



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



***ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ
ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΜΙΚΡΟΒΙΑΚΕΣ
ΚΟΙΝΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΜΕΛΕΤΕΣ
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ***

Στεφανία Κοτούδη

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ευαγγελία Παπαδοπούλου, Επίκουρη Καθηγήτρια

Λάρισα, Ιανουάριος 2026

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα μικροπλαστικά αποτελούν συνθετικά στερεά σωματίδια πρωτογενούς ή δευτερογενούς προέλευσης, τα οποία προκύπτουν κυρίως από τη διάσπαση μεγαλύτερων πλαστικών υλικών. Η ρύπανση από πλαστικά και μικροπλαστικά είναι εκτεταμένη στο περιβάλλον, με τα υδάτινα οικοσυστήματα να έχουν μελετηθεί εκτενώς. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον για τη ρύπανση των εδαφικών οικοσυστημάτων από μικροπλαστικά, τα οποία απαντώνται σε ποικίλες μορφές και προέρχονται από πολλαπλές πηγές και οδούς εισόδου στο έδαφος. Πλήθος ερευνών διεξάγονται με σκοπό τη διερεύνηση των επιπτώσεων των μικροπλαστικών στις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, στην ανάπτυξη των φυτών και στους μικροοργανισμούς, και κατ' επέκταση στην υγεία των ζώων και του ανθρώπου, καθώς έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα. Η παρούσα εργασία εστιάζει στην καταγραφή και ανάλυση των επιδράσεων των μικροπλαστικών στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε συλλογή, ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση δεδομένων από επιστημονικά άρθρα και μελέτες περίπτωσης. Οι μικροβιακές κοινότητες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στους βιογεωχημικούς κύκλους, στη γονιμότητα του εδάφους και στην ανάπτυξη φυτών. Τα αποτελέσματα των μελετών που αναλύθηκαν έδειξαν ότι τα μικροπλαστικά, ανάλογα το είδος του πολυμερούς, το μέγεθος, το σχήμα και τη συγκέντρωσή τους, επηρεάζουν την αφθονία, τη δομή και τη σύσταση των μικροβιακών κοινοτήτων, καθώς και τη γονιδιακή έκφραση, την ενζυμική δραστηριότητα και τις λειτουργικές τους ιδιότητες. Χαμηλές συγκεντρώσεις μικροπλαστικών, κυρίως συμβατικών πολυμερών, συνδέθηκαν με παροδική αύξηση της μικροβιακής δραστηριότητας και της ποικιλότητας, ενώ υψηλότερες συγκεντρώσεις και βιοδιασπώμενα πολυμερή συσχετίστηκαν με μείωση της α-ποικιλότητας, μεταβολές στη σχετική αφθονία βασικών βακτηριακών ομάδων και αναδιάρθρωση λειτουργικών διεργασιών που σχετίζονται με τη μικροβιακή αναπνοή και τους βιογεωχημικούς κύκλους του άνθρακα, του αζώτου και του φωσφόρου. Οι αλλαγές αυτές ενδέχεται να οδηγήσουν σε τροποποίηση βασικών εδαφικών ιδιοτήτων, όπως το pH, η σταθερότητα των συσσωματωμάτων και η ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων, επηρεάζοντας έμμεσα τη λειτουργία των εδαφικών οικοσυστημάτων. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι ορισμένοι μικροοργανισμοί είναι ικανοί να χρησιμοποιούν τα μικροπλαστικά ως πηγή άνθρακα. Τέλος, υπογραμμίζεται η ανάγκη για μελλοντικές έρευνες που θα καλύψουν υπάρχοντα ερευνητικά κενά, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς τύπους εδαφών, ρεαλιστικότερες πειραματικές προσεγγίσεις, μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες και τη συνδυασμένη παρουσία μικροπλαστικών με άλλους ρύπους στο έδαφος.

Λέξεις-κλειδιά: μικροπλαστικά, έδαφος, μικροβιακές κοινότητες, αφθονία, ποικιλότητα, ενζυμική δραστηριότητα, εδαφική λειτουργία, βιογεωχημικοί κύκλοι

ABSTRACT

Microplastics are synthetic solid particles of primary or secondary origin, mainly derived from the fragmentation and degradation of larger plastic materials. Pollution by plastics and microplastics is widespread in the environment, with aquatic ecosystems having been studied more extensively. In recent years, however, increasing research interest has been directed toward the contamination of terrestrial ecosystems by microplastics, which occur in various forms and originate from multiple sources and pathways of entry into soils. Numerous studies have been conducted to investigate the effects of microplastics on the physicochemical properties of soils, plant growth and soil microorganisms, and consequently on animal and human health, as microplastics have been shown to enter the food chain. The present thesis focuses on the identification and analysis of the effects of microplastics on soil microbial communities. To this end, data from scientific articles and case studies were collected, analyzed and comparatively evaluated. Soil microbial communities play a crucial role in biogeochemical cycles, soil fertility and plant growth. The reviewed studies indicate that microplastics, depending on polymer type, size, shape and concentration, affect the abundance, structure and composition of microbial communities, as well as gene expression, enzymatic activity, and microbial functional traits. Low concentrations of microplastics, mainly conventional polymers, were associated with transient increases in microbial activity and diversity, whereas higher concentrations and biodegradable polymers were linked to decreased alpha diversity, shifts in the relative abundance of key bacterial groups, and restructuring of functional processes related to microbial respiration and the biogeochemical cycles of carbon, nitrogen and phosphorus. These changes may lead to modifications in fundamental soil properties, such as pH, aggregate stability, and nutrient cycling, thereby indirectly affecting overall soil ecosystem functioning. Additionally, certain microorganisms have been reported to utilize microplastics as a carbon source. Finally, this thesis highlights the need for future research to address existing knowledge gaps, by considering different soil types, more realistic experimental approaches, longer time scales, and the combined presence of microplastics with other soil contaminants.

Keywords: microplastics, soil, microbial communities, abundance, diversity, enzymatic activity, soil function, biogeochemical cycles

Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην επιβλέπουσα καθηγήτρια κ. Παπαδοπούλου για την υπομονή, διάθεση χρόνου και καθοδήγηση για την ανάπτυξη και διεκπεραίωση της πτυχιακής μου εργασίας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον πατέρα μου για την οικονομική του υποστήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, και τους φίλους μου για την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας, που πίστευαν ότι θα μπορέσω να τη τελειώσω χωρίς να τα παρατήσω [special shoutout to CHULT, TBRC & ONFCORD]. Ιδιαίτερα, ένα μεγάλο ευχαριστώ στη φίλη μου Γαβριέλα, που τους τελευταίους μήνες μιλούσε μαζί μου μέσω voice call για ώρες ώστε να μπορέσω να συγκεντρωθώ παραπάνω στην πτυχιακή εργασία. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω το αγαπημένο μου μουσικό συγκρότημα ONF που χάρη στη μουσική τους μου δόθηκε δύναμη και μπόρεσα να συνεχίσω τις σπουδές μου χωρίς να τα παρατήσω ανεξαρτήτως τις δυσκολίες.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
Ευχαριστίες.....	3
Κατάλογος εικόνων	6
Κατάλογος πινάκων.....	7
Συντομογραφίες και ακρωνύμια.....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1. Πλαστικά και μικροπλαστικά	9
1.1.1. Γενικά για τα πλαστικά.....	9
1.1.2. Είδη πλαστικών	11
1.1.2.1. Θερμοπλαστικά πολυμερή	11
1.1.2.2. Θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή.....	12
1.2. Μικροπλαστικά	12
1.2.1. Κατηγορίες και χαρακτηριστικά μικροπλαστικών	12
1.2.2. Πρωτογενή και δευτερογενή μικροπλαστικά.....	13
1.2.3. Αποδόμηση πλαστικών σε μικροπλαστικά	14
1.2.3.1. Φωτοαποδόμηση	14
1.2.3.2. Μηχανική αποδόμηση.....	14
1.2.3.3. Βιοαποδόμηση.....	15
1.2.4. Πηγές μικροπλαστικών στο έδαφος.....	15
1.2.4.1. Βιοστερεά.....	15
1.2.4.2. Πλαστική εδαφοκάλυψη	16
1.2.4.3. Άλλες πηγές.....	16
1.2.5. Συμπεριφορά μικροπλαστικών στο εδαφικό περιβάλλον	17
1.2.5.1. Μετακίνηση και κατανομή των μικροπλαστικών στο έδαφος	17
1.2.5.2. Προσροφητική ικανότητα.....	19
1.3. Μικροβιακές κοινότητες του εδάφους	20
1.3.1. Μικροοργανισμοί και μικροβιακές κοινότητες	20
1.3.2. Ρόλος των μικροοργανισμών στην οικολογία του εδάφους.....	21
1.3.2.1. Ρόλος των μικροοργανισμών στον σχηματισμό και τη σταθερότητα των εδαφικών συσσωματωμάτων.....	21
1.3.2.2. Αλληλεπιδράσεις μικροοργανισμών-φυτών στη ριζόσφαιρα	22
1.3.2.3. Ρόλος των μικροοργανισμών στη δυναμική της οργανικής ύλης του εδάφους	23

1.3.2.4. Συμβολή των μικροοργανισμών του εδάφους στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου	23
1.3.2.5. Ρόλος των μικροοργανισμών στους βιογεωχημικούς κύκλους	24
1.3.3. Παράγοντες που επηρεάζουν τη σύσταση των μικροβιακών κοινοτήτων..	29
1.3.3.1. Θερμοκρασία.....	29
1.3.3.2. pH.....	30
1.3.3.3. Οξυγόνο.....	30
1.3.3.4. Άλλοι παράγοντες	31
1.3.4. Επιδράσεις μικροπλαστικών στους μικροοργανισμούς του εδάφους.....	31
1.4. Στόχος της εργασίας	33
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	33
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	34
3.1. Περιγραφή των μελετών που επιλέχθηκαν και των αποτελεσμάτων τους.	37
3.2. Συνθετική αποτίμηση της επίδρασης των μικροπλαστικών στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους.....	54
4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	55
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	56
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	58

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. Ενδεικτικές εφαρμογές πλαστικών υλικών στην καθημερινή ζωή.

Εικόνα 2. Εξέλιξη της παραγωγής πλαστικών στην Ευρώπη και παγκοσμίως από το 1950 έως το 2009 [Πηγή: *Plastics Europe – The Facts (2010)*].

Εικόνα 3. Παγκόσμια παραγωγή πλαστικών το 2023 (413.8 Mt) [Πηγή: *Plastics Europe – The Facts (2024)*].

Εικόνα 4. Κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής πλαστικών (συνολικά, ανακυκλωμένων και βιολογικής προέλευσης) ανά γεωγραφική περιοχή για το 2023 [Πηγή: *Plastics Europe – The Facts (2024)*].

Εικόνα 5. Είδη μικροπλαστικών [<https://share.google/qbYXYtMD0BS4rCTzN>].

Εικόνα 6. Κύριες μορφολογίες βακτηρίων: κόκκοι, διπλόκοκκοι, τετράδες, στρεπτόκοκκοι, βάκιλλοι, στρεπτοβάκιλλοι, κοκκοβάκιλλοι, δονάκια (*Vibrio*), σπειρίλλια και σπειροχαίτες [<https://bernalstudio.artstation.com/projects/5mk5g>]

Εικόνα 7. Κατηγοριοποίηση μικροοργανισμών σύμφωνα με την πηγή ενέργειας (φως/χημικές ενώσεις), τον δότη ηλεκτρονίων (οργανικές ή ανόργανες ενώσεις) και την πηγή άνθρακα (οργανικές ενώσεις ή CO₂).

Εικόνα 8. Ο κύκλος του άνθρακα.

Εικόνα 9. Ο κύκλος του αζώτου.

Εικόνα 10. Ο κύκλος του θείου.

Εικόνα 11. Ο κύκλος του φωσφόρου.

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. Θερμοπλαστικά πολυμερή.

Πίνακας 2. Θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή.

Πίνακας 3. Κατάλογος των μελετών που εξετάστηκαν και αξιολογήθηκαν για την παρούσα πτυχιακή εργασία, με αναφορά στους συγγράφεις, τον τίτλο, την ένταξη ή απόρριψη και τη σχετική αιτιολόγηση.

Πίνακας 4. Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των ερευνών.

Συντομογραφίες και ακρωνύμια

ACR = Acrylate Copolymer = Ακρυλικό Συμπολυμερές

ATP = Adenosine Triphosphate = Τριφωσφορική Αδενοσίνη

EVA = Ethylene-vinyl Acetate = Συμπολυμερές αιθυλενίου-οξικού βινυλίου

FDA = Fluorescein Diacetate Hydrolase = Υδρολάση του Διακετυλίου της Φλουορεσκεινης

FKM = Fluoroelastomers = Φθοροελαστομερή

HDPE = High-Density Polyethylene = Πολυαιθυλένιο Υψηλής Πυκνότητας

LDPE = Low-Density Polyethylene = Πολυαιθυλένιο Χαμηλής Πυκνότητας

PA = Polyamide = Πολυαμίδιο

PBAT = Polybutylene Adipate Terephthalate = Πολυβουτυλενο-αδιπικός τερεφθαλικός εστέρας

PBS = Polybutylene Succinate = Πολυ(ηλεκτρικός εστέρας βουτυλενίου)

PC = Polycarbonate = Πολυανθρακικό

PE = Polyethylene = Πολυαιθυλένιο

PES = Polyethersulfone = Πολυαιθεροσουλφόνη

PET = Polyethylene Terephthalate = Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο

PGPR = Plant Growth-Promoting Rhizobacteria = Ριζοβακτήρια που προάγουν την ανάπτυξη των φυτών

PHA = Polyhydroxyalkanoates = Πολυυδροξυαλκανοϊκά

PLA = Polylactic Acid = Πολυγαλακτικό Οξύ

PMMA = Poly(methyl methacrylate) = Πολυμεθακρυλικό Μεθύλιο

PP = Polypropylene = Πολυπροπυλένιο

PPC = Polypropylene Carbonate = Πολυ(ανθρακικό προπυλένιο)

PS = Polystyrene = Πολυστυρένιο

PU = Polyurethane = Πολυουρεθάνη

PVC = Polyvinyl Chloride = Πολυβινυλοχλωρίδιο

SOM = Soil Organic Matter = Οργανική Ύλη Εδάφους

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Πλαστικά και μικροπλαστικά

1.1.1. Γενικά για τα πλαστικά

Τα πλαστικά αποτελούν ευρέως χρησιμοποιούμενα συνθετικά ή ημισυνθετικά υλικά, με κύριο δομικό συστατικό τα πολυμερή. Τα πολυμερή είναι χημικές ενώσεις υψηλού μοριακού βάρους που σχηματίζονται μέσω της χημικής σύνδεσης πολλαπλών μικρότερων μορίων, των μονομερών ([Kameel et al., 2022](#)). Η παραγωγή πλαστικών βασίζεται σε χημικά στοιχεία όπως το άζωτο, το υδρογόνο, το χλώριο, το θείο και ο άνθρακας, τα οποία εξάγονται κυρίως από προϊόντα πετρελαίου, νερό, καθώς και άλλες βιολογικές πρώτες ύλες όπως φυσικό αέριο, ορυκτά ή ακόμα και φυτά ([Campo, 2008](#)). Ανάλογα με τη χημική δομή και τις μεθόδους επεξεργασίας τους, τα πλαστικά μπορούν να εμφανίζουν μια ευρεία ποικιλία φυσικών ιδιοτήτων: μπορεί να είναι διαφανή ή αδιαφανή, σκληρά ή μαλακά, εύκαμπτα ή άκαμπτα ([da Costa, 2017](#)).

Η βασική χημική διεργασία για τον σχηματισμό πολλών πλαστικών είναι ο πολυμερισμός. Ο πολυμερισμός αποτελεί μία χημική διαδικασία κατά την οποία μικρά μονομερή μόρια, όπως το αιθυλένιο, το προπυλένιο και το βουτυλένιο, ενώνονται διαδοχικά μέσω χημικών δεσμών, σχηματίζοντας μακρομοριακές πολυμερικές αλυσίδες υψηλού μοριακού βάρους. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται όταν τα μονομερή συνδέονται μεταξύ τους, οδηγώντας στη δημιουργία πολυμερών με διαφορετικές φυσικές και χημικές ιδιότητες. Για τον πολυμερισμό υπάρχουν 2 διαφορετικοί μηχανισμοί: (1) ο πολυμερισμός προσθήκης και (2) ο πολυμερισμός συμπύκνωσης.

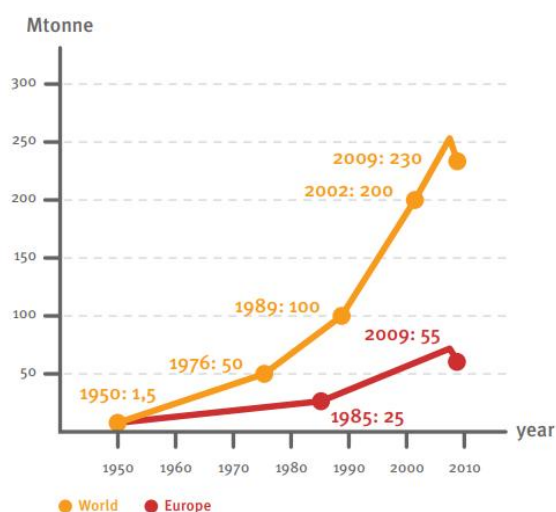
Στον πολυμερισμό προσθήκης, ή αλλιώς αλυσιδωτό πολυμερισμό, μονομερή μόρια προστίθενται διαδοχικά το ένα στο άλλο, σχηματίζοντας γραμμικές ή διακλαδισμένες πολυμερικές αλυσίδες. Η διεργασία αυτή απαιτεί την ενεργοποίηση των μονομερών, συνήθως μέσω ελεύθερων ριζών, ιόντων ή καταλυτών, όπως τα υπεροξείδια και τα μεταλλικά σύμπλοκα.

Στον πολυμερισμό συμπύκνωσης ή πολυμερισμό σταδιακής ανάπτυξης, δύο ή περισσότερα μονομερή με συγκεκριμένες λειτουργικές ομάδες (π.χ. υδροξύλια, καρβοξύλια) συμμετέχουν σε μια αντίδραση συνοδευόμενη από την απομάκρυνση μικρών μορίων, όπως το νερό ή μεθανόλη ([Baheti, 2020](#)). Τυπικά προϊόντα πολυμερισμού συμπύκνωσης είναι οι πολυεστέρες και τα πολυαμίδια ([Elizalde et al., 2013](#)).

Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των φυσικοχημικών ιδιοτήτων τους και του σχετικά χαμηλού κόστους παραγωγής τους, τα πλαστικά έχουν καθιερωθεί ως πολυλειτουργικά υλικά στον σύγχρονο κόσμο, με εφαρμογές σε ενδύματα, συσκευασίες τροφίμων, ηλεκτρονικές συσκευές, κατασκευές, ιατρικά είδη, μεταφορικά μέσα και πολλά άλλα καθημερινά αντικείμενα.

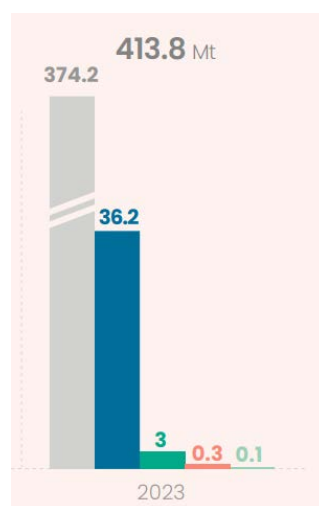


Εικόνα 1. Ενδεικτικές εφαρμογές πλαστικών υλικών στην καθημερινή ζωή.



Εικόνα 2. Εξέλιξη της παραγωγής πλαστικών στην Ευρώπη και παγκοσμίως από το 1950 έως το 2009.

Πηγή: *Plastics Europe – The Facts (2010)*



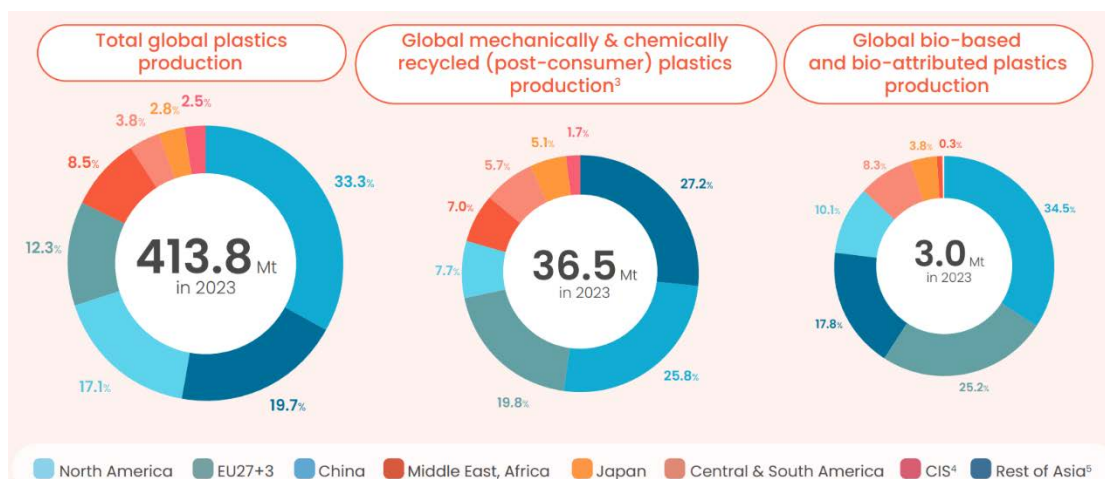
Εικόνα 3. Παγκόσμια παραγωγή πλαστικών το 2023 (413.8 Mt).

Γκρι: πλαστικά ορυκτής προέλευσης – Μπλε: μηχανικά ανακυκλωμένα – Πράσινο: βιολογικής προέλευσης – Πορτοκαλί: χημικά ανακυκλωμένα – Γαλάζιο: με δέσμευση άνθρακα.

Πηγή: *Plastics Europe – The Facts (2024)*

Λόγω των πλεονεκτημάτων τους, όπως το χαμηλό βάρος, η ανθεκτικότητα και η ευρεία δυνατότητα εφαρμογών, σε συνδυασμό με την εκτεταμένη χρήση τους, οδήγησαν σε ραγδαία αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής τους.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Plastics Europe (2010, 2024), η παγκόσμια παραγωγή πλαστικών αυξήθηκε από 1,5 εκατομμύρια τόνους το 1950, σε 230 εκατομμύρια τόνους το 2009 και έφτασε στους 413,8 εκατομμύρια τόνους το 2023, με την Κίνα να παράγει το μεγαλύτερο ποσοστό ανά χώρα.



Εικόνα 4. Κατανομή της παγκόσμιας παραγωγής πλαστικών (συνολικά, ανακυκλωμένων και βιολογικής προέλευσης) ανά γεωγραφική περιοχή για το 2023. Πηγή: *Plastics Europe – The Facts (2024)*.

1.1.2. Είδη πλαστικών

Τα πλαστικά χωρίζονται σε 2 κύριες κατηγορίες ανάλογα με την συμπεριφορά τους στη θερμότητα: στα θερμοπλαστικά πολυμερή και στα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή.

1.1.2.1. Θερμοπλαστικά πολυμερή

Το χαρακτηριστικό των θερμοπλαστικών είναι ότι αποτελούνται από γραμμικές ή ελαφρώς διακλαδισμένες πολυμερικές αλυσίδες. Μπορούν να μαλακώσουν και να λιώσουν σε υψηλές θερμοκρασίες συνήθως μικρότερες των 300 °C, και να σκληραίνουν ξανά όταν ψυχθούν. Έτσι, μπορούν να λιώνουν, να αναδιαμορφώνονται και να ψύχονται επανειλημμένα χωρίς σημαντική χημική αλλοίωση. Λόγο αυτής της ιδιότητας, τα θερμοπλαστικά είναι πλήρως ανακυκλώσιμα, κυρίως μέσω μηχανικής ανακύκλωσης (Larson, 2015).

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1) αναφέρονται ορισμένα θερμοπλαστικά πολυμερή, που έχουν μελετηθεί κυρίως σε σχέση με την εδαφική ρύπανση, μαζί με τις συντομογραφίες τους.

Πίνακας 1. Θερμοπλαστικά πολυμερή.

Πολυαιθυλένιο τερεφθαλικό	PET	Πολυπροπυλένιο	PP	Πολυαμίδιο	PA
Πολυαιθυλένιο	PE	Πολυυδροξυαλκανοϊκά	PHA	Πολυβουτυρικό	PBAT
Πολυστυρένιο	PS	Πολυγαλακτικό οξύ	PLA	Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας	LDPE
Πολυβινυλοχλωρίδιο	PVC	Πολυ(μεθακρυλικό μεθύλιο)	PMMA	Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας	HDPE

1.1.2.2. Θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή

Σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά, τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή είναι συνθετικά υλικά που σκληραίνουν με παρουσία θερμότητας και δεν μπορούν να αναδιαμορφωθούν ή να θερμανθούν ξανά. Λόγω της ιδιότητας αυτής, είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες και δεν μαλακώνουν ή λιώνουν όταν θερμανθούν ([Alarifi, 2022](#)). Συνεπώς, η ανακύκλωσή τους είναι αρκετά περιορισμένη και όχι διαδεδομένη, καθώς απαιτεί εκτενή κατανάλωση ενέργειας ή ακραίες συνθήκες ([Yue et al., 2022](#)).

Πίνακας 2. Θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή.

Πολυουρεθάνη / Polyurethane	Φουρανικές ρητίνες / Furan resins
Βακελίτης / Bakelite	Ρητίνες σιλικόνες / Silicone resins
Ρητίνες μελαμίνης / Melamine resins	Βινυλεστέρας / Vinyl ester
Εποξειδικές ρητίνες / Epoxy resins	Φαινολικές ρητίνες / Phenolic resins
Βενζοξαζίνες / Benzoxazines	Ακρυλικές ρητίνες / Acrylic resins
Πολυϊμίδιο / Polyimide	

1.2. Μικροπλαστικά

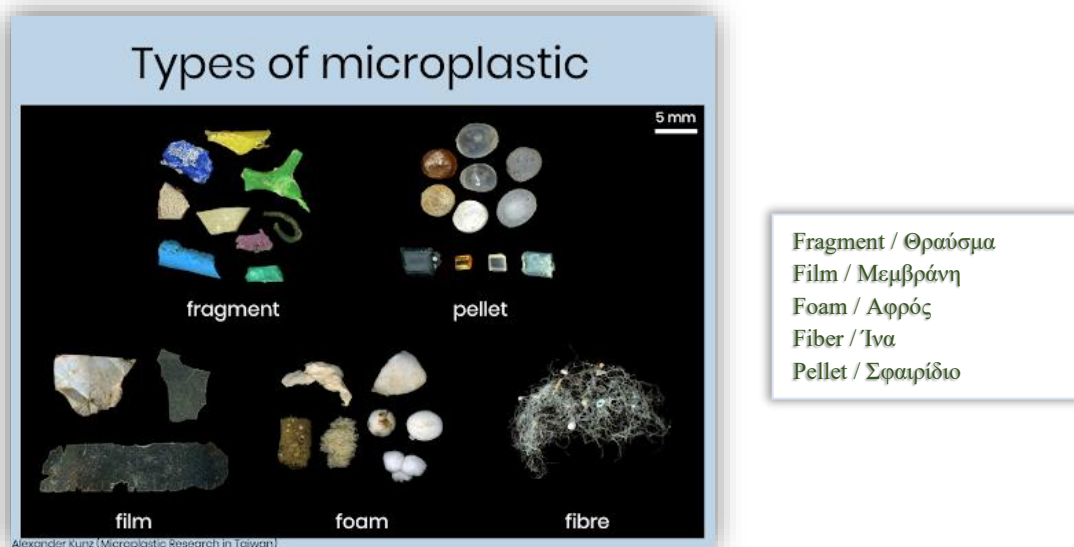
Η αυξημένη παραγωγή και κατανάλωση πλαστικών υλικών οδηγεί αναπόφευκτα σε μεγαλύτερες ποσότητες απορριμμάτων που καταλήγουν στο περιβάλλον. Επιπλέον, σημαντικό ποσοστό πλαστικών καταλήγει στα βιομηχανικά απόβλητα και στη συνέχεια, σε φυσικά οικοσυστήματα. Υπολογίζεται ότι περίπου 19-23 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών εισέρχονται κάθε χρόνο στα υδάτινα οικοσυστήματα παγκοσμίως ([UNEP, 2025](#)).

Ο χρόνος αποσύνθεσης των πλαστικών ποικίλλει σημαντικά, και κυμαίνεται από 20 έως και 500 έτη, ανάλογα με το είδος του πολυμερούς και τις περιβαλλοντικές συνθήκες ([WWF, 2025](#)). Ωστόσο, λόγω της υψηλής ανθεκτικότητάς τους, τα πλαστικά δεν αποδομούνται πλήρως. Η διεργασία της αποδόμησης οδηγεί συνήθως στη δημιουργία μικρότερων τμημάτων πλαστικού, τα οποία ονομάζονται μικροπλαστικά και εν συνεχεία σε ακόμα πιο μικρά τμήματα, τα νανοπλαστικά.

1.2.1. Κατηγορίες και χαρακτηριστικά μικροπλαστικών

Μικροπλαστικά ονομάζονται τα συνθετικά, στερεά πλαστικά σωματίδια, με συμμετρικό ή ακανόνιστο σχήμα και μέγεθος που κυμαίνεται από 1μm έως 5mm. Μπορεί να είναι πρωτογενούς ή δευτερογενούς προέλευσης και χαρακτηρίζονται από το ότι είναι αδιάλυτα στο νερό ([Frias & Nash, 2018](#)).

Τα μικροπλαστικά ταξινομούνται συνήθως σε πέντε βασικές κατηγορίες: θραύσμα, μεμβράνη, αφρός, ίνα, σφαιρίδιο.



Εικόνα 5. Είδη μικροπλαστικών (Kunz 2020: <https://share.google/qbYXYtMD0BS4rCTzN>).

Τα θραύσματα ορίζονται ως σκληρά ακανόνιστα πλαστικά με οδοντωτές άκρες (Zhou et al., 2018). Οι αιχμηρές γωνίες υποδηλώνουν συχνά πρόσφατη δημιουργία αυτών από τη διάσπαση μεγαλύτερων τμημάτων, ενώ οι λείες άκρες δείχνουν ότι το θραύσμα έχει παραμείνει στο περιβάλλον για μεγαλύτερο διάστημα και έχει υποστεί λείανση (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

Η μεμβράνη είναι ένα λεπτό, εύκαμπτο πλαστικό, συνήθως προερχόμενο από πλαστικές σακούλες, συσκευασίες τροφίμων ή μεμβράνες προστασίας. Συχνά είναι μερικώς διαφανές.

Ο αφρός είναι ελαφρύ και πορώδες υλικό, το οποίο μπορεί να προέρχεται από προϊόντα όπως φελιζόλ, μονωτικά υλικά ή αφρώδεις συσκευασίες (Zhou et al., 2018).

Η ίνα αποτελεί το λεπτό, επίμηκες, ινώδες πλαστικό που προέρχεται κυρίως από συνθετικά υφάσματα, σχοινιά και δίχτυα αλιείας. Έρευνες έχουν δείξει ότι η πλειονότητα των μικροπλαστικών που εντοπίζονται σε ποτάμια και σε αμμόδεις παραλίες είναι μικροΐνες (Baldwin et al., 2016). Σε πειράματα με λύματα από οικιακά πλυντήρια ρούχων βρέθηκε πως ένα και μόνο ένδυμα μπορεί να απελευθερώσει πάνω από 1900 μικροΐνες ανά πλύση (Browne et al., 2011).

Τα σφαιρίδια μπορεί να έχουν ωοειδές, σφαιρικό, δισκοειδές, κυλινδρικό ή ραβδοειδές σχήμα. Απαντώνται σε ποικιλία χρωμάτων και συχνά είναι διαφανή, ημιδιαφανή ή άχρωμα (Abu Hilal & Al-Najjar, 2009).

1.2.2. Πρωτογενή και δευτερογενή μικροπλαστικά

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα μικροπλαστικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την προέλευσή τους, στα πρωτογενή και τα δευτερογενή. Τα πρωτογενή μικροπλαστικά κατασκευάζονται εξ αρχής σε μικροσκοπικό μέγεθος και χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα σε συνθετικά υφάσματα, στα ελαστικά αυτοκινήτων καθώς και σε προϊόντα προσωπικής φροντίδας, όπως κρέμες απολέπισης, οδοντόκρεμες και προϊόντα καθαρισμού προσώπου (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2025).

Αντίθετα, τα δευτερογενή μικροπλαστικά προέρχονται από τη διάσπαση και τον κατακερματισμό μεγαλύτερων πλαστικών υλικών. Η αποδόμηση αυτών συμβαίνει λόγω διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η υγρασία, ο άνεμος και η μηχανική φθορά ([IUCN, 2024](#)).

1.2.3. Αποδόμηση πλαστικών σε μικροπλαστικά

Η αποδόμηση των πλαστικών σε μικροπλαστικά μπορεί να συμβεί είτε αβιοτικά είτε μέσω βιολογικών διεργασιών. Στις αβιοτικές διεργασίες περιλαμβάνονται κυρίως η φωτοαποδόμηση και η μηχανική αποδόμηση.

1.2.3.1. Φωτοαποδόμηση

Η φωτοαποδόμηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία η δράση της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί χημική αλλοίωση και διάσπαση των πολυμερών πλαστικών. Αποτελεί μια από τις σημαντικότερες και συχνότερες αιτίες αποδόμησης των πλαστικών στο περιβάλλον. Πολλά συνθετικά πολυμερή είναι ευαίσθητα στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV), κυρίως στα μήκη κύματος της UV-B (290-315nm) και UV-A (315-400nm) μέσης ενέργειας ([Zhang et al., 2021a](#)). Η αποδόμηση εντοπίζεται συχνά σε «ασταθή» τμήματα της πολυμερικής αλυσίδας, όπως σε ομάδες που περιέχουν αιθέρες, όπου η UV ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει στον σχηματισμό εστέρων, αλδεϋδών, μυρμηκικού οξέος και προπυλικών ομάδων. Οι UV ακτινοβολίες μπορούν να προκαλέσουν θραύση των δεσμών άνθρακα-άνθρακα, οδηγώντας σε μείωση του μήκους των πολυμερικών αλυσίδων. Το μήκος κύματος που είναι πιο επιβλαβές διαφέρει ανάλογα με το πλαστικό, καθώς κάθε πολυμερές έχει διαφορετικούς χημικούς δεσμούς και διαφορετικό φάσμα απορρόφησης. Η φωτοαποδόμηση μπορεί να αλλοιώσει τις οπτικές ιδιότητες, να μειώσει το μοριακό βάρος, να αλλάξει την κατανομή μοριακών κλασμάτων και να προκαλέσει απώλεια της μηχανικής αντοχής των πλαστικών ([Singh & Sharma, 2008](#)).

1.2.3.2. Μηχανική αποδόμηση

Η μηχανική αποδόμηση αφορά στη διάσπαση των πλαστικών λόγω της επίδρασης εξωτερικών φυσικών δυνάμεων, όπως η τριβή, η πρόσκρουση σε πέτρες ή άλλες σκληρές επιφάνειες, καθώς και οι πιέσεις που προκαλούνται από κύματα, άνεμο ή ρεύματα. ([Zhang et al., 2021a](#)). Οι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι παγώματος και τήξης μπορούν επίσης να επιταχύνουν τη μηχανική θραύση των πλαστικών σε υδάτινα περιβάλλοντα ([Pal et al., 2018](#)).

Ο βαθμός στον οποίο οι εξωτερικές δυνάμεις επηρεάζουν τα πλαστικά εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Πλαστικά με χαμηλή ικανότητα επιμήκυνσης και μικρότερη αντοχή στη θραύση τείνουν να διασπώνται ευκολότερα υπό μηχανική καταπόνηση. Η συνεχής πίεση ή κάμψη προκαλεί σταδιακή θραύση των πολυμερικών αλυσίδων, οδηγώντας στη δημιουργία μικροπλαστικών ([Zhang, et al., 2021a](#)).

1.2.3.3. Βιοαποδόμηση

Η βιοαποδόμηση είναι η αποδόμηση των πλαστικών από ζωντανούς οργανισμούς, κυρίως μικροοργανισμούς όπως βακτήρια και μύκητες. Μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους: είτε σωματικά με δάγκωμα, μάσηση ή πεπτικό κατακερματισμό, είτε βιολογικά μέσω βιοχημικών διαδικασιών που πραγματοποιούνται από μικροβιακά ένζυμα ([Zhang et al., 2021a](#)).

Η βιοαποδόμηση μπορεί επίσης να οριστεί ως οποιαδήποτε μικροβιακά προκαλούμενη αλλαγή στις επιφανειακές ιδιότητες των πλαστικών, ενζυμική αποδόμηση ή απώλεια της μηχανικής αντοχής των πολυμερών. Η διαδικασία μπορεί να ενισχυθεί από προηγούμενες αβιοτικές διεργασίες, όπως υδρόλυση, φωτοαποδόμηση ή μηχανική αποδόμηση οι οποίες αυξάνουν τη διαθέσιμη επιφάνεια για μικροβιακό αποικισμό ή μειώνουν το μοριακό βάρος του πολυμερούς, καθιστώντας το πιο ευάλωτο σε μικροβιακή διάσπαση. Η ευπάθεια των πλαστικών στη μικροβιακή διάσπαση εξαρτάται από παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα επιφάνειας για προσκόλληση μικροοργανισμών, η διαθεσιμότητα και το είδος των μικροβιακών ενζύμων, η εξειδίκευση των μικροβιακών ενζύμων για συγκεκριμένα είδη πολυμερών και η παρουσία τυχόν συνενζύμων που απαιτούνται για την αντίδραση ([Singh & Sharma, 2008](#)).

1.2.4. Πηγές μικροπλαστικών στο έδαφος

Τα μικροπλαστικά μπορούν να εισέλθουν στο έδαφος μέσω πολλών διαφορετικών οδών. Κύριες πηγές αποτελούν η διάσπαση και κατακερματισμός μεγαλύτερων πλαστικών αντικειμένων, η ατμοσφαιρική και εναέρια εναπόθεση, καθώς και η άρδευση γεωργικών εκτάσεων με νερό που περιέχει μικροπλαστικά. Επιπλέον, μικροπλαστικά εισάγονται στο έδαφος μέσω της εφαρμογής λιπασμάτων και γεωργικών φαρμάκων που φέρουν πλαστική επικάλυψη (π.χ. λιπάσματα βραδείας απελευθέρωσης, κοκκώδη σκευάσματα γεωργικών φαρμάκων με πλαστική επικάλυψη), της εφαρμογής βελτιωτικών εδάφους όπως κομπόστ και βιοστερεά, της χρήσης γεωργικών πλαστικών μεμβρανών εδαφοκάλυψης, αλλά και μέσω της απορροής από δρόμους και άλλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες ([Fan et al., 2023](#)).

1.2.4.1. Βιοστερεά

Τα βιοστερεά αποτελούν το κύριο στερεό τελικό προϊόν της επεξεργασίας αστικών λυμάτων που έχουν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία ώστε να πληρούν συγκεκριμένα πρότυπα σχετικά με ρύπους και παθογόνους μικροοργανισμούς, με στόχο τη διάθεσή τους στο έδαφος. Είναι πλούσια σε θρεπτικά και οργανικό άνθρακα και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως ως εδαφοβελτιωτικά και για την αύξηση της γεωργικής παραγωγής ([Hettiarachchi et al., 2023](#)).

Οι μονάδες επεξεργασίας αστικών λυμάτων μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά έως και 90% ή περισσότερο από τα μικροπλαστικά που περιέχονται στα λύματα ([Talvitie et al., 2017](#)). Ωστόσο, τα μικροπλαστικά που απομακρύνονται, συσσωρεύονται στη στερεή λυματολάσπη που παράγεται, η οποία αποτελεί τη βάση για την παραγωγή βιοστερεών. Σε έρευνα που διεξήγαγαν οι [Mahon et. al. \(2016\)](#), βρέθηκε πως τα

μικροπλαστικά που απομακρύνθηκαν από 7 μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων κυμαίνονταν κατά μέσο όρο από 4.196 έως 15.358 σωματίδια ανά κιλό βιοστερεών. Σε αντίστοιχη έρευνα σχετικά με την παραγωγή και την τελική χρήση βιοστερεών στην Αυστραλία κατά την περίοδο 2022 - 2023, η παραγωγή βιοστερεών ανήλθε σε 372.000 τόνους, παρουσιάζοντας αύξηση κατά 6% σε σύγκριση με έρευνα του 2021. Από την παραγόμενη ποσότητα το 79,3% εφαρμόστηκε σε γεωργικές εκτάσεις ([Lipscombe, 2024](#)). Στις ΗΠΑ, το 2023 διαχειρίστηκαν περίπου 4 εκατομμύρια ξηρούς μετρικούς τόνους βιοστερεών, εκ των οποίων το 31% χρησιμοποιήθηκε στη γεωργία. Το 2024 παρήχθη αντίστοιχη ποσότητα βιοστερεών, με το ποσοστό χρήσης στη γεωργία να αυξάνεται στο 53% ([U.S. EPA, 2025](#)). Στην Κίνα, η παραγωγή βιοστερεών ξεπέρασε τους 11 εκατομμύρια τόνους το 2019, από τους οποίους, 3.12 εκατομμύρια τόνοι χρησιμοποιήθηκαν ως βελτιωτικό εδάφους ([Li et al., 2022a](#)). Τα μικροπλαστικά που έχουν εντοπιστεί στα βιοστερεά περιλαμβάνουν πολυμερή όπως PP, PS, PE, Nylon, PET, PVC, PMMA, PC, PA, κ.ά. ([Ziajahromi et al., 2024](#)).

1.2.4.2. Πλαστική εδαφοκάλυψη

Η πλαστική εδαφοκάλυψη αποτελεί σημαντική γεωργική πρακτική σε πολλές χώρες, καθώς συμβάλλει στην αύξηση της παραγωγικότητας μέσω βελτιωμένης αξιοποίησης θρεπτικών στοιχείων και νερού, στην αποτελεσματικότερη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων, στην παροχή θερμομόνωσης και στον περιορισμό της διάβρωσης του εδάφους, μειώνοντας έτσι και την εμφάνιση ασθενειών στις καλλιέργειες ([Qi et.al., 2019](#)). Το συνηθέστερο πολυμερές που χρησιμοποιείται για την παραγωγή πλαστικών μεμβρανών εδαφοκάλυψης είναι το πολυαιθυλένιο (PE), το οποίο περιλαμβάνει τόσο PE υψηλής πυκνότητας (HDPE) όσο και PE χαμηλής πυκνότητας (LDPE) ([Bläsing & Amelung, 2017](#)).

Παρόλο που η χρήση πλαστικής εδαφοκάλυψης προσφέρει σημαντικά οφέλη στην καλλιέργεια, η απομάκρυνσή της μετά το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου είναι συχνά δύσκολη. Ως αποτέλεσμα, παραμένουν στο έδαφος πολλά θραύσματα πλαστικού, τα οποία στη συνέχεια υφίστανται αβιοτικές και βιοτικές διεργασίες αποδόμησης και τελικά μετατρέπονται σε μικροπλαστικά. Μικροπλαστικά μπορούν επίσης να δημιουργηθούν κατά τη διάρκεια γεωργικών εργασιών, όπως το όργωμα, το οποίο θρυμματίζει τις μεμβράνες ([Okoffo et al., 2021](#)). Σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε γεωργικές εκτάσεις της Κίνας με μακροχρόνια χρήση πλαστικής εδαφοκάλυψης, εντοπίστηκαν μέχρι και $102,9 \pm 69,4$ κομμάτια μικροπλαστικών ανά κιλό εδάφους σε χωράφια όπου η πρακτική εφαρμοζόταν συνεχώς για 5 χρόνια, και $1075 \pm 346,8$ κομμάτια μικροπλαστικών ανά κιλό εδάφους για 24 χρόνια ([Huang et al., 2020](#)).

1.2.4.3. Άλλες πηγές

Μικρά και λεπτά σωματίδια που παράγονται από τη φθορά ελαστικών οχημάτων μπορούν, μέσω έκπλυσης από τη βροχή ή ως αιωρούμενη σκόνη, να μεταφερθούν στα παρακείμενα εδάφη. Τα σωματίδια φθοράς ελαστικών θεωρούνται μικροπλαστικά, καθώς τα ελαστικά περιέχουν συνήθως 40-60% συνθετικά πολυμερή ([Hartmann et al., 2019](#)). Σε

έρευνα των [Järlskog et al. \(2022\)](#) που διεξάχθηκε στη Σουηδία, η συνολική μάζα σωματιδίων που συλλέχθηκε στη σκόνη δρόμου δίπλα στο κράσπεδο κυμαινόταν μεταξύ 400 και 1240 g/m², με αντίστοιχα επίπεδα να έχουν καταγραφεί σε περιοχές της Κορέας, του Μεξικού και της Νορβηγίας. Στην Ολλανδία εκτιμήθηκε ότι κατά το έτος 2012, παρήχθησαν συνολικά 17.300 τόνοι σωματιδίων από τη φθορά ελαστικών, από τα οποία το 36% κατέληξε στο έδαφος ([Verschoor et al., 2016](#)). Επιπλέον, μικροπλαστικά μπορούν να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα και να εναποτεθούν στα εδάφη μέσω κατακρημνίσεων ή μέσω μεταφοράς από ανέμους ([Zhang et al., 2020](#)).

1.2.5. Συμπεριφορά μικροπλαστικών στο εδαφικό περιβάλλον

1.2.5.1. Μετακίνηση και κατανομή των μικροπλαστικών στο έδαφος

Έχει παρατηρηθεί ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να εισέλθουν και να μετακινηθούν μέσα στο έδαφος, παρουσιάζοντας κάθετη αλλά και οριζόντια κινητικότητα. Η μετακίνησή τους επηρεάζεται από μία σειρά εδαφικών παραγόντων, όπως οι μακροπόροι και μικροπόροι, τα εδαφικά συσσωματώματα, οι ρωγμές του εδάφους, καθώς και οι διεργασίες που σχετίζονται με τα φυτά, όπως η ανάπτυξη των ριζών και η απομάκρυνσή τους μετά τη συγκομιδή. Επιπλέον, οι αγροτικές καλλιεργητικές πρακτικές, ο εδαφικός βióκοσμος (αναμόχλευση από θηλαστικά του εδάφους και δραστηριότητα ασπόνδυλων), καθώς και η πολυπλοκότητα του τροφικού πλέγματος, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που συμβάλλουν στη μετακίνηση και ανακατανομή των μικροπλαστικών στο έδαφος ([Surendran et al., 2023](#); [Guo et al., 2020](#)).

Αγροτικές εργασίες

Το όργωμα, η άρδευση, η εφαρμογή χημικών και οργανικών λιπασμάτων, καθώς και άλλες γεωργικές πρακτικές και εργασίες προετοιμασίας των εδαφών, συμβάλλουν στη μετακίνηση και ανακατανομή των μικροπλαστικών στο έδαφος. Όπως αναφέρθηκε, ορισμένα λιπάσματα μπορεί να περιέχουν μικροπλαστικά, τα οποία εισάγονται απευθείας στο έδαφος κατά τη χρήση τους. Επιπλέον, οι πλαστικές μεμβράνες εδαφοκάλυψης, που χρησιμοποιούνται ευρέως στη γεωργία, υφίστανται θρυμματισμό και κατακερματισμό μέσω γεωργικών εργασιών, οδηγώντας έτσι στη δημιουργία επιπλέον μικροπλαστικών. Σε μια πρόσφατη έρευνα αναφέρθηκε ότι μέσα σε 11 ημέρες άρδευσης, τα μικροπλαστικά μετακινήθηκαν σε βάθη μεγαλύτερα των 7 εκατοστών ([Hong et al., 2024](#)). Σε προηγούμενη έρευνα, μικροπλαστικά διείσδυσαν σε βάθη 4-7 εκατοστών μετά από 21 ημέρες παροχής νερού υπό μορφή τεχνητής βροχής, ενώ καταγράφηκε και οριζόντια μετακίνηση έως 24 εκατοστά ([Zhang et al., 2022](#)).

Εδαφικοί πόροι

Οι εδαφικοί πόροι λειτουργούν ως δίοδοι που διευκολύνουν τη μετανάστευση των μικροπλαστικών προς βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Συχνά, το μέγεθος των σωματιδίων μικροπλαστικών είναι μικρότερο από τη διάμετρο των πόρων, επιτρέποντας τη μετακίνησή τους από τα επιφανειακά προς τα κατώτερα στρώματα του εδαφικού

προφίλ υπό την επίδραση της βαρύτητας ([Zhao et al., 2022](#)). Η κινητικότητα τους επηρεάζεται επίσης από τις επιφανειακές ιδιότητες και το είδος των μικροπλαστικών. Για παράδειγμα, διαφορετικές μορφές, όπως οι μικροΐνες και τα μικροσφαιρίδια, παρουσιάζουν διαφορετικές αλληλεπιδράσεις με τα εδαφικά σωματίδια και τα συσσωματώματα, επηρεάζοντας έτσι τη μεταφορά τους μέσα στο εδαφικό προφίλ ([de Souza-Machado et al., 2018](#)).

Χλωρίδα

Η ανάπτυξη και η κίνηση των φυτικών ριζών, καθώς και η απορρόφηση νερού, αποτελούν σημαντικούς μηχανισμούς που επηρεάζουν τη μετακίνηση των μικροπλαστικών στο έδαφος. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι ρίζες μπορούν είτε να μετακινούν μικροπλαστικά προς τα ανώτερα στρώματα του εδάφους, είτε να τα συγκρατούν στο επίπεδο όπου αναπτύσσονται. Αυτό συμβαίνει επειδή η ριζική ανάπτυξη δημιουργεί νέα κενά και μικροπόρους στο έδαφος, διευκολύνοντας την κίνηση του νερού. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αναστέλλει τη διείσδυση των μικροπλαστικών σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα, αλλά ταυτόχρονα να οδηγεί στη συσσώρευσή τους στα επιφανειακά στρώματα. Επιπλέον, λόγω της υδροφοβικής φύσης των μικροπλαστικών και της χαμηλότερης πυκνότητάς τους σε σχέση με τα εδαφικά συστατικά, η παρουσία νερού σε κορεσμένα εδάφη μπορεί να ευνοήσει την ανοδική κίνησή τους ([Zhao et al., 2022](#)).

Πανίδα

Τα ασπόνδυλα του εδάφους, όπως οι γαιοσκώληκες και τα ακάρεα, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες στη μετακίνηση και ανακατανομή των μικροπλαστικών στο έδαφος. Έχει αποδειχθεί ότι οι γαιοσκώληκες ενισχύουν τη μετακίνησή τους, καθώς μπορούν να καταναλώσουν τα μικροπλαστικά που υπάρχουν στο έδαφος μαζί με αυτό, σύμφωνα με τη συνήθη διατροφική τους συμπεριφορά, και στη συνέχεια να τα αποβάλουν σε άλλα τμήματα του εδαφικού προφίλ μέσω των περιττωμάτων τους. Μικροπλαστικά από PE έχουν εντοπιστεί σε στοές γαιοσκωλήκων, γεγονός που δείχνει ότι μπορούν να μετακινηθούν καθέτως υπό την επίδραση της δραστηριότητάς τους ([Lwanga et al., 2016](#)). Μικροαρθρόποδα που καταναλώνουν τα περιττώματα των γαιοσκωλήκων, στα οποία τα μικροπλαστικά εμφανίζονται σε πιο συμπυκνωμένη μορφή, μπορούν επίσης να συμβάλλουν στην περαιτέρω μετακίνησή τους, καθώς και στη διασπορά ή επιπλέον θρυμματοποίησή τους. Ορισμένα είδη κολλέμβολων και ακάρεων διασκορπίζουν και αναδιανέμουν μικροπλαστικά μέσω μάσησης ή γδαρσίματος, ενώ η προσκόλληση μικροπλαστικών στο σώμα τους μπορεί να οδηγήσει σε παθητική μεταφορά ([Maaß et al., 2017](#)). Τα θηλαστικά του εδάφους (τυφλοπόντικας, γεώμυς) συνεισφέρουν στη μετακίνηση των μικροπλαστικών με παρόμοιο μηχανισμό. Επιπλέον, οι αλληλεπιδράσεις αρπακτικού-θηράματος μεταξύ μικροαρθρόποδων ενισχύουν τη μετακίνησή τους, καθώς η αυξημένη κινητικότητα των οργανισμών κατά τη διάρκεια θήρευσης επιταχύνει τη διασπορά των μικροπλαστικών ([Zhu et al., 2018](#)). Σε πρόσφατη μελέτη παρατηρήθηκε ότι τα μυρμήγκια μπορούν επίσης να συμβάλλουν στη μετακίνηση των μικροπλαστικών. Φαίνεται ότι τα συλλέγουν πιθανώς για την κατασκευή ή ενίσχυση των φωλιών τους, με τη μεγαλύτερη ποσότητα μικροπλαστικών να εντοπίζεται τελικά εκτός των φωλιών.

Βρέθηκε ακόμη ότι, σε σύγκριση με άλλες ομάδες της εδαφικής πανίδας, τα μυρμήγκια μετέφεραν τα μικροπλαστικά σε μεγαλύτερες αποστάσεις ([Liu et al., 2023](#)).

1.2.5.2. Προσροφητική ικανότητα

Τα μικροπλαστικά είναι υδροφοβικά υλικά και μπορούν να προσροφήσουν βαρεά μέταλλα, αντιβιοτικά, παρασιτοκτόνα/εντομοκτόνα, και άλλους οργανικούς ρύπους. Η προσρόφηση αυτή επιτυγχάνεται μέσω π-π αλληλεπιδράσεων, δεσμών υδρογόνου, ηλεκτροστατικών δυνάμεων και δυνάμεων van der Waals ([Chang et al., 2022](#)). Η ικανότητα προσρόφησης των οργανικών ρύπων στην επιφάνεια των μικροπλαστικών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το pH, η επιφανειακή χημεία, η τραχύτητα, το πάχος και το είδος του πολυμερούς ([Ramos et al., 2015](#); [Ya et al., 2021](#)). Έχει βρεθεί ότι τα μικροπλαστικά PE μπορούν να προσροφούν αντιβιοτικά και εντομοκτόνα σε μεγαλύτερο βαθμό από τα εδαφικά σωματίδια ([Ya et al., 2021](#)). Αντίστοιχα, τα μικροπλαστικά PP επηρεάζουν σημαντικά τη μετακίνηση και τη διατήρηση του αντιβιοτικού Ciprofloxacin σε πορώδη μέσα, καθώς εμφανίζουν μεγαλύτερη προσροφητικότητα από τη χαλαζιακή άμμο ([Chen et al., 2023](#)).

Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι τα μικροπλαστικά PA παρουσιάζουν υψηλότερη προσροφητική ικανότητα για το Cr(VI) σε σύγκριση με άλλα είδη μικροπλαστικών ([Yang et al., 2019](#); [Li et al., 2022b](#)), ενώ τα μικροπλαστικά PVA φαίνεται να προσροφούν περισσότερο Pb και Cd σε σχέση με άλλα πολυμερή ([Zhu et al., 2023](#)).

Σε μία μελέτη με κομμάτια σακούλας HDPE, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη προσροφητικότητα σε δασικά εδάφη σε σύγκριση με καλλιεργήσιμα εδάφη, πιθανώς λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας οργανικής ύλης στα δασικά εδάφη ([Hodson et al., 2017](#)). Επιπλέον, έρευνα των [Ramos et al., 2015](#) έδειξε ότι το εντομοκτόνο Endosulfan μπορεί να απομακρυνθεί γρήγορα μέσα από μεμβράνες LDPE, χωρίς να απαιτείται παρουσία οργανικού διαλύτη. Μετά την εναπόθεσή του σε πλαστική μεμβράνη, το εντομοκτόνο μπορεί να μετακινηθεί τόσο προς το έδαφος όσο και προς την ατμόσφαιρα. Ένα σημαντικό εύρημα είναι ότι σε σύγκριση με τις παρθένες (μη-γηρασμένες) γεωργικές πλαστικές μεμβράνες, οι μεμβράνες που έχουν υποστεί περιβαλλοντική γήρανση με το χρόνο παρουσιάζουν τραχύτερη επιφάνεια, μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια και περισσότερες λειτουργικές ομάδες οξυγόνου, χαρακτηριστικά που ενισχύουν την προσρόφηση οργανικών ρύπων. Συνεπώς, τα περιβαλλοντικά γηρασμένα μικροπλαστικά εμφανίζουν μεγαλύτερη προσροφητική ικανότητα από τα μη-γηρασμένα ([Chang et al., 2022](#); [Ya et al., 2021](#)).

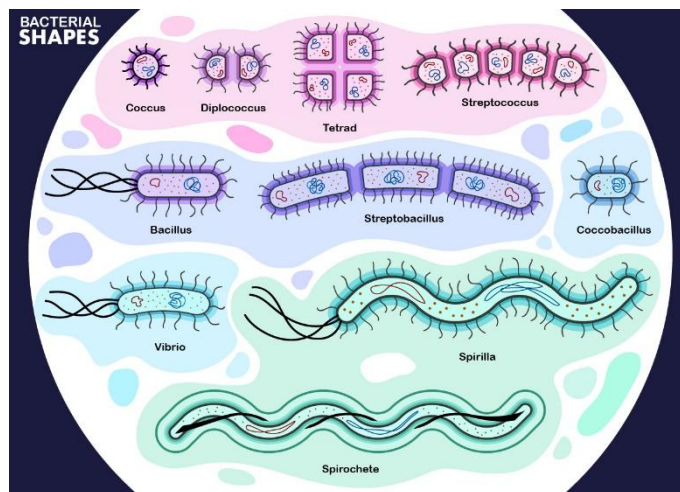
1.3. Μικροβιακές κοινότητες του εδάφους

1.3.1. Μικροοργανισμοί και μικροβιακές κοινότητες

Μία μικροβιακή κοινότητα αποτελείται από πληθυσμούς διαφορετικών ειδών μικροοργανισμών που συνυπάρχουν και αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους (Yim & Wang, 2021).

Οι μικροοργανισμοί είναι οργανισμοί με πολύ μικρό μέγεθος, οι οποίοι δεν μπορούν να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι. Διακρίνονται σε προκαρυωτικούς και ευκαριωτικούς οργανισμούς. Στους προκαρυωτικούς περιλαμβάνονται τα βακτήρια και τα αρχαία, ενώ στους ευκαριωτικούς τα πρωτίστα και οι μύκητες. Τα πρωτίστα περιλαμβάνουν τα άλγη και τα πρωτόζωα (Killham & Prosser, 2015).

Τα βακτήρια παρουσιάζουν ποικιλία μορφών, με συνηθέστερα μορφολογικά σχήματα τους κόκκους, τα ραβδία και τα σπειράματα.



Εικόνα 6. Κύριες μορφολογίες βακτηρίων: κόκκοι, διπλόκοκκοι, τετράδες, στρεπτόκοκκοι, βάκιλλοι, στρεπτοβάκιλλοι, κοκκοβάκιλλοι, δονάκια (Vibrio), σπειρίλλια και σπειροχαίτες. <https://bernalstudio.artstation.com/projects/5mk5g>.

Όλοι οι μικροοργανισμοί χρειάζονται άνθρακα για την ανάπτυξη και τον μεταβολισμό τους. Περίπου το 50% του ξηρού βάρους ενός βακτηριακού κυττάρου αποτελείται από άνθρακα. Ανάλογα με τον άνθρακα που χρησιμοποιούν, ταξινομούνται σε ετερότροφους και αυτότροφους. Οι αυτότροφοι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν ως πηγή άνθρακα το CO₂ για τη σύνθεση των κυτταρικών τους δομών. Οι ετερότροφοι προσλαμβάνουν οργανικό άνθρακα από μόρια όπως αμινοξέα, λιπαρά οξέα, σάκχαρα, αζωτούχες βάσεις, οργανικά οξέα, αρωματικές ενώσεις κ.ά. (Madigan et al., 2014). Η οξείδωση αυτών των ενώσεων οδηγεί στη σύνθεση τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP), που αποτελεί την κύρια μορφή χημικής ενέργειας για τους μικροοργανισμούς (Jurtshuk, 1996).

Οι μικροοργανισμοί μπορούν επίσης να ταξινομηθούν με βάση την πηγή ενέργειάς τους καθώς και τον δότη ηλεκτρονίων. Συγκεκριμένα, οι μικροοργανισμοί αυτοί που χρησιμοποιούν το φως ως πηγή ενέργειας ονομάζονται φωτότροφοι, ενώ αυτοί που αντλούν ενέργεια από την οξείδωση χημικών ενώσεων ονομάζονται χημειότροφοι.

Επιπλέον, οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούν οργανικές ενώσεις ως δότες ηλεκτρονίων λέγονται χημειοοργανότροφοι, ενώ εκείνοι που χρησιμοποιούν ως δότες ηλεκτρονίων ανόργανες ενώσεις, όπως H_2 , H_2S , Fe^{+2} , NH_4^+ , ονομάζονται χημειολιθότροφοι. Οι χημειοοργανότροφοι οργανισμοί είναι εξ' ορισμού ετερότροφοι, ενώ οι περισσότεροι χημειολιθότροφοι και φωτότροφοι οργανισμοί είναι αυτότροφοι ([Madigan et al., 2014](#)).

Συνοπτικά, η ταξινόμηση των μικροοργανισμών βασίζεται στη σειρά: Πηγή ενέργειας → Δότης ηλεκτρονίου → Πηγή άνθρακα



Εικόνα 7. Κατηγοριοποίηση μικροοργανισμών σύμφωνα με την πηγή ενέργειας (φως ή χημικές ενώσεις), τον δότη ηλεκτρονίων (οργανικές ή ανόργανες ενώσεις) και την πηγή άνθρακα (οργανικές ενώσεις ή CO_2).

1.3.2. Ρόλος των μικροοργανισμών στην οικολογία του εδάφους

1.3.2.1. Ρόλος των μικροοργανισμών στον σχηματισμό και τη σταθερότητα των εδαφικών συσσωματωμάτων

Τα εδαφικά συσσωματώματα θεωρείται πως σχηματίζονται και αποτελούνται από συστάδες ορυκτών σωματιδίων και οργανικού άνθρακα. Λόγω του ότι οι δυνάμεις συγκρότησης των σωματιδίων μέσα σε συσσωματώματα είναι πιο ισχυρές από τις δυνάμεις μεταξύ γειτονικών συσσωματωμάτων, οι δομές τους μπορούν να επιμένουν σε περιστατικά ύγρυνσης και μηχανικών διαταραχών του εδάφους ([Bucka et al., 2019](#)). Τα συσσωματώματα συμβάλλουν στην προστασία της οργανικής ύλης και μπορούν να επηρεάσουν τη δομή των μικροβιακών κοινοτήτων, να ρυθμίσουν τη ροή του νερού, να καθορίσουν την προσρόφηση και την εκρόφηση, να μειώσουν τη διάχυση οξυγόνου, καθώς και την απορροή και διάβρωση του εδάφους. Η εδαφική πανίδα, οι ρίζες, οι μικροοργανισμοί, οι μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και οι ανόργανοι παράγοντες δέσμευσης μπορούν να ασκήσουν επιρροή στα συσσωματώματα.

Ο σχηματισμός και η σταθεροποίηση των συσσωματωμάτων έχουν πολύ σημαντική συσχέτιση με τους σαπροφυτικούς και τους μυκορριζικούς μύκητες, ενώ ταυτόχρονα επηρεάζονται και αρκετά από διάφορα βακτήρια στη μικροκλίμακα ([Six et al., 2004](#)). Τα

περισσότερα βακτήρια συσχετίζονται με τα μακροσυσσωματώματα και ένα μεγάλο ποσοστό βακτηρίων ζει μέσα στα μικροσυσσωματώματα ([Wilpiseski et al., 2019](#)). Στα μικροσυσσωματώματα βρίσκονται επίσης πρώτιστα και μύκητες.

Γενικώς, έχουν εντοπιστεί δύο σημαντικοί τρόποι με τους οποίους οι μικροοργανισμοί μπορούν να σταθεροποιήσουν τα συσσωματώματα. Κάποιοι μικροοργανισμοί μπορούν μηχανικά να συγκρατήσουν τα εδαφικά σωματίδια, και κάποιοι παράγουν δεσμευτικούς παράγοντες με σύνθεση ή αποσύνθεση οργανικών υλικών ([Lynch & Bragg, 1985](#)). Τα μακροσυσσωματώματα σχηματίζονται χάρη στις συγκολλητικές ουσίες που παράγονται από μύκητες και άλλους μικροοργανισμούς μέσω της αξιοποίησης εύκολα διαθέσιμων πηγών άνθρακα, γύρω από χονδρόκοκκη ενδο-συσσωματωμένη σωματιδιακή οργανική ύλη (POM). Οι συγκολλητικές αυτές ουσίες που εκκρίνονται από μύκητες και βακτήρια συμβάλλουν σημαντικά στον σχηματισμό και την σταθεροποίηση των μικροσυσσωμάτων ([Six et al., 2004](#)). Σύμφωνα με τους [Aspiras et al. \(1971\)](#), η συνεχής αποδόμηση και σύνθεση οργανικών υλικών από τον μικροβιακό πληθυσμό διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη δυναμική κατάσταση και σταθερότητα των εδαφικών συσσωματωμάτων. Σε ορισμένα εδάφη, η σταθερότητα των μακροσυσσωματωμάτων σχετίζεται με το μήκος των υφών που παράγονται από πολλούς δενδρόμορφους μυκορριζικούς μύκητες. Οι υφές αυτές σχηματίζουν εκτεταμένα δίκτυα και παράγουν πολυσακχαρίτες στους οποίους προσκολλώνται τα μικροσυσσωματώματα δεσμευόμενα σε σταθερά μακροσυσσωματώματα μέσω των δικτύων των υφών ([Tisdall, 1994](#)).

1.3.2.2. Αλληλεπιδράσεις μικροοργανισμών-φυτών στη ριζόσφαιρα

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία εδαφικών βακτηρίων που αποικίζουν τη ριζόσφαιρα των φυτών και συμβάλλουν στην ενίσχυση της ανάπτυξής τους. Αυτά ονομάζονται ριζοβακτήρια που προάγουν την ανάπτυξη φυτών (Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR) ([Kloepper & Schroth, 1978](#)). Τα βακτήρια αυτά μπορούν να αυξήσουν την πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά, αλλά και να καταστείλουν τη δράση φυτοπαθογόνων μικροοργανισμών. Ενδεικτικά γένη PGPR περιλαμβάνουν τα *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Klebsiella*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Enterobacter* και *Serratia* ([Frankenberger & Arshad, 1995](#)). Οι μικροβιακές κοινότητες απαντώνται σε διάφορα μέρη του φυτού, ανάλογα με το όργανό του, όπως η φυλλόσφαιρα, η ριζόσφαιρα και η ενδόσφαιρα, με τη ριζόσφαιρα να είναι η πιο μελετημένη περιοχή ([Berg et al., 2016](#)). Έχει παρατηρηθεί ότι ο εμβολιασμός φυτών με PGPR μπορεί να αυξήσει τη βλάστηση, την εμφάνιση σποροφύτων, καθώς και να προάγει την ανάπτυξη και την απόδοση ποικίλων καλλιεργειών ([Frankenberger & Arshad, 1995](#)). Ορισμένα PGPR παράγουν φυτοορμόνες όπως κυτοκινίνες, αυξίνες και γιββερελλίνες, οι οποίες ρυθμίζουν τα ενδογενή ορμονικά επίπεδα των φυτών και επηρεάζουν άμεσα την ανάπτυξή τους. Επιπλέον, ορισμένα είδη εκκρίνουν το ένζυμο 1-αμινοκυκλοπροπάνιο-1-καρβοξυλικό- (1-aminocyclopropane-1-carboxylate) (ACC) απαμινάση, το οποίο μειώνει τα επίπεδα του αιθυλενίου- ορμόνης στρες στα φυτά ([Compant et al., 2019](#)). Ένας ακόμη σημαντικός ρόλος των PGPR, πέρα από την προαγωγή της φυτικής ανάπτυξης, είναι ο έλεγχος φυτοπαθογόνων, γνωστή ως βιοέλεγχος. Τα βακτήρια αυτά μπορούν να παράγουν πτητικές οργανικές ενώσεις,

αντιβιοτικά, ένζυμα και σιδηροφορείς, δηλαδή χηλικούς παράγοντες που δεσμεύουν αδιάλυτα ιόντα σιδήρου. Παράλληλα, μπορούν να αναστέλλουν την ανάπτυξη παθογόνων μέσω ανταγωνισμού για θρεπτικά στοιχεία και μικροπεριβάλλοντα, παρασιτισμού, καθώς και μέσω της επαγόμενης ανθεκτικότητας που προσφέρουν στο αμυντικό σύστημα των φυτών ([Santos & Olivares, 2021](#)). Γένη όπως τα *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Alcaligenes*, *Trichoderma*, *Enterobacter*, *Pantoea*, *Burkholderia*, *Paraburkholderia*, κ.ά., έχουν αναφερθεί ότι καταστέλλουν αποτελεσματικά φυτοπαθογόνους οργανισμούς ([Expósito et al., 2017](#)).

1.3.2.3. Ρόλος των μικροοργανισμών στη δυναμική της οργανικής ύλης του εδάφους

Η οργανική ύλη του εδάφους (soil organic matter, SOM) αποτελεί ένα σύνθετο και ιδιαίτερα σημαντικό συστατικό των εδαφών και περιλαμβάνει υπολείμματα φυτών και μικροοργανισμών, υλικά της ριζόσφαιρας σε διαφορετικά στάδια αποσύνθεσης, καθώς και νεκρούς εδαφικούς οργανισμούς ([Celestina et al., 2018](#); [Mohammadi et al., 2011](#)). Η SOM επηρεάζει ένα ευρύ φάσμα φυσικών, βιολογικών και χημικών ιδιοτήτων του εδάφους, όπως οι κύκλοι των θρεπτικών στοιχείων, η καταστολή φυτοπαθογόνων, η ρύθμιση του pH, η δημιουργία και σταθεροποίηση των εδαφικών συσσωματωμάτων, καθώς και η συγκράτηση νερού. Οι λειτουργίες αυτές είναι θεμελιώδεις για τη διατήρηση και βελτίωση της ποιότητας του εδάφους ([Celestina et al., 2018](#); [Bullock, 2005](#)). Το έδαφος αποτελεί μία από τις κύριες δεξαμενές ανακύκλωσης άνθρακα, με τη SOM να συνιστά τη μεγαλύτερη χερσαία δεξαμενή άνθρακα ([Janzen, 2004](#)). Οι μικροοργανισμοί αποτελούν βασικούς ρυθμιστικούς παράγοντες συσσώρευσης της οργανικής ύλης, καθώς ελέγχουν την ισορροπία μεταξύ των διεργασιών σχηματισμού της και της ανοργανοποίησής της προς CO₂ ([Liang et al., 2019](#)). Τα μικρόβια αποσυνθέτουν την οργανική ύλη και ενσωματώνουν τον άνθρακα στη βιομάζα τους. Μετά το θάνατό τους, ο άνθρακας αυτός απελευθερώνεται ως μικροβιακή νεκρομάζα, η οποία αποτελείται από νεκρά κύτταρα και θραύσματα κυτταρικών τοιχωμάτων. Ο άνθρακας της μικροβιακής νεκρομάζας συνιστά ιδιαίτερα σημαντικό τμήμα της οργανικής ύλης του εδάφους, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη μακροπρόθεσμη ανακύκλωση και σταθεροποίηση του άνθρακα στο έδαφος ([Khan et al., 2025](#)).

1.3.2.4. Συμβολή των μικροοργανισμών του εδάφους στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου

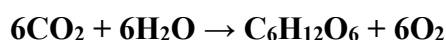
Τα αέρια του θερμοκηπίου είναι αέρια συστατικά της ατμόσφαιρας που παγιδεύουν τη θερμότητα και όταν βρίσκονται σε αυξημένες συγκεντρώσεις συμβάλλουν στην ενίσχυση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Στα κυριότερα αέρια του θερμοκηπίου συγκαταλέγονται το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O), το όζον (O₃), οι υδρατμοί, καθώς και οι αλογονάνθρακες, κυρίως εκείνοι που περιέχουν φθόριο. Από τα παραπάνω αέρια, τα CO₂, CH₄ και N₂O έχουν το έδαφος ως μια από τις κύριες πηγές εκπομπής τους και παράγονται μέσω των βιογεωχημικών κύκλων. Καθοριστικό ρόλο στους κύκλους αυτούς διαδραματίζουν οι μικροβιακές

κοινότητες του εδάφους. Ειδικότερα, μέσω διεργασιών όπως η ανοργανοποίηση, η νιτροποίηση και η μεθανογένεση οι οποίες πραγματοποιούνται από διαφορετικές ομάδες μικροοργανισμών, παράγονται αντίστοιχα CO₂, N₂O και CH₄. Αναλυτικότερη περιγραφή των βιογεωχημικών κύκλων και του ρόλου των μικροοργανισμών σε αυτούς παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες.

1.3.2.5. Ρόλος των μικροοργανισμών στους βιογεωχημικούς κύκλους

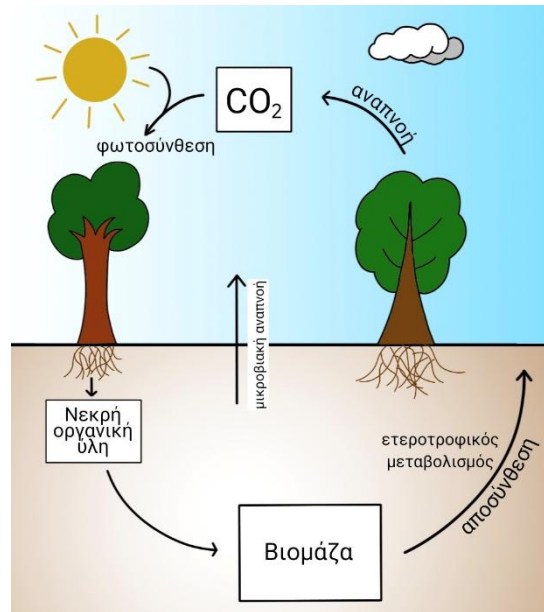
Κύκλος του άνθρακα

Ο κύκλος του άνθρακα ξεκινά με τη δέσμευση του ατμοσφαιρικού CO₂ από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης, κατά την οποία το CO₂ μετατρέπεται σε οργανική ύλη, κυρίως γλυκόζη:



Από τα συνολικά προϊόντα της φωτοσύνθεσης, περίπου το ήμισυ κατανέμεται στα φυλλώματα, στα κλαδιά, στους μίσχους, στις ρίζες και στα αναπαραγωγικά όργανα των φυτών ([Waring & Running, 2007](#)). Όταν τα φυτά αποβάλλουν φύλλα ή ρίζες ή μετά τον θάνατό τους, ο άνθρακας που έχει αφομοιωθεί μεταφέρεται στη δεξαμενή του οργανικού άνθρακα του εδάφους. Εκεί αποσυντίθεται από ετερότροφους μικροοργανισμούς μέσω ετεροτροφικού μεταβολισμού, με τελικό προϊόν την απελευθέρωση CO₂ πίσω στην ατμόσφαιρα ([Fung, 2003](#)). Η κατήλωση του CO₂ από τους αυτότροφους οργανισμούς αποτελεί τη μοναδική πηγή βιολογικής σύνθεσης νέων οργανικών ενώσεων στη βιόσφαιρα, ενώ οι ετερότροφοι μικροοργανισμοί τροφοδοτούνται από τη βιομάζα που παράγεται από τους αυτότροφους οργανισμούς.

Μέρος της φυτικής και μικροβιακής βιομάζας καταλήγει και αποδομείται σε ανοξικά ενδαιτήματα. Κατά την αναερόβια αποδόμηση, τα σύνθετα οργανικά πολυμερή υδρολύονται σε μονομερή, τα οποία λειτουργούν ως δότες ηλεκτρονίων για τον μικροβιακό μεταβολισμό. Οι πολυσακχαρίτες αποδομούνται από κυτταρολυτικά βακτήρια προς γλυκόζη, η οποία στη συνέχεια μεταβολίζεται από ζυμωτικούς μικροοργανισμούς, παράγοντας λιπαρά οξέα μικρής αλυσίδας, αλκοόλες, αέριο υδρογόνο (H₂) και CO₂. Οι αλκοόλες και τα λιπαρά οξέα, με εξαίρεση το οξικό οξύ, μεταβολίζονται περαιτέρω από συντροφικά βακτήρια (δευτερογενείς ζυμωτές) τα οποία τα μετατρέπουν σε υδρογόνο, CO₂ και οξικό οξύ. Τα προϊόντα αυτά αποτελούν υποστρώματα για τους μεθανιογόνους μικροοργανισμούς (μεθανιογόνα αρχαία). Οι μεθανιογόνοι ανάγουν το CO₂ σε CH₄ χρησιμοποιώντας το υδρογόνο ως δότη ηλεκτρονίων, ενώ ένας μικρός αριθμός ενώσεων, κυρίως το οξικό οξύ, μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε CH₄ και CO₂ μέσω οξικότροφης μεθανογένεσης ([Madigan et al., 2014](#)).



Εικόνα 8. Ο κύκλος του άνθρακα.

Κύκλος του αζώτου

Το άζωτο αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για την ανάπτυξη όλων των οργανισμών. Παρότι απαντάται σε αφθονία στην ατμόσφαιρα, με τη μορφή του στοιχειακού αζώτου (N_2), οι περισσότεροι οργανισμοί δεν μπορούν να το αξιοποιήσουν άμεσα σε αυτή τη μορφή. Για τον λόγο αυτό απαιτούνται βιολογικές διεργασίες που μετατρέπουν το στοιχειακό άζωτο σε πιο διαθέσιμες μορφές. Οι μετατροπές του οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στη δράση μικροοργανισμών και συγκροτούν τον κύκλο του αζώτου ([Graham et al., 2011](#)). Οι βασικές διεργασίες του κύκλου του αζώτου είναι η αζωτοδέσμευση, η αμμωνιοποίηση, η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση.

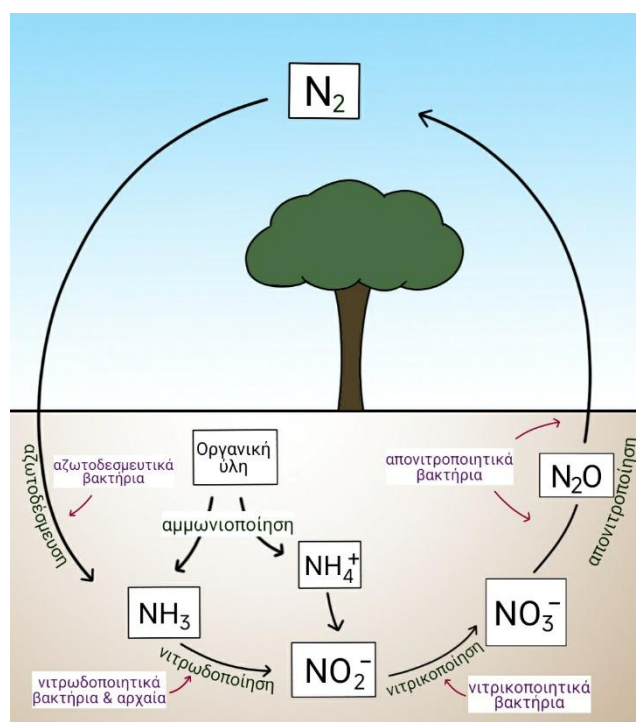
Η **αζωτοδέσμευση** πραγματοποιείται από εξειδικευμένους προκαρυωτικούς οργανισμούς που διαθέτουν το ένζυμο νιτρογενάση, το οποίο κωδικοποιείται από το γονίδιο *nifH*. Η νιτρογενάση καταλύει τη μετατροπή του N_2 σε αμμωνία (NH_3). Στους αζωτοδεσμευτικούς προκαρυωτικούς οργανισμούς περιλαμβάνονται ελεύθερα διαβιούντα, μη συμβιωτικά βακτήρια όπως τα *Azotobacter* και συμβιωτικά βακτήρια που σχηματίζουν συμβιωτικές σχέσεις με φυτά, όπως τα *Azospirillum*, *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* [$\text{N}_2 \rightarrow \text{NH}_3$] ([Wagner, 2011](#)).

Η **αμμωνιοποίηση** αφορά στη μετατροπή οργανικών ενώσεων πλούσιων σε άζωτο σε NH_3 ή αμμώνιο (NH_4^+) μέσω της δράσης υδrolυτικών ενζύμων όπως οι ουρεάσες και οι αμινοπεπτιδάσες. Η διεργασία αυτή επιτελείται κυρίως από ετερότροφους μικροοργανισμούς, όπως βακτήρια (*Bacillus* sp. και *Clostridium* sp.), ακτινοβακτήρια (*Streptomyces* sp., *Nocardia* sp.) και μύκητες (*Aspergillus* sp., *Trichoderma* sp.) [**οργανικό N** $\rightarrow \text{NH}_3$ ή NH_4^+] ([Hanrahan & Chan, 2005](#); [Grzyb et al., 2021](#)).

Η **νιτροποίηση** είναι αερόβια διεργασία που πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η **νιτρώδοποίηση**, κατά την οποία η αμμωνία ή το αμμώνιο οξειδώνονται σε νιτρώδη (NO_2^-). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται από βακτήρια που οξειδώνουν αμμωνία (νιτρώδοποιητικά βακτήρια, ammonia-oxidizing bacteria, AOB) (*Nitrosomonas*,

Nitrosococcus), καθώς και από αρχαία που οξειδώνουν αμμωνία (νιτρωδοποιητικά αρχαία, ammonia-oxidizing archaea, AOA) (*Nitrososphaerota*). Οι μικροοργανισμοί αυτοί διαθέτουν το ένζυμο μονοοξυγενάση της αμμωνίας (AMO), το οποίο καταλύει την οξείδωση της αμμωνίας σε υδροξυλαμίνη (NH_2OH), σημαντικό ενδιάμεσο στη διαδικασία της νιτροποίησης [NH_3 ή $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$] ([Wright et al., 2020](#)). Το δεύτερο στάδιο είναι η **νιτρικοποίηση**. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η οξείδωση των νιτρώδων σε νιτρικά (NO_3^-) από νιτρικοποιητικά χημειολιθοτροφικά βακτήρια (nitrite-oxidizing bacteria, NOB) (*Nitrospira*, *Nitrobacter*), με τα νιτρικά να αποτελούν άμεσα αξιοποιήσιμη πηγή αζώτου για μικροοργανισμούς και φυτά [$\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$] ([Daims et al., 2016](#)). Επιπλέον, έχει αναγνωριστεί η διεργασία Comammox (complete ammonia oxidation), κατά την οποία ένας μόνο οργανισμός είναι ικανός να οξειδώσει πλήρως την αμμωνία σε νιτρικά, χωρίς διακριτά στάδια. Αντιπροσωπευτικός οργανισμός είναι το *Nitrospira inopinata* ([Daims et al., 2015](#)).

Η **απονιτροποίηση** είναι μία αναερόβια διεργασία σταδιακής αναγωγής των νιτρικών σε αέριο άζωτο [$\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$]. Τα περισσότερα απονιτροποιητικά βακτήρια είναι προαιρετικά αερόβια ετερότροφα (όπως *Pseudomonas* και *Paracoccus*). Η διεργασία διεξάγεται με τη διαδοχική μεσολάβηση ενζύμων που περιλαμβάνουν τη νιτρική αναγωγή ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$), τη νιτρώδη αναγωγή ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}$), την αναγωγή του μονοξειδίου του αζώτου ($\text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$) και την αναγωγή του υποξειδίου του αζώτου ($\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$) ([Bernhard, 2010](#)).



Εικόνα 9. Ο κύκλος του αζώτου.

Κύκλος του θείου

Το θείο αποτελεί βασικό στοιχείο για τους ζωντανούς οργανισμούς, καθώς συμμετέχει στη δομή αμινοξέων, όπως η κυστεΐνη και η μεθειονίνη, καθώς και πρωτεϊνών, ενζύμων και βιταμινών. Στο φυσικό περιβάλλον, το θείο κυκλοφορεί μεταξύ της λιθόσφαιρας, της υδρόσφαιρας, της ατμόσφαιρας και της βιόσφαιρας μέσω βιογεωχημικών διεργασιών που ρυθμίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη δραστηριότητα μικροοργανισμών ([Lens, 2009](#)).

Οι βασικοί μετασχηματισμοί του κύκλου του θείου περιλαμβάνουν: (1) τη διάσπαση οργανικών θειούχων ενώσεων (ανοργανοποίηση θείου), (2) την οξείδωση του υδρόθειου (H_2S), (3) την οξείδωση του στοιχειακού θείου (S^0) και (4) την αναγωγή των θεικών ιόντων (SO_4^{2-}).

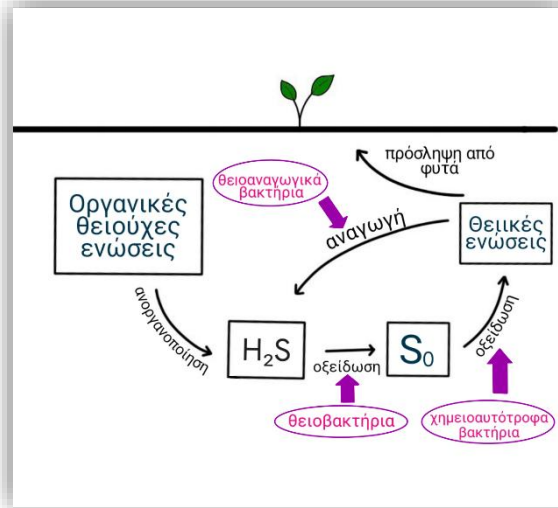
Με την αποσάθρωση θειούχων πετρωμάτων απελευθερώνονται θεικές ενώσεις (SO_4^{2-}) στο έδαφος και στα υδάτινα συστήματα, οι οποίες αποτελούν την κύρια ανόργανη μορφή θείου διαθέσιμη για φυτά και μικροοργανισμούς ([Rye et al., 2016](#)). Τα θειικά (SO_4^{2-}) προσλαμβάνονται από τους οργανισμούς και ενσωματώνονται σε οργανικές ενώσεις θείου, όπως αμινοξέα και πρωτεΐνες, οι οποίες μεταφέρονται μέσω της τροφικής αλυσίδας ([Trüper, 1984](#)). Τέλος, κατά την αποδόμηση της νεκρής οργανικής ύλης, το οργανικό θείο επανέρχεται στο περιβάλλον σε ανόργανες μορφές, κυρίως ως υδρόθειο (H_2S) ή θειικά, ολοκληρώνοντας τον κύκλο.

Ανοργανοποίηση οργανικών ενώσεων: Οι μικροοργανισμοί αποδομούν τις οργανικές θειούχες ενώσεις της νεκρής οργανικής ύλης, μετατρέποντάς τις σε ανόργανες μορφές θείου, όπως το υδρόθειο μέσω ετεροτροφικού μεταβολισμού [$\text{οργανικό S} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$].

Οξείδωση του υδρόθειου σε στοιχειακό θείο: Το υδρόθειο οξειδώνεται σε στοιχειακό θείο από φωτοσυνθετικά θειοβακτήρια όπως *Chlorobium*, *Chromatium*, καθώς και από πορφυρά βακτήρια όπως *Rhodospseudomonas*, με τη χρήση φωτός ως πηγή ενέργειας [$\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S}^0 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$] ([Madigan et al., 2014](#)).

Οξείδωση του στοιχειακού θείου σε θεικές ενώσεις: Το στοιχειακό θείο οξειδώνεται περαιτέρω σε θειικά από χημειοαυτότροφα βακτήρια όπως τα *Thiobacillus*, καθιστώντας το θείο εκ νέου διαθέσιμο για πρόσληψη από φυτά και μικροοργανισμούς ([Siciliano & Germida, 2005](#)) [$2\text{S}^0 + 3\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2\text{SO}_4$].

Αναγωγή των θεικών ενώσεων: Υπό αναερόβιες συνθήκες, τα θειικά ανάγονται σε υδρόθειο από θειοαναγωγικά βακτήρια όπως τα *Desulfovibrio* και *Bacillus* ([Mohebbi & Ball, 2016](#); [El-Midany & Abdel-Khalek, 2013](#)). Η διεργασία αυτή είναι γνωστή ως θεική αναγωγή. Το παραγόμενο H_2S που παράγεται παραμένει στο έδαφος ή στο υδάτινο περιβάλλον και μπορεί να επανεισαχθεί στον κύκλο μέσω οξείδωσης.



Εικόνα 10. Ο κύκλος του θείου.

Κύκλος του φωσφόρου

Ο φώσφορος αποτελεί απαραίτητο θρεπτικό στοιχείο για όλους τους ζωντανούς οργανισμούς, καθώς συμμετέχει στη δομή του DNA, RNA, της ATP και των φωσφολιπιδίων που συγκροτούν τις κυτταρικές μεμβράνες. Διαδραματίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στην πρωτογενή παραγωγή σε φυσικά όσο και σε αγροτικά οικοσυστήματα, καθώς είναι απαραίτητος για όλα τα στάδια της ανάπτυξης των φυτών, όπως η ριζική ανάπτυξη, η άνθηση, η καρποφορία και ο σχηματισμός σπόρων ([Ahash et al., 2025](#); [Schipanski & Bennett, 2021](#)).

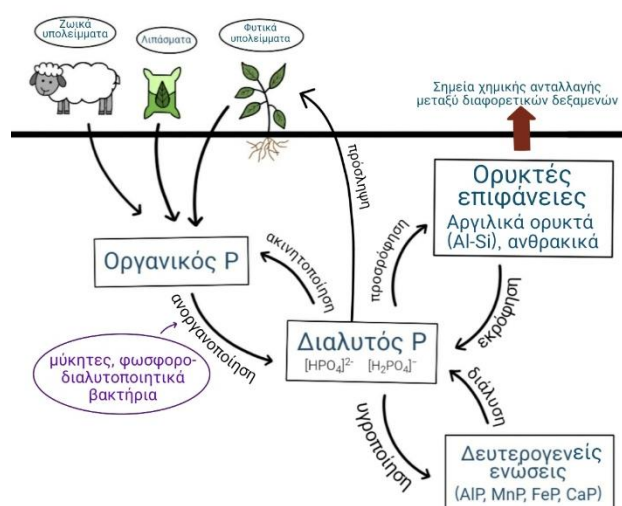
Ο κύκλος του φωσφόρου θεωρείται ένας από τους βραδύτερους βιογεωχημικούς κύκλους, καθώς η μετακίνηση του φωσφόρου από τα φωσφορικά πετρώματα προς το έδαφος και τους ωκεανούς μέσω αποσάθρωσης πραγματοποιείται με εξαιρετικά αργούς ρυθμούς. Αντίθετα, η κυκλοφορία του φωσφόρου μέσω των ζωντανών οργανισμών (φυτά – ζώα – μικροοργανισμοί) είναι συγκριτικά ταχύτερη ([Shmeis, 2018](#)).

Κατά την αποσάθρωση φωσφορικών πετρωμάτων απελευθερώνονται φωσφορικά άλατα, τα οποία μεταφέρονται στο έδαφος και στα υδάτινα συστήματα, ενώ μέρος τους καταλήγει σε λίμνες και ποτάμια μέσω επιφανειακής απορροής. Παράλληλα, η εξόρυξη φωσφορικών πετρωμάτων απομακρύνει σημαντικές ποσότητες φωσφόρου από τα φυσικά αποθέματα, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή λιπασμάτων. Τα λιπάσματα εφαρμόζονται στις καλλιέργειες, και ο φώσφορος μεταφέρεται περαιτέρω στην τροφική αλυσίδα μέσω της κατανάλωσης φυτών από ζώα. Τα ζωικά απόβλητα, καθώς και η αποσύνθεση φυτικών και ζωικών υπολειμμάτων, επιστρέφουν φωσφορικά άλατα στο έδαφος. Ωστόσο, μεγάλο ποσοστό του φωσφόρου στο έδαφος βρίσκεται σε μορφές που δεν είναι άμεσα διαθέσιμες στα φυτά. Για τον λόγο αυτό, οι μικροοργανισμοί του εδάφους διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη βιοδιαθεσιμότητα του φωσφόρου, επιταχύνοντας διεργασίες δέσμευσης, διαλυτοποίησης και ανοργανοποίησης μέσω ενζυμικών μηχανισμών ([Schipanski & Bennett, 2021](#)).

Ένας από τα σημαντικότερους μηχανισμούς πρόσληψης φωσφόρου από τα φυτά είναι οι συμβιωτικές σχέσεις με μυκορριζικούς μύκητες, που ανήκουν κυρίως στα φύλα

Glomeromycota και *Mucoromycota*. Οι μύκητες αυτοί, αποικίζουν στις ρίζες ή διεισδύουν στα ριζικά κύτταρα και απελευθερώνουν ένζυμα όπως οι φωσφατάσες, που ανοργανοποιούν τον οργανικό φώσφορο, καθώς και οργανικά οξέα που διαλυτοποιούν φωσφορικά ορυκτά. Επιπλέον, ένζυμα όπως η φυτάση, η φωσφωνατάση και η C-P λυάση συμβάλλουν στη διαλυτοποίηση του ανόργανου φωσφόρου ([Schipanski & Bennett, 2021](#); [Lutz et al., 2025](#)).

Πέραν των μυκήτων, σημαντικό ρόλο στη διαλυτοποίηση του φωσφόρου διαδραματίζουν και φωσφοροδιαλυτοποιητικά βακτήρια, κυρίως των γενών *Pseudomonas* και *Bacillus*, τα οποία απαντώνται στη ριζόσφαιρα. Τα βακτήρια αυτά κινητοποιούν τόσο τον ανόργανο όσο και τον οργανικό φώσφορο μέσω μηχανισμών όπως η χηλίωση (chelation), η οξίνιση του μικροπεριβάλλοντος, η ανταλλαγή ιόντων και η απελευθέρωση οργανικών οξέων, ανιόντων και σιδηροφόρων ενώσεων ([Cao et al., 2024](#)).



Εικόνα 11. Ο κύκλος του φωσφόρου.

1.3.3. Παράγοντες που επηρεάζουν τη σύσταση των μικροβιακών κοινοτήτων

1.3.3.1. Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη μικροβιακή ανάπτυξη, τον μεταβολισμό, την ενζυμική δραστηριότητα και την επιβίωση των μικροοργανισμών ([AlGhazali & Eljamay, 2025](#)). Κάθε μικροοργανισμός χαρακτηρίζεται από τρεις θεμελιώδεις θερμοκρασίες, εντός των οποίων μπορεί να επιβιώσει και να αναπτυχθεί: την ελάχιστη, τη βέλτιστη (άριστη) και τη μέγιστη θερμοκρασία. Στη βέλτιστη θερμοκρασία, η ταχύτητα αύξησης των μικροοργανισμών και ο ρυθμός των ενζυμικών αντιδράσεων είναι μέγιστοι ([Madigan et al., 2014](#)). Θερμοκρασίες χαμηλότερες από την ελάχιστη οδηγούν σε σημαντική μείωση της ενζυμικής δραστηριότητας και του μεταβολισμού, με αποτέλεσμα την αναστολή της μικροβιακής αύξησης. Αντίθετα, θερμοκρασίες υψηλότερες από τη μέγιστη προκαλούν μετουσίωση πρωτεϊνών και διαταραχή των κυτταρικών δομών, γεγονός που τελικά οδηγεί

στον θάνατο των κυττάρων ([Keenleyside, 2019](#)). Ανάλογα με το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο ευδοκιμούν, οι μικροοργανισμοί διακρίνονται σε ψυχρόφιλους, που αναπτύσσονται σε χαμηλές θερμοκρασίες (περίπου 0–20°C), μεσόφιλους, που αναπτύσσονται σε ήπιες θερμοκρασίες (20–45°C), θερμόφιλους, που ευδοκιμούν σε υψηλές θερμοκρασίες (45–80°C), καθώς και σε υπερψυχρόφιλους και υπερθερμόφιλους, οι οποίοι προσαρμόζονται σε ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες ([Jin et al., 2022](#); [Yildiz, 2024](#)).

1.3.3.2. pH

Μεταβολές στο pH επηρεάζουν τον ιονισμό των λειτουργικών ομάδων των αμινοξέων και διαταράσσουν τους δεσμούς υδρογόνου, γεγονός που οδηγεί σε αλλαγές στη μοριακή αναδίπλωση των πρωτεϊνών. Οι αλλαγές αυτές μπορούν να προκαλέσουν μετουσίωση των πρωτεϊνών και απώλεια της ενζυμικής τους δραστηριότητας ([Keenleyside, 2019](#)). Ανάλογα με το εύρος τιμών pH στο οποίο ευδοκιμούν, οι μικροοργανισμοί κατηγοριοποιούνται με τρόπο αντίστοιχο της θερμοκρασιακής τους κατάταξης. Μικροοργανισμοί που αναπτύσσονται σε τιμές pH ίσες ή χαμηλότερες του 5.0 χαρακτηρίζονται ως οξεόφιλοι, ενώ εκείνοι που ευδοκιμούν σε τιμές pH ίσες ή υψηλότερες του 9.0 χαρακτηρίζονται ως αλκαλεόφιλοι ([Johnson & Aguilera, 2019](#); [Rao et al., 2022](#)). Οι μύκητες συνήθως αναπτύσσονται σε ελαφρώς όξινες συνθήκες, με βέλτιστο pH γύρω στο 5.0. Έχει παρατηρηθεί ότι η κυτταροπλασματική μεμβράνη των έντονα οξεόφιλων βακτηρίων υφίσταται εκτεταμένη βλάβη και τα κύτταρα υφίστανται λύση όταν το pH προσεγγίζει ουδέτερες τιμές ([Madigan et al., 2014](#)). Τα περισσότερα βακτήρια επιβιώνουν και αναπτύσσονται σε εύρος pH που κυμαίνεται από 5.0 έως 8.5 και χαρακτηρίζονται ως ουδετερόφιλα. Τα ουδετερόφιλα παρουσιάζουν μέγιστη ανάπτυξη σε pH περίπου 7.4 ([Rius & Loren, 1998](#)). Έρευνα των [Kemmitt et al., \(2006\)](#) έδειξε ότι το pH μπορεί να επηρεάσει σημαντικά μικροβιακές ιδιότητες, καθώς και την ικανότητα των μικροοργανισμών να μεταβολίζουν άνθρακα και άζωτο. Η αύξηση της οξύτητας συνδέεται με μείωση της εγγενούς μικροβιακής δραστηριότητας, οδηγώντας σε αναστολή της λειτουργίας ορισμένων μικροοργανισμών. Επιπροσθέτως, το pH επιδρά στον μικροβιακό μεταβολισμό και τη δομή των μικροβιακών κοινοτήτων, καθώς μπορεί να τροποποιήσει τη θερμοδυναμική και την κινητική των οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στο έδαφος ([Jin & Kirk, 2018](#)).

1.3.3.3. Οξυγόνο

Το οξυγόνο αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη λειτουργία και την ανάπτυξη πολλών μικροοργανισμών, ωστόσο για ορισμένους η παρουσία του είναι τοξική. Οι μικροοργανισμοί που απαιτούν οξυγόνο για τον μεταβολισμό και την ανάπτυξή τους ονομάζονται αερόβιοι και ευδοκιμούν σε περιβάλλοντα πλήρες οξυγόνου. Πολλοί από αυτούς είναι προαιρετικά αερόβιοι, δηλαδή μπορούν να αναπτυχθούν τόσο παρουσία όσο και απουσία οξυγόνου, υπό κατάλληλες θρεπτικές και περιβαλλοντικές συνθήκες ([Madigan et al., 2014](#)). Αντίθετα, οι μικροοργανισμοί που δεν μπορούν να επιβιώσουν παρουσία οξυγόνου και αναστέλλονται ή οδηγούνται σε θάνατο ονομάζονται υποχρεωτικά αναερόβιοι. Υπάρχει επίσης η κατηγορία των αερανεκτικών αναερόβιων, οι

οποίοι μπορούν να αναπτυχθούν παρουσία οξυγόνου, χωρίς όμως να το χρησιμοποιούν ως τελικό δέκτη ηλεκτρονίων στον μεταβολισμό τους ([Brannan, 2006](#)). Στους υποχρεωτικά αναερόβιους οργανισμούς περιλαμβάνονται πολλά βακτήρια, τα μεθανιογόνα αρχαία και ορισμένοι μύκητες ([Madigan et al., 2014](#)). Ο θάνατος των υποχρεωτικά αναερόβιων οργανισμών παρουσία οξυγόνου οφείλεται στη μετατροπή του οξυγόνου σε αντιδραστικά και τοξικά παραπροϊόντα γνωστά ως αντιδραστικά είδη οξυγόνου (Reactive Oxygen Species, ROS), όπως το υπεροξειδίο (O_2^-), το υπεροξειδίο του υδρογόνου (H_2O_2) και η ρίζα υδροξυλίου. Οι αερόβιοι οργανισμοί διαθέτουν ενζυμικούς μηχανισμούς αποτοξίνωσης αυτών των ενώσεων, κυρίως μέσω της δισμουτάσης του υπεροξειδίου και της καταλάσης. Αντίθετα, οι υποχρεωτικά αναερόβιοι στερούνται αυτών των ενζύμων και ως εκ τούτου, δεν διαθέτουν αποτελεσματικούς μηχανισμούς άμυνας έναντι των τοξικών αυτών παραπροϊόντων ([Kurtz, 2003](#)).

1.3.3.4. Άλλοι παράγοντες

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τις μικροβιακές κοινότητες είναι τα φυτά και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως οι καλλιεργητικές πρακτικές (π.χ. όργωμα), καθώς και η χρήση λιπασμάτων και εντομοκτόνων ([Ahemad et al., 2009](#)). Η μικροβιακή βιομάζα και η δομή των μικροβιακών κοινοτήτων επηρεάζονται επίσης από την ποιότητα και την σύσταση των οργανικών υλικών που εισέρχονται στο έδαφος. Οι εδαφικές ιδιότητες, όπως η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, η περιεκτικότητα σε άργιλο και το μητρικό υλικό, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της μικροβιακής βιομάζας και της λειτουργικής ποικιλότητας των μικροοργανισμών. Το μητρικό υλικό καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων, ενώ η οργανική ύλη του εδάφους αποτελεί βασική πηγή ενέργειας για τους μικροοργανισμούς. Επιπλέον, η υφή του εδάφους επηρεάζει την συγκράτηση νερού και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται το μικροπεριβάλλον διαβίωσης και η μεταβολική δραστηριότητα των μικροβιακών κοινοτήτων ([Li et al., 2018](#)).

1.3.4. Επιδράσεις μικροπλαστικών στους μικροοργανισμούς του εδάφους

Τα μικροπλαστικά επηρεάζουν τις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους, τόσο άμεσα όσο και έμμεσα, καθώς οι μικροοργανισμοί διαδραματίζουν πολλαπλούς και κρίσιμους ρόλους στη λειτουργία και την οικολογία του εδάφους. Το μέγεθος, αλλά κυρίως το είδος των μικροπλαστικών, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο και την ένταση των επιδράσεών τους στους μικροοργανισμούς και στις ιδιότητες του εδάφους.

Τα εδαφικά συσσωματώματα παρέχουν χωρικές δομές, μικροοικοτόπους και οργανική ύλη για τους μικροοργανισμούς. Στα μακροσυσσωματώματα παρατηρείται υψηλότερη αφθονία άνθρακα σε σύγκριση με τα μικροσυσσωματώματα, γεγονός που ευνοεί σε ταχύτερα αναπτυσσόμενες μικροβιακές κοινότητες, με μικρότερη ωστόσο ποικιλότητα ([Upton et al., 2019](#)). Μεταβολές στη δομή και την σταθερότητα των συσσωματωμάτων μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση της μικροβιακής βιομάζας, της αναπνοής και της ενζυμικής δραστηριότητας ([Gupta & Germida, 2014](#)). Έχει αποδειχθεί ότι τα

μικροπλαστικά μπορούν να ενσωματωθούν στα εδαφικά συσσωματώματα και να παρεμποδίσουν τον σχηματισμό σταθερών δομών ([Liang et al., 2021](#)). Σύμφωνα με τους [Zhang & Liu \(2018\)](#), το 72% των μικροπλαστικών που εξετάστηκαν, ενσωματώθηκαν στα συσσωματώματα, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να καταλαμβάνουν διαθέσιμο χώρο εντός των συσσωματωμάτων, περιορίζοντας την πρόσβαση των μικροοργανισμών σε μικροοικοτόπους απαραίτητους για την ανάπτυξη και την επιβίωσή τους.

Ο αερισμός του εδάφους αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την κατανομή των μικροοργανισμών, ιδιαίτερα των μυκήτων ([Harris et al., 2003](#)). Η αύξηση της φαινόμενης πυκνότητας του εδάφους σχετίζεται με μείωση των μικροβιακών πληθυσμών και μεταβολές στις ενζυμικές δραστηριότητες, ενώ χαμηλότερες πυκνότητες μπορούν να δημιουργήσουν ευνοϊκότερες συνθήκες για τη μικροβιακή δραστηριότητα ([Li et al., 2001](#)). Έχει παρατηρηθεί ότι η ενσωμάτωση μικροπλαστικών όπως ίνες πολυεστέρα και κόκκοι πολυπροπυλενίου (PP), οδηγεί σε μείωση της φαινόμενης πυκνότητας του εδάφους. Τα ελαφρύτερα μικροπλαστικά μπορούν να αντικαθιστούν εδαφικά σωματίδια ίσου βάρους, καταλαμβάνοντας μεγαλύτερο όγκο και τροποποιώντας τη δομή του εδάφους ([Yu et al., 2023](#)). Αντίθετα, μικροπλαστικά LDPE έχει βρεθεί ότι αυξάνουν τη φαινόμενη πυκνότητα και μειώνουν το πορώδες του εδάφους. Η φαινόμενη πυκνότητα σχετίζεται άμεσα με τη διαθεσιμότητα οξυγόνου, επηρεάζοντας έτσι την κατανομή αερόβιων και αναερόβιων μικροοργανισμών ([Chen et al., 2024](#)).

Τα μικροπλαστικά μπορούν επίσης να μεταβάλλουν το pH του εδάφους, προκαλώντας τοξικές επιδράσεις στους μικροοργανισμούς, όπως αναστολή της ενζυμικής δραστηριότητας, διαταραχή του κυτταρικού μεταβολισμού και σε ορισμένες περιπτώσεις κυτταρικό θάνατο. Σε πείραμα διάρκειας 30 ημερών, μικροπλαστικά HDPE προκάλεσαν μείωση του pH του εδάφους ([Boots et al., 2019](#)), η οποία αποδίδεται στην απελευθέρωση οργανικών οξέων, όπως το γαλακτικό οξύ, από τη βιοαποδόμηση αλειφατικών πολυεστέρων και τον σχηματισμό ρωγμών στην επιφάνεια των μικροπλαστικών κατά την διεργασία της ανοργανοποίησης ([Chia et al., 2022](#)).

Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μπορούν να αυξήσουν ή να μειώσουν την αφθονία συγκεκριμένων ταξινομικών ομάδων μικροοργανισμών και να μεταβάλουν τη σύσταση των μικροβιακών κοινοτήτων. Η α-ποικιλότητα μεταβάλλεται ανάλογα με τη συγκέντρωση των μικροπλαστικών και τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες ([Agathokleous et al., 2021](#)). Μικροπλαστικά LDPE έχουν συσχετιστεί με μείωση των αντιγράφων των γονιδίων *sga*, *abfA*, *manB* και *xyIA*, τα οποία σχετίζονται με τον μεταβολισμό του ασταθούς άνθρακα, του αμύλου και της ημικυτταρίνης. Το φαινόμενο αυτό πιθανώς οφείλεται στην κατάληψη φυσικοχημικών μικρο-εσοχών από τα μικροπλαστικά, περιορίζοντας την αφθονία των μικροοργανισμών ([Zhang et al., 2021c](#)). Αντίθετα, οι [Su et al. \(2023\)](#) ανέφεραν αύξηση κατά 10,6% στον συνολικό αριθμό γονιδίων που σχετίζονται με την απονιτροποίηση, συμπεριλαμβανομένων των *nar*, *nas*, *nir* και *nos*. Ορισμένα μικροπλαστικά μπορούν να επηρεάσουν την αφθονία των γονιδίων που σχετίζονται με τον μεταβολισμό των υδατανθράκων και να μεταβάλουν τη ροή ενέργειας στο έδαφος. Παράλληλα, ορισμένοι μικροοργανισμοί είναι ικανοί να αποικίσουν την επιφάνεια των μικροπλαστικών και να δημιουργήσουν βιοφίλμ, τα οποία εμπλουτίζονται με θρεπτικά συστατικά όπως βιταμίνες και εξωκυτταρικούς

πολυσακαχαρίτες ([Chen et al., 2024](#)). Ωστόσο, η συνολική μικροβιακή βιομάζα συχνά μειώνεται, καθώς ο μικροβιακά διαθέσιμος άνθρακας που προκύπτει από την αποδόμηση των πλαστικών είναι περιορισμένος και ανεπαρκής για την στήριξη της μικροβιακής ανάπτυξης ([Li et al., 2023](#)). Οι μικροΐνες πολυεστέρα αυξάνουν την αφθονία των υφών των μυκορριζικών μυκήτων, ενώ τα μικροπλαστικά PLA μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιπτώσεις, οι οποίες αποδίδονται στην τοξικότητα των ενδιάμεσων χημικών προϊόντων που προκύπτουν κατά τη βιοαποδόμησή τους.

Τέλος, τα μικροπλαστικά μπορούν να προσροφήσουν βαρέα μέταλλα ενισχύοντας τις τοξικές τους επιδράσεις στους μικροοργανισμούς. Τα βαρέα μέταλλα διαταράσσουν τη χωρική δομή των ενζύμων και αναστέλλουν τη μικροβιακή ανάπτυξη, μειώνοντας τη σύνθεση και τη λειτουργικότητα των μικροβιακών ενζύμων ([Chu, 2018](#)). Η προσθήκη μολύβδου (Pb) έχει συσχετιστεί με μεταβολές στα γονίδια *16S rRNA* και *nirK*, με το τελευταίο να εμφανίζει εντονότερη απόκριση, υποδεικνύοντας ότι οι νιτρωδοποιητικοί και απονιτροποιητικοί μικροοργανισμοί ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στην έκθεση σε βαρέα μέταλλα, ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε μείωση της ποικιλότητας των κοινοτήτων τους ([Sobolev & Begonia, 2008](#)).

1.4. Στόχος της εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η καταγραφή και ανάλυση της επίδρασης των μικροπλαστικών στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους μέσα από μελέτες περίπτωσης που έχουν δημοσιευθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Η εργασία αποσκοπεί να συγκεντρώσει, να παρουσιάσει και να αξιολογήσει συγκριτικά τα διαθέσιμα ερευνητικά δεδομένα, να αποτυπώσει τις θετικές ή αρνητικές επιδράσεις που έχουν παρατηρηθεί, και να αναδείξει τα ερευνητικά κενά και τις κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η παρούσα εργασία αποτελεί περιγραφική βιβλιογραφική ανασκόπηση (narrative review) και δεν ακολουθεί πλήρως τις προδιαγραφές συστηματικής ανασκόπησης. Η αναζήτηση της βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε μέσω της πλατφόρμας Google Scholar, με κύρια βάση δεδομένων τη ScienceDirect, η οποία περιλαμβάνει επιστημονικά άρθρα και κεφάλαια βιβλίων αξιολογημένα από ομότιμους (peer-reviewed).

Η αναζήτηση της βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε κατά το διάστημα Μάιος - Αύγουστος 2025, με τη χρήση στοχευμένων συνδυασμών λέξεων-κλειδιών, όπως: “*microplastics and microbial communities in soil*”, “*microplastics and microbial genes in soil*”, “*microplastics effects on microbial activity in soil*”.

Τα άρθρα που εντοπίστηκαν αφορούσαν μελέτες οι οποίες εξέταζαν μικροβιακές κοινότητες τόσο στη ριζόσφαιρα όσο και στο χύδην έδαφος εκτός της ριζικής ζώνης. Η επιλογή των μελετών που συμπεριλήφθηκαν στην εργασία βασίστηκε σε συγκεκριμένα κριτήρια ένταξης. Πρώτον, λήφθηκε υπόψη η χρονολογία δημοσίευσης. Επιλέχθηκαν μελέτες από το 2020 και έπειτα, ώστε να αξιοποιηθούν τα πιο πρόσφατα ερευνητικά δεδομένα για τις επιδράσεις των μικροπλαστικών στο έδαφος, δεδομένου ότι πρόκειται για θέμα με αυξανόμενο επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Δεύτερον,

συμπεριλήφθηκαν μόνο άρθρα με σαφή και αναλυτική περιγραφή της πειραματικής μεθοδολογίας, όπου προσδιορίζονταν ο τύπος και η συγκέντρωση των μικροπλαστικών, καθώς και η διάρκεια επώασης ή καλλιέργειας. Εξαιρέθηκαν μελέτες που βασίζονταν αποκλειστικά σε δειγματοληψία πεδίου χωρίς ελεγχόμενες μεταχειρίσεις, καθώς και όσες δεν παρείχαν επαρκή πειραματικά στοιχεία. Επιπλέον, αξιολογήθηκε η αξιοπιστία των πηγών, δίνοντας προτεραιότητα σε άρθρα προερχόμενα από έγκριτες βάσεις δεδομένων με διαδικασία ομότιμης αξιολόγησης. Τέλος, στην παρούσα εργασία συμπεριλήφθηκαν αποκλειστικά πρωτότυπες ερευνητικές μελέτες, ενώ τα άρθρα ανασκόπησης ή μετα-ανάλυσης αποκλείστηκαν, ώστε η ανάλυση να βασίζεται αποκλειστικά σε πρωτογενή ερευνητικά δεδομένα.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μελέτες που εξέτασαν τις επιδράσεις των μικροπλαστικών στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους και οι οποίες πληρούσαν πλήρως τα κριτήρια που περιεγράφηκαν προηγουμένως. Συνολικά εντοπίστηκαν 20 εργασίες, από τις οποίες επιλέχθηκαν οι 14 για περαιτέρω ανάλυση και αξιολόγηση. Οι μελέτες που συμπεριλήφθηκαν πληρούσαν πλήρως τα κριτήρια χρονολογίας, μεθοδολογικής σαφήνειας, επάρκειας δεδομένων και αξιοπιστίας. Οι υπόλοιπες αποκλείστηκαν είτε λόγω ανεπαρκών πληροφοριών είτε επειδή αποτελούσαν άρθρα ανασκόπησης και όχι πρωτότυπες ερευνητικές εργασίες.

Οι μελέτες που αξιολογήθηκαν παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3, όπου αναφέρονται οι συγγραφείς της μελέτης, ο τίτλος της δημοσίευσης, η απόφαση ένταξης ή απόρριψης, καθώς και ο συνοπτικός λόγος επιλογής ή αποκλεισμού σύμφωνα με τα προκαθορισμένα κριτήρια.

Πίνακας 3. Κατάλογος των μελετών που εξετάστηκαν και αξιολογήθηκαν για την παρούσα πτυχιακή εργασία, με αναφορά στους συγγραφείς, τον τίτλο, την ένταξη ή απόρριψη και τη σχετική αιτιολόγηση.

#	Συγγραφείς	Τίτλος μελέτης	Επιλογή	Αιτιολόγηση επιλογής ή απόρριψης
1	Chen et al., 2025	Effects of microplastics on microbial community and greenhouse gas emission in soil: a critical review	OXI	Άρθρο ανασκόπησης
2	Han et al., 2024	Microplastics alter soil structure and microbial community composition	NAI	Μελέτη των επιπτώσεων PE και PLA μικροπλαστικών στη σταθερότητα των συσσωματωμάτων και στη σύσταση των μικροβιακών κοινοτήτων

3	Li et al., 2022a	Soil microbial community parameters affected by microplastics and other plastic residues	OXI	Δεν αποτελεί πρωτογενές πείραμα αλλά μετα-ανάλυση, χωρίς δικά της πρωτογενή δεδομένα
4	Li et al., 2022b	Microplastics distribution and microbial community characteristics of farmland soil under different mulch methods	OXI	Η μελέτη βασίζεται σε δειγματοληψία πεδίου και δεν παρέχει πληροφορίες για την πολυμερική σύσταση των μικροπλαστικών, παρά μόνο για το μέγεθος και την αφθονία τους
5	Li & Xiao, 2023	Microplastics increase soil microbial network complexity and trigger diversity-driven community assembly	NAI	Εξετάζει πώς διαφορετικοί τύποι μικροπλαστικών επηρεάζουν τη δομή, την πολυπλοκότητα και την οργάνωση των μικροβιακών κοινοτήτων του εδάφους
6	Ma et al., 2023	Effects of variable-sized polyethylene microplastics on soil chemical properties and functions and microbial communities in purple soil	NAI	Εξετάζει την επίδραση του μεγέθους των PE μικροπλαστικών στις χημικές και βιολογικές διεργασίες εδάφους
7	Omidoyin & Jho, 2023	Effect of microplastics on soil microbial community and microbial degradation of microplastics in soil: a review	OXI	Άρθρο ανασκόπησης
8	Palansooriya et al., 2022	Effect of LDPE microplastics on chemical properties and microbial communities in soil	NAI	Εξετάζει τις επιδράσεις μικροπλαστικών LDPE στις μικροβιακές κοινότητες και τις χημικές ιδιότητες του εδάφους
9	Qi et al., 2024	Regulatory path for soil microbial communities depends on the type and dose of microplastics	NAI	Παρέχει αναλυτικά δεδομένα για την επίδραση διαφορετικών τύπων και συγκεντρώσεων μικροπλαστικών στις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους και στη δομή και ποικιλότητα των μικροβιακών κοινοτήτων
10	Rong et al., 2021	LDPE microplastics affect soil microbial	NAI	Εξετάζει την επίδραση των μικροπλαστικών στον κύκλο

		communities and nitrogen cycling		του αζώτου και τη δομή των μικροβιακών κοινοτήτων
11	Song et al., 2024	Effect of conventional and biodegradable microplastics on the soil-soybean system: a perspective on rhizosphere microbial community and soil element cycling	NAI	Περιλαμβάνει πειραματικά δεδομένα σχετικά με την επίδραση συμβατικών και βιοδιασπώμενων μικροπλαστικών στη μικροβιακή κοινότητα της ριζόσφαιρας και στους κύκλους των θρεπτικών στοιχείων
12	Wang et al., 2024	Microplastics can regulate soil microbial activities: evidence from catalase, dehydrogenase and fluorescein diacetate hydrolase	OXI	Άρθρο ανασκόπησης
13	Xiao et al., 2022	Microplastics shape microbial communities affecting soil organic matter decomposition in paddy soil	NAI	Περιλαμβάνει δεδομένα για την επίδραση μικροπλαστικών στη δομή των εδαφικών μικροβιακών κοινοτήτων
14	Ya et al., 2022	LDPE microplastics affect soil microbial community and form a unique plastisphere on microplastics	NAI	Περιγράφει τη δημιουργία πλαστισφαίρας σε LDPE μικροπλαστικά και μελετά τις επιδράσεις τους στις φυσικοχημικές ιδιότητες και τη μικροβιακή κοινότητα του εδάφους
15	Ye et al., 2024	Microplastics abundance associated with farmland use types and the impact on soil microbial communities: a case study in southern China	NAI	Παρέχει δεδομένα πεδίου για την κατανομή των μικροπλαστικών σε διαφορετικές γεωργικές χρήσεις και την επίδρασή τους στη δομή των μικροβιακών κοινοτήτων του εδάφους
16	Yi et al., 2020	The effects of three different microplastics on enzyme activities and microbial communities in soil	NAI	Περιλαμβάνει δεδομένα για την επίδραση τριών διαφορετικών τύπων μικροπλαστικών στις μικροβιακές κοινότητες και τη λειτουργία τους στο έδαφος

17	Zhao et al., 2021	Microplastics increase soil pH and decrease microbial activities as a function of microplastics shape, polymer type and exposure time	NAI	Μελέτη περίπτωσης για την αξιολόγηση της επίδρασης διαφορετικών σχημάτων και πολυμερών μικροπλαστικών σε φυσικοχημικές ιδιότητες και μικροβιακές λειτουργίες του εδάφους
18	Zhou et al., 2021	The microplastisphere: biodegradable microplastics addition alters soil microbial community structural function	NAI	Εξετάζει την επίδραση βιοδιασπώμενων μικροπλαστικών στη δομή, της μικροβιακής κοινότητας του εδάφους
19	Zhou & Zhou, 2023	Role of microplastics in microbial community structure and functions in urban soils	OXI	Μελέτη πεδίου, παρατήρησης, που βασίζεται σε δειγματοληψία πεδίου και όχι σε ελεγχόμενο πειραματικό σχεδιασμό με καθορισμένες μεταχειρίσεις και διάρκεια επώασης
20	Zhu et al., 2022	Microplastic particles alter wheat rhizosphere soil microbial community composition and function	NAI	Εξετάζει τις επιδράσεις τριών τύπων μικροπλαστικών στη δομή και λειτουργία της κοινότητας των βακτηρίων στη ριζόσφαιρα σιταριού

3.1. Περιγραφή των μελετών που επιλέχθηκαν και των αποτελεσμάτων τους

Microplastics alter soil structure and microbial community composition - Τα μικροπλαστικά μεταβάλλουν τη δομή του εδάφους και τη σύσταση της μικροβιακής κοινότητας (Han et al., 2024)

Σε αυτή τη μελέτη εξετάστηκαν οι επιδράσεις των συμβατικών (PE) και βιοδιασπώμενων (PLA) μικροπλαστικών στη δομή του εδάφους και στις κοινότητες των βακτηρίων, λαμβάνοντας υπόψη τις κατηγορίες μεγέθους των εδαφικών συσσωματωμάτων. Στόχος ήταν να αξιολογηθεί πώς οι δύο τύποι μικροπλαστικών, σε τρία διαφορετικά μεγέθη (50, 150 και 300 μm), επηρεάζουν την κατανομή και τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων καθώς και τη σύσταση και την ευαισθησία των βακτηριακών κοινοτήτων σε διαφορετικά μικροπεριβάλλοντα του εδάφους. Τα εδάφη συλλέχθηκαν από ορυζώνες και επώαστηκαν σε θερμοκήπιο για ένα έτος. Συνολικά εφαρμόστηκαν επτά μεταχειρίσεις: μία μάρτυρας χωρίς μικροπλαστικά και έξι με μικροπλαστικά PE ή PLA στα διαφορετικά μεγέθη, σε

δοσολογία 0,5% β/β (w/w). Τα μικροπλαστικά τροποποίησαν σημαντικά τη δομή των βακτηριακών κοινοτήτων, δημιουργώντας ξεχωριστές ομάδες σε σχέση με το έδαφος χωρίς μικροπλαστικά, ανεξάρτητα από το μέγεθος των συσσωματωμάτων. Τα μικροπλαστικά PE και PLA είχαν γενικά παρόμοιες επιδράσεις. Τα κυρίαρχα φύλα ήταν *Actinobacteria* (23–31%), *Proteobacteria* (21–41%), *Acidobacteria* (7–15%), *Chloroflexi* (6–12%), *Firmicutes* (9–11%) και *Bacteroidota* (5–7%). Παρατηρήθηκε αύξηση των *Actinobacteria* σε συσσωματώματα και χύδην έδαφος, καθώς και των *Chloroflexi* στα μικροσυσσωματώματα, ενώ τα *Proteobacteria* μειώθηκαν. Αυτές οι μεταβολές επηρέασαν έμμεσα τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων. Τα μικροσυσσωματώματα εμφάνισαν πιο έντονες αρνητικές επιδράσεις, υποδηλώνοντας ότι ο ανταγωνισμός μεταξύ των βακτηριακών κοινοτήτων ενισχύθηκε σε αυτά και συνολικά στο έδαφος όταν προστέθηκαν μικροπλαστικά. Ο ανταγωνισμός ήταν πιο έντονος στα μικροπλαστικά PE, ενώ τα μικροπλαστικά PLA φαίνεται να παρείχαν πιο ευνοϊκές συνθήκες για την αύξηση βακτηρίων λόγω της μεγαλύτερης βιοαποδομησιμότητάς τους, μειώνοντας έτσι τη μικροβιακή πίεση. Η ανάλυση των δικτύων συνύπαρξης έδειξε ότι τα μικροπλαστικά αύξησαν την πολυπλοκότητα των βακτηριακών δικτύων, με ισχυρότερη επίδραση σε αυτά του PE από ό,τι σε PLA. Συνολικά, και οι δύο τύποι μικροπλαστικών μείωσαν το ποσοστό των μεγάλων και σταθερών συσσωματωμάτων, τροποποιώντας τη δομή των βακτηριακών κοινοτήτων και τις μικροβιακές ομάδες-κλειδιά, επιδρώντας έτσι στις λειτουργίες του εδάφους.

 Microplastics increase soil microbial network complexity and trigger diversity-driven community assembly - Τα μικροπλαστικά αυξάνουν την περιπλοκότητα του μικροβιακού δικτύου και ενεργοποιούν την σύσταση μικροβιακής κοινότητας ωθούμενη από την ποικιλότητα (Li & Xiao, 2023)

Σε αυτή τη μελέτη πραγματοποιήθηκε πείραμα διάρκειας 19 μηνών, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι μικροπλαστικών: PLA, PS και HDPE, υπό συνθήκες φύτευσης και μη φύτευσης. Στόχος της μελέτης ήταν να διερευνηθεί η επίδραση των διαφορετικών τύπων πολυμερών στη σύσταση των μικροβιακών κοινοτήτων βακτηρίων και μυκήτων στο έδαφος, να διευκρινιστεί ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνονται και οργανώνονται οι μικροβιακές κοινότητες στο έδαφος, καθώς και να αξιολογηθούν οι επιδράσεις τους στην ανάπτυξη φυτών. Τα εδαφικά δείγματα συλλέχθηκαν από γεωργικά εδάφη και φυτεύτηκαν με σπόρους *Pennisetum alopecuroides*. Το πείραμα περιλάμβανε 8 μεταχειρίσεις: μάρτυρα χωρίς φυτό και μικροπλαστικά, μόνο PLA, μόνο PS, μόνο HDPE, μόνο με το φυτό, καθώς και συνδυασμούς φυτού με PLA, PS και HDPE. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τρεις τύποι μικροπλαστικών είχαν διαφορετικές επιδράσεις στην ποικιλότητα και στη δομή τόσο της βακτηριακής κοινότητας, όσο και της ευκαρυωτικής κοινότητας. Από τα τρία είδη πολυμερών, το HDPE προκάλεσε τις σημαντικότερες αλλαγές στις βακτηριακές και ευκαρυωτικές κοινότητες. Διαπιστώθηκε επίσης ότι τα μικροπλαστικά μείωσαν το pH του εδάφους και ότι οι κοινότητες των βακτηρίων επηρεάστηκαν κυρίως από το pH του εδάφους και την υγρασία. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι τα μικροπλαστικά ενδέχεται να

ενισχύουν την ανάπτυξη βακτηρίων που σχετίζονται με τον κύκλο του αζώτου, καθώς και ορισμένα παθογόνα των ευκαρυωτικών οργανισμών. Η κοινότητα των βακτηρίων φάνηκε να είναι πιο ευαίσθητη στις περιβαλλοντικές μεταβολές από την ευκαρυωτική κοινότητα. Συνολικά, τα ευρήματα δείχνουν ότι τα μικροπλαστικά αυξάνουν την πολυπλοκότητα του μικροβιακού δικτύου και διαμορφώνουν μικροβιακές κοινότητες που αναπτύσσονται με βάση τη μικροβιακή ποικιλότητα, ενώ η αρνητική τους επίδραση στην ανάπτυξη φυτών μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.

 Effects of variable-sized polyethylene microplastics on soil chemical properties and functions and microbial communities in purple soil - Επίδρασεις μικροπλαστικών πολυαιθυλενίου (PE) διαφορετικού μεγέθους στις χημικές ιδιότητες, τις λειτουργίες και τις μικροβιακές κοινότητες του μωβ εδάφους (Ma et al., 2023)

Σε αυτή τη μελέτη πραγματοποιήθηκε πείραμα επώασης διάρκειας τεσσάρων εβδομάδων με σκοπό την αξιολόγηση της επίδρασης των μικροπλαστικών πολυαιθυλενίου (PE) διαφορετικού μεγέθους στις χημικές ιδιότητες του εδάφους, στις εξωκυτταρικές πολυμερικές ουσίες (EPS), στις ενζυμικές δραστηριότητες και στη μικροβιακή κοινότητα μωβ εδάφους (purple soil). Χρησιμοποιήθηκε έδαφος που συλλέχθηκε από το ανώτερο στρώμα αγρού σε υποτροπικό υγρό κλίμα, καθώς και μικροπλαστικά PE μεγέθους 300μm (Y300) και 600μm (Y600). Η προσθήκη μικροπλαστικών δεν προκάλεσε σημαντικές μεταβολές στον δείκτη ποικιλότητας Shannon. Τα *Proteobacteria* (29,2-30,4%) και τα *Actinobacteria* (23,0-26,8%) αποτελούσαν τα κυρίαρχα φύλα. Οι μεταχειρίσεις Y300 και Y600 μείωσαν τη σχετική αφθονία των *Chloroflexi* κατά 16,2% και 3,89% αντίστοιχα, ενώ η σχετική αφθονία των *Nitrospirae* αυξήθηκε σημαντικά στις μεταχειρίσεις Y300 (κατά 64,7%) και Y600 (κατά 33,8%). Η αύξηση των *Nitrospirae* υποδηλώνει ότι μικρότερα μικροπλαστικά ενδέχεται να ενισχύουν τη δραστηριότητα βακτηρίων που σχετίζονται με την αποδόμηση πολυαιθυλενίου. Τέλος, παρατηρήθηκε πως τα μικροπλαστικά μεγαλύτερου μεγέθους μείωσαν σημαντικά τη σταθερότητα του δικτύου του εδαφικού μικροοικοσυστήματος, κάτι που δείχνει ότι τα μικροπλαστικά μεγαλύτερου μεγέθους προκαλούν περισσότερο στρες στους μικροοργανισμούς σε σχέση με τα μικροπλαστικά μικρότερου μεγέθους. Σε επίπεδο χημικών ιδιοτήτων, τα μικροπλαστικά 300 μm μείωσαν περισσότερο το διαλυτό οργανικό υλικό (DOM), τις EPS και τη δραστηριότητα της N-ακετυλογλυκοζαμινιδάσης (NAG), ενώ αύξησαν την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC) σε σύγκριση με τα μεγαλύτερα σωματίδια (600 μm). Ανάλυση συνύπαρξης μικροοργανισμών έδειξε ότι τα μεγαλύτερα μικροπλαστικά μείωσαν τη σταθερότητα και την πολυπλοκότητα του μικροβιακού δικτύου, υποδηλώνοντας ότι προκαλούν υψηλότερο στρες στις μικροβιακές κοινότητες. Συνολικά, τα μικρότερου μεγέθους μικροπλαστικά PE έδειξαν ισχυρότερες επιδράσεις στις λειτουργίες του εδάφους, ενισχύοντας την ανάπτυξη βακτηρίων ικανών για αποδόμηση πολυαιθυλενίου και επηρεάζοντας κρίσιμες βιοχημικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής EPS και της ενζυμικής δραστηριότητας. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι το μέγεθος των μικροπλαστικών είναι καθοριστικός

παράγοντας που επηρεάζει τόσο τη μικροβιακή οικολογία όσο και τις λειτουργίες του συγκεκριμένου τύπου εδάφους.

 Effect of LDPE microplastics on chemical properties and microbial communities in soil - Επίδραση των μικροπλαστικών LDPE στις χημικές ιδιότητες και μικροβιακές κοινότητες του εδάφους (Palansooriya et al., 2022).

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε η υπόθεση ότι η αύξηση της συγκέντρωσης μικροπλαστικών LDPE, μπορεί να επηρεάσει τις χημικές ιδιότητες του εδάφους και να τροποποιήσει τις μικροβιακές κοινότητες. Το LDPE επιλέχθηκε λόγω της ευρείας χρήσης του σε γεωργικά συστήματα και της πιθανής συσσώρευσής του στο έδαφος. Στόχος ήταν συγκεκριμένα η διερεύνηση των επιδράσεων διαφορετικών συγκεντρώσεων LDPE μικροπλαστικών στις χημικές ιδιότητες του εδάφους, όπως το pH, τα ανταλλάξιμα κατιόντα, τον διαθέσιμο μόλυβδο και φώσφορο, καθώς και στη μικροβιακή ποικιλότητα και αφθονία στο γεωργικό έδαφος. Επιπλέον, εξετάστηκαν οι σχέσεις μεταξύ συγκέντρωσης των μικροπλαστικών, των χημικών ιδιοτήτων του εδάφους και των μικροβιακών ιδιοτήτων. Συλλέχθηκαν δείγματα εδάφους (25g) από αγρό δίπλα σε ιστορικές περιοχές εξόρυξης και προστέθηκαν μικροπλαστικά LDPE σε διαφορετικά ποσοστά (0%, 0,1%, 1%, 3%, 5% και 7% w/w). Τα δείγματα επώαστηκαν για 100 ημέρες στους 25°C και στο 70% της υδατοχωρητικής ικανότητας. Οι μικροβιακές κοινότητες και οι χημικές ιδιότητες του εδάφους αναλύθηκαν την 1η ημέρα και την 100η ημέρα. Μετά από 100 ημέρες, συγκεντρώσεις LDPE $\geq 1\%$ μείωσαν σημαντικά ($p < 0.05$) το pH ενώ αύξησαν την ηλεκτρική αγωγιμότητα, σε σύγκριση με το μάρτυρα. Οι συγκεντρώσεις των ανταλλάξιμων κατιόντων και του διαθέσιμου Pb δεν επηρεάστηκαν από την προσθήκη LDPE. Η αφθονία των *Actinobacteria* αυξήθηκε σταδιακά με την αύξηση της συγκέντρωσης των μικροπλαστικών LDPE, ενώ η αφθονία των *Proteobacteria* μειώθηκε. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η ρύπανση από μικροπλαστικά μπορεί να αλλάξει τη μικροβιακή δομή του εδάφους, με τις μεταβολές να εξαρτώνται από τη συγκέντρωση των μικροπλαστικών.

 Regulatory path for soil microbial communities depends on the type and dose of microplastics - Η ρυθμιστική πορεία των μικροβιακών κοινοτήτων του εδάφους εξαρτάται από το είδος και τη συγκέντρωση των μικροπλαστικών (Oi et al., 2024)

Στόχος της παρούσας μελέτης ήταν να διερευνηθεί πώς διαφορετικοί τύποι μικροπλαστικών, συμβατικών (PE, PVC) και βιοδιασπώμενων (PBS, PHA, PBAT, PPC), καθώς και διαφορετικές δόσεις τους (1 %, 7 % και 28 %), επηρεάζουν τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, καθώς και τη δομή και ποικιλότητα των μικροβιακών κοινοτήτων. Οι ερευνητές υπέθεσαν πως οι επιδράσεις στο εδαφικό περιβάλλον θα εξαρτηθούν περισσότερο από τον τύπο των μικροπλαστικών παρά την συγκέντρωση αυτών, καθώς και ότι τα μικροπλαστικά ρυθμίζουν τις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους μέσω των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους. Το πείραμα διήρκεσε 45 μέρες. Τα

αποτελέσματα έδειξαν ότι τόσο ο τύπος όσο και η συγκέντρωση των μικροπλαστικών μεταβάλλουν σημαντικά βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους του εδάφους, όπως το pH, την ηλεκτρική αγωγιμότητα, τον ολικό και οργανικό άνθρακα (TC, SOC) και τον μικροβιακό άνθρακα (MBC). Τα βιοδιασπώμενα μικροπλαστικά είχαν γενικά ισχυρότερη επίδραση, δημιουργώντας πιο «ενεργή» μικροβιακή οικολογική θέση και εμπλουτίζοντας παράλληλα περισσότερους δυνητικά παθογόνους μικροοργανισμούς σε σύγκριση με τα συμβατικά. Η ποικιλότητα των βακτηρίων και των μυκήτων (δείκτες Shannon και Chao1) βρέθηκε να εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του μικροπλαστικού. Για παράδειγμα, τα μικροπλαστικά PBAT προκάλεσαν σημαντική μείωση της βακτηριακής ποικιλότητας. Αντίθετα, η σύσταση της μικροβιακής κοινότητας ανταποκρίθηκε εντονότερα στη συγκέντρωση των μικροπλαστικών, κάτι που δείχνει ότι υψηλές συγκεντρώσεις μπορούν να μεταβάλλουν δραστικά τη δομή των κοινοτήτων. Το κυρίαρχο βακτηριακό φύλο ήταν τα *Proteobacteria*, ενώ το κυρίαρχο φύλο των μυκήτων ήταν οι *Ascomycota*. Επίσης παρατηρήθηκε πως οι κοινότητες των βακτηρίων επηρεάστηκαν περισσότερο από τις αντίστοιχες των μυκήτων, εύρημα που υποδηλώνει ότι οι βακτηριακές κοινότητες είναι πιο ευαίσθητες στην παρουσία μικροπλαστικών. Η αφθονία των γενών μυκήτων που κυριαρχούσαν αυξήθηκε σημαντικά με την προσθήκη συμβατικών μικροπλαστικών και του βιοδιασπώμενου PPC, υποδεικνύοντας πιθανές προτιμήσεις συγκεκριμένων μυκήτων για τέτοιους τύπους πολυμερών. Συνολικά, η μελέτη κατέδειξε ότι τα μικροπλαστικά, δεν επηρεάζουν μόνο τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, αλλά ρυθμίζουν τη μικροβιακή ποικιλότητα και τη σύσταση των μικροβιακών κοινοτήτων μέσω σύνθετων μηχανισμών, με τα βιοδιασπώμενα μικροπλαστικά να προκαλούν τις εντονότερες επιδράσεις.

 LDPE microplastics affect soil microbial communities and nitrogen cycling - Επιδράσεις των μικροπλαστικών LDPE στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους και τον κύκλο του αζώτου (Rong et al., 2021)

Σκοπός αυτής της μελέτης ήταν να διερευνηθούν οι αλλαγές στην ποικιλότητα των βακτηρίων του εδάφους, στη δομή της μικροβιακής κοινότητας, στα πρότυπα συνύπαρξης των μικροοργανισμών και στην αφθονία λειτουργικών γονιδίων του κύκλου του αζώτου (*nifH*, *amoA*-AOA, *amoA*-AOB, *nirK*, *nirS*), κατά την έκθεση σε μικροπλαστικά LDPE (μέγεθος 150-250μm) για 90 ημέρες. Συμπεριλήφθηκαν τρεις διαφορετικές μεταχειρίσεις: μάρτυρας χωρίς μικροπλαστικά, 2% β/β LDPE και 7% β/β LDPE. Τα μικροπλαστικά προστέθηκαν σε 200g εδάφους (ξηρό βάρος) και αναμίχθηκαν ομοιόμορφα. Στη συνέχεια η επώαση πραγματοποιήθηκε σε αποστειρωμένα δοχεία με πορώδες κάλυμμα, σε ελεγχόμενο περιβάλλον (25±1°C, σκοτάδι, 50% σχετική υγρασία) για 90 ημέρες. Δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν στις ημέρες 7, 15, 30, 60 και 90. Ο δείκτης Shannon έδειξε ότι η ποικιλότητα των βακτηρίων αυξήθηκε σημαντικά στο έδαφος με 2% w/w LDPE την ημέρα 7 και μειώθηκε σημαντικά στο έδαφος με 7% β/β LDPE την ημέρα 60. Το *Actinobacteria* ήταν το κυρίαρχο φύλο σε όλα τα δείγματα, με ποσοστό από 24% μέχρι 47,1%. Η μικρή δόση 2% μικροπλαστικών LDPE προκάλεσε αύξηση των *Proteobacteria*, *Actinobacteria* και *Bacteroidetes* στις ημέρες 7, 30 και 60 αντίστοιχα, ενώ μείωσε τα

Acidobacteria και *Rokubacteria* τις ημέρες 30 και 60 αντίστοιχα. Αντίθετα, η δόση 7% μικροπλαστικών LDPE αύξησε τις σχετικές αναλογίες των *Rokubacteria* την ημέρα 7, *Chloroflexi* την ημέρα 30 και *Actinobacteria* τις ημέρες 30 και 60, ενώ μείωσε τα *Bacteroidetes* και *Gemmatimonadetes* την ημέρα 60. Τα *Chloroflexi*, ικανά να μεταβολίσουν οργανοαλογονίδια και να συμμετέχουν στον κύκλο του χλωρίου, ενδέχεται να επιταχύνουν αυτή τη διεργασία. Αντίθετα, η αναστολή των *Bacteroidetes* υποδηλώνει πιθανή επιβράδυνση του ρυθμού ανοργανοποίησης του άνθρακα στο έδαφος. Η προσθήκη μικροπλαστικών LDPE προκάλεσε παροδική αύξηση της αφθονίας των γονιδίων *nifH*, *amoA*-AOB, *nirK* και *nirS*. Και οι δυο συγκεντρώσεις μικροπλαστικών αύξησαν ελαφρώς την αφθονία των γονιδίων *nifH*, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα μικροπλαστικά LDPE μπορούν να διεγείρουν την ανάπτυξη βακτηρίων που εκφράζουν αυτό το γονίδιο, πιθανώς επειδή λειτουργούν ως επιπρόσθετες πηγές άνθρακα. Η υψηλή συγκέντρωση των μικροπλαστικών (7% β/β LDPE) αύξησε σημαντικά τις σχετικές αφθονίες των *Mycobacterium*, *Gordonia* και *Rhodococcus*, ενώ μείωσε σημαντικά τη σχετική αφθονία του *Azoarcus* σε σύγκριση με το δείγμα του μάρτυρα. Επιπλέον, η προσθήκη μικροπλαστικών LDPE επηρέασε τις αλληλεπιδράσεις των βακτηρίων, μεταβάλλοντας τη δομή των κοινοτήτων νιτροδοποιητικών μικροοργανισμών και τη συνολική πολυπλοκότητα του μικροβιακού δικτύου.

 Effect of conventional and biodegradable microplastics on the soil-soybean system: A perspective on rhizosphere microbial community and soil element cycling - Επίδραση συμβατικών και βιοδιασπώμενων μικροπλαστικών στο σύστημα έδαφος-σόγια: Επισκόπηση της μικροβιακής κοινότητας της ριζόσφαιρας και της ανακύκλωσης των στοιχείων στο έδαφος (Song et al., 2024)

Σκοπός της μελέτης ήταν να διερευνηθούν οι επιδράσεις των συμβατικών (LDPE) και βιοδιασπώμενων μικροπλαστικών (PBAT και PLA) στη μικροβιακή κοινότητα της ριζόσφαιρας και στους κύκλους άνθρακα, αζώτου, φωσφόρου και θείου (C-N-P-S) σε σύστημα εδάφους-σόγιας. Παράλληλα, αξιολογήθηκαν οι αλλαγές στη φυτική ανάπτυξη και στις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, ώστε να διερευνηθούν οι υποκείμενες οικολογικές επιδράσεις διαφορετικών τύπων μικροπλαστικών. Οι ερευνητές υπέθεσαν ότι τα βιοδιασπώμενα PBAT και PLA θα ασκούσαν ισχυρότερη επίδραση στη ριζόσφαιρα από το LDPE, τροποποιώντας σημαντικά τη σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας και ενισχύοντας την αφθονία των λειτουργικών γονιδίων που σχετίζονται με τους κύκλους άνθρακα-αζώτου-φωσφόρου-θείου, επηρεάζοντας την περιεκτικότητα του εδάφους σε θρεπτικά και την ανάπτυξη φυτών. Το πείραμα περιλάμβανε τέσσερις μεταχειρίσεις: έδαφος χωρίς μικροπλαστικά (μάρτυρας), έδαφος με LDPE, έδαφος με PBAT και έδαφος με PLA και διήρκεσε 13 εβδομάδες. Τα μικροπλαστικά PBAT και PLA μείωσαν σημαντικά τη μικροβιακή ποικιλότητα καθώς και τον αριθμό των ειδών στη μικροβιακή κοινότητα της ριζόσφαιρας, ενώ τα LDPE δεν παρουσίασαν σημαντική επίδραση. Όσον αφορά τις λειτουργίες του εδάφους, τα LDPE μείωσαν την αφθονία των περισσότερων λειτουργικών γονιδίων που σχετίζονται με τους κύκλους C-N-P-S, ενώ τα PBAT και PLA την ενίσχυσαν. Τα βιοδιασπώμενα μικροπλαστικά προώθησαν επίσης διαδικασίες

σχετικές με τη σταθεροποίηση και αποδόμηση του άνθρακα στο έδαφος. Η μείωση της αποικιότητας που παρατηρήθηκε στα PBAT και PLA πιθανώς αντανάκλα επιλεκτική πίεση στη μικροβιακή κοινότητα, με επικράτηση οργανισμών που μπορούν να αξιοποιήσουν πιο αποτελεσματικά τις αλλαγές στο μικροπεριβάλλον της ριζόσφαιρας. Τα μικροπλαστικά PBAT και PLA οδήγησαν σε αύξηση των κοπιωτροφικών *Proteobacteria* και παράλληλα μείωσαν ολιγοτροφικά φύλα όπως τα *Verrucomicrobiota* και *Gemmatimonadota*. Αντίθετα, το LDPE προώθησε ολιγοτροφικά βακτήρια και είχε ηπιότερη συνολική επίδραση στη μικροβιακή κοινότητα. Η ενίσχυση των κοπιωτροφικών βακτηρίων στα PBAT και PLA συνοδεύτηκε από υψηλότερη μεταβολική δραστηριότητα, η οποία διευκόλυνε την αποδόμηση οργανικής ύλης και την απελευθέρωση θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος.

 Microplastics shape microbial communities affecting soil organic matter decomposition in paddy soil – Τα μικροπλαστικά μορφοποιούν μικροβιακές κοινότητες επηρεάζοντας την αποσύνθεση εδαφικής οργανικής ύλης σε έδαφος ορυζώνα (Xiao et al., 2022)

Η παρούσα μελέτη εξέτασε πώς η αποσύνθεση της SOM ρυθμίζεται από εδαφικούς μικροοργανισμούς υπό την ύπαρξη μικροπλαστικών σε έδαφος ορυζώνα. Οι ερευνητές υπέθεσαν πως η ανάπτυξη συγκεκριμένων ταξινομικών ομάδων μικροβίων που επιταχύνουν την αποσύνθεση της SOM θα διευκολυνθεί και η αποσύνθεση θα προωθηθεί με την αύξηση κινητικότητας των μικροβιακών κοινοτήτων. Συλλέχθηκε έδαφος από υποτροπικό ορυζώνα και αναμίχθηκε με μικροπλαστικά PE υπερύψηλου μοριακού βάρους και καλάμια ρυζιού μετά από προ-επώαση δύο εβδομάδων. Συμπεριλήφθηκαν τρεις μεταχειρίσεις: χωρίς μικροπλαστικά, 0,01% w/w μικροπλαστικά (χαμηλό) και 1% w/w μικροπλαστικά (υψηλό), καθώς και τέσσερις υπο-μεταχειρίσεις: μόνο έδαφος, έδαφος και γλυκόζη, έδαφος και καλάμι, έδαφος με καλάμι και γλυκόζη. Τοποθετήθηκαν επίσης φιαλίδια με NaOH για να γίνει σύλληψη του CO₂ που πιθανώς δημιουργείται, και επώαστηκαν για 100 ημέρες στους 25 °C. Αποτελέσματα έδειξαν πως τα μικροπλαστικά άλλαξαν τον ρυθμό εκροής του CO₂ σε σύντομο χρονικό διάστημα κατά την επώαση. Στις μεταχειρίσεις με υψηλή ποσότητα μικροπλαστικών παρατηρήθηκε μικρή επίδραση στις εκπομπές του CO₂. Η προσθήκη μικροπλαστικών στο έδαφος μείωσε τον δείκτη Shannon την 3^η μέρα, αλλά τον αύξησε την 15^η μέρα, κάτι που υπονοεί πως οι μικροοργανισμοί μπορούν να προσαρμοστούν στο νέο περιβάλλον υπό την παρουσία των μικροπλαστικών μετά από ένα χρονικό διάστημα. Επιπροσθέτως, προωθήθηκε η αφθονία ορισμένων αερόβιων χημειοτερότροφων μικροβιακών ομάδων κατά τις ημέρες 15 και 100, ενισχύοντας τη μικροβιακή αναπνοή. Τα μικροπλαστικά επηρέασαν την ανάπτυξη και τη λειτουργία των μικροβίων που σχετίζονται με την αποσύνθεση της SOM και επιτάχυναν την ανάπτυξη της βιομάζας των κοπιωτροφικών βακτηρίων r-στρατηγικής (δηλαδή βακτηρίων που παρουσία θρεπτικών υποστρωμάτων αποφέρουν πολλούς απογόνους εις βάρος της γονικής φροντίδας και παροχών).

✚ **LDPE microplastics affect soil microbial community and form a unique plastisphere on microplastics - Τα μικροπλαστικά LDPE επηρεάζουν τη μικροβιακή κοινότητα του εδάφους και δημιουργούν μια ιδιαίτερη πλαστισφαίρα στα μικροπλαστικά (Ya et al., 2022)**

Στην παρούσα έρευνα μελετήθηκαν οι επιδράσεις συγκεντρώσεων 1% w/w και 5% w/w μικροπλαστικών LDPE στις φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους, την ενζυμική δραστηριότητα και τα χαρακτηριστικά της μικροβιακής κοινότητας. Ερευνήθηκαν οι πιθανές επιδράσεις των μικροπλαστικών PE στη λειτουργία του εδάφους και τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών μέσω ανάλυσης των φυσικοχημικών ιδιοτήτων, της ενζυμικής δραστηριότητας και της μικροβιακής σύστασης. Επιπλέον, μελετήθηκε η μικροβιακή κοινότητα που εμπλουτίζεται στην επιφάνεια των μικροπλαστικών και εντοπίστηκαν οι βασικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη μικροβιακή σύσταση του εδάφους. Συμπεριλήφθηκαν τρεις μεταχειρίσεις: μάρτυρας χωρίς προσθήκη LDPE, 1% w/w LDPE και 5% w/w LDPE στο έδαφος, οι οποίες αναλύθηκαν στις ημέρες 0, 7, 14, 21, 28 και 35. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη μικροπλαστικών LDPE είχε μικρή επίδραση στην α-ποικιλότητα της κοινότητας των βακτηρίων του εδάφους και στις δύο συγκεντρώσεις. Ωστόσο, τέσσερα γένη βακτηρίων παρουσίασαν αλλαγές στη σχετική τους αφθονία μετά την προσθήκη μικροπλαστικών και περιλάμβαναν τα *Arhtrorobacter*, *Bacillus*, *Blastococcus* και *Nocardia*. Τα μικροπλαστικά PE μπορεί να επηρεάσουν τη διαθέσιμη περιεκτικότητα σε φώσφορο στα εδάφη λόγω των επιδράσεών τους σε αυτά τα βακτήρια. Η υψηλότερη συγκέντρωση μικροπλαστικών (5% w/w) μείωσε σημαντικά τη σχετική αφθονία των *Gemmatimonadaceae* και *Blastococcus*. Στην επιφάνεια των μικροπλαστικών παρατηρήθηκε σημαντικός εμπλουτισμός του φύλου *Actinobacteria*. Επιπλέον, τα *Nocardia*, *Aeromicrobium*, *Amycolatopsis* και *Rhodococcus* εμπλουτίστηκαν και σχημάτισαν μια ιδιαίτερη 'πλαστισφαίρα'. Αυτά τα βακτήρια σχετίζονται με την αποδόμηση πλαστικών, αλλά και με τη μετάδοση ασθνευιών και γονιδίων αντοχής στα αντιβιοτικά.

✚ **Microplastics abundance associated with farmland use types and the impact on soil microbial communities: A case study in Southern China - Αφθονία μικροπλαστικών σε σχέση με τους τύπους χρήσης γεωργικής γης και η επίδρασή τους στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους: Μελέτη περίπτωσης στην νότια Κίνα (Ye et al., 2024)**

Στόχος της μελέτης ήταν να διερευνηθεί πώς διαφορετικοί τύποι γεωργικής χρήσης (οπωρώνες, ορυζώνες και καλλιέργειες λαχανικών) επηρεάζουν την αφθονία, το είδος και τα χαρακτηριστικά των μικροπλαστικών στο έδαφος, καθώς και η σχέση των μικροπλαστικών με τη δομή των μικροβιακών κοινοτήτων. Συνολικά συλλέχθηκαν 78 δείγματα εδάφους, από 26 σημεία δειγματοληψίας σε μικρή ακτίνα (< 5 km), ώστε οι θέσεις να μοιράζονται παρόμοιες υδρολογικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες και το πείραμα διήρκεσε 35 ημέρες. Η αφθονία των μικροπλαστικών κυμάνθηκε από 528 έως 39.864 τεμάχια/kg. Συνολικά ταυτοποιήθηκαν 32 τύποι πολυμερών, με συχνότερα τα PET

(28,8%), PVC (13,5%) και FKM (9,5%). Τα μικροπλαστικά ήταν κυρίως μικρού μεγέθους (0–30 μm), με τη μεγαλύτερη αφθονία να παρατηρείται στους οπωρώνες, ακολουθούμενους από τους ορυζώνες και τα χωράφια λαχανικών. Πάνω από 11 φύλα αναγνωρίστηκαν στις μικροβιακές κοινότητες και των εδαφών και των μικροπλαστικών χρησιμοποιώντας την αλληλούχιση με βάση το γονίδιο *16S rRNA*. Το κυρίαρχο φύλο στα δείγματα του εδάφους και στα μικροπλαστικά ήταν τα *Pseudomonadota*, σε ποσοστό 34,73% και 45,11% αντίστοιχα. Τα μικροπλαστικά στο έδαφος χρησίμευσαν ως ιδιαίτερο ενδιαίτημα (πλαστισφαίρα), κάτι που άλλαξε τη δομή των μικροβιακών κοινοτήτων. Επιλέχθηκαν έξι είδη μικροπλαστικών που είχαν τη μεγαλύτερη αφθονία στα εδαφικά δείγματα (PET, PVC, FKM, ACR, PU, EVA) για να εξετασθεί η σχέση τους με τη μικροβιακή κοινότητα. Από τα 20 γένη με την περισσότερη αφθονία, τα 13 έδειξαν σημαντικές θετικές συσχετίσεις με τα μικροπλαστικά, υποδεικνύοντας ότι αυτά τα γένη μπορεί να χρησιμοποιήσουν τα μικροπλαστικά ως πηγή θρεπτικών συστατικών για να προάγουν τη μικροβιακή αύξηση. Η σχετική αφθονία των φύλων *Pseudomonadota* και *Cyanobacteriota* αυξήθηκε σημαντικά. Έξι γένη παρουσίασαν σημαντικές αρνητικές συσχετίσεις με τα μικροπλαστικά, υποδεικνύοντας πιθανή αναστολή της ανάπτυξής τους λόγω της παρουσίας μικροπλαστικών. Συνολικά, η μικροβιακή κοινότητα που αναπτύχθηκε πάνω στα μικροπλαστικά εμφάνισε μικρότερη χωρική διακύμανση και διαφοροποίηση σε σχέση με αυτήν του εδάφους, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα μικροπλαστικά λειτουργούν ως σταθερό υπόστρωμα για μικροβιακή αποίκηση. Επιπλέον, προέκυψαν ενδείξεις ότι η παρουσία μικροπλαστικών σχετίζεται με αύξηση μικροοργανισμών που φέρουν γονίδια βιοαποδόμησης ξενοβιοτικών ουσιών, υποδηλώνοντας πιθανές επιδράσεις στις οικολογικές λειτουργίες του εδάφους. Συνολικά, η μελέτη δείχνει ότι οι διαφορετικοί τύποι γεωργικής χρήσης επηρεάζουν την κατανομή και το είδος των μικροπλαστικών στο έδαφος, ενώ τα μικροπλαστικά συμβάλλουν στη διαμόρφωση εξειδικευμένων μικροβιακών κοινοτήτων με πιθανές οικολογικές συνέπειες.

 The effects of three different microplastics on enzyme activities and microbial communities in soil - Οι επιπτώσεις τριών διαφορετικών μικροπλαστικών στις ενζυμικές δραστηριότητες και μικροβιακές κοινότητες στο έδαφος (Yi et al., 2020)

Στη συγκεκριμένη μελέτη εξετάστηκαν οι επιδράσεις τριών τύπων μικροπλαστικών (μεμβρανώδες PE, ινώδες PP και μικροσφαιρίδια PP) στη μικροβιακή κοινότητα και στη λειτουργική δραστηριότητα δύο τύπων εδαφούς (αμμώδες και αργιλώδες) υπό αερόβιες συνθήκες. Τα δείγματα εδάφους επώαστηκαν στους 20 °C για 29 ημέρες και οι συγκεντρώσεις των μικροπλαστικών ήταν 20 mg/g για το PE και το ινώδες PP και 2 mg/g για τα μικροσφαιρίδια PP. Η μικροβιακή λειτουργία μετρήθηκε στις ημέρες 14 και 29 ημέρες με τη μέθοδο FDA-H (Fluorescein Diacetate Hydrolase), ενώ η ποικιλότητα των προκαρυωτικών μικροοργανισμών μελετήθηκε με αλληλούχιση με βάση το γονίδιο *16S rRNA*. Συνολικά εντοπίστηκαν περισσότερα από 10 φύλα μικροοργανισμών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρουσία μικροπλαστικών οδήγησε σε μείωση της συνολικής μικροβιακής λειτουργίας στις ημέρες 14 και 29, με το ινώδες PP να προκαλεί την ισχυρότερη αναστολή στην 29η ημέρα. Η προσθήκη μικροπλαστικών αύξησε την α-

ποικιλότητα των βακτηρίων, ενώ η β-ποικιλότητα έδειξε σαφή διαφοροποίηση των κοινοτήτων που αναπτύχθηκαν πάνω στις επιφάνειες των μικροπλαστικών σε σχέση με το χύδην έδαφος, επιβεβαιώνοντας ότι τα μικροπλαστικά δρουν ως νέοι μικροβιακοί μικρο-οικότοποι. Η δραστηριότητα της αφυδρογονάσης μειώθηκε την 14η ημέρα σε όλα τα δείγματα με μικροπλαστικά, αλλά στην 29η ημέρα παρουσίασε αύξηση στα δείγματα με PE και μικροσφαιρίδια PP, στοιχείο που αποδόθηκε σε πιθανή μικροβιακή προσαρμογή. Παρόμοια πρότυπα παρατηρήθηκαν και στη φωσφατάση, όπου το ινώδες PP προκάλεσε τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Επιπλέον, τα μικροσφαιρίδια PP, παρά την πολύ χαμηλότερη συγκέντρωσή τους, προκάλεσαν συνεχή και σταθερή αναστολή της ενζυμικής δραστηριότητας (ουρεάση, αφυδρογονάση και φωσφατάση), χωρίς τα προσωρινά αυξητικά μοτίβα που καταγράφηκαν στα PE και ινώδη PP. Το κυρίαρχο φύλο σε όλα τα δείγματα ήταν τα *Proteobacteria* (~ 50% της συνολικής αφθονίας). Σε δείγματα με μεμβρανώδες PE και ινώδες PP, παρατηρήθηκε αύξηση του γένους *Gemmatimonas*, το οποίο σχετίζεται με τη διαλυτοποίηση φωσφόρου. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει πιθανές επιπτώσεις στον κύκλο του φωσφόρου, ιδιαίτερα σε εδάφη που ήδη εμφανίζουν περιορισμένη διαθεσιμότητα φωσφορικών. Παράλληλα, τα μικροσφαιρίδια PP αύξησαν τα *Thaumarchaeota*, και ιδιαίτερα το *Candidatus Nitrososphaera*, ενός γένους-κλειδί στη νιτροποίηση, το οποίο οξειδώνει αμμώνιο ή ουρία. Το αποτέλεσμα αυτό υποδεικνύει πιθανές επιδράσεις των μικροπλαστικών και στον κύκλο του αζώτου, σε συμφωνία με τη μείωση της δραστηριότητας της ουρεάσης κατά τη διάρκεια της επώασης. Επιπλέον, η ανάλυση της πλαστισφαίρας έδειξε σημαντικό εμπλουτισμό σε *Actinobacteria*, κυρίως για γένη όπως τα *Streptomyces*, *Mycobacterium*, *Nocardia*, *Aeromicrobium* και *Arthrobacter*. Πολλά από αυτά τα γένη έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία ως ικανά να αποδομήσουν πολυμερή όπως το PE, ενώ κάποια σχετίζονται με παθογένεια ή ανθεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα. Τα ευρήματα αυτά ενισχύουν την άποψη ότι τα μικροπλαστικά, λόγω της ικανότητάς τους να προσροφούν ρύπους (βαρέα μέταλλα, οργανικούς ρύπους, αντιβιοτικά), ενδέχεται να λειτουργούν ως φορείς μεταφοράς μικροβιακών κοινοτήτων με ενισχυμένη ανθεκτικότητα ή εξειδικευμένες μεταβολικές δυνατότητες. Συνολικά, η παρουσία των μικροπλαστικών μείωσε την ανθεκτικότητα των μικροβιακών κοινοτήτων και επηρέασε κρίσιμες μικροβιακές διεργασίες που σχετίζονται με τους κύκλους του αζώτου και του φωσφόρου, υποδεικνύοντας ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να επιφέρουν πολυεπίπεδες αλλαγές στη δομή και λειτουργία των εδαφικών μικροβιωμάτων.

 Microplastics increase soil pH and decrease microbial activities as a function of microplastics shape, polymer type and exposure time – Τα μικροπλαστικά αυξάνουν το εδαφικό pH και μειώνουν μικροβιακές δραστηριότητες ως αποτέλεσμα του σχήματος των μικροπλαστικών, του τύπου του πολυμερούς και του χρόνου έκθεσης (Zhao et al., 2021)

Στην παρούσα έρευνα διεξήχθη εργαστηριακό πείραμα στο οποίο εξετάστηκαν τέσσερα διαφορετικά σχήματα μικροπλαστικών (ίνα, μεμβράνη, αφρός και θραύσμα), με κάθε σχήμα να αντιπροσωπεύεται από τρία διαφορετικά είδη πολυμερών. Στόχος της μελέτης ήταν η αξιολόγηση των επιδράσεων των μικροπλαστικών στο pH του εδάφους και στην μικροβιακή δραστηριότητα. Οι ερευνητές υπέθεσαν ότι το pH, η μικροβιακή αναπνοή του εδάφους και οι ενζυμικές δραστηριότητες των μικροοργανισμών ενδέχεται να επηρεάζονται από την προσθήκη μικροπλαστικών, ανάλογα με το σχήμα και το είδος του πολυμερούς. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση των μικροπλαστικών στη δραστηριότητα τεσσάρων εδαφικών ενζύμων: της όξινης φωσφατάσης (acid phosphatase) η οποία καταλύει την υδρόλυση εστέρων φωσφόρου σε όξινα περιβάλλοντα, της β-D-γλυκοσιδάσης (β-D-glucosidase), που συμμετέχει στην ολοκλήρωση της υδρόλυσης κυτταρίνης σε γλυκόζη, της N-ακέτυλο-β-γλυκοζαμινιδάσης (N-acetyl-β-glycosaminidase, NAG), η οποία διασπά γλυκοζιτικούς δεσμούς αμινοσακχάρων και σχετίζεται με τον κύκλο του αζώτου και της cellobiosidase, η οποία καταλύει τη διάσπαση της κυτταρίνης σε κυτταροβιόζη, συμβάλλοντας στη μικροβιακή αποδόμηση της οργανικής ύλης. Επιπλέον εξετάστηκε η επίδραση του χρόνου έκθεσης στα μικροπλαστικά κατά τη διάρκεια βραχυπρόθεσμης επώασης. Για τον σκοπό αυτό, συλλέχθηκε αργιλόαμμώδες έδαφος από ξηρό λιβάδι, το οποίο αναμίχθηκε με δώδεκα διαφορετικά δευτερογενή μικροπλαστικά τεσσάρων σχημάτων και οκτώ ειδών πολυμερών: PA, PC, PE, PES, PET, PP, PS και PU. Η αναλογία ανάμειξης των μικροπλαστικών ήταν 0,4% β/β (w/w), ώστε να προσομοιωθούν συνθήκες υψηλής ρύπανσης μικροπλαστικών και τα δείγματα επώαστηκαν στους 20 °C για διάστημα 31 ημερών. Δείγματα συλλέχθηκαν στις ημέρες 3, 11 και 31 με σκοπό τη μέτρηση του pH, της μικροβιακής αναπνοής και της ενζυμικής δραστηριότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το εδαφικό pH επηρεάστηκε από το σχήμα, το είδος του πολυμερούς και τη διάρκεια της επώασης, με αύξηση των τιμών pH να παρατηρείται κυρίως παρουσία αφρών και θραυσμάτων. Η μικροβιακή αναπνοή δεν παρουσίασε σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφορετικών σχημάτων μικροπλαστικών, ωστόσο μειώθηκε συνολικά με την προσθήκη των μικροπλαστικών. Οι δραστηριότητες των περισσότερων ενζύμων περιορίστηκαν, αν και οι αφροί οδήγησαν σε αύξηση ορισμένων ενζυμικών δραστηριοτήτων. Ο αφρός PE συνδέθηκε με τη μεγαλύτερη αύξηση της μικροβιακής αναπνοής, αν και οι ενζυμικές δραστηριότητες παρουσίασαν σταδιακή μείωση με την πάροδο του χρόνου. Η δραστηριότητα της όξινης φωσφατάσης δεν επηρεάστηκε σημαντικά, ενώ η β-D-γλυκοσιδάση μειώθηκε κυρίως παρουσία αφρών. Η cellobiosidase παρουσίασε μειωμένη δραστηριότητα σε δείγματα με ίνες, μεμβράνες και αφρούς, ενώ η N-ακέτυλο-β-γλυκοζαμινιδάση μειώθηκε κυρίως παρουσία ινών και θραυσμάτων.

 The microplastisphere: Biodegradable microplastics addition alters soil microbial community structure and function - Η μικροπλαστισφαίρα: Η προσθήκη βιοδιασπώμενων μικροπλαστικών μεταβάλλει τη δομή και τη λειτουργία της μικροβιακής κοινότητας του εδάφους (Zhou et al., 2021)

Στόχοι της συγκεκριμένης μελέτης ήταν ο εντοπισμός μικροβιακών hotspots *in situ* σε έδαφος που εμπλουτίστηκε με PHBV, καθώς και η διερεύνηση της επίδρασης των βιοδιασπώμενων μικροπλαστικών στη μικροβιακή αύξηση, την κινητική των εξωενζύμων και τη δομή της βακτηριακής κοινότητας στη μικροπλαστισφαίρα, στη ριζόσφαιρα και στο χύδην έδαφος. Οι ερευνητές υπέθεσαν ότι ο εύκολα διαθέσιμος άνθρακας του PHBV θα επιφέρει έντονες μεταβολές στην βακτηριακή κοινότητα και ότι η μικροπλαστισφαίρα θα λειτουργήσει ως ζώνη υψηλής μικροβιακής αύξησης και ενζυμικής δραστηριότητας σε σύγκριση με τα υπόλοιπα εδαφικά διαμερίσματα. Το έδαφος που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από πειραματικό αγρό χωρίς ιστορικό πλαστικής ρύπανσης. Για την πειραματική διάταξη, 400g εδάφους αναμίχθηκαν με PHBV και το μίγμα τοποθετήθηκε σε ριζόκοντα. Μετά από περίοδο επώασης μίας εβδομάδας, σπάρθηκαν σπόροι σιταριού και τα ριζόκοντα διατηρήθηκαν σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκηπίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προσθήκη PHBV οδήγησε σε έντονη αύξηση της μικροβιακής βιομάζας, της αναπνοής και της εξωενζυμικής δραστηριότητας. Στη μικροπλαστισφαίρα, η βασική αναπνοή και η αναπνοή ανάπτυξης ήταν 10–12 φορές υψηλότερες σε σύγκριση με τη ριζόσφαιρα, ενώ το χύδην έδαφος επηρεάστηκε σε πολύ μικρότερο βαθμό. Η μικροβιακή βιομάζα ήταν επίσης σημαντικά αυξημένη στη μικροπλαστισφαίρα, γεγονός που υποδηλώνει επιταχυνόμενη κυκλοφορία άνθρακα και θρεπτικών στοιχείων. Παρά το γεγονός ότι ο μέγιστος ειδικός ρυθμός ανάπτυξης μειώθηκε κατά 22% στη μικροπλαστισφαίρα σε σύγκριση με το χύδην έδαφος, παρατηρήθηκε εξαπλάσια αύξηση της ενεργής μικροβιακής βιομάζας και σημαντικά μικρότερη φάση υστέρησης. Το πρότυπο αυτό υποδηλώνει μετατόπιση της μικροβιακής κοινότητας προς στρατηγικές ανάπτυξης προσαρμοσμένες σε περιβάλλοντα πλούσια σε διαθέσιμο άνθρακα, με αυξημένη αποδοτικότητα στη χρήση πόρων (K-στρατηγική). Η σύσταση της κοινότητας των βακτηρίων μεταβλήθηκε σημαντικά μετά την προσθήκη PHBV. Παρατηρήθηκε αύξηση της αφθονίας των *Actinobacteria* και *Proteobacteria*, ενώ τα *Firmicutes* παρουσίασαν μείωση. Σε επίπεδο οικογενειών, το PHBV αύξησε την αφθονία των *Chitinophagaceae*, *Comamonadaceae* και *Oxalobacteraceae*, ενώ μείωσε τις *Planococcaceae*, *Xanthomonadaceae* και *Bacillaceae*. Συνολικά, η μελέτη καταδεικνύει ότι το PHBV δημιουργεί εντοπισμένα μικροβιακά hotspots με αυξημένη μικροβιακή δραστηριότητα και ενισχυμένη κυκλοφορία άνθρακα και θρεπτικών στοιχείων, υποδεικνύοντας ότι τα βιοδιασπώμενα μικροπλαστικά μπορούν να επιφέρουν ουσιαστικές μεταβολές στη λειτουργία του εδάφους και στις βιογεωχημικές διεργασίες του.

 Microplastic particles alter wheat rhizosphere soil microbial community composition and function - Τα σωματίδια μικροπλαστικών μεταβάλλουν τη σύσταση και τη λειτουργία της μικροβιακής κοινότητας του εδάφους της ριζόσφαιρας του σιταριού (Zhu et al., 2022)

Στη μελέτη αυτή συλλέχθηκε έδαφος, στο οποίο προστέθηκαν τρεις τύποι μικροπλαστικών (PVC, LDPE, και PS), με στόχο τη διερεύνηση των επιδράσεών τους στην ποικιλότητα, τη δομή και τη λειτουργία των βακτηριακών κοινοτήτων της ριζόσφαιρας του σιταριού. Εξετάστηκαν τρεις πειραματικές μεταχειρίσεις, κάθε μία με διαφορετικό είδος μικροπλαστικών σε συγκέντρωση 2% β/β (w/w). Κάθε γλάστρα περιείχε 500g έδαφος, στο οποίο φυτεύτηκαν 20 σπόροι σιταριού. Οι γλάστρες τοποθετήθηκαν σε κλιματικό θάλαμο με θερμοκρασίες 25-20°C (πρωί-βράδυ) και σχετική υγρασία 60% για 15 μέρες. Συνολικά ταυτοποιήθηκαν 15 φύλα και 159 γένη βακτηρίων. Τα κυρίαρχα φύλα ήταν τα *Proteobacteria* (42.7–52.1%), *Bacteroidetes* (8.6–20.1%), *Acidobacteria* (6.5–8.1%), *Actinobacteria* (5.4–9.0%), *Patescibacteria* (4.6–11.9%) και *Gemmatimonadetes* (2.2–4.0%). Σε επίπεδο γένους κυριάρχησαν τα *Lysobacter* (4.4–5.7%), *Sphingomonas* (3.8–5.8%), *Bdellovibrio* (2.3–4.0%), *Massilia* (2.3–3.8%), *Thermomonas* (2.2–3.2%), *Altererythrobacter* (2.0–3.0%), *Flavisolibacter* (1.2–4.7%), *Ponitibacter* (1.4–2.7%) και *Flavihumibacter* (0.8–2.6%). Ορισμένα φύλα και γένη που σχετίζονται με την αποδόμηση ρύπων παρουσίασαν σημαντική αύξηση, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα μικροπλαστικά με διαφορετικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά μπορούν να ενεργοποιούν διαφορετικές οδούς βιοαποδόμησης. Σε σύγκριση με τον μάρτυρα, η προσθήκη μικροπλαστικών LDPE οδήγησε σε μείωση της σχετικής αφθονίας των *Proteobacteria*, *Acidobacteria*, *Actinobacteria* και *Gemmatimonadetes*, ενώ αύξησε τα *Bacteroidetes* και *Patescibacteria*. Τα μικροπλαστικά PVC προκάλεσαν αύξηση μόνο των *Proteobacteria* και μείωση των υπόλοιπων φύλων. Αντίθετα, τα μικροπλαστικά PS αύξησαν τα *Proteobacteria*, *Actinobacteria* και *Gemmatimonadetes*, ενώ μείωσαν τα *Bacteroidetes*, *Acidobacteria* και *Patescibacteria*. Σε λειτουργικό επίπεδο, βάσει προβλεπόμενης γονιδιακής λειτουργίας από την ανάλυση *16S rRNA*, τα μικροπλαστικά PS συσχετίστηκαν με μείωση της προβλεπόμενης μεταβολικής δυναμικής της μικροβιακής κοινότητας, καθώς και λειτουργιών που σχετίζονται με τον γενετικό και κυτταρικό μεταβολισμό. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει συνολική μείωση της λειτουργικής ικανότητας της βακτηριακής κοινότητας της ριζόσφαιρας. Αντίθετα, τα μικροπλαστικά LDPE και PVC ενίσχυσαν συγκεκριμένες μεταβολικές λειτουργίες, με τα PVC να αυξάνουν ιδιαίτερα τις διεργασίες βιοαποδόμησης και μεταβολισμού. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι ορισμένα βακτήρια ενδέχεται να αξιοποιούν τα μικροπλαστικά ή τα προϊόντα αποδόμησής τους ως πηγή άνθρακα. Παράλληλα, τα μικροπλαστικά PVC ενεργοποίησαν λειτουργικές αποκρίσεις που σχετίζονται με τη μεταφορά μέσω κυτταρικών μεμβρανών, συμβάλλοντας στη διατήρηση της κυτταρικής ομοιόστασης και στην αύξηση της βακτηριακής ποικιλότητας.

Πίνακας 4. Συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των ερευνών.

Τύπος μικροπλαστικού	Παράγοντας επίδρασης	Φυσικοχημικές επιδράσεις στο έδαφος	Επιδράσεις στις μικροβιακές κοινότητες	Πηγή
PE, PLA	Είδος	Μείωση της σταθερότητας εδαφικών συσσωματωμάτων	Αύξηση της σχετικής αφθονίας των <i>Actinobacteria</i> και <i>Chloroflexi</i> , μείωση των <i>Proteobacteria</i> , ενίσχυση του ανταγωνισμού στα μικροσυσσωματώματα και αύξηση της πολυπλοκότητας των μικροβιακών δικτύων (εντονότερη επίδραση στα μικροπλαστικά PE)	Han et al., 2024
PLA, PS, HDPE	Είδος	Μείωση του εδαφικού pH	Μεταβολές στη δομή και την ποικιλότητα των βακτηριακών και ευκαρυωτικών κοινοτήτων, με τις βακτηριακές κοινότητες να εμφανίζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στις περιβαλλοντικές μεταβολές, το HDPE προκάλεσε τις εντονότερες αλλαγές	Li & Xiao, 2023
PE (300–600 μm)	Μέγεθος	Μείωση της διαλυτής οργανικής ύλης (DOM) και αύξηση της ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων (CEC)	Μείωση των εξωκυτταρικών πολυμερικών ουσιών (EPS) και της δραστηριότητας της N-ακετυλογλυκοζαμινιδάσης (NAG), μεταβολές στη μικροβιακή σύσταση με αύξηση της σχετικής αφθονίας των <i>Nitrospirae</i> και μείωση των <i>Chloroflexi</i> , καθώς και μείωση της σταθερότητας και της πολυπλοκότητας του μικροβιακού δικτύου, με εντονότερη αποσταθεροποίηση του μικροβιακού δικτύου στα μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια (600 μm)	Ma et al., 2023
LDPE	Συγκέντρωση	Μείωση του εδαφικού pH και αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε συγκεντρώσεις ίσες ή μεγαλύτερες του 1% β/β	Μεταβολές στη μικροβιακή δομή με αύξηση της σχετικής αφθονίας των <i>Actinobacteria</i> και μείωση των <i>Proteobacteria</i> , με τις επιδράσεις να	Palansooriya et al., 2022

			εξαρτώνται από τη συγκέντρωση των μικροπλαστικών	
Συμβατικά & βιοδιασπώμενα (PE, PVC, PBS, PHA, PBAT, PPC)	Είδος και συγκέντρωση	Μεταβολές βασικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους, συμπεριλαμβανομένων του pH, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, του ολικού και οργανικού άνθρακα και του μικροβιακού άνθρακα	Η μικροβιακή ποικιλότητα επηρεάστηκε κυρίως από τον τύπο του μικροπλαστικού, ενώ η σύσταση των μικροβιακών κοινοτήτων ανταποκρίθηκε εντονότερα στη συγκέντρωση, τα βιοδιασπώμενα μικροπλαστικά προκάλεσαν γενικά ισχυρότερες μεταβολές στις κοινότητες των βακτηρίων σε σύγκριση με τα συμβατικά	Qi et al., 2024
LDPE (2%–7% β/β)	Συγκέντρωση	Δεν αναφέρθηκαν άμεσες μεταβολές σε βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους	Η χαμηλότερη συγκέντρωση (2% β/β) οδήγησε σε παροδική αύξηση της βακτηριακής ποικιλότητας και της αφθονίας λειτουργικών γονιδίων του κύκλου του αζώτου, ενώ η υψηλότερη συγκέντρωση (7% β/β) προκάλεσε μείωση της ποικιλότητας, μεταβολές στη σχετική αφθονία βασικών βακτηριακών φύλων και αναδιάρθρωση των μικροβιακών δικτύων και των κοινοτήτων νιτροδοποιητικών μικροοργανισμών	Rong et al., 2021
LDPE	Είδος	Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στις βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους	Μείωση της αφθονίας των περισσότερων λειτουργικών γονιδίων που σχετίζονται με τους κύκλους άνθρακα, αζώτου, φωσφόρου και θείου και επικράτηση ολιγοτροφικών βακτηρίων στη μικροβιακή κοινότητα της ριζόσφαιρας	Song et al., 2024
PBAT, PLA	Είδος		Μείωση της α-ποικιλότητας και του αριθμού ειδών στη μικροβιακή κοινότητα της ριζόσφαιρας, αύξηση κοπιωτροφικών βακτηρίων, ενίσχυση της μεταβολικής δραστηριότητας και των λειτουργικών γονιδίων που σχετίζονται με τους κύκλους C–N–P–S	
PE (υπερύψηλου μοριακού βάρους)	Παρουσία	Δεν εξετάστηκαν φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους	Παροδική μείωση του δείκτη Shannon στα αρχικά στάδια, ακολουθούμενη από	Xiao et al., 2022

			αύξηση σε μεταγενέστερο χρόνο, ενίσχυση της μικροβιακής αναπνοής, αύξηση της αφθονίας αερόβιων χημειοετερότροφων και κοπιωτροφικών βακτηρίων r-στρατηγικής που σχετίζονται με την αποδόμηση της εδαφικής οργανικής ύλης	
LDPE (1–5% β/β)	Συγκέντρωση	Δεν εξετάστηκαν φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους	Μικρές αλλαγές στην α-ποικιλότητα της βακτηριακής κοινότητας του εδάφους, μεταβολές στη σχετική αφθονία συγκεκριμένων γενών (<i>Arthrobacter</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Blastococcus</i> , <i>Nocardia</i>), μείωση της αφθονίας των <i>Gemmatimonadaceae</i> και <i>Blastococcus</i> στη συγκέντρωση 5% β/β, καθώς και έντονος εμπλουτισμός <i>Actinobacteria</i> και εξειδικευμένων γενών (<i>Nocardia</i> , <i>Aeromicrobium</i> , <i>Amycolatopsis</i> , <i>Rhodococcus</i>) στην επιφάνεια των μικροπλαστικών, οδηγώντας στον σχηματισμό διακριτής πλαστισφαίρας	Ya et al., 2022
Διάφορα μικροπλαστικά (PET, PVC, FKM, ACR, PU, EVA)	Παρουσία	Διαφοροποίηση της αφθονίας, του μεγέθους και του τύπου των μικροπλαστικών στο έδαφος ανάλογα με τη γεωργική χρήση	Αύξηση της σχετικής αφθονίας των φύλων <i>Pseudomonadota</i> και <i>Cyanobacteriota</i> , μεταβολή της δομής των μικροβιακών κοινοτήτων, ανάπτυξη εξειδικευμένης μικροβιακής κοινότητας στην επιφάνεια των μικροπλαστικών (πλαστισφαίρα), θετικές και αρνητικές συσχετίσεις συγκεκριμένων γενών με την παρουσία μικροπλαστικών, καθώς και ενδείξεις εμπλουτισμού μικροοργανισμών που σχετίζονται με βιοαποδόμηση ξενοβιοτικών ουσιών	Ye et al., 2024
PE, PP (μεμβράνες PE, ίνες PP, μικροσφαιρίδια PP)	Σχήμα	Δεν εξετάστηκαν φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους	Μείωση της συνολικής μικροβιακής λειτουργικής δραστηριότητας (FDA-H), με έντονη χρονική διαφοροποίηση και ενδείξεις μικροβιακής προσαρμογής, διαφοροποίηση της δομής των	Yi et al., 2020

			βακτηριακών κοινοτήτων, αύξηση της αποικιλότητας, σαφής διαχωρισμός μεταξύ πλαστισφαίρας και χύδην εδάφους, μεταβολές σε νιτροποιητικούς μικροοργανισμούς (<i>Thaumarchaeota</i>) και βακτήρια που σχετίζονται με τον κύκλο του φωσφόρου (<i>Gemmatimonas</i>), καθώς και εμπλουτισμός εξειδικευμένων <i>Actinobacteria</i> στην επιφάνεια των μικροπλαστικών.	
Διάφορα μικροπλαστικά (PA, PC, PE, PES, PET, PP, PS, PV)	Είδος πολυμερούς, σχήμα και χρόνος έκθεσης	Αύξηση του εδαφικού pH, εξαρτώμενη από το σχήμα και τον τύπο του πολυμερούς (ιδίως αφροί και θραύσματα)	Συνολική μείωση της μικροβιακής αναπνοής και των περισσότερων ενζυμικών δραστηριοτήτων, κυρίως ενζύμων που σχετίζονται με τους κύκλους του άνθρακα και του αζώτου, με διαφοροποιήσεις στις αποκρίσεις των επιμέρους ενζύμων ανάλογα με το σχήμα των μικροπλαστικών και τη διάρκεια έκθεσης	Zhao et al., 2021
PHBV	Είδος	Δεν εξετάστηκαν φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους	Σημαντική αύξηση της μικροβιακής βιομάζας, της μικροβιακής αναπνοής και της εξωενζυμικής δραστηριότητας, έντονη διαφοροποίηση της βακτηριακής κοινότητας και δημιουργία εντοπισμένων μικροβιακών hotspots στη μικροπλαστισφαίρα σε σύγκριση με τη ριζόσφαιρα και το χύδην έδαφος	Zhou et al., 2021
PVC, LDPE, PS	Είδος	Δεν εξετάστηκαν φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους	Διακριτές αποκρίσεις της μικροβιακής κοινότητας ανά τύπο μικροπλαστικού, με μεταβολές στη σχετική αφθονία βασικών βακτηριακών φύλων και στις προβλεπόμενες λειτουργικές δυνατότητες της κοινότητας, τα PVC και LDPE ενίσχυσαν μεταβολικές και βιοαποδομητικές δυνατότητες, ενώ τα PS συσχετίστηκαν με συνολικό περιορισμό της λειτουργικής ικανότητας	Zhu et al., 2022

3.2. Συνθετική αποτίμηση της επίδρασης των μικροπλαστικών στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους

Η συνθετική αξιολόγηση των μελετών που αναλύθηκαν καταδεικνύει ότι τα μικροπλαστικά αποτελούν ενεργούς ρυθμιστές της μικροβιακής οικολογίας του εδάφους και όχι αδρανή σωματίδια. Οι επιδράσεις τους εξαρτώνται από ένα σύνολο παραμέτρων, όπως το είδος του πολυμερούς, το μέγεθος, τη συγκέντρωση, το σχήμα και τον χρόνο έκθεσης, καθώς και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους (Han et al., 2024; Qi et al., 2024; Zhao et al., 2021).

Σε επίπεδο εδαφικής δομής, τα μικροπλαστικά PE και PLA έχουν συσχετιστεί με μείωση της σταθερότητας των εδαφικών συσσωματωμάτων, ιδιαίτερα των μικροσυσσωματωμάτων, γεγονός που ενισχύει τον ανταγωνισμό μεταξύ των μικροβιακών κοινοτήτων σε αυτά τα μικροπεριβάλλοντα και επηρεάζει έμμεσα τη σύσταση των βακτηριακών κοινοτήτων (Han et al., 2024).

Οι περισσότερες μελέτες κατέγραψαν μεταβολές στη σχετική αφθονία βασικών βακτηριακών φύλων, όπως τα *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Chloroflexi* και *Gemmatimonadota*, με τις αποκρίσεις να διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος και τη συγκέντρωση των μικροπλαστικών (Ma et al., 2023; Rong et al., 2021; Zhu et al., 2022; Ye et al., 2024). Χαμηλές συγκεντρώσεις LDPE συνδέθηκαν συχνά με παροδική αύξηση της ποικιλότητας και της αφθονίας κοπιωτροφικών βακτηρίων, ενώ υψηλότερες συγκεντρώσεις οδήγησαν σε μείωση της α-ποικιλότητας και αναδιάρθρωση των μικροβιακών δικτύων (Rong et al., 2021; Ya et al., 2022).

Η μικροβιακή ποικιλότητα παρουσίασε αντιφατικές αποκρίσεις, με μείωση να παρατηρείται κυρίως παρουσία βιοδιασπώμενων μικροπλαστικών όπως PBAT και PLA (Song et al., 2024; Qi et al., 2024), ενώ σε άλλες μελέτες καταγράφηκε παροδική αύξηση της ποικιλότητας σε χαμηλές συγκεντρώσεις ή σε συγκεκριμένα σχήματα μικροπλαστικών (Yi et al., 2020; Rong et al., 2021). Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να λειτουργούν τόσο ως παράγοντας περιβαλλοντικού στρες όσο και ως υπόστρωμα δημιουργίας νέων μικρο-ενδιαιτημάτων.

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στον σχηματισμό της πλαστισφαίρας, δηλαδή εξειδικευμένων μικροβιακών κοινοτήτων που αναπτύσσονται στην επιφάνεια των μικροπλαστικών και διαφοροποιούνται σαφώς από το χύδην έδαφος. Οι κοινότητες αυτές συχνά εμπλουτίζονται σε μικροοργανισμούς με ικανότητα αποδόμησης πολυμερών ή αυξημένη ανθεκτικότητα σε ρύπους (Yi et al., 2020; Ya et al., 2022; Zhou et al., 2021; Ye et al., 2024).

Πέρα από τη δομή των κοινοτήτων, οι μελέτες ανέδειξαν σημαντικές επιδράσεις των μικροπλαστικών στη μικροβιακή λειτουργία, όπως στη μικροβιακή αναπνοή, στην ενζυμική δραστηριότητα και στην αφθονία λειτουργικών γονιδίων που σχετίζονται με τους κύκλους του άνθρακα, του αζώτου και του φωσφόρου, καθώς και στην πολυπλοκότητα των μικροβιακών δικτύων (Zhao et al., 2021; Rong et al., 2021; Song et al., 2024; Han et al., 2024; Li & Xiao, 2023).

Συνολικά, τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τον πολυπαραγοντικό και δυναμικό ρόλο των μικροπλαστικών στη διαμόρφωση της δομής και της λειτουργίας των εδαφικών μικροβιακών κοινοτήτων.

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η παρούσα εργασία επιβεβαιώνει ότι τα μικροπλαστικά επιδρούν στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους μέσω σύνθετων μηχανισμών που αλληλοεπιδρούν, γεγονός που εξηγεί τη σημαντική ετερογένεια των αποτελεσμάτων που καταγράφονται στη βιβλιογραφία (Qi et al., 2024; Zhao et al., 2021). Οι αποκρίσεις των μικροοργανισμών δεν είναι ομοιόμορφες καθώς εξαρτώνται τόσο από το είδος πολυμερούς, σχήμα, συγκέντρωση και τον χρόνο έκθεσης, όσο και από τις φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους.

Οι αντιφατικές μεταβολές στη σχετική αφθονία βασικών βακτηριακών ομάδων, όπως τα *Proteobacteria* και τα *Gemmatimonadota*, μπορούν να ερμηνευθούν με βάση τη λειτουργική ποικιλότητα αυτών των φύλων. Τα *Proteobacteria* περιλαμβάνουν κυρίως κοπιωτροφικούς μικροοργανισμούς (μικροοργανισμοί που ακολουθούν την r-στρατηγική) οι οποίοι ευνοούνται σε περιβάλλοντα με υψηλή διαθεσιμότητα άνθρακα. Η παρουσία μικροπλαστικών, ιδιαίτερα συμβατικών και ανθεκτικών πολυμερών όπως το PE, οδηγεί σε «φυσική αραίωση» του βιοδιαθέσιμου οργανικού άνθρακα, γεγονός που περιορίζει την ανταγωνιστική υπεροχή των *Proteobacteria* και ευνοεί μικροοργανισμούς που ακολουθούν την K-στρατηγική όπως τα *Actinobacteria* και τα *Chloroflexi* (Han et al., 2024). Αντίστοιχα, οι διαφοροποιήσεις στην απόκριση των *Gemmatimonadota* ενδέχεται να σχετίζονται με το σχήμα και τη μορφολογία των μικροπλαστικών, τα οποία επηρεάζουν τη συσσωμάτωση του εδάφους, τη διαθεσιμότητα φωσφόρου και τη δυνατότητα μικροβιακής αποίκησης (Yi et al., 2020; Ya et al., 2022).

Η μεταβλητότητα στη μικροβιακή ποικιλότητα υποδηλώνει ότι τα μικροπλαστικά δεν δρουν αποκλειστικά ως ανασταλτικός παράγοντας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χαμηλές συγκεντρώσεις ή συγκεκριμένα σχήματα μικροπλαστικών προκάλεσαν παροδική αύξηση της ποικιλότητας και της ενζυμικής δραστηριότητας, πιθανώς μέσω της δημιουργίας νέων μικρο-ενδιαιτημάτων, της αύξησης του πορώδους και της βελτίωσης της κυκλοφορίας νερού και οξυγόνου στο έδαφος (Yi et al., 2020; Zhao et al., 2021). Αντίθετα, υψηλές συγκεντρώσεις και βιοδιασπώμενα πολυμερή όπως PBAT και PLA συχνά συνδέθηκαν με μείωση της ποικιλότητας, υποδηλώνοντας επιλεκτική πίεση και επικράτηση μικροοργανισμών με αυξημένη μεταβολική ικανότητα και προσαρμογή σε περιβάλλοντα χαμηλής διαθεσιμότητας πόρων (Song et al., 2024; Qi et al., 2024).

Ιδιαίτερη οικολογική σημασία αποδίδεται στον σχηματισμό της πλαστισφαίρας, ενός διακριτού μικροβιακού ενδιαιτήματος στην επιφάνεια των μικροπλαστικών. Οι κοινότητες αυτές διαφοροποιούνται σαφώς από το χύδην έδαφος και εμπλουτίζονται σε βακτήρια, κυρίως *Actinobacteria*, με ικανότητα αποδόμησης ανθεκτικών πολυμερών ή αυξημένη ανθεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα και οργανικούς ρύπους. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να λειτουργούν όχι μόνο ως υπόστρωμα αποίκησης, αλλά και ως φορείς μεταφοράς μικροοργανισμών και λειτουργικών γονιδίων στο εδαφικό περιβάλλον (Zhou et al., 2021; Ye et al., 2024).

Παράλληλα, οι μεταβολές στις ενζυμικές δραστηριότητες και στη μικροβιακή αναπνοή φαίνεται να συνδέονται στενά με αλλαγές στο εδαφικό pH, στη συσσωμάτωση και στη διαθεσιμότητα υποστρωμάτων. Η αύξηση του pH που παρατηρήθηκε σε ορισμένα

σχήματα μικροπλαστικών, όπως αφροί και θραύσματα, αποδίδεται στην αύξηση του πορώδους και στον αερισμό του εδάφους, αλλά και στην έκπλυση χημικών προσθέτων, με έμμεσες επιδράσεις στη μικροβιακή λειτουργία (Zhao et al., 2021). Η χρονική διάσταση είναι κρίσιμη, καθώς αρκετές μελέτες κατέδειξαν αρχική αναστολή και μεταγενέστερη προσαρμογή της μικροβιακής δραστηριότητας, πιθανώς λόγω μικροβιακής προσαρμογής ή αποδόμησης τοξικών ενώσεων (Yi et al., 2020; Xiao et al., 2022).

Ωστόσο, η πλειονότητα των μελετών βασίζεται σε βραχυπρόθεσμα πειράματα επώασης υπό ελεγχόμενες συνθήκες, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων σε φυσικά εδαφικά οικοσυστήματα. Ως εκ τούτου, παραμένει ασαφές αν αυτή η προσαρμογή οδηγεί σε αποκατάσταση των οικολογικών λειτουργιών ή σε μόνιμες μετατοπίσεις της μικροβιακής ισορροπίας.

Συνολικά, τα μικροπλαστικά αναδεικνύονται ως ενεργοί ρυθμιστές της μικροβιακής οικολογίας του εδάφους, επηρεάζοντας τόσο τη δομή όσο και τη λειτουργία των μικροβιακών κοινοτήτων. Η κατανόηση των επιδράσεων αυτών απαιτεί ολοκληρωμένες, μακροχρόνιες μελέτες πεδίου που να λαμβάνουν υπόψη τη χρονική διάρκεια της επιρροής, τις αλληλεπιδράσεις με τα φυτά και την ετερογένεια των εδαφικών συστημάτων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ρύπανση των εδαφών με μικροπλαστικά αποτελεί ένα αναδυόμενο περιβαλλοντικό ζήτημα, το οποίο έχει αρχίσει να προσελκύει έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, ωστόσο παραμένει λιγότερο διερευνημένο σε σύγκριση με τη ρύπανση των υδάτινων οικοσυστημάτων. Η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να επιφέρουν σημαντικές επιδράσεις στις μικροβιακές κοινότητες του εδάφους, επηρεάζοντας τόσο τη δομή όσο και τη λειτουργία τους, με πιθανές συνέπειες για τη συνολική λειτουργία του εδαφικού οικοσυστήματος. Τα αποτελέσματα των μελετών που αναλύθηκαν δείχνουν ότι οι επιδράσεις των μικροπλαστικών δεν είναι ομοιόμορφες, αλλά εξαρτώνται από παράγοντες όπως το είδος του πολυμερούς, το μέγεθος, το σχήμα, η συγκέντρωση και ο χρόνος έκθεσης. Μεταβολές στη μικροβιακή αφθονία και ποικιλότητα, καθώς και στη μικροβιακή λειτουργία (αναπνοή, ενζυμική δραστηριότητα, λειτουργικά γονίδια), μπορούν να επηρεάσουν κρίσιμες διεργασίες του εδάφους, όπως οι κύκλοι του άνθρακα, του αζώτου και του φωσφόρου. Οι αλλαγές αυτές ενδέχεται να έχουν μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στις εδαφικές ιδιότητες και στη βιωσιμότητα των χερσαίων οικοσυστημάτων. Ωστόσο, λόγω του περιορισμένου αριθμού διαθέσιμων μελετών και της μεγάλης ετερογένειας στον πειραματικό σχεδιασμό, δεν είναι ακόμη δυνατή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με το μέγεθος και τη διάρκεια των επιδράσεων των μικροπλαστικών στα εδαφικά οικοσυστήματα. Η πλειονότητα των ερευνών βασίζεται σε βραχυπρόθεσμα πειράματα επώασης υπό ελεγχόμενες συνθήκες, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων σε φυσικά εδαφικά περιβάλλοντα. Μελλοντικές έρευνες θα πρέπει να εστιάσουν σε πειράματα μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας, σε διαφορετικά είδη και

σχήματα μικροπλαστικών, καθώς και σε ρεαλιστικότερες συγκεντρώσεις που αντανακλούν τις πραγματικές συνθήκες ρύπανσης. Ιδιαίτερη έμφαση θα πρέπει να δοθεί σε πειράματα πεδίου και μελέτες σε εξωτερικά περιβάλλοντα, υπό διαφορετικές κλιματικές και εδαφικές συνθήκες, ώστε να αποτυπωθούν οι μακροπρόθεσμες και σωρευτικές επιδράσεις των μικροπλαστικών στο έδαφος. Τέλος, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση της συνδυαστικής επίδρασης των μικροπλαστικών με άλλους ρύπους του εδάφους, όπως βαρέα μέταλλα και οργανικούς ρύπους, δεδομένου ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να λειτουργήσουν ως φορείς μεταφοράς και συσσώρευσης ρύπων. Η κατανόηση αυτών των αλληλεπιδράσεων είναι κρίσιμη για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των περιβαλλοντικών κινδύνων που σχετίζονται με τη ρύπανση των εδαφών από μικροπλαστικά.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abu Hilal AH & Al-Najjar T (2009). *Plastic pellets on the beaches of the Northern Gulf of Aqaba, Red Sea* [Aquatic Ecosystem Health and Management, 12, 461-470] <https://doi.org/10.1080/14634980903361200>
- Agathokleous E, Iavicoli I, Barceló D, Calabrese EJ (2021). *Ecological risks in a 'plastic' world: A threat to biological diversity?* [Journal of Hazardous Materials, 417, 126035] <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126035>
- Ahash S, Manikandan K, Devi TS, Elamathi S, Maragatham S, Subrahmaniyan K (2025). *Phosphate-solubilizing microorganisms for sustainable phosphorus management in rice* [Rhizosphere, 34, 101096] <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101096>
- Ahemad M, Zaidi A, Khan MDS, Oves M (2009). *Factors affecting the variation of microbial communities in different agro-ecosystems* [Microbial Strategies for Crop Improvement, 301-324] <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01979-1>
- Alarifi IM (2022). *Synthetic polymers* [Synthetic Engineering Materials and Nanotechnology, 33-58] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824001-4.00008-9>
- AlGhazali MA & Eljamay SM (2025). *The role of temperature in microbial growth: a discussion and meta-analysis* [Derna Academy Journal for Applied Sciences, 4, 26-36] <https://doi.org/10.71147/wdxm5r37>
- Aspiras RB, Allen ON, Harris RF, Chesters G (1971). *The role of microorganisms in the stabilization of soil aggregates* [Soil Biology and Biochemistry, 3, 347-353] [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(71\)90045-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(71)90045-9)
- Baheti P (2020). *How is plastic made?* [British Plastics Federation] <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/how-is-plastic-made.aspx>
- Baldwin KA, Corsi RS, Mason SA (2016). *Plastic debris in 29 great lakes tributaries: Relations to watershed attributes and hydrology* [Environmental Science & Technology, 50, 10377-10385] <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02917>
- Berg G, Rybakova D, Grube M, Köberl M (2015). *The plant microbiome explored: implications for experimental botany* [Journal of Experimental Botany, 67, 995-1002] <https://doi.org/10.1093/jxb/erv466>
- Bernhard A (2010). *The Nitrogen cycle: Processes, players and human impact* [Nature Education Knowledge] <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-nitrogen-cycle-processes-players-and-human-15644632/>
- Bläsing M & Amelung W (2017). *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>
- Boots B, Russell CW, Green DS (2019). *Effects of microplastics in soil ecosystems: Above and below ground* [Environmental Science & Technology, 53, 11496-11506] <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03304>
- Brannan DK (2006). *Biology of microbes* [Cosmetic Microbiology: A Practical Approach] <https://doi.org/10.3109/9781420003321>
- Browne MA, Crump P, Niven SJ, Teuten E, Tonkin A, Galloway T, Thompson R (2011). *Accumulation of microplastics on shorelines worldwide: Sources and sinks*

- [Environmental Science & Technology, 45, 9175-9179]
<https://doi.org/10.1021/es201811s>
- Bucka FB, Kölbl A, Uteau D, Peth S, Kögel-Knabner I (2019). *Organic matter input determines structure development and aggregate formation in artificial soils* [Geoderma, 354, 113881] <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113881>
- Bullock P (2005). *Climate change impacts* [Encyclopedia of Soils in the Environment, 254-262] <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00089-8>
- Campo EA (2008). *Polymeric materials and properties* [Selection of Polymeric Materials, 1-39] <https://doi.org/10.1016/B978-081551551-7.50003-6>
- Cao T, Luo Y, Shi M, Tian X, Kuzyakov Y (2023). *Microbial interactions for nutrient acquisition in soil: Miners, scavengers, and carriers* [Soil Biology and Biochemistry, 188, 109215] <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109215>
- Celestina C, Hunt JR, Sale PWG, Franks AE (2018). *Attribution of crop yield responses to application of organic amendments: A critical review* [Soil and Tillage Research, 186, 135-145] <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.002>
- Chang J, Fang W, Liang J, Zhang P, Zhang G, Zhang H, Zhang Y, Wang Q (2022). *A critical review on interaction of microplastics with organic contaminants in soil and their ecological risks on soil organisms* [Chemosphere 306, 135573] <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135573>
- Chen G, Guo S, Liu L, Zhang W, Tang J (2024). *Effects of microplastics on microbial community and greenhouse gas emission in soil: A critical review* [Ecotoxicology and Environmental Safety, 289, 117419] <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117419>
- Chen Y, Mo G, Wu M, Hao Y, Cheng Z, Lu G, Li Q, Hu BX, Wu J, Wu J (2023). *Important effects of polypropylene on migration of ciprofloxacin in groundwater* [Journal of Environmental Chemical Engineering, 11, 109847] <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109847>
- Chia RW, Lee JY, Jang J, Kim H, Kwon KD (2022). *Soil health and microplastics: a review of the impacts of microplastic contamination on soil properties* [Journal of Soils and Sediments, 22, 2690-2705] <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03254-4>
- Chu D (2018). *Effects of heavy metals on soil microbial community* [IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 113] <https://doi.org/10.1088/1755-1315/113/1/012009>
- Chu H & Ma Y (2024). *Biogeography of Soil Phosphorus-Cycling Microbes in a Changing World* [Global Change Biology, 30] <https://doi.org/10.1111/gcb.17617>
- Compant S, Samad A, Faist H, Sessitch A (2019). *A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends in microbial application* [Journal of Advanced Research, 19, 29-37] <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>
- Da Costa JP (2018). *Micro- and nanoplastics in the environment: Research and policymaking* [Current Opinion in Environmental Science & Health, 1, 12-16] <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.11.002>
- Daims H, Lebedeva EV, Pjevac P, Han P, Herbold C, Albertsen M, Jehmlich N, Palatinszky M, Vierheilig J, Bulaev A, Kirkegaard RH, von Bergen M, Rattei T, Bendinger B, Nielsen PH, Wagner M (2015). *Complete nitrification by Nitrospira bacteria* [Nature, 528, 504-509] <https://doi.org/10.1038/nature16461>

- Daims H, Lückner S, Wagner M (2016). *A new perspective on microbes formerly known as nitrite-oxidizing bacteria* [Trends in Microbiology, 24, 699-712] <https://doi.org/10.1016/j.tim.2016.05.004>
- De Souza Machado A, Lau CW, Till J, Kloas W, Lehmann A, Becker R, Rillig MC (2018). *Impacts of microplastics on the soil biophysical environment* [Environmental Science & Technology, 52, 9656–9665] <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
- Elizalde LE, de los Santos-Villarreal G, Santiago-García JL, Aguilar-Vega M (2013). *Handbook of polymer synthesis, characterization, and processing* (Chapter 3) <https://doi.org/10.1002/9781118480793.ch3>
- El-Midany AA & Abdel-Khalek MA (2013). *Reducing sulfur and ash from coal using Bacillus subtilis and Paenibacillus polymyxa* [Fuel, 115, 589-595] <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.076>
- Expósito RG, de Bruijin I, Postma J, Raaijmakers JM (2017). *Current insights into the role of rhizosphere bacteria in disease suppressive soils* [Frontiers in Microbiology, 8] <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02529>
- Fan W, Qiu C, Qu Q, Hu X, Mu L, Gao Z, Tang X (2023). *Sources and identification of microplastics in soils* [Soil & Environmental Health, 1, 100019] <https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100019>
- Frankenberger WT JR & Arshad M (1995). *Phytohormones in soils: Microbial production and function* <https://doi.org/10.1201/9780367812256>
- Frias JPGL & Nash R (2018). *Microplastics: Finding a consensus on the definition* [Marine Pollution Bulletin, 138, 145-147] <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- Fung I (2003). *Carbon cycle* [Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), 417-429] <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00921-2>
- Graham JE, Wantland NB, Campbell M, Klotz MG (2011). *Characterizing Bacterial Gene Expression in Nitrogen Cycle Metabolism with RT-qPCR* [Methods in Enzymology, 496, 345-372] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386489-5.00014-2>
- Grzyb A, Wolna-Maruwka A, Niewiadomska A (2021). *The significance of microbial transformation of nitrogen compounds in the light of integrated crop management* [Agronomy, 11, 1415] <https://doi.org/10.3390/agronomy11071415>
- Guo JJ, Huang XP, Xiang L, Wang YZ, Li YW, Li H, Cai QY, Mo CH, Wong MH (2020) *Source, migration and toxicology of microplastics in soil* [Environmental International, 137, 105263] <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105263>
- Gupta VVSR & Germida JJ (2014). *Soil aggregation: Influence on microbial biomass and implications for biological processes* [Soil Biology and Biochemistry, 80, A3-A9] <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.09.002>
- Han L, Chen L, Feng Y, Kuzyakov Y, Chen Q, Zhang S, Chao L, Cai Y, Ma C, Sun K, Rillig MC (2024). *Microplastics alter soil structure and microbial community composition* [Environment International, 185, 108508] <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108508>
- Hanrahan G & Chan G (2005). [Encyclopedia of analytical science (Second Edition)] <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780123693976/encyclopedia-of-analytical-science>

- Harris K, Young IM, Gilligan CA, Otten W, Ritz K (2003). *Effect of bulk density on the spatial organisation of the fungus Rhizoctonia solani in soil* [FEMS Microbiology Ecology, 44, 45-56] <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2003.tb01089.x>
- Hartmann NB, Hüffer T, Thompson RC, Hassallöv M, Verschoor A, Daugaard AE, Rist S, Karlsson T, Brennholt N, Cole M, Herrling MP, Hess MC, Ivleva NP, Lusher AL, Wagner M (2019). *Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris* [Environmental Science & Technology, 53, 1039-1047] <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>
- Hettiarachchi GM, Betts AR, Wekumbura WGC, Lake L, Mayer MM, Scheckel KG, Basta NT (2023). *Lead: The most extensively spread toxic environmental contaminant* [Inorganic Contaminants and Radionuclides, 113-150] <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90400-1.00006-9>
- Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson RC, Thiel M (2012). *Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification* [Environmental Science & Technology, 46, 3060-3075] <https://doi.org/10.1021/es2031505>
- Hodson ME, Duffus-Hodson CA, Clark A, Prendergast-Miller MT, Thorpe KL (2017). *Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates* [Environmental Science & Technology, 51, 4714-4721] <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00635>
- Hong C, Wang Z, Tian M, Wang Y, Liu J, Qiang X, Masharifov U, Chen K (2024). *Migration of microplastics in the rice-duckweed system under different irrigation modes* [Agriculture, 14, 1460] <https://doi.org/10.3390/agriculture14091460>
- Huang Y, Liu Q, Jia W, Yan C, Wang J (2020). *Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment* [Environmental Pollution, 260, 114096] <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>
- IUCN (2024). *Plastic pollution* [Issues Brief] <https://iucn.org/resources/issues-brief/plastic-pollution>
- Janzen HH (2004). *Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective* [Agriculture, Ecosystems & Environment, 104, 399-417] <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.040>
- Järlskog I, Jaramillo-Vogel D, Rausch J, Gustafsson M, Strömvall A-M, Andersson-Sköld Y (2022). *Concentrations of tire wear microplastics and other traffic-derived non-exhaust particles in the road environment* [Environmental International, 170, 107618] <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107618>
- Jin Q & Kirk MF (2018). *pH as a primary control in environmental microbiology: 1. thermodynamic perspective* [Frontiers in Environmental Science, 6] <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00021>
- Jin S, Wang Y, Zhao X (2022). *Cold-adaptive mechanism of psychrophilic bacteria in food and its application* [Microbial Pathogenesis, 169, 105652] <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2022.105652>
- Johnson DB & Aguilera A (2019). *Extremophiles and acidic environments* [Encyclopedia of Microbiology (Fourth Edition), 206-227] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.90687-3>

- Jurtshuk P Jr (1996). *Bacterial metabolism* [Medical Microbiology, 4th edition, Chapter 4] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK7919/>
- Keenleyside W (2019). *Temperature and microbial growth* [Microbiology: Canadian Edition] <https://ecampusontario.pressbooks.pub/microbio/chapter/temperature-and-microbial-growth/>
- Kemmitt SJ, Wright D, Goulding KWT, Jones DL (2005). *pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils* [Soil Biology and Biochemistry, 38, 898-911] <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.08.006>
- Khan MT, Suprionienė S, Žvirdauskienė R, Aleinikovienė J (2025). *Climate, soil, and microbes: interactions shaping organic matter decomposition in croplands* [Agronomy, 15, 1928] <https://doi.org/10.3390/agronomy15081928>
- Killham K & Prosser JI (2015). *The Bacteria and Archaea* [Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry, 41-73] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-415955-6.00003-7>
- Kloepper J & Schroth MN (1978). *Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes* [4th International Conference on Plant Pathogenic Bacteria, 2, 879-882] https://www.researchgate.net/publication/284682983_Plant_growth-promoting_rhizobacteria_on_radishes_IV_international_conference_on_plant_pathogenic_bacteria
- Kurtz DM (2003). *Oxygen and anaerobes* [Biochemistry and Physiology of Anaerobic Bacteria, 128-142] https://doi.org/10.1007/0-387-22731-8_10
- Larson ER (2015). *Why use plastic?* [Thermoplastic Material Selection, 19-56] <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-31299-8.00002-7>
- Lens P (2009). *Sulfur Cycle* [Encyclopedia of Microbiology, 3rd Edition, 361-369] <https://doi.org/10.1016/B978-012373944-5.00057-2>
- Li CH, Ma BL, Zhang TQ (2001). *Soil bulk density effects on soil microbial populations and enzyme activities during the growth of maize (Zea mays L.) planted in large pots under field exposure* [Canadian Journal of Soil Science, 82, 147-154] <https://doi.org/10.4141/S01-026>
- Li L, Xu M, Ali ME, Zhang W, Duan Y, Li D (2018). *Factors affecting soil microbial biomass and functional diversity with the application of organic amendments in three contrasting cropland soils during a field experiment* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203812>
- Li Y, Hou Y, Hou Q, Long M, Wang Z, Rillig MC, Liao Y, Yong T (2023a). *Soil microbial community parameters affected by microplastics and other plastic residues* [Terrestrial Microbiology, 14, 1258606] <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1258606>
- Li N, Qu J, Yang J (2023b). *Microplastics distribution and microbial community characteristics of farmland soil under different mulch methods* [Journal of Hazardous Materials, 445, 130408] <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130408>
- Li W & Xiao Y (2023). *Microplastics increase soil microbial network complexity and trigger diversity-driven community assembly* [Environmental Pollution, 333, 122095] <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122095>
- Li X, Liu H, Wang L, Guo H, Zhang J, Gao D (2022). *Effects of typical sludge treatment on microplastics in China-Characteristics, abundance and micro-morphological evidence* [Science of The Total Environment Volume 826, 154206] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154206>

- Li Y, Zhang Y, Su F, Wang Y, Peng L, Liu D (2022b). *Adsorption behaviour of microplastics on the heavy metal Cr(VI) before and after ageing* [Chemosphere, 302, 134865] <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134865>
- Liang C, Amelung W, Lehmann J, Kästner M (2019). *Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter* [Global Change Biology, 25, 3578-3590] <https://doi.org/10.1111/gcb.14781>
- Liang Y, Lehmann A, Yang G, Leifheit EF, Rillig MC (2021). *Effects of microplastic fibers on soil aggregation and enzyme activities are organic matter dependent* [Toxicology, Pollution and the Environment, 9, 650155] <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.650155>
- Lipscombe M – Biosolids AU (2024). *Biosolids production and end use survey – Australia 2022/23* https://www.biosolids.com.au/wp-content/uploads/j309-Biosolids-Production-in-Australia-2023_rev-1.pdf
- Liu X, Wang J, Zhang L, Zhu Y (2023). *The transport of microplastics by ants cannot be neglected in the soil ecosystem* [Environmental Pollution, 317, 120796] <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120796>
- Lutz S, Mikryukov V, Labouyrie M, Bahram M, Jones A, Panagos P, Delgado-Baquerizo M, Maestre FT, Orgiazzi A, Tedersoo L, van der Heijden MGA (2024). *Global richness of arbuscular mycorrhizal fungi* [Fungal Ecology, 74, 101407] <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2024.101407>
- Lwanga EH, Gertsen H, Gooren H, Peters P, Salánki T, van der Ploeg M, Besseling E, Koelmans AA, Geissen V (2016) *Incorporation of microplastics from litter into burrows of Lumbricus terrestris* [Environmental Pollution, 220, 523-531] <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.096>
- Lynch JM & Bragg E (1985). *Microorganisms and Soil Aggregate Stability* [Advances in Soil Science, 2, 133-171] http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-5088-3_3
- Maaß S, Daphi D, Lehmann A, Rillig MC (2017). *Transport of microplastics by two collembolan species* [Environmental Pollution, 225, 456-459] <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.009>
- Madigan MT, Martinko JM, Bender KS, Buckley DH, Stahl DA (2014). *Brock Biology of Microorganisms* (14th edition)
- Mahon AM, O'Connell B, Healy MG, O'Connor O, Officer R, Nash R, Morrison L (2016). *Microplastics in sewage sludge: Effects of treatment* [Environmental Science & Technology, 51, 810-818] <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04048>
- Ma J, Xu M, Wu J, Yang G, Zhang X, Song C, Long L, Chen C, Xu C, Wang Y (2023). *Effects of variable-sized polyethylene microplastics on soil chemical properties and functions and microbial communities in purple soil* [Science of The Total Environment, 868, 161642] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161642>
- Mohammadi K, Heidari G, Khalesro S, Sohrabi Y (2011). *Soil management, microorganisms and organic matter interactions: A review* [African Journal of Biotechnology, 10, 19840-19847] <https://doi.org/10.5897/AJBX11.006>
- Mohebbi G & Ball AS (2016). *Biodesulfurization of diesel fuels – Past, present and future perspectives* [International Biodeterioration & Biodegradation, 110, 163-180] <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.03.011>

- Kameel NIA, Wan Daud WMA, Patah MFA, Zulkifli NWM (2022). *Influence of reaction parameters on thermal liquefaction of plastic wastes into oil: A review* [Energy Conversion and Management: X, 14, 100196] <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100196>
- Okoffo ED, O'Brien S, Ribeiro F, Burrows SD, Toapanta T, Rauert C, O'Brien JW, Tschärke BJ, Wang X, Thomas KV (2021). *Plastic particles in soil: state of the knowledge on sources, occurrence and distribution, analytical methods and ecological impacts* [Environmental Science: Processes & Impacts, 23, 240] <https://doi.org/10.1039/D0EM00312C>
- Omidoyin KC & Jho EH (2023). *Effect of microplastics on soil microbial community and microbial degradation of microplastics in soil: A review* [Environmental Engineering Research, 28, 220716] <https://doi.org/10.4491/eer.2022.716>
- Palansooriya KN, Shi L, Sarkar B, Parikh SJ, Sang MK, Lee SR, Ok YS (2022). *Effect of LDPE microplastics on chemical properties and microbial communities in soil* [Soil Use and Management, 38, 1481-1492] <https://doi.org/10.1111/sum.12808>
- Pal P, Pandey JP, Sen G (2018). *Synthesis and application as programmable water soluble adhesive of polyacrylamide grafted gum tragacanth (GT-g-PAM)* [Biopolymer Grafting, 153-203] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810462-0.00005-3>
- PLASTICS EUROPE (2010). *The Facts* <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2010/>
- PLASTICS EUROPE (2022). *Thermoplastics* <https://plasticseurope.org/plastics-explained/a-large-family/thermoplastics/>
- PLASTICS EUROPE (2024). *The Facts* <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>
- Qi R, Jones DL, Tang Y, Gao F, Li J, Chi Y, Yan C (2024). *Regulatory path for soil microbial communities depends on the type and dose of microplastics* [Journal of Hazardous Materials, 473, 134702] <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134702>
- Qi Y, Ossowicki A, Yang X, Lwanga EH, Dini-Andreote F, Geissen V, Garbeva P (2019). *Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties* [Journal of Hazardous Materials, 387, 121711] <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121711>
- Ramos L, Berenstein G, Hughes EA, Zalts A, Montserrat JM (2015). *Polyethylene film incorporation into the horticultural soil of small periurban production units in Argentina* [Science of the Total Environment, 523, 74-81] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.142>
- Rao AS, Nair A, Nivetha K, More VS, Anantharaju KS, More SS (2022). *Molecular adaptations in proteins and enzymes produced by extremophilic microorganisms* [Extremozymes and Their Industrial Applications, 205-230] <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90274-8.00002-2>
- Rius N & Lorén JG (1998). *Buffering capacity and membrane H⁺ conductance of neutrophilic and alkalophilic gram-positive bacteria* [Applied and Environmental Microbiology, 64] <https://doi.org/10.1128/AEM.64.4.1344-1349.1998>
- Rong L, Zhao L, Zhao L, Cheng Z, Yao Y, Yuan C, Wang L, Sun H (2021). *LDPE microplastics affect soil microbial communities and nitrogen cycling* [Science of The Total Environment, 773, 145640] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145640>

- Rye C, Wise R, Jurukovski V, DeSaix J, Choi J, Avissar Y (2016). *Biogeochemical Cycles* [Biology] <https://openstax.org/books/biology/pages/46-3-biogeochemical-cycles>
- Santos LF & Olivares FL (2021). *Plant microbiome structure and benefits for sustainable agriculture* [Current Plant Biology, 26, 100198] <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2021.100198>
- Schipanski ME & Bennett EM (2021). *The Phosphorus cycle* [Fundamentals of Ecosystem Science (Second Edition), 189-213] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812762-9.00009-5>
- Shmeis RMA (2018). *Water Chemistry and Microbiology* [Comprehensive Analytical Chemistry, 81, 1-56] <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2018.02.001>
- Siciliano SD & Germida JJ (2005). *Sulfur in soils. Biological transformations* [Encyclopedia of Soils in the Environment, 85-90] <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00462-8>
- Singh B & Sharma N (2007). *Mechanistic implications of plastic degradation* [Polymer Degradation and Stability, 93, 561-584] <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008>
- Six J, Bossuyt H, Degryze S, Deneff K (2004). *A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics* [Soil and Tillage Research, 79, 7-31] <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>
- Sobolev D & Begonia M (2008). *Effects of heavy metal contamination upon soil microbes: lead-induced changes in general and denitrifying microbial communities as evidenced by molecular markers* [International Journal of Environmental Research and Public Health, 5, 450-456] <https://doi.org/10.3390/ijerph5050450>
- Song T, Liu J, Han S, Li Y, Xu T, Xi J, Hou L, Lin Y (2024). *Effect of conventional and biodegradable microplastics on the soil-soybean system: A perspective on rhizosphere microbial community and soil element cycling* [Environment International, 190, 108781] <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108781>
- Su P, Gao C, Zhang X, Zhang D, Liu X, Xiang T, Luo Y, Chu K, Zhang G, Bu N, Li Z (2022). *Microplastics stimulated nitrous oxide emissions primarily through denitrification: A meta-analysis* [Journal of Hazardous Materials, 445, 130500] <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130500>
- Surendran U, Jayakumar M, Raja P, Gopinath G, Chellam PV (2023). *Microplastics in terrestrial ecosystem: Sources and migration in soil environment* [Chemosphere, 318, 137946] <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.137946>
- Talvitie J, Mikola A, Koistinen A, Setälä O (2017). *Solutions to microplastic pollution – Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies* [Water Research, 123, 401-407] <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>
- Tisdall JM (1994). *Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils* [Plant and Soil, 159, 115-121] <https://doi.org/10.1007/BF00000100>
- Trüper HG (1984). *Microorganisms and the Sulfur Cycle* [Studies in Inorganic Chemistry, 5, 351-365] <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42355-9.50022-0>
- UN Environmental Programme (2025). *Plastic Pollution* <https://www.unep.org/plastic-pollution>

- Upton RN, Bach EM, Hofmockel KS (2019). *Spatio-temporal microbial community dynamics within soil aggregates* [Soil Biology and Biochemistry, 132, 58-68] <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.01.016>
- U.S. Environmental Protection Agency (2025). *Basics of sewage sludge and biosolids* <https://www.epa.gov/biosolids/basic-information-about-sewage-sludge-and-biosolids>
- Verschoor A, de Poorter L, Dröge R, Kuenen J, de Valk E (2016). *Emission of microplastics and potential mitigation measures* [National Institute for Public Health and the Environment, RIMV Report 2016-0026] <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0026.pdf>
- Wagner SC (2011). *Biological nitrogen fixation* [Nature Education Knowledge, 3, 15] <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/biological-nitrogen-fixation-23570419/>
- Wang F, Sun J, Han L, Liu W, Ding Y (2024). *Microplastics regulate soil microbial activities: Evidence from catalase, dehydrogenase, and fluorescein diacetate hydrolase* [Environmental Research, 263, 120064] <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120064>
- Waring RH & Running SW (2007). *Carbon Cycle* [Forest Ecosystems (Third Edition), 59-98] <https://doi.org/10.1016/B978-012370605-8.50008-6>
- Wilpiseski RL, Aufrecht JA, Retterer ST, Sullivan MB, Graham DE, Pierce EM, Zablocki OD, Palumbo AV, Elias DA (2019). *Soil aggregate microbial communities: Towards understanding microbiome interactions at biologically relevant scales* [Applied and Environmental Microbiology, 85] <https://doi.org/10.1128/AEM.00324-19>
- Wright CL, Schatteman A, Crombie AT, Murrell JC, Lehtovirta-Morley LE (2020). *Inhibition of ammonia monooxygenase from ammonia-oxidizing archaea by linear and aromatic alkynes* [Applied and Environmental Microbiology, 86] <https://doi.org/10.1128/AEM.02388-19>
- WWF Australia (2025). *The life cycle of plastics* <https://wwf.org.au/blogs/the-lifecycle-of-plastics/>
- Xiao M, Ding J, Luo Y, Zhang H, Yu Y, Yao H, Zhu Z, Chadwick DR, Jones D, Chen J, Ge T (2022). *Microplastics shape microbial communities affecting soil organic matter decomposition in paddy soil* [Journal of Hazardous Materials, 431, 128589] <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128589>
- Ya H, Jiang B, Xing Y, Zhang T, Lv M, Wang X (2021). *Recent advances on ecological effects of microplastics on soil environment* [Science of the Total Environment, 798, 149338] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149338>
- Ya H, Xing Y, Zhang T, Lv M, Jiang B (2022). *LDPE microplastics affect soil microbial community and form a unique plastisphere on microplastics* [Applied Soil Ecology, 180, 104623] <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104623>
- Yang J, Cang L, Sun Q, Dong D, Ata-UI-Karim ST, Zhou D (2019). *Effects of soil environmental factors and UV aging on Cu²⁺ adsorption on microplastics* [Environmental Science and Pollution Research, 26, 23027-23036] <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05643-8>
- Ye Q, Wu Y, Liu X, Wu J, Wu P, Wu W (2024). *Microplastics abundance associated with farmland use types and the impact on soil microbial communities: A case study in Southern China* [Journal of Hazardous Materials, 480, 136477] <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136477>

- Yi M, Zhou S, Zhang L, Ding S (2020). *The effects of three different microplastics on enzyme activities and microbial communities in soil* [Water Environment Research, 93, 24-32] <https://doi.org/10.1002/wer.1327>
- Yildiz SY (2024). *Exploring the hot springs of golan: A source of thermophilic bacteria and enzymes with industrial promise* [Current Microbiology, 81, 101] <https://doi.org/10.1007/s00284-024-03617-9>
- Yim SS & Wang HH (2021). *Exploiting interbacterial antagonism for microbiome engineering* [Current Opinion in Biomedical Engineering, 19, 100307] <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2021.100307>
- Yue L, Kuang X, Sun X, Qi HJ (2022). *Recyclable thermoset polymers: beyond self-healing* [Recent Advances in Smart Self-Healing Polymers and Composites (Second Edition), 483-511] <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823472-3.00012-6>
- Yu Y, Battu AK, Varga T, Denny AC, Zahid TMd, Chowdhury I, Flury M (2023). *Minimal impacts of microplastics on soil physical properties under environmentally relevant concentrations* [Environmental Science & Technology, 57, 5296-5304] <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09822>
- Zhang GS & Liu YF (2018). *The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China* [Science of The Total Environment, 642, 12-20] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004>
- Zhang K, Hamidioan AH, Tubić A, Zhang Y, Fang JKH, Wu C, Lam PKS (2021a). *Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: a review* [Environmental Pollution, 274, 116554] <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116554>
- Zhang X, Chen Y, Li X, Zhang Y, Gao W, Jiang J, Mo A, He D (2021b). *Size/shape-dependent migration of microplastics in agricultural soil under simulative and natural rainfall* [Science of The Total Environment, 815, 152507] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152507>
- Zhang X, Li Y, Ouyang D, Lei J, Tan Q, Xie L, Li Z, Liu T, Xiao Y, Farooq TH, Wu X, Chen L, Yan W (2021c). *Systematical review of interactions between microplastics and microorganisms in the soil environment* [Journal of Hazardous Materials, 418, 126288] <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126288>
- Zhang Y, Kang S, Allen S, Allen D, Gao T, Sillanpää M (2020). *Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives* [Earth-Science Reviews, 203, 103118] <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>
- Zhang Y, Li X, Xiao M, Feng Z, Yu Y, Yao H (2021). *Effects of microplastics on soil carbon dioxide emissions and the microbial functional genes involved in organic carbon decomposition in agricultural soil* [Science of the Total Environment, 806, 150714] <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150714>
- Zhao S, Zhang Z, Chen L, Cui Q, Cui Y, Song D, Fang L (2022). *Review on migration, transformation and ecological impacts of microplastics in soil* [Applied Soil Ecology, 176, 104486] <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104486>
- Zhao T, Lozano YM, Rilling MC (2021). *Microplastics increase soil ph and decrease microbial activities as a function of microplastic shape, polymer type, and exposure time* [Frontiers in Environmental Science, 9, 675803] <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.675803>

- Zhou J, Gui H, Banfield CC, Wen Y, Zang H, Dippold MA, Charlton A, Jones DL (2021). *The microplastisphere: Biodegradable microplastics addition alters soil microbial community structure and function* [Soil Biology and Biochemistry, 156, 108211] <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108211>
- Zhou Q, Zhang H, Fu C, Zhou Y, Dai Z, Li Y, Tu C, Luo Y (2018). *The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea* [Geoderma, 322, 201-208] <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.015>
- Zhou Y & Zhou S (2023). *Role of microplastics in microbial community structure and functions in urban soils* [Journal of Hazardous Materials, 459, 132141] <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132141>
- Zhu D, Bi Q-F, Xiang Q, Chen Q-L, Christie P, Ke X, Wu L-H, Zhu Y-G (2017). *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>
- Zhu G, Yue K, Ni X, Yuan C, Wu F (2023). *The types of microplastics, heavy metals, and adsorption environments control the microplastic adsorption capacity of heavy metals* [Environmental Science and Pollution Research, 30, 80807-80816] <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28131-6>
- Zhu J, Liu S, Wang H, Wang D, Zhu Y, Wang J, He Y, Zheng Q, Zhan X (2022). *Microplastic particles alter wheat rhizosphere soil microbial community composition and function* [Journal of Hazardous Materials, 436, 129176] <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129176>
- Ziajahromi S, Slynkova N, Dwyer J, Griffith M, Fernandes M, Jaeger JE, Leusch FDL (2023). *Comprehensive assessment of microplastics in Australian biosolids: Abundance, seasonal variation and potential transport to agroecosystems* [Water Research, 250, 121071] <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121071>
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο (2025). *Μικροπλαστικά: πηγές, επιπτώσεις και λύσεις της ΕΕ* <https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20181116STO19217/mikroplastika-piges-epiptoseis-kai-luseis-tis-ee>