

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΙΧΘΥΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΣΕ ΓΛΥΚΑ ΝΕΡΑ

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ: ΚΑΨΑΜΠΕΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΟΡΜΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΒΟΛΟΣ

ΙΟΥΝΙΟΣ, 2020

Τον επιβλέποντα της Διπλωματικής μου Εργασίας κ. Κορμά Κωνσταντίνο ευχαριστώ θερμά για τις πολύτιμες συμβουλές του, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, και για τις γνώσεις που μου παρείχε.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract.....	6
1. Εισαγωγή.....	7
2. Υδάτινα Περιβάλλοντα Γλυκού Νερού.....	10
2.1. Η Υδρόβια Ύπαρξη.....	10
2.2. Ωκεανογραφία και Ωκεανογραφία των Λιμνών	10
2.3. Βασικές Έννοιες Συστημάτων Γλυκού Νερού.....	12
2.3.1. Μικροοργανισμοί Γλυκού Νερού.....	12
2.3.2. Περιβάλλον Γλυκού Νερού - Νερό σε Υγρή και Παγωμένη Κατάσταση. 12	
2.3.3. Περιβάλλοντα Γλυκού και Αλμυρού Ύδατος.....	13
2.3.4. Λαντικά και Λοτικά Συστήματα Γλυκού Νερού	14
2.3.5. Βιολογία Μικροοργανισμών Γλυκού Νερού	15
2.3.6. Επίδραση Φυσικών Ιδιοτήτων Νερού στους Υδρόβιους Μικροοργανισμούς 17	
2.4. Περιβάλλοντα Γλυκού Νερού.....	19
2.5. Βιοποικιλότητα σε Συστήματα Γλυκού Νερού.....	21
2.6. Χαρακτηριστικά Ομάδων Φυκών	25
3. Τα Μικροπλαστικά.....	30
3.1. Ανάπτυξη Πλαστικού.....	32
3.2. Περιγραφή Πλαστικών Υλικών	34
3.3. Είσοδος Μικροαστικών στο Υδάτινο Περιβάλλον	35
3.4. Ο Αναδυόμενος Κίνδυνος των Μικροπλαστικών ως Ρύποι	37

3.5.	Πηγές Πλαστικών και Μικροπλαστικών σε Περιβάλλοντα Γλυκών Νερών....	38
3.6.	Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι	39
3.7.	Δειγματοληψία και Ανάλυση Μικροαστικών	42
3.8.	Επιπτώσεις Μικροαστικών.....	46
4.	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μικροπλαστικών σε Γλυκά Νερά	58
4.1.	Διάσπαρτη Κατανομή Μικροπλαστικών	58
4.2.	Έμφυτη Τοξικότητα και Απορρόφηση Ρύπων.....	59
4.3.	Δραστικές Παρεμβάσεις στις Πηγές Μικροπλαστικών Γλυκού Νερού	61
5.	Συμπεράσματα.....	66
	Βιβλιογραφία	68

Περίληψη

Η χρήση πλαστικών υλικών, τις δεκαετίες που πέρασαν αποτέλεσε μια καινοτομία η οποία δημιούργησε τεράστια ευκαιρίες, αλλά ωστόσο παράλληλα συνοδεύεται με μια σειρά σοβαρών μειονεκτημάτων. Η μεγάλη εξάπλωση των προϊόντων πλαστικού, σε συνδυασμό με την εξαιρετικά βραδεία αποσύνθεσή τους αποτελεί ένα ιδιαίτερα σοβαρό ζήτημα, το οποίο προκαλεί μεγάλη ανησυχία ως προς τη συσσώρευση πλαστικών στο υδάτινο περιβάλλον. Τα θραύσματα των πλαστικών προϊόντων των οποίων οι διαστάσεις είναι μικρότερες των 5mm, τα λεγόμενα μικροπλαστικά, προκαλούν ιδιαίτερη ανησυχία στην επιστημονική κοινότητα, καθώς αποτελέσματα ερευνών δείχνουν ότι έχουν διεισδύσει σε μεγάλο βαθμό στα υδάτινα οικοσυστήματα. Λόγω του μεγέθους τους, τα μικροπλαστικά είναι δυνατό να καταποθούν από ένα μεγάλο αριθμό θαλάσσιων ειδών τα οποία αποτελούν μέρος της τροφικής αλυσίδας άλλων ειδών, κάνοντας έτσι τα μικροπλαστικά μια αόρατη απειλή για τους ζωντανούς οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου. Αν και οι έρευνες για την μόλυνση των θαλάσσιων υδάτων με μικροπλαστικά έχουν ξεκινήσει περίπου από το 2000, οι αντίστοιχες έρευνες για τη μόλυνση των γλυκών νερών δεν τυγχάνουν της ίδιας έντασης. Εκτός από το γεγονός ότι ένα μέρος των γλυκών νερών καταλήγει στη θάλασσα, αυξάνοντας έτσι τις συγκεντρώσεις μικροπλαστικών, τα μικροπλαστικά των γλυκών νερών αποτελούν μεγάλο κίνδυνο για τα οικοσυστήματα που φιλοξενούν αλλά και για τον ίδιο τον άνθρωπο. Στην παρούσα έρευνα, επιχειρείται να αναλυθεί μέσω μιας βιβλιογραφικής ανασκόπησης το ζήτημα της εξάπλωσης των μικροπλαστικών στα γλυκά νερά, των επιπτώσεών τους, των βασικών τους πηγών, καθώς και των παρεμβάσεων που μπορούν να εφαρμοστούν για τον περιορισμό τους.

Λέξεις Κλειδιά: Μικροπλαστικά, Γλυκά Νερά, Ρύπανση

Abstract

The use of plastic materials in the past decades has been an innovation that has created huge opportunities, but at the same time it is accompanied by a number of serious disadvantages. The large spread of plastic products, combined with their extremely slow decomposition is a very serious issue, which causes great concern regarding the accumulation of plastics in the aquatic environment. Fragments of plastic products that are smaller than 5mm in size, so-called microplastics, are of particular concern to the scientific community, as research results show that they have greatly penetrated aquatic ecosystems. Due to their size, microplastics can be ingested by a large number of marine species that are part of the food chain of other species, making microplastics an invisible threat to living organisms, including humans. Although investigations into the contamination of seawater with microplastics have been under way since about 2000, the corresponding investigations into freshwater contamination are not of the same intensity. Apart from the fact that some of the fresh water ends up in the sea, thus increasing the concentrations of microplastics, freshwater microplastics pose a great danger to the ecosystems that host them but also to man himself. In the present study, an attempt is made to analyze through a literature review the issue of the spread of microplastics in freshwater, their effects, their main sources, as well as the interventions that can be applied to reduce them.

Keywords: Microplastics, Freshwater, Pollution

1. Εισαγωγή

Ιστορικά - αν μπορεί κανείς να το χαρακτηρίσει έτσι δεδομένης της πρώιμης ηλικίας του πεδίου - τα περιβαλλοντικά πλαστικά απομεινάρια αποτελούν το κυριότερο στοιχείο της έρευνας σχετικά με τις θάλασσες. Με γνώμονα την ανακάλυψη μακρόχρονων ξεχασμένων μελετών της δεκαετίας του 1970 σχετικά με την εμφάνιση μικρών πλαστικών υπολειμμάτων (που σήμερα ονομάζονται μικροπλαστικά) στους ωκεανούς, οι ωκεανογράφοι και οι θαλάσσιοι βιολόγοι «ανέστησαν» το συγκεκριμένο θέμα στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Έκτοτε, αυτό το πεδίο έχει επεκταθεί ταχύτατα και διαπιστώνεται ότι τα πλαστικά υπάρχουν παντού στο θαλάσσιο σύστημα, από την Αρκτική έως την Ανταρκτική και από την επιφάνεια έως τον πάτο της θάλασσας.

Ενώ προφανώς οι πηγές των περιβαλλοντικών πλαστικών είναι χερσαίες, πολύ λιγότερη έρευνα έχει αφιερωθεί στη διερεύνησή τους σε συστήματα γλυκού νερού. Λιγότερο από το 4% των δημοσιεύσεων εστιάζει σε περιβάλλοντα περιβάλλον γλυκού νερού, κάτι το οποίο αντικατοπτρίζει την ιδέα ότι τα ρεύματα, τα ποτάμια και οι λίμνες αποτελούν απλές διαδρομές μεταφοράς που μεταφέρουν πλαστικά στους ωκεανούς, λειτουργώντας σαν μία αποχέτευση. Η συγκεκριμένη εργασία μελετά την κατάσταση της επιστήμης, συμπεριλαμβανομένων των σημαντικών εξελίξεων και προκλήσεων, όσον αφορά τις πηγές, την κατάληξη, την αφθονία και τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών στα οικοσυστήματα του γλυκού νερού. Παρά τα πολλά κενά που υπάρχουν στην γενική ερευνητική βιβλιογραφία, επισημαίνεται ότι τα μικροπλαστικά είναι ρύποι αναδυόμενης ανησυχίας, ανεξάρτητα από την αλατότητα του περιβάλλοντος μέσου.

Τα περιβαλλοντικά (μικρο) πλαστικά είναι αυτά που ορισμένοι αποκαλούν κακοήθες πρόβλημα· παρουσιάζεται μεγάλη πολυπλοκότητα όταν κάποιος προσπαθεί να κατανοήσει τον αντίκτυπο αυτών των συνθετικών υλικών στον φυσικό κόσμο. Για παράδειγμα, δεν υπάρχει το «μικροπλαστικό» ως έννοια. Επί του παρόντος, υπάρχουν στο εμπόριο περισσότερα από 5.300 περιβαλλοντικά (μικρο) πλαστικά είναι αυτά που κάποιοι αποκαλούν κακό πρόβλημα, δηλαδή υπάρχει μεγάλη πολυπλοκότητα όταν κάποιος προσπαθεί να κατανοήσει τον αντίκτυπο αυτών των συνθετικών υλικών στον φυσικό κόσμο. Για παράδειγμα, δεν υπάρχει «μικροπλαστικό». Επί του παρόντος, υπάρχουν στο

εμπόριο περισσότερες από 5.300 ποιότητες συνθετικών πολυμερών. Οι ετερογενείς φυσικοχημικές τους ιδιότητες μπορεί να οδηγήσουν σε πολύ ετερογενείς καταστάσεις και επιπτώσεις μόλις εισέλθουν στο περιβάλλον. Υπό το πρίσμα αυτό, η επεξεργασία μικροπλαστικών ως μοναδικός ρύπος δεν έχει νόημα.

Η ανθρωπογενής δραστηριότητα είχε ως αποτέλεσμα την καθαίρεση ενός πολύπλοκου συνδυασμού υλικών σε ιζήματα λίμνης, συμπεριλαμβανομένων των συνθετικών πολυμερών (πλαστικά) που διαφέρουν πολύ από τους Ολόκαινους ρυθμούς. Κατά συνέπεια, τα πλαστικά θεωρούνται ως ένας δείκτης της εποχής του Ανθρωποκενίου (Waters, et al., 2016). Το πλαστικό είναι εδώ και καιρό γνωστό ότι αποτελεί μείζον συστατικό της ρύπανσης των ποταμών και τα προϊόντα αποικοδόμησης των πλαστικών έχουν σημειωθεί ως πιθανό ζήτημα μόλυνσης των εδαφών (Klemchuk, 1990). Ωστόσο, μέχρι πρόσφατα, το επίκεντρο της έρευνας για την ρύπανση από τα πλαστικά ήταν το θαλάσσιο περιβάλλον. Ειδικότερα, μια αναζήτηση βιβλιογραφίας στον Ιστό του Επιστημονικού Ιστού του Thomson Reuters επιστρέφει 1.228 έγγραφα που περιέχουν τον όρο «μικροπλαστικό*», εκ των οποίων μόνο ένα υποσύνολο 45 δημοσιεύσεων (3,7%) περιέχει τον όρο «γλυκό νερό». Αυτό άρχισε να αλλάζει τα τελευταία χρόνια, και η προσοχή έχει στραφεί τώρα τόσο στα χερσαία περιβάλλοντα (Lambert et al., 2014; Rillig, 2012), όσο και στα περιβάλλοντα του γλυκού νερού (Lambert et al., 2014; Wagner, et al., 2014; Eerkes-Medrano et al., 2015). Αυτές οι δημοσιεύσεις επισημαίνουν την έλλειψη γνώσεων για τα γλυκά νερά και τα χερσαία περιβάλλοντα όσον αφορά την εμφάνιση και τις επιπτώσεις των πλαστικών υπολειμμάτων.

Συγκεκριμένες μελέτες έχουν ποσοτικοποιήσει μικροσκοπικά πλαστικά υπολείμματα, τα λεγόμενα μικροπλαστικά (micro-plastics-MP), σε συστήματα γλυκού νερού, συμπεριλαμβανομένων των ποταμίσιων παραλιών, των επιφανειακών υδάτων και των ιζημάτων ποταμών, λιμνών και δεξαμενών (Zbyszewski & Corcoran, 2011; Biginagwa et al., 2016; Zhang et al., 2015; Mani et al., 2015; Bartsch et al., 2015; Lechner, et al., 2014). Αν και υπάρχουν πολύ λιγότερα δεδομένα σε σύγκριση με τα θαλάσσια συστήματα, οι μελέτες επισημαίνουν ότι τα μικροπλαστικά είναι πανταχού παρόντα και οι συγκεντρώσεις τους είναι συγκρίσιμες (Klein et al., 2017). Παράλληλα με τα δεδομένα παρακολούθησης,

οι οικοτοξικολογικές μελέτες έχουν διερευνήσει κατά κύριο λόγο τη λήψη απορριμμάτων από διάφορα είδη και τις επιπτώσεις τους στις παραμέτρους της ζωής (Ogonowski et al., 2016; Booth et al., 2016). Ενώ η πλειονότητα των μελετών χρησιμοποίησε πρωτογενείς μικρόσφαιρες πολυαιθυλενίου και πολυστυρενίου σε υψηλές συγκεντρώσεις σε βραχυπρόθεσμες εκθέσεις, υπάρχουν κάποιες ενδείξεις ότι τα μικροπλαστικά ενδέχεται να αποτελούν κίνδυνο για τα οικοσυστήματα του γλυκού νερού (Scherer et al., 2017). Επιπλέον, υπάρχει ανησυχία ότι η μακροχρόνια έκθεση μπορεί να οδηγήσει στη βιοσυσσώρευση σωματιδίων υπομικρονίων με ευρύτερες επιπτώσεις στην υγεία του περιβάλλοντος (Farrell & Nelson, 2013; Setala et al., 2014; Murray & Cowie, 2011).

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο παρέχει μια επισκόπηση των μικροπλαστικών και των σχετικών θεμάτων, τα οποία κυρίως εστιάζουν σε περιβάλλοντα γλυκού νερού. Η πρώτη ενότητα παρέχει ένα υπόβαθρο στο θέμα της συζήτησης περιγράφοντας και ορίζοντας τα πλαστικά υλικά, τα μικροπλαστικά και τους αναδυόμενους ρύπους.

2. Υδάτινα Περιβάλλοντα Γλυκού Νερού

2.1. Η Υδρόβια Ύπαρξη

Η ζωή ξεκίνησε πριν από 3,5 έως 4 δισεκατομμύρια χρόνια στο υδάτινο περιβάλλον, αρχικά με τη μορφή αυτό-αναπαραγόμενων μορίων (Alberts et al., 1962). Η επακόλουθη εξέλιξη των προκαρυωτικών κυττάρων, ακολουθούμενη από ευκαρυωτικά, οδήγησε στην ύπαρξη μικροοργανισμών ιδιαίτερα προσαρμοσμένων στα υδρόβια συστήματα.

Η ζωή στο υδάτινο περιβάλλον (γλυκού και θαλασσινού νερού) έχει πολλά δυναμικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την επίγεια. Μεταξύ άλλων περιλαμβάνονται η φυσική υποστήριξη (πλευστότητα), η προσβασιμότητα σε τρισδιάστατο χώρο, η παθητική κίνηση από ρεύματα νερού, η διασπορά κινητικών γαμετών σε υγρό μέσο, η ελάχιστη απώλεια νερού (συστήματα γλυκού νερού), τα χαμηλότερα όρια θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας και η έτοιμη διαθεσιμότητα διαλυτών οργανικών και ανόργανων θρεπτικών συστατικών.

Στα πιθανά μειονεκτήματα των υδάτινων βιότοπων περιλαμβάνονται οι οσμωτικές διαφορές μεταξύ του οργανισμού και του περιβάλλοντος υδάτινου μέσου (που οδηγεί σε ενδόσμωση ή εξώσμωση) και υψηλό βαθμό φυσικής διαταραχής σε πολλά υδάτινα συστήματα. Σε μη διαταραγμένα υδρόβια συστήματα όπως είναι οι λίμνες, οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί πρέπει να διατηρήσουν τη θέση τους στην επιφάνεια του νερού ώστε να υπάρχει διαθεσιμότητα φωτός. Σε πολλά υδάτινα σώματα (π.χ. στήλη ύδατος λίμνης), οι φυσικές και χημικές παράμετροι δείχνουν ένα συνεχές - με λίγους ξεχωριστούς μικρο-οικοτόπους. Σε αυτές τις καταστάσεις, τα είδη ανταγωνίζονται σε σχέση με διαφορετικές αναπτυξιακές και αναπαραγωγικές στρατηγικές παρά με ειδικές προσαρμογές στις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

2.2. Ωκεανογραφία και Ωκεανογραφία των Λιμνών

Το νερό καλύπτει επτά δέκατα της επιφάνειας της Γης και καταλαμβάνει εκτιμώμενο συνολικό όγκο $1,38 \times 10^9 \text{ km}^3$. Το μεγαλύτερο μέρος αυτού του ύδατος εμφανίζεται μεταξύ ηπείρων, όπου υπάρχει ως ωκεανός (96,1% του παγκόσμιου ύδατος)

συν ένα μεγάλο μέρος του ατμοσφαιρικού ύδατος. Το υπόλοιπο 3,9% που υπάρχει εντός των ηπειρωτικών ορίων (συμπεριλαμβανομένων των πολικών πάγων), εμφανίζεται κυρίως με τη μορφή του πολικού πάγου και των υπογείων υδάτων. Με την τελευταία μορφή παρουσιάζεται ως ελεύθερα ανταλλάξιμο (δηλαδή όχι χημικά δεσμευμένο) νερό σε υπόγειες περιοχές, όπως οι υδροφόροι ορίζοντες, σε διάφορα βάθη εντός του φλοιού της Γης. Τα μη πολικά επιφανειακά γλυκά ύδατα, συμπεριλαμβανομένων των εδαφικών υδάτων, των λιμνών, των ποταμών και των ρευμάτων καταλαμβάνουν περίπου 0,0013 % του παγκόσμιου ύδατος ή 0,37 % αυτού που εμφανίζεται εντός των ηπειρωτικών ορίων. Ο όγκος του αλατούχου λιμναίου ύδατος ισούται περίπου με εκείνον των λιμνών γλυκού ύδατος. Η μεγαλύτερη αβεβαιότητα ωστόσο έγκειται στην εκτίμηση του όγκου των υπογείων υδάτων. Οι ετήσιες εισροές με βροχόπτωση υπολογίζονται σε $5,2 \times 10^8 \text{ km}^3$, με την προκύπτουσα ροή από ηπειρωτικά συστήματα (γλυκού νερού) σε ωκεανούς περίπου $38\,600 \text{ km}^3$.

Η διάκριση μεταξύ σωμάτων των ωκεανών και των ηπειρωτικών υδάτων οδηγεί στους δύο κύριους κλάδους της υδρόβιας βιολογίας - ωκεανογραφία και λιμνολογία. Η ωκεανογραφία αφορά η μελέτη των υδρόβιων συστημάτων μεταξύ των ηπείρων. Περιλαμβάνει κυρίως αλμυρό νερό, με σημαντικό αντίκτυπο σε παγκόσμιες παραμέτρους, όπως η αλλαγή θερμοκρασίας, ο κύκλος άνθρακα και η κυκλοφορία του νερού. Η λιμνολογία αφορά τη μελέτη των υδρόβιων συστημάτων που περιέχονται στα όρια της ηπείρου, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών γλυκού και αλμυρού νερού. Η μελέτη της βιολογίας των γλυκών υδάτων αποτελεί επομένως μέρος της λιμνολογίας. Αν και τα συστήματα γλυκών υδάτων δεν έχουν τον παγκόσμιο αντίκτυπο όπως αυτά των ωκεανών, έχουν ωστόσο μεγάλη σημασία για τη βιολογία. Είναι σημαντικά οικολογικά χαρακτηριστικά εντός των ηπειρωτικών ορίων, έχουν ξεχωριστές ομάδες οργανισμών και παρουσιάζουν στενούς δεσμούς με τα επίγεια οικοσυστήματα.

Οι δύο κύριες τοποθεσίες (πάνω από 99 % κατ' όγκο) ηπειρωτικού ύδατος - οι πολικοί πάγοι και τα εναλλάξιμα υπόγεια ύδατα - είναι ακραία περιβάλλοντα που είχαν λάβει σχετικά μικρή μικροβιολογική προσοχή μέχρι πρόσφατα. Αν και οι περισσότερες λιμνολογικές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σε λίμνες, ποτάμια και υγρά τοπία, δεν

πρέπει να παραβλέπεται η σημασία άλλων υδάτινων σωμάτων - ιδιαίτερα των τεράστιων παγωμένων περιβαλλόντων των πολικών περιοχών.

Αν και υπάρχουν πολλές διαφορές μεταξύ των λιμνολογικών (εσωτερικών) και ωκεανών (διηπειρωτικών) συστημάτων, υπάρχουν επίσης μερικές στενές ομοιότητες. Η βιολογία των πλαγκτονικών οργανισμών στις λίμνες, για παράδειγμα, παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με εκείνων των ωκεανών - και μεγάλο μέρος της κατανόησης για τους βιοτόπους γλυκού νερού (π.χ., η βιολογία των υδρόβιων ιών) πηγάζει από μελέτες για θαλάσσια συστήματα.

2.3. Βασικές Έννοιες Συστημάτων Γλυκού Νερού

2.3.1. Μικροοργανισμοί Γλυκού Νερού

Ως μικροοργανισμοί μπορούν να οριστούν οι οργανισμοί εκείνοι που δεν είναι άμεσα ορατοί δια γυμνού οφθαλμού και για τη λεπτομερή παρατήρηση των οποίων απαιτείται μικροσκόπιο. Έχουν εύρος μεγέθους (μέγιστη γραμμική διάσταση) έως 200 mm, και ποικίλλουν από ιούς, βακτηρία και αρχαία, έως μικρο-φύκη, μύκητες και πρωτόζωα. Τα υψηλότερα φυτά, μακρο-φύκη, ασπόνδυλα και σπονδυλωτά δεν εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία. Σε αυτά περιλαμβάνεται ο φωτοσυνθετικός ανταγωνισμός ανάμεσα σε ανώτερα φυτά και μικρο-φύκη και ο ρόλος του ζωοπλαγκτού ως βοσκής φυκών και βακτηρίων

2.3.2. Περιβάλλον Γλυκού Νερού - Νερό σε Υγρή και Παγωμένη Κατάσταση

Τα περιβάλλοντα γλυκού νερού θεωρούνται ότι περιλαμβάνουν όλες τις τοποθεσίες όπου εμφανίζεται το γλυκό νερό ως το κύριο εξωτερικό μέσο, είτε σε υγρή είτε σε παγωμένη κατάσταση. Αν και τα παγωμένα υδρόβια περιβάλλοντα θεωρούνται από καιρό ως μικροβιολογικές έρημοι, πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Η Ανταρκτική υπο-ήπειρος, για παράδειγμα, είναι πλέον γνωστό ότι είναι πλούσια σε μικροοργανισμούς (Vincent, 1988), με πρωτόζωα, μύκητες, βακτήρια και μικρο-φύκη συχνά τοπικά άφθονα, τα οποία αλληλεπιδρούν για να σχηματίσουν πολύ δομημένες κοινότητες. Έχουν ανακαλυφθεί νέοι μικροοργανισμοί, συμπεριλαμβανομένων των

ανθεκτικών σε κατάψυξη φωτοτροφικών και ετεροτροφικών, οι οποίοι περιλαμβάνουν πλήθος ενδημικών οργανισμών. Νέα βιοτικά περιβάλλοντα έχουν επίσης ανακαλυφθεί σε αυτό το φαινομενικά εχθρικό περιβάλλον - το οποίο περιλαμβάνει εκτεταμένα πεδία χιονιού, παλιρροιακές λίμνες, λεκάνες πάγου, λεκάνες κρυστάλλων, υπεραλατούχα εδάφη, μικρο-οικοτόπους και παγετώδεις υδάτινες ροές. Πολλά από αυτά τα πολικά περιβάλλοντα είναι αλατούχα και η υδρόβια μικροβιολογία αυτών των περιοχών εξετάζεται κυρίως όσον αφορά τα χιονισμένα πεδία γλυκού νερού σε σχέση με ακραία υδάτινα περιβάλλοντα και τις κρυοφιλικές προσαρμογές των μικροόλγων.

Στη μελέτη του αυτή ο (Sigeo,2005) ασχολήθηκε με υδρόβια συστήματα όπου το νερό υπάρχει σε υγρή κατάσταση για τουλάχιστον ένα μέρος του έτους. Στις περισσότερες περιπτώσεις (εύκρατες λίμνες, ποτάμια και υγρότοποι) το νερό καταψύχεται μόνο για περιορισμένο χρονικό διάστημα, αλλά στις πολικές περιοχές ισχύει το αντίθετο. Ορισμένες περιοχές των πόλων παγώνουν μόνιμα, ενώ άλλες περιοχές παρουσιάζουν περιστασιακή ή περιοδική τήξη. Σε πολλά χιονισμένα μέρη, η βραχυπρόθεσμη παρουσία νερού στην υγρή κατάσταση κατά τη διάρκεια της τήξης οδηγεί σε έκρηξη μεταβολικής δραστηριότητας και είναι σημαντική για την περιορισμένη ανάπτυξη και διασπορά μικροοργανισμών χιονιού καθώς και για την πλήρωση του κύκλου της μικροβιακής ζωής.

2.3.3. Περιβάλλοντα Γλυκού και Αλμυρού Ύδατος

Μέσα στα εσωτερικά ύδατα, οι υδάτινοι χώροι παρουσιάζουν διαβάθμιση όσον αφορά την περιεκτικότητα του νερού σε ιόντα, από γλυκό νερό (χαμηλή περιεκτικότητα σε ιόντα) σε αλμυρό νερό (υψηλή περιεκτικότητα σε ιόντα- κυρίως νατρίου και χλωρίου). Στα αλμυρά ύδατα περιλαμβάνονται οι εκβολές ποταμών, οι υφάλμυρες λίμνες και οι εκτεταμένες περιοχές των πολικών πάγων (Vincent, 1988). Οι υψηλές ιοντικές συγκεντρώσεις αυτών των περιοχών μπορούν επίσης να καταγραφούν από την άποψη της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (ειδική αγωγιμότητα) και του υψηλού οσμωτικού δυναμικού.

Οι φυσιολογικές απαιτήσεις αλμυρών και γλυκών υδάτων είναι τόσο διαφορετικές που οι υδρόβιοι οργανισμοί προσαρμόζονται κανονικά σε ένα σύνολο συνθηκών αλλά όχι

στο άλλο δηλαδή είτε σε αλμυρό είτε σε γλυκό νερό. Η σημασία της αλατότητας στον προσδιορισμό της σύνθεσης των ειδών της υδρόβιας μικροβιακής κοινότητας καταδείχθηκε σε μια πρόσφατη έρευνα των αυστραλιανών αλμυρών λιμνών (Gell & Gasse, 1990), όπου υπήρχαν ξεχωριστές συγκεντρώσεις διατόμων σε ύδατα χαμηλής αλατότητας (υφάλμυρα) και υψηλής αλατότητας (υπεραλμυρά). Ορισμένα είδη διατόμων, ωστόσο, ανιχνεύτηκαν σε ολόκληρο το φάσμα αλατούχων συνθηκών, υποδεικνύοντας την ικανότητα ορισμένων μικροοργανισμών να είναι εντελώς ανεξάρτητοι από τη συγκέντρωση άλατος και τις ιοντικές αναλογίες. Η μακροχρόνια προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές αλατούχες συνθήκες υποδηλώνεται επίσης από την ικανότητα ορισμένων οργανισμών να μεταναστεύουν από αλμυρό νερό σε περιοχές γλυκού νερού και να επιβιώνουν στις νέες συνθήκες. Αυτό φαίνεται να ισχύει για διάφορα παράκτια κόκκινα φύκια λιμνών γλυκού νερού, τα οποία προέρχονταν αρχικά από θαλάσσια περιβάλλοντα (Lin & Blum, 1977).

Οι διαφορές μεταξύ των περιβαλλόντων γλυκού νερού/αλμυρού νερού και των μικροβιακών τους κοινοτήτων, είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε παγκόσμιο επίπεδο, όπου η κυριαρχία των αλατούχων συνθηκών είναι σαφής όσον αφορά την κάλυψη της περιοχής, τη συνολική βιομάζα και τη συνολική συμβολή του κύκλου του άνθρακα.

2.3.4. Λαντικά και Λοτικά Συστήματα Γλυκού Νερού

Τα περιβάλλοντα γλυκού νερού παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές ως προς τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά τους και την επίδραση που έχουν αυτές οι παράμετροι στις μικροβιακές κοινότητες που περιέχουν. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει μια σημαντική διάκριση - μεταξύ των λαντικών και των λοτικών συστημάτων. Τα περιβάλλοντα γλυκών υδάτων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε στάσιμα ύδατα (λαντικά συστήματα - συμπεριλαμβανομένων λεκανών, λιμνών, βάλτων και άλλων κλειστών υδάτινων σωμάτων) και ρεόντων υδάτων (λοτικά συστήματα - ποτάμια, εκβολές και κανάλια). Η διάκριση μεταξύ των λαντικών και των λοτικών συστημάτων δεν είναι απόλυτη αφού σχεδόν όλα τα υδάτινα σώματα έχουν κάποιο στοιχείο ροής. Ωστόσο υπάρχουν βασικές διαφορές μεταξύ δύο συστημάτων όσον αφορά τη διαθεσιμότητα άνθρακα και τους ιστούς τροφίμων.

2.3.5. Βιολογία Μικροοργανισμών Γλυκού Νερού

Η βιολογία των μικροοργανισμών γλυκού νερού εξετάζεται από πέντε βασικές πτυχές:

- Μικροβιακή ποικιλομορφία και αλληλεπιδράσεις εντός των οικοσυστημάτων. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις περιλαμβάνουν χρονικές αλλαγές στη διαδοχή και τη διατροφή (τροφικές).
- Παραλλαγές μεταξύ διαφορετικών περιβαλλοντικών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων λιμνών, ποταμών και υδροτόπων. Κάθε σύστημα έχει το δικό του μείγμα μικροβιακών κοινοτήτων και το δικό του σύνολο φυσικών και βιολογικών χαρακτηριστικών.
- Χαρακτηριστικά και δραστηριότητες των πέντε κύριων ομάδων μικροβιακών οργανισμών - φύκη, βακτήρια, ιοί, μύκητες και πρωτόζωα.
- Οι απαιτήσεις των μικροοργανισμών γλυκού νερού για δύο σημαντικούς περιβαλλοντικούς πόρους - το φως και τα ανόργανα θρεπτικά συστατικά.
- Η μικροβιακή απάντηση στον ευτροφισμό. Τα περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με την αύξηση των θρεπτικών ουσιών έχουν αυξανόμενη σημασία και αντανakλούν τόσο τη μικροβιακή απόκριση στην περιβαλλοντική αλλαγή όσο και τη μικροβιακή επίδραση στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Σε μικρο-επίπεδο, το υδάτινο μέσο που περιβάλλει τους ζωντανούς πόρους γλυκού νερού είναι ένα ετερογενές μείγμα τριών κύριων συστατικών-σωματιδιακό υλικό, διαλυτά συστατικά και νερό. Τα διαλυτά συστατικά αποτελούνται από ανόργανα συστατικά και διαλυμένο οργανικό άνθρακα - DOC. Ως σωματιδιακό υλικό ορίζεται όλο το στερεό υλικό με διάμετρο (μακρύτερος άξονας) μεγαλύτερη από 0,2 mm. Μπορεί περαιτέρω να διαιρεθεί σε χονδροειδή σωματίδια (διάμετρος > 1 mm) και λεπτά σωματίδια (0,2 mm - 1 mm). Αυτό το σωματιδιακό υλικό περιλαμβάνει τόσο ανόργανα όσο και οργανικά συστατικά, με περαιτέρω διαχωρισμό των τελευταίων σε ζώντες (πλαγκτονικούς οργανισμούς κ.λ.π.) και μη ζώντες (υπολείμματα φύλλων, νεκρούς πλαγκτονικούς οργανισμούς κ.λ.π.) οργανισμούς. Ο αυθαίρετος χαρακτηρισμός της διαλυμένης

οργανικής ύλης (DOM) ως συμπερίληψη όλου του υλικού με μέγεθος $<0,2$ mm οδηγεί στην ανώμαλη συμπερίληψη τόσο σωματιδιακού υλικού (π.χ. σωματίδια ιού, λεπτά οργανικά υπολείμματα) όσο και πραγματικά διαλυτού υλικού (π.χ., μικρά οργανικά μόρια MW, ανόργανα ανιόντα και κατιόντα) σε αυτήν την κατηγορία.

Με αυτούς τους ορισμούς όσον αφορά το μέγεθός τους, οι μικροοργανισμοί αποτελούν κύρια συστατικά και των τριών κατηγοριών οργανικού υλικού - CPOM, FPOM και DOM. Το διαλυμένο οργανικό υλικό (DOM) υδάτινων συστημάτων μπορεί να μετρηθεί ως προς την ολική μάζα ή πιο τυπικά ως προς την περιεκτικότητα σε άνθρακα, όταν εκφράζεται ως διαλυμένος οργανικός άνθρακας (DOC). Στους παραπάνω ορισμούς μεγέθους, το DOC περιλαμβάνει επίσης ορισμένα σωματίδια καθώς και πραγματικά διαλυτό υλικό.

Στο περιβάλλον των γλυκών υδάτων, το νερό είναι σημαντικό τόσο ως κύριο εσωτερικό συστατικό των βιοτόπων όσο και ως περιβαλλοντική μήτρα. Λόγω αυτού του διπλού ρόλου, οι φυσικές/χημικές ιδιότητες του νερού καθίστανται σημαντικές για τη φυσιολογία και την οικολογία των οργανισμών του γλυκού νερού.

Το νερό είναι ασυνήθιστο σε σύγκριση με άλλα μόρια παρόμοιας δομής (H_2S , NH_3 , HF) ως προς το ότι υφίσταται ως υγρό και όχι ως ατμός στην επιφάνεια της γης και είναι το ένα από τα δύο μόνο ανόργανα υγρά (μαζί με τον υδράργυρο) που μπορούν να υπάρχουν σε αυτήν την κατάσταση υπό συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος και πίεσης. Οι μοναδικές ιδιότητες του νερού προκύπτουν από την ασυνήθιστη μοριακή δομή του, χάρη στο διαχωρισμό των φορτίων μεταξύ ηλεκτροαρνητικών ατόμων οξυγόνου και ηλεκτροθετικών ατόμων υδρογόνου. Αυτή η ασυμμετρία φορτίου οδηγεί σε ασθενούς δεσμούς υδρογόνου μεταξύ των μορίων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μοριακών σύμπλοκων - $(H_2O)_n$ - με ημι-κρυσταλλική δομή. Αυτές οι χημικές ιδιότητες είναι που καθορίζουν την υγρή κατάσταση του νερού σε θερμοκρασία δωματίου.

Το νερό παρουσιάζει ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών και υψηλές τιμές για ιξώδες, ειδική θερμική ικανότητα, λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, διηλεκτρική σταθερά και επιφανειακή τάση. Αντίθετα οι τιμές για τη θερμική αγωγιμότητα, την απορρόφηση του

φωτός και τους συντελεστές σκέδασης είναι χαμηλές. Αυτές οι ιδιότητες έχουν σημαντικές επιπτώσεις στα φυσικά χαρακτηριστικά του υδάτινου περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένων των αλλαγών θερμοκρασίας στην επιφάνεια του νερού, του σχηματισμού πάγου, της διαστρωμάτωσης, της ανάμιξης και της κυκλοφορίας του νερού, της καθίζησης των σωματιδίων στη στήλη ύδατος και της έντασης του φωτός της λίμνης και των ποταμών. Ορισμένες φυσικές ιδιότητες, όπως ο συντελεστής θερμικής διαστολής και ιξώδους, ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με τη θερμοκρασία - έτσι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξαρτώνται επίσης έντονα από τη θερμοκρασία. Οι συντελεστές απορρόφησης φωτός και σκέδασης ποικίλλουν ανάλογα με τα φασματικά χαρακτηριστικά και εξαρτώνται από το μήκος κύματος (Kirk, 1994).

2.3.6. Επίδραση Φυσικών Ιδιοτήτων Νερού στους Υδρόβιους Μικροοργανισμούς

Οι φυσικές ιδιότητες του νερού ασκούν θεμελιώδη και ευρεία επίδραση στη βιολογία των μικροοργανισμών γλυκού νερού μέσω των επιπτώσεών τους στο υδάτινο περιβάλλον. Μερικά από αυτά τα φαινόμενα είναι γενικά σε όλα τα υδάτινα σώματα, ενώ άλλα είναι πιο συγκεκριμένα σε συστήματα λωτικά ή λαντικά, αντίστοιχα.

Τα χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας του νερού είναι γενικά σημαντικά, ρυθμίζοντας την επίδραση των εξωτερικών αλλαγών στην ατμοσφαιρική θερμοκρασία. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και η υψηλή θερμική χωρητικότητα ρυθμίζουν τις ημερήσιες και εποχιακές αλλαγές στη θερμοκρασία. Αυτό έχει ευρείες επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένων σχετικά υψηλών ποσοστών αποσύνθεσης (σε σύγκριση με τα επίγεια συστήματα) από μύκητες και άλλων σαπροφύτων. Άλλα χαρακτηριστικά γενικής σημασίας περιλαμβάνουν την υψηλή επιφανειακή τάση (ανάπτυξη κοινοτήτων επιφανειακών μικροοργανισμών *neuston*) και την χαμηλή απορρόφηση φωτός/σκέδαση. Η βαθιά διείσδυση της στήλης ύδατος και η ακτινοβολήση ιζημάτων προάγει τη φωτοσύνθεση και άλλες δραστηριότητες που προκαλούνται από το φως σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλόντων.

Η χυδην ροή νερού σε λοτικά συστήματα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί σε σχέση με τον αδιάστατο αριθμό Reynolds (Re), όπου:

$$Re = \frac{\bar{U}L}{\eta}$$

Και \bar{U} είναι η ταχύτητα του υγρού (m/s^{-1}), L είναι η χαρακτηριστική μονάδα μέτρησης μήκους (m) και η η το κινηματικό ιξώδες.

Ο αριθμός Reynolds είναι χαρακτηριστικός για μια συγκεκριμένη κατάσταση μαζικής ροής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάκριση διαφορετικών τύπων ροής που κυμαίνονται από στρωτή έως τυρβώδη. Σε χαμηλές τιμές Re (<500) κυριαρχούν οι ιξώδεις δυνάμεις και η ροή είναι στρωτή. Οι αυξήσεις στον αριθμό Reynolds (500-10³) οδηγούν σε μεταβατική ροή, ενώ τιμές πάνω από 10³ δηλώνουν τυρβώδεις συνθήκες. Ο αριθμός Reynolds ποσοτικοποιεί την αναλογία αδράνειας προς ιξώδεις δυνάμεις μέσα σε ένα υγρό και τονίζει τη σημασία του ιξώδους στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ροής ενός ρεύματος ή ενός ποταμού. Το σχετικά υψηλό ιξώδες του νερού μειώνει την τιμή του Re και συνεπώς ευνοεί τις συνθήκες στρωτής ροής.

Η ταχύτητα και ο τύπος της ροής του νερού έχει μεγάλη σημασία για τις λοτικές βενθικές κοινότητες σε σχέση με τη διασπορά, την απόκτηση θρεπτικών ουσιών, τον ανταγωνισμό, τις αλληλεπιδράσεις θηρευτών-θηραμάτων και τη δημιουργία μικροπεριβάλλοντος.

Οι φυσικές ιδιότητες του νερού είναι σημαντικές για τους μικροοργανισμούς των λιμνών με διάφορους συγκεκριμένους τρόπους, όπως η διαστρωμάτωση της λίμνης, η ανάπτυξη ανθών πάγου και η δημιουργία μικροβιακών κοινοτήτων επιφανειακού βιοφίλμ (neuston).

Σχηματισμός ανθών πάγου. Οι διακυμάνσεις στην πυκνότητα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη διατήρηση της θερμικής διαστρωμάτωσης σε στάσιμα ύδατα, με τη θερμοκρασία να μειώνεται κανονικά με το βάθος στη στήλη ύδατος. Η πυκνότητα του νερού, ωστόσο, φτάνει το μέγιστο στους 3,95°C, με αποτέλεσμα την αντίστροφη στρωματοποίηση κάτω από το επίπεδο του πάγου (η θερμοκρασία

αυξάνεται με το βάθος) καθώς τα επιφανειακά ύδατα πλησιάζουν το σημείο πήξης. Η ανώμαλη καμπύλη θερμοκρασίας-πυκνότητας νερού είναι ιδιαίτερα σημαντική σε υδάτινα σώματα όπως η λίμνη Βαϊκάλη (Ρωσία), όπου η τοπική θέρμανση κάτω από το επιφανειακό στρώμα πάγου στα τέλη της άνοιξης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ασθενών ρευμάτων μεταφοράς. Τα ρεύματα αυτά αρκούν για να διατηρηθούν οι μικροβιακές κοινότητες (ιδιαίτερα τα διάτομα) σε εναιώρημα κάτω από τον πάγο σε μια εποχή του χρόνου κατά την οποία η ένταση του φωτός αυξάνεται, με αποτέλεσμα τα φύκια να ανθίζουν. Εάν η πυκνότητα του νερού απλώς μειωνόταν με την αύξηση της θερμοκρασίας από 0° C, δεν θα προέκυπτε καθίζηση και δεν θα ήταν δυνατή η ροή κάτω από τον πάγο.

Κοινότητες του επιφανειακού στρώματος Η υψηλή επιφανειακή τάση του νερού είναι σημαντική για τη δημιουργία ενός επιφανειακού βιοφίλμ, με μια συνδεδεμένη κοινότητα επιφανειακών μικροοργανισμών. Η μείωση της επιφανειακής τάσης από οργανικά μόρια οδηγεί στην αυθόρμητη προσρόφηση τους στη διεπαφή αέρα-νερού, δημιουργώντας μια μικροστιβάδα υψηλής θρεπτικής ουσίας. Το γεγονός αυτό λειτουργεί ως τύπος για μικροβιακή προσκόλληση και παροχή θρεπτικών ουσιών, οδηγώντας στην ανάπτυξη πυκνών επιφανειακών πληθυσμών βακτηρίων, φυκών και πρωτοζώων. Αυτοί οι επιφανειακοί μικροοργανισμοί αποτελούν τμήμα μιας ευρύτερης κοινότητας επιφανειακών βιοτόπων (neuston), η οποία περιλαμβάνει διάφορα ασπόνδυλα. Πολλά από αυτά, όπως ο κάνθαρος (Notonecta) και οι προνύμφες κουνουπιών, εκμεταλλεύονται την υψηλή επιφανειακή τάση του νερού για να προσκολληθούν στην επιφάνεια.

2.4. Περιβάλλοντα Γλυκού Νερού

Τα περιβάλλοντα γλυκού νερού δείχνουν μεγάλη ποικιλία από άποψη μεγέθους, μονιμότητας και πολυπλοκότητας. Επίσης ποικίλλουν ως προς την κατάσταση του υδατικού μέσου (κατεψυγμένο ή υγρό) και σε ένα ευρύ φάσμα άλλων φυσικοχημικών συνθηκών που επιβάλλονται στους ζωντανούς οργανισμούς που κατοικούν εκεί.

Η διάκριση μεταξύ στάσιμων υδάτων (λαντικά συστήματα) και των ρέοντων υδάτων (λοτικά συστήματα) προαναφέρθηκε. Τα συστήματα γλυκού νερού εξετάζονται σε

τέσσερις κύριες κατηγορίες-λίμνες, υγρότοποι (λαντικά συστήματα), ποτάμια και εκβολές ποταμών (λοτικά συστήματα). Παρόλο που η πλειονότητα αυτών των περιβαλλόντων επιτρέπει σε ένα ευρύ φάσμα μικροοργανισμών να επιβιώσουν και να αναπτυχθούν υπό «κανονικές» συνθήκες, άλλα περιβάλλοντα είναι πιο περιορισμένα στην υποστήριξη των βιοτόπων γλυκού νερού. Τέτοια «ακραία» περιβάλλοντα περιορίζουν σοβαρά τις μεταβολικές δραστηριότητες των υδρόβιων οργανισμών.

Τα φύκια γλυκού νερού δεν εμφανίζονται ως μια επίσημη ταξινομική ομάδα οργανισμών. Η ετερογένεια των φυκών γλυκού νερού τονίζεται από το γεγονός ότι χωρίζονται μεταξύ δύο από τους κύριους τομείς των ζώντων οργανισμών - τα Βακτήρια (μια ομάδα προκαρυωτικών που περιλαμβάνει κυανοπράσινα φύκια) και τα Ευκαρυωτικά (συμπεριλαμβανομένων όλων των ευκαρυωτικών φυκών). Αν και υπάρχει μικρή συναίνεση μεταξύ των φυσιολόγων όσον αφορά την ακριβή ομαδοποίηση, χωρίζονται σε 10 βασικές κατηγορίες ή τάξεις. Η κατηγοριοποίηση σχετίζεται με την μικροσκοπική εμφάνιση, την κινητικότητα και τα οικολογικά χαρακτηριστικά ή με βιοχημικά και κυτταρολογικά χαρακτηριστικά. Περαιτέρω πληροφορίες για την ταξινόμηση των φυκών μπορούν να ληφθούν από μια σειρά μελετών, συμπεριλαμβανομένων των (Hoek et al., 1995), (Wehr & Sheath, 2003), και (John et al., 2002). Ο μοριακός χαρακτηρισμός των φυκών του γλυκού νερού έχει αυξανόμενη ταξινομική και διαγνωστική σημασία

Η εξέταση περιβαλλοντικών δειγμάτων κάτω από το μικροσκόπιο φωτός αποκαλύπτει ένα ευρύ φάσμα μορφολογίας και μεγέθους φυκών που κυμαίνεται από μονοκύτταρες σε αποικιακές μορφές, (σε φρέσκα δείγματα) διαφορές στο χρώμα, παρουσία ή απουσία εξωτερικού στρώματος βλεννογόνου και κινητικότητα.

Η κινητικότητα συμβαίνει τόσο σε στερεές επιφάνειες (βενθικά φύκια) όσο και εντός της στήλης ύδατος (πλαγκτονικές μορφές) και περιλαμβάνει τόσο ενεργές όσο και ανενεργές (μηχανισμοί πλευστότητας) διαδικασίες. Τα πλαγκτονικά διάτομα είναι μη κινητικά και εξαρτώνται από τη ροή του νερού για να διατηρήσουν τη θέση τους μέσα στη στήλη ύδατος. Ανάμεσα στα ευκαρυωτικά φύκια, τρεις ομάδες-τα ευγλενοειδή, τα δινομαστιγωτά και οι κρυπτομονάδες είναι εντελώς μονοκύτταρα και είναι ενεργά κινητικά χάρη στο μαστίγιο που διαθέτουν.

Τα φύκια είναι παρόντα σε όλα τα περιβάλλοντα γλυκών υδάτων, συμπεριλαμβανομένων των λαντικών και λωτικών συστημάτων, καθώς και σε πεδία χιονιού, αερολύματα και σε μια σειρά ακραίων υδάτινων καταστάσεων. Εντός των λωτικών και λαντικών συστημάτων, ορισμένες ομάδες φυκών (ευγλενοειδή, δινομαστιγωτά, κρυπτομονάδες και χρυσόφυτα) δείχνουν προτίμηση για τις συνθήκες του πλαγκτόν, ενώ άλλες (κυανοπράσινα φύκη, πράσινα φύκη και διάτομα) είναι εξίσου πλαγκτονικές ή βενθικές. Παρόλο που η μεγάλη πλειονότητα των ειδών φυκών γλυκού νερού έχουν ευρεία γεωγραφική κατανομή, υπάρχουν ορισμένα είδη χρυσόφυτων, πράσινων και κόκκινων φυκών και διατόμων που περιορίζονται (ενδημικά) σε ορισμένες γεωγραφικές περιοχές ή σε συγκεκριμένα υδάτινα σώματα. Ορισμένα είδη γλυκού νερού μπορούν επίσης να επιβιώσουν σε υφάλμυρο (εν μέρει αλατούχο) νερό, το οποίο υπογραμμίζει τη συγγένεια των διαφόρων μεγάλων ομάδων.

2.5. Βιοποικιλότητα σε Συστήματα Γλυκού Νερού

Οι διαφορετικές διαιρέσεις των φυκών γλυκού ύδατος διαφέρουν ως προς τη σχέση τους με τα γλυκά ύδατα και θαλάσσια περιβάλλοντα. Ο βαθμός προσαρμογής και εξέλιξης σε αυτά τα ξεχωριστά υδρόβια συστήματα υποδεικνύεται από τη σχετική αφθονία και έκταση της ποικιλίας των ειδών που εμφανίζεται για συγκεκριμένες ομάδες. Κανένα από τα κύρια τμήματα φυκών δεν είναι αποκλειστικά γλυκού νερού, αλλά ορισμένες ομάδες παρουσιάζουν μεγαλύτερη αφθονία και ποικιλομορφία στα συστήματα αυτά-συμπεριλαμβανομένων των κυανοπράσινων και πράσινων φυκών. Άλλες ομάδες, όπως τα διάτομα και τα χρυσόφυτα, εκπροσωπούνται καλά και στις δύο καταστάσεις, ενώ τα δινομαστιγωτά, τα κόκκινα και τα καφέ φύκη παρουσιάζουν μεγαλύτερη βιοποικιλότητα στα θαλάσσια συστήματα. Τα κόκκινα και τα καφέ, συγκεκριμένα, έχουν σχετικά λίγους εκπροσώπους στο γλυκό νερό.

Η βιοποικιλότητα στα κύρια τμήματα φυκών στα συστήματα γλυκού νερού υποδεικνύεται από το εύρος των οικοτόπων που έχουν αποικιστεί και από την ποικιλία των γενετικών, φυσιολογικών, βιοχημικών και δομικών χαρακτηριστικών που εμφανίζονται στην ομάδα. Ο αριθμός των γενών εντός διαιρέσεων παρέχει έναν δείκτη φαινοτυπικής βιοποικιλότητας και στα φύκια γλυκού νερού της Βόρειας Αμερικής (μια καλά

χαρακτηρισμένη ομάδα που εμφανίζεται σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή) κυμαίνεται από > 300 (Χλωροφύτα) έως < 5 (Φαιοφύτα).

Αν και τα βιοχημικά και κυτταρολογικά χαρακτηριστικά είναι σημαντικοί δείκτες για τη διάκριση διαφορετικών ομάδων φυκών (Descy et al., 2000), ωστόσο έχουν περιορισμένη χρήση ως βοηθήματα στον προσδιορισμό δειγμάτων πεδίου, δεδομένου ότι συνήθως απαιτούν λεπτομερή εργαστηριακή (χημική και μικροσκοπική) ανάλυση.

Τα κυριότερα βιοχημικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν τη χρώση, τα προϊόντα αποθήκευσης, τη σύνθεση εξωτερικού καλύμματος (κυτταρικό τοίχωμα) και την ταυτότητα των οσμωτικώς ενεργών οργανικών διαλυτών χαμηλού μοριακού βάρους (MW).

Η χρώση των φυκών προέρχεται από τρεις κύριες ομάδες μορίων- τη χλωροφύλλη, τα καροτενοειδή και τις φυκοβίνες (Hoek et al., 1995). Το κυρίως πράσινο χρώμα αυτών των οργανισμών (από χλωροφύλλη) συχνά τροποποιείται από την παρουσία των άλλων χρωστικών. Το χρυσό-καφέ χρώμα των διατόμων, για παράδειγμα, προκύπτει λόγω της απόκρυψης της χλωροφύλλης από τη βοηθητική χρωστική φουκοξανθίνη και τα κυανοπράσινα φύκια έχουν μια κυανή απόχρωση χάρη στην φυκοκυανίνη.

Οι χρωστικές φυκών εντοπίζονται στο κύτταρο των φυκών σε συνδυασμό με τις φωτοσυνθετικές ή θυλακοειδείς μεμβράνες. Οι χλωροφύλλες αποτελούνται από ένα σύστημα δακτυλίου πορφυρίνης με ένα κεντρικό άτομο μαγνησίου, και εμφανίζονται ως τέσσερις κύριοι τύποι - χλωροφύλλη-α, -b, -c (c1, c2 και c3) και -d. Η χλωροφύλλη-α εμφανίζεται σε όλα τα φωτοσυνθετικά φύκη ως η κύρια φωτοσυνθετική χρωστική (ο ελαφρύς υποδοχέας του φωτοσυστήματος I της αντίδρασης φωτός) και κυμαίνεται από 0,3-3% του ξηρού βάρους των φυκών. Οι άλλες χλωροφύλλες λειτουργούν ως βοηθητικές χρωστικές και έχουν περιορισμένη αλλά διακριτική κατανομή εντός των διαφόρων ομάδων φυκών.

Τα καροτενοειδή είναι μόρια μακράς αλυσίδας που μπορούν να χωριστούν σε δύο κύριες ομάδες: ι) καροτένη (υδρογονάνθρακες χωρίς οξυγόνο) και ιι) ξανθοφύλλες (τα οξυγονωμένα παράγωγά τους). Από τις τέσσερις καροτένες που υπάρχουν στα φύκια, η

β-καροτένη, εμφανίζεται σε όλες τις ομάδες φυκών ενώ οι α-, γ- και ε-καροτένη έχουν πιο περιορισμένη εμφάνιση. Οι ξανθοφύλλες εμφανίζονται ως ένα ευρύ φάσμα μορίων, με περίπου 30 διαφορετικούς τύπους, αναγνωρίζονται και σχηματίζουν ένα διακριτικό μοτίβο κατανομής εντός των διαφόρων ομάδων φυκών.

Οι φυκοβιλίνες είναι υδατοδιαλυτές κόκκινες ή μπλε χρωστικές ουσίες που βρίσκονται επάνω (κυανοπράσινα φύκια, κόκκινα φύκια) ή στο εσωτερικό (κρυπτοφύτες) των φωτοσυνθετικών μεμβρανών. Το χρωστικό μόριο ή το χρωμοφόρο είναι μια τετραπυρόλη και εμφανίζεται σε συνδυασμό με μη χρωματισμένη πρωτεΐνη (ή αποπρωτεΐνη) για να σχηματίσει τη φυκολιπρωτεΐνη. Το μπλε χρωμοφόρο είναι φυκοκυανοβιλίνη και το κόκκινο χρωμοφόρο φυκοερυθροβιλίνη.

Τα φύκια περιέχουν μια σειρά προϊόντων αποθήκευσης υδατανθράκων υψηλού και χαμηλού μοριακού βάρους. Οι ενώσεις που μοιάζουν με άμυλο υψηλού MW είναι είτε α-1,4 συνδεδεμένες είτε β-1,3 συνδεδεμένες γλυκάνες, και είναι διαγνωστικές για συγκεκριμένες ομάδες φυκών. Οι υδατάνθρακες αποθήκευσης χαμηλού MW περιλαμβάνουν τη σακχαρόζη (σημαντικό απόθεμα σε πράσινα φύκια και ευγλενοειδή) και τρεαλόζη (κυανοπράσινα φύκια) ενώ οι γλυκοζίτες και πολυόλες (π.χ. μαννιτόλη) να είναι σημαντικές στα κόκκινα και καφέ φύκια αντίστοιχα.

Τα αποθέματα πρωτεϊνών περιλαμβάνουν την κυανοφυκίνη, που υπάρχει στα κυανοπράσινα φύκια ως σημαντικό προϊόν αποθήκευσης σταθερού αζώτου. Τα αποθέματα λιπιδίων είναι επίσης ευρέως παρόντα στα φύκια και φαίνεται να είναι ιδιαίτερα εμφανή στα δινιλοφελικά και τα διάτομα. Τα πολυφωσφορικά αποτελούν και αυτά ένα σημαντικό προϊόν αποθήκευσης σε όλες τις ομάδες φυκών και είναι σημαντικά για την κατανάλωση φωσφορικών αλάτων.

Το εξωτερικό κάλυμμα των φυκών σχηματίζει τυπικά μια συνεχή διακριτή δομή (κυτταρικό τοίχωμα), η οποία αναφέρεται ποικίλα ως σφαιρίδιο (ευγλενοειδή), θεκά (δινομαστιγωτά), περιπλάστη (κρυπτομονάδες) και κρούστα (διατόματα). Το θεκά και ο περιπλάστης εμφανίζονται μέσα στο πλασμάλωμα, τα υπόλοιπα είναι εξωτερικά.

Γενικά, τα κυτταρικά τοιχώματα φυκών αποτελούνται από δύο συστατικά - ένα σκελετικό ή ινώδες συστατικό και μια άμορφη μήτρα. Το πιο κοινό σκελετικό συστατικό είναι η κυτταρίνη (πολυμερές 1,4 συνδεδεμένης β-D-γλυκόζης), αλλά μπορεί επίσης να εμπλέκονται και άλλα μακρομόρια (συμπεριλαμβανομένων των:πηκτίνη, πεπτιδογλυκάνη (βλεννοπεπτίδιο) και πρωτεΐνη). Τα άμορφα βλενώδη συστατικά αποτελούν σημαντικό μέρος της δομής του κυτταρικού τοιχώματος σε κόκκινα και καφέ φύκια και σχηματίζουν ένα ξεχωριστό στρώμα (βλεννογόνο) σε πολλές ομάδες φυκών. Τα διάτομα είναι τα μοναδικά των οποίων το κυτταρικό τοίχωμα είναι κατασκευασμένο από άμορφο, ενυδατωμένο πυρίτιο που συνδέεται με πρωτεΐνες, πολυσακχαρίτες και λιπίδια (Fischer et al., 1999).

Τα κυτταρολογικά χαρακτηριστικά έχουν θεμελιώδη σημασία για τη διάκριση των διαφορετικών ομάδων φυκών. Η πιο θεμελιώδης διαίρεση φυκών, που τα διαχωρίζει σε προκαρυωτικά (κυανοπράσινα φύκια) και ευκαρυωτικά (άλλες ομάδες), βασίζεται στη δομή των κυττάρων, με τα κυανοπράσινα φύκια να μην έχουν πυρήνα κυττάρου και διακριτά κυτταροπλασματικά οργανίδια που είναι χαρακτηριστικά των ευκαρυωτικών κυττάρων. Η σχετικά «πρωτόγονη» κατάσταση των λυανοπράσινων φυκών σε καμία περίπτωση δεν μειώνει την οικολογική και εξελικτική επιτυχία τους στο περιβάλλον των γλυκών υδάτων.

Μέσα στα ευκαρυωτικά φύκια, άλλα σημαντικά κυτταρολογικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν τη λεπτή δομή του χλωροπλάστη, τον αριθμό και την εμφάνιση των μαστιγίων και την λεπτή δομή της πυρηνικής χρωματίνης. Οι χλωροπλάστες διαφέρουν ως προς τον αριθμό των εξωτερικών μεμβρανών (δύο μεμβράνες περιβλήματος συν πρόσθετες ενδοπλασματικές δικτυωτές μεμβράνες) και την ομαδοποίηση των θυλακοειδών - κυμαίνονται από μεμονωμένες μεμβράνες (δεν ομαδοποιούνται) έως και συσσωματώματα των έξι. Σημαντική ποικιλομορφία συμβαίνει σε σχέση με τη δομή μαστιγίου. Αρκετές ομάδες αλγών ενώνονται με την παρουσία άνισων (ετεροκοντοφύτων) μαστίγιων, (που διαθέτουν ένα μακρύ με κατεύθυνση προς τα εμπρός μαστίγιο και ένα μαλακό με κατεύθυνση προς τα πίσω). Η λεπτή δομή της πυρηνικής χρωματίνης είναι διαγνωστική για μια συγκεκριμένη ομάδα φυκών, τα δινομαστιγωτά, τα οποία έχουν

διακριτικά μόνιμα συμπυκνωμένα χρωμοσώματα. Η εργασία των (Hoek et al., 1995) αποτελεί μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση της κυτταρολογίας των φυκών.

2.6. Χαρακτηριστικά Ομάδων Φυκών

Στη συνέχεια περιγράφονται τα γενικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών ομάδων φυκών. Τα κυανοπράσινα φύκια (Κυανόφυτα) αναφέρονται και ως κυανοβακτήρια. Πρόκειται για την μόνη ομάδα προκαρυωτικών φυκών. Τα κυανόφυτα είναι σημαντικά συστατικά των κοινοτήτων των περιφύτων και φυτοπλαγκτόν, και υπάρχουν τόσο ως μονοκύτταρες (pico-πλαγκτόν) όσο και ως αποικιακές μορφές. Τα κυανοπράσινα φύκη πιστεύεται ότι έχουν εξελιχθεί κατά την πρώιμη εποχή του Προκάμβριου, όταν εκτέθηκαν σε μειωμένη ατμόσφαιρα και υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας (ιδιαίτερα UV). Κατά τη διάρκεια της μακρόχρονης ύπαρξής τους, έχουν αποικίσει σχεδόν όλους τους βιότοπους γλυκού νερού, τους θαλάσσιους και τους χερσαίους, συμπεριλαμβανομένων ακόμη και των ακραίων περιβαλλόντων όπως οι θερμές πηγές (έως 70° C), οι υπεραλμυρές λίμνες, οι λίμνες υψηλής αρκτικής και αλπικής, και οι καυτές και κρύες ερήμους. Η γενική επιτυχία των κυανοπράσινων φυκών σε υδάτινα περιβάλλοντα αποδίδεται στους ακόλουθους παράγοντες:

- Αποτελεσματικοί μηχανισμοί συλλογής φωτός, με δυνατότητα προσαρμογής στις φασματικές διαφορές με παραλλαγές των βοηθητικών χρωστικών.
- Συνεχής φωτοσύνθεση σε χαμηλές συγκεντρώσεις CO₂ και υψηλό pH. Αυτές οι συνθήκες είναι ιδιαίτερα εμφανείς κατά τον σχηματισμό άνθισης σε ευτροφικά ύδατα.
- Αντοχή στην καταστροφική ακτινοβολία, με την παραγωγή μια σειρά ενώσεων που δρουν ως φωτοπροστατευτικά απορροφώντας μικρά μήκη κύματος
- Προσαρμογές θερμοκρασίας-διαφορετικά είδη μπορούν να αναπτυχθούν σε ακραία ζεστά ή κρύα περιβάλλοντα. Σε εύκρατες και τροπικές λίμνες, τα κυανοπράσινα φύκη μπορούν να διατηρήσουν ρυθμούς ανάπτυξης σε υψηλές καλοκαιρινές θερμοκρασίες, σε αντίθεση με άλλα φύκη.

- Μηχανισμός πλευστότητας για τον καθορισμό της θέσης στη στήλη ύδατος. Αυτή η ενεργειακά αποδοτική διαδικασία επιτρέπει στα κυανοπράσινα φύκη να πραγματοποιούν ημερήσια μετανάστευση εντός της στήλης ύδατος μεταξύ επιφανειακών υδάτων (υψηλό φως και θήρευση) και κατώτερων υδάτων (υψηλές συγκεντρώσεις φωσφορικών και νιτρικών, αποφυγή φωτοαναστολής).
- Απόδοση στην πρόσληψη θρεπτικών ουσιών Τα κυανοπράσινα φύκη δείχνουν μια ολόκληρη σειρά χαρακτηριστικών που σχετίζονται με την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών:
 - είναι σε θέση να κυριαρχούν τόσο σε oligοτροφικά (ως *rico*-πλάγκτον) όσο και σε ευτροφικά (μεγάλα αποικιακά πράσινα) περιβάλλοντα.
 - Μερικά κυανοπράσινα μπορούν να καθορίσουν το αέριο άζωτο, κάτι που τα καθιστά ικανά να αναπτυχθούν σε χαμηλές αναλογίες N/P.
 - παράγουν σιδηροφόρα υπό συνθήκες στρες σιδήρου, επιτρέποντάς τους να καθαρίσουν το Fe (III) σε περιοριστικά περιβαλλοντικά επίπεδα.
 - δεν απαιτούν εξωγενείς πηγές για τις ανάγκες τους σε βιταμίνες.

Έχουν χημικούς (τοξίνες) και φυσικούς (μεγάλες αποικίες) μηχανισμούς για να αντισταθούν στην απομάκρυνση με τη βοήθεια επιλεκτικής καταναλώσης ζωοπλαγκτόν. Έχουν αναπτύξει εξειδικευμένες συμβιωτικές βακτηριακές συσχετίσεις, οι οποίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε σχέση με τις λειτουργίες της ετεροκύστης.

Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν ιδιαίτερη σημασία στην ικανότητα των κυανοπράσινων φυκών να σχηματίζουν κυρίαρχες ανθίσεις στα ευτροφικά ύδατα

Τα πράσινα φύκη (Χλωρόφυτα) αποτελούν την πιο ποικίλη κατηγορία φυκών. Είναι σημαντικά τόσο ως πλαγκτόν όσο και ως συνδεδεμένοι οργανισμοί, με μορφολογίες που κυμαίνονται από απλές μονοκυτταρικές έως πολύπλοκες αποικιακές μορφές. Μερικά μακροσκοπικά μέλη των πράσινων φυκών (*Chara*, *Cladophora*) μοιάζουν εμφανησιακά με υψηλότερα φυτά και είναι σημαντικά μέλη των περιφύτων. Ορισμένες ομάδες ανάμεσα στα πράσινα φύκη έχουν συγκεκριμένες οικολογικές απαιτήσεις, συμπεριλαμβανομένων των μαστιγοφόρων χλωροφύτων (πλούσια σε θρεπτικά συστατικά ύδατα) και των

μονοκύτταρων κοκκιδίων και αποικιών (υψηλό φως, θρεπτικά συστατικά και θερμοκρασία, στάσιμα νερά). Τα δεσμίδια είναι τα πιο διαδεδομένα σε λίμνες και τάφρους όπου επικρατούν η χαμηλή αγωγιμότητα και τα χαμηλά έως μέτρια επίπεδα θρεπτικών ουσιών.

Όσον αφορά τη γενική αφθονία και την ποικιλομορφία των ειδών, τα ευγλενοειδή (Ευγλενόφυτα) πρόκειται για μια σχετικά μικρή ομάδα φυκών γλυκού νερού. Αυτοί οι οργανισμοί μπορεί να γίνουν ιδιαίτερα άφθονοι, χάρη στο φυτοπλαγκτόν των στάσιμων υδάτων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά και μπορούν εύκολα να ταυτοποιηθούν στο μικροσκόπιο χάρη στη μονοκυτταρική ατρακτοειδή μορφολογία και την ενεργή κινητικότητά τους.

Τα κιτρινο-πράσινα φύκη (Eustigmatophyta, Raphidophyta and Tribophyta) είναι μια ποικίλη ομάδα οργανισμών γλυκού νερού, που απαντώνται σε ένα ευρύ φάσμα οικοτόπων, και με μεγάλο αριθμό αναφερόμενων γενών (τουλάχιστον 90 στη Βόρεια Αμερική). Αν και είναι ευρέως διαδεδομένα, τα φύκη αυτά δεν ανήκουν στα εξέχοντα μέλη της χλωρίδας του γλυκού νερού, καθώς πολλές είναι μικρές μορφές κοκκοειδών που εμφανίζονται μόνο σε μικρούς αριθμούς.

Οι δινομαστιγωτές (Dinophyta) είναι συχνά σχετικά δευτερεύοντα συστατικά του φυτοπλαγκτού της λίμνης σε σχέση με τον αριθμό των ειδών. Το μεγάλο μέγεθος αυτών των οργανισμών, ωστόσο, σημαίνει ότι η συμβολή του βιο-όγκου στο φυτοπλαγκτόν είναι πολύ πιο σημαντική - και συχνά συμβάλλουν σημαντικά στη συνολική βιομάζα φυκών. Μαζί με τα αποικιακά κυανοπράσινα, αυτά τα φύκη είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα K- επιλεγμένων οργανισμών και τείνουν να σχηματίζουν ανθίσεις σε εύκρατες λίμνες προς το τέλος του καλοκαιριού όταν η διαστρωμάτωση είναι σταθερή και τα θρεπτικά συστατικά του επιλίμνιου μειώνονται. Υπό τέτοιες συνθήκες, αυτοί οι εξαιρετικά κινητικοί οργανισμοί είναι σε θέση να μεταναστεύσουν στο πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά υπολίμνιο για να αποκτήσουν τις προμήθειές τους σε νιτρικά και φωσφορικά άλατα.

Οι κρυπτομονάδες (Κρυπτόφυτα ή κρυπτοφύκη) αποτελούν μονοκύτταρους οργανισμοί που παρουσιάζουν ιδιαίτερη ποικιλία σε εύκρατες περιοχές, όπου συνήθως

εμφανίζονται ως φυτοπλαγκτόν σε λίμνες. Ο σύντομος κυτταρικός κύκλος και η ικανότητα για ενεργή ανάπτυξη κρυπτομονάδων σημαίνει ότι συναντώνται συχνά κατά τη διάρκεια της φάσης καθαρού νερού του ετήσιου κύκλου σε εύκρατες λίμνες, μαζί με άλλους r-επιλεγμένους οργανισμούς.

Στην πλειονότητα τους τα χρυσόφυτα ή χρυσοφύκη είναι μονοκυτταρικές ή απλές αποικιακές μορφές, και συνήθως πλαγκτονικές ωστόσο υπάρχουν και σε συνημμένες μορφές. Συνήθως συνδέονται με στάσιμα ύδατα που έχουν χαμηλά έως μέτρια θρεπτικά συστατικά, αλκαλικότητα και αγωγιμότητα (Ph ελαφρώς οξύ έως ουδέτερο).

Τα διάτομα (Βακιλλαριοφύκη) εμφανίστηκαν αρχικά στο απολιθωμένο ρεκόρ των 185 εκατομμυρίων ετών και ήταν άφθονα στα επιφανειακά νερά τα τελευταία 115–110 εκατομμύρια χρόνια. Η κύρια βιομάζα διατόμων υπάρχει σε θαλάσσια συστήματα, όπου είναι οι σημαντικότεροι μικροβιακοί πρωτογενείς παραγωγοί και οι κύριοι συντελεστές στην παγίωση του άνθρακα. Αυτά τα μικρο-φύκη είναι επίσης μείζονος σημασίας στα γλυκά ύδατα, όπου εμφανίζονται τόσο ως πλαγκτονικοί όσο και ως συνδεδεμένοι (βιοφίλμ) οργανισμοί σε λίμνες, ρέματα και εκβολές. Τα διάτομα μπορεί να είναι μονοκύτταρα ή αποικιακά, και αποτελούν μία από τις μεγαλύτερες κατηγορίες μικροφυκών γλυκού νερού (Fischer et al., 1999). Το κυτταρικό τοίχωμα (κρούστα) είναι μοναδικό μεταξύ των ζωντανών οργανισμών, καθώς αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από πυρίτιο. Αυτοί οι οργανισμοί είναι γνωστοί για τον ενδιαφέροντα σχεδιασμό του συγκεκριμένου είδους και για την άκαμπτη και πολύ πυκνή δομή τους.

Τα κόκκινα φύκη (Rhodophyta) είναι κατά κύριο λόγο θαλάσσια, με μόνο το 3 % πάνω από 5.000 είδη παγκοσμίως να εμφανίζονται σε αληθινά οικοσυστήματα γλυκού νερού (Wehr & Sheath, 2003). Αν και τα κόκκινα φύκη γλυκού νερού (όπως τα μεγάλα νηματώδη φύκη *Batrachospermum*) βρίσκονται σε μεγάλο βαθμό σε ρέματα και ποτάμια, αυτοί οι οργανισμοί μπορεί επίσης να εμφανιστούν ως θαλάσσιοι εισβολείς λιμνών και υφάλμυρα περιβάλλοντα.

Ορισμένα κόκκινα φύκη γλυκού νερού στις παράκτιες ζώνες της λεκάνης των Μεγάλων Λιμνών (ΗΠΑ), για παράδειγμα, φαίνεται να ήταν αρχικά θαλάσσια και να

έχουν χάσει την ικανότητα σεξουαλικής αναπαραγωγής. Αυτά περιλαμβάνουν την νηματοειδή κόκκινη άλγη *Bangia atropurpurea* (Lin & Blum, 1977), η οποία αναπαράγεται μόνο από ασεξουαλικά μονοσπόρια - σε αντίθεση με τα θαλάσσια είδη που υφίστανται εναλλαγή γενεών και πραγματοποιούν σεξουαλική αναπαραγωγή. Τα προσκολλημένα κόκκινα φύκη (π.χ., *Chroodactylon ramosum*) συμβάλλουν επίσης στην επιφανειακή χλωρίδα της περιφύτων της λίμνης.

Όπως και τα κόκκινα, τα καφέ φύκη (*Phaeophyta*) είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου θαλάσσια - με λιγότερο από το 1 % των ειδών να υπάρχουν σε οικοτόπους γλυκού νερού (Wehr & Sheath, 2003). Αυτά τα είδη είναι εντελώς βενθικά, είτε σε λίμνες είτε σε ποτάμια, και έχουν πολύ διάσπαρτη κατανομή. Τα καφέ φύκη γλυκού νερού περιλαμβάνουν γένη όπως τα *Pleurocladia* και τα *Heribaudiella*, και είναι τα λιγότερο διαφορετικά από όλα τα φύκη γλυκού νερού. Οι μορφολογίες τους βασίζονται σε μια σχετικά απλή νηματώδη δομή, και δεν διαθέτουν την πολύπλοκη μακρο-μορφολογία που χαρακτηρίζει τα καφέ θαλάσσια φύκια.

3. Τα Μικροπλαστικά

Ο όρος μικροπλαστικά αναφέρεται σε μικρά πλαστικά σωματίδια που βρίσκονται στο περιβάλλον, διαμέτρου μικρότερης των 5mm, σύμφωνα με την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμοσφαιρικής Οργάνωσης των Ηνωμένων Πολιτειών. Τα μικροπλαστικά παραμένουν σε υψηλές συγκεντρώσεις στα υδρόβια οικοσυστήματα.

Τα μικροπλαστικά κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τα πρωτογενή και τα δευτερογενή μικροπλαστικά. Στα πρωτογενή πλαστικά περιλαμβάνονται μικροπλαστικά που προέρχονται άμεσα από την κατασκευή προϊόντων, ενώ τα δευτερογενή μικροπλαστικά αποτελούν θραύσματα προερχόμενα από τη διάσπαση μεγαλύτερων τμημάτων πλαστικών υπολειμμάτων.

Στην κατηγορία των πρωτογενών μικροπλαστικών τα πλαστικά σωματίδια είναι σκοπίμως κατασκευασμένα μικροσκοπικά. Η κύρια χρήση τους εντοπίζεται σε καθαριστικά προσώπου και καλλυντικά, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται στην ιατρική ως φορείς για φάρμακα. Ως συστατικά των απολεπιστικών καθαριστικών προσώπου και σώματος, οι μικροπλαστικοί “καθαριστές” έχουν αντικαταστήσει τα τελευταία χρόνια φυσικά, παραδοσιακά χρησιμοποιούμενα προϊόντα, όπως τα αμύγδαλα, το πλιγούρι βρώμης και την ελαφρόπετρα. Τέλος, εντοπίζεται η χρήση τους στην τεχνολογία εκτόξευσης αέρα. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την εκτόξευση ακρυλικών, μελαμινικών ή πολυεστερικών μικροπλαστικών σωματιδίων σε μηχανές, κινητήρες και σκάφη πλοίων για την απομάκρυνση της σκουριάς και της βαφής. Καθώς η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται επανειλημμένα μέχρι να μειωθούν τα μικροπλαστικά σε μέγεθος και η ισχύς κοπής τους να χαθεί, συχνά μολύνονται με βαρέα μέταλλα όπως κάδμιο, χρώμιο και μόλυβδο.

Ως δευτερεύοντα μικροπλαστικά περιγράφονται τα μικροσκοπικά πλαστικά τεμάχια που δημιουργούνται από την κατάτμηση μεγαλύτερων πλαστικών σωματιδίων, τόσο στο υδάτινο όσο και στο χερσαίο περιβάλλον. Η πάροδος του χρόνου συντελεί, μέσω των φυσικών, βιολογικών και χημικών διαδικασιών, στη μεταβολή της δομικής ακεραιότητας των πλαστικών σωματιδίων, με άμεση συνέπεια τον κατακερματισμό και επομένως τη

μείωση του μεγέθους τους. Τα μικροπλαστικά μπορούν να αποικοδομηθούν περαιτέρω, φτάνοντας σε μια ελάχιστη διάμετρο 1,6 μm.

Αν και τα περισσότερα από τα πλαστικά υλικά είναι ανθεκτικά και δεν βιοαποικοδομούνται εύκολα, υπό την επίδραση των ηλιακών ακτινοβολιών UV, της υψηλής θερμοκρασίας, των κυμάτων και της τριβής του αέρα, οδηγούνται σε γήρανση και διασπώνται σε μικρότερα κομμάτια (Singh & Sharma, 2008).

Οι βασικοί παράγοντες που επιδρούν στη γήρανση είναι οι ακόλουθοι:

- Ηλιακή ακτινοβολία
- Θερμοκρασία
- Υγρασία
- Μηχανικές καταπονήσεις (αέρας, κύματα, άμμος)

Κατά την έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία παρατηρείται μια υποβάθμιση των ιδιοτήτων των πολυμερών. Με τη θερμική αποδόμηση παρατηρούνται μεταβολές στις ομάδες των μακρομορίων και συνεπώς αλλαγές στις ιδιότητες των πολυμερών. Υψηλότερη θερμοκρασία συνεπάγεται μεγαλύτερο βαθμό γήρανσης. Θερμοκρασιακή υποβάθμιση συμβαίνει σε θερμοκρασίες κάτω από τη θερμοκρασία Tg του πολυμερούς, όταν αυτό δε βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας και αλλάζει προς την κατεύθυνση της θερμοδυναμικής ισορροπίας. Οι αλλαγές που θα συντελεστούν στο πολυμερές και τις ιδιότητές του εξαρτώνται από την απόσταση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος από τη θερμοκρασία Tg.

Τα πλαστικά που βρίσκονται στο περιβάλλον εκτίθενται σε ακτινοβολία. Η ενέργεια της υπεριώδους ακτινοβολίας του ήλιου απορροφάται επιλεκτικά από τους ακόρεστους δεσμούς της πολυμερικής αλυσίδας και τις φωτοευαίσθητες ομάδες. Το γεγονός αυτό προκαλεί σπάσιμο των δεσμών και κατάτμηση των μακρομοριακών αλυσίδων, με ταυτόχρονη δημιουργία δύο ελεύθερων ριζών.

Η υγρασία επηρεάζεται από την υπεριώδη ακτινοβολία. Δημιουργούνται ελεύθερες ρίζες που είναι υπεύθυνες για την έναρξη της διαδικασίας αποδόμησης. Κάνοντας λόγο για αποδόμηση αναφερόμαστε σε μια ακολουθία χημικών μεταβολών, μέσω των οποίων

μειώνεται το μοριακό βάρος και η μηχανική ακεραιότητα του πολυμερούς, που διαμορφώνονται κατά κύριο λόγο από αντιδράσεις όπως φωτο- και θερμική οξειδωση, υδρόλυση και βιοαποδόμηση που προκαλείται από μικροβιακή δραστηριότητα (Sigh and Sharma, 2008).

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, το πλαίσιο των περιβαλλοντικών μικροπλαστικών δίνεται από (1) την παροχή μιας σύντομης ιστορικής επισκόπησης της εξέλιξης των πλαστικών υλικών, (2) την περιγραφή της σύνθετης χημικής σύνθεσης του πλαστικού υλικού και (3) τον ορισμό των μικροπλαστικών ως μολυσματικών ουσιών που προκαλούν ανησυχία.

3.1. Ανάπτυξη Πλαστικού

Η δημιουργία νέων συνθετικών χημικών σε συνδυασμό με τις μηχανικές δυνατότητες της μαζικής παραγωγής έχει καταστήσει τα πλαστικά ως ένα από τα πιο δημοφιλή υλικά στη σύγχρονη εποχή. Η σημερινή κυριότερη χρήση των πλαστικών υλικών μπορεί να εντοπιστεί από το 1800 με την ανάπτυξη της τεχνολογίας του καουτσούκ. Μία από τις βασικές ανακαλύψεις σε αυτόν τον τομέα ήταν η ανακάλυψη βουλκανισμού του φυσικού καουτσούκ από τον Charles Goodyear (Stevenson et al., 2008). Καθ' όλη τη διάρκεια του 1800, πραγματοποιήθηκαν πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη συνθετικών πολυμερών, συμπεριλαμβανομένων του πολυστυρενίου και του πολυβινυλοχλωριδίου, αλλά, στην προκειμένη φάση, αυτά τα υλικά ήταν είτε πολύ εύθραυστα για να είναι εμπορικά βιώσιμα ή δεν θα διατηρούσαν το σχήμα τους. Το πρώτο συνθετικό πολυμερές που εισήλθε στη μαζική παραγωγή ήταν ο βακελίτης, μια ρητίνη φαινόλης-φορμαλδεΰδης, που αναπτύχθηκε από τον Βέλγο χημικό Leo Baekeland το 1909. Αργότερα, κατά τη δεκαετία του 1930 αναπτύχθηκαν οι σύγχρονες μορφές του πολυβινυλοχλωριδίου, του τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου, της πολυουρεθάνης και ενός πιο επεξεργασμένου πολυστυρενίου (Brandsch & Piringer, 2008). Στις αρχές της δεκαετίας του 1950 σημειώθηκε η ανάπτυξη υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου και πολυπροπυλενίου. Στη δεκαετία του 1960, οι εξελίξεις στις επιστήμες των υλικών οδήγησαν στην ανάπτυξη πλαστικών υλικών που παράγονται άλλα από φυσικούς πόρους, όπως η βακτηριακή ζύμωση σακχάρων και λιπιδίων, και περιλαμβάνουν πολυδροξυαλκανοϊκά, πολυλακτίδια, αλειφατικούς πολυεστέρες και πολυσακχαρίτες. Τα πολυλακτίδια

βρίσκονται βρίσκεται στα πρόθυρα να εισέλθουν σε μαζική παραγωγή, ενώ η παραγωγή των πολυδροξυαλκανοϊκών βρίσκεται μεταξύ της πιλοτικής μονάδας και του εμπορικού σταδίου (Mohan, 2016).

Ένα συνοπτικό προφίλ της ανάπτυξης των πλαστικών που βασίστηκε στον Lambert (2013)

Έτος	Είδος Πολυμερούς	Δημιουργός/σημειώσεις
1839	Φυσικό καουτσούκ λατέξ	Charles Goodyear
1839	Πολυστυρένιο	Discovered by Eduard Simon
1862	Κυταρινοειδές	Alexander Parkes
1865	Οξική Κυτταρίνη	Paul Schützenberger
1869	Celluloid	John Wesley Hyatt
1872	Πολυβινυλοχλωρίδιο	Δημιουργήθηκε πρώτα από τον Eugen Baumann
1894	Βισκόζη	Charles Frederick Cross
1909	Βακελίτης	Leo Hendrik Baekeland
1926	Πλαστικοποιημένο Πολυβινυλοχλωρίδιο	Walter Semon
1933	Πολυβινυλοχλωρίδιο	Ralph Wiley
1935	Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας	Reginald Gibson και Eric Fawcett

1936	Ακρυλικό ή μεθακρυλικό πολυμεθύλιο	
1937	Πολυουρεθάνη	Otto Bayer και συνεργάτες
1938	Πολυστυρένιο	Ως εμπορικά βιώσιμο πολυμερές
1938	Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο	John Whinfield και James Dickson
1942	Ακόρεστος πολυεστέρας	John Whinfield και James Dickson
1951	Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας	Paul Hogan και Robert Banks
1951	Πολυπροπυλένιο	Paul Hogan και Robert Banks
1953	Πολυανθρακικό	Hermann Schnell
1954	Φελιζόλ	Ray McIntire
1960	Πολυγαλακτικό οξύ	Ο Patrick Gruber έχει τα εύσημα για την εφεύρεση μιας εμπορικής βιώσιμης διαδικασίας
1978	Γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας	DuPont

3.2. Περιγραφή Πλαστικών Υλικών

Τα πλαστικά είναι επεξεργάσιμα υλικά με βάση πολυμερών (Baner & Piringer, 2007) και για γίνουν κατάλληλα ως προς την χρήση τους, γενικά υποβάλλονται σε επεξεργασία με μια σειρά χημικών προσθέτων. Αυτές οι ενώσεις χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν τις

ιδιότητες των υλικών και να τις καταστήσουν κατάλληλες για τον επιδιωκόμενο σκοπό τους. Επομένως, στις ταξινομήσεις των πολυμερών, τα πλαστικά υλικά μπορούν ακόμη να διαφέρουν ως προς τη δομή και την απόδοση ανάλογα με τον τύπο και την ποσότητα των πρόσθετων με τα οποία συνδυάζονται. Πιο πρόσφατα, οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν αλληλεπιδράσει με την ανάπτυξη νέων εφαρμογών στοιχείων που βασίζονται σε νανοκλίμακες, οι οποίες παράγουν τώρα πλαστικά νανοσύνθετα. Η βιομηχανία των πλαστικών αναμένεται να είναι ένας σημαντικός τομέας για την καινοτομία στη νανοτεχνολογία. Εκτιμάται ότι έως το 2020, το μερίδιο των νανοσύνθετων μεταξύ των πλαστικών στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής θα είναι 7% (Roes et al., 2012). Αυτά τα νανοσύνθετα περιλαμβάνουν υλικά που είναι ενισχυμένα με νανο-πληρωτές (νανο-πηλό και νανο-σίλικα) για μείωση του βάρους, νανοσωλήνες άνθρακα για τη βελτιωμένη μηχανική αντοχή και νανο-ασήμι που χρησιμοποιείται ως αντιμικροβιακός παράγοντας σε πλαστικά υλικά συσκευασίας τροφίμων.

3.3. Είσοδος Μικροπλαστικών στο Υδάτινο Περιβάλλον

Η εμφάνιση των μικροπλαστικών σωματιδίων σε υδάτινο οικοσύστημα αναφέρθηκε για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1970 αν και η χρήση του όρου “μικροπλαστικά” είναι πιο πρόσφατη. Έχει καταστεί εμφανές ότι η κατανομή των μικροπλαστικών είναι παγκόσμια. Το φαινόμενο αυτό είναι άμεση απόρροια της σημαντικής αύξησης της κατανάλωσης πλαστικών (περίπου 9% ετησίως) και της ανεπάρκειας των πρακτικών επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης και διαχείρισης των αποβλήτων σε πολλά μέρη του κόσμου.

Τα πλαστικά σωματίδια μειώνονται σε μέγεθος εξαιτίας των καιρικών συνθηκών και των διαδικασιών αποσύνθεσης που λαμβάνουν χώρα. Με τη δημιουργία μικρότερων θραυσμάτων αυξάνεται η επιφάνεια των πλαστικών σωματιδίων και κατά συνέπεια, η δυνατότητα μεταφοράς χημικών ουσιών, λόγω της απόπλυσης των μικροπλαστικών, είναι μεγαλύτερη. Παράλληλα, το μικρό μέγεθος των πλαστικών σωματιδίων διευκολύνει την

κατάποσή τους από ένα ευρύ φάσμα ζωντανών οργανισμών, με αποτέλεσμα την είσοδο των μικροπλαστικών στην τροφική αλυσίδα.

Μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με την εμφάνιση μικροπλαστικών σε ιζήματα υποδηλώνουν ότι η κατανομή των μικροπλαστικών είναι αποσπασματική και δεν συνδέεται άμεσα με τη μεταφορά των ιζημάτων. Παρόλο που σήμερα είναι γνωστές οι επιδράσεις τόσο των μεγαλύτερων πλαστικών τεμαχίων, όσο και των μικροπλαστικών στους υδρόβιους οργανισμούς, μέσω της επαφής ή και της κατάποσης των πλαστικών από τους τελευταίους, περιορισμένα είναι τα στοιχεία για τις πιθανές επιπτώσεις των μικροπλαστικών σε ένα ευρύ φάσμα μικρότερων οργανισμών, οι οποίοι και εκτίθενται σε σωματίδια διαφόρων μεγεθών, καθώς και στις χημικές ουσίες που πηγάζουν από αυτά. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα μικροπλαστικά που εντοπίζονται στα ύδατα, πέραν των τοξικών ουσιών που περιέχουν λόγω της κατασκευής τους, απορροφούν επιπλέον τοξικές ουσίες οι οποίες μπορεί να βρίσκονται στο νερό, όπως επιβραδυντικά καύσης και αντιοξειδωτικά PCB και DDT, τα οποία και υπάρχουν σε ύδατα περιοχών με έντονη βιομηχανική δραστηριότητα.

Αρκετές πρόσφατες μελέτες έχουν εντοπίσει τις πιθανές επιδράσεις των πλαστικών σωματιδίων στα υδάτινα ενδιαιτήματα. Στις επιδράσεις αυτές συμπεριλαμβάνονται η εκρόφηση των επίμονων, βιοσυσσωρευτικών και τοξικών (ABT) ουσιών από πλαστικά, η απόπλυση προσθέτων από τα πλαστικά και η σωματική βλάβη των οργανισμών που έρχονται σε επαφή με αυτά.

Τα βασικά ερωτήματα που προκύπτουν αφορούν το βαθμό στον οποίο τα μικροπλαστικά έχουν σημαντικό άμεσο αντίκτυπο στους οργανισμούς και το περιβάλλον, καθώς και το βαθμό στον οποίο παρέχουν ένα πρόσθετο φορέα για χημικές προσμείξεις αυξάνοντας ή μειώνοντας την έκθεση των οργανισμών σε ABT. Συχνά, οι δυνητικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών είναι αρκετά λεπτές, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η εφαρμογή των πειραματικών αποτελεσμάτων στην κλίμακα του πληθυσμού και των υδάτινων οικοσυστημάτων.

Το GESAMP (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection) στην συνολική εκτίμηση της κατάστασης του υδάτινου περιβάλλοντος το 2001, επικεντρώθηκε σε χερσαίες πηγές και ανέφερε ότι τα στερεά απόβλητα συγκεντρώνονται κοντά σε αστικές περιοχές, σε παραλίες παρακείμενες σε οικισμούς και σε υδάτινες οδούς, ενώ εντοπίζονται και στους ωκεανούς. Το πλαστικό είναι το μεγαλύτερο σε ποσότητα συστατικό που εντοπίζεται σε αστικές περιοχές, ακολουθούμενο από το χάλυβα και το αλουμίνιο. Τα απορρίματα προκαλούν θνησιμότητα στους υδρόβιους οργανισμούς, όμως η έκταση αυτής της θνησιμότητας είναι άγνωστη. Δεν υπάρχουν ενδείξεις, βέβαια, ότι οι επιπτώσεις της ύπαρξης πλαστικών απορριμάτων είναι σημαντικές σε επίπεδο πληθυσμού. Τα πλαστικά απόβλητα έχουν επίσης αρνητικές συνέπειες σε επίπεδο αισθητικής, επηρεάζοντας με τον τρόπο αυτό την αναψυχή και τον τουρισμό. Σε κάθε περίπτωση, η καλύτερη διαχείριση των στερεών αποβλήτων αποτελεί επιτακτική ανάγκη για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που δημιουργούνται εξαιτίας αυτών στα υδάτινα οικοσυστήματα.

3.4. Ο Αναδύμενος Κίνδυνος των Μικροπλαστικών ως Ρύποι

Ο όρος «μικροπλαστικά» αναφέρεται συνήθως σε πλαστικά σωματίδια των οποίων η μεγαλύτερη διάμετρος είναι <5 mm και είναι ο ορισμός που χρησιμοποιείται από τους περισσότερους συγγραφείς. Έχει προταθεί ότι ο όρος «μικροπλαστικά» πρέπει να επαναπροσδιοριστεί ως αντικείμενα <1 mm, ώστε να περιλαμβάνει μόνο σωματίδια στο εύρος του μεγέθους του μικρομέτρου και ο όρος «μεσοπλαστικά» να χρησιμοποιείται για να περιγραφούν τ' αντικείμενα μεταξύ 1 και 2.500 mm (GESAMP, 2015). Ο Lambert (2014) περιέγραψε τα μακροπλαστικά με μήκος ως > 5 mm, τα μεσοπλαστικά με μήκος ως 5 έως > 1 mm, τα μικροπλαστικά με μήκος 1 mm έως $> 0,1$ mm και τα ναοπλαστικά με μήκος ως 0,1 μm. Ωστόσο, το ανώτατο όριο των 5 mm είναι γενικά αποδεκτό, επειδή αυτό το μέγεθος μπορεί να περιλαμβάνει μια σειρά μικρών σωματιδίων που μπορούν εύκολα να απορροφηθούν από οργανισμούς (GESAMP, 2015).

Γενικά, τα μικροπλαστικά χωρίζονται σε κατηγορίες είτε πρωτογενών είτε δευτερευόντων. Τα πρωτογενή μικροπλαστικά κατασκευάζονται ως έχουν και χρησιμοποιούνται είτε ως σφαιρίδια ρητίνης για την παραγωγή μεγαλύτερων αντικειμένων, είτε απευθείας σε

καλλυντικά προϊόντα όπως προϊόντα απολέπισης και οδοντόκρεμες ή σε ψηγματοβολές (παραδείγματος χάριν για την αφαίρεση βερνικιών). Σε σύγκριση με αυτήν την βασική και εσκεμμένη χρήση, τα δευτερεύοντα μικροπλαστικά σχηματίζονται από την αποσύνθεση μεγαλύτερων πλαστικών υπολειμμάτων.

Τα μικροπλαστικά έχουν δείξει την παρουσία τους στο περιβάλλον εδώ και πολλά χρόνια. Για παράδειγμα, πολλές έρευνες (Carpenter et al., 1972; Colton et al., 1974; Gregory, 1977) παρουσίασαν την παρουσία των πλαστικών στις θάλασσες τη δεκαετία του 1970, αλλά δεν έχουν μελετηθεί εκτενώς ιδιαίτερα στο πλαίσιο των συστημάτων του γλυκού νερού. Καθώς η έρευνα επικεντρώθηκε στο ζήτημα πιο έντονα από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, τα μικροπλαστικά θεωρούνται μολυσματικοί παράγοντες που προκαλούν ανησυχία (Sutherland et al., 2010).

3.5. Πηγές Πλαστικών και Μικροπλαστικών σε Περιβάλλοντα Γλυκών Νερών

Τα πλαστικά εισέρχονται σε περιβάλλοντα γλυκού νερού από διάφορες πηγές μέσω διαφόρων διαδρομών. Η ρύπανση της ξηράς αποτελεί ένα σημαντικό περιβαλλοντικό και δημόσιο ζήτημα και αποτελεί θέμα αυξανόμενης ανησυχίας σε προστατευόμενες περιοχές όπου το μέγεθος της μόλυνσης επηρεάζεται από την πυκνότητα των επισκεπτών· κατά συνέπεια, κρίνεται επιτακτική η λήψη μέτρων για τη μείωση και τον μετριασμό των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον (Cierjacks et al., 2012). Επιπλέον, οι πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων σε διαφορετικές περιοχές του κόσμου ποικίλλουν επίσης και αυτό μπορεί να είναι μια πιο σημαντική πηγή σε μια γεωγραφική περιοχή σε σύγκριση με μια άλλη. Όπως και με τα πλαστικά είδη, τα μικροπλαστικά μπορούν να εισέλθουν στο περιβάλλον από μια σειρά διόδων και μια σημαντική διαδρομή σε μια γεωγραφική περιοχή μπορεί να είναι λιγότερο σημαντική σε μια άλλη. Για παράδειγμα, τα κύρια μικροπλαστικά που χρησιμοποιούνται στα καλλυντικά είναι πιθανώς πιο σημαντικά σε εύπορες περιοχές (Lambert et al., 2014). Τα μικροπλαστικά έχουν αρκετές πιθανές οδούς απελευθέρωσης προς το περιβάλλον: (1) διέλευση μέσω εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, είτε από την χρήση μικροπλαστικών σε προϊόντα προσωπικής φροντίδας, είτε από την απελευθέρωση ινών από υφάσματα κατά το πλύσιμο των ρούχων στα επιφανειακά νερά, (2) εφαρμογή βιοσέδων από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων σε γεωργικές

εκτάσεις, (3) πρόκληση από τις πλημμύρες από τις καταιγίδες, (4) περιστασιακή απελευθέρωση (παραδείγματος χάριν κατά τη φθορά των ελαστικών), (5) απελευθέρωση από βιομηχανικά προϊόντα ή διεργασίες και (6) ατμοσφαιρική εναπόθεση ινών (Dris et al., 2017). Οι πλαστικές μεμβράνες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή καλλιεργειών θεωρούνται σημαντική γεωργική εκπομπή και η χρήση τους θεωρείται μία από τις σημαντικότερες πηγές μόλυνσης των γεωργικών εδαφών από τα πλαστικά (Xu, et al., 2006; Brodhagen et al., 2015; Kyrikou & Briassoulis, 2007). Τα πλεονεκτήματα των μικροπλαστικών περιλαμβάνουν τη διατήρηση της υγρασίας, μειώνοντας έτσι την άρδευση· μειώνουν την ανάπτυξη ζιζανίων και αυξάνουν τη θερμοκρασία του εδάφους, η οποία αύξηση μειώνει τον ανταγωνισμό για τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους και μειώνει το κόστος των λιπασμάτων, βελτιώνοντας έτσι τις αποδόσεις των καλλιεργειών και την προστασία από τις δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Ωστόσο, οι καιρικές συνθήκες μπορεί να κάνουν εύθραυστες τις καλλιέργειες και δύσκολο ν' ανακτηθούν, με αποτέλεσμα την αποσύνθεση του υλικού, και όταν συνδυάζονται με διαδοχικά γεγονότα καθίζησης, τα υπολείμματα και τα αποσυντεθέντα σωματίδια μπορεί να πλυθούν στο έδαφος όπου συσσωρεύονται (Klemchuk, 1990; Liu et al., 2014; Xu et al., 2006). Άλλες πηγές περιλαμβάνουν εκπομπές από χώρους κατασκευών. Τα σωματίδια που προέρχονται από την φθορά των ελαστικών αυτοκινήτων μπορούν επίσης να απελευθερώσουν μεγάλους όγκους συνθετικών σωματιδίων. Αυτά τα σωματίδια φθοράς των ελαστικών αναγνωρίζονται ως πηγή ψευδάργυρου στο περιβάλλον, με ανθρωπογενείς συγκεντρώσεις ψευδάργυρου που σχετίζονται στενά με την πυκνότητα της κυκλοφορίας. Οι πηγές και οι οδοί εκπομπών των νανοπλαστικών συζητούνται επίσης από τους Rist και Hartmann (2017).

3.6. Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι

Στις περισσότερες χώρες οι εκτιμήσεις του χημικού κινδύνου βασίζονται σε μαζικές συγκεντρώσεις ουσιών που ενδιαφέρουν ως μέτρηση έκθεσης και αποτελέσματος. Στη νανο-βιβλιογραφία, οι μαζικές συγκεντρώσεις των σωματιδίων που προβλέπεται να εκπέμπονται έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των κινδύνων των παραγόμενων νανοσωματιδίων (Boxall et al., 2007; Musee, 2011). Αυτές οι προσεγγίσεις υποθέτουν ότι

τα σωματίδια κατανέμονται ομοιόμορφα, χωρίς να πραγματοποιείται μεταφορά μεταξύ διαφορετικών περιβαλλοντικών στοιχείων. Αυτή η προσέγγιση αναπτύχθηκε περαιτέρω από μία συγκεκριμένη έρευνα που χρησιμοποίησε συντελεστές μεταφοράς για τη μοντελοποίηση των ροών εκπομπών μεταξύ των διαφόρων στοιχείων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο τους, καθώς και τη συμπερίληψη των ποσοστών καθίζησης (Gottschalk et al., 2009). Τέτοιες προσεγγίσεις μοντελοποίησης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής τύχης των πρωτογενών μικροπλαστικών, όπου οι εκπομπές στο περιβάλλον κατανέμονται σε μια γεωγραφική περιοχή ανάλογη με την πυκνότητα του πληθυσμού και τα ποσοστά κατανάλωσης, υποθέτοντας ότι η διαδρομή των μικροπλαστικών κατά την είσοδό τους στο περιβάλλον εξαρτάται από την χρήση τους (Kooi et al., 2017). Ωστόσο, αυτός ο τύπος προσέγγισης απαιτεί εκτεταμένες πληροφορίες σχετικά με τα επίπεδα παραγωγής πρωτογενών μικροπλαστικών, βιομηχανικές εφαρμογές και χρήσεις, επίπεδα καταναλωτικών προϊόντων, επεξεργασία λυμάτων, απορρίψεις σε χωματερές και μοντελοποίηση της περιβαλλοντικής διανομής για την πραγματοποίηση μιας ουσιαστικής έκθεσης αξιολόγησης. Μια έκθεση αξιολόγησης για δευτερεύοντα μικροπλαστικά θα χρειαστεί δεδομένα παρακολούθησης, κάτι το οποίο μπορεί να συναντήσει εμπόδια, καθώς τα εύρη μεγέθους που αναφέρονται σε μελέτες πεδίου περιορίζονται γενικά από τις τεχνικές δειγματοληψίας που χρησιμοποιούνται (GESAMP, 2015).

Τα προβλήματα της χρήσης μαζικών συγκεντρώσεων ως μετρικές επιπτώσεις είναι παρόμοια με αυτά που συζητήθηκαν στο πλαίσιο των παραγόμενων νανοσωματιδίων στο ότι οι βιολογικές επιδράσεις μπορεί να μην εξαρτώνται από τη μάζα, αλλά να εξαρτώνται από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες της εν λόγω ουσίας (Senjen & Hansen, 2011; Foss Hansen et al., 2007). Κατά συνέπεια, κατά την εκτίμηση των κινδύνων που παρουσιάζονται από τις ιδιότητες των μικροπλαστικών, όπως το μέγεθος, το σχήμα, η πυκνότητα του πολυμερούς, η επιφάνεια, η χημική σύνθεση του βασικού πλαστικού και η χημική σύνθεση των απορροφούμενων συνυπαρχόντων ρύπων (Lambert et al., 2017). Ωστόσο, όταν εξετάζονται τα δευτερεύοντα μικροπλαστικά, οι πληροφορίες σχετικά με ορισμένες από αυτές τις ιδιότητες ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμες. Αυτή η έλλειψη

πληροφοριών καθιστά δύσκολη την αναγνώριση των βασικών χαρακτηριστικών ή των συνδυασμών χαρακτηριστικών, που ενδέχεται να ευθύνονται για κινδύνους στο περιβάλλον.

Η αξιολόγηση των μικροπλαστικών βάσει της χημικής τους σύνθεσης παρουσιάζει επίσης μια σημαντική πρόκληση, επειδή τα χημικά μικροπλαστικά μπορούν να θεωρηθούν ως μίξη. Ένα απλοποιημένο παράδειγμα εκτίμησης του κινδύνου για την πολυουρεθάνη με βάση τη χημική του σύνθεση αποτελεί ο εύκαμπτος αφρός πολυουρεθάνης, που χρησιμοποιείται για στρώματα και καθίσματα αυτοκινήτου και κατασκευάζεται συνδυάζοντας τρία μονομερή και μπορεί να αποτελείται από έως και 18% επιβραδυντικό περιεχόμενο φλόγας (Alaee et al., 2003).

Τα διαφορετικά μεγέθη των σωματιδίων των μικροπλαστικών στα περιβαλλοντικά συστήματα παρουσιάζουν διαφορετικούς κινδύνους για τους οργανισμούς που ζουν σε αυτά τα συστήματα. Για παράδειγμα, τα μικρά είδη ψαριών που τρέφονται με πλαγκτόν μπορεί να έρθουν σ' επαφή με μικροπλαστικά από τη νανοκλίμακα μικροπλαστικών έως 5 mm ή και μεγαλύτερα. Τα ψάρια μπορεί ν' αποφύγουν τα μεγαλύτερα σωματίδια, αλλά τα μικρά σωματίδια μπορεί να καταποθούν κατά την τροφή τους. Για την φιλτραρισμένη τροφή των οργανισμών, το ανώτερο όριο μεγέθους εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων που ένας συγκεκριμένος οργανισμός θα καταπιεί. Η εκτίμηση του κινδύνου που προκαλείται από τα μικροπλαστικά θα μπορούσε επομένως να βασίζεται στο μέγεθος των σωματιδίων. Μια απλοποιημένη υποθετική περίπτωση παρουσιάζεται στο παράδειγμα που δίδεται από τον Arvidsson (2012). Αυτή η προσέγγιση προϋποθέτει ότι υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με τα κατώτατα όρια των μικροπλαστικών που σχετίζονται με τη βλάβη βάσει των τάξεων μεγέθους και της συγκέντρωσης σωματιδίων για τα πιο ευαίσθητα είδη σε αυτό το εύρος μεγέθους σωματιδίων. Ωστόσο, η χρήση του μεγέθους των σωματιδίων για τον προσδιορισμό του περιβαλλοντικού κινδύνου μπορεί να μην είναι τόσο απλή, επειδή τα μικροπλαστικά δεν είναι μονοδιασπαρμένα στο περιβάλλον. Επιπλέον, όπως περιγράφεται από τον Hansen (2009) σχετικά με τα παραγόμενα νανοσωματίδια, παραμένει ασαφές το εάν μπορεί να καθοριστεί ένα «όριο χωρίς

επιπτώσεις», ποιοι είναι οι καλύτεροι παράγοντες πρόκλησης κινδύνου και ποια είναι τα πιο σχετικά τελικά σημεία.

3.7. Δειγματοληψία και Ανάλυση Μικροαστικών

Οι διαδικασίες λήψης μεταφοράς και συντήρησης των δειγμάτων νερού που προορίζονται για ανάλυση είναι συγκεκριμένες. Η δειγματοληψία μπορεί να είναι αυτόματη, διαδοχική, τυχαία ή συστηματική. Κατά την αυτόματη δειγματοληψία (automatic sampling) τα δείγματα λαμβάνονται είτε διακριτά είτε συνεχώς, ανεξάρτητα από την ανθρώπινη παρέμβαση, και σύμφωνα με ένα προκαθορισμένο πρόγραμμα. Στη διαδοχική δειγματοληψία (incremental sampling) λαμβάνονται μικρά δείγματα, λόγω του χαμηλού ρυθμού ροής των υδάτων των ποταμών, ή λόγω της περιορισμένης πρόσβασης στο δείγμα. Στη συνέχεια, τα μικρά δείγματα που προκύπτουν συγκεντρώνονται για να σχηματίσουν ένα σύνθετο δείγμα. Στην τυχαία δειγματοληψία, οι πιθανότητες απόκτησης διαφορετικών τιμών των συγκεντρώσεων μιας παραμέτρου είναι ακριβώς εκείνες που ορίζονται από την πιθανότητα κατανομής της παραμέτρου προς ανάλυση, ενώ στη συστηματική δειγματοληψία τα δείγματα λαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Το πρόγραμμα δειγματοληψιών σχεδιάζεται με τρόπο τέτοιο, ώστε τα δείγματα που θα συλλεχθούν να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά, καθώς η ποιότητα του νερού μεταβάλλεται τόσο κατά τη διάρκεια του έτους, όσο και κατά την επιφάνειά του. Επιπλέον, στην περίπτωση των ποταμών, λαμβάνεται υπόψη η ανάμειξη των νερών στα σημεία εισροής των παραπόταμων και των αποχετευτικών αγωγών.

Η δειγματοληψία πραγματοποιείται με τον καθορισμό σταθερών σημείων και την εφαρμογή συγκεκριμένης μεθόδου λήψης των δειγμάτων. Πριν την έναρξη της δειγματοληψίας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ορισμένοι παράγοντες. Σε αυτούς συγκαταλέγονται η εύρεση της ιδανικότερης θέσης δειγματοληψίας, της θέσης, δηλαδή, που θα εξασφαλίσει την εύκολη πρόσβαση στο σημείο συλλογής του δείγματος, ο εντοπισμός ισοδύναμων σημείων δειγματοληψίας, στην περίπτωση που αλλάζουν οι συνθήκες του ποταμού, ο καθορισμός του τύπου, καθώς και της συχνότητας της

δειγματοληψίας, για την εξαγωγή στατιστικών συμπερασμάτων, στα πλαίσια του ανεκτού σφάλματος, και η επιλογή του δειγματοληπτικού εξοπλισμού.

Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες παρουσιάζεται περιοδικότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό της μέσης συγκέντρωσης με εφαρμογή συστηματικής και όχι τυχαίας δειγματοληψίας.

Αναφορικά με τον απαιτούμενο εξοπλισμό για την πραγματοποίηση της δειγματοληψίας, κρίνεται απαραίτητη η χρήση δοχείων, κονταριών και συσκευών δειγματοληψίας από ειδικά βάρη, καθώς και συσκευών αυτόματης δειγματοληψίας και ειδικών δοχείων μεταφοράς των δειγμάτων.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, καθοριστικής σημασίας για την παροχή των απαραίτητων πληροφοριών και την εξαγωγή στατιστικά επεξεργάσιμων δεδομένων είναι η θέση της δειγματοληψίας. Στην περίπτωση των ποταμών, σε περιοχές όπου παρουσιάζονται σημαντικές εποχικές αυξομειώσεις του όγκου των υδάτων, τα σημεία της δειγματοληψίας πρέπει να είναι ικανά να εξασφαλίσουν την ποιότητα των αποτελεσμάτων τόσο κατά τη μέγιστη όσο και κατά την ελάχιστη ροή των υδάτων. Η επιλογή δύο σημείων δειγματοληψίας είναι αναγκαία στην περίπτωση εκροών λυμάτων ή παραποτάμου. Το ένα σημείο ορίζεται στο σημείο της συμβολής, ενώ το άλλο σε αρκετή απόσταση, ώστε η ανάμειξη των υδάτων να είναι πλήρης.

Είναι γεγονός πως οι μέθοδοι δειγματοληψίας ιζημάτων είναι ευρέως διαδεδομένες. Επιτακτική όμως είναι η ανάγκη για χρήση βελτιωμένων τεχνικών και για τυποποίηση στη διαδικασία δειγματοληψίας, προκειμένου να διευκολυνθεί η εντατική και όχι γεωγραφικά περιορισμένη δειγματοληψία, προς τον προσδιορισμό της κίνησης και του τρόπου εναπόθεσης των μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα. Αναγκαίοι κρίνονται, επομένως, ο καθορισμός του μικρότερου μεγέθους πλαστικών σωματιδίων που θα ανιχνεύονται, καθώς και η ανάπτυξη ενός τυποποιημένου συστήματος δειγματοληψίας πάνω στη βάση αυτή.

Οι προσπάθειες της NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) για την τυποποίηση των ποσοτικών μεθόδων παρείχαν ένα καλό σημείο εκκίνησης. Είναι γεγονός

ότι υπάρχουν μεγάλα προβλήματα στον χειρισμό του όγκου δειγμάτων που ενδεχομένως χρειάζονται σε παγκόσμιο επίπεδο.

Έχει επισημανθεί ότι στις περιοχές όπου η δειγματοληψία και η διαλογή ιζημάτων λαμβάνουν χώρα, έχουν αναπτυχθεί βασικές τεχνικές για τη διαλογή οργανικών και ανόργανων υλικών και οργανισμών, ενώ είναι διαθέσιμες οικονομικά αποδοτικές τεχνικές χαμηλής τεχνολογίας. Οι τεχνικές αυτές θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για το διαχωρισμό και την ανάλυση των μικροπλαστικών.

Παράδειγμα τέτοιων τεχνικών αποτελεί η διαδικασία της εκκένωσης, κατά την οποία χρησιμοποιούνται κλίνες ρευστοποιημένης άμμου που δημιουργούνται από τη ροή του νερού μέσα από δίσκους, επιτρέποντας την ακριβή ταξινόμηση μεγαλύτερων δειγμάτων. Ως ρευστοποιημένη κλίση εννοούμε μια κλίση σωματιδίων, δηλαδή μια κλίση με πληρωτικό υλικό σωματίδια όπως κόκκους άμμου, ανθρακίτη, γρανάδια άμμο και ενεργούς άνθρακες, διαφόρων κοκκομετριών, τα οποία κινούνται τυχαία και ασταμάτητα μέσα σε αυτήν με την βοήθεια μιας ρευστής φάσης. Το σχήμα των πληρωτικών υλικών μπορεί να είναι σφαιρικό, κυλινδρικό, ή οποιοδήποτε άλλο, αρκεί να διευκολύνει την καλή επαφή στερεού και ρευστού. Με τη χρήση της μεθόδου αυτής είναι δυνατή η αντικατάσταση των χημικών ουσιών υψηλής πυκνότητας. Ο εντοπισμός των μικροπλαστικών στα δείγματα μπορεί, επίσης, να επιτευχθεί με τη χρήση ενός πολωτικού μικροσκοπίου, με τη βοήθεια του οποίου μπορεί να γίνει γρήγορος διαχωρισμός των πλαστικών υλικών με το μάτι.

Ένα σημείο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής αφορά το ενδεχόμενο τα μικροπλαστικά να δρουν ως φορέας για τη μεταφορά πληθυσμών, συμπεριλαμβανομένου του μικροβιακού αποικισμού μικροπλαστικών σωματιδίων. Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του φαινομένου αυτού και τη χημική ανάλυση της σύνθεσης των πλαστικών μικροσωματιδίων. Η μία εξ αυτών είναι η φασματοσκοπία υπέρυθρου μετασχηματισμού Fourier (FT-IR) και η άλλη η φασματοσκοπία Raman. Παρά το γεγονός ότι και οι δύο αυτές μέθοδοι είναι αρκετά δαπανηρές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διαγνωστικά εργαλεία. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την

κρυσταλλική δομή του πολυμερούς και, επομένως, τον τρόπο απορρόφησής του, παρέχει η φασματοσκοπία Raman.

Η φασματοσκοπία υπερύθρου μετασχηματισμού Fourier αποτελεί μέθοδο της υπέρυθρης φασματοσκοπίας και βασίζεται στην απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα μόρια μιας ένωσης. Τα μόρια αυτά διεγείρονται σε υψηλότερες στάθμες δόνησης ή περιστροφής. Οι απορροφήσεις στο IR φάσμα προκύπτουν από την αλληλοεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με το ηλεκτρικό δίπολο ενός μορίου. Η ανάπτυξη των φασματοφωτόμετρων υπερύθρου με μετασχηματισμό Fourier, οδήγησε στην αντικατάσταση των κοινών φασματοφωτόμετρων διασποράς με φασματόμετρα υπερύθρου, καθώς τα τελευταία παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία και ταχύτητα. Η FT-IR φασματοσκοπία χρησιμοποιείται εκτεταμένα για την ταυτοποίηση των ομοιοπολυμερών, συμπολυμερών και μειγμάτων πολυμερών, όπως επίσης και τον προσδιορισμό της μοριακής δομής τους (τακτικότητα, διακλάδωση, κρυσταλλικότητα, δεσμοί υδρογόνου, προσανατολισμός). Επιπλέον, χρησιμοποιείται στη μέτρηση του βαθμού πολυμερισμού τους, καθώς και στον έλεγχο των διεργασιών πολυμερισμού, όπως επίσης και στην εξέταση των επιφανειακών ιδιοτήτων των πολυμερών, και τη μελέτη και διερεύνηση των μηχανισμών αποσύνθεσής τους.

Η φασματοσκοπία Raman βασίζεται στη μη-ελαστική σκέδαση του φωτός και πήρε το όνομά της από το αντίστοιχο φαινόμενο. Κατά το φαινόμενο Raman, όταν κάποιο υλικό σύστημα ακτινοβολείται με μονοχρωματική ακτινοβολία, τότε η διάχυτη ακτινοβολία, που σκεδάζεται, περιέχει νέες φασματικές περιοχές. Η Φασματοσκοπία Raman αποτελεί μια ειδική φασματοσκοπική μέθοδο, που εφαρμόζεται για την έρευνα και μελέτη στοιχείων και πληροφοριών που αφορούν τη δομή των μορίων, ιόντων, και κρυστάλλων.

Είναι γεγονός πως καθώς οι απαιτήσεις για έρευνα και ανάλυση των μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα αυξάνεται, η ύπαρξη περισσότερων πληροφοριών σχετικά με τις πλαστικές και μικροπλαστικές εισροές γίνεται επιτακτικότερη. Οι γνώσεις πάνω στις χωρικές και χρονικές κατανομές των πλαστικών σωματιδίων, καθώς και του τρόπου μεταφοράς και των περιοχών συσσώρευσής τους, και στον τρόπο αλληλεπίδρασής τους με τους υδρόβιους οργανισμούς, θα μπορούσαν να συμβάλλουν στην καλύτερη οργάνωση

της έρευνας πάνω στην ύπαρξη των μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα. Επιπλέον, αναγκαία είναι η ταξινόμηση των μικροπλαστικών με κριτήρια όπως το σχήμα, το μέγεθος, η πυκνότητα, η χημική σύσταση και οι ιδιότητες, καθώς και ο καθορισμός της ηλικίας τους, προκειμένου να διευκολυνθεί η μελέτη τους.

3.8. Επιπτώσεις Μικροαστικών

Η απόρριψη πλαστικών υλών στο περιβάλλον αποτελεί ένα τεράστιο περιβαλλοντικό ζήτημα. Σύμφωνα με έκθεση της Greenpeace (2006), από τα 260 εκατομμύρια τόνους πλαστικού που παράγονται κάθε χρόνο, περίπου το 10% καταλήγει στα ύδατα. Το 70% της πλαστικής ύλης καταβυθίζεται, δημιουργώντας ιζήματα και επηρεάζοντας αρνητικά την υδρόβια ζωή. Το υπόλοιπο 30% της πλαστικής μάζας επιπλέει στα ύδατα, σχηματίζοντας συχνά συσσωρεύματα περιστρεφόμενων πλαστικών απορριμμάτων.

Μόλις τα πλαστικά θραύσματα εισέλθουν στο υδάτινο περιβάλλον, το πλαστικό γίνεται διαπεραστικό προκαλώντας μια σειρά από προβλήματα, λόγω των εγγενών ιδιοτήτων του. Τα προβλήματα αυτά αφορούν την πλευστότητα και την ανθεκτικότητα του πλαστικού, την τάση απορρόφησής του από τα ύδατα, καθώς και την ικανότητα διάσπασής του σε μικροσκοπικά θραύσματα. Αποδεδειγμένα, τα πλαστικά τεμάχια αποσυντίθεται, με άμεσο αντίκτυπο την απόπλυση τοξικής διφαινόλης Α (BPA) και άλλων τοξινών στο υδάτινο περιβάλλον.

Η παρουσία πλαστικού στο περιβάλλον προκαλεί ρύπανση του τελευταίου. Όταν το πλαστικό εντοπίζεται με τη μορφή μεγάλων θραυσμάτων, η ρύπανση είναι ορατή. Ο μεγάλος κίνδυνος, όμως, βρίσκεται στα μη ορατά θραύσματα που εμφανίζονται με τη μορφή μικροπλαστικών. Η εξάπλωση των μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα αποτελεί μια σημαντική απειλή τόσο για το περιβάλλον, όσο και για την υγεία.

Πέραν των αρνητικών επιπτώσεων του ίδιου του πλαστικού είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το πλαστικό μπορεί να μετατραπεί σε μια επιφάνεια που θα φιλοξενήσει άλλες τοξίνες. Μια τέτοιου είδους τοξίνη είναι τα PCBs (Polychlorinated biphenyls), με την οποία και συνδέεται.

Σχετικά με την επίδραση και τις αρνητικές συνέπειες των μικροπλαστικών στο υδάτινο περιβάλλον, το πρώτο Διεθνές Ερευνητικό Εργαστήριο που πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο της Ουάσιγκτον στις 9-11 Σεπτεμβρίου 2008, συμφώνησε ότι τα μικροπλαστικά είναι υπεύθυνα για μια σειρά προβλημάτων στα υδάτινα οικοσυστήματα, τα οποία προβλήματα σχετίζονται με την εμφάνιση των μικροπλαστικών σωματιδίων στο περιβάλλον, το χρόνο παραμονής τους σε αυτό, καθώς και την αποδεδειγμένη κατάποσή τους από τους υδρόβιους οργανισμούς και, κατά συνέπεια, την είσοδο των μικροπλαστικών στην τροφική αλυσίδα.

Η έρευνα μέχρι στιγμής έχει επικεντρωθεί στις απειλές από μεγαλύτερα τμήματα πλαστικού στο περιβάλλον. Γνωρίζουμε ότι τέτοιου είδους απειλές σχετίζονται με τα προβλήματα που τα πλαστικά τεμάχια δημιουργούν στους έμβιους οργανισμούς, όπως την ασφυξία ή ακόμα και το θάνατο αυτών εξαιτίας της κατάποσης των πλαστικών. Τα μικροπλαστικά σωματίδια, αντίθετα, λόγω και του μικρού τους μεγέθους, εντοπίζονται σε μεγαλύτερη έκταση και ποικιλία και επομένως, μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα στα υδάτινα ενδιαιτήματα.

Μια σημαντική επίπτωση της ύπαρξης μικροπλαστικών στο περιβάλλον αποτελεί η βιολογική τους ενσωμάτωση στους οργανισμούς. Συχνά τα μικροπλαστικά, μέσω της κατάποσής τους από τους οργανισμούς ή της αναπνοής, ενσωματώνονται στους ιστούς των τελευταίων, με αποτέλεσμα να έχουν βρεθεί μικροπλαστικά τόσο στις γαστρεντερικές, όσο και στις αναπνευστικές οδούς υδρόβιων οργανισμών.

Πέραν των ψαριών και των λοιπών ελεύθερων – ζωντανών οργανισμών, μικροπλαστικά έχουν βρεθεί και σε ζωικές πλαγκτονικές βιοκοινωνίες. Μικροπλαστικά θραύσματα διαμέτρου 1,7 – 30,6 μm μπορούν να καταναλωθούν από το ζωοπλαγκτόν, το οποίο εν συνεχεία εκκρίνει περιττωματική ύλη μολυσμένη με μικροπλαστικά. Μαζί με την κατάποση, τα μικροπλαστικά προσκολλούνται στο εξωσκελετό του ζωοπλαγκτού. Γενικά έχει βρεθεί πως ο κύριος λόγος που το ζωοπλαγκτόν καταναλώνει μικροπλαστικά είναι επειδή αυτά εκπέμπουν παρόμοιες ουσίες, όπως διμεθυλοσουλφίδιο, με το φυτοπλαγκτόν. Οσμές διμεθυλοσουλφιδίου παράγονται κατά κύριο λόγο από πλαστικά όπως πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE)

και πολυπροπυλένιο (PP), τύποι πλαστικού που συνήθως υπάρχουν σε λευκαντικά, δοχεία αποθήκευσης τροφίμων, πλαστικές σακούλες και καλύμματα φιαλών.

Με περίοδο πέψης δύο ημερών, θα χρειαστούν τουλάχιστον δεκατέσσερις μέρες για να απορριφθούν τα μικροπλαστικά από έναν οργανισμό που τα έχει καταναλώσει. Η ενσφήνωση όμως των σωματιδίων στα βράγχια των υδρόβιων οργανισμών μπορεί να διαρκέσει μεγάλο χρονικό διάστημα.

Όταν οι οργανισμοί που έχουν καταναλώσει μικροπλαστικά καταναλωθούν με τη σειρά τους από θηρευτές, τα μικροπλαστικά σωματίδια ενσωματώνονται στα σώματα καταναλωτών υψηλότερου επιπέδου. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά απορροφούν χημικούς ρύπους που μπορούν να μεταφερθούν στους ιστούς των οργανισμών. Ένα άλλο πρόβλημα που μπορεί να δημιουργήσει η κατανάλωση μικροπλαστικών είναι η μειωμένη πρόσληψη τροφής από τους μικρούς υδρόβιους οργανισμούς, λόγω του αισθήματος κορεσμού που τους δημιουργείται, και κατά συνέπεια μια σειρά σωματικών βλαβών.

Είναι γεγονός ότι τα ψάρια αποτελούν μεγάλο μέρος της διατροφής του ανθρώπινου πληθυσμού. Καθώς τα μικροπλαστικά καταναλώνονται από ψάρια και καρκινοειδή περνούν στην τροφική αλυσίδα και μπορούν εν τέλει να καταναλωθούν από τον άνθρωπο ως τελικό καταναλωτή. Σύμφωνα με έρευνα του Πανεπιστημίου της Νέας Υόρκης, σε δείγματα δεκαοχτώ ειδών ψαριών που ελήφθησαν εντοπίστηκε σε όλα ένα επίπεδο πλαστικών στο σύστημά τους. Ερευνητές εντόπισαν επίσης ότι οι ίνες πλαστικών που έχουν καταναλωθεί έχουν συνδεθεί με μέταλλα όπως πολυχλωριωμένα διφαινύλια και με λοιπές τοξικές μολυσματικές ουσίες. Αυτή η ένωση μικροπλαστικών και μετάλλου μπορεί κατόπιν να εισέλθει στον ανθρώπινο οργανισμό εξαιτίας της κατανάλωσης μολυσμένων ψαριών. Βέβαια, τα στοιχεία που αφορούν την επίδραση της κατανάλωσης αυτών στην υγεία των ανθρώπων είναι ασαφή.

Η ύπαρξη μικροπλαστικών στα υδάτινα οικοσυστήματα επιδρά και στην πλευστότητα. Περίπου το ήμισυ των μικροπλαστικών που εισάγονται στα υδάτινα περιβάλλοντα και που καταναλώνονται από οργανισμούς μπορεί να προκαλέσει βύθιση επιπρόσθετων πλαστικών θραυσμάτων στο βυθό, δημιουργώντας ιζήματα και επηρεάζοντας τις

διαδικασίες ανταλλαγής ιζηματογενών αερίων. Μεγάλες μεταβολές στην πλευστότητα έχουν παρατηρηθεί κυρίως στα αυτοτροφικά συστήματα, καθώς η απορρόφησή τους επηρεάζει άμεσα τη φωτοσύνθεση και επομένως τα επακόλουθα επίπεδα αερίων.

Επιπροσθέτως, η μεγάλη συγκέντρωση μικροπλαστικών μπορεί να διευκολύνει τη μεταφορά συνθετικών οργανικών ενώσεων, όπως ανθεκτικούς οργανικούς ρύπους, PCB, DDT POPs και διοξίνες, που υπάρχουν στο υδάτινο περιβάλλον. Οι περισσότεροι ανθεκτικοί οργανικοί ρύποι επιπλέον στα ύδατα σε χαμηλές συγκεντρώσεις, αλλά εξαιτίας της υδροφοβίας τους συγκεντρώνονται στην επιφάνεια των πλαστικών σωματιδίων. Οι υδρόβιοι οργανισμοί καταναλώνοντας τα μικροπλαστικά καταναλώνουν, ταυτόχρονα, τους τοξικούς ρύπους. Βέβαια, δεν έχει καταστεί σαφές αν τα μικροπλαστικά μπορούν να λειτουργήσουν ως φορείς μεταφοράς των POPs από το περιβάλλον στους οργανισμούς μέσω του τρόπου αυτού. Υπάρχει όμως μια πιθανή δίοδος για την είσοδο των συνθετικών οργανικών ενώσεων μέσω των μικροπλαστικών στους διατροφικούς ιστούς.

Υπάρχουν νέα στοιχεία που καταδεικνύουν ότι τα μικροπλαστικά δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τη συσσωμάτωση των οργανικών ρύπων στους οργανισμούς. Βέβαια, τα πρόσθετα που ενσωματώνονται στα πλαστικά κατά τη διαδικασία παρασκευής τους μπορούν να εισέλθουν στους οργανισμούς μέσω της κατάποσης, προκαλώντας τους σημαντικές σωματικές βλάβες.

Τα πολυμερή που προέρχονται από ορυκτά έλαια είναι μη βιοαποικοδομήσιμα. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται τεχνολογίες παραγωγής φυσικών βιοαποικοδομήσιμων πολυμερών, παρόμοιων ιδιοτήτων με τα πολυμερή που έχουν ως βάση το πετρέλαιο, με μικρότερες όμως επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Καθώς τα πλαστικά αποικοδομούνται, απορροφούν μονομερή όπως το BPA. Το μονομερές αυτό μπορεί κατόπιν να απορροφηθεί από τους οργανισμούς και να περάσει στην τροφική αλυσίδα. Τα μικροπλαστικά, όντας πολυάριθμα, παρέχουν πολύ μεγάλες επιφάνειες πάνω στις οποίες μπορούν να προσκολληθούν εκτός από χημικές ενώσεις και μικροοργανισμοί. Η δραματική αύξηση της αποικιοποίησης μπορεί να επηρεάσει

σημαντικά τα πληθυσμιακά επίπεδα. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά στην περίπτωση αυτή λειτουργούν ως μέσο μεταφοράς των μικροοργανισμών.

Η τοξικότητα των μικροπλαστικών στους υδρόβιους οργανισμούς δεν έχει οριστεί μέχρι σήμερα με μεγάλη ακρίβεια. Είναι όμως γνωστό ότι η τοξικότητα αυτή μπορεί να προκύψει από τρεις διαφορετικές οδούς. Αυτές είναι η κατάποση, με την επακόλουθη φυσική απόφραξη, η διαρροή πρόσθετων από τα πλαστικά και η έκθεση σε μολυσματικούς παράγοντες που σχετίζονται με τα μικροπλαστικά.

Τα ποσοστά έκθεσης σε μικροπλαστικά στους οργανισμούς ποικίλουν ανάλογα με τη συσσώρευση και τη μετακίνηση αυτών μέσα στους ιστούς, καθώς και την ικανότητα του οργανισμού να εξισορροπήσει τα σωματίδια. Σε περιπτώσεις, όπως συμβαίνει με το ζωοπλαγκτόν, τα καρκινοειδή, τα αμφίποδα, τα μαλάκια και τα ψάρια, τα μικροπλαστικά μπορούν να απορροφηθούν από τους υδρόβιους οργανισμούς. Λόγω της κατάποσής τους και της επακόλουθης κατανάλωσης των οργανισμών αυτών από καταναλωτές υψηλότερου επιπέδου, τα μικροπλαστικά μεταφέρονται σε υψηλότερο τροφικό επίπεδο, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Ορισμένα είδη οργανισμών είναι ικανά για ταχεία έκκριση των μικροπλαστικών, ενώ άλλα τα διατηρούν, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση πλαστικών σωματιδίων και την κυκλοφορία εντός των οργανισμών.

Τα μικροπλαστικά σωματίδια μπορούν εύκολα να απορροφηθούν μέσω τροφοδοτών φίλτρων κατευθείαν από τη στήλη ύδατος, κατόπιν τακτοποίησής τους στο ίζημα. Είναι πιθανό η έκθεση μικροπλαστικών στα τροφοδοτικά φίλτρων να είναι μεγαλύτερη σε σχέση με άλλες τεχνικές διατροφής που χρησιμοποιούνται στους οργανισμούς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα εκτρεφόμενα στρείδια και μύδια. Σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε, βρέθηκε ότι σε οστρακοειδή αγορασμένα από τη Γερμανία υπήρχαν από 0,36 μικροπλακίδια / g υγρού βάρους (ww) έως 0,47 σωματίδια

/ g ww. Λαμβάνοντας υπόψη τη μέση κατανάλωσή τους από τους ευρωπαίους, η κατανάλωσή μικροπλαστικών από τον άνθρωπο θα κυμαινόταν μεταξύ 1800 και 11000 μικροπλαστικά ανά έτος.

Σε μια προσπάθεια κατανόησης της κατανάλωσης μικροπλαστικών έχει μελετηθεί ένας αριθμός πλαγκτονικών και καρκινοειδών οργανισμών. Σε μια έρευνα, μελετήθηκαν δεκαπέντε διαφορετικά είδη αυτών των οργανισμών και παρατηρήθηκε σε αυτούς η ύπαρξη μικροπλαστικών PS. Τα μικροπλαστικά εισχώρησαν στους οργανισμούς μέσω διαφορετικών στρατηγικών διατροφής και πιο συγκεκριμένα μέσω τροφοδοσίας με φίλτρο, παγίδευσης σε κοιλότητα του σώματος και άμεση κατάποση. Επιπλέον, δύο από τα είδη που εξετάστηκαν δεν κατανάλωσαν το PS. Τα μικροπλαστικά σφαιρίδια που καταναλώθηκαν, μετά από λίγες ώρες αποβλήθηκαν από το πεπτικό σύστημα, ενώ παρατηρήθηκε ότι μέρος των μικροπλαστικών προσκολλήθηκε σε εξωτερικές επιφάνειες των οργανισμών.

Μελέτες έχουν διεξαχθεί και για τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών στα φύκια. Τα φύκια εκτέθηκαν σε νανο-PS για 72 ώρες, γεγονός που προκάλεσε μειωμένη ανάπτυξη και κυτταρική περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη. Τα μικροπλαστικά που προσροφήθηκαν προκάλεσαν μείωση στη φωτοσύνθεση και αύξηση στην παραγωγή αντιδραστικών ειδών οξυγόνου, πιθανόν λόγω είτε της σκίασης φωτός είτε της απόφραξης των οδών CO₂ και των θρεπτικών ουσιών.

Σε έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε άλλα είδη υδρόβιων οργανισμών που έχουν τροφοδοτηθεί με μικροπλακίδια, παρατηρήθηκαν επιπτώσεις που σχετίζονται με μειωμένη κατανάλωση τροφής ή και γενικότερες αγχωτικές αντιδράσεις. Γενικά, όμως, δεν παρατηρήθηκε οξεία τοξικότητα. Η έκθεση σε PS-NH₂ και PS-COOH προκάλεσε κυτταρική ειδική απόπτωση και γενική αγχωτική αντίδραση, αντίστοιχα, ενώ οι διαφορές απόκρισης ήταν πιθανό αποτέλεσμα των διαφορών στο φορτίο των σωματιδίων. Σε άλλη μελέτη, βρέθηκε ότι το PVC αυξάνει την ευαισθησία των οργανισμών, ενώ αντίθετα, η 24ωρη έκθεση σε PE που ακολουθείται από περίοδο απομάκρυνσης επτά ημερών δεν προκάλεσε σημαντικά αποτελέσματα. Είναι βέβαιο, όμως, πως πρόκειται να υπάρξουν μακροπρόθεσμες επιπτώσεις ως αποτέλεσμα της κατάποσης μικροπλαστικών.

Όπως προαναφέρθηκε, εκτός από τις επιπτώσεις της άμεσης κατανάλωσης μικροπλαστικών, οι επιπτώσεις της κατανάλωσής τους είναι έκδηλες και σε καταναλωτές υψηλότερων τροφικών επιπέδων. Σε μια μελέτη που εξετάζει τα αποτελέσματα της

τροφικής μεταφοράς, τα φύκια αναμείχθηκαν με νανοσωματίδια του PS, τα οποία τροφοδοτήθηκαν με την *Daphnia magna* και οι даφνίδες τροφοδοτήθηκαν έπειτα στο *Carassius carassius*. Μετά την επανάληψη αυτού του κύκλου τροφοδοσίας 3 ημερών κατά τη διάρκεια των 61 ημερών, παρατηρήθηκε μειωμένη δραστηριότητα σίτισης στον κυπρίνο, καθώς και μεταβολές στη συμπεριφορά, στο ήπαρ και στους μυς και στον εγκέφαλο. Συγκεκριμένα, η αιθανόλη αυξήθηκε στο ήπαρ και η ινοσίνη, αδενοσίνη και λυσίνη αυξήθηκαν στους μυϊκούς ιστούς, ενώ τα ψάρια είχαν βαρύτερους, πρησμένους εγκεφάλους, με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νερό. Λόγω της λιπόφιλης φύσης των μικροπλαστικών, τα σωματίδια PS μπορούν να συσσωματωθούν σε όργανα, όπως ο εγκέφαλος, και να διαταράξουν τις βιολογικές μεμβράνες.

Είναι γεγονός ότι τα μικροπλαστικά μπορεί να περιέχουν μια μεγάλη ποικιλία προσθέτων. Τα πιο συχνά απαντούμενα τέτοια πρόσθετα σε πλαστικά είναι οι φθαλικές ενώσεις, οι οποίες συχνά συνδέονται με το PVC. Η ανταλλαγή προσθετικών ή ρυπογόνων ουσιών μεταξύ των μικροπλαστικών σωματιδίων και του υδάτινου περιβάλλοντος εξαρτάται τόσο από τη συγκέντρωση, όσο και από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του πλαστικού πολυμερούς και τις χημικές διεργασίες αποικοδόμησης που δρουν στα μικροπλαστικά (Νορβηγικό Ινστιτούτο για την έρευνα των υδάτων, 2014). Οι χημικές ουσίες προσροφούν γενικά στις μη κρυσταλλικές περιοχές των πλαστικών πολυμερών και τα μικρότερα πρόσθετα τείνουν να απομακρύνονται από τα πλαστικά ταχύτερα.

Εκτός από τις ενώσεις που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των πλαστικών, υπάρχει επίσης πιθανότητα έκθεσης των υδρόβιων ζώντων οργανισμών σε άλλους μολυντές που προσροφούν μικροπλαστικά σωματίδια. Τα μικροπλαστικά είναι υδρόφοβα και έχουν μεγάλο εμβαδό επιφάνειας, επιτρέποντας τη συσσώρευση οργανικών ρύπων, όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs), πολυβρωδιφαινυλαιθέρες (PBDEs), πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB), και διγλωροδιφαινυλοτριγλωροαιθάνιο (DDT) (Andrady, 2011).

Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι οργανικοί ρύποι συνδέονται με τα μικροπλαστικά ευκολότερα από ότι με μεγαλύτερα πλαστικά θραύσματα, ως αποτέλεσμα του αυξημένου λόγου επιφάνειάς τους προς όγκο (Teuten, 2007). Στην πραγματικότητα, η αναγνώριση της ικανότητας σύνδεσης των πλαστικών έχει οδηγήσει σε αυξανόμενη χρήση τους σε συσκευές παθητικής δειγματοληψίας για την εκτίμηση των συγκεντρώσεων POP στο νερό, στα ιζήματα και στους ζωντανούς οργανισμούς.

Με παρόμοιο τρόπο, τα πλαστικά σωματίδια μπορούν να συσχετιστούν με μέταλλα, τα οποία ενδεχομένως συσσωρεύονται σε συγκεντρώσεις ισοδύναμες ή μεγαλύτερες από εκείνες στα περιβάλλοντα ιζήματα ή στο νερό (Ashton 2010). Έρευνες έχουν παρουσιάσει την απορρόφηση των Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb και Zn σε μικροπλαστικά υπό ποικίλες συνθήκες αλατότητας και pH. Η προσρόφηση στα γηρασμένα μικροσφαιρίδια ήταν γενικά μεγαλύτερη σε σχέση με τα καινούρια σφαιρίδια, ενώ για όλα τα μέταλλα εκτός από Cu και Cr, η προσρόφησή τους ήταν μεγαλύτερη στα γλυκά νερά από ό, τι το θαλασσινό νερό (Holmes, 2014). Σε μια μεταγενέστερη μελέτη, η απορρόφηση Ag, Al, Cd, Co, Cr, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb και Zn σε πλαστικά σωματίδια ήταν μεγαλύτερη για τα γηρασμένα σφαιρίδια από ότι για τα νέα και το αυξανόμενο pH συνέβαλε στην αύξηση την προσρόφηση Ag, Cd, Co, Ni, Pb και Zn (Turner and Holmes, 2015). Οι μέσες συγκεντρώσεις μετάλλων στα σφαιρίδια κυμαίνονταν από <3 ng / g Ag και Hg έως 34.400 ng / g Fe όταν εκτέθηκαν σε διαλύματα που περιείχαν 5 µg / L δοκιμαστικού μετάλλου για 168 ώρες (Turner and Holmes, 2015). Οι μελέτες αυτές καταδεικνύουν την ικανότητα των μικροπλαστικών να συσσωρεύουν μέταλλα σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις από ό, τι στο περιβάλλον νερό, ενδεχομένως αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις έκθεσης για τους υδρόβιους οργανισμούς που απορροφούν αυτά τα σωματίδια.

Οι ρυθμοί απορρόφησης ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο πλαστικού και το συγκεκριμένο στοιχείο. Για παράδειγμα, σε μία μελέτη, διαπιστώθηκε ότι το DDT ανταγωνίζεται το φαινανθερένιο για τη προσρόφησή του σε PVC και PE (Bakir, 2012). Οι ικανότητες απορρόφησης των PS, PE και PP για τους PAH, των εξαχλωροεξάνιων και των χλωριωμένων βενζολίων έχουν προσδιοριστεί πειραματικά. Ενώ η αλατότητα δεν φαίνεται να επηρεάζει την απορροφητική ικανότητα των πλαστικών για τους περισσότερους POPs,

μπορεί να επηρεάσει το ρυθμό και την ποσότητα της προσρόφησης για μερικούς από αυτούς τους μολυντές. Παραδείγματος χάριν, μία μελέτη ανέφερε ότι αυξάνεται η προσρόφηση των PCB σε νανο-Ρδ και μικρο- ΡΕ καθώς η αλατότητα αυξάνεται, με ταυτόχρονη μείωση της προσρόφησης σε οργανική ύλη στο ίζημα (Velzeboer, 2014). Επιπλέον, υπάρχει υπόνοια μεγαλύτερης συγκέντρωσης ρύπων στις εκβολές των ποταμών ή στα θαλάσσια ύδατα.

Τα ίδια τα πλαστικά θεωρούνται βιολογικά αδρανή δεδομένου ότι οι περισσότεροι υδρόβιοι οργανισμοί στερούνται ενζύμων για να διασπάσουν συνθετικά πολυμερή. Εντούτοις, οι μολυσματικές ουσίες ή τα πρόσθετα που σχετίζονται με το πλαστικό μπορούν να διέλθουν, ανάλογα με τη θερμοκρασία, το pH, το μέγεθος των σωματιδίων και άλλες ιδιότητες του πλαστικού και του περιβάλλοντος (Andersson, 2014). Η πιθανότητα αυτές οι χημικές προσμείξεις να διέλθουν σε υδρόβιους οργανισμούς μετά την κατάποση μικροπλαστικών αποτελεί μείζον θέμα, αλλά αρχίζει να γίνεται κατανοητή. Αν και δεν χαρακτηρίστηκαν εκτενώς, οι ουσίες που σχετίζονται με τα μικροπλαστικά, έχουν ανιχνευθεί σε διάφορα διαφορετικά παγκόσμια υδάτινα σώματα, υποδεικνύοντας ότι η προσρόφηση πραγματοποιείται υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Για τα περισσότερα υδρόβια είδη, η κυρίαρχη οδός μεταφοράς του μολυσματικού στοιχείου από το πλαστικό είναι μέσω της κατάποσης. Ενώ οι ίδιες οι μολυσματικές ουσίες είναι γενικά καλά μελετημένες, η μεταφορά τους και οι επιδράσεις τους ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης με τα μικροπλαστικά απαιτούν ακόμη περαιτέρω έρευνα για να γίνουν πλήρως κατανοητές.

Τα πρόσθετα που σχετίζονται με τα μικροπλαστικά, όπως η διφαινόλη Α (BPA) και οι φθαλικές ενώσεις, μπορούν να επηρεάσουν τα ενδοκρινικά συστήματα των υδρόβιων οργανισμών, επιδρώντας στην κινητικότητα, την αναπαραγωγή και την ανάπτυξή τους. Οι φθαλικές ενώσεις και οι BPA είναι γνωστοί ενδοκρινικοί διαταράκτες σε ψάρια, καρκινοειδή και ασπόνδυλα και έχει αποδειχθεί ότι προκαλούν ολικές σωματικές και μοριακές επιδράσεις σε συγκεντρώσεις στην περιοχή ng / L σε μg / L (Cole, 2011). Έχουν

διεξαχθεί αρκετές μελέτες εργαστηριακής έκθεσης με ιχθύδια (*A. Marina*) και τεχνητά μολυσμένα μικροπλαστικά.

Βιολογικά μοντέλα έχουν επίσης δημιουργηθεί σε μια προσπάθεια να μοντελοποιηθεί η πιθανή τοξικότητα των POPs που σχετίζονται με τα μικροπλαστικά. Ένα μοντέλο υποδεικνύει ότι η έκπλυση της BPA και της εννεύλοφαινόλης από τα εισπνεόμενα μικροπλαστικά στην *Arenicola marina* (σκουλήκι πολυκετών) και *Gadus morhua* (cod) συνέβαλε αμελητέα στη συνολική έκθεση σε αυτές τις ενώσεις (Koelmans, 2014). Ένα άλλο μοντέλο προέβλεψε παρομοίως ότι οι διεργασίες αραίωσης και εκκαθάρισης στην *A. Marina* θα κυριαρχούσαν και θα απέτρεψαν τη συσσώρευση POPs από μικροπλαστικά. Οι μεγαλύτεροι κίνδυνοι συνδέονταν με χημικές ουσίες για τις οποίες το πλαστικό είναι η κύρια πηγή (π.χ. πλαστικοποιητές και άλλα πρόσθετα). Ωστόσο, αυτά τα αποτελέσματα προσδιορίστηκαν υπό συνθήκες μοντελοποίησης και θα πρέπει να ερμηνεύονται με προσοχή (Koelmans, 2014). Τα συνολικά αποτελέσματα των μελετών για τα ψάρια και τα ασπόνδυλα δείχνουν ότι οι μολυσματικές ουσίες που σχετίζονται με μικροπλαστικά έχουν τη δυνατότητα να συσσωρεύονται στους ιστούς και να προκαλούν επιδράσεις που είναι ειδικές για το μολυσματικό και το πλαστικό πολυμερές, συμπεριλαμβανομένης της ενδοκρινικής διαταραχής, των τροποποιήσεων συμπεριφορών και των αλλαγών στις μεταβολικές διεργασίες.

Πέραν των δυνατοτήτων για φυσικές ή τοξικολογικές επιδράσεις, τα μικροπλαστικά δημιουργούν ένα σκληρό ιζηματογενές υπόστρωμα στα υδρόβια οικοσυστήματα, με άμεσες επιπτώσεις στις βακτηριακές κοινότητες. Για παράδειγμα, βρέθηκαν είδη *Vibrio* και ετεροτροφικών βακτηρίων που αποικίζουν πλαστικά υπολείμματα (Quilliam, 2014). Δύο άλλες μελέτες σημείωσαν ότι οι βακτηριακές συγκεντρώσεις στα μικροπλαστικά ήταν ποικίλες και διέφεραν σημαντικά από εκείνες στο οργανικό υλικό στο κανάλι και στη στήλη ύδατος (Zettler, 2013). Δεν είναι γνωστό αν αυτό οφείλεται σε διαφορές στη χημική σύνθεση ή στην παρουσία μιας σκληρής επιφάνειας για αποικισμό, αλλά αυτές οι επιφάνειες είναι περισσότερο εκτεθειμένες από το φυσικό υπόστρωμα.

Βέβαια, πέραν τον κινδύνων των μικροπλαστικών για τα υδρόβια οικοσυστήματα, εμφανής είναι και ο κίνδυνος για την ύπαρξή τους στο πόσιμο νερό. Ο Παγκόσμιος

Οργανισμός Υγείας ανακοίνωσε την επανεξέταση των πιθανών κινδύνων του πλαστικού στο πόσιμο νερό μετά από μια νέα ανάλυση μερικών από τις πιο δημοφιλείς μάρκες εμφιαλωμένου νερού στον κόσμο, ότι πάνω από το 90% περιείχε μικροσκοπικά κομμάτια πλαστικού. Μια προηγούμενη μελέτη βρήκε επίσης υψηλά επίπεδα μικροπλαστικών στο νερό της βρύσης.

Στη νέα μελέτη, ανάλυση 259 φιαλών από 19 τοποθεσίες σε εννέα χώρες σε 11 διαφορετικές μάρκες βρήκε κατά μέσο όρο 325 πλαστικά σωματίδια για κάθε λίτρο νερού που πωλείται. Σε ένα μπουκάλι Nestlé Pure Life, οι συγκεντρώσεις ήταν τόσο υψηλές όσο τα 10.000 πλαστικά κομμάτια ανά λίτρο νερού. Από τα 259 μπουκάλια που δοκιμάστηκαν, μόνο 17 ήταν ελεύθερα πλαστικών, σύμφωνα με τη μελέτη. Οι επιστήμονες που εδρεύουν στο κρατικό πανεπιστήμιο της Νέας Υόρκης αναφέρουν ότι βρέθηκαν περίπου δύο φορές περισσότερα πλαστικά σωματίδια μέσα στο εμφιαλωμένο νερό σε σύγκριση με προηγούμενη μελέτη τους για το νερό της βρύσης.

Σύμφωνα με τη νέα μελέτη, ο πιο κοινός τύπος πλαστικού θραύσματος που βρέθηκε ήταν το πολυπροπυλένιο, ο ίδιος τύπος πλαστικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή καπακιών φιαλών. Οι φιάλες που αναλύθηκαν αγοράστηκαν στις ΗΠΑ, την Κίνα, τη Βραζιλία, την Ινδία, την Ινδονησία, το Μεξικό, τον Λίβανο, την Κένυα και την Ταϊλάνδη. Οι επιστήμονες χρησιμοποίησαν κόκκινη βαφή του Νείλου για να φθορίζουν σωματίδια στο νερό, καθώς η βαφή τείνει να κολλάει στην επιφάνεια των πλαστικών, αλλά όχι στα περισσότερα φυσικά υλικά. Είναι φανερό πως τα μικροπλαστικά αποτελούν μια αόρατη απειλή και για τον άνθρωπο, καθώς βρίσκονται σε πολλά προϊόντα που καθημερινά χρησιμοποιούμε.

Υπάρχουν πολλά προϊόντα προσωπικής φροντίδας που περιέχουν μικροπλαστικά, ένα εκ των οποίων και η οδοντόκρεμα, η οποία αποτελεί μία από τις συνηθέστερες χρήσεις μικροπλαστικών στην καθημερινότητά μας. Ορισμένα καλλυντικά προϊόντα μπορεί, επίσης, να περιέχουν τόσο πλαστικό, όσο και το πλαστικό που υπάρχει στην ίδια τη συσκευασία τους, σύμφωνα με εμπειρογνώμονες. Τα προϊόντα απολέπισης καθημερινής χρήσης πολύ συχνά περιέχουν μικροπλαστικά, τα οποία στη συνέχεια ξεπλένονται και

μπαίνουν στους σωλήνες αποχέτευσης του σπιτιού μας, οδηγούμενα στον υδροφόρο ορίζοντα.

Μέσω των λυμάτων, τα μικροπλαστικά φθάνουν στα ύδατα, όπου εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα μέσω του ζωοπλαγκτού. Το 2017, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι το 25% των θαλάσσιων ψαριών που ελέγχθηκαν στις αγορές της Ινδονησίας και της Καλιφόρνιας είχαν πλαστικές ίνες στο έντερό τους. Η έρευνα εξακολουθεί να υπολείπεται ως προς το αν η κατανάλωση μικροπλαστικών μέσω ψαριών βλάπτει την ανθρώπινη υγεία. Εκτός από τα μικροπλαστικά στα προϊόντα υγιεινής, τα συνθετικά υφάσματα απελευθερώνουν επίσης μια τεράστια ποσότητα μικροσκοπικών πλαστικών ινών σε λύματα. Ερευνητές διαπίστωσαν ότι ένα συνηθισμένο πλυντήριο 6 κιλών με ρούχα από ακρυλικά υφάσματα παράγει πάνω από 700.000 μεμονωμένες πλαστικές ίνες. Τα συνθετικά υφάσματα αντιπροσωπεύουν περίπου το ένα τρίτο των μικροπλαστικών στους ωκεανούς.

Τα ελαστικά των οχημάτων αποτελούν επίσης κύρια πηγή απελευθέρωσης μικροπλαστικών στο περιβάλλον. Τα ελαστικά είναι κατασκευασμένα από συνθετικά πολυμερή αναμεμιγμένα με καουτσούκ, τα οποία φθείρονται με την χρήση. Αυτό απελευθερώνει μικροπλαστικά που είτε τα παίρνει ο άνεμος, είτε ξεπλένονται με τη βροχή. Νορβηγοί και Σουηδοί ερευνητές συμφωνούν ότι μια μεγάλη αναλογία σωματιδίων που βρέθηκαν στα νερά προέρχεται από ελαστικά αυτοκινήτων.

Μικροπλαστικά βρέθηκαν επίσης στο νερό της βρύσης. Σε μια ανάλυση δειγμάτων νερού βρύσης από χώρες σε όλο τον κόσμο, πάνω από το 80% ήταν μολυσμένο με κάποια ποσότητα πλαστικών ινών. Εάν υπάρχουν μικροπλαστικά και στο νερό της βρύσης, είναι πιθανό να υπάρχουν και σε άλλα βασικά τρόφιμα, όπως το ψωμί.

4. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Μικροπλαστικών σε Γλυκά Νερά

Από το 2010 έχουν πραγματοποιηθεί περισσότερες ερευνητικές δημοσιεύσεις σχετικά με την θαλάσσια ρύπανση από τα πλαστικά από ό, τι τις προηγούμενες τέσσερις δεκαετίες, φέρνοντας το ζήτημα στο προσκήνιο και σε δημόσιο λόγο ως ένα ισχυρό επιστημονικό πεδίο. Πολλά από αυτά που είναι ήδη γνωστά μπορούν να συνοψιστούν σε τρία συμπεράσματα: το κατακερματισμένο πλαστικό διανέμεται παγκοσμίως, συνδέεται με μία μίξη επικίνδυνων χημικών και ως εκ τούτου αποτελεί άλλη μια πηγή επικίνδυνων χημικών προς τα υδρόβια περιβάλλοντα και τα ζώα και εμπλέκεται και απορροφάται από εκατοντάδες είδη άγριας πανίδας σε κάθε επίπεδο της τροφικής αλυσίδας, συμπεριλαμβανομένων των ζώων που θεωρούνται θαλασσινά (Kuhn, 2015).

4.1. Διάσπαρτη Κατανομή Μικροπλαστικών

Η παγκόσμια διανομή πλαστικών είναι αποτέλεσμα του κατακερματισμού και της μεταφοράς από τον άνεμο και τα ρεύματα στο υδάτινο περιβάλλον, από εγχώριες λίμνες και ποτάμια στον ανοιχτό ωκεανό και πιθανώς την εναπόθεση στις ακτές ή στον πυθμένα της θάλασσας (Shimanaga & Yanagi, 2016). Νέες μελέτες δείχνουν αυξανόμενες αφθονίες μικροπλαστικών, δείχνοντας ότι ο σχηματισμός των μικροπλαστικών δεν περιορίζεται στη θάλασσα, αν και πρωτοεμφανίστηκαν εκεί.

Οι πρώτες παρατηρήσεις του πλαστικού στους ωκεανούς έγιναν το 1972 στο δυτικό Βόρειο Ατλαντικό, οι οποίες αποτελούνταν από σφαιρίδια προπαραγωγής και υποβαθμισμένα υπολείμματα που βρέθηκαν σε πλαγκτόν (Carpenter & Smith, 1972). Μετά από εκείνη την εύρεση, ακολούθησαν μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στο Βόρειο Ειρηνικό (Wong, 1974; Shaw & Mapes, 1979) και στο Νότιο Ατλαντικό Ωκεανό (Morris, 1980). Οι επιστήμονες άρχισαν να κατανοούν τις παγκόσμιες επιπτώσεις των κατακερματισμένων πλαστικών που ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις. «Τα δεδομένα από την έρευνα μας στους ωκεανούς δείχνουν ότι το πλαστικό τόσο από εσωτερικές, όσο και από εξωτερικές πηγές συγκεντρώνεται στο κέντρο της φύσης, με τον ίδιο τρόπο που κάνει το *Sargassum*» (Wilber, 1987).

Το 2001 ο καπετάνιος Charles Moore δημοσίευσε την ανακάλυψή του για μια συσσώρευση μικροπλαστικών στο Υποτροπικό Ρεύμα του Βόρειου Ειρηνικού Ωκεανού (Moore, 2001). Αυτό το εύρημα θα μπορούσε να ενταχθεί στην έρευνα που είχε δημοσιευτεί τον προηγούμενο τέταρτο του αιώνα, αλλά οι δραματοποιημένες ιστορίες των μέσων ενημέρωσης ανέφεραν πλασματικά νησιά από σκουπίδια που συνδέονταν με τον ωκεανό και σχημάτιζαν σκουπίδια δύο φορές το μέγεθος του Τέξας. Αυτό, ακολούθως, λειτούργησε ως καταλύτης για την προσοχή, το ενδιαφέρον και την ανησυχία του κοινού, των υπευθύνων χάραξης πολιτικής, της βιομηχανίας και της επιστήμης.

Μετά από αυτές τις μελέτες, έχουν εμφανιστεί και οι περιφερειακές και παγκόσμιες εκτιμήσεις των υπολειμμάτων (van Sebille, 2015; Cozar, 2014). Οι εκτιμήσεις των περιβαλλοντικών συγκεντρώσεων κυμαίνονταν από 8 εκατομμύρια τόνους πλαστικών που αφήνονταν στις ακτές παγκοσμίως ανά έτος, σε σύγκριση με μια εκτίμηση ενός εκατομμυρίου τόνων που παρασύρονται στη θάλασσα (Eriksen, 2014).

4.2. Έμφυτη Τοξικότητα και Απορρόφηση Ρύπων

Ενώ τα προϊόντα πλαστικού που εισέρχονται στον ωκεανό αντιπροσωπεύουν μια σειρά από ποικίλα πολυμερή και πλαστικοποιητές, πολλά απορροφούν και προσροφούν (προσκολλώνται) άλλους έμμοιους οργανικούς ρύπους και μέταλλα που χάνονται στο περιβάλλον, με αποτέλεσμα μια μεγάλη λίστα τοξικών που συνδέονται με πλαστικά υπολείμματα (Gauquie, 2015). Αρκετοί ανθεκτικοί οργανικοί ρύποι συνδέονται με το πλαστικό, καθώς μεταφέρονται μέσω της λεκάνης απορροής, θάβονται σε ιζήματα ή περιφέρονται στον ωκεανό. Ένα μεμονωμένο σφαιρίδιο μπορεί να προσελκύσει έως και ένα εκατομμύριο φορές τη συγκέντρωση ορισμένων ρύπων στο θαλασσινό νερό του περιβάλλοντος και αυτές οι χημικές ουσίες ενδέχεται να καταλήξουν στη θαλάσσια ζωή κατά την κατάποση (Mato, 2001).

Η χημεία του πλαστικού στα καταναλωτικά προϊόντα εγείρει το θέμα της ανθρώπινης υγείας, καθώς και οικολογικά προβλήματα. Για παράδειγμα, στα συγκεκριμένα προβλήματα συμπεριλαμβάνονται οι πολυφθοριωμένες ενώσεις (Fromme, 2009; Giesy, 2001; Kovarova & Svobodova, 2008) και τα φυτοφάρμακα / απολυμαντικά *triclosan* (Ahn,

2008; Chalew & Halden, 2009), τα οποία χρησιμοποιούνται επίσης σε μη συνταγογραφούμενα φάρμακα, αντιμικροβιακά σαπούνια χεριών και σε ορισμένες μάρκες οδοντόκρεμας, σε επιβραδυντικά φλόγας και ιδιαίτερα σε πολυβρωμιούχους διφαινυλεθέρους (Costa, 2008; Yogui & Sericano, 2009) και σε νουλοφαινόλες. Η δισφαινόλη Α, δηλαδή το δομικό στοιχείο των πολυανθρακικών και τα φθαλικά - το πλαστικό πρόσθετο που μετατρέπει το σκληρυμένο πολυβινυλοχλωρίδιο σε εύκαμπτο βινύλιο- είναι και οι δύο γνωστοί ενδοκρινικοί διαταράκτες (Bonfeld-Jørgensen, 2007; U.S. EPA, 2016).

Από τα 557 είδη που έχουν αναφερθεί για την πρόσληψη ή την εμπλοκή στα σκουπίδια των ανθρώπων, τουλάχιστον 203 από αυτά προσλαμβάνουν επίσης μικροπλαστικά, εκ των οποίων πολλά είναι ψάρια και άλλα σπονδυλωτά (Anastasopoulou, 2013; de Stephanis, 2013). Επιπλέον, τα εργαστηριακά δεδομένα υποδηλώνουν μια αυξανόμενη λίστα ζωοπλαγκτόν, αρθροπόδων και μαλακίων, ενώ και τα σκουλήκια σε ιζήματα παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά, μαζί με αλληλεπιδράσεις με φυτοπλαγκτόν που μπορεί να επηρεάσουν τα ποσοστά καθίζησης (Long, 2015). Επιπλέον, έχουν βρεθεί παραδείγματα μαλακίων και ψαριών σε αγορές με άφθονα μικροπλαστικά στο πεπτικό τους σύστημα. Μια εργαστηριακή μελέτη με μύδια έδειξε ότι 10 μm μικροπλαστικών μετατοπίστηκαν στο κυκλοφορικό σύστημα (Browne, 2008), οδηγώντας σε μελέτες που δείχνουν στοιχεία ότι τα μικροπλαστικά και τα νανοπλαστικά μπορούν να περιλαμβάνονται σε τροφικά επίπεδα σε καρκινοειδή και άλλους δευτερογενείς καταναλωτές (Farrell & Nelson, 2013). Η κατάποση μικροπλαστικών που είναι φορτωμένα με πολυβρωμοδιφαινυλαιθέρους μπορεί να μεταφερθεί σε πτηνά και σε σκώληκες. Τα στοιχεία ότι υπάρχουν επιπτώσεις σε μεμονωμένα ζώα, συμπεριλαμβανομένων των καρκίνων στα ψάρια (Rochman, 2013) και σε χαμηλότερη αναπαραγωγική επιτυχία και μικρότερη διάρκεια ζωής στα θαλάσσια σκουλήκια (Wright, 2013) αυξάνονται. Ορισμένες μελέτες δείχνουν ακόμη και επιπτώσεις στους εργαστηριακούς πληθυσμούς: μια μελέτη στρειδιών καταλήγει στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν «ενδείξεις ότι το μικρο-πολυστυρένιο προκαλεί τροποποιήσεις στη σίτιση και τη διαταραχή της αναπαραγωγής, με σημαντικές επιπτώσεις στους απογόνους» (Sussarellu, 2015).

4.3. Δραστικές Παρεμβάσεις στις Πηγές Μικροπλαστικών Γλυκού Νερού

Η διακοπή της πρόκλησης αρνητικών επιπτώσεων απαιτεί δραστικές παρεμβάσεις. Όσο πιο μακριά πραγματοποιείται ο δραστικός μετριασμός, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα συλλογής περισσότερων πλαστικών με λιγότερη αποικοδόμηση και κατακερματισμό και ο εντοπισμός των πηγών, πριν συμβούν ακόμα πιο έντονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για τους περισσότερους επιστήμονες και υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, ο καθαρισμός των ωκεανών δεν είναι οικονομικά ή λογιστικά εφικτός, μετακινώντας τη συζήτηση σε ανάντη προσπάθειες, όπως οι στρατηγικές μηδενικών αποβλήτων, η βελτίωση της ανάκτησης των αποβλήτων και η διαχείριση και άμβλυνση σημειακών και μη σημειακών πηγών μικροπλαστικής δημιουργίας και απώλειας στο περιβάλλον.

Υπάρχει μία ευρεία συμφωνία ότι τα μικροπλαστικά στη θάλασσα αποτελούν μια περίπτωση της τραγωδίας των κοινών, όπου η αφθονία τους στα διεθνή ύδατα και η ανιχνευσιμότητα τους καθιστά σχεδόν αδύνατο την προμήθευση των προϊόντων στην εταιρεία ή την εκάστοτε χώρα προέλευσης. Σε χερσαία περιβάλλοντα, η αναγνώριση των πηγών είναι ευκολότερη λόγω της χαμηλότερης υποβάθμισης, αλλά η σύλληψη και ο ποσοτικός προσδιορισμός των μικροπλαστικών σε οποιοδήποτε περιβάλλον είναι δύσκολες και μπορεί εύκολα μία περιοχή να μολυνθεί ή να αναγνωριστεί εσφαλμένα ως κάτοχος μικροπλαστικών (Song, 2015), ενώ παράλληλα στις εσωτερικές πλωτές οδούς υπάρχει η πρόκληση της διαλογής υπολειμμάτων από μεγάλες ποσότητες της βιομάζας. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, οι διατάξεις του νόμου για το καθαρό νερό και οι πολιτείες συνολικών ημερήσιων φορτώσεων κατευθύνουν τους περιβαλλοντικούς οργανισμούς στο να ρυθμίζουν τα πλαστικά απόβλητα σε πλωτές οδούς, όπως οι συνολικές ημερήσιες φορτώσεις της Καλιφόρνιας, αν και συχνά περιορίζονται σε > 5 mm και αποβάλλουν εντελώς τα μικροπλαστικά.

Ενώ υπάρχουν συγκεκριμένες περιβαλλοντικές διαδικασίες που αποικοδομούν το πλαστικό σε μικρότερα σωματίδια (υπεριώδης αποικοδόμηση, οξειδωση, ευθραυστότητα και θραύση, βιοαποικοδόμηση), υπάρχουν άλλες επίγειες δραστηριότητες και σχέδια προϊόντων / συσκευασιών που δημιουργούν τα μικροπλαστικά. Αυτές μπορεί να

περιλαμβάνουν την κακή διαχείριση των σφαιριδίων προπαραγωγής σε χώρους παραγωγής και διανομής, τα βιομηχανικά λειαντικά προϊόντα, το συνθετικό γρασίδι σε αθλητικούς χώρους, τις τσακισμένες γωνίες πακέτων σάλτσας, την σκόνη των ελαστικών από τα οχήματα, την κατασκευή πλαστικών προϊόντων, την τριβή οδικών πλαστικών απορριμμάτων στις άκρες του δρόμου, τα μη φιλτραρισμένα στεγνωτήρια σε εγκαταστάσεις πλυντηρίων που αποβάλλουν μικροΐνες στον αέρα (Dris, 2016) ή τη συνδυασμένη υπερχειλίση λυμάτων που αποβάλλει τα πλαστικά από τις οικιακές γραμμές αποχέτευσης, όπως τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας, οι ίνες από υφάσματα και τα καλλυντικά, στο υδάτινο περιβάλλον. Αυτές οι πηγές δεν διαθέτουν συγκεκριμένες μεθόδους μέτρησης.

Υπάρχουν παραδείγματα σχετικά με την παρατηρούμενη αφθονία μικροπλαστικών σε χερσαία και γλυκά υδάτινα περιβάλλοντα που οδηγούν σε μετριασμούς, όπως ο νόμος των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής του 2015 για τα μικρόβια που παρατηρήθηκαν στα νερά (U.S. Congress, 2015) και οι νόμοι για τις βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης για την απώλεια σφαιριδίων προπαραγωγής (California Environmental Protection Agency, 2014). Είναι ενδιαφέρον ότι αυτά τα δύο παραδείγματα μοιράζονται τρία κοινά χαρακτηριστικά: (α) ποσοτικοποιούνται με τυπικές μεθόδους χρησιμοποιώντας διάφορους τρόπους για τη μέτρηση των απορρίψεων σε πλωτές οδούς, (β) βρίσκονται σε μεγάλη αφθονία και (γ) είναι πρωτογενή μικροπλαστικά, καθιστώντας ευκολότερο τον προσδιορισμό των υπεύθυνων πηγών. Λαμβάνοντας υπόψη τις επίγειες δραστηριότητες που δημιουργούν μικρές ποσότητες δύσκολου ποσοτικού προσδιορισμού μικροπλαστικών και ναοπλαστικών, οι οποίες συχνά ονομάζονται δευτερεύοντα μικροπλαστικά, υπάρχει ανάγκη για νέες μεθόδους για τη μέτρηση της σημασίας τους.

Στην παρούσα φάση, κρίνεται επιτακτική η διατύπωση του ερωτήματος: γιατί να περιμένουμε έως ότου τα μικροπλαστικά φτάσουν στο νερό για να ποσοτικοποιηθεί η ύπαρξή τους; Οι τρέχουσες μέθοδοι λεκάνης απορροής και χαρακτηρισμού αποβλήτων μπορούν να μετρήσουν μόνο τα μακροπλαστικά. Τα μικροπλαστικά, όπως το συνθετικό γρασίδι, το ξύρισμα με εργαλεία, η τριβή του δρόμου και άλλα, αποτελούν πηγές μικροπλαστικών με άγνωστες αφθονίες, οι οποίες θα μπορούσαν να μετρηθούν με τη

δειγματοληψία επιφανειακών περιοχών στο έδαφος κοντά στις δραστηριότητες που τις δημιουργούν. Αυτές οι μεθοδολογίες μπορεί να περιλαμβάνουν τη σάρωση τετραγωνικών μέτρων στα πεζοδρόμια και τις άκρες του δρόμου για τον ποσοτικό προσδιορισμό της αφθονίας. Μια πρόσφατη μελέτη σχετικά με την πτώση μικροϊνών χρησιμοποίησε δοχεία σε στέγες στο Παρίσι για τη σύλληψη αερομεταφερόμενων σωματιδίων (Dris, 2016). Αυτές οι μικροπλαστικές και νανοπλαστικές ίνες μπορούν να μετρηθούν όταν βρίσκονται πιο κοντά στις πηγές τους. Η έρευνα σχετικά με την επιφάνεια της φυλλωσιάς κοντά σε αυτόματα πλυντήρια ανακάλυψε πρόσφατα άφθονες μικροΐνες. Άλλες μέθοδοι μπορεί να χρησιμοποιούν το ποδόλουτρο έξω από ξενοδοχεία ή τα καταστήματα με δάπεδα με μοκέτα για τη μέτρηση της μεταφοράς ινών λόγω της κυκλοφορίας των ποδιών. Η παραγωγή των μικροπλαστικών στα νοικοκυριά θα μπορούσε να εκτιμηθεί από τα σωματίδια σκόνης που συσσωρεύονται στους σάκους φίλτρων των ηλεκτρικών σκουπών. Ο ποσοτικός προσδιορισμός της σημασίας αυτών των σημειωτικών και μη σημειωτικών πηγών μπορεί να βοηθήσει τις προσπάθειες μετριασμού των επιπτώσεων τους.

Πηγές, μετρήσεις και στρατηγικές για την δραστική απαλοιφή των μικροπλαστικών

Αντιμετώπιση των μικροπλαστικών

Κατηγορία	Πηγή	Πιθανή παρέμβαση
Παραγωγή	Τα μικροπλαστικά στα καλλυντικά	Απομάκρυνση από τα προϊόντα. Αντικατάσταση με αβλαβείς εναλλακτικές
	Λανθασμένη μεταχείριση προπαραγωγής σφαιριδίων	Ρύθμιση του χειρισμού των σφαιριδίων. Καθάρισμα από τα σφαιρίδια.

Εμπόριο	Βιομηχανικά λειαντικά προϊόντα	Βελτίωση του περιορισμού και ανάγκη για εναλλακτικές
	Εξάτμιση από αυτόματα πλυντήρια	Βελτίωση του φιλτραρίσματος
	Γεωργία – υποβαθμισμένα λεπτά στρώματα, γλάστρες, και σωλήνες	Βελτίωση της ανάκαμψης, βιοδιασπώμενα πλαστικά
Καταναλωτής	Σκόνη από τα λάστιχα	Τεχνολογικές εξελίξεις, επιφάνεια δρόμου
	Απορρίμματα από μικρά πλαστικά αντικείμενα (φιλτράκια από τσιγάρα, τσακισμένες γωνίες συσκευασιών, μικρές λεπτές συσκευασίες, και άλλα)	Εφαρμογή των κλήσεων για ρίψη απορριμμάτων, εκπαίδευση πολιτών
	Πλύσιμο ρούχων στο σπίτι. Σπατάλη υγρών λυμάτων	Πλύσιμο με καλής ποιότητας πλυντήρια. Περιορισμός απόνερων, μονοϊνικά υφάσματα.
Διαχείριση απορριμμάτων	Κατακερματισμός από την οδήγηση των αμαξιών	Βελτιωμένη διαχείριση απορριμμάτων
	Υπεριώδης ακτινοβολία και χημικά χερσαία απόβλητα	Βελτιωμένη διαχείριση απορριμμάτων

	Υγρά λύματα (συνθετικές ίνες)	Φιλτράρισμα άπλυτων, καινοτομίες στην βιομηχανία των υφασμάτων
	Συνδυασμένη υπερχείλιση λυμάτων (μεγάλα αντικείμενα)	Βελτίωση στις υποδομές
	Μηχανικός κατατεμαχισμός απορριμμάτων στον δρόμο κατά την κοπή της βλάστησης (κυρίως γρασίδι)	Καλύτερη νομοθεσία και εφαρμογή του νόμου· διατίμηση των άχρηστων προϊόντων

5. Συμπεράσματα

Η απομόνωση των μικροπλαστικών σε περιβαλλοντικά υποστρώματα μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολη, ιδίως όταν τίθενται δείγματα με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά συστατικά, όπως τα ιζήματα και τα εδάφη. Παρομοίως, η φασματοσκοπική ταυτοποίηση των συνθετικών πολυμερών περιπλέκεται από το υψηλό περιεχόμενο της χρωστικής και την διάβρωση των σωματιδίων και των ινών. Κατά συνέπεια, η ανίχνευση και η αναλυτική επιβεβαίωση των μικροπλαστικών απαιτούν πρόσβαση σε εξελιγμένο εξοπλισμό (π.χ. μικρο-μετασχηματιστική υπέρυθη φασματοσκοπία Fourier και μικρο-Raman) (Klein et al., 2017). Πρόσφατες μελέτες παρακολούθησης έχουν αποδείξει ότι – στην ίδια βάση με τα θαλάσσια περιβάλλοντα – τα μικροπλαστικά βρίσκονται παντού σε μια ποικιλία θαλασσών γλυκού νερού. Συγκεντρώσεις μικροπλαστικών που αναφέρθηκαν σε δείγματα επιφανειακών υδάτων του ποταμού Ρήνου (Γερμανία) κατά μέσο όρο 892.777 σωματιδίων km^{-2} με μέγιστη συγκέντρωση 3,9 εκατομμύρια σωματίδια km^{-2} (Mani et al., 2015). Στα ιζήματα της όχθης του ποταμού, ο αριθμός των σωματιδίων κυμαινόταν από 228 έως 3.763 και 786 έως 1.368 σωματίδια kg^{-1} κατά μήκος των ποταμών Ρήνος και Μάιν (Γερμανία), αντίστοιχα (Klein et al., 2015). Υψηλές συγκεντρώσεις σε επιφανειακά ύδατα αναφέρονται και το φράγμα Three Gorges στην Κίνα (192–13.617 σωματίδια km^{-2}), οι οποίες οφείλονται στην έλλειψη εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων σε μικρότερες πόλεις, καθώς και σε θέματα ως προς την υποδομή κατά την ανακύκλωση και τη διάθεση αποβλήτων (Zhang et al., 2015). Αυτές οι μελέτες μπορεί να υποτιμήσουν τις πραγματικές συγκεντρώσεις των μικροπλαστικών, επειδή ο διαχωρισμός και η ταυτοποίησή τους βασίζονται σε μεθόδους οπτικής παρατήρησης (Reddy et al., 2006) και μπορεί να αποκλείσουν αυτές που βρίσκονται στο εύρος των μεγεθών του υπομικρού. Η περιβαλλοντική εμφάνιση και οι πηγές των μικροπλαστικών σε υποστρώματα γλυκού νερού σε αφρικανικά, ασιατικά και ευρωπαϊκά πλαίσια συζητούνται περαιτέρω από συγκεκριμένες έρευνες (Dris et al., 2017; Wu et al., 2017; Khan et al., 2017).

Συνολικά, οι περιβαλλοντικές εισροές σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές μπορεί να ποικίλουν ανάλογα με την κατά κεφαλήν κατανάλωση των πλαστικών, τα δημογραφικά στοιχεία του πληθυσμού και την ικανότητα των υποδομών να χειρίζονται τ' απορρίμματα.

Οι περιβαλλοντικές συγκεντρώσεις μπορεί να αλλάξουν μακροπρόθεσμα (είτε θετικά ή αρνητικά) λόγω της αστικοποίησης, της αύξησης του πληθυσμού και των τεχνολογικών εξελίξεων. Η καλύτερη κατανόηση της περιβαλλοντικής έκθεσης σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές προσδιορίζει εκείνες τις περιοχές όπου οι δράσεις και οι επιλογές μετριασμού είναι οι πιο αποτελεσματικές. Οι μελλοντικές εργασίες πρέπει να εστιάζουν στην καλύτερη κατανόηση της περιβαλλοντικής εξέλιξης και των οικολογικών επιπτώσεων των μικροπλαστικών. Μια τέτοια κατανόηση θα πρέπει να επιτρέψει την ανάπτυξη νέων προσεγγίσεων μοντελοποίησης για την αξιολόγηση της μεταφοράς των μικροπλαστικών στο έδαφος, τα ιζήματα και τη στήλη ύδατος. Λίγα είναι επίσης γνωστά για τις μακροπρόθεσμες, ήπιες επιδράσεις της έκθεσης σε μικροπλαστικά και σε ευαίσθητα σημεία (παραδείγματος χάριν οξειδωτικό στρες) που πρέπει να εντοπιστούν ως προς την εμφάνιση σωματιδίων, αλλά και χημικής τοξικότητας. Τέλος, παρόλο που η επιστήμη απέχει πολύ από την κατανόηση των οικολογικών επιπτώσεων των μικροπλαστικών στο γλυκό νερό, πρέπει να ληφθούν τεχνολογικές καινοτομίες, κοινωνικές δράσεις και πολιτικές παρεμβάσεις για τον μετριασμό της ρύπανσης από πλαστικά, η οποία - σε περίπτωση αδράνειας - σίγουρα θα αυξηθεί τα επόμενα χρόνια.

Βιβλιογραφία

- Ahn, K. C. (2008). In vitro biologic activities of the antimicrobials triclocarban, its analogs, and triclosan in bioassay screens: receptor-based bioassay screens. *Environ Health Perspect*, 116, σσ. 1203-1210.
- Alaee, M., Arias, P., Sjodin, A., & Bergman, A. (2003). An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/regions and possible modes of release. *Environ Int*, 29(6), σσ. 683-689.
- Anastasopoulou, A. (2013). Plastic debris ingested by deep-water fish of the Ionian Sea (Eastern Mediterranean). *Deep-Sea Res I Oceanogr Res Pap*, 74, σσ. 11-13.
- Arvidsson, R. (2012). Contributions to emissions, exposure and risk assessment of nanomaterials. Chalmers University of Technology.
- Baner, A. L., & Piringer, O. (2007). Preservation of quality through packaging. Στο Wiley-VCH Verlag GmbH, *Plastic packaging materials for food* (σσ. 1-8). Weinheim.
- Bartsch, W. M., Axler, R. P., & Host, G. E. (2015). Evaluating a Great Lakes scale landscape stressor index to assess water quality in the St. Louis River area of concern. *J Great Lakes Res*, 41(1), σσ. 99-110.
- Bejgarn, S., MacLeod, M., Bogdal, C., & Breitholtz, M. (2009). Toxicity of leachate from weathering plastics: an exploratory screening study with *Nitocra spinipes*. *Chemosphere*, 74(9), σσ. 1195-1200.
- Bern, L. (1990). Size-related discrimination of nutritive and inert particles by freshwater zoo-plankton. *J Plankton Res*, 12(5), σσ. 1059-1067.
- Besseling, E., Wegner, A., Foekema, E. M., van den Heuvel-Greve, M. J., & Koelmans, A. A. (2013). Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the Lugworm *Arenicola marina* (L.). *Environ Sci Technol*, 47(1), σσ. 593-600.

- Biginagwa, F. J., Mayoma, B. S., Shashoua, Y., Syberg, K., & Khan, F. R. (2016). First evidence of microplastics in the African Great Lakes: recovery from Lake Victoria Nile perch and Nile tilapia. *J Great Lakes Res*, 42(1), σσ. 146-149.
- Bilotta, G. S., & Brazier, R. E. (2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Res*, 42(12), σσ. 2849-2861.
- Bonefeld-Jørgensen, E. C. (2007). Endocrine-disrupting potential of bisphenol A, bisphenol A dimethacrylate, 4-n-nonylphenol, and 4-n-octylphenol in vitro: new data and a brief review. *Environ Health Perspect*, 115, σσ. 69-76.
- Booth, A. M., Hansen, B. H., Frenzel, M., Johnsen, H., & Altin, D. (2016). Uptake and toxicity of methyl-methacrylate-based nanoplastic particles in aquatic organisms. *Environ Toxicol Chem*, 35(7), σσ. 1641-1649.
- Boxall, A. B., Chaudhry, M. Q., Sinclair, C. J., Jones, A., Aitken, R., Jefferson, B., & Watts, C. (2007). Current and future predicted environmental exposure to engineered nanoparticles. Central Science Laboratory for the Department of Environment Food and Rural Affairs.
- Bradley, E. L., Driffield, M., Harmer, N., Oldring, P. K., & Castle, L. (2008). Identification of potential migrants in epoxy phenolic can coatings. *Int J Polym Anal Charact*, 13(3), σσ. 200-233.
- Bradley, L. E., Driffield, M., Guthrie, J., Harmer, N., Oldring, T. P., & Castle, L. (2009). Analytical approaches to identify potential migrants in polyester-polyurethane can coatings. *Food Addit Contam Part A*, 26(12), σσ. 1602-1610.
- Brandsch, J., & Piringer, O. (2008). Characteristics of plastic materials. Στο Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Plastic packaging (σσ. 15-61). Weinheim: KGaA.
- Brodhagen, M., Peyron, M., Miles, C., & Inglis, D. A. (2015). Biodegradable plastic agricultural mulches and key features of microbial degradation. *Appl Microbiol Biotechnol*, 99(3), σσ. 1039-1056.

- Browne, M. A. (2008). Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel *Mytilus edulis* (L.). *Environ Sci Technol*, 42, σσ. 5026-5031.
- California Environmental Protection Agency. (2014). Preproduction plastic debris program. Ανάκτηση από https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/stormwater/plasticdebris.shtml
- Carpenter, E. J., & Smith, K. L. (1972). Plastics on the Sargasso sea surface. *Science*, 175, σσ. 1240-1241.
- Carpenter, E., Anderson, S. J., Miklas, H. P., Peck, B. B., & Harvey, G. R. (1972). Polystyrene spherules in coastal waters. *Science*, 178(4062), σ. 749.
- Chalew, T. E., & Halden, R. U. (2009). Environmental exposure of aquatic and terrestrial biota to triclosan and triclocarban. *J Am Water Works Assoc*, 45, σσ. 4-13.
- Cierjacks, A., Behr, F., & Kowarik, I. (2012). Operational performance indicators for litter management at festivals in semi-natural landscapes. *Ecol Indic*, 13(1), σσ. 328-337.
- Colton, J. B., Knapp, F. D., & Burns, B. R. (1974). Plastic particles in surface waters of Northwestern Atlantic. *Science*, 185(4150), σσ. 491-497.
- Costa, L. G. (2008). Polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants: environmental contamination, human body burden and potential adverse health effects. *Acta Biomed*, 79, σσ. 172-183.
- Cozar, A. (2014). Plastic debris in the open ocean. *Proc Natl Acad Sci USA*, 111, σσ. 10239-10244.
- de Stephanis, R. (2013). As main meal for sperm whales: plastics debris. *Mar Pollut Bull*, 69, σσ. 206-214.
- Desai, M. P., Labhsetwar, V., Walter, E., Levy, R. J., & Amidon, G. L. (1997). The mechanism of uptake of biodegradable microparticles in Caco-2 cells is size dependent. *Pharm Res*, 14(11), σσ. 1568-1573.

- Descy, J. P., Higgins, H. W., Mackey, D. J., Hurley, J. P., & Frost, T. M. (2000). Pigment ratios and phytoplankton assessment in northern Wisconsin lakes. *Journal of Phycology*, 36(2), 274-286.
- Dris, R. (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment? *Mar Pollut Bull*, 104(1-2), σσ. 290-293.
- Dris, R., Gasperi, J., & Tassin, B. (2017). Sources and fate of microplastics in urban areas: a focus on Paris Megacity. Στο M. Wagner, & S. Lambert, *Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?* Heidelberg: Springer.
- Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. (2015). Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Res*, 75, σσ. 63-82.
- Eriksen, M. (2014). Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLoS One*, 9, σ. e111913.
- Farrell, P., & Nelson, K. (2013). Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). *Environ Pollut*, 177, σσ. 1-3.
- Farrell, P., & Nelson, K. (2013). Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* to *Carcinus maenas*. *Environ Pollut*, 177, σσ. 1-3.
- Fischer, H., Robl, I., Sumper, M., & Kröger, N. (1999). Targeting and covalent modification of cell wall and membrane proteins heterologously expressed in the diatom *Cylindrotheca fusiformis* (Bacillariophyceae). *Journal of Phycology*, 35(1), 113-120.
- Foss Hansen, S., Larsen, B. H., Olsen, S. I., & Baun, A. (2007). Categorization framework to aid hazard identification of nanomaterials. *Nanotoxicology*, 1(3), σσ. 243-250.
- Fromme, H. (2009). Perfluorinated compounds – exposure assessment for the general population in western countries. *Int J Hyg Environ Health*, 212, σσ. 239-270.

- Gauquie, J. (2015). A qualitative screening and quantitative measurement of organic contaminants on different types of marine plastic debris. *Chemosphere*, 138, σσ. 348-356.
- Gell, P. A., & Gasse, F. (1990, August). Relationships between salinity and diatom flora from some Australian saline lakes. In *Proceedings of the 11th international diatom symposium*'.(Ed. JP Kociolek) pp (pp. 631-647).
- GESAMP. (2015). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection Reports and studies.
- Giesy, J. P. (2001). Global biomonitoring of perfluorinated organics. *Sci World J*, 1, σσ. 627-629.
- Gottschalk, F., Sonderer, T., Scholz, R. W., & Nowack, B. (2009). Modeled environmental concentrations of engineered nanomaterials (TiO₂, ZnO, Ag, CNT, fullerenes) for different regions. *Environ Sci Technol*, 43(24), σσ. 9216-9222.
- Gregory, M. R. (1977). Plastic pellets on New-Zealand beaches. *Mar Pollut Bull*, 8(4), σσ. 82-84.
- Handy, R. D., Owen, R., & Valsami-Jones, E. (2008). The ecotoxicology of nanoparticles and nanomaterials: current status, knowledge gaps, challenges, and future needs. *Ecotoxicology*, 17(5), σσ. 315-325.
- Hansen, S. F. (2009). Regulation and risk assessment of nanomaterials – too little, too late? Technical University of Denmark.
- Hoek, C., Mann, D., Jahns, H. M., & Jahns, M. (1995). *Algae: an introduction to phycology*. Cambridge university press.
- John, D., Whitton, B., & Brook, A. (2002). The new British Freshwater Algal Flora. In *Freshwater Forum* (Vol. 18, pp. 46-48).
- Khan, F. R., Mayoma, B. S., Biginagwa, F. J., & Syberg, K. (2017). Microplastics in inland African waters: presence, sources and fate. Στο M. Wagner, & S. Lambert,

- Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants? Heidelberg: Springer.
- Kirk, J. T. (1994). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge university press.
- Klein, S., Dimzon, I. K., Eubeler, J., & Knepper, T. P. (2017). Analysis, occurrence, and degradation of microplastics in the aqueous environment. Στο M. Wagner, & S. Lambert, *Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?* Heidelberg: Springer.
- Klein, S., Worch, E., & Knepper, T. P. (2015). Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-main area in Germany. *Environ Sci Technol*, 49(10), σσ. 6070-6076.
- Klemchuk, P. P. (1990). Degradable plastics – a critical-review. *Polym Degrad Stab*, 27(2), σσ. 183-202.
- Kooi, M., Besseling, E., Kroeze, C., van Wezel, A. P., & Koelmans, A. A. (2017). Modeling the fate and transport of plastic debris in freshwaters: review and guidance. Στο M. Wagner, & S. Lambert, *Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?* Springer: Heidelberg.
- Kovarova, J., & Svobodova, Z. (2008). Perfluorinated compounds: occurrence and risk profile. *Neuroendocrinol Lett*, 29, σσ. 599-608.
- Kuhn, S. (2015). Deleterious effects of litter on marine life. Στο M. Bergmann, L. Gutow, & M. Klages, *Marine anthropogenic litter* (σσ. 75-116). New York: Springer.
- Kyrikou, I., & Briassoulis, D. (2007). Biodegradation of agricultural plastic films: a critical review. *J Polym Environ*, 15(2), σσ. 125-150.
- Lambert, S. (2013). *Environmental risk of polymers and their degradation products*. University of York.

- Lambert, S., Scherer, C., & Wagner, M. (2017). Ecotoxicity testing of microplastics: considering the heterogeneity of physico-chemical properties. *Integr Environ Assess Manage*, 13(3), σσ. 470-475.
- Lambert, S., Sinclair, C. J., & Boxall, A. B. (2014). Occurrence, degradation and effects of polymer-based materials in the environment. *Rev Environ Contam Toxicol*, 227, σσ. 1-53.
- Lambert, S., Sinclair, C. J., & Boxall, A. B. (2014). Occurrence, degradation and effects of polymer-based materials in the environment. *Rev Environ Contam Toxicol*, 227, σσ. 1-53.
- Lechner, A., Keckeis, H., Lumesberger-Loisl, F., Zens, B., Krusch, R., Tritthart, M., . . . Schludermann, E. (2014). The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river. *Environ Pollut*, 188, σσ. 177-181.
- Lin, C. K., & Blum, J. L. (1977). Recent invasion of a red alga (*Bangia atropurpurea*) in Lake Michigan. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 34(12), 2413-2416.
- Lithner, D., Nordensvan, I., & Dave, G. (2012). Comparative acute toxicity of leachates from plastic products made of polypropylene, polyethylene, PVC, acrylonitrile-butadiene-styrene, and epoxy to *Daphnia magna*. *Environ Sci Pollut Res*, 19(5), σσ. 1763-1772.
- Liu, E. K., He, W. Q., & Yan, C. R. (2014). 'White revolution' to 'white pollution' – agricultural plastic film mulch in China. *Environ Res Lett*, 9(9), σ. 091001.
- Long, M. (2015). Interactions between microplastics and phytoplankton aggregates: impact on their respective fates. *Mar Chem*, 175, σσ. 39-46.
- Mani, T., Hauk, A., Walter, U., & Burkhardt-Holm, P. (2015). Microplastics profile along the Rhine River. *Sci Rep*, 5, σ. 17988.
- Mato, Y. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environ Sci Technol*, 35, σσ. 318-324.

- Mattsson, K., Hansson, L. A., & Cedervall, T. (2015). Nano-plastics in the aquatic environment. *Environ Sci Process Impacts*, 17, σσ. 1712-1721.
- Mohan, S. R. (2016). Strategy and design of innovation policy road mapping for a waste biorefinery. *Bioresour Technol*, 215, σσ. 76-83.
- Moore, C. J. (2001). A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre. *Mar Pollut Bull*, 42, σσ. 1297-1300.
- Morris, R. J. (1980). Floating plastic debris in the Mediterranean. *Mar Pollut Bull*, 11, σ. 125.
- Muncke, J. (2009). Exposure to endocrine disrupting compounds via the food chain: is packaging a relevant source? *Sci Total Environ*, 407(16), σσ. 4549-4559.
- Murray, F., & Cowie, P. R. (2011). Plastic contamination in the decapod crustacean *Nephrops norvegicus* (Linnaeus, 1758). *Mar Pollut Bull*, 62(6), σσ. 1207-1217.
- Musee, N. (2011). Simulated environmental risk estimation of engineered nanomaterials: a case of cosmetics in Johannesburg City. *Hum Exp Toxicol*, 30(9), σσ. 1181-1195.
- Nowack, B., & Bucheli, T. D. (2007). Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. *Environ Pollut*, 150(1), σσ. 5-22.
- Ogonowski, M., Schur, C., Jarsen, A., & Gorokhova, E. (2016). The effects of natural and anthropogenic microparticles on individual Fitness in *Daphnia magna*. *PLoS One*, 11(5), σ. e0155063.
- Reddy, M. S., Basha, S., Adimurthy, S., & Ramachandraiah, G. (2006). Description of the small plastics fragments in marine sediments along the Alang-Sosiya ship-breaking yard, India. *Estuar Coast Shelf Sci*, 68(3-4), σσ. 656-660.
- Rillig, M. C. (2012). Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environ Sci Technol*, 46(12), σσ. 6453-6454.
- Rist, S. E., & Hartmann, N. B. (2017). Aquatic ecotoxicity of microplastics and nanoplastics - lessons learned from engineered nanomaterials. Στο M. Wagner, &

- S. Lambert, *Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?* Heidelberg: Springer.
- Rochman, C. M. (2013). Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Sci Rep*, 3, σ. 3263.
- Roes, L., Patel, M. K., Worrell, E., & Ludwig, C. (2012). Preliminary evaluation of risks related to waste incineration of polymer nanocomposites. *Sci Total Environ*, 417, σσ. 76-86.
- Rosenkranz, P., Chaudbury, Q., Stone, V., & Fernandes, T. F. (2009). A comparison of nanoparticle and fine particle uptake by *Daphnia magna*. *Environ Toxicol Chem*, 28(10), σσ. 2142-2149.
- Scherer, C., Weber, A., Lambert, S., & Wagner, M. (2017). Interactions of microplastics with freshwater biota. Στο M. Wagner, & S. Lambert, *Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?* Heidelberg: Springer Nature.
- Senjen, R., & Hansen, S. F. (2011). Towards a nanorisk appraisal framework. *C R Phys*, 12(7), σσ. 637-647.
- Setälä, O., Fleming-Lehtinen, V., & Lehtiniemi, M. (2014). Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environ Pollut*, 185, σσ. 77-83.
- Shaw, D. G., & Mapes, G. A. (1979). Surface circulation and the distribution of pelagic tar and plastic. *Mar Pollut Bull*, 10, σσ. 160-162.
- Shimanaga, M., & Yanagi, K. (2016). The Ryukyu trench may function as a “depocenter” for anthropogenic marine litter. *J Oceanogr*, 72(6), σσ. 895-903.
- Singh, B., & Sharma, N. (2008). Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer degradation and stability*, 93(3), 561-584.
- Song, Y. K. (2015). A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples. *Mar Pollut Bull*, 93, σσ. 202-209.

- Stevenson, K., Stallwood, B., & Hart, A. G. (2008). Tire rubber recycling and bioremediation: a review. *Biorem J*, 12(1), σσ. 1-11.
- Sussarellu, R. (2015). Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113, σσ. 2430-2435.
- Sutherland, W. J., Clout, M., Cote, I. M., Daszak, P., Depledge, M. H., Fellman, L., . . . Watkinson, A. R. (2010). A horizon scan of global conservation issues for 2010. *Trends Ecol Evol*, 25(1), σσ. 1-7.
- Syberg, K., Khan, F. R., Selck, H., Palmqvist, A., Banta, G. T., Daley, J., . . . Duhaime, M. B. (2015). Microplastics: addressing ecological risk through lessons learned. *Environ Toxicol Chem*, 34(5), σσ. 945-953.
- U.S. Congress. (2015). H.R. 1321 – Microbead-Free Waters Act of 2015. Ανάκτηση από <https://www.congress.gov/bill/114th-congress/house-bill/1321>
- U.S. EPA. (2016). Bisphenol A (BPA) action plan. Ανάκτηση από <https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/risk-management-bisphenol-bpa>
- van Sebille, E. (2015). A global inventory of small floating plastic debris. *Environ Res Lett*, 10, σ. 124006.
- Wagner, M., Scherer, C., Alvarez-Munoz, D., Brennholt, N., Bourrain, X., Buchinger, S., . . . Reifferscheid, G. (2014). Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. *Environ Sci Eur*, 26(1), σσ. 1-9.
- Waters, C. N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C., Barnosky, A. D., Poirier, C., Galuszka, A., . . . Wolfe, A. P. (2016). The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 351(6269), σ. aad2622.
- Wehr, J. D., & Sheath, R. G. 2003, *Freshwater algae of North America—Ecology and classification*.
- Wilber, R. (1987). Plastic in the North Atlantic. *Oceanus*, 30, σσ. 61-68.

- Wong, C. S. (1974). Quantitative tar and plastic waste distributions in the Pacific Ocean. *Nature*, 247, σσ. 30-32.
- Wright, S. L. (2013). Microplastic ingestion decreases energy reserves in marine worms. *Curr Biol*, 23, σσ. 1031-1033.
- Wu, C., Zhang, K., & Xiong, X. (2017). Microplastic pollution in inland waters focusing on Asia. Στο M. Wagner, & S. Lambert, *Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?* Heidelberg: Springer.
- Xu, G., Wang, Q. H., Gu, Q. B., Cao, Y. Z., Du, X. M., & Li, F. S. (2006). Contamination characteristics and degradation behavior of low-density polyethylene film residues in typical farmland soils of China. *J Environ Sci Health Part B*, 41(2), σσ. 189-199.
- Xu, J., Wang, P., Guo, W. F., Dong, J. X., Wang, L., & Dai, S. G. (2006). Seasonal and spatial distribution of nonylphenol in Lanzhou Reach of Yellow River in China. *Chemosphere*, 65(9), σσ. 1445-1451.
- Yogui, G. T., & Sericano, J. L. (2009). Polybrominated diphenyl ether flame retardants in the US marine environment: a review. *Environ Int*, 35, σσ. 655-666.
- Zbyszewski, M., & Corcoran, P. L. (2011). Distribution and degradation of fresh water plastic particles along the beaches of Lake Huron, Canada. *Water Air Soil Pollut*, 220(1-4), σσ. 365-372.
- Zhang, K., Gong, W., Lv, J., Xiong, X., & Wu, C. (2015). Accumulation of floating microplastics behind the three Gorges Dam. *Environ Pollut*, 204, σσ. 117-123.