ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
(ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ)

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ & ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Ο ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μυρτώ-Δήμητρα Αντωνίου

Επιβλέπων Καθηγητής Γ. Σταυρουλάκης

ΧΑΝΙΑ 2025

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
(ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ)

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ & ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Ο ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΥΔΑΤΙΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μυρτώ-Δήμητρα Αντωνίου

Επιβλέπων : Καθηγητής Σταυρουλάκης Γιώργος

Επιτροπή: Καθηγητής Καλδέρης Δημήτρης (Μέλος)

Αξιολόγησης Δρ Παπαφιλιππάκη Ανδρονίκη Επιστημονικός Συνεργάτης/Νέος Διδάκτορας (Μέλος)

Αύξων Αριθμός Πτυχιακής Εργασίας 116

Πίνακας περιεχομένων

Abstract 5
Εισαγωγή 5
Νομοθεσίες για τα πλαστικά 10
Γενικά για τα πλαστικά 7
Κατηγορίες πλαστικών 7
Γενικά για τα μικροπλαστικά 9
Μικροπλαστική ρύπανση 10
Κατηγορίες μικροπλαστικών και πηγές 11
Οπτικά χαρακτηριστικά, χημική σύνθεση, χημικά πρόσθετα και προσροφημένοι ρύποι. 12
Οπτικά χαρακτηριστικά 12
Χημική σύνθεση 13
Χημικά πρόσθετα και προσροφημένοι ρύποι στα μικροπλαστικά 14
Βιοδιαθεσιμότητα 15
Πηγές μικροπλαστικών και τρόποι μεταφοράς τους 15
Μηχανισμοί δημιουργίας μικροπλαστικών μέσω υποβάθμισης 15
Επιδράσεις στους οργανισμούς – Τοξικότητα 18
Μέθοδοι δειγματοληψίας, επεξεργασίας και της ανάλυσης μικροπλαστικών στο νερό, σε ιζήματα και παράκτιες αποθέσεις 21
Μέθοδοι δειγματοληψίας 21
Δείγματα επιφανειακών υδάτων 23
Δείγματα από τη στήλη νερού. 23
Δείγματα παράκτιων αποθέσεων. 24
Δείγματα ιζημάτων πυθμένα. 25
Επεξεργασία δειγμάτων δειγματοληψίας 25
Διατήρηση, αποθήκευση και ποιοτικός έλεγχος. 25
Προετοιμασία δείγματος. 26
Διαχωρισμός πυκνότητας. 26
Διήθηση. 27
Κοσκινίσματα. 28
Πέψη οργανικής ύλης. 28
Ανάλυση δειγμάτων μικροπλαστικών 28
Ταυτοποίηση των μικροπλαστικών. 29
Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά. 29

Προσδιορισμός της χημικής σύνθεσης των μικροπλαστικών και του τύπου του πολυμερούς. ... 29
Οδοί έκθεσης μικροπλαστικών στο ανθρώπινο σώμα ... 35
Διατροφική οδός έκθεσης ... 36
Μικροπλαστικά στα θαλασσινά ... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
Επιτραπέζιο αλάτι ... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
Πόσιμο νερό ... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
Άλλα τρόφιμα ... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
Συσκευασία τροφίμων ... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
Οδός έκθεσης μέσω εισπνοής ... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
Επαφή με το δέρμα ... **Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**
Μελλοντικές προοπτικές ... 38
Ανάπτυξη τυποποιημένης ορολογίας και ερευνητικών μεθόδων ... 39
Ενίσχυση της διακυβέρνησης της ρύπανσης από μικροπλαστικά ... 39
Διερεύνηση καινοτόμων στρατηγικών και τεχνολογιών ... 40
Ενεργοποίηση του κοινού και αλλαγή συμπεριφοράς ... 40
Υιοθέτηση διεπιστημονικής προσέγγισης ... 40
Συμπεράσματα ... 41
Βιβλιογραφία ... 41

“The life cycle of microplastics in the aquatic environment”

Abstract

On a global scale, marine litter has been a significant problem for many years and requires immediate treatment and management. Marine litter is defined as synthetic or processed solid materials that discharged directly or indirectly into the marine environment and are characterized by a long lifespan [1].

Today, the quantities of marine debris found on the coasts reveal that plastics are the dominant type of waste, originating from objects used in various human activities. Their abundance as plastics or even microplastics in the world’s seas and oceans, combined with steadily increasing use of plastics in various applications, has mobilized the scientific community, as well as international organizations, towards a rational approach and management of the problem, as they must be aware of the impacts and risks of this form of pollution.

The term “microplastics: was first used in 2004 and relates to a size-based classification, for which there is no general consensus on a specific size, although it has been suggested that microplastics should be defined as all microparticle fragments smaller than 5mm [2]. However, some studies use the terminology “microplastics” in a much broader scope, for example, including particles as small as 1mm or as large as 10mm. The sizes, therefore, vary from study to study, with diameters sometimes <5mm. We conclude that the term microplastics is used to describe solid synthetic organic polymer microparticles with a size between 100nm and 5mm.

Keywords: microplastics, environment, water, plastics

Εισαγωγή

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ρύπανση από θαλάσσια απόβλητα αποτελεί μια σοβαρή και διαρκή πρόκληση που απαιτεί άμεση δράση και αποτελεσματική διαχείριση. Τα θαλάσσια απόβλητα ορίζονται ως τα στερεά υλικά, είτε συνθετικά είτε επεξεργασμένα, που απορρίπτονται άμεσα ή έμμεσα στο θαλάσσιο περιβάλλον και χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια ζωής [1]. Σήμερα, οι ποσότητες αποβλήτων που εντοπίζονται στις παραλίες δείχνουν ότι τα πλαστικά είναι ο πιο συχνά εμφανιζόμενος τύπος απορριμμάτων, προερχόμενα από αντικείμενα που χρησιμοποιούνται σε διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες. Η μεγάλη παρουσία τους, είτε ως πλαστικά είτε ως μικροπλαστικά, στους παγκόσμιους ωκεανούς και θάλασσες, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη χρήση πλαστικών σε διάφορες εφαρμογές, έχει κινητοποιήσει την επιστημονική κοινότητα και διεθνείς οργανώσεις να αναζητήσουν αποτελεσματικούς τρόπους διαχείρισης και αντιμετώπισης του προβλήματος. Η ευαισθητοποίηση και η ενεργός συμμετοχή των πολιτών είναι επίσης ζωτικής σημασίας, καθώς πρέπει να ενημερώνονται για τις επιπτώσεις και τους κινδύνους που συνεπάγεται η ρύπανση αυτή.

Ο όρος «μικροπλαστικά» χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 2004 και αφορά μια κατηγοριοποίηση βάσει μεγέθους, χωρίς να υπάρχει πλήρης συμφωνία σχετικά με το συγκεκριμένο όριο μεγέθους. Πρόκειται για θραύσματα ή μικροσωματίδια που έχουν διάμετρο μικρότερη των 5 mm [2]. Ωστόσο, ορισμένες μελέτες χρησιμοποιούν την έννοια «μικροπλαστικά» σε ευρύτερο πλαίσιο, συμπεριλαμβάνοντας σωματίδια που κυμαίνονται από 1 mm έως και 10 mm. Συνεπώς, το εύρος των μεγεθών ποικίλλει

ανάλογα με τη μελέτη. Συνολικά, ο όρος «μικροπλαστικά» αναφέρεται σε στερεά οργανικά μικροσωματίδια πολυμερούς, με διαστάσεις από 100 νανόμετρα έως 5 mm.

Λέξεις κλειδιά: μικροπλαστικά, περιβάλλον, νερό, πλαστικά

Κεφάλαιο 1

Γενικά για τα πλαστικά

Τα πλαστικά αποτελούνται από μια ευρεία γκάμα συνθετικών ή ημι-συνθετικών οργανικών υλικών, που διαθέτουν ευελιξία και μπορούν να διαμορφωθούν σε διάφορα σχήματα και μεγέθη. Συνήθως παράγονται από πετροχημικές πηγές και χαρακτηρίζονται από υψηλή μοριακή μάζα. Χάρη στο χαμηλό κόστος, την εύκολη επεξεργασία και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, τα πλαστικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε προϊόντα καθημερινής ζωής, τόσο σε απλά αντικείμενα όσο και σε πολύπλοκες μηχανικές κατασκευές. Είναι ουσιώδη υλικά για τη σύγχρονη κοινωνία και βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως οι μεταφορές, η κατασκευή, η ιατρική, η συσκευασία, ο αθλητισμός, η αναψυχή και οι υποδομές ύδρευσης και αποχέτευσης. Τα πιο διαδεδομένα πολυμερή είναι το πολυαιθυλένιο (29,4%), το πολυπροπυλένιο (19,1%), το πολυβινυλοχλωρίδιο (10,1%), η πολυουρεθάνη (7,5%), ο πολύτερεφθαλικός αιθυλενεστέρας (7,1%) και το πολυστυρόλιο (6,9%).

Ένα μεγάλο πρόβλημα με τα πλαστικά είναι ο κίνδυνος να καταλήξουν στο φυσικό περιβάλλον, κάτι που οφείλεται στην ακατάλληλη διαχείριση απορριμμάτων, την ανεύθυνη ανθρώπινη συμπεριφορά και τυχαίες απώλειες ή φθορά. Έτσι, οι θάλασσες και οι ωκεανοί δέχονται τόσο άμεσες όσο και έμμεσες εισροές πλαστικών, μέσω θαλάσσιων δραστηριοτήτων ή ποταμών [3]. Η παρουσία μακροπλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον αποτελεί τόσο ζήτημα αισθητικής υποβάθμισης όσο και οικονομικό, επηρεάζοντας τον τουρισμό και τις θαλάσσιες βιομηχανίες όπως η ναυτιλία, η αλιεία, η παραγωγή ενέργειας και οι υδατοκαλλιέργειες, ενώ ταυτόχρονα προκαλεί ανησυχίες για το περιβάλλον [4].

Ιστορικά, το πρώτο σύγχρονο πλαστικό, ο βακελίτης, αναπτύχθηκε το 1907. Η μαζική παραγωγή ξεκίνησε τη δεκαετία του 1940, με την ταχεία αύξηση των ποσοτήτων και την αυξανόμενη κατανάλωση πετρελαίου ως πρώτη ύλη, το οποίο το 2009 αντιπροσώπευε το 8% της παγκόσμιας παραγωγής πετρελαίου [4]. Το 1979, η παγκόσμια κατανάλωση πλαστικών εκτιμήθηκε σε 62 εκατομμύρια τόνους, ενώ το 2000 είχε αυξηθεί σε 160 εκατομμύρια τόνους. Τα πρόσφατα δεδομένα δείχνουν ότι η παραγωγή αυξήθηκε κατά 4% από το 2013 στο 2014, φτάνοντας τους 311 εκατομμύρια τόνους. Μετά τη χρήση, μόνο το 9% των πλαστικών ανακυκλώνεται, το 12% αξιοποιείται ενεργειακά, το 8% απορρίπτεται σε χώρους υγειονομικής ταφής και το υπόλοιπο, που ανέρχεται σε ποσοστό 71%, χάνονται στο περιβάλλον [5][6].

Επειδή τα πλαστικά είναι δύσκολο να διασπαστούν, συσσωρεύονται και παραμένουν στο περιβάλλον για χρόνια ή και δεκαετίες [6]. Με την αυξανόμενη παραγωγή, αυξάνονται και οι ποσότητες που απορρίπτονται, οδηγώντας στη συσσώρευση πλαστικών απορριμμάτων σε διάφορα οικοσυστήματα, συμπεριλαμβανομένων των θαλάσσιων. Λόγω της ευρείας χρήσης, της χαμηλής ανακύκλωσης και της υψηλής αντοχής τους, τα πλαστικά συσσωρεύονται με ανεξέλεγκτο ρυθμό, υφίστανται διάβρωση και μεταφέρονται σε διάφορα οικοσυστήματα [7][8]. Εκτιμάται ότι πάνω από 8 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών εισέρχονται ετησίως στο περιβάλλον. Το 2014, υπολογίστηκε ότι σε θαλάσσια συστήματα έχουν συσσωρευτεί μεταξύ 15 και 51 τρισεκατομμυρίων μικροσωματίων, με βάρος έως και 236.000 τόνους [5]. Η παραγωγή πλαστικών το 2018 ανήλθε στους 359 εκατομμύρια τόνους, από τους οποίους έως 13 εκατομμύρια τόνοι απορρίφθηκαν στους ωκεανούς. Προβλέπεται ότι έως το 2025, συνολικά 250 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών θα έχουν απορριφθεί [9].

Κατηγορίες πλαστικών

Σε παγκόσμιο επίπεδο, παράγονται διαφορετικοί τύποι πλαστικών που χρησιμοποιούνται σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας, της γεωργίας αλλά και για οικιακή χρήση. Σύμφωνα με στοιχεία της Plastics Europe [10], τα πλαστικά με το μεγαλύτερο ποσοστό χρήσης είναι κατά σειρά τα εξής:

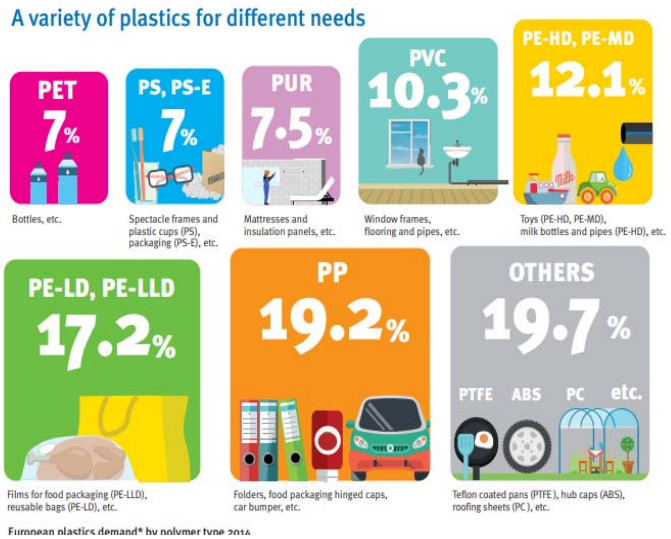
- πολυαιθυλένιο (PE, Polyethylene)
- πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (PE-LD)
- πολυαιθυλένιο γραμμικής χαμηλής πυκνότητας (PE-LLD)
- πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (PE-HD)
- πολυπροπυλένιο (PP-Polypropylene)
- Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)
- Πολυουρεθάνιο (PUR)
- Πολυστυρένιο (PS)
- Διογκούμενο πολυστυρένιο (PS-E)
- Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET)

Αυτά, στο σύνολό τους καλύπτουν ποσοστό περίπου 80%, ενώ ποσοστό περίπου 20% αποτελούν άλλοι τύποι πλαστικού, όπως τα θερμοσκληραινόμενα, συγκολλητικά, κ.λπ. πλαστικά

Πίνακας 1: Τύποι πολυμερών και ποσοστό χρήσης σε ευρωπαϊκές χώρες για το έτος 2013 [10]

.

Τύπος πολυμερούς	Συντομογραφία	Ποσοστό χρήσης (%)
Polypropylene	PP	19,2
Polyethylene, Low Density	PE-LD	17,2
Polyethylene, Linear Low Density	PE-LLD	17,2
Polyethylene, High Density	PE-HD	12,1
Polyvinyl chloride	PVC	10,3
Polyurethane	PUR	7,5
Polystyrene	PS	
Polystyrene, Expandable	PS-E	7
Polyethylene terephthalate	PET	7
Λοιπά		19,7



Εικόνα 1: Ευρωπαϊκή ζήτηση πλαστικών με τύπο πολυμερούς

Ως πρώτη ύλη για την παραγωγή των πλαστικών χρησιμοποιούνται τα ορυκτά καύσιμα. Το μεγαλύτερο μέρος των κοινών πλαστικών που κατασκευάζονται, όπως το PET (φιάλες εμφιάλωσης) και το PP, χρησιμοποιούνται σε συσκευασίες προϊόντων που έχουν σχετικά μικρή διάρκεια ζωής, και καταλήγουν πολύ γρήγορα σε στερεά απορρίμματα. Τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή κτιρίων,

όπως το PVC, αποτελούν περίπου το ένα τρίτο της παγκόσμιας παραγωγής, και έχουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Εκτός όμως από τα ορυκτά καύσιμα, ως πρώτη ύλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η βιομάζα. Η διαθεσιμότητα των βιολογικών πρώτων υλών για την παραγωγή πλαστικών, αναμένεται να αυξηθεί στο προσεχές μέλλον, παρέχοντας μια εναλλακτική λύση για τα υλικά που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα ως πρώτη ύλη. Η χρήση βιολογικών πρώτων υλών στα πλαστικά δεν τα καθιστά απαραίτητα, βιοδιασπώμενα. Στην πραγματικότητα οι βιολογικές ρητίνες/πολυμερή, όπως το βιο-πολυαιθυλένιο (bio-PE) ή το βιο-τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (bio-PET) έχουν αναπτυχθεί ως υποκατάστατα των συμβατικών πολυμερών, ενώ βρίσκουν σχετικά μικρή εφαρμογή σε παραγόμενα προϊόντα [11].

Πίνακας 2: Τύποι πολυμερών που ταυτοποιήθηκαν ως μικροπλαστικά υπολείμματα σε 42 μελέτες (Πηγή:[2]).

Τύπος πολυμερούς	Συντομογραφία	Μελέτες (N)
Polyethylene	PE	33
Polypropylene	PP	27
Polystyrene	PS	17
Polyamide (nylon)	PA	7
Polyester	PES	4
Acrylic	AC	4
Polyoximethylene	POM	4
Polyvinyl alcohol	PVA	3
Polyvinyl chloride	PVC	2
Poly methylacrylate	PMA	2
Polyethylene terephalate	PET	1
Alkyd	AKD	1
Polyurethane	PU	1

Διεθνώς, οι εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί για τα μικροπλαστικά στο θαλάσσιο περιβάλλον έχουν ως στόχο, τη διερεύνηση της χωρικής κατανομής αυτών, όπως αφθονία, ο τύπος και το μέγεθος των μικροπλαστικών, ενώ σχετικά μικρότερος αριθμός αυτών περιλαμβάνει προσεγγίσεις, που αφορούν στη δειγματοληψία, στο χαρακτηρισμό και στη μεθοδολογία ποσοτικοποίησης αυτών [2]. Οι Higalgo et al. [2] διερεύνησαν τους τύπους των μικροπλαστικών που ταυτοποιήθηκαν σε 42 σχετικές εργασίες (Πίνακας 2). Όπως προκύπτει το πολυαιθυλένιο (PE) και το πολυπροπυλένιο (PP) αποτελούν τα πολυμερή που αναγνωρίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα

Γενικά για τα μικροπλαστικά

Αρχικά, από τη δεκαετία του 1960, άρχισε να παρατηρείται η εμφάνιση μικροπλαστικών (MP), ενώ ήδη από τις βιβλιογραφικές πηγές της δεκαετίας του 1970 εκφράζονταν οι πρώτες ανησυχίες σχετικά με την εξέλιξη του φαινομένου της ρύπανσης από πλαστικά απορρίμματα. Το αυξανόμενο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα, τις κυβερνήσεις και τα ΜΜΕ από την προηγούμενη δεκαετία οφείλεται κυρίως στην ανησυχία για τις επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία.

Η παρουσία μικροπλαστικών έχει επιβεβαιωθεί σε πολλούς υδάτινους οικοτόπους, τόσο σε εσωτερικά υδάτινα συστήματα όσο και σε ανοιχτούς ωκεανούς και κλειστές θάλασσες. Τα MP έχουν βρεθεί τόσο στην επιφάνεια των υδάτων, στη στήλη του νερού, όσο και στα ιζήματα του βυθού και των ακτών. Επιπλέον, έχουν ανιχνευθεί στον αέρα, το έδαφος, το πόσιμο νερό, καθώς και σε τρόφιμα όπως τα θαλασσινά, το επιτραπέζιο αλάτι, και πιθανώς στη μπίρα και το μέλι.

Μικροπλαστική ρύπανση

Αρχικά, η επιστημονική και η δημόσια εστίαση ήταν στραμμένη στα μεγαλύτερα κομμάτια πλαστικού. Ωστόσο, η παρουσία μικροπλαστικών σωματιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον ήταν ήδη γνωστή από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 [12]. Τα πρώτα μικροπλαστικά παρατηρήθηκαν στη Βόρεια Αμερική ως μικρά σφαιρίδια μέσα στο πλαγκτόν, στην ακτή της Νέας Αγγλίας, κατά τη δεκαετία του 1970. Από τότε, τα μικροπλαστικά έχουν βρεθεί στα περισσότερα μεγάλα υδάτινα σώματα, όπως οι ωκεανοί, οι θάλασσες, οι λίμνες και τα ποτάμια [13].

Η ρύπανση των θαλασσών με μικροπλαστικά αποτελεί μια ολοένα και αυξανόμενη ανησυχία για τη σύγχρονη κοινωνία, εξαιτίας της συνεχούς αύξησης της παραγωγής πλαστικών και της επακόλουθης διάθεσής τους στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ακόμα και αν σταματήσει η εισροή πλαστικών απορριμμάτων στις θάλασσες, η μικροπλαστική ρύπανση θα συνεχίσει να αυξάνεται λόγω του κατακερματισμού των ήδη υπαρχόντων πλαστικών στο νερό. Περίπου το 10% των παραγόμενων πλαστικών καταλήγει στους ωκεανούς, αποτελώντας το 80-85% των θαλάσσιων απορριμμάτων. Εκτιμάται ότι το 92% από τα 5,25 τρισεκατομμύρια πλαστικά σωματίδια που βρίσκονται στην επιφάνεια των ωκεανών είναι μικροπλαστικά, δηλαδή μικρά, διαμέτρου μικρότερου των 5 mm. Αυτά ρυπαίνουν τη στήλη του νερού, τα ιζήματα και τους βιοτόπους τόσο των παράκτιων υδάτων όσο και των ανοιχτών ωκεανών, καθώς και των περιβαλλοντικών συστημάτων των γλυκών υδάτων [14].

Έρευνες σε ιζήματα κατά μήκος των ακτών του Βελγίου έδειξαν ότι η μικροπλαστική ρύπανση τριπλασιάστηκε, από 55 μικροπλαστικά ανά κιλό ξηρού ιζήματος (την περίοδο 1993-2000) σε 156 μικροπλαστικά ανά κιλό ξηρού ιζήματος (την περίοδο 2005-2008) [4]. Η παρουσία μικροπλαστικών τόσο σε θαλάσσια όσο και σε γλυκά νερά αποτελεί ένα αναδυόμενο πρόβλημα. Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την κατανόηση των επιπτώσεων αυτών των μικροπλαστικών στην υδρόβια άγρια ζωή, καθώς οι συνέπειες αυτές παραμένουν ακόμα σχετικά ανεπαρκώς κατανοητές [13].

Νομοθεσίες για τα πλαστικά

- Νόμος 4736/2020 - ΦΕΚ 200/Α/20-10-2020

  Με το Νόμο 4736/2020 που δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ 200/Α/20-10-2020 (που ενσωμάτωσε την οδηγία 2019/904/5-06-2019 της Ευρωπαϊκής Ένωσης[Ε.Ε.]) , αποσύρονται από τον Ιούλιο του 2021 μια σειρά πλαστικών (καλαμάκια, μαχαιροπήρουνα, πιάτα, ποτήρια και περιέκτες τροφίμων από φελιζόλ, αναδευτήρες, στηρίγματα για μπαλόνια, μπατονέτες, καθώς και πάσης φύσεως προϊόντα που διασπώνται σε μικροπλαστικά), ενώ στο Δημόσιο η εφαρμογή της απόσυρσης ξεκινά 6 μήνες νωρίτερα.

  Θεσμοθετείται η επιβράβευση της ανακύκλωσης, καθώς κάθε πολίτης που θα επιστρέφει το πλαστικό μπουκάλι του στο σημείο πώλησης θα παίρνει πίσω το επιπλέον ποσό της εγγύησης, δηλαδή θα λαμβάνει πίσω τα λίγα λεπτά του

ευρώ που έδωσε κατά την αγορά του (Άρθρο 13- που ενσωμάτωσε το άρθρο 9 της οδηγίας 2019/904 Ε.Ε- παρ. 4 και παρ.7, σε συνδυασμό με το άρθρο 14 – που ενσωμάτωσε το άρθρο 10 της οδηγίας 2019/904 Ε.Ε- του νόμου 4736/2020)

Επιπλέον θεσπίζεται πρόγραμμα διευρυμένης ευθύνης του παραγωγού για τα αλιευτικά εργαλεία που περιέχουν πλαστική ύλη, με σκοπό τη μείωση των αλιευτικών εργαλείων που απορρίπτονται στο θαλάσσιο περιβάλλον, καθώς και τη χωριστή συλλογή και ανακύκλωση των αποβλήτων των αλιευτικών εργαλείων. [39]

- Νόμος 4819/2021 – ΦΕΚ 129/Α/23.07.2021

  Ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη διαχείριση των αποβλήτων - Ενσωμάτωση των Οδηγιών 2018/851 και 2018/852 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 30ής Μαΐου 2018 για την τροποποίηση της Οδηγίας 2008/98/ΕΚ περί αποβλήτων και της Οδηγίας 94/62/ΕΚ περί συσκευασιών και απορριμμάτων συσκευασιών, πλαίσιο οργάνωσης του Ελληνικού Οργανισμού Ανακύκλωσης, διατάξεις για τα πλαστικά προϊόντα και την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, χωροταξικές - πολεοδομικές, ενεργειακές και συναφείς επείγουσες ρυθμίσεις. [38]

Κατηγορίες μικροπλαστικών και πηγές

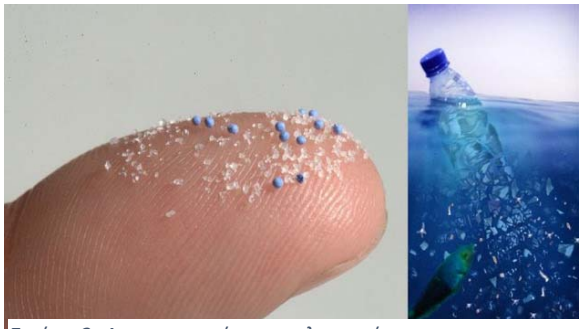
Τα μικροπλαστικά (MP) σε δύο κατηγορίες όσον αφορά τον τρόπο παραγωγής τους:

- **πρωτογενή**: τα οποία κατασκευάζονται για να εξυπηρετούν μια συγκεκριμένη λειτουργία. Σημαντική κατηγορία πρωτογενών MP αποτελούν τα μικροσωματίδια που περιέχονται στα προϊόντα προσωπικής υγιεινής και αποτελούν μια σημαντική πρωτογενή πηγή MP για το θαλάσσιο περιβάλλον. Τα πρωτογενή MP εισέρχονται είτε απευθείας στο περιβάλλον μέσω διαφόρων πηγών όπως αστικές και βιομηχανικές απορροές, απόβλητα υπονόμων ή εμμέσως μέσω των εκροών και περιλαμβάνουν θραύσματα, ίνες, σωματίδια, σφαιρίδια, φίλμς.



Εικόνα 2: Πρωτογενή μικροπλαστικά

- **δευτερογενή**: προέρχονται από την υποβάθμιση και τον κατακερματισμό μεγαλύτερων αντικειμένων τόσο κατά τη χρήση τους όσο και μετά την είσοδό τους στο περιβάλλον.



Εικόνα 3: Δευτερογενή μικροπλαστικά

Τα δευτερογενή MP, τα οποία προέρχονται από τη θραύση μεγαλύτερων πλαστικών κομματιών στο περιβάλλον [15] μέσω διαφόρων διαδικασιών όπως μηχανικές δυνάμεις, φωτόλυση, θερμοδιάσπαση,

βιολογική διάβρωση, ακολουθούν διάφορες διαδρομές οπότε δεν είναι εύκολη η σύνδεσή τους με τις πηγές προέλευσης.

Τόσο τα επιφανειακά ύδατα, όπως λίμνες και ποτάμια, όσο και τα άλλα υδάτινα σώματα, έχουν αποδειχθεί ότι περιέχουν μικροπλαστικά (MP), γεγονός που τα καθιστά σημαντικές πηγές εισόδου MP στο θαλάσσιο περιβάλλον. Επιπλέον, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία τόσο των ανθρώπων, μέσω του πόσιμου νερού, όσο και των θαλάσσιων οργανισμών [16].

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν επίσης μια σημαντική πηγή μικροπλαστικών, καθώς τόσο τα αστικά όσο και τα βιομηχανικά λύματα περιέχουν μικρό και μεγάλο μέγεθος πλαστικών σωματιδίων. Επιπλέον, τα αστικά λύματα συχνά περιέχουν μεγάλο ποσοστό προϊόντων προσωπικής υγιεινής που περιέχουν πλαστικά μικροσφαιρίδια. Η τριτογενής επεξεργασία των λυμάτων θεωρείται ότι συμβάλλει στην παρουσία μικροαπορριμμάτων και MP, αν και υπάρχουν έρευνες που υποστηρίζουν ότι η επίδρασή της στην παρουσία MP στους ωκεανούς και στα επιφανειακά νερά είναι περιορισμένη [17].

Όσον αφορά τον τύπο του πολυμερούς που περιέχουν, τα MP διακρίνονται σε κύριες κατηγορίες: πολυαιθυλένιο (PE), πολυπροπυλένιο (PP), πολυαμίδιο (PA), χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), πολυουρεθάνιο (PUR) και το πολυτετραφθοροαιθύλιο (PTFE ή Teflon).

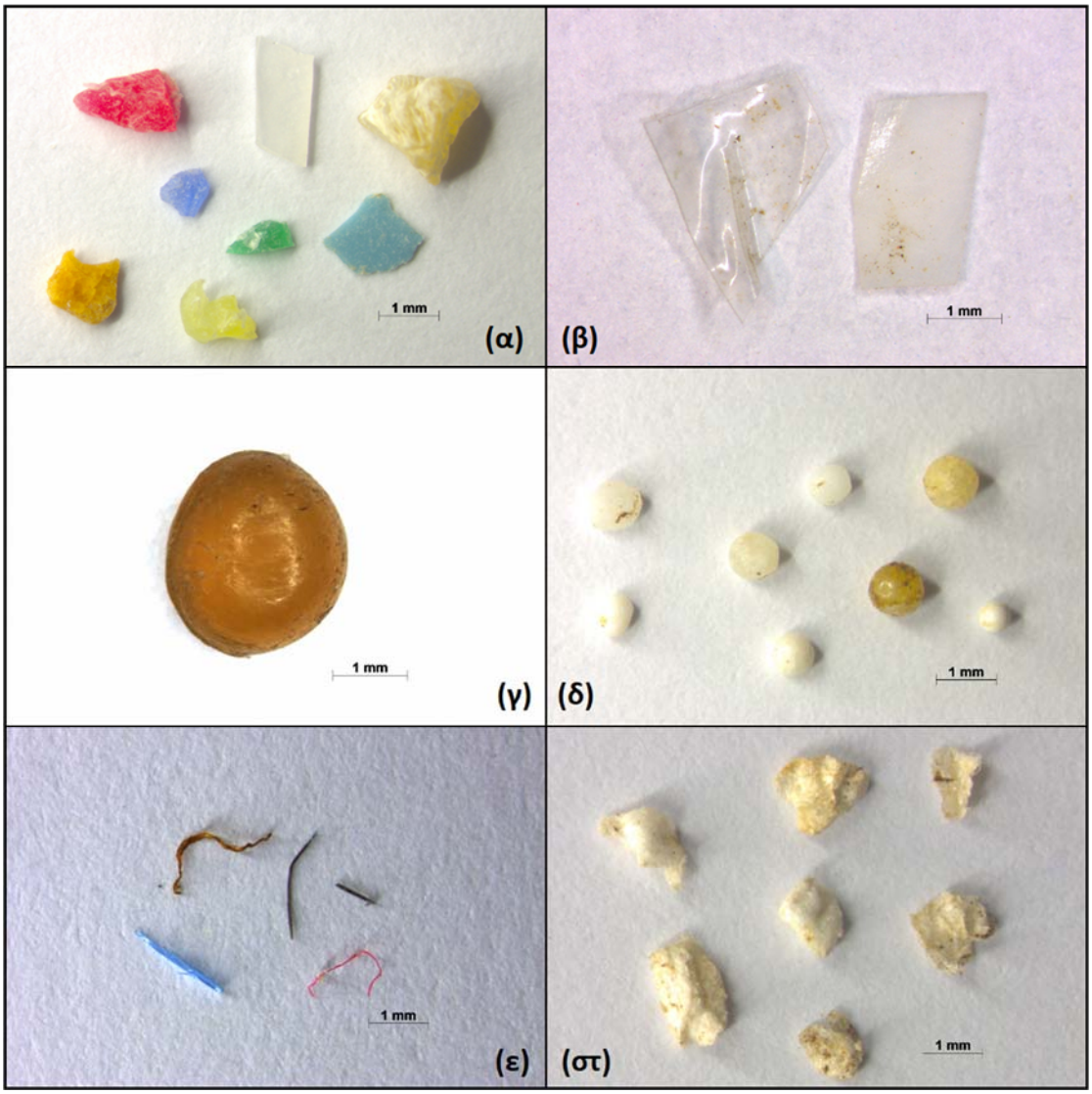
Οπτικά χαρακτηριστικά, χημική σύνθεση, χημικά πρόσθετα και προσροφημένοι ρύποι

Οπτικά χαρακτηριστικά

Η τεχνική υποομάδα της ΕΕ για τα θαλάσσια απορρίμματα [18] εκπόνησε μελέτες για την παρακολούθηση των μικροπλαστικών στις ευρωπαϊκές θάλασσες, ταξινομώντας τα σε έξι κατηγορίες σύμφωνα με τα οπτικά χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 3: Κατηγοριοποίηση μικροπλαστικών με βάση τα οπτικά τους χαρακτηριστικά

Κατηγορία	**Περιγραφή/Οπτικά χαρακτηριστικά**
Θραύσματα	Άκαμπτα, παχιά, με αιχμηρές άκρες και ακανόνιστο σχήμα. Συνήθως παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αφθονία.
Ταινίες	Έχουν ακανόνιστα σχήματα, με σύγκριση με τα θραύσματα, είναι λεπτά, εύκαμπτα και συνήθως διαφανή.
Σφαιρίδια	Ακανόνιστα, στρογγυλά σε σχήμα, σχετικά μεγάλου μεγέθους, με διάμετρο περίπου 5mm. Μπορεί να είναι επίπεδα στη μία πλευρά τους και εμφανίζονται με διάφορα χρώματα. Προέρχονται από τη βιομηχανία πλαστικών.
Κόκκοι	Σε σύγκριση με τα σφαιρίδια, έχουν κανονικό στρογγυλό σχήμα και συνήθως μικρότερο μέγεθος, διαμέτρου περίπου 1mm. Εμφανίζονται σε φυσικά χρώματα (λευκό, μπεζ, καφέ).
Νήματα	Μπορούν να είναι κοντά ή μακριά, με διαφορετικά πάχη και χρώματα. Μετά τα θραύσματα, είναι ο επόμενος τύπος μικροπλαστικών σωματιδίων σε αφθονία.
Αφροί	Μαλακή υφή, ακανόνιστο σχήμα και λευκό έως κίτρινο χρώμα. Προέρχονται από μεγάλα σωματίδια φελιζόλ.



Εικόνα 4: α) θραύσματα, β)ταινίες, γ) σφαιρίδια, δ) κόκκοι, ε) νήματα, στ) αφροί

Χημική σύνθεση

Τα πολυμερή που αποτελούν τα πρωτογενή μικροπλαστικά κυρίως περιλαμβάνουν πολυαιθυλένιο (PE), πολυπροπυλένιο (PP) και πολυστυρόλιο (PS), τα οποία αντιστοιχούν στα είδη πλαστικών που παράγονται ανάλογα με τα προϊόντα που κατασκευάζει η βιομηχανία. Από την άλλη πλευρά, τα δευτερογενή μικροπλαστικά αποτελούνται κυρίως από πολυεστέρα (PES), ακρυλικό (PAN) και πολυαμίδιο (PA), σχηματίζοντας ίνες που διασκορπίζονται στο περιβάλλον. Στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ), τα πιο συχνά ανιχνεύσιμα πολυμερή είναι ο πολυεστέρας, το πολυαιθυλένιο, το PET (πολυτετραφθοροαιθύλενεστέρας), το νάιλον (PA), το πολυπροπυλένιο και το PS. Ο πολυεστέρας αποτελεί το πιο συχνά αναφερόμενο πολυμερές σε μελέτες που πραγματοποιήθηκαν σε τέτοιες εγκαταστάσεις. Ως κύρια πηγή του PES θεωρείται το πλύσιμο των συνθετικών ρούχων.

Τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας και τα καθαριστικά συχνά περιέχουν σωματίδια από PE, PP και PS, που έχουν μέγεθος περίπου 150 έως 330 μικρόμετρα. Επιπλέον, τα πολυμερή που συναντώνται στα μικροπλαστικά που βρίσκονται σε εμφιαλωμένο νερό είναι κυρίως το PET, PE και PES, λόγω των υλικών που χρησιμοποιούνται για τα μπουκάλια και τα καπάκια. Τέλος, τόσο το PES όσο και το

PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο) έχουν εντοπιστεί σε νερό βρύσης και σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας πόσιμου νερού, εξαιτίας των τυποποιημένων υλικών που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα συστήματα διανομής και επεξεργασίας [19].

Πίνακας 4: Κυριότεροι τύποι πολυμερών στα μικροπλαστικά, πως αυτά χαρακτηρίζονται, ως πρωτογενή ή δευτερογενή, ποια είναι συνήθως η προέλευσή τους, καθώς και που εντοπίζονται

Τύπος πολυμερούς	**Εντοπίζεται σε**	**Ως πρωτογενή ή δευτερογενή μικροπλαστικά, συνήθως**
PA	Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ), προερχόμενο κυρίως από συνθετικά ρούχα.	Δευτερογενή
PAN	ΕΕΛ, προερχόμενο κυρίως από συνθετικά ρούχα και οικιακό εξοπλισμό (π.χ. κουβέρτες)	Δευτερογενή
PE	ΕΕΛ, προερχόμενο κυρίως από προϊόντα προσωπικής φροντίδας και καθαριστικά. Εμφανίζεται και στο εμφιαλωμένο νερό λόγω του υλικού κατασκευής συνήθως των καπακιών, στα μπουκάλια εμφιάλωσης.	Πρωτογενή
PES	ΕΕΛ, προερχόμενο κυρίως από συνθετικά ρούχα. Εμφανίζεται και στο εμφιαλωμένο νερό λόγω του υλικού κατασκευής συνήθως των μπουκαλιών εμφιάλωσης. Εντοπίζεται ακόμη στο νερό βρύσης και στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας πόσιμου νερού λόγω των τυποποιημένων υλικών κατασκευής δικτύων και συστημάτων διανομής.	Δευτερογενή
PET	ΕΕΛ, προερχόμενο κυρίως από συνθετικά ρούχα. Εμφανίζεται και στο εμφιαλωμένο νερό λόγω του υλικού κατασκευής συνήθως των μπουκαλιών εμφιάλωσης	Δευτερογενή
PP	ΕΕΛ, προερχόμενο κυρίως από προϊόντα προσωπικής φροντίδας και καθαριστικά	Πρωτογενή
PS	ΕΕΛ, προερχόμενο κυρίως από προϊόντα προσωπικής υγιεινής και καθαριστικά	Πρωτογενή
PVC	ΕΕΛ, προερχόμενο κυρίως από τα υλικά κατασκευής σωληνώσεων και δικτύων. Εντοπίζεται ακόμη στο νερό βρύσης και στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας πόσιμου νερού λόγω των τυποποιημένων υλικών κατασκευής δικτύων και συστημάτων διανομής.	Δευτερογενή

Χημικά πρόσθετα και προσροφημένοι ρύποι στα μικροπλαστικά

Τα πολυμερή περιέχουν επίσης διάφορα πρόσθετα (plastic additives, PAs), όπως πλαστικοποιητές, επιβραδυντικά φλόγας, αντιοξειδωτικά, χρωστικές ουσίες και

σταθεροποιητές που προστατεύουν από τη θερμότητα, την ακτινοβολία και τη γήρανση του υλικού. Ο σκοπός αυτών των προσθέτων είναι η βελτίωση ή η τροποποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων του πλαστικού. Ενώσεις όπως η διφαινόλη Α, οι φθαλικοί εστέρες και οι πολυβρωμιωμένοι διφαινυλαιθέρες χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την πλαστικότητα κατά τη διαδικασία παραγωγής. Τα μικροπλαστικά ενδέχεται να έχουν τοξικές ή ενδοκρινικές επιδράσεις λόγω της παρουσίας αυτών των PAs [20].

Τα σωματίδια γενικά, εκτός από τα πρόσθετα, περιέχουν και πρώτες ύλες όπως μονομερή και ολιγομερή, που δεν είχαν αντιδράσει και μπορούν να απελευθερωθούν στο περιβάλλον κατά τη χρήση ή τη διάθεσή τους. Επιπλέον, η προσρόφηση ανθεκτικών οργανικών ρύπων, όπως πολυχλωριωμένα διφαινύλια, πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, φυτοφάρμακα και οργανο-φωσφορικές ενώσεις, αυξάνει τον περιβαλλοντικό κίνδυνο, καθιστώντας τα μικροπλαστικά ακόμη πιο επιβαρυμένα. Συνεπώς, τόσο τα πρόσθετα όσο και οι ανθεκτικοί οργανικοί ρύποι που προσροφώνται στα μικροπλαστικά αποτελούν πηγή ανησυχίας, διότι εισάγουν δυνητικά επικίνδυνα χημικά στους βιοτόπους [4].

Βιοδιαθεσιμότητα

Το μικρό μέγεθος των μικροπλαστικών τα καθιστά εύκολα διαθέσιμα τόσο σε σπονδυλωτούς όσο και σε ασπόνδυλους οργανισμούς. Η κατάποση μικροπλαστικών έχει παρατηρηθεί σε οργανισμούς ευρείας κλίμακας, όπως το ζωοπλαγκτόν, τα διθύρα, καθώς και σε στρείδια και μύδια, αλλά και σε ψάρια [5]. Συνεπώς, τα μικροπλαστικά αποτελούν αναδυόμενους ανθρώπινους ρυπαντές που έχουν ανιχνευθεί σε διάφορα υδάτινα περιβάλλοντα, όπως οι ωκεανοί, οι ποταμοί, οι λίμνες, οι εκβολές ποταμών, καθώς και στις απορροές και τα λύματα των αστικών περιοχών [21].

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των μικροπλαστικών, όπως το μέγεθος, το σχήμα, η πυκνότητα, το χρώμα και η χημική τους σύνθεση, επηρεάζουν σημαντικά τον τρόπο μεταφοράς τους στο περιβάλλον και τη βιοδιαθεσιμότητά τους. Επιπλέον, οι τοξικολογικές επιδράσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς εξαρτώνται επίσης από αυτά τα χαρακτηριστικά [8]. Τα επιφανειακά και υπόγεια γλυκά νερά αποτελούν τις κύριες πηγές πόσιμου νερού για τον άνθρωπο. Τα συστήματα διαχείρισης των γλυκών νερών αποτελούν αποδέκτες μικροπλαστικών, διευκολύνοντας την εξάπλωσή τους σε ευρύτερα περιβάλλοντα. Έτσι, μικροπλαστικά έχουν ανιχνευθεί ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές των γλυκών νερών. Το πόσιμο νερό, ωστόσο, σχετίζεται άμεσα με την ανθρώπινη υγεία, και παρόλο που οι πληροφορίες σχετικά με τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών στην ανθρώπινη υγεία είναι περιορισμένες, η παρουσία τους στο νερό που πίνουμε αποτελεί δυνητικό κίνδυνο. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι συγκεντρώσεις μικροπλαστικών στο πόσιμο νερό κυμαίνονται από το μηδέν μέχρι χιλιάδες σωματίδια ανά λίτρο σε παγκόσμιο επίπεδο. Επομένως, η παρουσία μικροπλαστικών στο πόσιμο νερό και η ανάγκη για την απομάκρυνσή τους είναι ζητήματα που δεν μπορούν να αγνοηθούν.

Πηγές μικροπλαστικών και τρόποι μεταφοράς τους

Οι περισσότεροι ερευνητές συμφωνούν ότι περίπου το 80% των μικροπλαστικών που βρίσκονται στους ωκεανούς προέρχεται από ανθρώπινες δραστηριότητες στη ξηρά, όπως γεωργικές εφαρμογές (π.χ. δέματα ενσίρωσης, πλαστικές σακούλες και φυτοκομικά φιλμ), χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων, αστικές και γεωργικές απορροές (όπως ισχυρές βροχοπτώσεις και πλημμύρες) ή από άμεσες απορρίψεις εκροών από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων σε ποτάμια, με αποτέλεσμα τα

μικροπλαστικά να καταλήγουν στα θαλάσσια οικοσυστήματα [22]. Πολλά μικροπλαστικά βρίσκονται επίσης σε προϊόντα προσωπικής φροντίδας και καλλυντικά, όπως οδοντόκρεμες, κρέμες απολέπισης, υγρά σαπούνια, καθαριστικά προσώπου και αφρούς ξυρίσματος, γεγονός που οδηγεί στην παρουσία τους στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων [22,14]. Στην ευρωπαϊκή αγορά, σε υγρά σαπούνια εκτιμήθηκε ότι το 70% των μικροπλαστικών ήταν μεγαλύτερα από 450 μm. Ωστόσο, ορισμένα προϊόντα προσωπικής φροντίδας περιείχαν μικροσωματίδια μικρότερου μεγέθους, όπως π.χ. σε οδοντόκρεμες, όπου βρέθηκαν μικροπλαστικές χάντρες με μέγεθος κάτω από 10 μm, κυρίως μεταξύ 2 και 5 μm [23].

Τα πλαστικά σφαιρίδια χάνονται κατά τη διάρκεια βιομηχανικών διαδικασιών παραγωγής πλαστικών προϊόντων και εξαρτημάτων, είτε πριν από την τελική παραγωγή (κατά τη διαχείριση των μικροσφαιριδίων ως πρώτης ύλης), είτε κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, είτε μετά την παραγωγή κατά τη μεταφορά και διανομή των προϊόντων. Οι μεγαλύτερες απώλειες παρατηρούνται στα αρχικά στάδια, όπως μικρά τεμάχια πλαστικών ρητινών (μικροσφαιρίδια, ροδέλες, «δάκρυα γοργόνας», σπασμένα σφαιρίδια), καθώς και σκόνη και «ουρές» λιωμένων πλαστικών κατά την παραγωγή. Σύμφωνα με μια μελέτη Σουηδών επιστημόνων σχετικά με τις απώλειες βιομηχανικών μικροπλαστικών σφαιριδίων, η ετήσια ποσότητα που χάνεται κυμαίνεται μεταξύ 300 και 500 τόνων, χωρίς όμως να υπάρχουν ακριβή στοιχεία για το πόσο καταλήγει τελικά στη θάλασσα [23].

Επίσης, μικροπλαστικά σωματίδια χρησιμοποιούνται ως λειαντικά μέσα σε προϊόντα καθαρισμού, λόγω της ήπιας λειαντικής τους δράσης σε ευαίσθητες επιφάνειες. Επιπλέον, μικροπλαστικά από χρώματα μπορούν να απελευθερωθούν στο περιβάλλον λόγω φθοράς κατά τη χρήση ή κατά την αφαίρεση παλαιών στρώσεων χρωμάτων (π.χ. λείανση, τρίψιμο) [24]. Τα μικροσωματίδια χρησιμοποιούνται επίσης σε διαδικασίες καθαρισμού με πίεση, όπου εκτινάσσονται με αέρα για τον καθαρισμό σκαφών και μεγάλων μηχανημάτων, και ενδέχεται να διαρρεύσουν είτε τα ίδια είτε σκόνη πλαστικής ρητίνης [13].

Οι τεχνητοί χλοοτάπητες σε αθλητικά κέντρα και γήπεδα συμβάλλουν επίσης στη δημιουργία και μεταφορά μικροπλαστικών στο περιβάλλον. Ο χλοοτάπητας αποτελείται από «τεχνητά χόρτα» που συνδέονται με ένα υπόστρωμα-χαλί από πολυπροπυλένιο, πολυαμίνιο, πολυολεφίνες ή/και πολυουρεθάνη, ενώ το υπόστρωμα αποτελείται από κόκκους καουτσούκ, τα οποία μπορεί να προέρχονται από διάφορα υλικά ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες. Η φθορά του χλοοτάπητα, του υποστρώματος ή των κόκκων καουτσούκ προκαλεί τη δημιουργία μικροπλαστικών, τα οποία μεταφέρονται είτε ακούσια από τους χρήστες είτε μέσω του νερού που ξεπλένει την επιφάνεια, καταλήγοντας συχνά στα συστήματα όμβριων υδάτων. Μελέτες στη Σουηδία εκτίμησαν ότι η ετήσια απώλεια μικροπλαστικών από τέτοιες επιφάνειες κυμαίνεται μεταξύ 1.640 και 2.460 τόνων, χωρίς όμως να υπάρχουν δεδομένα σχετικά με το πόσο από αυτά καταλήγουν στη θάλασσα [23].

Επίσης, μικροπλαστικά προκύπτουν από τη φθορά πλαστικών που χρησιμοποιούνται σε εσωτερικούς χώρους, όπως παιχνίδια, ηλεκτρονικές συσκευές, μαγειρικά σκεύη και χαλιά. Η συνεχής φθορά των υφασμάτων, όπως τα ρούχα που πλένονται συχνά, οδηγεί στη δημιουργία μικρονιφάδων που απελευθερώνονται στα λύματα. Μια μελέτη έδειξε ότι ένα ρούχο κατασκευασμένο από συνθετικά υλικά μπορεί να απελευθερώσει πάνω από 1.900 μικροΐνες ανά πλύσιμο [23]. Άλλη έρευνα το 2016 αποκάλυψε ότι από τα συνθετικά ρούχα απελευθερώνονται περίπου 23.000 νημάδια ανά κιλό και ότι το 30% των υφασμάτων στα ρούχα μας είναι συνθετικά, ενώ το ίδιο το νούμερο των ινών και η μάζα τους είναι σχετικά μικρά, αλλά η συχνή πλύση αυξάνει την απελευθέρωση [23].

Τέλος, μικροπλαστικά χρησιμοποιούνται και σε ιατρικές εφαρμογές, όπως σε μικροσφαίρες που χορηγούνται σε φάρμακα για ανθρώπους και ζώα. Τα ζώα εκτροφής συχνά εμβολιάζονται με μικροσφαίρες μέσω στόματος, μια μέθοδος που είναι γρήγορη, οικονομική και αυξάνει την απορρόφηση, μειώνοντας τις παρενέργειες. Στους ανθρώπους, τα μικροσωματίδια χρησιμοποιούνται κυρίως για χορήγηση φαρμάκων και εμβολιασμούς, και μπορεί να κατασκευάζονται από διάφορα υλικά, όπως λιποσώματα, λατέξ, ορυκτά ή σύνθετα βιοϋλικά, και όχι αποκλειστικά από πλαστικά πολυμερή, που συχνά θεωρούνται βιοαποικοδομήσιμα [23].

Η ανεξέλεγκτη απόρριψη πλαστικών προϊόντων αποτελεί μια άλλη σημαντική πηγή μικροπλαστικών. Τα μεγάλα πλαστικά θραύσματα σπάνια διασπώνται πλήρως, και καταρρέουν σε μικρότερα κομμάτια κάτω από μηχανική φθορά, UV ακτινοβολία και βιολογική υποβάθμιση από βακτήρια και μύκητες. Αυτό το φαινόμενο επιδεινώνεται από την αυξανόμενη παραγωγή πλαστικών απορριμμάτων και την αυξημένη κατανάλωση μιας χρήσης πλαστικών. Στις εγκαταστάσεις ανακύκλωσης, η κακή διαχείριση των απορριμμάτων μπορεί να οδηγήσει σε διασπορά μικροπλαστικών μέσω του αέρα, καθώς τα απορρίμματα διασπώνται ή μεταφέρονται τυχαία [23].

Εκτιμάται ότι το 5-10% των μικροπλαστικών στους υδάτινους πόρους προέρχεται από τη φθορά ελαστικών. Τα σωματίδια αυτά έχουν μέγεθος από 5 μm έως 100 μm, με τα περισσότερα μεταξύ 5 και 25 μm [19]. Επιπλέον, η αλιεία, τα θαλάσσια σκάφη, οι βιομηχανίες ιχθυοκαλλιέργειας και οι ψυχαγωγικές δραστηριότητες στη θάλασσα αποτελούν άμεσες ή έμμεσες πηγές μικροπλαστικών, που εισέρχονται στο θαλάσσιο περιβάλλον από απορρίμματα αλιευτικών εργαλείων, φθαρμένα σκάφη, χρώματα και άλλα πλαστικά αντικείμενα. Ο τουρισμός και η αναψυχή επίσης συμβάλλουν στην απελευθέρωση πλαστικών αποβλήτων σε παραλίες και παράκτια περιοχές [4,23].

Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων αποτελούν έναν ακόμη βασικό δρόμο για τα μικροπλαστικά προς το περιβάλλον. Τα μικροπλαστικά που απελευθερώνονται από οικιακές και βιομηχανικές δραστηριότητες στη συλλογή και επεξεργασία λυμάτων καταλήγουν συχνά στα υδάτινα οικοσυστήματα, παρά την υψηλή αποτελεσματικότητα απομάκρυνσής τους (95-99%). Ωστόσο, η τεράστια ποσότητα λυμάτων που επεξεργάζονται καθημερινά σημαίνει ότι εκατομμύρια μικροπλαστικά διαφεύγουν σε ποτάμια και θάλασσες. Μελέτες σε δείγματα ιζημάτων και εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων στη Σουηδία, δείχνουν ότι τα μικροπλαστικά που προέρχονται από πολυεστερικές και ακρυλικές ίνες κυριαρχούν και σε δείγματα από ακτές και απόβλητα, επαληθεύοντας την υπόθεση ότι οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποτελούν σημαντικό μονοπάτι για την μετάδοση μικροπλαστικών στο περιβάλλον [21]. Επιπρόσθετα, η λυματολάσπη που προκύπτει περιέχει μεγάλες ποσότητες μικροπλαστικών και σε ορισμένες χώρες, η χρήση της στη γεωργία επιτρέπεται, επαναφέροντας τα μικροπλαστικά στο έδαφος και κατ' επέκταση στο περιβάλλον [22]. Σε άλλες χώρες, όπως οι Κάτω Χώρες, η λυματολάσπη υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία και τελικά καίγεται.

Οι ωκεανοί γίνονται τελικά αποδέκτες των μικροπλαστικών, καθώς το μεγαλύτερο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού ζει κοντά στην ακτή, και τα μικροπλαστικά εισέρχονται μέσω ποταμών ή εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων [4,3]. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο ποταμός Ρήνος, που διασχίζει έξι χώρες και έχει υψηλή πυκνότητα πληθυσμού στη λεκάνη απορροής του. Εκεί, από δείγματα επιφανειακών υδάτων σε 11 σημεία κατά μήκος 820 χιλιομέτρων, βρέθηκε μέση συγκέντρωση περίπου 890.000 μικροπλαστικών ανά km² μεγέθους ≥300 μm, με τη μεγαλύτερη να φτάνει τα 3,9 εκατομμύρια ανά km². Υπολογίστηκε ότι ο ποταμός Ρήνος μεταφέρει περίπου 190 εκατομμύρια μικροπλαστικά την ημέρα στη Βόρεια Θάλασσα, που αντιστοιχεί σε περίπου 100 κιλά μικροπλαστικών ημερησίως ή 36 τόνους ετησίως.

Τα μικροπλαστικά έχουν συσσωρευτεί σε ωκεανούς και παραλίες παγκοσμίως τα τελευταία 40 χρόνια, και βρίσκονται σε όλες τις υδάτινες στρώσεις, στους βυθούς και σε βιολογικούς οργανισμούς [8].

Η ποικιλομορφία στο σχήμα, το μέγεθος και την πυκνότητα των μικροπλαστικών παίζει ρόλο στη μετακίνησή τους και την διασπορά σε μεγάλες αποστάσεις μέσα στα ύδατα. Τα μικροπλαστικά με χαμηλή πυκνότητα επιπλέουν και περνούν μεγάλο χρόνο στην επιφάνεια ή στην στήλη του νερού, και μπορούν να βρεθούν σε απομακρυσμένα μέρη, όπως απομακρυσμένες παραλίες. Τα σωματίδια με υψηλή πυκνότητα τείνουν να βυθίζονται πιο γρήγορα και να συσσωρεύονται στους πυθμένους, κοντά στις πηγές τους, καθώς η ανάπτυξη μικροοργανισμών σε επιφάνειά τους μπορεί να αυξήσει την πυκνότητά τους, ενώ η φθορά μπορεί να την μειώσει, επηρεάζοντας την ικανότητα επίπλευσής τους [2].

Τέλος, η εναπόθεση μικροπλαστικών μέσω του αέρα θεωρείται συχνά ότι παίζει ρόλο στη διασπορά, αν και συχνά παραβλέπεται. Τα μικροσωματίδια που μεταφέρονται μέσω του αέρα, με διάμετρο από μερικά νανόμετρα έως 100 μm, μπορούν να καταλήξουν σε παράκτια και θαλάσσια οικοσυστήματα, ενώ η ποσότητα και η διασπορά τους εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες. Μελέτες σε αστικές περιοχές, όπως το Παρίσι, εκτιμούν ότι η εναπόθεση μικροπλαστικών από τον αέρα κυμαίνεται από 29 έως 280 σωματίδια ανά m² και ημέρα, με πάνω από το 90% να είναι ίνες. Τα μικροπλαστικά που μεταφέρονται με τον αέρα μπορούν να παρασυρθούν σε υδάτινους αποδέκτες με τις βροχοπτώσεις ή να εναποτεθούν απευθείας στην επιφάνεια της θάλασσας, επηρεαζόμενα από τις καιρικές συνθήκες και την πυκνότητα των σωματιδίων [23].

Η κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των υδροδυναμικών, ανθρωπογενών, μετεωρολογικών και γεωγραφικών παραγόντων είναι ζωτικής σημασίας, καθώς αυτοί καθορίζουν τη συμπεριφορά των μικροπλαστικών στο υδάτινο περιβάλλον, καθώς και τη δυναμική της μεταφοράς και συσσώρευσής τους, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους όπως το μέγεθος, η σύνθεση και η πυκνότητά τους [8].

Μηχανισμοί δημιουργίας μικροπλαστικών μέσω υποβάθμισης

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί μηχανισμοί μέσω των οποίων τα πλαστικά διασπώνται στο περιβάλλον, παράγοντας έτσι δευτερογενή μικροπλαστικά. Αυτοί είναι η φωτοαποικοδόμηση, η θερμοξειδωτική αποικοδόμηση, η υδρολυτική αποδόμηση και η βιοαποικοδόμηση από μικροοργανισμούς. Γενικά, η φυσική αποδόμηση του πλαστικού ξεκινά με τη φωτοαποδόμηση, η οποία στη συνέχεια οδηγεί στη θερμοξειδωτική αποδόμηση. Η υπεριώδης ακτινοβολία του ήλιου παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για να ενεργοποιηθεί η χημική αντίδραση ενσωμάτωσης οξυγόνου, που προέρχεται από το οξυγόνο του αέρα, στο πολυμερές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πλαστικό να γίνεται εύθραυστο και να σπάει σε ολοένα μικρότερα κομμάτια, μέχρι τα μοριακά του μονοπάτια να φτάσουν σε χαμηλό μοριακό βάρος και να καταστούν εύκολα μεταβολίσιμα από μικροοργανισμούς, δηλαδή να υποστούν βιοαποικοδόμηση.

Οι παραλίες θεωρούνται οι πιο πιθανές περιοχές όπου συμβαίνει η αποδόμηση των πλαστικών στους θαλάσσιους περιβάλλοντες χώρους, καθώς οι συνθήκες εκεί προάγουν τους υψηλούς ρυθμούς φωτοαποδόμησης [14]. Τα δευτερογενή μικροπλαστικά που θα δημιουργηθούν εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, που καθορίζουν και την ταχύτητα αποδόμησης των πλαστικών. Έτσι, η έντονη ηλιακή ακτινοβολία UV και οι υψηλές θερμοκρασίες το καλοκαίρι μπορούν να προκαλέσουν μεγαλύτερο κατακερματισμό των πλαστικών

υπολειμμάτων σε μικρότερα κομμάτια, με αποτέλεσμα πιο αυξημένη συγκέντρωση μικροπλαστικών σε σχέση με τον χειμώνα, όταν οι καιρικές συνθήκες είναι λιγότερο ευνοϊκές. Τα πλαστικά που επιπλέουν στην επιφάνεια ή βρίσκονται κάτω από το νερό υποβαθμίζονται και θρυμματίζονται, με χαμηλότερους ρυθμούς σε σύγκριση με εκείνα που βρίσκονται στις παραλίες, λόγω βιολογικών αλληλεπιδράσεων που σχηματίζουν βιοφίλμ και προστατεύουν την επιφάνειά τους από το ηλιακό φως. Επιπρόσθετα, η χαμηλότερη θερμοκρασία και η απουσία υπεριώδους ακτινοβολίας σε μεγαλύτερα βάθη του ωκεανού επιβραδύνουν περαιτέρω τη διαδικασία αποδόμησης [14].

Η παρουσία του θαλασσινού νερού συμβάλλει επίσης στην κατακερματιστική διαδικασία των πλαστικών. Αν και αρχικά θεωρούνταν ότι το αλμυρό νερό δεν επηρεάζει την αποδόμηση, οι πρόσφατες μελέτες δείχνουν διαφορετικά. Έρευνες με φάσματα ATR-FTIR σε σφαιρίδια πολυαιθυλενίου (PE) μετά από οκτώ εβδομάδες έκθεσης σε θαλασσινό νερό έδειξαν την ανάπτυξη νέων λειτουργικών ομάδων, όπως η καρβονυλομάδα, που αποτελεί δείκτη οξείδωσης του πολυμερούς. Οι εικόνες από ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) αποκάλυψαν εκτεταμένες ρωγμές στην επιφάνεια των σφαιριδίων, υποδεικνύοντας ότι η παρουσία του θαλασσινού νερού επιταχύνει τη διαδικασία υποβάθμισης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην παρουσία ανόργανων ιόντων που λειτουργούν ως καταλύτες οξείδωσης του πολυμερούς. Η αρχική δημιουργία επιφανειακών ρωγμών, που ενισχύεται από τις τριβές, τις συγκρούσεις και τις αναταράξεις στο νερό, προάγει τελικά τον μαζικό κατακερματισμό των πλαστικών και τη δημιουργία μικροπλαστικών [6].

Επιδράσεις στους οργανισμούς – Τοξικότητα

Οι επιπτώσεις των μικροπλαστικών στη θαλάσσια και άγρια ζωή δεν έχουν ακόμα ερευνηθεί σε βάθος, καθιστώντας τη σαφή κατανόηση τους δύσκολη. Ωστόσο, έχει βρεθεί ότι πολλοί οργανισμοί, τόσο σπονδυλωτά όσο και ασπόνδυλα, καταναλώνουν μικροπλαστικά. Τα παραδείγματα που έχουν μελετηθεί ανήκουν σε διάφορους μηχανισμούς σίτισης, όπως λοξοσκώληκες, κοράλλια, αμφιπόδα, μύδια, στρείδια και ψάρια [13]. Ενδεικτικά, έρευνες σε καφέ πέστροφες (Salmo trutta) στη Βόρεια Θάλασσα και στη δυτική Σουηδική ακτή έδειξαν ότι το 68% των ατόμων περιείχαν μικροπλαστικά. Υπάρχουν διάφορα μονοπάτια μέσω των οποίων τα μικροπλαστικά μπορούν να εισέλθουν στα ψάρια: πρώτον, επειδή μοιάζουν οπτικά με την τροφή τους και μπορεί να καταποθούν τυχαία, δεύτερον, λόγω παθητικής κατάποσης ή λάθους κατά την αναζήτηση τροφής και τρίτον, μέσω της τροφικής αλυσίδας [25].

Πολλές εργαστηριακές μελέτες έχουν επιβεβαιώσει ότι τα μικροπλαστικά μεταφέρονται μέσω της τροφικής αλυσίδας. Για παράδειγμα, μια έρευνα έδειξε ότι φθοριζούσες μικροσφαίρες πολυστυρολίου (PS) 10 μm μεταφέρθηκαν από το ζωοπλαγκτόν στις γαρίδες (Mysis relicta) [12], ενώ σε άλλη μελέτη εξετάστηκε η μεταφορά μικροπλαστικών από μύδια (Mytilus edulis) σε καβούρια (Carcinus maenas). Μετά την έκθεση των μυδιών σε μικροσφαιρίδια πολυστυρολίου, αυτά καταναλώθηκαν από τα καβούρια. Τα μικροπλαστικά βρέθηκαν τελικά στο στομάχι, στις ωοθήκες και στα βράγχια των καβουριών. Η τροφική μεταφορά αυτών των μικροπλαστικών σε υψηλότερα τροφικά επίπεδα αυξάνει τις ανησυχίες σχετικά με την ενδεχόμενη επίδρασή τους στην υγεία ανθρώπων [8]. Σε πελαγικά ψάρια έξι ειδών στο Βόρειο Ειρηνικό, που αλιεύτηκαν με τράτες manta, το 35% είχε πλαστικά σωματίδια στο έντερό τους, κυρίως θραύσματα (94%) μεγέθους 1-2,8 mm [12].

Υπάρχουν ενδείξεις ότι η παρουσία των μικροπλαστικών στα θαλάσσια περιβάλλοντα αυξάνεται συνεχώς. Επειδή πολλά από αυτά τα μικροπλαστικά έχουν το ίδιο μέγεθος με ιζήματα και πλαγκτονικούς οργανισμούς, είναι πιθανό να γίνονται διαθέσιμα σε ευρύ φάσμα θαλάσσιων ειδών. Έτσι, μπορούν να συσσωρεύονται μέσα στους

οργανισμούς, προκαλώντας αρνητικές συνέπειες. Πολλά είδη, όπως θαλάσσια πτηνά, χελώνες, κητοειδή, φώκιες και καρχαρίες, έχουν αναφερθεί ότι επηρεάζονται αρνητικά από πλαστικά θραύσματα. Τα θαλάσσια πτηνά, ειδικά, είναι πολύ ευαίσθητα στην κατάποση πλαστικών αντικειμένων που τα παραπλανούν ότι είναι τροφή. Τα καταναλωθέντα πλαστικά μένουν στο πεπτικό σύστημα και μπορεί να προκαλέσουν γαστρεντερική απόφραξη, μειωμένη έκκριση πεπτικών ενζύμων και ορμονικές διαταραχές, επηρεάζοντας αρνητικά την αναπαραγωγική τους ικανότητα.

Οι τοξικές επιδράσεις των μικροπλαστικών που απελευθερώνονται στο περιβάλλον οφείλονται κυρίως σε δύο λόγους. Πρώτον, επειδή τα μικροπλαστικά χαρακτηρίζονται από υδροφοβία και μεγάλη επιφάνεια σε σχέση με τον όγκο τους, μπορούν εύκολα να προσροφήσουν οργανικούς ρύπους όπως τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB), τα φυτοφάρμακα (π.χ. DDT) και πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAH). Έτσι, λειτουργούν ως φορείς αυτών των τοξικών ενώσεων. Δεύτερον, η τοξικότητα μπορεί να προέρχεται και από τα ίδια τα πρόσθετα και μονομερή που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των πλαστικών, όπως η διφαινόλη Α, οι φθαλικές ενώσεις και τα επιβραδυντικά φλόγας. Πολλά από αυτά τα χημικά είναι ενδοκρινικοί διαταράκτες και μπορούν να προκαλέσουν τοξικές επιδράσεις, όπως διαταραχές στην ανάπτυξη, ορμονικές δυσλειτουργίες, νευρολογικές βλάβες, καθώς και γενετικές ανωμαλίες, ακόμα και καρκίνο και διαβήτη. Επιπλέον, τα μονομερή και πρόσθετα μπορούν να μεταναστεύουν από το πλαστικό σε τρόφιμα ή νερό, επηρεάζοντας άμεσα την ανθρώπινη υγεία.

Η βιορύπανση των μικροπλαστικών, δηλαδή η ανάπτυξη μικροοργανισμών και φυκών στην επιφάνειά τους, αυξάνει την πιθανότητα κατάποσής τους από υδρόβιους οργανισμούς. Τα μικροπλαστικά που υφίστανται βιορύπανση μπορεί να αποικιστούν από βακτήρια, προνύμφες και σπόρια, σχηματίζοντας βιοφίλμ που διευκολύνει την προσκόλλησή τους και την κατάποσή τους από διάφορα είδη. Μερικές μελέτες δείχνουν ότι η παρουσία μικροπλαστικών σε οργανισμούς μπορεί να επηρεάσει τη φωτοσυνθετική δραστηριότητά τους και να προκαλέσει αναστολή στην ανάπτυξή τους, μέσω της προσρόφησης και συσσώρευσης μικροπλαστικών στην επιφάνεια τους [14].

Επιπλέον, έρευνες σε μύδια (Mytilus edulis) που εκτέθηκαν σε μικροσφαίρες πολυστυρολίου (3-9,6 μm) δείχνουν ότι, μετά την κατάποση, αυτά τα σωματίδια συσσωρεύονται στον γαστρεντερικό σωλήνα και μετακινούνται στο κυκλοφορικό σύστημα εντός τριών ημερών, παραμένοντας εκεί έως και 48 ημέρες. Μια άλλη μελέτη διαπίστωσε ότι τα μύδια παρουσίασαν ανοσοαπόκριση και σχηματισμό κοκκιωμάτων μετά την κατάποση μικροσφαιρών. Τα καβούρια που τρέφονται με τροφή που περιέχει πλαστικές ίνες (π.χ. πολυπροπυλένιο) παρουσίασαν μικρή, αλλά σημαντική μείωση στην ενεργειακή τους απόδοση, ενώ μικροπλαστικά εντοπίστηκαν σε διάφορα όργανα που δεν σχετίζονται με το πεπτικό σύστημα, όπως το ήπαρ και το πάγκρεας, και στα βράγχια. Αυτό δείχνει ότι η ανάλυση ολόκληρου του οργανισμού είναι απαραίτητη για την πλήρη εκτίμηση της έκθεσής τους [21].

Τέλος, η ανθρώπινη υγεία μπορεί να απειλείται μέσω της κατανάλωσης μολυσμένων θαλασσινών. Τα μικροπλαστικά μπορούν να έχουν τοξικές επιδράσεις στον οργανισμό, προκαλώντας οξειδωτικό στρες, βλάβες στους ιστούς και χρόνια φλεγμονή. Μια πρόσφατη μελέτη εξέτασε την πιθανή απορρόφηση μικροπλαστικών στον ανθρώπινο οργανισμό, διαπιστώνοντας ότι τα μεγαλύτερα (πάνω από 2 mm) πιθανότατα παραμένουν στο έντερο, ενώ τα μικρότερα μπορούν να εισέλθουν σε περιφερικούς ιστούς και στο κυκλοφορικό σύστημα. Σε άτομα με εντερικές παθήσεις, η διαπερατότητα των ιστών αυξάνεται, καθιστώντας πιο πιθανή τη μεταφορά μικροπλαστικών σε άλλους οργανισμούς και συστήματα. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με τη βιοσυσσώρευση οργανικών ρύπων, που συχνά συνοδεύουν τα μικροπλαστικά, και

τη μεταβίβασή τους μέσω της τροφικής αλυσίδας, υποδηλώνουν ότι τα μικροπλαστικά και οι συσχετιζόμενες χημικές ενώσεις αποτελούν πιθανό άμεσο κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, με συσχετίσεις σε προβλήματα όπως ανωριμότητα, νευρολογικές διαταραχές, ενδοκρινικές διαταραχές, νευροψυχολογικές αλλαγές, αρθρίτιδα, καρκίνο και διαβήτη.

Μέθοδοι δειγματοληψίας, επεξεργασίας και της ανάλυσης μικροπλαστικών στο νερό, σε ιζήματα και παράκτιες αποθέσεις

Μέθοδοι δειγματοληψίας

Οι πρώτες καταγραφές για την παρουσία μικροπλαστικών σε δείγματα πλαγκτού χρονολογούνται από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, ωστόσο μόλις πρόσφατα το θέμα των μικροπλαστικών στον Παγκόσμιο Ωκεανό αρχίζει να απασχολεί συστηματικά την επιστημονική κοινότητα στο εξωτερικό. Τα μικροπλαστικά αποτελούν μια πολύ ποικιλόμορφη ομάδα σωματιδίων, διαφορετικών σε μέγεθος, σχήμα, χρώμα και πυκνότητα, και συχνά περιλαμβάνουν διάφορα συνθετικά πολυμερή. Αυτό καθιστά τη συλλογή, την προετοιμασία και την ανίχνευση αυτών των πλαστικών σωμάτων μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στην ποσοτική εκτίμηση της παρουσίας τους στο περιβάλλον. Οι ερευνητές συζητούν ευρέως την ανάγκη για την ανάπτυξη τυποποιημένων μεθόδων και πρωτοκόλλων. Αν και έχουν αρχίσει ήδη να γίνονται πρώτα βήματα προς αυτή την κατεύθυνση, το συνολικό πρόβλημα παραμένει άλυτο.

Παρά ταύτα, πολλοί επιστήμονες εστιάζουν στην ανάπτυξη και δοκιμή τεχνικών για τη συλλογή και την προετοιμασία δειγμάτων νερού, ιζημάτων από τον βυθό και παράκτιων αποθέσεων, καθώς και στην ανάπτυξη αξιόπιστων μεθόδων ανίχνευσης μικροπλαστικών σε αυτά τα δείγματα. Οι τρέχουσες εργαστηριακές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί από τη NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) για την ανάλυση μικροπλαστικών στα θαλάσσια περιβάλλοντα παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα και συχνά θεωρούνται προαιρετικές, ενώ τα προγράμματα παρακολούθησης απαιτούν εξατομικευμένες λύσεις που ανταποκρίνονται στα συγκεκριμένα προβλήματα που καλούνται να επιλύσουν.

Δείγματα μικροπλαστικών σε θαλάσσιο περιβάλλον μπορούν να συλλεχθούν

- από το επιφανειακό στρώμα,
- από την υδάτινη στήλη, και
- με δειγματοληψία ιζημάτων πυθμένα ή
- από παράκτιες αποθέσεις.

Τα δείγματα μπορούν να είναι

- επιλεκτικά,
- μαζική δειγματοληψία,
- μειωμένου όγκου.



Εικόνα 5: Πλαστικά υπολείμματα που φαίνονται με γυμνό μάτι

Επιλεκτική δειγματοληψία in situ σημαίνει ότι τα πλαστικά υπολείμματα συνήθως αναγνωρίζονται με γυμνό μάτι και συλλέγονται από την αμμώδη επιφάνεια της παραλίας. Η τεχνική αυτή είναι χρήσιμη κατά την αξιολόγηση των

πλαστικών κόκκων και είναι κατάλληλη λόγω του σφαιρικού τους σχήματος και των σχετικά μεγάλων μεγεθών τους (έως μερικά χιλιοστά), γεγονός που διευκολύνει την αναγνώρισή τους στην αμμώδη επιφάνεια. Ωστόσο, οι πιθανότητες να λείπει το πλαστικό είναι υψηλές όταν αναμιγνύεται με άλλα σκουπίδια ή έχει ακανόνιστο σχήμα.

Δεν λαμβάνει χώρα συγκέντρωση πλαστικού όταν τα δείγματα συλλέγονται με μαζική δειγματοληψία. Μια τέτοια τεχνική είναι η πιο δημοφιλής κατά τη μελέτη των ιζημάτων του πυθμένα, αλλά σπάνια χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία νερού λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας του νερού σε πλαστικό.

Η **μαζική δειγματοληψία** είναι προτιμότερη όταν η οπτική ταυτοποίηση του πλαστικού είναι αδύνατη, δηλαδή, εάν τα σωματίδια αναμιγνύονται με τα ιζήματα του πυθμένα ή τα σωματίδια είναι πολύ μικρά για διήθηση στο σημείο δειγματοληψίας ή για την αναγνώριση με γυμνό μάτι.

Η **μέθοδος μειωμένου όγκου** είναι η πλέον εφαρμόσιμη για τη δειγματοληψία νερού και μερικές φορές για τα ιζήματα του πυθμένα. Στην περίπτωση αυτή, ο όγκος του αρχικού δείγματος μειώνεται και παραμένει μόνο ένα μικρό τμήμα του που περιέχει μικροπλαστικά για τη μετέπειτα ανάλυση. Τα δείγματα ιζημάτων πυθμένα και άμμου μπορούν να κοσκινιστούν απευθείας στο σημείο δειγματοληψίας στην παραλία ή σε ένα σκάφος, ενώ τα δείγματα νερού συνήθως συμπυκνώνονται με διήθηση μεγάλων όγκων νερού μέσω διχτυών πλαγκτόν. Τα δείγματα μαζικής δειγματοληψίας και μειωμένου όγκου απαιτούν πρόσθετη επεξεργασία σε εργαστηριακές συνθήκες.

Σύμφωνα με τις συστάσεις του NOAA, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες διαδικασίες για το διαχωρισμό μικροπλαστικών σωματιδίων από περιβαλλοντικά δείγματα ανάλογα με το μέγεθός τους:

- ροή νανοφιλτράρισμα ή νανοεκχύλιση των σωματιδίων που είναι μικρότερα από 1 μm,
- τυποποιημένο φίλτρο για σωματίδια μεγέθους από 0,2 έως 1 μm
- η χρήση φυτοπλαγκτονικού διχτυού neuston 50-80 μm (δίχτυ Phyto-P)
- δίχτυ neuston ζωοπλαγκτού (Zoo-P net) 330 μm
- κόσκινο 5 mm για το κοσκίνισμα.

Είναι δύσκολο να συγκριθούν τα αποτελέσματα από το κοσκίνισμα και πλαγκτόν με δίχτυα. Ως εκ τούτου, συνιστάται η χρήση κόσκινων με πλέγμα 500 μm και να επεξεργάζονται χωριστά τα σωματίδια που συγκρατούνται και περνούν από το κόσκινο ως υποχρεωτική λειτουργία στο πλαίσιο κάθε μιας από τις ανωτέρω διαδικασίες. Αυτό καθιστά δυνατή τη σύγκριση των αποτελεσμάτων από το διαχωρισμό πυκνότητας και το φιλτράρισμα με τα δεδομένα που προκύπτουν από την ανάλυση μεγαλύτερων κλασμάτων (0,5-5 mm) με κόσκινα [26].

Δείγματα επιφανειακών υδάτων

Τα δίχτυα Neuston χρησιμοποιούνται κυρίως σε αυτή την περίπτωση. Το κύριο πλεονέκτημα είναι το γρήγορο φιλτράρισμα των μεγάλων όγκων νερού και η λήψη ενός συμπυκνωμένου δείγματος. Τα δίχτυα καθιστούν δυνατή τη λήψη αντιπροσωπευτικής δειγματοληψίας από μια μεγάλη επιφάνεια νερού, τη συλλογή πλαστικών σωματιδίων της τάξης του χιλιοστού και να συλλέγονται ταυτόχρονα μικροπλαστικά και ζωοπλαγκτόν για να συγκριθούν οι ποσότητες τους.



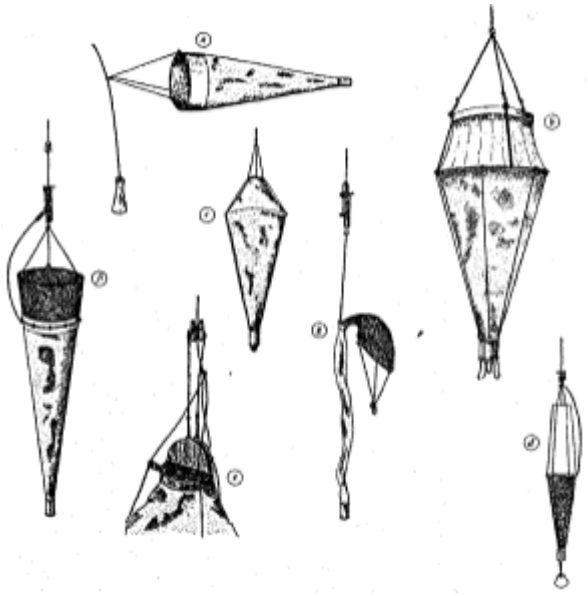
Εικόνα 6: Δίχτυα Neuston

Το πλέγμα και τα μεγέθη ανοιγμάτων είναι τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των διχτυών δειγματοληψίας. Ωστόσο, οι παράμετροι των διχτυών δειγματοληψίας σπάνια αναφέρονται πλήρως και το μέγεθος των ανοιγμάτων είναι συνήθως η μόνη παράμετρος που αναφέρεται στις δημοσιεύσεις. Το μέγεθος των ματιών εξαρτάται από το στόχους της έρευνας και ποικίλλει από δεκάδες μικρόμετρα έως χιλιοστά, αλλά αντιστοιχεί κατά μέσο όρο στο μέγεθος ματιών των διχτυών ζωοπλαγκτού. Το μέγεθος ανοίγματος του neuston είναι έως $2m^2$. Το μήκος αυτών των διχτυών για την επιφάνεια δειγματοληψίας ποικίλλει σημαντικά από ένα έως αρκετά μέτρα, αλλά τα δίχτυα μήκους 3-4 μέτρων είναι τα πιο συνηθισμένα. Το επιφανειακό στρώμα που δειγματολήπτεται από τα δίχτυα αυτά είναι περίπου 15-25 cm πάχος. Η άνωση ενός διχτυού υποστηρίζεται από ειδικούς πλωτήρες (τράτα manta) ή καταμαράν (καταμαράν neuston). Η ταχύτητα ρυμούλκησης του διχτυού κυμαίνεται από 1 έως 5 κόμβους. Η χρήση καταμαράν διευκολύνει τη δειγματοληψία σε ταραγμένη θάλασσα ενώ η αποτελεσματικότητα της τράτας μειώνεται λόγω της βύθισης της εισόδου της στα κύματα. Ως εκ τούτου, το τελευταίο δίχτυ εφαρμόζεται σε ήρεμα νερά. Η διάρκεια ρυμούλκησης κυμαίνεται από λεπτά έως ώρες ανάλογα με τις την περιεκτικότητα του νερού σε SPM. Η χρήση διχτυών με διαφορετικά μεγέθη ματιών δυσχεραίνει σημαντικά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων [26].

Δείγματα από τη στήλη νερού.

Τα δίχτυα ζωοπλαγκτού, ένας καταγραφέας συνεχούς πλαγκτού (CPR), μια τράτα κοντά στον πυθμένα για τη σύλληψη βενθικών οργανισμών (επιβενθικό έλκηθρο), και διάφορες υποβρύχιες αντλίες είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα εργαλεία στη στήλη νερού. Το σύστημα υδροληψίας ενός ερευνητικού σκάφους χρησιμοποιείται επίσης, αλλά σπάνια. Οι φιάλες Niskin χρησιμοποιούνται για πλήρη όγκο δειγματοληψίας των υδάτων. Διαφορετικές μελέτες χρησιμοποίησαν διαφορετικές

μεθόδους για τη δειγματοληψία νερού σε βάθη που κυμαίνονται από ένα έως εκατοντάδες μέτρα [26].



Εικόνα 7: Διάφοροι τύποι διχτυών συλλογής ζωοπλαγκτού



Εικόνα 8: Φιάλη Niskin

Δείγματα παράκτιων αποθέσεων.

Τα δείγματα συλλέγονται κυρίως από διάφορα σημεία μιας παραλίας, και η επιλογή συγκεκριμένης θέσης μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η συλλογή δειγμάτων (ή η σειρά συλλογής) πραγματοποιείται με διαφορετικούς τρόπους, όπως:

• σε ολόκληρη την έκταση της παραλίας,
• εντός επιμέρους ζωνών,
• κατά μήκος της γραμμής που διαγράφουν οι διαφορετικές ζώνες της παραλίας,
• κατά μήκος της γραμμής της μέγιστης παλίρροιας ή ανόδου (στην υψηλή παραλία), και
• σε ρηχά κανάλια ή τάφρους που βρίσκονται πέρα από την ακτή.

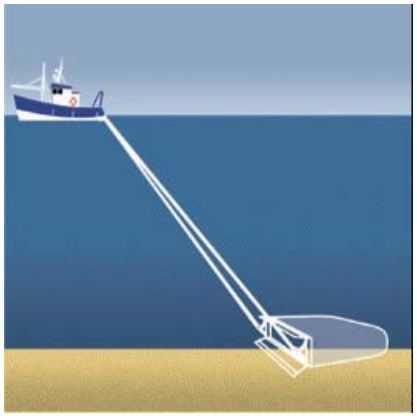
Για τη συλλογή μικροπλαστικών, συχνά χρησιμοποιούνται απλά εργαλεία, όπως λαβίδες, μεταλλικά κουτάλια ή σέσουλες, ή ακόμη και το χέρι με ειδικό δοχείο ή σακούλα. Η στρατηγική συλλογής διαφέρει, π.χ. μπορεί να γίνεται περνώντας κατά μήκος της ακτογραμμής και συλλέγοντας υλικό με κουτάλι ή σέσουλα, ή εστιάζοντας σε μια συγκεκριμένη περιοχή μέσα σε ένα πλαίσιο. Σε ορισμένες περιπτώσεις, εφαρμόζεται η στρωματοποιημένη δειγματοληψία με ειδικούς σωλήνες.

Οι μονάδες δειγματοληψίας εξαρτώνται από τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα, όταν χρησιμοποιούνται πλαίσια ή σωλήνες, η συγκέντρωση υπολογίζεται ανά περιοχή που μπορεί να κυμαίνεται από λίγα εκατοστά μέχρι μερικά μέτρα τετραγωνικά. Σε άλλες περιπτώσεις, η συγκέντρωση υπολογίζεται βάσει του βάρους του δείγματος, που μπορεί να κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες γραμμάρια έως 10 κιλά, ή με βάση τον όγκο, που μπορεί να είναι από μερικές δεκάδες χιλιοστόλιτρα μέχρι αρκετά λίτρα.

Συνήθως, η δειγματοληψία εστιάζει στα ανώτερα 5 cm του ιζήματος, αλλά μπορεί να περιορίζεται σε μια επιφάνεια ή να γίνεται σε βάθος δεκάδων εκατοστών. Τα μικροπλαστικά έχουν την τάση να συσσωρεύονται στην άμμο με τον ίδιο τρόπο που συσσωρεύονται οργανικά σωματίδια, και μπορούν να θαφτούν σε βαθύτερα στρώματα. Για την ανίχνευσή τους σε τέτοιες περιπτώσεις, προτιμάται η στρωματοποιημένη δειγματοληψία με τη χρήση σωλήνα.

Δείγματα ιζημάτων πυθμένα.

Διαδικασίες για τον πυθμένα αποθέσεων για τη δειγματοληψία της περιεκτικότητας σε μικροπλαστικά είναι παρόμοιες με εκείνες για τον προσδιορισμό της χημικής τους σύστασης ή για βιολογική αξιολόγηση. Τα δείγματα συλλέγονται με (Ekman-Birdge, Van- Veen, Peterson), ένα βυθοσκόπιο, τράτα βυθού, ή δειγματολήπτη πυρήνα. Η κατανομή των μικροπλαστικών ως σωματιδιακή ύλη στα ιζήματα του πυθμένα μπορεί να είναι σημαντικά ετερογενής. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν αρκετές δειγματοληψίες ιζημάτων για να ληφθεί ένα ενιαίο αντιπροσωπευτικό δείγμα όταν χρησιμοποιούνται σημείο προς σημείο συσκευές, όπως ο αρπαγέας ή ο πυρηνολήπτης. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση των συμπαγών δειγματοληπτών [26].



Εικόνα 9: Τράτα βυθού

Επεξεργασία δειγμάτων δειγματοληψίας

Διατήρηση, αποθήκευση και ποιοτικός έλεγχος.

Η λανθασμένη αποθήκευση των δειγμάτων μπορεί να επιφέρει αλλαγές στην κατανομή μεγέθους των σωματιδίων, καθώς μπορεί να προκληθεί μερική καταστροφή των πλαστικών σωμάτων και άρα να εμποδιστεί η ανίχνευση τους με τις τρέχουσες μεθόδους. Επομένως, κατά την αποθήκευση ή τη μεταφορά των δειγμάτων, είναι σημαντικό να εφαρμόζονται συγκεκριμένες διαδικασίες που διασφαλίζουν τη διατήρηση της αρχικής κατάστασής τους, όπως αυτή που υπήρχε κατά τη δειγματοληψία από το περιβάλλον.

Οι βασικές αρχές για την αποθήκευση και διατήρηση των δειγμάτων πριν από την εργαστηριακή ανάλυση περιλαμβάνουν:

• διατήρηση στο σκοτάδι (κατά προτίμηση στους 4°C, ανεξάρτητα από τη μήτρα του δείγματος),
• κατάψυξη (έως -20°C) για δείγματα ιζημάτων πυθμένα και φίλτρων,
• χρήση διαλυμάτων στερέωσης όπως αιθανόλη, DESS, διάλυμα φορμόλης 4-5% ή HCl5-10%,
• συνδυασμό διαλύματος στερέωσης και αποθήκευσης στους 4°C,
• ξήρανση σε θερμοκρασία δωματίου και αποθήκευση σε σκοτάδι (ιδιαίτερα όταν η ανάλυση πραγματοποιείται σε πλοίο).

Επίσης, είναι σκόπιμο να αποφεύγονται και, όπου είναι δυνατόν, να αντικαθίστανται οι πηγές μόλυνσης από πλαστικά, όπως πλαστικά εργαστηριακά σκεύη, κόσκινα ή συσκευές, με μεταλλικά ή γυάλινα εργαλεία. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπως τα δίχτυα και άλλα όργανα, αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Είναι υποχρεωτικό να γίνεται έλεγχος

με αρνητικά δείγματα (κενά δείγματα) όταν χρησιμοποιούνται πλαστικά σκεύη για την αποθήκευση. Η μόλυνση των δειγμάτων μπορεί να προέρχεται από ανεπαρκή ποιότητα αέρα στο εργαστήριο, σωματίδια από συνθετικά υφάσματα εργαστηρίου, κακή καθαριότητα των εργαλείων, χαλαρά κλειστά δοχεία, χρωματιστά σωματίδια που έχουν αποκοπεί από το πλάι του δοχείου ή σωματίδια από συνθετικά δίχτυα που χρησιμοποιούνται στη δειγματοληψία. Τα αρνητικά δείγματα ή κενά δείγματα είναι απαραίτητα για την παρακολούθηση της πιθανής μόλυνσης.

Προετοιμασία δείγματος.

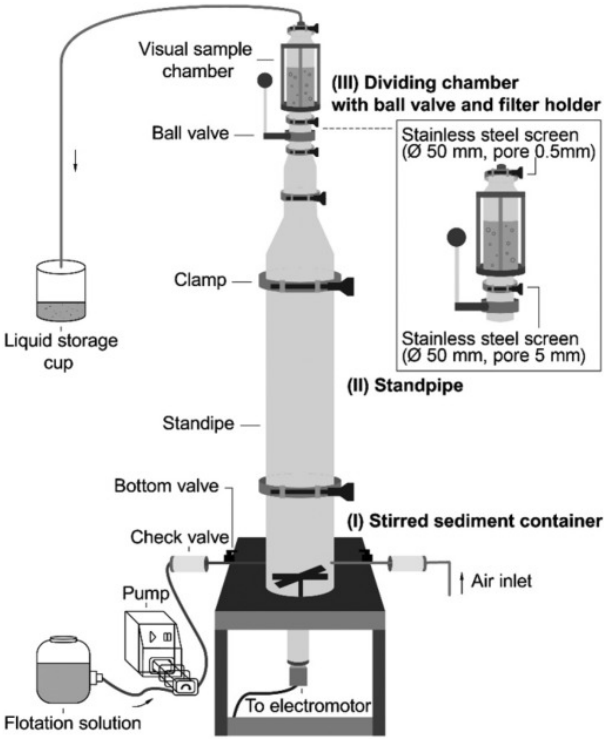
Υπάρχουν τέσσερα κύρια στάδια:

- διαχωρισμός πυκνότητας,
- φιλτράρισμα,
- κοσκίνισμα και
- πέψη οργανικής ύλης.

Όλα αποσκοπούν στον διαχωρισμό των μικροπλαστικών σωματιδίων από το κύριο υλικό του δείγματος (νερό, ιζήματα πυθμένα και άμμος) και στην απομάκρυνση του οργανικού υλικού [26].

Διαχωρισμός πυκνότητας.

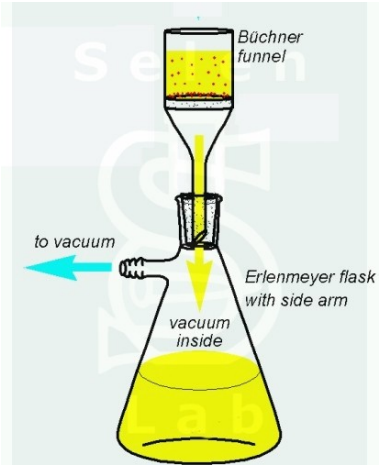
Η ειδική πυκνότητα των περισσότερων πλαστικών κυμαίνεται από 0,8 έως 1,70 g/cm^3. Το εύρος κυμαίνεται από <0,05 g/cm^3 για το διογκωμένο πολυστυρένιο και μέχρι 2,1-2,3 g/cm^3 για το πολυτετραφθοροαιθυλένιο/τεφλόν. Γενικά, η πυκνότητα της άμμου και άλλων αποθέσεων είναι 2,65 g/cm^3. Η διαφορά αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για τον διαχωρισμό των συγκριτικά ελαφρών πλαστικών από τα βαρύτερα σωματίδια του εδάφους με την τοποθέτηση του δείγματος σε ένα κορεσμένο αλατούχο διάλυμα και την ανάμιξή του για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Μετά την ανάμιξη, η άμμος και τα ιζήματα του πυθμένα καθιζάνουν, ενώ τα ελαφρύτερα σωματίδια (συμπεριλαμβανομένων των πλαστικών) παραμένουν αιωρούμενα ή επιπλέουν στην επιφάνεια του διαλύματος. Τα αιωρούμενα σωματίδια συλλέγονται για περαιτέρω επεξεργασία. Ως διάλυμα διαχωρισμού, φρέσκο ή νερό βρύσης, θαλασσινό νερό, πυκνό διάλυμα NaCl (με πυκνότητα 1,2 g/cm^3), πολυτουγγικό νάτριο, μεταβατουγγικό λίθιο, χλωριούχος ψευδάργυρος, ιωδιούχο νάτριο και άλλα άλατα χρησιμοποιούνται. Ελαφριά και αφρώδη πλαστικά, των οποίων η πυκνότητα είναι μικρότερη από 1 g/cm^3 μπορούν επίσης να διαχωριστούν με τη χρήση γλυκού νερού. Τα πλαστικά που επιπλέουν στο θαλασσινό νερό περιλαμβάνουν τη διογκωμένη πολυστερίνη και υψηλής και χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο και πολυπροπυλένιο. Το πολυστυρένιο σε στερεή μορφή αναδύεται μόνο σε κορεσμένο αλατούχο διάλυμα NaCl. Το ελαστικό και άκαμπτο χλωριούχο πολυβινύλιο(PVC), το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και το νάιλον επιπλέουν σε διάλυμα μεταβατουρικού νατρίου. Δεδομένου ότι η πυκνότητα ορισμένων πλαστικών φτάνει τα 1,7 g/cm^3, η χρήση ενός κορεσμένου διαλύματος χλωριούχου νατρίου και ιδιαίτερα γλυκού νερού μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση της συνολικής περιεκτικότητας σε μικροπλαστικά. Διάφορα όργανα (αναδευτήρες, αναμικτήρες, φυγοκεντρικές μηχανές, φλοτέρ και διαχωριστές) χρησιμοποιούνται για την ανάμιξη του διαλύματος. Στην απλούστερη περίπτωση, το



Εικόνα 10: Διαχωριστής πλαστικών ιζημάτων Munich

δείγμα τοποθετείται σε ποτήρι ζέσεως και αναμιγνύεται με γυάλινο αναδευτήρα-ράβδο. Ο χρόνος ανάμιξης είναι μία από τις κύριες παραμέτρους της εκχύλισης. Μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τον όγκο του δείγματος και μπορεί να κυμαίνεται από δεκάδες δευτερόλεπτα έως αρκετές ώρες. Ο χρόνος καθίζησης ποικίλλει επίσης σημαντικά και κυμαίνεται από λίγα λεπτά έως μία ημέρα. Είναι επίσης σκόπιμο να πραγματοποιούνται διαδοχικές εκχυλίσεις από το ίζημα, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της απόδοσης της εκχύλισης των μικροπλαστικών σημαντικά, αλλά με το κόστος της αύξησης του χρόνου ανάλυσης. Η πιο αποτελεσματική μέθοδος εκχύλισης αυτή τη στιγμή περιλαμβάνει την Διαχωριστής πλαστικών ιζημάτων Munich (Munich Plastic Sediment Separator, MPSS) [26].

Διήθηση.



Εικόνα 11: Διήθηση υπό κενό

Η διήθηση υπό κενό χρησιμοποιείται συνήθως για ένα διάλυμα που λαμβάνεται στο στάδιο του διαχωρισμού πυκνότητας που περιέχει επιπλέοντα πλαστικά σωματίδια. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται υαλοβάμβακας, πολυκαρβονική μεμβράνη, χαρτί, νιτροκυτταρίνη και φίλτρα πυριτίου ειδικά σχεδιασμένα για τη φασματοσκοπία FT-IR. Το μέγεθος των πόρων κυμαίνεται από 1 έως 1,6 μm. Φίλτρα με μέγεθος πόρων 2 μm χρησιμοποιούνται σπάνια. Μερικές φορές, το διάλυμα εργασίας με επιπλέοντα σωματίδια διέρχεται από λεπτό πλέγμα.

Η διήθηση χρησιμοποιείται επίσης για την απομόνωση μικροπλαστικών από δείγματα νερού μαζικής δειγματοληψίας. Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται φίλτρα με μήκος έως 15 cm διάμετρο και με μέγεθος πόρων έως 47 μm.

Είναι δυνατή η συλλογή μικροπλαστικών σωματιδίων από την επιφάνεια του διαλύματος με λαβίδα. Για το διαχωρισμό των μεγάλων σωματιδίων, τα δείγματα πριν από τη διήθηση μπορούν να περάσουν από κόσκινο με μέγεθος πόρων 500 μm. Σημαντικό σημείο είναι η διαδικασία μετακίνησης των επιπλεόντων σωματιδίων από την επιφάνεια του διαλύματος στα φίλτρα και τα κόσκινα. Για την αποφυγή



Εικόνα 12: Φίλτρα διήθησης

τυχόν απώλειας αναλύτη που σχετίζεται με την προσκόλληση των σωματιδίων στα τοιχώματα του εργαστηριακού σκεύους, συνιστάται να πλένονται διαδοχικά τα τοιχώματα των γυάλινων σκευών απευθείας στο φίλτρο [26].

Κοσκινίσματα.

Τα μικροπλαστικά μπορούν να απομονωθούν από δείγματα με κοσκίνισμα των τελευταίων μέσω κόσκινων με διαφορετικά μεγέθη ματιών. Το υλικό στα κόσκινα διαχωρίζεται περαιτέρω και το υπόλοιπο που έχει περάσει από το κόσκινο απορρίπτεται. Η χρήση κόσκινων με πόρους διαφόρων μεγεθών επιτρέπει το διαχωρισμό των μικροπλαστικών σωματιδίων σε διάφορες ομάδες μεγέθους. Ένας καταρράκτης από διάφορα κόσκινα (ένα έως έξι) με μεγέθη από 0,038 έως 4,75 mm χρησιμοποιείται συνήθως. Το υλικό του κόσκινου είναι συνήθως ανοξείδωτος χάλυβας ή χαλκός.



Εικόνα 13:Κόσκινα διαφόρων μεγεθών

Τα φίλτρα και το κοσκινισμένο υλικό ξηραίνονται σε θερμοκρασία δωματίου ή σε ξηραντήρες. Η θερμοκρασία στους ξηραντήρες ποικίλλει πολύ στις διάφορες μεθόδους (από 60 έως 90°C), αλλά το πρότυπο ορίζει τις συνθήκες για προετοιμασία των πλαστικών δειγμάτων πριν από τη δοκιμή και συνιστά να μην υπερβαίνει τη θερμοκρασία των 50 ± 2°C, με χρόνο ξήρανσης 24 ωρών με επακόλουθη μεταφορά της θερμοκρασίας σε κανονικές συνθήκες σε ξηραντήρα. Αυτό θεσπίζεται για την αποφυγή αλλαγών στη σύνθεση και των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των πλαστικών [26].

Πέψη οργανικής ύλης.

Η ποσότητα φυσικής οργανικής ύλης στα δείγματα, όπως φύκια, ζωοπλαγκτόν, φυτοπλαγκτόν, καθώς και υπολείμματα μικρών οργανισμών και κελύφη, μπορεί να υπερβαίνει σημαντικά τον όγκο του δείγματος που αναλύεται. Τα πλαστικά σωματίδια είναι πιθανό να προσμείγονται από ορισμένα είδη καφέ άλγης και βακτηριακές μεμβράνες, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει σφάλματα κατά τον προσδιορισμό ορισμένων φυσικών χαρακτηριστικών, όπως η ειδική πυκνότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, πραγματοποιείται πλύση των πλαστικών σωματιδίων με υπερήχους σε αποσταγμένο ή απιονισμένο νερό, προκειμένου να απομακρυνθούν τυχόν επιφανειακές μολύνσεις από άμμο ή ιλύ.

Είναι κρίσιμο να εφαρμόζονται κατάλληλες τεχνικές αναγνώρισης για την ανάλυση των διαφορετικών ομάδων μεγέθους των πλαστικών σωμάτων. Σήμερα, ευρέως χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η οπτική ανίχνευση και η αέρια χρωματογραφία πυρόλυσης σε συνδυασμό με φασματομετρία μάζας, με τις φασματομετρικές μεθόδους να παρέχουν τα πιο αξιόπιστα ποιοτικά αποτελέσματα ταυτοποίησης.

Ανάλυση δειγμάτων μικροπλαστικών

Ταυτοποίηση των μικροπλαστικών.

Η οπτική παρατήρηση (με γυμνό μάτι ή με μικροσκόπιο) και η διαλογή των συμπυκνωμένων δειγμάτων συχνά αποτελούν το αρχικό στάδιο για τον διαχωρισμό των πλαστικών από οργανικά υπολείμματα και άλλα μη πλαστικά απόβλητα, όπως το γυαλί ή η ρητίνη. Όταν η οπτική εξέταση πραγματοποιείται χωρίς τη χρήση μικροσκοπίου, η ταυτοποίηση ενός σωματιδίου ως πλαστικού γίνεται συχνά βάσει υποκειμενικών χαρακτηριστικών, όπως η λάμψη, η φωτεινότητα, το ασυνήθιστο χρώμα, το σχήμα, η δομή ή η ελαστικότητα και η σκληρότητα, που μπορεί να αξιολογηθούν με τσιμπίδα.

Μικροπλαστικά σωματίδια μεγαλύτερα από 1 mm μπορούν να ανιχνευθούν οπτικά με μικροσκόπιο σύμφωνα με ορισμένους κανόνες:

• Να μην παρουσιάζουν κυτταρική δομή ή άλλα οργανικά μορφώματα.
• Οι ίνες θα πρέπει να έχουν ομοιόμορφο χρώμα και πάχος σε όλο το μήκος τους.
• Τα σωματίδια πρέπει να έχουν καθαρό, ομοιόμορφο χρωματισμό.
• Εάν είναι διαφανή ή λευκά, τότε συνιστάται να ελέγχονται με μικροσκόπιο φθορισμού σε υψηλή μεγέθυνση.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, προτείνεται να μην θεωρούνται πλαστικά τα λευκά, διαφανή και μαύρα σωματίδια, καθώς μπορεί να παρεμβαίνουν σε βιολογικό υλικό ή άλλες ουσίες. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να υποτιμήσει την περιεκτικότητα σε μικροπλαστικά και θα πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή.

Επιπλέον, συστήνεται η χρήση μεθόδων όπως η αέρια χρωματογραφία πυρόλυσης με φασματομετρία μάζας (pyrolysis GC-MS, PyrGC-MS) και η φασματομετρία FT-IR για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων. Οι οπτικές μέθοδοι δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μεμονωμένα, αλλά σε συνδυασμό με χημικές ή φασματοσκοπικές τεχνικές, με τις τελευταίες να επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της οπτικής παρατήρησης. Για τον εντοπισμό μικροπλαστικών μικρότερων διαστάσεων, η μόνη αξιόπιστη επιλογή είναι η φασματομετρική ανάλυση, αν και αυτή η διαδικασία είναι χρονοβόρα. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου ανίχνευσης είναι ζωτικής σημασίας για την σωστή αξιολόγηση της μόλυνσης από μικροπλαστικά.

Τα μικροπλαστικά σωματίδια σε θαλάσσιο περιβάλλον μπορούν να χαρακτηριστούν βάσει διαφόρων κριτηρίων, όπως το μέγεθος, το σχήμα, η ειδική πυκνότητα, το χρώμα, η χημική τους σύνθεση και η συγκέντρωσή τους στο νερό. Συνεπώς, η ανάλυση των μικροπλαστικών διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες: τη μορφολογική περιγραφή, που περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των σωματιδίων, και την ποσοτική ανάλυση, που εστιάζει στον προσδιορισμό της χημικής σύνθεσης των πολυμερών.

Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά.

Το μέγεθος των σωματιδίων αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό, εκτός από τη χημική τους σύνθεση. Το μέγεθος ενός σωματιδίου καθορίζεται συνήθως από τη μεγαλύτερη διάστασή του. Η μέτρησή του μπορεί να γίνει άμεσα, με χρήση οργάνων όπως μικροσκόπιο διαβαθμισμένο ή ψηφιακό μικροσκόπιο, ή έμμεσα, μέσω διαχωρισμού με κόσκινα που επιτρέπουν τον διαχωρισμό ενός δείγματος σε ομάδες μεγέθους, ή μέσω συνδυασμού αυτών των μεθόδων. Οι κατηγορίες μεγέθους που αποδίδονται κατά την ανάλυση εξαρτώνται άμεσα από τις τεχνικές δειγματοληψίας και διαχωρισμού που

χρησιμοποιούνται, καθώς και από τα ονομαστικά μεγέθη των φίλτρων ή των κόσκινων που εμπλέκονται.

Τα μικροπλαστικά σωματίδια διαφέρουν ως προς το σχήμα: μπορούν να είναι σφαιρικά, ακανόνιστα ή μακρόστενα. Το σχήμα τους επηρεάζεται από τον βαθμό καταστροφής και τον χρόνο παραμονής τους στο περιβάλλον. Για τον μορφολογικό χαρακτηρισμό της επιφάνειας των πλαστικών, χρησιμοποιείται η σάρωση ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (SEM) και οι παραλλαγές της, αν και η τεχνική αυτή δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί επαρκώς για τον προσδιορισμό της παραμονής των σωματιδίων στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Ο αριθμός των κατηγοριών που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των μικροπλαστικών εξαρτάται από τους σκοπούς της μελέτης και μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Η μορφολογική περιγραφή βασίζεται στην προέλευση, τον τύπο, το σχήμα, το χρώμα και το βαθμό αποικοδόμησης των σωματιδίων. Οι βάσεις αναφοράς που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων που βρίσκονται στη θάλασσα είναι σημαντικές για την ταυτοποίησή τους.

Το χρώμα αποτελεί ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά κατά την οπτική αναγνώριση. Τα πιο συνηθισμένα χρώματα είναι το λευκό ή κοντά σε αυτό, όπως το ξεθωριασμένο κίτρινο ή το κρεμ. Το χρώμα των σωματιδίων μπορεί να δημιουργήσει αβεβαιότητες, ειδικά όταν το πλαστικό καλύπτεται από βιολογικά υπολείμματα. Τα φωτεινά χρώματα τείνουν να επιλέγονται ως πλαστικά, ενώ τα ξεθωριασμένα χρώματα μπορούν να παραβλεφθούν, προκαλώντας μια μεροληπτική εκτίμηση στην ανάλυση. Το χρώμα επίσης χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του βαθμού φωτοαποικοδόμησης, του χρόνου παραμονής στην επιφάνεια του νερού και της γενικής ρύπανσης και διάβρωσης.

Έμμεσοι δείκτες όπως η ειδική πυκνότητα ή το χρώμα μπορούν να βοηθήσουν στην κατά προσέγγιση αναγνώριση του πολυμερούς που αποτελεί το σωματίδιο. Παρ' όλα αυτά, η τελική ταυτοποίηση απαιτεί χημική ανάλυση. Για να εκτιμηθεί ο τύπος του πολυμερούς με προσεγγίσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υποκειμενικά χαρακτηριστικά, όπως το χρώμα της φλόγας ή η οσμή κατά την καύση.

Παρόλο που τα πλαστικά ανήκουν στα άμορφα υλικά, πολλά έχουν μια μερική κρυσταλλική δομή και μπορούν να διακριθούν από το σημείο τήξης τους, το οποίο μπορεί να προσδιοριστεί με διαφορική θερμιδομετρία σάρωσης. Για τον προσδιορισμό της ειδικής πυκνότητας, προτείνονται τεχνικές όπως αυτές των Kolb και Kolb, η μέθοδος τιτλομέτρησης για πυκνότητα μη κυτταρικών πλαστικών, ή η μέθοδος επίπλευσης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτές οι τεχνικές προορίζονται μόνο για την ανάλυση μη κυτταρικών πλαστικών.

Η χρήση έμμεσων χαρακτηριστικών όπως η πυκνότητα, το χρώμα ή το σημείο τήξης μπορεί να είναι αποτελεσματική για γρήγορη και οικονομική προσδιοριστική ταξινόμηση του τύπου του πολυμερούς, δεδομένου ότι αυτά τα χαρακτηριστικά περιγράφονται από τον κατασκευαστή. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση δεν είναι αξιόπιστη για θραύσματα πλαστικών, όπου το σχήμα και το χρώμα ποικίλλουν ευρύτατα, κυρίως λόγω κατακερματισμού και διάβρωσης, και δεν μπορούν να συσχετιστούν με ακρίβεια με συγκεκριμένο τύπο πλαστικού.

Προσδιορισμός της χημικής σύνθεσης των μικροπλαστικών και του τύπου του πολυμερούς.

Για τον προσδιορισμό των μικροπλαστικών χρησιμοποιούνται διάφορες αναλυτικές τεχνικές, όπως η πυρόλυση GC-MS, η φασματοσκοπία Raman, η ηλεκτρονική μικροσκοπία SEM και ορισμένες παραλλαγές αυτών, καθώς και η φασματομετρία Fourier IR.

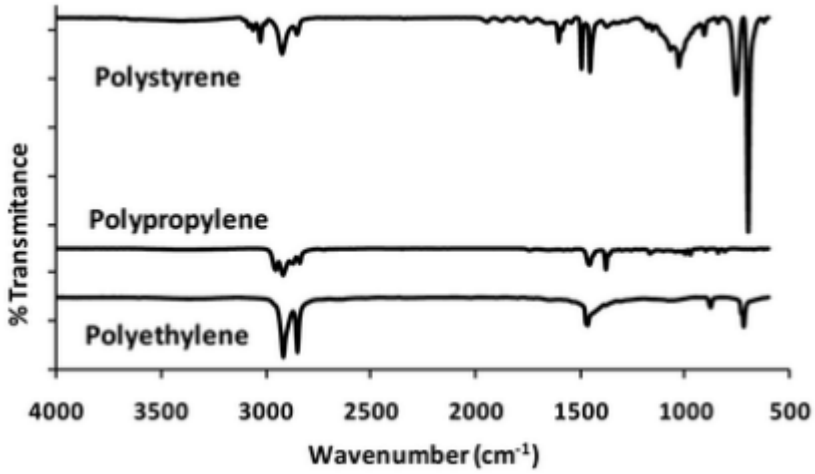
Η μέθοδος GC-MS πυρόλυσης αξιολογεί τη χημική σύσταση των μικροπλαστικών σωματιδίων μέσω της ανάλυσης των αερίων προϊόντων που παράγονται κατά τη θερμική τους διάσπαση. Ένα πολυμερές ταυτοποιείται από τα χαρακτηριστικά πυρογραφήματα που παράγονται, συγκρίνοντάς τα με πυρογραφήματα αναφοράς γνωστών καθαρών πολυμερών. Η GC-MS πυρόλυσης επιτρέπει τον προσδιορισμό των τύπων των πολυμερών με επαρκή ακρίβεια. Ωστόσο, στην ανάλυση μικροπλαστικών, έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα: τα σωματίδια πρέπει να τοποθετούνται χειροκίνητα σε σωλήνες πυρόλυσης. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος είναι εφαρμόσιμη κυρίως για μεγαλύτερα σωματίδια και επιβάλλει περιορισμούς στο ελάχιστο μέγεθος των μικροπλαστικών που μπορούν να αναλυθούν. Επιπλέον, κάθε δείγμα μπορεί να αναλυθεί μόνο ένας σωματίδιο σε κάθε κύκλο, καθιστώντας αυτήν τη μέθοδο ανεπαρκή για την επεξεργασία μεγάλου αριθμού δειγμάτων.

Η φασματοσκοπία Raman αποτελεί μια αποτελεσματική τεχνική χημικής ανάλυσης. Αντίθετα με τη φασματομετρία IR, η Raman βασίζεται στην ανελαστική σκέδαση του φωτός από μόρια μιας ουσίας, και το σκεδαζόμενο φως εμφανίζει μήκος κύματος διαφορετικό από το διεγερτικό φως. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής περιλαμβάνουν την έλλειψη ανάγκης προετοιμασίας δείγματος, την δυνατότητα άμεσης ανάλυσης σε υγρά περιβάλλοντα όπως το νερό, και τη χρήση γυάλινων ή χαλαζιακών κυψελών. Συνδυάζοντας τη μέθοδο αυτή με μικροσκοπική ανάλυση, μπορούμε να αποκτήσουμε ένα πιο ισχυρό εργαλείο για την εξέταση των μικροπλαστικών. Η μικροφασματοσκοπία Raman επιτρέπει τον προσδιορισμό του τύπου του πολυμερούς ακόμα και σε πολύ μικρά σωματίδια, μεγέθους μέχρι μερικών μικρομέτρων.

Επί του παρόντος, η φασματομετρία IR είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος και χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση των μικροπλαστικών. Η μέθοδος αυτή συγκρίνει το φάσμα απορρόφησης IR ή τη μετάδοση ενός δείγματος με τα φάσματα γνωστών συνθετικών ουσιών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διάφορα φασματομετρικά όργανα: ένα φασματόμετρο υπέρυθρου, ένα φασματόμετρο IR Fourier, και ένα φασματόμετρο υπέρυθρου για λειτουργία στο εγγύς υπέρυθρο. Μπορούν να προσδιορίσουν ένα ευρύ φάσμα πολυμερών, π.χ., PP, PE και πολυεστέρα. Ωστόσο, για τα μικροπλαστικά σωματίδια που μελετώνται σε ένα συμβατικό φασματόμετρο IR, προκύπτουν τεχνικές δυσκολίες λόγω του μεγέθους των μικρών σωματιδίων. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση micro-IR Fourier φασματόμετρου, καθώς και με τη μέτρηση των φασμάτων σε συνθήκες εξασθενημένης ολικής ανάκλασης (ATR). Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να επιτυγχάνονται με την αγορά πρόσθετου εξοπλισμού: ένα ειδικό μικροσκόπιο ή κυψέλες ATR-FTIR που διατίθενται για πολλά σύγχρονα φασματόμετρα FTIR. Ο συνδυασμός αυτών των δύο προσεγγίσεων (αναλύσεις micro-ATR και FT-IR), εκτός από τη μέτρηση των φασμάτων των σωματιδίων, καθιστά δυνατή την προσθήκη

οπτικοποίησης και χαρτογράφησης των δειγμάτων και την αυτοματοποίηση του προσδιορισμού του τύπου πολυμερούς.

Ωστόσο, η διαδικασία αυτή είναι πολύ δαπανηρή, χρονοβόρα και απαιτεί εξειδικευμένους ειδικούς- ωστόσο, είναι η καταλληλότερη για τον προσδιορισμό των



Εικόνα 14: ATR-FTIR φάσματα μικροπλαστικών που ανακτήθηκαν απο δείγματα σε επιφανειακά νερά στις ακτές της νότιας Κασπίας θάλασσας (Mataji et al., 2020 [27])

μικροπλαστικών σωματιδίων και παρουσιάζει υψηλή αξιοπιστία και επαναληψιμότητα. Σε σχέση με την εργατικότητα των φασματομετρικών αναλυτών, χρησιμοποιούνται συχνά για να προσδιορίζουν όχι όλο το υλικό που λαμβάνεται από το δείγμα, αλλά μόνο κάποιο κλάσμα του δείγματος.

Για την αύξηση της αποτελεσματικότητας των προγραμμάτων παρακολούθησης, θα πρέπει να υπενθυμίζεται ότι η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την επιλογή και τον προσδιορισμό μικροπλαστικών είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση αυτού του τύπου μόλυνσης. Κατά το σχεδιασμό μελετών παρακολούθησης, είναι σημαντικό, αν είναι δυνατόν, να τηρούνται οι αυστηρότερες απαιτήσεις για τη δειγματοληψία, την προετοιμασία και την ανάλυση των δειγμάτων, διατηρώντας παράλληλα τη μέγιστη δυνατή ποσότητα πληροφοριών για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από διαφορετικές ερευνητικές ομάδες, προκειμένου να εκτιμηθεί το μέγεθος του προβλήματος σε παγκόσμια κλίμακα. Κατά την ανάπτυξη νέων μεθοδολογικών προσεγγίσεων, πρέπει να θυμόμαστε ότι τα πλαστικά είναι βιομηχανικά υλικά των οποίων οι μέθοδοι δοκιμής είναι ήδη ευρέως γνωστές. Οι μέθοδοι αυτές, με ορισμένες τροποποιήσεις, μπορούν να βελτιωθούν και να εφαρμοστούν για την ανάλυση των μικροπλαστικών. Ορισμένα πρότυπα περιγράφουν τεχνικές προετοιμασίας δειγμάτων που μπορούν επίσης να προσαρμοστούν για χρήση σε αυτόν τον τομέα [26].

Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων εξοπλισμών που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια των δειγματοληψιών σε ύδατα και ιζήματα

Πεδίο δειγματοληψίας : Ύδατα			
Εξοπλισμός	**Πλεονεκτήματα**	**Περιορισμοί και Μειονεκτήματα**	**Παρατηρήσεις**
Δίχτυα manta	-Εύχρηστος εξοπλισμός -Καλύπτει μεγάλες ποσότητες δειγμάτων ή περιοχές κατά τη δειγματοληψία -Συλλέγεται μεγάλος αριθμός μικροπλαστικών για περαιτέρω δοκιμές οπότε τα αποτελέσματα θεωρούνται αξιόπιστα. - Η χρήση ενός μετρητή ροής είναι δυνατή λόγω των πλευρικών φτερών που διαθέτει το δίχτυ manta. Ένας μετρητής ροής καταγράφει τον όγκο του φιλτραρισμένου νερού και έτσι επιτρέπει την έκφραση των αποτελεσμάτων ανά όγκο νερού (δυνατότητα για σύγκριση μεταξύ δειγμάτων και τοποθεσιών με κανονικοποίηση.)	-Ακριβός εξοπλισμός -Απαιτείται σκάφος -Πιθανή επιμόλυνση από τα σχοινιά ρυμούλκησης των σκαφών ή λόγω φθοράς των διχτυών -Το κατώτερο όριο ανίχνευσης είναι συνήθως 333μm (η πλειονότητα των μελετών έδειξε άνοιγμα ματιών από 0,30 έως 0,39 mm). -Πιθανή απώλεια μικροπλαστικών, λόγω ταχείας διήθησης, ιδιαίτερα εκείνων με μέγεθος μικρότερο από το μέγεθος πλέγματος των εργαλείων δειγματοληψίας.	-Δειγματοληψία μειωμένου όγκου. -Τα δίχτυα manta που χρησιμοποιούνται πιο συχνά έχουν μέγεθος ματιών πλέγματος περίπου 300μm και μήκος 3-4 μ. -Το ορθογώνιο άνοιγμα της τράτας έχει συνήθως ύψος 16 cm και πλάτος 61cm. -Η ταχύτητα τράτας συνιστάται να κυμαίνεται μεταξύ 2-3 κόμβους, αλλά εξαρτάται από το ύψος του κύματος, την ταχύτητα του ανέμου και τα θαλάσσια ρεύματα. -Ο χρόνος τράτας συνιστάται να είναι περίπου 30 λεπτά. -Οι τράτες manta χρησιμοποιούνται συνήθως για δειγματοληψία σε βάθος 0-0,5m. -Για να συμπεριληφθούν μικροπλαστικά με μικρότερο μέγεθος από το καθαρό μέγεθος των ματιών προτείνεται η άντληση νερού ώστε να συμπληρώσει την τράτα.
Δίχτυα neuston	-Εύχρηστος εξοπλισμός. -Καλύπτει μεγάλες ποσότητες δειγμάτων ή περιοχές κατά τη δειγματοληψία. -Συλλέγεται μεγάλος αριθμός μικροπλαστικών για περαιτέρω δοκιμές οπότε τα αποτελέσματα θεωρούνται αξιόπιστα	-Ακριβός εξοπλισμός. -Απαιτείται σκάφος. -Πιθανή επιμόλυνση από τα σχοινιά ρυμούλκησης των σκαφών ή λόγω φθοράς των διχτυών. -Το κατώτερο όριο ανίχνευσης είναι συνήθως 333 μm (η πλειονότητα των μελετών έδειξε άνοιγμα ματιών από 0,30 έως 0,39 mm). -Πιθανή απώλεια μικροπλαστικών, λόγω ταχείας διήθησης, ιδιαίτερα εκείνων με μέγεθος μικρότερο από το μέγεθος πλέγματος των εργαλείων δειγματοληψίας.	-Δειγματοληψία μειωμένου όγκου. -Το μέγεθος των ματιών για τα δίχτυα είναι συνήθως 300-390 μm. -Χρησιμοποιούνται συνήθως για δειγματοληψία σε βάθος 0–0,5 m. -Το καθαρό άνοιγμα για τα ορθογώνια ανοίγματα των διχτυών neuston (επιφάνεια της θάλασσας κυμαίνονταν από 0,03 έως 2,0 m2 (Μια συνηθισμένη διάσταση είναι 0,52x 0,36 m). -Τα περισσότερα δίχτυα να έχουν μήκος 3,0 έως 4,5 m. -Ο χρόνος δειγματοληψίας είναι περίπου 15-20 λεπτά. -Για να συμπεριληφθούν μικροπλαστικά με μικρότερο μέγεθος από το καθαρό μέγεθος των ματιών, προτείνεται η άντληση χύδην νερού ώστε να συμπληρώσει τη δειγματοληψία με δίχτυα neuston.
Δίχτυα πλαγκτόν	-Εύχρηστος εξοπλισμός. -Γρήγορη χρήση. -Δείγματα μεσαίων όγκων νερού. -Χαμηλότερο όριο ανίχνευσης 100 μm (λόγω των μικρότερων ανοιγμάτων ματιών)	-Ακριβός εξοπλισμός. -Απαιτείται σκάφος. -Η στατική δειγματοληψία απαιτεί ροή νερού. -Μπορεί να φράξει ή να σπάσει. -Δειγματοληψία χαμηλότερων όγκων νερού από τη τράτα Manta. -Πιθανή διασταυρούμενη επιμόλυνση λόγω του πλαστικού διχτυού. -Πιθανή απώλεια μικροπλαστικών, λόγω ταχείας διήθησης, ιδιαίτερα εκείνων με μέγεθος μικρότερο από το	-Δειγματοληψία μειωμένου όγκου. -Τα δίχτυα πλαγκτόν χρησιμοποιούνται συνήθως για δειγματοληψία στη στήλη νερού, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και για επιφανειακά ύδατα. -Χρόνος δειγματοληψίας 30 λεπτά (για δίχτυ πλαγκτόν με άνοιγμα ματιών 153 μm).

		μέγεθος πλέγματος των εργαλείων δειγματοληψίας.	
Αντλία Εξαγωγής	-Ευκολία χειρισμού (χρήση και μεταφορά) και φτηνή κατασκευή. -Καλύπτει μεγάλες ποσότητες δειγμάτων κατά τη δειγματοληψία. -Η αντλία και τα φίλτρα αποτελούν κλειστό σύστημα και συνεπώς η επιμόλυνση των δειγμάτων είναι πολύ μικρή κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. -Μειώνει το χρόνο δειγματοληψίας. -Επιτρέπει την επιλογή διάφορων μεγεθών ματιών, για τα χρησιμοποιούμενα κόσκινα -Επί τόπου κλασματοποίηση των μικροπλαστικών. -Συλλέγει ένα ευρύ φάσμα μικροπλαστικών.	-Απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό. -Απαιτεί κατανάλωση ενέργειας. -Τα μαζικά δείγματα τείνουν να περιέχουν μεγάλες ποσότητες ανεπιθύμητων υλικών, αυξάνοντας μόνιμα το φορτίο χειρισμού. -Πιθανή επιμόλυνση από τα πλαστικά υλικά κατασκευής τμημάτων της συσκευής. -Κάποιες διατάξεις δειγματοληψίας μπορεί να παρουσιάζουν δυσκολία μεταφοράς μεταξύ των τοποθεσιών δειγματοληψίας.	-Άντληση νερού από τη ροή λυμάτων απευθείας σε μια στοίβα κόσκινων με διάφορα μεγέθη ματιών που κυμαίνονται από 20 έως 5000 μm. -Σε κάποια από τις αντλίες τα αφαιρούμενα ατσάλινα κόσκινα είχαν μεγέθη 500, 190, 100 και 25 μm &διάμετρο 12 cm.
Κόσκινα	-Δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό, ούτε σκάφος. -Εύκολη συλλογή δειγμάτων. -Καλύπτει μεγάλες ποσότητες δειγμάτων κατά τη δειγματοληψία.	-Επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία. -Χειροκίνητη συνήθως μεταφορά νερού με κουβάδες	-Δειγματοληψία μειωμένου όγκου. -Πολλές φορές χρησιμοποιούνται συστοιχίες κόσκινων με διάφορα ανοίγματα ματιών.
Τυχαία Δείγματα	-Εύκολη στην εκτέλεση δειγματοληψία. -Δείγμα ενός χρόνου, με λιγότερη έκθεση σε περιβαλλοντική επιμόλυνση	-Τα δείγματα ενδέχεται να μην είναι αντιπροσωπευτικά.	-Μαζική δειγματοληψία. Είναι κατάλληλη όταν τα μικροπλαστικά δεν μπορούν να αναγνωριστούν εύκολα οπτικά. -Είναι μεμονωμένα δείγματα που λαμβάνονται ταυτόχρονα. -Τα δοχεία δειγματοληψίας περιλαμβάνουν χαλύβδινους κουβάδες, πλαστικά δοχεία, γυάλινα δοχεία.
Πεδίο Δειγματοληψίας: Ιζήματα			
Μέθοδος	**Πλεονεκτήματα**	**Περιορισμοί και Μειονεκτήματα**	**Παρατηρήσεις**
Επιλεκτική δειγματοληψία ιζημάτων παραλίας	-Απλή μέθοδος. -Δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό	-Τα λιγότερο εμφανή μικροπλαστικά, που δεν διαθέτουν χαρακτηριστικά σχήματα (π.χ. ακανόνιστα, τραχιά) παραβλέπονται εύκολα, ιδιαίτερα όταν αναμιγνύονται με άλλα θραύσματα. -Χρονοβόρα διαδικασία.	-Κατάλληλη για εύρος μεγεθών των μικροπλαστικών, 1−5 mm διάμετρο. -Η συλλογή μικροπλαστικών κόκκων και θραυσμάτων στις παραλίες περιλαμβάνει άμεση δειγματοληψία με λαβίδα.
Μειωμένου όγκου δειγματοληψία ιζημάτων παραλίας	-Απλή μέθοδος. Τα δείγματα κοσκινίζονται επί τόπου στην παραλία. -Δεν απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό -Καλύπτει μεγάλες ποσότητες δειγμάτων ή περιοχές κατά τη δειγματοληψία	-Χρονοβόρα διαδικασία. -Τα λιγότερο εμφανή μικροπλαστικά, που δεν διαθέτουν χαρακτηριστικά σχήματα (π.χ. ακανόνιστα, τραχιά) παραβλέπονται εύκολα.	
Χτένα παραλιών	-Θεωρείται η ευκολότερη από τις διαθέσιμες πρακτικές. -Έχει σχετικά χαμηλό κόστος. -Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία χτενίσματος (σάρωσης) της παραλίας σε	Συνήθως εντοπίζονται και συλλέγονται τα μεγαλύτερου μεγέθους μικροπλαστικά. -Τα λιγότερο εμφανή μικροπλαστικά, που δεν διαθέτουν χαρακτηριστικά	

	τακτική βάση, μπορεί η συσσώρευση μικροπλαστικών να παρακολουθείται με την πάροδο του χρόνου.	σχήματα (π.χ. ακανόνιστα, τραχιά) παραβλέπονται εύκολα.	
Μαζικά δείγματα ιζημάτων παραλίας	-Εύκολη στην εφαρμογή μέθοδος δειγματοληψίας. - Επιτρέπει τη συλλογή μεγάλων όγκων δειγμάτων. - Λιγότερο χρονοβόρα δειγματοληψία.	-Υπάρχουν πολλές παραλλαγές με βάση την τοποθεσία (ζώνη), το εμβαδόν της τοποθεσίας, καθώς και το βάθος δειγματοληψίας. -Τα μαζικά δείγματα τείνουν να περιέχουν μεγάλες ποσότητες ανεπιθύμητων υλικών, αυξάνοντας έτσι το φορτίο χειρισμού. -Επιτρέπει αναλογικά μόνο μία σχετικά μικρή ποσότητα δείγματος να συλλεχθεί, κάτι που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος.	Τα μαζικά δείγματα είναι κατάλληλα όταν τα μικροπλαστικά δεν μπορούν να αναγνωριστούν εύκολα οπτικά. -Η τοποθεσία δειγματοληψίας μπορεί να είναι η υψηλή παλιρροιακή γραμμή, η χαμηλή παλιρροιακή γραμμή ή ολόκληρη η παλιρροιακή ζώνη. -Το βάθος κυμαίνεται από 1 έως και 5 cm, ενώ κάποιες μελέτες κάνουν λόγο για 15 και 20 cm από την επιφάνεια. Συνήθως λαμβάνεται το κορυφαίο στρώμα ιζήματος (3-6 cm). Επικρατέστερα τα 5 cm. -Υπάρχει μεγάλη ποικιλία στον τρόπο που λαμβάνονται τα δείγματα. Έτσι χρησιμοποιούνται ανοξείδωτα κουτάλια, σπάτουλες, φτυάρια και μυστριά. -Για την εκτέλεση της δειγματοληψίας είτε δοκιμάζονται και εφαρμόζονται πολλά τέτοια τετράγωνα, ομοιόμορφα διασκορπισμένα στην ακτογραμμή, ή επιλέγονται μερικά αντιπροσωπευτικά τετραγωνικά. -Συνιστώνται 11 δείγματα ανά 100 μέτρα παραλίας ώστε η εκτίμηση της συγκέντρωσης των μικροπλαστικών να ανέρθει σε επίπεδο αξιοπιστίας μέτρησης στο 90%. -Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία σέσουλα από ανοξείδωτο ατσάλι (βάθος 10 cm) ώστε να γεμίσει ένα γυάλινο δοχείο Kilner, χωρητικότητας 1L.
Συλλογή δειγμάτων από ιζήματα βυθού	-Εύχρηστη μέθοδος δειγματοληψίας. -Μπορεί να επιτρέψει επαναλήψεις κατά τη δειγματοληψία. -Καλύπτει σχετικά μεγάλες ποσότητες δειγμάτων κατά τη δειγματοληψία	Ακριβός εξοπλισμός. -Απαιτείται σκάφος -Υπάρχουν παραλλαγές σχετικά με την τοποθεσία και το βάθος δειγματοληψίας. -Τα μαζικά δείγματα τείνουν να περιέχουν μεγάλες ποσότητες ανεπιθύμητων υλικών, αυξάνοντας έτσι το φορτίο χειρισμού. -Η δειγματοληψία μπορεί να διαταράξει την επιφάνεια των ιζημάτων του βυθού. -Επιτρέπει αναλογικά μόνο μία σχετικά μικρή ποσότητα δείγματος να συλλεχθεί, κάτι που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος.	-Μαζική δειγματοληψία. -Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι δειγματολήπτης αρπαγέας, ή πυρηνολήπτης. -Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί το βυθοσκόπιο Ekman (με ποσότητα δείγματος 3 kg).

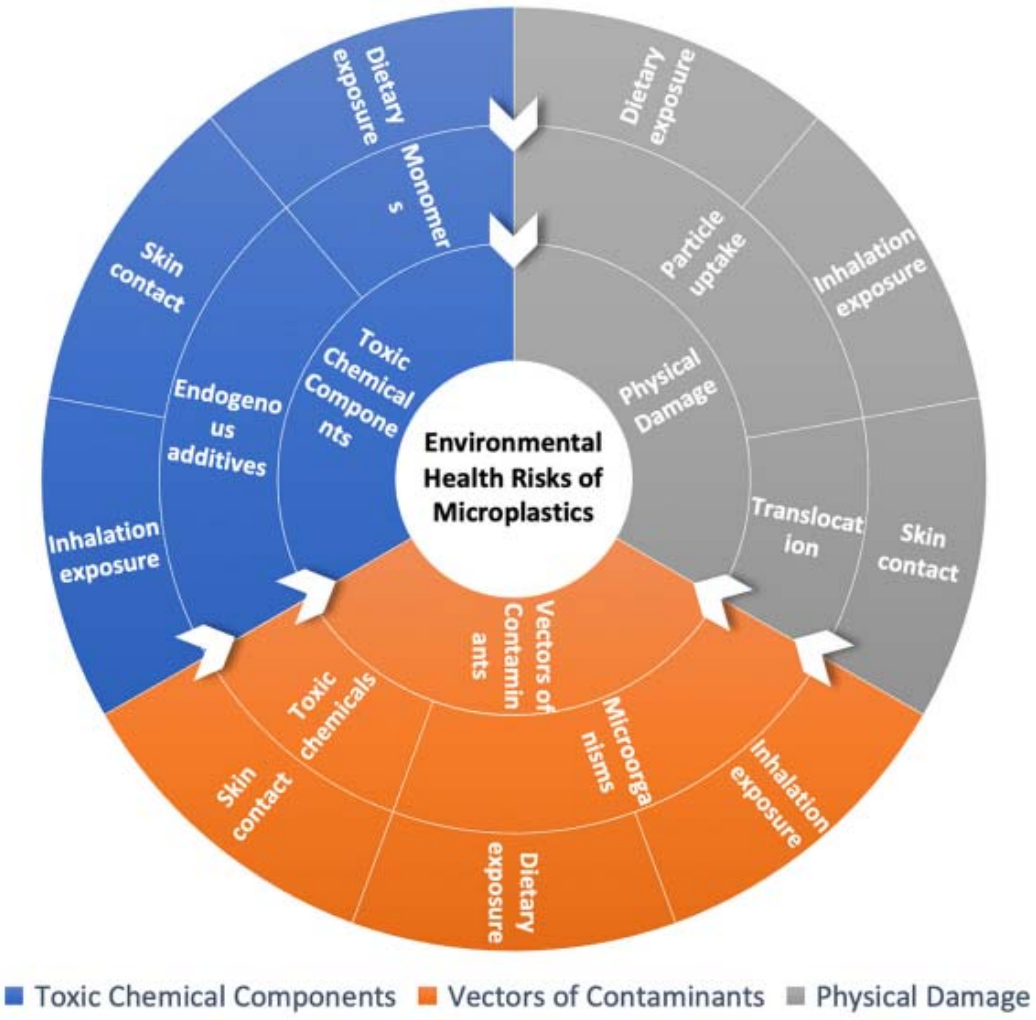
Οδοί έκθεσης μικροπλαστικών στο ανθρώπινο σώμα

Σύγχρονες μελέτες έχουν τεκμηριώσει τους πιθανούς χημικούς, μικροβιακούς και σωματιδιακούς κινδύνους των μικροπλαστικών, που είναι πανταχού παρόντα στα

περισσότερα οικοσυστήματα, οδηγώντας σε αναπόφευκτη έκθεση του ανθρώπου. Οι τρέχουσες γνώσεις σχετικά με την κλίμακα των επιπέδων έκθεσης των ανθρώπων στα μικροπλαστικά είναι φτωχή και υπάρχουν υπάρχει ανάγκη για ενδελεχή κατανόηση των συγκεντρώσεων έκθεσης, των φυσικοχημικών ιδιοτήτων, των ρυπαντών που προκαλούν ανησυχία, των εμπλεκόμενων ιστών και της προσωπικής ευαισθησίας των μικροπλαστικών. Χρόνια έκθεση σε μικροπλαστικά μπορεί να είναι ακόμη και να έχει σημαντική ανησυχία, δεδομένης της δυνητικής συσσωρευτικής τους επίδραση με τρόπο εξαρτώμενο από τη δόση.

Υπάρχουν τρεις κύριες οδοί έκθεσης του ανθρώπου στα μικροπλαστικά (Εικ. 15):

- έκθεση μέσω της διατροφής
- έκθεση μέσω της εισπνοής
- επαφή με το δέρμα.



Εικόνα 15: Απλοποιημένο σχήμα που απεικονίζει τους πιθανούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία από τη ρύπανση με μικροπλαστικά. Οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι για την υγεία από τα μικροπλαστικά αντικατοπτρίζονται στο τοξικές χημικές ουσίες, τους φορείς των ρύπων και τις φυσικές βλάβες, οι οποίες ενδέχεται να επιφέρουν δυσμενείς συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία μέσω της διατροφής, της εισπνοής και των οδών έκθεσης μέσω του δέρματος.[28]

Διατροφική οδός έκθεσης

Καθώς αυξάνεται η διαπίστωση σχετικά με την παρουσία μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα σε παγκόσμιο επίπεδο, έχει ανιχνευθεί η μόλυνση από

μικροπλαστικά σε πολλά είδη θαλάσσιων οργανισμών, γεγονός που μπορεί να αποτελεί σοβαρό κίνδυνο για τους καταναλωτές. Συχνά, τα θαλάσσια προϊόντα καταναλώνονται ολόκληρα, συμπεριλαμβανομένων των γαστρεντερικών οργάνων και των βράγχων, περιοχές που είναι γνωστό ότι συγκεντρώνουν μικροπλαστικά. Επιπλέον, οι Pfaller και συνεργάτες [29] απέδειξαν ότι η οσμή από πλαστικά απορρίμματα μπορεί να ενεργοποιεί την αναζήτηση τροφής στις θαλάσσιες χελώνες, υποδηλώνοντας ότι η έλξη των μικροπλαστικών στα θαλάσσια ζώα οφείλεται όχι μόνο στην εξωτερική τους εμφάνιση αλλά και στη μυρωδιά τους [28].

Τα μικροπλαστικά έχουν ανιχνευθεί και στο επιτραπέζιο αλάτι που προέρχεται από θάλασσες, λίμνες, πηγάδια και αλατόπετρες σε διάφορες χώρες [22]. Επειδή το αλάτι αποτελεί βασικό προϊόν στη διατροφή, η μόλυνση από μικροπλαστικά αποτελεί σοβαρή απειλή για τη δημόσια υγεία. Οι Lee και συνεργάτες [30] διαπίστωσαν ότι το 94% του εμπορικού επιτραπέζιου αλατιού περιείχε μικροπλαστικά, με τους τύπους PET, PP και PE να είναι οι πιο συνηθισμένοι. Έτσι, οι άνθρωποι ενδέχεται να καταναλώνουν εκατοντάδες μικροπλαστικά στοιχεία μέσω της καθημερινής κατανάλωσης αλατιού, καθιστώντας το μια μακροπρόθεσμη οδό έκθεσης [28].

Πολλές μελέτες έχουν καταδείξει την παρουσία μικροπλαστικών στο πόσιμο νερό, τόσο στη βρύση όσο και σε εμφιαλωμένα προϊόντα, καθώς και σε υπόγεια ύδατα. Για παράδειγμα, οι Schymanski και συνεργάτες [31] εξέτασαν δείγματα νερού από διάφορα δοχεία και διαπίστωσαν ότι τόσο τα πλαστικά όσο και τα γυάλινα μπουκάλια περιείχαν μικροπλαστικά. Οι εισροές μικροπλαστικών στα γλυκά νερά προέρχονται κυρίως από επιφανειακή απορροή και απόβλητα λυμάτων. Αν και οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού μπορούν να περιορίσουν την είσοδο μικροπλαστικών στο πόσιμο νερό, η τριβή από τον πλαστικό εξοπλισμό κατά τη διαδικασία καθαρισμού και διανομής μπορεί να συμβάλει στη μόλυνση. Υπάρχουν ακόμη διαφωνίες σχετικά με το αν η μόλυνση προέρχεται και από εργαστηριακές διαδικασίες [28].

Τα φυτά εκτίθενται επίσης σε μικροπλαστικά μέσω της χρήσης οργανικών λιπασμάτων, ιλύος, πλαστικών απορριμμάτων, λυμάτων και άλλων πλαστικών υλικών που εφαρμόζονται στο έδαφος, με αποτέλεσμα να συσσωρεύουν μικροπλαστικά μέσω επιφανειακής απορροής και αερολύματος. Υπολογίζεται ότι οι άνθρωποι μπορεί να καταναλώνουν καθημερινά περίπου 80 γραμμάρια μικροπλαστικών μέσω βρώσιμων φυτών. Μελέτες, όπως εκείνη των Sun και συνεργατών [32], έδειξαν ότι τα πλαστικά συσσωρεύονται στο Arabidopsis thaliana ανάλογα με το φορτίο τους, με τα θετικά φορτισμένα νανοπλαστικά να συγκεντρώνονται κυρίως στις άκρες των ριζών, ενώ τα αρνητικά φορτισμένα μικροπλαστικά ανιχνεύονται τόσο στον αποπλάστη όσο και στον ξυλώνα. Μικροπλαστικά έχουν βρεθεί σε λαχανικά όπως καρότα, μαρούλι, μπρόκολο, πατάτες, καθώς και σε φρούτα όπως μήλα και αχλάδια [28].

Η επεξεργασία και η συσκευασία των τροφίμων μπορούν επίσης να αποτελέσουν πηγές μόλυνσης με μικροπλαστικά. Για παράδειγμα, ένα κουτί τροφίμων με επένδυση από PE, που πωλείται στην αγορά, μπορεί να μολυνθεί μέσω της ανακύκλωσης, ενώ το κρέας που συσκευάζεται, συχνά, περιέχει μικροπλαστικά. Τα μικροπλαστικά μπορεί να προέρχονται από δίσκους τροφίμων, κατασκευασμένους από εξηλασμένο PS. Ακόμη πιο ανησυχητικό, σύμφωνα με τους Hernandez και συνεργάτες [33], είναι ότι ορισμένες τσάι-σάκοι μπορούν να απελευθερώσουν δισεκατομμύρια νάιλον και PET μικροσωματίδια σε ένα φλιτζάνι. Η μόλυνση από μικροπλαστικά στα πλαστικά μπουκάλια μεταλλικού νερού σχετίζεται με το pH, την πυκνότητα και το πάχος του υλικού, ενώ η μηχανική καταπόνηση από το άνοιγμα και το κλείσιμο αυτών των μπουκαλιών μπορεί να αυξήσει την απελευθέρωση μικροπλαστικών [28].

Όσον αφορά την έκθεση μέσω εισπνοής, τα αερομεταφερόμενα μικροπλαστικά αποτελούν έναν υποτιμημένο κίνδυνο, καθώς τα σωματίδια μπορούν να φθάσουν βαθιά στους πνεύμονες, παρακάμπτοντας την άμυνα της αναπνευστικής οδού. Τα μικροπλαστικά αποτελούν μέρος των αιωρούμενων σωματιδίων που αυξάνονται όλο και περισσότερο ως σοβαρός κίνδυνος για την υγεία. Το πιο ανησυχητικό είναι ότι η σκόνη σε εσωτερικούς χώρους, η οποία αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από μικροΐνες, περιέχει επίσης μικροπλαστικά. Αυτά μπορούν να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της αναπνοής και να προκαλέσουν επιπτώσεις, ιδιαίτερα σε εργαζόμενους σε βιομηχανικούς χώρους. Μελέτες σε ζώα έχουν δείξει ότι οι μικροπλαστικές ίνες μπορούν να αποικοδομηθούν στους πνεύμονες και να προκαλέσουν επιβλαβείς επιδράσεις. Πηγές αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών αποτελούν τα ελαστικά, η φθορά των δρόμων, η θαλάσσια άλατα, η απομάκρυνση ιλύος από τα απόβλητα, η υποβάθμιση δομικών υλικών, η ξήρανση ρούχων και υφασμάτων, καθώς και άλλες δραστηριότητες. Σύμφωνα με τους Liu και συνεργάτες [34], περίπου 120,72 kg μικροπλαστικών μεταφέρονται ετησίως μέσω της ατμόσφαιρας στη Σαγκάη, ενώ ένας ενήλικας μπορεί να εισπνεύσει έως και 21 μικροπλαστικά σωματίδια καθημερινά. Τα αερομεταφερόμενα μικροπλαστικά μπορούν επίσης να μεταφέρουν παθογόνα μικρόοργανισμούς στους πνεύμονες, προκαλώντας λοιμώξεις [28].

Τέλος, η ανθρώπινη έκθεση σε μικροπλαστικά μπορεί να συμβεί και μέσω επαφής με το δέρμα, καθώς συνθετικές ίνες και μικροσφαιρίδια από προϊόντα καλλυντικών και άλλα επεξεργασμένα υλικά πέφτουν από την ατμόσφαιρα. Οι θύλακες των τριχών, οι ιδρωτοποιοί αδένες και τυχόν τραύματα μπορούν να αποτελέσουν οδούς εισόδου. Επιπλέον, σωματίδια κάτω των 100 nm μπορούν να διαπεράσουν τον δερματικό φραγμό και να εισχωρήσουν στον οργανισμό. Τα μικροσφαιρίδια που χρησιμοποιούνται σε προϊόντα περιποίησης και καλλυντικά μπορούν να κατακερματιστούν σε νανοπλαστικά, αυξάνοντας τον κίνδυνο. Οι Kuo και συνεργάτες [35] έδειξαν ότι χημικοί παράγοντες, όπως το ελαϊκό οξύ και η αιθανόλη, μπορούν να ενισχύσουν τη διαπερατότητα των νανοσωματιδίων μέσω του δέρματος. Συγκεκριμένα, η επαφή με μικροπλαστικά σε δέρμα που έρχεται σε επαφή με προϊόντα με PET ή PVC, όπως σε καλλυντικά, χειροτεχνίες και υφάσματα, μπορεί να αποτελεί παράγοντα κινδύνου [28].

Μελλοντικές προοπτικές

Υπάρχουν σημαντικά ελλείμματα στη γνώση σχετικά με τις πηγές, τη σύσταση και τις οδούς μέσω των οποίων εισέρχονται τα μικροπλαστικά, καθώς και στην αξιολόγηση των κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν άμεσα. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία υποδεικνύει διάφορες βασικές προτεραιότητες που απαιτούν περαιτέρω έρευνα, προκειμένου να βελτιωθεί η κατανόηση των κινδύνων από τη ρύπανση με μικροπλαστικά και να αναπτυχθούν αποτελεσματικές δράσεις διαχείρισής τους.

Αυτές οι προτεραιότητες περιλαμβάνουν:
• Τη δημιουργία τυποποιημένων ορολογιών και ερευνητικών μεθόδων
• Την ενίσχυση της διακυβέρνησης και των πολιτικών για τη ρύπανση από μικροπλαστικά
• Την εξερεύνηση καινοτόμων στρατηγικών και τεχνολογιών αντιμετώπισης
• Την ενεργή συμμετοχή του κοινού και την αλλαγή στη συμπεριφορά
• και την υιοθέτηση μιας διεπιστημονικής προσέγγισης.

Ανάπτυξη τυποποιημένης ορολογίας και ερευνητικών μεθόδων

Η ασάφεια γύρω από τους όρους που χρησιμοποιούνται για τα μικροπλαστικά μπορεί να δημιουργήσει εμπόδια στην πρόοδο της έρευνας. Για παράδειγμα, η έλλειψη κοινής συμφωνίας σχετικά με έναν συγκεκριμένο ορισμό των πλαστικών απορριμμάτων μπορεί να οδηγήσει σε δεδομένα που δεν είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Ένα ακόμα πρόβλημα που δυσκολεύει τις συγκρίσεις ανάμεσα σε διάφορες μελέτες είναι η απουσία τυποποιημένων μεθόδων για τη συλλογή δειγμάτων, τον ποσοτικό προσδιορισμό και την ανάλυση των μικροπλαστικών. Υπάρχει επείγουσα ανάγκη να βελτιωθούν οι τεχνικές δειγματοληψίας και ανάλυσης, μέσα από την ανάπτυξη διαδικασιών που εγγυώνται την αξιοπιστία και διευκολύνουν την ανταλλαγή και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Αν και έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες για τον καθορισμό τυποποιημένων μεθοδολογικών κριτηρίων στην έρευνα των μικροπλαστικών, συμπεριλαμβανομένων αξιολογήσεων των υπαρχόντων μεθόδων, η κοινή αποδοχή και υιοθέτηση αυτών των προτύπων από την επιστημονική κοινότητα σε παγκόσμιο επίπεδο απαιτείται ακόμα. Συνεπώς, το πρώτο βήμα για την αντιμετώπιση των ελλείψεων στη γνώση γύρω από τις μελέτες μικροπλαστικών είναι ο καθορισμός μιας τυποποιημένης ορολογίας και η ανάπτυξη ενιαίων, αποδεκτών μεθόδων έρευνας στον τομέα αυτό [28].

Ενίσχυση της διακυβέρνησης της ρύπανσης από μικροπλαστικά

Η ρύπανση από μικροπλαστικά συνδέεται στενά με παγκόσμιες διαδικασίες και αποτελεί έναν αναδυόμενο ανθρωπογενή κίνδυνο, που απαιτεί προσεκτικό χειρισμό και αποτελεσματική πρόληψη. Η διαχείριση των πλαστικών αποβλήτων και η κεντρική διακυβέρνηση είναι ζωτικής σημασίας για την αποτροπή των αρνητικών επιπτώσεων αυτής της μορφής ρύπανσης στην περιβαλλοντική υγεία.

Διάφοροι κυβερνητικοί και μη κυβερνητικοί οργανισμοί έχουν επιχειρήσει να θέσουν κατευθυντήριες γραμμές για τον έλεγχο των μικροπλαστικών. Για παράδειγμα, σε πολλές χώρες έχουν σταδιακά απαγορευτεί τα μικροπλαστικά σφαιρίδια. Ένα σύστημα ρύθμισης των πλαστικών μίας χρήσης, όπως τα επιτραπέζια σκεύη, βρίσκεται υπό διαβούλευση και δημόσια συζήτηση στο Χονγκ Κονγκ. Επιπλέον, η Κίνα ανακοίνωσε την απαγόρευση των PCCP που περιέχουν μικροπλαστικά σφαιρίδια στα τέλη του 2020 και προγραμματίζει να απαγορεύσει την πώληση προϊόντων που περιέχουν τέτοια μικροπλαστικά μέχρι το τέλος του 2022.

Παρά τις πρόσφατες εξελίξεις στη διεθνή διακυβέρνηση, η διασπορά, η ανθεκτικότητα και η κινητικότητα των μικροπλαστικών, μαζί με την αυξανόμενη παραγωγή, την παγκοσμιοποιημένη κατανάλωση, τις ποικίλες πηγές ρύπανσης και τις δυσδιάκριτες ευθύνες στο διεθνές εμπόριο, καθιστούν δύσκολη την αποτελεσματική διαχείριση. Υπάρχει ανάγκη για πιο αποτελεσματικό έλεγχο της εσωτερικής βιομηχανίας και για μια διεθνή συμφωνία σχετικά με τα πλαστικά. Επιπλέον, οι πολιτικές που υιοθετούνται συχνά βασίζονται σε περιβαλλοντικά επιχειρήματα παρά σε ανησυχίες σχετικά με την ανθρώπινη υγεία, γεγονός που δείχνει την έλλειψη ευαισθητοποίησης σχετικά με τους κινδύνους για την υγεία από την πλαστική ρύπανση.

Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις είναι η έγκαιρη αντιμετώπιση της πλαστικής ρύπανσης. Για τον σκοπό αυτό, απαιτούνται τεκμηριωμένες πολιτικές που θα ελέγχουν το ζήτημα. Έχουν προταθεί διάφορες στρατηγικές πολιτικής, που επικεντρώνονται στην ατομική και εταιρική κοινωνική ευθύνη, στην απαγόρευση ορισμένων τύπων

πλαστικών και στην προώθηση εναλλακτικών λύσεων, καθώς και στη βελτίωση των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και άλλων μέτρων [28].

Διερεύνηση καινοτόμων στρατηγικών και τεχνολογιών

Η ταχεία συσσώρευση πλαστικών αποβλήτων οδηγεί σε αυξανόμενη ανάγκη για καινοτόμες και βιώσιμες πρακτικές παραγωγής, με επενδύσεις σε νέα τεχνολογικά λύσεις. Οι στρατηγικές που βασίζονται στη βιοτεχνολογία θεωρούνται μία από τις πιο ελπιδοφόρες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής ρύπανσης από μικροπλαστικά. Τα βιοπλαστικά θα μπορούσαν να είναι είτε βιολογικής προέλευσης, είτε βιοδιασπώμενα, είτε και τα δύο, και θα έπρεπε να εντάσσονται σε ένα βιώσιμο και κυκλικό οικονομικό μοντέλο. Ιδανικά, τα βιοδιασπώμενα πλαστικά θα πρέπει να μην συσσωρεύονται βιολογικά, να είναι μη τοξικά και να μην παράγουν επιβλαβή παραπροϊόντα. Επιπλέον, μπορούν να λειτουργήσουν ως μακροπρόθεσμοι αποθηκευτικοί χώροι άνθρακα, εφόσον ενσωματωθούν αποτελεσματικά σε μεγάλης κλίμακας υποδομές βασισμένες σε βιοπλαστικά. Ωστόσο, ορισμένοι επικριτές υποστηρίζουν ότι τα βιοδιασπώμενα πλαστικά αποτελούν απλώς μια προσωρινή λύση και ότι η πραγματική προτεραιότητα πρέπει να είναι η πρόληψη της παραγωγής πλαστικών, η επανάχρηση και η ανακύκλωση.

Παράλληλα, υπάρχει επιτακτική ανάγκη για την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών που θα βελτιώσουν την ανίχνευση και την ταυτοποίηση των μικροπλαστικών, όπως η βελτίωση των μεθόδων δειγματοληψίας, της προεπεξεργασίας δειγμάτων, της ταξινόμησης και της ανάλυσης. Για παράδειγμα, η τεχνική micro-FTIR αποτελεί μια από τις πιο τυπικές μεθόδους για τον ποσοτικό προσδιορισμό και την ταυτοποίηση των μικροπλαστικών ταυτόχρονα, και συνεχώς αναπτύσσονται και επικαιροποιούνται νέες τεχνικές για την επίτευξη πιο ακριβών δεδομένων. Εκτός από την ανάλυση των μικροπλαστικών στο περιβάλλον, η ανίχνευση αυτών και στον ανθρώπινο οργανισμό είναι ζωτικής σημασίας για την έρευνα σχετικά με τους κινδύνους που εγκυμονούν στην ανθρώπινη υγεία. Για παράδειγμα, οι Huang και συν. [36] εξέτασαν την παρουσία μικροπλαστικών στα ανθρώπινα πτύελα χρησιμοποιώντας φασματοσκοπία απορρόφησης υπερύθρων, παρέχοντας στοιχεία για πιθανά αναπνευστικά προβλήματα που σχετίζονται με τη ρύπανση από μικροπλαστικά [28].

Ενεργοποίηση του κοινού και αλλαγή συμπεριφοράς

Οι προκλήσεις στην εξισορρόπηση της ευκολίας χρήσης των πλαστικών με τον κίνδυνο μόλυνσης από μικροπλαστικά αποτελούν σημαντικό κοινωνικό ζήτημα. Χωρίς άμεσες και αποτελεσματικές προληπτικές ενέργειες, οι επιπτώσεις αυτής της ρύπανσης στην περιβαλλοντική υγεία θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε σοβαρά προβλήματα τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Συνεπώς, η αυξημένη ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με τις επιλογές τους στην κατανάλωση και η ενεργή συμμετοχή στην ελαχιστοποίηση των πλαστικών αποβλήτων είναι ζωτικής σημασίας. Θα πρέπει να υιοθετήσουμε μια στρατηγική από τα κάτω προς τα πάνω, ακολουθώντας την αρχή «αποφεύγουμε ό,τι μπορούμε».

Μια έρευνα σχετικά με τις στάσεις του κοινού απέναντι στο πλαστικό δείχνει ότι το 80% των ανθρώπων ανησυχούν για τα πλαστικά ως περιβαλλοντικό πρόβλημα, ωστόσο λίγοι μετατρέπουν αυτήν την ανησυχία σε συγκεκριμένες δράσεις. Για την επίτευξη ενός βιώσιμου περιβάλλοντος, κάθε άτομο οφείλει να αναλάβει την ευθύνη

για τη διατήρηση και την προστασία του πλανήτη. Δεν αρκεί να εκφράζουμε μόνο φιλολόγους, αλλά πρέπει να μετατρέψουμε τα λόγια σε πράξεις. Οι άνθρωποι αποτελούν τόσο την αιτία όσο και τη λύση του προβλήματος. Συνεπώς, η ενσωμάτωση της ανθρώπινης διάστασης στην έρευνα σχετικά με τα μικροπλαστικά είναι ζωτικής σημασίας. Για να αντιμετωπίσουμε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτής της ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία, χρειάζεται διατομεακή συνεργασία και ενσωμάτωση επιστημών συμπεριφοράς και φυσικών επιστημών, αξιοποιώντας τις δυνατότητες και τις προοπτικές που προσφέρει η ανθρώπινη συμπεριφορά για να διευκολύνουμε την αλλαγή.

Η επιστήμη των πολιτών περιλαμβάνει τη συμμετοχή του κοινού στην επιστημονική έρευνα, όπου εθελοντές μπορούν να βοηθήσουν στην παρακολούθηση της πλαστικής ρύπανσης. Ως μια προσέγγιση που είναι ανοιχτή και συμμετοχική, η επιστήμη των πολιτών μπορεί να λειτουργήσει ως καταλύτης, προωθώντας μεγαλύτερη εμπλοκή και δράση από τους πολίτες στον τομέα αυτό. Επιπλέον, η συμμετοχή του κοινού περιλαμβάνει διάφορες εκπαιδευτικές δραστηριότητες σε σχολεία ή κοινωνικούς συλλόγους. Για παράδειγμα, η βιωματική εκπαίδευση σχετικά με τα θαλάσσια απορρίμματα έχει αποδειχθεί ότι ενισχύει τις γνώσεις των μαθητών σχετικά με τα μικροπλαστικά και τους ενδυναμώνει να υιοθετήσουν υπεύθυνες συμπεριφορές. Έτσι, η εκπαίδευση αποτελεί ένα βασικό εργαλείο για την καλλιέργεια οικολογικής ευαισθητοποίησης και την προώθηση καλών πρακτικών τόσο στο ευρύ κοινό όσο και στις προσωπικές τους συνήθειες. Επιπλέον, οι Garcia-Vazquez και συνεργάτες [37] έχουν επισημάνει ότι η μελέτη των ψυχοκοινωνικών παραγόντων είναι σημαντική για την αποτελεσματικότερη μείωση της ρύπανσης από μικροπλαστικά.

Υιοθέτηση διεπιστημονικής προσέγγισης

Η ρύπανση από μικροπλαστικά έχει μετατραπεί από ένα επιφανειακό περιβαλλοντικό πρόβλημα σε μια ευρέως διαδεδομένη κρίση και ένα ζήτημα παγκόσμιας σημασίας για την περιβαλλοντική υγεία, επηρεάζοντας τόσο το φυσικό όσο και το ανθρώπινο περιβάλλον. Επιπλέον, δημιουργεί αλληλεξαρτώμενους κινδύνους που αφορούν το περιβάλλον, τα ζώα και την ανθρώπινη υγεία. Υπάρχει ανάγκη για ολοκληρωμένες και ολιστικές προσεγγίσεις προκειμένου να αντιμετωπιστεί η ευρύτατη και πολύπλοκη φύση αυτού του ζητήματος, με την ανάπτυξη πολιτικών και διακυβέρνησης σε τοπικό και παγκόσμιο επίπεδο. Η φύση της ρύπανσης από μικροπλαστικά απαιτεί συλλογική δράση, ώστε να αντιμετωπιστούν οι διάφορες κοινωνικές, υγειονομικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις. Για το λόγο αυτό, επιστήμονες από τον οικολογικό, ιατρικό και κοινωνικό τομέα θα πρέπει να συνεργαστούν στενά για την επίλυση αυτών των πολλαπλών ζητημάτων. Απαιτείται μια διεπιστημονική προσέγγιση που θα βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση της πολυπλοκότητας της κατάστασης και στη συνεκτική ενσωμάτωση των ερευνητικών αποτελεσμάτων στη λήψη αποφάσεων [28].

Συμπεράσματα

Τα μικροπλαστικά αποτελούν ένα σύγχρονο περιβαλλοντικό πρόβλημα που απασχολεί και αναμένεται να απασχολήσει σε βάθος την επιστημονική κοινότητα, καθώς υπάρχουν πολλά ερωτήματα σχετικά με τις επιπτώσεις τους τόσο στο περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη υγεία. Η ανάγκη παρακολούθησης και διαχείρισης του προβλήματος οδήγησε στην ανάπτυξη ποικίλων μεθόδων που καλύπτουν όλο το φάσμα των διαδικασιών, από τη συλλογή δειγμάτων σε διαφορετικά περιβαλλοντικά πεδία, όπως τα νερά, τα ιζήματα και οι οργανισμοί, μέχρι τον διαχωρισμό και τον καθαρισμό των μικροσωματιδίων, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα

αποτελέσματα. Η χρήση χημικών τεχνικών ανάλυσης και ταυτοποίησης επιτρέπει τον χημικό και ποσοτικό προσδιορισμό των πολυμερών που περιέχονται στα μικροπλαστικά. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτών των μεθόδων που λειτουργούν αποσπασματικά και χωρίς ένα ενιαίο πρωτόκολλο με καθολική ισχύ, έχει ως αποτέλεσμα να παραμένουν οι διαφορετικές τεχνικές ανεξάρτητες και ασύνδετες μεταξύ τους. Αυτή η έλλειψη ολοκληρωμένου πρωτοκόλλου και η μη διαλειτουργικότητα των μεθόδων οδηγούν σε ασυμβατότητα στα αποτελέσματα, με αποτέλεσμα η συνολική προσπάθεια για την παρακολούθηση και αντιμετώπιση των μικροπλαστικών στο περιβάλλον να παραμένει ημιτελής και αποσπασματική.

Τα βασικά σημεία της εργασίας εστιάζουν στη σημασία των πλαστικών στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου και στην επικινδυνότητά τους όταν απορρίπτονται στο περιβάλλον, είτε ως μικροπλαστικά είτε ως μακροπλαστικά. Από την ανάλυση προκύπτει η έλλειψη επαρκών δεδομένων σχετικά με τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών στην ανθρώπινη υγεία, καθώς και η ανάγκη για περαιτέρω πειραματικές μελέτες και έρευνες στον συγκεκριμένο τομέα, με στόχο τη μείωση ή και την εξάλειψή τους.

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, οι πιθανές επιπτώσεις από την παρουσία των μικροπλαστικών στο θαλάσσιο και όχι μόνο περιβάλλον είναι πολλές και πολυδιάστατες. Επιπλέον, γίνεται σαφές ότι η επιστημονικά τεκμηριωμένη ενημέρωση και ευαισθητοποίηση του κοινού είναι ζωτικής σημασίας, καθώς και η ενεργή συμμετοχή των πολιτών στην αντιμετώπιση του μεγάλου περιβαλλοντικού προβλήματος των θαλάσσιων απορριμμάτων, ιδιαίτερα των πλαστικών. Για το λόγο αυτό, η συστηματική ανακύκλωση και η εκπαίδευση των πολιτών σχετικά με τα περιβαλλοντικά ζητήματα είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική διαχείριση και την προστασία του περιβάλλοντος.

Βιβλιογραφία

1. United Nations Environment Programme, 2005, Διαθέσιμο : https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/12079/brochure-microplastics.pdf?sequence=1&amp%3BisAllowed= , 24/09/2025
2. Hidalgo-Ruz V., Gutow L., Thompson R., Thiel M. (2012), Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification, Environ. Sci. Technol. 2012, 46, 3060−3075
3. OSPAR Commission, 2017, Assessment document of land-based inputs of microplastics in the marine environment, Συντάκτης: Verschoor A. Διαθέσιμο: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ospar.org/documents?v=38018 , 24/09/2015
4. Cole M., Lindeque P., Halsband C., Galloway T. S., 2011, Microplastics as contaminants in the marine environment: A review, Marine Pollution Bulletin 62 (2011) 2588–2597
5. Besley A., Vijver M., Behrens., Bosker T., 2017, A standardized method for sampling and extraction methods for quantifying microplastics in beach sand, Marine Pollution Bulletin 114 (2017) 77-83
6. Enfrin M., Dumée L., Lee J., 2019, Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes – Origin, impact and potential solutions, Water Research 161 (2019) 621-638
7. Talvitie J., Heinonen M., Pääkkönen J., Vahtera E., Mikola A., Setälä O., Vahala R., 2015, Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland, Baltic Sea, Water Science & Technology 72.9 2015
8. Rocha-Santos T., Duarte A., 2015, A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate, and the behavior of microplastics in the environment, Trends in Analytical Chemistry 65 (2015) 47-53
9. Shen M., Song B., Zhu Y., Zeng G., Zhang Y., Yang Y., Wen X., Chen M., Yi H., 2020, Removal of microplastics via drinking water treatment: Current knowledge and future directions, Chemosphere 251 (2020) 126612
10. Plastics – the Facts 2015, An analysis of European plastics production, demand and waste data, Plastics Europe – Association of Plastics Manufacturers, 2015. Διαθέσιμο: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2015-Plastics-the-facts.pdf , 24/09/2025
11. GESAMP (2015), Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment", Kershaw, P. J., Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, ISSN: 1020-4873
12. Duis K., Coors A., 2016, Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects, Environ Sci Eur (2016) 28:2, DOI 10.1 186/s 12302-015-0069-y
13. Masura, J., et al. 2015. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48.
14. Coyle R., Hardiman G., Driscoll K., 2020, Microplastics in the marine environment: A review of their sources distribution processes, uptake and exchange in ecosystems, Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 2 (2020) 100010

15. De Sa L., Oliviera M., Ribeiro F., Rocha T., Futter M., 2018, Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? Science of the Total Environment 645 (2018) 1029–1039
16. Rezania S., Park J., Din M., Taib S., Talaiekhozani A., Yadav K., Kamyab H., 2018, Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: A review of recent studies, Marine Pollution Bulletin 133 (2018) 191-208
17. Carr S., Liu J., Tesoro A., 2016, Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants, Water Research 91 (2016) 174-182
18. Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas ˙A guidance document within the Common Implementation Strategy for the Marine Strategy Framework Directive by MSFD Technical Subgroup on Marine Litter, 2013, Διαθέσιμο: https://mcc.jrc.ec.europa.eu/documents/201702074014.pdf , 24/09/2025
19. Elkhatib D., Oyanedel-Craver V., 2020, A Critical Review of Extraction and Identification Methods of Microplastics in Wastewater and Drinking Water, Environ.Sci.Technol.2020,54,7037−7049
20. Fries E., Ebert M., Willmeyer J., Remy D., 2013, Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis- GC/MS and scanning electron microscopy, DOI: 10.1039/c3em00214d
21. Ziajahromi S., Neale P., Rintoul L., Leusch F., 2017, Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a new approach to sample wastewater-based microplastics, Water Research 112 (2017) 93-99
22. Gundoğdu S., Çevik C., Güzel E., 2018, Microplastics in municipal wastewater treatment plants in Turkey: a comparison of the influent and secondary effluent concentrations, Environ. Monit. Assess (2018) 190:626
23. Magnusson K., Eliasson K., Fråne A, Haikonen K., Hultén J., Olshammar M., Stadmark J., Voisin A., 2016, Swedish sources and pathways for microplastics to the marine environment, IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd.
24. Verschoor Anja, 2016, Emission of microplastics and potential mitigation measures ˙Abrasive cleaning agents, paints and tyre wear, Published by: National Institute for Public Health and the Environment, RIVM Report 2016-0026
25. Roch S., Friedrich C., Brinker A., 2020, Uptake routes of microplastics in fishes: practical and theoretical approaches to test existing theories, Scientific Reports (2020) 10:3896
26. Borisovich- Zobkov & Esiukova, 2018, Microplastics in a Marine Environment: Review of Methods for Sampling, Processing, and Analyzing Microplastics in Water, Bottom Sediments, and Coastal Deposits, OCEANOLOGY Vol. 58 No. 1 2018
27. Mataji A., Taleshi M., Balimoghaddas E., 2020, Distribution and Characterization of Microplastics in Surface Waters and the Southern Caspian Sea Coasts Sediments
28. Xi Yang et al., 2022, Environmental health impacts of microplastics exposure on structural organization levels in the human body, Science of the Total Environment 825 (2022) 154025
29. Pfaller J., Goforth K., Gil M., Savoca M., Lohmann K., 2020, Odors from marine plastic debris elicit foraging behavior in sea turtles, Current Biology 30, R191–R214
30. Lee H., Kunz A., Shim W., Walther B., 2019, Microplastic contamination of table salts from Taiwan, including a global review, Scientific Reports (2019) 9:10145
31. Schymanski D., Goldbeck C., Humpf H., Fürst P., 2018, Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water, Water Research 129 (2018) 154-162

32. Sun X., Yuan X., Jia Y., Feng L., Zhu F., Dong S., Liu J., Kong X., Tian H., Duan J., Ding Z., Wang S., Xing B., 2020, Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in Arabidopsis thaliana, Nature Nanotechnology volume 15, pages 755–760 (2020)
33. Hernandez L., Xu E., Larsson H., Tahara R., Maisuria V., Tufenkji N., 2019, Plastic Teabags Release Billions of Microparticles and Nanoparticles into Tea, Environmental Science & Technology 2019, 53, 21, 12300–12310
34. Liu K., Wang X., Wei N., Song Z., Li D., 2019, Accurate quantification and transport estimation of suspended atmospheric microplastics in megacities: Implications for human health, Environment International 132 (2019) 105127
35. Kuo Y., Lee Y., Tseng Y., Su C., Burnouf T., Su C., 2009, Influence of ethanol on the release of growth factors in human blood-derived platelet gels, Biologicals 38 (2010) 120-127
36. Huang X., Saha S., Saha G., Francis I., Luo Z., 2022, Transport and deposit of microplastics and nanoplastics in the human respiratory tract, Environmental Advances 16 (2024) 100525
37. Garcia-Vazquez E., Garcia-Ael C., Topa G., 2021, On the way to reduce marine microplastics pollution. Research landscape of psychosocial drivers, Science of the Total Environment 799 (2021) 149384
38. Νόμος υπ΄αριθμ. 4819/2021- ΦΕΚ 129/Α/23-7-2021, Διαθέσιμο: https://www.e-nomothesia.gr/kat-periballon/nomos-4819-2021-phek-129a-23-7-2021.html , 24/09/2025
39. Νόμος υπ'αριθμ. 4736/2020- ΦΕΚ 200/Α/20-10-2020, Διαθέσιμο: https://www.e-nomothesia.gr/kat-periballon/nomos-4736-2020-phek-200a-20-10-2020.html ,24/09/2025