



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΒΙΩΣΙΜΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΚΑΙ ΚΥΚΛΙΚΗ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βιώσιμη Διαχείριση Υδατικών Πόρων: Περιορισμός και Αποφυγή Ρύπανσης

Sustainable Water Resources Management: Pollution Reduction and Avoidance

Ονοματεπώνυμο: ΜΑΓΓΙΝΑ ΚΛΕΟΠΑΤΡΑ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: ΤΣΙΤΣΙΦΛΗ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ

Μέλη Επιτροπής: ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΥ ΟΛΓΑ
ΣΑΚΕΛΑΡΙΟΥ ΣΤΑΥΡΟΣ

ΒΟΛΟΣ, 2025

Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος Πινάκων	2
Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract.....	5
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	6
1.1 Παρουσίαση του Προβλήματος	6
1.2 Γενικοί και Ειδικοί Στόχοι	7
1.3 Ερευνητικά ερωτήματα.....	8
1.4 Δομή Παρούσας Εργασίας.....	9
Κεφάλαιο 2: Διαχείριση Υδατικών Πόρων – Θεωρητικό υπόβαθρο	10
2.1 Ανάλυση βασικών εννοιών	10
2.2 Ρύπανση των υδατικών πόρων.....	11
2.3 Συχνοί Ρύποι	12
2.4 Ρύπανση επιφανειακών υδάτων	23
2.5 Ρύπανση υπόγειων υδάτων	24
2.6 Τεχνολογικές και Μεθοδολογικές Εξελίξεις στις μεθόδους αντιρρύπανσης	25
2.7 Νομοθετικό πλαίσιο για την προστασία των υδάτων και τον έλεγχο της ρύπανσης	28
Κεφάλαιο 3: Ρύπανση από Μικροπλαστικά	34
3.1 Τι είναι τα Μικροπλαστικά.....	34
3.2 Προέλευση Μικροπλαστικών	35
3.3 Ρύπανση από Μικροπλαστικά	37
3.4 Επιδράσεις των Μικροπλαστικών.....	39
3.4.1 Στην ανθρώπινη υγεία.....	39
3.4.2 Στο μικροπεριβάλλον.....	42
3.5 Χημικές και Φυσικές αντιδράσεις των μικροπλαστικών	45
3.6 Τι είναι η Αντιρρύπανση/Απορρύπανση.....	47
3.7 Ρύποι Προτεραιότητας.....	49
Κεφάλαιο 4: Τεχνικές και Πολιτικές Περιορισμού Ρύπανσης.....	55
4.1 Τεχνολογίες, τεχνικές και πολιτικές περιορισμού ρύπανσης των υδάτων	55

4.2 Τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων: Βιολογικοί καθαρισμοί, φίλτρα, νέες τεχνολογίες	57
4.3 Βέλτιστες πρακτικές στη γεωργία: Ορθολογική χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, προστασία εδαφών	60
4.4 Εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση: Κοινωνική συμμετοχή, ενημέρωση πολιτών και φορέων.....	61
Κεφάλαιο 5: Μελέτες Περίπτωσης.....	63
5.1 Βιομηχανία: Αντιρρυπαντικές πολιτικές, επεξεργασία αποβλήτων, συμμόρφωση με κανονισμούς	63
5.2 Διεθνή παραδείγματα: Επιτυχημένα προγράμματα καθαρισμού και πρόληψης ρύπανσης	65
5.3 Εφαρμογές στην Ελλάδα / Μεσογειακή περιοχή: Τοπικά έργα και πολιτικές.....	67
5.4 Συγκριτική αξιολόγηση: Τι λειτούργησε, τι όχι, διδάγματα και προτάσεις.....	76
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Προτάσεις	79
Συμπεράσματα	79
Προτάσεις	81
Βιβλιογραφία	83
Ξενόγλωσση.....	83
Ελληνόγλωσση	110

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Τοξικά στοιχεία που υπάρχουν συνήθως σε αστικά και βιομηχανικά λύματα.....	13
---	----

Ευχαριστίες

Με την παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, θα ήθελα πρωτίστως να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κ. Τσιτσιφλή Σταυρούλα, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη συνεχή υποστήριξη και τις ουσιαστικές παρατηρήσεις του, που συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω, επίσης, στην οικογένειά μου, τους καθηγητές της σχολής και τους συμφοιτητές για την αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Περίληψη

Η εργασία εξετάζει τη βιώσιμη διαχείριση υδατικών πόρων δίνοντας έμφαση στον περιορισμό και την αποφυγή ρύπανσης. Αναλύει τις ανθρωπογενείς πιέσεις όπως η (αστικοποίηση, γεωργία, βιομηχανία) σε συνδυασμό με την επίδραση της κλιματικής αλλαγής. Στη συνέχεια, θέτει στόχους για την χαρτογράφηση των ρυπαντών προτεραιότητας, την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων, καθώς και τη διαμόρφωση μιας ανθεκτικής στρατηγικής πρόληψης και αποφυγής σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Η μελέτη προσεγγίζει τη ρύπανση των υδάτων μέσα από μια συνθετική προοπτική που συνδυάζει βιβλιογραφική ανασκόπηση και συγκριτική ανάλυση επιλεγμένων μελετών περίπτωσης, εστιάζοντας σε τέσσερις βασικούς άξονες όπως τον έλεγχο της ρύπανσης στην πηγή, τις τεχνολογίες επεξεργασίας, με έμφαση τα οικονομικά εργαλεία την ανάκτηση κόστους και τα ζητήματα διακυβέρνησης. Στο θεωρητικό πλαίσιο παρουσιάζονται οι κύριοι μηχανισμοί που οδηγούν σε ρύπανση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων και οι βασικές κατηγορίες ρυπαντών (ανόργανοι, οργανικοί, βιολογικοί). Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στα μικροπλαστικά ως αναδυόμενη απειλή, που οφείλεται στις χημικές/φυσικές τους αλληλεπιδράσεις και με σοβαρές συνέπειες τόσο για τα οικοσυστήματα όσο και για την ανθρώπινη υγεία.

Παράλληλα, αναλύονται οι τεχνολογικές και μεθοδολογικές εξελίξεις σε βιολογικές, φυσικοχημικές και μεμβρανικές διεργασίες, οι οποίες αποτελούν βελτιωμένες τεχνικές για την καθαριστική επεξεργασία του νερού, καθώς και σε προσροφητικά υλικά δηλαδή ουσίες που συγκρατούν και αφαιρούν ρύπους από το νερό, όπως τα βαρέα μέταλλα και οι Τεχνικές Βιοαποκατάσταση, σε συνδυασμό με προληπτικές παρεμβάσεις στη γεωργία και τη βιομηχανία.

Τέλος, προτείνονται πρακτικές λύσεις για μικρούς δήμους, όπως τηλεμετρική παρακολούθηση και αποκεντρωμένες υποδομές δηλαδή (τεχνητοί υγρότοποι, επαναχρησιμοποίηση νερού), που ενισχύουν την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των μέτρων.

Λέξεις-κλειδιά: Βιώσιμη διαχείριση, Ρύπανση υδάτων, Μικροπλαστικά, Επεξεργασία νερού, Μείωση ρύπων, Προστασία

Abstract

The study examines the sustainable management of water resources, giving emphasis to the limitation and the avoidance of pollution. It analyzes the anthropogenic pressures such as (urbanization, agriculture, industry) in combination with the impact of climate change. Subsequently, it sets objectives for the mapping of priority pollutants, the evaluation of the effectiveness of the measures, as well as the formulation of a resilient strategy of prevention and avoidance at the river basin level.

The study approaches water pollution through a synthetic perspective that combines literature review and comparative analysis of selected case studies, focusing on four main axes such as the control of pollution at the source, treatment technologies, with emphasis on economic instruments, cost recovery, and governance issues. In the theoretical framework, the main mechanisms that lead to pollution of surface and groundwater are presented, along with the basic categories of pollutants (inorganic, organic, biological). Particular weight is given to micro plastics as an emerging threat, which is due to their chemical/physical interactions and with serious consequences both for ecosystems and for human health.

At the same time, technological and methodological developments are analyzed in biological, physicochemical, and membrane processes, which are improved techniques for water treatment, as well as in adsorptive materials, that is, substances that retain and remove pollutants from the water, such as heavy metals, and Bioremediation Techniques, and in combination with preventive interventions in agriculture and industry. Practical solutions are also proposed for small municipalities, such as telemetric monitoring and decentralized infrastructures, that is (constructed wetlands, water reuse), which enhance the effectiveness and the sustainability of the measures.

Keywords: Sustainable management, Water pollution, Micro plastics, Water treatment, Pollution reduction, Protection

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Παρουσίαση του Προβλήματος

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας εστιάζει στη διερεύνηση των αιτιών, των επιπτώσεων και των στρατηγικών μετριασμού της ρύπανσης των υδατικών πόρων, επιδιώκοντας να αναδείξει τόσο την επιστημονική όσο και την κοινωνικοοικονομική διάσταση του προβλήματος. Αποτελεί ένα από τα πλέον πιεστικά περιβαλλοντικά προβλήματα του 21ου αιώνα, καθώς προέρχεται από αστικά λύματα, βιομηχανικά απόβλητα, γεωργικές δραστηριότητες αλλά και από νέους ρύπους, όπως τα μικροπλαστικά και τα φαρμακευτικά κατάλοιπα. Οι επιπτώσεις της είναι ιδιαίτερα σοβαρές για τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία, καθώς μειώνεται η ποιότητα του νερού και διαταράσσεται η ισορροπία της φύσης.

Οι υδατικοί πόροι, τόσο οι επιφανειακοί όσο και οι υπόγειοι, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της ζωής και στη στήριξη της γεωργίας, της βιομηχανίας και της οικιακής κατανάλωσης. Ωστόσο, η ταχεία αστικοποίηση, η εντατικοποίηση της γεωργικής παραγωγής, η ανεξέλεγκτη βιομηχανική δραστηριότητα και η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού έχουν οδηγήσει σε αυξανόμενη πίεση, με αποτέλεσμα τη συνεχή υποβάθμιση της ποιότητάς τους (European Environment Agency, 2018).

Σύμφωνα με πρόσφατες εκθέσεις της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, λιγότερο από το 40% των επιφανειακών υδάτων στην Ευρώπη πληρούν τα κριτήρια «καλής οικολογικής κατάστασης» που θέτει η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/EK (European Commission, 2025).

Τα στοιχεία αυτά υποδηλώνουν την ύπαρξη σοβαρών και επίμονων προβλημάτων ρύπανσης, τα οποία απορρέουν από σημειακές πηγές, όπως τα βιομηχανικά λύματα, αλλά και από διάχυτες πηγές, όπως η γεωργική απορροή και η ατμοσφαιρική εναπόθεση ρύπων (Talabi & Kayode, 2019).

Ιδιαίτερα ανησυχητική είναι και η ρύπανση των υπόγειων υδάτων, τα οποία αποτελούν την κύρια πηγή πόσιμου νερού για εκατομμύρια ανθρώπους παγκοσμίως (Jia & Qian, 2025).

Η αόρατη φύση της υπόγειας ρύπανσης καθιστά δύσκολη την έγκαιρη ανίχνευση και αντιμετώπιση, ενώ η παρατεταμένη παρουσία τοξικών ρύπων, όπως βαρέα μέταλλα, νιτρικά ιόντα και οργανικές ενώσεις, ενέχει σοβαρούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία (Cao et al., 2023).

Τα τελευταία χρόνια, στο ήδη σύνθετο πρόβλημα της ρύπανσης προστίθεται η αυξανόμενη παρουσία μικροπλαστικών και νανοπλαστικών σε ποτάμια, λίμνες, υπόγεια ύδατα και θαλάσσια οικοσυστήματα (MacLeod et al., 2021).

Τα σωματίδια αυτά, λόγω του μικρού μεγέθους και της χημικής τους σταθερότητας, συσσωρεύονται στο περιβάλλον και μεταφέρονται μέσω της τροφικής αλυσίδας, προκαλώντας αλυσιδωτές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα και εν δυνάμει στην ανθρώπινη υγεία (Wang et al., 2019).

Παράλληλα, η αδυναμία των παραδοσιακών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων να απομακρύνουν αποτελεσματικά τα μικροπλαστικά καταδεικνύει την ανάγκη για νέες τεχνολογικές καινοτομίες και ενίσχυση των υποδομών διαχείρισης (Viegas et al., 2020).

Η πολυπλοκότητα του προβλήματος εντείνεται περαιτέρω από τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, η οποία επιδρά στον υδρολογικό κύκλο, εντείνει τα ακραία καιρικά φαινόμενα και επιταχύνει τις διαδικασίες μεταφοράς ρύπων στα υδάτινα οικοσυστήματα (Batabyal, 2018).

1.2 Γενικοί και Ειδικοί Στόχοι

Ο γενικός στόχος της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση και ανάλυση των προβλημάτων ρύπανσης των υδατικών πόρων, με έμφαση στις αιτίες, τις επιπτώσεις και τις δυνατότητες πρόληψης και αποκατάστασης. Η εργασία αποσκοπεί στην ανάδειξη της πολυδιάστατης φύσης του προβλήματος, το οποίο συνδέεται τόσο με τις ανθρώπινες δραστηριότητες όσο και με τις κλιματικές και περιβαλλοντικές μεταβολές.

Οι ειδικοί στόχοι της εργασίας διαρθρώνονται ως εξής:

- Καταγραφή και ανάλυση των βασικών πηγών ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, με διάκριση μεταξύ σημειακών και διάχυτων φορτίων.
- Διερεύνηση της ρύπανσης από μικροπλαστικά, η οποία συνιστά αναδυόμενη περιβαλλοντική απειλή, με ιδιαίτερη έμφαση στη διάδοσή τους σε υδάτινα και χερσαία οικοσυστήματα.
- Παρουσίαση και σύγκριση σύγχρονων τεχνολογιών και μεθοδολογιών για την πρόληψη και αποκατάσταση της ρύπανσης.

Μέσω αυτών των στόχων, η εργασία επιδιώκει να συμβάλει στην κατανόηση της πολυπλοκότητας των περιβαλλοντικών προκλήσεων και να προτείνει κατευθύνσεις για αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης.

1.3 Ερευνητικά ερωτήματα

Η εργασία επιδιώκει να τεκμηριώσει, με συστηματική και διεπιστημονική προσέγγιση, τις δυνατότητες για βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων, με έμφαση στον περιορισμό και την αποφυγή της ρύπανσης.

Τα ερευνητικά ερωτήματα που τίθενται είναι τα εξής:

EE1. Ποιες είναι οι κύριες και πιο ανησυχητικές κατηγορίες ρύπων που επηρεάζουν την ποιότητα των υδάτων;

EE2. Πόσο αποτελεσματικά είναι τα υφιστάμενα μέτρα πολιτικής και τεχνολογίας στον περιορισμό και την αποφυγή ρύπανσης των υδάτων;

EE3. Πώς μπορεί να διαμορφωθεί μια ολοκληρωμένη και ανθεκτική στρατηγική πρόληψης και αποφυγής, ικανή να ανταποκριθεί στις μελλοντικές περιβαλλοντικές και κλιματικές προκλήσεις;

1.4 Δομή Παρούσας Εργασίας

Η εργασία έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε να ακολουθεί μια λογική ακολουθία.

- **Το Κεφάλαιο 1** αναφέρεται η εισαγωγή, η διατύπωση του προβλήματος, οι γενικοί και ειδικοί στόχοι και η δομή της μελέτης. Το κεφάλαιο αυτό θέτει το θεωρητικό και μεθοδολογικό πλαίσιο στο οποίο εδράζεται η έρευνα.
- **Το Κεφάλαιο 2** εστιάζει στις θεωρητικές βάσεις της διαχείρισης των υδατικών πόρων, αναλύοντας τις βασικές έννοιες, τις πηγές και τα είδη ρύπανσης, τις τεχνολογικές εξελίξεις, καθώς και τις μεθόδους απορρύπανσης και πρόληψης.
- **Το Κεφάλαιο 3** επικεντρώνεται στη ρύπανση από μικροπλαστικά, εξετάζοντας την προέλευση, τις επιπτώσεις και τις τεχνολογίες αντιμετώπισής της, προκειμένου να αναδειχθούν οι προκλήσεις και οι δυνατότητες μετριασμού τους, καθώς και άλλων ρύπων προτεραιότητας όπως είναι τα φάρμακα και οι ενδοκρινικοί διαταράκτες.
- **Το Κεφάλαιο 4** παρουσιάζει τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (βιολογικοί καθαρισμοί, φίλτρα, καινοτόμες μέθοδοι), εστιάζει σε βέλτιστες γεωργικές πρακτικές, σε βιομηχανικές πολιτικές αντιρρύπανσης και συμμόρφωση, και σε δράσεις εκπαίδευσης και ευαισθητοποίησης που μετασχηματίζουν συμπεριφορές και θεσμικές πρακτικές.
- **Το Κεφάλαιο 5** συνθέτει εμπειρικά δεδομένα και αναλύει διεθνή παραδείγματα επιτυχημένων προγραμμάτων καθαρισμού/πρόληψης, καθώς και εφαρμογές στην Ελλάδα και τη Μεσογειακή περιοχή. Έπειτα παρέχει μια συγκριτική αξιολόγηση, αναδεικνύοντας παράγοντες επιτυχίας/αποτυχίας και εξάγοντας διδάγματα και προτάσεις πολιτικής.

Κεφάλαιο 2: Διαχείριση Υδατικών Πόρων – Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Ανάλυση βασικών εννοιών

Τα υδάτινα οικοσυστήματα αποτελούν βασικό στοιχείο του υδρολογικού κύκλου και θεμέλιο της ανθρώπινης ανάπτυξης.

Ενώ τα επιφανειακά ύδατα καλούνται τα υδάτινα σώματα που απαντώνται άμεσα στην επιφάνεια της Γης, δηλαδή ποταμοί, λίμνες, υγρότοποι, μεταβατικά και παράκτια ύδατα. Αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού όγκου υδάτων, παρέχοντας κρίσιμες υπηρεσίες οικοσυστήματος και οικονομική στήριξη σε αγροτικές, βιομηχανικές και οικιακές δραστηριότητες (European Environment Agency, 2018).

Παρά τα σημαντικά βήματα βελτίωσης της ποιότητας μετά το 2000, μόλις 40 % των επιφανειακών υδάτων εμφανίζουν «καλή» οικολογική κατάσταση, γεγονός που υποδεικνύει την επίμονη επιβάρυνση από υδρομορφολογικές παρεμβάσεις και διάχυτη ρύπανση. Η Επιτροπή επισημαίνει ότι η επίτευξη «καλής» χημικής κατάστασης προϋποθέτει τήρηση προτύπων για τις ουσίες προτεραιότητας και σταδιακή εξάλειψη των εκπομπών τους (European Commission, 2025).

Με τον όρο υπόγεια ύδατα αναφερόμαστε στο νερό που αποθηκεύεται κάτω από το έδαφος, στη ζώνη κορεσμού, και που έρχεται σε άμεση επαφή με το έδαφος ή το υπέδαφος. Η δημιουργία τους προέρχεται κυρίως από τη διείσδυση των βροχοπτώσεων τροφοδοτώντας ποτάμια, πηγές και υδροφόρους ορίζοντες.

Η δημιουργία τους ξεκινά από την κατείδυση της βροχόπτωσης και ακολουθεί αργές γραμμές ροής έως ότου επανεμφανιστούν φυσικά ως πηγές ή τροφοδοτήσουν ρεύματα (U.S. Geological Survey, 2018).

Παρά το γεγονός ότι τα υπόγεια αποθέματα αντιστοιχούν σε πολλαπλάσιο όγκο των λιμνών και ποταμών, η αόρατη φύση τους οδηγεί συχνά σε υπεράντληση ή/και χημική ρύπανση, με επακόλουθα καθιζήσεις, υφαλμύρωση και απώλεια οικοσυστημικών λειτουργιών (U.S. Geological Survey, 2018).

Η διάκριση μεταξύ των δύο κατηγοριών (επιφανειακά και υπόγεια ύδατα) είναι λειτουργική και όχι απόλυτη· στα περισσότερα υδρολογικά συστήματα, καθώς τα επιφανειακά ύδατα τροφοδοτούν και τροφοδοτούνται από τα υπόγεια, σχηματίζοντας έναν συνεχή υδατικό ισολογισμό. Η εξάτμιση, η διαπνοή και η επιφανειακή απορροή ελέγχουν τις εισροές σε ποταμούς, ενώ η κατείσδυση (recharge) ρυθμίζει τη στάθμη των υδροφόρων. Η κατανόηση αυτής της διπλής ροής είναι κρίσιμη για τη χωρική ιεράρχηση μέτρων, όπως οι ζώνες προστασίας πηγαδιών και τα προγράμματα αποκατάστασης κοίτης. Συνεπώς, ο ορθός προσδιορισμός και η ποσοτικοποίηση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων αποτελούν προϋπόθεση για ολοκληρωμένη διαχείριση πόρων υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Οι σύγχρονες ευρωπαϊκές πολιτικές επιβάλλουν συνδυασμένα υδρολογικά-οικολογικά κριτήρια, ενώ η διεπιστημονική έρευνα υιοθετεί ολοένα και πιο σύνθετα μοντέλα υδρο-γεωχημικής αλληλεπίδρασης, υποστηρίζοντας μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των υδάτινων συστημάτων (Batabyal, 2018).

2.2 Ρύπανση των υδατικών πόρων

Η ρύπανση των πόρων τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων συνιστά μείζονα περιβαλλοντική και υγειονομική πρόκληση, καθώς οι υδάτινες λεκάνες λειτουργούν ταυτόχρονα ως αποδέκτες, φορείς και πηγές ζωτικών οικοσυστημικών υπηρεσιών. Οι ρυπαντές εισέρχονται στο υδάτινο περιβάλλον μέσω ποικίλων οδών: γεωργική απορροή, βιομηχανικές εκροές, αστικά λύματα, μεταλλευτικές δραστηριότητες και διάχυτες εκπομπές από τον χώρο των μεταφορών ή των απορριμμάτων. Οι μηχανισμοί διάχυσης διαφέρουν: στα επιφανειακά ύδατα επικρατούν οι άμεσες εκ φορτίσεις και η επιφανειακή απορροή, ενώ στα υπόγεια η κατακόρυφη διήθηση μέσω εδαφικών στρωμάτων, συχνά με λανθάνοντα χρόνο μετάδοσης (Talabi & Kayode, 2019).

Η ασφάλεια της ποιότητας των υπόγειων υδάτων και η πρόληψη και ο έλεγχος της ρύπανσης αποτελούν σημαντικά παγκόσμια περιβαλλοντικά ζητήματα. Επιπλέον, η μακροχρόνια κατανάλωση νερού ρυπασμένου με ανόργανες ενώσεις, ενδέχεται να

συνιστά σοβαρό κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, λόγω της αόρατης φύσης, της επίμονης παρουσίας και της τοξικότητας των ανόργανων ρύπων (Cao et al., 2023).

Ενδεικτικά, τα αυξημένα επίπεδα νιτρικών στο πόσιμο νερό μπορούν να προκαλέσουν καρκίνο του πεπτικού συστήματος ή του ήπατος (Joodavi et al., 2021).

Συνεπώς, η ανάλυση των πηγών και η αξιολόγηση του κινδύνου για την υγεία από ανόργανους ρύπους στα υπόγεια ύδατα, είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών ελέγχου της ρύπανσης και είναι σημαντικές για την πρόληψη της ρύπανσης σε περιφερειακό επίπεδο και την προστασία της ανθρώπινης υγείας.

2.3 Συχνοί Ρύποι

Οι ρύποι που επηρεάζουν το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: ανόργανοι, οργανικοί και βιολογικοί. Παρακάτω αναλύονται ανά κατηγορία.

A. Ανόργανοι Ρύποι

Τα υδάτινα οικοσυστήματα είναι εξαιρετικά πολύπλοκα, δυναμικά και υπόκεινται σε πολλές εσωτερικές και εξωτερικές αλλαγές με την πάροδο του χρόνου. Οι ρύποι εισέρχονται στο υδάτινο σύστημα και δημιουργούν σοβαρά προβλήματα προκαλώντας εκτεταμένες ζημιές στη ζωή και τις δραστηριότητες των ζωντανών υδρόβιων οργανισμών και αλλάζουν τη χημεία του νερού, γεγονός που επηρεάζει την ποιότητα του νερού και διαταράσσει την οικολογική ισορροπία στο υδάτινο οικοσύστημα. Οι περισσότεροι εισέρχονται στο υδάτινο περιβάλλον είναι χημικής φύσης και κυμαίνονται από εντελώς τοξικές ουσίες όπως γεωργικά φυτοφάρμακα, κυάνιο και άλατα διαφόρων βαρέων μετάλλων έως θρεπτικά συστατικά όπως φωσφορικά, νιτρικά, λιπάσματα και οργανική ύλη οικιακής και βιομηχανικής προέλευσης (Ainsworth, 1994).

Μια σύντομη λίστα ανόργανων συστατικών που υπάρχουν συχνότερα σε αστικά και βιομηχανικά ύδατα δίνεται στον **Πίνακα 1** μαζί με τις πηγές και τις αρνητικές επιπτώσεις τους.

Πίνακας 2: Τοξικά στοιχεία που υπάρχουν συνήθως σε αστικά και βιομηχανικά λύματα

Στοιχείο	Πηγές	Ανεπιθύμητες επιδράσεις	
Αρσενικό (As)	Παρασιτοκτόνα, Χημικά απόβλητα, Παραπροϊόντα εξόρυξης	Αναστολέας ενζύμων, Καρκινογόνο	
Βηρύλλιο (Be)	Πυρηνική ενέργεια και διαστημική βιομηχανία, Άνθρακας	Τοξικό, Καρκινογόνο	
Βόριο (B)	Βιομηχανικά απόβλητα, Απορρυπαντικά, Άνθρακας	Τοξικό για ορισμένα φυτά	
Κάδμιο (Cd)	Βιομηχανικές απορρίψεις, Επιμετάλλωση, Μπαταρίες, Εξόρυξη	Υπέρταση, νεφρική δυσλειτουργία, αναιμία, διαταραχές μυελού των οστών	
Χρώμιο (Cr III & Cr VI)	Επιμετάλλωση, Βιομηχανία δέρματος	Το Cr (VI) είναι καρκινογόνο	
Χαλκός (Cu)	Επιμετάλλωση, Εξόρυξη, Εκχύλιση μεταλλευμάτων	Τοξικό για φυτά και φύκη	
Φθόριο (F)	Φυσικές γεωλογικές πηγές, Βιομηχανικά απόβλητα	Βλάβες στα οστά, κηλίδες στα δόντια	
Μόλυβδος (Pb)	Υδραυλικά, Εξόρυξη, Άνθρακας, Βενζίνη	Αναιμία, νεφρική δυσλειτουργία, νευρικές διαταραχές	
Μαγγάνιο (Mn)	Εξόρυξη, Μικροβιακή δράση ορυκτών Mn σε χαμηλό pH	Τοξικό για φυτά	
Υδράργυρος (Hg)	Εξόρυξη, Βιομηχανικά απόβλητα, Άνθρακας	Πολύ τοξικό (με τη μορφή CH_3Hg^+ , Hg^{2+})	
Μολυβδαίνιο (Mo)	Φυσικές πηγές, Βιομηχανικά απόβλητα	Τοξικό για ζώα	
Σελήνιο (Se)	Φυσικές πηγές, Άνθρακας	Τοξικό	
Ψευδάργυρος (Zn)	Επιμετάλλωση, Βιομηχανικά απόβλητα	Τοξικό για φυτά	

(Thangamalathi & Anuradha, 2018)

Τα βαρέα μέταλλα γενικά εισέρχονται στο υδάτινο περιβάλλον μέσω της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης, της διάβρωσης της γεωλογικής μήτρας ή λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που προκαλούνται από βιομηχανικά λύματα, οικιακά λύματα και απόβλητα εξόρυξης. Οι μεταλλικοί ρύποι στα υδάτινα συστήματα συνήθως παραμένουν είτε διαλυτοί είτε σε μορφή εναιωρήματος και τελικά τείνουν να κατακάθονται στον πυθμένα ή απορροφούνται από τους οργανισμούς. Η προοδευτική και μη αναστρέψιμη συσσώρευση αυτών των μετάλλων σε διάφορα όργανα υδρόβιων πλασμάτων οδηγεί σε ασθένειες που σχετίζονται με τα μέταλλα μακροπρόθεσμα λόγω της τοξικότητάς τους, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο την υδρόβια βιοποικιλότητα και άλλους οργανισμούς. Οι υποκατάστατες οποιουδήποτε μετάλλου μπορεί να είναι σημαντικός παράγοντας για την πρόκληση τοξικότητας (Thangamalathi & Anuradha, 2018).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, οι ανόργανοι ρύποι συγκαταλέγονται στους σημαντικότερους παράγοντες ρύπανσης των υδάτινων οικοσυστημάτων. Ανάμεσα τους περιλαμβάνονται τα βαρέα μέταλλα που είναι ιδιαίτερα σημαντικά, καθώς εντοπίζονται συχνά σε περιοχές με έντονη βιομηχανική ή μεταλλευτική δραστηριότητα. Επίσης, ο μόλυβδος (Pb) και το χρώμιο (Cr) έχουν καταγραφεί σε υψηλές συγκεντρώσεις σε ποτάμια που διασχίζουν αστικοβιομηχανικές ζώνες, όπως ο ποταμός Yamuna στην Ινδία. Τα επίπεδα αυτών των ρύπων αυξάνονται κατά την ξηρή περίοδο, γεγονός που υποδεικνύει ότι προέρχονται κυρίως από ανθρώπινες δραστηριότητες (Sankhla et al., 2021).

Σε υπόγεια νερά, όπως στην πεδιάδα Songnen της βορειοανατολικής Ασίας, έχουν βρεθεί αυξημένες ποσότητες **αρσενικού (As)**, **μαγγανίου (Mn)** και **σιδήρου (Fe)**. Αυτά τα στοιχεία υπάρχουν φυσικά στο έδαφος, όμως η άρδευση και η έντονη χρήση λιπασμάτων κάνουν την κατάστασή τους πιο έντονη (Ruan et al., 2024).

Επιπρόσθετα, η εκτεταμένη μεταλλευτική δραστηριότητα επίσης, ρυπαίνει τα ποτάμια, κυρίως μέσω της όξινης απορροής από ορυχεία (acid mine drainage). Αυτή η διαδικασία αυξάνει **τα επίπεδα χαλκού (Cu), ψευδαργύρου (Zn) και καδμίου (Cd) στα νερά**, επηρεάζοντας αρνητικά την ποιότητά τους (Wolkersdorfer & Mugona, 2020).

Άλλοι σημαντικοί ανόργανοι ρύποι είναι τα νιτρικά και τα φωσφορικά ιόντα, που προέρχονται κυρίως από γεωργικές καλλιέργειες και αστική ρύπανση. Στη λεκάνη του ποταμού Jinzi, η έντονη χρήση λιπασμάτων έχει αλλάξει τη χημική σύνθεση των νερών (Zhang et al., 2025). Αντίστοιχα, στη Νότια Ασία, οι υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών και φωσφορικών σχετίζονται με την κτηνοτροφία και τα βιομηχανικά απόβλητα (Sarker et al., 2021).

B. Οργανικοί Ρύποι

Οι οργανικοί περιβαλλοντικοί ρύποι αποτελούν κρίσιμη κατηγορία ενώσεων άνθρακα, γνωστές για την λιποφιλία και την τάση βιοσυσσώρευσης, χαρακτηριστικά που ενισχύουν την περιβαλλοντική και διατροφική τους μεταφορά (Bukowska et al., 2022).

Σε αυτό το πλαίσιο, αναλύονται οι κύριες κατηγορίες οργανικών ρύπων, δηλαδή ουσιών που μολύνουν το περιβάλλον και μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την υγεία του ανθρώπου:

1. Πολυαρωματικοί Υδρογονάνθρακες (PAHs)

Δημιουργούνται κυρίως από ατελή καύση οργανικών υλικών, όπως ξύλο, κάρβουνο, πετρέλαιο ή ακόμα και καπνό από τσιγάρα.

Έχουν την τάση να «κολλούν» πάνω σε αιωρούμενα σωματίδια στον αέρα αλλά και στο έδαφος, πράγμα που διευκολύνει τη μεταφορά και τη συσσώρευσή τους στο περιβάλλον.

Το πιο γνωστό και μελετημένο μέλος αυτής της κατηγορίας είναι μια χημική ένωση που είναι το βενζοπυρένιο, το οποίο η Διεθνής Υπηρεσία Έρευνας για τον Καρκίνο το έχει κατατάξει στις ουσίες της Ομάδας 1, δηλαδή σε εκείνες που είναι αποδεδειγμένα καρκινογόνες για τον άνθρωπο, όπως επίσης και στον οργανισμό, μπορεί να αλληλοεπιδράσει με το DNA και να προκαλέσει **μεταλλάξεις**, που με τη σειρά τους αυξάνουν τον κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου, κυρίως στον πνεύμονα και το δέρμα (Bukowska et al., 2022).

2. Πολυχλωριωμένα Διφαινύλια (PCBs)

Χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στο παρελθόν σε βιομηχανικές εφαρμογές (π.χ. σε ηλεκτρικούς μετασχηματιστές, μονωτικά υλικά κ.ά.), αλλά σήμερα έχουν απαγορευτεί διεθνώς.

Παρά την απαγόρευση, εξακολουθούν να υπάρχουν στο περιβάλλον, γιατί είναι πολύ σταθερές χημικές ενώσεις που δεν αποδομούνται εύκολα (ATSDR, 2024).

Η έκθεση του ανθρώπου στα γίνεται κυρίως μέσω της διατροφής, καθώς συσσωρεύονται στην τροφική αλυσίδα (ιδιαίτερα σε λιπαρούς ιστούς ζώων και ψαριών).

Έχουν συνδεθεί με σοβαρές επιδράσεις στην υγεία, όπως:

νευροαναπτυξιακές διαταραχές (προβλήματα στην ανάπτυξη του νευρικού συστήματος), ενδοκρινικές επιδράσεις (παρεμβάσεις στις ορμόνες), ηπατοτοξικότητα (βλάβες στο ήπαρ) (ATSDR, 2024).

3. Πολυχλωριωμένες Διβενζοδιοξίνες / Διοξίνες και Φουράνια (PCDD/Fs)

Οι διοξίνες ανήκουν στους πλέον αυθεντικούς οργανικούς ρύπους, με μεγάλη διάρκεια παραμονής στο περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι δεν αποδομούνται εύκολα στο περιβάλλον και συσσωρεύονται κυρίως σε ζωικά προϊόντα (π.χ. κρέας, γάλα,

ψάρια), αφού έχουν μεγάλη χημική σταθερότητα και λιποφιλία (δηλαδή «αποθηκεύονται» στους λιπαρούς ιστούς).

Λόγω της υψηλής τοξικότητάς τους, η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων, αναθεώρησε το 2018 τα επιτρεπτά όρια έκθεσης σε πολύ χαμηλά επίπεδα, καθώς ακόμη και μικρές ποσότητες, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος για την υγεία. Αυτή έγινε γιατί φάνηκε πως ακόμη και πολύ χαμηλές ποσότητες μπορούν να έχουν επιπτώσεις στο αναπαραγωγικό σύστημα (π.χ. γονιμότητα) και στο ενδοκρινικό σύστημα δηλαδή ορμονικές διαταραχές (EFSA CONTAM Panel, 2018).

4. Νιτροαρωματικά

Είναι μια ομάδα ενώσεων με σημαντικές βιομηχανικές και στρατιωτικές χρήσεις.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το (τρινιτροτολουόλιο), το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε εκρηκτικά. Το οποίο έχει:

υψηλή ανθεκτικότητα στο περιβάλλον (δεν αποδομείται εύκολα), τοξικότητα για τον άνθρωπο και τα οικοσυστήματα.

Η νιτρογλυκερίνη, αν και δεν ανήκει αυστηρά στα αρωματικά παράγωγα, συχνά αναφέρεται μαζί τους, γιατί εμφανίζει παρόμοιες προκλήσεις. Έχει χρησιμοποιηθεί τόσο στη φαρμακευτική (ως αγγειοδιασταλτικό) όσο και σε εκρηκτικά, ενώ στο περιβάλλον μπορεί επίσης να προκαλέσει ρύπανση και τοξικότητα (Bilal et al., 2021).

5. Γεωργικά Φάρμακα και Προϊόντα Μεταβολισμού (TPs)

Τα γεωργικά φάρμακα (φυτοφάρμακα, ζιζανιοκτόνα, εντομοκτόνα) χρησιμοποιούνται ευρέως στη γεωργία για την προστασία των καλλιεργειών.

Όταν οι ενώσεις αυτές αποικοδομούνται στο περιβάλλον, σχηματίζονται μεταβολίτες και προϊόντα αποικοδόμησης.

Σε αντίθεση με τις αρχικές ουσίες, τα παράγωγα αυτά είναι συχνά πιο διαλυτά στο νερό και επομένως μπορούν να μετακινούνται πιο εύκολα στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα. Έτσι, ανιχνεύονται συχνά σε επιφανειακά νερά (λίμνες, ποτάμια) αλλά και σε πόσιμο νερό, γεγονός που δημιουργεί σοβαρές ανησυχίες για τη δημόσια υγεία.

Αυτός είναι και ο λόγος που υπάρχει ανάγκη για συστηματική παρακολούθηση της παρουσίας τους στο περιβάλλον (Pasquini et al., 2025).

6. Χλωροφαινόλες

Οι χλωροφαινόλες είναι μια κατηγορία χημικών ενώσεων που προκύπτουν όταν το μόριο της φαινόλης συνδυάζεται με άτομα χλωρίου.

Χρησιμοποιούνται ως βιοκτόνα δηλαδή ουσίες που καταστρέφουν μικροοργανισμούς και αξιοποιούνται ως συντηρητικά σε ξύλο, δέρματα, προϊόντα χαρτιού, για να τα προστατεύουν από φθορές.

Μπορούν όμως να παραχθούν και δευτερογενώς, π.χ. κατά τη χλωρίωση νερού ή άλλων οργανικών υλών.

Χαρακτηρίζονται από:

- οξεία τοξικότητα (προκαλούν άμεσες βλάβες στον οργανισμό σε υψηλές δόσεις),
- χρόνια τοξικότητα (επιπτώσεις μετά από μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλές δόσεις),
- βιοσυσσώρευση (συσσωρεύονται στους οργανισμούς και στην τροφική αλυσίδα),
- αρνητική επίδραση στη βιοποικιλότητα, καθώς βλάπτουν υδρόβιους οργανισμούς (ψάρια, αμφίβια, ασπόνδυλα), διαταράσσουν μικροοργανισμούς, όπως φύκη και βακτήρια και, μέσω της τροφικής αλυσίδας, μπορούν να απειλήσουν και πουλιά ή θηλαστικά (Yadav et al., 2023).

7. Χλωροαλκάνια / Χλωροαλκένια

Οι βραχείας αλυσίδας χλωροπαραφίνες (SCCPs) είναι χημικές ουσίες που φτιάχνονται σε μικρά «κομμάτια» παραφίνης (δηλαδή μόρια με λίγους άνθρακες) προστίθεται χλώριο και χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, π.χ. σε πλαστικά, λιπαντικά και υλικά που δεν καίγονται εύκολα.

Επειδή δεν διασπώνται εύκολα, μπορούν να ταξιδέψουν σε μεγάλες αποστάσεις μέσα από τον αέρα ή το νερό, θεωρούνται επικίνδυνοι οργανικοί ρύποι (POPs) και έχουν ενταχθεί στη Σύμβαση της Στοκχόλμης για περιορισμό (IARC, 2014).

Δύο άλλες ουσίες της κατηγορίας, οι διαλύτες (τριχλωροαιθυλένιο) και (τετραχλωροαιθυλένιο), χρησιμοποιούνται στον καθαρισμό και την απολίπανση μετάλλων.

- Το TCE έχει αποδειχθεί ότι είναι **καρκινογόνο για τον άνθρωπο**.
- Το PCE θεωρείται ότι **πιθανόν προκαλεί καρκίνο** (UNEP, 2022).

8. Κτηνιατρικά Φάρμακα (Αντιβιοτικά)

Τα φάρμακα που δίνονται στα ζώα για την πρόληψη και θεραπεία ασθενειών (όπως αντιβιοτικά και φάρμακα που σκοτώνουν ή απομακρύνουν τα σκουλήκια και άλλα παράσιτα που ζουν μέσα στο σώμα ζώων ή ανθρώπων) και συχνά καταλήγουν στο περιβάλλον. Αυτό γίνεται κυρίως μέσω των αποβλήτων των ζώων (ούρα, κόπρανα) ή από τη διαρροή στις μονάδες εκτροφής.

Όταν οι ουσίες αυτές φτάνουν στα νερά και στο έδαφος, μπορούν να επηρεάσουν τα μικρόβια και να οδηγήσουν στην ανάπτυξη αντοχής στα αντιβιοτικά.

Το πρόβλημα αυτό είναι παγκόσμιο και αφορά άμεσα τη δημόσια υγεία, γιατί κάνει πιο δύσκολη τη θεραπεία ασθενειών στον άνθρωπο.

Στην Ευρώπη, νέες έρευνες δείχνουν ότι χρειάζεται καλύτερη χαρτογράφηση και παρακολούθηση των κινδύνων που προκαλούν τα φάρμακα αυτά (Albarano et al., 2024).

Έτσι λοιπόν, ένα ιδιαίτερα σημαντικό είδος οργανικών ρύπων είναι τα υπολείμματα φαρμάκων, τα οποία καταλήγουν στα νερά κυρίως επειδή τα αστικά λύματα δεν καθαρίζονται σωστά. Αυτό συμβαίνει όταν οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων είτε δεν λειτουργούν σωστά, είτε δεν είναι κατάλληλα σχεδιασμένες, με αποτέλεσμα τα φαρμακευτικά κατάλοιπα να περνούν στο τελικό νερό που απορρίπτεται στο περιβάλλον. Ορισμένα φάρμακα, όπως η καρβαμαζεπίνη και η ιβουπροφαίνη, που χρησιμοποιούνται ευρέως, εντοπίζονται συχνά σε ποτάμια και λίμνες ως μικρορύποι. Έρευνες έχουν δείξει ότι ο ενεργός άνθρακας που παράγεται από απόβλητα χαρυπιού μπορεί να απορροφήσει αποτελεσματικά τέτοιες ουσίες. Αυτή η προσέγγιση δείχνει πως μπορούν να εφαρμοστούν λύσεις κυκλικής οικονομίας, δηλαδή να αξιοποιούνται απόβλητα για την προστασία του περιβάλλοντος (Viegas et al., 2020).

Γ. Βιολογικοί Ρύποι

Οι βιολογικοί ρύποι δηλαδή μικροοργανισμοί που μολύνουν το νερό, περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα παθογόνων οργανισμών όπως τα βακτήρια, ιούς, πρωτόζωα (που είναι μικροσκοπικά ζωντανά που μοιάζουν με μικρά ζώα). Αυτοί οι οργανισμοί είναι βασική αιτία ασθενειών που μεταδίδονται μέσω του νερού (EPA, 2025).

Αν βρεθούν σε πόσιμο νερό (αυτό που πίνουμε), σε επιφανειακό νερό (ποτάμια, λίμνες) ή σε υπόγειο νερό (π.χ. πηγάδια), αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για την υγεία και χρειάζονται αυστηροί έλεγχοι. Παραδείγματα όπως είναι τα παθογόνα που προκαλούν ασθένειες όπως δυσεντερία, χολέρα και γαστρεντερίτιδα. Η παρουσία τους στα υδατικά συστήματα συχνά προκύπτει από ανεπαρκώς επεξεργασμένα λύματα (νερά από σπίτια ή εργοστάσια που δεν έχουν καθαριστεί σωστά), από γεωργική απορροή (νερά βροχής που παρασύρουν λιπάσματα, φυτοφάρμακα ή περιττώματα ζώων) ή από έλλειψη βασικών υποδομών όπως εγκαταστάσεις και δίκτυα για τον καθαρισμό και τη διανομή νερού (Ali, 2025).

Επιπλέον, ορισμένοι οργανισμοί, όπως τα κυανοβακτήρια (μικροοργανισμοί που μοιάζουν με φύκια), όταν πολλαπλασιάζονται υπερβολικά («άνθιση») παράγουν επικίνδυνες ουσίες, που βλάπτουν τόσο τη φύση όσο και την ανθρώπινη υγεία (Lin et al., 2022).

Συνεπώς, στο νερό αντιπροσωπεύουν έναν πολύ σοβαρό περιβαλλοντικό και υγειονομικό κίνδυνο. Για να μειωθεί ο κίνδυνος, χρειάζονται καλύτερες εγκαταστάσεις καθαρισμού, συνεχής έλεγχος της ποιότητας του νερού και υπεύθυνη χρήση γεωργικών πρακτικών.

Δ. Ρύποι προτεραιότητας

Οι ρύποι προτεραιότητας είναι κατηγορίες χημικών ουσιών που θεωρούνται πιο επικίνδυνες για την υγεία των ανθρώπων και για τα υδάτινα οικοσυστήματα. Η επιλογή τους γίνεται από οργανισμούς όπως η Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ, με βάση τρία βασικά κριτήρια: πόσο τοξικές είναι, πόσο αντέχουν στο περιβάλλον και πόσο τείνουν να συσσωρεύονται στα ζωντανά όντα. Ακόμα και σε πολύ μικρές ποσότητες, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα κυρίως στην ανθρώπινη υγεία και στα υδάτινα οικοσυστήματα. Σύμφωνα με τον νόμο Clean Water Act, έχει καταρτιστεί ένας κατάλογος επικίνδυνων ρύπων, που χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για την ρύθμιση και τον έλεγχο της ρύπανσης των υδάτων (EPA, 2025).

Σύμφωνα με τον κατάλογο της EPA οι σημαντικότερες κατηγορίες περιλαμβάνουν:

1. **Βαρέα μέταλλα:** Όπως μόλυβδος, κάδμιο, υδράργυρος, αρσενικό, νικέλιο και χρώμιο. Αυτά τα μέταλλα είναι επικίνδυνα για την υγεία και τα ζώα και συσσωρεύονται εύκολα στο περιβάλλον.
2. **Πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs):** Είναι η ναφθαλίνη που πρόκειται για οργανικές ουσίες που μπορούν να προκαλέσουν οικολογικές και

υγειονομικές επιπτώσεις, όπως φάνηκε και στη μελέτη της λεκάνης του ποταμού Siret στη Ρουμανία.

3. **Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs) και διοξίνες / φουράνια:**

Είναι πολύ σταθερές οργανικές ουσίες που δεν σπάνε εύκολα στο περιβάλλον και έχουν υψηλή τοξικότητα. Συχνά παραμένουν για μεγάλο διάστημα και συσσωρεύονται στο οικοσύστημα, γι' αυτό θεωρούνται ιδιαίτερα επικίνδυνες.

4. **Φθαλικές ενώσεις (π.χ. DEHP) και ζιζανιοκτόνα/βιοκτόνα:** Χρησιμοποιούνται ευρέως ως πλαστικοποιητές ή για προστασία καλλιεργειών. Ακόμα και αν έχουν απαγορευτεί, πολλές από αυτές παραμένουν στο έδαφος και στο νερό για πολλά χρόνια.

5. **Πτητικές και ημιπτητικές οργανικές ουσίες:** Είναι χημικές ενώσεις που μπορούν εύκολα να γίνουν αέριο και να εξατμιστούν στην ατμόσφαιρα (Zait et al., 2022).

Περιλαμβάνουν ουσίες που είναι:

- **Βενζόλιο:** Χρησιμοποιείται για να φτιάχνονται πλαστικά, χρώματα και καύσιμα. Είναι εύφλεκτο και μπορεί να βλάψει την υγεία αν εισπνευσθεί ή καταναλωθεί σε μεγάλες ποσότητες.
- **Χλωροφόρμιο:** Παλιά χρησιμοποιούνταν ως αναισθητικό, σήμερα χρησιμοποιείται στη βιομηχανία. Είναι τοξικό και μπορεί να βλάψει το ήπαρ ή τα νεφρά σε υψηλές δόσεις.
- **Εξαχλωροβενζένιο:** Χρησιμοποιείται στη βιομηχανία και για φυτοφάρμακα. Είναι πολύ σταθερό στο περιβάλλον και μπορεί να παραμείνει στο έδαφος και στο νερό για μεγάλο διάστημα, γι' αυτό θεωρείται επικίνδυνο.

Αυτές οι ουσίες εξατμίζονται εύκολα και μπορούν να μολύνουν τον αέρα και το νερό, γι' αυτό θεωρούνται σημαντικοί ρύποι προτεραιότητας (Zait et al., 2022).

Συνεπώς, οι ρύποι προτεραιότητας συνιστούν κρίσιμη έννοια στην κατανόηση της υδατικής ρύπανσης και του περιβαλλοντικού κινδύνου.

Οι βασικές κατηγορίες περιλαμβάνουν βαρέα μέταλλα, πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες και διοξίνες, φθαλικές ενώσεις και πτητικές οργανικές ουσίες. Ταυτόχρονα, νέες ομάδες ρύπων, όπως οι PFAS, (χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται σε αντικολλητικά σκεύη, υφάσματα, αφρώδη υλικά κ.ά.), δείχνουν ότι οι παραδοσιακοί κατάλογοι των ρύπων προτεραιότητας μπορεί να μην καλύπτουν όλους τους κινδύνους.

Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για ενημέρωση και αναθεώρηση των κανονισμών, ώστε να προστατεύεται καλύτερα η ανθρώπινη υγεία και το φυσικό περιβάλλον.

2.4 Ρύπανση επιφανειακών υδάτων

Η ρύπανση επιφανειακών υδάτων συνιστά κρίσιμη περιβαλλοντική πρόκληση που απειλεί πολλές οικολογικές λειτουργίες, την ανθρώπινη υγεία αλλά και την οικονομική βιωσιμότητα. Παρά τη θέσπιση αυστηρότερων προτύπων, η παγκόσμια αύξηση των πληθυσμών και η εκβιομηχάνιση εντείνουν τις εισροές θρεπτικών, βαρέων μετάλλων, μικροπλαστικών και οργανικών ρύπων, υπονομεύοντας την επίτευξη των στόχων της Οδηγίας-Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ.

Η υπερβολική παρουσία ανόργανου αζώτου που προέρχεται από αστικά λύματα και απορροές λιπασμάτων προκαλεί φαινόμενα ευτροφισμού, μείωση του οξυγόνου στα υδάτινα οικοσυστήματα και απώλεια βιοποικιλότητας. Σε μια έρευνα σε πολυλειτουργικές αστικές μικρολεκάνες της **Τεχεράνης** εντόπισε συγκεντρώσεις νιτρικών (NO_3^-) έως και 58 mg L^{-1} σε περιοχές με έντονη βιομηχανική δραστηριότητα και κυκλοφορία, ενώ οι Δείκτες Υγειονομικού Κινδύνου ($\text{HI} > 4$) υποδηλώνουν έντονο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, γεγονός που τονίζει την ανάγκη για άμεσες και στοχευμένες παρεμβάσεις (Soltaninia et al., 2025).

Παράλληλα, η συνεχιζόμενη εξορυκτική και αγροτική δραστηριότητα συμβάλλει στην αύξηση της συγκέντρωσης τοξικών μετάλλων. Για παράδειγμα, σε αγροτικές περιοχές του **Βιετνάμ**, μακροχρόνια παρακολούθηση (2016–2020) κατέγραψε επίπεδα σιδήρου (Fe) γύρω στα $392 \mu\text{g L}^{-1}$, καθώς και σημαντικές υπερβάσεις στα επίπεδα αρσενικού (As), καδμίου (Cd) και μολύβδου (Pb). Ο δείκτης ρύπανσης βαρέων μετάλλων (Heavy Metal Pollution Index) έδειξε αυξημένο φορτίο στη διάρκεια της ξηρής περιόδου και αυξημένο κίνδυνο έκθεσης για τα παιδιά (Le & Nguyen, 2024).

Ακόμη, η συσσώρευση μικρο- και νανοπλαστικών στα γλυκά ύδατα έχει εξελιχθεί σε σοβαρό περιβαλλοντικό πρόβλημα σε ευρωπαϊκή κλίμακα. Σύμφωνα με την ανασκόπηση 29 ερευνών που εστιάζουν σε έξι μεγάλους ευρωπαϊκούς ποταμούς εντόπισε επιφανειακές συγκεντρώσεις που φθάνουν έως $1,9 \times 10^4$ σωματίδια ανά m^3 . Ειδικότερα, το 70 % των ινών που ανιχνεύθηκαν ήταν συνθετικής προέλευσης, κυρίως από υφάσματα γεγονός που αναδεικνύει τον ρόλο των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, όπως το πλύσιμο ρούχων στην επιβάρυνση των υδάτινων σωμάτων (Gao et al., 2024).

2.5 Ρύπανση υπόγειων υδάτων

Τα υπόγεια ύδατα είναι πολύ σημαντική πηγή πόσιμου νερού, ειδικά σε αγροτικές και βιομηχανικές περιοχές (από 45% έως 75% του πόσιμου νερού προέρχεται από αυτά). Όμως, η ρύπανση τους αποτελεί μεγάλο πρόβλημα, επειδή επηρεάζει την ασφάλεια του νερού, τα οικοσυστήματα και την παραγωγή τροφίμων (Jia & Qian, 2025).

Η ρύπανση προέρχεται από πολλούς παράγοντες, όπως:

- Τα αγροτικά λιπάσματα και η κτηνοτροφία που προσθέτουν πολλά νιτρικά στο νερό.
- Βιομηχανικά και αστικά λύματα που περιέχουν επικίνδυνους ρύπους.
- Η χρήση συνθετικών υλικών που επίσης ρυπαίνουν το νερό (Jia & Qian, 2025).

Σε μελέτη που έγινε στη **Λοφώδη Περιοχή Λες στην Κίνα**, πάνω από το 50% των δειγμάτων υπόγειου νερού είχε νιτρικά σε επίπεδα πάνω από το επιτρεπτό όριο, κάτι που δείχνει πόσο ευάλωτο είναι το νερό, ανάλογα με τη δομή του εδάφους και τη χρήση γης (Jia & Qian, 2025).

Επιπλέον, η βιομηχανία και η άρδευση με ανεπεξέργαστα λύματα προκαλούν συσσώρευση βλαβερών μετάλλων όπως αρσενικό και μόλυβδο, που σε συγκεκριμένη περιοχή στο Πακιστάν βρέθηκαν σε υπερβολικές ποσότητες (Ullah et al., 2022).

Η ρύπανση προέρχεται και από φυσικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε πετρώματα και νερό, αλλά κυρίως από ανθρώπινες δραστηριότητες. Ταυτόχρονα, ορισμένα μεταλλικά οξείδια στα υπόγεια πετρώματα μπορούν να αποθηκεύουν ρύπους, αλλά κάτω από ορισμένες συνθήκες τους απελευθερώνουν ξανά, επιδεινώνοντας τη ρύπανση (Ullah et al., 2022).

2.6 Τεχνολογικές και Μεθοδολογικές Εξελίξεις στις μεθόδους αντιρρύπανσης

Η ρύπανση των υδάτων από οργανικούς, ανόργανους, βιολογικούς και χημικούς ρύπους απαιτεί την εφαρμογή πολυδιάστατων τεχνολογικών και φυσικοχημικών μεθόδων επεξεργασίας. Οι τεχνικές αντιρρύπανσης κατατάσσονται συνήθως σε προληπτικές, θεραπευτικές και αποκατάστασης, ανάλογα με το στάδιο εφαρμογής και τον τύπο του ρύπου (Tchobanoglous et al., 2014).

Οι προληπτικές μέθοδοι στοχεύουν στην αποτροπή της εισόδου ρύπων στο υδάτινο περιβάλλον. Στο βιομηχανικό τομέα περιλαμβάνουν την εφαρμογή «καθαρών τεχνολογιών», την επαναχρησιμοποίηση υδάτων και τη χρήση κλειστών συστημάτων παραγωγής (EPA, 2025).

Στη γεωργία περιλαμβάνονται πρακτικές μείωσης λιπασμάτων και ορθολογικής χρήσης φυτοφαρμάκων, καθώς και η προστασία περιοχών απορροής για την

πρόληψη επιφανειακής ρύπανσης. Στα αστικά κέντρα η πρόληψη εστιάζει στην αποχέτευση όμβριων υδάτων και στην ανάπτυξη πράσινων υποδομών, όπως οι τεχνητοί υγρότοποι, που φιλτράρουν τα επιφανειακά νερά πριν καταλήξουν σε ποτάμια και λίμνες (FAO, 2022).

Μεταξύ των **φυσικών μεθόδων** συγκαταλέγονται η καθίζηση και η διήθηση, οι οποίες εφαρμόζονται για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών μέσω δεξαμενών καθίζησης και φίλτρων άμμου. Ο αερισμός χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό του νερού με οξυγόνο, ώστε να διευκολύνεται η αποδόμηση της οργανικής ύλης και να απομακρύνονται πτητικοί ρύποι όπως η αμμωνία και το υδρόθειο (Metcalf & Eddy, 2014).

Οι χημικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τη χλωρίωση και την οζόνωση για την απολύμανση του νερού από παθογόνους μικροοργανισμούς. Το όζον θεωρείται πιο αποτελεσματικό και δεν δημιουργεί επικίνδυνα παραπροϊόντα όπως η χλωρίωση (WHO, 2022). Οι προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες χρησιμοποιούν ρίζες υδροξυλίου για την οξείδωση οργανικών ρύπων που δεν αποικοδομούνται εύκολα, όπως φαρμακευτικά κατάλοιπα και βιοκτόνα. Παράλληλα, η χημική κατακρήμνιση επιτρέπει την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων, όπως ο μόλυβδος και το κάδμιο, μέσω του σχηματισμού αδιάλυτων αλάτων (Fu & Wang, 2011).

Στον τομέα των **βιολογικών μεθόδων** περιλαμβάνεται η ενεργός ιλύς, μια αερόβια βιολογική επεξεργασία κατά την οποία μικροοργανισμοί αποδομούν την οργανική ύλη των λυμάτων (Tchobanoglous et al., 2014).

Η **αναερόβια χώνευση** εφαρμόζεται κυρίως για λύματα με υψηλό οργανικό φορτίο, μετατρέποντας την οργανική ύλη σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα (Metcalf & Eddy, 2014).

Οι πιο προηγμένες τεχνολογίες περιλαμβάνουν τις μεμβρανικές διεργασίες, όπως την υπερδιήθηση, τη νανοδιήθηση και την αντίστροφη όσμωση, οι οποίες αφαιρούν ιούς, βακτήρια και διαλυμένους ρύπους και συχνά εφαρμόζονται και για αφαλάτωση (Shannon et al., 2008).

Προσροφητικά υλικά (όπως ο ενεργός άνθρακας, οι ζεόλιθοι που είναι φυσικά ή συνθετικά ορυκτά με πορώδη δομή που τους επιτρέπει να παγιδεύουν και να ανταλλάσσουν ιόντα, ενώ το βιοκάρβουνο είναι άνθρακας που παράγεται από φυτική βιομάζα και διαθέτει μεγάλη πορώδη επιφάνεια, ικανή να δεσμεύει ρύπους και βαρέα μέταλλα.) χρησιμοποιούνται για:

- **Απομάκρυνση οργανικών μικρορύπων** (π.χ. φυτοφάρμακα, φαρμακευτικά κατάλοιπα από νερό).
- **Δέσμευση βαρέων μετάλλων** (π.χ. μόλυβδος, κάδμιο, υδράργυρος) από υγρά ή αέρια ρεύματα. Ο μηχανισμός είναι η προσρόφηση, δηλαδή η συγκράτηση αυτών των ουσιών στην επιφάνεια του υλικού, χάρη στα μεγάλα πορώδη δίκτυα και τη μεγάλη ειδική επιφάνεια που διαθέτουν (Shahid et al., 2021).

Τέλος, η βιοαποκατάσταση εφαρμόζει μικροοργανισμούς ή φυτά για την *in situ* αποικοδόμηση ρύπων, ειδικά σε περιπτώσεις πετρελαιοειδών και οργανικών ενώσεων, αποτελώντας μια από τις πιο φιλικές προς το περιβάλλον μεθόδους (Mishra et al., 2021).

Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η χρήση τεχνικών, όπως η Φασματομετρία ICP-MS: Είναι μια πολύ ακριβής μέθοδος μέτρησης στοιχείων και μετάλλων σε δείγματα (π.χ. νερό, χώμα, τρόφιμα). Έχει βελτιώσει σημαντικά την ικανότητα εντοπισμού πολύ μικρών ποσοτήτων ρύπων: Χάρη σε αυτή την τεχνική, οι επιστήμονες μπορούν να βρουν ακόμα και ελάχιστες ποσότητες ρύπων που προηγουμένως ήταν πολύ δύσκολο ή αδύνατο να μετρηθούν. Με άλλα λόγια, η τεχνική βελτιώνει την ευαισθησία των μετρήσεων, ώστε να βλέπουμε ακόμη και «ίχνη» ρύπων (Balaram et al., 2023).

Παράλληλα, νέες μεθοδολογίες που αξιοποιούν στατιστικά μοντέλα, όπως η προσομοίωση Monte Carlo και οι ασαφείς αριθμοί, συμβάλλουν σε μια πιο ακριβή εκτίμηση των περιβαλλοντικών και ανθρώπινων κινδύνων (Ruan et al., 2024). Η υπερβολική χρήση αντιβιοτικών στους ανθρώπους, στα ζώα και στις καλλιέργειες έχει επηρεάσει αρνητικά τα υπόγεια νερά. Έχουν βρεθεί σε αυτά γονίδια που κάνουν τα μικρόβια πιο ανθεκτικά στα αντιβιοτικά (τα λεγόμενα Antibiotic Resistance Genes).

Σε έρευνα με 283 δείγματα νερού από τα οποία τα 58 ήταν υπόγεια διαπιστώθηκε ότι τα υπόγεια νερά περιέχουν πολύ περισσότερα τέτοια γονίδια σε σχέση με τα επιφανειακά. Αυτό οφείλεται κυρίως στην παρουσία συγκεκριμένων τύπων βακτηρίων, όπως τα *Pseudomonas* και *Citrobacter* που βρίσκονται στο νερό ή στο περιβάλλον. Είναι πολύ ικανά να “ανταλλάσσουν” γενετικό υλικό μεταξύ τους και με άλλα βακτήρια. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι κομμάτια DNA από μικρόβια (εξωκυττάριο DNA) μπορούν να παραμένουν στο νερό για πολλές εβδομάδες, ακόμη και όταν οι συνθήκες είναι φυσιολογικές (Yang et al., 2025).

Αυτό δείχνει ότι οι συνηθισμένες μέθοδοι καθαρισμού του νερού δεν είναι αρκετές για να εξαλείψουν τον κίνδυνο εμφάνισης πολύ ανθεκτικών μικροβίων στο πόσιμο νερό (Yang et al., 2025)

2.7 Νομοθετικό πλαίσιο για την προστασία των υδάτων και τον έλεγχο της ρύπανσης

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, με την **Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα (2000/60/ΕΚ) WFD** της θεμελιώνει μια ενοποιημένη προσέγγιση διαχείρισης, υπογραμμίζοντας ότι η καλή κατάσταση όλων των υδάτινων σωμάτων αποτελεί νομική υποχρέωση των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Commission, 2025).

Η Οδηγία θέτει ένα ολοκληρωμένο και οικοσυστημικό πλαίσιο πολιτικής για την προστασία και τη βιώσιμη διαχείριση όλων των κατηγοριών υδάτων, δηλαδή των εσωτερικών επιφανειακών, των υπόγειων, των μεταβατικών και των παράκτιων. Κεντρικός της στόχος είναι η επίτευξη «καλής κατάστασης» για όλα τα υδάτινα σώματα, καθώς και η αποτροπή κάθε περαιτέρω υποβάθμισης της ποιότητάς τους. Βασική αρχή της Οδηγίας αποτελεί η διαχείριση σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού (River Basin District - RBD), δηλαδή η ολιστική αντιμετώπιση των υδάτων βάσει φυσικών υδρολογικών ορίων και όχι διοικητικών συνόρων (European Commission, 2025).

Η Οδηγία καθιερώνει σαφείς περιβαλλοντικούς σκοπούς (άρθρο 4), με έμφαση στην αρχή της μη υποβάθμισης, αλλά και με πρόβλεψη για τεκμηριωμένες παρεκκλίσεις και χρονικές επεκτάσεις. Αυτές εφαρμόζονται σε περιπτώσεις όπου υφίσταται τεχνική αδυναμία, φυσικοί περιορισμοί ή δυσανάλογο οικονομικό κόστος, πάντα με τη λογική της σταδιακής συμμόρφωσης (Directive 2000/60/EC, 2000).

Στην Ελλάδα, η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα (WFD) ενσωματώθηκε με τον Ν. 3199/2003 και το Π.Δ. 51/2007, που έφεραν το νέο θεσμικό πλαίσιο (Εθνική Επιτροπή Υδάτων, Ειδική Γραμματεία, Περιφερειακές Διευθύνσεις) και όρισαν πώς θα γίνονται τα Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής, τα προγράμματα μέτρων και τα συστήματα παρακολούθησης. Παράλληλα, καθόρισαν πώς θα διαχειρίζονται τα τεχνητά ή τροποποιημένα υδατικά σώματα και έθεσαν κανόνες για τυχόν εξαιρέσεις (ΕΛΙΝΥΑΕ, 2003).

Το άρθρο 9 της Οδηγίας εφαρμόστηκε με την ΚΥΑ 135275/2017, που όρισε πώς θα γίνεται η κοστολόγηση και τιμολόγηση του νερού για ύδρευση, άρδευση και βιομηχανία, συμπεριλαμβάνοντας και το περιβαλλοντικό κόστος. Αυτό το μέτρο βοήθησε να υπάρχει περισσότερη διαφάνεια και πιο δίκαιη οικονομική διαχείριση στη χρήση του νερού (OECD, 2019).

Η Οδηγία 91/676/ΕΟΚ για τη νιτρορύπανση στοχεύει στη μείωση και πρόληψη της ρύπανσης των υδάτων από νιτρικά ιόντα γεωργικής προέλευσης, προστατεύοντας τόσο τα επιφανειακά όσο και τα υπόγεια ύδατα, καθώς και τα υδατικά οικοσυστήματα και τη δημόσια υγεία (άρθρο 1). Το κανονιστικό της πλαίσιο εστιάζει στις διάχυτες πιέσεις που ασκεί η γεωργία και οργανώνεται γύρω από τέσσερις βασικούς πυλώνες:

1. Αναγνώριση των υδάτων που πλήττονται ή κινδυνεύουν να πληγούν.
2. Χαρακτηρισμός «ευπρόσβλητων ζωνών» (NVZs).
3. Καθορισμός κωδίκων ορθής γεωργικής πρακτικής (ΚΟΓΠ).
4. Υποχρεωτικά Προγράμματα Δράσης με συγκεκριμένα μέτρα για τις ευπρόσβλητες ζώνες (Středová, 2024).

Στην Ελλάδα, η εφαρμογή της Νιτρικής Οδηγίας έγινε κυρίως:

- ΚΥΑ 16190/1335/1997 (ΦΕΚ Β' 519/25.06.1997) - Μέτρα και όροι για την προστασία των νερών από νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης (Υπουργείο Περιβάλλοντος, 1997).
- ΚΥΑ οικ. 19652/1906/1999 (ΦΕΚ Β' 1575/05.08.1999) - Καθορισμός ευπρόσβλητων ζωνών και αρχικός κατάλογος νιτρορυπασμένων υδάτων (Υπουργείο Περιβάλλοντος, 1999).
- ΚΥΑ ΥΠΕΝ/ΓρΕΓΥ/38552/265/25.04.2019 (ΦΕΚ Β' 1496/03.05.2019) - Το 2019 θεσπίστηκαν Ενιαία Προγράμματα Δράσης για όλες τις ζώνες, με υποχρεωτικά μέτρα όπως προγραμματισμό λίπανσης, ζώνες προστασίας υδατορεμάτων, ανώτατες δόσεις αζώτου και ελάχιστες δυνατότητες αποθήκευσης κοπρολυμάτων (ΥΠΕΝ, 2019).

Η Οδηγία 2006/118/ΕΚ για τα υπόγεια νερά δημιουργεί ειδικό καθεστώς προστασίας για τα υπόγεια ύδατα, ως συνέχεια της Οδηγίας-Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ. Στόχος της είναι η πρόληψη ή μείωση της ρύπανσης, η διατήρηση «καλής χημικής κατάστασης» και η αναστροφή σημαντικών αυξήσεων ρύπων. Προβλέπει σαφείς μεθόδους εκτίμησης και παρακολούθησης, καθώς και κριτήρια αξιολόγησης της χημικής κατάστασης, ειδικά πρότυπα ποιότητας και υποχρεωτικά όρια (threshold values) που κάθε κράτος μέλος προσαρμόζει στα υπόγεια ύδατα του (Ευρωπαϊκή Ένωση, 2006).

Το άρθρο 6 της Οδηγίας WFD καθιερώνει πρόληψη και περιορισμό ρύπων στα υπόγεια νερά μέσω των Προγραμμάτων Μέτρων: απαγορεύει πλήρως επικίνδυνες ουσίες και περιορίζει άλλους ρύπους (π.χ. θρεπτικά στοιχεία, μέταλλα, φυτοφάρμακα) που περιλαμβάνονται στο Παράρτημα VIII, ώστε να αποφεύγεται υποβάθμιση ή σημαντική αύξηση συγκεντρώσεων. Η στρατηγική συμπληρώνεται από παρακολούθηση και δημοσιοποίηση ορίων και αποτελεσμάτων στα (RBMPs) Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών (European Parliament and Council, 2006).

Συνολικά, η Οδηγία για τα Υπόγεια Νερά παρέχει αυστηρό και επαληθεύσιμο πλαίσιο πρόληψης και αποκατάστασης, εφαρμοζόμενο στην Ελλάδα μέσω της υλοποίησης (ΚΥΑ 39626/2009, όπως τροπ.), των δικτύων παρακολούθησης, επιτρέπουν την τακτική αξιολόγηση της ποιότητας των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων, ενώ τα δεσμευτικά κατώφλια ορίζουν τα μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα ρύπων και εξασφαλίζουν έγκαιρη δράση πριν την υποβάθμιση για κάθε υδροφορέα στα Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής (RBMPs). Οι κύριες προκλήσεις περιλαμβάνουν: την πιστή εφαρμογή των μέτρων στους βασικούς τομείς που επηρεάζουν την ποιότητα των υδάτων στην γεωργία (π.χ. σωστή χρήση λιπασμάτων), υφαλμύριση (εισροή θαλασσινού νερού) και σημειακές πηγές (βιομηχανικές εκροές, αποχετεύσεις), την τακτική επικαιροποίηση των κατωφλίων με βάση νέα δεδομένα και την έγκαιρη αντιμετώπιση αυξανόμενων συγκεντρώσεων ρύπων πριν ξεπεραστούν κρίσιμα όρια (European Parliament and Council, 2008).

Η Οδηγία 2008/105/ΕΚ για τα Πρότυπα Ποιότητας Περιβάλλοντος καθορίζει σαφή και κοινά για όλα τα κράτη μέλη πρότυπα ποιότητας για τις ουσίες προτεραιότητας, δηλαδή τους πιο επικίνδυνους ή επίμονους ρύπους που πρέπει να παρακολουθούνται αυστηρά, λόγω των επιπτώσεών τους στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, καλύπτει και άλλους ρύπους που επηρεάζουν τα επιφανειακά ύδατα, όπως ποτάμια, λίμνες και κανάλια. Η Οδηγία εισάγει δεσμευτικές τιμές και στόχους (Environmental Quality Standards EQS), που ορίζουν το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο κάθε ρύπου για να προστατεύεται η οικολογική και η ανθρώπινη υγεία.

Οι τιμές αυτές περιλαμβάνουν:

- Χρόνια τοξικότητα: τις επιπτώσεις που προκύπτουν από μακροχρόνια έκθεση σε μικρές συγκεντρώσεις ρύπων.
- Οξεία τοξικότητα: τις άμεσες και έντονες επιπτώσεις που προκαλούνται από υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων (European Parliament and Council, 2008).

Για ορισμένους πανταχού παρόντες και επίμονους ρύπους (π.χ. υδράργυρος, HCB), τα όρια EQS τίθενται και στη βιομάζα (τους οργανισμούς που ζουν στα ύδατα), ώστε να λαμβάνεται υπόψη η βιοσυσσώρευση και οι επιπτώσεις στην τροφική αλυσίδα. Τέλος, η Οδηγία προβλέπει την ύπαρξη ζωνών ανάμιξης κοντά σε εκροές (π.χ. βιομηχανικές ή αστικές αποχετεύσεις), αλλά μόνο υπό αυστηρούς όρους, έτσι ώστε να μην υποβαθμίζεται η συνολική χημική κατάσταση των υδάτων (European Parliament and Council, 2008).

Η Ελλάδα ενσωμάτωσε την Οδηγία 2008/105/EK μέσω της ΚΥΑ Η.Π. 51354/2641/Ε103/2010 (ΦΕΚ Β' 1909/8.12.2010), η οποία καθόρισε τα Πρότυπα Ποιότητας Περιβάλλοντος (ΠΠΠ) για τις ουσίες προτεραιότητας στα επιφανειακά ύδατα και ρύθμισε τις ειδικές ρυπαντικές ουσίες στα εσωτερικά επιφανειακά ύδατα. Στη συνέχεια, η ΚΥΑ 170766/2016 (ΦΕΚ Β' 69/22.1.2016) τροποποίησε την προηγούμενη απόφαση, ώστε να υπάρξει πλήρης συμμόρφωση με την Οδηγία 2013/39/ΕΕ, ενσωματώνοντας νέες ουσίες και biota-EQS, δηλαδή τα πρότυπα ποιότητας που λαμβάνουν υπόψη τη βιοσυσσώρευση στους οργανισμούς των υδάτων (ΥΠΕΝ, 2016).

Η Οδηγία 2013/39/ΕΕ για αναθεώρηση λίστας ουσιών προτεραιότητας
Μια σημαντική καινοτομία στην ευρωπαϊκή διαχείριση υδάτων αποτελεί ο «Κατάλογος Επιτήρησης» (watch list) για αναδυόμενους ρύπους. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκδίδει κάθε δύο χρόνια εκτελεστικές πράξεις που καθορίζουν ουσίες προς πανευρωπαϊκή παρακολούθηση, με στόχο η συλλογή νέων δεδομένων να υποστηρίξει μελλοντικές αναθεωρήσεις της λίστας προτεραιότητας και των EQS Environmental Quality Standards – Πρότυπα Ποιότητας Περιβάλλοντος. Μετά τις αποφάσεις 2015/495, 2018/840, 2020/1161 και 2022/1307, η πιο πρόσφατη επικαιροποίηση στις 28 Φεβρουαρίου 2025 περιλαμβάνει ουσίες όπως η δραστική ουσία fipronil και τα φαρμακευτικά σκευάσματα όπως clindamycin και ofloxacin, παρέχοντας ενδεικτικές μεθόδους ανάλυσης και όρια ανίχνευσης (European Commission, 2025).

Ο σκοπός είναι η παρακολούθηση αναδυόμενων κινδύνων και η κάλυψη των κενών δεδομένων για την αξιολόγηση του κινδύνου.

Η δυναμική αυτή πορεία συμμορφώνεται με τις θεσμικές αναθεωρήσεις του πλαισίου προτεραιοτήτων (COM/2022/540), δίνοντας έμφαση σε ουσίες όπως τα PFAS και στη συμπληρωματική θέσπιση προτύπων ποιότητας σε νερό και βιομάζα (European Commission, 2025).

Συνολικά, το καθεστώς EQS λειτουργεί ως «γέφυρα» μεταξύ της χημικής διαχείρισης και της οικολογικής προστασίας των υδάτων: Μετατρέπει την εκτίμηση κινδύνου σε συγκεκριμένα όρια για κάθε ρύπο και περιβαλλοντική μήτρα. Παρέχει νομικά εκτελεστό σημείο αναφοράς για την ταξινόμηση της ποιότητας των υδάτων. Κατευθύνει στοχευμένα μέτρα ελέγχου πιέσεων, όπως βιομηχανικές εκπομπές, αστικά λύματα και γεωργικές απώλειες (European Commission, 2025).

Η περιοδική ανανέωση της λίστας μέσω της Οδηγίας 2013/39/ΕΕ και του watch list διασφαλίζει την προσαρμοστικότητα σε νέους αναδυόμενους ρύπους, όπως:

- Φαρμακευτικά: φάρμακα που φτάνουν στα ύδατα μέσω απορροών από νοσοκομεία, νοικοκυριά ή βιομηχανίες.
- PFAS: επίμονες χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται σε προϊόντα όπως υφάσματα και αφρούς πυρόσβεσης και δυσκολεύονται να διασπαστούν στο περιβάλλον.

Στην Ελλάδα, η ενσωμάτωση των νέων ουσιών και των αντίστοιχων ορίων ποιότητας γίνεται μέσω των ΚΥΑ Η.Π. 51354/2641/Ε103/2010 (ΦΕΚ Β' 1909/2010) και της τροποποίησής της με την ΚΥΑ 170766/2016 (ΦΕΚ Β' 69/2016), ενώ τα Πρότυπα Ποιότητας Περιβάλλοντος (ΠΠΠ) και τα RBMPs ενημερώνονται ώστε οι ουσίες να παρακολουθούνται και η ποιότητα των υδάτων να προστατεύεται αποτελεσματικά (European Commission, 2025).

Κεφάλαιο 3: Ρύπανση από Μικροπλαστικά

3.1 Τι είναι τα Μικροπλαστικά

Η παγκόσμια παραγωγή πλαστικού έχει αυξηθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες. Σύμφωνα με τα στοιχεία των Ηνωμένων Εθνών, η συνολική παραγωγή πλαστικών υλικών έφτασε τους 359 εκατομμύρια μετρικούς τόνους το 2018, σε σύγκριση με μόλις 1,5 εκατομμύριο τόνους το 1950 (Leal Filho et al., 2021).

Αυτό οφείλεται κυρίως στην αύξηση του πληθυσμού, την αστικοποίηση και τον καταναλωτισμό. Ωστόσο, εάν δεν αλλάξει κάτι, τα πλαστικά απόβλητα θα τριπλασιαστούν μέχρι το 2050 (Anik et al., 2021).

Η υπερβολική χρήση πλαστικών έχει οδηγήσει σε τεράστιο όγκο απορριμμάτων, τα οποία συσσωρεύονται σε θάλασσες και ξηρά. Τα πλαστικά απόβλητα έχουν μακροχρόνια διάρκεια παραμονής στο περιβάλλον και επιφέρουν ποικίλες αρνητικές επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στους οργανισμούς. Ειδικότερα, στα θαλάσσια οικοσυστήματα, η παρουσία πλαστικών υπολειμμάτων έχει συνδεθεί με περιπτώσεις παγίδευσης ή κατάποσης από θαλάσσια είδη, προκαλώντας τραυματισμούς, ασφυξία ή ακόμη και θάνατο (Kumar et al., 2021).

Η κατάποση πλαστικών μπορεί επίσης να οδηγήσει σε προβλήματα υγείας στους θαλάσσιους οργανισμούς, όπως μείωση της ικανότητας πρόσληψης τροφής, υποσιτισμό ή διαταραχές στην αναπαραγωγή (Golwala et al., 2021).

Τέλος, τα υπολείμματα μεταφέρουν παθογόνα μικρόβια, επιδεινώνοντας την κατάσταση των οικοσυστημάτων και αυξάνοντας τον κίνδυνο ασθενειών (Sangkhom et al., 2022).

Τα πλαστικά αυτά υλικά, με την πάροδο του χρόνου, διασπώνται σε μικρά κομμάτια, συνήθως 5mm, τα οποία έχουν ανιχνευθεί σε ποτάμια, λίμνες, και θάλασσα οικοσυστήματα, προκαλώντας ανησυχία για την τροφική αλυσίδα (Melo-Agustín, 2022).

Αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την προέλευσή τους:

- **Πρωτογενή**, που παράγονται σκόπιμα για χρήση σε προϊόντα όπως καλλυντικά ή βιομηχανικά υλικά (Alvim et al., 2020).
- **Δευτερογενή**, που προκύπτουν από τη φθορά ή αποσύνθεση μεγαλύτερων πλαστικών μέσα από φυσικές και ανθρώπινες διαδικασίες (Hanun, Hassan & Jiang, 2021).

Τα μικροπλαστικά αυτά διασπείρονται στο υδάτινο, εδαφικό και ατμοσφαιρικό περιβάλλον μέσω πλήθους ανθρώπινων δραστηριοτήτων, τόσο στην ξηρά όσο και στη θάλασσα (Chellasamy et al., 2022).

Επιπλέον, διαφέρουν και ως προς το σχήμα, το μέγεθος και τη χημική σύσταση. Μπορούν να εμφανίζονται είτε σε σφαιρική είτε σε ακανόνιστη μορφή και συχνά περιέχουν πρόσθετα όπως πλαστικοποιητές, σταθεροποιητές, τα οποία έχουν τη δυνατότητα απελευθερωθούν στο περιβάλλον και να προκαλέσουν κινδύνους για την υγεία και τα οικοσυστήματα (Hu et al., 2022).

3.2 Προέλευση Μικροπλαστικών

Τα πρωτογενή μικροπλαστικά αποτελούν σωματίδια που κατασκευάζονται εξ αρχής σε μικρομετρικό μέγεθος για συγκεκριμένες εφαρμογές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι μικροΐνες που αποδεσμεύονται από συνθετικά υφάσματα κατά τη διάρκεια της πλύσης ή της φθοράς, οι οποίες εισέρχονται κυρίως στα υδάτινα συστήματα (Wang et al., 2019).

Επίσης, οι μικροσφαίρες είναι πολύ μικρά σφαιρικά κομμάτια πλαστικού που φτιάχνονται από πλαστικά υλικά, όπως πολυαιθυλένιο, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε προϊόντα προσωπικής φροντίδας, όπως καθαριστικά προσώπου, αφρόλουτρα και οδοντόκρεμες και αποτελούν συχνή μορφή πρωτογενούς ρύπανσης που καταλήγουν εύκολα στο περιβάλλον (Tang et al., 2021).

Άλλη σημαντική πηγή είναι τα ρητινώδη σωματίδια δηλαδή μικρά κομμάτια πλαστικής ρητίνης που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη στη βιομηχανική παραγωγή πλαστικών προϊόντων (Huang et al., 2022).

Στον τομέα της ιατρικής, τα μικροπλαστικά υπάρχουν σε ειδικά προϊόντα, όπως οδοντιατρικά υλικά (ρητίνες και σφραγίσματα δοντιών). Αυτά τα υλικά, όταν πετιούνται ως ιατρικά απόβλητα, μπορεί τελικά να καταλήξουν στο περιβάλλον, συμβάλλοντας έτσι στη ρύπανση (Suzuki et al., 2022).

Παράλληλα, τα σωματίδια που εκλύονται από τη φθορά ελαστικών οχημάτων λόγω τριβής με το οδόστρωμα απελευθερώνονται μικρά σωματίδια, τα οποία ρυπαίνουν τόσο τον αέρα όσο και τα νερά (Goßmann et al., 2021).

Επιπλέον, τα μικροπλαστικά προέρχονται και από χημικά πρόσθετα και ενδιάμεσα υλικά που χρησιμοποιούνται κατά τη βιομηχανική παραγωγή πλαστικών, ενώ μηχανικές διεργασίες ανακύκλωσης μπορούν επίσης να προκαλέσουν διασπορά μικροπλαστικών σωματιδίων (Suzuki et al., 2022).

Από την άλλη πλευρά, **τα δευτερογενή μικροπλαστικά** δημιουργούνται όταν μεγαλύτερα πλαστικά αντικείμενα σπάνε σε μικρότερα κομμάτια λόγω φυσικών, χημικών ή μηχανικών διεργασιών. Η φυσική ή χημική υποβάθμιση πλαστικών απορριμμάτων, είτε σε υδάτινα είτε σε χερσαία περιβάλλοντα, είναι η κυριότερη αιτία δημιουργίας αυτών των μικροπλαστικών (Jaikummar et al., 2019).

Ένας πρόσθετος παράγοντας είναι η ανεπαρκής διαχείριση πλαστικών μιας χρήσης, όπως είναι τα μέσα ατομικής προστασίας (μάσκες, γάντια), που χρησιμοποιούνται ευρέως σε υγειονομικές και βιομηχανικές εφαρμογές και καταλήγουν ως μικροπλαστικά λόγω διάσπασης (Akhbarizadeh et al., 2021).

Επιπλέον, περιβαλλοντικές πιέσεις, όπως η έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία και οι ακραίες θερμοκρασίες, οδηγούν σε γήρανση και θραύση πλαστικών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικροσωματιδίων (Ahmed et al., 2022).

Στη γεωργία, η φθορά αγροτικών πλαστικών, όπως τα φύλλα που καλύπτουν το έδαφος για την προστασία των καλλιεργειών, συμβάλλει σημαντικά στη ρύπανση με μικροπλαστικά (Huang et al., 2022).

Τέλος, τα πλαστικά καλύμματα εδάφους από πολυαιθυλένιο (PE), που χρησιμοποιούνται για καλύτερη παραγωγή και εξοικονόμηση νερού, αποτελούν σοβαρή πηγή μικροπλαστικής ρύπανσης του εδάφους (Yang & Gao, 2022).

3.3 Ρύπανση από Μικροπλαστικά

Η ρύπανση από τα μικροπλαστικά αποτελεί σήμερα ένα από τα ταχύτερα αναδυόμενα περιβαλλοντικά προβλήματα σε παγκόσμια κλίμακα (MacLeod et al., 2021).

Η αυξανόμενη ρύπανση των χερσαίων οικοσυστημάτων από μικροπλαστικά ενδέχεται να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην παγκόσμια αγροτική παραγωγή, γεγονός που καθιστά επιτακτική την ανάγκη αντιμετώπισης του ζητήματος της επισιτιστικής ασφάλειας μιας από τις σημαντικότερες προκλήσεις σε παγκόσμιο επίπεδο στο προσεχές μέλλον. Η βιοαποδόμηση, δηλαδή η αποικοδόμηση των πλαστικών απορριμμάτων μέσω μικροοργανισμών ή ενζύμων, θεωρείται μια δυνητικά αποτελεσματική προσέγγιση για τη μείωση των επιπτώσεων των πλαστικών αποβλήτων, ιδίως όταν προηγείται προεπεξεργασία, όπως η άλεση ή η ακτινοβολία των υλικών (Miri et al., 2021).

Παράλληλα, έρευνες έχουν δείξει ότι οι γαιοσκώληκες μπορούν να επιταχύνουν τη διαδικασία βιοαποδόμησης των βιοδιασπώμενων πλαστικών στο έδαφος, ενισχύοντας έτσι τη φυσική αποικοδόμηση των υλικών. Κατά συνέπεια, ο συνδυασμός καινοτόμων μεθόδων προεπεξεργασίας με σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην ενίσχυση της αποδομισιμότητας των πλαστικών αποβλήτων στο περιβάλλον (Sanchez-Hernandez et al., 2020).

Τα σωματίδια αυτά είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στη βιοαποδόμηση, με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται σε πολλαπλά περιβαλλοντικά διαμερίσματα, όπως οι ωκεανοί, τα ποτάμια, οι λίμνες, το έδαφος, ακόμη και το πόσιμο νερό. Η ευρεία διασπορά των μικροπλαστικών συνδέεται με την ανεπαρκή διαχείριση των πλαστικών αποβλήτων, τις αστικές απορροές, τις γεωργικές πρακτικές και την κακή συντήρηση των υδάτινων και αποχετευτικών συστημάτων (Du et al., 2024).

Ειδικότερα, τα μικροπλαστικά εισέρχονται στις θάλασσες και τους ωκεανούς κυρίως μέσω αστικών λυμάτων, όμβριων υδάτων και ποταμών. Συγκεκριμένα, οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων διοχετεύουν έως 37% των μικροπλαστικών που διαχειρίζονται στις θαλάσσιες περιοχές, ενώ τα όμβρια ύδατα συνεισφέρουν περίπου 59% (Wang et al., 2022).

Επίσης, εκτιμάται ότι τα ποτάμια μεταφέρουν στον ωκεανό έως 0,5 εκατομμύρια τόνους πλαστικών ετησίως, καθιστώντας τα έναν κρίσιμο φορέα ρύπανσης. Η παρουσία πλαστικών στους ωκεανούς έχει αυξηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια, προκαλώντας σημαντική βλάβη στη θαλάσσια ζωή και τα οικοσυστήματα (MacLeod et al., 2021).

Όσον αφορά τα γλυκά νερά λειτουργούν ως ενδιάμεσοι μεταφορείς μικροπλαστικών. Έρευνες δείχνουν σημαντικά αυξημένα επίπεδα σε λίμνες με υψηλό αστικό φόρτο, ενώ παρατηρείται αντίστροφη σχέση μεταξύ συγκέντρωσης και βάθους νερού. Ορισμένες ανασκοπήσεις επιβεβαιώνουν ότι οι κύριες εισροές προέρχονται από αστικά λύματα, απορροές και ανεξέλεγκτη διάθεση απορριμμάτων. Τα ποτάμια λειτουργούν ως «διαύλοι» διοχέτευσης αυτών των ρύπων προς τη θάλασσα (Yin et al., 2023).

Στο έδαφος, τα μικροπλαστικά συσσωρεύονται κυρίως λόγω της χρήσης λυμάτων ως λίπασμα και εφαρμόζονται πλαστικές μεμβράνες στις καλλιέργειες για κάλυψη. Ανασκοπήσεις τονίζουν ότι αυτές οι πρακτικές προκαλούν συσσώρευση έως και 13.000 μικροπλαστικών σωματιδίων ανά κιλό ξηρού εδάφους σε αγροτικές περιοχές (Khan et al., 2024).

Εργαστηριακές μελέτες δείχνουν πως τα μικροπλαστικά επηρεάζουν αρνητικά το πώς το έδαφος απορροφά και διαχειρίζεται το νερό, καθώς και τη βιολογική του δραστηριότητα (Zhang et al., 2025).

Επίσης, αξιοσημείωτη είναι μικροπλαστικά ξεπλένονται από τα biosolids σε καλλιεργήσιμα πεδία, με αποτέλεσμα τη μεταφορά τους σε υπόγεια ύδατα (Ziajahromi et al., 2024).

Τέλος, τα μικροπλαστικά έχουν ανιχνευθεί σε πόσιμο νερό τόσο από δίκτυα ύδρευσης, όσο και σε εμφιαλωμένο νερό. Σύγχρονες μελέτες επιβεβαιώνουν ότι υπάρχουν σωματίδια μικροπλαστικού σε όλα τα στάδια επεξεργασίας και διανομής (Carodaglio, 2025).

3.4 Επιδράσεις των Μικροπλαστικών

3.4.1 Στην ανθρώπινη υγεία

Τα μικροπλαστικά θεωρούνται παράγοντες ενδοκρινικής διαταραχής, καρδιαγγειακών και αναπνευστικών προβλημάτων. Υπάρχουν ήδη ενδείξεις παρουσίας τους στο ανθρώπινο αίμα, στους πνεύμονες και ακόμα και στον πλακούντα (Wang et al., 2022). Έχουν ανιχνευθεί σε πληθώρα τροφίμων, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται τα ψάρια και τα θαλασσινά, το επιτραπέζιο αλάτι, η μπύρα, το μέλι, η ζάχαρη και το νερό της βρύσης. Επιπλέον, εντοπίζονται και στο έδαφος, ως αποτέλεσμα ρύπανσης από πλαστικές συσκευασίες ή αγροτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη γεωργία (Wang J et al., 2019).

Υπάρχουν κάποιες κατηγορίες πηγών μικροπλαστικών στη διατροφή μας όπως: το εμφιαλωμένο νερό, η μπίρα, τα θαλασσινά (όστρακα και ψάρια), το αλάτι, οι σακούλες τσαγιού, τα κονσερβοποιημένα τρόφιμα και τα έτοιμα γεύματα (Ritchie & Roser, 2018).

- Το εμφιαλωμένο νερό θεωρείται μία από τις πλέον επιβαρυντικές πηγές, Η έκθεση του μπουκαλιού στο άμεσο ηλιακό φως επιδεινώνει περαιτέρω την απελευθέρωση μικροπλαστικών στο περιεχόμενό του. Αν και το νερό της βρύσης περιέχει επίσης μικρά πλαστικά τεμάχια, η συγκέντρωση σε εμφιαλωμένο νερό είναι υπερδιπλάσια. Παράλληλα, έχει υπολογιστεί ότι 1 λίτρο μπίρας περιέχει περίπου 4,05 ίνες πλαστικού (The European Parliament, 2025).
- Επιπρόσθετα, τα οστρακοειδή αποτελούν τη δεύτερη σημαντικότερη πηγή μικροπλαστικών, μετά το νερό, καθώς πολλά θαλάσσια είδη καταπίνουν πλαστικά απορρίμματα, τα οποία καταλήγουν σε όλο τους το σώμα, τα οποία στη συνέχεια καταναλώνονται από τον άνθρωπο (The European Parliament, 2025).
- Αντίστοιχα, έχει διαπιστωθεί ότι 1 κιλό θαλασσινού αλατιού περιέχει 212 σωματίδια μικροπλαστικού. Σημαντικό πρόβλημα προκαλούν και οι πλαστικές σακούλες τσαγιού: όταν βυθίζονται σε ζεστό νερό, απελευθερώνουν μικροπλαστικά στο ρόφημα. Για τον λόγο αυτό, οι περισσότερες εταιρείες έχουν στραφεί στη χρήση χάρτινων φακέλων (The European Parliament, 2021).
- Η κύρια ανησυχία σχετικά με τα κονσερβοποιημένα τρόφιμα αφορά τη χημική ουσία BPA (Bisphenol A δηλαδή Δισφαινόλη Α), η οποία χρησιμοποιείται για να ενισχύει την πλαστική επίστρωση στο εσωτερικό των κονσερβών. Ωστόσο, υπάρχει κίνδυνος να περάσει στο φαγητό και να το επιμολύνει (The European Parliament, 2025).
- Παρόμοια, είναι τα έτοιμα γεύματα που σερβίρονται σε πλαστικές συσκευασίες ενδέχεται να εμπλουτίζουν άθελά τους τη διατροφή μας με μικροπλαστικά, πέρα από τα βασικά θρεπτικά συστατικά. Επιπλέον, τα

μικροπλαστικά έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν επιβλαβείς χημικές ουσίες, όπως βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις τοξικής δράσης. Οι ουσίες αυτές μπορεί να απελευθερωθούν από την επιφάνεια του πλαστικού και να διεισδύσουν στον οργανισμό, αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο τοξικότητας (The European Parliament, 2025).

Αυτά τα σωματίδια εντοπίζονται ακόμα και στο νερό της βρύσης, όπου μπορούν να μεταφέρουν στην επιφάνειά τους παθογόνους μικροοργανισμούς, λειτουργώντας έτσι ως φορείς μετάδοσης ασθενειών. Η έκθεση των ανθρώπων σε μικροπλαστικά ενδέχεται να προκαλέσει οξειδωτικό στρες, βλάβες στο DNA και φλεγμονές στον οργανισμό. Όταν η φλεγμονή καταστεί χρόνια, μπορεί να οδηγήσει σε ιδιαίτερα σοβαρές ασθένειες. Η ρύπανση δεν περιορίζεται μόνο σε προϊόντα ζωικής προέλευσης, αλλά μολύνονται επίσης και τα φρούτα, τα λαχανικά, καθώς απορροφούν μικροπλαστικά από το νερό που μεταφέρεται μέσω των ριζών. (The European Parliament, 2025).

Αναφορικά με τη ρύπανση του εδάφους, οι οικολογικοί και υγειονομικοί κίνδυνοι που συνδέονται με την έκθεση στα μικροπλαστικά θεωρούνται ιδιαίτερα σοβαροί, γιατί μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω διαφόρων διαδρομών έκθεσης, όπως η εισπνοή σκόνης, η κατανάλωση μολυσμένων τροφίμων ή η άμεση κατανάλωση νερού (Dris et al., 2018).

Με την Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA), μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν επαρκή επιστημονικά δεδομένα που να εξηγούν με ακρίβεια τον τρόπο με τον οποίο τα μικροπλαστικά διεισδύουν στα τρόφιμα, πώς αλληλοεπιδρούν με τον ανθρώπινο οργανισμό και ποιες είναι οι ενδεχόμενες επιπτώσεις τους στην υγεία.

Για τον λόγο αυτόν, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή περαιτέρω ερευνών, με στόχο την ανάπτυξη νέων μεθόδων τυποποίησης που θα επιτρέπουν την ανάλυση, την εκτίμηση της δράσης και την αξιολόγηση του κινδύνου των μικροπλαστικών στον ανθρώπινο οργανισμό (Munoz-Piniero, 2018).

Μέχρι σήμερα, δεν έχουν εκδοθεί επίσημες οδηγίες από αρμόδιες αρχές που να συνιστούν αλλαγή των διατροφικών μας συνηθειών ή αποφυγή συγκεκριμένων τροφών λόγω της παρουσίας μικροπλαστικών (Munoz-Piniero, 2018).

3.4.2 Στο μικροπεριβάλλον

Η συσσώρευση μικροπλαστικών στα περιβαλλοντικά μέσα οδηγεί σε ουσιαστικές επιπτώσεις. Στο οικοσύστημα, προκαλούν τοξικότητα, χρόνια φλεγμονή, αναπαραγωγικές διαταραχές και οικολογικές διαταραχές (Bakhshaei et al., 2025).

Η καρκινογόνος δράση των μικροπλαστικών αποτελεί επίσης σοβαρό ζήτημα. Η αλληλεπίδρασή τους με τη μικροπανίδα του εδάφους επηρεάζει αρνητικά την υγεία των οργανισμών αλλά όσο και τις λειτουργίες του εδάφους. Μια επιπλέον πηγή πλαστικής ρύπανσης αφορά την άγρια ζωή και εντοπίζεται σε περιοχές κοντά σε ποτάμια, όπου οι οργανισμοί εκτίθενται άμεσα στους κινδύνους που επιφέρει η παρουσία μικροπλαστικών στο περιβάλλον, αυτά μπορούν είτε να φράξουν το πεπτικό τους σύστημα ή δίνοντάς τους την εντύπωση ότι έχουν χορτάσει επαρκώς, με αποτέλεσμα να σταματούν την αναζήτηση τροφής και σε ορισμένες περιπτώσεις να οδηγούνται τελικά σε λιμοκτονία (Tang et al., 2020).

Ακόμη, στο **θαλάσσιο οικοσύστημα** αντικείμενο μελέτης για πρώτη φορά αποτέλεσε το 1971. Σήμερα, έχει πλέον τεκμηριωθεί η ύπαρξή τους σε όλους σχεδόν τους τύπους υδάτινων οικοσυστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των θαλασσών, των λιμνών και των ποταμών, ενώ εντοπίζονται και σε αγροοικοσυστήματα και σε συστήματα παραγωγής και κατανάλωσης τροφίμων και ποτών (Pereira Amanda et al., 2020).

Εντυπωσιακό είναι ότι η συσσώρευση μικροπλαστικών έχει παρατηρηθεί ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές, μακριά από αστικά κέντρα, όπως σε πολικές θαλάσσιες περιοχές και στους πάγους της Αρκτικής, καθώς και σε απομονωμένες ορεινές περιοχές (Allen et al., 2019).

Το φαινόμενο αυτό υποδηλώνει τη δυνατότητα των μικροπλαστικών, να διασκορπίζονται μέσω της ατμόσφαιρας και να εναποτίθενται σε απομακρυσμένα φυσικά περιβάλλοντα. Υπάρχουν επιπλέον ενδείξεις ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη επιταχύνει το λιώσιμο των πάγων στις πολικές περιοχές, απελευθερώνοντας έτσι τις ποσότητες μικροπλαστικών που ήταν εγκλωβισμένες σε αυτούς (Mason, 2018).

Επιπλέον, η έντονη παρουσία των μικροπλαστικών στο **χερσαίο περιβάλλον** επιτάσσει την επιστημονική εστίαση και σε αυτά τα οικοσυστήματα. Ειδικότερα, η μελέτη των γλυκών υδάτων και των εδαφικών οικοσυστημάτων μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην κατανόηση της προέλευσης των μικροπλαστικών, καθώς αυτοί οι χώροι αποτελούν τους πρώτους αποδέκτες γεωργικών και αστικών αποβλήτων (De Bhowmick et al., 2021).

Όσον αφορά στο χερσαίο οικοσύστημα, η χρήση πλαστικών μεμβρανών για την κάλυψη του εδάφους στη γεωργία έχει αναγνωριστεί ως μία από τις βασικές αιτίες μόλυνσης του αγροτικού εδάφους με μικροπλαστικά, μαζί με άλλα υλικά όπως το κομπόστ, η ιλύς λυμάτων, μπορούν να αποτελέσουν πηγές ρύπανσης, αν και περιέχουν βλαβερές ουσίες, όπως είναι τα βιοστερεά, το αρδευτικό νερό, η ατμοσφαιρική εναπόθεση, η σκόνη από τους δρόμους (Corradini et al., 2019).

Η εναπόθεση μικροπλαστικών από την ατμόσφαιρα σε εδάφη τόσο αστικών όσο και απομακρυσμένων περιοχών, έχει καταγραφεί να συμβαίνει κατά τη διάρκεια υγρών και ξηρών καιρικών περιόδων (Rochman & Hoellein, 2020).

Τα βιοστερεά, δηλαδή τα στερεά οργανικά κατάλοιπα που προκύπτουν από την επεξεργασία λυμάτων και χρησιμοποιούνται συχνά ως λίπασμα σε καλλιεργούμενες εκτάσεις, εφαρμόζονται είτε επιφανειακά είτε με έγχυση στο έδαφος, ανάλογα με την κορεσμένη ή μη κατάσταση του υπεδάφους (Crossman et al., 2020).

Η μόλυνση είναι πιο έντονη στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους σε σύγκριση με τα βαθύτερα εδαφικά στρώματα (Liu et al., 2018).

Στην Ελβετία, έχει παρατηρηθεί ότι πάνω από το 90% των εδαφών που βρίσκονται σε πλημμυρικές πεδιάδες και περιοχές που εκτείνονται κατά μήκος ποταμών ή ρεμάτων και είναι ευάλωτες σε πλημμύρες είναι ρυπασμένα από μικροπλαστικά. Η συγκέντρωση των μικροπλαστικών σε αυτού του τύπου τα εδάφη σχετίζεται άμεσα με την πυκνότητα του πληθυσμού στην εκάστοτε περιοχή, κάτι που δείχνει ότι τα οικιακά πλαστικά απόβλητα αποτελούν βασική πηγή ρύπανσης (Scheurer & Bigalke, 2018).

Η μετακίνηση των μικροπλαστικών από το έδαφος προς τα υδάτινα συστήματα περιλαμβανομένων των θαλάσσιων, των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων, μπορεί να προκύψει μέσω ποικίλων φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών, όπως η απορροή, η καλλιέργεια του εδάφους, η διήθηση νερού, η αιολική διάβρωση και η βόσκηση ζώων (Hurley & Nizzetto, 2018).

Έχει μάλιστα αναφερθεί ότι έως και το 99% των μικροπλαστικών που προέρχονται από βιοστερεά και εφαρμόζονται στα αγροτεμάχια τελικά μεταναστεύουν προς το υδάτινο περιβάλλον (Crossman et al., 2020).

Ωστόσο, η κινητικότητα των μικροπλαστικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος, το σχήμα και τις επιφανειακές τους ιδιότητες (Qi et al., 2020).

Σωματίδια πλαστικού που έχουν διασπαστεί εντοπίζονται συχνά σε γεωργικά εδάφη, ειδικά εκεί όπου χρησιμοποιείται πλαστική επίστρωση (Ding et al., 2020).

Παρά ταύτα, τα μικροπλαστικά έχουν εντοπιστεί και σε αγροτικές περιοχές όπου δεν εφαρμόστηκαν ούτε αγροτικά πλαστικά ούτε λιπάσματα, γεγονός που αποδίδεται στην εναπόθεση από την ατμόσφαιρα (Piehl et al., 2018).

Εν κατακλείδι, διαταράσσουν τις βιοφυσικές ιδιότητες του εδάφους, προκαλώντας αλλαγές στη δομή του, μειώνοντας τον αερισμό, τη διαπερατότητα και την ικανότητα συγκράτησης νερού. Αυτό οφείλεται στη μικρή ικανότητα των υδρόφοβων μικροπλαστικών να συγκρατούν χημικές ενώσεις στο νερό του εδάφους (Zhang et al., 2018).

3.5 Χημικές και Φυσικές αντιδράσεις των μικροπλαστικών

Τα μικροπλαστικά στο έδαφος έχουν την ικανότητα να απορροφούν τοξικές ουσίες όπως βαρέα μέταλλα, αντιβιοτικά και άλλες επικίνδυνες χημικές ενώσεις, επιτείνοντας έτσι την αρνητική τους επίδραση στους μικροοργανισμούς του εδάφους (Wang et al., 2019).

Οι πολυμερείς ενώσεις που ανιχνεύονται συχνότερα στο χερσαίο περιβάλλον είναι το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυαιθυλενε-τερεφθαλικό (PET) (Qi et al., 2020).

Τα πλαστικά περιέχουν πρόσθετα όπως οι φθαλικοί εστέρες (PAEs), είναι μια κατηγορία οργανικών ενώσεων που χρησιμοποιούνται κυρίως ως πλαστικοποιητές δηλαδή, προστίθενται σε πλαστικά (κυρίως PVC) για να τα κάνουν πιο εύκαμπτα και μαλακά, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της οικολογικής τους τοξικότητας. Οι ενώσεις αυτές, χρησιμοποιούνται κυρίως σε γεωργικά πλαστικά όπως τα φύλλα κάλυψης, που μπορούν να διαρρεύσουν στο έδαφος και να προκαλέσουν ρύπανση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά τους στα φρούτα και λαχανικά, που καλλιεργούνται σε επιβαρυμένα με PAEs εδάφη και ενδέχεται να περιέχουν κατάλοιπα αυτών των ενώσεων, θέτοντας σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία μέσω της τροφικής αλυσίδας.

Οι συγκεντρώσεις των φθαλικών εστέρων στα συγκεκριμένα εδάφη κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 1,8 και 3,5 mg ανά κιλό, επίπεδα που θεωρούνται σημαντικά για το περιβάλλον, ιδίως όταν η έκθεση είναι χρόνια και συνεχής. Για την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας, είναι σημαντική η μείωση της χρήσης τέτοιων προσθέτων και η προώθηση πιο φιλικών προς το περιβάλλον υλικών (Qi et al., 2020).

Αναλυτικότερα, τα μικροπλαστικά λόγω των φυσικοχημικών τους ιδιοτήτων, επιδεικνύουν υψηλή ικανότητα απορρόφησης και προσρόφησης χημικών ρύπων. Οι επιφάνειες τους, ιδίως όταν είναι φθαρμένες ή έχουν υποστεί φωτοοξειδωση, λειτουργούν ως ενεργά σημεία προσκόλλησης οργανικών ρύπων (π.χ. φυτοφαρμάκων, πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων) και βαρέων μετάλλων (π.χ. Pb, Cd, Hg).

Αυτή η ικανότητα καθιστά τα μικροπλαστικά «φορείς» επικίνδυνων ενώσεων, οι οποίες δύνανται να μεταφερθούν μέσω της τροφικής αλυσίδας σε οργανισμούς και τελικά στον άνθρωπο. Μάλιστα, η προσρόφηση είναι περισσότερο έντονη στα μικροπλαστικά που προέρχονται από πολυαιθυλένιο και πολυπροπυλένιο, λόγω της υδρόφοβης φύσης τους και της μεγάλης ειδικής επιφάνειας (Wang et al., 2018).

Η μεταφορά μικροπλαστικών μέσω της βιολογικής τροφικής αλυσίδας αποτελεί σημαντικό μηχανισμό διασποράς τους στο περιβάλλον. Έχει παρατηρηθεί ότι διάφοροι θαλάσσιοι οργανισμοί όπως το πλαγκτόν μέχρι τα εμπορικά ψάρια καταναλώνουν είτε άμεσα είτε έμμεσα μέσω της τροφής τους. Κατά την πέψη, τα μικροπλαστικά δεν διασπώνται, ενώ ταυτόχρονα δύνανται να προκαλέσουν μηχανικά τραύματα ή να μειώσουν την πρόσληψη τροφής. Επίσης, συσσωρεύονται σε όλο και υψηλότερα τροφικά επίπεδα (βιομεγέθυνση), κάτι που απειλεί την οικολογική ισορροπία και την ασφάλεια των τροφίμων (Provencher et al., 2020).

Παράλληλα, οι μικροπλαστικές ίνες αλληλεπιδρούν με τα μικροβιακά οικοσυστήματα των εδαφών και των υδάτων. Μελέτες έχουν δείξει ότι τα μικροπλαστικά στη θάλασσα ή στο περιβάλλον δρουν σαν "επιφάνειες" πάνω στις οποίες κολλάνε μικρόβια, όπως βακτήρια και μύκητες. Με τον καιρό, αυτά τα μικρόβια σχηματίζουν ένα λεπτό στρώμα (σαν φιλμ), που ονομάζεται βιοφίλμ (Zettler et al., 2018).

Το φαινόμενο αυτό αλλοιώνει τη σύσταση της μικροπανίδας και επηρεάζει την κυκλοφορία θρεπτικών στοιχείων, όπως του αζώτου και του φωσφόρου. Η αλλοίωση της μικροβιακής βιοποικιλότητας επηρεάζει ευρύτερα τις οικοσυστημικές λειτουργίες, ιδίως σε αγροτικά και παραθαλάσσια περιβάλλοντα (Luo et al., 2019).

Ανησυχία προκαλεί και η παρουσία μικροπλαστικών στο πόσιμο νερό, τόσο σε δείγματα βρύσης όσο και εμφιαλωμένου νερού. Έρευνα της Orb Media διαπίστωσε μικροπλαστικά σε πάνω από το 80% των δειγμάτων εμφιαλωμένου νερού διεθνώς (Mason et al., 2018).

Αν και η επιστημονική κοινότητα δεν έχει ακόμη καταλήξει σε οριστικά συμπεράσματα για τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, ενδείξεις υποδεικνύουν πιθανή πρόκληση οξειδωτικού στρες, φλεγμονής και κυτταρικών αλλοιώσεων (Prata et al., 2020).

Επί του παρόντος, δεν υφίστανται διεθνή όρια ασφαλείας για μικροπλαστικά στο πόσιμο νερό, γεγονός που καθιστά την ανάγκη περαιτέρω ερευνών επιτακτική.

Συνολικά, οι φυσικές και χημικές αλληλεπιδράσεις των μικροπλαστικών με το περιβάλλον ενισχύουν τη βιοδιαθεσιμότητα τοξικών ουσιών, επηρεάζουν τη λειτουργία τροφικών δικτύων και ενδέχεται να θέτουν σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία, μέσω της έκθεσης ανθρώπων σε νερό και τρόφιμα που περιέχουν μικροπλαστικά.

3.6 Τι είναι η Αντιρρύπανση/Απορρύπανση

Η αντιρρύπανση αναφέρεται σε κάθε στρατηγική ή πρακτική που στοχεύει στην πρόληψη ή μείωση της εκπομπής ρύπων στο περιβάλλον, ενώ **η απορρύπανση** σχετίζεται με τις τεχνικές απομάκρυνσης ήδη υπάρχοντων ρύπων, όπως τα μικροπλαστικά, από οικοσυστήματα. Οι μικροσκοπικές διαστάσεις των μικροπλαστικών, η σταθερότητα τους στο περιβάλλον και η ικανότητά τους να προσροφούν επικίνδυνες χημικές ενώσεις καθιστούν την ανάγκη για στοχευμένα μέτρα πρόληψης και αποκατάστασης κρίσιμη (Andrady, 2018).

- Ένας βασικός πυλώνας της αντιρρύπανσης είναι **η νομοθετική απαγόρευση ή ρύθμιση προϊόντων** που περιέχουν μικροπλαστικά, ιδίως σε καλλυντικά, απορρυπαντικά και προϊόντα προσωπικής φροντίδας. Η ΕΕ έχει υιοθετήσει μέτρα που απαγορεύουν την εσκεμμένη προσθήκη μικροπλαστικών σε πολλά

προϊόντα, στο πλαίσιο της στρατηγικής για τη μείωση της πλαστικής ρύπανσης (European Chemicals Agency, 2022).

Παράλληλα, ενισχύονται οι πολιτικές για την αναβάθμιση εγκαταστάσεων καθαρισμού λυμάτων και τη βελτίωση της απόδοσης φιλτραρίσματος (Sun et al., 2019).

- **Η αποφυγή καλλυντικών** που περιέχουν μικροπλαστικά, μέσω της προτίμησης σε φυσικά και βιοδιασπώμενα συστατικά, αποτελεί πρακτικό και άμεσο μέτρο μείωσης της ζήτησης για πλαστικά συστατικά. Μελέτες δείχνουν ότι οι καταναλωτές αγνοούν συχνά την παρουσία μικροπλαστικών σε προϊόντα καθημερινής χρήσης, καθιστώντας κρίσιμη την ενημέρωση και εκπαίδευση του κοινού (Giustra et al., 2024).
- **Η εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση του πληθυσμού** είναι καίριας σημασίας. Εκστρατείες όπως το “Beat the Microbead” συμβάλλουν στην κατανόηση των συνεπειών των μικροπλαστικών και των λύσεων στην καθημερινότητα των πολιτών (UNEP, 2018).
- **Η μείωση της χρήσης πλαστικών μίας χρήσης** μέσω της αντικατάστασης με εναλλακτικά υλικά (π.χ. γυαλί, χαρτί, μέταλλο) συμβάλλει άμεσα στην πρόληψη της παραγωγής μικροπλαστικών από τη διάσπαση πλαστικών αποβλήτων (Geyer et al., 2018).
- **Επιπλέον, η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση υλικών** παρατείνει τη διάρκεια ζωής του πλαστικού, περιορίζοντας την ανεξέλεγκτη απόρριψη και συνεπώς τον κίνδυνο διασποράς μικροπλαστικών (Geyer et al., 2018).

Όσον αφορά τους **τρόπους απορρύπανσης** που μπορούμε να τα απομακρύνουμε είναι οι εξής:

- **Φίλτρα επεξεργασίας νερού:** Η τεχνολογία φίλτρων σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού και λυμάτων αποτελεί βασική λύση για τη συγκράτηση μικροπλαστικών. Τα στάδια φιλτραρίσματος, ιδιαίτερα αυτά που χρησιμοποιούν μεμβράνες τύπου microfiltration και nanofiltration,

απομακρύνουν αποτελεσματικά τα σωματίδια από το νερό βρύσης ή τα βιομηχανικά απόβλητα (Vitala et al., 2018).

Τα σύγχρονα φίλτρα μπορούν να φιλτράρουν έως και 90% των μικροπλαστικών από λύματα, περιορίζοντας την είσοδό τους στο υδάτινο περιβάλλον.

- **Καθαρισμός ακτών και θαλασσών:** Η συλλογή μικροπλαστικών από ακτές και θαλάσσιες περιοχές, είτε μέσω οργανωμένων δράσεων πολιτών είτε με χρήση ρομποτικών ή αυτόνομων συστημάτων (όπως τα Seabins ή τα drone καθαρισμού), ενισχύει την προστασία της παράκτιας βιοποικιλότητας. Τέτοιες δράσεις εφαρμόζονται ευρέως σε ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες, όπως το «CleanSea» και το «The Ocean Cleanup» (Schuyler et al., 2018).
- **Ανάπτυξη τεχνολογιών:** Μια από αυτές είναι η βιοαπορρύπανση που είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί βακτήρια ή μύκητες για την αποδόμηση μικροπλαστικών στο περιβάλλον. Παρά τις προκλήσεις, αυτή η μέθοδος (βιοαποικοδόμηση) αναμένεται να αποτελέσει βασικό άξονα της καινοτομίας στον τομέα της απορρύπανσης (Yoshida et al., 2018).

3.7 Ρύποι Προτεραιότητας

Η ανάλυση της διεθνούς βιβλιογραφίας των τελευταίων πέντε ετών καταδεικνύει ότι τα υδάτινα οικοσυστήματα, δέχονται σημαντικές πιέσεις όχι μόνο από τα μικροπλαστικά, αλλά και από μια σειρά άλλων «αναδυόμενων» και κλασικών ρύπων, οι οποίοι εμφανίζονται συχνά ταυτόχρονα και μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται:

- **Φαρμακευτικά κατάλοιπα:** Φάρμακα όπως αντιβιοτικά, αναλγητικά και αντικαταθλιπτικά, που καταλήγουν στο νερό μέσω των αποβλήτων των ανθρώπων και των νοσοκομείων. Μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά, την ανάπτυξη και τη γενική υγεία των υδρόβιων οργανισμών.

- **Ενδοκρινικοί διαταράκτες (EDCs):** Χημικές ουσίες που παρεμβαίνουν στο ενδοκρινικό σύστημα, όπως οιστρογόνα και άλλες ορμόνες. Μπορούν να προκαλέσουν αναπαραγωγικές διαταραχές, αλλοιώσεις στη σεξουαλική ανάπτυξη και μακροχρόνιες οικολογικές επιπτώσεις.
- **PFAS (Περ- και Πολυφθοροαλκυλικές ενώσεις):** Πολύ σταθερές χημικές ενώσεις που χρησιμοποιούνται σε αδιάβροχα υλικά, αφρούς πυρόσβεσης και βιομηχανικά προϊόντα. Είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές στη διάσπαση και τείνουν να συσσωρεύονται στον οργανισμό, προκαλώντας πιθανές νεφρικές, ηπατικές και ανοσολογικές βλάβες.
- **Φυτοφάρμακα:** Ειδικά τα νεονικοτινοειδή, είναι μια κατηγορία που χρησιμοποιούνται στην αγροτική παραγωγή, για να προστατεύουν τα φυτά από έντομα και άλλα ασπόνδυλα (π.χ. σκουλήκια). Αυτά τα μικρά πλάσματα είναι **πολύ σημαντικά για την τροφική αλυσίδα**, γιατί αποτελούν τροφή για μεγαλύτερους οργανισμούς, όπως ψάρια ή πουλιά. Αν μειωθεί ο αριθμός τους, **διαταράσσεται η ισορροπία του οικοσυστήματος**, δηλαδή το σύστημα των ζώων και φυτών δεν λειτουργεί σωστά και μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα, όπως μείωση των ψαριών ή αλλαγές στα φυτά.
- **Οργανικοί ρύποι προσωπικής φροντίδας:** Ουσίες όπως φίλτρα UV που χρησιμοποιούνται στα αντηλιακά για να προστατεύουν το δέρμα από τον ήλιο.
Τρικλοζάνη: Ένα αντιβακτηριδιακό συστατικό που υπήρχε σε σαπούνια και προϊόντα καθαρισμού και όταν αυτές οι ουσίες καταλήγουν στο νερό, μπορούν να προκαλέσουν τοξικές και ορμονικές διαταραχές σε ψάρια και άλλους υδρόβιους οργανισμούς.
- **Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs):** Προέρχονται κυρίως από καύση οργανικών υλών, όπως πετρέλαιο και κάρβουνο. Είναι καρκινογόνοι και μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή των υδρόβιων ειδών.
- **Βαρέα μέταλλα:** Όπως ο υδράργυρος, ο μόλυβδος και το κάδμιο, τα οποία συσσωρεύονται στους οργανισμούς και προκαλούν νευροτοξικότητα, βλάβες στα όργανα και διαταραχές της ανάπτυξης (Davey et al., 2022).

Η συν-εμφάνιση αυτών των ρύπων και η μακροχρόνια δράση τους, που συχνά δεν προκαλεί άμεσους θανάτους αλλά υποκλινικές βλάβες, υπογραμμίζουν την ανάγκη συστηματικής παρακολούθησης.

Οι μηχανισμοί δράσης τους περιλαμβάνουν:

- **Οιστρογονικότητα** → διαταράσσει το ενδοκρινικό σύστημα και την αναπαραγωγή των οργανισμών.
- **Νευροτοξικότητα** → επηρεάζει τη λειτουργία του νευρικού συστήματος, προκαλώντας αλλαγές στη συμπεριφορά ή στη διαβίωση των ειδών.
- **Ανοσοτοξικότητα** → εξασθενεί την άμυνα του οργανισμού, αυξάνοντας την ευαισθησία σε ασθένειες.

Συνεπώς, η παρακολούθηση των επιπέδων αυτών των ρύπων είναι κρίσιμη για την προστασία της βιοποικιλότητας, την οικολογική ισορροπία και τη διασφάλιση της δημόσιας υγείας. Η συνεχής αξιολόγηση τους επιτρέπει την έγκαιρη λήψη μέτρων για τη μείωση των επιπτώσεων και την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων (Davey et al., 2022).

1. Στα φαρμακευτικά, συστηματικές έρευνες στην Ευρώπη, καταγράφουν ευρεία παρουσία ψυχοφαρμάκων, αντιβιοτικών και αναλγητικών που βρίσκονται συχνά στα επιφανειακά ύδατα, προκαλώντας οικολογικούς κινδύνους για τις τροφικές αλυσίδες. Παράλληλα, οι βιοϋμένες (biofilms) είναι στρώματα μικροοργανισμών που κολλάνε σε επιφάνειες μέσα στο νερό, όπως πέτρες ή σωλήνες. Αυτά αλλάζουν τη λειτουργία των μικροβίων και τα κάνουν πιο ανθεκτικά σε φάρμακα και αντιβιοτικά.

Αυτό σημαίνει ότι η παρουσία τους ενισχύει τον κίνδυνο για μικροβιακή αντοχή (AMR), δηλαδή για μικρόβια που δεν σκοτώνονται εύκολα από τα αντιβιοτικά (Davey et al., 2022).

Μια πρόσφατη παγκόσμια ανάλυση που εξέτασε 190 PPCPs (Pharmaceuticals and Personal Care Products, φάρμακα και προϊόντα προσωπικής φροντίδας) σε 60 χώρες, αναδεικνύει μια λίστα προτεραιότητας ουσιών, οι οποίες είναι πολύ δύσκολο να αφαιρεθούν από τις συμβατικές εγκαταστάσεις καθαρισμού νερού, γι' αυτό θεωρούνται επικίνδυνα και χρειάζονται προτεραιότητα στην παρακολούθηση (Davey et al., 2022).

2. Οι ενδοκρινικοί διαταράκτες (EDCs) περιλαμβάνουν τόσο φυσικές όσο και συνθετικές ορμόνες, όπως η οιστρίολη, η οιστραδιόλη και η αιθινυλοιστραδιόλη καθώς και χημικές ενώσεις όπως οι φθαλικές ενώσεις και οι διφαινόλες (π.χ. BPA). Αυτές οι ουσίες έχουν τεκμηριωμένη παρουσία σε δίκτυα πόσιμου νερού και μπορούν να προκαλέσουν επιπτώσεις σε αναπτυξιακά και νευροενδοκρινικά συστήματα, δηλαδή να επηρεάσουν την ανάπτυξη και τη λειτουργία των ορμονών σε ανθρώπους και ζώα.

Πρόσφατες ανασκοπήσεις επιβεβαιώνουν ότι το νερό αποτελεί κύρια οδό έκθεσης ανθρώπων/οργανισμών, ενώ οι συγκεντρώσεις αυτών των ουσιών μεταβάλλονται με την εποχή, ανάλογα με τις αλλαγές στην κατανάλωση και την επεξεργασία του νερού (Thacharodi et al., 2023).

Στην ίδια κατηγορία εντάσσονται πολλοί ρύποι προσωπικής φροντίδας: όπως οργανικά UV-φίλτρα που χρησιμοποιούνται σε αντηλιακά. Αυτά μπορούν να προκαλέσουν οιστρογονικές και αναπαραγωγικές επιδράσεις στους οργανισμούς και παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλο διάστημα, επειδή εισρέουν συνεχώς στο νερό (ψευδο-επιμονή). Οι μέθοδοι προχωρημένης οξειδωσης (AOPs) μειώνουν μόνο εν μέρει την παρουσία τους.

Η τρικλοζάνη, ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο αντιμικροβιακό, συνδέεται με δυσλειτουργίες στις μικροβιακές κοινότητες και προκαλεί οξειδωτικό στρες σε ψάρια και άλλα υδρόβια είδη, επηρεάζοντας την υγεία τους και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων (Thacharodi et al., 2023).

3. Οι PFAS (π.χ. PFOS, PFOA, GenX, TFA) αποτελούν ομάδα ρύπων με εξαιρετική σταθερότητα και υψηλή κινητικότητα στα υδατικά συστήματα. Πρόσφατες χαρτογραφήσεις και μελέτες περίπτωσης στην Ευρώπη καταδεικνύουν ευρεία επιβάρυνση επιφανειακών/υπόγειων υδάτων και πόσιμων πηγών, ενώ οι σύγχρονες τεχνολογίες απομάκρυνσης (προσρόφηση, φωτοκατάλυση) παραμένουν τεχνικά και οικονομικά απαιτητικές.

Επιπλέον, η στοχευμένη ανίχνευση δείχνει ότι τα PFAS συχνά υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια σε νερά κοντά σε βιομηχανικές περιοχές, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη για προληπτική διαχείριση στη πηγή, δηλαδή να περιορίζεται η ρύπανση πριν αυτή φτάσει στο περιβάλλον (Moghadas et al., 2023).

4. Στα φυτοφάρμακα, τα νεονικοτινοειδή χαρακτηρίζονται από υψηλή υδατοδιαλυτότητα και ανθεκτικότητα, ιδιότητες που τα καθιστούν αποτελεσματικά αλλά και ιδιαίτερα επίμονα στο περιβάλλον. Έχουν καταγραφεί σημαντικοί κίνδυνοι για οργανισμούς μη-στόχους, όπως τα ασπόνδυλα και τα ανώτερα τροφικά στάδια, γεγονός που δημιουργεί ανησυχίες για ευρύτερες οικολογικές επιπτώσεις. Πρόσφατες ανασκοπήσεις επιβεβαιώνουν ότι οι ουσίες αυτές ανιχνεύονται συστηματικά σε επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, επιβεβαιώνοντας τη διασπορά τους στο περιβάλλον. Παράλληλα, οι ίδιες μελέτες υποδεικνύουν την ανάγκη υιοθέτησης πολιτικών μετριασμού, όπως περιορισμοί στη χρήση, βελτίωση πρακτικών εφαρμογής και προώθηση βιώσιμων εναλλακτικών μεθόδων, με στόχο τον περιορισμό των περιβαλλοντικών κινδύνων (Mandal et al., 2025).

5. Τέλος, οι «κλασικοί» τοξικοί ρύποι, όπως οι πολυαρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) και τα βαρέα μέταλλα, παραμένουν κρίσιμοι. Συνεχή δεδομένα από λεκάνες απορροής ποταμών αναδεικνύουν εποχικές μεταβολές των PAHs σε νερό και ιζήματα, οι οποίες συνδέονται με καρκινογόνους κινδύνους. Παράλληλα, μελέτες για βαρέα μέταλλα (Hg, Cd, Pb, Ni, Cr κ.ά.)

τεκμηριώνουν οικοτοξικολογικούς και υγειονομικούς δείκτες κινδύνου, ενώ καταδεικνύουν ότι οι ρύποι προέρχονται τόσο από διάχυτες όσο και από σημειακές πηγές. Οι ξηρασίες και οι χαμηλές παροχές εντείνουν τις συγκεντρώσεις πολλών οργανικών ρύπων, μεταβάλλοντας το προφίλ κινδύνου σε κλίμακα λεκάνης (Teixeira et al., 2024).

Συνολικά, το μείγμα αυτών των ρύπων απαιτεί την εφαρμογή πολιτικών ιεράρχησης βάσει κινδύνου, προκειμένου να δοθεί προτεραιότητα στους ρύπους που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απειλή για την οικολογία και την υγεία. Παράλληλα, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη και η ενίσχυση δικτύων παρακολούθησης, τα οποία δεν περιορίζονται μόνο σε συγκεντρώσεις χημικών, αλλά περιλαμβάνουν και effect-based βιοδοκιμές, οι οποίες αξιολογούν τις βιολογικές επιπτώσεις των ρύπων στα οικοσυστήματα. Η αποτελεσματική διαχείριση απαιτεί επίσης συνδυασμό τεχνολογιών επεξεργασίας των υδάτων με προληπτικά μέτρα στην πηγή, ώστε να μειώνεται η εισροή των ρύπων πριν φτάσουν στους φυσικούς αποδέκτες (Sun et al., 2024).

Η ενσωμάτωση αυτών των ευρημάτων σε Σχέδια Διαχείρισης Υδάτων (WFD) και σε Πρότυπα Ποιότητας (EQS) είναι κρίσιμη για την επίτευξη της «καλής χημικής κατάστασης» των υδάτων, ιδιαίτερα υπό τις συνθήκες κλιματικής πίεσης και υδρολογικής μεταβλητότητας, που μπορούν να επηρεάσουν τις συγκεντρώσεις και τη μεταφορά των ρύπων.

Με αυτόν τον τρόπο, η διαχείριση γίνεται πιο στοχευμένη, επιστημονικά τεκμηριωμένη και ικανή να αντιμετωπίσει τόσο σημερινές όσο και μελλοντικές προκλήσεις (Sun et al., 2024).

Κεφάλαιο 4: Τεχνικές και Πολιτικές Περιορισμού Ρύπανσης

4.1 Τεχνολογίες, τεχνικές και πολιτικές περιορισμού ρύπανσης των υδάτων

- A. Οι τεχνικές περιορισμού της ρύπανσης εφαρμόζονται κυρίως επιτόπου, με στόχο να εμποδίσουν την εξάπλωση των ρύπων, να μειώσουν τη συγκέντρωσή τους απευθείας από το περιβάλλον. Δεν απαιτούν πάντα μεγάλα συστήματα ή εγκαταστάσεις, αλλά βασίζονται σε φυσικές, χημικές ή βιολογικές διεργασίες.

Παρακάτω συνοψίζονται οι κυριότερες σύγχρονες μέθοδοι και οι συναφείς πολιτικές για τον περιορισμό της ρύπανσης των υδάτων.

- **Εγκιβωτισμός και υδραυλικός έλεγχος:** Χρησιμοποιούνται φράγματα χαμηλής διαπερατότητας και συστήματα άντλησης για να αποτρέπεται η διάδοση των ρύπων στο υπέδαφος. Οι ρύποι συγκρατούνται σε μια συγκεκριμένη περιοχή, δίνοντας τη δυνατότητα να αντιμετωπιστούν πιο εύκολα στην επιφάνεια (Shen, 2025).
- **Διαπερατά αντιδραστικά φράγματα (PRBs):** Είναι ειδικά φράγματα που αφήνουν το νερό να περνά μέσα τους, αλλά περιέχουν υλικά όπως σίδηρο ή ενεργό άνθρακα. Καθώς το νερό διέρχεται, οι ρύποι παγιδεύονται ή διασπώνται χημικά/βιολογικά, μειώνοντας την τοξικότητά τους. Πρόκειται για δραστική λύση που καθαρίζει το νερό ενώ το αφήνει να ρέει (Jayasundara et al., 2023).
- **In Situ Chemical Oxidation (ISCO):** Μέθοδος κατά την οποία οξειδωτικές ουσίες, όπως υπεροξείδιο του υδρογόνου εγχέονται στο έδαφος για να διασπάσουν επικίνδυνους οργανικούς ρύπους (Wei et al., 2022).
- **In Situ Chemical Reduction (ISCR):** Τεχνική που χρησιμοποιεί σίδηρο μηδενικού σθένους για την αναγωγή και εξουδετέρωση τοξικών ουσιών, όπως βαρέα μέταλλα και αλογονωμένες ενώσεις (Lawrinenko et al., 2023).

- **Βιοαποκατάσταση:** Αξιοποιούνται μικροοργανισμοί που τρέφονται με ρυπαντικές ουσίες, μετατρέποντάς τες σε λιγότερο επικίνδυνα συστατικά. Η μέθοδος αυτή είναι φιλική προς το περιβάλλον και ιδιαίτερα χρήσιμη για οργανικούς ρύπους όπως το πετρέλαιο και τα νιτρικά (Oziegbe, 2025).

B. Οι τεχνολογίες είναι πιο συστηματικές λύσεις που εφαρμόζονται κυρίως σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων ή πόσιμου νερού. Πρόκειται για εξοπλισμούς και μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί ώστε να καθαρίζουν μεγάλες ποσότητες νερού με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Οι βασικότερες τεχνολογίες περιλαμβάνουν:

- **Συμβατικές βιολογικές διεργασίες:** Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για καθαρισμό αστικών λυμάτων. Περιλαμβάνει τρία στάδια (πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια) που μειώνουν τα οργανικά απόβλητα και τους μικροοργανισμούς που προκαλούν ασθένειες (Lin, 2025).
- **Μεμβρανικά συστήματα και MBR:** Χρησιμοποιούν ειδικά φίλτρα πολύ μικρού μεγέθους και βιοαντιδραστήρες με μεμβράνες, για να καθαρίζουν το νερό. Το αποτέλεσμα είναι καθαρό νερό υψηλής ποιότητας, κατάλληλο για επαναχρησιμοποίηση (Al-Asheh et al., 2021).
- **Κατασκευασμένοι υγρότοποι (CWs):** Τεχνητοί υγρότοποι που λειτουργούν όπως οι φυσικοί. Φυτά, υπόστρωμα και μικροοργανισμοί αφαιρούν θρεπτικά συστατικά και οργανικούς ρύπους με σχετικά χαμηλό κόστος (Lawrinenko et al., 2023).
- **Προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες (AOPs):** Μέθοδοι που χρησιμοποιούν όζον, υπεριώδη ακτινοβολία ή καταλύτες, για να καταστρέφουν τους πιο ανθεκτικούς ρύπους. Είναι αποτελεσματικές, αλλά χρειάζονται περισσότερη ενέργεια (Hubner et al., 2024).

Γ. Στο επίπεδο πολιτικής, η εφαρμογή **κανονιστικών πλαισίων** και η συμμετοχή πολιτών είναι απαραίτητες για την επιτυχία των τεχνικών και διαχειριστικών μέτρων:

- **Η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Ύδατα της ΕΕ** και οι οδηγίες για αστικά λύματα και νιτρορύπανση θέτουν όρια και στόχους για την οικολογική κατάσταση των υδάτων (European Commission, 2020).
- **Παρακολούθηση ποιότητας και ενημέρωση πολιτών:** Προωθούν την βιώσιμη χρήση και προστασία των υδατικών πόρων.
- **Οι διεθνείς οργανισμοί και χρηματοδοτικά εργαλεία:** Σύνδεση με την ενέργεια και την κλιματική αλλαγή υπογραμμίζει τη σημασία ολοκληρωμένων δράσεων σε πολλαπλά επίπεδα (IEA, 2024).

4.2 Τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων: Βιολογικοί καθαρισμοί, φίλτρα, νέες τεχνολογίες

Η αποτελεσματική προστασία των υδατικών πόρων βασίζεται κυρίως στην πρόληψη, ώστε να αποφεύγεται η είσοδος ρύπων στο περιβάλλον. Στο πλαίσιο αυτό, εφαρμόζονται μέτρα σε διάφορους τομείς:

Η σύγχρονη διαχείριση των υγρών αποβλήτων στηρίζεται σε προληπτικά και περιοριστικά μέτρα ρύπανσης, εφαρμόζοντας ένα ευρύ φάσμα στρατηγικών και μεθόδων, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί ώστε να αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά τα διάφορα συστατικά των αποβλήτων και να εξασφαλίζουν την προστασία του περιβάλλοντος. Στον πυρήνα αυτών παραμένουν οι βιολογικοί καθαρισμοί, οι οποίοι εξακολουθούν να αποτελούν τη βασική και πιο αξιόπιστη μέθοδο επεξεργασίας (Khalidi-Idrissi et al., 2023).

Στο πλαίσιο αυτό, η κλασική μέθοδος της ενεργού ιλύος, καθώς και τα πιο εξελιγμένα συστήματα (Biological Nutrient Removal), τα οποία περιλαμβάνουν διαδικασίες όπως η νιτροποίηση και η απονιτροποίηση, καθώς και η βιολογική απομάκρυνση του φωσφόρου, μειώνουν τα βασικά θρεπτικά στοιχεία και παραμένουν η κύρια γραμμή άμυνας για τον έλεγχο των κύριων θρεπτικών συστατικών: που προκαλούν μόλυνση στα νερά. Αυτές οι μέθοδοι έχουν τεκμηριωμένη αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση των ρύπων και παράλληλα παρέχουν σημαντικές δυνατότητες βελτιστοποίησης.

Τέτοιες δυνατότητες περιλαμβάνουν τον έλεγχο και τη ρύθμιση του αερισμού, τη βελτιστοποίηση του χρόνου παραμονής των υγρών αποβλήτων στις μονάδες επεξεργασίας και την επιλογή και προσαρμογή των μικροβιακών κοινοτήτων που συμμετέχουν στις βιολογικές διεργασίες, με στόχο τη μέγιστη αποδοτικότητα της επεξεργασίας (Khalidi-Idrissi et al., 2023).

Η ένωση της βιολογικής επεξεργασίας με τεχνολογίες μεμβρανών, όπως τα membrane bioreactors (MBR), εξασφαλίζει εκροές υψηλής καθαρότητας με χαμηλή συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών και παθογόνων, ενώ μειώνει το χώρο εγκατάστασης και διευκολύνει την επαναχρησιμοποίηση νερού ή τον περιορισμό μικρορυπαντών μέσω τριτοβάθμιας επεξεργασίας. Αν και το κόστος των μεμβρανών παραμένει υψηλό, τα MBR θεωρούνται ώριμη και αξιόπιστη λύση για αστικά και βιομηχανικά απόβλητα (Al-Asheh et al., 2021).

Μια ακόμη εναλλακτική μέθοδο έντασης, είναι η αερόβια κοκκώδης ιλύς (AGS), με υψηλές ταχύτητες καθίζησης, σύντομους χρόνους κύκλου και δυνατότητα ταυτόχρονης απομάκρυνσης C–N–P σε πλήρη κλίμακα (Ekholm et al., 2022).

Για την αντιμετώπιση της αζωτούχου ρύπανσης, οι διεργασίες ANAMMOX προσφέρουν μείωση του οργανικού φορτίου και τον αερισμό, αν και απαιτούν σταθερές συνθήκες λειτουργίας, όπως κατάλληλη θερμοκρασία, διαθεσιμότητα νιτритικών ιόντων και έλεγχο πιθανών αναστολών. Η ένταξη επιμέρους σταδίων, όπως μερική νιτρίτωση με ANAMMOX ή χρήση υβριδικών συστημάτων

σταθερού/κινούμενου βιοφίλμ διευρύνει τα λειτουργικά όρια των μονάδων και ενισχύει την αξιοπιστία τους (He et al., 2021).

Ειδικότερα η φίλτρανση και η προσρόφηση λειτουργούν ως κρίσιμη βαθμίδα για μικρορύπους. Τα κοκκώδη φίλτρα ενεργού άνθρακα, αφαιρούν οργανικούς ρύπους (π.χ. φαρμακευτικά) ενώ η βιολογική ενεργοποίηση των φίλτρων αυξάνει την αποδοτικότητα και την αντοχή τους στον κορεσμό (Betsholtz et al., 2024).

Στις περιπτώσεις όπου απαιτείται αφαλάτωση, απομάκρυνση ιόντων ή μικρορυπαντών, οι μεμβράνες νανοδιήθησης (NF) και αντίστροφης ώσμωσης (RO) χρησιμοποιούνται ως προχωρημένη βαθμίδα επεξεργασίας, προσφέροντας νερό υψηλής ποιότητας κατάλληλο για επαναχρησιμοποίηση. Η χρήση αυτών των μεμβρανών συνοδεύεται από σημαντικές ενεργειακές και λειτουργικές ισορροπίες (trade-offs), δηλαδή η υψηλή αποδοτικότητα στην απομάκρυνση ρύπων, συχνά απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και προσεκτική διαχείριση της λειτουργίας. Επιπλέον, η προεπεξεργασία του νερού πριν τη διέλευση από τις μεμβράνες είναι κρίσιμη, ώστε να περιοριστεί το φαινόμενο fouling (σχηματισμός επικαθίσεων και βιοφίλμ πάνω στη μεμβράνη), το οποίο μειώνει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των μεμβρανών (Fernández-Medrano et al., 2022).

Τέλος, οι τεχνητοί υγρότοποι προσφέρουν μια οικονομική και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης επιλογή για μικρούς οικισμούς ή αποκεντρωμένα δίκτυα. Έχουν αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών, ενώ η απομάκρυνση θρεπτικών συστατικών μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τον τρόπο σχεδιασμού και λειτουργίας τους (Biswal & Balasubramanian, 2022).

Συμπερασματικά, όλα αυτά πρέπει να γίνονται υπό συνεχή παρακολούθηση και να λειτουργεί αποδοτικά σε σχέση με το κόστος, τόσο σε επίπεδο μονάδας επεξεργασίας όσο και σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

4.3 Βέλτιστες πρακτικές στη γεωργία: Ορθολογική χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, προστασία εδαφών

Η διεθνής τεκμηρίωση συγκλίνει ότι η αποτελεσματική προστασία των υδάτων από γεωργικές πιέσεις απαιτεί ένα ολοκληρωμένο συνδυασμό ορθολογικής θρέψης των καλλιεργειών, κατάλληλες δομικές παρεμβάσεις στο πεδίο και εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών, συμπληρωμένων από ολοκληρωμένη φυτοπροστασία. Βασικός πυλώνας της θρέψης είναι το πλαίσιο 4R (σωστή πηγή, δόση, χρόνος, θέση), το οποίο μειώνει συστηματικά τις απώλειες φωσφόρου, ενώ παράλληλα έχει συμβάλει στην ευθυγράμμιση της γεωργικής παραγωγικότητας με την προστασία του περιβάλλοντος (Bruilsema, Peterson, & Prochnow, 2019).

Ως προς τον έλεγχο αζωτούχων απωλειών, δύο ανεξάρτητες μετα-αναλύσεις επιβεβαιώνουν ότι τα καλυπτικά φυτά μειώνουν δραστικά την έκπλυση νιτρικών: κατά μέσο όρο 56% έως 69% σε παγκόσμιο επίπεδο, χωρίς να επηρεάζεται η στράγγιση (Nouri et al., 2022).

Συμπληρωματικά, η ελεγχόμενη αποστράγγιση σε αρδευόμενες ή υπόγεια στραγγιζόμενες εκτάσεις, μειώνει τόσο την παροχή όσο και το φορτίο των νιτρικών (NO_3^-) προς τους υδατικούς αποδέκτες, με συνθετική αποτίμηση να τεκμηριώνει ότι οι μειώσεις αυτές είναι διατηρήσιμες σε διαφορετικές περιοχές (Helmerts et al., 2022).

Για τη συγκράτηση θρεπτικών και φυτοφαρμάκων απευθείας στην πηγή, οι περιμετρικές ζώνες βλάστησης εμφανίζουν μια ιδιαίτερα αποτελεσματική πρακτική. Έτσι, συμβάλουν ουσιαστικά στη μείωση των απωλειών αζώτου, με τι πιο έντονη κατακράτηση να παρατηρείται στα υπόγεια νερά (Valkama et al., 2019).

Ως προς τα φυτοπροστατευτικά, σύγχρονη ανασκόπηση δείχνει ότι οι λωρίδες βλάστησης μπορούν να περιορίσουν τη μεταφορά φυτοφαρμάκων κατά 10–100% και θρεπτικών κατά 12–100%. Η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από παράγοντες όπως το πλάτος της λωρίδας, η κλίση και η υφή του εδάφους, η πυκνότητα της φυτοκάλυψης και οι υδρολογικές συνθήκες (Prosser et al., 2020).

Τέλος, η ολοκληρωμένη φυτοπροστασία (IPM) παραμένει ο πιο ισχυρός μηχανισμός περιορισμού της χημικής πίεσης στα ύδατα. Πολυετής πειραματική μελέτη έδειξε ότι με την εφαρμογή κατωφλίων επέμβασης και τη διατήρηση επικονιαστών, οι χρήσεις εντομοκτόνων μπορούν να μειωθούν έως και 95% χωρίς καμία απώλεια στην παραγωγή (Pecenka et al., 2021).

4.4 Εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση: Κοινωνική συμμετοχή, ενημέρωση πολιτών και φορέων

Η εκπαίδευση και η κοινωνική συμμετοχή αποτελούν θεμέλια μίας προληπτικής πολιτικής για την ποιότητα των υδάτων, όχι μόνο επειδή ενισχύουν τη γνώση των πολιτών, αλλά κυρίως διότι μεταφράζουν τη γνώση σε έγκαιρες, συλλογικές και ατομικές πρακτικές διαχείρισης ρύπανσης.

Οι πρόσφατες μελέτες συμφωνούν ότι τα προγράμματα συμμετοχικής παρακολούθησης και οι στοχευμένες παρεμβάσεις επικοινωνίας κινδύνου, είναι περισσότερο αποτελεσματικά όταν εντάσσονται σε πλαίσια διακυβέρνησης με καθαρούς στόχους, μηχανισμούς ανατροφοδότησης και διαύλους ένταξης των δεδομένων στη λήψη αποφάσεων (Ramírez et al., 2023).

Στο επίπεδο της κοινωνικής συμμετοχής, οι μεθοδολογικές ανασκοπήσεις αναδεικνύουν τρεις κρίσιμες προϋποθέσεις για την επιτυχία:

(α) εκπαίδευση - καθοδήγηση των εθελοντών και πρωτόκολλα Διασφάλισης Ποιότητας και Έλεγχος Ποιότητας QA/QC.

(β) σταθερή θεσμική στήριξη και χρηματοδότηση.

(γ) αμφίδρομη επικοινωνία με ανατροφοδότηση προς τους πολίτες για το πώς αξιοποιούνται τα δεδομένα τους (San Llorente Capdevila et al., 2020).

Πρόσφατες προτάσεις πολιτικής τονίζουν ότι τα δεδομένα που συλλέγουν οι πολίτες πρέπει να ενσωματώνονται σε εθνικά συστήματα και δείκτες. Αν δεν το κάνουν, η συμμετοχή και η κινητοποίηση των πολιτών χάνει τη δύναμή της (Warner et al., 2024).

Όσον αφορά την αλλαγή καθημερινών πρακτικών που σχετίζονται με την ρύπανση, στοχευμένες εκπαιδευτικές παρεμβάσεις, μπορούν να μειώσουν ροές ρυπαντών όταν συνδυάζουν γνωστικά και συναισθηματικά ερεθίσματα. Σε τυχαίοποιημένο πεδίο, η οπτικοποίηση των επιπτώσεων της πλαστικής ρύπανσης στη θαλάσσια ζωή μετέβαλε μετρήσιμα τη συμπεριφορά απόρριψης, κατανάλωσης (μείωση πλαστικών κατά 17%), υπερέχοντας της απλής ενημερωτικής σήμανσης (Luo et al., 2022).

Αντίστοιχα, σύντομες, θεωρητικά θεμελιωμένες παρεμβάσεις (Theory of Planned Behavior) σε πανεπιστημιακές κοινότητες βελτίωσαν προθέσεις και πρακτικές μείωσης χρήσης πλαστικών μίας χρήσης, αξιοποιώντας δεσμεύσεις και κοινωνικούς κανόνες (Truelove et al., 2023).

Παρά ταύτα, τα ευρήματα από την Ελλάδα δείχνουν ότι οι εκστρατείες πληροφόρησης, αν και μετατοπίζουν προτιμήσεις και προθυμία πληρωμής υπέρ μέτρων προστασίας, δεν αρκούν από μόνες τους για μόνιμη αλλαγή συνηθειών χωρίς συμπληρωματικά οικονομικά/ρυθμιστικά εργαλεία (Latinopoulos et al., 2018).

Συνολικά, η εμπειρία δείχνει ότι οι δράσεις εκπαίδευσης και ευαισθητοποίησης για την πρόληψη ρύπανσης είναι πιο αποτελεσματικές όταν: οι αποδέκτες συμμετέχουν στο σχεδιασμό τους, εντάσσονται σε συμμετοχική παρακολούθηση με διασφάλιση ποιότητας, συνδυάζουν πληροφόρηση με συναισθηματική απεικόνιση και κοινωνικούς κανόνες, και συνδέονται με θεσμικά κανάλια λήψης αποφάσεων, ώστε η κοινωνική κινητοποίηση να μετατρέπεται σε μετρήσιμο περιβαλλοντικό αποτέλεσμα (Ramírez et al., 2023).

Κεφάλαιο 5: Μελέτες Περίπτωσης

5.1 Βιομηχανία: Αντιρρυπαντικές πολιτικές, επεξεργασία αποβλήτων, συμμόρφωση με κανονισμούς

Παρά την πρόληψη, σε πολλές περιπτώσεις η ρύπανση έχει ήδη εκδηλωθεί, και συνεπώς απαιτούνται μέτρα αποκατάστασης και διαχείρισης.

Η κατηγορία αυτή των μέτρων είναι καθοριστική για την αποκατάσταση της ποιότητας των υδάτων και την προστασία των οικοσυστημάτων και της δημόσιας υγείας

Η αποτελεσματική διαχείριση της υδατικής ρύπανσης στη βιομηχανία στηρίζεται σε δύο αλληλένδετους πυλώνες:

1. **Αυστηρό και στοχευμένο ρυθμιστικό πλαίσιο**, που καθοδηγεί τις επενδύσεις σε Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές (BAT).
2. **Τεχνολογίες επεξεργασίας**, ικανές να εξασφαλίσουν αξιόπιστη ποιότητα εκροών.

Εμπειρικά, η κινεζική πρωτοβουλία «Water Ten Plan» μείωσε σημαντικά τη βιομηχανική ρύπανση, δείχνοντας ότι η συνδυασμένη δράση ρυθμιστικής αυστηροποίησης, τεχνολογικής καινοτομίας και αναβάθμισης του βιομηχανικού μίγματος αποδίδει (Zhou et al., 2021).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η εφαρμογή της Οδηγίας Βιομηχανικών Εκπομπών έχει οδηγήσει σε αυστηρότερες οριακές τιμές στις άδειες, ενισχύοντας τη ρυθμιστική πειθαρχία (Calvo et al., 2021).

Παράλληλα, μελέτες σε αναδυόμενες οικονομίες καταγράφουν επίμονες αστοχίες, π.χ. σε έλαια, λίπη, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ισχυρότερους ελέγχους πεδίου και συγκέντρωση βιομηχανικών δραστηριοτήτων σε οργανωμένες ζώνες (Dufatanye et al., 2022).

Στον τεχνολογικό τομέα, οι μεμβρανικοί βιοαντιδραστήρες έχουν εδραιωθεί για διάφορα βιομηχανικά λύματα, προσφέροντας σταθερή απομάκρυνση οργανικού φορτίου και αιωρούμενων, καθώς και υψηλή μικροβιολογική απόδοση. Το κόστος λειτουργίας μετριάζεται μέσω βελτιστοποίησης του αερισμού και ελέγχου ρύπανσης μεμβρανών (Al-Asheh et al., 2021).

Για ρεύματα υψηλής αλατότητας ή χρωστικών, όπως στην κλωστοϋφαντουργία, τα υβριδικά σχήματα σε συνδυασμό με προχωρημένες οξειδώσεις βελτιώνουν αποτελεσματικά τη Χημική Απαίτηση Οξυγόνου και το χρώμα, επιτρέπουν την ανάκτηση νερού (Moreira et al., 2022).

Σύγχρονες ανασκοπήσεις επιβεβαιώνουν ότι ο ορθός συνδυασμός φυσικοχημικών (π.χ. προσρόφηση), βιολογικών και προχωρημένων διεργασιών (οζόνωση, φωτοκατάλυση) είναι απαραίτητος για «δύσκολους» ρύπους και για τη μετατροπή της Μονάδας Επεξεργασίας Υδάτων σε εγκαταστάσεις ανάκτησης πόρων (Kato et al., 2024).

Για δύσκολους μικρορύπους, όπως τα PFAS που είναι πολύ σταθερές ουσίες και δεν διασπώνται εύκολα στο περιβάλλον, μια μελέτη σε 23 εγκαταστάσεις έδειξε ότι η χρήση κοκκώδους ενεργού άνθρακα, δηλαδή η προσθήκη φίλτρων με μικρούς κόκκους άνθρακα που απορροφούν τους ρύπους, είναι αποτελεσματική για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η αποδοτικότητα εξαρτάται από το μήκος της χημικής αλυσίδας και απαιτείται προσοχή ώστε να αποφευχθεί κορεσμός, καθοδηγώντας τότε πρέπει να ανανεώνεται ή να αντικαθίσταται το μέσο (Nakazawa et al., 2023).

Συνολικά, η διεθνής εμπειρία υποδεικνύει ότι τα προγράμματα αντιρρύπανσης πετυχαίνουν όταν:

- Το κανονιστικό πλαίσιο είναι σαφές, με στόχους ποιότητας, δεσμεύσεις BAT, κατάλληλες οριακές τιμές και κυρώσεις.
- Οι βιομηχανίες επενδύουν σε υβριδικές και ανθεκτικές τεχνολογικές λύσεις που καθαρίζουν αποτελεσματικά τα απόβλητα, όπως βιολογικούς αντιδραστήρες με μεμβράνες, φίλτρα με μεμβράνες σε συνδυασμό με

προχωρημένες οξειδώσεις, και όπου χρειάζεται, συστήματα που επιτρέπουν την πλήρη ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση του νερού.

- Το σύστημα συμμόρφωσης βασίζεται έτσι ώστε να ελέγχεται συνεχώς αν οι βιομηχανίες τηρούν τους κανονισμούς, με διαφάνεια στα δεδομένα τους και τακτικούς ελέγχους επί τόπου για να επιβεβαιώνεται η ορθή εφαρμογή των κανόνων (Calvo et al., 2021).

5.2 Διεθνή παραδείγματα: Επιτυχημένα προγράμματα καθαρισμού και πρόληψης ρύπανσης

Σε διεθνές επίπεδο, αρκετά προγράμματα αποκατάστασης και πρόληψης ρύπανσης αποδεικνύουν ότι ο συνδυασμός ρυθμιστικών εργαλείων, τεχνολογικών επενδύσεων και διακυβέρνησης σε κλίμακα λεκάνης απορροής μπορεί να επιφέρει μετρήσιμες βελτιώσεις στην ποιότητα των υδάτων.

Ενδεικτικά, **ο Τάμεσης στο Ηνωμένο Βασίλειο** έχει ανακάμψει θεαματικά μετά από δεκαετίες επενδύσεων σε επεξεργασία λυμάτων και ελέγχους βιομηχανικών απορρίψεων (Sharma, 2021).

Η αποκατάσταση του Ρήνου (Rhine Action Programme) θεωρείται διεθνές ορόσημο στην διαχείριση των υδάτων. Το πρόγραμμα, που ξεκίνησε το 1987 μετά το βιομηχανικό ατύχημα στο Sandoz, συνδύασε πολυεπίπεδες παρεμβάσεις: σαφείς στόχους ποιότητας, κοινά συστήματα παρακολούθησης και έγκαιρης προειδοποίησης, αυστηρό περιορισμό τοξικών εκροών και δράσεις επανασύνδεσης οικοτόπων, ώστε τα ζώα και τα φυτά να μπορούν να μετακινούνται και να αναπαράγονται κανονικά. Η επιτυχία του βασίστηκε στη συντονισμένη διακυβέρνηση και στη συνεργασία μεταξύ κρατών, με αποτέλεσμα να βελτιωθεί εντυπωσιακά η ποιότητα των υδάτων και να επιστρέψουν είδη που δείχνουν την υγεία του οικοσυστήματος, όπως ο σολομός που είναι ένα ψάρι που θεωρείται «ευαίσθητο» και ζει μόνο σε καθαρά ποτάμια (Fenten & Dieperink, 2024).

Στη Βόρεια Αμερική, η στοχευμένη μείωση φωσφόρου στη λίμνη Erie από τη δεκαετία του 1970, μέσω αναβαθμίσεων των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (Α/Β/Τα), της απαγόρευσης φωσφορικών στα απορρυπαντικά και της υιοθέτησης σαφών διακρατικών στόχων μείωσης φορτίου, που οδήγησε σε σημαντικό περιορισμό του ευτροφισμού κατά τις δεκαετίες του 1980 και 1990, οδηγώντας σε αισθητή βελτίωση της διαύγειας, της οξυγόνωσης και την συνολική οικολογική κατάσταση της λίμνης (Schindler, 2016).

Η εμπειρία της Σιγκαπούρης με τον καθαρισμό των ποταμών Singapore και Kallang δείχνει ότι μέχρι τη δεκαετία του 1970 ήταν έντονα ρυπασμένοι, κυρίως λόγω ανεπεξέργαστων λυμάτων, βιομηχανικών αποβλήτων και ανεξέλεγκτη δόμηση. Με ένα δεκαετές πρόγραμμα που συνδύασε μετεγκαταστάσεις, σύγχρονα δίκτυα αποχέτευσης, αυστηρούς κανονισμούς και κοινωνική συμμετοχή, το αποτέλεσμα στην Σιγκαπούρη ήταν θεαματικό: καθαρά νερά, αποκατάσταση της βιοποικιλότητας, αναβάθμιση του δημόσιου χώρου και αξιοποίηση των ποταμών ως κέντρα αναψυχής και τουρισμού. Το παράδειγμα αυτό αναδεικνύει πώς η πολιτική βούληση και η συνεκτική διακυβέρνηση μπορούν να μεταμορφώσουν πλήρως ένα υποβαθμισμένο οικοσύστημα σε πηγή περιβαλλοντικής και κοινωνικής αναγέννησης (Joshi, 2012).

Η μελέτη του Mike Young, που δημοσιεύθηκε το 1998, εξετάζει τη διαχείριση της λεκάνης απορροής Murray-Darling στην Αυστραλία, η οποία αποτελεί κρίσιμο υδατικό και αγροτικό πόρο της χώρας και αναδεικνύει τις σοβαρές προκλήσεις της υπεράντλησης, της ρύπανσης και της άνισης κατανομής νερού, υπογραμμίζοντας παράλληλα τη σημασία της ολοκληρωμένης διαχείρισης υδάτων που συνδυάζει εθνικές πολιτικές, συνεργασία μεταξύ πολιτειών και βιώσιμες πρακτικές χρήσης των πόρων για τη διασφάλιση της οικολογικής ισορροπίας και της βιωσιμότητας της γεωργίας (Hart, 2020).

Η οργάνωση Wildcoast εγκατέστησε το σύστημα "Brute Broom" κατά μήκος του φαραγγιού Laureles για να συλλέξει πλαστικά απορρίμματα από τον ποταμό Tijuana, που διασχίζει τα σύνορα Μεξικού και Ηνωμένων Πολιτειών και θεωρείται ένας από τους πιο μολυσμένους ποταμούς του κόσμου, αποτελώντας παράλληλα αντικείμενο διασυνοριακής περιβαλλοντικής συνεργασίας για την κατασκευή υποδομών, επεξεργασίας λυμάτων και την εφαρμογή κοινών πολιτικών με στόχο τη μείωση της ρύπανσης και την αποκατάσταση της οικολογικής του κατάστασης (WILDCOAST, 2021).

Συνολικά, τα επιτυχημένα παραδείγματα συγκλίνουν σε τρεις αρχές βιώσιμης διαχείρισης:

- (α) πρόληψη στην πηγή με ρυθμιστικά/οικονομικά εργαλεία,
- (β) επενδύσεις σε υποδομές και επαναχρησιμοποίηση,
- (γ) διακυβέρνηση σε κλίμακα λεκάνης με διαφάνεια, κοινούς δείκτες και λογοδοσία (Scavia et al., 2014).

5.3 Εφαρμογές στην Ελλάδα / Μεσογειακή περιοχή: Τοπικά έργα και πολιτικές

- Στον Εσωτερικό Σαρωνικό διερευνήθηκαν πώς επηρεάζεται το ζωοπλαγκτόν από περιβαλλοντικούς παράγοντες, χρησιμοποιώντας δύο νέους βιοχημικούς δείκτες που δείχνουν την αναπνοή και την ανάπτυξή του. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεγαλύτερη διαφορά οφείλεται στην εποχή με εντονότερο μεταβολισμό το καλοκαίρι και όχι στην απόσταση από την εκβολή της Ψυττάλειας. Η θερμοκρασία και η διαθέσιμη τροφή (φυτοπλαγκτόν) βρέθηκαν να παίζουν τον πιο σημαντικό ρόλο, καλύπτοντας επαρκώς τις ανάγκες του ζωοπλαγκτού σε άνθρακα. Συνολικά, η μελέτη προσφέρει χρήσιμα εργαλεία για την οικολογική παρακολούθηση, συνδυάζοντας βιοχημικούς δείκτες με κλασικές μετρήσεις (βιομάζα, θερμοκρασία, πρωτογενής παραγωγή), τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλα παράκτια μεσογειακά συστήματα (Drakopoulou et al., 2024).

- Μια εκστρατεία ενημέρωσης στη Σύρο αξιολόγησε την επίδραση της παροχής περιβαλλοντικής πληροφόρησης στη μείωση των πλαστικών απορριμμάτων, ιδίως των πλαστικών σακουλιών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ενημέρωση ενίσχυσε τις προτιμήσεις των πολιτών υπέρ αυστηρότερων μέτρων προστασίας και αύξησε την προθυμία πληρωμής, δηλαδή το ποσό που οι πολίτες είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν για πολιτικές μείωσης πλαστικών, σύμφωνα με την περιβαλλοντική οικονομία, χωρίς όμως να επηρεάσει σημαντικά τη συμπεριφορική τους δέσμευση για περιορισμό της χρήσης σακούλας, επιβεβαιώνοντας το γνωστό «κενό υλοποίησης» μεταξύ στάσεων και πράξεων. Συμπερασματικά, οι πληροφοριακές παρεμβάσεις είναι χρήσιμα εργαλεία διαμόρφωσης κοινωνικών προτιμήσεων, αλλά η πραγματική αλλαγή απαιτεί συνδυασμό με οικονομικά κίνητρα, ρυθμιστικά μέτρα και υποδομή (Latinopoulos, Mentis & Bithas, 2018)
- Η Λίμνη Καστοριάς, ένα ιδιαίτερα ευαίσθητο οικοσύστημα της Δυτικής Μακεδονίας, αποτέλεσε αντικείμενο σημαντικής έρευνας με στόχο την αξιολόγηση και τη διαχείριση των πηγών ρύπανσης. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, έχει αναπτυχθεί ολοκληρωμένο πλαίσιο παρακολούθησης, το οποίο συνδυάζει συστηματική μέτρηση κρίσιμων φυσικοχημικών παραμέτρων και χωρική ανάλυση με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS).
Στόχος του είναι να καταγράψει με ακρίβεια τις αλλαγές στο περιβάλλον της λίμνης, να αναδείξει τις περιοχές που επιβαρύνονται περισσότερο και να υποστηρίξει τη λήψη αποτελεσματικών μέτρων για την πρόληψη και τη διαχείριση της ρύπανσης (Mantzafleri, Psilovikos & Blanta, 2009).

Στο πλαίσιο του μηνιαίου προγράμματος που υλοποιήθηκε από τον Δήμο Καστοριάς την περίοδο 2002–2007, πραγματοποιήθηκε συστηματική καταγραφή βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων.

Οι μετρήσεις περιλάμβαναν:

- **Θερμοκρασία νερού (Tw):** επηρεάζει τη διαλυτότητα του οξυγόνου και τον ρυθμό βιολογικών διεργασιών.
- **Διαλυμένο οξυγόνο (DO):** δείκτης υγείας του οικοσυστήματος, απαραίτητο για τους υδρόβιους οργανισμούς.
- **BOD και COD:** δείκτες οργανικής ρύπανσης, που φανερώνουν πιθανή παρουσία αποβλήτων.
- **pH:** δείχνει την οξύτητα/αλκαλικότητα του νερού, επηρεάζοντας τη διαθεσιμότητα θρεπτικών.
- **Ηλεκτρική αγωγιμότητα (ECw):** συνδέεται με τα διαλυμένα άλατα και ιόντα.
- **Δυναμικό οξειδοαναγωγής (RP):** δείχνει αν το περιβάλλον είναι πιο οξειδωτικό ή αναγωγικό.
- **Θρεπτικά στοιχεία ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P/DIP}$):** καθορίζουν την ανάπτυξη φυτοπλαγκτού, ενώ η υπερβολική παρουσία τους οδηγεί σε ευτροφισμό (Mantzafleri, Psilovikos & Blanta, 2009).

Αν και συλλέχθηκαν πολλές παράμετροι, η ανάλυση επικεντρώθηκε κυρίως σε πέντε βασικούς δείκτες: θερμοκρασία νερού, διαλυμένο οξυγόνο, αμμωνιακά, νιτρικά και φωσφορικά, οι οποίοι θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικοί για την κατανόηση της οικολογικής κατάστασης. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πέντε στρατηγικά επιλεγμένους σταθμούς: Σιούτισσα, Ξηροπόταμος, Μαυριώτισσα, Βόρεια Παραλία και Σταυρός Νότια Παραλία, ώστε να αποτυπωθεί η χωρική διαφοροποίηση της ρύπανσης, καθώς κάθε σταθμός αντιπροσωπεύει διαφορετικές συνθήκες και πιέσεις που δέχεται η λίμνη.

Για παράδειγμα, η δυο πρώτες περιοχές αντιπροσωπεύουν με εισροές από παρακείμενα ρέματα, η Μαυριώτισσα καλύπτει περιοχές με φυσική βλάστηση, ενώ οι

Βόρεια και Νότια Παραλία καταγράφουν την επίδραση των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και των αστικών απορροών. Με αυτόν τον τρόπο, η παρακολούθηση παρέχει μια πλήρη και αντιπροσωπευτική εικόνα της ποιότητας του νερού σε ολόκληρη τη λίμνη, επιτρέποντας την αναγνώριση περιοχών υψηλής επιβάρυνσης και τη στοχευμένη λήψη μέτρων διαχείρισης (Mantzafleri, Psilovikos & Blanta, 2009).

Για να αποδοθεί καλύτερα η χωρική κατανομή των ρύπων, εφαρμόστηκαν γεωστατιστικοί αλγόριθμοι παρεμβολής. Συγκεκριμένα συγκρίθηκαν ο (Inverse Distance Weighting), που δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στις κοντινές μετρήσεις, και ο (Radial Basis Function), που επιδιώκει να δημιουργήσει πιο λείες επιφάνειες με βάση όλο το σύνολο δεδομένων.

Η σύγκριση έδειξε ότι ο IDW απέδωσε καλύτερα, καθώς αποτύπωσε με μεγαλύτερη ακρίβεια τα «τοπικά hotspots» ρύπανσης, ενώ ο RBF εξομάλυνε υπερβολικά τις διαφορές και «έκρυβε» τις έντονες χωρικές μεταβολές (Mantzafleri, Psilovikos & Blanta, 2009).

Η χωρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για δύο εποχές (χειμώνας και καλοκαίρι) και για δύο έτη (2005 και 2006), ώστε να φανεί η εποχικότητα των ρύπων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Τον χειμώνα, η λίμνη είχε χαμηλότερες θερμοκρασίες, υψηλότερες συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου και χαμηλότερα επίπεδα θρεπτικών, λόγω μειωμένης βιολογικής δραστηριότητας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η επιφάνεια πάγωνε, περιορίζοντας την ανταλλαγή αερίων.
- Το καλοκαίρι, αυξήθηκαν σημαντικά τα θρεπτικά (κυρίως φωσφορικά και αμμωνιακά), μειώθηκε το διαλυμένο οξυγόνο και παρατηρήθηκαν έντονα φαινόμενα ευτροφισμού και ανάπτυξης φυτοπλαγκτόν (Mantzafleri, Psilovikos & Blanta, 2009).

Η ανάλυση αυτή ανέδειξε τη σημασία των θεματικών χαρτών, καθώς επιτρέπουν στοχευμένη ερμηνεία των τάσεων και βοηθούν στην ιεράρχηση των παρεμβάσεων. Ωστόσο, έγινε σαφές ότι η μηνιαία δειγματοληψία έχει περιορισμούς: αν και παρέχει μια γενική εικόνα, δεν μπορεί να εντοπίσει βραχυχρόνια επεισόδια ή αιχμές ρύπανσης, όπως αυτές που εμφανίζονται μετά από έντονες βροχοπτώσεις ή αιφνίδιες απορρίψεις.

Για τον λόγο αυτό, προτείνεται η μετάβαση σε τηλεμετρική παρακολούθηση σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, ώστε να υπάρχει έγκαιρη προειδοποίηση και πιο αποτελεσματική προληπτική διαχείριση.

Συνολικά, η μελέτη αναδεικνύει τη σημασία της ολοκληρωμένης παρακολούθησης, της χωρικής ανάλυσης και της εφαρμογής κατάλληλων πολιτικών διαχείρισης. Ένα τέτοιο πλαίσιο μπορεί να αποτελέσει πρότυπο για άλλες λίμνες που αντιμετωπίζουν προβλήματα ευτροφισμού και κυανοβακτηριακών ανθήσεων, ενισχύοντας τη λήψη αποφάσεων με βάση στοχευμένες παρεμβάσεις και συνεχή εγρήγορση.

Ο τελικός στόχος είναι η αναβάθμιση της οικολογικής κατάστασης της Λίμνης Καστοριάς και η ενίσχυση της ανθεκτικότητας του οικοσυστήματός (Mantzafleri, Psilovikos & Blanta, 2009).

- Ο Θερμαϊκός Κόλπος αποτελεί έναν ημίκλειστο, μικροπαλιρροϊκό κόλπο που επηρεάζεται έντονα από ποτάμια και έχει κρίσιμη κοινωνικοοικονομική σημασία για περίπου 1,5 εκατομμύριο κατοίκους. Η έντονη αλληλεπίδραση φυσικών διεργασιών και ανθρώπινων δραστηριοτήτων καθιστά απαραίτητη την παρακολούθηση των δυναμικών του κόλπου και τη συστηματική καταγραφή των περιβαλλοντικών του δεικτών.

Η ανασκόπηση καλύπτει πενήντα χρόνια ωκεανογραφικής έρευνας και συνοψίζει τα βασικά ευρήματα σε τομείς όπως η υδροδυναμική, η μεταφορά ιζηματος, η βιογεωχημεία και ο ευτροφισμός, η ρύπανση, η βιοποικιλότητα και η αλιεία. Ο κόλπος περιγράφεται μορφολογικά σε Εσωτερικό, Κεντρικό και Εξωτερικό Θερμαϊκό, με επιμέρους λεκάνες στον Εσωτερικό ΘΚ (Θεσσαλονίκης

και Κεντρικού Κόλπου). Η διαίρεση αυτή σχετίζεται με διαφοροποιημένη κυκλοφορία, τροφοδοσία θρεπτικών στοιχείων και χωρικές διαφορές στην ποιότητα των υδάτων.

Ιστορικά, η περιβαλλοντική ποιότητα του Θερμαϊκού Κόλπου υποβαθμίστηκε σημαντικά τη δεκαετία 1970-1980, λόγω της έλλειψης επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Από τη δεκαετία του 1990 παρατηρείται σταδιακή ανάκαμψη, σε συνάρτηση με την αναβάθμιση των υποδομών και τη συμμόρφωση με το ευρωπαϊκό νομικό πλαίσιο για τα ύδατα, χωρίς όμως να έχει επιτευχθεί ακόμη η «καλή περιβαλλοντική κατάσταση» σύμφωνα με τα εθνικά και ευρωπαϊκά πρότυπα (Androulidakis et al., 2024).

Η επισκόπηση επισημαίνει επίσης ότι μετά το 2010 υπήρξε σημαντική κάμψη της ερευνητικής παραγωγής, σε αντίθεση με την «χρυσή περίοδο» από τα μέσα του 1990 έως τα τέλη του 2000, γεγονός που επηρέασε τη συστηματικότητα της παρακολούθησης. Με βάση τα ευρήματα, προτείνονται συγκεκριμένες δράσεις για την ενίσχυση της γνώσης και της διαχείρισης του κόλπου:

1. Αύξηση μόνιμων σταθμών παρακολούθησης με επαρκή κάλυψη στον χώρο και στον χρόνο.
2. Συμπερίληψη όλων των κρίσιμων φυσικών, βιογεωχημικών και οικολογικών παραμέτρων.
3. Συστηματική παρακολούθηση της ποσότητας και της ποιότητας όλων των γλυκών εκροών χερσαίας προέλευσης.
4. Στοχευμένη μελέτη σε τομείς που έως τώρα έχουν μείνει υποφωτισμένοι, όπως η παράκτια διάβρωση και η θαλάσσια ρύπανση από πλαστικά.
5. Ανάπτυξη αξιόπιστων εργαλείων πρόγνωσης, όπως αριθμητικά μοντέλα, για την υποστήριξη πρώτης απόκρισης και διαχείρισης κρίσεων.
6. Σύσταση εποπτεύουσας δημόσιας αρχής με ολιστική αρμοδιότητα για τον Θερμαϊκό Κόλπο (Androulidakis et al., 2024).

Η εφαρμογή αυτών των συστάσεων μπορεί να καλύψει τα υπάρχοντα κενά γνώσης και να ενισχύσει τη λειτουργική ανθεκτικότητα του οικοσυστήματος, διασφαλίζοντας τη βιώσιμη διαχείριση του κόλπου στο μέλλον (Androulidakis et al., 2024).

- Η ανασκόπηση εξετάζει συστηματικά τη χρήση τεχνητών υγροτόπων (Constructed Wetlands) για την επεξεργασία λυμάτων και τη διαχείριση ενεργού ιλύος στη Βόρεια Ελλάδα. Ειδικότερα, η μελέτη βασίζεται σε συστήματα που έχουν μελετηθεί από το Εργαστήριο Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης και άλλους φορείς, συγκρίνοντας διαφορετικούς τύπους CWS και φωτίζοντας τον ρόλο των σχεδιαστικών και λειτουργικών παραμέτρων στην απόδοσή τους. Τα τεχνητά υγροτόπια αποτελούν διεθνώς ώριμη τεχνολογία για την επεξεργασία αστικών, βιομηχανικών και αγροτικών λυμάτων, αλλά στην Ελλάδα η διάδοση παραμένει περιορισμένη, παρά το ευνοϊκό μεσογειακό κλίμα. Η ανασκόπηση καταγράφει τόσο πιλοτικές εγκαταστάσεις όσο και εφαρμογές πλήρους κλίμακας που εξυπηρετούν οικισμούς ή μεμονωμένα νοικοκυριά, επιτρέποντας συγκρίσεις υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (Tsihrintzis & Gikas, 2010).

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα συστήματα που λειτουργούν στη Βόρεια Ελλάδα παρουσιάζουν καλή και συνεχόμενη απόδοση, με αξιόπιστη απομάκρυνση οργανικού φορτίου και αιωρούμενων στερεών, ενώ η επεξεργασία θρεπτικών στοιχείων (άζωτο και φώσφορος) εξαρτάται από τη διαμόρφωση των συστημάτων, κυρίως από τον αερισμό/οξυγόνωση, και από εποχικές παραμέτρους όπως θερμοκρασία και βροχοπτώσεις (Tsihrintzis & Gikas, 2010).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις σχεδιαστικές λεπτομέρειες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων: στην επιλογή του κατάλληλου υποστρώματος και του βάθους του υγροτόπου, στον συνδυασμό κάθετης και οριζόντιας ροής ώστε να ενισχυθούν οι βιολογικές διεργασίες μετατροπής του αζώτου (νιτρίδοποίηση και απονιτρίδοποίηση), δηλαδή η επαρκής προεπεξεργασία για την αποφυγή κορεσμού ή φραγών στην επιφάνεια και η προσαρμογή της παροχής και της ποιότητας των λυμάτων στις πραγματικές συνθήκες εισροής (Tsihrintzis & Gikas, 2010).

Στο επίπεδο πολιτικής και διακυβέρνησης, η περιορισμένη διάδοση των CWS στην Ελλάδα αποδίδεται σε θεσμικούς, γνωσιακούς και χωροταξικούς παράγοντες, όπως η έλλειψη εξοικείωσης, η προτίμηση σε ενεργοβόρες λύσεις και η δυσκολία χωροθέτησης. Παρά ταύτα, τα CWS προσφέρουν χαμηλό κόστος και χαμηλή συντήρηση, αποτελώντας ιδανική λύση για μικρές ή διάσπαρτες κοινότητες, με δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης του νερού για άρδευση σε μεσογειακά πλαίσια. Ως πρακτικές συστάσεις προτείνονται: η ενίσχυση της παρακολούθησης της απόδοσης με τυποποιημένα πρωτόκολλα, η διάχυση τεχνικής γνώσης σε δήμους και μελετητές, και η ενσωμάτωση των CWS σε υβριδικά σχήματα με συμβατικές διεργασίες, ώστε να διασφαλίζεται σταθερή ποιότητα εκροής και ανθεκτικότητα έναντι εποχικών μεταβολών (Tsihrintzis & Gikas, 2010).

- Η Λίμνη Παμβώτιδα στα (Ιωάννινα) αποτέλεσε αντικείμενο διαχρονικής μελέτης για την ευτροφική της εξέλιξη, με έμφαση στην αντίδραση του συστήματος μετά τη μείωση των εξωτερικών φορτίων θρεπτικών, που επιτεύχθηκε μέσω της εκτροπής αστικών λυμάτων στο πλαίσιο του σχεδίου αποκατάστασης (1995-1996).

Η παρακολούθηση πραγματοποιήθηκε σε τρεις χρονικές περιόδους (1985-1989, 1998-1999, 2004-2005) και σε βασικές φυσικοχημικές και

βιολογικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, το pH, το διαλυμένο οξυγόνο, τα ανόργανα θρεπτικά στοιχεία και η χλωροφύλλη-*a*. Αυτό επέτρεψε την αποτίμηση τόσο των βραχυπρόθεσμων όσο και των μεσοπρόθεσμων αλλαγών σε σχέση με την ανθρωπογενή πίεση και τα μέτρα διαχείρισης.

Ιστορικά, η λίμνη πέρασε από καθεστώς χαμηλής πίεσης σε ευτροφικό ή υπερευτροφικό, εξαιτίας του συνδυασμού παραγόντων όπως η άρδευση και τα οικιακά λύματα, γεγονός που αποτυπώνεται σε υψηλές συγκεντρώσεις θρεπτικών και συνακόλουθες βιολογικές αποκρίσεις (Kagalou, Papastergiadou & Leonardos, 2008).

Κομβικό εύρημα της μελέτης είναι η σημαντική βελτίωση της ποιότητας του νερού μετά τη μείωση των εξωτερικών θρεπτικών:

- **Ορθοφωσφορικό (PO_4^{3-}):** Η συγκέντρωση μειώθηκε περίπου κατά 87%, δείχνοντας ότι ο φωσφόρος που τροφοδοτούσε την υπερβολική ανάπτυξη φυτοπλαγκτού περιορίστηκε. Αυτό σημαίνει λιγότερη ανάπτυξη φυτών και μικρότερη πιθανότητα άνθισης.
- **Νιτρικά (NO_3^-):** Μειώθηκαν σε τιμές κάτω από 1,20 mg/L, πράγμα που δείχνει ότι η παροχή αζώτου μειώθηκε και η λίμνη έγινε λιγότερο επιβαρυμένη από θρεπτικά.
- **Ανόργανα μορφώματα αζώτου:** Περιλαμβάνουν νιτρικά, νιτρώδη και αμμωνιακά. Η μείωσή τους ήταν μικρότερη (0,39–1,24 mg N/L, μέση τιμή 0,76 mg N/L), που σημαίνει ότι υπάρχει ακόμα λίγο άζωτο, αρκετό για μέτρια ανάπτυξη φυτοπλαγκτού, αλλά όχι σε επίπεδα που προκαλούν υπερβολικό ευτροφισμό.
- **Χλωροφύλλη-*a*:** Ο δείκτης αυτός της βιομάζας φυτοπλαγκτού μειώθηκε, δείχνοντας ότι η λίμνη παρουσίασε μερική μείωση της ευτροφικής πίεσης και βελτίωση της κατάστασής της.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι παρεμβάσεις «στην πηγή», όπως η εκτροπή και επεξεργασία λυμάτων, μπορούν να αποδώσουν μετρήσιμες βελτιώσεις στην υδατική στήλη σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Παράλληλα, η μελέτη επισημαίνει την ανάγκη για πιο σύνθετες στρατηγικές διαχείρισης, όπως ο περιορισμός του εσωτερικού φορτίου (π.χ. αδρανοποίηση ιζημάτων ή ελεγχόμενη αφαίρεση), η εφαρμογή βιοχειρισμού (ρύθμιση της ιχθυοκοινότητας για ενίσχυση του «top-down» ελέγχου) και η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών στη λεκάνη απορροής όπως γεωργικές μέθοδοι χαμηλού εισροών (Kagalou, Papastergiadou & Leonardos, 2008).

Όσον αφορά, η μελέτη αναδεικνύει την αξία των μακροχρόνιων χρονοσειρών και της πολυπαραμετρικής παρακολούθησης για την αξιολόγηση της πραγματικής «απόκρισης» των οικοσυστημάτων στα μέτρα πολιτικής, παρέχοντας ένα τεκμηριωμένο υπόδειγμα για την εφαρμογή της Οδηγίας-Πλαίσιο για τα Ύδατα και συναφών κανονισμών (Kagalou, Papastergiadou & Leonardos, 2008).

5.4 Συγκριτική αξιολόγηση: Τι λειτούργησε, τι όχι, διδάγματα και προτάσεις

Διεθνώς, οι επιτυχημένες αποκαταστάσεις υδάτινων συστημάτων βασίζονται σε τρία αλληλένδετα σκέλη:

1. **Έλεγχος των φορτίων στην πηγή:** περιορισμός της ρύπανσης πριν φτάσει στη λίμνη ή τον ποταμό.
2. **Συνεχής επένδυση σε υποδομές επεξεργασίας νερού και λυμάτων:** όπως μονάδες επεξεργασίας αστικών λυμάτων (δηλαδή εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων), διαχείριση όμβριων υδάτων, έλεγχος υπερχειλίσσεων δικτύων αποχέτευσης και εφαρμογή επαναχρησιμοποίησης νερού.
3. **Διακυβέρνηση σε λεκάνη απορροής:** κοινά πρότυπα, διαφανής παρακολούθηση και λογοδοσία για όλους τους χρήστες νερού.

Παραδείγματα όπως ο Τάμεσης, ο Ρήνος, η Λίμνη Erie, η Σιγκαπούρη και τον ποταμό Tijuana, δείχνουν ότι η συνδυαστική εφαρμογή αυτών των μέτρων οδηγεί σε μετρήσιμα αποτελέσματα: επιστροφή ειδών-δεικτών, μείωση θρεπτικών και αύξηση της διαύγειας. Στη Σιγκαπούρη, το μοντέλο “One Water” δείχνει ότι ένας ενιαίος δημόσιος φορέας που συνδυάζει τεχνικά έργα και κοινωνικές παρεμβάσεις μεγιστοποιεί τα θετικά αποτελέσματα.

Στην Ελλάδα, τα τεχνικά μέτρα στο «τελικό σημείο» έχουν αποδώσει αποτελεσματικά: η αναβάθμιση και η λειτουργία των ΕΕΛ (εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων), μαζί με μακροχρόνια παρακολούθηση στον Σαρωνικό, συνέβαλαν στη σταθεροποίηση των τροφικών ροών και σε εποχικές βελτιώσεις. Ο Θερμαϊκός Κόλπος εμφανίζει επίσης πρόοδο. Επιπλέον, οι τοπικές παρεμβάσεις στη συμπεριφορά του κοινού μπορούν να αλλάξουν προτιμήσεις υπέρ της προστασίας, επιβεβαιώνοντας τη σημασία της ενημέρωσης. Οι τεχνητοί υγρότοποι αποδίδουν αξιόπιστα σε αποκεντρωμένα δίκτυα, ενώ σε λίμνες όπως η Παμβώτιδα η εκτροπή λυμάτων οδήγησε σε σημαντική μείωση των εξωτερικών φορτίων.

Ωστόσο, ορισμένα σημεία χρειάζονται ενίσχυση:

1. **Η εστίαση μόνο στα σημειακά φορτία**, χωρίς παράλληλα μέτρα για τη διάχυτη ρύπανση (π.χ. θρεπτικά από γεωργικές εκτάσεις), μπορεί να μην αρκεί για τη διαρκή βελτίωση της ποιότητας των υδάτων. Αυτό φαίνεται από την «επαναευτροφικοποίηση» της Λίμνης Erie, όπου μετά από αρχική μείωση των θρεπτικών μέσω ελέγχου σημειακών πηγών, τα επίπεδα θρεπτικών αυξήθηκαν ξανά λόγω διάχυτης ρύπανσης, προκαλώντας νέα άνθιση φυτοπλαγκτού και υποβάθμιση της οικολογικής κατάστασης.
2. **Ασυνέχεια χρηματοδότησης και παρακολούθησης**: η έλλειψη συνεχούς υποστήριξης υπονομεύει τη μακροχρόνια συμμόρφωση.
3. **Συμπεριφορικό χάσμα**: η ενημέρωση από μόνη της δεν αλλάζει πάντα τις συνήθειες (π.χ. πλαστικές σακούλες), απαιτούνται οικονομικά κίνητρα και κατάλληλες υποδομές.

4. **Ρηχές λίμνες:** το εσωτερικό φορτίο φωσφόρου τα (θρεπτικά που απελευθερώνονται από τον πυθμένα) και η έλλειψη «top-down» βιοελέγχου που είναι (φυσικός έλεγχος της βιομάζας μέσω τροφικών αλυσίδων, π.χ. ψάρια που τρώνε ζωοπλαγκτόν) καθυστερούν την ανάκαμψη της οικολογικής κατάστασης, ακόμα και όταν τα εξωτερικά φορτία έχουν μειωθεί.

Η βελτίωση της ποιότητας των υδάτων στην Ελλάδα απαιτεί συνδυασμένη στρατηγική σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Αυτό περιλαμβάνει:

1. Θέσπιση σαφών στόχων για τα φορτία αζώτου και φωσφόρου, με κοινά πρωτόκολλα παρακολούθησης και διαφανή εργαλεία, όπως στο μοντέλο του Ρήνου.
2. Μείωση της διάχυτης ρύπανσης μέσω αγρό-περιβαλλοντικών προγραμμάτων και στοχευμένων δράσεων για μείωση θρεπτικών ουσιών, σε συνδυασμό με αναβάθμιση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και έλεγχο υπερχειλίσεων των δικτύων αποχέτευσης.
3. Συνεχή παρακολούθηση λιμνών και παράκτιων περιοχών με τηλεμετρία, ενσωματωμένη σε προγνωστικά μοντέλα, για άμεση και στοχευμένη διαχείριση.
4. Στρατηγικές αλλαγής συμπεριφοράς, όπως οικονομικά κίνητρα και υποδομές επαναχρησιμοποίησης, ώστε οι στάσεις των πολιτών να οδηγούν σε πραγματικές ενέργειες.
5. Αποκεντρωμένες λύσεις για μικρούς δήμους, όπως τεχνητοί υγρότοποι και επαναχρησιμοποίηση νερού, ιδιαίτερα σε μεσογειακές περιοχές με ξηρασία, για βιώσιμη διαχείριση των υδάτων.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα – Προτάσεις

Συμπεράσματα

Η μελέτη αυτή αποτελεί μια βιβλιογραφική προσέγγιση που εξετάζει συνολικά το ζήτημα της ρύπανσης των υδάτων και των τρόπων αντιμετώπισής της στο πλαίσιο της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων. Βασικός στόχος ήταν η συστηματική καταγραφή και ανάλυση των κυριότερων πηγών ρύπανσης, των τεχνολογιών και τεχνικών αποκατάστασης, καθώς και των πολιτικών και θεσμικών εργαλείων που εφαρμόζονται σε εθνικό και διεθνές επίπεδο.

Η μεθοδολογία βασίστηκε σε συστηματική ανασκόπηση πρόσφατων ερευνητικών δεδομένων, με αξιοποίηση επιστημονικών άρθρων, εκθέσεων διεθνών οργανισμών, ευρωπαϊκών οδηγιών και εγχώριων πηγών. Μέσα από αυτή τη διαδικασία έγινε εφικτή η σύγκριση διαφορετικών πρακτικών, η αποτίμηση της αποτελεσματικότητάς τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την οργάνωση μιας συνολικής στρατηγικής διαχείρισης. Ειδική αναφορά έγινε στους αναδυόμενους ρύπους (όπως τα μικροπλαστικά και οι φαρμακευτικές ουσίες), οι οποίοι συνιστούν μια νέα πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα και τους διαχειριστικούς φορείς.

Από την ανάλυση του υλικού της εργασίας αναδείχθηκε ότι η ρύπανση των υδάτων συνιστά ένα πολυδιάστατο και σύνθετο πρόβλημα. Η επιβάρυνση των υδατικών σωμάτων δεν προέρχεται από μία μόνο πηγή, αλλά αποτελεί το αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης πολλών παραγόντων, όπως τα αστικά και βιομηχανικά λύματα, οι γεωργικές απορροές, η ανεξέλεγκτη απόρριψη αποβλήτων και η κλιματική αλλαγή. Η πολύπλευρη αυτή φύση της ρύπανσης καθιστά δύσκολη την πλήρη αντιμετώπισή της, επιβάλλοντας την ανάγκη συνδυασμένων παρεμβάσεων.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν οι λεγόμενοι αναδυόμενοι ρύποι, όπως τα μικροπλαστικά, τα φαρμακευτικά κατάλοιπα και τα φυτοφάρμακα, οι οποίοι αποτελούν νέα και αυξανόμενη απειλή τόσο για τα υδάτινα οικοσυστήματα όσο και

για την ανθρώπινη υγεία. Η διαχείρισή τους είναι περισσότερο σύνθετη σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς ρύπους, καθώς απαιτεί εξειδικευμένες τεχνολογίες, όπως τα μεμβρανικά συστήματα και οι προηγμένες οξειδωτικές διεργασίες, που παρέχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα αλλά συνοδεύονται και από υψηλότερο κόστος.

Ταυτόχρονα, διαπιστώνεται ότι οι τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων εξελίσσονται με ταχείς ρυθμούς. Πέρα από τις κλασικές μεθόδους βιολογικού καθαρισμού, εφαρμόζονται πλέον καινοτόμες λύσεις, όπως οι μεμβρανικοί βιοαντιδραστήρες, οι κατασκευασμένοι υγρότοποι και οι τεχνικές Βιοαποκατάστασης. Οι μέθοδοι αυτές συμβάλλουν όχι μόνο στην πιο αποτελεσματική απομάκρυνση οργανικών και ανόργανων ρύπων, αλλά και στη δημιουργία προοπτικών για την ασφαλή επαναχρησιμοποίηση του νερού σε διαφορετικές χρήσεις.

Παράλληλα, η γεωργία εξακολουθεί να αποτελεί καθοριστικό παράγοντα ρύπανσης, κυρίως λόγω της αλόγιστης χρήσης αζωτούχων και φωσφορικών λιπασμάτων, που οδηγούν στον ευτροφισμό και την υποβάθμιση λιμνών, ποταμών και παράκτιων περιοχών. Παρά την ύπαρξη της Οδηγίας 91/676/ΕΟΚ για τη νιτρορύπανση, η εφαρμογή της δεν έχει αποφέρει τα αναμενόμενα αποτελέσματα, κυρίως εξαιτίας της δυσκολίας ελέγχου των διάχυτων εκπομπών από γεωργικές δραστηριότητες.

Ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η κοινωνική και θεσμική διάσταση παίζει καθοριστικό ρόλο. Η τεχνολογία, όσο προηγμένη κι αν είναι, δεν επαρκεί χωρίς την ύπαρξη πολιτικής βούλησης, σαφών νομοθετικών πλαισίων και ενεργού συμμετοχής της κοινωνίας των πολιτών. Η περιβαλλοντική εκπαίδευση, οι δράσεις ενημέρωσης και η εμπλοκή των πολιτών σε προγράμματα παρακολούθησης και προστασίας του περιβάλλοντος μπορούν να ενισχύσουν ουσιαστικά την αποτελεσματικότητα των τεχνικών μέτρων.

Τέλος, καθίσταται σαφές ότι απαιτείται μια ολιστική προσέγγιση στη διαχείριση των υδάτων, η οποία να συνδυάζει την πρόληψη της ρύπανσης στην πηγή με την αξιοποίηση της τεχνολογικής καινοτομίας, την εφαρμογή θεσμικών ρυθμίσεων και την ενίσχυση της κοινωνικής συμμετοχής. Μόνο μέσα από μια τέτοια συνδυαστική στρατηγική μπορεί να διασφαλιστεί η προστασία και η ανθεκτικότητα των υδατικών οικοσυστημάτων σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

Προτάσεις

Η προστασία των υδατικών πόρων δεν είναι μόνο ανάγκη αλλά και ευθύνη. Για τον σκοπό αυτό προτείνονται τα παρακάτω μέτρα, που μπορούν να ενισχύσουν τη βιώσιμη διαχείριση.

1. Ενίσχυση πρόληψης και μείωσης ρύπανσης στην πηγή.
 - ο Αυστηρότερος έλεγχος στις αγροτικές απορροές και εφαρμογή κωδίκων ορθής γεωργικής πρακτικής.
 - ο Μείωση πλαστικών μίας χρήσης και προώθηση εναλλακτικών υλικών.
 - ο Ανασχεδιασμός βιομηχανικών διαδικασιών με στόχο τον περιορισμό επικίνδυνων εκροών.
2. Προώθηση τεχνολογικής καινοτομίας.
 - ο Ανάπτυξη και εφαρμογή μεμβρανικών βιοαντιδραστήρων, προηγμένων οξειδωτικών διεργασιών και τεχνικών βιοαποκατάστασης.
 - ο Υποστήριξη πιλοτικών έργων σε ελληνικούς δήμους και βιομηχανικές περιοχές.
3. Αξιοποίηση αποκεντρωμένων λύσεων.
 - ο Χρήση κατασκευασμένων υγροτόπων και μικρής κλίμακας μονάδων σε αγροτικές περιοχές και μικρούς οικισμούς.
 - ο Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση και αστική χρήση, με ασφαλή πρότυπα.
4. Θεσμική και πολιτική ενίσχυση.
 - ο Εναρμόνιση εθνικής πολιτικής με την Οδηγία-Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ.
 - ο Δημιουργία μηχανισμών διασυνοριακής συνεργασίας, καθώς πολλά υδατικά σώματα μοιράζονται μεταξύ χωρών.
 - ο Εξασφάλιση σταθερής χρηματοδότησης για έργα υποδομής και έρευνα.

5. Κοινωνική συμμετοχή και εκπαίδευση.

- ο Ενίσχυση προγραμμάτων περιβαλλοντικής εκπαίδευσης σε σχολεία και πανεπιστήμια.
- ο Εφαρμογή δράσεων citizen science για την παρακολούθηση υδάτων από τους ίδιους τους πολίτες.
- ο Οικονομικά κίνητρα για πράσινες πρακτικές σε επιχειρήσεις και νοικοκυριά.

6. Διεπιστημονική προσέγγιση.

- ο Συνέργεια επιστημόνων, μηχανικών, οικονομολόγων, κοινωνιολόγων και πολιτικών επιστημόνων.
- ο Ολοκληρωμένα σχέδια που λαμβάνουν υπόψη οικολογικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς δείκτες.

Εν κατακλείδι, η προστασία των υδατικών πόρων είναι μια πρόκληση που δεν μπορεί να λυθεί με μεμονωμένες παρεμβάσεις. Η βιώσιμη διαχείριση απαιτεί συνέργεια τεχνολογίας, πολιτικής βούλησης και κοινωνικής συμμετοχής. Μόνο μέσα από ένα τέτοιο συνδυαστικό μοντέλο μπορεί να διασφαλιστεί η ποιότητα των υδάτων και να προστατευτεί η υγεία των οικοσυστημάτων και των ανθρώπων στο μέλλον.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

Ahmed R, Hamid AK, Krebsbach SA, He J, Wang D. (2022). Critical review of microplastics removal from the environment. *Chemosphere*. 2022 Apr; 293:133557 PMID: 35016952. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133557>

Akhbarizadeh R, Dobaradaran S, Nabipour I, Tangestani M, Abedi D, Javanfekr F, Jeddi F, Zendehtboodi A. (2021). Abandoned Covid-19 personal protective equipment along the Bushehr shores, the Persian Gulf: An emerging source of secondary microplastics in coastlines. *Mar Pollut Bull*. 2021 Jul; 168:112386. Apr 19. PMID: 33901902; PMCID: PMC8055201. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112386>

Al-Asheh, S., Bagheri, M., & Aidan, A. (2021). Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100109>

Al-Asheh, S., Banat, F. and Al-Khatib, I. (2021). Membrane systems and membrane bioreactors for wastewater treatment: A review. *Desalination and Water Treatment*, 204, pp. 1-15. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27035>

Albarano L, Padilla Suarez EG, Maggio C, La Marca A, Iovine R, Lofrano G, Guida M, Vaiano V, Carotenuto M, Libralato G. (2024). Assessment of ecological risks posed by veterinary antibiotics in European aquatic environments: A comprehensive review and analysis. *Sci Total Environ*. 1; 954:176280. Sep 13. PMID: 39278491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176280>

Ali, N.M., Khan, M.K., Mazhar, B. *et al.* (2025). Impact of Water Pollution on Waterborne Infections: Emphasizing Microbial Contamination and Associated Health Hazards in Humans. *Discov Water* **5**, 19. <https://doi.org/10.1007/s43832-025-00198-x>

Allen, Steve & Allen, Deonie & Phoenix, Vernon & Le Roux, Gaël & Jiménez, Pilar & Simonneau, anaëlle & Binet, Stéphane & Galop, Didier. (2019). Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*. 12. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>

Andrady, A. L. (2018). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>

Androulidakis, Y., Makris, C., Kombiadou, K., Krestenitis, Y., Stefanidou, N., Antoniadou, C., Krasakopoulou, E., Kalatzi, M.-I., Baltikas, V., Moustaka-Gouni, M., & Chintiroglou, C. (2024). Oceanographic research in the Thermaikos Gulf: A review over five decades. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(5), 795. <https://doi.org/10.3390/jmse12050795>

Anik, Amit & Hossain, Shabiha & Alam, Mahbub & Binte Sultan, Maisha & Hasnine, Md Tanvir & Rahman, Md. Mostafizur. (2021). Microplastics Pollution: A Comprehensive Review on the Sources, Fates, Effects, and Potential Remediation. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management*. 16. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100530>

ATSDR. (2024). *Clinician brief: PCBs*. <https://www.atsdr.cdc.gov/environmental-medicine/hcp/clinicianbriefpcbs/>

Bakhshaei, Alireza & Babakhani, Peyman & Ashiq, Muhammad Masood & Bell, Kati & Salehi, Maryam & Jazaei, Farhad. (2025). Potential impacts of microplastic pollution on soil–water–plant dynamics. *Scientific Reports*. 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93668-0>

Balaram, V., Cobia, L., Kumar, U.S., Miller, J. and Chidambaram, S., 2023. Pollution of water resources and application of ICP-MS techniques for monitoring and management—A comprehensive review. *Geosystems and Geoenvironment*, 2(4), p.100210. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2023.100210>

Batabyal, A. K. (2018). Hydro geochemistry and quality of groundwater in a part of Damodar Valley, Eastern India: An integrated geochemical and statistical approach. *Stoch Environ. Res. Risk Assess* 32, 2351–2368 (2018). <https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-018-1552-y>

Betsholtz, A., Falås, P., Svahn, O., Cimbritz, M., Davidsson, A. (2024). New perspectives on the interactions between adsorption and biodegradation in GAC filters. *Environmental Science & Technology*. 58(26), 11771-11780. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00815>

Bilal M, Bagheri AR, Bhatt P, Chen S. (2021). Environmental occurrence, toxicity concerns, and remediation of recalcitrant nitroaromatic compounds. *J Environ Manage*. 291:112685. Apr 27. PMID: 33930637. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112685>

Biswal, B. K., & Balasubramanian, R. (2022). Constructed wetlands for reclamation and reuse of wastewater and urban stormwater: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.836289>

Bruulsema, T. W., Peterson, H. M., & Prochnow, L. I. (2019). The science of 4R nutrient stewardship for phosphorus management across latitudes. *Journal of Environmental Quality*, 48(5), 1295–1299. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0065>

Bretas Alvim C, Mendoza-Roca JA, Bes-Piá A. (2020). Wastewater treatment plant as microplastics release source - Quantification and identification techniques. *J Environ Manage.* Feb 1; 255:109739. Dec 26. PMID: 32063314.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109739>

Bukowska B, Mokra K, Michałowicz J. (2022). Benzo[a]pyrene-Environmental Occurrence, Human Exposure, and Mechanisms of Toxicity. *Int J Mol Sci.* 23(11):6348. PMID: 35683027; PMCID: PMC9181839.

<https://doi.org/10.3390/ijms23116348>

Cao et al. (2023). Salinity-mediated water self-purification via bond network distorting of H₂O molecules on DRC surface. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2023 Nov 7;120(45): e2311920120. PMID: 37922324 PMCID: PMC10636312

<https://doi.org/10.1073/pnas.2311920120>

Cao, L., Zhang, Y., Huang, X., & Wang, Y. (2023). Salinity-mediated water self-purification via bond network distorting of H₂O molecules on DRC surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(45), e2311920120.

<https://doi.org/10.1073/pnas.2311920120>

Calvo VLV, Giner-Santonja G, Alonso-Fariñas B, Aguado JM. (2021). The effect of the European Industrial Emissions Directive on the air emission limit values set by competent authorities in the permitting procedure: The case of the Spanish cement industry. *Sci Total Environ.* 15;773:145491.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145491>

Capodaglio, A. G. (2025). Micro- and Nano-Plastics in Drinking Water: Threat or Hype? Critical State-of-the-Art Analysis of Risks and Approaches. *Journal of Xenobiotics*, 15(3), 85. <https://doi.org/10.3390/jox15030085>

Chellasamy G, Kiriyanthan RM, Maharajan T, Radha A, Yun K. (2022). Remediation of microplastics using bionanomaterials: A review. *Environ Res.* May 15; 208:112724. Jan 11. PMID: 35026186. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112724>

Corradini F, Meza P, Eguiluz R, Casado F, Huerta-Lwanga E, Geissen V. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Sci Total Environ.* 2019 Jun 25; 671:411-420. PMID: 30933797.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>

Crossman J, Hurley RR, Futter M, Nizzetto L. Transfer and transport of microplastics from biosolids to agricultural soils and the wider environment. *Sci Total Environ.* 2020 Jul 1; 724:138334. Apr 1. PMID: 32408466.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138334>

Colombo, Miriam. (2024). Microplastics in Cosmetics: Open Questions and Sustainable Opportunities. *ChemSusChem.* Volume 17, Issue 22, e202401065.
<https://doi.org/10.1002/cssc.202401065>

Davey, C., Kraak, M., Praetorius, A., ter Laak, T., van Wezel, A. (2022). Occurrence, hazard, and risk of psychopharmaceuticals and illicit drugs in European surface waters, *Water Research*, 222, 118878, ISSN 0043-1354.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118878>

Drakopoulou, I., Protopapa, M., Tsangaris, C., & Zervoudaki, S. (2024). Meso zooplankton production and respiration across a trophic gradient in a coastal Eastern Mediterranean ecosystem. *Marine Environmental Research*, 198, 106551.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106551>

De Bhowmick, Goldy & Sarmah, Ajit. (2021). Microplastics in the NZ Environment: Current status and future directions. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 3. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100076>

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities, L 327, 22 December 2000, pp. 1–73.
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj/eng>

Ding L, Zhang S, Wang X, Yang X, Zhang C, Qi Y, Guo X. The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Dris R, Gasperi J, Mirande C, Mandin C, Guerrouache M, Langlois V, et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environmental Pollution*. 2018; 221:453-458.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>

Du, X., Zhang, S. & Zou, E. (2024) Marine Microplastics and Infant Health', *arXiv*, October. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.17391>

Dufatanye, I., Lee, Y., Kim, H., & Lee, S. (2022). Industrial Wastewater Discharge and Compliance Investigation for Environmentally Resilient Rwanda. *Water*, 14(19), 3100.
<https://doi.org/10.3390/w14193100>

ECHA. (2022). *Microplastics restriction*. European Chemicals Agency.
<https://echa.europa.eu/hot-topics/microplastics>

EFSA CONTAM Panel. (2018). Risk for animal and human health related to the presence of dioxins and dioxin-like PCBs in food. *EFSA Journal*, 16(11), e05333.

EPA. (2025). *Types of Drinking Water Treatment Methods*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov>

Ekholm, J., Persson, F., de Blois, M., Modin, O., Pronk, M., van Loosdrecht, M. C. M., Suarez, C., Gustavsson, D. J. I., & Wilén, B.-M. (2022). Full-scale aerobic granular sludge for municipal wastewater treatment – granule formation, microbial succession, and process performance. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 8, 3138–3154. <https://doi.org/10.1039/D2EW00653G>

Eur-Lex (2000). Οδηγία 2000/60/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000 για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj?locale=el>

European Commission (2020). Water Framework Directive: Strategy for protecting Europe's waters. https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en

European Commission - EU Environment (2025). *Surface water*. https://environment.ec.europa.eu/topics/water/surface-water_en?prefLang=el

European Commission. (2025). Water Framework Directive: Status of surface waters in the EU. Publications Office of the European Union. https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en

European Commission, 2025. Implementing Decision (EU) 2025/439 of 28 February 2025 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC. *Official Journal of the European Union*, L 2025/439, 3 March 2025. https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2025/439/oj

European Environment Agency. (2018). European waters — Assessment of status and pressures 2018. Publications Office of the European Union. <https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-water>

European Environment Agency. (2018). *Surface waters* (AIRS 2018). Κοπεγχάγη: ΕΕΑ.
<https://www.eea.europa.eu/airs/2018/natural-capital/surface-waters>

European Parliament and Council, 2006. *Directive 2006/118/EC on the protection of groundwater against pollution and deterioration*. Official Journal of the European Union, L 372, pp.19–31.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A32006L0118>

European Parliament and Council, 2008. *Directive 2008/105/EC on environmental quality standards in the field of water policy*. Official Journal of the European Union, L 348, pp. 84–97. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/105/oj/eng>

ΕΛΙΝΥΑΕ, 2003. Ν. 3199/2003 (ΦΕΚ 280/Α', 9 Δεκεμβρίου 2003). Προστασία και διαχείριση των υδάτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000. Διαθέσιμο:
<https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/n-31992003-fek-280a-912200>

FAO. (2022). *Water pollution from agriculture: A global review*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org>

Fenten, T., & Dieperink, C. (2024). Governance Conditions for a Successful Restoration of Riverine Ecosystems, Lessons from the Rhine River Basin. *Water*, 16(20), 2983.
<https://doi.org/10.3390/w16202983>

Fernández-Medrano, V., Cuartas-Urbe, B., Bes-Piá, M.-A., & Mendoza-Roca, J.-A. (2022). Application of Nanofiltration and Reverse Osmosis Membranes for Tannery Wastewater Reuse. *Water*, 14(13), 2035. <https://doi.org/10.3390/w14132035>

Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewater: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>

Gao, S., Orlowski, N., Bopf, F., Breuer, L. (2024). A review on microplastics in major European rivers. *WIREs Water*. <https://doi.org/10.1002/wat2.1713>

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2018). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

Giustra, Marco & Sinesi, Giulia & Spina, Francesca & De Santes, Beatrice & Morelli, Lucia & Barbieri, Linda & Garbujo, Stefania & Galli, Paolo & Prosperi, Davide & Colombo, Miriam. (2024). Microplastics in Cosmetics: Open Questions and Sustainable Opportunities. *ChemSusChem*. Volume 17, Issue 22, e202401065. <https://doi.org/10.1002/cssc.202401065>

Golwala, H., Zhang, X., Iskander, S. M. and Smith, A. L. (2021). Solid waste: An overlooked source of microplastics to the environment. *Science of the Total Environment*, 769: 144581. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144581>

Goßmann, I., Halbach, M., and Scholz-Böttcher, B. M. (2021). Car and truck tire wear particles in complex environmental samples—a quantitative comparison with “traditional” microplastic polymer mass loads. *Science of the Total Environment*, 773: 145667. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145667>

Hanun, J. N., Hassan, F. and Jiang, J. J. (2021). Occurrence, fate, and sorption behavior of contaminants of emerging concern to microplastics: Influence of the weathering/aging process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5): 106290. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126386>

Hart, B., Walker, G., Katupitiya, A., & Doolan, J. (2020). Salinity Management in the Murray–Darling Basin, Australia. *Water*, 12(6), 1829. <https://doi.org/10.3390/w12061829>

He, D., Luo, Y., Lu, S., Liu, M., Song, Y., Lei, L. (2018). Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 109, 163-172, ISSN 0165-9936, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.006>.

He, H., et al. (2021). Recent progress using membrane-aerated biofilm reactors (MABRs) for wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 84(9), 2131–2159. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.443>

Helmers, M. J., Christianson, R., Brenneman, G., et al. (2022). Impact of controlled drainage on subsurface drain flow and nitrate load: A synthesis across the U.S. Midwest and Southeast. *Agricultural Water Management*, 259, 107222. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107222>

Hu, K., Yang, Y., Zuo, J., Tian, W., Wang, Y., Duan, X. and Wang, S. (2022). Emerging microplastics in the environment: properties, distributions, and impacts. *Chemosphere*, 297: 134118. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 27(6), 1216-1235, 1230, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134118>

Huang Y, Liu Q, Jia W, Yan C, Wang J. (2020). Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environ Pollut.* May; 260:114096. Jan 29. PMID: 32041035. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>

Huang, D., Wang, X., Yin, L., Chen, S., Tao, J., Zhou, W., and Xiao, R. (2022). Research progress of microplastics in soil-plant system: ecological effects and potential risks. *Science of The Total Environment*, 812: 151487. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151487>

Hübner, U., Spahr, S., Lutze, H., Wieland, A., Rüting, S., Gernjak, W., & Wenk, J. (2024). Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment - Guidance for systematic future research. *Heliyon*, 10(9), e30402.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30402>

Hurley, R.R. and Nizzetto, L. (2018) Fate and Occurrence of Micro (Nano)Plastics in Soils: Knowledge Gaps and Possible Risks. *Current Opinion Environmental Science & Health*, 1, 6-11. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.006>

Jaikumar, G., Brun, N. R., Vijver, M. G. and Bosker, T. (2019). Reproductive toxicity of primary and secondary microplastics to three cladocerans during chronic exposure. *Environmental Pollution*, 249: 638-646. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.085>

Jia, H., & Qian, H. (2025). Groundwater nitrate response to hydrogeological conditions and socioeconomic load in an agriculture-dominated area. *Scientific Reports*, 15, 1315. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84318-y>

Joodavi, A., Zare, M., Ziaei, A., & Ferré, T. (2017). Groundwater management under uncertainty using a stochastic multi-cell model. *Journal of Hydrology*. 551. 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.003>

Joshi, Y. K., Tortajada, C., & Biswas, A. K. (2012). Cleaning of the Singapore River and Kallang Basin in Singapore: Economic, Social, and Environmental Dimensions. *International Journal of Water Resources Development*, 28(4), 647–658. <https://doi.org/10.1080/07900627.2012.669034>

Jayasundara, C., Kumarasinghe, U., Manage, P., Karunarathna, A., Nugara, R., & Abhayapala, R. (2023). Permeable reactive barriers as an in-situ groundwater remediation technique for open solid waste dumpsites: A review and prospect. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(2), 56. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-06056-z>

International Energy Agency (IEA) (2024). World Energy Outlook 2024: Analysis and projections. Available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

IARC. (2014). *Trichloroethylene, tetrachloroethylene, and some other chlorinated agents* (Vol. 106). IARC Monographs.

<https://incchem.org/documents/iarc/iarcmono/v106iarc.pdf>

Kagalou, I., Papastergiadou, E., & Leonardos, I. (2008). Long term changes in the eutrophication process in a shallow Mediterranean lake ecosystem of W. Greece: Response after the reduction of external load. *Journal of Environmental Management*, 87(3), 497–506. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.039>

Kato, Shoma & Kansha, Yasuki. (2024). Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environmental Science and Pollution Research*. 31. 1-34. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0>

Khalidi-Idrissi, A., Madinzi, A., Anouzla, A., Pala, A., Mouhir, L., Kadmi, Y., & Souabi, S. (2023). Recent advances in the biological treatment of wastewater rich in emerging pollutants produced by pharmaceutical industrial discharges. *International journal of environmental science and technology: IJEST*, 1–22. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04867-z>

Kumar, R., Sharma, P., Manna, C. and Jain, M. (2021). Abundance, interaction, ingestion, ecological concerns, and mitigation policies of microplastic pollution in riverine ecosystem: A review. *Science of The Total Environment*, 782: 146695. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146695>.

Latinopoulos, D., Mentis, C., & Bithas, K. (2018). The impact of a public information campaign on preferences for marine environmental protection: The case of plastic waste. *Marine Pollution Bulletin*, 131(Pt A), 151–162.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.002>

Lawrinenko, M., Zhang, L. and Wang, Y. (2023). Constructed wetlands for nutrient and organic pollutant removal: technology and applications. *Ecological Engineering*, 170, 106358. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106358>

Lawrinenko, M., Kurwadkar, S., & Wilkin, R. T. (2023). Long-term performance evaluation of zero-valent iron amended permeable reactive barriers for groundwater remediation - A mechanistic approach. *Geoscience frontiers*, 14(2), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101494>

Le T.V., Nguyen, B.T. (2023). Heavy metal pollution in surface water bodies in provincial Khanh Hoa, Vietnam: Pollution and human health risk assessment, source quantification, and implications for sustainable management and development. *Environ Pollut.* 15, 343:123216. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123216>

Leal Filho, W., Salvia, A. L., Bonoli, A., Saari, U. A., Voronova, V., Klõga, M., and Barbir, J. (2021). An assessment of attitudes towards plastics and bioplastics in Europe. *Science of the Total Environment*, 755: 142732 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142732>

Li, J., Sun, C., Chen, W., Zhang, Q., Zhou, S., Lin, R., & Wang, Y. (2022). Groundwater Quality and Associated Human Health Risk in a Typical Basin of the Eastern Chinese Loess Plateau. *Water*, 14(9), 1371. <https://doi.org/10.3390/w14091371>

Lin, L., Yang, H., Xu, X. (2022). Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. *Frontiers in Environmental Science*. 10. 880246. <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>

Lin, Z. (2025). Conventional biological processes and membrane systems for wastewater treatment and water reuse. *Science of the Total Environment*, 850, pp. 157-169. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.157169>

Liu M, Lu S, Song Y, Lei L, Hu J, Lv W, Zhou W, Cao C, Shi H, Yang X, He D. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. *Environ Pollut.* 2018 Nov;242 (Pt A):855-862. Jul 18. PMID: 30036839. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.051>

Luo H, Xiang Y, He D, Li Y, Zhao Y, Wang S, Pan X. (2019). Leaching behavior of fluorescent additives from microplastics and the toxicity of leachate to *Chlorella vulgaris*. *Sci Total Environ.* Aug 15; 678:1-9. Apr 28. PMID: 31075575. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.401>

Luo, Y., Douglas, J., Pahl, S., & Zhao, J. (2022). Reducing Plastic Waste by Visualizing Marine Consequences. *Environment and Behavior*, 54(4), 809-832. <https://doi.org/10.1177/00139165221090154>

MacLeod, M., Arp, H. P. H., Tekman, M. B., & Jahnke, A. (2021). The global threat from plastic pollution. *Science*, 373(6550), 61–65. <https://doi.org/10.1126/science.abg5433>

Mandal, A. H., Sadhu, A., Ghosh, S., Saha, N. C., Mossotto, C., Pastorino, P., Saha, S., & Faggio, C. (2025). Evaluating the impact of neonicotinoids on aquatic non-target species: A comprehensive review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 113, 104606. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2024.104606>

Mantzafleri, N., Psilovikos, A., & Blanta, A. (2009). Water quality monitoring and modeling in Lake Kastoria, using GIS: Assessment and management of pollution sources. *Water Resources Management*, 23, 3221–3254. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9431-4>

Mason, S. A., Welch, V. G., & Neratko, J. (2018). Synthetic polymer contamination in bottled water. *Frontiers in Chemistry*, 6, 407. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00407>

Melo-Agustín, P., Kozak, E. R., de Jesús PereaFlores, M. and Mendoza-Pérez, J. A. (2022). Identification of microplastics and associated contaminants using ultra high resolution microscopic and spectroscopic techniques. *Science of The Total Environment*, 828: 154434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154434>

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill. https://www.abpsoil.com/images/Books/Wastewater_Engineering_Treatment_Resource_Recovery_Metcalf_Eddy_5th.pdf

Miri S, Saini R, Davoodi SM, Pulicharla R, Brar SK, Magdoulis S. Biodegradation of microplastics: Better late than never. *Chemosphere*. 2022 Jan;286 (Pt 1):131670. Jul 26. PMID: 34351281. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131670>

Moreira, V., Lebron, Y., Couto, C., Maia, A., Moravia, W., Amaral, M. (2021). Process development for textile wastewater treatment towards zero liquid discharge: Integrating membrane separation process and advanced oxidation techniques. *Process Safety and Environmental Protection*. 157. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.10.037>

Moghadas, R., Mumberg, T., & Wanner, P. (2023). Spatial prediction of concentrations of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in European soils. *Environmental Science & Technology Letters*, 10(11), 1125–1129. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00633>

Munoz-Pinero MA. (2018). *Microplastics: Focus on Food and Health*. Publications Office of the European Union; 2018. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC110629>

Nakazawa, Y., Kosaka, K., Yoshida, N., Asami, M., & Matsui, Y. (2023). Long-term removal of perfluoroalkyl substances via activated carbon process for general advanced treatment purposes. *Water Research*, 245, 120559.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120559>

Nouri A, Lukas S, Singh S, Singh S, Machado S. (2022). When do cover crops reduce nitrate leaching? A global meta-analysis. *Glob Chang Biol*. 2022 Aug;28(15):4736-4749.

<https://doi.org/10.1111/gcb.16269>

Pasquini, Laure & Lardy-Fontan, Sophie & Rosin, Christophe. (2025). Pesticide transformation products: a potential new source of interest for drinking water. *Environmental Science and Pollution Research*. 32. 4619-4635.

<http://dx.doi.org/10.1007/s11356-025-35979-3>

Pecenka, J. R., Ingwell, L. L., Foster, R. E., Krupke, C. H., & Kaplan, I. (2021). IPM reduces insecticide applications by 95% while maintaining or enhancing crop yields through wild pollinator conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(44), e2108429118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2108429118>

Pereira Amanda da Costa Araújo, de Melo NFS, de Oliveira Junior AG, Rodrigues FP, Fernandes T, de Andrade Vieira JE, Rocha TL, Malafaia G. How much are microplastics harmful to the health of amphibians? A study with pristine polyethylene microplastics and *Physalaemus cuvieri*. *J Hazard Mater*. 2020 Jan 15; 382:121066

<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100054>

Piehl, Sarah & Leibner, Anna & Löder, Martin & Dris, Rachid & Bogner, Christina & Laforsch, Christian. (2018). Identification and quantification of macro and microplastics on agricultural farmland. *Scientific Reports*. 2018-12, Vol 8 (1), p.17950-9, Article 17950. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-36172-y>

Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects. *Science of the Total Environment*, 702, 134455.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>

Provencher, J. F., Bond, A. L., Mallory, M. L., Borrelle, S. B., & Avery-Gomm, S. (2020). Quantifying ingested debris in marine megafauna: A review and recommendations for standardization. *Analytical Methods*, 12(15), 1500–1514.

<https://doi.org/10.1039/C6AY02419J>

Province, in north-western China. *Sci Total Environ*. 2020 Jun 10; 720:137525. Feb 24. PMID: 32325574. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137525>

Prosser RS, Hoekstra PF, Gene S, Truman C, White M, Hanson ML. (2020). A review of the effectiveness of vegetated buffers to mitigate pesticide and nutrient transport into surface waters from agricultural areas. *J Environ Manage*. 261:110210.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110210>

OECD, 2019. OECD Water Policies Country Note: Greece. Διαθέσιμο: <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/topics/policy-sub-issues/water-and-agriculture/oecd-water-policies-country-note-greece.pdf>

Oziegbe, O. (2025). Bioremediation of heavy metals in aquatic environments. *Science of the Total Environment*, 850, pp. 157-169.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.157169>

Qi R, Jones DL, Li Z, Liu Q, Yan C. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review. *Sci Total Environ*. 2020 Feb 10; 703:134722. Oct 17. PMID: 31767311. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134722>

Ramírez, S. B., van Meerveld, H. J., & Seibert, J. (2023). Citizen science approaches for water quality measurements. *Science of the Total Environment*, 897, 165436.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165436>

Ritchie, H., Samborska, V., Roser, M. (2023) - "Plastic Pollution" Published online at OurWorldinData.org. Retrieved from: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>

Rochman CM, Hoellein T. (2020). The global odyssey of plastic pollution. *Science*. 12;368(6496):1184-1185. PMID: 32527817. DOI:10.1126/science.abc4428

<https://par.nsf.gov/servlets/purl/10463502>

Rochman, C. M. Microplastics research—from sink to source. *Science*. 360, (6384)

Roy, Poritosh & Mohanty, Amar & Misra, Manjusri. (2022). Microplastics in the ecosystems: Their implications and mitigation pathway. *Environmental Science: Advances*. 1. <https://doi.org/10.1039/D1VA00012H>

Ruan, D., Bian, J., Wang, Y., Wu, J. and Gu, Z., 2024. Identification of groundwater pollution sources and health risk assessment in the Songnen Plain based on PCA-APCS-MLR and trapezoidal fuzzy number-Monte Carlo stochastic simulation model. *Journal of Hydrology*, 632, p.130897. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130897>

Sangkham, S., Faikhaw, O., Munkong, N., Sakunkoo, P., Arunlertaree, C., Chavali, M., and Tiwari, A. (2022). A review on microplastics and nanoplastics in the environment: Their occurrence, exposure routes, toxic studies, and potential effects on human health. *Marine Pollution Bulletin*, 181: 113832.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113832>

San Llorente Capdevila, A., Kokimova, A., Sinha Ray, S., Avellán, T., Kim, J., & Kirschke, S. (2020). Success factors for citizen science projects in water quality monitoring. *Science of the Total Environment*, 728, 137843.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137843>

Sankhla et al. (2021). Seasonal Variations of Lead and chromium concentration in the water samples from Yamuna River in Delhi, India. *Iranian Journal of Toxicology* 15(2):109-114. <http://dx.doi.org/10.32598/IJT.15.2.769.1>

Sarker, B., Keya, K. N., Mahir, F., Nahiun, K., Shahida, S., Khan, R. (2021). Scientific Review Surface and Ground Water Pollution: Causes and Effects of Urbanization and Industrialization in South Asia. *Scientific Review*. 7. 32-41. <http://dx.doi.org/10.32861/sr.73.32.41>

Scavia, D., Allan, J. D., Arend, K. K., Bartell, S., Beletsky, D., Bosch, N. S., Brandt, S. B., Briland, R. D., Daloğlu, I., DePinto, J. V., Dolan, D. M., Evans, M. A., Farmer, T. M., Goto, D., Han, H., Höök, T. O., Knight, R., Ludsins, S. A., Mason, D., Michalak, A. M., Richards, R. P., Roberts, J. J., Rucinski, D. K., Rutherford, E., Schwab, D. J., Sesterhenn, T. M., Zhang, H., & Zhou, Y. (2014). Assessing and addressing the re-eutrophication of Lake Erie: Central basin hypoxia. *Journal of Great Lakes Research*, 40(2), 226–246. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.02.004>

Scheurer, M. and Bigalke, M. (2018) Microplastics in Swiss Floodplain Soils. *Environmental Science & Technology*, 52, 3591-3598. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06003>

Schindler, D. W., Carpenter, S. R., Chapra, S. C., Hecky, R. E., & Orihel, D. M. (2016). Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. *Environmental Science & Technology*, 50(17), 8923-8929. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02204>

Schuyler QA, Wilcox C, Townsend KA, Wedemeyer-Strombel KR, Balazs G, van Seville E, Hardesty BD. (2018). Risk analysis reveals global hotspots for marine debris ingestion by sea turtles. *Glob Chang Biol*. Feb;22(2):567-76. Sep 14. PMID: 26365568. https://www.researchgate.net/publication/281769305_Risk_analysis_reveals_global_hotspots_for_marine_debris_ingestion_by_sea_turtles

Shahid, M. K., Kashif, A., Fuwad, A., & Choi, Y. (2021). Current advances in treatment technologies for removal of emerging contaminants from water – A critical review. *Coordination Chemistry Reviews*, 442, 213993. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213993>

Sharma, V., Joshi, H. & Bowes, M.J. A Tale of Two Rivers: Can the Restoration Lessons of River Thames (Southern UK) Be Transferred to River Hindon (Northern India)?. *Water Air Soil Pollut* **232**, 212 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05152-w>

Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Mariñas, B. J., & Mayes, A. M. (2008). Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452(7185), 301–310. <https://doi.org/10.1038/nature06599>

Shen, J. (2025). Controlled-release oxidants for in situ remediation of contaminated groundwater. *Environmental Science & Technology*, 59(6), pp. 2345-2358. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02396>

Soltaninia S, Eskandaripour M, Golmohammadi MH, Taghavi L, Mehboodi A. Nitrate pollution in urban runoff: A comprehensive risk assessment for human and ecological health. *Sci Total Environ*. 2025 Apr 25; 974:179184. Mar 25. PMID: 40138899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179184>

Subba Rao, N. (2012) 'PIG: a numerical index for dissemination of groundwater contamination zones', *Hydrological Processes*, 26(22), pp. 3344–3350. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8456>

Sun, J., Dai, X., Wang, Q., van Loosdrecht, M. C., & Ni, B. J. (2019). Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Research*, 152, 21–37. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.050>

- Sun, J., Rene, E. R., Tao, D., Lu, Y., Jin, Q., Lam, J. C.-H., Leung, K. M. Y., & He, Y. (2024). Degradation of organic UV filters in the water environment: A concise review on the mechanism, toxicity, and technologies. *Journal of Hazardous Materials*, 463, 132822. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132822>
- Suzuki, G., Uchida, N., Tanaka, K., Matsukami, H., Kunisue, T., Takahashi, S., and Osako, M. (2022). Mechanical recycling of plastic waste as a point source of microplastic pollution. *Environmental Pollution*, 303: 119114. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119114>
- Středová, H. (2024) 'Nitrates Directive restriction: To change or not to change in Europe?', *Science of the Total Environment*, 899, Article 166990. Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724005163>
- Talabi, A. and Kayode, T. (2019) Groundwater Pollution and Remediation. *Journal of Water Resource and Protection*, 11, 1-19. doi: [10.4236/jwarp.2019.111001](https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.111001).
- Talabi, A.O., Kayode, T.J. (2019) Groundwater Pollution and Remediation. *Journal of Water Resource and Protection*, 11, 1-19. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.11100>
- Tang Y, Zhou W, Sun S, Du X, Han Y, Shi W, et al. Immunotoxicity and neurotoxicity of bisphenol a and microplastics alone or in combination with a bivalve species, *Tegillarca granosa*. *Environmental Pollution*. 2020; 265:115115. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115115>
- Tang, Y., Zhang, S., Su, Y., Wu, D., Zhao, Y. and Xie, B. (2021). Removal of microplastics from aqueous solutions by magnetic carbon nanotubes. *Chemical Engineering Journal*, 406: 126804. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126804>

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4th ed.). McGraw-Hill.

https://ptabdata.blob.core.windows.net/files/2017/IPR201701468/v22_FWS1016%20-%20Metcalf.pdf

Teixeira, J., Delerue-Matos, C., Morais, S. *et al.* (2024). Environmental contamination with polycyclic aromatic hydrocarbons and contribution from biomonitoring studies to the surveillance of global health. *Environ Sci Pollut Res* **31**, 54339–54362. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34727-3>

Thacharodi, A., Hassan, S., Hegde, T., Dilip, D., Brindhadevi, K., Pugazhendhi, A. (2023). Water a major source of endocrine-disrupting chemicals: An overview on the occurrence, implications on human health and bioremediation strategies, *Environmental Research*, 231(1), 116097, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116097>

Thangamalathi, S., & Anuradha, V. (2018). Role of inorganic pollutants in freshwater ecosystem – A review. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 5(11), 39–49. <https://doi.org/10.22192/ijarbs.2018.05.11.005>

Truelove, H. B., Largo-Wight, E., Siuda, A. N. S., Gowans, S., Minichiello, H., & Hill, J. (2023). Reducing single-use plastic on college campuses: Theory of planned behavior-based brief interventions. *Current Research in Ecological and Social Psychology*, 4, 100098. <https://doi.org/10.1016/j.cresp.2023.100098>

The European Parliament. Plastic in the Ocean: The Facts, Effects and New EU Rules. 2025. https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/10/story/20181005STO15110/20181005STO15110_en.pdf

Tsihrintzis, V. A., & Gikas, G. D. (2010). Constructed wetlands for wastewater and activated sludge treatment in north Greece: A review. *Water Science and Technology*, 61(10), 2653–2672. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.188>.

U.S. Geological Survey. (2018). *Groundwater: What is groundwater?* Water Science School. <https://www.usgs.gov/water-science-school/science/groundwater-what-groundwater>

Uddin S, Fowler SW, Habibi N, Behbehani M. Micro-Nano Plastic in the Aquatic Environment: Methodological Problems and Challenges. *Animals (Basel)*. 2022 Jan 25;12(3):297. PMID: 35158621; PMCID: PMC8833669.
<http://dx.doi.org/10.3390/ani12030297>

Ullah, Z., Rashid, A., Ghani, J., Nawab, J., Zeng, X.-C., & Shah, M. et al. (2022). *Groundwater contamination through potentially harmful metals and its implications in groundwater management*. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1021596.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1021596>

UNEP. (2018). *Marine plastic debris and microplastics: Global lessons and research to inspire action and guide policy change*. United Nations Environment Programme.
<https://www.unep.org/resources/report/marine-plastic-debris-and-microplastics-global-lessons-and-research-inspire-action>

UNEP/Stockholm Convention. (2022). *Inventory guidance for short-chain chlorinated paraffins (SCCPs)*.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132344>

United States Geological Survey; Guardian news coverage. (2024–2025). PFAS contamination: Public health risk and prevalence.
<https://www.theguardian.com/us-news/2024/nov/13/pfas-contaminating-drinking-water>

Valkama, E., Usva, K., Saarinen, M., & Uusi-Kämppe, J. (2019). A meta-analysis on nitrogen retention by buffer zones. *Journal of Environmental Quality*, 48(2), 270–279.

<https://doi.org/10.2134/jeq2018.03.0120>

Viegas, R.M.C., Mestre, A.S., Mesquita, E., Campinas, M., Andrade, M.A., Carvalho, A.P. and Rosa, M.J. (2020). Assessing the applicability of a new carob waste-derived powdered activated carbon to control pharmaceutical compounds in wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 743, p.140791. Available at:

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140791>

Viitala, Mirka & Ncibi, Mohamed Chaker & Sillanpää, Markus & Sillanpää, Mika. (2019). Intercomparison study on commonly used methods to determine microplastics in wastewater and sludge samples. *Environmental Science and Pollution Research*. 26.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-04584-6>

Wang J, Liu X, Li Y, Powell T, Wang X, Wang G, Zhang P. (2019). Microplastics as contaminants in the soil environment: A mini-review. *Sci Total Environ*. Nov 15; 691:848-857. PMID: 31326808. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.209>

Wang, Chengqian & O'Connor, David & Wang, Liuwei & Wu, Weimin & Luo, Jian & Hou, Deyi. (2022). Microplastics in urban runoff: Global occurrence and fate. *Water Research*. 225. 119129. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119129>

Wang, J., Taylor, A., Xu, C., Schlenk, D., Gan, J. (2018). Evaluation of different methods for assessing bioavailability of DDT residues during soil remediation, *Environmental Pollution*, 238, 462-470, ISSN 0269-7491. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.082>

Wang, T., Li, B., Zou, X., Wang, Y., Li, Y., Xu, Y., ... and Yu, W. (2019). Emission of primary microplastics in mainland China: invisible but not negligible. *Water Research*, 162: 214-224. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.042>

Warner, S., Blanco Ramírez, S., de Vries, S., Marangu, N., Ateba Bessa, H., Toranzo, C., Loisel, S. (2024). Empowering citizen scientists to improve water quality: From monitoring to action. *Frontiers in Water*, 6, 1367198.

<https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1367198>

Wei, K.H., Zhang, Y. and Li, X. (2022). Advances in in situ chemical oxidation technologies for removal of organic contaminants. *Science of the Total Environment*, 830, 154763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154763>

WHO (2022). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>

Wolkersdorfer, C., Mugova, E. (2020). Effects of Mining on Surface Water. *Human Pressures and Management of Inland Waters*. Available at: <https://www.wolkersdorfer.info/publication/pdf/Effects%20of%20Mining%20on%20Surface%20Water.pdf>

WILDCOAST, 2021. *Ending the Plastic Pollution Crisis on the U.S.-Mexico Border*. Διαθέσιμο στο: <https://wildcoast.org/community-engagement-and-innovation-to-end-the-plastic-crisis-in-los-laureles-canyon-tijuana-mexico/>

Yadav S, Kumar S, Haritash AK. (2023). A comprehensive review of chlorophenols: Fate, toxicology and its treatment. *J Environ Manage*. 342:118254. Jun 7. PMID: 37295147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118254>

Yang, Y., Cai, S., Mo, C., Dong, J., Chen, S., & Wen, Z. (2025). *Profiles of antibiotic resistome risk in diverse water environments*. *Communications Earth & Environment*, 6, 158. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02139-x>

Yin, Lingshi & Du, Li & Wen, Xiaofeng & Huang, Danlian & Xiao, Ruihao & Wang, Zeyu & Su, Hongyu & Huang, Jiali & Wang, Guangfu & Tao, Jiaxi & Kang, Yuantai. (2023). Occurrence and Effects of Microplastics in Lake Ecosystems: Particular Focus on

Migration in Water and Food Chains. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. 261. <http://dx.doi.org/10.1007/s44169-023-00036-y>

Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., ... & Oda, K. (2018). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), 1196–1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

Zait, R., Fighir, D., Sluser, B., Plavan, O., & Teodosiu, C. (2022). Priority Pollutants Effects on Aquatic Ecosystems Evaluated through Ecotoxicity, Impact, and Risk Assessments. *Water*, 14(20), 3237. <https://doi.org/10.3390/w14203237>

Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. (2018). Life in the “plastisphere”: Microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7137–7146. <https://doi.org/10.1021/es401288x>

Zhang M, Dong B, Qiao Y, Yang H, Wang Y, Liu M. (2018). Effects of sub-soil plastic film mulch on soil water and salt content and water utilization by winter wheat under different soil salinities. *Field Crops Research*. 225: 130-140, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.06.010>

Zhang S, Yang X, Gertsen H, Peters P, Salánki T, Geissen V. A simple method for the extraction and identification of light density microplastics from soil. *Sci Total Environ*. 2018 Mar; 616-617: 1056-1065. Oct 31. PMID: 29096962. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.213>

Zhang, X., Zhang, Y., Gui, Y. *et al.* (2025). Chemical characteristics of groundwater and surface water affected by human activities in the upper Jinzi River Basin, China. *Sci Rep* 15, 9294. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93318-5>

Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T., & Sillanpää, M. (2021). Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 217, 103827. <https://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b05450>

Zhou B, Wang J, Zhang H, Shi H, Fei Y, Huang S, Tong Y, Wen D, Luo Y, Barceló D. Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: Multiple sources other than plastic mulching film. *J Hazard Mater*. 2020 Apr 15; 388:121814. Dec 5. PMID: 31843412. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121814>

Zhou, Z., Liu, J., Zhou, N., Zhang, T., & Zeng, H. (2021). Does the “10-Point Water Plan” reduce the intensity of industrial water pollution? Quasi-experimental evidence from China. *Journal of Environmental Management*, 295, 113048. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113048>

Ziajahromi, Shima & Lu, Hsuan-Cheng & Dwyer, Jason & Fernandes, Milena & Griffith, Merran & Leusch, Frederic. (2024). Transport and Accumulation of Microplastics from Biosolids to Australian Agricultural Soils: Detection of Microplastics Down to 1 µm. *Environmental science & technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c04661>

Ελληνόγλωσση

Υπουργείο Ανάπτυξης, Υπουργείο Γεωργίας, Υπουργείο Εθνικής Οικονομίας & Οικονομικών, Υπουργείο Εσωτερικών, Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας & Δημοσίων Έργων, Υπουργείο Υγείας & Πρόνοιας, 1997. *Μέτρα και όροι για την προστασία των νερών από τη νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης*. ΦΕΚ Β' 519/25.06.1997. <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/ya-oik1619013351997-fek-519b-2561997>

Υπουργείο Ανάπτυξης, Υπουργείο Γεωργίας, Υπουργείο Εθνικής Οικονομίας & Οικονομικών, Υπουργείο Εσωτερικών, Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας & Δημοσίων Έργων, Υπουργείο Υγείας & Πρόνοιας, 1999. *Προσδιορισμός των νερών που υφίστανται νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης – Κατάλογος ευπρόσβλητων ζωνών*. ΦΕΚ Β' 1575/05.08.1999. <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/ya-oik-1965219061999-fek-1575b-581999>

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2019. *Ενιαία Προγράμματα Δράσης για όλες τις ευπρόσβλητες ζώνες*. ΦΕΚ Β' 1496/03.05.2019. https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2021/06/147070_14-3224-%CE%92%C2%B4.pdf

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας κ.ά., 2016. *ΚΥΑ οικ. 170766/2016 – Τροποποίηση της ΚΥΑ 51354/2641/Ε103/2010, σε συμμόρφωση με την Οδηγία 2013/39/ΕΕ (ΦΕΚ Β' 69/22.1.2016)*. Διαθέσιμο στο: <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/ya-oik-1707662016-fek-69b-2212016>

Οδηγία 2006/118/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με την προστασία των υπόγειων υδάτων από τη ρύπανση και την υποβάθμιση, Επίσημη Εφημερίδα L 372, 27/12/2006, σ. 19–31. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A32006L0118>