



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



Η ΡΑΓΔΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ Η ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ

ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ
ΜΠΕΧΑΙ ΝΤΙΑΝΤΖΕΛΑ
ΑΜ: 3019027
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΖΑΜΠΑΡΑΣ ΜΙΛΤΙΑΔΗΣ
ΛΑΡΙΣΑ 2023



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ρύπανση από τα μικροπλαστικά έχει αναδειχθεί ως ένα κρίσιμο περιβαλλοντικό πρόβλημα, με συνέπειες για τα θαλάσσια οικοσυστήματα, την άγρια ζωή και την ανθρώπινη υγεία. Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρέχει μια ενδεδειγμένη ανάλυση των πηγών, της κατανομής και των οικολογικών επιπτώσεων των μικροπλαστικών, καθώς και μια αξιολόγηση των τρεχουσών στρατηγικών διαχείρισης και των πολιτικών ανταποκρίσεων. Μέσω μιας συστηματικής ανασκόπησης της βιβλιογραφίας, αναγνωρίζουμε τα πρωτογενή και δευτερογενή μικροπλαστικά ως πανταχού παρόντα ρυπογόνα που έχουν διεισδύσει σε χερσαίους και υδάτινους βιότοπους παγκοσμίως. Εξετάζουμε τις διαδικασίες αποσύνθεσης που οδηγούν στη δημιουργία δευτερογενών μικροπλαστικών και εξετάζουμε τις διάφορες διαδρομές μέσω των οποίων αυτοί οι ρύποι εισέρχονται στο περιβάλλον. Αναλύουμε τις επιπτώσεις τους στην υγεία των οργανισμών και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων, ενώ αξιολογούμε και την πιθανότητα των μικροπλαστικών να λειτουργούν ως φορείς τοξικών χημικών και την τάση τους για βιοσυσσώρευση. Η αποτελεσματικότητα των υπάρχουσών μέτρων μείωσης, περιλαμβανομένων των βελτιώσεων στη διαχείριση αποβλήτων, των νομοθετικών δράσεων και των εκστρατειών ευαισθητοποίησης του κοινού, αξιολογείται κριτικά. Τα ευρήματά μας τονίζουν την ανάγκη για μια πολυεπιστημονική προσέγγιση για να αντιμετωπιστούν οι πολύπλοκες προκλήσεις που θέτουν τα μικροπλαστικά, καλώντας για ενισχυμένη επιστημονική έρευνα, καινοτόμες τεχνολογίες ελέγχου της ρύπανσης και ισχυρότερη διεθνή συνεργασία. Αυτή η εργασία συμβάλλει στην αυξανόμενη γνώση για τη ρύπανση από μικροπλαστικά και λειτουργεί ως βάση για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη πολιτικής με στόχο τη διατήρηση της περιβαλλοντικής ακεραιότητας αντιμετωπίζοντας αυτό το διαδεδομένο πρόβλημα.



ABSTRACT

Microplastic pollution has emerged as a critical environmental challenge, with implications for marine ecosystems, wildlife, and human health. This thesis provides a comprehensive analysis of the sources, distribution, and ecological impacts of microplastics, as well as an evaluation of current management strategies and policy responses. Through a systematic review of the literature, we identify primary and secondary microplastics as ubiquitous contaminants that have infiltrated terrestrial and aquatic habitats globally. We explore the degradation processes that give rise to secondary microplastics and examine the various pathways through which these pollutants enter the environment. entanglement as key concerns for organism health and ecosystem function. Furthermore, we assess the potential for microplastics to act as vectors for toxic chemicals and their propensity for bioaccumulation. The effectiveness of existing mitigation measures, including waste management improvements, legislative actions, and public awareness campaigns, is critically evaluated. Our findings underscore the need for a multidisciplinary approach to address the complex challenges posed by microplastics, calling for enhanced scientific research, innovative pollution control technologies, and stronger international cooperation. This work contributes to the growing body of knowledge on microplastic pollution and serves as a foundation for future research and policy development aimed at preserving environmental integrity in the face of this pervasive issue.



Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή.....	7
1.1. Μικροπλαστικά	8
1.2. Τύποι μικροπλαστικών	13
1.3. Πηγές μικροπλαστικών	15
2. Κατανομή και συσσώρευση μικροπλαστικών σε υδάτινα περιβάλλοντα	16
2.1. Παγκόσμια πρότυπα διανομής	16
2.1.1. Θαλάσσια Περιβάλλοντα	17
2.1.2. Συστήματα γλυκού νερού	17
2.1.3. Πολικές περιοχές.....	18
2.1.4. Ατμοσφαιρική Εναπόθεση	18
2.1.5. Βαθιά θάλασσα	18
2.2. Μηχανισμοί μεταφοράς.....	19
2.3. Ζώνες συσσώρευσης.....	20
2.3.1. Θαλάσσια ρεύματα	20
2.3.2. Παράκτιες περιοχές	20
2.3.3. Εκβολές ποταμών.....	21
2.3.4. Εποχικά καιρικά φαινόμενα.....	21
2.3.5. Ιζήματα βαθέων υδάτων	21
2.3.6. Αρκτικός πάγος	21
2.3.7. Αστικές πλωτές οδοί	22
2.4. Εποχιακές και χρονικές διακυμάνσεις.....	22
2.4.2. Υδρολογικοί Κύκλοι.....	22
2.4.3. Ανθρώπινες Δραστηριότητες	22
2.4.4. Βιογεωχημικοί κύκλοι	23
3. Υλικά και Μέθοδοι.....	23
3.1. Τεχνικές δειγματοληψίας.....	23
3.1.1. Αναδυνόμενες τεχνικές	26
3.2. Αναλυτικές τεχνικές.....	27
3.3. Ταυτοποίηση και χαρακτηρισμός.....	29



3.4. Προκλήσεις και περιορισμοί στην ανίχνευση	30
4. Επιπτώσεις των μικροπλαστικών στους υδρόβιους οργανισμούς.....	32
4.1. Κατάποση και φυσικές επιπτώσεις	32
4.2. Τοξικολογικές επιδράσεις	33
4.3. Βιοσυσσώρευση και βιομεγέθυνση	35
4.4. Επιπτώσεις στα υδάτινα οικοσυστήματα.....	37
5. Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία	39
5.1. Οδοί έκθεσης	39
5.2. Πιθανοί κίνδυνοι για την υγεία	41
5.3. Τρέχοντα κενά έρευνας και γνώσης.....	43
6. Στρατηγικές πολιτικής και διαχείρισης.....	45
6.1. Διεθνείς κανονισμοί και συμφωνίες.....	45
6.2. Εθνικές πολιτικές και νομοθεσία	46
6.3. Τεχνικές μετριασμού και αποκατάστασης.....	48
6.4. Ευαισθητοποίηση και εκπαίδευση του κοινού.....	53
7. Συμπέρασμα- Συζήτηση.....	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	60



Ντιάντζελα Μπεχάι

Η ΡΑΓΔΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΥΛΑΤΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ Η
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ



ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Απαιτήσεις και χρήσεις διαφορετικών τύπων πλαστικού στην Ευρώπη για το 2014 (PlasticsEurope,2015)	9
Εικόνα 2. Κατηγορίες και πηγές μικροπλαστικών στο περιβάλλον. (Πηγή: Wu et al., 2019)	14
Εικόνα 3 Δίχτυ Manda (Kc-denmark)	24
Εικόνα 4 Δίχτυ Neuston (Environmental-expert)	24
Εικόνα 5 Δίχτυα Plankton (Aquatic Research Instrument, 2017)	25
Εικόνα 6. Δίχτυ Bongo (Kc-denmark)	26



1.Εισαγωγή

Η παγκόσμια παραγωγή πλαστικών αυξήθηκε από 1,5 εκατομμύρια τόνους τη δεκαετία του 1950 σε 335 εκατομμύρια τόνους το 2016, ενώ τα πλαστικά αποικοδομούνται, μεταφέρονται και απορρίπτονται σε μια ποικιλία συνθέσεων στο περιβάλλον. Τα πλαστικά σπάνια βιοδιασπώνται, αλλά μέσω διαφορετικών διαδικασιών κατακερματίζονται σε μακροπλαστικά, μικροπλαστικά και νανοπλαστικά, τα οποία έχουν αναφερθεί ως πανταχού παρόντες ρύποι σε όλα τα θαλάσσια περιβάλλοντα παγκοσμίως (Ma et al. 2020). Η τύχη των πλαστικών στο περιβάλλον καθορίζεται από τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της αντοχής, του μικρού βάρους και της ανθεκτικότητας σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος κατασκευής (Kyriakopoulos et al 2022).

Τα μικροπλαστικά, που συνήθως ορίζονται ως πλαστικά σωματίδια μεγέθους μικρότερου των 5 χιλιοστών, έχουν αναδειχθεί ως ένας διάχυτος περιβαλλοντικός ρύπος, διεισδύοντας στα υδάτινα οικοσυστήματα σε όλο τον κόσμο. Η πανταχού παρουσία των πλαστικών αποβλήτων, σε συνδυασμό με τις διαδικασίες υποβάθμισης του περιβάλλοντος, έχει οδηγήσει στον κατακερματισμό μεγαλύτερων πλαστικών απορριμμάτων σε μικροπλαστικά, τα οποία βρίσκονται τώρα σε ωκεανούς, ποτάμια, λίμνες, ακόμη και στα πιο απομακρυσμένα υδάτινα ενδιαίτηματα.

Η προέλευση των μικροπλαστικών ποικίλη και προέρχεται τόσο από πρωτογενείς πηγές, όπως τα καλλυντικά και τα βιομηχανικά υλικά, όσο και από δευτερογενείς πηγές, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της διάσπασης μεγαλύτερων πλαστικών αντικειμένων. Η ανθεκτικότητα και η μακροζωία αυτών των σωματιδίων, σε συνδυασμό με το μικρό τους μέγεθος, τα καθιστούν μια ιδιαίτερα ύπουλη μορφή ρύπανσης. Μόλις εισαχθούν στο υδάτινο περιβάλλον, τα μικροπλαστικά μπορούν να προσληφθούν από ένα ευρύ φάσμα οργανισμών, από το πλαγκτόν έως τα θαλάσσια θηλαστικά, οδηγώντας σε φυσικές, χημικές και βιολογικές επιπτώσεις που μπορούν να διαπεράσουν την τροφική αλυσίδα και έχουν την δυνατότητα να προκαλέσουν βλάβη στους υδρόβιους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένης της φλεγμονής, της μειωμένης σίτισης και της αλλοιωμένης συμπεριφοράς. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μπορούν να απορροφήσουν και να συγκεντρώσουν περιβαλλοντικούς ρύπους, όπως έμμοιους οργανικούς ρύπους (POP), βαρέα μέταλλα και παθογόνους οργανισμούς, αυξάνοντας ενδεχομένως την τοξικότητά τους.

Η κλιμακούμενη παρουσία μικροπλαστικών στο υδάτινο περιβάλλον και οι πιθανές επιπτώσεις τους στα υδάτινα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία απαιτούν πλήρη κατανόηση αυτού του ζητήματος. Στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι:



1. Η περιγραφή των διάφορων τύπων μικροπλαστικών που βρίσκονται στα υδάτινα συστήματα, των φυσικών και χημικών τους ιδιοτήτων και των πηγών από τις οποίες προέρχονται.
2. Η αξιολόγηση των οικολογικών επιπτώσεων των μικροπλαστικών στους υδρόβιους οργανισμούς και τα οικοσυστήματα, συμπεριλαμβανομένης της κατάποσης, της εμπλοκής και της δυνατότητας των μικροπλαστικών να δρουν ως φορείς άλλων ρύπων.
3. Η διερεύνηση των πιθανών κινδύνων που ενέχουν τα μικροπλαστικά για την ανθρώπινη υγεία μέσω της έκθεσης μέσω της τροφικής αλυσίδας και άλλων οδών.
4. Η ανασκόπηση των μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση, ταυτοποίηση και ποσοτικοποίηση των μικροπλαστικών, επισημαίνοντας τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς των διαφόρων προσεγγίσεων.
5. Ο εντοπισμός κενών στην τρέχουσα έρευνα που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων της ρύπανσης από μικροπλαστικά.
6. Να συζητηθούν οι επιπτώσεις των ευρημάτων στην πολιτική και τη διαχείριση, συμπεριλαμβανομένων των στρατηγικών μετριασμού, των ρυθμιστικών προσεγγίσεων και των προσπαθειών δημόσιας εκπαίδευσης.
7. Να προταθούν κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα που μπορούν να παράσχουν βαθύτερες γνώσεις σχετικά με τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών και να ενημερώσουν πιο αποτελεσματικές απαντήσεις σε αυτήν την περιβαλλοντική πρόκληση.

Με την επίτευξη αυτών των στόχων, η παρούσα πτυχιακή θα συμβάλει στο σύνολο των γνώσεων σχετικά με τα μικροπλαστικά στα υδάτινα περιβάλλοντα και θα υποστηρίξει την ανάπτυξη στρατηγικών για τον μετριασμό αυτού του πιεστικού περιβαλλοντικού ζητήματος.

1.1. Μικροπλαστικά

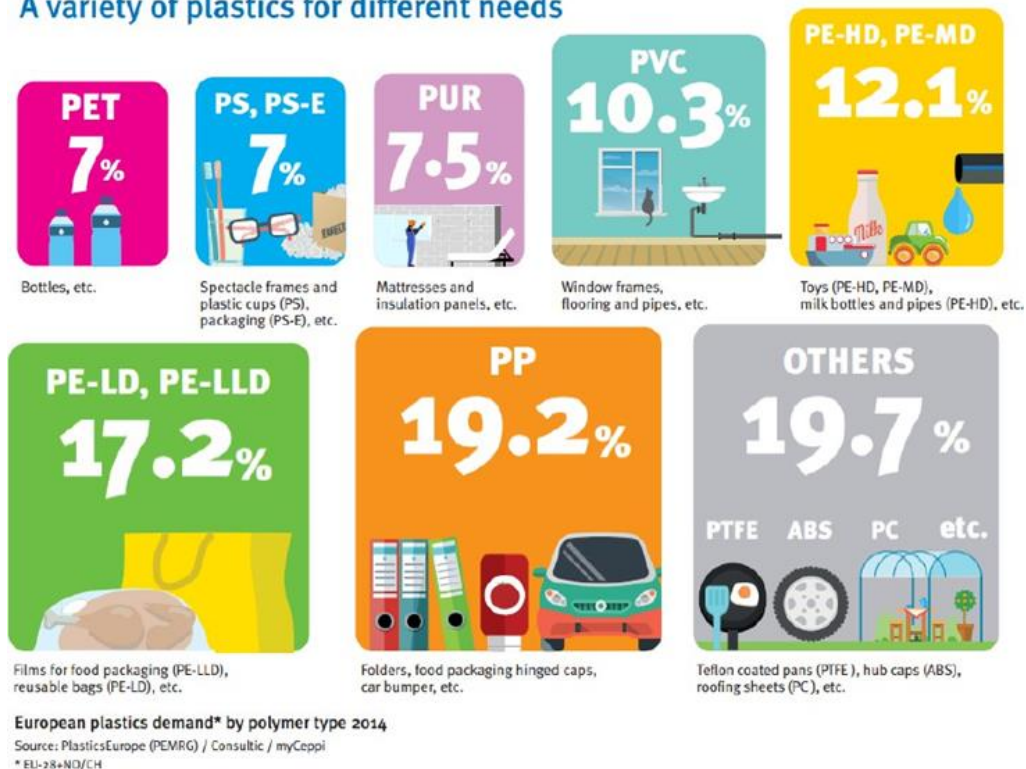
Τα μικροπλαστικά είναι μια μορφή πλαστικής ρύπανσης που χαρακτηρίζεται από το μικρό τους μέγεθος, συνήθως λιγότερο από 5 χιλιοστά σε διάμετρο. Κατηγοριοποιούνται με βάση το μέγεθος, το σχήμα, τη σύνθεση και την προέλευσή τους. Ο ορισμός των μικροπλαστικών είναι ζωτικής σημασίας για την τυποποίηση των ερευνητικών μεθοδολογιών και για κανονιστικούς σκοπούς. Αυτή η ενότητα της πτυχιακής θα διερευνήσει τους διάφορους ορισμούς και ταξινομήσεις των μικροπλαστικών όπως αναγνωρίζονται από επιστημονικούς φορείς και ρυθμιστικούς φορείς.

Το μέγεθος των μικροπλαστικών είναι το κύριο χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται για τον ορισμό τους. Το ανώτατο όριο μεγέθους συμφωνείται γενικά ως 5 χιλιοστά, αλλά υπάρχει μεταβλητότητα στο κατώτερο όριο μεγέθους, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από 1 μικρόμετρο έως 1 χιλιοστό, ανάλογα με την εν λόγω μελέτη ή κανονισμό. Τα μικροπλαστικά μπορούν να πάρουν διάφορα σχήματα, συμπεριλαμβανομένων ινών, θραυσμάτων, σφαιριδίων (όπως

γνωστών ως nurdles), μεμβρανών και αφρών. Κάθε σχήμα προέρχεται από διαφορετικές πηγές και έχει διαφορετικές περιβαλλοντικές συμπεριφορές και επιπτώσεις (Cole et al., 2011).

Τα μικροπλαστικά αποτελούνται από μια ποικιλία τύπων πολυμερών, όπως πολυαιθυλένιο (PE), πολυπροπυλένιο (PP), πολυστυρένιο (PS) και τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και έχουν λιπόφιλη φύση, δηλαδή προσκολλώνται με ευκολία στην επιφάνειά τους επιβλαβή και τοξικά χημικά από το θαλάσσιο περιβάλλον. Πρόσθετα και πλαστικοποιητές μπορεί όπως να υπάρχουν, επηρεάζοντας την πυκνότητα, την ανθεκτικότητα και την τοξικότητα των σωματιδίων (Rochman et al., 2013). Η φύση των πολυμερών από τα οποία αποτελούνται τα μικροπλαστικά παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην κατανόηση της προέλευσής τους, στην τύχη τους στο περιβάλλον και την επιρροή που έχουν στο οικοσύστημα. Τα χαρακτηριστικά των πολυμερών επηρεάζουν την συμπεριφορά των μικροπλαστικών και την αλληλεπίδραση τους με το περιβάλλον (Andrady A., 2017).

A variety of plastics for different needs



Εικόνα 1. Απαιτήσεις και χρήσεις διαφορετικών τύπων πλαστικού στην Ευρώπη για το 2014 (PlasticsEurope, 2015)

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά πλαστικών και επιδράσεις στην συμπεριφορά τους (Πηγή : Andrady A.,2017)

Χαρακτηριστικά	Επιρροή στη συμπεριφορά των μικροπλαστικών	Σχόλια
1. Πυκνότητα	Η πλευστότητα του μικροπλαστικού καθορίζει σε ποιο ύψος της υδάτινης στήλης θα βρεθεί.	Οι πυκνότητες των κλάσεων των πλαστικών είναι γενικά γνωστές αλλά μπορούν να τροποποιηθούν από πρόσθετα υλικά καθώς και από επιφανειακούς μολυσματικούς παράγοντες.
2. Μερική κρυσταλλικότητα	Ο βαθμός κρυσταλλικότητας καθορίζει την ευκολία οξειδωτικής αποδόμησης και κατακερματισμού κατά τη διάρκεια των καιρικών συνθηκών.	Υπάρχουν γενικά εύρη τιμών για διαφορετικά πλαστικά, αλλά αυτά μπορεί να αλλάξουν με βάση το ιστορικό δειγμάτων
3. Αντοχή στην οξείδωση ή αντοχή στις καιρικές συνθήκες	Οι χημικές δομές καθορίζουν πόσο εύκολα οξειδώσιμο θα είναι το πλαστικό στο περιβάλλον. Ο κατακερματισμός είναι συνέπεια της εκτεταμένης οξειδωτικής αποδόμησης.	Η ευκολία οξείδωσης που υποδηλώνει η χημική δομή μπορεί να είναι πολύ διαφορετική στα σύνθετα πλαστικά που περιέχουν σταθεροποιητές και πρόσθετα.
4. Βιοδιασπασιμότητα	Καθορίζει το ρυθμό ανοργανοποίησης και την πιθανή μερική απομάκρυνση των πλαστικών από τη στήλη νερού ή το ίζημα	Τα κοινά πλαστικά είναι γενικά μη βιοδιασπώμενα. Εξαιρέσεις υπάρχουν στα συνθετικά πλαστικά καθώς και στα βιοπολυμερή.
5. Υπολειμματικό μονομερές	Η τοξικότητα των παραμένων μονομερών που διαρρέουν από τα μικροπλαστικά σε θαλάσσιους	Τόσο τα επίπεδα υπολειμματικού μονομερούς στα κοινά πλαστικά όσο και οι



Χαρακτηριστικά	Επιρροή στη συμπεριφορά των μικροπλαστικών	Σχόλια
	οργανισμούς που καταναλώνουν πλαστικά.	τοξικότητές τους είναι αξιόπιστα γνωστά.
6. Ιδιότητες Μεταφοράς	Η βιοδιαθεσιμότητα των παραμένων μονομερών, προσθέτων και οργανικών ρύπων που έχουν απορροφηθεί από τα μικροπλαστικά εξαρτάται από τις ταχύτητες διάλυσής τους στο περιβάλλον του γαστρεντερικού συστήματος.	Οι ιδιότητες είναι γνωστές για τις ρητίνες, αλλά μπορούν να αλλάξουν επειδή ο βαθμός κρυσταλλικότητας μπορεί να ποικίλει.
7. Πρόσθετες ουσίες	Η συγκέντρωση και η τοξικότητα των προσθέτων στα μικροπλαστικά μπορεί να συμβάλλει στις αρνητικές επιπτώσεις στα είδη που καταναλώνουν τα μικροπλαστικά.	Η χημεία, τα επίπεδα χρήσης στα πλαστικά και οι τοξικότητες, είναι γενικά γνωστά. Ωστόσο, αυτά τα επίπεδα για τους ενδοκρινικούς διαταράκτες δεν είναι αξιόπιστα γνωστά.
8. Ιδιότητες επιφάνειας	Ο ρυθμός ρύπανσης των θραυσμάτων καθορίζει τα ποσοστά διάβρωσης και βύθισης των μικροπλαστικών.	Οι ιδιότητες της επιφάνειας και τα ποσοστά ρύπανσης για τα κοινά πλαστικά είναι γνωστά.

Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των μικροπλαστικών μπορούν να παίξουν έναν σημαντικό ρόλο στην κίνησή τους στο θαλάσσιο περιβάλλον και την αλληλεπίδρασή τους με τα οργανισμικά και χημικά συστατικά τους. Για παράδειγμα, τα μικροπλαστικά που έχουν σχήμα ίνας μπορεί να έχουν μεγαλύτερη πλευστότητα και μικρότερη ταχύτητα καθίζησης σε σχέση με τα σφαιρικά μικροπλαστικά με ίδια πυκνότητα και όγκο. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τον χρόνο που παραμένουν στην επιφάνεια του νερού και τη διανομή τους στο περιβάλλον

Επιπλέον, τα μικροπλαστικά με μεγάλη επιφάνεια σε σχέση με τον όγκο τους, όπως οι ίνες και ο αφρός, μπορεί να παρέχουν μεγαλύτερες επιφάνειες για την πρόσκληση οργανικής ύλης και



την ανάπτυξη βιολογικών κοινοτήτων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη ενσωμάτωση τους στον πυθμένα του ωκεανού ή σε άλλα βυθιζόμενα υποστρώματα με πιο γρήγορους ρυθμούς καθίζησης. Κατά συνέπεια, η κατανόηση αυτών των χαρακτηριστικών είναι σημαντική για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς και των επιπτώσεων των μικροπλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον (Ryan, 2015).

Τα μικροπλαστικά ταξινομούνται σε πρωτογενείς και δευτερογενείς κατηγορίες με βάση την προέλευσή τους. Τα πρωτογενή μικροπλαστικά κατασκευάζονται για να έχουν μικροσκοπικό μέγεθος για χρήση σε καλλυντικά, τα μικροσφαιρίδια αυτά που περιέχονται σε αντικείμενα καθημερινής χρήσης όπως, π.χ. οδοντόκρεμες, αφρόλουτρα, αποσμητικά, μάσκαρες, κρέμες ξυρίσματος, αντηλιακά, βαφές μαλλιών και νυχιών και μείκ-απ, αμέσως μετά τη χρήση καταλήγουν στο σιφόνι και από εκεί στον αποχετευτικό δίκτυο (Castaneda et al., 2014; Fendall and Sewell, 2009; Cole et al., 2011; Costa et al., 2010) Guin et al., 2015).

Πίνακας 1.2. Πρωτογενή μικροπλαστικά

Πρωτογενή μικροπλαστικά
Προϊόντα προσωπικής φροντίδας που περιέχουν μικροπλαστικά για απολέπιση (scrubs)
Προϊόντα καθημερινής χρήσης όπως οδοντόκρεμες, αφρόλουτρα, κρέμες ξυρίσματος, αντηλιακά
Προπαρασκευασμένα πλαστικά σε μορφή σκόνης ή σφαιριδίων
Ειδικά χημικά με πλαστικές μικροχάντρες για την ανίχνευση αερίου και πετρελαίου

Τα δευτερογενή μικροπλαστικά ορίζονται ως τα θραύσματα μεγαλύτερων πλαστικών αντικειμένων που υφίστανται κατακερματισμό όταν βρίσκονται τόσο στο θαλάσσιο όσο και στο χερσαίο περιβάλλον (Thompson et al., 2004, Ryan et al., 2009). Τα δευτερογενή μικροπλαστικά μπορούν να προκύψουν από τη χρήση ρούχων που αποτελούνται από πολυεστέρα και νάυλον και ειδικότερα κατά το πλύσιμο τους όπου το ρούχο φθείρεται και δημιουργούνται μικροπλαστικά σε μορφή μικρών ινών (Falco et al., 2018).

Σε προσομοίωση πλύσης σε οικιακό πλυντήριο που διεξήχθη σε εργαστήριο βρέθηκαν τεράστιες ποσότητες μικροπλαστικών ινών στην αποχέτευση (Hernander et al., 2017). Έχει υπολογιστεί ότι το 2013 παράχθηκαν 54,4 εκατομμύρια τόνοι συνθετικών ινών, ενώ το 2011 από πείραμα που διεξήχθη από τους Brown et al. ποσοτικοποιήθηκε ο αριθμός των ινών που παράγονται μετά από κάθε πλύσιμο σε 120 με 300 ίνες ανά λίτρο ή πάνω από 1900 ίνες ανά πλύση. Επίσης αποδείχθηκε ότι η ποσότητα των μικροπλαστικών στην αποχέτευση είναι μεγαλύτερη όταν χρησιμοποιείται απορρυπαντικό από όταν δεν χρησιμοποιείται (Pirc et al., 2016)

Πίνακας 1.3. Δευτερογενή Μικροπλαστικά

Δευτερογενή Μικροπλαστικά
Χρήση πλαστικών λιπασμάτων στις γεωργικές δραστηριότητες
Χρήση συνθετικών για την βελτίωση του εδάφους
Απώλεια πλαστικών υλικών κατά τις οικοδομικές εργασίες
Ίνες από φθορά συνθετικών υφασμάτων κατά την πλύση
Απώλεια πλαστικών κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών
Απώλεια αποβλήτων κατά την συλλογή τους από χωματερές και εγκαταστάσεις ανακύκλωσης
Απώλεια και απόρριψη πλαστικού εξοπλισμού από αλιευτικά καΐκια
Απώλεια και απόρριψη πλαστικού εμπορεύματος από εμπορικά πλοία

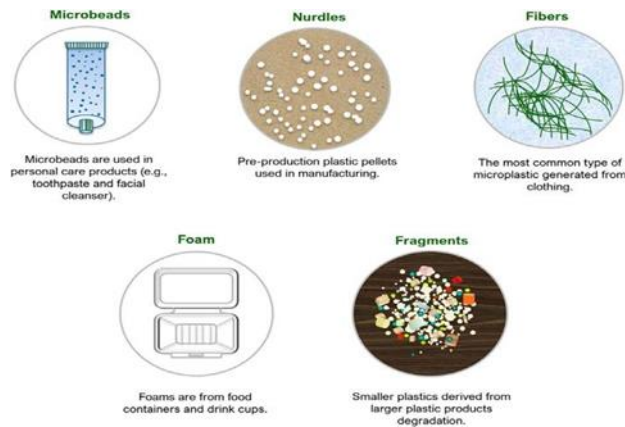
Μια βασική πτυχή των μικροπλαστικών είναι η περιβαλλοντική τους εμμονή. Σε αντίθεση με τα φυσικά υλικά, τα μικροπλαστικά δεν βιοδιασπώνται εύκολα, οδηγώντας στη συσσώρευσή τους στο περιβάλλον με την πάροδο του χρόνου. Η εμμονή αυτή αποτελεί μακροπρόθεσμη πρόκληση για τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία (Andrady, 2011).

Διάφοροι διεθνείς και εθνικοί οργανισμοί έχουν αναπτύξει τους δικούς τους ορισμούς των μικροπλαστικών για σκοπούς παρακολούθησης και κανονιστικούς σκοπούς. Αυτοί οι ορισμοί μπορούν να επηρεάσουν τον τρόπο διαχείρισης και ελέγχου των μικροπλαστικών σε διαφορετικές δικαιοδοσίες.

1.2. Τύποι μικροπλαστικών

Τα μικροπλαστικά είναι μια ομάδα ρύπων που ποικίλλουν ευρέως ως προς το σχήμα, το μέγεθος, τη σύνθεση και το χρώμα. Αυτή η ποικιλομορφία είναι αποτέλεσμα των πολυάριθμων πηγών και διαδικασιών που παράγουν μικροπλαστικά. Σε αυτή την ενότητα, θα κατηγοριοποιήσουμε και θα περιγράψουμε τους διαφορετικούς τύπους μικροπλαστικών που βρίσκονται συνήθως σε υδάτινα περιβάλλοντα (Γκουλέτσα, 2022; Καλαρέμας, 2019).

Τα μικροπλαστικά έρχονται σε διάφορα σχήματα, συμπεριλαμβανομένων θραυσμάτων, ινών, μεμβρανών, αφρών και σφαιριδίων ή χάντρες (Καλαρέμας, 2019).. Το σχήμα μπορεί να επηρεάσει την κίνηση του μικροπλαστικού στο περιβάλλον και την πιθανότητα κατάποσής του από οργανισμούς. Για παράδειγμα, οι ίνες αποβάλλονται κυρίως από συνθετικά υφάσματα όπως νάilon και πολυεστέρα κατά τη διάρκεια του πλυσίματος είναι ένας κοινός τύπος μικροπλαστικών που βρίσκονται σε θαλάσσια περιβάλλοντα και μπορούν εύκολα να καταναλωθούν από τη θαλάσσια ζωή (Browne et al., 2011).



Εικόνα 2. Κατηγορίες και πηγές μικροπλαστικών στο περιβάλλον. (Πηγή: Wu et al., 2019)

Τα θραύσματα πρόκειται για κομμάτια ακανόνιστου σχήματος που προκύπτουν από τη διάσπαση μεγαλύτερων πλαστικών αντικειμένων. Μπορούν να ποικίλουν σε μεγάλο βαθμό σε μέγεθος και βρίσκονται συχνά στις ακτές και στην ανοιχτή θάλασσα. Οι χάντρες πρόκειται για μικρά, σφαιρικά πλαστικά που συχνά προστίθενται σε προϊόντα προσωπικής φροντίδας ως απολεπιστικά. Μπορούν επίσης να προέρχονται από βιομηχανικές εφαρμογές όπως η αμμοβολή. Οι μεμβράνες είναι λεπτά, εύκαμπτα κομμάτια πλαστικού, όπως αυτά από πλαστικές σακούλες και περιτυλίγματα, μπορούν να διασπαστούν σε μικροπλαστικά που μοιάζουν με μικρότερες μεμβράνες. Τέλος, οι αφροί είναι μικροπλαστικά από αφρώδη πλαστικά, όπως ο αφρός πολυστερίνης που χρησιμοποιείται στη συσκευασία και τη μόνωση, μπορούν να διασπαστούν σε μικρά σωματίδια (Wright et al., 2013).

Τα μικροπλαστικά χαρακτηρίζονται επίσης από το μέγεθος τους. Τα μεγάλα μικροπλαστικά γενικά ορίζονται ως εκείνα που πλησιάζουν το ανώτατο όριο μεγέθους των 5 mm. Ενώ, τα μικρά μικροπλαστικά είναι πιο κοντά στο χαμηλότερο όριο μεγέθους και μπορεί να απαιτούν πιο προηγμένες τεχνικές ανίχνευσης και ανάλυσης. Ακόμη, η σύνθεση τους ποικίλει, υπάρχουν μικροπλαστικά από Πολυαιθυλένιο (PE) που είναι κοινά σε πλαστικές σακούλες και φιάλες, τα θραύσματα PE μπορούν να παραμείνουν στο περιβάλλον για μεγάλα χρονικά διαστήματα, από Πολυπροπυλένιο (PP), το οποίο συχνά χρησιμοποιείται σε συσκευασίες και σχοινιά, το PP μπορεί επίσης να βρεθεί ως μικροπλαστικό σε υδάτινα περιβάλλοντα, το Πολυστυρένιο (PS) που χρησιμοποιείται σε δοχεία και συσκευασίες τροφίμων μιας χρήσης, το PS που μπορεί να διασπαστεί σε μικρές χάντρες και θραύσματα. Επίσης, μπορεί να είναι από Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) το οποίο συνήθως χρησιμοποιείται σε περιέκτες υφασμάτων και ποτών, οι ίνες και τα θραύσματα PET ανιχνεύονται συχνά σε δείγματα νερού και από άλλα πολυμερή τα οποία αποτελούνται από μια ποικιλία άλλων πλαστικών όπως PVC, PA και ακρυλικό, το καθένα με τις δικές του ιδιότητες και περιβαλλοντικές συμπεριφορές (Rochman et al., 2013).

Το χρώμα των μικροπλαστικών μπορεί να κυμαίνεται από διαφανές έως οποιοδήποτε χρώμα του φάσματος, ανάλογα με την αρχική χρήση του πλαστικού και την παρουσία χρωστικών



ουσιών. Το χρώμα μπορεί να διαδραματίσει ρόλο στην οπτική ελκυστικότητα των μικροπλαστικών στους οργανισμούς, επηρεάζοντας ενδεχομένως τα ποσοστά κατάποσης. Τα διαφανή μικροπλαστικά είναι συχνά πιο δύσκολο να ανιχνευθούν και μπορεί να προέρχονται από αντικείμενα όπως μπουκάλια νερού και συσκευασίες τροφίμων. Από την άλλη τα χρωματιστά μικροπλαστικά μπορούν να προέρχονται από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των καταναλωτικών προϊόντων και των βιομηχανικών αποβλήτων, και οι χρωστικές τους μπορεί να ενέχουν πρόσθετους περιβαλλοντικούς κινδύνους (Wright et al., 2013).

Η κατανόηση των τύπων μικροπλαστικών είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση των πηγών, των μηχανισμών μεταφοράς, της περιβαλλοντικής μοίρας και των πιθανών επιπτώσεων στην υδρόβια ζωή και την ανθρώπινη υγεία.

1.3. Πηγές μικροπλαστικών

Τα μικροπλαστικά προέρχονται από διάφορες πηγές, τόσο χερσαίες όσο και θαλάσσιες, και η παρουσία τους στο περιβάλλον προκαλεί αυξανόμενη ανησυχία λόγω της εμμονής τους και των πιθανών επιπτώσεών τους στα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία. Αυτή η ενότητα θα περιγράψει τις πρωτογενείς πηγές μικροπλαστικών και τις οδούς τους στο περιβάλλον.

Η πλειονότητα των μικροπλαστικών στο περιβάλλον πιστεύεται ότι προέρχεται από χερσαίες πηγές. Αυτά περιλαμβάνουν κατακερματισμός πλαστικών προϊόντων, αλιευτικά εργαλεία, θαλάσσιες μεταφορές, Μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (WWTP), Ατμοσφαιρική απόθεση και γεωργικές πηγές.

Τα πλαστικά σφαιρίδια ρητίνης παράγονται και στη συνέχεια μεταφέρονται σε εργοστάσια όπου μετασχηματίζονται σε διάφορα πλαστικά προϊόντα. Κατά τη διαδικασία μεταφοράς, υπάρχει ο κίνδυνος να χαθούν σφαιρίδια στο περιβάλλον, είτε στην ξηρά είτε στη θάλασσα. Επιπλέον, κατά την επεξεργασία των προϊόντων, οι διαδικασίες καθαρισμού των μηχανημάτων μπορεί να προκαλέσουν περαιτέρω απώλειες ρητίνης. Για την αποφυγή τέτοιων απωλειών, συνιστάται η χρήση φίλτρων και η ακριβής τήρηση διαδικασιών καθαρισμού. Κατά την παραγωγή, η κοπή των πλαστικών μπορεί να δημιουργήσει θραύσματα, ενώ η χρήση τρυπανιών παράγει μικροίνες που εκλύονται στον αέρα ως σκόνη, σύμφωνα με την έκθεση του GESAMP το 2016.

Τα μεγαλύτερα πλαστικά απόβλητα, όπως συσκευασίες, σακούλες και μπουκάλια, μπορούν να διασπαστούν σε μικροπλαστικά μέσω της έκθεσης σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η υπεριώδης ακτινοβολία και η φυσική τριβή (Barnes et al.), μικροπλαστικά σε δρόμους, τα οποία μπορούν να μεταφερθούν σε υδάτινα περιβάλλοντα με απορροή (Wagner et al.). Οι θαλάσσιες δραστηριότητες συμβάλλουν επίσης στο φορτίο μικροπλαστικών στους ωκεανούς και τις θάλασσες. Τα χαμένα ή απορριπτόμενα αλιευτικά εργαλεία, όπως τα δίχτυα και τα σχοινιά, μπορούν να διασπαστούν σε μικροπλαστικά με την πάροδο του χρόνου (Gregory, 2009). Οι δραστηριότητες ναυσιπλοΐας μπορούν να οδηγήσουν σε τυχαία απελευθέρωση



μικροπλαστικών μέσω τεμαχισμού χρωμάτων και απώλειας φορτίου (Law et al., 2010). Οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν σημαντική οδό εισόδου των μικροπλαστικών σε υδάτινα περιβάλλοντα. Ενώ μπορούν να αφαιρέσουν σημαντική ποσότητα μικροπλαστικών από τα λύματα, δεν έχουν σχεδιαστεί για να εξαλείφουν όλα τα μικροπλαστικά, με αποτέλεσμα την απελευθέρωσή τους σε υδάτινα σώματα (Talvitie et al., 2017). Πρόσφατες μελέτες έχουν εντοπίσει την ατμοσφαιρική εναπόθεση ως μονοπάτι για μικροπλαστικά, με σωματίδια που μεταφέρονται από τον άνεμο και κατακάθονται στις επιφάνειες της γης και του νερού (Dris et al., 2016). Τα μικροπλαστικά μπορούν επίσης να εισαχθούν στο περιβάλλον μέσω γεωργικών πρακτικών, όπως η εφαρμογή ιλύος καθαρισμού λυμάτων ως λίπασμα, το οποίο μπορεί να περιέχει μικροπλαστικά (Corradini et al., 2019).

Η γεωργία μπορεί να συμβάλει στην παραγωγή μικροπλαστικών μέσω της χρήσης πλαστικών στην άρδευση και ως καλύμματα για την προστασία των φυτών. Αυτά τα πλαστικά μπορεί να διασπαστούν σε μικρότερα κομμάτια και να καταλήξουν στο περιβάλλον, ενδεχομένως φτάνοντας μέχρι και τη θάλασσα. Επιπλέον, η χρήση λιπασμάτων ελεγχόμενης αποδέσμευσης (CRF), που περιέχουν πολυμερή επιστρώσεις, μειώνει την ανάγκη για συχνή λίπανση και την ποσότητα λιπασμάτων που χρησιμοποιείται. Ωστόσο, αυτά τα λιπάσματα ενδέχεται να προσθέσουν μικροπλαστικά στο έδαφος και τελικά στα υδάτινα συστήματα, αυξάνοντας τον κίνδυνο για περιβαλλοντική ρύπανση.

2. Κατανομή και συσσώρευση μικροπλαστικών σε υδάτινα περιβάλλοντα

2.1. Παγκόσμια πρότυπα διανομής

Η παγκόσμια κατανομή των μικροπλαστικών σε υδάτινα περιβάλλοντα αντιπροσωπεύει ένα εξαιρετικά σύνθετο φαινόμενο, το οποίο υπόκειται σε ποικίλους παράγοντες. Παράγοντες όπως οι πηγές ρύπανσης, τα περιβαλλοντικά ρεύματα, καθώς και οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των ίδιων των μικροπλαστικών συμβάλλουν στη διαμόρφωση των προτύπων κατανομής.

Σε παγκόσμια κλίμακα, παρατηρείται ότι οι μικροπλαστικοί ρύποι διεισδύουν εκτενώς τόσο στα θαλάσσια όσο και στα συστήματα γλυκού νερού. Οι πηγές ρύπανσης περιλαμβάνουν την απόρριψη πλαστικών συσκευασιών, τα ναυπηγεία, την απόρριψη σκαφών και τις αστικές εκβολές. Ωστόσο, οι ρευματικές και θαλάσσιες ροές παίζουν καίριο ρόλο στη μεταφορά και εξάπλωση αυτών των μικροσωματιδίων σε διάφορες περιοχές του πλανήτη Πατσιαβάς, 2019).



Επιπλέον, οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των μικροπλαστικών, όπως το μέγεθος και η πυκνότητα, επηρεάζουν την πορεία διάχυσής τους. Τα μικροπλαστικά μπορούν να εισχωρούν στα οικοσυστήματα, επηρεάζοντας τη θαλάσσια ζωή και την υδρόβια χλωρίδα.

Συνεπώς, η συνολική κατανόηση των παραπάνω παραγόντων είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση του προβλήματος των μικροπλαστικών, προκειμένου να αναπτυχθούν αποτελεσματικές στρατηγικές πρόληψης και κατάρτισης πολιτικών για την προστασία των υδάτινων περιβαλλόντων.

2.1.1. Θαλάσσια Περιβάλλοντα

Στο θαλάσσιο περιβάλλον, έχουν ανιχνευθεί μικροπλαστικά από τα επιφανειακά ύδατα έως τα βάθη της θάλασσας, συμπεριλαμβανομένων απομακρυσμένων περιοχών μακριά από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Τα ωκεάνια ρεύματα είναι σημαντικές ζώνες συσσώρευσης για πλωτά μικροπλαστικά. Αυτά τα ρεύματα, που βρίσκονται στον Βόρειο Ειρηνικό, τον Νότιο Ειρηνικό, τον Βόρειο Ατλαντικό, τον Νότιο Ατλαντικό και τον Ινδικό Ωκεανό, χαρακτηρίζονται από τα κυκλικά ρεύματά τους που αντλούν συντρίμια από τα γύρω νερά (Lebreton et al., 2018; Πατσιαβάς, 2019).

Πέρα από τα ρεύματα, μικροπλαστικά βρίσκονται επίσης κατά μήκος των ακτών, στη στήλη νερού και μέσα στα ιζήματα του βυθού. Οι παράκτιες περιοχές εμφανίζουν συχνά υψηλότερες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών λόγω της γειννίας με αστικές και βιομηχανικές πηγές, κακαι λόγω ψυχαγωγικών δραστηριοτήτων. Οι υφαλοκρηπίδες μπορούν επίσης να συσσωρεύσουν μικροπλαστικά, τα οποία μεταφέρονται εκεί με διάφορες ωκεανογραφικές διεργασίες (Van Cauwenberghe et al., 2015).

2.1.2. Συστήματα γλυκού νερού

Τα συστήματα γλυκού νερού, συμπεριλαμβανομένων των ποταμών, των λιμνών και των ρευμάτων, δεν είναι μόνο αγωγοί για τα μικροπλαστικά που εισέρχονται στους ωκεανούς, αλλά και οι ίδιοι οι τόποι συσσώρευσης. Οι ποταμοί, ειδικότερα, αποτελούν σημαντικές οδούς για τα μικροπλαστικά που ταξιδεύουν από τις εσωτερικές πηγές στη θάλασσα. Μελέτες έχουν διαπιστώσει ότι τα αστικά ποτάμια τείνουν να έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών, αντανακλώντας την επίδραση των αστικών λυμάτων, της απορροής ομβρίων υδάτων και των βιομηχανικών απορρίψεων (Eerkes-Medrano et al., 2015; Καυάμπελης, 2020).

Οι λίμνες, ειδικά εκείνες που βρίσκονται κοντά σε αστικές περιοχές ή λαμβάνουν εισροές από ποτάμια, μπορούν επίσης να παρουσιάσουν υψηλά επίπεδα μικροπλαστικής μόλυνσης. Η κατανομή εντός αυτών των συστημάτων γλυκού νερού επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ροή του νερού, ο άνεμος και η μορφολογία της λεκάνης απορροής της λίμνης (Free et al., 2014).



2.1.3. Πολικές περιοχές

Οι πολικές περιοχές, που κάποτε θεωρούνταν ανεπηρέαστες, δεν έχουν γλιτώσει από τη ρύπανση από μικροπλαστικά. Έρευνες έχουν δείξει ότι μικροπλαστικά υπάρχουν στους θαλάσσιους πάγους της Αρκτικής και στα γύρω ύδατα, καθώς και σε δείγματα πάγου και ιζημάτων της Ανταρκτικής. Η μεταφορά σε αυτές τις απομακρυσμένες περιοχές διευκολύνεται από τα ωκεάνια ρεύματα μεγάλων αποστάσεων και ενδεχομένως από τις ατμοσφαιρικές μεταφορές (Obbard et al., 2014).

2.1.4. Ατμοσφαιρική Εναπόθεση

Πρόσφατες μελέτες έχουν αναδείξει τον ρόλο της ατμόσφαιρας στη μεταφορά μικροπλαστικών. Ο άνεμος μπορεί να μεταφέρει μικροπλαστικά, ιδιαίτερα τα μικρότερα και ελαφρύτερα σωματίδια, σε μεγάλες αποστάσεις. Η ατμοσφαιρική εναπόθεση μπορεί να εισαγάγει μικροπλαστικά τόσο σε θαλάσσια όσο και σε χερσαία περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων τοποθεσιών μακριά από άμεσες πηγές ρύπανσης (Dris et al., 2016).

2.1.5. Βαθιά θάλασσα

Η βαθιά θάλασσα είναι η τελική καταβόθρα για πολλά μικροπλαστικά, με σωματίδια που βρίσκονται σε βάθη που υπερβαίνουν τα 1.000 μέτρα. Η κατανομή σε αυτά τα βάθη δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητή, αλλά είναι σαφές ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να διεισδύσουν ακόμη και στα πιο απομακρυσμένα και απρόσιτα μέρη του ωκεανού. Τα ιζήματα βαθέων υδάτων έχουν αναγνωριστεί ως σημαντικές αποθήκες για τη συσσώρευση μικροπλαστικών, με την έρευνα να δείχνει ότι αυτά τα περιβάλλοντα μπορεί να φιλοξενούν σημαντικές ποσότητες αυτών των ρύπων (Woodall et al., 2014).

Η παγκόσμια κατανομή των μικροπλαστικών αποτελεί απόδειξη της επιμονής τους και της έκτασης των ανθρώπινων επιπτώσεων στο περιβάλλον. Η ευρεία παρουσία αυτών των σωματιδίων σε όλα τα υδάτινα περιβάλλοντα υπογραμμίζει την ανάγκη συντονισμένης παγκόσμιας αντίδρασης για τη διαχείριση και τον μετριασμό της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Οι προσπάθειες παρακολούθησης και έρευνας πρέπει να συνεχιστούν για την ακριβέστερη χαρτογράφηση των προτύπων κατανομής και την κατανόηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων στα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία.



2.2. Μηχανισμοί μεταφοράς

Η κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς των μικροπλαστικών είναι απαραίτητη για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυτά τα σωματίδια κινούνται και συσσωρεύονται σε διαφορετικά υδάτινα περιβάλλοντα. Αυτή η ενότητα εμβαθύνει στις διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που επηρεάζουν την κατανομή των μικροπλαστικών.

2.2.1. Φυσικές Μεταφορές

Οι φυσικές διεργασίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην κίνηση των μικροπλαστικών. Τα ωκεάνια και ποτάμια ρεύματα είναι οι κύριες κινητήριες δυνάμεις των μεταφορών μεγάλων αποστάσεων στα υδάτινα συστήματα. Τα επιφανειακά ρεύματα μπορούν να μεταφέρουν επιπλέοντα μικροπλαστικά στους ωκεανούς, οδηγώντας συχνά στο σχηματισμό ζωνών συσσώρευσης σε γύρους και κατά μήκος των ακτών (Eriksen et al., 2014). Στα ποτάμια, η ταχύτητα ροής και οι αναταράξεις μπορούν να επηρεάσουν την κατάντη μεταφορά μικροπλαστικών, με τα βραδύτερα κινούμενα νερά να οδηγούν συχνά σε αυξημένη απόθεση (Lebreton et al., 2017).

Η επιφανειακή κυκλοφορία που καθοδηγείται από τον άνεμο είναι ένας άλλος φυσικός μηχανισμός που μπορεί να επηρεάσει την κατανομή των μικροπλαστικών, ιδιαίτερα σε λίμνες και παράκτιες περιοχές. Τα μοτίβα ανέμου μπορούν να προκαλέσουν συσσώρευση μικροπλαστικών σε ορισμένες περιοχές ή να εναποτεθούν στις ακτές (Zhao et al., 2014).

2.2.2. Μεταφορά χημικών

Οι χημικές ιδιότητες των μικροπλαστικών, όπως η πυκνότητα και η υδροφοβία, επηρεάζουν την άνωση και την ικανότητά τους να προσροφώνται σε άλλα σωματίδια. Τα πυκνότερα πλαστικά μπορεί να βυθιστούν και να ενσωματωθούν στα ιζήματα, ενώ τα λιγότερο πυκνά πλαστικά μπορούν να παραμείνουν αιωρούμενα στη στήλη νερού ή να επιπλέουν στην επιφάνεια. Η αλληλεπίδραση των μικροπλαστικών με τη φυσική οργανική ύλη και τα ορυκτά μπορεί επίσης να επηρεάσει τη μεταφορά και την τύχη τους σε υδάτινα περιβάλλοντα (Andrady, 2011).

2.2.3. Βιολογική μεταφορά

Οι οργανισμοί μπορούν ακούσια να διευκολύνουν τη μεταφορά μικροπλαστικών μέσω της κατάποσης. Τα μικροπλαστικά που προσλαμβάνονται από υδρόβια ζώα μπορούν να εκκρίνονται σε διαφορετικές τοποθεσίες, συμβάλλοντας στην εξάπλωσή τους. Επιπλέον, η βιορύπανση, η συσσώρευση οργανισμών στην επιφάνεια των μικροπλαστικών, μπορεί να μεταβάλει την



άνωση και τους ρυθμούς βύθισης αυτών των σωματιδίων, οδηγώντας ενδεχομένως στην κάθετη μεταφορά τους εντός της στήλης νερού (Reisser et al., 2014).

2.2.4. Καθίζηση και επαναιώρηση

Η καθίζηση είναι η διαδικασία με την οποία τα μικροπλαστικά κατακάθονται από τη στήλη νερού και συσσωρεύονται στα ιζήματα. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω της αυξημένης πυκνότητας σωματιδίων από τη βιορύπανση ή τη συσσωμάτωση με άλλα υλικά. Η επαναιώρηση μπορεί να συμβεί σε περιοχές με ισχυρά ρεύματα ή κυματική δράση, όπου τα καθιζάνοντα μικροπλαστικά επανεισάγονται στη στήλη νερού (Kane and Clare, 2019).

Η μεταφορά μικροπλαστικών σε υδάτινα περιβάλλοντα διέπεται από μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών. Οι μηχανισμοί αυτοί καθορίζουν όχι μόνο τη χωρική κατανομή των μικροπλαστικών, αλλά και τις πιθανές επιπτώσεις τους στους υδρόβιους οργανισμούς και τα οικοσυστήματα. Η περαιτέρω έρευνα σχετικά με αυτούς τους μηχανισμούς μεταφοράς είναι ζωτικής σημασίας για την πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς των μικροπλαστικών και για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών μετριασμού.

2.3. Ζώνες συσσώρευσης

Τα μικροπλαστικά είναι γνωστό ότι συσσωρεύονται σε διάφορα περιβάλλοντα, δημιουργώντας ζώνες όπου η συγκέντρωσή τους είναι σημαντικά υψηλότερη από ό, τι στις γύρω περιοχές. Αυτές οι ζώνες είναι κρίσιμες για την κατανόηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μικροπλαστικών και για την εστίαση των προσπαθειών αποκατάστασης. Ακολουθούν μερικές από τις βασικές ζώνες συσσώρευσης μικροπλαστικών:

2.3.1. Θαλάσσια ρεύματα

Οι ωκεάνιοι γύροι, οι οποίοι είναι μεγάλα συστήματα κυκλικών ρευμάτων, είναι διαβόητοι για τη συσσώρευση πλωτών συντριμμιών, συμπεριλαμβανομένων των μικροπλαστικών. Οι ζώνες σύγκλισης στο κέντρο αυτών των γύρων, όπως το Great Pacific Garbage Patch, έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών λόγω των συγκλινόντων ρευμάτων που παγιδεύουν και συγκεντρώνουν τα συντρίμια (Eriksen et al., 2014).

2.3.2. Παράκτιες περιοχές

Οι παραλίες και τα παράκτια ιζήματα είναι κοινές ζώνες συσσώρευσης μικροπλαστικών. Η δράση των κυμάτων, οι παλίρροιες και τα παράκτια ρεύματα μπορούν να εναποθέσουν



μικροπλαστικά στις ακτές, οδηγώντας σε σημαντική συσσώρευση, ειδικά σε αστικές παραλίες ή κοντά στις εκβολές ποταμών (Browne et al., 2011).

2.3.3. Εκβολές ποταμών

Τα ποτάμια μεταφέρουν μικροπλαστικά από εσωτερικές πηγές και συχνά τα εναποθέτουν στις εκβολές τους. Αυτές οι μεταβατικές ζώνες μεταξύ ποτάμιων και θαλάσσιων οικοσυστημάτων μπορούν να λειτουργήσουν ως καταβόθρες για μικροπλαστικά, παγιδεύοντάς τα σε ιζήματα ή στη στήλη νερού (Schmidt et al., 2017).

2.3.4. Εποχιακά καιρικά φαινόμενα

Τα καιρικά φαινόμενα, όπως οι μουσώνες, οι καταιγίδες και οι εποχιακοί άνεμοι, μπορούν να οδηγήσουν σε χρονικές αλλαγές στις συγκεντρώσεις μικροπλαστικών. Για παράδειγμα, οι έντονες βροχοπτώσεις μπορούν να αυξήσουν την απορροή από αστικές περιοχές, οδηγώντας σε υψηλότερα μικροπλαστικά φορτία που εισέρχονται σε υδάτινα σώματα κατά τη διάρκεια υγρών περιόδων (Barnes et al., 2009). Αντίθετα, οι ήρεμες καιρικές συνθήκες μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα την καθίζηση μικροπλαστικών και τη μείωση των επιφανειακών συγκεντρώσεων.

2.3.5. Ιζήματα βαθέων υδάτων

Τα μικροπλαστικά μπορούν επίσης να συσσωρευτούν σε ιζήματα βαθέων υδάτων. Λόγω του μικρού μεγέθους τους και της ποικίλης πυκνότητάς τους, τα μικροπλαστικά μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλα βάθη, όπου ενσωματώνονται στο βενθικό περιβάλλον, επηρεάζοντας ενδεχομένως τα οικοσυστήματα βαθέων υδάτων (Woodall et al., 2014). Η συσσώρευση μικροπλαστικών στα θαλάσσια ιζήματα ακολουθεί διαφορετικό μοτίβο από εκείνη στα επιφανειακά ύδατα, ίνες εντοπίστηκαν σε ποσότητα έως και 4 φορές μεγαλύτερη στα ιζήματα του Ατλαντικού Ωκεανού, της Μεσογείου και του Ινδικού Ωκεανού σε σύγκριση με τις ποσότητες που έχουν καταγραφεί στα επιφανειακά τους ύδατα (Woodall et al., 2014).

2.3.6. Αρκτικός πάγος

Οι πολικές περιοχές, ιδίως η Αρκτική, έχουν αναγνωριστεί ως σημαντικές καταβόθρες για τα μικροπλαστικά. Ο θαλάσσιος πάγος μπορεί να ενσωματώσει μικροπλαστικά από τη στήλη του νερού και καθώς λιώνει, απελευθερώνει αυτά τα σωματίδια πίσω στον ωκεανό, συμβάλλοντας στη συσσώρευση στα πολικά νερά (Obbard et al., 2014).



2.3.7. Αστικές πλωτές οδοί

Στις αστικές περιοχές, τα μικροπλαστικά μπορούν να συσσωρευτούν στις πλωτές οδούς λόγω της απορροής ομβρίων υδάτων, των απορρίψεων λυμάτων και της δημιουργίας απορριμμάτων. Αυτές οι πλωτές οδοί μπορεί να έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών σε σύγκριση με τις αγροτικές περιοχές λόγω της εγγύτητας σε πηγές ρύπανσης (Horton et al., 2017).

2.4. Εποχιακές και χρονικές διακυμάνσεις

Οι εποχιακές και χρονικές διακυμάνσεις επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή και τη συγκέντρωση των μικροπλαστικών στα υδάτινα περιβάλλοντα. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να αποδοθούν σε αλλαγές στις καιρικές συνθήκες, στους υδρολογικούς κύκλους και στις ανθρώπινες δραστηριότητες, οι οποίες επηρεάζουν την είσοδο και την κίνηση των μικροπλαστικών.

2.4.2. Υδρολογικοί Κύκλοι

Ο υδρολογικός κύκλος διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη μεταφορά μικροπλαστικών. Οι εποχιακές διακυμάνσεις στους ρυθμούς ροής των ποταμών μπορούν να επηρεάσουν την ποσότητα των μικροπλαστικών που μεταφέρονται σε θαλάσσια περιβάλλοντα. Οι υψηλοί ρυθμοί ροής κατά τη διάρκεια της ανοιξιτιάτικης απόψυξης ή των βροχερών περιόδων μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη μεταφορά μικροπλαστικών, ενώ οι χαμηλότεροι ρυθμοί ροής κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων μπορούν να μειώσουν τη μεταφορά και να οδηγήσουν σε συσσώρευση μικροπλαστικών στις κοίτες των ποταμών (Mani et al., 2015).

2.4.3. Ανθρώπινες Δραστηριότητες

Οι εποχιακές διακυμάνσεις στις ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως ο τουρισμός και οι γεωργικές πρακτικές, μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη ρύπανση από μικροπλαστικά. Οι παράκτιες περιοχές ενδέχεται να αντιμετωπίσουν υψηλότερη ρύπανση από μικροπλαστικά κατά τη διάρκεια των τουριστικών περιόδων αιχμής λόγω της αυξημένης ψυχαγωγικής χρήσης και της δημιουργίας απορριμμάτων (Verschoor et al., 2016). Ομοίως, η γεωργική απορροή κατά τη διάρκεια των περιόδων φύτευσης ή συγκομιδής μπορεί να συμβάλει στις χρονικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων μικροπλαστικών σε κοντινά υδατικά συστήματα.



2.4.4. Βιογεωχημικοί κύκλοι

Οι βιογεωχημικές διεργασίες, όπως η αποσύνθεση της οργανικής ύλης και η επαναιώρηση ιζημάτων, μπορούν να παρουσιάσουν εποχιακά μοτίβα που επηρεάζουν την κατανομή των μικροπλαστικών. Για παράδειγμα, οι εποχιακές ανθίσεις φυκιών μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένη βιορύπανση και συσσώματωση μικροπλαστικών, γεγονός που μπορεί να μεταβάλει τα ποσοστά άνωσης και καθίζησης (Long et al., 2015).

Οι εποχιακές και χρονικές διακυμάνσεις είναι κρίσιμοι παράγοντες για την κατανόηση της δυναμικής της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορούν να οδηγήσουν σε διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων μικροπλαστικών και να επηρεάσουν τον κίνδυνο έκθεσης για τους υδρόβιους οργανισμούς. Απαιτείται συνεχής παρακολούθηση και μακροπρόθεσμες μελέτες για την καταγραφή αυτών των παραλλαγών και την πρόβλεψη των πιθανών επιπτώσεων των μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα.

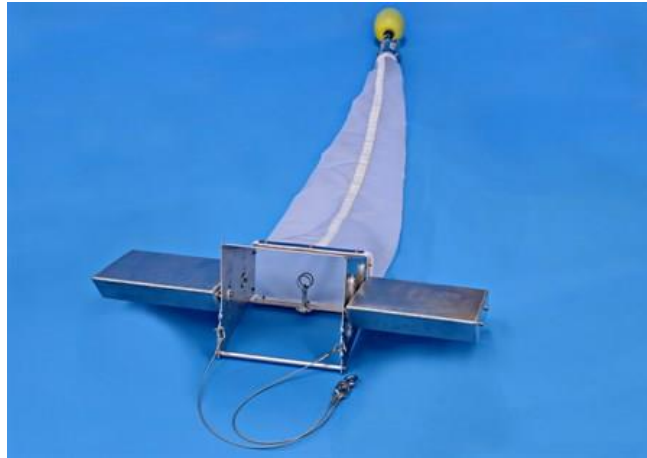
3. Υλικά και Μέθοδοι

3.1. Τεχνικές δειγματοληψίας

Η δειγματοληψία είναι ένα κρίσιμο βήμα για τη μελέτη των μικροπλαστικών σε υδάτινα περιβάλλοντα, καθώς καθορίζει τα δεδομένα που συλλέγονται. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι δειγματοληψίας για τη δέσμευση μικροπλαστικών από διαφορετικές υδρόβιες μήτρες, συμπεριλαμβανομένου του νερού, των ιζημάτων, των ζώντων οργανισμών, ακόμη και των ατμοσφαιρικών σωματιδίων.

Η μελέτη των μικροπλαστικών στο περιβάλλον απαιτεί ένα ευρύ φάσμα τεχνικών δειγματοληψίας, καθεμία από τις οποίες έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίσει τις μοναδικές προκλήσεις που θέτουν τα διαφορετικά ενδιαφέροντα και τα διαφορετικά μεγέθη των μικροπλαστικών. Η δειγματοληψία επιφανειακών υδάτων είναι μια κοινή προσέγγιση όπου χρησιμοποιούνται συσκευές όπως τράτες μάντα (manta) και δίχτυα νεύστον (neuston). Αυτά τα εργαλεία είναι αποτελεσματικά για χρήσεις στην επιφάνεια του νερού, όπου ελαφρύτερα και μικρότερα μικροπλαστικά τείνουν να συσσωρεύονται λόγω των επιφανειακών ρευμάτων που οδηγούνται από τον άνεμο και της δράσης των κυμάτων. Το μέγεθος του πλέγματος αυτών των δικτύων είναι κρίσιμο, καθώς καθορίζει το μικρότερο μέγεθος μικροπλαστικών που μπορούν να συλλεχθούν, που συνήθως κυμαίνονται από 300 έως 500 μικρόμετρα (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

Τα manta nets, τα οποία έχουν λάβει την ονομασία τους από το σχήμα τους που παραπέμπει σε σαλάχι, αποτελούνται από αλουμινένια κατασκευή με αλουμινένια ‘φτερα’ εκατέρωθεν της στην οποία είναι δεμένο ένα δίχτυ με διάμετρο οπών συνήθως 0.333mm. Τα δίχτυα αυτά είναι θεμιτό να χρησιμοποιούνται σε ήρεμα νερά γιατί υπάρχει κίνδυνος τα ψηλά κύματα να προκαλέσουν βλάβη στη συσκευή (Thompson R., 2015)



Εικόνα 3 Δίχτυ Manta (Kc-denmark)

Τα neuston nets αποτελούνται από δύο πλωτήρες στους οποίους παρεμβάλλεται μια μεταλλική κατασκευή από ανοξείδωτο ατσάλι στην οποία τοποθετείται ένα δίχτυ με διάμετρο οπών από 200 έως 500 μm . Ουσιαστικά δημιουργείται μια κατασκευή που παραπέμπει σε καταμαράν για τον λόγο αυτό στις διάφορες βιβλιογραφίες μπορούμε να συναντήσουμε τον όρο “Neuston catamaran”. Αυτή η κατασκευή είναι πιο ανθεκτική στις έντονες καιρικές συνθήκες και μπορεί να λειτουργήσει και σε μέρες με ψηλά κύματα παρουσιάζοντας πλεονέκτημα συγκριτικά με τα δίχτυα manta (Thompson R., 2015)



Εικόνα 4 Δίχτυ Neuston (Environmental-expert)

Τα δίχτυα για πλαγκτόν είναι δίχτυα από νάιλον με μικρότερες διαμέτρους από τα manta και neuston (100μm). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για κατακόρυφη αλλά και για οριζόντια δειγματοληψία. Κατά τη διάρκεια της ρυμούλκησης το δείγμα από πλαγκτόν συγκεντρώνεται στο πίσω μέρος του δικτυού ενώ μετά τη λήξη της δειγματοληψίας το δίχτυ πρέπει να καθαριστεί προσεκτικά έτσι ώστε το σύνολο του πλαγκτόν και των σκουπιδιών που συλλέχθηκαν να βρίσκονται στο πίσω μέρος του. Αυτό είναι ένα σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας διότι εάν μείνουν υπολείμματα, αυτά θα μεταφερθούν στο επόμενο δείγμα και τα αποτελέσματα θα αλλοιωθούν (Thompson R., 2015).



Εικόνα 5 Δίχτυα Plankton (Aquatic Research Instrument, 2017)

Τα δίχτυα ονομάζονται bongo nets είναι δύο δίχτυα πλαγκτόν, δηλαδή δύο μακρόστενα κυκλικά δίχτυα με μικρή διάμετρο σπών (100μm) τα οποία είναι συνδεδεμένα το ένα δίπλα στο άλλο. Τα δίχτυα αυτά ρυμουλκούνται από σκάφη σε μικρές ταχύτητες γιατί οι οπές φράζουν πολύ εύκολα. Επίσης διαθέτουν έναν μετρητή ροής για να μπορεί να υπάρξει μια εκτίμηση του όγκου

νερού που έχει ελεγχθεί ώστε η συγκέντρωση των μικροπλαστικών να μπορεί να εκφραστεί σε mg/m^3 .



Εικόνα 6. Δίκτυο Bongo (Kc-denmark)

3.1.1. Αναδυόμενες τεχνικές

Τα αερομεταφερόμενα μικροπλαστικά αντιπροσωπεύουν έναν άλλο φορέα περιβαλλοντικής μόλυνσης. Δειγματολήπτες αέρα εξοπλισμένοι με φίλτρα χρησιμοποιούνται για τη συλλογή μικροπλαστικών σωματιδίων από την ατμόσφαιρα. Αυτά τα δείγματα είναι σημαντικά για την κατανόηση των οδών μέσω των οποίων τα μικροπλαστικά μπορούν να ταξιδέψουν μεγάλες αποστάσεις και να εναποτεθούν τόσο σε αστικές όσο και σε απομακρυσμένες περιοχές, συμβάλλοντας στην ευρεία κατανομή αυτών των ρύπων (Dris et al., 2016).

Εκτός από αυτές τις μεθόδους, υπάρχουν αναδυόμενες τεχνικές, όπως η τηλεπισκόπηση και οι πρωτοβουλίες επιστήμης των πολιτών, που μπορούν να ενισχύσουν τη χωρική και χρονική ανάλυση της παρακολούθησης των μικροπλαστικών. Η τεχνολογία τηλεπισκόπησης, αν και βρίσκεται ακόμη στο στάδιο ανάπτυξης των μικροπλαστικών, έχει τη δυνατότητα να παρέχει δεδομένα μεγάλης κλίμακας σχετικά με την πλαστική ρύπανση. Τα προγράμματα επιστήμης των πολιτών μπορούν επίσης να επεκτείνουν το γεωγραφικό πεδίο εφαρμογής της δειγματοληψίας εμπλέκοντας το κοινό στις προσπάθειες συλλογής δεδομένων.

Η ανάπτυξη και η βελτίωση των τεχνικών δειγματοληψίας συνεχίζονται, με τους ερευνητές να εργάζονται για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, της ακρίβειας και της συγκρισιμότητας των μικροπλαστικών δεδομένων. Οι διεργαστηριακές μελέτες και η καθιέρωση τυποποιημένων πρωτοκόλλων είναι απαραίτητες για να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα από διαφορετικές μελέτες μπορούν να συγκριθούν και να συντεθούν, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της ρύπανσης από μικροπλαστικά.



Η βελτίωση των τεχνικών δειγματοληψίας μικροπλαστικών περιλαμβάνει επίσης την ανάπτυξη νέων μεθόδων για την ανίχνευση και την ποσοτικοποίηση μικροπλαστικών που είναι μικρότερες από αυτές που μπορούν να συλλάβουν οι τρέχουσες μέθοδοι που βασίζονται στο δίκτυο. Αυτά τα μικρότερα σωματίδια, που συχνά αναφέρονται ως νανοπλαστικά, μπορεί να είναι πιο δύσκολο να απομονωθούν και να αναγνωριστούν λόγω του μεγέθους τους. Προηγμένες τεχνικές όπως η φασματοσκοπία Raman, η φασματοσκοπία υπερύθρων μετασχηματισμού Fourier (FTIR) και η αέρια χρωματογραφία-φασματομετρία μάζας πυρόλυσης (Py-GC / MS) χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ανίχνευσης μικροπλαστικών στο κάτω άκρο του φάσματος μεγέθους (Shim et al., 2017).

Επιπλέον, η χρήση παραγόντων χρώσης που συνδέονται με πλαστικά πολυμερή μπορεί να βοηθήσει στην οπτικοποίηση των μικροπλαστικών κάτω από ένα μικροσκόπιο, βοηθώντας στην ταυτοποίηση και την απαρίθμησή τους. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν πρόκειται για σύνθετα περιβαλλοντικά δείγματα που περιέχουν μείγμα οργανικής ύλης και μικροπλαστικών (Erni-Cassola et al., 2017).

Καθώς το πεδίο της έρευνας για τα μικροπλαστικά εξελίσσεται, υπάρχει αυξανόμενη ανάγκη για διεπιστημονική συνεργασία. Ωκεανογράφοι, χημικοί, οικολόγοι, τοξικολόγοι και επιστήμονες υλικών πρέπει να συνεργαστούν για να αναπτύξουν και να επικυρώσουν νέες τεχνικές δειγματοληψίας και αναλυτικές μεθόδους. Αυτή η συλλογική προσπάθεια είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση της κατανόησης των πηγών, των μεταφορών, της μοίρας και των επιπτώσεων των μικροπλαστικών στο περιβάλλον.

3.2. Αναλυτικές τεχνικές

Η μελέτη των μικροπλαστικών περιλαμβάνει μια σειρά αναλυτικών τεχνικών, καθεμία από τις οποίες συμβάλλει σε μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Η οπτική διαλογή και η μικροσκοπική εξέταση είναι συνήθως τα αρχικά βήματα για τον εντοπισμό πιθανών μικροπλαστικών σε περιβαλλοντικά δείγματα. Τα στερεοσκοπικά μικροσκόπια χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερα σωματίδια, ενώ τα λεπτότερα μικροπλαστικά μπορεί να απαιτούν ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) για λεπτομερή απεικόνιση (Hidalgo-Ruz, Gutow, Thompson, & Thiel, 2012).

Οι φασματοσκοπικές μέθοδοι, της η φασματοσκοπία υπερύθρων μετασχηματισμού Fourier (FTIR) και η φασματοσκοπία Raman, είναι απαραίτητες για τον χημικό χαρακτηρισμό των μικροπλαστικών. Αυτές οι τεχνικές παρέχουν μοριακά δακτυλικά αποτυπώματα που βοηθούν στην αναγνώριση των τύπων πολυμερών που υπάρχουν (Shim, Hong, & Eo, 2017).

Η θερμική ανάλυση, συμπεριλαμβανομένης της θερμιδομετρίας διαφορικής σάρωσης (DSC) και της θερμοβαρυνμετρικής ανάλυσης (TGA), χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των θερμικών ιδιοτήτων των μικροπλαστικών, οι οποίες μπορεί να είναι ενδεικτικές της πολυμερούς



σύνθεσής της (Andrady, 2011). Η χρωματογραφία-φασματομετρία μάζας pyrolysisgas (Py-GC/MS) είναι μια άλλη προηγμένη τεχνική που διασπά τα μικροπλαστικά σε μικρότερα μόρια, επιτρέποντας την ταυτοποίηση και τον ποσοτικό προσδιορισμό της (Fries et al. Είναι μια κοινή τεχνική για την απομόνωση μικροπλαστικών από πυκνότερα υλικά σε ένα δείγμα.2017). Η χημική πέψη είναι συχνά απαραίτητη για την απομάκρυνση οργανικής ύλης από δείγματα, ιδιαίτερα κατά την ανάλυση ιζημάτων ή βιολογικών ιστών, για την πρόληψη παρεμβολών στην ανίχνευση μικροπλαστικών (Cole, Lindeque, Halsband, & Galloway, 2014).

Η ανάλυση μεγέθους σωματιδίων είναι μια άλλη κρίσιμη πτυχή της έρευνας για τα μικροπλαστικά. Τεχνικές της η δυναμική σκέδαση φωτός (DLS) και η ανάλυση παρακολούθησης νανοσωματιδίων (NTA) παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την κατανομή μεγέθους των πλαστικών σωματιδίων, η οποία είναι σημαντική για την κατανόηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων της (Lambert & Wagner, 2016).

Οι αναλυτικές τεχνικές για την έρευνα των μικροπλαστικών είναι ποικίλες, καθεμία με το δικό της σύνολο πλεονεκτημάτων και περιορισμών. Η αέρια χρωματογραφία-φασματομετρία μάζας (GC-MS) χρησιμοποιείται ευρέως για τον εντοπισμό οργανικών ενώσεων μέσα στα μικροπλαστικά, της πλαστικοποιητές και επιβραδυντικά φλόγας, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της πιθανής τοξικότητας (Rochman, Hoh, Kurobe, & 28he, 2013).

Η υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC) είναι μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των οργανικών συστατικών των μικροπλαστικών, ειδικά για μη πτητικές ενώσεις που η GC-MS δεν μπορεί να αναλύσει. Το HPLC μπορεί να συνδυαστεί με διάφορους ανιχνευτές για να ενισχύσει της δυνατότητές του (Karlsson et al., 2018).

Ο φθορισμός ακτίνων X (XRF) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της στοιχειακής σύνθεσης των μικροπλαστικών, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με την παρουσία βαρέων μετάλλων και άλλων στοιχείων (Turner & Holmes, 2015). Η ηλεκτρονική μικροσκοπία περιβαλλοντικής σάρωσης (ESEM) επιτρέπει την παρατήρηση των μικροπλαστικών στη φυσική της κατάσταση και μπορεί να συνδυαστεί με φασματοσκοπία ακτίνων X διασποράς ενέργειας (EDX) για ανάλυση σύνθεσης (Fischer & Scholz-Böttcher, 2017).

Καθώς ο τομέας εξελίσσεται, η ανάπτυξη τυποποιημένων μεθόδων και υλικών αναφοράς είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ποιότητας και της συγκρισιμότητας των δεδομένων. Αυτό θα επιτρέψει της ερευνητές να παρακολουθούν καλύτερα την τύχη των μικροπλαστικών στο περιβάλλον και να αναπτύξουν αποτελεσματικές στρατηγικές για τον μετριασμό της πλαστικής ρύπανσης.



3.3. Ταυτοποίηση και χαρακτηρισμός

Η ταυτοποίηση και ο χαρακτηρισμός των μικροπλαστικών περιλαμβάνει μια σειρά βημάτων για τον προσδιορισμό της σύνθεσης, του μεγέθους, του σχήματος και των πιθανών πηγών τους. Η διαδικασία ξεκινά με τη συλλογή δειγμάτων από διάφορες περιβαλλοντικές μήτρες όπως το νερό, τα ιζήματα, το έδαφος ή οι ζώντες οργανισμοί. Μόλις συλλεχθούν, τα δείγματα συνήθως υποβάλλονται σε επεξεργασία για την απομόνωση μικροπλαστικών από φυσικά υλικά.

Οπτική αναγνώριση

Η αρχική ταυτοποίηση είναι συχνά οπτική, χρησιμοποιώντας ένα μικροσκόπιο για να διακρίνει τα μικροπλαστικά από τα φυσικά συντρίμια με βάση χαρακτηριστικά όπως το χρώμα, το σχήμα και η υφή. Ωστόσο, η οπτική ταυτοποίηση από μόνη της δεν είναι αξιόπιστη λόγω της πιθανότητας εσφαλμένης ταυτοποίησης φυσικών υλικών ως πλαστικών (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

Φασματοσκοπικές Μέθοδοι

Για ακριβή χαρακτηρισμό, χρησιμοποιούνται φασματοσκοπικές μέθοδοι. Η φασματοσκοπία υπερύθρων μετασχηματισμού Fourier (FTIR) και η φασματοσκοπία Raman είναι οι πιο κοινές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Το FTIR λειτουργεί ανιχνεύοντας τα μοναδικά φάσματα απορρόφησης διαφορετικών πολυμερών, ενώ η φασματοσκοπία Raman χρησιμοποιεί τη σκέδαση του φωτός λέιζερ για τον εντοπισμό μοριακών δονήσεων, παρέχοντας ένα ξεχωριστό φασματικό αποτύπωμα για διάφορους τύπους πλαστικών (Shim et al., 2017).

Θερμική Ανάλυση

Οι τεχνικές θερμικής ανάλυσης, όπως η θερμιδομετρία διαφορικής σάρωσης (DSC) και η θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TGA), μπορούν να παράσχουν πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις θερμικές ιδιότητες των μικροπλαστικών, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τους τύπους πολυμερών τους (Andrady, 2011).

Πυρόλυση-GC/MS

Η πυρόλυση ακολουθούμενη από αέρια χρωματογραφία-φασματομετρία μάζας (Py-GC/MS) είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την ταυτοποίηση πολυμερών και προσθέτων μέσα σε μικροπλαστικά. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει τη θερμική αποικοδόμηση των πλαστικών σωματιδίων σε μικρότερα μόρια που μπορούν να διαχωριστούν και να αναγνωριστούν από GC / MS (Fries et al., 2013).



Διαχωρισμός πυκνότητας

Ο διαχωρισμός πυκνότητας είναι μια κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την απομόνωση μικροπλαστικών από πυκνότερα σωματίδια ιζημάτων. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει τη χρήση διαλυμάτων με γνωστές πυκνότητες για την επίπλευση μικροπλαστικών, επιτρέποντας παράλληλα τη βύθιση πυκνότερων υλικών (Erni-Cassola et al., 2017).

Χημική πέψη

Η χημική πέψη χρησιμοποιείται συχνά για την απομάκρυνση οργανικής ύλης από περιβαλλοντικά δείγματα, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ανίχνευση και την ανάλυση μικροπλαστικών. Ισχυρά οξέα, βάσεις ή ένζυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πέψη φυσικών οργανικών υλικών χωρίς να επηρεάζονται τα μικροπλαστικά (Cole et al., 2014).

Ανάλυση μεγέθους σωματιδίων

Τεχνικές όπως η δυναμική σκέδαση φωτός (DLS) και η ανάλυση παρακολούθησης νανοσωματιδίων (NTA) χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της κατανομής μεγέθους των μικροπλαστικών σωματιδίων. Οι μέθοδοι αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την κατανόηση της πιθανότητας βιοδιαθεσιμότητας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μικροπλαστικών (Lambert & Wagner, 2016).

Η ταυτοποίηση και ο χαρακτηρισμός των μικροπλαστικών είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση των πηγών, της διανομής και των πιθανών επιπτώσεών τους στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Ο συνδυασμός οπτικών, φασματοσκοπικών, θερμικών και χημικών τεχνικών παρέχει μια ισχυρή προσέγγιση για τη μελέτη αυτών των ρύπων. Καθώς το πεδίο εξελίσσεται, η ανάπτυξη πιο ευαίσθητων και ακριβών μεθόδων, καθώς και τυποποιημένων πρωτοκόλλων, θα είναι απαραίτητη για την προώθηση των γνώσεών μας και την ενημέρωση των αποφάσεων πολιτικής που σχετίζονται με τη ρύπανση από μικροπλαστικά.

3.4. Προκλήσεις και περιορισμοί στην ανίχνευση

Η ανίχνευση και η ανάλυση των μικροπλαστικών παρουσιάζουν αρκετές προκλήσεις και περιορισμούς που μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Αυτές οι προκλήσεις πηγάζουν από την ποικιλόμορφη φύση των μικροπλαστικών, την πολυπλοκότητα των περιβαλλοντικών μητρών και τους περιορισμούς των σημερινών αναλυτικών μεθόδων.



Συλλογή και προετοιμασία δειγμάτων

Μία από τις κύριες προκλήσεις στην έρευνα για τα μικροπλαστικά είναι η συλλογή και προετοιμασία περιβαλλοντικών δειγμάτων. Τα μικροπλαστικά είναι πανταχού παρόντα στο περιβάλλον και μπορεί να προκύψει μόλυνση από το περιβάλλον ή από τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη δειγματοληψία και την επεξεργασία (Löder and Gerdts, 2015). Η διασφάλιση ότι τα δείγματα είναι απαλλαγμένα από τέτοια μόλυνση απαιτεί αυστηρά πρωτόκολλα και καθαρές εργαστηριακές πρακτικές.

Εύρος μεγέθους και ποικιλομορφία

Το εύρος μεγέθους των μικροπλαστικών, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από νανόμετρα έως χιλιοστά, αποτελεί σημαντική πρόκληση για ανίχνευση. Τα μικρότερα μικροπλαστικά, που συχνά αναφέρονται ως νανοπλαστικά, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να ανιχνευθούν και να ποσοτικοποιηθούν λόγω του μεγέθους τους και των περιορισμών των σημερινών αναλυτικών τεχνικών (Gigault et al., 2018).

Η ποικιλία των τύπων πολυμερών, των σχημάτων, των χρωμάτων και η παρουσία προσθέτων ή βιολογικών εναποθέσεων περιπλέκει επίσης τη διαδικασία ταυτοποίησης. Διαφορετικά πολυμερή μπορεί να απαιτούν διαφορετικές αναλυτικές προσεγγίσεις και μερικά μπορεί να μην είναι εύκολα ανιχνεύσιμα με τυποποιημένες μεθόδους (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

Αναλυτικές Τεχνικές

Ενώ η φασματοσκοπία FTIR και Raman είναι ισχυρά εργαλεία για την ταυτοποίηση πολυμερών, έχουν περιορισμούς όσον αφορά την ευαισθησία και την ανάλυση, ιδιαίτερα για μικρότερα σωματίδια και πολύπλοκα μείγματα. Αυτές οι τεχνικές μπορεί επίσης να δυσκολευτούν να εντοπίσουν μαύρα ή σκουρόχρωμα πλαστικά που απορροφούν το φως που χρησιμοποιείται για ανάλυση (Shim et al., 2017).

Η πυρόλυση-GC / MS είναι μια ευαίσθητη μέθοδος για την ταυτοποίηση πολυμερών, αλλά απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και τεχνογνωσία. Περιλαμβάνει επίσης την καταστροφή του δείγματος, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση (Fries et al. των μικροπλαστικών με άλλους ρύπους, οι οργανισμοί και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες είναι πολύπλοκοι και δεν είναι πλήρως κατανοητοί, γεγονός που περιορίζει την ικανότητα εκτίμησης των πραγματικών επιπτώσεών τους (Rochman et al. T., Ebert, M., & Remy, D. (2013)



4. Επιπτώσεις των μικροπλαστικών στους υδρόβιους οργανισμούς

Τα μικροπλαστικά έχουν αναγνωριστεί ως σημαντικοί φορείς ρύπων στο περιβάλλον λόγω της ικανότητάς τους να απορροφούν και να συγκεντρώνουν τοξικές ουσίες από τα γύρω ύδατα. Η ικανότητα των μικροπλαστικών διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ικανότητά τους να απορροφούν ρύπους. Οι υδρόφοβοι ρύποι, όπως τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB) και οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAH), έχουν μεγάλη συγγένεια με τις υδρόφοβες επιφάνειες των μικροπλαστικών. Επιπλέον, η γήρανση των μικροπλαστικών μπορεί να αυξήσει την τραχύτητα της επιφάνειάς τους και έτσι να ενισχύσει την ικανότητα προσρόφησης (Bakir et al., 2014). Μόλις οι ρύποι προσροφηθούν στα μικροπλαστικά, μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις και μπορεί να γίνουν περισσότερο βιοδιαθέσιμοι στους οργανισμούς.

4.1. Κατάποση και φυσικές επιπτώσεις

Η κατάποση μικροπλαστικών από υδρόβιους οργανισμούς και άγρια ζώα έχει γίνει μια αυξανόμενη ανησυχία στην επιστημονική κοινότητα, καθώς οι φυσικές επιπτώσεις που συνδέονται με αυτό το φαινόμενο μπορεί να είναι επιζήμιες για μεμονωμένους οργανισμούς και ενδεχομένως για ολόκληρα οικοσυστήματα. Έρευνες έχουν δείξει ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να προσληφθούν από ένα ευρύ φάσμα θαλάσσιων ειδών και ειδών γλυκού νερού, από πλαγκτόν έως μεγαλύτερα θαλάσσια θηλαστικά, οδηγώντας σε φυσικά μπλοκαρίσματα, αραίωση ενέργειας και πιθανή έκθεση σε επιβλαβείς χημικές ουσίες (Wright et al., 2013).

Φυσικά μπλοκαρίσματα και αραίωση ενέργειας

Κατά την κατάποση, τα μικροπλαστικά μπορούν να συσσωρευτούν στις πεπτικές οδούς των ζώων, οδηγώντας σε φυσικά μπλοκαρίσματα που βλάπτουν τη σίτιση και την πέψη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μια ψευδή αίσθηση κορεσμού, μειωμένη πρόσληψη θρεπτικών ουσιών και αραίωση ενέργειας, όπου η ενέργεια που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη και την αναπαραγωγή δαπανάται για την αντιμετώπιση των απορροφούμενων πλαστικών. Σε σοβαρές περιπτώσεις, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε λιμοκτονία, μειωμένους ρυθμούς ανάπτυξης, ακόμη και θνησιμότητα (Besseling et al., 2015). Το μέγεθος, το σχήμα και η συγκέντρωση των μικροπλαστικών διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη σοβαρότητα αυτών των επιπτώσεων, με μικρότερα σωματίδια να μετατοπίζονται ενδεχομένως σε άλλους ιστούς του σώματος και να προκαλούν περαιτέρω βλάβη (Browne et al., 2008).



Χημική έκθεση και βιοσυσσωρευση

Πέρα από τις φυσικές επιπτώσεις, τα μικροπλαστικά μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως φορείς για τη μεταφορά τοξικών ουσιών σε οργανισμούς. Αυτά τα πλαστικά περιέχουν συχνά ένα κοκτέιλ χημικών προσθέτων από τη διαδικασία παραγωγής τους και μπορούν επίσης να απορροφήσουν έμμονους οργανικούς ρύπους (POP) από το περιβάλλον. Μετά την κατάποση, αυτές οι χημικές ουσίες μπορούν να διαφύγουν στον οργανισμό, οδηγώντας σε βιοσυσσωρευση και πιθανές τοξικολογικές επιδράσεις, συμπεριλαμβανομένων των ενδοκρινικών διαταραχών, της μειωμένης αναπαραγωγικής επιτυχίας και των ανοσολογικών βλαβών (Rochman et al., 2013).

Επιπτώσεις στους τροφικούς ιστούς και την ανθρώπινη υγεία

Η κατάποση μικροπλαστικών και οι σχετικές επιπτώσεις τους δεν περιορίζονται σε μεμονωμένους οργανισμούς, αλλά μπορούν να έχουν αλυσιδωτές επιπτώσεις σε όλα τα τροφικά πλέγματα. Οι θηρευτές που καταναλώνουν θήραμα φορτωμένο με μικροπλαστικά μπορεί οι ίδιοι να υποφέρουν από τις φυσικές και χημικές επιπτώσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στη δυναμική του τροφικού ιστού και στη λειτουργία του οικοσυστήματος. Επιπλέον, υπάρχει ανησυχία για την ανθρώπινη υγεία, καθώς μικροπλαστικά έχουν βρεθεί στα θαλασσινά που καταναλώνονται από τον άνθρωπο, εγείροντας ερωτήματα σχετικά με τη δυνατότητα αυτών των υλικών και των συναφών χημικών ουσιών να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία (Seltenrich, 2015).

Η κατάποση μικροπλαστικών και οι επακόλουθες φυσικές επιπτώσεις στην άγρια ζωή είναι πολύπλευρα ζητήματα που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση για την πλήρη κατανόηση των επιπτώσεων στα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία. Καθώς ο επιπολασμός των μικροπλαστικών στο περιβάλλον συνεχίζει να αυξάνεται, είναι επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθούν στρατηγικές για τον μετριασμό της απελευθέρωσής τους και την κατανόηση των μακροπρόθεσμων συνεπειών της παρουσίας τους στον φυσικό κόσμο.

4.2. Τοξικολογικές επιδράσεις

Οι τοξικολογικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών στους οργανισμούς και τα οικοσυστήματα αποτελούν έναν αυξανόμενο τομέα ανησυχίας. Τα μικροπλαστικά μπορούν να χρησιμεύσουν ως φορείς τοξικών χημικών ουσιών, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που προστίθενται κατά την κατασκευή και εκείνων που απορροφώνται από το περιβάλλον. Οι ουσίες αυτές μπορούν να έχουν διάφορες δυσμενείς επιπτώσεις στην άγρια πανίδα και χλωρίδα και, ενδεχομένως, στην ανθρώπινη υγεία (Κοκκάλας, 2021).



Χημικά πρόσθετα και προσροφημένοι ρύποι

Τα μικροπλαστικά περιέχουν συχνά μια σειρά χημικών προσθέτων που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή τους, όπως πλαστικοποιητές, επιβραδυντικά φλόγας και σταθεροποιητές UV. Αυτές οι ουσίες μπορούν να εκπλυθούν κατά την κατάποση από οργανισμούς, οδηγώντας σε τοξικές επιδράσεις. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μπορούν να απορροφήσουν έμμοιους οργανικούς ρύπους (POP) από το περιβάλλον, οι οποίοι στη συνέχεια μπορούν να βιοσυσσωρευτούν και να βιομεγεθυνθούν μέσω της τροφικής αλυσίδας, θέτοντας σε κίνδυνο τους θηρευτές σε υψηλότερα τροφικά επίπεδα, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων. Αυτές οι χημικές ουσίες στους οργανισμούς μπορούν να οδηγήσουν σε χρόνια έκθεση, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μια σειρά τοξικολογικών επιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένων των ενδοκρινικών διαταραχών, των αναπαραγωγικών και αναπτυξιακών προβλημάτων και της ανοσοτοξικότητας. Η βιομεγέθυνση αυτών των ουσιών μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη υψηλότερες συγκεντρώσεις στους θηρευτές, επηρεάζοντας ενδεχομένως την υγεία και την αναπαραγωγική επιτυχία τους (Galloway, 2015).

Επιδράσεις που σχετίζονται με σωματίδια

Εκτός από τη χημική τοξικότητα, η φυσική παρουσία μικροπλαστικών μπορεί επίσης να προκαλέσει βλάβη. Τα μικροπλαστικά μπορούν να προσληφθούν από ένα ευρύ φάσμα οργανισμών, οδηγώντας σε φυσικές βλάβες, φλεγμονές και άλλες αντιδράσεις στο στρες. Το μέγεθος, το σχήμα και η συγκέντρωση των μικροπλαστικών μπορούν να επηρεάσουν τη σοβαρότητα αυτών των επιπτώσεων, με τα μικρότερα σωματίδια να προκαλούν ενδεχομένως μεγαλύτερη βλάβη λόγω της ικανότητάς τους να διεισδύουν στους ιστούς και τα κύτταρα (Wright et al., 2013).

Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Οι πιθανές επιπτώσεις των μικροπλαστικών στην ανθρώπινη υγεία δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητές, αλλά υπάρχει ανησυχία ότι η κατάποση μικροπλαστικών μέσω της κατανάλωσης μολυσμένων θαλασσινών θα μπορούσε να οδηγήσει σε έκθεση σε τοξικές χημικές ουσίες. Η έρευνα συνεχίζεται για να προσδιοριστεί η έκταση της έκθεσης του ανθρώπου και οι πιθανές επιπτώσεις στην υγεία (Smith et al., 2018).

Οι τοξικολογικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών είναι πολύπλοκες και πολύπλευρες, περιλαμβάνοντας τόσο χημικές όσο και φυσικές πτυχές. Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την καλύτερη κατανόηση αυτών των επιπτώσεων, ιδίως των μακροπρόθεσμων συνεπειών της χρόνιας έκθεσης σε μικροπλαστικά και τις συναφείς χημικές ουσίες. Οι γνώσεις αυτές είναι απαραίτητες για την αξιολόγηση των κινδύνων τόσο για την άγρια πανίδα όσο και για την ανθρώπινη υγεία και για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών για τον μετριασμό των επιπτώσεων των μικροπλαστικών στο περιβάλλον (Amato-Lourenço et al., 2020).



4.3. Βιοσυσσώρευση και βιομεγέθυνση

Η βιοσυσσώρευση και η βιομεγέθυνση είναι διαδικασίες που μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τη συγκέντρωση ρύπων εντός ενός οικοσυστήματος, ιδίως όσον αφορά τα μικροπλαστικά και τους συναφείς ρύπους τους. Αυτές οι διαδικασίες μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλά επίπεδα τοξικών ουσιών σε οργανισμούς στην κορυφή της τροφικής αλυσίδας, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων.

Βιοσυσσώρευση σε οργανισμούς

Η βιοσυσσώρευση συμβαίνει όταν ένας οργανισμός απορροφά μια ουσία με ρυθμό ταχύτερο από αυτόν με τον οποίο η ουσία χάνεται με καταβολισμό και απέκκριση. Τα μικροπλαστικά μπορούν να προσληφθούν από μια ποικιλία θαλάσσιων οργανισμών και οργανισμών γλυκού νερού, όπου μπορεί να συσσωρευτούν στο γαστρεντερικό σωλήνα. Με την πάροδο του χρόνου, οι χημικές ουσίες που σχετίζονται με αυτά τα μικροπλαστικά, όπως πλαστικοποιητές, επιβραδυντικά φλόγας και άλλα πρόσθετα, καθώς και υδρόφοβοι οργανικοί ρύποι από το περιβάλλον, μπορούν να διαφύγουν στους ιστούς του οργανισμού (Teuten et al., 2009).

Βιομεγέθυνση μέσω τροφικών πλεγμάτων

Η βιομεγέθυνση αναφέρεται στην αύξηση της συγκέντρωσης μιας ουσίας στους ιστούς των οργανισμών σε διαδοχικά υψηλότερα επίπεδα σε μια τροφική αλυσίδα. Καθώς οι θηρευτές καταναλώνουν θήραμα, καταπίνουν επίσης τα μικροπλαστικά και τους συναφείς ρύπους που συσσωρεύονται μέσα σε αυτούς τους θηρευματικούς οργανισμούς. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερες συγκεντρώσεις αυτών των ρύπων στο σώμα του αρπακτικού σε σύγκριση με το περιβάλλον ή την τροφή του. Η διαδικασία συνεχίζεται στην τροφική αλυσίδα, οδηγώντας ενδεχομένως σε σημαντικούς κινδύνους για την υγεία των κορυφαίων θηρευτών και των ανθρώπων που καταναλώνουν θαλασσινά (Fossi et al., 2014).

Επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία

Η βιοσυσσώρευση και η βιομεγέθυνση των μικροπλαστικών και των συναφών χημικών ουσιών μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία. Οι οργανισμοί που έχουν συσσωρεύσει υψηλά επίπεδα ρύπων μπορεί να υποφέρουν από διάφορες δυσμενείς επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένων των αναπαραγωγικών, αναπτυξιακών και ανοσολογικών βλαβών. Για τον άνθρωπο, η κατανάλωση μολυσμένων θαλασσινών μπορεί να οδηγήσει σε έκθεση σε αυτές τις επιβλαβείς ουσίες, εγείροντας ανησυχίες σχετικά με την πιθανότητα δυσμενών αποτελεσμάτων για την υγεία (Rochman et al., 2015).



Έρευνα και παρακολούθηση

Η συνεχής έρευνα και παρακολούθηση είναι απαραίτητες για την κατανόηση της έκτασης της βιοσυσώρευσης και της βιομεγέθυνσης των μικροπλαστικών και των συναφών χημικών ουσιών σε διαφορετικά οικοσυστήματα. Οι γνώσεις αυτές είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση των κινδύνων για την άγρια πανίδα και την ανθρώπινη υγεία και για την ανάπτυξη στρατηγικών για τη διαχείριση και τον μετριασμό των επιπτώσεων των μικροπλαστικών στο περιβάλλον (Barboza et al., 2018).

Βιοσυσώρευση σε οργανισμούς

Η βιοσυσώρευση συμβαίνει όταν ένας οργανισμός απορροφά μια ουσία με ρυθμό ταχύτερο από αυτόν με τον οποίο η ουσία χάνεται με καταβολισμό και απέκκριση. Τα μικροπλαστικά μπορούν να προσληφθούν από μια ποικιλία θαλάσσιων οργανισμών και οργανισμών γλυκού νερού, όπου μπορεί να συσσωρευτούν στο γαστρεντερικό σωλήνα. Με την πάροδο του χρόνου, οι χημικές ουσίες που σχετίζονται με αυτά τα μικροπλαστικά, όπως πλαστικοποιητές, επιβραδυντικά φλόγας και άλλα πρόσθετα, καθώς και υδρόφοβοι οργανικοί ρύποι από το περιβάλλον, μπορούν να διαφύγουν στους ιστούς του οργανισμού (Teuten et al., 2009).

Βιομεγέθυνση μέσω τροφικών πλεγμάτων

Η βιομεγέθυνση αναφέρεται στην αύξηση της συγκέντρωσης μιας ουσίας στους ιστούς των οργανισμών σε διαδοχικά υψηλότερα επίπεδα σε μια τροφική αλυσίδα. Καθώς οι θηρευτές καταναλώνουν θήραμα, καταπίνουν επίσης τα μικροπλαστικά και τους συναφείς ρύπους που συσσωρεύονται μέσα σε αυτούς τους θηραματικούς οργανισμούς. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερες συγκεντρώσεις αυτών των ρύπων στο σώμα του αρπακτικού σε σύγκριση με το περιβάλλον ή την τροφή του. Η διαδικασία συνεχίζεται στην τροφική αλυσίδα, οδηγώντας ενδεχομένως σε σημαντικούς κινδύνους για την υγεία των κορυφαίων θηρευτών και των ανθρώπων που καταναλώνουν θαλασσινά (Fossi et al., 2014).

Επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία

Η βιοσυσώρευση και η βιομεγέθυνση των μικροπλαστικών και των συναφών χημικών ουσιών μπορεί να έχει σοβαρές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία. Οι οργανισμοί που έχουν συσσωρεύσει υψηλά επίπεδα ρύπων μπορεί να υποφέρουν από διάφορες δυσμενείς επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένων των αναπαραγωγικών, αναπτυξιακών και ανοσολογικών βλαβών. Για τον άνθρωπο, η κατανάλωση μολυσμένων θαλασσινών μπορεί να οδηγήσει σε έκθεση σε αυτές τις επιβλαβείς ουσίες, εγείροντας ανησυχίες σχετικά με την πιθανότητα δυσμενών αποτελεσμάτων για την υγεία (Rochman et al., 2015).



Έρευνα και παρακολούθηση

Η συνεχής έρευνα και παρακολούθηση είναι απαραίτητες για την κατανόηση της έκτασης της βιοσυσώρευσης και της βιομεγέθυνσης των μικροπλαστικών και των συναφών χημικών ουσιών σε διαφορετικά οικοσυστήματα. Οι γνώσεις αυτές είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση των κινδύνων για την άγρια πανίδα και την ανθρώπινη υγεία και για την ανάπτυξη στρατηγικών για τη διαχείριση και τον μετριασμό των επιπτώσεων των μικροπλαστικών στο περιβάλλον (Barboza et al., 2018).

4.4. Επιπτώσεις στα υδάτινα οικοσυστήματα

Η παρουσία μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα έχει καταστεί διαδεδομένο περιβαλλοντικό ζήτημα, με εκτεταμένες επιπτώσεις στα ενδιαιτήματα θαλάσσιων και γλυκών υδάτων. Αυτές οι επιπτώσεις είναι πολύπλευρες, επηρεάζοντας οργανισμούς σε διάφορα τροφικά επίπεδα, μεταβάλλοντας τις δομές των οικοτόπων και ενδεχομένως διαταράσσοντας την ισορροπία των οικοσυστημάτων.

Φυσικές μεταβολές των οικοτόπων

Τα μικροπλαστικά μπορούν να συσσωρευτούν σε ιζήματα, στις ακτές και εντός της στήλης νερού, οδηγώντας σε φυσικές αλλαγές στα ενδιαιτήματα. Αυτές οι αλλαγές μπορούν να επηρεάσουν τη διαθεσιμότητα του φωτός, τα επίπεδα οξυγόνου και τη δομή των ιζημάτων, τα οποία είναι κρίσιμα για την επιβίωση των βενθικών οργανισμών και τη συνολική υγεία των υδάτινων οικοσυστημάτων. Η αλλοίωση των οικοτόπων μπορεί επίσης να επηρεάσει την κατανομή και την αφθονία των ειδών, οδηγώντας σε αλλαγές στη σύνθεση των κοινοτήτων και τη βιοποικιλότητα (Gall and Thompson, 2015).

Επιδράσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς και στους οργανισμούς γλυκών υδάτων

Οι υδρόβιοι οργανισμοί, από το πλαγκτόν έως τα μεγάλα θαλάσσια θηλαστικά, μπορούν να καταπιούν μικροπλαστικά είτε άμεσα είτε έμμεσα μέσω του τροφικού ιστού. Αυτή η κατάποση μπορεί να οδηγήσει σε φυσικά μπλοκαρίσματα, μειωμένη απόδοση τροφοδοσίας και εξάντληση ενέργειας. Επιπλέον, η κατάποση μικροπλαστικών μπορεί να προκαλέσει εσωτερικούς τραυματισμούς και αντιδράσεις στρες στους οργανισμούς, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη ανάπτυξη, αναπαραγωγική επιτυχία και ποσοστά επιβίωσης (Wright et al., 2013).

Χημικές επιπτώσεις

Τα μικροπλαστικά μπορούν να μεταφέρουν μια σειρά χημικών ουσιών, συμπεριλαμβανομένων πλαστικών προσθέτων και έμμονων οργανικών ρύπων. Αυτές οι χημικές ουσίες μπορούν να διαρρεύσουν στο νερό ή να καταποθούν από οργανισμούς, οδηγώντας σε τοξικολογικές



επιδράσεις όπως ενδοκρινικές διαταραχές, μειωμένη ανοσολογική λειτουργία και άλλες υποθανατηφόρες επιδράσεις που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την υγεία των υδρόβιων ειδών. Η συσσώρευση αυτών των χημικών ουσιών μέσω της βιοσυσσώρευσης και της βιομεγέθυνσης μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες για τους κορυφαίους θηρευτές και μπορεί να επηρεάσει τη δομή και τη λειτουργία των υδρόβιων τροφικών ιστών (Rochman et al., 2013).

Πιθανότητα επιπτώσεων σε επίπεδο οικοσυστήματος

Οι επιπτώσεις των μικροπλαστικών σε μεμονωμένους οργανισμούς μπορούν να κλιμακωθούν για να επηρεάσουν τη δυναμική του πληθυσμού και τις διαδικασίες του οικοσυστήματος. Για παράδειγμα, οι αλλαγές στην υγεία και τη συμπεριφορά βασικών ειδών μπορούν να επηρεάσουν τον κύκλο των θρεπτικών ουσιών, τις σχέσεις θηρευτή-θηράματος και την ανθεκτικότητα των οικοσυστημάτων στις περιβαλλοντικές αλλαγές. Η μακροχρόνια παρουσία μικροπλαστικών σε υδάτινα περιβάλλοντα μπορεί να οδηγήσει σε επιπτώσεις σε επίπεδο οικοσυστήματος που δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητές (Sutherland et al., 2010).

Προκλήσεις Έρευνας και Διαχείρισης

Η αντιμετώπιση των επιπτώσεων των μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα απαιτεί συνεχή έρευνα για την καλύτερη κατανόηση των οδών έκθεσης, των μηχανισμών επίδρασης και των μακροπρόθεσμων συνεπειών για τα οικοσυστήματα. Απαιτούνται επίσης αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης για τον μετριασμό της απελευθέρωσης μικροπλαστικών στο περιβάλλον και την προστασία των υδάτινων οικοσυστημάτων από τις δυσμενείς επιπτώσεις τους (Law and Thompson, 2014).

Συνεχής έρευνα και δράση

Η συνεχής έρευνα είναι απαραίτητη για τον ποσοτικό προσδιορισμό των ακριβών επιπέδων μικροπλαστικών σε διάφορα υδάτινα οικοσυστήματα και για την κατανόηση των συγκεκριμένων οδών μέσω των οποίων ασκούν τις επιπτώσεις τους. Αυτό περιλαμβάνει τη μελέτη της αποδόμησης των μικροπλαστικών σε ακόμη μικρότερα νανοπλαστικά, τα οποία μπορούν να διεισδύσουν ευκολότερα σε κύτταρα και ιστούς και να έχουν άγνωστες συνέπειες. Πρέπει να αναπτυχθούν αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης για την αντιμετώπιση της απελευθέρωσης μικροπλαστικών στο περιβάλλον και για τη διασφάλιση της ασφάλειας των υδάτινων πόρων. Αυτό περιλαμβάνει τη βελτίωση των πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων, την ανάπτυξη καλύτερων τεχνολογιών επεξεργασίας νερού και την παρακολούθηση της παρουσίας μικροπλαστικών και παθογόνων παραγόντων στο υδάτινο περιβάλλον (Shruti et al., 2020).

Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη διεθνούς συνεργασίας για τη μείωση της παραγωγής και της απελευθέρωσης μικροπλαστικών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω μέτρων πολιτικής, βελτιωμένων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων και εκστρατειών δημόσιας εκπαίδευσης με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης πλαστικού και την αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης.



Προσπάθειες μετριασμού και αποκατάστασης

Οι προσπάθειες μετριασμού περιλαμβάνουν την ανάπτυξη βιοδιασπώμενων εναλλακτικών λύσεων στα συμβατικά πλαστικά, την εφαρμογή αυστηρότερων κανονισμών για την παραγωγή πλαστικών και τη διαχείριση αποβλήτων και τον καθαρισμό της υφιστάμενης πλαστικής ρύπανσης σε υδάτινα περιβάλλοντα. Οι τεχνικές αποκατάστασης, όπως η χρήση πλωτών φραγμάτων για τη δέσμευση πλωτών πλαστικών και ο καθαρισμός των ακτών και των παραλιών, μπορούν επίσης να συμβάλουν στη μείωση της επιβάρυνσης των μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα (Shruti et al., 2020).

Ευαισθητοποίηση και Εκπαίδευση του Κοινού

Η ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση της αλλαγής συμπεριφοράς και την υποστήριξη δράσεων πολιτικής. Οι εκπαιδευτικές πρωτοβουλίες μπορούν να ενημερώσουν το κοινό σχετικά με τη σημασία της μείωσης της χρήσης πλαστικού, της σωστής απόρριψης και της συμμετοχής στις προσπάθειες καθαρισμού της κοινότητας (Shruti et al., 2020).

Συμπερασματικά, οι επιπτώσεις των μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα είναι πολύπλοκες και εκτεταμένες, επηρεάζοντας οργανισμούς, ενδιαιτήματα και διαδικασίες οικοσυστημάτων. Η αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος απαιτεί μια πολύπλευρη προσέγγιση που περιλαμβάνει έρευνα, πολιτική και δημόσια δέσμευση για την προστασία αυτών των ζωτικών περιβαλλόντων για τις μελλοντικές γενιές.

5. Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

5.1. Οδοί έκθεσης

Οι οδοί έκθεσης στα μικροπλαστικά αναφέρονται στις διάφορες οδούς μέσω των οποίων τα μικροπλαστικά μπορούν να εισέλθουν σε οργανισμούς και οικοσυστήματα. Η κατανόηση αυτών των οδών είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση των πιθανών κινδύνων και επιπτώσεων της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Οι κύριες οδοί έκθεσης περιλαμβάνουν την κατάποση, την εισπνοή και τη δερματική επαφή.

Κατάποση

Η κατάποση είναι η πιο καλά τεκμηριωμένη οδός έκθεσης για τα μικροπλαστικά. Οι υδρόβιοι οργανισμοί, από το ζωοπλαγκτόν έως τα μεγάλα θαλάσσια θηλαστικά, μπορούν να καταπιούν μικροπλαστικά απευθείας από τη στήλη νερού ή μέσω της λείας τους. Τα μικροπλαστικά μπορεί να μοιάζουν με φυσικές πηγές τροφίμων, οδηγώντας σε τυχαία κατανάλωση. Μετά την



κατάποση, τα μικροπλαστικά μπορούν να προκαλέσουν φυσικά μπλοκαρίσματα, να απελευθερώσουν τοξικές ουσίες και ενδεχομένως να μεταφέρουν παθογόνους παράγοντες (Horton et al., 2017).

Σε χερσαία περιβάλλοντα, τα μικροπλαστικά μπορούν να καταναλωθούν από χερσαία ζώα, συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων, μέσω της κατανάλωσης μολυσμένων τροφίμων και νερού. Μικροπλαστικά έχουν βρεθεί σε διάφορα προϊόντα διατροφής, όπως τα θαλασσινά, το μέλι, το αλάτι, ακόμη και η μύρα. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μπορούν να εισέλθουν στα γεωργικά συστήματα μέσω της εφαρμογής μολυσμένης ιλύος καθαρισμού λυμάτων ή πλαστικής εδαφοκάλυψης, οδηγώντας σε απορρόφηση από τις καλλιέργειες (Horton et al., 2017).

Εισπνοή

Τα μικροπλαστικά μπορούν να μεταφερθούν στον αέρα και να εισπνευστούν από ανθρώπους και άλλα ζώα. Αυτό ριορεί να συμβεί έσω τη αριόδοση μεγαλύτερων πλαστικών αντικειμένων σε μικροπλαστικά, τα οριόια ριορούν στη συνέχεια να εταφερθούν αριό τον άνεμο. Οι επιπτώσεις δεν έχουν ακόμη γίνει πλήρως κατανοητές (Prata, 2018).

Δερματική επαφή

Η δερματική επαφή με μικροπλαστικά είναι μια άλλη πιθανή οδός έκθεσης, ιδίως για τον άνθρωπο. Τα μικροπλαστικά μπορούν να υπάρχουν σε καλλυντικά, προϊόντα προσωπικής φροντίδας και ρούχα. Ενώ το δέρμα είναι ένα αποτελεσματικό φράγμα κατά της διείσδυσης μεγαλύτερων σωματιδίων, υπάρχει ανησυχία για τις πιθανές επιπτώσεις των μικροπλαστικών και των συναφών χημικών ουσιών στην υγεία του δέρματος. Επιπλέον, ο αντίκτυπος των νανοπλαστικών, τα οποία είναι αρκετά μικρά ώστε να διεισδύσουν στο δέρμα, αποτελεί τομέα αναδυόμενης ανησυχίας (Guo and Wang, 2019).

Περιβαλλοντικές Οδοί

Τα μικροπλαστικά μπορούν επίσης να μεταφερθούν μέσω περιβαλλοντικών οδών, όπως η απορροή νερού, τα λύματα λυμάτων και η ατμοσφαιρική απόθεση. Αυτές οι οδοί συμβάλλουν στην ευρεία κατανομή των μικροπλαστικών σε διάφορα οικοσυστήματα, συμπεριλαμβανομένων απομακρυσμένων περιοχών μακριά από άμεσες πηγές πλαστικής ρύπανσης (Prata, 2018).

Έρευνα και μετριάσμός

Η έρευνα σχετικά με τις οδούς έκθεσης είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη στρατηγικών για τον μετριάσμό των κινδύνων που συνδέονται με τα μικροπλαστικά. Αυτό περιλαμβάνει τη βελτίωση των πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων για τη μείωση της απελευθέρωσης μικροπλαστικών στο περιβάλλον, την ανάπτυξη εναλλακτικών λύσεων για τα προϊόντα που



περιέχουν μικροπλαστικά και την ενίσχυση των συστημάτων φιλτραρίσματος και επεξεργασίας νερού και αέρα για την απομάκρυνση των μικροπλαστικών (Guo and Wang, 2019).

5.2. Πιθανοί κίνδυνοι για την υγεία

Οι πιθανοί κίνδυνοι για την υγεία που συνδέονται με τα μικροπλαστικά είναι ένας τομέας αυξανόμενης ανησυχίας και ενεργού έρευνας. Ενώ η πλήρης έκταση αυτών των κινδύνων δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητή, μελέτες έχουν προτείνει διάφορους τρόπους με τους οποίους τα μικροπλαστικά μπορούν να αποτελέσουν απειλές για την ανθρώπινη υγεία.

Φυσικές επιπτώσεις

Η κατάποση μικροπλαστικών μπορεί να οδηγήσει σε φυσικές επιπτώσεις, όπως φλεγμονή ή τραυματισμό του γαστρεντερικού σωλήνα, μέσω του πεπτικού συστήματος χωρίς να απορροφάται (Thompson et. al., 2009).

Χημικές επιδράσεις

Τα μικροπλαστικά μπορούν να μεταφέρουν μια σειρά επικίνδυνων χημικών ουσιών, συμπεριλαμβανομένων των χημικών ουσιών από τις οποίες αποτελούνται, όπως η δισφαινόλη Α (BPA) και οι φθαλικές ενώσεις, καθώς και ρύπους που απορροφούν από το περιβάλλον, όπως έμμοιους οργανικούς ρύπους (POP). Αυτές οι χημικές ουσίες μπορούν να διαφύγουν στο σώμα και μπορεί να δράσουν ως ενδοκρινικοί διαταράκτες, παρεμβαίνοντας στη λειτουργία των ορμονών και ενδεχομένως οδηγώντας σε αναπαραγωγικά, αναπτυξιακά και μεταβολικά προβλήματα (Rochman et al., 2013).

Βιολογικές επιδράσεις

Τα μικροπλαστικά μπορούν επίσης να χρησιμεύσουν ως φορείς παθογόνων και επιβλαβών μικροοργανισμών. Κατά την κατάποση, αυτά τα παθογόνα μπορεί να οδηγήσουν σε λοιμώξεις ή άλλες επιπλοκές στην υγεία. Επιπλέον, η αλληλεπίδραση των μικροπλαστικών με το ανοσοποιητικό σύστημα του σώματος δεν είναι πλήρως κατανοητή, αλλά υπάρχει ανησυχία ότι η χρόνια έκθεση θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανοσολογικές αποκρίσεις ή αλλαγές στο μικροβίωμα του εντέρου (Guo and Wang, 2019)..

Αναπνευστικοί κίνδυνοι

Η εισπνοή αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών, ιδίως σε επαγγελματικούς χώρους ή περιοχές με υψηλή ρύπανση, θα μπορούσε να οδηγήσει σε αναπνευστικά προβλήματα. Το μικρό μέγεθος ορισμένων μικροπλαστικών τους επιτρέπει να διεισδύσουν βαθιά στους πνεύμονες, όπου



μπορεί να προκαλέσουν φλεγμονή ή να επιδεινώσουν καταστάσεις όπως το άσθμα (Guo and Wang, 2019)..

Νανοπλαστικά

Τα νανοπλαστικά, τα οποία είναι ακόμη μικρότερα από τα μικροπλαστικά, αποτελούν μοναδικό κίνδυνο λόγω της ικανότητάς τους να διασχίζουν βιολογικούς φραγμούς, συμπεριλαμβανομένου του αιματοεγκεφαλικού φραγμού και του πλακούντα. Αυτό θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει σε άμεση έκθεση ιστών και οργάνων σε πλαστικά σωματίδια και συναφείς χημικές ουσίες (Besseling et al., 2015).

Μακροχρόνια έκθεση

Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της χρόνιας έκθεσης σε μικροπλαστικά στην υγεία εξακολουθούν να είναι σε μεγάλο βαθμό άγνωστες. Δεδομένης της πανταχού παρουσίας των πλαστικών στο περιβάλλον και της πιθανότητας βιοσυσσώρευσης, υπάρχει ανάγκη για μακροπρόθεσμες μελέτες για την κατανόηση των επιπτώσεων της επίμονης έκθεσης σε μικροπλαστικά (Prata, 2018).

Ερευνητικές Ανάγκες

Απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την καλύτερη κατανόηση των κινδύνων για την υγεία που συνδέονται με τα μικροπλαστικά. Αυτό περιλαμβάνει μελέτες σχετικά με την απορρόφηση, την κατανομή, το μεταβολισμό και την απέκκριση (ADME) των μικροπλαστικών στο ανθρώπινο σώμα, καθώς και επιδημιολογικές μελέτες για τη συσχέτιση των επιπέδων έκθεσης με τα αποτελέσματα της υγείας.

Ρυθμιστική ανταπόκριση και ανταπόκριση στη δημόσια υγεία

Ως απάντηση στους πιθανούς κινδύνους, ορισμένοι ρυθμιστικοί φορείς και οργανισμοί λαμβάνουν προληπτικά μέτρα, όπως η απαγόρευση των μικροσφαιριδίων στα προϊόντα προσωπικής φροντίδας και η βελτίωση της διαχείρισης των αποβλήτων για τη μείωση της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Οι συστάσεις για τη δημόσια υγεία δίνουν επίσης έμφαση στη μείωση της χρήσης πλαστικών μίας χρήσης και υποστηρίζουν την έρευνα και τις πολιτικές που αποσκοπούν στον μετριασμό της μόλυνσης από μικροπλαστικά (Prata, 2018).

Ενώ οι πιθανοί κίνδυνοι για την υγεία από τα μικροπλαστικά προκαλούν ανησυχία, η τρέχουσα βάση αποδεικτικών στοιχείων εξακολουθεί να εξελίσσεται. Η συνεχής έρευνα είναι απαραίτητη για την πλήρη κατανόηση αυτών των κινδύνων και για την ενημέρωση των κατευθυντήριων γραμμών για τη δημόσια υγεία και των ρυθμιστικών πολιτικών για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος.



5.3. Τρέχοντα κενά έρευνας και γνώσης

Η τρέχουσα έρευνα για τα μικροπλαστικά έχει αρχίσει να ρίχνει φως στον επιπολασμό, τη διανομή και τις πιθανές επιπτώσεις τους στην υγεία και το περιβάλλον. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά κενά γνώσης, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν για την πλήρη κατανόηση του πεδίου εφαρμογής του ζητήματος και την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών μετριασμού.

Επικράτηση και κατανομή

Ενώ μελέτες έχουν τεκμηριώσει την παρουσία μικροπλαστικών σε διάφορα περιβάλλοντα, εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για πιο ολοκληρωμένα δεδομένα σχετικά με την κατανομή τους, ειδικά σε συστήματα γλυκού νερού και χερσαία περιβάλλοντα (Wagner et al., 2014). Απαιτούνται επίσης τυποποιημένες μέθοδοι δειγματοληψίας, ταυτοποίησης και ποσοτικοποίησης μικροπλαστικών για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ μελετών και με την πάροδο του χρόνου (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

Πηγές και διαδρομές

Ο εντοπισμός των πρωτογενών πηγών μικροπλαστικών και η κατανόηση των διαδρομών τους προς το περιβάλλον είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη περαιτέρω ρύπανσης. Απαιτείται έρευνα για τον ποσοτικό προσδιορισμό της συμβολής διαφόρων πηγών, όπως τα καλλυντικά προϊόντα, τα συνθετικά υφάσματα και η φθορά των ελαστικών, καθώς και για την παρακολούθηση της κίνησης των μικροπλαστικών μέσω του αέρα, του νερού και του εδάφους (Browne et al., 2011).

Οικολογικές επιπτώσεις

Οι οικολογικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών δεν είναι πλήρως κατανοητές. Απαιτείται περισσότερη έρευνα για να προσδιοριστεί ο τρόπος με τον οποίο τα μικροπλαστικά επηρεάζουν την άγρια ζωή σε ατομικό, πληθυσμιακό και οικοσυστημικό επίπεδο, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητάς τους να διαταράζουν τα τροφικά πλέγματα και τη βιοποικιλότητα (Galloway et al., 2017).

Κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία

Οι κίνδυνοι για την υγεία των μικροπλαστικών για τον άνθρωπο εξακολουθούν να είναι σε μεγάλο βαθμό άγνωστοι. Απαιτούνται μελέτες για τη διερεύνηση της πιθανότητας τα μικροπλαστικά να προκαλέσουν βλάβη κατά την κατάποση, την εισπνοή ή τη δερματική επαφή. Αυτό περιλαμβάνει έρευνα σχετικά με την απορρόφηση, την κατανομή, το μεταβολισμό και την απέκκριση (ADME) των μικροπλαστικών στο ανθρώπινο σώμα, καθώς και τη δυνατότητά τους



να δρουν ως φορείς παθογόνων ή να προκαλούν τοξικολογικές επιδράσεις λόγω συναφών ρύπων (Wright & Kelly, 2020).

Τοξικολογικές επιδράσεις

Η έρευνα σχετικά με τις τοξικολογικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών και των χημικών ουσιών που μεταφέρουν βρίσκεται ακόμη στα σπάργανα. Υπάρχει ανάγκη για εμπειριστατωμένες τοξικολογικές μελέτες για την κατανόηση της πιθανότητας πρόκλησης βλάβης στα μικροπλαστικά, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητάς τους να δρουν ως φορείς άλλων ρύπων και των επιπτώσεων της μακροχρόνιας έκθεσης (Koelmans et al., 2017).

Αξιολόγηση της έκθεσης του ανθρώπου

Η αξιολόγηση της ανθρώπινης έκθεσης σε μικροπλαστικά απαιτεί βελτιωμένες αναλυτικές τεχνικές ικανές να ανιχνεύουν και να ποσοτικοποιούν τα μικροπλαστικά σε διάφορες μήτρες, συμπεριλαμβανομένων των τροφίμων, του νερού και του αέρα. Υπάρχει επίσης ανάγκη για μελέτες βιοπαρακολούθησης για τον προσδιορισμό των επιπέδων μικροπλαστικών στους ανθρώπινους ιστούς και υγρά (Leslie, 2017).

Εκτίμηση κινδύνου

Απαιτούνται ολοκληρωμένες εκτιμήσεις κινδύνου για την αξιολόγηση των δυνητικών κινδύνων για την υγεία που ενέχουν τα μικροπλαστικά. Αυτό περιλαμβάνει την ενσωμάτωση δεδομένων σχετικά με τα επίπεδα έκθεσης, τον προσδιορισμό των κινδύνων, τις σχέσεις δόσης-απόκρισης και την ευπάθεια του πληθυσμού (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain, 2016).

Μετριασμός και αποκατάσταση

Η έρευνα για στρατηγικές μετριασμού και αποκατάστασης είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη βιοαποικοδομήσιμων εναλλακτικών λύσεων, βελτιώσεις στη διαχείριση αποβλήτων και τεχνολογίες για την απομάκρυνση των μικροπλαστικών από το περιβάλλον (Rochman et al., 2019).

Πολιτική και κανονισμός

Υπάρχει ανάγκη έρευνας για την ενημέρωση της πολιτικής και των κανονισμών, συμπεριλαμβανομένης της αποτελεσματικότητας της ισχύουσας νομοθεσίας και των δυνατοτήτων για νέες προσεγγίσεις για τη μείωση της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Αυτό περιλαμβάνει επίσης την αξιολόγηση των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων των μικροπλαστικών και της οικονομικής αποδοτικότητας των μέτρων μετριασμού (Thompson et al., 2009).



Η αντιμετώπιση των κενών γνώσης στην έρευνα για τα μικροπλαστικά είναι απαραίτητη για την κατανόηση της πλήρους έκτασης των επιπτώσεών τους και για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος. Οι προσπάθειες συνεργασίας μεταξύ των επιστημόνων, των υπευθύνων χάραξης πολιτικής, της βιομηχανίας και του κοινού θα είναι καίριας σημασίας για την αντιμετώπιση αυτού του παγκόσμιου ζητήματος.

6. Στρατηγικές πολιτικής και διαχείρισης

6.1. Διεθνείς κανονισμοί και συμφωνίες

Η αυξανόμενη ανησυχία για τη ρύπανση από μικροπλαστικά έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη διαφόρων διεθνών κανονισμών και συμφωνιών που αποσκοπούν στη μείωση της απελευθέρωσης μικροπλαστικών στο περιβάλλον. Οι προσπάθειες αυτές συχνά επικεντρώνονται σε συγκεκριμένες πηγές ρύπανσης από μικροπλαστικά, όπως τα καλλυντικά προϊόντα ή τα πλαστικά μίας χρήσης, και περιλαμβάνουν συνδυασμό εθελοντικών πρωτοβουλιών και δεσμευτικών κανονισμών.

Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον (UNEP)

Το Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον βρίσκεται στην πρώτη γραμμή της αντιμετώπισης της πλαστικής ρύπανσης. Το έργο του UNEP περιλαμβάνει την υποστήριξη της παγκόσμιας δράσης, τη διεξαγωγή έρευνας και την υποστήριξη της ανάπτυξης διεθνών κατευθυντήριων γραμμών και προτύπων. Μία από τις βασικές πρωτοβουλίες είναι η Παγκόσμια Σύμπραξη για τα Θαλάσσια Απορρίμματα, η οποία συγκεντρώνει κυβερνήσεις, τον ιδιωτικό τομέα, την κοινωνία των πολιτών και διακυβερνητικούς οργανισμούς για τη μείωση των θαλάσσιων απορριμμάτων, συμπεριλαμβανομένων των μικροπλαστικών (UNEP, 2017).

Η Σύμβαση της Βασιλείας

Η Σύμβαση της Βασιλείας για τον έλεγχο των διασυνοριακών κινήσεων επικίνδυνων αποβλήτων και της διάθεσής τους τροποποιήθηκε το 2019 ώστε να συμπεριλάβει τα πλαστικά απόβλητα στο κανονιστικό της πλαίσιο. Η παρούσα τροπολογία αποσκοπεί στη μείωση της διακίνησης πλαστικών αποβλήτων μεταξύ χωρών, διασφαλίζοντας ότι η διαχείριση των αποβλήτων αυτών γίνεται με περιβαλλοντικά ορθό τρόπο (Secretariat of the Basel Convention, 2019).

Η Σύμβαση της Στοκχόλμης

Η σύμβαση της Στοκχόλμης για τους έμμονους οργανικούς ρύπους (POP) εξετάζει το ζήτημα των επικίνδυνων χημικών ουσιών που συνδέονται με τα μικροπλαστικά. Ενώ η σύμβαση δεν



ρυθμίζει άμεσα τα μικροπλαστικά, ελέγχει την παραγωγή και τη χρήση ορισμένων χημικών ουσιών που μπορούν να προσροφηθούν και να μεταφερθούν από μικροπλαστικά σωματίδια (Stockholm Convention, 2001).

Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ)

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εφαρμόσει αρκετές οδηγίες για την αντιμετώπιση της πλαστικής ρύπανσης. Η οδηγία για τα πλαστικά μίας χρήσης, που εκδόθηκε το 2019, αποσκοπεί στην πρόληψη και τη μείωση των επιπτώσεων ορισμένων πλαστικών προϊόντων στο περιβάλλον, ιδίως στο θαλάσσιο περιβάλλον. Περιλαμβάνει μέτρα όπως η απαγόρευση συγκεκριμένων πλαστικών αντικειμένων μίας χρήσης και η προώθηση εναλλακτικών λύσεων (European Parliament and Council, 2019).

Η οδηγία-πλαίσιο για τη θαλάσσια στρατηγική (MSFD)

Η ΟΠΘΣ είναι άλλη μια βασική νομοθετική πράξη της ΕΕ που απαιτεί από τα κράτη μέλη να επιτύχουν «καλή περιβαλλοντική κατάσταση» των θαλάσσιων υδάτων τους έως το 2020, η οποία περιλαμβάνει τη μείωση των θαλάσσιων απορριμμάτων. Η οδηγία έχει οδηγήσει σε διάφορες δράσεις και προγράμματα παρακολούθησης που επικεντρώνονται στα μικροπλαστικά (European Parliament and Council, 2008).

Οι διεθνείς κανονισμοί και συμφωνίες διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην αντιμετώπιση της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα αυτών των μέτρων εξαρτάται από την εφαρμογή και την επιβολή τους σε εθνικό επίπεδο, καθώς και από τη συνεχιζόμενη διεθνή συνεργασία και δέσμευση για τη μείωση των πλαστικών αποβλήτων.

6.2. Εθνικές πολιτικές και νομοθεσία

Οι εθνικές πολιτικές και η νομοθεσία διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην καταπολέμηση της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Οι χώρες σε όλο τον κόσμο έχουν αρχίσει να αναγνωρίζουν τη σημασία της αντιμετώπισης αυτού του ζητήματος και έχουν εφαρμόσει διάφορους νόμους και κανονισμούς για τον έλεγχο της παραγωγής, της χρήσης και της απόρριψης των πλαστικών. Αυτές οι εθνικές προσπάθειες είναι απαραίτητες για τη συμπλήρωση των διεθνών συμφωνιών και τη διασφάλιση αποτελεσματικής τοπικής δράσης.

Ηνωμένες Πολιτείες

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, ο νόμος για τα ύδατα χωρίς μικροσφαιρίδια του 2015 ήταν ένα σημαντικό βήμα για την καταπολέμηση της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Αυτή η πράξη



απαγορεύει την παρασκευή και διανομή καλλυντικών που ξεπλένονται και περιέχουν πλαστικά μικροσφαιρίδια, τα οποία βρίσκονται συνήθως σε προϊόντα απολέπισης προσωπικής φροντίδας (Κογκρέσο των ΗΠΑ, 2015). Επιπλέον, διάφορα κράτη έχουν θεσπίσει τη δική τους νομοθεσία για την αντιμετώπιση των πλαστικών μίας χρήσης και των απορριμμάτων συσκευασίας.

Καναδάς

Ο Καναδάς έχει λάβει μέτρα κατά των μικροπλαστικών απαγορεύοντας τα μικροσφαιρίδια στα προϊόντα περιποίησης από την 1η Ιουλίου 2018. Ο καναδικός νόμος για την προστασία του περιβάλλοντος τροποποιήθηκε για να καταγράψει τα μικροσφαιρίδια ως τοξική ουσία, επιτρέποντας στην κυβέρνηση να ρυθμίσει και να περιορίσει τη χρήση τους (Government of Canada, 2017).

Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ)

Η ΕΕ έχει αναλάβει ενεργό ρόλο στην αντιμετώπιση της πλαστικής ρύπανσης μέσω μιας σειράς οδηγιών και κανονισμών. Η οδηγία της ΕΕ για τις πλαστικές σακούλες, που εγκρίθηκε το 2015, στοχεύει στη μείωση της κατανάλωσης λεπτών πλαστικών σακουλών μεταφοράς, ενθαρρύνοντας τα κράτη μέλη να υιοθετήσουν μέτρα για την ελαχιστοποίηση της χρήσης τους (European Parliament and Council, 2015).

Ηνωμένο Βασίλειο

Μετά το Brexit, το Ηνωμένο Βασίλειο συνέχισε να επιβάλλει αυστηρούς ελέγχους στα πλαστικά. Η απαγόρευση του Ηνωμένου Βασιλείου για τα μικροσφαιρίδια στα προϊόντα προσωπικής φροντίδας τέθηκε σε ισχύ το 2018 και υπάρχουν συνεχιζόμενες συζητήσεις σχετικά με την επέκταση του πεδίου εφαρμογής των μέτρων μείωσης των πλαστικών αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένου ενός φόρου στις πλαστικές συσκευασίες με λιγότερο από 30% ανακυκλωμένο περιεχόμενο (UK Government, 2018).

Ινδία

Η Ινδία ανακοίνωσε ένα ολοκληρωμένο σύνολο μέτρων για την εξάλειψη των πλαστικών μίας χρήσης έως το 2022. Αυτό το φιλόδοξο σχέδιο περιλαμβάνει την απαγόρευση ορισμένων τύπων πλαστικών μίας χρήσης, τη βελτίωση των υποδομών διαχείρισης αποβλήτων και την ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με τις επιπτώσεις της πλαστικής ρύπανσης (Ministry of Environment, Forest and Climate Change, 2018).

Ελλάδα

Η Ελλάδα, ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, υπόκειται στους κανονισμούς της ΕΕ που στοχεύουν στη μείωση της πλαστικής ρύπανσης και στην προώθηση της ανακύκλωσης και της διαχείρισης αποβλήτων.



Ένα από τα βασικά νομοθετήματα της ΕΕ που θα επηρεάσει την Ελλάδα είναι η οδηγία για τα πλαστικά μίας χρήσης (οδηγία (ΕΕ) 2019/904), την οποία ενέκρινε η ΕΕ για την αντιμετώπιση των 10 πλαστικών αντικειμένων μίας χρήσης που εμφανίζονται συχνότερα στις ευρωπαϊκές παραλίες. Η οδηγία περιλαμβάνει μέτρα όπως η απαγόρευση ορισμένων πλαστικών προϊόντων μίας χρήσης για τα οποία υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις και απαιτεί από τα κράτη μέλη να επιτύχουν συγκεκριμένους στόχους για τη μείωση της χρήσης πλαστικών και τη συλλογή πλαστικών φιαλών.

Η Ελλάδα, όπως και άλλα κράτη μέλη της ΕΕ, αναμένεται να μεταφέρει τις οδηγίες της ΕΕ στο εθνικό δίκαιο και να εφαρμόσει τα απαραίτητα μέτρα για να συμμορφωθεί με τους στόχους και τους κανονισμούς της ΕΕ. Αυτό θα περιλαμβάνει προσπάθειες για τη μείωση της χρήσης πλαστικών μίας χρήσης, τη βελτίωση των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων και ανακύκλωσης και την αύξηση της ευαισθητοποίησης του κοινού σχετικά με τις επιπτώσεις της πλαστικής ρύπανσης.

Για τις πιο πρόσφατες και λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τις εθνικές πολιτικές και τη νομοθεσία της Ελλάδας σχετικά με τα μικροπλαστικά και ευρύτερα περιβαλλοντικά ζητήματα, θα ήταν απαραίτητο να συμβουλευτείτε τις επίσημες πηγές της ελληνικής κυβέρνησης ή τις τελευταίες εκθέσεις σχετικά με την εφαρμογή της περιβαλλοντικής πολιτικής στην Ελλάδα.

Οι εθνικές πολιτικές και η νομοθεσία είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Ενώ υπάρχει μια αυξανόμενη τάση προς αυστηρότερους κανονισμούς, η αποτελεσματικότητα αυτών των πολιτικών εξαρτάται από την επιβολή, τη συμμετοχή του κοινού και την ανάπτυξη βιώσιμων εναλλακτικών λύσεων στα πλαστικά προϊόντα.

6.3. Τεχνικές μετριασμού και αποκατάστασης

Οι τεχνικές μετριασμού και αποκατάστασης της ρύπανσης από μικροπλαστικά είναι απαραίτητες για τη μείωση του υφιστάμενου περιβαλλοντικού φορτίου των μικροπλαστικών και την πρόληψη περαιτέρω μόλυνσης. Αυτές οι τεχνικές κυμαίνονται από στρατηγικές μείωσης της πηγής έως λειτουργίες καθαρισμού και προηγμένες τεχνολογίες φιλτραρίσματος.

Μείωση πηγής

Η πρόληψη στην πηγή ξεχωρίζει ως η πιο αποτελεσματική στρατηγική για τον μετριασμό της ρύπανσης από μικροπλαστικά, δίνοντας έμφαση στα προληπτικά μέτρα που αποτελούν την πηγή του προβλήματος. Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση περιλαμβάνει τη μείωση τόσο της παραγωγής όσο και της χρήσης πλαστικών μίας χρήσης, αντιμετωπίζοντας τα βαθύτερα αίτια της πλαστικής ρύπανσης. Αυτό συνεπάγεται αλλαγή στα πρότυπα σχεδιασμού και κατανάλωσης



πλαστικών προϊόντων για την ελαχιστοποίηση της παραγωγής αποβλήτων και την προώθηση της βιωσιμότητας (Thompson et al., 2009).

Μια κρίσιμη πτυχή της μείωσης της πηγής είναι ο περιορισμός των πλαστικών μίας χρήσης. Οι πολιτικές και οι πρωτοβουλίες θα πρέπει να επικεντρωθούν στη μείωση της κατασκευής και κατανάλωσης αντικειμένων όπως συσκευασίες μιας χρήσης, σκεύη και δοχεία, τα οποία συμβάλλουν σημαντικά στη συσσώρευση μικροπλαστικών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής αυστηρών κανονισμών, κινήτρων για την ανάπτυξη πλαστικών εναλλακτικών λύσεων και εκστρατειών ευαισθητοποίησης του κοινού για την ενθάρρυνση της αλλαγής συμπεριφοράς (Thompson et al., 2009).

Η βελτίωση του σχεδιασμού των προϊόντων είναι ένα άλλο αναπόσπαστο στοιχείο της μείωσης της πηγής. Η έμφαση πρέπει να δοθεί στη δημιουργία προϊόντων με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, αυξημένη ανθεκτικότητα και βελτιωμένη ανακυκλωσιμότητα. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί την ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις και μειώνει τη συνολική ζήτηση για παραγωγή πλαστικού. Οι καινοτομίες στον σχεδιασμό συσκευασιών, για παράδειγμα, μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της πηγής, δίνοντας προτεραιότητα σε υλικά που έχουν μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο και είναι λιγότερο επιρρεπή στη διάσπαση σε μικροπλαστικά (Thompson et al., 2009).

Η προώθηση της χρήσης βιοαποικοδομήσιμων υλικών αποτελεί μια μελλοντοστραφή λύση στο πλαίσιο της μείωσης των πηγών. Ενθαρρύνοντας την υιοθέτηση υλικών που μπορούν φυσικά να διασπαστούν με την πάροδο του χρόνου χωρίς να προκαλέσουν βλάβη στο περιβάλλον, ο κύκλος της πλαστικής ρύπανσης μπορεί να διαταραχθεί. Αυτή η μετατόπιση απαιτεί συνεργατικές προσπάθειες με τη συμμετοχή κατασκευαστών, καταναλωτών και υπευθύνων χάραξης πολιτικής για να δοθεί προτεραιότητα στην ανάπτυξη και εφαρμογή βιοδιασπώμενων εναλλακτικών λύσεων σε διάφορες βιομηχανίες (Thompson et al., 2009).

Η μελέτη-ορόσημο των Thompson et al. (2009) υπογραμμίζει τη σημασία της μείωσης των πηγών στην αντιμετώπιση της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Τα ευρήματά τους ενισχύουν την ιδέα ότι η αντιμετώπιση των βαθύτερων αιτίων της πλαστικής ρύπανσης είναι θεμελιώδης για τη δημιουργία ενός βιώσιμου και ανθεκτικού περιβάλλοντος. Μέσω ισχυρών στρατηγικών μείωσης των πηγών, μπορούμε να εργαστούμε συλλογικά για τον μετριασμό των επιπτώσεων των μικροπλαστικών, τη διατήρηση των οικοσυστημάτων και την προώθηση μιας πιο βιώσιμης σχέσης με τα πλαστικά υλικά.

Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων

Η ενίσχυση των διαδικασιών επεξεργασίας λυμάτων είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό της ρύπανσης από μικροπλαστικά, ιδίως για την πρόληψη της απελευθέρωσής τους σε υδάτινα περιβάλλοντα. Οι παραδοσιακές μέθοδοι συχνά χάνουν μικρότερα σωματίδια, προκαλώντας την υιοθέτηση προηγμένων συστημάτων φιλτραρίσματος όπως οι βιοαντιδραστήρες



μεμβράνης. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν μεμβράνες σχεδιασμένες να συλλαμβάνουν μικροσκοπικά σωματίδια, συμπεριλαμβανομένων των μικροπλαστικών, μειώνοντας σημαντικά την απόρριψή τους και τις πιθανές επιπτώσεις στα υδάτινα οικοσυστήματα (Talvitie et al., 2017).

Η βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, συμπεριλαμβανομένων διαδικασιών όπως η καθίζηση και η πήξη, βοηθά περαιτέρω στην απομάκρυνση των μικροπλαστικών από τα λύματα πριν απελευθερωθούν στο περιβάλλον. Είναι σημαντικό να επεκταθούν αυτές οι βελτιώσεις όχι μόνο στα αστικά λύματα αλλά και στα βιομηχανικά λύματα, καθώς πολλά μικροπλαστικά προέρχονται από βιομηχανικές διεργασίες. Η συνεργασία μεταξύ βιομηχανιών και ρυθμιστικών φορέων είναι καίριας σημασίας για την εφαρμογή προσαρμοσμένων μέτρων επεξεργασίας βιομηχανικών λυμάτων (Talvitie et al., 2017).

Η μελέτη των Talvitie et al. (2017) υπογραμμίζει τη σημασία των προηγμένων συστημάτων φιλτραρίσματος, όπως οι βιοαντιδραστήρες μεμβράνης, στη δέσμευση μικροπλαστικών κατά την επεξεργασία λυμάτων. Αυτές οι εξελίξεις αντιπροσωπεύουν ένα κρίσιμο βήμα προς βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης των υδάτων και μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα.

Καθαρισμοί παραλιών και ωκεανών

Οι καθαρισμοί παραλιών και ωκεανών, με επικεφαλής μη κερδοσκοπικούς οργανισμούς και κοινοτικές ομάδες, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον μετριασμό της πλαστικής ρύπανσης. Αυτές οι οργανωμένες προσπάθειες επικεντρώνονται στην απομάκρυνση μεγαλύτερων πλαστικών απορριμμάτων από παράκτιες περιοχές πριν διασπαστούν σε επιβλαβή μικροπλαστικά, διασφαλίζοντας έτσι την υγεία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

Αυτές οι πρωτοβουλίες καθαρισμού περιλαμβάνουν εθελοντές που συλλέγουν διάφορες μορφές πλαστικών απορριμμάτων, από μπουκάλια έως αλιευτικά εργαλεία, αποτρέποντας την αποσύνθεση αυτών των αντικειμένων με την πάροδο του χρόνου. Πέρα από την άμεση απομάκρυνση των συντριμμιών, οι προσπάθειες αυτές αυξάνουν επίσης την ευαισθητοποίηση σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πλαστικής ρύπανσης, ενισχύοντας το αίσθημα ευθύνης και τις βιώσιμες πρακτικές στις τοπικές κοινότητες.

Ενώ οι καθαρισμοί των παραλιών και των ωκεανών είναι αποτελεσματικοί στην αντιμετώπιση της υπάρχουσας πλαστικής ρύπανσης, είναι σημαντικό να συμπληρωθούν αυτές οι προσπάθειες με προληπτικά μέτρα. Η μείωση των πηγών, η βελτιωμένη διαχείριση των αποβλήτων και οι εκστρατείες ευαισθητοποίησης του κοινού αποτελούν βασικά στοιχεία μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής. Ωστόσο, η οργανωμένη απομάκρυνση μεγαλύτερων πλαστικών απορριμμάτων μέσω πρωτοβουλιών καθαρισμού παραμένει κρίσιμο στοιχείο στη συλλογική προσπάθεια για την προστασία του παράκτιου περιβάλλοντος και την καταπολέμηση της πλαστικής ρύπανσης.



Το έργο οργανισμών όπως το Ocean Conservancy (2020) υπογραμμίζει τον ζωτικό ρόλο των πρωτοβουλιών που καθοδηγούνται από την κοινότητα στη διατήρηση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

Βιοαποκατάσταση

Η βιοαποκατάσταση, μια πολλά υποσχόμενη οδός στον αγώνα κατά της πλαστικής ρύπανσης, περιλαμβάνει τη χρήση μικροοργανισμών και φυτών για την αποδόμηση ή τη συσσώρευση μικροπλαστικών. Η δυνατότητα αξιοποίησης των φυσικών δυνατοτήτων αυτών των ζωντανών οργανισμών για τη διάσπαση ή την απομόνωση των μικροπλαστικών αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στις συμβατικές μεθόδους καθαρισμού. Οι ερευνητές διερευνούν την αποτελεσματικότητα διαφόρων μικροβιακών και φυτικών ειδών στη στόχευση συγκεκριμένων τύπων μικροπλαστικών, προσφέροντας μια προσαρμοσμένη προσέγγιση για τον μετριασμό της ρύπανσης σε διαφορετικά περιβάλλοντα (Urbanek et al., 2018).

Ενώ η βιοαποκατάσταση είναι πολλά υποσχόμενη, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτός ο τομέας βρίσκεται ακόμα στα αρχικά στάδια ανάπτυξης του και απαιτεί περαιτέρω εις βάθος έρευνα. Οι ερευνητές εργάζονται για να κατανοήσουν τους μηχανισμούς με τους οποίους οι μικροοργανισμοί και τα φυτά αλληλεπιδρούν με τα μικροπλαστικά και τις βέλτιστες συνθήκες για την ενίσχυση των δυνατοτήτων αποκατάστασής τους. Παρά τους τρέχοντες περιορισμούς της, η συνεχιζόμενη διερεύνηση της βιοαποκατάστασης υπογραμμίζει τις δυνατότητές της ως καινοτόμου και βιώσιμης λύσης για τον μετριασμό του διάχυτου ζητήματος της ρύπανσης από μικροπλαστικά σε διάφορα οικοσυστήματα (Urbanek et al., 2018).

Νανοτεχνολογία

Η νανοτεχνολογία υπόσχεται ως λύση αιχμής για την αντιμετώπιση της ρύπανσης από μικροπλαστικά, εισάγοντας καινοτόμα υλικά σχεδιασμένα να δεσμεύουν και να αποικοδομούν αυτά τα μικροσκοπικά σωματίδια. Η ανάπτυξη νανοϋλικών, ειδικά σχεδιασμένων για την αλληλεπίδρασή τους με τα μικροπλαστικά, προσφέρει νέα σύνορα στις στρατηγικές αποκατάστασης. Μια αξιοσημείωτη εφαρμογή περιλαμβάνει τη χρήση μαγνητικών νανοσωματιδίων που έχουν σχεδιαστεί για τη δέσμευση μικροπλαστικών στο νερό. Αυτά τα μαγνητικά σωματίδια μπορούν να συνδεθούν αποτελεσματικά με τα μικροπλαστικά, επιτρέποντας τον εύκολο διαχωρισμό τους μέσω μαγνητικών διεργασιών. Αυτή η στοχευμένη προσέγγιση παρέχει μια πιθανή οδό για την αποτελεσματική απομάκρυνση των μικροπλαστικών από τις πηγές νερού (Zhang et al., 2020).

Παρά τα πιθανά οφέλη, είναι σημαντικό να προσεγγίσουμε τη νανοτεχνολογία με προσοχή και να διεξάγουμε διεξοδική έρευνα σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την ασφάλειά της. Η διερεύνηση νανοϋλικών για την αποκατάσταση μικροπλαστικών βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, γεγονός που απαιτεί προσεκτική εξέταση των πιθανών ακούσιων συνεπειών και μακροπρόθεσμων επιπτώσεων. Καθώς ο τομέας εξελίσσεται, η υπεύθυνη και ολοκληρωμένη



αξιολόγηση των εφαρμογών της νανοτεχνολογίας θα είναι ζωτικής σημασίας για να διασφαλιστεί ότι αυτές οι καινοτόμες λύσεις συμβάλλουν θετικά στον μετριασμό της πλαστικής ρύπανσης χωρίς να εισάγουν νέες περιβαλλοντικές προκλήσεις (Zhang et al., 2020).

Χημική Ανακύκλωση

Η χημική ανακύκλωση αντιπροσωπεύει μια πολλά υποσχόμενη οδό για τον μετριασμό της πλαστικής ρύπανσης, προσφέροντας μια ξεχωριστή προσέγγιση για τη διαχείριση των πλαστικών αποβλήτων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους ανακύκλωσης, η χημική ανακύκλωση περιλαμβάνει τη διάσπαση των πλαστικών στα συστατικά μονομερή τους ή τη μετατροπή τους σε άλλες χρήσιμες χημικές ουσίες. Αυτός ο μετασχηματισμός επιτρέπει τη δημιουργία νέων υλικών, παρέχοντας ένα σύστημα κλειστού βρόχου που μπορεί να συμβάλει σε έναν πιο βιώσιμο κύκλο ζωής πλαστικού. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της χημικής ανακύκλωσης είναι η ικανότητά της να επεξεργάζεται μικτά και μολυσμένα πλαστικά απόβλητα, κάτι που συχνά αποτελεί πρόκληση για τις συμβατικές μεθόδους ανακύκλωσης. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά τη χημική ανακύκλωση ιδιαίτερα πολύτιμη για την αντιμετώπιση των πολύπλοκων και ποικίλων ροών πλαστικών αποβλήτων που συμβάλλουν στη ρύπανση του περιβάλλοντος (Fullana et al., 2020).

Ενώ η χημική ανακύκλωση έχει μεγάλες δυνατότητες, υπάρχουν προκλήσεις και ζητήματα που απαιτούν προσοχή. Η οικονομική σκοπιμότητα, η επεκτασιμότητα και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαδικασιών χημικής ανακύκλωσης μεγάλης κλίμακας χρειάζονται προσεκτική αξιολόγηση. Επιπλέον, η διασφάλιση ότι η χημική ανακύκλωση συμπληρώνει και δεν αντικαθιστά τις παραδοσιακές προσπάθειες ανακύκλωσης είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση μιας ολιστικής προσέγγισης στη διαχείριση των πλαστικών αποβλήτων. Καθώς η συνεχιζόμενη έρευνα και ανάπτυξη βελτιώνουν τις τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης, υπάρχει αισιοδοξία ότι αυτή η μέθοδος θα διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της πλαστικής ρύπανσης (Fullana et al., 2020).

Πολιτική και εκπαίδευση

Η εφαρμογή αποτελεσματικών πολιτικών αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο στη συλλογική προσπάθεια για τον μετριασμό της πλαστικής ρύπανσης, ιδιαίτερα όσον αφορά το διαδεδομένο ζήτημα των μικροπλαστικών. Οι κυβερνήσεις και οι ρυθμιστικοί φορείς διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση της πορείας της κατανάλωσης πλαστικών και της διαχείρισης αποβλήτων. Οι πολιτικές που παρέχουν κίνητρα για τη μείωση της χρήσης πλαστικού, όπως η επιβολή φόρων στα πλαστικά μίας χρήσης ή η παροχή οικονομικών κινήτρων για βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη συμπεριφορά των καταναλωτών. Ευθυγραμμίζοντας τα οικονομικά κίνητρα με τις φιλικές προς το περιβάλλον επιλογές, οι πολιτικές δημιουργούν ένα πλαίσιο που ενθαρρύνει τις επιχειρήσεις και τους ιδιώτες να



υιοθετήσουν πιο βιώσιμες πρακτικές, μειώνοντας τελικά τη συνολική επιβάρυνση της πλαστικής ρύπανσης (Hartley et al., 2018).

Παράλληλα με τα μέτρα πολιτικής, οι εκπαιδευτικές εκστρατείες διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην προώθηση της ευαισθητοποίησης του κοινού και στην προώθηση αλλαγών συμπεριφοράς. Η εκπαίδευση των κοινοτήτων σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών, τις πηγές της πλαστικής ρύπανσης και τη σημασία της υπεύθυνης κατανάλωσης δίνει τη δυνατότητα στα άτομα να κάνουν συνειδητές επιλογές. Αυτές οι εκστρατείες χρησιμεύουν ως ισχυρά εργαλεία για να υποκινήσουν μια πολιτιστική στροφή προς τη βιωσιμότητα, επηρεάζοντας τις αποφάσεις αγοράς και προωθώντας την υπεύθυνη χρήση πλαστικού. Συνδυάζοντας ισχυρές πολιτικές με εκτεταμένες εκπαιδευτικές πρωτοβουλίες, οι κοινωνίες μπορούν να εργαστούν προς μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τον μετριασμό της πλαστικής ρύπανσης, αντιμετωπίζοντας τόσο τις συστημικές αιτίες όσο και τις ατομικές συμπεριφορές (Hartley et al., 2018).

Ο μετριασμός και η αποκατάσταση της ρύπανσης από μικροπλαστικά απαιτούν μια πολύπλευρη προσέγγιση που περιλαμβάνει τεχνολογική καινοτομία, βελτιώσεις στη διαχείριση αποβλήτων, παρεμβάσεις πολιτικής και συμμετοχή του κοινού. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη είναι ζωτικής σημασίας για την εξεύρεση αποτελεσματικών λύσεων σε αυτό το παγκόσμιο ζήτημα.

6.4. Ευαισθητοποίηση και εκπαίδευση του κοινού

Η ευαισθητοποίηση και η εκπαίδευση του κοινού αποτελούν κρίσιμες συνιστώσες για την καταπολέμηση της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Η ενημέρωση του κοινού σχετικά με τις πηγές, τις επιπτώσεις και τους τρόπους μείωσης της ρύπανσης από μικροπλαστικά μπορεί να οδηγήσει σε πιο βιώσιμες καταναλωτικές συμπεριφορές και αυξημένη υποστήριξη για πολιτικές που στοχεύουν στη μείωση των πλαστικών αποβλήτων.

Επιλογές και αλλαγή συμπεριφοράς των καταναλωτών

Οι εκπαιδευτικές εκστρατείες που αναδεικνύουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των πλαστικών μίας χρήσης μπορούν να λειτουργήσουν ως ισχυροί καταλύτες για την αλλαγή της συμπεριφοράς των καταναλωτών, συμβάλλοντας σημαντικά στον μετριασμό της πλαστικής ρύπανσης. Αυτές οι εκστρατείες, όπως αποδεικνύεται από τους Rochman et al. (2015), διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην αύξηση της ευαισθητοποίησης σχετικά με τις συνέπειες της κατανάλωσης πλαστικού. Δίνοντας έμφαση στην οικολογική βλάβη που προκαλείται από τα πλαστικά μίας χρήσης, οι καταναλωτές ενημερώνονται περισσότερο και είναι πιο πιθανό να κάνουν βιώσιμες επιλογές, όπως η επιλογή επαναχρησιμοποιήσιμων σακουλών, μπουκαλιών και δοχείων. Η σχέση μεταξύ της κατανόησης των άμεσων συνεπειών των ατομικών ενεργειών και της επακόλουθης αλλαγής συμπεριφοράς υπογραμμίζει τη σημασία της στοχευμένης



εκπαίδευσης για τη δημιουργία μιας πιο περιβαλλοντικά συνειδητής κοινωνίας και τη μείωση της εξάρτησης από πλαστικά μιας χρήσης.

Σχολικά Εκπαιδευτικά Προγράμματα

Η ενσωμάτωση μαθημάτων σχετικά με την πλαστική ρύπανση και την περιβαλλοντική διαχείριση στα σχολικά προγράμματα σπουδών μπορεί να είναι μια ισχυρή στρατηγική για τον μετριασμό της πλαστικής ρύπανσης. Τα εκπαιδευτικά προγράμματα στα σχολεία, όπως υποστηρίζεται από το Litterati (2021), έχουν τη δυνατότητα να ενσταλάξουν μια ισχυρή αίσθηση περιβαλλοντικής ευθύνης στη νεότερη γενιά. Παρέχοντας στους μαθητές γνώσεις σχετικά με τις επιπτώσεις της πλαστικής ρύπανσης και προωθώντας μια βαθιά κατανόηση των περιβαλλοντικών ζητημάτων, τα σχολεία συμβάλλουν στη διαμόρφωση ατόμων που έχουν μεγαλύτερη επίγνωση του οικολογικού τους αποτυπώματος. Αυτή η πρόωπη έκθεση στην περιβαλλοντική εκπαίδευση δημιουργεί ένα θεμέλιο για βιώσιμες πρακτικές, επηρεάζοντας τις στάσεις και τις συμπεριφορές των μελλοντικών πολιτών απέναντι στην υπεύθυνη χρήση πλαστικού και τις προσπάθειες διατήρησης.

Συμμετοχή της κοινότητας

Η συμμετοχή της κοινότητας μέσω εργαστηρίων, καθαρισμών παραλιών και τοπικών εκδηλώσεων διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στον μετριασμό της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Αυτές οι πρωτοβουλίες όχι μόνο εμπλέκουν ενεργά το κοινό στις πρακτικές προσπάθειες για την απομάκρυνση των πλαστικών αποβλήτων από το περιβάλλον, αλλά χρησιμεύουν επίσης ως πολύτιμες εκπαιδευτικές ευκαιρίες. Καλλιεργώντας ένα αίσθημα συλλογικής ευθύνης, η συμμετοχή της κοινότητας ενθαρρύνει τα άτομα να συμβάλλουν ενεργά στη μείωση των μικροπλαστικών. Αυτές οι δραστηριότητες όχι μόνο ενισχύουν την περιβαλλοντική καθαριότητα, αλλά και αυξάνουν την ευαισθητοποίηση, ενδυναμώνοντας τις κοινότητες με τις γνώσεις που απαιτούνται για να κάνουν βιώσιμες επιλογές και να υποστηρίξουν πολιτικές που αντιμετωπίζουν τις βασικές αιτίες της πλαστικής ρύπανσης. Μέσω αυτής της δέσμευσης, οι κοινότητες γίνονται ενεργοί διαχειριστές του τοπικού τους περιβάλλοντος, προωθώντας μια κουλτούρα περιβαλλοντικής συνείδησης και συμβάλλοντας στο ευρύτερο κίνημα κατά της πλαστικής ρύπανσης (Ocean Conservancy, 2020).

Εκστρατείες στα μέσα ενημέρωσης και στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης

Οι εκστρατείες στα μέσα ενημέρωσης, που περιλαμβάνουν ντοκιμαντέρ, πρωτοβουλίες στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης και ανακοινώσεις κοινής ωφέλειας, χρησιμεύουν ως εργαλεία επιρροής στην προσπάθεια μετριασμού της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Με την ικανότητά τους να προσεγγίζουν ένα ευρύ κοινό, αυτές οι εκστρατείες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ευαισθητοποίηση σχετικά με τον εκτεταμένο αντίκτυπο των μικροπλαστικών και τονίζουν τη σημασία της μείωσης της κατανάλωσης πλαστικού. Μέσω συναρπαστικών οπτικών εικόνων και προσβάσιμων μηνυμάτων, οι εκστρατείες των μέσων ενημέρωσης συμβάλλουν στην



εκπαίδευση του κοινού, προωθώντας μια συλλογική κατανόηση του επείγοντος χαρακτήρα της αντιμετώπισης της πλαστικής ρύπανσης. Αξιοποιώντας διάφορες πλατφόρμες μέσων ενημέρωσης, αυτές οι πρωτοβουλίες έχουν τη δυνατότητα να εμπνεύσουν εκτεταμένες αλλαγές συμπεριφοράς, ενθαρρύνοντας τα άτομα να υιοθετήσουν πιο βιώσιμες πρακτικές και να υποστηρίξουν μέτρα που αντιμετωπίζουν τις βασικές αιτίες της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Το έργο των Xanthos and Walker (2017) υπογραμμίζει τον σημαντικό ρόλο των εκστρατειών των μέσων ενημέρωσης στην ευαισθητοποίηση του κοινού και τη συμμετοχή του στον παγκόσμιο αγώνα κατά της πλαστικής ρύπανσης.

Συνεργασία με τη Βιομηχανία

Η συνεργασία με τους ενδιαφερόμενους φορείς της βιομηχανίας αποτελεί βασική στρατηγική στη συλλογική προσπάθεια για τη μείωση των πλαστικών αποβλήτων και τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους. Μέσω συνεργασιών με επιχειρήσεις, μπορεί να αναπτυχθεί εκπαιδευτικό υλικό για την προώθηση βέλτιστων πρακτικών για την ελαχιστοποίηση των πλαστικών αποβλήτων σε διάφορες βιομηχανίες. Οι εταιρείες, με τη σειρά τους, μπορούν να συμβάλουν στην ευαισθητοποίηση των καταναλωτών ενσωματώνοντας ενημερωτικές προσπάθειες επισημάνσης και μάρκετινγκ που αναδεικνύουν βιώσιμες πρακτικές. Η μελέτη των Hopewell et al. (2009) υπογραμμίζει τη σημασία αυτών των συνεργατικών προσπαθειών, τονίζοντας τη δυνατότητα συνεργασίας της βιομηχανίας να οδηγήσει σε θετική αλλαγή στη συμπεριφορά των καταναλωτών και να προωθήσει μια πιο υπεύθυνη προσέγγιση στην κατανάλωση πλαστικού. Τέτοιες συνεργασίες δημιουργούν ευκαιρίες για κοινή ευθύνη, καινοτόμες λύσεις και συλλογική δέσμευση για την αντιμετώπιση των σύνθετων προκλήσεων που θέτει η πλαστική ρύπανση.

Η ευαισθητοποίηση και η εκπαίδευση του κοινού είναι απαραίτητες για τη δημιουργία μιας κοινωνικής στροφής προς τη μείωση της εξάρτησης από τα πλαστικά. Μέσω διάφορων εκπαιδευτικών στρατηγικών και συνεργατικών προσπαθειών, είναι δυνατόν να ενδυναμωθούν τα άτομα και οι κοινότητες να αναλάβουν δράση κατά της ρύπανσης από μικροπλαστικά και να υποστηρίξουν την περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

7. Συμπέρασμα- Συζήτηση

Περίληψη των ευρημάτων

Η έρευνα για τη ρύπανση από μικροπλαστικά αποκάλυψε ένα πειστικό περιβαλλοντικό ζήτημα με εκτεταμένες επιπτώσεις. Τα μικροπλαστικά έχουν ανακαλυφθεί σε διάφορα περιβάλλοντα παγκοσμίως, που εκτείνονται από τις βαθύτερες ωκεάνιες τάφρους έως τις υψηλότερες βουνοκορφές. Αυτά τα μικροπλαστικά προέρχονται από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένης



της διάσπασης μεγαλύτερων πλαστικών υπολειμμάτων, βιομηχανικών διεργασιών και καταναλωτικών προϊόντων όπως καλλυντικά και συνθετικά υφάσματα. Επιπλέον, η περιβαλλοντική υποβάθμιση των πλαστικών αποβλήτων συμβάλλει σε δευτερογενείς πηγές μικροπλαστικών.

Η απειλή που θέτουν τα μικροπλαστικά επεκτείνεται τόσο στα θαλάσσια όσο και στα χερσαία οικοσυστήματα, όπου η κατάποση από μια σειρά οργανισμών έχει ως αποτέλεσμα φυσική και χημική βλάβη. Ανησυχίες σχετικά με τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία προκύπτουν από την πιθανή συσσώρευση μικροπλαστικών στην τροφική αλυσίδα, αν και η έκταση αυτών των επιπτώσεων εξακολουθεί να διερευνάται.

Τα αναποτελεσματικά συστήματα διαχείρισης αποβλήτων, ιδιαίτερα σε ταχέως αστικοποιούμενες περιοχές, συμβάλλουν σημαντικά στο πρόβλημα της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Οι κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο ανταποκρίνονται σε αυτό το ζήτημα με αυξανόμενη έμφαση στις πολιτικές και τη νομοθεσία που αποσκοπούν στη μείωση των πλαστικών μίας χρήσης και στη βελτίωση των πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων.

Οι προσπάθειες μετριασμού και αποκατάστασης περιλαμβάνουν διάφορες τεχνικές, όπως η μείωση της πηγής, η προηγμένη επεξεργασία λυμάτων και οι πρωτοβουλίες καθαρισμού. Η ευαισθητοποίηση και η εκπαίδευση του κοινού θεωρούνται ζωτικής σημασίας για την προώθηση της αλλαγής συμπεριφοράς και την υποστήριξη πρωτοβουλιών πολιτικής για την καταπολέμηση της πλαστικής ρύπανσης. Παρά την πρόοδο, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά ερευνητικά κενά στην κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς, της περιβαλλοντικής μοίρας και των επιπτώσεων των μικροπλαστικών στην υγεία, γεγονός που απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

Δεδομένης της διασυννοριακής φύσης του ζητήματος, η διεθνής συνεργασία και ο συντονισμός είναι επιτακτική ανάγκη για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της ρύπανσης από μικροπλαστικά και τη διασφάλιση της παγκόσμιας περιβαλλοντικής υγείας.

Συμπερασματικά, τα ευρήματα υπογραμμίζουν την ανάγκη για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, που θα ενσωματώνει παρεμβάσεις πολιτικής, επιστημονική έρευνα, δημόσια δέσμευση και διεθνή συνεργασία. Απαιτείται επείγουσα δράση για τον μετριασμό των πιθανών επιπτώσεων των μικροπλαστικών στα οικοσυστήματα, την άγρια ζωή και την ανθρώπινη υγεία, δίνοντας έμφαση στις συνεχιζόμενες προσπάθειες για τη μείωση της παρουσίας τους στο περιβάλλον.

Συνεισφορές στο πεδίο

Η μελέτη της ρύπανσης από μικροπλαστικά έχει προωθήσει σημαντικά το πεδίο της περιβαλλοντικής επιστήμης και έχει ασκήσει βαθύ αντίκτυπο στην πολιτική, τη βιομηχανία και την αντίληψη του κοινού. Μια σημαντική συμβολή έγκειται στην καλύτερη κατανόηση της κατανομής των μικροπλαστικών. Οι ερευνητικές προσπάθειες έχουν χαρτογραφήσει



σχολαστικά την παρουσία μικροπλαστικών σε διάφορα οικοσυστήματα, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα σχετικά με τη διεισδυτικότητά τους και εντοπίζοντας εστίες ρύπανσης.

Οι εξελίξεις στις μεθόδους ανίχνευσης αντιπροσωπεύουν μια άλλη κρίσιμη συμβολή. Η ανάπτυξη πιο ευαίσθητων και ακριβών τεχνικών για την ανίχνευση και την ποσοτικοποίηση των μικροπλαστικών έχει δώσει τη δυνατότητα στους επιστήμονες να αξιολογήσουν καλύτερα την έκταση της μόλυνσης και να κατανοήσουν τα χαρακτηριστικά αυτών των ρύπων. Αυτή η πρόοδος έχει συμβάλει καθοριστικά στη διαμόρφωση της κατανόησής μας για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ρύπανσης από μικροπλαστικά.

Οι γνώσεις σχετικά με τις οικολογικές επιπτώσεις αποτελούν σημαντική πτυχή των συνεισφορών. Μελέτες έχουν εμβαθύνει την κατανόησή μας για το πώς τα μικροπλαστικά αλληλεπιδρούν με οργανισμούς και οικοσυστήματα, αποκαλύπτοντας τις δυνατότητες βιοσυσσώρευσης και αποσαφηνίζοντας τις επιπτώσεις στα τροφικά πλέγματα και τη βιοποικιλότητα. Τα ευρήματα αυτά διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ενημέρωση των στρατηγικών διατήρησης και διαχείρισης για τη διατήρηση της υγείας των οικοσυστημάτων.

Η μελέτη της μικροπλαστικής ρύπανσης έχει επίσης καταλύσει την καινοτομία στον μετριάσμό της ρύπανσης. Έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνολογιών και στρατηγικών που αποσκοπούν στη μείωση της ρύπανσης από μικροπλαστικά, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας βιοαποδομήσιμων υλικών, των βελτιώσεων στις πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων και της εισαγωγής νέων τεχνικών αποκατάστασης. Αυτή η καινοτομία είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση βιώσιμων πρακτικών και τον μετριάσμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μικροπλαστικών.

Συμπερασματικά, οι συνεισφορές της έρευνας για τη ρύπανση από μικροπλαστικά εκτείνονται σε πολλαπλές διαστάσεις - από τη χαρτογράφηση, τη διανομή και τη βελτίωση των μεθόδων ανίχνευσης έως την παροχή πληροφοριών σχετικά με τις οικολογικές επιπτώσεις και την προώθηση της καινοτομίας στον μετριάσμό της ρύπανσης. Αυτές οι συνεισφορές δεν έχουν επηρεάσει μόνο τις πολιτικές και τις πρακτικές της βιομηχανίας, αλλά έχουν επίσης εμπλέξει το κοινό και έχουν ανοίξει το δρόμο για μελλοντική έρευνα, δίνοντας έμφαση στη συλλογική προσπάθεια που απαιτείται για την αντιμετώπιση των πολύπλοκων προκλήσεων που θέτει η ρύπανση από μικροπλαστικά.

Συστάσεις για πολιτική και έρευνα

Με βάση τα ευρήματα και τις συνεισφορές στον τομέα της ρύπανσης από μικροπλαστικά, μπορούν να γίνουν διάφορες συστάσεις για την καθοδήγηση των μελλοντικών προσπαθειών πολιτικής. Πρώτον και κύριον, υπάρχει κρίσιμη ανάγκη ενίσχυσης των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής θα πρέπει να δώσουν προτεραιότητα στην εφαρμογή και επιβολή αυστηρότερων κανονισμών για την πρόληψη της εισόδου πλαστικών αποβλήτων στο περιβάλλον. Έμφαση πρέπει να δοθεί στην προώθηση των αρχών της μείωσης,



επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των πλαστικών για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων.

Μια άλλη βασική σύσταση πολιτικής αφορά την επέκταση του πεδίου εφαρμογής των κανονισμών σχετικά με τα πλαστικά μίας χρήσης. Οι κυβερνήσεις θα πρέπει να εξετάσουν το ενδεχόμενο εφαρμογής απαγορεύσεων ή φόρων στα πλαστικά μίας χρήσης και να προωθήσουν ενεργά την ανάπτυξη και τη χρήση βιώσιμων εναλλακτικών λύσεων. Αυτή η προσέγγιση ευθυγραμμίζεται με τον πρωταρχικό στόχο της μείωσης της παραγωγής και κατανάλωσης πλαστικών που συμβάλλουν σημαντικά στη ρύπανση από μικροπλαστικά. Επιπλέον, η ανάπτυξη διεθνών προτύπων για τη μέτρηση και την αναφορά μικροπλαστικών είναι ουσιαστικής σημασίας. Η τυποποίηση θα διευκολύνει τις ουσιαστικές συγκρίσεις και την παρακολούθηση των επιπέδων ρύπανσης, ενισχύοντας την παγκόσμια κατανόηση αυτού του διάχυτου ζητήματος.

Επιπλέον, η στήριξη της διευρυμένης ευθύνης του παραγωγού (ΔΕΠ) είναι ζωτικής σημασίας. Οι πολιτικές που καθιστούν τους παραγωγούς υπόλογους για ολόκληρο τον κύκλο ζωής των προϊόντων τους, συμπεριλαμβανομένων των αποβλήτων μετά την κατανάλωση, μπορούν να δώσουν κίνητρα για βιώσιμες πρακτικές παραγωγής και να συμβάλουν σε μια κυκλική οικονομία. Η διάθεση πόρων για τη χρηματοδότηση πρωτοβουλιών καθαρισμού, ιδίως σε περιοχές με μεγάλη ρύπανση, όπως οι πλωτές οδοί και οι ωκεανοί, είναι μια άλλη σημαντική σύσταση. Τέλος, η ενίσχυση της δημόσιας εκπαίδευσης μέσω στοχευμένων εκστρατειών θα διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στην ευαισθητοποίηση σχετικά με τις πηγές και τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών, προωθώντας τελικά την αλλαγή συμπεριφοράς. Σε διεθνές επίπεδο, η προώθηση συνεργασιών και συμφωνιών είναι επιτακτική ανάγκη για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της διασυννοριακής φύσης της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Αυτές οι συστάσεις πολιτικής διαμορφώνουν συλλογικά μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τον μετριασμό και την πρόληψη της περαιτέρω εξάπλωσης των μικροπλαστικών στο περιβάλλον.

Ερευνητικές συστάσεις

Οι ερευνητικές συστάσεις είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση της κατανόησης της ρύπανσης από μικροπλαστικά και την καθοδήγηση μελλοντικών παρεμβάσεων. Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των οικολογικών επιπτώσεων των μικροπλαστικών, υπάρχει πιεστική ανάγκη για μακροπρόθεσμες μελέτες που εξετάζουν διαφορετικά είδη και οικοσυστήματα. Αυτές οι μελέτες μπορούν να ρίξουν φως στις περίπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ μικροπλαστικών και περιβάλλοντος, ενημερώνοντας τις στρατηγικές διατήρησης και τις πολιτικές που αποσκοπούν στη διατήρηση της βιοποικιλότητας.

Στον τομέα της ανθρώπινης υγείας, η στοχευμένη έρευνα είναι απαραίτητη για τη διερεύνηση των πιθανών επιπτώσεων στην υγεία από την έκθεση σε μικροπλαστικά. Αυτό περιλαμβάνει μια διεξοδική εξέταση των οδών κατάποσης και εισπνοής, συμβάλλοντας πολύτιμες



πληροφορίες στη συνεχιζόμενη συζήτηση σχετικά με τον αντίκτυπο των μικροπλαστικών στην ανθρώπινη ευημερία. Επιπλέον, οι ερευνητικές προσπάθειες θα πρέπει να κατευθύνονται προς την ανάπτυξη και τη δοκιμή καινοτόμων τεχνολογιών για την απομάκρυνση των μικροπλαστικών από διάφορα περιβάλλοντα, διασφαλίζοντας την αποτελεσματικότητα των στρατηγικών αποκατάστασης.

Ένας κρίσιμος τομέας εξερεύνησης είναι η βιοαποδόμηση των πλαστικών, όπου η έρευνα μπορεί να εμβαθύνει στις δυνατότητες των βιοαποικοδομήσιμων υλικών και στον ρόλο των μικροοργανισμών στην αποδόμηση των πλαστικών αποβλήτων. Οι μελέτες κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων είναι εξίσου ζωτικής σημασίας, αξιολογώντας το κόστος της ρύπανσης από μικροπλαστικά στην αλιεία, τον τουρισμό και τη δημόσια υγεία. Τέτοιες μελέτες μπορούν να παρέχουν μια ολιστική κατανόηση των ευρύτερων επιπτώσεων των μικροπλαστικών, ενημερώνοντας τεκμηριωμένες αποφάσεις πολιτικής.

Για να διασφαλιστεί η υπεύθυνη διαχείριση της ρύπανσης από μικροπλαστικά, οι ερευνητικές προσπάθειες θα πρέπει να επικεντρωθούν στον εντοπισμό των σημαντικότερων πηγών και στην ανάπτυξη στοχευμένων στρατηγικών για τη μείωση των εκπομπών. Επιπλέον, υπάρχει ανάγκη για τυποποιημένες μεθόδους εκτίμησης κινδύνου, επιτρέποντας την ιεράρχηση των δράσεων και την αποτελεσματική κατανομή των πόρων. Η θέσπιση μακροπρόθεσμων προγραμμάτων παρακολούθησης για την παρακολούθηση του επιπολασμού και της κατανομής των μικροπλαστικών και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων πολιτικής είναι υψίστης σημασίας. Τέλος, ενθαρρύνεται μια διεπιστημονική προσέγγιση, συγκεντρώνοντας εμπειρογνομosύνη από την περιβαλλοντική επιστήμη, τη χημεία, την τοξικολογία, την οικονομία, τις κοινωνικές επιστήμες και άλλους σχετικούς τομείς για την αντιμετώπιση των πολύπλευρων προκλήσεων της ρύπανσης από μικροπλαστικά.

Με την εφαρμογή αυτών των συστάσεων πολιτικής και έρευνας, τα ενδιαφερόμενα μέρη μπορούν να συνεργαστούν για μια πιο ολοκληρωμένη και αποτελεσματική προσέγγιση για τη διαχείριση της ρύπανσης από μικροπλαστικά. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής μπορούν να δημιουργήσουν ένα ρυθμιστικό περιβάλλον που μετριάξει την απελευθέρωση μικροπλαστικών και υποστηρίζει βιώσιμες πρακτικές, ενώ οι ερευνητές συμβάλλουν στη βάση τεκμηρίωσης που καθοδηγεί αυτές τις προσπάθειες και κατανοεί τις ευρύτερες επιπτώσεις των μικροπλαστικών στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Amato-Lourenço, L. F., Moreira, T. C. L., de Oliveira Souza, V. C., Barbosa, F., Saiki, M., Saldiva, P. H. N., & Mauad, T. (2020). The presence of microplastics in the lungs of human cadavers living in urban areas. **Environmental Science & Technology**, 54(22), 14589-14594. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05768>

Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. **Marine Pollution Bulletin**, 62(8), 1596-1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>

Andrady, Anthony. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*. 119. 10.1016/j.marpolbul.2017.01.082..

Arias-Andres, M., Klümper, U., Rojas-Jimenez, K., & Grossart, H.-P. (2018). Microplastic pollution increases gene exchange in aquatic ecosystems. **Environmental Pollution**, 237, 253-261. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.058>

Arthur, C., Baker, J., & Bamford, H. (Eds.). (2009). Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30.

Bakir, A., Rowland, S. J., & Thompson, R. C. (2014). Competitive sorption of persistent organic pollutants onto microplastics in the marine environment. **Marine Pollution Bulletin**, 81(1), 303-309. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.049>

Barboza, L. G. A., Vethaak, A. D., Lavorante, B. R. B. O., Lundebye, A.-K., & Guilhermino, L. (2018). Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. **Marine Pollution Bulletin**, 133, 336-348. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.058>

Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985-1998. doi:10.1098/rstb.2008.0205

Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985-1998. doi:10.1098/rstb.2008.0205



- Besseling, E., Wang, B., Lüring, M., & Koelmans, A. A. (2015). Nanoplastic affects growth of *S. obliquus* and reproduction of *D. magna*. **Environmental Science & Technology**, 49(20), 12297-12303. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02393>
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, 45(21), 9175-9179. doi:10.1021/es201811s
- Browne, M. A., Dissanayake, A., Galloway, T. S., Lowe, D. M., & Thompson, R. C. (2008). Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). **Environmental Science & Technology**, 42(13), 5026-5031. <https://doi.org/10.1021/es800249a>
- Browne, M. A., Galloway, T., & Thompson, R. (2007). Microplastic—an emerging contaminant of potential concern? *Integrated Environmental Assessment and Management*, 3(4), 559-561. doi:10.1897/IEAM_2007-037.1
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588-2597. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.09.025
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2014). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**, 62(12), 2588-2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2019). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of The Total Environment*, 671, 411-420. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.03.368
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Saad, M., Renault, N., & Tassin, B. (2016). Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris. **Environmental Chemistry**, 12(5), 592-599. <https://doi.org/10.1071/EN14167>
- Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. (2015). Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Research*, 75, 63-82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2016). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. **EFSA Journal**, 14(6), 4501. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4501>
- Enders, K., Lenz, R., Stedmon, C. A., & Nielsen, T. G. (2015). Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical



distribution. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), 70-81.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.027>

Erni-Cassola, G., Gibson, M. I., Thompson, R. C., & Christie-Oleza, J. A. (2017). Lost, but found with Nile red; a novel method to detect and quantify small microplastics (20 μm –1 mm) in environmental samples. *Environmental Science & Technology*, 51(23), 13641-13648.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04512>

European Parliament and Council. (2008). Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). Official Journal of the European Union, L164/19. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0056>

European Parliament and Council. (2015). Directive (EU) 2015/720 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 amending Directive 94/62/EC as regards reducing the consumption of lightweight plastic carrier bags. Official Journal of the European Union, L115/11. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32015L0720>

European Parliament and Council. (2019). Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment. Official Journal of the European Union, L155/1. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>

Fischer, E. K., & Scholz-Böttcher, B. M. (2017). Simultaneous trace identification and quantification of common types of microplastics in environmental samples by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry. *Environmental Science & Technology*, 51(9), 5052-5060. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06362>

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

Fries, E., Dekiff, J. H., Willmeyer, J., Nuelle, M. T., Ebert, M., & Remy, D. (2013). Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 15(10), 1949-1956. doi:10.1039/c3em00214d

Fullana, A., Sidorenko, A., & Farraia, M. V. (2020). The potential of chemical recycling for post-consumer plastic waste management. *Environmental Science & Technology*, 54(15), 9209-9221. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02147>



Galloway, T. S. (2015). Micro- and nano-plastics and human health. In M. Bergmann, L. Gutow, & M. Klages (Eds.), **Marine Anthropogenic Litter** (pp. 343-366). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_13

Government of Canada. (2017). Microbeads in Toiletries Regulations. Canada Gazette, Part II, 151(14). <http://gazette.gc.ca/rp-pr/p2/2017/2017-06-07/html/sor-dors111-eng.html>

Gregory, M. R. (2009). Environmental implications of plastic debris in marine settings—Entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2013-2025. doi:10.1098/rstb.2008.0265

Guo, X., & Wang, J. (2019). The chemical behaviors of microplastics in marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**, 142, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.019>

Hartley, B. L., Thompson, R. C., & Pahl, S. (2018). Marine litter education boosts children's understanding and self-reported actions. *Marine Pollution Bulletin*, 127, 804-812. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.062>

Hermabessiere, L., Dehaut, A., Paul-Pont, I., Lacroix, C., Jezequel, R., Soudant, P., ... & Duflos, G. (2017). Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: A review. *Chemosphere*, 182, 781-793. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.05.096

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification. **Environmental Science & Technology**, 46(6), 3060-3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>

Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>

Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. **Science of The Total Environment**, 586, 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>

Karlsson, T. M., Vethaak, A. D., Almroth, B. C., Ariese, F., van Velzen, M., Hassellöv, M., & Leslie, H. A. (2018). Screening for microplastics in sediment, water, marine invertebrates and fish: Method development and microplastic accumulation. **Marine Pollution Bulletin**, 122(1-2), 403-408. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.080>



- Keswani, A., Oliver, D. M., Gutierrez, T., & Quilliam, R. S. (2016). Microbial hitchhikers on marine plastic debris: Human exposure risks at bathing waters and beach environments. **Marine Environmental Research**, 118, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.04.006>
- Koelmans, A. A., Bakir, A., Burton, G. A., & Janssen, C. R. (2016). Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic environment: Critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 3315-3326. doi:10.1021/acs.est.5b06069
- Koelmans, A. A., Nor, N. H. M., Hermesen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & De France, J. (2017). Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. **Water Research**, 155, 410-422. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>
- Kyriakopoulos, G. L., Zamparas, M., & Kapsalis, V. C. (2022). Investigating the Human Impacts and the Environmental Consequences of Microplastics Disposal into Water Resources. *Sustainability*, 14(2), 828. <https://doi.org/10.3390/su14020828>
- Lambert, S., & Wagner, M. (2016). Characterisation of nanoplastics during the degradation of polystyrene. **Chemosphere**, 145, 265-268. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.11.078>
- Law, K. L., & Thompson, R. C. (2014). Microplastics in the seas. **Science**, 345(6193), 144-145. <https://doi.org/10.1126/science.1254065>
- Law, K. L., Morét-Ferguson, S., Maximenko, N. A., Proskurowski, G., Peacock, E. E., Hafner, J., & Reddy, C. M. (2010). Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre. *Science*, 329(5996), 1185-1188. doi:10.1126/science.1192321
- Lebreton, L. C. M., Van der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2018). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, 8, 15611. <https://doi.org/10.1038/ncomms1561>
- Leslie, H. A. (2017). Review of microplastics in cosmetics. **Science of The Total Environment**, 598, 601-611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.146>
- Litterati. (2021). Digital Cleanup App - Litterati. <https://www.litterati.org/>
- Löder, M. G. J., & Gerds, G. (2015). Methodology used for the detection and identification of microplastics—A critical appraisal. In M. Bergmann, L. Gutow, & M. Klages (Eds.), **Marine Anthropogenic Litter** (pp. 201-227). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_8
- Long, M., Moriceau, B., Gallinari, M., Lambert, C., Huvet, A., Raffray, J., & Soudant, P. (2015). Interactions between microplastics and phytoplankton aggregates: Impact on their respective fates. **Marine Chemistry**, 175, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2015.04.003>



Ma, H.; Pu, S.; Liu, S.; Bai, Y.; Mandal, S.; Xing, B. Microplastics in aquatic environments: Toxicity to trigger ecological consequences. *Environ. Pollut.* 2020, 261, 114089. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.03.001>

Mani, T., Hauk, A., Walter, U., & Burkhardt-Holm, P. (2015). Microplastics profile along the Rhine River. **Scientific Reports**, 5, 17988. <https://doi.org/10.1038/srep17988>

Ministry of Environment, Forest and Climate Change. (2018). India's strategy to eliminate single-use plastic by 2022. <http://moef.gov.in/indias-strategy-to-eliminate-single-use-plastic-by-2022/>

Obbard, R. W., Sadri, S., Wong, Y. Q., Khitun, A. A., Baker, I., & Thompson, R. C. (2014). Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future*, 2(6), 315-320. <https://doi.org/10.1002/2014EF000240>

Ocean Conservancy. (2020). International Coastal Cleanup. <https://oceanconservancy.org/trash-free-seas/international-coastal-cleanup/>

Pollution Bulletin*, 92(1-2), 170-179. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.12.041>

Prata, J. C. (2018). Airborne microplastics: Consequences to human health? **Environmental Pollution**, 234, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.043>

Rochman, C. M., Hoh, E., Kurobe, T., & Teh, S. J. (2013). Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Scientific Reports*, 3, 3263. doi:10.1038/srep03263

Rochman, C. M., Tahir, A., Williams, S. L., Baxa, D. V., Lam, R., Miller, J. T., ... & Teh, F. C. (2015). Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. **Scientific Reports**, 5, 14340. <https://doi.org/10.1038/srep14340>

Secretariat of the Basel Convention. (2019). Amendments to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal. <http://www.basel.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/1275/Default.aspx>

Seltenrich, N. (2015). New link in the food chain? Marine plastic pollution and seafood safety. **Environmental Health Perspectives**, 123(2), A34-A41. <https://doi.org/10.1289/ehp.123-A34>

Shim, W. J., Hong, S. H., & Eo, S. E. (2017). Identification methods in microplastic analysis: a review. **Analytical Methods**, 9(9), 1384-1391. <https://doi.org/10.1039/C6AY02558G>

Shruti, V. C., Pérez-Guevara, F., & Kutralam-Muniasamy, G. (2020). Wastewater mediated activation of micronuclei and antibiotic resistance spread potential in biofilm forming bacteria. **Chemosphere**, 248, 126009. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126009>



Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., & Neff, R. A. (2018). Microplastics in seafood and the implications for human health. **Current Environmental Health Reports**, 5(3), 375-386. <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>

Stockholm Convention. (2001). Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). <http://www.pops.int/>

Sutherland, W. J., Clout, M., Côté, I. M., Daszak, P., Depledge, M. H., Fellman, L., Fleishman, E., Garthwaite, R., Gibbons, D. W., De Lurio, J., Impey, A. J., Lickorish, F., Lindenmayer, D., Madgwick, J., Margerison, C., Maynard, T., Peck, L. S., Pretty, J., Prior, S., Redford, K. H., Scharlemann, J. P. W., Spalding, M., & Watkinson, A. R. (2010). A horizon scan of global conservation issues for 2010. **Trends in Ecology & Evolution**, 25(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.10.003>

Talvitie, J., Heinonen, M., Pääkkönen, J. P., Vahtera, E., Mikola, A., Setälä, O., & Vahala, R. (2017). Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland, Baltic Sea. *Water Science and Technology*, 75(3), 537-546. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.486>

Teuten, E. L., Saquing, J. M., Knappe, D. R. U., Barlaz, M. A., Jonsson, S., Björn, A., ... & Ochi, D. (2009). Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2027-2045. doi:10.1098/rstb.2008.0284

Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., & Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, 364(1526), 2153-2166. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>

Turner, A., & Holmes, L. (2015). Adsorption of trace metals by microplastic pellets in fresh water. **Environmental Chemistry**, 12(5), 600-610. <https://doi.org/10.1071/EN14205>

U.S. Congress. (2015). Microbead-Free Waters Act of 2015, Public Law No: 114-114. <https://www.congress.gov/bill/114th-congress/house-bill/1321/text>

UK Government. (2018). UK ban on microbeads comes into force. <https://www.gov.uk/government/news/uk-ban-on-microbeads-comes-into-force>

UNEP. (2017). The Global Partnership on Marine Litter. <https://www.unenvironment.org/explore-topics/oceans-seas/what-we-do/working-regional-seas/marine-litter/global-partnership-marine>

Urbanek, A. K., Rymowicz, W., & Mironczuk, A. M. (2018). Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats.



Van Cauwenberghe, L., Vanreusel, A., Mees, J., & Janssen, C. R. (2015). Microplastic pollution in deep-sea sediments. *Environmental Pollution*, 182, 495-499. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.08.013>

Verschoor, A., Poorter, L. R., Roex, E. W., & Bellert, B. (2016). Plastic soup lab: Inventory and preliminary risk assessment of microplastics in cosmetics. *Report for the Dutch Ministry of Infrastructure and the Environment*. Retrieved from <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0072.pdf>

Wagner, M., Scherer, C., Alvarez-Muñoz, D., Brennholt, N., Bourrain, X., Buchinger, S., ... & Reifferscheid, G. (2014). Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. *Environmental Sciences Europe*, 26(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s12302-014-0012-7>

Woodall, L. C., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., Paterson, G. L., Coppock, R., Sleight, V., ... & Thompson, R. C. (2014). The deep sea is a major sink for microplastic debris. Royal Society Open Science, 1(4), 140317. <https://doi.org/10.1098/rsos.140317>

Wright, S. L., Kelly, F. J. (2020). Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environmental Science & Technology*, 54(12), 7034-7046. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02293>

Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, 178, 483-492. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>

Xanthos, D., & Walker, T. R. (2017). International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): A review. Marine Pollution Bulletin, 118(1-2), 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.048>

Zettler, E. R., Mincer, T. J., & Amaral-Zettler, L. A. (2013). Life in the "Plastisphere": Microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47(13), 7137-7146. <https://doi.org/10.1021/es401288x>

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Γκουλέτσα, Σ. (2022). Πλαστική ρύπανση: το πρόβλημα, οι τεχνικές διαχείρισης και οι νέες προκλήσεις: Μικροπλαστικά.

Καψάμπελης, Γ. Ι. (2020). *Μικροπλαστικά σε γλυκά νερά* (Bachelor's thesis).

Νάτσιου, Α. Α. (2021). *Επιπτώσεις των μικροπλαστικών στο νερό ανθρώπινης κατανάλωσης και στο εμφιαλωμένο νερό* (Master's thesis).



Ντιάντζελα Μπεχάι

**Η ΡΑΓΔΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ Η
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΣΤΟΝ ΑΝΘΡΩΠΟ**



Κοκκάλας, Δ. (2021). Το πρόβλημα των μικροπλαστικών στο περιβάλλον.

Καλαρέμας, Γ. (2019). Αφθονία, κατηγορίες και μέθοδος μικροπλαστικών σωματιδίων σε αμμώδεις παραλίες αναψυχής της Λέσβου.

Πατσιαβάς, Γ. (2019). Πλαστικά στις θάλασσες και μικροπλαστικά.