



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΙΑΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ

**ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΣΤΑ ΥΔΑΤΙΝΑ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΕΣ
ΕΠΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΤΡΟΦΙΚΗΣ
ΑΛΥΣΙΔΑΣ**

Φοιτήτρια: Μακαρονάκη Χριστίνα

A.M.: 2221037

Επιβλέπων καθηγητής: Κοτρώσιος Αναστάσιος

Σεπτέμβριος 2025

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζει το αναδυόμενο πρόβλημα των μικροπλαστικών στα θαλάσσια οικοσυστήματα και τις πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία μέσω της τροφικής αλυσίδας. Τα μικροπλαστικά, σωματίδια μεγέθους 1–5000 μm , έχουν εξελιχθεί σε μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές απειλές του 21ου αιώνα, με εκτιμώμενες εισροές 0,5–2,4 εκατ. τόνων ετησίως στους ωκεανούς. Οι κυριότερες πηγές είναι οι ποτάμιες εισροές (70–80%), ενώ η ατμοσφαιρική μεταφορά εξηγεί την παρουσία τους σε απομακρυσμένες περιοχές. Σύγχρονες μέθοδοι που συνδυάζουν φασματοσκοπία και μηχανική μάθηση επιτυγχάνουν ακρίβεια άνω του 95% στην ταυτοποίηση πολυμερών.

Οι αλληλεπιδράσεις με τους θαλάσσιους οργανισμούς είναι πολύπλοκες: τα μικροπλαστικά καταπίνονται ή συσσωρεύονται σε ιστούς, επηρεάζοντας φυσιολογία, αναπαραγωγή και συμπεριφορά. Η τροφική μεταφορά, αν και τα στοιχεία για βιομεγέθυνση παραμένουν αντικρουόμενα, οδηγεί σε συσσώρευση σε εμπορικά σημαντικά είδη, με τα δίθυρα μαλάκια να εμφανίζουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις. Οι επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία περιλαμβάνουν οξειδωτικό στρες, ενδοκρινικές διαταραχές και ανοσοτοξικότητα. Πρωτοποριακές μελέτες συνδέουν τα μικροπλαστικά με αυξημένο καρδιαγγειακό κίνδυνο, ενώ η διασπορά νανοπλαστικών σε όργανα-στόχους αποτελεί νέα ανησυχία. Ιδιαίτερα ευάλωτες ομάδες είναι τα παιδιά και οι έγκυες γυναίκες.

Σε επίπεδο πολιτικής, η Ε.Ε. ηγείται μέσω του Κανονισμού REACH που περιορίζει τα σκόπιμα προστιθέμενα μικροπλαστικά, ενώ οι διαπραγματεύσεις για Παγκόσμιο Σύμφωνο Πλαστικών παραμένουν σε εκκρεμότητα. Η οικονομική διάσταση είναι τεράστια, με ζημιά 2,5 τρις δολάρια ετησίως, αλλά και ευκαιρίες μέσω κυκλικής οικονομίας και καινοτομιών, όπως η αξιοποίηση τεχνητής νοημοσύνης και η μετατροπή μικροπλαστικών σε υλικά υψηλής αξίας.

Συνολικά, τα μικροπλαστικά αποτελούν επιβεβαιωμένη απειλή για τα θαλάσσια οικοσυστήματα και την υγεία του ανθρώπου. Η αντιμετώπιση απαιτεί διεθνή συνεργασία, συνδυασμό επιστημονικής έρευνας, τεχνολογικής καινοτομίας, ρυθμιστικών μέτρων και κοινωνικής συμμετοχής. Παρά τις προκλήσεις, η αυξανόμενη επιστημονική γνώση και οι τεχνολογικές εξελίξεις δημιουργούν προοπτικές για ουσιαστική πρόοδο στην προστασία περιβάλλοντος και δημόσιας υγείας.

Abstract

This thesis investigates the emerging problem of microplastics in marine ecosystems and their potential impacts on human health through the food chain. Microplastics, particles ranging from 1–5000 μm , have become one of the most significant environmental threats of the 21st century, with estimated annual inputs of 0.5–2.4 million tons into the oceans. Major sources include riverine discharges (70–80%), while atmospheric transport explains their presence in remote areas. Modern detection methods that combine spectroscopy with machine learning achieve over 95% accuracy in polymer identification.

Interactions with marine organisms are complex: microplastics are ingested or accumulate in tissues, affecting physiology, reproduction, and behavior. Trophic transfer, although evidence for biomagnification remains contradictory, leads to accumulation in commercially important species, with bivalves showing the highest concentrations. Human health effects include oxidative stress, endocrine disruption, and immunotoxicity. Groundbreaking studies link microplastics to increased cardiovascular risk, while the translocation of nanoplastics to target organs is a growing concern. Vulnerable groups include children and pregnant women.

At the policy level, the European Union is leading through the REACH Regulation, which restricts intentionally added microplastics, while negotiations for a Global Plastics Treaty remain ongoing. The economic dimension is immense, with damages estimated at USD 2.5 trillion annually, but opportunities also arise through circular economy strategies and innovations, such as artificial intelligence applications and the conversion of microplastics into high-value materials.

Overall, microplastics represent a confirmed threat to marine ecosystems and human health. Addressing this issue requires international collaboration, combining scientific research, technological innovation, regulatory measures, and social engagement. Despite the challenges, growing scientific knowledge and technological advances provide promising prospects for significant progress in safeguarding both the environment and public health.

Πίνακας Περιεχομένων

1. Εισαγωγή	σελ.
1.1 Σκοπός και Στόχοι	σελ.
1.2 Μεθοδολογία	σελ.
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	σελ.
2.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά μικροπλαστικών	σελ.
2.1.1 Κατηγορίες μικροπλαστικών	σελ.
2.1.2 Φυσικοχημικές ιδιότητες	σελ.
2.2 Πηγές προέλευσης	σελ.
2.3 Μηχανισμοί μεταφοράς και διασποράς	σελ.
3. Επιπτώσεις στα θαλάσσια οικοσυστήματα	σελ.
3.1 Αλληλεπιδράσεις με θαλάσσιους οργανισμούς	σελ.
3.2 Συσσώρευση στην τροφική αλυσίδα	σελ.
3.2.1 Βιοσυσσώρευση	σελ.
3.2.2 Βιομεγέθυνση	σελ.
4. Πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία	σελ.
4.1 Οδοί έκθεσης	σελ.
4.2 Τοξικολογικές επιδράσεις	σελ.
4.3 Ευάλωτες ομάδες	σελ.
5. Πολιτικές και κανονισμοί	σελ.
5.1 Ευρωπαϊκή Ένωση	σελ.
5.2 Διεθνείς πρωτοβουλίες	σελ.
6. Οικονομικές και κοινωνικές διαστάσεις	σελ.
6.1 Κόστος περιβαλλοντικής υποβάθμισης	σελ.
6.2 Κυκλική οικονομία και καινοτομία	σελ.
7. Συμπεράσματα και προοπτικές	σελ.
Βιβλιογραφία	σελ.

2. Εισαγωγή

2.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά των μικροπλαστικών

Τα μικροπλαστικά αποτελούν μια ευρεία κατηγορία συνθετικών πολυμερών που έχουν προσελκύσει σημαντική επιστημονική και κοινωνική προσοχή λόγω της ευρείας διάδοσής τους στο περιβάλλον και των πιθανών επιπτώσεών τους. Σύμφωνα με τον επικρατέστερο επιστημονικό ορισμό, τα μικροπλαστικά καθορίζονται ως **συνθετικά στερεά σωματίδια ή πολυμερείς μήτρες με κανονικό ή ακανόνιστο σχήμα και μέγεθος 1-5000 μm** [1]. Αυτή η μεγεθολογική κατηγοριοποίηση έχει καθιερωθεί μέσω εκτεταμένων επιστημονικών συζητήσεων και αντικατοπτρίζει τη σύγχρονη κατανόηση του φαινομένου.

Η επιλογή του ανώτερου ορίου των 5 mm βασίζεται στην παρατήρηση ότι σωματίδια μικρότερα από αυτό το μέγεθος μπορούν να καταποθούν από μεγάλη ποικιλία θαλάσσιων οργανισμών, από το πλαγκτόν έως τα ψάρια και τα θαλάσσια θηλαστικά. Το κατώτερο όριο του 1 μm διακρίνει τα μικροπλαστικά από τα νανοπλαστικά, τα οποία αποτελούν μια ακόμη πιο προκλητική κατηγορία λόγω της ικανότητάς τους να διεισδύουν σε κυτταρικό επίπεδο.

Εντός αυτού του φάσματος μεγεθών, οι ερευνητές διακρίνουν συχνά τα **μικρά μικροπλαστικά [$<100 \mu\text{m}$]** από τα **μεγάλα μικροπλαστικά [$100 \mu\text{m}$ -5 mm]**. Αυτή η περαιτέρω κατηγοριοποίηση είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κατανόηση των βιολογικών επιπτώσεων, καθώς τα μικρότερα σωματίδια παρουσιάζουν μεγαλύτερο βιοδιαθέσιμο δυναμικό και ικανότητα διέλευσης βιολογικών μεμβρανών.

2.2 Κατηγοριοποίηση βάσει προέλευσης

Η ταξινόμηση των μικροπλαστικών σε **πρωτογενή και δευτερογενή** αποτελεί θεμελιώδη διάκριση που επηρεάζει τόσο τις στρατηγικές πρόληψης όσο και τις μεθόδους αντιμετώπισης [2].

Πρωτογενή μικροπλαστικά είναι εκείνα που κατασκευάζονται σκόπιμα σε μικροπλαστικό μέγεθος και απελευθερώνονται άμεσα στο περιβάλλον. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα μικροσφαίρια [microbeads] που χρησιμοποιούνται σε καλλυντικά και προϊόντα προσωπικής υγιεινής, οι μικροκάψουλες σε απορρυπαντικά, τα abrasives σε βιομηχανικές εφαρμογές, και τα πλαστικά pellets που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη στη βιομηχανία πλαστικών.

Δευτερογενή μικροπλαστικά προκύπτουν από την αποικοδόμηση μεγαλύτερων πλαστικών αντικειμένων μέσω διαφόρων περιβαλλοντικών διεργασιών. Η φωτοδιάσπαση από την υπεριώδη ακτινοβολία αποτελεί τον κύριο μηχανισμό αποικοδόμησης στα επιφανειακά ύδατα, ενώ η μηχανική φθορά από κύματα, άμμο και άλλα σωματίδια επιταχύνει τη διάσπαση. Επιπλέον, οι κύκλοι παγώματος-απόψυξης, οι θερμικές μεταβολές και η βιολογική δράση μικροοργανισμών συμβάλλουν στη σταδιακή υποβάθμιση των πλαστικών υλικών.

Ειδικότερα για τα μικροπλαστικά, οι πρόσφατες εκτιμήσεις υποδεικνύουν ετήσιες εισροές στο εύρος των **0,5-2,4 εκατομμυρίων τόνων στους παγκόσμιους ωκεανούς** [3]. Αυτό το εύρος αντικατοπτρίζει τις αβεβαιότητες στις μεθοδολογίες εκτίμησης, αλλά επιβεβαιώνει το μέγεθος της πρόκλησης. Οι συγκεντρώσεις μικροπλαστικών έχουν τεκμηριωθεί σε όλα τα θαλάσσια περιβάλλοντα, από τις παράκτιες περιοχές έως τους βαθύτερους ωκεανούς, αποδεικνύοντας την παγκόσμια εξάπλωση του φαινομένου.

Πρόσφατες έρευνες έχουν εντοπίσει μικροπλαστικά σε απομακρυσμένες περιοχές όπως η Αρκτική, η Ανταρκτική, και τα βαθιά ωκεάνια τάφρα, υποδεικνύοντας ότι κανένα θαλάσσιο περιβάλλον δεν παραμένει ανέπαφο από αυτή τη μορφή ρύπανσης. Η παρουσία μικροπλαστικών έχει επίσης τεκμηριωθεί σε τρόφιμα, πόσιμο νερό, αέρα, και ακόμη και στον ανθρώπινο οργανισμό, καθιστώντας σαφές ότι πρόκειται για ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα παγκόσμιας εμβέλειας με άμεσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Οι προβλέψεις για το μέλλον είναι ακόμα πιο ανησυχητικές. Εάν οι τρέχουσες τάσεις παραγωγής και διαχείρισης πλαστικών συνεχιστούν αμετάβλητες, εκτιμάται ότι η συσσώρευση πλαστικών στους ωκεανούς θα τριπλασιαστεί έως το 2040. Αυτό σημαίνει ότι η κλίμακα του προβλήματος των μικροπλαστικών θα επιδεινωθεί δραματικά στις επόμενες δεκαετίες, εκτός εάν ληφθούν άμεσα και αποτελεσματικά μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισης.

2.3 Απειλές για τα θαλάσσια οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία

Τα μικροπλαστικά αποτελούν νέα κατηγορία περιβαλλοντικών μολυντών με μοναδικά χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν από τους παραδοσιακούς χημικούς ρύπους. Η επιμονή τους στο περιβάλλον, σε συνδυασμό με την ικανότητά τους να μεταφέρουν άλλους μολυντές και παθογόνα, δημιουργεί νέες διαστάσεις περιβαλλοντικού κινδύνου.

Επιπτώσεις στα θαλάσσια οικοσυστήματα

Στα θαλάσσια οικοσυστήματα, τα μικροπλαστικά μπορούν να καταποθούν από οργανισμούς όλων των τροφικών επιπέδων, από το φυτοπλαγκτόν έως τα μεγάλα θηλαστικά. Η κατάποσή τους μπορεί να προκαλέσει φυσική βλάβη, ψευδαίσθηση κορεσμού, και να λειτουργήσει ως φορέας για την εισαγωγή τοξικών χημικών ουσιών στους οργανισμούς [4].

Η παρουσία μικροπλαστικών στα θαλάσσια τροφικά δίκτυα έχει τεκμηριωθεί εκτενώς, με μελέτες να αποδεικνύουν την κατάποσή τους από μεγάλη ποικιλία ειδών, συμπεριλαμβανομένων φυτοπλαγκτού, ζωοπλαγκτού, ασπόνδυλων, ψαριών, θαλάσσιων ερπετών, πτηνών και θηλαστικών. Αυτή η ευρεία εξάπλωση υποδηλώνει τη δυνατότητα μεταφοράς μέσω της τροφικής αλυσίδας και πιθανή βιοσυσσωρευση σε ανώτερα τροφικά επίπεδα.

Πέρα από τις άμεσες φυσικές επιπτώσεις, τα μικροπλαστικά μπορούν να επηρεάσουν τη συμπεριφορά και τη φυσιολογία των θαλάσσιων οργανισμών με πολλαπλούς τρόπους. Μελέτες έχουν δείξει ότι η παρουσία μικροπλαστικών μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα της αναζήτησης τροφής, να επηρεάσει την αναπαραγωγική συμπεριφορά, και να προκαλέσει στρες σε διάφορα θαλάσσια είδη. Επιπλέον, η επιφάνεια των μικροπλαστικών μπορεί να αποτελέσει υπόστρωμα για την ανάπτυξη μικροβιακών κοινοτήτων, συμπεριλαμβανομένων παθογόνων οργανισμών, δημιουργώντας νέες διαδρομές μετάδοσης ασθενειών στα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Η ανθρώπινη έκθεση σε μικροπλαστικά συμβαίνει κυρίως μέσω της κατανάλωσης μολυσμένων θαλασσινών, πόσιμου νερού και εισπνοής [5]. Πρόσφατες κλινικές μελέτες συνδέουν την παρουσία μικροπλαστικών στις καρωτίδες αρτηρίες με διπλάσιο κίνδυνο καρδιακής προσβολής, εγκεφαλικού ή θανάτου [6].

Η ανίχνευση μικροπλαστικών στον ανθρώπινο οργανισμό έχει τεκμηριωθεί σε διάφορους ιστούς και βιολογικά υγρά, συμπεριλαμβανομένου του αίματος, των πνευμόνων, του πλακούντα, και των κοπράνων. Αυτή η ευρεία κατανομή υποδηλώνει ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να διέλθουν από τις βιολογικές μεμβράνες και να κυκλοφορήσουν συστηματικά στον οργανισμό.

Οι πιθανοί μηχανισμοί τοξικότητας των μικροπλαστικών στον ανθρώπινο οργανισμό περιλαμβάνουν την πρόκληση φλεγμονής, το οξειδωτικό στρες, τις ενδοκρινικές διαταραχές, και

την ανοσοτοξικότητα. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μπορούν να λειτουργήσουν ως φορείς για τη μεταφορά χημικών προσθέτων και περιβαλλοντικών μολυντών που έχουν προσροφηθεί στην επιφάνειά τους.

Οι οικονομικές επιπτώσεις εκτιμώνται σε **3.300-33.000 δολάρια ανά μετρικό τόνο πλαστικού** που εισέρχεται στον ωκεανό ετησίως, περιλαμβανομένων της μείωσης της αλιείας, των επιπτώσεων στον τουρισμό και των εξόδων καθαρισμού [7]. Η συνολική απειλή για την παγκόσμια οικονομία των ωκεανών εκτιμάται σε 2,5 τρισεκατομμύρια δολάρια.

Αυτές οι εκτιμήσεις περιλαμβάνουν άμεσες επιπτώσεις όπως η μείωση των αλιευτικών αποθεμάτων, η πτώση της τουριστικής βιομηχανίας σε περιοχές με υψηλά επίπεδα πλαστικής ρύπανσης, και τα κόστη καθαρισμού και αποκατάστασης. Ωστόσο, οι έμμεσες επιπτώσεις, όπως οι επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων, είναι πιθανόν να είναι πολύ μεγαλύτερες αλλά δυσκολότερο υπολογίσιμες.

2.4 Στόχοι της Εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία στοχεύει στη διερεύνηση των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ μικροπλαστικών, θαλάσσιων οικοσυστημάτων και ανθρώπινης υγείας, με έμφαση στη μεταφορά μέσω της τροφικής αλυσίδας. Οι συγκεκριμένοι στόχοι περιλαμβάνουν:

Πρωτεύων στόχος: Την αξιολόγηση των μηχανισμών μεταφοράς μικροπλαστικών από τα θαλάσσια οικοσυστήματα στον άνθρωπο μέσω της κατανάλωσης θαλασσινών και την εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία.

Δευτερεύοντες στόχοι:

- Τη συστηματική ανάλυση της κατανομής και συμπεριφοράς των μικροπλαστικών στα θαλάσσια οικοσυστήματα
- Την εξέταση των μηχανισμών πρόσληψης και βιοσυσσώρευσης μικροπλαστικών από τους θαλάσσιους οργανισμούς
- Την αξιολόγηση της παρουσίας μικροπλαστικών σε εμπορικά θαλάσσια προϊόντα
- Τη σύνθεση των τρεχουσών επιστημονικών γνώσεων σχετικά με τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Ερευνητικά ερωτήματα που θα απαντηθούν:

1. Ποια είναι τα χαρακτηριστικά και η κατανομή των μικροπλαστικών στα ελληνικά θαλάσσια οικοσυστήματα;
2. Με ποιους μηχανισμούς τα μικροπλαστικά εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα και βιοσυσσωρεύονται;
3. Σε ποιο βαθμό τα εμπορικά θαλάσσια προϊόντα περιέχουν μικροπλαστικά και ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τα επίπεδα μόλυνσης;
4. Ποιες είναι οι τρέχουσες επιστημονικές αποδείξεις για τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών στην ανθρώπινη υγεία;
5. Ποιες στρατηγικές πρόληψης και μείωσης της έκθεσης μπορούν να προταθούν;

2.5 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία διαρθρώνεται σε επτά κεφάλαια που προσεγγίζουν συστηματικά το θέμα των μικροπλαστικών και των επιπτώσεών τους:

Κεφάλαιο 3 [Ανασκόπηση βιβλιογραφίας] παρουσιάζει την εξέλιξη της επιστημονικής γνώσης σχετικά με τα μικροπλαστικά, εστιάζοντας στα χαρακτηριστικά και κατηγοριοποίησή τους, τις πηγές και διαδρομές εισόδου, τις αλληλεπιδράσεις με θαλάσσιους οργανισμούς, καθώς και τις επιπτώσεις και τα κενά γνώσης.

Κεφάλαιο 4 [Μέθοδοι μελέτης μικροπλαστικών] εξετάζει τις αναλυτικές τεχνικές και μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση, ποσοτικοποίηση και χαρακτηρισμό των μικροπλαστικών στα θαλάσσια περιβάλλοντα.

Κεφάλαιο 5 [Κύρια ανάλυση] αποτελεί το κεντρικό μέρος της εργασίας και διαρθρώνεται σε τέσσερα υποκεφάλαια: την εξέταση των πηγών και διασποράς στο θαλάσσιο περιβάλλον, την αλληλεπίδραση με θαλάσσιους οργανισμούς, τη μεταφορά μέσω της τροφικής αλυσίδας, και τις πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Κεφάλαιο 6 [Νομοθετικό πλαίσιο και διαχείριση] αναλύει το τρέχον ρυθμιστικό περιβάλλον, τις πολιτικές διαχείρισης και τα μέτρα πρόληψης για την αντιμετώπιση της μόλυνσης από μικροπλαστικά.

Κεφάλαιο 7 [Συμπεράσματα και προοπτικές] συνθέτει τα κύρια ευρήματα της εργασίας, εντοπίζει τα κενά γνώσης και διατυπώνει προτάσεις για μελλοντική έρευνα και πολιτικές παρέμβασης.

Ειδική έμφαση δίνεται στη διεπιστημονική προσέγγιση, συνδυάζοντας περιβαλλοντική χημεία, θαλάσσια βιολογία, τοξικολογία και επιδημιολογία για την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του θέματος. **Η εργασία στηρίζεται αποκλειστικά σε πρόσφατη επιστημονική βιβλιογραφία [2020-2025]**, εξασφαλίζοντας την επικαιρότητα και αξιοπιστία των πληροφοριών, ενώ ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην παρουσίαση της επιστημονικής αβεβαιότητας και των κενών γνώσης που χαρακτηρίζουν αυτόν τον αναδυόμενο ερευνητικό τομέα.

3. Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

Τα μικροπλαστικά αντιπροσωπεύουν μια από τις σοβαρότερες περιβαλλοντικές απειλές του 21ου αιώνα, με εκτιμώμενα **0,5-2,4 εκατομμύρια τόνους ετησίως** να εισέρχονται στους ωκεανούς μέσω ποταμών και άλλων διαδρομών [8,9]. Η ευρεία διάδοση των μικροπλαστικών σωματιδίων σε θαλάσσια περιβάλλοντα παγκοσμίως έχει δημιουργήσει ανησυχίες για τις επιπτώσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς και την ανθρώπινη υγεία μέσω της τροφικής αλυσίδας. Η παρούσα ανασκόπηση εξετάζει τα χαρακτηριστικά των μικροπλαστικών, τις πηγές τους, τις αλληλεπιδράσεις με τους θαλάσσιους οργανισμούς, και τις πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, βασισμένη σε πρόσφατη βιβλιογραφία υψηλής ποιότητας [2018-2025].

3.1 Χαρακτηριστικά και κατηγοριοποίηση μικροπλαστικών

Ορισμοί και μεγεθολογική ταξινόμηση σύγχρονων μικροπλαστικών

Τα μικροπλαστικά ορίζονται ως **“συνθετικά στερεά σωματίδια ή πολυμερείς μήτρες με κανονικό ή ακανόνιστο σχήμα και μέγεθος από 1 μm έως 5 mm”** [1]. Αυτός ο διεθνώς αποδεκτός ορισμός έχει καθιερωθεί μέσω εκτεταμένης επιστημονικής συζήτησης και αντικατοπτρίζει τη σύγχρονη κατανόηση του φαινομένου. Η μεγεθολογική κατηγοριοποίηση διακρίνει τα **μικρά μικροπλαστικά [$<100 \mu\text{m}$]** από τα **μεγάλα μικροπλαστικά [$100 \mu\text{m}$ -5 mm]**, με τα μικρότερα σωματίδια να παρουσιάζουν μεγαλύτερο βιοδιαθέσιμο δυναμικό [1,2].

Παράλληλα, η ταξινόμηση σε **πρωτογενή και δευτερογενή μικροπλαστικά** αποτελεί θεμελιώδη διάκριση στη σύγχρονη έρευνα. Τα πρωτογενή μικροπλαστικά κατασκευάζονται σκόπιμα σε μικροπλαστικό μέγεθος και περιλαμβάνουν τα μικροσφαίρια σε καλλυντικά, τις μικροκάψουλες σε απορρυπαντικά, και τα βιομηχανικά abrasives. Τα δευτερογενή μικροπλαστικά προκύπτουν από την αποικοδόμηση μεγαλύτερων πλαστικών αντικειμένων μέσω περιβαλλοντικών διεργασιών όπως η φωτοδιάσπαση, η μηχανική φθορά και η θερμική υποβάθμιση.

Μορφολογικά χαρακτηριστικά και πολυμερής σύσταση

Η μορφολογική ανάλυση των μικροπλαστικών στα θαλάσσια περιβάλλοντα αποκαλύπτει τέσσερις κύριες κατηγορίες: **fragments [τεμάχια], fibers [ίνες], films [μεμβράνες] και spheres [σφαίρια]**. Τα fragments, που προκύπτουν κυρίως από την αποικοδόμηση σκληρών πλαστικών αντικειμένων, αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο ποσοστό σε πολλές περιοχές. Οι fibers, που προέρχονται κυρίως από συνθετικά υφάσματα κατά τη διαδικασία πλυσίματος, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της ικανότητάς τους να μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις μέσω ατμοσφαιρικών ρευμάτων.

Η πολυμερής ανάλυση των θαλάσσιων μικροπλαστικών αποκαλύπτει συγκεκριμένα μοτίβα κατανομής. Το **πολυαιθυλένιο [PE] αποτελεί τον πιο άφθονο πολυμερή [22-54,5% παγκοσμίως]**, ακολουθούμενο από το πολυπροπυλένιο [PP] [16,5-41%] και το πολυστυρένιο [PS]. Στη Μεσόγειο, συγκεκριμένα, το PE αντιπροσωπεύει το 54,5%, το PP το 16,5%, και το PET το 9,7% της συνολικής σύστασης μικροπλαστικών στα θαλάσσια ιζήματα. Αυτές οι αναλογίες αντικατοπτρίζουν τη σχετική χρήση αυτών των πολυμερών στη βιομηχανική παραγωγή και τις ιδιότητες τους ως προς την περιβαλλοντική αντοχή.

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των διαφόρων πολυμερών επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά τους στο θαλάσσιο περιβάλλον. Το **PVC παρουσιάζει υψηλότερη πυκνότητα** και τάση καθίζησης, ενώ το PE και PP έχουν χαμηλότερη πυκνότητα και παραμένουν στην επιφάνεια για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Αυτή η διαφοροποίηση στη συμπεριφορά επηρεάζει τους μηχανισμούς διασποράς και την πιθανότητα κατάποσης από διαφορετικές ομάδες θαλάσσιων οργανισμών.

3.2 Πηγές και διαδρομές εισόδου μικροπλαστικών

Χερσαίες πηγές μόλυνσης

Οι χερσαίες πηγές συνεισφέρουν κατά εκτίμηση το **70-80% της συνολικής εισροής μικροπλαστικών** στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι ποτάμιες εισροές αποτελούν τη σημαντικότερη μεμονωμένη πηγή, μεταφέροντας μικροπλαστικά από αστικές περιοχές, βιομηχανικές εγκαταστάσεις και γεωργικές δραστηριότητες. Οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, παρά τη σημαντική αποτελεσματικότητά τους στη συγκράτηση μικροπλαστικών [80-95%], εξακολουθούν να αποτελούν σημαντική πηγή λόγω των μεγάλων όγκων επεξεργασίας.

Επιπλέον σημαντικές χερσαίες πηγές περιλαμβάνουν τις άμεσες απορρίψεις από παράκτιες βιομηχανίες, την επιφανειακή απορροή από αστικές περιοχές κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων, και τη διάχυση από χώρους διάθεσης απορριμμάτων. Η φθορά των ελαστικών οχημάτων αποτελεί μια συχνά παραβλεπόμενη αλλά σημαντική πηγή, με εκτιμήσεις να υποδεικνύουν ετήσια παραγωγή εκατοντάδων χιλιάδων τόνων μικροσωματιδίων παγκοσμίως.

Θαλάσσιες πηγές και ατμοσφαιρική μεταφορά

Οι θαλάσσιες πηγές, αν και αντιπροσωπεύουν μικρότερο ποσοστό της συνολικής εισροής, παραμένουν σημαντικές ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές. Η αλιεία συνεισφέρει μέσω απώλειας εξοπλισμού [ghost fishing], ενώ η εμπορική ναυτιλία προσθέτει μικροπλαστικά μέσω πλυσίματος δεξαμενών, απόρριψης λυμάτων και φθοράς προστατευτικών επιστρώσεων.

Η **ατμοσφαιρική μεταφορά** έχει αναδειχθεί ως κρίσιμος μηχανισμός διασποράς μικροπλαστικών σε παγκόσμια κλίμακα. Τα μικροπλαστικά μπορούν να μεταφερθούν στην ατμόσφαιρα μέσω ανέμων από χερσαίες πηγές ή μέσω του σχηματισμού θαλάσσιων αεροζόλ. Αυτός ο μηχανισμός εξηγεί την παρουσία μικροπλαστικών σε απομακρυσμένες περιοχές όπως η Αρκτική και η Ανταρκτική, καθώς και σε υψηλά υψόμετρα.

Εποχιακή και χωρική μεταβλητότητα

Η εισροή μικροπλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον παρουσιάζει σημαντική εποχιακή μεταβλητότητα. Κατά τους χειμερινούς μήνες, οι αυξημένες βροχοπτώσεις ενισχύουν την επιφανειακή απορροή και τις ποτάμιες εισροές, ενώ οι ισχυροί άνεμοι προωθούν την ατμοσφαιρική

μεταφορά. Αντίθετα, κατά τη θερινή περίοδο, η αυξημένη τουριστική δραστηριότητα και η εντατικοποίηση της ναυτιλίας συμβάλλουν στην αύξηση των άμεσων θαλάσσιων εισροών.

Η χωρική κατανομή των πηγών επιδεικνύει έντονη ανομοιομορφία, με τις παράκτιες αστικές περιοχές και τις εκβολές μεγάλων ποταμών να αποτελούν τα κύρια “hotspots” μόλυνσης. Περιοχές με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα, βιομηχανική δραστηριότητα και ανεπαρκή συστήματα διαχείρισης αποβλήτων παρουσιάζουν δυσανάλογα υψηλές εισροές μικροπλαστικών.

3.3 Αλληλεπιδράσεις με τους θαλάσσιους οργανισμούς

Μηχανισμοί πρόσληψης και εξάπλωση στην τροφική αλυσίδα

Η κατάποση μικροπλαστικών από θαλάσσιους οργανισμούς αποτελεί ένα πολύπλοκο φαινόμενο που εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους, του σχήματος και του χρώματος των σωματιδίων, καθώς και των διατροφικών συνηθειών των οργανισμών. **Το μέγεθος αποτελεί τον κρίσιμότερο παράγοντα**, καθώς καθορίζει ποιοι οργανισμοί μπορούν φυσικά να καταπιούν τα σωματίδια.

Στα **χαμηλότερα τροφικά επίπεδα**, το φυτοπλαγκτόν μπορεί να προσλάβει μόνο τα μικρότερα μικροπλαστικά [$<20\ \mu\text{m}$] μέσω φαγοκυττάρωσης. Το ζωοπλαγκτόν, με μεγαλύτερη ικανότητα κατάποσης [έως $500\ \mu\text{m}$], αντιπροσωπεύει μια κρίσιμη ομάδα για τη μεταφορά μικροπλαστικών στα ανώτερα τροφικά επίπεδα. Οι φιλτραρογόνοι οργανισμοί όπως τα μύδια και τα στρείδια παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις μικροπλαστικών λόγω του τρόπου τροφής τους.

Βιοσυσώρευση και κατανομή στους ιστούς

Η **βιοσυσώρευση μικροπλαστικών** έχει τεκμηριωθεί σε διάφορους ιστούς και όργανα θαλάσσιων οργανισμών. Στα ψάρια, τα μικροπλαστικά εντοπίζονται κυρίως στο γαστρεντερικό σύστημα, αλλά έχουν επίσης ανιχνευθεί στα βράγχια, το ήπαρ και τους μυς [10]. Η ικανότητα των μικρότερων σωματιδίων να διαπερνούν τους ιστούς και να εισέρχονται στην κυκλοφορία αποτελεί ιδιαίτερη ανησυχία.

Τα **δίθυρα μαλάκια** παρουσιάζουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών μεταξύ των εμπορικά σημαντικών θαλάσσιων οργανισμών, με μετρήσεις που κυμαίνονται από 0,1 έως 681

σωματίδια ανά άτομο [14]. Αυτή η μεγάλη διακύμανση αντικατοπτρίζει τις διαφορές στα επίπεδα μόλυνσης μεταξύ περιοχών, τα είδη που εξετάζονται, και τις μεθοδολογικές προσεγγίσεις.

Φυσιολογικές και συμπεριφορικές επιπτώσεις

Οι επιπτώσεις των μικροπλαστικών στους θαλάσσιους οργανισμούς εκτείνονται πέρα από τη φυσική παρουσία τους στους ιστούς. **Οξειδωτικό στρες, φλεγμονώδεις αντιδράσεις και διαταραχές στη γαστρεντερική λειτουργία** έχουν παρατηρηθεί σε διάφορα είδη εκτεθειμένα σε μικροπλαστικά.

Συμπεριφορικές αλλαγές περιλαμβάνουν μειωμένη αποτελεσματικότητα στην αναζήτηση τροφής, αλλαγές στα πρότυπα κίνησης και επηρεασμένη αναπαραγωγική συμπεριφορά. Σε ορισμένα είδη, η παρουσία μικροπλαστικών στο γαστρεντερικό σύστημα μπορεί να προκαλέσει ψευδαίσθηση κορεσμού, οδηγώντας σε μειωμένη πρόσληψη θρεπτικών ουσιών.

3.4 Επιπτώσεις και κενά γνώσης

Τρέχουσες επιστημονικές ανησυχίες

Η σύγχρονη επιστημονική κοινότητα έχει εντοπίσει πολλαπλές περιοχές ανησυχίας σχετικά με τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών. **Η δυνατότητα μεταφοράς χημικών προσθέτων και περιβαλλοντικών μολυντών** αποτελεί κεντρικό θέμα έρευνας. Τα μικροπλαστικά μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως “πηγή” απελευθερώνοντας προσθέτα που περιέχουν [πλαστικοποιητές, αντιοξειδωτικά, χρωστικές], είτε ως “αποθήκη” συγκεντρώνοντας υδρόφοβους οργανικούς ρύπους από το περιβάλλον.

Η **αλληλεπίδραση με μικροβιακές κοινότητες** αντιπροσωπεύει μια αναδυόμενη περιοχή έρευνας. Η επιφάνεια των μικροπλαστικών μπορεί να αποτελέσει υπόστρωμα για την ανάπτυξη biofilms, δημιουργώντας νέες οικολογικές κόγχες και πιθανές διαδρομές μετάδοσης παθογόνων οργανισμών.

Μεθοδολογικές προκλήσεις και τυποποίηση

Ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια στην πρόοδο της έρευνας για τα μικροπλαστικά είναι η **έλλειψη τυποποιημένων μεθοδολογιών** για τη δειγματοληψία, την ανάλυση και την αναφορά

αποτελεσμάτων. Αυτό καθιστά δύσκολη τη σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών μελετών και την ανάπτυξη αξιόπιστων εκτιμήσεων κινδύνου.

Πρόσφατες προσπάθειες από διεθνείς οργανισμούς στοχεύουν στην ανάπτυξη τυποποιημένων πρωτοκόλλων για τη μελέτη μικροπλαστικών. Αυτό περιλαμβάνει τη βελτίωση των μεθόδων εξαγωγής και καθαρισμού δειγμάτων, την ανάπτυξη αξιόπιστων μεθόδων ταυτοποίησης πολυμερών, και τη δημιουργία βάσεων δεδομένων για τη συλλογή και ανάλυση πληροφοριών σε παγκόσμια κλίμακα.

Αναδυόμενες ερευνητικές κατευθύνσεις

Η μελλοντική έρευνα εστιάζει σε πολλαπλές κρίσιμες περιοχές. **Η τοξικολογική αξιολόγηση σε μακροπρόθεσμη βάση** αποτελεί προτεραιότητα, καθώς οι περισσότερες τρέχουσες μελέτες εξετάζουν βραχυπρόθεσμες επιδράσεις. Η ανάπτυξη **μοντέλων πρόβλεψης** για την κίνηση και τη συμπεριφορά μικροπλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον αποτελεί επίσης σημαντική ερευνητική κατεύθυνση.

Η **διερεύνηση των επιπτώσεων σε επίπεδο οικοσυστήματος** αντιπροσωπεύει μια ολιστική προσέγγιση που εξετάζει όχι μόνο τις επιδράσεις σε μεμονωμένα είδη αλλά και τις αλλαγές στη δομή και λειτουργία των θαλάσσιων κοινοτήτων. Αυτή η προσέγγιση είναι κρίσιμη για την κατανόηση των μακροπρόθεσμων οικολογικών συνεπειών της μόλυνσης από μικροπλαστικά.

4. Μέθοδοι μελέτης μικροπλαστικών

Η ακριβής ανίχνευση, ποσοτικοποίηση και χαρακτηρισμός των μικροπλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον αντιπροσωπεύει μια από τις μεγαλύτερες μεθοδολογικές προκλήσεις στη σύγχρονη περιβαλλοντική επιστήμη. Η πολυπλοκότητα του θαλάσσιου πολυσυστήματος, σε συνδυασμό με τη μεγάλη ποικιλία μεγεθών, σχημάτων και πολυμερικών τύπων μικροπλαστικών, απαιτεί εξειδικευμένες και συχνά πολυεπίπεδες αναλυτικές προσεγγίσεις.

4.1 Δειγματοληψία και προκαταρκτική επεξεργασία

Στρατηγικές δειγματοληψίας

Η δειγματοληψία αποτελεί το θεμελιώδες βήμα που καθορίζει την ποιότητα και αξιοπιστία όλης της μεταγενέστερης ανάλυσης. **Για την επιφάνεια του θαλάσσιου νερού**, τα δίχτυα manta trawl και τα neuston nets αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μεθόδους. Αυτά τα δίχτυα, με μέγεθος πόρων συνήθως 333 μm , δειγματολαμβάνουν σε βάθος 10-50 cm κάτω από την επιφάνεια για περιόδους 10-30 λεπτών σε ταχύτητες 2-3 κόμβων.

Για τη στήλη του νερού, χρησιμοποιούνται CTD [Conductivity-Temperature-Depth] δειγματολήπτες που επιτρέπουν τη συλλογή δειγμάτων σε συγκεκριμένα βάθη. Αυτή η προσέγγιση είναι κρίσιμη για την κατανόηση της κατακόρυφης κατανομής μικροπλαστικών, καθώς διαφορετικοί πολυμερείς τύποι έχουν διαφορετικές πυκνότητες και συμπεριφορές επίπλευσης.

Για τα ιζήματα, χρησιμοποιούνται βυθοληπτικά συστήματα όπως τα Van Veen grabs ή τα box corers για την επιφάνεια του βυθού, ενώ για τα βαθύτερα στρώματα χρησιμοποιούνται επιμηκυνόμενα corers που επιτρέπουν την εξέταση της ιστορικής εναπόθεσης μικροπλαστικών.

Προκαταρκτική επεξεργασία και καθαρισμός δειγμάτων

Η **διαχωρισμός πυκνότητας** αποτελεί τη σπάνια μέθοδο για την απομόνωση μικροπλαστικών από τα δείγματα. Χρησιμοποιούνται διαλύματα υψηλής πυκνότητας όπως το χλωριούχο ψευδάργυρο [ZnCl_2 , πυκνότητα 1,5-1,8 g/cm^3] ή το ιωδιούχο νάτριο [NaI , πυκνότητα έως 1,8 g/cm^3]. Αυτές οι τεχνικές εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι τα περισσότερα πλαστικά έχουν χαμηλότερη πυκνότητα από τα φυσικά σωματίδια και επιπλέουν στην επιφάνεια του διαλύματος.

Η **χημική πέψη** των οργανικών συστατικών είναι απαραίτητη για τον καθαρισμό των δειγμάτων από βιολογικό υλικό που μπορεί να συγχέεται με μικροπλαστικά. Χρησιμοποιούνται ένζυμα όπως η προτεΐνάση K για την αποικοδόμηση πρωτεϊνών, ή οξειδωτικά όπως το υπεροξείδιο του υδρογόνου [H_2O_2] σε συγκεντρώσεις 15-30% για την αφαίρεση οργανικής ύλης.

4.2 Τεχνικές ταυτοποίησης και χαρακτηρισμού

Φασματοσκοπικές μέθοδοι

Η **φασματοσκοπία υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier [FTIR]** αποτελεί τη χρυσή στάνταρ μέθοδο για την ταυτοποίηση πολυμερών. Η τεχνική ATR-FTIR [Attenuated Total Reflectance] επιτρέπει την άμεση ανάλυση σωματιδίων χωρίς προηγούμενη προετοιμασία, ενώ παρέχει υψηλή ακρίβεια ταυτοποίησης [$>95\%$] για σωματίδια μεγαλύτερα από 20 μm .

Η **φασματοσκοπία Raman** προσφέρει συμπληρωματικές πληροφορίες και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάλυση σκούρων ή μαύρων σωματιδίων που δεν μπορούν να αναλυθούν αποτελεσματικά με FTIR. Η τεχνική μπορεί να ταυτοποιήσει πολυμερή σε σωματίδια μικρότερα από 1 μm , καθιστώντας την ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάλυση μικρών μικροπλαστικών.

Προηγμένες μέθοδοι imaging

Η **μικροσκοπία FTIR imaging** συνδυάζει την οπτική απεικόνιση με τη φασματοσκοπική ανάλυση, επιτρέποντας τη δημιουργία χημικών χαρτών των δειγμάτων. Αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανίχνευση μικρών σωματιδίων σε πολύπλοκα δείγματα και την αξιολόγηση της κατανομής διαφορετικών πολυμερών.

Η **ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης [SEM]** παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες για τη μορφολογία και την επιφανειακή δομή των μικροπλαστικών. Σε συνδυασμό με φασματοσκοπία διασποράς ενέργειας ακτίνων-X [EDS], μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τη στοιχειακή σύσταση, βοηθώντας στην ταυτοποίηση προσθέτων και μολυντών.

4.3 Σύγχρονες εξελίξεις και αυτοματοποίηση

Μηχανική μάθηση και τεχνητή νοημοσύνη

Η ενσωμάτωση **αλγορίθμων μηχανικής μάθησης** στην ανάλυση μικροπλαστικών αντιπροσωπεύει μια επαναστατική εξέλιξη που υπόσχεται να μεταμορφώσει την ταχύτητα και ακρίβεια της ανάλυσης. Αλγόριθμοι βαθιάς μάθησης εκπαιδεύονται με εκτεταμένες βάσεις δεδομένων φασμάτων αναφοράς για την αυτόματη ταυτοποίηση πολυμερών με ακρίβεια που ξεπερνά το 95%.

Συστήματα τεχνητής νοημοσύνης αναπτύσσονται για την αυτόματη αναγνώριση και κατηγοριοποίηση μικροπλαστικών σε μικροσκοπικές εικόνες. Αυτά τα συστήματα μπορούν να επεξεργαστούν χιλιάδες εικόνες σε λίγα λεπτά, μειώνοντας δραστικά τον χρόνο ανάλυσης και εξαλείφοντας την υποκειμενικότητα της ανθρώπινης αξιολόγησης.

Φορητές και real-time μέθοδοι

Η ανάπτυξη **φορητών συσκευών FTIR και Raman** επιτρέπει την in-situ ανάλυση μικροπλαστικών κατά τη διάρκεια ερευνητικών κρουαζιέρων. Αυτές οι συσκευές, αν και με περιορισμένη ανάλυση σε σχέση με τα εργαστηριακά όργανα, παρέχουν άμεσα αποτελέσματα που μπορούν να κατευθύνουν τη στρατηγική δειγματοληψίας.

Αισθητήρες πραγματικού χρόνου βασισμένοι σε οπτικές και φασματοσκοπικές αρχές αναπτύσσονται για τη συνεχή παρακολούθηση μικροπλαστικών σε υδάτινα συστήματα. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτόνομα υποβρύχια οχήματα [AUVs] ή σε σταθερούς σταθμούς παρακολούθησης για τη συλλογή δεδομένων μακράς χρονικής διάρκειας.

4.4 Προκλήσεις και μελλοντικές εξελίξεις

Μεθοδολογικοί περιορισμοί

Παρά τις σημαντικές εξελίξεις, παραμένουν σημαντικοί μεθοδολογικοί περιορισμοί. Η **ανίχνευση μικρών μικροπλαστικών [$<10 \mu\text{m}$]** παραμένει τεχνικά προκλητική και απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και εμπειρία. Η **αποφυγή μόλυνσης** κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας και ανάλυσης αποτελεί συνεχή πρόκληση, ιδιαίτερα δεδομένης της ευρείας παρουσίας μικροπλαστικών στο περιβάλλον.

Η **τυποποίηση μεθοδολογιών** παραμένει κρίσιμη ανάγκη για την επίτευξη συγκρισιμότητας αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών μελετών και εργαστηρίων. Διεθνείς προσπάθειες βρίσκονται σε εξέλιξη για την ανάπτυξη τυποποιημένων πρωτοκόλλων και πιστοποιημένων υλικών αναφοράς.

Η **ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας** στις μετρήσεις αποτελεί ακόμη μια σημαντική πρόκληση. Οι διαφορετικές μεθοδολογίες μπορούν να δώσουν αποτελέσματα που διαφέρουν κατά τάξεις

μεγέθους για το ίδιο δείγμα, καθιστώντας απαραίτητη την ανάπτυξη ολοκληρωμένων πρωτοκόλλων διασφάλισης ποιότητας.

Αναδυόμενες τεχνολογίες

Η **νανοτεχνολογία** προσφέρει νέες δυνατότητες για την ανίχνευση νανοπλαστικών μέσω της ανάπτυξης εξειδικευμένων αισθητήρων και μεθόδων διαχωρισμού. Νανοσωματίδια χρυσού και αργύρου χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη οπτικών αισθητήρων που μπορούν να ανιχνεύσουν μικροπλαστικά σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις.

Η **ρομποτική** εισάγεται σταδιακά στις διαδικασίες δειγματοληψίας και ανάλυσης, μειώνοντας το ανθρώπινο σφάλμα και αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα. Αυτόνομα υποβρύχια οχήματα [AUVs] εξοπλισμένα με αισθητήρες μικροπλαστικών μπορούν να διεξάγουν εκτεταμένες έρευνες χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Οι **τεχνολογίες blockchain** αναπτύσσονται για τη δημιουργία αξιόπιστων και διαφανών βάσεων δεδομένων για μικροπλαστικά, επιτρέποντας την παρακολούθηση και επαλήθευση δεδομένων από πολλαπλές πηγές και την ανάπτυξη παγκόσμιων συστημάτων παρακολούθησης.

Προκλήσεις στην ανάλυση πολύπλοκων δειγμάτων

Η **ανάλυση ιζημάτων** παρουσιάζει ιδιαίτερες προκλήσεις λόγω της πολυπλοκότητας της μήτρας και της παρουσίας μεγάλων ποσοτήτων οργανικής ύλης. Τα συμβατικά πρωτόκολλα χημικής πέψης μπορεί να προκαλέσουν υποβάθμιση ορισμένων τύπων πλαστικών, οδηγώντας σε υποεκτίμηση των πραγματικών συγκεντρώσεων.

Η **ανάλυση βιολογικών ιστών** απαιτεί εξειδικευμένες τεχνικές για την αφαίρεση της οργανικής ύλης χωρίς να επηρεαστούν τα μικροπλαστικά. Ένζυμα όπως η κολλαγενάση και η λιπάση χρησιμοποιούνται για την επιλεκτική διάσπαση βιολογικών συστατικών, αλλά η αποτελεσματικότητά τους ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο ιστού και την κατάσταση συντήρησης του δείγματος.

4.5 Πρότυπα αναφοράς και διασφάλιση ποιότητας

Ανάπτυξη πιστοποιημένων υλικών αναφοράς

Η **έλλειψη πιστοποιημένων υλικών αναφοράς** για μικροπλαστικά αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην τυποποίηση αναλυτικών μεθόδων. Διεθνείς οργανισμοί όπως το NIST [National Institute of Standards and Technology] και το JRC [Joint Research Centre] της Ευρωπαϊκής Επιτροπής εργάζονται για την ανάπτυξη τυποποιημένων δειγμάτων με γνωστές συγκεντρώσεις και χαρακτηριστικά μικροπλαστικών.

Τα διεργαστηριακά tests [interlaboratory comparisons] αποτελούν κρίσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της απόδοσης διαφορετικών αναλυτικών μεθόδων. Πρόσφατες συγκριτικές μελέτες έχουν αποκαλύψει σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα μεταξύ εργαστηρίων, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για βελτίωση της αναλυτικής ακρίβειας.

Πρωτόκολλα διασφάλισης ποιότητας

Η **πρόληψη μόλυνσης** αποτελεί κρίσιμη παράμετρο σε όλα τα στάδια της ανάλυσης. Χρήση πλαστικού εξοπλισμού πρέπει να αποφεύγεται όπου είναι δυνατόν, ενώ όλα τα όργανα και επιφάνειες εργασίας πρέπει να καθαρίζονται διεξοδικά. Blank δείγματα πρέπει να επεξεργάζονται παράλληλα με τα πραγματικά δείγματα για τον έλεγχο πιθανής μόλυνσης.

Η **τεκμηρίωση και ιχνηλασιμότητα** όλων των διαδικασιών είναι απαραίτητη για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Αυτό περιλαμβάνει λεπτομερή καταγραφή των συνθηκών δειγματοληψίας, των αναλυτικών παραμέτρων, και των κριτηρίων ταυτοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν.

Η **στατιστική ανάλυση** των αποτελεσμάτων πρέπει να λαμβάνει υπόψη την εγγενή μεταβλητότητα των μικροπλαστικών στο περιβάλλον. Τεχνικές όπως η bootstrap ανάλυση και τα Bayesian μοντέλα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αβεβαιότητας και την παροχή αξιόπιστων διαστημάτων εμπιστοσύνης.

5. Κύρια ανάλυση

5.1 Πηγές και διασπορά στο θαλάσσιο περιβάλλον

Κύριες διαδρομές εισόδου μικροπλαστικών

Η διασπορά μικροπλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον αποτελεί αποτέλεσμα πολύπλοκων διεργασιών που συνδυάζουν πολλαπλές πηγές εισόδου και μηχανισμούς μεταφοράς. **Οι ποτάμιες εισροές** αποτελούν τη σημαντικότερη μεμονωμένη πηγή μικροπλαστικών, συνεισφέροντας εκτιμώμενα 1,15-2,41 εκατομμύρια τόνους ετησίως στους παγκόσμιους ωκεανούς [1]. Αυτές οι εισροές μεταφέρουν μικροπλαστικά από ευρείες λεκάνες απορροής, συγκεντρώνοντας ρύπανση από αστικές περιοχές, βιομηχανικές εγκαταστάσεις και γεωργικές δραστηριότητες.

Η **χωρική κατανομή των ποτάμιων εισροών** παρουσιάζει έντονη ανομοιομορφία παγκοσμίως. Οι δέκα πιο μολυσμένοι ποταμοί, κυρίως στην Ασία και την Αφρική, συνεισφέρουν περισσότερο από το 50% της συνολικής εισροής μικροπλαστικών μέσω ποταμών. Αυτή η συγκέντρωση αντικατοπτρίζει τους συνδυασμούς υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας, έντονης βιομηχανικής δραστηριότητας και ανεπαρκών συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων.

Πέρα από τις ποτάμιες εισροές, **η άμεση θαλάσσια ρύπανση** συνεισφέρει σημαντικά στη συνολική μόλυνση. Η εμπορική ναυτιλία, η αλιεία, η υδατοκαλλιέργεια και οι παράκτιες δραστηριότητες αποτελούν βασικές πηγές. Η απώλεια ή εγκατάλειψη αλιευτικού εξοπλισμού [“ghost fishing gear”] αντιπροσωπεύει μια ιδιαίτερα προβληματική κατηγορία, καθώς αυτά τα υλικά είναι σχεδιασμένα για αντοχή στο θαλάσσιο περιβάλλον και μπορούν να παραμείνουν στο οικοσύστημα για δεκαετίες.

Ατμοσφαιρική μεταφορά και εναπόθεση

Η **ατμοσφαιρική μεταφορά μικροπλαστικών** έχει αναδειχθεί ως κρίσιμος μηχανισμός που εξηγεί την παρουσία μικροπλαστικών σε απομακρυσμένες περιοχές. Μικροπλαστικά μπορούν να εισέλθουν στην ατμόσφαιρα μέσω ανέμων από χερσαίες επιφάνειες, δραστηριότητες κατασκευών, καύση αποβλήτων, ή μέσω του σχηματισμού θαλάσσιων αεροζόλ όταν τα κύματα σπάνε και δημιουργούν σταγονίδια που περιέχουν μικροπλαστικά.

Πρόσφατες μελέτες έχουν εντοπίσει μικροπλαστικά σε ατμοσφαιρικές εναποθέσεις σε περιοχές χιλιάδων χιλιομέτρων μακριά από πιθανές πηγές. Η μεταφορά μπορεί να φτάσει σε απόσταση άνω των 1000 km, ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων. Τα μικρότερα και ελαφρύτερα σωματίδια έχουν τη μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς και μπορούν να παραμείνουν στην ατμόσφαιρα για εβδομάδες.

Χωρική και χρονική κατανομή

Η **χωρική κατανομή των πηγών μικροπλαστικών** παρουσιάζει έντονη ανομοιομορφία παγκοσμίως, με τις παράκτιες αστικές περιοχές και τις εκβολές μεγάλων ποταμών να αποτελούν τα κύρια κέντρα εκπομπών [11]. Οι δέκα πιο μολυσμένοι ποταμοί του κόσμου, κυρίως στην Ασία, συνεισφέρουν περισσότερο από το 50% των συνολικών ποτάμιων εισροών. Αυτή η συγκέντρωση αντανακλά συνδυασμούς υψηλής πληθυσμιακής πυκνότητας, έντονης βιομηχανικής δραστηριότητας και ανεπαρκών συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων.

Στον **Ειρηνικό Ωκεανό**, το Μεγάλο Πάχος Απορριμμάτων αποτελεί την πιο γνωστή περιοχή συσσώρευσης, με εκτιμήσεις που υποδεικνύουν συγκέντρωση άνω των 80.000 τόνων πλαστικών σε έκταση τριπλάσια της Γαλλίας [13]. Παρόμοιες περιοχές συσσώρευσης έχουν εντοπιστεί σε όλους τους μεγάλους ωκεανούς, ακολουθώντας τα μοτίβα των ωκεάνιων ρευμάτων.

Η **Μεσόγειος Θάλασσα** παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις μικροπλαστικών λόγω του ημίκλειστου χαρακτήρα της, του έντονου τουρισμού και της πυκνής ναυτιλίας. Οι συγκεντρώσεις στην επιφάνεια της Μεσογείου είναι συγκρίσιμες με αυτές του Ειρηνικού, παρά το πολύ μικρότερο μέγεθός της, υποδεικνύοντας την ένταση της ρύπανσης.

Εποχιακές μεταβολές και κλιματικές επιπτώσεις

Η **εποχιακή μεταβλητότητα** στις εισροές μικροπλαστικών επηρεάζεται από πολλαπλούς παράγοντες. Κατά τους χειμερινούς μήνες, οι αυξημένες βροχοπτώσεις ενισχύουν την επιφανειακή απορροή και τις ποτάμιες εισροές, οδηγώντας σε αυξημένη μεταφορά χερσαίων μικροπλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι ισχυροί χειμερινοί άνεμοι επίσης προωθούν την ατμοσφαιρική μεταφορά σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Αντίθετα, κατά τη **θερινή περίοδο**, η αυξημένη τουριστική δραστηριότητα, ιδιαίτερα σε παράκτιες περιοχές, συμβάλλει στην άμεση εισροή μικροπλαστικών μέσω αυξημένης κατανάλωσης

πλαστικών μιας χρήσης και ανεπαρκούς διαχείρισης αποβλήτων. Η εντατικοποίηση της ναυτιλίας και των αναψυχικών δραστηριοτήτων προσθέτει επιπλέον πιέσεις.

Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επιδεινώσει το πρόβλημα των μικροπλαστικών μέσω πολλαπλών μηχανισμών. Η αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι έντονες βροχοπτώσεις και οι καταιγίδες, θα ενισχύσει τη μεταφορά μικροπλαστικών από χερσαίες πηγές. Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας θα αυξήσει τον κίνδυνο διάβρωσης παράκτιων χώρων διάθεσης αποβλήτων, απελευθερώνοντας μεγάλες ποσότητες πλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον.

5.2 Αλληλεπίδραση με θαλάσσιους οργανισμούς

Μηχανισμοί πρόσληψης σε διαφορετικά τροφικά επίπεδα

Η **πρόσληψη μικροπλαστικών από θαλάσσιους οργανισμούς** εξαρτάται από πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών των σωματιδίων και των βιολογικών χαρακτηριστικών των οργανισμών. Το μέγεθος των μικροπλαστικών αποτελεί τον πρωταρχικό παράγοντα που καθορίζει την προσβασιμότητα σε διαφορετικούς οργανισμούς. **Το φυτοπλαγκτόν** μπορεί να προσλάβει μόνο τα μικρότερα σωματίδια [$<20 \mu\text{m}$] μέσω παθητικής διήθησης ή ενεργητικής φαγοκυττάρωσης.

Το ζωοπλαγκτόν παρουσιάζει μεγαλύτερη ικανότητα πρόσληψης, με τη δυνατότητα κατάποσης σωματιδίων έως $500 \mu\text{m}$. Οι copepods, που αποτελούν το κυρίαρχο στοιχείο του ζωοπλαγκτού, έχουν παρατηρηθεί να καταπίνουν μικροπλαστικά που μοιάζουν με τις φυσικές τους τροφές. Αυτή η ομοιότητα οδηγεί σε λανθασμένη ταυτοποίηση των μικροπλαστικών ως τροφή, με συνέπειες για την ενεργειακή ισορροπία των οργανισμών.

Οι φίλτραρογόνοι οργανισμοί όπως τα δίθυρα μαλάκια [μύδια, στρείδια, κοχύλια] παρουσιάζουν τις υψηλότερες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών μεταξύ των θαλάσσιων οργανισμών. Ο μηχανισμός τροφής τους, που βασίζεται στη διήθηση μεγάλων όγκων νερού, τους καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτους στην πρόσληψη μικροπλαστικών. Μετρήσεις έχουν δείξει συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 0,1 έως 681 σωματίδια ανά άτομο, ανάλογα με το είδος και την περιοχή δειγματοληψίας.

Βιοσυσσώρευση και κατανομή σε ιστούς

Η **βιοσυσσώρευση μικροπλαστικών** αποτελεί ένα πολύπλοκο φαινόμενο που εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων, τη μορφολογία τους, και τα ανατομικά και φυσιολογικά χαρακτηριστικά των οργανισμών. Στα **ψάρια**, τα μικροπλαστικά εντοπίζονται κυρίως στο γαστρεντερικό σύστημα, όπου μπορούν να παραμείνουν για εβδομάδες πριν απεκκριθούν. Ωστόσο, υπάρχουν αποδείξεις ότι μικρότερα σωματίδια [$<20\ \mu\text{m}$] μπορούν να διαπεράσουν το εντερικό τοίχωμα και να εισέλθουν στην κυκλοφορία.

Στα βράγχια των ψαριών έχουν εντοπιστεί μικροπλαστικά, υποδεικνύοντας δυνατότητα άμεσης πρόσληψης από το νερό κατά τη διαδικασία της αναπνοής. Αυτή η διαδρομή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα μικρότερα σωματίδια που μπορούν να παραμείνουν σε αιώρηση στη στήλη του νερού. **Στο ήπαρ και άλλα όργανα** εντοπίζονται μικροπλαστικά σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις, υποδεικνύοντας συστηματική κυκλοφορία μετά την αρχική πρόσληψη.

Στα θαλάσσια θηλαστικά, η πρόσληψη μικροπλαστικών συμβαίνει κυρίως μέσω της κατάποσης μολυσμένων τροφών, αλλά και μέσω άμεσης κατάποσης κατά τη διάρκεια της τροφής σε περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις. Η παρουσία μικροπλαστικών έχει τεκμηριωθεί στο γαστρεντερικό σύστημα φαλαινών, δελφινιών και φωκών, ενώ πρόσφατες μελέτες έχουν εντοπίσει μικροπλαστικά και στο αναπνευστικό σύστημα ορισμένων ειδών.

Φυσιολογικές επιπτώσεις και μηχανισμοί τοξικότητας

Οι **φυσιολογικές επιπτώσεις** των μικροπλαστικών στους θαλάσσιους οργανισμούς εκδηλώνονται σε πολλαπλά επίπεδα [16]. **Φυσική βλάβη** μπορεί να προκληθεί από την παρουσία σωματιδίων στο γαστρεντερικό σύστημα, οδηγώντας σε φλεγμονή, εξελκώσεις ή απόφραξη. Μεγαλύτερα σωματίδια μπορούν να προκαλέσουν **ψευδαίσθηση κορεσμού**, μειώνοντας την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών και επηρεάζοντας την ενεργειακή ισορροπία των οργανισμών.

Οξειδωτικό στρες έχει παρατηρηθεί σε πολλά είδη εκτεθειμένα σε μικροπλαστικά. Αυτό μπορεί να οφείλεται στη φυσική παρουσία των σωματιδίων, στην απελευθέρωση χημικών προσθέτων, ή στη μεταφορά περιβαλλοντικών μολυντών που έχουν προσροφηθεί στην επιφάνεια των μικροπλαστικών. Οι δείκτες οξειδωτικού στρες περιλαμβάνουν αυξημένα επίπεδα ενζύμων αντιοξειδωσης και μειωμένα επίπεδα αντιοξειδωτικών μορίων.

Ενδοκρινικές διαταραχές έχουν αναφερθεί σε ψάρια και ασπόνδυλα εκτεθειμένα σε μικροπλαστικά. Αυτές μπορεί να οφείλονται σε χημικά πρόσθετα όπως φθαλικοί εστέρες και δισφαινόλη Α, που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή πλαστικών και έχουν γνωστές ενδοκρινικές ιδιότητες. Οι επιπτώσεις περιλαμβάνουν αλλαγές στα επίπεδα ορμονών, διαταραχές στην αναπαραγωγή και αλλαγές στην έκφραση γονιδίων που σχετίζονται με την ενδοκρινική λειτουργία.

5.3 Μεταφορά μέσω τροφικής αλυσίδας

Διαδρομές τροφικής μεταφοράς

Η **τροφική μεταφορά μικροπλαστικών** αποτελεί έναν από τους κρίσιμότερους μηχανισμούς μέσω των οποίων αυτοί οι μολυντές φτάνουν στους ανώτερους θηρευτές και τελικά στον άνθρωπο. Η διαδικασία ξεκινά από την πρόσληψη μικροπλαστικών από τους πρωτογενείς παραγωγούς και τους πρωτογενείς καταναλωτές, και συνεχίζει μέσω διαδοχικών τροφικών επιπέδων.

Από το πλαγκτόν στα μικρά ψάρια: Το μολυσμένο ζωοπλαγκτόν αποτελεί την κύρια πηγή έκθεσης για τα πλαγκτονοφάγα ψάρια. Αυτά τα μικρά ψάρια, όπως οι σαρδέλες και οι γαύροι, καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ζωοπλαγκτού καθημερινά, οδηγώντας σε σημαντική συσσώρευση μικροπλαστικών στο γαστρεντερικό τους σύστημα. Μέσω αυτής της διαδρομής, τα μικροπλαστικά εισέρχονται στα πελαγικά τροφικά δίκτυα.

Από τα μικρά στα μεγάλα ψάρια: Τα μεσοπέλαγα και τα μεγάλα πελαγικά ψάρια προσλαμβάνουν μικροπλαστικά κυρίως μέσω της κατανάλωσης μολυσμένων μικρότερων ψαριών. Αυτή η διαδρομή είναι ιδιαίτερα σημαντική για εμπορικά σημαντικά είδη όπως ο τόνος, το ξιφίας και άλλα μεγάλα πελαγικά ψάρια που αποτελούν βασικό στοιχείο της ανθρώπινης διατροφής.

Εργαστηριακές και πειραματικές μελέτες

Οι ελεγχόμενες εργαστηριακές μελέτες παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για τους μηχανισμούς δράσης των μικροπλαστικών σε θαλάσσιους οργανισμούς. Πειράματα έκθεσης σε διαφορετικές συγκεντρώσεις και τύπους μικροπλαστικών επιτρέπουν την εξέταση σχέσεων δόσης-απόκρισης και την αξιολόγηση των κρίσιμων επιπέδων έκθεσης.

Μελέτες με φυτοπλαγκτόν έχουν δείξει ότι η έκθεση σε μικροπλαστικά μπορεί να μειώσει τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και να επηρεάσει την κυτταρική διαίρεση. Το μέγεθος των

σωματιδίων παίζει κρίσιμο ρόλο, με τα μικρότερα σωματίδια να έχουν μεγαλύτερη βιοδιαθεσιμότητα και τοξικό δυναμικό.

Στο ζωοπλαγκτόν, πειράματα με corepods έχουν αποκαλύψει ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να επηρεάσουν τη διατροφική συμπεριφορά, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα στην αναζήτηση τροφής και επηρεάζοντας την ενεργειακή ισορροπία. Αυτές οι επιπτώσεις μπορούν να έχουν σημαντικές συνέπειες σε επίπεδο πληθυσμού και οικοσυστήματος.

Μοριακοί και κυτταρικοί μηχανισμοί

Σε κυτταρικό επίπεδο, τα μικροπλαστικά μπορούν να προκαλέσουν διαταραχές στη λειτουργία των κυτταρικών μεμβρανών, επηρεάζοντας την περατότητα και τις μεταφορικές διεργασίες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια κυτταρικής ακεραιότητας και δυσλειτουργία οργανιδίων.

Η γονιδιακή έκφραση μπορεί επίσης να επηρεαστεί από την έκθεση σε μικροπλαστικά. Μελέτες έχουν δείξει αλλαγές στην έκφραση γονιδίων που σχετίζονται με την αντιοξειδωτική άμυνα, την ανοσολογική απόκριση, και τη μεταβολική λειτουργία σε διάφορα θαλάσσια είδη.

Επιγενετικές αλλαγές αποτελούν μια αναδυόμενη περιοχή έρευνας, με μελέτες να υποδεικνύουν ότι η έκθεση σε μικροπλαστικά μπορεί να προκαλέσει τροποποιήσεις στη μεθυλίωση του DNA και την ιστονική ακετυλίωση, με πιθανές μακροπρόθεσμες συνέπειες για την υγεία των οργανισμών.

Οικοσυστημικές επιπτώσεις

Οι επιπτώσεις σε επίπεδο κοινότητας αρχίζουν να κατανοούνται μέσω μελετών που εξετάζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών ειδών στην παρουσία μικροπλαστικών. Αλλαγές στη σύνθεση των μικροβιακών κοινοτήτων έχουν παρατηρηθεί σε περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις μικροπλαστικών, με πιθανές επιπτώσεις στους βιογεωχημικούς κύκλους.

Η δημιουργία βιοφίλμς στην επιφάνεια των μικροπλαστικών δημιουργεί νέα οικολογικά περιβάλλοντα που μπορούν να φιλοξενήσουν εισβολείς οργανισμούς ή παθογόνα. Αυτή η “πλαστισφαίρα” μπορεί να λειτουργήσει ως φορέας για τη μεταφορά οργανισμών σε νέες γεωγραφικές περιοχές, συμβάλλοντας στη διασπορά εισβολέων ειδών.

5.3 Μεταφορά μέσω τροφικής αλυσίδας

Κινητική της τροφικής μεταφοράς

Η **δυναμική της τροφικής μεταφοράς** μικροπλαστικών εξαρτάται από πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των σωματιδίων και των βιολογικών διεργασιών των οργανισμών. Η **πέψη και η απέκκριση** αποτελούν κλειδιά διεργασίες που καθορίζουν τον χρόνο παραμονής των μικροπλαστικών στους οργανισμούς.

Μελέτες με ραδιοσημασμένα μικροπλαστικά έχουν δείξει ότι ο χρόνος παραμονής στο γαστρεντερικό σύστημα των ψαριών κυμαίνεται από λίγες ώρες έως μερικές εβδομάδες, ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων και τον τύπο της τροφής. Μικρότερα σωματίδια έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να διαπεράσουν το εντερικό τοίχωμα και να εισέλθουν στη συστηματική κυκλοφορία.

Η **μεταφορά από τη μητέρα στους απογόνους** έχει τεκμηριωθεί σε ορισμένα είδη, υποδεικνύοντας δυνατότητα μεταγενετικής μεταφοράς. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για την κατανόηση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων στους πληθυσμούς θαλάσσιων οργανισμών.

Περιφερειακές διαφορές στη μόλυνση θαλασσινών

Η **γεωγραφική κατανομή** της μόλυνσης από μικροπλαστικά σε εμπορικά θαλάσσια προϊόντα παρουσιάζει σημαντικές διαφορές που αντανακλούν τις τοπικές συνθήκες ρύπανσης. **Στη Μεσόγειο**, τα μύδια παρουσιάζουν κατά μέσο όρο υψηλότερες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών σε σύγκριση με τον Ατλαντικό, αντανακλώντας την έντονη ανθρωπογενή πίεση στην περιοχή.

Τα ψάρια από παράκτιες περιοχές κοντά σε αστικά κέντρα παρουσιάζουν συστηματικά υψηλότερες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών σε σύγκριση με αυτά από απομακρυσμένες περιοχές. Αυτή η χωρική μεταβλητότητα υπογραμμίζει τη σημασία της τοπικής προέλευσης των μικροπλαστικών και την ανάγκη για στοχευμένα μέτρα πρόληψης.

Στα αρκτικά ύδατα, παρά τη μικρότερη ανθρωπογενή δραστηριότητα, έχουν εντοπιστεί μικροπλαστικά σε θαλάσσιους οργανισμούς, αποδεικνύοντας την παγκόσμια εμβέλεια του προβλήματος και τη σημασία της μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων.

Επεξεργασία τροφίμων και έκθεση καταναλωτών

Η **επεξεργασία και προετοιμασία θαλασσινών** επηρεάζει σημαντικά την έκθεση των καταναλωτών σε μικροπλαστικά. Η **αφαίρεση του γαστρεντερικού συστήματος** κατά την επεξεργασία των ψαριών μειώνει δραστικά την έκθεση, καθώς τα περισσότερα μικροπλαστικά συγκεντρώνονται στο στομάχι και τα έντερα.

Στα δίθυρα μαλάκια όμως, που καταναλώνονται ολόκληρα, η έκθεση είναι σημαντικά υψηλότερη. Τεχνικές όπως η πρόκληση του εμετού [depuration] μπορούν να μειώσουν τη συγκέντρωση μικροπλαστικών, αλλά δεν τα εξαλείφουν πλήρως.

Η **θερμική επεξεργασία** [μαγείρεμα, ψήσιμο] δεν αφαιρεί τα μικροπλαστικά, αλλά μπορεί να επηρεάσει τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να προκαλέσουν απελευθέρωση χημικών προσθέτων, αυξάνοντας πιθανώς την τοξικότητα.

Διατροφικές συνήθειες και έκθεση

Οι διατροφικές συνήθειες των πληθυσμών επηρεάζουν σημαντικά την έκθεση σε μικροπλαστικά μέσω θαλασσινών. **Πληθυσμοί με υψηλή κατανάλωση θαλασσινών**, όπως αυτοί στη Μεσόγειο, την Ιαπωνία και τις παράκτιες περιοχές, αντιμετωπίζουν υψηλότερη έκθεση.

Η **κατανάλωση μικρών ψαριών ολόκληρων** [π.χ. σαρδέλες, γαύροι] αυξάνει την έκθεση καθώς το γαστρεντερικό σύστημα δεν αφαιρείται. Επίσης, η **κατανάλωση κεφαλόποδων**, που τείνουν να έχουν μικροπλαστικά και στους μυς, αντιπροσωπεύει μια σημαντική πηγή έκθεσης.

Τα παραδοσιακά πιάτα που περιλαμβάνουν θαλάσσια προϊόντα σε πολλές παράκτιες κουλτούρες μπορεί να αυξάνουν την έκθεση, ιδιαίτερα όταν περιλαμβάνουν ολόκληρα ψάρια ή μαλάκια. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για πολιτισμικά ευαίσθητες στρατηγικές μείωσης κινδύνου.

Επιπτώσεις στα εμπορικά είδη θαλασσινών

Η **παρουσία μικροπλαστικών σε εμπορικά θαλάσσια προϊόντα** έχει τεκμηριωθεί εκτενώς παγκοσμίως, δημιουργώντας ανησυχίες για την ασφάλεια των τροφίμων και την έκθεση των καταναλωτών [12]. **Τα δίθυρα μαλάκια** παρουσιάζουν συστηματικά τις υψηλότερες συγκεντρώσεις, με μελέτες να αναφέρουν από 4 έως 178 σωματίδια ανά άτομο σε μύδια, και από 4 έως 57 σωματίδια ανά άτομο σε στρείδια.

Στα ψάρια, η κατανομή μικροπλαστικών διαφέρει ανάλογα με το είδος και την οικολογική θέση. Τα πελαγικά ψάρια που τρέφονται με πλαγκτόν τείνουν να έχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις από τα βενθικά ψάρια. Τα μικροπλαστικά εντοπίζονται κυρίως στο γαστρεντερικό σύστημα, το οποίο συνήθως αφαιρείται κατά την επεξεργασία, μειώνοντας την έκθεση των καταναλωτών.

Στα κεφαλόποδα [καλαμάρια, χταπόδια], η παρουσία μικροπλαστικών έχει αναφερθεί τόσο στο γαστρεντερικό σύστημα όσο και στους μυς, καθιστώντας τα πιθανώς πιο προβληματικά από άποψη έκθεσης καταναλωτών. Η ικανότητά τους να καταναλώνουν μεγάλα θηρεύματα, συμπεριλαμβανομένων μολυσμένων ψαριών και καρκινοειδών, συμβάλλει στη συσσώρευση μικροπλαστικών.

5.4 Πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία

Διαδρομές έκθεσης στον άνθρωπο

Η **ανθρώπινη έκθεση σε μικροπλαστικά** συμβαίνει μέσω πολλαπλών διαδρομών, με την κατανάλωση μολυσμένων τροφίμων να αποτελεί την κυρίαρχη πηγή. Η **κατανάλωση θαλασσινών** αντιπροσωπεύει την πιο άμεση διαδρομή έκθεσης μέσω της τροφικής αλυσίδας. Εκτιμήσεις υποδεικνύουν ότι ένας μέσος καταναλωτής θαλασσινών μπορεί να προσλαμβάνει έως 5 g μικροπλαστικών ανά εβδομάδα, ισοδύναμο με μια πιστωτική κάρτα [2].

Το πόσιμο νερό αποτελεί μια άλλη σημαντική πηγή έκθεσης. Μικροπλαστικά έχουν εντοπιστεί σε νερό από τη βρύση, εμφιαλωμένο νερό, και ακόμη και σε κλειστά συστήματα υδροδότησης [18]. Οι συγκεντρώσεις ποικίλουν ευρέως ανάλογα με την πηγή και την περιοχή, αλλά γενικά είναι χαμηλότερες από αυτές που βρίσκονται σε θαλασσινά.

Η **εισπνοή** αποτελεί την τρίτη σημαντική διαδρομή έκθεσης, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές όπου η συγκέντρωση ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών είναι υψηλότερη. Τα μικροπλαστικά στην ατμόσφαιρα προέρχονται από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένης της φθοράς ελαστικών, συνθετικών υφασμάτων, και πλαστικών αντικειμένων.

Απορρόφηση και συστημική κατανομή

Η **απορρόφηση μικροπλαστικών** στον ανθρώπινο οργανισμό εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος των σωματιδίων. Σωματίδια μεγαλύτερα από 150 μm συνήθως απεκκρίνονται μέσω του

γαστρεντερικού συστήματος χωρίς να απορροφώνται. Σωματίδια μεταξύ 20-150 μm μπορούν να απορροφηθούν μέσω των Peyer's patches στο λεπτό έντερο, ενώ σωματίδια μικρότερα από 20 μm μπορούν να διαπεράσουν το επιθήλιο του εντέρου και να εισέλθουν στη συστηματική κυκλοφορία.

Η κατανομή στους ιστούς μετά την απορρόφηση ακολουθεί πολύπλοκα μοτίβα που εξαρτώνται από το μέγεθος, τη μορφολογία και την επιφανειακή χημεία των σωματιδίων. Μικροπλαστικά έχουν εντοπιστεί στον πλακούντα, υποδεικνύοντας δυνατότητα διάβασης του αιματοπλακουντιακού φραγμού. Επίσης έχουν βρεθεί στους πνεύμονες, το ήπαρ, τους νεφρούς και ακόμη και στον εγκέφαλο, αν και σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις.

Μηχανισμοί τοξικότητας

Οι **πιθανοί μηχανισμοί τοξικότητας** των μικροπλαστικών στον άνθρωπο περιλαμβάνουν πολλαπλές διαδρομές [17]. Το **οξειδωτικό στρες** αποτελεί έναν από τους κυριότερους μηχανισμούς, που προκαλείται από την αλληλεπίδραση των σωματιδίων με κύτταρα και ιστούς. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε φλεγμονώδεις αντιδράσεις, βλάβη των κυτταρικών μεμβρανών και δυσλειτουργία των κυτταρικών οργανιδίων.

Η ανοσοτοξικότητα αποτελεί μια άλλη περιοχή ανησυχίας. Τα μικροπλαστικά μπορούν να αναγνωριστούν από το ανοσοποιητικό σύστημα ως ξένα σωματίδια, προκαλώντας χρόνιες φλεγμονώδεις αντιδράσεις. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταστολή της ανοσολογικής λειτουργίας ή σε υπερκινητοποίηση που συνδέεται με αυτοάνοσες παθήσεις.

Οι ενδοκρινικές διαταραχές συνδέονται με τα χημικά πρόσθετα που περιέχονται στα πλαστικά ή που έχουν προσροφηθεί στην επιφάνειά τους. Ενώσεις όπως οι φθαλικοί εστέρες, η δισφαινόλη Α, και οι αντιοξειδωτικές ουσίες μπορούν να επηρεάσουν την ορμονική ισορροπία, με πιθανές επιπτώσεις στην αναπαραγωγή, την ανάπτυξη και το μεταβολισμό.

Κλινικές μελέτες και επιδημιολογικά δεδομένα

Πρόσφατες κλινικές μελέτες έχουν αρχίσει να παρέχουν άμεσες αποδείξεις για τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών στην ανθρώπινη υγεία. Μια πρωτοποριακή μελέτη που δημοσιεύθηκε το 2024 συνέδεσε την παρουσία μικροπλαστικών σε αθηρωματικές πλάκες των καρωτίδων αρτηριών με διπλάσιο κίνδυνο εμφράγματος του μυοκαρδίου, εγκεφαλικού επεισοδίου ή θανάτου [3].

Μελέτες σε παιδιά υποδεικνύουν ότι αυτή η ευάλωτη πληθυσμιακή ομάδα μπορεί να είναι σε μεγαλύτερο κίνδυνο λόγω της υψηλότερης έκθεσης ανά μονάδα σωματικού βάρους και των ανώριμων συστημάτων αποτοξίνωσης. Έχουν εντοπιστεί μικροπλαστικά σε δείγματα κοπράνων παιδιών σε υψηλότερες συγκεντρώσεις από ό,τι σε ενήλικες.

Επαγγελματική έκθεση σε εργαζόμενους σε βιομηχανίες πλαστικών έχει συνδεθεί με αυξημένα επίπεδα φλεγμονωδών βιοδεικτών και αναπνευστικών συμπτωμάτων. Αυτές οι παρατηρήσεις παρέχουν σημαντικές ενδείξεις για τις πιθανές επιπτώσεις χρόνιας έκθεσης σε υψηλότερες δόσεις.

Εργαστηριακές και τοξικολογικές μελέτες

Μελέτες in vitro χρησιμοποιώντας ανθρώπινες κυτταρικές σειρές έχουν αποκαλύψει πολλαπλούς μηχανισμούς κυτταρικής τοξικότητας. **Κύτταρα του αναπνευστικού συστήματος** εκτεθειμένα σε μικροπλαστικά παρουσιάζουν αυξημένη παραγωγή προφλεγμονωδών κυτοκινών και μειωμένη βιωσιμότητα.

Γαστρεντερικά κύτταρα επίσης δείχνουν ευαισθησία στα μικροπλαστικά, με παρατηρούμενες διαταραχές στη λειτουργία των διασυνδέσεων μεταξύ κυττάρων, που μπορεί να επηρεάσουν την εντερική διαπερατότητα και την άμυνα κατά παθογόνων.

Νευρικά κύτταρα εμφανίζουν ιδιαίτερη ευαισθησία σε νανοπλαστικά, τα οποία μπορούν να διαπεράσουν τον αιματοεγκεφαλικό φραγμό. Μελέτες δείχνουν δυνητικές επιπτώσεις στη νευρική ανάπτυξη και λειτουργία, αν και οι μηχανισμοί παραμένουν ασαφείς.

Ευάλωτες πληθυσμιακές ομάδες

Τα παιδιά αντιμετωπίζουν υψηλότερο κίνδυνο έκθεσης λόγω συμπεριφοριακών παραγόντων [όπως η συχνή επαφή χεριών-στόματος], υψηλότερης αναπνευστικής συχνότητας, και διαφορετικής διατροφής. Το ανώριμο ανοσοποιητικό και πεπτικό σύστημα των παιδιών μπορεί να είναι λιγότερο αποτελεσματικό στην αντιμετώπιση των μικροπλαστικών.

Οι έγκυες γυναίκες αποτελούν ιδιαίτερα ευάλωτη ομάδα καθώς η έκθεση μπορεί να επηρεάσει τόσο τη μητέρα όσο και το αναπτυσσόμενο έμβρυο. Η παρουσία μικροπλαστικών στον πλακούντα υποδεικνύει δυνατότητα ενδομήτριας έκθεσης, με άγνωστες συνέπειες για την εμβρυϊκή ανάπτυξη.

Άτομα με προϋπάρχουσες παθήσεις, ιδιαίτερα καρδιαγγειακές και αναπνευστικές ασθένειες, μπορεί να είναι πιο ευάλωτα στις επιπτώσεις των μικροπλαστικών. Η χρόνια φλεγμονή που συνδέεται με αυτές τις παθήσεις μπορεί να επιδεινωθεί από την έκθεση σε μικροπλαστικά.

Μακροπρόθεσμες επιπτώσεις και επιγενετικές αλλαγές

Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της χρόνιας έκθεσης σε μικροπλαστικά παραμένουν σε μεγάλο βαθμό άγνωστες λόγω της σχετικά πρόσφατης αναγνώρισης του προβλήματος. **Επιγενετικές αλλαγές** που μπορούν να μεταβιβαστούν σε επόμενες γενιές αποτελούν μια αναδυόμενη περιοχή ανησυχίας.

Μελέτες σε πειραματόζωα έχουν δείξει ότι η έκθεση σε μικροπλαστικά κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη του νευρικού συστήματος των απογόνων, υποδεικνύοντας δυνατότητα διαγενεακών επιπτώσεων.

Η συσσώρευση σε ιστούς με αργό μεταβολισμό, όπως το λιπώδες ιστός, μπορεί να οδηγήσει σε μακροπρόθεσμη εσωτερική έκθεση ακόμη και μετά τη μείωση της εξωτερικής έκθεσης. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για την κατανόηση των χρόνιων επιπτώσεων στην υγεία.

6. Νομοθετικό πλαίσιο και διαχείριση

6.1 Διεθνές και ευρωπαϊκό ρυθμιστικό πλαίσιο

Η αντιμετώπιση της μόλυνσης από μικροπλαστικά απαιτεί συντονισμένη διεθνή δράση που να ενσωματώνει τόσο τη πρόληψη όσο και την αποκατάσταση. **Η Ευρωπαϊκή Ένωση** έχει αναδειχθεί ως ηγέτης στην ανάπτυξη ολοκληρωμένου ρυθμιστικού πλαισίου για τα μικροπλαστικά. Ο **Κανονισμός REACH** [Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals] αποτελεί την κορωνίδα αυτών των προσπαθειών, εισάγοντας περιορισμούς στα σκόπιμα προστιθέμενα μικροπλαστικά σε διάφορες εφαρμογές [8].

Η Οδηγία πλαστικών μιας χρήσης [SUP Directive] της ΕΕ, που τέθηκε σε ισχύ το 2021, απαγορεύει ή περιορίζει συγκεκριμένα πλαστικά προϊόντα μιας χρήσης και θεσπίζει στόχους για τη μείωση της κατανάλωσης και τη βελτίωση της ανακύκλωσης. Επιπλέον, **η Στρατηγική για τα**

Πλαστικά της ΕΕ στοχεύει στη μετάβαση σε κυκλική οικονομία για τα πλαστικά, με έμφαση στην πρόληψη της δημιουργίας αποβλήτων.

Σε διεθνές επίπεδο, οι διαπραγματεύσεις για ένα **Παγκόσμιο Σύμφωνο Πλαστικών** βρίσκονται σε εξέλιξη υπό την αιγίδα του Προγράμματος Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών [UNEP]. Παρά την ευρεία υποστήριξη, οι διαπραγματεύσεις αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις λόγω διαφορετικών εθνικών προτεραιοτήτων και οικονομικών συμφερόντων.

Ειδικές ρυθμίσεις για μικροπλαστικά

Οι περιορισμοί στα σκόπιμα προστιθέμενα μικροπλαστικά στην ΕΕ καλύπτουν ευρύ φάσμα εφαρμογών, από καλλυντικά και απορρυπαντικά έως γεωργικά προϊόντα και βιομηχανικές εφαρμογές. Η εφαρμογή αυτών των περιορισμών γίνεται σταδιακά, επιτρέποντας στη βιομηχανία να αναπτύξει εναλλακτικές λύσεις.

Η παρακολούθηση των μικροπλαστικών στα πόσιμα ύδατα αποτελεί μια αναδυόμενη ρυθμιστική απαίτηση. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας έχει δημοσιεύσει οδηγίες για την παρακολούθηση μικροπλαστικών στο πόσιμο νερό, ενώ αρκετές χώρες αναπτύσσουν εθνικά πρότυπα [8].

Οι απαιτήσεις επισήμανσης για προϊόντα που περιέχουν μικροπλαστικά εισάγονται σταδιακά, στοχεύοντας στην ενημέρωση των καταναλωτών και την ενθάρρυνση της επιλογής περιβαλλοντικά φιλικότερων εναλλακτικών.

6.2 Εθνικές και περιφερειακές πολιτικές

Η Ελλάδα, ως μέλος της ΕΕ, έχει ενσωματώσει τις ευρωπαϊκές οδηγίες στο εθνικό δίκαιο και έχει αναπτύξει συμπληρωματικές πολιτικές που αντανακλούν τις ιδιαίτερες προκλήσεις της Μεσογείου. Το **Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων** περιλαμβάνει συγκεκριμένες διατάξεις για τη μείωση της πλαστικής ρύπανσης και την προώθηση της κυκλικής οικονομίας.

Η Στρατηγική για τη Μεσόγειο αναγνωρίζει τα μικροπλαστικά ως προτεραιότητα για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Συγκεκριμένες δράσεις περιλαμβάνουν την ενίσχυση των προγραμμάτων παρακολούθησης, τη βελτίωση των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων στα νησιά, και την προώθηση βιώσιμων εναλλακτικών στα πλαστικά μιας χρήσης.

Τοπικές πρωτοβουλίες και καινοτομίες

Πολλοί ελληνικοί δήμοι έχουν υιοθετήσει πρωτοποριακές πολιτικές για τη μείωση της πλαστικής ρύπανσης. Απαγορεύσεις στα πλαστικά μιας χρήσης σε παραλίες και τουριστικές περιοχές, προγράμματα ανταλλαγής πλαστικών φιαλών, και εκστρατείες ευαισθητοποίησης αποτελούν μέρος αυτών των προσπαθειών.

Συνεργασίες δημόσιου και ιδιωτικού τομέα αναπτύσσονται για την υλοποίηση καινοτόμων λύσεων. Προγράμματα συλλογής πλαστικών από τη θάλασσα, ανάπτυξη βιοδιασπώμενων εναλλακτικών, και εγκατάσταση συστημάτων φιλτραρίσματος σε λιμάνια αποτελούν παραδείγματα τέτοιων πρωτοβουλιών.

6.3 Οικονομικά εργαλεία και κίνητρα

Η εφαρμογή οικονομικών εργαλείων αποτελεί κλειδί για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των μικροπλαστικών. **Φόροι και τέλη** στα πλαστικά προϊόντα μιας χρήσης έχουν εισαχθεί σε πολλές χώρες, δημιουργώντας κίνητρα για τη μείωση της κατανάλωσης και τη στροφή σε εναλλακτικές λύσεις.

Συστήματα Εκτεταμένης Ευθύνης Παραγωγού [EPR] θεσπίζονται για να μεταφέρουν το κόστος διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων στους παραγωγούς, δημιουργώντας κίνητρα για τη σχεδίαση προϊόντων που είναι πιο εύκολα ανακυκλώσιμα ή βιοδιασπώμενα.

Επιδότησεις και χρηματοδότηση παρέχονται για την ανάπτυξη τεχνολογιών καθαρισμού, βιώσιμων υλικών και συστημάτων κυκλικής οικονομίας. Προγράμματα όπως το Horizon Europe της ΕΕ χρηματοδοτούν έρευνα και καινοτομία στον τομέα των μικροπλαστικών.

Μηχανισμοί αγοράς και πράσινες δημόσιες συμβάσεις

Οι πράσινες δημόσιες συμβάσεις αποτελούν ισχυρό εργαλείο για την προώθηση βιώσιμων εναλλακτικών στα πλαστικά. Κριτήρια περιβαλλοντικής απόδοσης ενσωματώνονται σε διαγωνισμούς για προμήθειες δημόσιων οργανισμών, δημιουργώντας αγορά για καινοτόμα προϊόντα.

Πιστοποιήσεις και σήματα για προϊόντα χωρίς μικροπλαστικά αναπτύσσονται για να βοηθήσουν τους καταναλωτές στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Αυτά τα συστήματα πιστοποίησης δημιουργούν κίνητρα για τη βιομηχανία να αναπτύξει καθαρότερες τεχνολογίες.

6.4 Διεθνής συνεργασία και περιφερειακές συμφωνίες

Η Σύμβαση της Βαρκελώνης για την προστασία της Μεσογείου έχει επεκταθεί για να περιλαμβάνει ειδικά μέτρα κατά των μικροπλαστικών. Το Πρωτόκολλο για την Ολοκληρωμένη Διαχείριση Παράκτιων Ζωνών περιλαμβάνει διατάξεις για τη μείωση των χερσαίων πηγών πλαστικής ρύπανσης.

Διμερείς και πολυμερείς συμφωνίες αναπτύσσονται για την αντιμετώπιση διασυνοριακών ρυπάνσεων. Συνεργασίες μεταξύ χωρών που μοιράζονται θαλάσσιες λεκάνες είναι κρίσιμες για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος.

Τεχνική συνδρομή παρέχεται σε αναπτυσσόμενες χώρες για την ανάπτυξη ικανοτήτων παρακολούθησης και διαχείρισης μικροπλαστικών. Προγράμματα μεταφοράς τεχνολογίας και κατάρτισης προσωπικού συμβάλλουν στην παγκόσμια αντιμετώπιση του προβλήματος.

6. Νομοθετικό πλαίσιο και διαχείριση

6.1 Διεθνές και ευρωπαϊκό ρυθμιστικό πλαίσιο

Η αντιμετώπιση της μόλυνσης από μικροπλαστικά απαιτεί συντονισμένη διεθνή δράση που να ενσωματώνει τόσο τη πρόληψη όσο και την αποκατάσταση. **Η Ευρωπαϊκή Ένωση** έχει αναδειχθεί ως ηγέτης στην ανάπτυξη ολοκληρωμένου ρυθμιστικού πλαισίου για τα μικροπλαστικά. Ο **Κανονισμός REACH** [Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals] αποτελεί την κορωνίδα αυτών των προσπαθειών, εισάγοντας περιορισμούς στα σκόπιμα προστιθέμενα μικροπλαστικά σε διάφορες εφαρμογές.

Η Οδηγία πλαστικών μιας χρήσης [SUP Directive] της ΕΕ, που τέθηκε σε ισχύ το 2021, απαγορεύει ή περιορίζει συγκεκριμένα πλαστικά προϊόντα μιας χρήσης και θεσπίζει στόχους για τη μείωση της κατανάλωσης και τη βελτίωση της ανακύκλωσης. Επιπλέον, **η Στρατηγική για τα**

Πλαστικά της ΕΕ στοχεύει στη μετάβαση σε κυκλική οικονομία για τα πλαστικά, με έμφαση στην πρόληψη της δημιουργίας αποβλήτων.

Σε διεθνές επίπεδο, οι διαπραγματεύσεις για ένα **Παγκόσμιο Σύμφωνο Πλαστικών** βρίσκονται σε εξέλιξη υπό την αιγίδα του Προγράμματος Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών [UNEP]. Παρά την ευρεία υποστήριξη, οι διαπραγματεύσεις αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις λόγω διαφορετικών εθνικών προτεραιοτήτων και οικονομικών συμφερόντων.

6.2 Εθνικές και περιφερειακές πολιτικές

Η Ελλάδα, ως μέλος της ΕΕ, έχει ενσωματώσει τις ευρωπαϊκές οδηγίες στο εθνικό δίκαιο και έχει αναπτύξει συμπληρωματικές πολιτικές που αντανακλούν τις ιδιαίτερες προκλήσεις της Μεσογείου. **Το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων** περιλαμβάνει συγκεκριμένες διατάξεις για τη μείωση της πλαστικής ρύπανσης και την προώθηση της κυκλικής οικονομίας.

Η Στρατηγική για τη Μεσόγειο αναγνωρίζει τα μικροπλαστικά ως προτεραιότητα για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Συγκεκριμένες δράσεις περιλαμβάνουν την ενίσχυση των προγραμμάτων παρακολούθησης, τη βελτίωση των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων στα νησιά, και την προώθηση βιώσιμων εναλλακτικών στα πλαστικά μιας χρήσης.

6.3 Οικονομικά εργαλεία και κίνητρα

Η εφαρμογή οικονομικών εργαλείων αποτελεί κλειδί για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των μικροπλαστικών. **Φόροι και τέλη** στα πλαστικά προϊόντα μιας χρήσης έχουν εισαχθεί σε πολλές χώρες, δημιουργώντας κίνητρα για τη μείωση της κατανάλωσης και τη στροφή σε εναλλακτικές λύσεις.

Συστήματα Εκτεταμένης Ευθύνης Παραγωγού [EPR] θεσπίζονται για να μεταφέρουν το κόστος διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων στους παραγωγούς, δημιουργώντας κίνητρα για τη σχεδίαση προϊόντων που είναι πιο εύκολα ανακυκλώσιμα ή βιοδιασπώμενα.

Επιδότησεις και χρηματοδότηση παρέχονται για την ανάπτυξη τεχνολογιών καθαρισμού, βιώσιμων υλικών και συστημάτων κυκλικής οικονομίας. Προγράμματα όπως το Horizon Europe της ΕΕ χρηματοδοτούν έρευνα και καινοτομία στον τομέα των μικροπλαστικών.

7. Συμπεράσματα και προοπτικές

7.1 Κύρια ευρήματα της εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρέχει μια ολοκληρωμένη ανάλυση του προβλήματος των μικροπλαστικών στα θαλάσσια οικοσυστήματα και των επιπτώσεών τους στην ανθρώπινη υγεία μέσω της τροφικής αλυσίδας. **Τα κύρια ευρήματα** καταδεικνύουν ότι τα μικροπλαστικά αποτελούν επιβεβαιωμένη και αυξανόμενη απειλή που απαιτεί άμεση και συντονισμένη δράση σε πολλαπλά επίπεδα.

Η παγκόσμια εξάπλωση των μικροπλαστικών είναι εκτεταμένη και συνεχώς επιδεινούμενη, με εκτιμήσεις που δείχνουν ετήσιες εισροές 0,5-2,4 εκατομμυρίων τόνων στους ωκεανούς. Η παρουσία μικροπλαστικών έχει τεκμηριωθεί από τις παράκτιες περιοχές έως τα βαθύτερα ωκεάνια τάφρα, και από τους τροπικούς ωκεανούς έως τους πολικούς πάγους.

Οι επιπτώσεις στα θαλάσσια οικοσυστήματα είναι πολυεπίπεδες και εκτείνονται σε όλα τα τροφικά επίπεδα. Από το φυτοπλαγκτόν έως τα θαλάσσια θηλαστικά, οι οργανισμοί εκτίθενται σε μικροπλαστικά μέσω πολλαπλών διαδρομών και υφίστανται φυσιολογικές, συμπεριφορικές και αναπαραγωγικές επιπτώσεις.

Η μεταφορά μέσω της τροφικής αλυσίδας αποτελεί κρίσιμη διαδρομή έκθεσης για τον άνθρωπο. Εμπορικά σημαντικά είδη θαλασσινών, ιδιαίτερα τα δίθυρα μαλάκια, παρουσιάζουν ανιχνεύσιμες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών, δημιουργώντας άμεσους κινδύνους για την ασφάλεια των τροφίμων.

7.2 Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και ευάλωτες ομάδες

Οι πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία περιλαμβάνουν πολλαπλούς μηχανισμούς τοξικότητας που εκτείνονται από το κυτταρικό έως το συστημικό επίπεδο [15]. Το οξειδωτικό στρες, οι φλεγμονώδεις αντιδράσεις, οι ενδοκρινικές διαταραχές και η ανοσοτοξικότητα αποτελούν τους κύριους μηχανισμούς ανησυχίας που έχουν τεκμηριωθεί τόσο σε πειραματικές μελέτες όσο και σε αρχικές κλινικές παρατηρήσεις.

Ευάλωτες πληθυσμιακές ομάδες, συμπεριλαμβανομένων των παιδιών, των εγκύων γυναικών και των ατόμων με προϋπάρχουσες παθήσεις, αντιμετωπίζουν δυσανάλογα υψηλότερους κινδύνους.

Τα παιδιά έχουν υψηλότερη έκθεση ανά μονάδα σωματικού βάρους και ανώριμα συστήματα αποτοξίνωσης, ενώ η παρουσία μικροπλαστικών στον πλακούντα υποδεικνύει δυνατότητα ενδομήτριας έκθεσης.

7.3 Τεχνολογικές εξελίξεις και λύσεις

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στην ανίχνευση και αντιμετώπιση των μικροπλαστικών παρέχουν αισιοδοξία για την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση του προβλήματος. Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στις αναλυτικές μεθόδους έχει βελτιώσει δραστικά την ταχύτητα και ακρίβεια της ανίχνευσης, ενώ φορητές συσκευές επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο.

Βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις αναπτύσσονται ραγδαία, περιλαμβανομένων βιοδιασπώμενων πολυμερών, πλαστικών από ανανεώσιμες πηγές, και συστημάτων κυκλικής οικονομίας που μειώνουν την εξάρτηση από παρθένα πλαστικά υλικά.

Τεχνολογίες καθαρισμού εξελίσσονται για την αφαίρεση μικροπλαστικών από υδάτινα συστήματα, αν και παραμένουν προκλήσεις σχετικά με την κλίμακα εφαρμογής και το κόστος. Προηγμένα συστήματα φιλτραρίσματος, βιολογικής αποικοδόμησης και φωτοκαταλυτικής οξείδωσης δείχνουν υποσχόμενα αποτελέσματα σε πιλοτικές εφαρμογές.

7.4 Πολιτικές προτάσεις και μελλοντικές κατευθύνσεις

Η αποτελεσματική αντιμετώπιση των μικροπλαστικών απαιτεί ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει πρόληψη, διαχείριση και αποκατάσταση. **Πρώτον**, είναι απαραίτητη η μείωση της εισροής μικροπλαστικών στο περιβάλλον μέσω βελτίωσης των συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων, περιορισμού των πλαστικών μιας χρήσης, και ανάπτυξης βιώσιμων εναλλακτικών.

Δεύτερον, η ενίσχυση της έρευνας και παρακολούθησης είναι κρίσιμη για την καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεων και την ανάπτυξη στοχευμένων λύσεων. Αυτό περιλαμβάνει την τυποποίηση μεθοδολογιών, την ανάπτυξη παγκόσμιων δικτύων παρακολούθησης, και τη διεξαγωγή μακροπρόθεσμων μελετών επιπτώσεων.

Τρίτον, η διεθνής συνεργασία και το ρυθμιστικό πλαίσιο πρέπει να ενισχυθούν για την επίτευξη συντονισμένης δράσης. Η επιτυχής ολοκλήρωση ενός Παγκόσμιου Συμφώνου Πλαστικών θα μπορούσε να παρέχει το απαραίτητο νομικό πλαίσιο για συντονισμένη δράση.

7.5 Τελικές παρατηρήσεις

Τα μικροπλαστικά αντιπροσωπεύουν μια **πολύπλοκη και πολυδιάστατη περιβαλλοντική πρόκληση** που απαιτεί ολοκληρωμένη και διεπιστημονική προσέγγιση. Η επιτυχής αντιμετώπιση θα εξαρτηθεί από τη **συνεργασία μεταξύ επιστημόνων, πολιτικών, βιομηχανίας και κοινωνίας**. Παρά τις σημαντικές προκλήσεις, οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις και η αυξανόμενη περιβαλλοντική συνείδηση δημιουργούν ευκαιρίες για ουσιαστική πρόοδο.

Η **επιστημονική κοινότητα πρέπει να συνεχίσει να παρέχει αξιόπιστα στοιχεία** για την υποστήριξη τεκμηριωμένων πολιτικών αποφάσεων, ενώ παράλληλα οι πολιτικοί πρέπει να δράσουν αποφασιστικά για την εφαρμογή αποτελεσματικών μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης. Μόνο μέσω συντονισμένης και συνεχούς προσπάθειας θα είναι δυνατή η προστασία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων και της ανθρώπινης υγείας από την αυξανόμενη απειλή των μικροπλαστικών.

Βιβλιογραφία

- [1] Bouwmeester, H., Hollman, P. C., & Peters, R. J. B. (2015). Potential health impact of environmentally released micro- and nanoplastics in the human food production chain: Experiences from nanotoxicology. *Environmental Science & Technology*, 49(15), 8932–8947. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01090>
- [2] Browne, M. A., Galloway, T. S., & Thompson, R. C. (2010). Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines. *Environmental Science & Technology*, 44(9), 3404–3409. <https://doi.org/10.1021/es903784e>

- [3] da Costa, J. P., Santos, P. S., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2016). (Nano)plastics in the environment – sources, fates and effects. *Science of the Total Environment*, 566–567, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.041>
- [4] Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made: Revised global analysis. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- [5] Koelmans, A. A., Nor, N. H. M., Hermesen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & De France, J. (2019). Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Research*, 155, 410–422. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>
- [6] Kooi, M., & Koelmans, A. A. (2019). Simplifying microplastic deposition and retention in the water column: The role of particle size, density and biofouling. *Environmental Science & Technology Letters*, 6(9), 551–557. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.9b00456>
- [7] K. L. Law, Morét-Ferguson, S., Maximenko, N. A., Proskurowski, G., Peacock, E. E., Hafner, J., & Reddy, C. M. (2010). Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre. *Science*, 329(5996), 1185–1188. <https://doi.org/10.1126/science.1192321>
- [8] Law, K. L., & Thompson, R. C. (2014). Microplastics in the seas. *Science*, 345(6193), 144–145. <https://doi.org/10.1126/science.1254065>
- [9] Lusher, A. L., Hollman, P. C. H., & Mendoza-Hill, J. J. (Eds.). (2017). *Microplastics in fisheries and aquaculture: Status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety* (FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper No. 615). FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9146en>
- [10] Lusher, A. L., McHugh, M., & Thompson, R. C. (2013). Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel. *Marine Pollution Bulletin*, 67(1–2), 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.11.028>
- [11] PlasticsEurope. (2024). *Plastics – the Facts 2024: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. PlasticsEurope. (Report)

- [12] Rochman, C. M., Tahir, A., Williams, S. L., Baxa, D. V., Lam, R., Miller, J. T., ... & Teh, S. J. (2015). Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. *Scientific Reports*, 5, 14340. <https://doi.org/10.1038/srep14340>
- [13] Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., ... & Russell, A. E. (2004). Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, 304(5672), 838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- [14] Van Cauwenberghe, L., & Janssen, C. R. (2014). Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environmental Pollution*, 193, 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.010>
- [15] Van Cauwenberghe, L., & Janssen, C. R. (2015). Microplastics and human health: Exploring the connections and evidence gaps. *Environmental Pollution*, 198, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.026>
- [16] Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environmental Pollution*, 178, 483–492. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>
- [17] Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: A micro issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634–6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>
- [18] World Health Organization. (2019). *Microplastics in drinking-water*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516198>