1,7 έως 16,2 σωματίδια ανά κυβικό μέτρο (m^3). Η μορφή τους αποτελούνταν κυρίως από ίνες και θραύσματα, με σύσταση πολυμερούς το πολυέστερ (81%), ακολουθούμενο από πολυαιθυλένιο (5%) και νάιλον (3%). Το αποτέλεσμα της ερευνάς παρουσίασε ότι το σύνολο των ΜΠ βρισκόταν περίπου 4% από τα οργανικά σωματίδια που εισπνέονται. Τα υπόλοιπα αποτελούνταν από πρωτεϊνικά ή κυτταρινούχα σωματίδια. Δεδομένου ότι τα σωματίδια εισπνέονται και οι άνθρωποι εκτίθενται σε αυτά που αιωρούνται στον εσωτερικό αέρα, δίνοντας έτσι δυνητική σημασία για την υγεία (Abbasi et al., 2019). Διαφορετική περίπτωση ερευνάς στο Κουίνσλαντ της Αυστραλίας, μετρήθηκαν μικροπλαστικά σε αέρα από εσωτερικούς χώρους μεγέθους 20 μm –5 mm, συγκεκριμένα μέρη λήψης δεδομένων αποτέλεσαν: παιδικός σταθμός ($2,25 \pm 0,38 \text{ MP/m}^3$), γραφείο ($1,20 \pm 0,14$), σχολείο ($1,03 \pm 0,40$), όχημα ($0,20 \pm 0,14$). Βρέθηκαν ίνες, τύπου PET σε ποσοστό 98% και μεγέθους 71–4.950 μm . με τις υψηλότερες συγκεντρώσεις να παρατηρούνται σε παιδικούς σταθμούς, εξαιτίας των υφασμάτων και παιχνιδιών. Επιπλέον εκτιμάται ότι ο μέσος ενήλικας εισπνέει περίπου 3.200 σωματίδια ετησίως (Hossain et. al., 2024).

Σχετικά με τον τεράστιο όγκο υφασμάτων που παράγεται από συνθετικά και πλαστικά υλικά ειδικότερα τα δυο τρίτα των παραγομένων ινών αποτελούνται από τα εκάστοτε υλικά. Σύμφωνα με τους Trainic et al. (2020) οι ινώδεις μικροπλαστικές ύλες φθείρονται μέσω φωτοοξείδωσης και έπειτα θρυμματίζονται περαιτέρω όταν προστίθεται η διάτμηση του ανέμου. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται και εκτοξεύονται μικροσκοπικά σωματίδια μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα (Amato-Lourenço et al., 2020).

Υπάρχουν αναφορές για θραύσματα πάνω από τη στεριά, τις παραλίες και σε απομακρυσμένα θαλάσσια οικοσυστήματα, ακόμα και σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς τον ανθρώπινο παράγοντα (Allen et al., 2021). Οι έκταση που λαμβάνουν και τα μέρη που μπορούν να βρεθούν αιτιολογούνται από την ευκολία που υπάρχει στο να ταξιδέψουν πιο μακριά και από τα κανονικά σωματίδια σκόνης, καθώς είναι πιο λεπτά και μικρά από τα σωματίδια εδάφους και μπορούν να απελευθερωθούν στον αέρα (Katsnelson, 2015).

Ακόμα πιθανές πηγές που αιτιολογούν την παρουσία στον αέρα ειδικά σε αστικά περιβάλλοντα είναι η κυκλοφορία λόγω φθοράς των ελαστικών. Σε αντίστοιχη ερευνά βρέθηκαν σωματίδια μικροπλαστικών σε αστικούς κήπους λαχανικών με την πιο πιθανή εξήγηση ειδικά σε σημεία πόλεων με σημαντικά επίπεδα κυκλοφορίας (Canha et. al., 2023).

Μια επεξηγεί της διασποράς τους αποτελεί ότι τα εδάφη έχουν την ικανότητα να αποτελέσουν πηγή της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης των μικροπλαστικών και να μεταφερθούν με αυτόν τον τρόπο σε άλλα περιβάλλοντα, συμβάλλοντας έτσι στον κύκλο μεταφοράς τους (Zhang et al., 2020).

Θα μπορούσαμε να παραθέσουμε μερικά παραδείγματα που αφορούν τις συγκεντρώσεις στον εσωτερικό χώρο. Μελέτη στο Ισλαμαμπάντ στο Πανεπιστήμιο Επιστημών και Τεχνολογίας του Πακιστάν διερεύνησε τα επίπεδα σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Στους εσωτερικούς χώρους τα στοιχεία που βρέθηκαν λεπτομερώς έχουν ως εξής: στις

αίθουσες διδασκαλίας ($6,12 \text{ MP/m}^3$), ακολουθούμενες από διαδρόμους ($4,94 \text{ MP/m}^3$) και εργαστήρια ($1,96 \text{ MP/m}^3$). Ενώ στους εξωτερικούς χώρους τα επίπεδα ήταν εντυπωσιακά χαμηλότερα $0,93 \pm 0,32$ σωματίδια/ m^3 . Το σύνολο των ΜΠ αποτελούνταν από ίνες και ειδικότερα οι τύποι πολυμερών αποτελούνταν από: PET, PE, PP, και PS. Στο πλαίσιο της ερευνάς βρέθηκαν σημάδια φθοράς και αποσύνθεσης στα μικροπλαστικά, τόσο από τη πάροδο του χρόνου, όσο και από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες (Rashid et al., 2023).

Δε θα έπρεπε να εστιάσουμε σε μικρή χωρική κλίμακα μόνο, αγνοώντας τις συγκεντρώσεις σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα στην ατμόσφαιρα. Για την καλύτερη κατανόηση της κατανομής τους στην ατμόσφαιρα θα αναφερθούμε σε μερικές περιπτώσεις. Στο Παρίσι σε δείγματα που συλλέχθηκαν από ταράτσες, βρέθηκαν 118 σωματιδίων μικροπλαστικών ανά m^2 ανά ημέρα. Με τα χαρακτηριστικά τους να είναι ότι αποτελούνταν από ίνες σε ποσοστό 90%, μεγέθους ενός χιλιοστού και παραπάνω στην πλειοψηφία τους (Dris et al., 2016). Στο Λονδίνο μελέτες ατμοσφαιρικής απόθεσης δείχνουν 575–1.008 σωματίδια/ m^2 /ημέρα σε δείγματα που έχουν ληφθεί από ταράτσες (Ageel et al., 2024). Ακόμα στοιχεία μικροπλαστικών βρέθηκαν σε υψόμετρο 2.900 μέτρων στις Γαλλικές Άλπεις με συγκέντρωση 0,09–0,66 ΜΠ/ m^3 στον αέρα. Η παρουσία τους δε θα έπρεπε να προκαλεί έκπληξη αλλά προβληματισμό όσο αφορά την εξάπλωση τους. Αποτελεί απόδειξη σαφώς πως η μεταφορά των μικροπλαστικών μέσω του ανέμου μπορεί να τα μεταφέρει σε τεράστιες αποστάσεις, ακόμα και αρκετά απομακρυσμένες που θα δε θα περιμέναμε να συναντήσουμε ακόμα και να επεκταθούν και στην στρατόσφαιρά, όχι μόνο στην ατμόσφαιρα (Allen et al., 2019).

Εφόσον τα σωματίδιά αυτά μπορούν να ταξιδέψουν στον αέρα δεν μένουν μόνο στην ατμόσφαιρα, αλλά όπως θα περιμέναμε θα κατέληγαν στο περιβάλλον, είτε αυτό είναι το υδάτινο, είτε το χερσαίο. Έτσι παρασύρονται και εναποτίθενται σε ποικίλες επιφάνειες, αυτό αποτελεί έναν τρόπο που καταλήγουν στο περιβάλλον δηλαδή μέσω της αερομεταφοράς. Διαφορετικός τρόπος πραγματοποιείται μέσω της ξερής απόθεσης, προσδοκώμενος τρόπος καθώς η βαρύτητα οδηγεί στην εναπόθεση τους στο περιβάλλον. Εξίσου η φυσική καθίζηση συμπεριλαμβάνεται σε αυτή τη κατηγορία με βασική λεπτομέρεια πως εδώ παρατηρούνται μορφές των ΜΠ να αποτελούνται από ίνες (Brahney et al., 2020). Αλλιώς η υγρή απόθεση μέσω των κατακρημνισμάτων οδηγούν τις συγκεντρώσεις των μικροπλαστικών τόσο σε έδαφος όσο και στο νερό, με την παρατήρηση τους να βρίσκονται ως επι το πλείστον στην βροχή και στον χιόνι. Το κοινό αποτέλεσμα αποτελεί την συσσώρευση σε ποικίλες επιφάνειες και κατ' επέκταση στους οργανισμούς (Bucci et al., 2024)

Η συνεχόμενη και μη ελεγχόμενη ρύπανση των μικροπλαστικών καταλήγει στην ατμοσφαιρική εναπόθεση, η οποία μπορεί να συμβάλει στην δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων ΜΠ (Adhikari et al., 2024), φτάνοντας αρκετά μακριά από την αρχική γεωγραφική περιοχή της πηγής τους. Ωστόσο η αύξηση της ρύπανσης στα εδάφη εξαιτίας των ατμοσφαιρικών εναποθέσεων, αναμένεται να προκαλέσει μακροπρόθεσμες επιβλαβείς συνέπειες για τα χερσαία οικοσυστήματα (Wu et al., 2020a; Zhou et al., 2020; Yu et al., 2022).

6.2. Εισαγωγή στο Υδάτινο Περιβάλλον

Η πρώτη φορά που έγινε αναφορά για τα μικροπλαστικά στους ωκεανούς ήταν στις αρχές της δεκαετίας του 1970 (Carpenter και Smith Jr. 1972; Colton Jr. et al. 1974; Helmberger et

al. 2020). Έπειτα οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν επεκτάθηκαν στα ποταμιά και τις λίμνες και μετρά στα εδάφη (Rochman, 2018). Βέβαια έμφαση δινόταν στις συνέπειες και τις πηγές που προερχόταν τα μικροαστικά στους φυσικούς χώρους, αρκετή έμφαση δόθηκε στην αλληλεπίδραση τους με την υδρόβια ζωή της χλωρίδας και πανίδας των υδάτινων οικοσυστημάτων (Qi et al., 2020).

Με την εισαγωγή του πλαστικού στο περιβάλλον αρχίζει η σταδιακή συσσώρευση του αυτό αποδεικνύεται από την ανθεκτικότητά του, ακόμα και στους ωκεανούς αλλά και στα γλυκά νερά παρατηρούνται συγκεντρώσεις του (Barnes et al., 2009). Ανησυχητικό αποτελεί το γεγονός ότι περίπου 4,8 και 12,7 εκατομμύρια τόνοι απελευθερώνονται στα παγκόσμια ύδατα (Haward, 2020).

Τα σωματίδια πολυμερών είναι αρκετά εύκολο να μεταφερθούν από ένα οικοσύστημα σε εάν άλλο, έτσι και στους ωκεανούς αυτό πραγματοποιείται μέσω του ανέμου ή της ανύψωσης από το νερό μέσω της εξάτμισης, των υπογείων υδάτων αλλά και εξίσου από την δράση των κυμάτων σταδιακά δημιουργείται καιρική φθορά με την παραμονή τους σε ωκεανούς και παράλιες (Andrady, 2011). Έχει παρατηρηθεί πως τα χαρακτηριστικά των ΜΠ που βρίσκονται στον αέρα και στην επιφάνεια της θάλασσας, όσο πιο κοντά βρίσκονται σε ακτογραμμές τόσο μεγαλύτερη ομοιότητα θα υπάρξει μεταξύ τους. Αυτό δείχνει την δυναμική αλληλεπίδραση και εναλλαγή μεταξύ αέρα και θάλασσας, ιδιαίτερα κοντά στις ακτές (Ding et al., 2022a). Επι του παρόντος θέματος οι φυσαλίδες στην επιφάνεια της θάλασσας όταν εκρήγνυνται μπορούν να εμπεριέχουν ΜΠ και επόμενο είναι να μετάβουν στην ατμόσφαιρα (Masry et al. 2021). Αξιοσημείωτο αποτελεί το γεγονός πως με τη σύσταση του νερού και τα χαρακτηριστικά όπως είναι η αλατότητα, το ιξώδες είναι πιθανό να ρυθμίσουν την συσσώρευση των πλαστικών και την μετέπειτα μεταφορά τους από το νερό στον αέρα (Wang et al. 2021c).

Άλλος τρόπος έχει αποδειχτεί πως η διάβρωση των εδαφών αποτελεί ένας σοβαρός παράγοντας μεταφοράς τους, ειδικά με τη μεταφορά από τα ρυάκια μέχρι και τους ποταμούς τα μικροπλαστικά καταλήγουν από την ξηρά στους ωκεανούς (Schmidt et al. 2018). Από την άλλη πλευρά και οι πλημμύρες συγκεντρώνουν τα περισσότερα από τα μικροπλαστικά όπως και αυτά που βρίσκονται στα ιζήματα περίπου το 70%. Εξαπλώνοντας τα κατά κύριο λόγο σε χερσαία οικοσυστήματα και κατ' επέκταση σε υδάτινα, όπως λογού χάρη παράλιες και επομένως ωκεανούς (Hurley et al., 2018).

Ός γνωστόν τα πλαστικά απορρίμματα ειδικά από κοντινές κατοικίες και βιομηχανίες που βρίσκονται δημιουργούν πιο ευκολά πλαστική ρύπανση σε εδαφικά οικοσυστήματα. Όμως και πιο συχνό φαινόμενο σε σύγκριση με τον ρυθμό της αποδόμησης αποτελεί αξιοπρόσεκτο ότι γίνεται με πιο αργούς ρυθμούς στο θαλάσσιο οικοσύστημα πάρα στο εδαφικό.

Σε αντίθεση όμως με το χερσαίο οικοσύστημα, σε υδάτινα οικοσυστήματα οι πηγές των μικροπλαστικών είναι αρκετά διαφορετικές. Σε περίπου ποσοστό 80% συμβάλουν οι ανθρώπινες δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στην στεριά, όπως αποτελεί ο τουρισμός στην πλειονότητα των μορφών του, δραστηριότητες αναψυχής στις ακτές. Σχετικά με τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στα ύδατα, η εμπορική αλιεία, η οποία συμβάλει σε ποσοστό 18% από τις εφαρμογές πλαστικών αλιευτικών εργαλείων. Σαφώς η ανάγκη για μεγαλύτερη ποσότητα των θαλάσσιων οργανισμών με σκοπό να ικανοποιηθούν οι ανάγκες του αυξανόμενου πληθυσμού λειτουργεί ως κομβικός παράγοντας για την αύξηση της αλιείας, αυτό συνεπάγεται την αυξημένη ζήτηση για πλαστικό εξοπλισμό

αλιείας. Επίσης τα θαλασσιά σκάφη αλλά οι πλατφόρμες πετρελαίου, σαφώς και άλλες δραστηριότητες συμβάλουν στο πρόβλημα της συσσώρευσης των μικροπλαστικών (Andrady, 2011; Cole et al., 2011; Doyle et al., 2011).

Επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό και οι βιομηχανίες που εξαρτώνται από τα γλυκά και αλμυρά ύδατα όπως είναι οι υδατοκαλλιέργειες. Με την ένταση αυτής της δραστηριότητας να έχει αναγνωριστεί ως η κυρίαρχη πηγή της μικροαστικής ρύπανσης, σε συνδυασμό με τις πλαστικές εγκαταστάσεις είναι τα κύρια μικροπλαστικά στο επιφανειακό θαλασσινό νερό. Για παράδειγμα, προκλήθηκε αύξηση της μικροπλαστικής ρύπανσης στον κόλπο Σανγκκού κατά περίπου 62,76% λόγω αντίστοιχων ανθρωπίνων δραστηριοτήτων (Jiang et al., 2022). Επιπλέον παράλιες, ακτές και θάλασσες πληττονται αρκετά από εγκαταλειμμένο, χαμένο ή απορριφθέν εξοπλισμό αλιείας (Deshrande et al., 2020). Τα τρία βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή διάφορων εξοπλισμών αλιείας να είναι το νάιλον, το πολυπροπυλένιο και το πολυαιθυλένιο και αποτελούν αυτά που συναντιούνται περισσότερο (Mace, 2012).

Η πλαστική ρύπανση του θαλασσιού οικοσυστήματος αποτελεί παγκόσμιο περιβαλλοντικό ζήτημα διαταράσσοντας όλες τις περιοχές των ωκεανών (Everaert et al., 2018). Η ύπαρξη μικροπλαστικών τύπου ινών αναφέρεται ευρέως (Rahman et al., 2021; Govindaraj et al., 2022). Κοινώς έχουν ανακαλυφθεί στον πυθμένα, σε ποίκιλα βαθύ και σε ακτές της θάλασσας, μέχρι και σε ανοιχτούς ωκεανούς, συμπεριλαμβανομένου και της Αρκτικής Θάλασσας και του Ατλαντικού βορείως της Σκωτίας (Everaert et al., 2018; Horton & Barnes, 2020). Συγκεκριμένα σωματίδια μικροπλαστικού βρέθηκαν σε ακτές της Νότιας Αφρικής, της Χιλής, του Αρχιπελάγους Χαβάης και της Ατλαντικής ακτής της Βόρειας Αμερικής, τα οποία προήλθαν από πλαστικό αλιευτικό εξοπλισμό όπως δίχτυα, κουβάδες, μπουκάλια, αφρός πολυστυρενίου, σακούλες/ταινίες και άλλα πλαστικά (Free et al., 2014). Μπορούμε να παραθέσουμε μερικές περιπτώσεις όπως αυτή σε δείγματα ιζημάτων από γλυκό νερό, στο οποίο βρέθηκαν ίνες από σωματίδιο μεγέθους μικρότερο από 1 mm. Επιπλέον βρέθηκαν αρκετές ποσότητες σε τύπους πολυμερών PE και PS, τα οποία είναι αρκετά κοινά στη χρήση τους (Wu et al., 2020). Ακόμα πρωτογενή μικροπλαστικά με σφαιρικό σχήμα που βρέθηκαν σε γλυκά ύδατα, παρατηρήθηκε ότι προφέρονται καλλυντικά ή και καθαριστικά προϊόντα, λύματα και επεξεργασμένα λύματα (Van Sebille et al., 2015; Meng et al., 2020).

Τα υδάτινα οικοσυστήματα που φιλοξενούν τεράστιο πλήθος ειδών, όταν εμφανίζουν συγκεντρώσεις μικροπλαστικών μπορεί να επιφέρουν αρκετές επιπτώσεις τόσο σε ασπόνδυλα όσο και σε σπονδυλωτά (Huerta Lwanga et al., 2016; Cao et al., 2017; Zhu et al., 2018; Napper and Thompson, 2020). Πολυάριθμες μελέτες έχουν αποδείξει ότι είναι εύκολο να γίνει η κατανάλωση των ΜΠ από διάφορους υδρόβιους οργανισμούς. Πρόσφατα δεδομένα επιβεβαιώνουν πως πάνω από 160 θαλάσσια και 39 γλυκού νερού είδη καταναλώνουν μικροπλαστικά (De Felice et al., 2019). Ακόμα μπορεί να διαταραχθεί και η ισορροπία και η λειτουργία των υδάτινων οικοσυστημάτων (Boots et al., 2019; De Souza Machado et al., 2019), ή ένα τέτοιο οικοσύστημα να λειτουργήσει ως φορέας για διάφορες χημικές ουσίες ή επίμονους οργανικούς ρύπους (Rochman et al., 2013; Bakir et al., 2015; Wang et al., 2016).

Μέχρι σήμερα έχει αποδειχτεί πως η ύπαρξη της μεταφοράς σε τροφικές αλυσίδες είναι ένα βέβαιο δεδομένο λόγω του μικρού τους μεγέθους (Cole et al., 2011). Υποστηρίζεται πως με την πορεία της τροφικής αλυσίδας μπορεί να προκαλέσει διάφορες επακόλουθες επιδράσεις στους διάφορους οργανισμούς, όπως διαταραχή στην τροφή, μείωση της αναπαραγωγής, εντερικές βλάβες και μεταβολικές διαταραχές (De Felice et al., 2019; Jemec

et al., 2016; Jeong et al., 2016; Lei et al., 2018; Peda et al., 2016; Sussarellu et al., 2016; Von Moos et al., 2012; Ward et al., 2019).

Συνεπώς τα μικροσωματίδια που συγκεντρώνονται στους ωκεανούς και σε άλλους υδάτινους όγκους καταλήγουν και στην τροφική αλυσίδα της θαλάσσιας ζωής. Με αποτέλεσμα θαλασσινά που αλιεύονται και καταναλώνονται από τον άνθρωπο μολύνονται (Iñiguez et al., 2018). Τα μικροπλαστικά βέβαια μπορούμε να τα συναντήσουμε όχι μόνο σε ιζήματα του θαλασσινού νερού αλλά και του νερού των λιμνών (Martin et al., 2022). Ωστόσο, λίγες πληροφορίες υπάρχουν για τη κατανάλωση των μικροπλαστικών και τις επιπτώσεις της (Rahman et al., 2021).

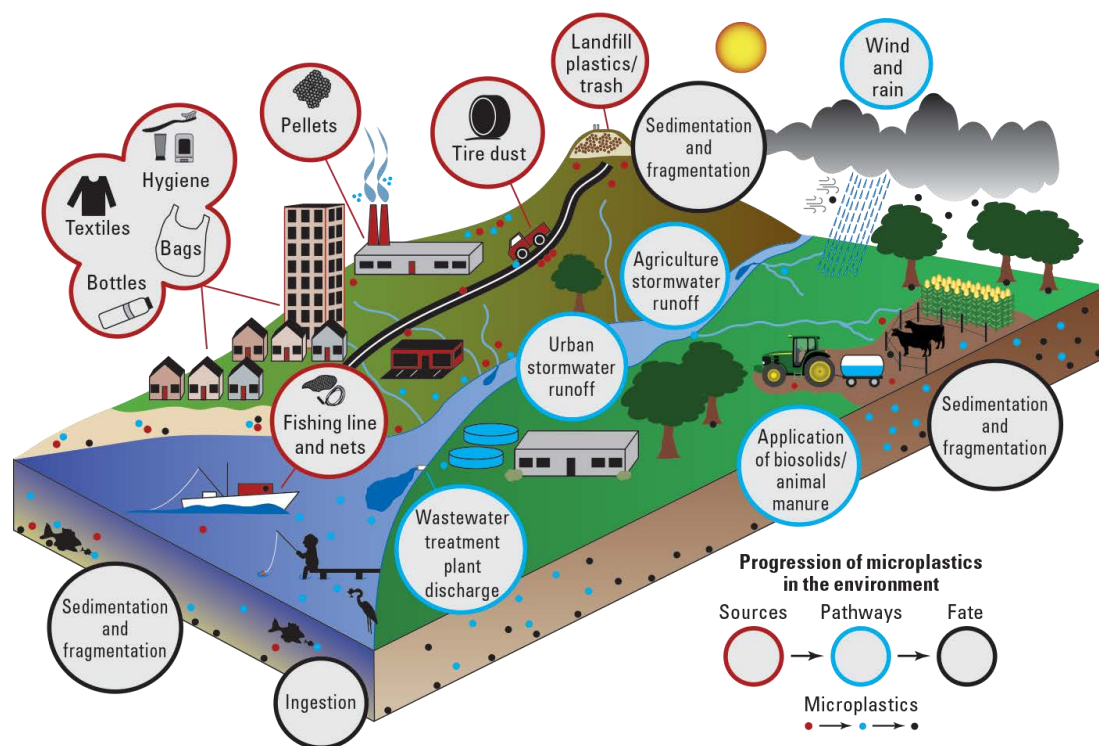
6.3. Εισαγωγή στο χερσαίο περιβάλλον

6.3.1. Πηγές Μικροπλαστικών στο Έδαφος: Γενικό πλαίσιο

Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μπορεί επίσης να προκύψουν από τη σκόπιμη χρήση πλαστικών στη γεωργία, η οποία καλύπτει το ένα τρίτο της χερσαίας επιφάνειας του κόσμου (Παγκόσμια Τράπεζα, 2016). Υπάρχει σημαντικά μεγάλος αριθμός μελετών ως προς την κατανόησή της συμπεριφοράς, την μετακίνησης των μικρών πλαστικών σωματιδίων στους ωκεανούς και τις θάλασσες. Βέβαια το θέμα έθιξε ο Rillig (2012) για πρώτη φορά πριν περίπου μια δεκαετία (Helmberger et al. 2020). Ωστόσο υπάρχει έλλειψη ως προς το χερσαίο περιβάλλον, όπως τα διαφορά εδάφη όπως αστικά, αγροτικά, δασικά καθώς έχει δοθεί λιγότερη προσοχή, πάρα το γεγονός ότι υπάρχουν σημαντικά σημάδια ρύπανσης (Dioses-Salinas et al., 2020; Guo et al., 2020; Sarker et al., 2020). Επιπροσθέτως ανακαλύπτεται πως τα εδάφη αποτελούν μεγαλύτερη δεξαμενή ΜΠ σε σχέση με τους ωκεανούς, διότι μέχρι προσφάτων δεδομένων σημαντικό ποσοστό καταλήγει σε χώρους υγειονομικής ταφής (Bläsing and Amelung, 2018; Hurley and Nizzetto, 2018).

Ένα τέτοιο γεγονός είναι αρκετά ανησυχητικό καθώς με την εισαγωγή των μικρών σωματιδίων πλαστικού επιφυλάσσονται σημαντικοί κίνδυνοι. Κατά κύριο λόγο οι αλληλεπιδράσεις που εξελίσσονται διαταράσσουν το γεωχημικό και βιοφυσικό περιβάλλον του εκάστοτε εδάφους, με τις ανάλογες επιπτώσεις στους μικροοργανισμούς και οργανισμούς του εδάφους (Windsor et al., 2019). Με την αλλαγή στην οικολογία του εδάφους επηρεάζονται και τα φυτά ως προς την ανάπτυξη τους (Khalid et al., 2020), εξίσου και οι μικροβιακές κοινότητες του εδάφους που διατάσσονται οι δραστηριότητές τους (Qi et al., 2020). Μερικά από τα αποτελέσματα είναι πως επηρεάζονται η γονιμότητα αλλά και η ποιότητα του εδάφους (Awet et al., 2018). Λόγω της ευκολίας της κίνησης είτε στο ίδιο το οικοσύστημα είτε σε άλλο οικοσύστημα, με αντίστοιχες μελέτες που διεξάχθηκαν παρατηρήθηκε πως για μια τέτοια διαδικασία είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά του εδάφους όπως είναι το pH, η υγρασία, οι συγκεντρώσεις ορυκτών και άλλα στοιχεία (Wu et al., 2020). Με την εισαγωγή τους στο έδαφος τα ΜΠ συνεχίζουν να κινούνται λόγω βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων (Kim and An, 2020). Αυτή η διαδικασία επιφυλάσσει δυνητικούς οικολογικούς κινδύνους όπως είναι η ρύπανση των υπογείων υδάτων (Pinon-Colin et al., 2020).

Σε αυτό το σημείο θα παραθέσουμε τις πηγές με επίκεντρο το έδαφος σε πιο ειδικό πλαίσιο. Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι και μορφές με τους οποίους εισάγονται τα μικροπλαστικά στο χερσαίο περιβάλλον.



Εικ. 4: Πηγές και μοίρα των μικροπλαστικών στο έδαφος σε χερσαία περιβάλλοντα.

Η βασικότερη πηγή προέρχεται από γεωργικές δραστηριότητες, σε αυτές συγκαταλέγονται αξιοποίηση ιλύς από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, ακόμα η χρήση πλαστικών καλυμμάτων, απορροές από τους δρόμους, κομπόστ (Bläsing και Amelung, 2018) στην περίπτωση του συστήματος επεξεργασίας λυμάτων, πάρα τις διαδικασίες απομάκρυνσης των μικροπλαστικών έχει παρατηρηθεί πως παραμένουν στην ιλύ. Λογού χάρη έχουν εντοπιστεί μικρο- και μακροπλαστικά με συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 1500 έως 24,000 αντικείμενα kg⁻¹ σε ιλύ (Mahon et. al., 2017)

Έπειτα μεγάλες συγκεντρώσεις προέρχονται από ανεπεξέργαστα λύματα είτε από την εκροή πλυντηρίων είτε προϊόντων περιποίησης και καθαρισμού, όπως είναι τα σαμπουάν, τα απολεπιστικά. Επόμενο είναι με την άμεση χρήση των ανεπεξέργαστων λυμάτων για την άρδευση των καλλιεργειών να εισέρχονται μικροπλαστικά και να ρυπαίνουν τα γεωργικά οικοσυστήματα (Bläsing and Amelung, 2018). Σε συγκεντρώσεις από νοικοκυριά βρέθηκαν 627,000 σωματίδια m⁻³ (Hartline et. al., 2016). Επίσης σε άλλη περίπτωση σύμφωνα με τους Majewsky et. al. (2016) υπήρχαν 80-260 mg ανά m³ σε λύματα, συγκεκριμένα ο τύπος πλαστικού που βρέθηκε ήταν πολυπροπυλένιο και πολυαιθυλένιο.

Άλλοι παράγοντες που βοηθούν στη συγκέντρωση των ΜΠ στα εδάφη αποτελούν οι φυσικές πλημμύρες, η απορροή στους δρόμους ή και τα αστικά κέντρα. Η αποστράγγιση από τους δρόμους και τις αστικές περιοχές όταν δε υπάρχει συγκράτηση από τα δίκτυα αποχέτευσης (από αστικά ή βιομηχανικά λύματα) είναι πιθανό να ρυπαίνει τα εδάφη της γύρω περιοχής (Qiu et al. 2016).

Ακόμα μέσω της υπερχειλίσης των ποταμών είναι πιθανό να μεταφερθούν σωματίδια. Παρομοίως και σε περίπτωση βύθισης των παραποτάμιων περιοχών προκαλείται εξίσου εναπόθεση πλαστικών στο έδαφος (Silva et al. 2018).

Έπειτα οι ατμοσφαιρικές αποθέσεις μέσω της βροχής ή μέσω των ρευμάτων αέρα μπορούν να διασπείρουν ίνες ή και θραύσματα μικροπλαστικών στο χερσαίο οικοσύστημα. Ακόμα η παράνομη απόθεση και απόρριψη απορριμμάτων κοντά σε δρόμους συμβάλει στην ρύπανση του περιβάλλοντος. Με τις αρνητικές συνέπειες που επιφέρουν στη γη και όχι μόνο, καθώς τόσο οι χώματος όσο και οι χώροι υγειονομικής ταφής εξαιτίας των γιγάντιων ποσοτήτων συσσώρευσης πλαστικών δεν αποτελεί το μόνο πρόβλημα ότι εισέρχονται στο έδαφος, αλλά συμβάλλουν στην αύξηση των εκπομπών των αέριων του θερμοκηπίου (Amobonye et al. 2021; Priya et al. 2022). Συνεπώς τα εδάφη δεν αποτελούν μόνο αποδεκτή αλλά και ένα περιβάλλον που εκτυλίσσονται αρνητικά τα μικροπλαστικά ως παράγωγα και άλλων επιπτώσεων και φαινομένων (Möller et al., 2020).

Σε αστικά και περαστικά μέρη όπως ακόμα και σε σημεία κοντά σε δρόμους με κίνηση συναντάμε ΜΠ τα οποία προέρχονται κυρίως από τη φθορά των ελαστικών, ως συνήθως καουτσούκ, το οποίο αποτελεί συνθετικό πολυμερές. Κάποιες αναφορές της ετήσιας εκπομπής σωματιδίων από ελαστικά που μπορούμε να παραθέσουμε συγκεκριμένα κυμαίνεται στους 10.000 τόνους περίπου στη Σουηδία και 110.000 τόνους στη Γερμανία (Bläsing and Amelung, 2018).

Έτσι το έδαφος μπορούμε να το χαρακτηρίσουμε αρκετά ευάλωτο στη ρύπανση εξαιτίας των διαφορετικών αλλά και ποσοτικών συγκεντρώσεων εισροών μικροπλαστικών που ανιχνεύονται (Allen et. al., 2019). Βέβαια αυτή η κατάσταση οφείλεται στην ευκολία με την οποία εισέρχονται τα ΜΠ στο έδαφος και κατ' επέκταση στον επηρεασμό των χαρακτηριστικών του, όπως για παράδειγμα πυκνότητα της δομής του και η ικανότητα να συγκρατεί νερό (O'Connor et. al. 2019). Αποτελούν αρνητικούς και ορισμένες φορές τοξικούς παράγοντες, ειδικά με την παρουσία διάφορων τοξικών χημικών παραγόντων, με χαρακτηριστικό παράδειγμα να είναι οι φθαλικοί εστέρες με επιβεβαιωμένες επιδράσεις στον οργανισμό και ειδικότερο στον ενδοκρινολογικό σύστημα (Meng et. al., 2023). Στις επόμενες υποενότητες θα εξηγηθούν λεπτομερώς οι βασικότεροι τομείς και ανθρωπογενής δραστηριότητες που λειτουργούν ως τρόποι ένταξης των μικροαστικών στα χερσαία οικοσυστήματα και συμβάλουν στην δημιουργία υψηλών συγκεντρώσεων τους.

6.4. Πηγές Πλαστικών στα Αργοτικά εδάφη

6.4.1 Βελτιώσεις εδάφους (κομποστοποίηση & ιλύς αποβλήτων)

Οι γεωργικές πρακτικές και εφαρμογές τα τελευταία χρονιά έχουν ερευνηθεί σε μεγάλο βαθμό ως προς τις άμεσες, αλλά και έμμεσες εκπομπές ρύπανσης, συγκαταλέγοντας και της πλαστικής ρύπανσης από την εισαγωγή πλαστικών από τα λιπάσματα και τα πλαστικά καλυψής εδαφους, τα οποία θεωρούνται ως κυρίαρχοι τρόποι εισροής. Ακολουθούν ιλύς, κομπόστ, ακόμα εφαρμογές άλλων υλικών (Scorpetani et al. 2022; Tagg et al. 2022; Steinmetz et al. 2022). Με τις οργανικές απορρίψεις να αποτελούνται από πλήθος θρεπτικών συστατικών και συμβάλλοντας έτσι στην βελτίωση των εδαφών, καθώς εμπεριέχουν ακόμα και οργανικό άνθρακα. Συνεπώς τα βελτιωτικά συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό στην αύξηση των αποδόσεων των καλλιεργειών (Urbaniak et al., 2017; Bai et al., 2017).

Με τις βελτιώσεις εδαφους να συμβάλουν ιδιαίτερα στην ενίσχυση της βιωσιμότητας της γεωργίας, παράλληλα προσφέροντας λύση ως προς την ολοκλήρωση των κύκλων των θρεπτικών ουσιών με την επαναχρησιμοποίηση των οργανικών απόβλητων (Smith et al.,

2020; González et al., 2022). Παρόλο το πλεονέκτημα της ενίσχυσης της παραγωγής, βρέθηκαν στοιχεία σε αρκετές πρόσφατες μελέτες για την παρουσία μικροπλαστικών λόγω της εφαρμογής τους (Wang et al., 2021; European Environment Agency, 2023).

Βέβαια η εισροή των μικροπλαστικών δεν περιορίζεται μόνο εκεί, καθώς είναι πολύ πιθανό να εισέλθουν από γειτονικά οικοσυστήματα και περιοχές, όπως παραδείγματος χάρι εξαιτίας των πρακτικών άρδευσης (PérezReverón et al. 2022). Επιπροσθέτως η ατμοσφαιρική εναπόθεση (Aeschlimann et al. 2022) ή πιο έμμεσα μέσω πλημμυρών απο ποτάμια και λίμνες ή και ακατέργαστα λύματα και λοιπα υγρά απόβλητα (Bläsin, & Amelung, 2018; Lechthaler et al. 2021), κάτι τέτοιο παρατηρείται τόσο σε γεωργικά εδάφη όσο και σε άλλου τύπου εδάφη (π.χ. δασικά εδάφη, φυσικά λιβάδια).

Σύμφωνα με εκτιμήσεις προ δεκαετίας οι ετήσιες εισροές ΜΠ φαινόταν πως σε γεωργικές εκτάσεις της Ευρώπης και της βορείας Αμερικής, οι συγκεντρώσεις ανέρχονταν στους 430,000 και 300,000 τόνους αντίστοιχα (Nizzetto et. al., 2016). Σε πιο πρόσφατες έρευνες που διεξάχθηκαν οι εκτιμήσεις για τις εισροές των πλαστικών σωματιδίων παρέμειναν σε παρόμοια επίπεδα όπως ήταν, συγκεκριμένα φτάνουν μέχρι 450.000 και 320.000 τόνους (Li et al., 2023; European Environment Agency, 2024)

Ωστόσο αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός της σοβαρότητας και της διάστασης που έχει λάβει η ρύπανση του εδαφους, κατά κύριο λόγο εξαιτίας της αυξημένης παραγωγής και χρήσης των πλαστικών, καθώς και της ανεπαρκούς διαχείρισης των αποβλήτων (Li et al., 2023). Σχετικά με τις εισροές και διαδρομές των μικροπλαστικών στον αγροτικό τομέα, αλλά και σε άλλους τομείς εξίσου, πλέον έχουν ρυθμιστεί και οριστικοποιηθεί αρκετά επίπεδα νομοθεσίας, τα οποία περιλαμβάνουν την ίλη αποχέτευσης αλλά και την απαγόρευση μια χρήσης πλαστικών, αλλά και σταδιακή αντικατάσταση των συμβατών με βιοδιασπώμενα πλαστικά (Da Costa et al. 2020). Το νομοθετικό πλαίσιο θα αναλυθεί σε διαφορετική ενότητα, στα επόμενα σημεία της εργασίας θα αναλυθούν περαιτέρω οι σημαντικότερες πηγες στα αγροτικά εδάφη.

6.4.2 Κομποστοποίηση

Στη σύγχρονη γεωργία, τα πλαστικά προϊόντα είναι πανταχού παρόντα, καθώς κάνουν τις συνηθισμένες λειτουργίες πιο ασφαλείς, φθηνές, αποτελεσματικές ή βολικές (Harms et. al., 2021). Με τη κομποστοποίηση να εφαρμόζεται ως βελτιωτικό του εδαφους σαν το λίπασμα. Στην ευρωπαϊκή ενώσει η παραγωγή της κυμαινόταν σε 18 εκατομμύρια τόνους περίπου, με τις τότε προβλέψεις της αύξησης στο 37% μέχρι το 2020 (ARCADIS, 2010). Και σε συνέχεια ο συνιστάμενος ρυθμός εφαρμογής κυμαινόταν από 30 μέχρι 35 τόνους ανά εκτάριο εφαρμογής (WRAP, 2015). Τα πιο πρόσφατα δεδομένα δείχνουν ότι η παραγωγή κομπόστ έφτασε περίπου 17,6 εκατομμύρια τόνους, τα οποία προήλθαν από βιοαπόβλητα. Ως σύνολο βέβαια επεξεργάστηκαν 60 εκατομμύρια τόνοι βιοαποβλήτων μέσω κομποστοποίησης και αναερόβιας χώνευσης. Ακόμα και σήμερα ο αγροτικός τομέας εφαρμογής του κομπόστ παραμένει ο βασικότερος, παρόλο που οι τιμές πωλήσεων βρίσκονται κατά μέσω όρο στα 10,1 € ανά τόνο (European Compost Network, 2022).

Σε ορισμένες χώρες υπάρχει περιορισμός ως προς τη χρήση του, συγκεκριμένα στη Γερμανία η εφαρμογή πρέπει να βρίσκεται από 30 μέχρι 40 τόνους ανά εκτάριο στη χρονική διάρκεια τριών ετών, αυτό προκύπτει από τον κανονισμό BioAbfV. Σε γενικό πλαίσιο όμως της ευρωπαϊκής ένωσης η εφαρμογή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις καλλιεργείες και

τις ανάγκες του εδαφους και φυσικά τις τοπικές συνθήκες, για αυτό το λόγω οι συνιστάμενοι ρυθμοί εφαρμογής κομπόστ ταλαντεύονται από 10 έως 40 τόνους ανά εκτάριο ετησίως (Gottschall et. al., 2023).

Η ευρεία χρήση των πολυμερών είναι τόσο συχνή όπως και η χρήση λιπασμάτων, φυτοφάρμακων ή και ανανεώσιμοι πόροι όπως το νερό. Χρησιμοποιούνται δηλαδή με σκοπό της ενίσχυσης της απόδοσης των καλλιεργειών, για παράδειγμα όταν καλλιεργούνται και προστατεύονται εντός των πλαστικών κατασκευών όπως τα θερμοκήπια ενισχύονται οι αποδόσεις της παραγωγής, διότι με αυτό το τρόπο προστατεύονται από εξωγενείς παράγοντες όπως είναι τα παράσιτα ή οι έντονες και καταστροφικές καιρικές συνθήκες. Συνεπώς τα καλύμματα και τα δίχτυα συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό στην βελτίωση των συνθηκών των φυτών. Αλλά πλαστικά αντικείμενα που συναντάμε έντονα στον τομέα της γεωργίας, αποτελούν τα πλαστικά δοχεία, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και αποθήκευση σχεδόν όλων των αγροτικών προϊόντων. Όπως αναφέρθηκαν παραπάνω στα λιπάσματα με την έντονη χρήση τους συμβάλουν στην διασπορά των μικροπλαστικών, το οργανικά λιπάσματα ακόμα που μπορούν να αποτελέσουν προϊόν κομπόστ περιλαμβάνουν πιθανόν σωματίδια πλαστικού από τα οικιακά απορρίμματα. Παραδείγματος χάρη μπορούν να περιέχουν υπολείμματα υλικών συσκευασίας (Weithmann et al., 2018).

Ο αριθμός των στοιχείων για τις συγκεντρώσεις του πλαστικού στις περιπτώσεις κομποστοποίησης είναι περιορισμένος. Μια πρώτη μέτρηση που έγινε σε μελέτη (πτυχιακής εργασίας) στην Σλοβενία, στην οποία βρέθηκαν κατά μέσο όρο 1200 mg πλαστικού kg⁻¹. Σε άλλες περιπτώσεις η ενσωμάτωση των μικροπλαστικών στο κομπόστ εκτιμήθηκε από 2,38 έως 180 mg/kg (Gajst, 2016). Έκτοτε υπάρχουν και άλλες επιστημονικές μελέτες που αποδεικνύουν τη συσχέτιση του με τις αλληλεπιδράσεις στο έδαφος, αλλά και τις επιπτώσεις που επιφέρει. Γενικότερα οι εφαρμογές μπορούν να οδηγήσουν στην εισαγωγή 0,016 έως 6,3 kg πλαστικού/εκτάριο/έτος (European Compost Network, 2022). Σε μια από τις μελέτες φαίνεται ότι το κομπόστ μπορεί να αυξήσει τις συγκεντρώσεις EDTA αλλά και των στοιχείων του εδαφους Zn και Cu μετρά από επαναλαμβανομένη εφαρμογή του (Cambier et al., 2019).

Συγκεκριμένα το EDTA δεν ανοικοδομείται ευκολά στο έδαφος και αποτελεί ρύπο, αυτή η χημική ένωση όταν βρίσκεται σε εδαφικό οικοσύστημα και όχι μόνο έχει την ιδιότητα να δεσμεύει αλλά και να επανακκιντοποιήσει βαρέα μέταλλα. Έτσι αναμένονται οι συγκεντρώσεις των Zn ή Cu να είναι υψηλότερες σε εδάφη που εμπεριέχουν μικροπλαστικά, σε αντίθεση με τα εδάφη που δεν περιέχουν συγκεντρώσεις πλαστικών σωματιδίων (Corradini et. al., 2021).

Το κομπόστ, ειδικά από δημοτικές πηγές, θα πρέπει να θεωρείται σημαντική πηγή πλαστικού που εισάγεται στο έδαφος. Αυτή η πλαστική εισαγωγή μέσω εφαρμογών κομποστοποίησης μπορεί να είναι ιδιαίτερα προβληματική σε χωράφια με απότομες πλαγιές, όπως οι αμπελώνες, όπου η διάβρωση του εδαφους μπορεί να μεταφέρει υλικά (Bläsing et al., 2017) και έτσι να μεταφέρονται πλαστικό σε άλλα οικοσυστήματα.

6.4.3 Λυματολάσπη (ιλύς αποβλήτων)

Η ιλύς επεξεργασμένων λυμάτων συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση του εδαφικού άνθρακα σε συνδυασμό με την χρησιμοποίηση των θρεπτικών συστατικών που εμπεριέχονται στα φυτά (Willén et al., 2017). Αποτελεί μια δημοφιλή λύση ως βιολογικό λίπασμα για τον αγροτικό τομέα. Στον ευρωπαϊκό χώρο η παραγομένη λυματολάσπη βρίσκεται από 45 μέχρι 50 % στο σύνολο της εφαρμογής της, σε μεγαλύτερο ποσοστό η εφαρμογή της στην βόρεια Αμερική φτάνει το 55% (European Commission, 2024). Θα μπορούσαμε σε αυτό το σημείο να δούμε συγκεκριμένα παραδείγματα χωρών, όπως είναι η Φιλανδία με ποσοστό χρήσης στο 46%, η εφαρμογή εδώ δε περιορίστηκε στην γεωργία, αλλά επεκτάθηκε και στη χρήση για διαμόρφωση αστικών χωρών πράσινου (Vilpanen και Serrälä, 2021). Στην Ιρλανδία το ποσοστό ξεπερνάει το 80% με αξιοποίηση τόσο σε πράσινους χώρους αλλά και στον αγροτικό τομέα (Milojevic και Cydzik-Kwiatkowska, 2021; Hušek et al., 2022).

Δεδομένου όμως ότι πέρα από τα θρεπτικά συστατικά εμπεριέχει και διάφορους παράγοντες ρύπανσης, είναι αναγκαία η εφαρμογή κατάλληλων ρυθμίσεων και κανονισμών σχετικά με τα όρια της περιεκτικότητας των παθογόνων και των βαρέων μετάλλων (Rolsky et al., 2020). Παρόλα αυτά όμως καμία από τις ακόλουθες οδηγίες δεν λαμβάνουν υπόψη τα πλαστικά μικροσωματίδια ως ανεπιθύμητα στην ιλύ ειδικότερα ως περιοριστικούς ρύπους, σύμφωνα με την ευρωπαϊκή νομοθεσία (EE 86/278/EEC) και την αμερικανική νομοθεσία (40 CFR Part 503) (European Commission, 1986; United States Environmental Protection Agency (EPA, 1993). Σε αντίθεση αντικρούεται αυτό με τα νέα δεδομένα που αποδεικνύουν ότι μέχρι 90% των μικροπλαστικών εισέρχονται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων με τις εισροές των οποίων είναι τα αστικά λύματα, τα βιομηχανικά λύματα και τα όμβρια ύδατα (Mbachu et al., 2021). Με διαδικασίες που ακολουθούνται τα μικροπλαστικά απομακρύνονται από τα λύματα με ελάχιστο μέρος τους από τα ύδατα (Defra, 2025). Ενώ το υπόλοιπο δηλαδή η πλειοψηφία των συγκεντρώσεων να βρίσκεται στη λυματολάσπη (Jiang et al., 2020). Για να αντιληφθούμε καλύτερα τη διάσταση του θέματος σε αντίστοιχη μελέτη μιας εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων στην βόρεια Κίνα, διαπιστώθηκαν πως οι μεγάλες ποσότητες μικροπλαστικών στα εισερχόμενα και στα εξερχόμενα ύδατα, αποτελούνταν από 288,5 και 22,9 σωματίδια/L αντίστοιχα. Με το 90% αυτών να έχουν παραμείνει στις ιλύες (Yang et al., 2021a).

Σε πρόσφατη μελέτη που διεξάχθηκε φαίνεται η δραματική αλλαγή των επίπεδων μικροπλαστικών σε διάστημα τεσσάρων ετών από την εφαρμογή λυματολάσπης, η αύξηση έφτασε 1 450% στο έδαφος, το ποσοστό αυτό παρέμενε όχι μόνο κατά την διάρκεια αλλά και μετρά από δυο δεκαετίες (James Hutton Institute, 2025)

Αποτελεί μια σημαντική πηγή μικροπλαστικών ειδικά όταν πρόκειται για μακροχρόνια εφαρμογή κυρίως σε αγροτικές εκτάσεις και αυτό θα το επιβεβαιώσουν οι παρακάτω μελέτες. Σύμφωνα με τους Corradini et al. (2019) σε επαναλαμβανόμενες εφαρμογές ιλύς σε 30 αγροκτήματα στη Χιλή με διάρκεια μιας δεκαετίας, παρατηρήθηκε αφθονία ΜΠ η οποία κυμαινόταν από 0,6 έως 10,4 σωματίδια/g. Σε άλλη παρατήρηση των συγκεντρώσεων σε 16 χωράφια στην Ισπανία εκτιμήθηκε η μέση αύξηση των μικροπλαστικών μετά από εφαρμογή ελαφρύς και βαριάς ίλης να βρίσκεται 280 και 430 σωματίδια/kg αντίστοιχα (van den Berg et al., 2020).

Στη Γερμανία (5 τόνοι ξηρής ουσίας λυματολάσπης ανά εκτάριο για 3 χρόνια), μεταξύ 1,67 και 40,8 εκατομμυρίων πλαστικών σωματιδίων ανά εκτάριο μπορούν να καταλήξουν σε καλλιεργήσιμη γη κάθε χρόνο ως αποτέλεσμα της εφάπαξ (μεμονωμένης) χρήσης της λυματολάσπης (Weber et al., 2022).

Σε ορισμένες περιοχές τα λύματα ενδέχεται να περιέχουν συνθετικές ίνες, κυρίως από τη πλύση ή στέγνωμα ρούχων, μετέπειτα τα ύδατα από τα πλυντήρια ρούχων απορρίπτονται και καταλήγουν σε μικρές λίμνες κοντά, οι οποίες στην συνέχεια χρησιμεύουν ως προς την άντληση και κατόπιν άρδευση των καλλιεργειών (Zhang & Liu, 2018)(Weithmann et al., 2018). Επιπλέον, σε αγροτικές περιοχές τα πλαστικά προϊόντα όπως δίχτυα σκίασης και σακούλες λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται ευρέως ενδέχεται να αποσυντίθενται σε ίνες και έτσι τα μικροπλαστικά να διασπείρονται με ευκολία στο περιβάλλον. Η μεγάλη ποσότητα σχήματος χάντρας που έχει εντοπιστεί στις περιοχές δειγματοληψίας ενδέχεται να οφείλεται στη διαδεδομένη χρήση προϊόντων προσωπικής φροντίδας, τα οποία εμπεριέχουν τέτοιου είδους υλικά (Chen et al., 2020).

Η ανομοιογένεια που παρατηρείται στις διάφορες μορφές και συγκεντρώσεις ενδέχεται προκύπτει από τις διαφορετικές πηγές ρύπανσης πλαστικών, καθώς και διαφορετική προέλευση, όπως σαφώς και διαφορετικών μερών λήψης δειγματοληψίας. Υπάρχει μεγάλο πεδίο που δεν έχει ερευνηθεί επί του παρόντος θέματος, όπως για παράδειγμα υπάρχει έλλειψη πληροφοριών σχετικά με τις διάφορες εφαρμογές τύπου λυματολάσσης σε μεμονωμένη ή κατ' επανάληψη εφαρμογή στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Τέλος, οι Mahon et al. (2017) διαπίστωσαν ότι, παρά την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων απομάκρυνσης μικροπλαστικών, ούτε η ασβέστωση, ούτε η αναερόβια πέψη, ούτε και η θερμική ξήρανση αποδείχθηκαν επαρκείς για την απομόνωση των μικροπλαστικών από την ιλύ.

6.4.4 Πλαστικά καλύμματα εδάφους (Plastic mulching)

Η εφαρμογή του πλαστικού καλύμματος είναι μια αρκετά δημοφιλής τεχνική από παλαιότερα, η διάδοση της οφείλεται στην βελτίωση των ποσοτήτων συγκομιδής, αλλά και της βελτίωσης της ποιότητας των καλλιεργειών (Lament, 1993). Μπορεί να συντελέσει θετικά στην αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους και την βελτίωσης της αποδοτικότητας της άρδευσης Fan et al., 2017; Wu et al., 2017). Τα πλαστικά σωματίδια που εισέρχονται στα αγροτικά εδάφη προστίθενται κατά κύριο λόγο από τη πλαστική επικάλυψη που εκτελείται λόγω αυτών θετικών παραγόντων, παράλληλα συμβάλλουν και στη μείωση των διάφορων τύπων παράσιτων που ενδέχεται να βλάψουν τα φυτά, αλλά και στη πρόληψη ασθενειών (Qi et al. 2018; Wong et al. 2020). Η κοινή πρακτική, το λεγόμενο mulch, σε συνδυασμό με τα μειωμένα ποσοστά ανακύκλωσης και συγκομιδής τους έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση αρκετά μεγάλων ποσοτήτων μικροπλαστικών στα γεωργικά εδάφη (Qi et al. 2020; Huang et al., 2020).

Στην πραγματικότητα όμως τα πλαστικά καλύμματα εδάφους απειλούν την υγεία των αγροτικών κυρίως οικοσυστημάτων αλλά όχι μόνο, καθώς μπορούν να μεταφέρουν και σε άλλα οικοσυστήματα ή γύρω περιοχές πλαστικά σωματίδια (Atugoda et al. 2023). Σύμφωνα με πολλές μελέτες έχει διαπιστωθεί πως πρόκειται για βασική πηγή μικροπλαστικών στα εδάφη. Με παρατηρήσεις διαπιστώθηκε ότι τα μικροπλαστικά από το mulch μπορούν να κινηθούν σε μεγαλύτερα βάθη των εδαφικών προφίλ και να επηρεάσουν την παραγωγικότητα, την δομή και εξέλιξη της μικροβιακής κοινότητας και τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους (Canha et al., 2023; Fei et al. 2020).

Σε παγκόσμιο επίπεδο η εκτίμηση του πλαστικού καλύμματος εδάφους πριν μια δεκαετία περίπου αναμενόταν να αυξηθεί κατά 5,7% σε ετήσια βάση μέχρι το 2019 (Transparency Market Research, 2013). Με τις πρόσφατες εκτιμήσεις υπολογίζεται πως η ετήσια αύξηση

των επιφανειών που καλύπτονται από πλαστικά καλύμματα θα βρίσκεται από 7% μέχρι 10% μεταξύ της χρονικής περιόδου 2021 και 2026, με την πλειοψηφία χρήσεις σε περιοχές της Κίνας και της Ινδίας, με μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης να βρίσκεται περίπου 7,2% (PW Consulting Agency, 2025). Συγκεκριμένα στην Κίνα υπήρξαν ρυθμοί αύξησης σε 30% ετησίως στο χρονικό διάστημα 1991 μέχρι 2004 (Esri, 2006). Ιδιαίτερα η εφαρμογή των πλαστικών καλυμμάτων αυξήθηκε από 110.000 τόνους το 1991, στα 1,4 εκατ. τόνους το 2014, καλύπτοντας έτσι περίπου 18 εκατομμύρια εκτάρια. Σήμερα η εφαρμογή του πλαστικού καλύμματος βρίσκεται στα 20 εκατομμύρια εκτάρια γεωργικής γης με αύξηση ετήσιου ρυθμού 7–10%, με την Κίνα να έχει τη κυρίαρχη αναλογία με ποσοστό περίπου στο 90% της εφαρμογής (Ren et al., 2021; Steinmetz et al., 2016).

Γενικότερα ως προς τη χρήση του πιο συχνά χρησιμοποιούμενο πολυμερές αποτελεί το πολυαιθυλένιο (PE), συμπεριλαμβανομένων των τύπων υψηλής πυκνότητας, χαμηλής πυκνότητας και γραμμικού χαμηλής πυκνότητας δηλαδή HDPE, LDPE, LLDPE. Η κυριαρχία του στην αγορά συγκεντρώνεται σε νούμερα, με το 55% να αφορά τα πλαστικά στον αγροτικό τομέα παγκοσμίως (Kara and Atar, 2013; Steinmetz et al., 2016).

Η πολυαιθυλένιο (PE), λόγω της αντοχής του, είναι ο πιο κοινός τύπος πλαστικής επένδυσης που χρησιμοποιείται στη γεωργία

Το φιλμ επικάλυψης πολυαιθυλενίου έχει ως χαρακτηριστικό τον σύντομο κύκλο χρήσης, ενώ η εφαρμογή του συμβαίνει για μια μόνο καλλιεργητική περίοδο, η οποία διαρκεί 3 με 8 μήνες ή μέχρι την ολοκλήρωση της καλλιεργητικής περιόδου. Αργότερα το υλικό αυτό απομακρύνεται από την περιοχή καλλιέργειας ή εισχωρεί στο έδαφος. Τα υπολείμματα του καλύμματος που παραμένουν είναι αρκετά δύσκολο να ανακτηθούν και να διαχωριστούν με αποτέλεσμα να συσσωρευτούν στο έδαφος. Σε αντίθεση με το χρόνο χρήσης, ο χρόνος διάσπασης τους είναι μεγαλύτερης καθώς η πλήρης διάσπαση μπορεί να διαρκέσει από δεκάδες μέχρι και εκατοντάδες χρονιά, σε ορισμένες μελέτες έχει βρεθεί μάλιστα ότι η διάρκεια παραμονής τους στο έδαφος μπορεί να φτάσει και 300 χρονιά (Salama και Geyer, 2023).

Το βασικότερο πρόβλημα που προέρχεται από την εφαρμογή του καλύμματος είναι η διάρκεια βιοαποικοδόμησης τους. Αν και ως φαινομενικά ιδανική λύση λόγω του υλικού τους που είναι λεπτό, αποδοτικό και οικονομικό ως προς το κόστος του, διασπάται σε μικρότερα σωματίδια και ενσωματώνεται άμεσα στο εδαφικό οικοσύστημα, καθώς παραμένει εκεί μετά τη συγκομιδή του (Changrong et al., 2014). Εξαιτίας διάφορων πρακτικών δυσκολιών της ανακύκλωσης του, κάτι το οποίο απαιτεί κόστος (Brodhagen et al., 2017; Kasirajan και Ngouajio, 2012), έχει ως αποτέλεσμα την συσσωρεύσει μεγάλου αριθμού πλαστικών σωματιδίων, όπως μακρό- και μικροσωματίδια (Rillig et al., 2017; Steinmetz et al., 2016). Ως πιο συνηθισμένη μορφή συναντάμε τα θραύσματα μικροπλαστικών, τα οποία μπορούν να απορροφήσουν με ευκολία από μικροοργανισμούς και ρίζες των φυτών και να εισέρθουν με ευκολία στην τροφική αλυσίδα (Santini et al., 2023).

Σύμφωνα με τους Ramos et al. (2015) σε ανάλυση υπολειμμάτων πλαστικού φιλμ πολυαιθυλενίου από πλαστική κάλυψη γεωργικών εδαφών μέσου μεγέθους 28 τετραγωνικών εκατοστών, έδειξε την ύπαρξη 3 gr PE ανά m² εδάφους, που αντιστοιχούσαν στο 10% της συνολικής δειγματοληπτικής επιφάνειας. Η ερευνά αυτή μπορεί να μας δώσει μια εικόνα της συγκέντρωσης των πλαστικών σωματιδίων. Πέρα από το μέγεθος που μπορούν να καταλάβουν, είναι σημαντικό να μην αγνοούμε και τα επιβλαβή προσθετά που

περιέχουν, όπως οι φθαλικές ενώσεις. Σε γενικό πλαίσιο μπορούν να φτάσουν από 50 έως 120 mg ανά kg πλαστικού καλύμματος εδαφους (Wang et al., 2013). Αυτό σημαίνει ότι οι χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται ως επι το πλείστον ως πλαστικοποιητές, σε εδάφη της Κίνας οι συγκεντρώσεις βρίσκονται από 74 έως 208% υψηλότερες, σε αντίθεση με τα εδάφη χωρίς πλαστική επικάλυψη (Kong et al., 2012).

Το σύνολο των συγκεντρώσεων με τη πάροδο του χρόνου αυξάνεται, έτσι αποτελεί αναγκαίο η εύρεση εναλλακτικών λύσεων, κάποιες από αυτές είναι η αντικατάσταση με βιοδιασπώμενα ή χάρτινα καλύμματα. Αν και πρόσφατα η εισαγωγή των βιοδιασπώμενων πλαστικών μοιάζει θετική, καθώς αποτελεί την αντικατάσταση των συμβατικών πλαστικών, εξαιτίας της ταχείας διάσπασης του εξασφαλίζει αρκετά γεωργικά οφέλη και όχι μόνο (Chamas et al., 2020; Yin et al., 2019). Βέβαια η παραδοσιακή λύση του πλαστικού παραμένει κυρίαρχη παρόλο τις αρνητικές συνέπειες που μπορεί να επιφέρει με τη προοδευτική διαδικασία διάσπασης τους, κυρίως λόγω της μηχανικής τριβής και τις υπερϊώδους ακτινοβολίας που υφίσταται (Sun et al., 2022).

Παράλληλα τα τελευταία χρονιά πέρα από τη συσσώρευση των ΜΠ ένα αλληλένδετο πρόβλημα είναι η εντατική καλλιέργεια με τη διαχείριση των γεωργικών εκτάσεων να επιφέρουν επιπλέον επιπτώσεις. Ένα από αυτά αποτελεί την συσσώρευση των βαρέων μετάλλων, η οποία με τη σειρά της τα μέταλλα διαταράσσουν τη μικροβιακή δραστηριότητα των εδαφών και κατ' επέκταση των φυτών (Iqbal et al., 2023; Santini et al., 2022)

Στην πραγματικότητα η βιοδιαθέσιμη αυτή μορφή του εδαφους όταν βρίσκεται σε μεγαλύτερες από τα επιτρεπτά επίπεδα επηρεάζει την ανάπτυξη, τη φυσιολογία και την ανάπτυξη των φυτών, διότι είναι ευκολά απορροφήσιμα στοιχεία εδαφους (Natasha et al., 2022). Σε αρκετές μπορούν να επιβεβαιωθεί η ρύπανση των εδαφών από Cu και Pb, με συνηθέστερα φαινόμενα την αναστολή της βλάστησης, τον μη πολλαπλασιασμό των ρίζων αλλά και της βιομάζας (Khan et al., 2022). Πέρα από τα φυτά και διάφοροι μικροοργανισμοί είναι ευάλωτοι στη διάθεση των βαρέων μετάλλων και έτσι παρουσιάζουν επιπτώσεις ως προς τη μείωση της ανάπτυξης τους αλλά και των δραστηριοτήτων. Συγκεκριμένα αρκετά ένζυμα όπως η (όπως η υδρολάση, η αφυδρογονάση, η β-γλυκοσιδάση και η ουρεάση) χρησιμοποιούνται ως δείκτες μόλυνσης από βαρέα μέταλλα επειδή ανταποκρίνονται γρήγορα στις αλλαγές των συνθηκών του εδαφους (Memoli et al., 2021).

Όμως δεν θα πρέπει να παραλείψουμε ότι ως φορείς των βαρέων μετάλλων δεν είναι αποκλειστικά τα συμβατά μικροπλαστικά αλλά μπορούν είναι εξίσου και τα βιοδιασπώμενα, μέσω των διαδικαστικών παραγωγής και βελτιώσεων των φυτών, συμβάλουν θετικά στην επίδοση, τη παραγωγικότητα και τη βελτίωση των τελικών προϊόντων. Η ρύπανση που επέρχεται όμως είναι ένα ζήτημα που απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση ως προς τους τρόπους – λύσεις, καθώς η συσσώρευση όχι μόνο των ΜΠ αλλά και των χημικών προσθέτων για τις πιθανές οικολογικές συνέπειες που ακολουθούν (Santini et al., 2023).

6.4.5 Άρδευση και πλημμύρες

Η σχέση της άρδευσης αλλά και οι πλημμύρες εξίσου έχει παρατηρηθεί πως είναι εφικτό να αποτελέσουν πηγές μικροπλαστικών στα αγροτικά εδάφη. Αρχικά η άρδευση είναι μια από τις συνηθέστερες και απαραίτητες πρακτικές του γεωργικού τομέα, η εφαρμογή της γίνεται

σε περιοχές με έλλειψη νερού, καθώς έτσι επιτρέπει την καλλιέργεια των φυτών ακόμα και όταν οι βροχοπτώσεις είναι μη επαρκείς για τον σκοπό της καλυψής νερού των καλλιεργειών. Σύμφωνα με παλαιότερα παγκόσμια στοιχεία σε περιοχή εκατομμυρίων εκτάρων που υπήρχε άρδευση, αντιστοιχούσε σε 270 εκατομμύρια εκτάρια (Mha) με ποσοστό 18% της συνολικής γεωργικής γης (Bruinsma, 2003).

Σήμερα η άρδευση παραμένει μια θεμελιώδης πρακτική ενισχύοντας την γεωργική παραγωγή, ειδικά σε μέρη που το φυσικό νερό δεν επαρκεί. Λαμβάνοντας υπόψη τα στοιχεία του USDA Economic Research Service (2024) μέχρι το 2020 ο σχετικός εξοπλισμός αποτελούνταν από περίπου 343 εκατομμύρια εκτάρια (Mha), δηλαδή γύρω στο 20% της συνολικής γεωργικής γης. Έπειτα βάση τα στοιχεία του 2022, υπάρχουν συνολικά 354 εκατομμύρια εκτάρια με εξοπλισμό για άρδευση, καλύπτοντας περίπου το 22% της παγκόσμιας καλλιεργήσιμης γης (FAO, 2024). Τα στοιχεία δείχνουν σημαντική αύξηση σε παγκόσμιο επίπεδο με το ένα πέμπτο των στεμμάτων να αρδεύονται, ειδικά σε περιοχές μεγάλης έντασης παραγωγής. Σε αυτή τη διάρκεια των χρόνων δηλαδή από το 2003 με ποσοστό 18% η αύξηση της έκτασης της αρδευόμενης γης έφτασε στο 22% το 2024.

Η σημαντική αύξηση που παρατηρήθηκε εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αύξηση του πληθυσμού και της αστικοποίησης. Βέβαια με τα σημάδια της κλιματικής αλλαγής να εμφανίζονται σε διάφορες χώρες και σε συνδυασμό με την έλλειψη νερού σε αρκετές περιοχές του κόσμου. Η κατάσταση αυτή οδηγεί στην άμεση χρήση των επεξεργασμένων ή και ακόμα ακατέργαστων λυμάτων για την άρδευση γεωργικών εδαφών. Μερικές φορές σε κάποιες περιοχές αποτελεί και την μοναδική λύση πηγής νερού για αρκετούς αγρότες (WWAP, 2009). Ωστόσο τα ύδατα που χρησιμοποιούνται εμπεριέχουν μικρά πλαστικά σωματίδια (Hartline et al., 2016). Με βάση τους Majewsky et al. (2016) προσδιόρισαν 80–260 mg PE και PP ανά m³ λύματος. Επομένως, η άρδευση με λύματα, που είναι ήδη γνωστό ότι οδηγεί σε συσσώρευση επιβλαβών ουσιών όπως φαρμακευτικά προϊόντα (π.χ. Dalkmann et al., 2012) και προφανώς χρησιμεύει και ως πηγή μικροπλαστικών για τα γεωργικά εδάφη. Βέβαια όπως θα περιμέναμε κάποιοι μέθοδοι άρδευσης θα εξασφάλιζαν τη μείωση εισαγωγής ΜΠ στα αγροτικά εδάφη, όμως έχει διαπιστωθεί ότι ο βαθμός χρήσης του νερού αν και οδηγεί στη μείωση του συνολικού όγκου του νερού, δεν ισχύς το ίδιο για τα μικρο- ή νανοπλαστικά. Επομένως, η είσοδος μικροπλαστικών σε φυσικά εδάφη από το αρδευτικό νερό ακολουθεί τη σειρά: επιφανειακή άρδευση > άρδευση με ψεκαστήρες > άρδευση με σταγόνες (Zhang, 2020).

Σε αυτό το σημείο θα γίνει παράθεση μερικών περιπτώσεων συγκέντρωσης ΜΠ. Σε ερευνά του 2022 στην Ταιβάν, βρέθηκαν 1,9 έως 141 τεμάχια/L μικροπλαστικών σε νερό επιφανειακής άρδευσης, με τη περισσότερη ποσότητα να παρατηρείται τον Μάιο, κατά τη διάρκεια της βροχερής περιόδου. Οι τύποι πολυμερούς που κυριαρχούσαν ήταν το πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο και πολυστυρένιο, και τα μεγαλύτερα σωματίδια ήταν ίνες μήκους 333–1000 μm (Jiang et. al., 2023). Μια διαφορετική περίπτωση σε έρημο στη Χινηjiang της Κίνας το 2024, έδειξε πως τα ΜΠ μπορούν να μετακινηθούν στο έδαφος με το πότισμα της καλλιέργειας, με τη μέθοδο της στάγδην άρδευσης. Έτσι μετακινήθηκε το 30,5 % των πλαστικών σωματιδίων κάτω από το σημείο εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου (Du et. Al., 2024).

Πλέον υπάρχουν σαφείς αποδείξεις ότι η άρδευση συμβάλει στην παρουσία των ΜΠ, καθώς τα σωματίδια έχουν την ικανότητα να μεταναστεύουν μέσα στο έδαφος, ειδικά με τις τεχνικές άρδευσης τύπου drip και αποτελούν μια σημαντική αλλά ακόμα υπό διερεύνηση πηγή ρύπανσης. Άλλες πηγές που συμβάλουν στις υψηλές συγκεντρώσεις είναι τα πλαστικά αγροτικά απορρίμματα στην επιφάνεια, ακόμα και οι διαρροές από

σωληνώσεις άρδευσης ή αποστράγγισης έχουν ρολό στην πλαστική ρύπανση. Το σύνολο των μικροπλαστικών που εισάγονται βέβαια εξαρτώνται από κάποιες μεταβλητές, ως εξής έχουμε: τη συγκέντρωση της ποσότητας στο νερό, τη ποσότητα του νερού που εισέρχεται στο έδαφος, τον ρυθμό διήθησης τους νερού καθώς είναι ένας παράγοντας που εξαρτάται από τη σύσταση δηλαδή τον τύπο του εδαφους, όπως και από τον κορεσμό δηλαδή την επάρκεια του εδαφους σε νερό και υγρασία (Rillig et. al., 2024).

Συνεπώς τα γεωργικά εδάφη που αρδεύονται και τα ύδατα κατευθύνονται στους υδροφόρους ορίζοντες πιθανότατα οι συγκεντρώσεις των μικροπλαστικών που φτάνουν να είναι μειωμένες, αλλά των ναυοπλαστικών είναι ελάχιστα πιο υψηλές. Παρότι τα υπόγεια νερά φιλτράρονται από το έδαφος, πρόσφατες μελέτες καταδεικνύουν ότι η παρουσία μικροπλαστικών, ακόμη και σε βάθη μεγαλύτερα των 50 μέτρων, έτσι η εξάπλωση της ρύπανσης δεν μπορεί να αποκλειστεί πλήρως. Με τις αντίστοιχες έρευνες θα παρουσιαστούν η παρουσία τους στα υπόγεια ύδατα. Στην Βικτωρία της Αυστραλίας πραγματοποιήθηκε μελέτη με γεωτρήσεις και λήψεις 21 δειγμάτων, με βάθος εδαφους 10-25 μέτρων, βρέθηκαν ως μέσος όρος 38 ± 8 τεμ./L μικροπλαστικών, με τους τύπους πολυμερών να είναι: PE, PP, PS, PVC και μέσο μέγεθος περίπου 89 μm (Samandra et. al., 2022). Σε υπόγεια ρέματα στην νοτιά Κορέα επιβεβαιώνονται ξανά οι συγκεντρώσεις των μικροπλαστικών, οι οποίες κυμαίνονται από 0,006 έως 0,193 τεμ./L (Kim et al., 2023). Άλλες δυο μελέτες έχουν ανιχνεύσει: 12–54 MP/L σε περιοχή της Ιταλίας και 4 MP/L στην νοτιά Κορέα σε βαθιά στρωματά της υδροφόρου (Colmenarejo Calero et al., 2024). Αυτό συνεπάγεται με το συμπέρασμα ότι η ποσότητα των μικροπλαστικών βρίσκεται κατά κύριο λόγο κάτω από 50 τεμ./L. Όσο αφορά τα ναυοπλαστικά (<1 μm) για την ανίχνευση στοιχείων στο υπόγειο νερό φαίνεται πως οι έρευνες βρίσκονται σε αρχικό στάδιο ακόμα, με το δεδομένο να είναι ότι είναι η πιθανή παρουσία τους χωρίς σαφή ποσοτικά δεδομένα, λόγω τεχνικών περιορισμών που υπάρχουν (Iwanowicz et. al., 2024).

Τόσο η άρδευση όσο και οι πλημμύρες, που δε θα έπρεπε να αγνοούμε, είναι πιθανές πηγές πλαστικών στα εδάφη. Όμως οι συγκεντρώσεις από αυτές τις πηγές είναι αρκετά μεταβλητές, οι οποίες είναι άμεσα εξαρτώμενες από τις συγκεντρώσεις πλαστικού στο περιβάλλον, από τα λύματα κυρίως τα ακατέργαστα να έχουν υψηλές συγκεντρώσεις σε πολυμερή υλικό, εξίσου και τα επεξεργασμένα λύματα, βέβαια μπορούν να προέρχονται από τη ροή ποταμών και λοιπών κοντινών υδάτων όπως λίμνες. Ως τελικά συμπεράσματα θα μπορούσαμε να αναφέρουμε πως ο κίνδυνος της άρδευσης θεωρείται χαμηλός, όμως με τη περαιτέρω παρακολούθηση και ερευνά θα σχηματιστεί μια καλύτερη εικόνα της πλαστικής ρύπανσης από την άρδευση και τις πλημμύρες (Rillig et. al., 2024).

6.5. Η Επιρροή των Απορριμμάτων

Βέβαια και το αστικό περιβάλλον με τον υπερπληθυσμό και την αστικοποίηση είναι παράγοντας αύξησης της ποσότητας αποβλήτων. Εξίσου άλλες πηγές που συνδέονται είναι τα κατεστραμμένα οχήματα και μέσα, παράλληλα και η παράνομη απόρριψη των σκουπιδιών που είναι πλαστικά συμβάλουν στην επιβάρυνση των διάφορων οικοσυστημάτων. Σε αυτή την επιβάρυνση των απορριμμάτων συμβάλει σε μεγάλο βαθμό και ο τομέας του τουρισμού, καθώς περιοχές με έντονο τουρισμό τείνουν αυξάνουν στο έδαφος τις συγκεντρώσεις. Επίσης η εναπόθεση έπειτα την αποσύνθεση των προϊόντων πλαστικού ή συνθετικού υλικού. Ακόμα συγκαταλέγονται οι συνθετικές ίνες που προέρχονται από ρούχα και είδη σπιτιού και απορρίπτονται, έτσι διαφεύγουν με την ατμοσφαιρική μεταφορά σωματιδίων με τη φθορά τους ή απλά καταλήγουν και συσσωρεύονται στους χώρους συγκέντρωσης απορριμμάτων (Hamm et al., 2018).

Τα πλαστικά απορρίμματα ενδέχεται να προκαλέσουν της εισαγωγή χημικών ουσιών, για παράδειγμα οι πλαστικοποιητές που είναι μια αρκετά διαδεδομένη κατηγορία που βρίσκεται σε τέτοια υλικά επιφέρει άμεσες και επικίνδυνες συνέπειες στα χερσαία περιβάλλοντα. Οι πλαστικοποιητές προέρχονται από μεγάλα πλαστικά αντικείμενα που βρίσκονται στην επιφάνεια των εδαφών ή βρίσκονται στο στάδιο της αποσύνθεσης τους με τα μικροπλαστικά να έχουν λάβει τη θέση τους. Η υποβάθμιση των εδαφών που οφείλεται στα πλαστικά συμβαίνει μέσω της διασποράς των μορίων πλαστικοποιητών στην επιφάνεια των εκάστοτε αντικειμένων, με την επερχόμενη άμεση απορροή τους από το έδαφος ή διαφορετικά διάσπαση από τα στοιχεία του εδαφους που λειτουργούν με τέτοιο τρόπο στην επιφάνεια του πλαστικού αντικειμένου (Billings et al., 2021).

Ένα χαρακτηριστικό των μικροπλαστικών που θα περιμέναμε να βρούμε σε χωματερές και χώρους υγειονομικής ταφής είναι τα σωματίδια μικρού μεγέθους, διότι τα πλαστικά έχουν συγκεντρωθεί και σταδιακά αρχίζουν να φθείρονται με το πέρασμα του χρόνου, ειδικά όσα περισσότερα χρονιά τόσο μεγαλύτερη θα είναι η φθορά τους. Έτσι τα πλαστικά σωματίδια συνεχίζουν αυτή τη διαδικασία με αποτέλεσμα να δημιουργούνται όλο και μικρότερα σωματίδια, δηλαδή από πλαστικά σε μεσοπλαστικά, έπειτα μικροπλαστικά και σε τελικό στάδιο νανοπλαστικά. Εξετάζοντας το γεγονός αυτό οι χωματερές και οι χώροι υγειονομικής ταφής δέχονται επι συνεχή βάση την εισαγωγή γιγάντιων ποσοτήτων όλο και περισσότερο, με τα μεγέθη των σωματιδίων να είναι μεγαλύτερα. πλέον είναι αναμενόμενο πως βρεθούν πιο μεγάλα σωματίδια πλαστικού σε τέτοια μέρη ως πλειοψηφία, σε σχέση με άλλες περιοχές χρήσης γης θα που το ποσοστό τους δε θα είναι αντίστοιχο, ποσό μάλλον στο φυσικό περιβάλλον (Leitão et al., 2023).

Με τη παραγωγή των απορριμμάτων να έχει εκτοξευθεί, με αποτέλεσμα την επακόλουθη διάθεση αποβλήτων να προκαλεί αρκετούς προβληματισμούς. Η συνολική παραγωγή πλαστικών αποβλήτων στην ευρωπαϊκή ένωση ανήλθε παρήγαγε περίπου 2,233 δισεκατομμύρια τόνους, με αξιοσημείωτο γεγονός ότι το σημαντικό μέρος τους οφείλεται στις πλαστικές συσκευασίες (Eurostat, 2022). Σχετικά με την επεξεργασία που πραγματοποιείται στα πλαστικά απορρίμματα που έχουν απορριφθεί οι 32,3 εκατομμύρια τόνοι από αυτούς, το επόμενο στάδιο είναι μόνο το 29,9% δηλαδή οι 8,7 περίπου εκατομμύρια τόνοι θα ανακυκλωθούν, το υπόλοιπο 49,6% αφέθηκε στους χώρους υγειονομικής ταφής (χωματερές) ή αποτεφρώθηκε με ανάκτηση ενέργειας. Τέλος το υπόλοιπο 23,5% έχει υποστεί άλλες διαδικασίες που δεν είναι ξεκάθαρες πλήρως (Plastic Europe, 2023). Σχετικά με το μεγαλύτερο ποσοστό προϊόντων δηλαδή τα πλαστικά συσκευασίας, αναφέρεται σύμφωνα με το Eurostat (2022) πως από τα 16,16 δισεκατομμύρια τόνους, το 2022 έχουν ανακυκλωθεί το 40,7 % και το υπόλοιπο 59,3% έχει οδηγηθεί σε διαδικασίες αποτέφρωσης ή εναπόθεσης σε χωματερές.

Οι τεράστιες ποσότητες που αφήνονται στους χώρους υγειονομικής ταφής κατά τη διάρκεια της αποσύνθεσης τους παράγουν μεγάλες ποσότητες από εκπομπές του φαινομένου του θερμοκηπίου (Muenmee et al., 2016). Αν και υπο κατάλληλες συνθήκες και απολυτούς ορούς ακολουθήσεις της διαδικασίας δεν θα έπρεπε να ενδέχεται τέτοιος κίνδυνος, διότι ενισχύονται οι επιβλαβείς κίνδυνοι ρύπανσης για τα εδάφη και τα ύδατα (Hamilton et al., 2019). Οι εναέριες εναποθέσεις των μικροπλαστικών και νανοπλαστικών είναι πλέον αναμενόμενο, σύμφωνα με τους Liang και Yu (2023) έχει παρατηρηθεί ότι απόβλητα PVC στην διαδικασία της ανακύκλωσης μπορούν να παραχθούν 0,345 κιλά CO₂-e, παρόλο που η διαδικασία αυτή θεωρείται ότι αφήνει ελάχιστο ανθρακικό αποτύπωμα (Hamilton et al., 2019). Σε συνέχεια η αποτέφρωση που αποτελεί ένα φαινομενικά ιδανικό μετρώ μπορεί να παράγει εξίσου αρκετή ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα CO₂ (Pilz, 2014).

Πέρα από αυτό παράγονται παράλληλα και οξείδια του αζώτου, μονοξείδιο του άνθρακα και πτητικές οργανικές ενώσεις (Ali et al., 2021). Συνολικά αν λάβουμε υπόψη όλες τις διαδικασίες που μπορούν να συμβάλουν στην διαχείριση των πλαστικών αποβλήτων, βρέθηκε πως κατά την αποτέφρωση παράγονται οι περισσότερες εκπομπές, καθιστώντας την υπεύθυνη για την ρύπανση του περιβάλλοντος (Hamilton et al., 2019). Ακόμα ένας παράγοντας που συμβάλει στην εξάπλωση των πλαστικών σωματιδίων είναι η μη κατάλληλη και μη προσεκτική συλλογή και μεταφορά τους, έτσι μπορεί να γίνει διαρροή τους (Barnes et al., 2009). Τέλος ας μην αγνοούμε τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις διάθεσης αποβλήτων που όλο και περισσότερο η χωρητικότητά τους δεν είναι επαρκής με τις συνεχόμενες αυξημένες ποσότητες αποβλήτων που παράγονται, με ένα μεγάλο ποσοστό αυτών να εισδέχονται στο περιβάλλον (Parvez et al., 2024)

6.6. Παρουσία και Πηγές Μικροπλαστικών στο Έδαφος: Επισκόπηση Ανθρωπογενών Επιρροών

Η παρουσία των μικροπλαστικών στα χερσαία εδάφη αν και τα τελευταία χρονιά όλο και περισσότερο ερευνάται, ένα είναι σίγουρο πως πρόκειται για μια συνθέτη και πολυπαραγοντική πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπίσουμε. Μέχρι το σημείο αυτό είδαμε και γενικά και πιο ειδικά στοιχεία με τις πηγές εισροής των μικροπλαστικών στα εδάφη, παρουσιάσαμε τις σημαντικότερες όμως υπάρχουν και άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες που οφείλουν την ύπαρξη τους. Η εξόρυξη μπορεί να συμβάλει στην πλαστική ρύπανση των εδαφών. Κατά τη διάρκεια της εξόρυξης των μεταλλευμάτων χρησιμοποιούνται πλαστικοί σωλήνες και πιθανόν διαφορά εργαλεία που εμπεριέχουν πλαστικό, με τη βασική χρήση των σωλήνων να είναι η ψύξη και ο αερισμός, φθείρονται κατά τη διάρκεια της ζωής τους και έτσι απελευθερώνονται μικροπλαστικά σωματίδια στην περιοχή (Corradini et al., 2021; Khant et al., 2024). Τα μικροπλαστικά δεν καταλήγουν μόνο στη συγκεκριμένη περιοχή, αλλά μπορούν να αποτελούν παράγοντες ρύπανσης και για τα γύρω εδάφη και όχι μόνο, καθώς μπορούν να μεταφερθούν μέσω του ανέμου σε κοντινά οικοσυστήματα. Παράλληλα κατά τη διάρκεια των εξορυκτικών δραστηριοτήτων η ρύπανση δεν οφείλεται μόνο σε ΜΠ, αλλά τα εδάφη μπορούν να εμπλουτιστούν και από βαρέα μέταλλα, όπως είναι ο χαλκός (Cu), ο οποίος συνδέεται αρκετά με την αυξημένη παρουσία μικροπλαστικών, θα μπορούσαμε συνεπώς να τον θεωρήσουμε και ως δείκτη συγκέντρωσης (Neaman et al., 2020).

Επιπρόσθετα υπάρχουν και άλλες ανθρώπινες παρεμβάσεις όπου έχουν αντίκτυπο στο περιβάλλον, όπως είναι η λειτουργία υδροηλεκτρικών φραγμάτων, οι οποίοι με τη σειρά τους διαταράσσουν τον τρόπο μεταφοράς των μικροπλαστικών από τη πορεία του νερού από τα ποταμιά στις θάλασσες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση τους σε ιζήματα των ταμιευτήρων (Xu et al., 2022a). Ακόμα ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η κατασκευή φραγμάτων σχηματίζουν και μεταφέρουν ιζήματα, επίσης η καταστροφή των κατοικιών και διάφορων υποδομών και άλλες παραποτάμιες δραστηριότητες συμβάλουν στις εισροές των μικροπλαστικών αλλά και την υποβάθμιση των οικοσυστημάτων (Borrelli et al., 2017). Παράλληλα πρακτικές κυρίως σε αγροτικές περιοχές που επηρεάζουν και την ποιότητα του αέρα, αποτελεί η καύση φυτικών υπολειμμάτων ή στέρεων οικιακών αποβλήτων (συμπεριλαμβάνοντας σε αυτά και πλαστικά προϊόντα) σε υπαίθριους χώρους, όπως οι κήποι και οι αυλές των σπιτιών. Αυτή η κοινή πρακτική μεταφέρει με την τεφρά και μικρά σωματίδια πλαστικού μέσω της ατμοσφαιρικής διασποράς στο υπόλοιπο περιβάλλον. Η δυνητική πηγή της καύσης μπορεί να αιτιολογήσει ένα σημαντικό μέρος των υψηλών επίπεδων μικροπλαστικών στο αγροτικό περιβάλλον (Canha et. al., 2023)

Βάση μελετών στην Πορτογαλία, οι αστικοί κήποι στις πόλεις μπορεί να οδηγήσει στη πλαστική ρύπανση, ακόμα και αν δεν είναι εκ πρώτης όψεως δεν είναι ξεκάθαρες οι πηγές της ρύπανσης. Η ενίσχυση της πιθανότητας να οφείλεται σε παράγοντες της κοντινής απόστασης από πόλεις ή και γενικά κατοικημένες περιοχές, αλλά και καύση πλαστικών αποβλήτων σε τοπικό επίπεδο (Canha et al., 2023).

Οι χρήσεις γης και η αλλαγές χρήσης είναι συνυφασμένες με την ανθρώπινη δραστηριότητα πέρα από πηγή πλαστικών σωματιδίων τα οποία σύμφωνα με στοιχεία μας δείχνουν ότι οι συγκεντρώσεις των ΜΠ σε χερσαία περιβάλλοντα ποικίλει σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση της γης. Στα καλλιεργήσιμα εδάφη σε ποσοστό 57% των δειγμάτων εμφανίσε πλαστική ρύπανση, ενώ σε βοσκοτόπους το ποσοστό ήταν μειωμένο 44%. Σε αντίθεση οι φυσικοί χώροι βόσκησης η ρύπανση από πλαστικά σωματίδια ήταν μόνο 20%, με τη λιγότερη συκέντρωση να βρίσκεται στο 3% στους χώρους βόσκησης που κυριαρχούνταν από θάμνους. Θα μπορούσαμε να παρουσιάσουμε συγκεκριμένα τις συγκεντρώσεις των σωματιδίων ανά κιλά εδαφους: καλλιεργούμενα εδάφη, 540 ± 320 σωματίδια/kg). Βοσκότοποι (420 ± 240 σωματίδια/kg) (Corradini et al., 2021).

Εξίσου ως βασική αίτια της επιταχυνόμενης διάβρωσης των εδαφών ειδικά σε συνδυασμό με την επήρεια των παραγόντων της κλιματικής αλλαγής επέρχονται ακόμα περισσότερες πηγές ρύπανσης (García-Ruiz et al., 2013). Οι πλέον τρέχουσες παγκόσμιες τάσεις αλλαγής χρήσης γης χαρακτηρίζονται από την αυξημένη κάλυψη των αγροτικών εκτάσεων και της μείωσης της δασικής καλυψης σε παγκόσμιο επίπεδο (Winkler et al., 2021). Αυτή η κατάσταση δημιουργεί προβλήματα στον κύκλο των θρεπτικών ουσιών αλλά και του άνθρακα του εδαφους, σαφώς και της παραγωγικότητας του, διότι σταδιακά επηρεάζονται οι οικοσυστημικές του υπηρεσίες, όπως είναι η συγκράτηση των υδάτων και η παροχή ενδυνάμυντων. Εν τούτης επέρχεται η υποβάθμιση του εδαφους (Borrelli et al., 2017).

Βέβαια η εκτίμηση για τις επερχόμενες εξελίξεις υπό τις εμφανείς συνέπειες της κλιματικής αλλαγής είναι μια αρκετά συνθετή κατάσταση, εξαιτίας των πολυάριθμων παραμέτρων, όπως κοινωνικοοικονομικοί, πολιτικοί, περιβαλλοντικοί και αλλά δρουν τόσο σε τοπικό, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο (Li και Fang, 2016). Λόγω της πολυπλοκότητας που παρουσιάζεται είναι απαραίτητα τα μετρά συντήρησης, με κυρίαρχο το μετρό της πρόληψης με σκοπό την προσαρμογή στα νέα δεδομένα (Eekhout και de Vente, 2019). Μερικές παραθέσεις μέτρων είναι οι αναδράσεις των δασών, τα καταλληλά μετρά βόσκησης ή ακόμα και η απαγόρευση της όταν απαιτείται μέτρων (Xiong et al., 2018). Τα μέτρα συντήρησης του εδαφους δεν είναι μόνο ευεργετικά για τη μείωση της διάβρωσης του εδαφους, αλλά μπορούν να προσφέρουν επιπλέον οικοσυστημικές υπηρεσίες, όπως η συγκράτηση άνθρακα και αζώτου, συμβάλλοντας στην μετρίαση της κλιματικής αλλαγής (Lal et al., 2011) και την προστασία της βιοποικιλότητας (Albaladejo et al., 2021).

Για την μεγαλύτερη ακρίβεια του δείκτη ανθρωπογενών πιέσεων εφαρμοστήκαν συγκεντρώσεις φωσφόρου (P), καθώς υπήρχε έλλειψη πληροφοριών όσο αφορά την ένταση των δραστηριοτήτων. Ο λόγος βέβαια που χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης ήταν ότι οι περιοχές χρησίμευαν για εντατική γεωργία, με πρακτικές υπερβολικής λίπανσης, συγκεκριμένα με φωσφορικά λιπάσματα. Τα αποτελέσματα μας υπέδειξαν ότι η ρύπανση από μικροπλαστικά δεν είναι απαραίτητο να σχετίζεται με την εφαρμογή κομπόστ ή ακόμα και λιπασματα, ή ακόμα δεν υπάρχει πάντα σύνδεση με τις δραστηριότητες ανόρυξης, τους δρόμους κυκλοφορίας ή της κοντινής απόστασης με κατοικήσιμες περιοχές. Αλλά μάλλον μεγαλύτερο ρολό έχει η γενικότερη ένταση των γεωργικών δραστηριοτήτων (Corradini et al., 2019).

Τέλος είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος παραμονής των πλαστικών σωματιδίων στην επιφάνεια του εδάφους, διότι αποτελεί ένας βασικός παράγοντας για το σταδιακό κατακερματισμό τους σε μικρότερα σωματίδια. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν είναι η μεταφορά τους στο περιβάλλον, οι βιοτικοί και αβιοτικοί παράγοντες και σαφώς οι ανθρωπογενείς παράγοντες. Έτσι η μετακίνηση και η διάσπαση τους εξαρτάται από αυτούς τους παράγοντες, όπως και η κατανομή και η σύνθεση των μικροπλαστικών στην εδαφική επιφάνεια. Συνεπώς τα μικροπλαστικά που βρίσκονται στην επιφάνεια και κοντά σε αυτή, ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζουν επακριβώς ούτε τις συγκεντρώσεις, ούτε την πολυεδρική σύνθεση των μικροπλαστικών που βρίσκεται στο εδαφικό οικοσύστημα (Billings et al., 2021).

7. Διάσπαση και Αποικοδόμηση των Μικροπλαστικών στο Φυσικό Περιβάλλον

7.1. Η Διάσπαση και Αποικοδόμηση στο Έδαφος

Η διαδικασία της αποικοδόμηση των μικροπλαστικών δεν ξεκινάει κατευθείαν με τη εναπόθεση τους στο έδαφος, διότι μπορεί να παρασυρθούν είτε από έμβιους είτε από αβιοτικούς παράγοντες. ενώ ένα σημαντικό ενδεχόμενο είναι ότι μπορούν να καταναλωθούν από τους οργανισμούς του εδάφους και έτσι να μεταφερθούν στα διαφορά τροφικά επίπεδα ακόμα και μέχρι τους τριτογενείς καταναλωτές, προκαλώντας σημαντικές αρνητικές συνέπειες, τόσο στους αποικοδομητές, όσο και στους καταναλωτές της τροφικής αλυσίδας (Nizzetto et al., 2016).

Σε πολυάριθμες έρευνες έχει αποδειχτεί πως ποικίλες ομάδες μικροοργανισμών, όπως βακτήρια και παθογόνοι μικροοργανισμοί έχουν την ικανότητα αποδόμησης των πλαστικών, σε σημεία με έντονη ρύπανση από τα μικροπλαστικά παρουσιάζεται αφθονία στον πληθυσμό τους. Αυτό υποδηλώνει πως τα ΜΠ λειτουργούν ως ένας μικροβιακός βιότοπος, επηρεάζοντας παράλληλα τις οικολογικές λειτουργίες του εδαφικού οικοσυστήματος (Huang et al., 2019). Επίσης η εισχώρηση των μικροπλαστικών φαίνεται πως αλλάζει και τη σχέση μεταξύ των δραστηριοτήτων της μικροβιακής κοινότητας και της σταθεροποίησης των συσσωμάτων, τα οποία με τη σειρά του βοηθάνε στη διατήρηση της λειτουργίας και της δομής του εδάφους (De Souza Machado et al., 2018; Lehmann et al., 2017).

Επομένως κρίνεται απαραίτητο να κατανοήσουμε εις βάθος τους τρόπους με τους οποίους τα μικροπλαστικά συμβάλουν στην διαμόρφωση της μικροβιακής κοινότητας καθώς αλλά και στην επήρεια που έχουν στην ροή του άνθρακα και την αλληλεπίδραση τους (Zang et al., 2019; Qi et al., 2020).

Όστε να μη διαταραχθούν τα οικοσυστήματα η λύση θα μπορούσε να είναι η εξάλειψη της ρύπανσης από τα μικροπλαστικά, κάτι που αποτελεί εξαιρετικά δύσκολο, ειδικά στα εδάφη, διότι ως υλικό έχει ιδιαίτερη αντοχή. Όπως και με το σκοπό κατασκευής του, έτσι με την εισαγωγή τους στο περιβάλλον τα πλαστικά χαρακτηρίζονται από την ανθεκτικότητά τους και αντοχή τους. Συνεπώς η συσσώρευση τους είναι αναμενόμενη, τόσο στο έδαφος, όσο και στα ιζήματα του νερού (Barnes et al., 2009). Όπως έχει ήδη φανεί και για άλλες φυσικές και σταθερές ενώσεις όπως ο άνθρακας, μπορεί να παραμείνει για εκατοντάδες χρονιά. Συγκεκριμένα η αποδόμηση του μπορεί να κυμανθεί από 10 έως και περισσότερα από 1000 χρονιά, βέβαια οι παράγοντες που το επηρεάζουν διαφέρουν ανάλογα το περιβάλλον, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τον τύπο του πλαστικού αλλά και την διαχείριση του (Chamas et al., 2020). Σε αρκετές μελέτες έχει διαπιστωθεί η κατάσταση

αυτή στα εδάφη, ενδεικτικά θα μπορούσαμε να αναφέρουμε μερικές: η απώλεια βάθους του πολυαιθυλενίου (PE) ήταν μόλις 0,1 έως 0,4% έπειτα από 800 ημέρες στο έδαφος (Albertsson, 1980). Η απώλεια βάθους πολυπροπυλενίου (PP) βρισκόταν σε 0,4% μετά από ένα έτος (Arkatkar et al., 2009). Ενώ η αποδόμηση του πολυβινυλοχλωριδίου (PVC) ήταν ανύπαρκτη έπειτα από 35 χρονιά παραμονής του στο έδαφος (Santana et al., 2012; Ali et al., 2014).

Με τη παραμονή τους τα πλαστικά, όπως τα συνθετικά υλικά και σαφώς οι χημικές ενώσεις που εμπεριέχονται αποτελούν κίνδυνο για το περιβάλλον (Czirmczik & Masiello, 2007). όμως η μακροπρόθεσμη παραμονή τους και η μετέπειτα τύχη τους είναι αρκετά ασαφής, καθώς αποτελεί πεδίο διερεύνησης. Κάτι που είναι γνωστό αποτελεί την μετακίνηση των σωματιδίων από τις ρωγμές του εδαφους, δηλαδή μέσα από τα φυσικά κανάλια που έχουν δημιουργηθεί, είτε από μικροοργανισμούς όπως γεωσκοπίες ή από τις ρίζες και ριζίδια των φυτών. Αυτά τα φυσικά κανάλια βέβαια είναι χρήσιμα για τη βελτίωση του αερισμού και την αποστράγγιση του εδαφους. Βοηθώντας έτσι την καλύτερη ανάπτυξη των ριζών και συμβάλλοντας στην απομάκρυνση των επιπλέον υδάτων. Επιπλέον άλλο τρόπος αποτελεί η βιοανάδευση, δηλαδή η μεταφορά των στοιχείων του εδαφους από μεγαλύτερους οργανισμούς, παραδείγματος χάρη τυφλοπόντικες, μεταφέροντας τα ΜΠ σε μεγαλύτερα βάθη του εδαφικού προφίλ (Huerta Lwanga et al., 2017a).

Με τη πάροδο των χρόνων τα πλαστικά διασπώνται σε μικρότερα σωματίδια λόγω της υπεριώδους ακτινοβολίας από τον ήλιο και την μηχανική καταπόνησης που δέχονται (Song et al., 2017). Στα εδάφη όμως οι διεργασίες αυτές είναι περιορισμένες και αυτό κάνει την αποδόμηση αρκετά αργή (Krueger et al., 2015). Αν και τα συμβατικά πλαστικά είναι πιο επιτρέπει στις μεταβληθέντες επιδράσεις, η φωτώ – οξείδωση είναι ένας πιο άμεσος και αποτελεσματικός τρόπος δημιουργίας μεγάλων ποσοτήτων διάσπασης, δηλαδή δημιουργία μικροπλαστικών και νανοπλαστικών (Delre et al., 2023; Hale et al., 2020). Θεωρείται ότι πολλά από αυτά προσέλθαν από αυτή τη διαδικασία και κατά τη διάρκεια της αποικοδόμησης τους στην φύση εκλύουν συνεχώς εκπέμπουν διάφορα αέρια του θερμοκηπίου, όπως CO₂, CH₄, αιθυλένιο και άλλες χημικές ουσίες, ενώ υποδομούνται στη φύση (Kida et al., 2022; Royer et al., 2018). Οι Kida et al. (2022) παρατήρησαν την επίδραση που έχει το μέγεθος των μικροπλαστικών σε σχέση με τη ποσότητα των εκπομπών CO₂ και CH₄ και κατέγραψαν ότι όσο μικρότερα είναι τα σωματίδια, τόσο μεγαλύτερες είναι οι εκπομπές. Αποτελεί εντυπωσιακό το γεγονός πως όταν εισέρχονται στο περιβάλλον κάποια χαρακτηριστικά τους μεταβάλλονται με τη πάροδο των ετών, λειτουργώντας διαφορετικά και ενισχύοντας έτσι τις επιβλαβείς επιδράσεις τους στα διάφορα οικοσυστήματα. Παρόλα αυτά, η διαδικασία της ανοικοδομεί τους δεν είναι πλήρως κατανοητή και υπάρχουν κενά γνώσης και αμφιβολίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές συνέπειες κάτω από διάφορους παράγοντες και συνθήκες (Parvez et al., 2023).

Ανάλογα με τη διάσπαση γινάτια και η περαιτέρω εξάπλωση τους, τόσο στα χερσαία περιβάλλοντα όσο και στα υδάτινα, εντείνοντας με αυτό το τρόπο τις πιέσεις στην βιοποικιλότητα. Βέβαια έχει άμεση σχέση με τον τύπο του πλαστικού και τα χημικά προσθετά που εμπεριέχονται στα σωματίδια, όπως είναι φαλλικές ενώσεις με σκοπό την ενίσχυση της ευκαμψίας (Arthur et al. 2008). Έπειτα από τη διάσπαση τους εκλύονται στο εκάστοτε περιβάλλον, με τον ενδεχόμενο να έχουν τοξικές επιδράσεις σε διάφορα είδη οργανισμών (Bouwmeester et al., 2015).

Συνεπώς τα συμβατικά είδη πλαστικών, όπως είναι τα σωματίδια PE στα γεωργικά καλύμματα παραμένουν στο έδαφος για πάρα πολλές δεκαετίες υπό τη μορφή μικροπλαστικών (Krueger et al., 2015· Briassoulis et al., 2015). Παράδειγμα για το τύπο του

βιοδιασπώμενος PE σε μορφή φιλμ με προσθετά για την εξασφάλιση της βιοαποικοδόμησης φάνηκε πως οι σημαντικές αλλαγές της φθοράς τους έπειτα την τριετή παραμονή του στο έδαφος (Selke et al., 2015). Έτσι την θέση των συμβατών πλαστικών έρχονται πλέον να λάβουν τα βιοδιασπώμενα πλαστικά, τα οποία αναπτυχθήκαν με το σκοπό να αποτελέσουν μια εναλλακτική λύση με όσο το δυνατόν λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον, αλλά οι μελέτες αποδεικνύουν ότι ούτε και αυτά υποδομοούνται πλήρως στο έδαφος (Briassoulis et al., 2015; Bläsing και Amelung, 2018).

Λόγω του μεγάλο προβληματισμού της γιγάντιας παραγωγής και συσσώρευσης αποβλήτων, η ανάγκη μια λύσης που θα είχε ως στόχο τη βιοδιάσπαση τους ήταν αναγκαία. Τα βιοδιασπώμενα πλαστικά έχουν αποκτήσει σημαντική θέση στην παραγωγή και κατανάλωση τους τα τελευταία χρονιά, ήρθε στην θέση ως αντικαταστάτης των συμβατών πολυμερών (Andler et al., 2022). Η βιοδιάσπαση κατά κύριο λόγο εκτελείται από ποικίλους οργανισμούς, τόσο σε αερόβιες όσο και σε αναερόβιες συνθήκες. Ωστόσο η ποσότητα αυτών των μικροοργανισμών είναι σχετικά περιορισμένη με τους ρυθμούς της αποδόμησης που ακολουθούνται να είναι αργοί (Koller et al., 2023). Κατά τη διαδικασία αυτή γίνεται παραγωγή CH₄ και το CO₂ (Ali et al., 2021; Gilani et al., 2023). Και τα δυο αποτελούν παράγοντα συγκράτησης θερμότητας, ενισχύοντας παράλληλα το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη, αλλά και την κλιματική αλλαγή. Σε αντίθεση με τα συμβατά μικροπλαστικά που εμφανίζουν μειωμένο αποτέλεσμα θέρμανσης λόγω της ανθεκτικότητας και της αντίστασης στην αποικοδόμηση (Lin and Su 2022). Επιπλέον βιολογική τους αποδόμηση επιφέρει δημιουργία θραυσμάτων των μικροπλαστικών, τα οποία ενδέχεται να παραμείνουν στην φύση με τις επιπτώσεις να είναι απρόβλεπτες και αλυσιδωτές (Sutkar et al., 2023).

7.2. Μεταφορά κατά Μήκος της Τροφικής Αλυσίδας

Αντιλαμβανόμαστε πως εξάπλωση των μικροπλαστικών στο περιβάλλον επιφέρει και οικολογικούς και υγειονομικούς κινδύνους από την μεγάλη έκθεση προκύπτει έντονη ανησυχία για τις επερχόμενες εξελίξεις αλλά και συνέπειες. Από την εναπόθεση των πλαστικών σωματιδίων και την μεταφορά τους σε διαφορά οικοσυστήματα όπως περιγράψαμε σε προηγούμενα σημεία, είναι αρκετά εύκολη η εισροή των μικροπλαστικών και στην τροφική αλυσίδα. Αν και υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με τη τροφική μετάδοση τους σε εδαφικές τροφικές αλυσίδες, αποτελεί αφορμή για περαιτέρω διερεύνηση (Carbery et al., 2018; Zhu et al., 2019).

Θα μπορούσαμε να αναφέρουμε μερικά παραδείγματα, μια ερευνά των Lwanga et al. (2017) ερεύνησε μερικές περιπτώσεις της τροφικής αλυσίδας με βάση τη πρόσληψη μικροπλαστικών σε εδάφη από κήπους σπιτιών. Βρέθηκαν εκκρίματα από σκουλήκια και κοπριά από κοτόπουλα, στη δεύτερη περίπτωση οι συγκεντρώσεις ήταν υψηλές με $129,8 \pm 82,3$ σωματίδια μικροπλαστικού ανά γραμμάριο. Σχετικά με τους σκώληκες είναι ικανοί να καταναλώσουν σωματίδια από 0,50-1 mm. Ωστόσο το πιο σύνηθες όπως έχει παρατηρηθεί στα έντερα είναι η κατανάλωση μικρότερων από 0,25 mm. Οι υποθετικοί λόγοι που βρέθηκαν οι συγκεντρώσεις θα μπορούσαν να είναι: πρώτον τα μικροπλαστικά διασπώνται σε μικροπλαστικά καθώς περνούν από το πεπτικό σύστημα και δεύτερον τα ΜΠ που βρέθηκαν στα κοτόπουλα να οφείλονται στο ότι τράφηκαν με σκώληκες που είχαν ήδη συγκεντρώσεις. Σε περίπτωση που ισχύει η δεύτερη περίπτωση, θα επιβεβαιώσει ότι η

τροφική μετάδοση είναι ρεαλιστική περίπτωση για τη μεταφορά των πλαστικών σωματιδίων στις τροφικές αλυσίδες (Lwanga et al. 2018).

Η συσσώρευση ποσοτήτων στους μικροοργανισμούς που μπορούν να καταναλώσουν μικροπλαστικά μπορεί να αποτελειώσει περιβαλλοντικό κίνδυνο, τόσο για την εδαφική πανίδα όσο και για το μέρος που φιλοξενεί τέτοιου είδους ζωή. Όταν τα μικροπλαστικά εισέρχονται στον οργανισμό των σκουληκιών και καταλήγουν στο έντερο, είναι εφικτό να προκληθεί απώλεια του βάρους τους, μείωση του ρυθμού ανάπτυξης, ακόμα και προκαλώντας θάνατο. Κάτι τέτοιο θα μείωνε την ποιότητα του εδάφους (Lwanga et al., 2017).

Ένα άλλο παράδειγμα που πραγματοποιήθηκε με σκοπό την παρατήρηση της τροφικής μεταφοράς των ΜΠ σε είδη αρθροπόδων **Hydroaspis aculeifer** και **Folsomia candida**, απέδειξε ότι και τα δυο είδη έχουν ενεργό ρολό στο να μεταφέρουν ΜΠ τόσο στο έδαφος, όσο και σε υψηλότερα τροφικά επίπεδα (Zhu et al., 2018).

Επιπλέον σε αντίστοιχο πείραμα μελετήθηκαν ποντικά και αναφέρθηκαν ίχνη στους ιστούς τους, όπως οι νεφρούς, το ήπαρ και τα έντερα (Deng et al., 2017). γεγονός που υποδεικνύει ότι τα ποντίκια μπορούν να καταναλώσουν και να αποθηκεύσουν μικροπλαστικά σε ιστούς που θα καταναλωθούν από ζώα υψηλότερων τροφικών επιπέδων αργότερα. Αλλά παραδείγματα που αφορούν το υδάτινο περιβάλλον αποτελούν: θραύσματα μικροπλαστικών ανιχνεύθηκαν στους ωτολίθους ψαριών (*Electrona subaspera*) και σε περιττώματα θαλάσσιων λιονταριών (*Phocartos hookeri*) και φωκιών (*Arctocephalus* spp.). επιβεβαιώνοντας την φυσική τροφική μετάδοση (Nelms et al., 2018).

Αυτό αποδεικνύει ότι η μεταφορά κατά μήκος της τροφικής αλυσίδας είναι πανταχού παρόν, όπως και η παρουσία των μικροπλαστικών εξάλλου, καθώς βρίσκονται σε ποίκιλα οικοσυστήματα. Έτσι η βιοσυσσώρευση είναι βέβαιο ότι υπάρχει τόσο σε υδάτινα περιβάλλοντα όσο και στα εδαφικά, καθώς θα μεταφέρονται με ευκολία από τα θηράματα στους θηρευτές (Au et al., 2017).

Κάπως παρόμοια μεταφορά της αλυσίδας είναι αυτή που ο άνθρωπος αποτελεί τον τελευταίο κρίκο την τροφικής αλυσίδας. Αυτό σημαίνει πως και η ανθρώπινη υγεία βρίσκεται σε κίνδυνο σε κάποιο βαθμό. Μέσω της διατροφής του ο άνθρωπος ενδέχεται να καταναλώσει κάποια ποσότητα μικροπλαστικών. Αρκετές μελέτες έχουν αναφέρει την ύπαρξη σε διάφορες τροφές. Τα προϊόντα έχουν ως εξής: θαλασσινά, αλάτι, ζάχαρη, μέλι και μπύρα (Kosuth et al., 2018).

Συνεπώς η έκθεση που υπάρχει μέσα από την μεγάλη ποικιλία διατροφικών επιλογών είναι πιθανό να συγκεντρωθούν μικροπλαστικά όχι μόνο μέσω της κατανάλωσης της τροφής ή του νερού, αλλά ακόμα και από την εισπνοή σκόνης. Έτσι δεν είναι η μοναδική πηγή εισροής στο ανθρώπινο σώμα η διατροφή (Oßmann et al., 2018; Prata, 2018; Schymanski et al., 2018)

Η ύπαρξη των σωματιδίων πλαστικού δεν θα έπρεπε να απασχολεί μόνο ως κίνδυνος ρύπανσης αλλά και μια δυνητική απειλή για τα τροφικά δίκτυα και κα επέκταση την ανθρώπινη υγεία. Ακόμα και οι εδαφικοί μικροοργανισμοί και οργανισμοί συμβάλουν στην αποδόμηση των πλαστικών συμβάλλοντας στην δημιουργία μικροπλαστικών και γναθοπλαστικών. Ως αποτέλεσμα πέρα από την δημιουργία μιας γιγάντιας εδαφικής δεξαμενής των μικροπλαστικών, επιτρέπει τη βιοσυσσώρευση στα τροφικά δίκτυα, με την είσοδο και συσσώρευση σε διάφορους ιστούς της πανίδας. Το σύνολο των

προβληματισμών δημιουργεί επιτακτική ανάγκη για πιο ειδική διερεύνηση του θέματος, καθώς και ανάπτυξη πολιτικών που θα στοχεύσουν στην μείωση της έκθεσης των μικροπλαστικών στα χερσαία οικοσυστήματα (Hurley et al., 2018).

7.3. Η Απελευθέρωση στην Ατμόσφαιρα και η Σύνδεση με τη Κλιματική Αλλαγή

Όπως αναφερθήκαμε σε πολλά σημεία σχετικά με τη διαδικασία της αποικοδόμησης των μικροπλαστικών, μας απασχόλησε οξείδωση που προκαλείται από την υπεριώδη ακτινοβολία. Ως μια βιολογική διαδικασία φθοράς των μικροπλαστικών που εκτίθενται απευθείας σε αυτή, είναι επερχόμενη η διάσπαση των πολυμερών και πτητικών ενώσεων, δημιουργώντας έτσι νέα μικρομόρια και πτητικές οργανικές ενώσεις (Gewert et al., 2015). Με τη διαδικασία της θραύσης παράλληλα απελευθερώνονται ενώσεις και στοιχεία όπως, αρωματικές και αλκαλικές ουσίες, οι οποίες με τη σειρά τους επιδρούν στην σύνθεση των συγκεντρώσεων άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Σταδιακά δημιουργούνται αντιδράσεις εντός τους πολυμερούς κατά τη διάρκεια λαμβάνουν χωρά αντιδράσεις όχι μόνο ως προς το οξυγόνο, αλλά και με διάφορους οξειδωτικούς παράγοντες ή άλλες ενώσεις όπως είναι το οξειδίο του αζώτου (Bianco & Passananti, 2020).

Σύμφωνα με τους Wu et al. (2022) διαπίστωσαν πως τα μικροπλαστικά τύπου PS που εκτέθηκαν σε υπεριώδη ακτινοβολία παρουσίασαν μεταβολές στις φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Παρόλα αυτά απελευθερώθηκαν τοξικές ουσίες, συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν: βενζόλιο, τολουόλιο, φαινόλη. Επόμενο ήταν να συνεχιστεί η αποικοδόμηση με το τελικό παραγωγό τις ανόργανες ενώσεις και κατάκρυοί λόγω το διοξειδίο του άνθρακα (CO₂), δημιουργώντας έτσι έναν ακόμα συντελεστή επιδείνωσης του φαινομένου του θερμοκηπίου. Λαμβάνοντας υπόψη την μελέτη του ρυθμού της φωτοαποδόμησης των ΜΠ, ο οποίος εξαρτάται από την ενέργεια και ένταση της ακτινοβολίας, τις συγκεντρώσεις του οξυγόνου και του νερού και τη διάμετρο των πλαστικών σωματιδίων (Vicente et al., 2009). Υπάρχουν και άλλες μελέτες που στηρίζουν ότι η παρουσία των μικροπλαστικών επιταχύνει τη διαδικασία χρονικής φθοράς μέσω των αντιδράσεων του όζοντος, εξαιτίας της οξειδωτικής φύσης (Zhang et al. 2022c).

Το αποτέλεσμα της παρατεταμένης έκθεσης των μικροπλαστικών στο περιβάλλον και ειδικά στην ατμόσφαιρα, αναπτύσσονται χημικές αντιδράσεις με το όζον, καταστρέφοντας σταδιακά τα υψηλότερα στρωματά. Κάτι ακόμα που παρατηρείται είναι η δημιουργία του φωτοχημικού όζοντος στην τροπόσφαιρα (Zhao & You, 2022), συμβάλλοντας στην λεγόμενη «ρύπανση του όζοντος», λαμβάνοντας ρολό στην κλιματική αλλαγή και υπερθέρμανση του πλανήτη με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς το όζον αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στο να ρυθμίζει την ατμοσφαιρική θερμοκρασία (Bornman et al., 2019).

Επίσης σχετικά με την αποδόμηση των πλαστικών σωματιδίων συγκεκριμένα αυτών που έχουν ερευνηθεί λιγότερο, τα νανοπλαστικά μπορούν να λειτουργήσουν ως συγκεντρωτές των νεφών ή δημιουργίας πάγου, επηρεάζοντας έτσι τόσο τη διαδικασία σχηματισμού νεφών, όσο και την κατακρήμνιση όταν βρίσκονται σε υψηλές συγκεντρώσεις, ακόμα και στην διάρκεια ζωής των νεφών. Διαταράσσοντας την ισορροπία της ακτινοβολίας στην γη και στο κλίμα, με αναμενόμενες επιπτώσεις (Aeschlimann et al. 2022).

Μετα την παραμονή τους στην ατμόσφαιρα τα μικροπλαστικά με τη βοήθεια των κατακρημνισμάτων ή του αέρα θα εγκατασταθούν στα φύλλα και ανθεί των φυτών, με

αυτή τη κατάσταση να υπονομεύει τους ρυθμούς ανάπτυξης των φυτών αλλά και τις φωτοσυνθετικές τους ικανότητες. Καθώς τα φυτά κατά τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης δεσμεύουν διοξείδιο του άνθρακα και αποβάλλουν οξυγόνα, στην περίπτωση αυτή είμαι πιθανό η δράση των ΜΠ να μειώνει την ικανότητα δέσμευσης του (Gan et al. 2023; Liu et al. 2020).

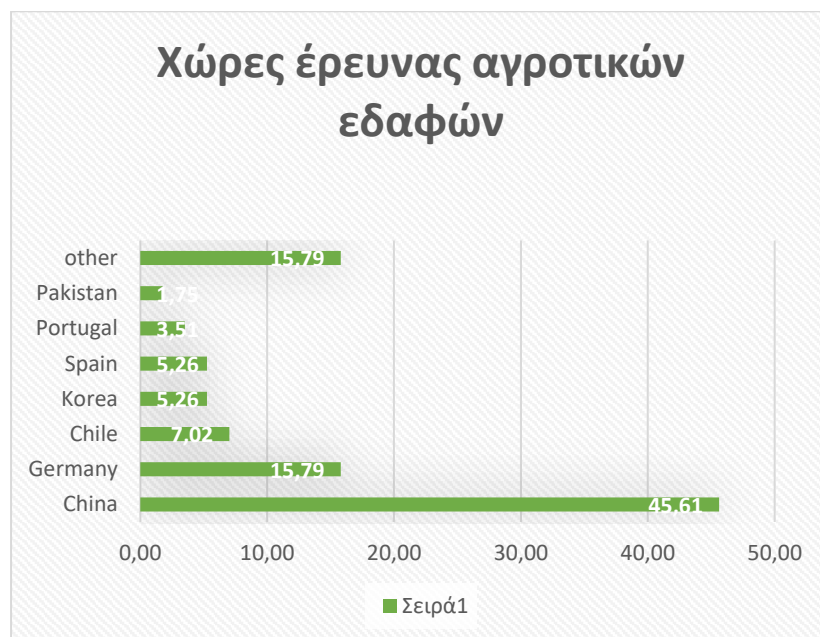
Σήμερα μεγάλο ποσοστό ερευνών στρέφονται στην διερεύνηση και στην παρουσίαση της συμβολής των μικροπλαστικών στην εκπομπή των αέριων του θερμοκηπίου μέσω διάφορων πηγών και διαδρομών στο περιβάλλον. Αν και μερικές μελέτες διαπιστώνουν στην μείωση της παραγωγής των ρύπων του θερμοκηπίου σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο, διαταράσσοντας αρκετά και τη δεξαμενή οργανικού άνθρακα στο έδαφος (SOC) και στην ατμόσφαιρα. Στο επόμενο κεφάλαιο θα αναφερθούμε λεπτομερώς στην επίδραση των μικροπλαστικών ως κυρία πηγή ρύπανσης, καθώς επιταχύνουν δυο βασικά ζητήματα, τη κλιματική αλλαγή και την υπερθέρμανση του πλανήτη. Θα αναφερθούμε στους παράγοντες και τις συνιστώσες που συνδέονται.

8. Επιπτώσεις των ΜΠ και της κλιματικής αλλαγής στα εδάφη και φυτά

8.1. Τα μικροπλαστικά και οι επιπτώσεις για τα αστικά, αγροτικά και δασικά εδάφη

➤ Αγροτικά εδάφη

Τα αγροτικά εδάφη αποτελούν τα εδάφη που έχουν ερευνηθεί πολύ περισσότερο από κάθε άλλο τύπου εδαφους. Οι συγκεντρώσεις των μικροπλαστικών διάφορου σημαντικά ανάλογα τη χωρά, τη περιοχή, την χρήση γης και την ύπαρξη ή πρακτικών λίπανσης εδαφους ή εφαρμογής κάποιου αλλού βελτιωτικού εδαφους.



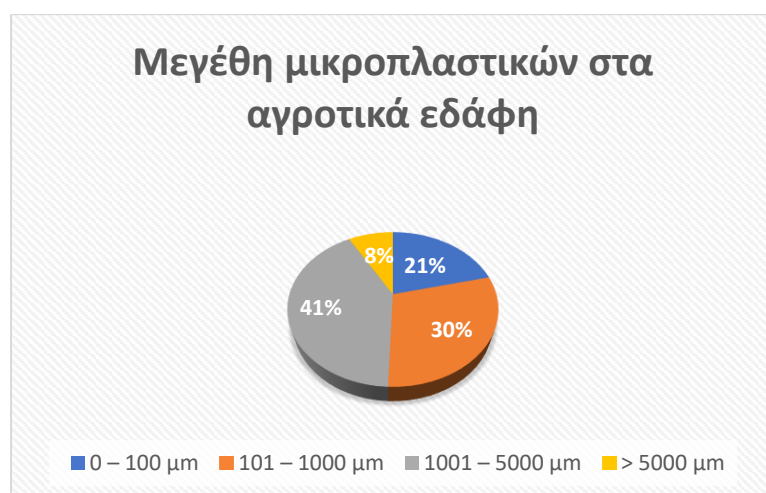
Διάγραμμα 1: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τις χώρες έρευνας στα αγροτικά εδάφη

Ένα αξιοσημείωτο συμπέρασμα που προέκυψε στην μετα ανάλυση που πραγματοποιήθηκε είναι πως η εφαρμογή των οργανικών λιπασμάτων δεν είναι απαραίτητο να συνεπάγεται με χαμηλά επίπεδα ρύπανσης. Σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρήθηκε αυτό όπως σε χώρες της Αυστρίας και της Γερμανίας, κομπόστ ή αλλού είδους οργανικού λιπασματα οδήγησε στην σημαντική ποσότητα συγκεντρώσεων μικροπλαστικών.

Παράγοντες του εδαφους που μπορεί να επηρεάσουν είναι η υφή και ο τύπος του εδαφους. Στα αμμώδη εδάφη παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες ποσότητες σε σχέση με αργιλώδη ή εδάφη ιλύς, εξαιτίας της μειωμένης ικανότητας συγκράτησης στοιχείων. Άλλη μια διαπίστωση που αφορά τα μεγέθη ενώ μικροπλαστικών είναι πως τα μεγαλύτερα σωματίδια δηλαδή μικροπλαστικά ή μεσοπλαστικά παραμένουν στα επιφανειακά στρώματά, σε αντίθεση με τα μικρότερα σωματίδια όπως τα μικροπλαστικά ή νανοπλαστικά κατευθύνονται σε βαθύτερα στρώματά του εδαφους. Βέβαια η εύρεση τους σε αλλά σημεία και βαθύ του εδαφους οφείλεται από τη μεταφορά τους που μπορεί να οφείλεται στις καλλιεργητικές πρακτικές που ακολουθούνται.

Ο βασικότερος παράγοντας της εισροής μικροπλαστικών είναι ο άνθρωπος, διότι με τις εφαρμογές των πλαστικών καλυμμάτων εδαφους (mulch) να αποτελεί τον πιο δημοφιλή παράγοντα ρύπανσης, ακολουθώντας τα λιπάσματα και οι διαδικασίες της εντατικής γεωργίας. Άλλος παράγοντας αποτελεί η θέση της περιοχής, καθώς οι κοντινοί δρόμοι ή πόλεις αυξάνουν την πλαστική ρύπανση, καθώς είναι αρκετά εύκολη η μεταφορά των μικροπλαστικών από τη μια περιοχή σε μια άλλη.

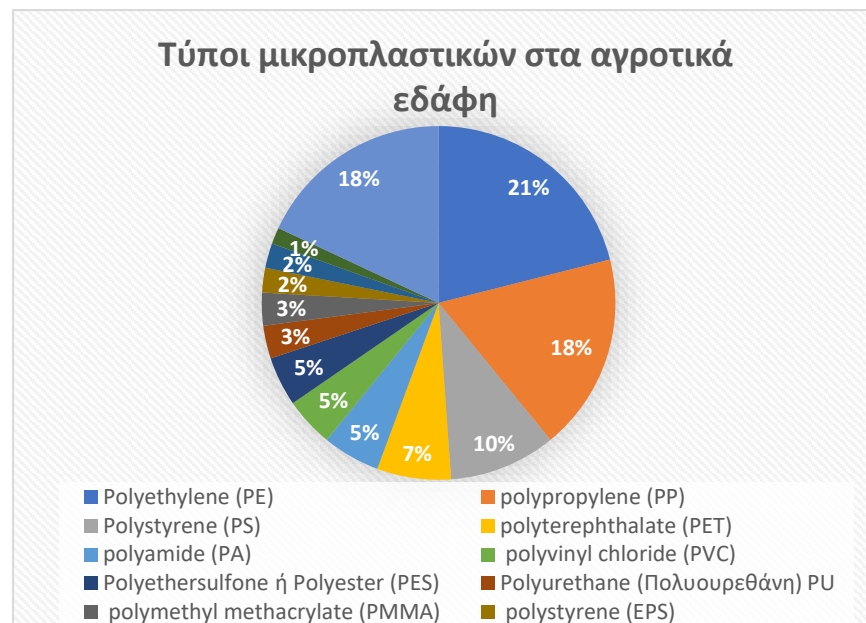
Οι διαστάσεις που παρατηρήθηκαν αντιστοιχούν στην πλειοψηφία του μικρότερου μεγέθους μικροπλαστικών, κάτι που διευκολύνει την εύκολη μετακίνηση στο έδαφος αλλά και την πρόσκληση του από οργανισμούς ή από τα φυτά μέσω του ριζικού τους συστήματος.



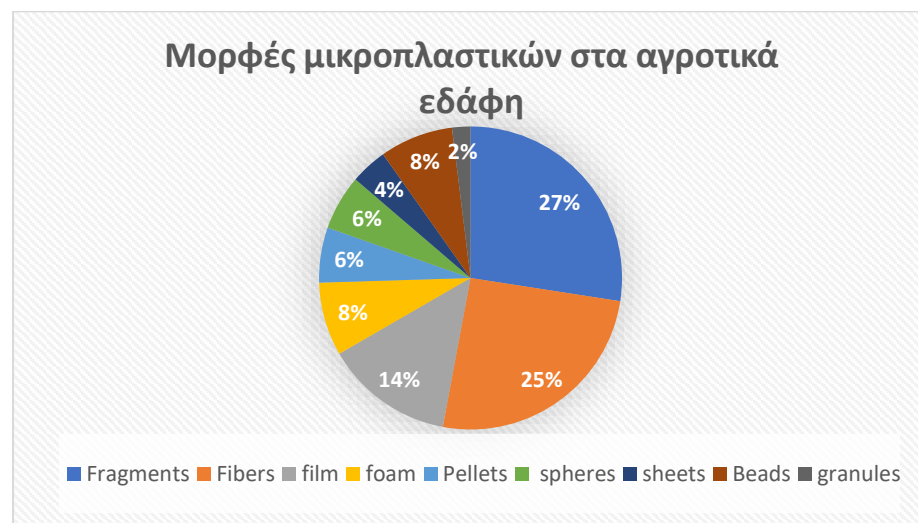
Διάγραμμα 2: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τα μεγέθη των μικροπλαστικών στα αγροτικά εδάφη

Όσο αφορά τους τύπους των πολυμερών που βρέθηκαν στα γεωργικά εδάφη αποτελούν τα PE και PP, τα οποία είναι τα πιο διαδεδομένα σε παγκόσμιο επίπεδο εξαιτίας της αυξημένης χρήσης του σε προϊόντα όπως τα καλύμματα εδαφους, τις συσκευασίες και τα υλικά που συμβάλουν στην άρδευση. Τα θραύσματα και ίνες ήταν σε μεγαλύτερη ποσότητα σε σχέση με άλλες μορφές. Και τα χρώματα δεν είχαν ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις ως προς τα ποσοστά. Τα χρώματα των σωματιδίων που βρέθηκαν είναι πιθανό να αποτελούν στοιχείο

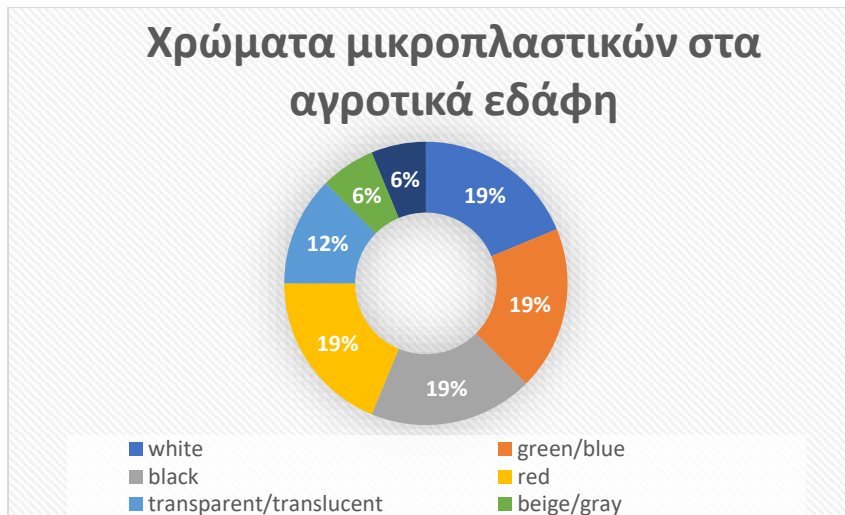
για το είδος τους προϊόντος ή της πηγής που προέρχονται, παραδείγματος χάρη εδαφικό κάλυμμα ή κάποιου είδους συσκευασία.



Διάγραμμα 3: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τους τύπους μικροπλαστικών στα αγροτικά εδάφη



Διάγραμμα 4: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τις μορφές των μικροπλαστικών στα αγροτικά εδάφη



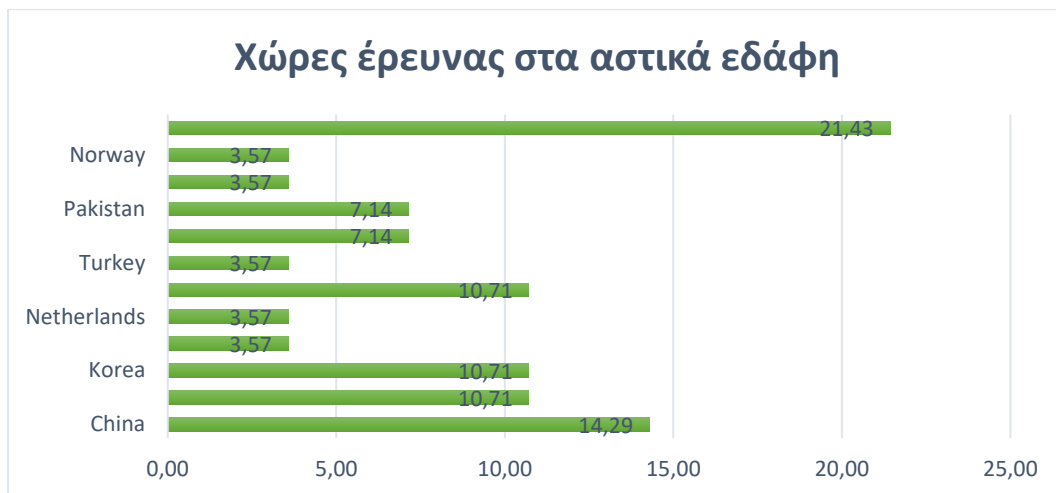
Διάγραμμα 5: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τα χρώματα μικροπλαστικών στα αγροτικά εδάφη

Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ΜΠ οφείλονται σε: 1) Μακροχρόνια χρήση πλαστικών καλυμμάτων (mulching) (π.χ. Xinjiang, Κίνα) 2) Εφαρμογές ιλύος και λυμάτων ή ζωικών αποβλήτων (κοπριάς) 3) τέλος κοντινή απόσταση από αστικά ή προαστιακά περιβάλλοντα (Wuhan, Χιλή κ.α.).

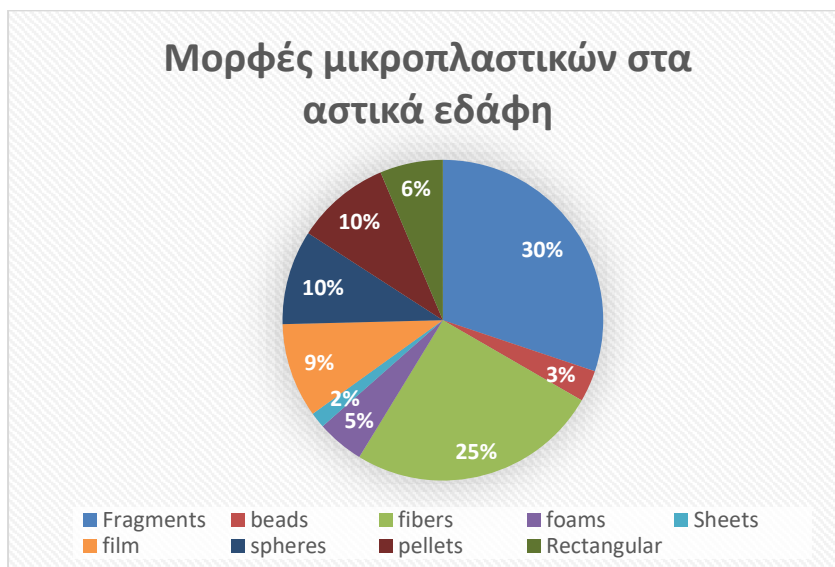
➤ Αστικά εδάφη

Στα αστικά εδάφη η πλαστική ρύπανση είναι εντολή, περιλαμβάνοντας και τις βιομηχανικές και τις αστικές περιοχές, στα οποία βρίσκονται δρόμοι, πάρκα, φρεάτια αποστράγγισης, ρούχα και πλυντήρια χώντας τεράστιες συγκεντρώσεις σε μικροπλαστικά. Σε σύγκριση με τα γεωργικά εδάφη η ρύπανση εκτιμάται πως βρίσκεται αν όχι σιγουρά μεγαλύτερη, βρίσκεται περίπου στα ίδια επίπεδα εξαρτάται από τις ανθρώπινες και βιομηχανικές πηγές, με τις συγκρίσεις να ποικίλουν ανά περιοχή και χρήσης γης. Για παράδειγμα στα πάρκα και στα περαστικά πάρκα ή περιοχές με φύση περιείχαν τις λιγότερες ποσότητες.

Η ρύπανσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις αποστάσεις από δρόμους οδικής κυκλοφορίας ή από τις πόλεις, σχετικό παράδειγμα αποτελούν οι χώρες της Πορτογαλίας και της Χιλής, στις οποίες όσο περισσότερο κοντά βρίσκονται τα ποσοστά συγκεντρώσεων σε αντίστοιχες περιοχές, τόσο πιο αυξημένα ήταν και τα επίπεδα ρύπανσης. Αναμενόμενο είναι βέβαια ότι τα επίπεδα μειώνονται όσο πιο μακριά βρίσκονται και οι πόλεις, αν και κάποια ποσοστά ρυπαντές σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να οφείλονται σε πλημμυρίδες αποθέσεις ή ατμοσφαιρικές εναποθέσεις.

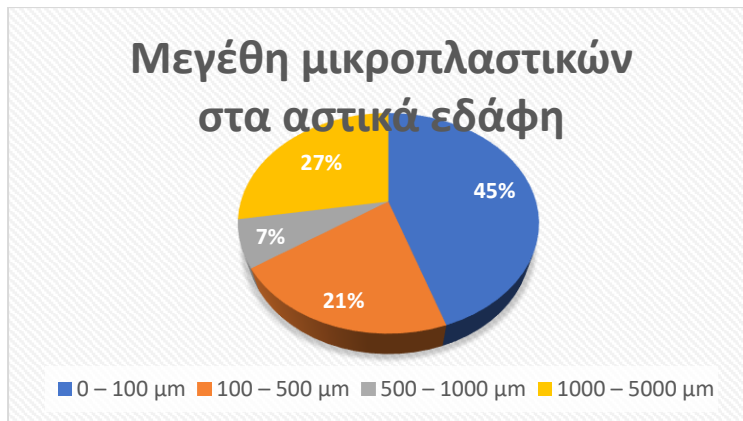


Διάγραμμα 6: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τις χώρες έρευνας στα αστικά εδάφη



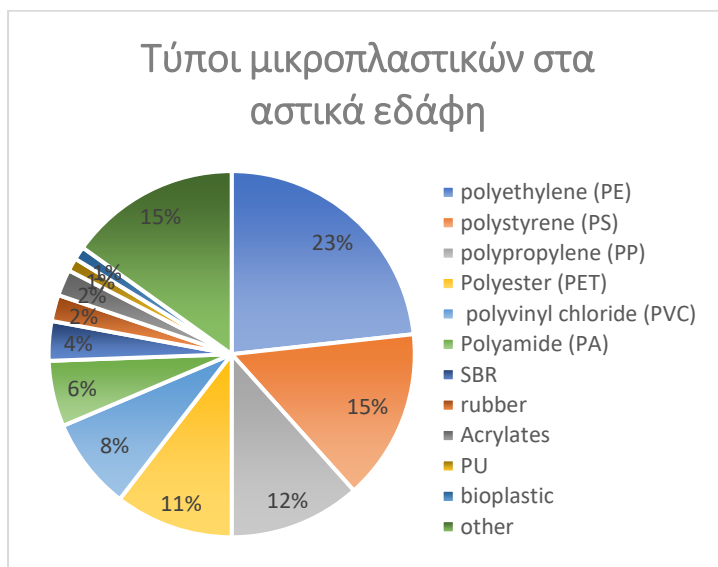
Διάγραμμα 7: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τις μορφές μικροπλαστικών στα αστικά εδάφη

Τα μεγέθη των μικροπλαστικών που βρέθηκαν στα περισσότερα εδάφη αποτελούνται από αρκετά μικρή διάμετρο και έτσι θα μετακινούνται αρκετά ευκολά, επίσης δύσκολα ανιχνεύσιμα και αρκετά πιθανόν να είναι βιοδιαθέσιμα για τους μικροοργανισμούς του εδαφους ή τα φυτά. Το αμέσως επόμενο ποσοστό μεγεθών είναι το μεσαίο δηλαδή 100–200 μm , όπως φαίνονται παρακάτω στο διάγραμμα.

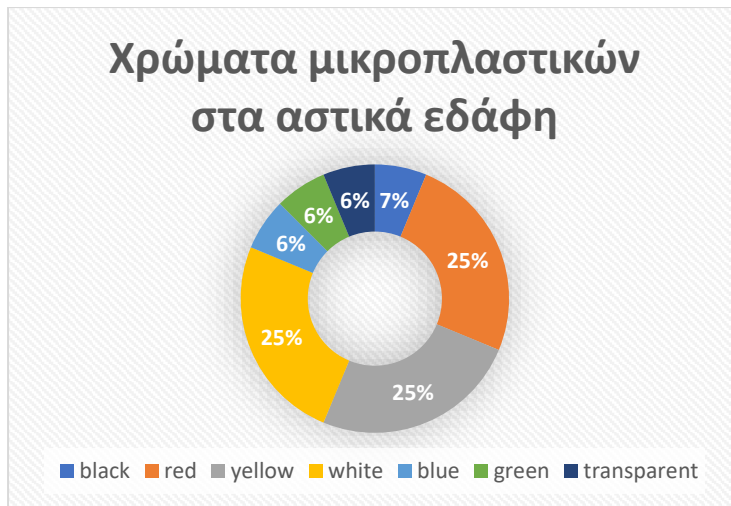


Διάγραμμα 8: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τα μεγέθη των μικροπλαστικών στα αστικά εδάφη

Σχετικά με τον τύπο των πλαστικών που βρέθηκε στα αστικά εδάφη υπήρχε μεγάλο εύρος, αυτοί που βρέθηκαν σε εγγύτερο ποσοστό είναι οι PE, PP, PS, PVC. Οι πηγές που προέρχονται πιθανόν είναι από υλικά συσκευασίας ή διαφορά καταναλωτικά αγαθά. Ένα γεγονός σχετικά με τους τύπους των πολυμερών και τους τύπους των εδαφών είναι ότι το PVC εμφανίζεται σε πολύ μεγαλύτερα ποσοστά στα αστικά εδάφη, ενώ το PE κυριαρχεί σε αγροτικά.



Διάγραμμα 9: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τους τύπους μικροπλαστικών στα αστικά εδάφη

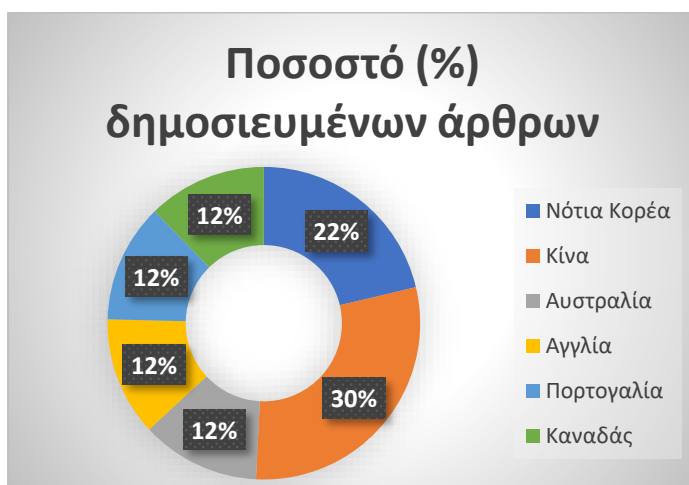


Διάγραμμα 10: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τα χρώματα των μικροπλαστικών στα αστικά εδάφη

Ορισμένα πλαστικά που βρίσκονται σπάνια και δεν είναι ιδιαίτερα γνωστά δείχνουν σύνθετες πηγές ρύπανσης, όπως βιομηχανία, νοικοκυριά, υφάσματα. Συνεπώς η χρήση γης δεν καθορίζει εξολοκλήρου το μέγεθος καθώς εδώ δεν συναντάμε μεγέθη που να συνδέονται με τον τύπο τους εδαφους. Το μέγεθος των μικροπλαστικών περισσότερο εξαρτάται από τη φυσική φθορά τους, την πηγή που προέρχονται και τον τύπου του πλαστικού.

➤ Δασικά εδάφη

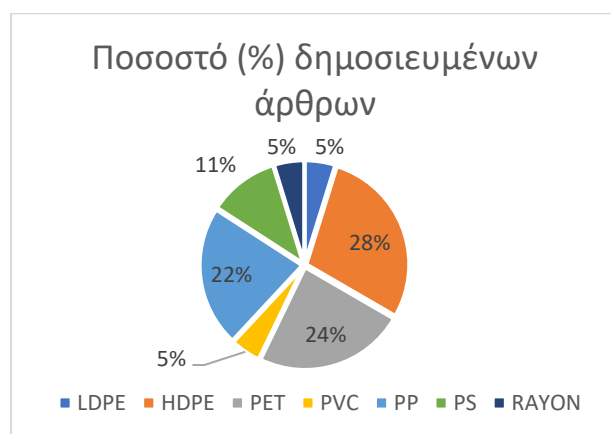
Τα δασικά εδάφη αν και θεωρούνται ότι έχουν τα λιγότερα ποσοστά ρύπανσης, πάλι υπάρχουν συγκεντρώσεις που δικαιολογούνται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Αξιοπερίεργο είναι πως βρίσκονται μικροπλαστικά ακόμα και σε προστατευόμενες περιοχές. Συνεπώς οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι οι εισροές σε αυτή τη περίπτωση είναι διαφορετικές, μια πρώτη εκτίμηση είναι από τον κύκλο του νερού, όσο τα κατακρημνίσματα όσο και υπόγεια ύδατα ή ακόμα την ύπαρξη κοντινών κατοικήσιμων περιοχών ή αγροτικών περιοχών, βέβαια σημαντικές συγκεντρώσεις θα βρίσκονται κοντά σε μονοπάτια.



Διάγραμμα 11: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τις χώρες έρευνας στα δασικά εδάφη

Η παραμονή των μικροπλαστικών στα δασικά εδάφη ή και η αποικοδόμηση του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επήρεια των μικροβιακών οικοσυστημάτων. Παραδείγματος χάρη η προσθήκη PET σε ένα τέτοιο οικοσύστημα μείωσε την ποικιλότητα και την ομοιομορφία των βακτηρίων στα εδάφη. Ακόμα παρατηρήθηκε πως κάποιοι τύποι πολυμελών προκαλούν μείωση της διαθέσιμης υγρασίας για τα φυτά. Σε άλλες περιπτώσεις όπως σε υψηλές συγκεντρώσεις, αύξησαν την αφθονία συγκεκριμένων βακτηριακών κοινοτήτων.

Η πιο συνηθισμένη κατηγορία είναι τα PLA, που εντοπίστηκαν σε περιοχές δασικής έκτασης (πιθανώς βιοδιασπώμενα ή εμπορικά λιγότερο διαδεδομένα). Η μεγαλύτερη αντίθεση που παρουσιάστηκε είναι αναμεσα στα φυσικά και στα ανθρωπογενή επηρεασμένα δάση.

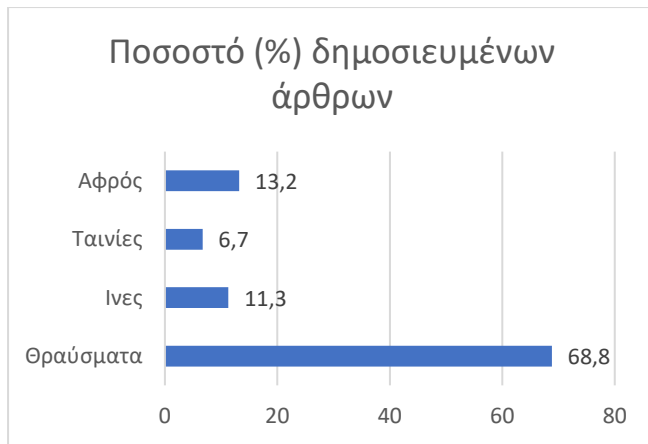


Διάγραμμα 12: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τους τύπους των μικροπλαστικών στα δασικά εδάφη

Σε αρκετές περιπτώσεις αν και δε είναι ορατές οι αρνητικές συνέπειες, είναι πάντα υπαρκτές και λειτουργούν ως ρύπος. Τα δασικά εδάφη είναι η μοναδική κατηγορία ρύπανσης μικροπλαστικών που θα θεωρούμε ανεπηρέαστη από πλαστική ρύπανση, αν και σαφώς οι συγκεντρώσεις εδώ είναι πολύ μικρότερες.



Διάγραμμα 13: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τα μεγέθη των μικροπλαστικών στα δασικά εδάφη

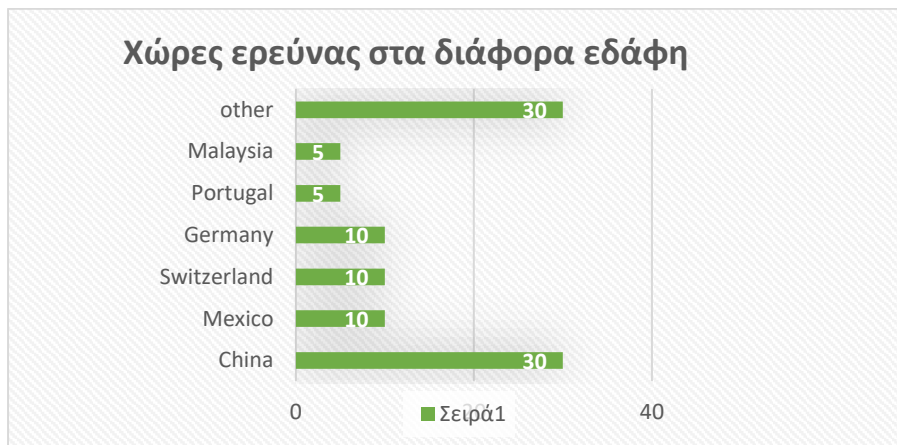


Διάγραμμα 14: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τις μορφές των μικροπλαστικών στα δασικά εδάφη

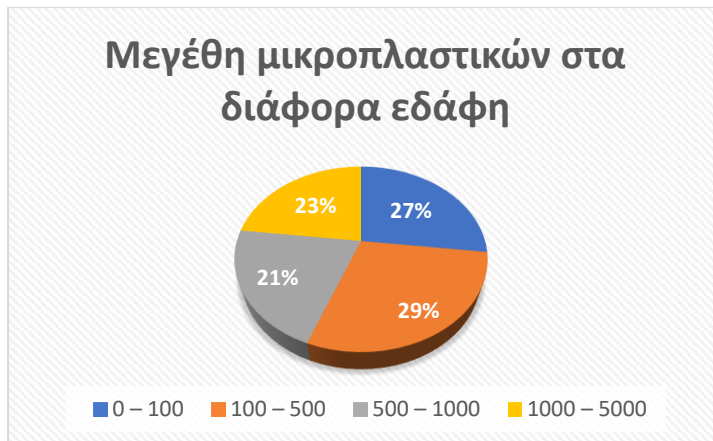
Στην πλειοψηφία τους τα μεγέθη διαπιστώνεται πως είναι μικρού μεγέθους. Με βασικότερο να είναι μέγεθος είναι πολύ μικρού μεγανθούς σωματιδίου (<250 μm), διευκολύνοντας της μεταφορά στον εδαφικό όγκο και τη βιοδιαθεσιμότητα σε μικροοργανισμούς ή φυτικά συστήματα, άρα θα μπορούσαμε να τα χαρακτηρίσουμε ως δυνητικά επικίνδυνα λόγω της βιοδιαθεσιμότητάς τους.

➤ Διάφοροι τύποι εδαφών

Σχετικά με τα εδάφη που έγινε συλλογή από διάφορες δημοσιεύσεις και χωρίς την κατηγοριοποίηση του τύπου εδαφους, παρατηρήθηκε ότι οι πολυάριθμες συγκεντρώσεις είναι στην πλειοψηφία τους μικρού έως μεγάλου μεγέθους, κάτι που προσφέρει εύκολη στην κίνηση τους στο έδαφος. Το πιο ρυπασμένο στρώμα εδαφους αποδεικνύεται το επιφανειακό δηλαδή 0 μέχρι 10 cm.

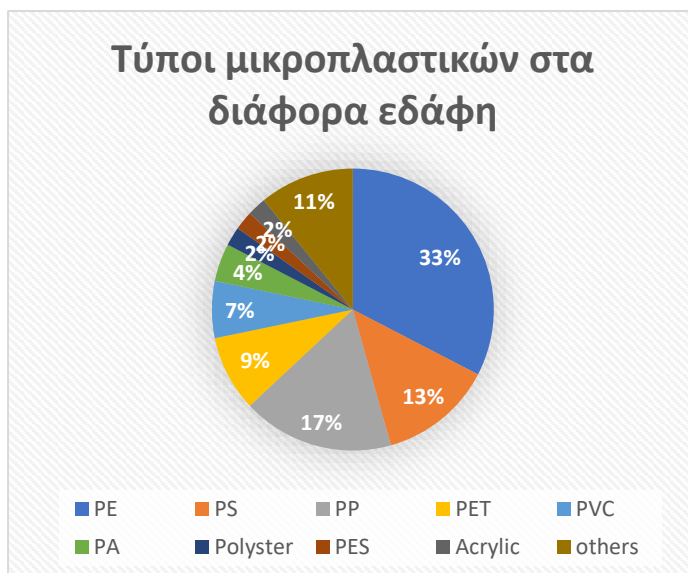


Διάγραμμα 15: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τις χώρες έρευνας στα ποικίλα εδάφη

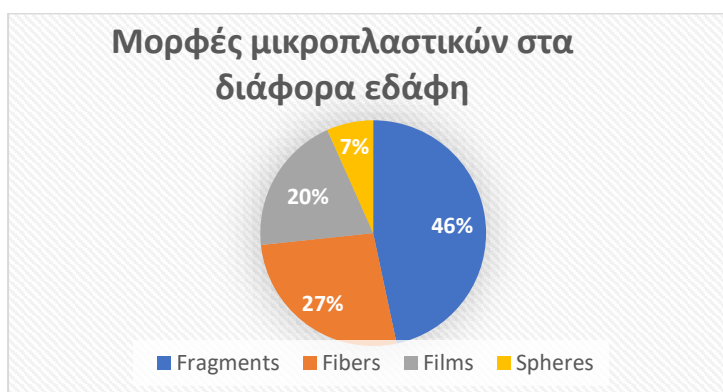


Διάγραμμα 16: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τα μεγέθη των μικροπλαστικών στα ποικίλα εδάφη

Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εμφανίζονται σύμφωνα με τα πλειοψηφία να βρίσκονται στους χώρους υγειονομικής ταφής ή χώρους απόθεσης απορριμμάτων, με τα μεγέθη των πλαστικών σωματιδίων να είναι μεγάλα. Το μικρότερο ποσοστό, αν και μη αναμενόμενο να εμπεριέχει μικροπλαστικά είναι οι έρημοι. Οι συγκεντρώσεις ποικίλλουν δραματικά λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας, του τύπου πλαστικών και της χρήσης γης.



Διάγραμμα 17: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τους τύπους των μικροπλαστικών στα ποικίλα εδάφη



Διάγραμμα 18: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τις μορφές των μικροπλαστικών στα ποικίλα εδάφη

Συνολικά Συμπεράσματα στα εδάφη:

Η ρύπανση από τα μικροπλαστικά βεβαιώνεται πως βρίσκεται σε όλους τους τύπους των εδαφικών οικοσυστημάτων. Είναι σίγουρη η διατάραξη που θα επιφέρει στα φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά των εδαφικών οικοσυστημάτων. Ακόμα διαπιστώθηκε πως δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει κοντινή ύπαρξη μικροπλαστικού για να υπάρχει μόλυνση. Οι συνιστώσες που επηρεάζονται είναι η βιοποικιλότητα, η γεωργική παραγωγή και η ποιότητα του εδάφους και τον ανθρώπινο παράγοντα. Στο σύνολο τους τα εδάφη χρειάζονται κατηγοποίηση και παρακολούθηση των τύπων πλαστικού, με σκοπό την αξιολόγηση της τοξικότητας, της βιοδιαθεσιμότητας και της εισροής τους αλλά και μεταφορά τους στο περιβάλλον. Τέλος είναι χρήσιμο πέρα από τη παρακολούθηση και πρόληψή και εντοπισμός των πηγών που προέρχονται, να ληφθούν πολιτικές και στάσεις για τα χερσαία οικοσυστήματα.

8.2. Τα Μικροπλαστικά και οι Επιστρώσεις στη Βλάστηση

Παρατηρήθηκαν αξιοσημείωτες επιδράσεις στην μορφολογία και φυτολογία των φυγών, θα παραθέσουμε τα συμπεράσματα των ερευνών μας ανά κατηγορία. Σε αρχικό πλαίσιο η ανάπτυξη της βλάστησης είναι ισχυρό σημάδι ύπαρξης των μικροπλαστικών και εξαρτάται από το είδος, το μέγεθος, όπως και τη συγκέντρωση της ποσότητας των ΜΠ. Η επίδραση στη βλαστική ικανότητα του φυτού είναι αρνητική στο μεγαλύτερο ποσοστό των περιπτώσεων. Εντυπωσιακό αποτελεί ότι το είδος του πολυμερούς δηλαδή οι τύποι πλαστικού: PS, HDPE, PLA, PVC είχαν τη μεγαλύτερη επίδραση, ενώ PE λιγότερη επίδραση. Ελάχιστο έως και μηδαμινό αποτέλεσμα φάνηκε ότι παρουσιάζουν τόσο οι αρκετά χαμηλές συγκεντρώσεις αλλά και τα LDPE, PLA σε κάποιες περιπτώσεις.

Όσο αφορά το ριζικό σύστημα των φυτών παρατηρήθηκε ότι η μείωση της μείωσης του μήκους της ρίζας είναι συχνό αποτέλεσμα και συνδέεται με τα PS, PVC, PLA. Αντίστοιχα για τη μείωση της διαμέτρου των ρίζων υπήρχε συχνή καταγραφή σε πολυάριθμα πειράματα. Έκπληξη προκαλεί ότι παρατηρήθηκε αύξηση του μήκους αλλά και της βιομάζας της ρίζας όταν οι συγκεντρώσεις ήταν χαμηλές, ειδικά στα PE, LDPE, Bio-MPs. Συνεπώς αυτό το μέρος των φυτών εμφανίζει ισχυρή ανταπόκριση είτε αρνητική είτε θετική ανάλογα τη δόση και τον τύπο ΜΠ.

Συνεχίζοντας στην μορφολογία όπως ο βλαστός, τα φύλλα, οι έρευνες έδειξαν ότι μειώθηκαν σε μέγεθος τα φύλλα σε συνδυασμό με την χλωροφύλλη. Άλλη επίδραση είναι η μείωση της βιομάζας, των φύλλων και του βλαστού, η αρνητική επίπτωση σχετίστηκε με τα PS, HDPE, PLA.

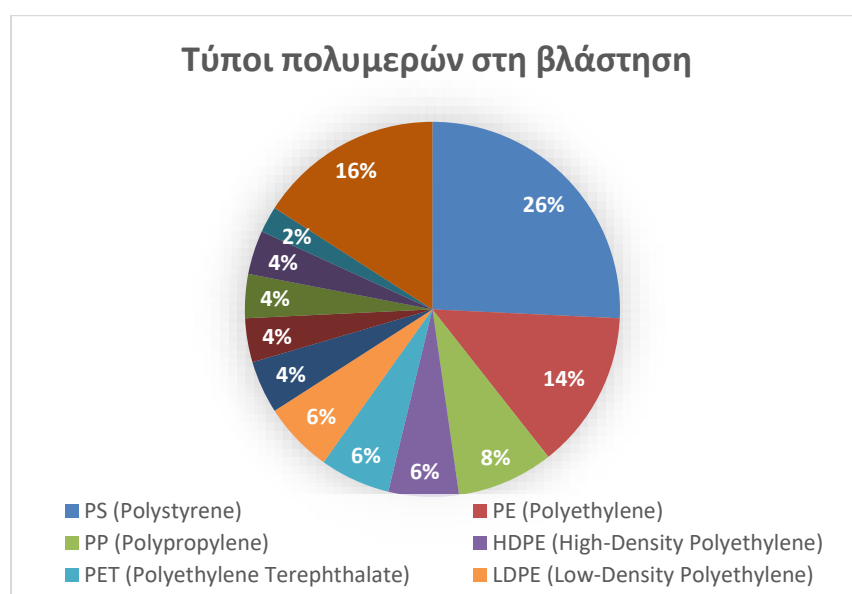
Οι επιδράσεις στην φυσιολογία και των μεταβολισμό ήταν οι εξής: στην χλωροφύλλη δημιουργήθηκε και αύξηση και μείωση ανάλογα φυσικά το τύπο και τη συγκέντρωση του μικροπλαστικού. Στην οξειδωτική δράση, η οποία ήταν αρκετά συχνή στα πειράματα οδήγησε σε κυτταρικές αλλοιώσεις. Παρατηρήθηκε έντονη δραστηριότητα των ενζύμων είτε μειωμένη είτε αυξημένη, κατά κύριο λόγο ως ένδειξη οξειδωτικού στρες. Σε μια από τις βασικότερες και ζωτικές λειτουργίες που είναι η φωτοσυνθετική του απόδοση μοιάζει μειωμένη ειδικά στα PS, PLA, PVC.

Η συσσώρευση και η μεταφορά στοιχείων και νερού φάνηκε ότι επηρεάζεται εξίσου με αλλά χαρακτηριστικά του φυτού. Η ύπαρξη των μικροπλαστικών δημιούργησε μείωση

πρόσληψης νερού και θρεπτικών στοιχείων, μέσω την αναστολή της διαπνοής. Με τη συνεχομένη κατάσταση δημιουργώντας έτσι δυσμενής συνθήκες διαβίωσης. Σημεία που συμβάλουν στην μεταφορά στοιχείων είναι και τα φύλλα, στα οποία συναντήσαμε σωματίδια PS. Ακόμα ένα αξιοπερίεργο σημείο που ανακαλυφθήκαν νανοπλαστικά αποτέλεσε το ενδοκυτταρικό περιεχόμενο του φυτού.

Παρατηρήθηκαν ακόμα και επιδράσεις στο εδαφικό οικοσύστημα και τις συμβιωτικές σχέσεις που εξελίσσονται. Σε μελέτες αναφέρονται αυξομειώσεις στην μικροβιακή δραστηριότητα. Ακόμα αξιοσημείωτο είναι ότι η δομή του εδαφους και εναλλαγής του pH μπορεί να βελτιωθεί, μια θετική συνέπεια που οφείλεται σε ορισμένους τύπους πολυμερών. Καθώς έχουμε αναφέρει ότι σε πολλές περιπτώσεις της πλαστίσφαιρας προσκαλούνται βαρέα μέταλλα έτσι και σε υψηλές συγκεντρώσεις του καδμίου (Cd), προκαλείται αυξημένη βιοδιαθεσιμότητα αλλά και μείωση της χλωροφύλλης. Συνεπώς τα μικροπλαστικά επηρεάζουν τις ιδιότητες του εδαφους, συμπεριλαμβανομένων των τοξικών αλληλεπιδράσεων με βαρέα μέταλλα.

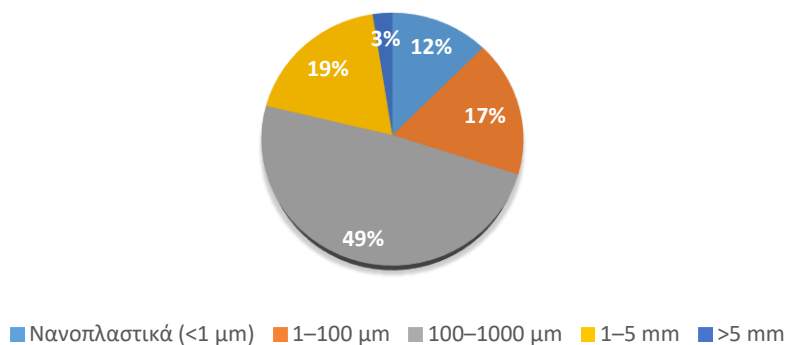
Σχετικά με τους τύπους των μικροπλαστικών που υπήρχαν στις πολυάριθμες έρευνες όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, έχουν ως εξής: Polystyrene (PS) αποτελεί αρκετά δημοφιλή τύπο μικροπλαστικών με ποσοστό εμφάνισης 25%, με εφαρμογή στις συσκευασίες, καλλυντικά και καθαριστικά προϊόντα. Επόμενο και με παραλλαγές HDPE, LDPE, είναι Polyethylene (PE) με το μεγαλύτερο ποσοστό περίπου στο 14%, σε αυτό υπάρχει σύνδεση με τη συχνή εφαρμογή πλαστικών καλυψης εδαφους στις καλλιεργήσιμες περιοχές. Άλλοι τύποι πολυμερών είναι τα βιοδιασπώμενα πλαστικά (PLA, bioplastic) και PET, PVC, PP, PES και αλλά με μικρότερη συχνότητα εμφάνισης.



Διάγραμμα 19: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τους τύπους των μικροπλαστικών που βρέθηκαν στα φυτά

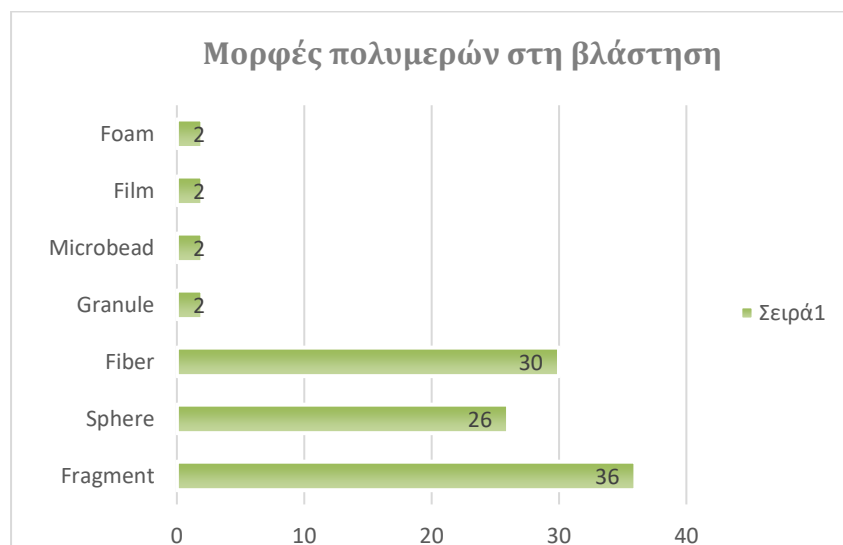
Σχετικά με τα μεγέθη των σωματιδίων υπάρχει ποικιλία, η πλειοψηφία βέβαια αποκλείεται από τα μικροπλαστικά (100–1000 μm) σε ποσοστό 48%, τα οποία είναι στόχος της ερευνάς μας. Ακολουθεί σε αμέσως επόμενη κατηγορία τα μεσοπλαστικά 1–5 mm με ποσοστό 18%, τα οποία πιο ευκολά τα συναντάμε σε επιφανειακά στρώματα του εδαφους καθώς δεν μεταφέρονται ευκολά σε αυτό. Ακολουθούν τα υπόλοιπα όπως εμφανίζονται στο διάγραμμα παρακάτω.

Μεγέθη σωματιδίων πλαστικού στη βλάστηση



Διάγραμμα 20: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τα μεγέθη των μικροπλαστικών που βρέθηκαν στα φυτά

Σε συνέχεια ερευνήθηκαν οι μορφές που βρίσκονται στα σωματίδια και παρακάτω εμφανίζονται τα αποτελέσματα από το σύνολο των δημοσιεύσεων.

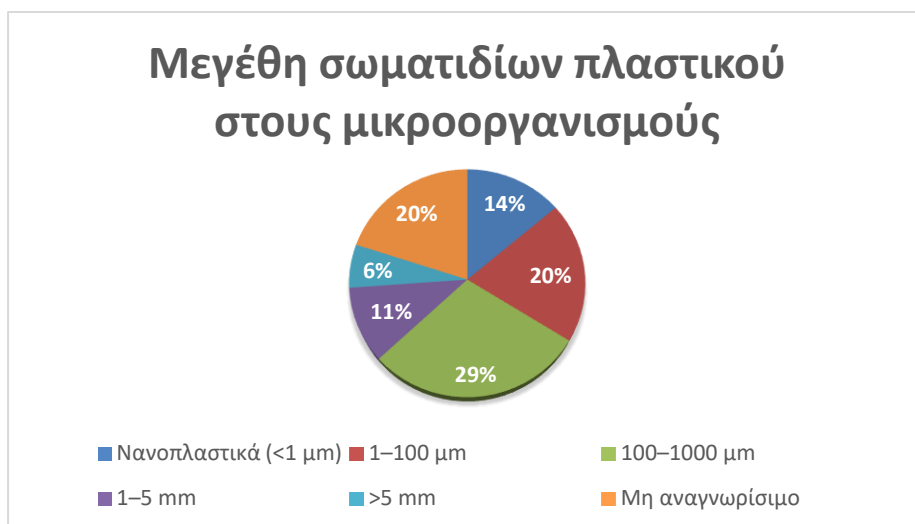


Διάγραμμα 21: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τις μορφές των μικροπλαστικών που βρέθηκαν στα φυτά

Ως γενικά συμπεράσματα από εκατόν τρεις (103) δημοσιεύσεις είναι πως τα φυλλώδη λαχανικά όπως το μαρούλι και τα βολβώδη είδη όπως καρότο είναι αρκετά ευαίσθητα. Τα δημητριακά όπως ρύζι και διαφορά σιτηρά παρουσιάζουν μέτρια έως χαμηλή ευαισθησία, όμως με την παρουσία των μικροπλαστικών διαταράσσονται οι φυσιολογικές λειτουργίες τους. Στην κατηγορία των ψυχανθών διαταράσσεται η έναρξη ανάπτυξης δηλαδή η βλαστικότητα τους.

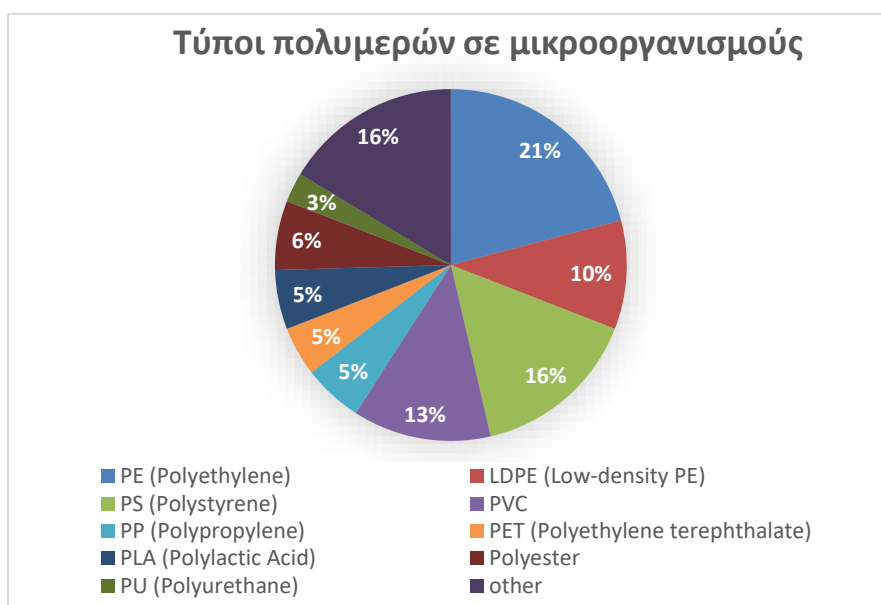
8.3. Τα Μικροπλαστικά και οι Επιπτώσεις στους Μικροοργανισμούς

Σχετικά με τη μικροβιακή κοινότητα παρουσιαστικά μεταβολές της με τις αρκετά σημαντικές παραμέτρους τη δομή της κοινότητας και τις λειτουργίες της. Οι πιο σημαντικές επιπτώσεις διαπιστώθηκαν στην μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών του εδαφους. Η πλειοψηφία των μεγεθών όπως και στα φυτά είναι πάλι τα μικροπλαστικά με τα μεγανθή στην πλειοψηφία τους να είναι: 1–100 μm και 100–1000 μm .



Διάγραμμα 22: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τα μεγέθη των μικροπλαστικών που βρέθηκαν στους μικροοργανισμούς

Οι τύποι των πλαστικών σωματιδίων έχουν ως εξής:

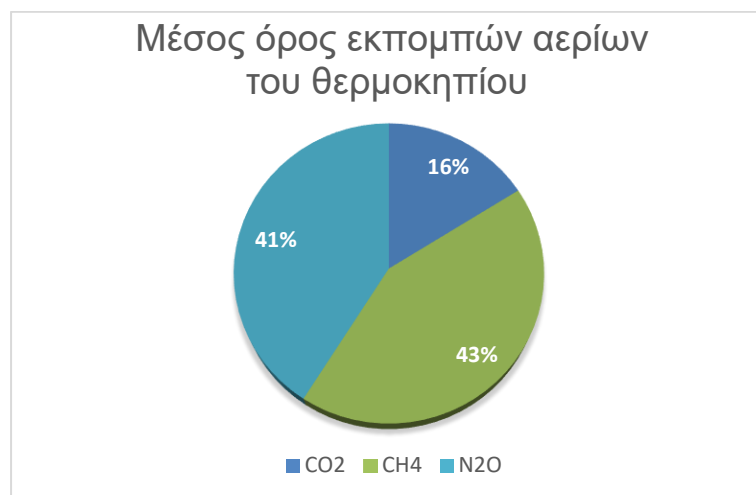


Διάγραμμα 23: Ποσοστό δημοσιεύσεων για τους τύπους των μικροπλαστικών που βρέθηκαν στους μικροοργανισμούς

8.4. Τα Μικροπλαστικά και οι Επιδράσεις στις Εκπομπές των Ρύπων του Φαινομένου του Θερμοκηπίου

Τα αέρια CH₄ (μεθάνιο), CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα) και N₂O (υποξείδιο του αζώτου) είναι κύρια αέρια του θερμοκηπίου και σχετίζονται έντονα με την περιβαλλοντική επιβάρυνση από τα απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων και των πλαστικών αποβλήτων. Η μεγαλύτερη αύξηση εντοπίστηκε να εμφανίζει το μεθάνιο (CH₄), αν και σε όλες τις εκπομπές αέριων, περιλαμβανομένων CO₂ και N₂O, παρουσιάστηκε αύξηση καθώς τα μικροπλαστικά εμφανίζουν έντονη επίδραση. Μια ιδιαίτερη αλλαγή οφείλεται στην μορφή των πλαστικών, συγκεκριμένα στα μικροπλαστικά από την εισαγωγή τους και σε σύντομο χρονικό διάστημα παρουσίασαν αύξηση στο N₂O (υποξείδιο του αζώτου) 87%, στο CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα) 0%, για το CH₄ (μεθάνιο) είναι ελλιπής η πληροφόρηση σχετικά με την επίδραση από τη πρόσφατη εισαγωγή των μικροπλαστικών στο περιβάλλον. Όμως εμφανίζεται μια διαφορά καθώς τα “γερασμένα” μικροπλαστικά εκπέμπουν 12% N₂O (υποξείδιο του αζώτου) και 12% CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα). Συνεπώς αποικοδόμηση των μικροπλαστικών έχει ισχυρό αντίκτυπο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου αυξάνοντας τους ρύπους και κα επέκταση της υπερθέρμανση στον πλανήτη μας.

Σε σημεία της ερευνάς φαινικέ πως κάποιοι τύποι εδαφών παρουσιάζουν επίδραση στην ρύπανση, ειδικά θα αναφερθούμε στους εξής τύπους: Τα αμμώδη εδάφη έχουν ελάχιστη επίδραση, τα εδάφη μέσης υφής μέτρια αύξηση επίδρασης και τα λεπτόκοκκα εδάφη παρουσιάζουν σημαντική αύξηση της ρύπανσης του φαινομένου του θερμοκηπίου με τη μεγαλύτερη ευαισθησία. Ακόμα κάποια χαρακτηριστικά συμβάλουν σε αυτό. Επιβεβαιώθηκε πως τα κορεσμένα εδάφη, εννοώντας όσα εδάφη είναι με επαρκή και ικανοποιητικά επίπεδα υγρασίας και θρεπτικών συστατικών πιθανόν να συμβάλουν στην αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα. Ως κοινή επίδραση αύξησης του υποσελίδιου του αζώτου βεβαιώθηκε τα εδάφη μπορεί να είναι και ξηρά και με κανονικά – επαρκή υγρασία. Στο διάγραμμα φαίνεται ο μέσος ορός των εκπομπών υπό την επίδραση των μικροπλαστικών.



Διάγραμμα 23: Ποσοστό δημοσιεύσεων με βάση το μέσο ορό επίδρασης των εκπομπών αέριων του φαινομένου του θερμοκηπίου στα μικροπλαστικά

Συνεπώς τα μικροπλαστικά επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό και πολύπλευρα τα χερσαία οικοσυστήματα αλλά και την βλάστηση και τους μικροοργανισμούς που εμπεριέχει. Παρατηρήθηκε ότι αλλάζουν τη μικροβιακή σύνθεση, αυξάνουν τις εκπομπές των θερμοκηπίων ρύπων, ειδικά τα CH₄ και N₂O, διαταράσσουν την βλάστηση, ανάπτυξη και

λειτουργίες των φυτών, καθώς και δρουν συνδυαστικά με τη σύσταση και την υγρασία του εδαφους αλλά και την χημική σύσταση και βαθμό αποικοδόμησης ή με των μικροπλαστικών, επιδρώντας στο βαθμό της τοξικότητας που μπορεί να αποκτήσουν.

9. Κλιματική Αλλαγή: Παρούσα Κατάσταση και Συνέπειες που Επέρχονται

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel for Climatic Change) ορίζει ως κλιματική αλλαγή τις αλλαγές που προκύπτουν στο κλίμα, με τις οποίες παρατηρούνται από τις έντονες μεταβολές στη πάροδο των ετών, συνήθως για δεκαετίες ή και παραπάνω. Τα αίτια μπορεί να προέρχονται από εσωτερικές διεργασίες ή από εξωτερικούς παράγοντες. Επίσης οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες μπορούν να επηρεάσουν κατά κύριο λόγο τη σύνθεση της ατμοσφαιράς ή και τις χρήσεις γης. (ipcc, 2014)

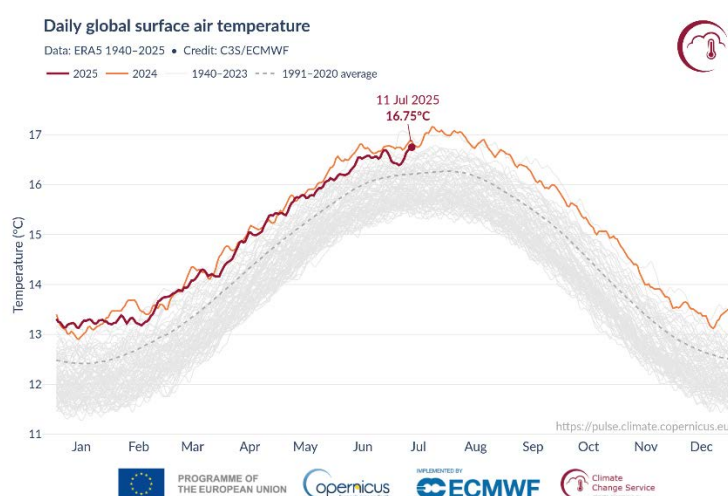
Παλαιότερα είχε δημιουργηθεί η αντίληψη ότι οι αλλαγές που υφίσταται το κλίμα προέρχονταν από φυσικές παραμέτρους, για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια, η ηφαιιστιογενής δραστηριότητα, οι μετακινήσεις των τεκτονικών πλακών ή και τα ρεύματα των ωκεανών (Δαρείου, 2011). Πλέον η επικρατέστερη άποψη του αίτιου πρόκλησης της κλιματικής αλλαγής είναι ο ανθρωπογενής παράγοντας. Με αυτό να συνεπάγεται το οικολογικό αποτύπωμα που αφήνουν οι ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες επιφέρουν τεράστιες επιπτώσεις στο περιβάλλον και βέβαια στο κλίμα.

Ως πιο επιβλαβή χαρακτηρίζεται η υπερβολική χρήση ορυκτών, ο αγροτικός και κτηνοτροφικός τομέας έχουν οδηγήσει στην αύξηση των συγκεντρώσεων των αέριων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, η οποία επηρεάζει με τη σειρά της την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας (Li et al. 2024).

Σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία με την έκδοση του World Meteorological Organization. (2024), εντοπίζεται πως το CO₂ ευθύνεται για περίπου το 64 % της συνολικής αύξησης, ενώ σε μικρότερο ποσοστό συμβάλουν τα CH₄ και το N₂O συμβάλλουν κατά 16 % και 6 % αντίστοιχα της αύξησης της θέρμανσης του πλανήτη μας (Copernicus, 2024). Οι πηγές των ρύπων προέρχονται κατά κύριο λόγο από την καύση ορυκτών καυσίμων, βέβαια πολύ σημαντική είναι και η συμβολή του αγροτικού και κτηνοτροφικού τομέα που αλληλοσυνδέεται με τις διατροφικές αλυσίδες που σε ποσοστό των εκπομπών υπολογίζεται πως συνεισφέρουν 16–20 % (FAO, 2024). Αντίστοιχα οι υγρότοποι παράγουν το 20–30 % του CH₄ σε παγκόσμια κλίμακα, ενώ οι ωκεανοί παράγουν εκπομπές CO₂ και CH₄ μέσω φυσικών διαδικασιών αλλά και μεθάνιο από τα πλοία που πλέον στα ύδατα (Washington Post, 2025). Πιο λεπτομερώς θα μπορούσαμε να παραθέσουμε πως η κτηνοτροφία και καλλιέργεια ορυζώνων παρουσιάζουν το 32 % και 8% των εκπομπών CH₄ και N₂O αντίστοιχα (Food and Agriculture Organization & UNEP, 2023).

Με την προβιομηχανική μέση θερμοκρασία σε σχέση με τη μέση θερμοκρασία του 2022 να βρίσκεται 1,15 °C, σε συνδυασμό με τις εκτιμήσεις των τελευταίων ετών της αύξησης πάνω από 1,5 °C, οι επιπτώσεις που επέρχονται θα είναι καταστροφικές για το περιβάλλον (Tollefson, 2022). Η πιθανότητα της παγκόσμιας υπερθέρμανσης να βρίσκεται κοντά ή ακόμα και να ξεπεράσει τον 1,5 °C στις ερχόμενες δεκάτιζες δείχνει ότι πλέον είναι μεγαλύτερη και από 50%. Ένα τέτοιο σενάριο δε θα έχει αναπόφευκτους κινδύνους μόνο για τα οικοσυστήματα αλλά και για τους ανθρώπους (IPCC, 2022).

Μετά το πέρας της Βιομηχανικής Επανάστασης του 20ου αιώνα παρατηρήθηκε ότι οι βιομηχανίες αρχίσαν να αυξάνονται και τα αστικά κέντρα να πληθαίνουν, η κλιματική αλλαγή άρχισε να εντείνεται και αυτό προέκυψε με την αύξηση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων που είχαν αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον, συγκεκριμένα με την αύξηση της θερμοκρασίας, ακολούθησε περιβαλλοντική υποβάθμιση, καθώς η ρύπανση του περιβάλλοντος ήταν ένας ακόμα παράγοντας της κατάστασης αυτής. Στα επερχόμενα έτη είναι αρκετά πιθανό να βιώσουμε πιο έντονες αλλαγές, με το φαινόμενο του θερμοκηπίου να εντείνεται. Αυτό αποδεικνύεται σύμφωνα με τις μετρήσεις των τελευταίων ετών, στις οποίες παρατηρήθηκε άνοδος της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη μας. Έτσι προκύπτει ότι η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας μέχρι το τέλος της εκατονταετίας θα βρίσκεται στα 1.5 - 2,7 °C, αν δεν λάβουμε τα καταλληλά μετρά και δράσεις (ipcc, 2023).



Εικόνα 4: Η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης κατά τη πάροδο των ετών

Στο παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε τα σημεία συγκεκριμένων ετών με τις θερμοκρασίες που υπήρχαν και υπάρχουν στην επιφάνειας της Γης, παρατηρούμε την έντονη αύξηση της θερμοκρασίας ειδικά τα τελευταία έτη. Αξιοσημείωτο γεγονός αποτελεί ότι η παγκόσμια μέση θερμοκρασία και 0,54°C πιο πάνω από τον μέσο όρο των ετών 1991 - 2020 και περίπου 1,5°C πιο πάνω από τον προβιομηχανικό μέσο όρο της περιόδου 1850-1900 (Copernicus, 2024). Το αρκετά κρίσιμο σημείο που τέθηκε ως σκοπός μη υπέρβασης του είναι το όριο του 1,50C, έτσι ώστε να αποφευχθούν οι μη αναστρέψιμες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (ipcc, 2022). Η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης σε γενικό πλαίσιο βρίσκεται περίπου στους 15°C, που είναι κατάλληλη θερμοκρασία για την επιβίωση της ζωής. Σε περίπτωση διαταραχής της, όμως θα επιφέρει αρκετές επιπλοκές, τόσο στον άνθρωπο όσο και στο περιβάλλον (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2023).

Βέβαια αν επιβεβαιωθεί αυτό το σενάριο της αύξησης μέσης θερμοκρασίας θα υπάρχουν επιπτώσεις με τις αυξήσεις της συχνότητας και της έντασης των ακραίων καιρικών φαινομένων παγκοσμίως. Όπως ήδη συναντάμε, μερικές από αυτές είναι η αλλαγή στο ύψος των βροχοπτώσεων, τα αυξημένα ακραία καιρικά φαινόμενα, αύξηση δασικών πυρκαγιών, ακόμα και αύξηση της στάθμης του νερού, αύξηση πλημμυρικών φαινομένων σε σύγκριση με παλαιότερα, καθώς και το φαινόμενο της θερμικής νησίδας (WMO, 2022).

Στις αρνητικές συνέπειες υπάρχει διαφοροποίηση ως προς την ένταση και τον τρόπο εκδήλωσης τους, με συνιστώσες όπως είναι το γεωγραφικό πλάτος. Δηλαδή οι χώρες της νοτιάς Ευρώπης, κυρίως της μεσογείου, σε αντίθεση με τη βόρεια Ευρώπη δεν θα αντιμετωπίσουν με τον ίδιο τρόπο την κλιματική αλλαγή (European Trade Union Confederation, 2022).

Λαμβάνοντας υπόψη πολλές αναφορές της βιβλιογραφίας μας συμπεραίνουμε πως τα περισσότερα πλαστικά σωματίδια που χρησιμοποιούνται τόσο στις πόλεις, όσο και σε αγροικές περιοχές, αποτελούν κυρίες εστίες ρύπανσης, οι οποίες επηρεάζονται από τις έντονες καιρικές και κλιματικές συνθήκες που επικρατούν (Hale et al., 2020; Jia et al., 2022). Διότι με αυτό τον τρόπο γίνεται αρκετά εύκολη η μεταφορά τους στα χερσαία οικοσυστήματα και όχι μόνο (Campanale et al., 2020).

Υπάρχουν αρκετές μελέτες που αποδεικνύουν την επίδραση της σχέσης καιρικές συνθήκες και διασπορά μικροπλαστικών. Λαμβάνοντας υπόψη τους Sun et al. (2023) διαπιστώθηκε ότι οι ισχυρές καταιγίδες παράγουν κυματισμούς ανασύροντας τα μικροπλαστικά που είναι ενδιάμεσα στα ιζήματα, τα οποία αποτελούν ένα αρκετά σημαντικό σημείο αποθήκευσης τους στα παράκτια μέρη. Αυτή η παρατήρηση έγινε με τη διαφορά των ιδιοτήτων των ΜΠ κατά τη διάρκεια της καταιγίδας, κάτι το οποίο επέφερε την άνοδο τους στην επιφάνεια των θαλάσσιων υδάτων (Xia et al., 2020).

9.1. Η Απειλή των ΜΠ και η Σύνδεση με τις Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου

Μέχρι σήμερα οι έρευνες που έχουν προηγηθεί επικεντρώνονται στις επιπτώσεις των ΜΠ στις φυσικές και βιολογικές ιδιότητες τους εδάφους, καθώς και στην επίδραση των αγροτικών εδαφών (Iqbal et al., 2020, 2021; Wang et al., 2022), κάτι που αποτέλεσε μια βάση για την αρχή της διερεύνησης της επίδρασης των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής. Ακόμα ένα γιγάντιο ποσοστό ερευνών έχει απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα με τις διαδικασίες, τους μηχανισμούς, τις επιδράσεις ακόμα και τις εκτιμήσεις του φαινομένου του θερμοκηπίου. Όμως μερικά θέματα παραμένουν ακόμα ασαφή λόγω του μεγάλου εύρους του θέματος, δηλαδή η ξεχωριστή μελέτη των ΜΠ και του φαινομένου αυτού. Συγκεκριμένα οι εκπομπές των ρύπων του θερμοκηπίου από τα χερσαία περιβάλλοντα που εμπεριέχουν ΜΠ είναι ακόμα μη σαφώς. Για αυτό το λόγο πρέπει να εξασφαλίσουν οι προϋποθέσεις της περιβαλλοντικής και κλιματικής βιωσιμότητας με σκοπό τη ρύθμιση και την αντιμετώπιση τους (Chia et al., 2023).

Τα πλαστικά σωματίδια προκαλούνε εκπομπές των αέριων του θερμοκηπίου από του έδαφος. Με τα ΜΠ να έχουν τη δυνατότητα να παράγουν νέφη και επηρεάζοντας τη ψύξη της ατμοσφαιράς, παράλληλα με τα ακραία καιρικά φαινόμενα που παρατηρούμε όλα και πιο συχνά αντιλαμβανόμαστε πως η ρύπανση αυξάνεται τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια, κάτι που προκαλεί έναν φαύλο κύκλο επιδεινώνοντας τη κατάσταση. Γεφυρώνοντας έτσι ένα χάσμα αξιοσημείωτων ζητημάτων, τα οποία προηγουμένως θεωρούνταν ξεχωριστά.

Αυτό που προκαλεί ιδιαίτερη ανησυχία είναι κατά ποσό η εισροή των ΜΠ θα επηρεάσει τις αναδράσεις των αέριων του θερμοκηπίου (GHGs) (Chia et al., 2023). Διότι οι αναδράσεις με τα ΜΠ συνδέονται με τις εκπομπές τριών ισχυρών αερίων του θερμοκηπίου ως εξής:

διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), οξείδιο του αζώτου (N₂O) και μεθάνιο (CH₄) (Gao et al., 2021, 2022; Tafvizi et al., 2021; Inubushi et al., 2022).

Είναι δυνατό να καθορίζονται σε κάποιο βαθμό από τους ποικίλους τύπους μικροπλαστικών και των χαρακτηριστικών τους, όπως το σχήμα. Ακόμα και το ποσοστό των συγκεντρώσεων τους (Greenfield et al., 2022; Inubushi et al., 2022; Yu et al., 2022). Μια σύνδεση που είναι αρκετά πιθανή σχετικά με τον τύπο των ΜΠ, αποτελεί η περιεκτικότητα του αζώτου στο πολυμερές με την συγκέντρωση του νερού στο έδαφος (Yu et al., 2022; Li et al., 2023a). Άλλες συνδέσεις που έχουν προηγηθεί είναι πως οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα μπορούν να αυξηθούν από την εδαφική αναπνοή, ως αποτέλεσμα των επιδράσεων ενεργοποίησης που προκαλούνται από την πλαστική ρύπανση (Tafvizi et al., 2021; Chia et al., 2023).

Ακόμα στις εκπομπές CH₄ βρέθηκε πως εξαρτάται περισσότερο από τη ρύπανση που προκαλούν τα ΜΠ στα εδάφη, προκαλώντας ανησυχία, διότι είναι υψηλότερο κατά 27% από το διοξείδιο του άνθρακα (Collins et al., 2013). Ο πιθανός μηχανισμός που ενεργοποιείται σε αυτή τη περίπτωση των μικροοργανισμών που παράγουν μεθάνιο, ενισχύοντας έτσι ακόμα περισσότερο την ρύπανση του εδάφους (Han et al., 2022). Η εξήγηση που θα μπορούσε να δοθεί, είναι ότι ή θα συμβαίνει άμεσα λόγω της επίδρασης της αφθονίας των μικροοργανισμών ή έμμεσα εξαιτίας των φυσικοχημικών αλληλεπιδράσεων του εδάφους (Rassaei, 2023). Σχετικά με τις διαφοροποιήσεις που υπάρχουν στους τύπους των πολυμερών, η ρύπανση του εδάφους που παρατηρήθηκε από: PLA, LDPE και PE δημιούργησε αυξημένες εκπομπές CO₂. Ειδικά την μεγαλύτερη επίδραση φάνηκε πως προέρχεται από την ρύπανση με PLA (Iqbal et al, 2024).

Σε αντίθεση κάποιες μελέτες έχουν δείξει πως τα ΜΠ σε ορισμένες περιπτώσεις μείωσαν τις εκπομπές CO₂, N₂O και CH₄ από το εδαφικό οικοσύστημα (Ren et al., 2020; Rillig et al., 2021). Συνεπώς είναι αναγκαίο η περαιτέρω διερεύνηση των παραγόντων που ορίζουν την πορεία και τη διάσταση της σχέσης ιδιοτήτων ΜΠ με εκπομπές αέριων του θερμοκηπίου.

Σε πρόσφατο χρονικό διάστημα παρατηρήθηκε αύξηση των τιμών του φαινομένου του θερμοκηπίου. Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές που υπήρχαν το 2013-2014 σε σύγκριση με τις πιο πρόσφατες τιμές του 2023, παρατηρούμε εντυπωσιακή αύξηση των εκπομπών. Παρατηρήθηκε αύξηση 5,5% στο CO₂, 5,5% στο N₂O και 3,0% στο CH₄, Θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε το παρακάτω πίνακα ως νέες τιμές ρεκόρ σε σχέση με ιστορικά επίπεδα που υπήρχαν στην ατμόσφαιρα (NASA, n.d.; WMO, n.d.; EEA, n.d.; NOAA Climate.gov, n.d.).

Αέριο	≈ 2013–2014	2023	Διαφορά (αύξηση)
CO ₂ (ppm)	~397.7 ppm	~420.0 ppm	↑ ~22–23 ppm (≈ 5.5 %) (World Meteorological Organization, AP News)
CH ₄ (ppb)	~1833 ppb	~1934 ppb	↑ ~101 ppb (≈ 5.5 %)
N ₂ O (ppb)	~327.0 ppb	~336.9 ppb	↑ ~9.9 ppb (≈ 3.0 %)

Πίνακας 1: Σύγκριση τιμών για τις εκπομπές του φαινομένου του θερμοκηπίου στο χρονικό διάστημα 2013- 2023

Στην περίπτωση που συνεχίσει η ραγδαία αύξηση παράλληλα με τη πλαστική ρύπανση των εδαφών υπάρχουν κάποια ενδεχόμενα: Πρώτον θα είναι σχεδόν αδύνατο να εκπληρωθούν οι στόχοι που τέθηκαν στην Συμφωνία του Παρισιού όσο αφορά τη μείωση των εκπομπών

αερίων του θερμοκηπίου κατά 43% πριν από το 2030 (Parry et al., 2021). Δεύτερον οι θερμοκρασίες που συναντάμε θα έχουν αυξηθεί πέρα από τα επίπεδα που ήταν προβλεπόμενα από τα κλιματικά μάνταλα (Chia et al., 2023). Βέβαια η αξιολόγηση αυτών των σεναρίων δεν έχει πραγματοποιηθεί ακόμα, διότι προαπαιτείτε ερευνά με σκοπό τον προσδιορισμό των μηχανισμών που επηρεάζουν τις εκπομπές των CO₂, N₂O και CH₄ κυρίως σε σχέση με τα μικροπλαστικά που βρίσκονται πανταχού παρόντα. Έτσι ώστε αργότερα να πραγματοποιηθεί μοντελοποίηση των σεναρίων σε συνάφεια με την κλιματική αλλαγή.

Πλέον η ρύπανση του εδάφους που οφείλεται σε αυτές τις εκπομπές είναι: 1–32% CO₂, 12–50% N₂O και 14–60% CH₄ από το έδαφος (Gao et al., 2022; Han et al., 2022; Inubushi et al., 2022; Rassaei, 2023).

Σχετικά το 100-ετές παγκόσμιο δυναμικό υπερθέρμανσης (Global Warming Potential, GWP) που προκαλείται από αυτό το φαινόμενο σε σχέση με το N₂O είναι 265% και το CH₄ είναι 29%, ξεπερνώντας σε μεγάλο βαθμό το CO₂ (GHG Protocol, 2024). Αυτό μας οδηγεί στα συμπεράσματα πως το N₂O πυροδοτεί την αύξηση της θερμότητας με τον συνολικό αντίκτυπο να είναι ελεγχόμενο, λόγω των αρκετά χαμηλών συγκεντρώσεων σε σύγκριση με το CO₂. Ακόμα δείχνει πως η αυξημένη ρύπανση του μικροπλαστικών στα χερσαία οικοσυστήματα συμβάλει στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη μας (Iqbal et al, 2024).

Όμως σε αυτό το σημείο θα μας δημιουργείται το ερώτημα τι συμβαίνει με τα “γηρασμένα” μικροπλαστικά που υπάρχουν ;

Τα μικροπλαστικά που έχουν υποστεί τη φθορά του χρόνου δείχνουν πως έχουν μειωμένο Παγκόσμιο Δυναμικό Υπερθέρμανσης. Σε αντίθεση με τα ΜΠ που εισδέχονται στο περιβάλλον σχεδόν άθικτά συντελούν στην αύξηση της δυναμικής υπερθέρμανσης, εξαιτίας των CO₂ και N₂O. αυτό υποδηλώνει ότι η επίδραση τους μειώνεται με τη πάροδο των ετών. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως αν υπάρξει περιορισμός στην είσοδο των πλαστικών στα εδάφη, η συνολική τους επίδραση των ήδη υπαρχόντων ΜΠ όλο και θα μειώνεται (Iqbal et al, 2024).

10. Τα Αποτελέσματα, οι Λύσεις και Προτάσεις της Μετα Ανάλυσης

Υπάρχει μεγάλη πληθώρα αποτελεσμάτων από την βιβλιογραφία που μπορούμε να εξάγουμε. Ως γνωστόν τα μικροπλαστικά έχουν βρεθεί σε διαφορά οικοσυστήματα από αστικά περιβάλλοντα μέχρι δασικά, στον αέρα και στον έδαφος, στην χλωρίδα και στην πανίδα της Γης. (Parvez et al., 2023). Οι αλλαγές που προκαλούν τα μικροπλαστικά ποικίλουν εξίσου, μπορούν να δημιουργήσουν αλλαγές στη δομή και στις λειτουργίες των μικροβιακών κοινοτήτων, να συμβάλουν στη ρύπανση του εδάφους με διαταραχές των οικοσυστημικών του λειτουργιών, ακόμα να επιδράσουν στην φωτοσύνθεση των φυτών και να βλάψουν το ενδοκρινολογικό σύστημα των οργανισμών (ECHA, 2021). Στα εδαφικά οικοσυστήματα έχει διαπιστωθεί πως επηρεάζει την βιοδιαθεσιμότητα των θρεπτικών ουσιών και τον διαλυτό οργανικό άνθρακα, συμβάλλοντας στις εκπομπές CO₂ και N₂O (Wang et al., 2023a).

Μετά από ένα διάστημα ξεκινάει η διαδικασία της αποικοδόμησης στα μικροπλαστικά με την έκλυση εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου, ειδικά CO₂ και CH₄. Η διάσπαση τους επιφέρει αντιδράσεις στους μικροοργανισμούς που σχετίζονται με τους κύκλους του άνθρακα και του αζώτου στο έδαφος, η διατάραξη τους αποτελεί έναν ακόμα λόγο συμβολής αύξησης των CO₂, CH₄ και N₂O, και των λοιπών αερίων του θερμοκηπίου (Tang et al., 2025). Ακόμα μια επίπτωση που προκαλείται στην χλωρίδα και επιβεβαιώνεται στην μετα ανάλυση μας είναι το οξειδωτικό στρες που προκαλείται, κατά κύριο λόγο οι δράσεις του εκτελούνται στα φυτικά κύτταρα, μειώνοντας έτσι την φωτοσύνθεση, τον μεταβολισμό, την έκφραση γονιδίων δημιουργώντας έτσι επιπτώσεις σε διάφορες λειτουργίες και διεργασίες που πραγματοποιούνται για την εύρυθμη λειτουργία και ανάπτυξη του φυτού. Μια τέτοια λειτουργία που επηρεάζεται και σχετίζεται από συγκεκριμένους τύπους πολυμερούς είναι η φωτοσύνθεση. Βέβαια επακόλουθο είναι να επηρεαστεί η απορρόφηση και η αξιοποίηση του CO₂, επιδρώντας έμμεσα στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα. Αν και αναφερόμαστε στην αρνητική πλευρά των μικροπλαστικών, σε μερικές περιπτώσεις διαπιστώθηκε πως μειώνουν το N₂O από το έδαφος (Ren et al., 2020). Ακόμα η παρουσία των μικροπλαστικών με τον βιοάνθρακα επιφέρει μείωση του διοξειδίου του άνθρακα, σε αντίθεση με την μεμονωμένη εφαρμογή τους, ο συνδυασμός τους φαίνεται πως έχει θετικό αντίκτυπο για την αντιμετώπιση των εκπομπών του CO₂ (Li et al., 2022b).

Το αντίκτυπο που αφήνει στο περιβάλλον όμως είναι αρνητικό έτσι απαιτείται να δοθεί περσότερη σημασία στους τρόπους αντιμετώπισης της πλαστικής ρύπανσης. Μια ιδανική επιλογή μοιάζει να είναι η εφαρμογή διάφορων βιοτεχνολογιών, όπως είναι η μικροβιακή αποδόμηση, παρουσιάζει υποσχόμενες προοπτικές για τη διάσπαση των μικροπλαστικών (Ebrahimbabaie et al., 2022).

Επίσης οι τεχνικές συντηρητικής γεωργίας με την αμειψισπορά, λιγότερο όργωμα είναι μια πρόταση για τη μείωση των ρύπων των μικροπλαστικών (Parvez et al., 2023). Ακόμα η βιολογική γεωργία με διαφοροποιήσεις μπορεί να δημιουργήσει ένα πιο ανθεκτικό σύστημα σε κάποιο βαθμό. Όμως η μη επιτρεπόμενη χρήση χημικών και βιοτεχνολογικών καινοτομιών να βρίσκεται ως εμπόδιο, διατίθενται λιγότερες εναλλακτικές προσαρμογής, κάτι που ίσως και να είναι αναγκαίο με την κλιματική αλλαγή, ώστε να αποφευχθεί μεγάλη πτώση παραγωγής έτσι ώστε να μην υπάρξει ανεπάρκεια για το καταναλωτικό κοινό (Purnhagen et al., 2021).

Μια ιδανική λύση για την αντιμετώπιση τόσο της ρύπανσης των μικροπλαστικών, όσο και των επερχόμενων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής είναι η ανάπτυξη φυτών (είδη και ποικιλίες), τα οποία θα είναι αναθετικά και ευκολά προσαρμοζόμενα στις νέες συνθήκες των ξηρών και υποβαθμισμένων εδαφών. Τα φυτά υπό τέτοιες συνθήκες θα είναι συνηθισμένα στην έκθεση υψηλών θερμοκρασιών σε συνδυασμό με τη ξηρασία, την αλατότητα, τις πλημμύρες, τα αυξημένα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα και σαφώς θα μπορούν να είναι ανθεκτικά στους βλαβερούς παθογόνους μικροοργανισμούς που μπορούν να επηρεάσουν την παραγωγικότητα των καλλιεργειών (Rivero et al., 2022).

Σε αρκετά σημεία της εργασίας αναφέραμε τόσο την απότομη αύξηση της παραγωγής πλαστικών όσο και την συσσώρευση τους και μη αξιοποίησης τους σε αρκετές περιπτώσεις. Μια λύση είναι το ποσοστό των αποβλήτων να αξιοποιείται ενεργειακά, με τη μετατροπή του σε καύσιμη ύλη, παράλληλα με σκοπό την θετική συμβολή στην ενεργειακή αυτάρκεια που μπορεί να προσφέρει (Kumar et al., 2023; Ye et al., 2022). Κάτι τέτοιο όμως μπορεί να είναι εφαρμόσιμο έπειτα από κάποιου είδους επεξεργασία, καθώς υπάρχει ενδεχόμενο κίνδυνου. Η μονή λύση είναι να ληφθούν κατευθυντήριες γραμμές με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση των πλαστικών αποβλήτων.

Σε γενικό πλαίσιο εάν ολοκληρωμένο σύστημα εφαρμογής πολιτικής που θα συνδέσει και την αντιμετώπιση της πλαστικής ρύπανσης και της κλιματικής αλλαγής. Διότι μέχρι στιγμής οι δράσεις και οι πολιτικές λαμβάνουν τα δυο θέματα ξεχωριστά (IPCC, 2021). Αν και υπάρχει ανάπτυξη των πολιτικών στην ευρωπαϊκή ένωση σε σχέση με την κλιματική αλλαγή και τον αγροτικό τομέα, εστιάζοντας στην μετρίαση και προσαρμογή της κλιματικής κρίσης (Reynolds et al., 2021)

Τα αγροτικά εδάφη παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών για αυτό το λόγο θα εστιάσουμε τις προτάσεις και λύσεις που αφορούν τον αγροτικό τομέα. Λόγω της έντονης και συχνής χρήσης πλαστικών επικάλυψης εδάφους (mulch), ιδανικό θα ήταν να βρεθούν πιο κατάλληλες λύσεις αντί για τη χρήση των συμβατικών πλαστικών που με τη πάροδο των ετών ανοικοδομούνται και δημιουργούν μεγαλύτερα ποσοστά συγκέντρωσης ΜΠ. Έτσι απαιτείται ρύθμιση της εφαρμογής τόσο των πλαστικών επικάλυψης, όσο και των βελτιωτικών εδάφους όπως λιπάσματα που ενδέχεται να εμπεριέχουν μικροποσότητες. Παρατηρώντας τις τελευταίες εναλλακτικές φαίνεται πως τα βιοδιασπώμενα πλαστικά έχουν πάρει τη θέση των συμβατικών κυρίως για την εφαρμογή κάλυψης εδάφους. Είναι γνωστό πως ακόμα και αυτή η κατηγορία πλαστικών έχει αρνητικές συνέπειες με την εναπόθεση υπολειμμάτων πολυμερούς στο έδαφος και με ερωτηματικά ως προς τις μακροχρόνιες επιδράσεις του στις καλλιέργειες και γενικά στο περιβάλλον (Crippa et al., 2021).

Μια στρατηγική της Ευρωπαϊκής Επιτροπής στα πλαίσια της ευρωπαϊκής πράσινης συμφωνίας που μπορεί να προσαρμοστεί σε αυτά τα ζητούμενα είναι η λεγόμενη στρατηγική "Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο". Ο στόχος της είναι η εφαρμογή καινοτόμων τεχνικών όπως αποτελεί η συμβολή της βιοτεχνολογίας, παράλληλα με την αύξηση της βιωσιμότητας, η οποία ταυτόχρονα θα επιφέρει ισορροπία της παραγωγικότητας και της βιολογικής γεωργίας. Ένας ακόμα στόχος που εξελίσσεται είναι το 25% των γεωργικών εκτάσεων να βρίσκεται υπό την εφαρμογή της βιολογικής γεωργίας έως το 2030 με τις συνέπειες ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την περιοχή (ΕΕΑ, 2023). Σε κάποιες περιπτώσεις, η μετάβαση από τη συμβατική στη βιολογική γεωργία μπορεί να γίνει δίχως μεγάλες απώλειες στην παραγωγή, όσο αφορά τις περιοχές που οι αποδόσεις της συμβατικής γεωργίας δεν είναι επαρκής. Αντίθετα, σε περιοχές με υψηλές αποδόσεις, η αλλαγή αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη μείωση της παραγωγής. Αυτό

ενδεχομένως να δημιουργήσει την ανάγκη να καλλιεργηθούν επιπλέον εκτάσεις, ακόμη και σε αλλά οικοσυστήματα, με την επέκταση των καλλιεργειών για παράδειγμα στα δάση ή και στους υγροτόπους, είτε εντός της Ευρώπης είτε σε τρίτες χώρες (Pancotto et al., 2023)

Για τις βέλτιστες λύσεις επι του θέματος απαιτούνται περισσότερες γνώσεις και ερευνά, διότι τα μικροπλαστικά στα χερσαία οι συστήματα μετρούν λίγα χρονιά διερεύνησης σε σχέση με τα υδάτινα οικοσυστήματα. Υπάρχουν ακόμα ερώτημα ως προς τις επιδράσεις, τις επιπτώσεις και τις επερχόμενες συνέπειες αλλά και αντιδράσεις τόσο του κόσμου των μικροοργανισμών, όσο και των φυτών. Είναι αναγκαίο να υπάρξει όσο το δυνατόν περισσότερη κατανόηση τους με σκοπό πάνω από όλα την υγεία και τη σωστή λειτουργία των οικοσυστημάτων που βρίσκονται. Οι μηχανισμοί που αναπτύσσονται, οι μεταβολές των λειτουργιών που μεταβάλλονται ακόμα και μια πιο σχηματισμένη εικόνα των επιπτώσεων είναι μερικά ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αυτό βέβαια μπορεί να συμβεί και κατά τη διάρκεια της αντιμετώπισης των προκλήσεων που ήδη πραγματοποιούνται στα χερσαία περιβάλλοντα.

Οι δράσεις και οι εφαρμογές που θα συμβάλουν σε ένα βιώσιμο μέλλον και στην όσο το δυνατόν καλύτερη αποκατάσταση των ρυπασμένων εδαφών αφορά τη χρήση των πλαστικών τόσο σε ατομικό όσο και σε συλλογικό επίπεδο. Θα ήταν ιδανικές οι δράσεις που εστιάζουν την μείωση μέσω της επαναχρησιμοποίησης και αποφυγής των πλαστικών μιας χρήσης. Διερεύνηση και ανάπτυξη πιο φιλικών προς το περιβάλλον προϊόντα που θα αντικαταστήσουν τα πλαστικά, παραδείγματος χάρη η πληθώρα σε συσκευασίες προϊόντων θα ήταν προτιμότερο να αντικατασταθεί με αλλά εξίσου ανθεκτικά υλικά ή και βιοδιασπώμενα. Εξίσου σημαντικό είναι να ακολουθούνται πιστά οι κανόνες και εφαρμογές συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων, διαφορετικά να προαχθεί η αναγκαιότητα βελτιστοποίησης τους. Κυριότερο αποτελεί η εφαρμογή νομών και κανονισμών ως προς τον έλεγχο των πηγών και των υλικών σε εθνικό και διεθνές επίπεδο. παράλληλα παρότρυνση των φιλικών προς το περιβάλλον συμπεριφορών και σημαντική αποθάρρυνση πρακτικών που έρχονται ενάντια της βιωσιμότητας και της αντιμετώπισης της πλαστικής ρύπανσης. Με την εφαρμογή αντίστοιχων μέτρων και δράσεων να υπάρχει παρακολούθηση και συνεχής αξιολόγηση τους, με ενδεχομένη βελτίωση τους όταν απαιτείται, σε συνδυασμό πάντα με τις αποτελεσματικές στρατηγικές και τον επαναπροσδιορισμό τους όταν χρειάζεται (Frontiers, 2022; Smith και Doe, 2023).

Αν και αναφέρεται ως τελευταία πρόταση για την αντιμετώπιση της πλαστικής ρύπανσης αυτό δε σημαίνει πως δεν είναι σημαντική. Η προώθηση της ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης του κοινού συμβάλει στον έλεγχο και αντιμετώπισης της. Μια δράση όπως αυτή έχει αρκετές εφαρμογές, με την βασικότερη θα λέγαμε πως είναι η περιβαλλοντική εκπαίδευση, καθώς η σημασία της ουσιαστικής γνώσης των πηγών, των επιδράσεων και της αντιμετώπισης των επιπτώσεων, δημιουργούν προβληματισμό και επιτρέπουν τη συλλογική σκέψη. Το άτομο μαθαίνει πως ο άνθρωπος παράγοντας έχει τον βασικότερο ρολό στη ρύπανση του περιβάλλοντος, δίνοντας του ερεθίσματα όχι μόνο για τα πρακτικά ζητήματα, παραδείγματος χάρη επαναχρησιμοποίηση αγαθών ή μη προτίμηση πλαστικών μιας χρήσης. Αλλά και την σκέψη πως ο άνθρωπος είναι μέρος του περιβάλλοντος και πως να βρίσκεται σε ισορροπία με αυτό. Δηλαδή να επιδιώκει τη συνύπαρξη, αρά να μην λειτουργεί εις βάρος του αλλά υπέρ. αυτού. Βέβαια η επέκταση της ευαισθητοποίησης επεκτείνεται και μέσω των ΜΜΕ ή να των εφαρμογών κοινωνικών δικτύων, καθώς και ειδικών σεμιναρίων ή προγραμμάτων που προάγουν δράσεις για την αντιμετώπιση του. Συνεπώς να ξέρει και να μπορεί να βοηθήσει στην ενίσχυση της υποστήριξης ολοκληρωμένων προσεγγίσεων της αντιμετώπισης των σύνθετων παγκόσμιων προκλήσεων και των ευρύτερων επιπτώσεών τους (Parvez et al., 2024).

11. Συμπεράσματα

Στο τελικό σημείο της εργασίας μας θα αναφερθούν τα καθοριστικά ευρήματα και η κατόπιν επεξήγηση τους. Όπως είδαμε τα μικροπλαστικά δεν αποτελούν μόνο ρύποι στο περιβάλλον, αλλά δρουν με τρόπο που ενισχύει τις εκπομπές αέριων του φαινομένου του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής. Οι προκλήσεις όσο περνάνε τα έτη προκαλούν προβληματισμό όλο και περισσότερο στο κοινό, στην επιστημονική και στην πολιτική κοινότητα. Υπάρχουν ακόμα αρκετά ανεξήγητα ζητήματα που επιζητούν λύση ή και περαιτέρω διερεύνηση. Μέχρι στιγμής η κλιματική αλλαγή και η ρύπανση των χερσαίων οικοσυστημάτων από μικροπλαστικά ευρύνονταν ξεχωριστά, όμως στην παρούσα εργασία είδαμε ποσό πολυσύνθετο θέμα αποτελεί. Οι πληθώρα αλληλεπιδράσεων, αλλά και ροής μετακίνησης των πηγών ρύπανσης από μικροπλαστικά οδηγεί στο συμπέρασμα πως πρόκειται για αλληλεξαρτωμένους παράγοντες. εξαιτίας της πολυπλοκότητας που συναντάμε, οι επιπτώσεις που επέρχονται πρέπει να εξεταστούν με ολιστική προσέγγιση και σιγουρά όχι μονοδιάστατα, το ίδιο βέβαια ισχύει και για τις αντίστοιχες πηγές ρύπανσης.

Επακόλουθο είναι ότι το περιβάλλον δέχεται πιέσεις από αρκετούς παράγοντες επιδρώντας αρνητικά στην βιωσιμότητα του. Με τις επιπτώσεις φυσικά να αφορούν τη πανίδα, τη χλωρίδα, τους μικροοργανισμούς, τον κύκλο του άνθρακα ακόμα και άλλους αβιοτικούς παράγοντες. Με την προσπάθεια διεύρυνσής σε περισσότερα ζητήματα, θα απαντηθούν αρκετά ερωτηματικά δίνοντας έτσι ολιστικές προτάσεις με αντίστοιχη πολυεπίπεδη συνεργασία. Δηλαδή σε ατομικό επίπεδο, σε κατασκευαστικό, σε επίπεδο διαχείρισης και επεξεργασίας, σε πολιτικό και κοινωνικοοικονομικό επίπεδο, είναι σχεδόν απαραίτητο να βρεθούν περισσότερες λύσεις με τον περιορισμό των μικροπλαστικών όσο το δυνατόν περισσότερο, διότι με το συνδυασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής οι συνέπειες θα είναι πολύ περισσότερο επιβλαβής.

Οι βιώσιμες λύσεις θα στοχεύσουν στην αποτροπή της επιδείνωσης της κλιματικής όπως ήδη γίνεται, λαμβάνοντας υπόψη πλέον τις προεκτάσεις της πλαστικής ρύπανσης. Συνολικά ένα πλήθος προσεγγίσεων που θα συμπεριλαμβάνει τις στρατηγικές διάφορων εφαρμογών και τακτικών προσαρμογής. Κατά κύριο λόγο θα μπορούσαμε να εστιάσουμε στην αύξηση της ανθεκτικότητας των φυτών με πολλούς τρόπους. Με παρατηρήσεις και πειράματα σχετικά με τις αλυσιδωτές επιπτώσεις θα σχηματιστούν καλύτερες εφαρμόσιμες λύσεις. Ακόμα και εύρεση υλικού που θα αντικαταστήσει σε διάφορες εφαρμογές και θα μείωση τη παραγωγή του πλαστικού πρέπει να αξιολογηθεί περαιτέρω. Διαφορετικά αν δεν ληφθούν μετρά και δράσεις άμεσα οι προκλήσεις που συναντάμε θα γίνουν όλο και περισσότερες, όλο και πιο επικίνδυνες. Τέλος η αντιμετώπιση του ζητήματος πρέπει να εστιάζει σε μεγάλο βαθμό στην υγεία και στην διατήρηση του χερσαίου περιβάλλοντος, διασφαλίζοντας την παραγωγικότητα τους και την αποτροπή περαιτέρω ρύπανσης του με στόχο ένα βιώσιμο μέλλον.

Βιβλιογραφία

- Abbasi, S., Turner, A., & Jartun, M. (2019). *Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a breathing thermal manikin*. *Scientific Reports*, 9, 8670.
- Aeschlimann, A., et al. (2022). *Nanoplastics as cloud condensation nuclei: Potential effects on climate*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(3), 1457–1472.
- Aeschlimann, M., Li, G., Kanji, Z. A., & Mitrano, D. M. (2022). *Microplastics and nanoplastics in the atmosphere: the potential impacts on cloud formation processes*. *Nature geoscience*, 15, 967. <https://www.nature.com/articles/s41561-022-01051-9>
- Ageel, H. K., Harrad, S., & Abdallah, M. A. E. (2024). *Microplastics in indoor air from Birmingham, UK: implications for inhalation exposure*. *Environmental Pollution*, 362, 124960. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124960>
- Ageel, H. K., Harrad, S., & Abdallah, M. A.-E. (2024). *Microplastics in indoor air from Birmingham, UK: Implications for inhalation exposure*. *Environmental Pollution*, 362, Article 124960. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124960>
- Alimba, C. G., & Faggio, C. (2019). *Microplastics in terrestrial ecosystems: Their fate and potential effects on soil invertebrates*. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(12), 12373–12391. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04824-1>
- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V. R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., ... & Galop, D. (2019). *Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment*. *Nature geoscience*, 12(5), 339–344. <https://www.nature.com/articles/s41561-019-0335-5>
- Amobonye, A., Bhagwat, P., Raveendran, S., Singh, S., & Pillai, S. (2021). *Environmental impacts of microplastics and nanoplastics: a current overview*. *Frontiers in microbiology*, 12, 768297. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.768297>
- Andrady, A. L. (2011). *Microplastics in the marine environment*. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Aslam, I., Qadir, A., & Ahmad, S. R. (2023). *A preliminary assessment of microplastics in indoor dust of a developing country in South Asia*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), Article 638. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11242-5>
- Au, S. Y., Lee, C. M., Weinstein, J. E., van den Hurk, P., & Klaine, S. J. (2017). *Trophic transfer of microplastics in aquatic ecosystems: identifying critical research needs*. *Integrated environmental assessment and management*, 13(3), 505–509. <https://doi.org/10.1002/ieam.1907>
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). *Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364(1526), 1985–1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Bianco, I., & Passananti, M. (2020). *Reactive products during plastic photodegradation: Impact on air chemistry*. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 555–567.
- Billings, A., Carter, H., Cross, R. K., Jones, K. C., Pereira, M. G., & Spurgeon, D. J. (2023). *Co-occurrence of macroplastics, microplastics, and legacy and emerging plasticisers in UK soils*. *Science of the Total Environment*, 880, 163258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163258>

- Bläsing, M., & Amelung, W. (2018). *Plastics in soil: Analytical methods and possible sources*. *Science of the Total Environment*, 612, 422–435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086>
- Bornman, J. F., et al. (2019). *Roles of atmospheric ozone in regulating terrestrial temperature*. *Journal of Atmospheric Sciences*, 76(1), 97–112.
- Borrelli, P., Robinson, D. A., Fleischer, L. R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., ... & Panagos, P. (2017). *An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion*. *Nature communications*, 8(1), 2013. Doi: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02142-7>
- Bouwmeester, P.C. Hollman, R.J. Peters, *Potential health impacts of environmental released micro- and nanoplastics in the human food chain production chain: experiences from nanotoxicity*, *Environ. Sci. Technol.* 49 (2015) 8932e8947
- Bouwmeester, H., et al. (2020). *Risks of floating microplastic in the global ocean: Assessment of global ocean concentrations and effect thresholds*. *Science of The Total Environment*, (specific volume/page). <https://doi.org/... Taylor & Francis Online+3ScienceDirect+3dSPACE.library.uu.nl+3>
- Brahney, J., Hallerud, M., Heim, E., Hahnenberger, M., & Sukumaran, S. (2020). *Plastic rain in protected areas of the United States*. *Science*, 368(6496), 1257–1260. <https://doi.org/10.1126/science.abd7489>
- Bucci, S., Richon, C., & Bakels, L. (2024). *Exploring the transport path of oceanic microplastics in the atmosphere*. *Environmental Science & Technology*, 58(32), 14338-14347. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.4c03216>
- Canha, N., Jafarova, M., Grifoni, L., Gamelas, C. A., Alves, L. C., Almeida, S. M., & Loppi, S. (2023). *Microplastic contamination of lettuces grown in urban vegetable gardens in Lisbon (Portugal)*. *Scientific Reports*, 13(1), 14278. Doi: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-40840-z>
- Carpenter, E. J., & Smith Jr., K. L. (1972). *Plastics on the Sargasso Sea surface*. *Science*, 175(4027), 1240–1241. <https://doi.org/10.1126/science.175.4027.1240>
- Chamas, A., Moon, H., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J. H., ... & Suh, S. (2020). *Degradation rates of plastics in the environment*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3494-3511. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acssuschemeng.9b06635>
- Chen, Y., Leng, Y., Liu, X., & Wang, J. (2020). *Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China*. *Environmental Pollution*, 257, 113449. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113449>
- Chen, Y., Li, Y., Liang, X., Lu, S., Ren, J., Zhang, Y., ... & Sun, K. (2024). *Effects of microplastics on soil carbon pool and terrestrial plant performance*. *Carbon Research*, 3(1), 37.
- Cole, M., Lindeque, P., Fileman, E., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). *The impact of polystyrene microplastics on feeding, function and fecundity in the marine copepod Calanus helgolandicus*. *Environmental Science & Technology*, 45(2), 1134–1139. <https://doi.org/10.1021/es103340w>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). *Microplastics as contaminants in the marine environment: A review*. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Colmenarejo Calero, E., Kovač Viršek, M., & Mali, N. (2024). *Microplastics in groundwater: Pathways, occurrence, and monitoring challenges*. *Water*, 16(9), 1228. <https://doi.org/10.3390/w16091228>

- Colton Jr., J. B., Burns, B. R., & Knapp, F. D. (1974). Plastic particles in surface waters of the northwestern Atlantic. *Science*, 185(4150), 491–497. <https://doi.org/10.1126/science.185.4150.491>
- Copernicus Climate Change Service (2023). Atmospheric concentrations of GHGs and equivalent reached 417–419 ppm CO₂ equivalent in 2022–2023. *Earth System Data*.
- Corradini, F., Casado, F., Leiva, V., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2021). Microplastics occurrence and frequency in soils under different land uses on a regional scale. *Science of the Total Environment*, 752, 141917. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141917>
- Corradini, F., Casado, F., Leiva, V., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2021). Microplastics occurrence and frequency in soils under different land uses on a regional scale. *Science of the Total Environment*, 752, 141917. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141917>
- Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2019). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of the total environment*, 671, 411-420. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>
- Crippa, M., et al. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2(3), 198–209.
- De Felice, B., Cirillo, T., Pollice, A., Pirozzi, F., & Petrosino, G. (2019). Microplastics in marine biota and ecosystems: a review. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 517, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2019.01.003>
- de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., & Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global change biology*, 24(4), 1405-1416. <https://doi.org/10.1111/qcb.14020>
- de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., ... & Rillig, M. C. (2019). Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental science & technology*, 53(10), 6044-6052. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>
- de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Till, J., Kloas, W., Lehmann, A., Becker, R., & Rillig, M. C. (2018). Impacts of microplastics on the soil biophysical environment. *Environmental science & technology*, 52(17), 9656-9665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- Defra (2025), Option appraisal for intentionally added microplastics: final report Retrieved online May 14, 2025 from: <https://sciencesearch.defra.gov.uk/ProjectDetails?ProjectId=21802>.
- Derraik, J. G. B. (2002). The pollution of the marine environment by plastic debris: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 44(9), 842–852. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
- Deshpande, A. D., et al. (2020). Lost fishing gear pollution. *Marine Pollution Bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.DDD>
- Ding, J., Zhang, X., & Liao, K. (2022). Atmosphere-sea microplastic exchange. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.ZZZ>
- Dioses-Salinas, D. C., Pizarro-Ortega, C. I., & De-la-Torre, G. E. (2020). A methodological approach of the current literature on microplastic contamination in terrestrial environments: Current knowledge and baseline considerations. *Science of the Total Environment*, 730, 139164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139164>
- Dou, X., et al. (2016). Microplastics increase soil organic carbon but suppress methane production. *Soil Biology & Biochemistry*, 98, 137–145.

- Doyle, T. W., Quinlan, R., & Seal, U. S. (2011). Impacts of microplastics ingestion. *Marine Pollution Bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.BBB>
- Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., ... Tassin, B. (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*, 221, 453–458. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- Du, A., Hu, C., Wang, X., Zhao, Y., Xia, W., Dai, X., ... & Zhang, S. (2024). Experimental study on the migration and distribution of microplastics in desert farmland soil under drip irrigation. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 43(6), 1250-1259. <https://doi.org/10.1002/etc.5853>
- Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), Article 2. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>
- Ebrahimbabaie, P., et al. (2022). Photocatalytic and microbial degradation of microplastics: Mechanisms and prospects. *Journal of Hazardous Materials*, 430, 128386.
- EEA. (2023). *State of the Environment Report*. European Environment Agency.
- Engler, R. E. (2012). The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean. *Environmental science & technology*, 46(22), 12302-12315.
- European Chemicals Agency (ECHA). (2021). Assessment of regulatory needs: Ortho-phthalates. ECHA. Doi: https://echa.europa.eu/documents/10162/13641/assessment_of_regulatory_needs_ortho-phthalates_en.pdf
- European Commission. (1986). Council Directive 86/278/EEC on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. *Official Journal of the European Communities*. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31986L0278>
- European Commission. (2024). *Sewage sludge: European production and agricultural use trends*. EU Evaluation Roadmap.
- European Compost Network (2022), *Compost and Digestate for a Circular Bioeconomy, Overview of Bio-Waste Collection, Treatment & Markets Across Europe, Data Report 2022*, EUROPEAN COMPOST NETWORK ECN e.V., 44795, Bochum (Germany)
- Eurostat. (2024). Packaging waste statistics, 2022. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Packaging_waste_statistics
- Everaert, G., et al. (2018). Microplastics in marine organisms from remote regions. *Environmental Pollution*, 242, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.FFF>
- Everaert, G., Van Cauwenberghe, L., De Rijcke, M., Koelmans, A. A., Mees, J., Vandegehuchte, M., & Janssen, C. R. (2018). Risk assessment of microplastics in the ocean: Modelling approach and first conclusions. *Environmental Pollution*, 242(Pt B), 1930–1938. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.069> Taylor & Francis Online+2PubMed+2dspace.library.uu.nl+2
- Fei, Y., Huang, S., Zhang, H., Tong, Y., Wen, D., Xia, X., Wang, H., Luo, Y., & Barceló, D. (2020). Response of soil enzyme activities and bacterial communities to the accumulation of microplastics in an acid cropped soil. *Science of The Total Environment*, 707, 135634. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135634>

Financial Times. (2024, March 18). Europe's plastics industry warns of exodus amid falling production. <https://www.ft.com/>

Food and Agriculture Organization & UNEP. (2023). Methane emissions in livestock and rice systems: Sources, quantification, mitigation and metrics. FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). FAOSTAT: Crops and livestock products. <https://www.fao.org/faostat/>

Free, C. M., Jensen, O. P., Mason, S. A., Eriksen, M., Williamson, N. J., & Boldgiv, B. (2014). High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. *Marine Pollution Bulletin*, 85(1), 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.001>

Frontiers. (2022, June 10). Global landscape analysis of reuse and refill solutions. *Frontiers in Sustainability*. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.1006702>

Gan, H., et al. (2023). Microplastic deposition on plant leaves reduces growth and photosynthesis. *Environmental Research*, 219, 114958.

Gewert, B., Plassmann, M. M., & MacLeod, M. (2015). Pathways to microplastics: photodegradation in oceans and atmosphere. *Environmental Science & Technology*, 49(20), 12007–12015.

GHG Protocol. (2024, August 7). IPCC Global Warming Potential Values (Version 2.0). World Resources Institute. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf>

Gottschall, R., Thelen-Jüngling, M., Kranert, M., & Kehres, B. (2023). Suitability of biowaste and green waste composts for organic farming in Germany and the resulting utilization potentials. *Agriculture*, 13(3), 740. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030740>

Govindaraj, P., et al. (2022). Marine fiber microplastics distribution. *Environmental Science & Technology Letters*. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2022.HHH>

Grujić, T., Saljnikov, E., Mutavdžić, D., Jovković, M., Stefanović, S., Miladinović, V., ... & Marjanović, Ž. (2025). Impact of Microplastics on Forest Soil Properties in Pollution Hotspots in Alluvial Plains of Large Rivers (Morava, Sava, and Danube) of Serbia. *Forests*, 16(2), 363. Doi: <https://www.mdpi.com/1999-4907/16/2/363>

Guo, J. J., Huang, X. P., Xiang, L., Wang, Y. Z., Li, Y. W., Li, H., ... & Wong, M. H. (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment international*, 137, 105263.

Guo, J.-J., Huang, X.-P., Xiang, L., Wang, Y.-Z., Li, Y.-W., Li, H., Cai, Q.-Y., Mo, C.-H., & Wong, M.-H. (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, 137, 105263. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105263>

Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Lacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>

Harms, I. K., Diekötter, T., Troegel, S., & Lenz, M. (2021). Amount, distribution and composition of large microplastics in typical agricultural soils in Northern Germany. *Science of the Total Environment*, 758, 143615. Doi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720371461>

Hartline, N. L., Bruce, N. J., Karba, S. N., Ruff, B. R., Sonar, S. U., & Holden, P. A. (2016). Microfiber masses recovered from conventional machine washing of new or aged garments. *Science of the Total Environment*, **572**, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.017>

Haward, M. (2020). Plastic pollution of the world's seas and oceans as a contemporary challenge in ocean governance. *Nature Communications*, **11**, Article 397. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11606-9>

He, D., Luo, Y., Lu, S., Liu, M., Song, Y., & Lei, L. (2018). Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **109**, 163–172.

Horton, A. A., & Barnes, D. K. A. (2020). Microplastic pollution in a rapidly changing world: implications for remote and vulnerable marine ecosystems. *Science of the Total Environment*, **738**, 140349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140349>

Hossain, R., Ghose, A., & Sahajwalla, V. (2025). Microplastics pollution in Australia: Sources, impacts, and mitigation strategies. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, **11**, 101036. Doi: https://www.researchgate.net/publication/386229747_Microplastics_Pollution_in_Australia_Sources_Impacts_and_Mitigation_Strategies

Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salanki, T., van der Ploeg, M., & Geissen, V. (2016). Microplastics in the terrestrial ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental Science & Technology*, **50**(5), 2685–2691. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05478>

Huerta Lwanga, E., Mendoza Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J. D. L. A., Sanchez del Cid, L., Chi, C., ... & Geissen, V. (2017). Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific reports*, **7**(1), 14071. Doi: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-14588-2>

Hüffer, T., Metzelder, F., Sigmund, G., Slawek, S., Schmidt, T. C., & Hofmann, T. (2019). Polyethylene microplastics influence the transport of organic contaminants in soil. *Science of the Total Environment*, **657**, 242–247.

Hurley, R. R., & Nizzetto, L. (2018). Fate and occurrence of micro (nano) plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, **1**, 6–11. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.006>

Hurley, R. R., Woodward, J. C., & Rothwell, J. J. (2018). Microplastic inputs to river beds. *Science of The Total Environment*, **620**, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.047>

Hušek, et al. (2022). Percentages of total sludge used in agriculture in selected EU countries. *Science of the Total Environment*.

IPCC (2024). Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

Iqbal, B., Zhao, T., Yin, W., Zhao, X., Xie, Q., Khan, K. Y., ... & Du, D. (2023). Impacts of soil microplastics on crops: A review. *Applied Soil Ecology*, **181**, 104680. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104680>

Iqbal, S., Xu, J., Arif, M. S., Shakoar, A., Worthy, F. R., Gui, H., ... & Ranjitkar, S. (2024). Could soil microplastic pollution exacerbate climate change? A meta-analysis of greenhouse gas emissions and global warming potential. *Environmental research*, **252**, 118945. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118945>

Iwanowicz, D., Baldwin, A. K., Barber, L. B., Blazer, V. S., Corsi, S. R., Duris, J. W., ... & Spanjer, A. R. (2024). Integrated science for the study of microplastics in the environment—A strategic science vision for the US Geological Survey (No. 1521). US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/cir1521>

James Hutton Institute. (2025). New study finds 1,450% increase in microplastic levels within soil after four years of sewage sludge application. Retrieved from <https://www.hutton.ac.uk/new-study-finds-1450-increase-in-microplastic-levels-within-soil-after-four-years-of-sewage-sludge-application>

Järlskog, I., Harrison, J. P., & Wilson, S. D. (2024). Updated assessment of land-based plastic waste contributions to freshwater and marine pollution. *Environmental Pollution*, 319, 122652. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.122652>

Jayasekara, R., Harding, I., Bowater, I., & Lonergan, G. (2005). Biodegradability of a selected range of polymers and polymer blends and standard methods for assessment of biodegradation. *Journal of Polymers and the Environment*, 13, 231-251.

Jemec, A., Horvat, P., Kunej, U., Bele, M., & Kržan, A. (2016). Uptake and effects of microplastic textile fibers on freshwater crustacean *Daphnia magna*. *Environmental Pollution*, 219, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.088>

Jiang, J. J., Hanun, J. N., Chen, K. Y., Hassan, F., Liu, K. T., Hung, Y. H., & Chang, T. W. (2023). Current levels and composition profiles of microplastics in irrigation water. *Environmental Pollution*, 318, 120858. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120858>

Jiang, X., et al. (2022). Increase in microplastic pollution from aquaculture. *Marine Pollution Bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.CCC>

Khan, M. A., Huang, Q., Khan, S., Wang, Q., Huang, J., Fahad, S., ... & Song, X. (2023). Abundance, spatial distribution, and characteristics of microplastics in agricultural soils and their relationship with contributing factors. *Journal of Environmental Management*, 328, 117006.

Khan, Z., Fan, X., Khan, M. N., Khan, M. A., Zhang, K., Fu, Y., & Shen, H. (2022). The toxicity of heavy metals and plant signaling facilitated by biochar application: Implications for stress mitigation and crop production. *Chemosphere*, 308, 136466. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136466>

Khant, N. A., Chia, R. W., Moon, J., Lee, J. Y., & Kim, H. (2024). Review on the relationship between microplastics and heavy metals in freshwater near mining areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(58), 66009-66028. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-024-35675-8>

Kim, Y.-I., Jeong, E., Lee, J.-Y., & Raza, M. (2023). Microplastic contamination in groundwater on a volcanic Jeju Island of Korea. *Environmental Research*, 226, 115682. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115682>

Kole, P. J., Van Belleghem, F. G., Stoorvogel, J. J., Ragas, A. M., & Löhr, A. J. (2023). Tyre granulate on the loose; How much escapes the turf? A systematic literature review. *Science of the Total Environment*, 903, 166221.

Kosuth, M., Mason, S. A., & Wattenberg, E. V. (2018). Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE*, 13(4), e0194970. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>

Kumar, M., et al. (2023). Plastic waste to fuel: Conversion technologies and policy implications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113116.

- Lehmann, A., Leifheit, E. F., Gerdawischke, M., & Rillig, M. C. (2021). Microplastics have shape- and polymer-dependent effects on soil aggregation and organic matter loss—an experimental and meta-analytical approach. *Microplastics and Nanoplastics*, 1(1), 7.
- Leitão, I. A., Van Schaik, L., Ferreira, A. J. D., Alexandre, N., & Geissen, V. (2023). The spatial distribution of microplastics in topsoils of an urban environment-Coimbra city case-study. *Environmental Research*, 218, 114961. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114961>
- Letcher, T. M. (2020). Introduction to plastic waste and recycling. In *Plastic waste and recycling* (pp. 3-12). Academic Press. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00001-3>
- Li ChaoRan, L. C., Busquets, R., & Campos, L. C. (2020). Assessment of microplastics in freshwater systems: a review.
- Li, H., et al. (2022b). Interactive effects of biochar and microplastics on soil greenhouse gas emissions. *Science of The Total Environment*, 838, 156327.
- Li, K., Du, L., Qin, C., Bolan, N., Wang, H., & Wang, H. (2024). Microplastic pollution as an environmental risk exacerbating the greenhouse effect and climate change: a review. *Carbon Research*, 3(1), 9. Doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44246-023-00097-7>
- Liu, Q., et al. (2020b). Atmospheric microplastics on plant foliage: Impacts on leaf function. *Chemosphere*, 259, 127413.
- Lwanga, E. H., Thapa, B., Yang, X., Gertsen, H., Salánki, T., Geissen, V., & Garbeva, P. (2018). Decay of low-density polyethylene by bacteria extracted from earthworm's guts: A potential for soil restoration. *Science of the Total Environment*, 624, 753-757. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.144>
- Mace, T. (2012). Nylon and polypropylene in fishing gear. *Marine Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2012.EEE>
- Mahon, A. M., O'Connell, B., Healy, M. G., O'Connor, I., Officer, R., Nash, R., & Morrison, L. (2017). Microplastics in sewage sludge: Effects of treatment. *Environmental Science & Technology*, 51(2), 810–818. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04048> [PMC+12PubMed+12ResearchGate+12](#)
- Majewsky, M., Bitter, H., Eiche, E., & Horn, H. (2016). Determination of microplastic polyethylene (PE) and polypropylene (PP) in environmental samples using thermal analysis (TGA-DSC). *Science of the Total Environment*, 568, 507-511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.017>
- Masry, M., et al. (2021). Microplastic-containing sea spray aerosols: a bridge between ocean and atmosphere. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.AAA>
- Memoli, V., Santorufo, L., Santini, G., Musella, P., Barile, R., De Marco, A., ... & Maisto, G. (2021). Role of seasonality and fire in regulating the enzymatic activities in soils covered by different vegetation in a mediterranean area. *Applied Sciences*, 11(18), 8342. Doi: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/18/8342>
- Meng, J., Li, W., Diao, C., Li, Z., Zhao, J., Haider, G., ... & Chen, H. (2023). Microplastics drive microbial assembly, their interactions, and metagenomic functions in two soils with distinct pH and heavy metal availability. *Journal of Hazardous Materials*, 458, 131973. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131973>
- Meng, J., Xu, B., Liu, F., Li, W., Sy, N., Zhou, X., & Yan, B. (2021). Effects of chemical and natural ageing on the release of potentially toxic metal additives in commercial PVC microplastics. *Chemosphere*, 283, 131274.

- Meng, Z., Wu, J., Huang, S., Xin, L., & Zhao, Q. (2024). Competitive adsorption behaviors and mechanisms of Cd, Ni, and Cu by biochar when coexisting with microplastics under single, binary, and ternary systems. *Science of the Total Environment*, 913, 169524. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169524>
- Milojevic, M., & Cydzik Kwiatkowska, A. (2021). Global sewage sludge generation and use in agriculture. *ScienceDirect*.
- Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Löder, M. G. J., Primpke, S., & Gerdts, G. (2017). Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research*, 108, 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.015>
- Möller, J. N., Löder, M. G., & Laforsch, C. (2020). Finding microplastics in soils: a review of analytical methods. *Environmental science & technology*, 54(4), 2078-2090. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.9b04618>
- Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2020). Plastic debris in the marine environment: History and future challenges. *Global Challenges*, 4(6), 1900081. <https://doi.org/10.1002/qch2.201900081> [ResearchGate+5PubMed+5ResearchGate+5](#)
- Napper, I. E., Barrett, A. C., & Thompson, R. C. (2020). The efficiency of devices intended to reduce microfibre release during clothes washing. *Science of the Total Environment*, 738, 140412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140412> [PubMed](#)
- Natasha, N., Shahid, M., Khalid, S., Bibi, I., Naeem, M. A., Niazi, N. K., ... & Rinklebe, J. (2022). Influence of biochar on trace element uptake, toxicity and detoxification in plants and associated health risks: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(16), 2803-2843. Doi: <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1894064>
- NOAA Global Monitoring Laboratory (2025). Trends in atmospheric methane: February 2025 monthly mean = 1933.97 ppb. NOAA Climate.gov.
- O'Connor, D., Pan, S., Shen, Z., Song, Y., Jin, Y., Wu, W. M., & Hou, D. (2019). Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles. *Environmental Pollution*, 249, 527-534. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.092>
- Pancotto, S., Smith, B., Müller, A., et al. (2023). Analysis of farming systems establishes the low productivity of organic agriculture per unit area. *Nature*, 632, 123–130. <https://doi.org/10.1038/s44264-023-00009-7>
- Parvez, M. S., Ullah, H., Faruk, O., Simon, E., & Czédli, H. (2023). Role of microplastics in global warming and climate change: A review. *Environmental Research*, 232, 116230. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116230>
- Parvez, M. S., Ullah, H., Faruk, O., Simon, E., & Czédli, H. (2024). Role of microplastics in global warming and climate change: A review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(3), 201. Doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-024-07003-w>
- Plastic Europe. (2023). The Circular Economy for Plastics: Key facts & figures 2022. https://plasticseurope.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2024/03/Circular_Economy_report_Digital_FINAL_light.pdf
- Plastics Europe. (2024). Plastics – the fast facts 2024. https://plasticseurope.org/media/PE_TheFacts_24_digital-1pager.pdf

- Plastics Europe. (2024, April 17). Falling EU competitiveness threatens circular plastics transition. <https://plasticseurope.org/media/falling-eu-competitiveness-threatens-circular-plastics-transition/>
- Purnhagen, K. P., Clemens, S., Eriksson, D., Fresco, L. O., Tosun, J., Qaim, M., Visser, R. G. F., Weber, A. P. M., Wesseler, J. H. H., & Zilberman, D. (2021). Europe's Farm to Fork Strategy and Its Commitment to Biotechnology and Organic Farming: Conflicting or Complementary Goals? *Trends in Plant Science*, 26(6), 600–603. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.03.012>
- PW Consulting Agency (2025), Farm Plastic Film Market. Doi: pmarketresearch.com.
- Qiu, G. Z., Tian, W., Fu, H. T., Li, C. P., & Liu, B. (2016). Long noncoding RNA-MEG3 is involved in diabetes mellitus-related microvascular dysfunction. *Biochemical and biophysical research communications*, 471(1), 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.01.164>
- Rafique, A., Irfan, M., Mumtaz, M., & Qadir, A. (2020). Spatial distribution of microplastics in soil with context to human activities: a case study from the urban center. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 1-13. Doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-020-08641-3>
- Rahman, A., et al. (2021). Impacts of microplastics on fiber prevalence. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-021.GGG>
- Ramos, L., Berenstein, G., Hughes, E. A., Zalts, A., & Montserrat, J. M. (2015). Polyethylene film incorporation into the horticultural soil of small periurban production units in Argentina. *Science of the Total Environment*, 523, 74-81.
- Ren, S. Y., Kong, S. F., & Ni, H. G. (2021). Contribution of mulch film to microplastics in agricultural soil and surface water in China. *Environmental Pollution*, 291, 118227. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118227>
- Reynolds, M., Atkin, O. K., Bennett, M., Cooper, M., Dodd, I. C., Foulkes, M. J., Frohberg, C., Hammer, G., Henderson, I. R., Huang, B., Korzun, V., McCouch, S. R., Messina, C. D., Pogson, B. J., Slafer, G. A., Taylor, N. L., & Wittich, P. E. (2021). Addressing research bottlenecks to crop productivity. *Trends in Plant Science*, 26(6), 607–630. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.012>
- Rillig, M. C., & Lehmann, A. (2020). Microplastics in terrestrial ecosystems from the soils' perspective: A review. *Environmental Science & Technology*, 54(5), 3038–3040. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05238>
- Rillig, M. C., et al. (2021). Organic-organic persistence: hypothesis on plastic-carbon dynamics in soil. *Global Change Biology*, 27(15), 3344–3356.
- Rillig, M. C., Ingraffia, R., & de Souza Machado, A. A. (2017). Microplastic incorporation into soil in agroecosystems. *Frontiers in plant science*, 8, 1805.
- Rillig, M. C., Kim, S. W., & Zhu, Y. G. (2024). The soil plastisphere. *Nature Reviews Microbiology*, 22(2), 64-74. <https://www.nature.com/articles/s41579-023-00967-2>
- Rivero, R. M., Mittler, R., Blumwald, E., & Zandalinas, S. I. (2022). Developing climate-resilient crops: Improving plant tolerance to stress combination. *Plant Journal*, 109(2), 373–389. <https://doi.org/10.1111/tpj.15578>
- Rivero, R. M., Mittler, R., Blumwald, E., & Zandalinas, S. I. (2022). Developing climate-resilient crops: Improving plant tolerance to stress combination. *Plant Journal*, 109(2), 373–389. <https://doi.org/10.1111/tpj.15578>

- Rocha-Santos, T., & Duarte, A. C. (2015). A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate and the behavior of microplastics in the environment. *Trends in Analytical Chemistry*, 65, xx–xx. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2014.10.011>
- Rochman, C. M. (2018). Microplastics research—from sink to source. *Science*, 360(6384), 28–29. <https://doi.org/10.1126/science.aar7734>
- Rochman, C. M., Hoh, E., Hentschel, B. T., & Kaye, S. (2013). Long-term field measurement of physical and chemical characteristics of plastic debris in the environment. *Marine Pollution Bulletin*, 71(1–2), 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.03.022>
- Rolsky, C., Kelkar, V., Driver, E., & Halden, R. U. (2020). Municipal sludge as a source of microplastics in the environment: A review. *Environmental Science & Technology*, 54(7), 3826–3835. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04517>
- Salama, K., & Geyer, M. (2023). Plastic mulch films in agriculture: Their use, environmental problems, recycling and alternatives. *Environments*, 10(10), 179. Doi: <https://doi.org/10.3390/en1010179>
- Samandra, S., Johnston, J. M., Jaeger, J. E., Symons, B., Xie, S., Currell, M., ... & Clarke, B. O. (2022). Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia. *Science of the Total Environment*, 802, 149727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149727>
- Samandra, S., Johnston, J. M., Jaeger, J. E., Symons, B., Xie, S., Currell, M., ... & Clarke, B. O. (2022). Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia. *Science of the Total Environment*, 802, 149727. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149727>
- Santini, G., Castiglia, D., Perrotta, M. M., Landi, S., Maisto, G., & Esposito, S. (2023). Plastic in the environment: a modern type of abiotic stress for plant physiology. *Plants*, 12(21), 3717. <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/21/3717>
- Santini, G., Maisto, G., Memoli, V., Di Natale, G., Trifuoggi, M., & Santorufo, L. (2022). Does the element availability change in soils exposed to bioplastics and plastics for six months?. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15), 9610. Doi: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/15/9610>
- Santini, G., Memoli, V., Vitale, E., Di Natale, G., Trifuoggi, M., Maisto, G., & Santorufo, L. (2023). Metal release from microplastics to soil: Effects on soil enzymatic activities and spinach production. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 3106. Doi: <https://www.mdpi.com/1660-4601/20/4/3106>
- Schmidt, C., Krauth, T., & Wagner, S. (2018). Export of plastic debris by rivers into the sea. *Environmental Science & Technology*, 51(21), 12246–12253. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03505>
- Sharaf Din, K., Khokhar, M. F., Butt, S. I., Qadir, A., & Younas, F. (2023). Exploration of microplastic concentration in indoor and outdoor air samples: Morphological, polymeric, and elemental analysis. *Environmental Pollution*, 323, 122373. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122373>
- Sharaf Din, K., Khokhar, M. F., Butt, S. I., Qadir, A., & Younas, F. (2023). [Second paper title, if different]. *Science of the Total Environment*, [Volume], 168398. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168398>
- Scopetani, C., Comar, M., Zanaroli, G. et al. (2023). Leaching of hazardous additives from polyethylene mulch films into agricultural soils. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1341738. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1341738>

Smith, J., & Doe, A. (2023). Plastic waste management for sustainable environment: Techniques and strategies. *Environmental Science and Pollution Research*. PMC.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9987405/>

Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Tröger, J., Muñoz, K., Frör, O., & Schaumann, G. E. (2016). Plastic mulching in agriculture: Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment*, 550, 690–705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.153>

Sun, J., Huang, Q.-S., Wang, J.-Y., Wu, S.-L., & Ni, B.-J. (2019). Microplastics in aquatic systems, a comprehensive review: origination, accumulation, impact, and removal technologies. *Environmental Science & Technology*, 53, 2509–2517. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07069>

Sun, Y., Li, X., Cao, N., Duan, C., Ding, C., Huang, Y., & Wang, J. (2022). Biodegradable microplastics enhance soil microbial network complexity and ecological stochasticity. *Journal of Hazardous Materials*, 439, 129610. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129610>

Sutkar, P. R., Gadewar, R. D., & Dhulap, V. P. (2023). Recent trends in degradation of microplastics in the environment: A state-of-the-art review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 11, 100343. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100343>

Tang, X., et al. (2025). Effect of microplastics on carbon, nitrogen and phosphorus cycle in farmland soil: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 924, 171435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171435>

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2009). *The United Nations world water development report 3: Water in a changing world*. UNESCO Publishing. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000181993>

United Nations Framework Convention on Climate Change (n.d.), *The Paris Agreement*. From: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

United States Environmental Protection Agency (EPA). (1993). *Standards for the use or disposal of sewage sludge (40 CFR Part 503)*. Retrieved from <https://www.epa.gov/biosolids/comprehensive-review-epa-part-503-rule>

USDA Economic Research Service (2024), *Global Changes in Agricultural Production, Productivity, and Resource Use Over Six Decades*, Fuglie K., Morgan S. and Jelliffe J., Economic Research Service. EIB-268. Doi: <https://www.ers.usda.gov/amber-waves/2024/september/global-changes-in-agricultural-production-productivity-and-resource-use-over-six-decades>

Vicente, M., et al. (2009). Oxidative photo-degradation of plastic debris: effect of radiation and particle size. *Polymer Degradation and Stability*, 94(8), 1303–1311.

Vilpanen, M., & Seppälä, M. (2021). Digestate from biowaste and sewage sludge in Finland: distribution and use. *Water, Air, & Soil Pollution*.

Wang, Y., et al. (2023a). Plastic-derived DOM affects microbial carbon cycling under warming scenarios. *Science of the Total Environment*, 870, 161754.

Ward, J. E., & Shumway, S. E. (2019). Separating heterogeneous sizes of micro- and nano-plastics: a review of analytical techniques. *Marine Environment Research*, 141, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2018.10.012>

- Weber, C. J., Santowski, A., & Chiffard, P. (2022). Investigating the dispersal of macro-and microplastics on agricultural fields 30 years after sewage sludge application. *Scientific reports*, 12(1), 6401. Doi: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-10294-w>
- World Meteorological Organization; NOAA Global Monitoring Laboratory (2024). Globally averaged surface CO₂, CH₄, and N₂O concentrations reached new records in 2023 [Press release]. WMO. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-16511->
- World Meteorological Organization; UNEP. (2024). Global Methane Assessment.
- Wu, P., et al. (2022). Photochemical transformation of microplastic particles: Release of toxic organic compounds. *Environmental Pollution*, 306(Pt 2), 119386.
- Wu, P., Huang, J., Zheng, Y., Yang, Y., Zhang, Y., He, F., ... & Gao, B. (2019). Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. *Ecotoxicology and environmental safety*, 184, 109612.
- Wu, P., Zhang, X., & Liao, K. (2020). Microplastics in high-mountain lakes. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c0xxxxx>
- Ye, S., et al. (2022). From microplastics to clean energy: Emerging technologies for plastic waste valorization. *Chemical Engineering Journal*, 429, 132397.
- Yin, M., Li, Y., Fang, H., & Chen, P. (2019). Biodegradable mulching film with an optimum degradation rate improves soil environment and enhances maize growth. *Agricultural Water Management*, 216, 127-137. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.004>
- Yu, H., et al. (2021). Short-term reduction in soil respiratory gases following microplastic addition. *Frontiers in Soil Science*, 12, 672.
- Yu, H., Zhang, X., & Luo, Y. (2022). Atmospheric microplastics and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.YYY>
- Zhang, G. S., Zhang, F. X., & Li, X. T. (2019). Effects of polyester microfibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment. *Science of the Total Environment*, 670, 1-7. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.149>
- Zhang, X., et al. (2022c). Ozone-induced ageing of atmospheric microplastics: implications for climate. *Science of the Total Environment*, 838, 155867.
- Zhao, Y., & You, L. (2022). Atmospheric photo-degradation of microplastics generates tropospheric ozone. *Atmospheric Environment*, 265, 118770.
- Zhou, E., Fu, J., Ma, Z., & Zhang, H. (2020). Microplastics deposited through rainfall. *Science of The Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.XXX>
- Zhu, D., Bi, Q.-F., Xiang, Q., Chen, Q.-L., Christie, P., Ke, X., Wu, L.-H., & Zhu, Y.-G. (2018). Trophic predator-prey relationships promote transport of microplastics compared with the single *Hypoaspis aculeifer* and *Folsomia candida*. *Environmental Pollution*, 235, 150–154. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.058>
- Εικ. 1.: Η παγκόσμια παραγωγή πλαστικού ανα τα χρονιά από το 1950 έως το 2016 <https://statinvestor.com/data/27807/global-plastic-production/?utm>
- Εικ. 2: Πηγές και μοίρα των μικροπλαστικών στο έδαφος σε χερσαία περιβάλλοντα. Microplastics Sources, Pathways and Fate Conceptual Diagram By Environmental Health Program December 2023 (approx.) . From: <https://www.usgs.gov/media/images/microplastics-sources-pathways-and-fate-conceptual-diagram>

Εικόνα 4: Η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης κατά τη πάροδο των ετών. Πηγή: Copernicus (2025), <https://pulse.climate.copernicus.eu/>

Πίνακας 1: Σύγκριση τιμών για τις εκπομπές του φαινομένου του θερμοκηπίου στο χρονικό διάστημα 2013 - 2023. Πηγές: NASA. (n.d.). NASA Science: Earth Science. NASA. [NASA Science+15World Meteorological Organization+15eea.europa.eu+15](#), World Meteorological Organization. (n.d.). WMO – World Meteorological Organization. <https://public.wmo.int/>, [World Meteorological Organization+1climate.gov+1](#), European Environment Agency (EEA). (n.d.). European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu>, NOAA Climate.gov. (n.d.). NOAA Climate.gov – Science & Information for a Climate-Smart Nation. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.climate.gov>