



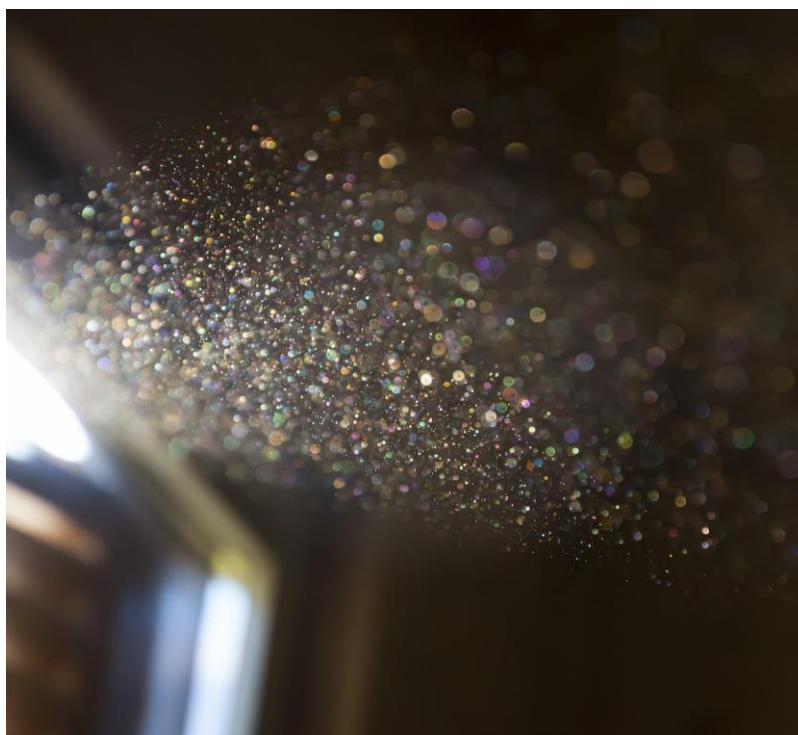
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΓΕΙΑ

“Μεταπτυχιακό στην Επαγγελματική και Περιβαλλοντική Υγεία”

2021-2022

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ»



Μεταπτυχιακή φοιτήτρια : Φωτεινή Ευθυμάκη

Αριθμός Μητρώου: mepy21039

Επιβλέπουσα: Δρ. Λευκοθέα Εβρένογλου, Αν. Καθηγήτρια

Αθήνα, Ιούνιος 2023



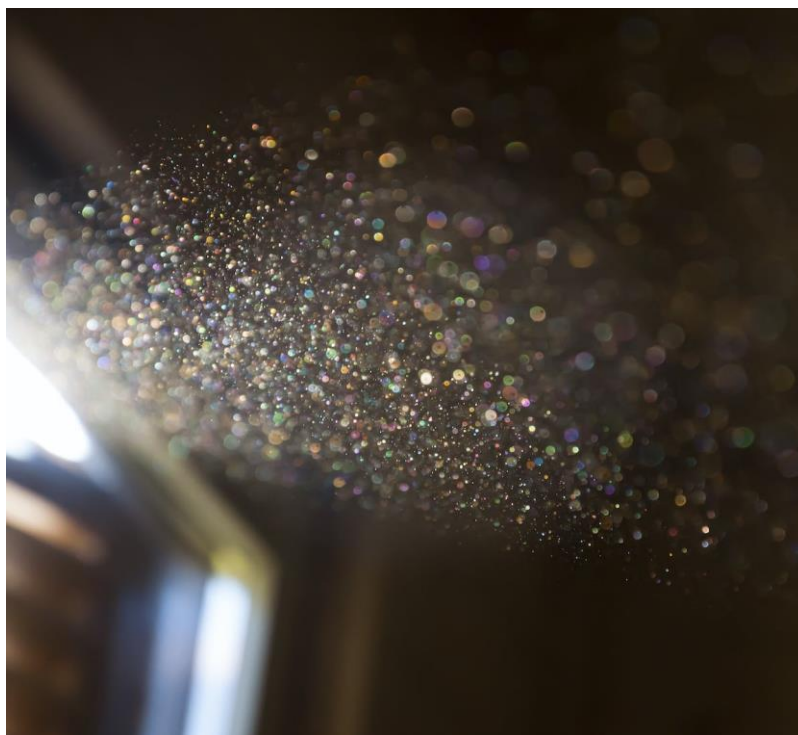
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΓΕΙΑ

“MSc In Occupational and Environmental Health”

2021-2022

DIPLOMA THESIS

“MICROPLASTICS IN THE ATMOSPHERE”



Student: Fotini Efthymaki , Registration Number : mepy 21039

Supervisor: Dr. Lefkothea Evrenoglou, Associate Professor

Athens, June 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΥΓΕΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΥΓΕΙΑ

«ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ»

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του
Εισηγητή**

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική
Επιτροπή:

| α/α | ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ | ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ | ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ |
|-----|---------------------|----------------------------|------------------|
| 1 | ΕΒΡΕΝΟΓΛΟΥ ΛΕΥΚΟΘΕΑ | ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ | |
| 2 | ΚΑΒΟΥΡΑ ΟΛΓΑ | ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ | |
| 3 | ΔΑΜΙΚΟΥΚΑ ΙΩΑΝΝΑ | ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ | |

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη **Φωτεινή Ευθυμάκη του Σταύρου**, με αριθμό μητρώου **μερy 21039**, φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Επαγγελματική και Περιβαλλοντική Υγεία του Τμήματος Πολιτικών Δημόσιας Υγείας της Σχολής Δημόσιας Υγείας του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια, την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου.»

Η Δηλούσα
Φωτεινή Ευθυμάκη



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής για αυτό το γνωστικό ταξίδι και τους καθηγητές μου για τη συνεισφορά τους σε αυτό.

Επιπλέον το σύζυγο και τα παιδιά μου για την υπομονή που έδειξαν τις ώρες που απουσίαζα για τα μαθήματα και όσες χρειάστηκαν για το διάβασμα και τις εργασίες.

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| Περίληψη | VIII |
| Abstract | IX |
| Πίνακας εικόνων | X |
| Συντομεύσεις | XI |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 1 |
| 1.1. Πηγές και προέλευση | 4 |
| 1.2. Μέθοδοι Ανίχνευσης Μικροπλαστικών στην Ατμόσφαιρα | 6 |
| 1.2.1. Συλλογή δειγμάτων..... | 8 |
| 1.2.2. Παθητική ατμοσφαιρική εναπόθεση..... | 11 |
| 1.2.3. Ενεργοί αντλούμενοι δειγματολήπτες | 12 |
| 1.2.4. Η προετοιμασία των δειγμάτων | 13 |
| 1.3. Αναγνώριση μικροπλαστικών | 14 |
| 1.3.1. Οπτική παρατήρηση..... | 14 |
| 1.3.2. Υπέρυθρος μετασχηματισμός Fourier (FTIR)..... | 15 |
| 1.3.3. Φασματοσκοπία Raman | 16 |
| 1.3.4. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης..... | 17 |
| 1.4. Αέρια χρωματογραφία πυρόλυσης-φασματομετρία μάζας | 17 |
| 1.5. Η εναπόθεση των μικροπλαστικών της ατμόσφαιρας..... | 18 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ | 22 |
| 2.1. Πληθυσμός | 22 |
| 2.2. Ανθρώπινη δραστηριότητα | 23 |
| 2.3. Μετεωρολογικοί παράγοντες..... | 27 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ... | 33 |
| 3.1. Υδάτινο περιβάλλον | 33 |
| 3.2. Ατμόσφαιρα | 36 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ | 39 |
| 4.1. Επιδράσεις σωματιδίων : φλεγμονή και δευτερογενής τοξικότητα | 41 |
| 4.2. Χημικές αντιδράσεις | 41 |
| 4.2.1. Συναφείς προσμίξεις..... | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.2. Οικιακοί ρύποι..... | 42 |
| 4.3. Ασθένειες που προκαλούνται από μικροπλαστικά που αερομεταφέρονται | 42 |
| 4.4. Μηχανισμοί τοξικότητας..... | 42 |
| 4.5. Ατμοσφαιρική ρύπανση και καρκίνος | 43 |
| 4.6. Τοξικές επιδράσεις στον άνθρωπο | 44 |
| 4.6.1. Κυτταροτοξικότητα και οξειδωτικό στρες..... | 45 |
| 4.6.2. Νευροτοξικότητα..... | 46 |
| 4.7. Τα μικροπλαστικά σε συνδυασμό με άλλους ρύπους | 46 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΖΗΤΗΣΗ | 48 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 51 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 56 |

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συσσώρευση πλαστικών απορριμμάτων, λόγω της υπερπαραγωγής αυτών αλλά και της μη σωστής απόρριψής τους, ασκεί ιδιαίτερη πίεση στο περιβάλλον. Τα πλαστικά αυτά διασπώνται δημιουργώντας μικροπλαστικά (MPs), που αποτελούν πλέον σοβαρή απειλή για τον πλανήτη. Στα μικροπλαστικά κατατάσσονται όλα τα πλαστικά σωματίδια με διαμέτρους από 5 χιλιοστά έως 100 νανόμετρα και δημιουργούνται από την σταδιακή αποσύνθεση των πλαστικών που καταναλώνει ο άνθρωπος. Τα μικροπλαστικά σωματίδια έχουν ένα τέτοιο μέγεθος που είναι αρκετό για να εισχωρήσουν και να κατακαθίσουν στους αεραγωγούς του αναπνευστικού συστήματος και στη συνέχεια να εισέλθουν στον ανθρώπινο οργανισμό, προκαλώντας διάφορες επιπτώσεις οι οποίες θα αναπτυχθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Πλαστικά σωματίδια με πολύ μικρό μέγεθος μπαίνουν απευθείας από το αναπνευστικό σύστημα και από εκεί (δια μέσο του κυκλοφορικού συστήματος) μπορούν να προσβάλουν διάφορα όργανα ζωτικής σημασίας. Μετά από δειγματοληπτική διαδικασία έχει βρεθεί ότι δεν είναι δυνατόν να αναγνωριστεί η σύστασή τους. Επίσης, λόγω του μικρού μεγέθους, παραμένουν σε αιώρηση για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα προκαλώντας σοβαρές επιπτώσεις στο ευρύτερο περιβάλλον.

Αυτή η εργασία αποσκοπεί στην έρευνα της εμφάνισης, της κατανομής και των πιθανών πηγών των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα. Μέσω μιας εκτενούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης η έρευνα παρέχει πληροφορίες για τους μηχανισμούς μεταφοράς και εναπόθεσης των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, η εργασία εξετάζει τους πιθανούς κινδύνους που προκαλούνται από τα εναέρια μικροπλαστικά για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

Λέξεις κλειδιά: μικροπλαστικά, ατμόσφαιρα, περιβάλλον, δημόσια υγεία

ABSTRACT

The accumulation of plastic waste, due to their overproduction and improper disposal, exerts significant pressure on the environment. These plastics breaks down into microplastics (MPs), which now pose a serious threat to the planet. Microplastics include all plastic particles ranging in size from 5 millimeters to 100 nanometers and are created through the gradual decomposition of consumed plastics. These tiny particles are small enough to penetrate and settle in the respiratory airways and subsequently enter the human body, causing various effects that will be explored in this dissertation. Microplastic particles with such small dimensions cannot be easily identified through sampling procedures. Furthermore, due to their small size, they remain suspended for very long period of time, causing severe impacts on the broader environment.

This thesis aims to investigate the occurrence, distribution, and potential sources of microplastics in the atmosphere. Through literature review the research provides insights into the atmospheric transport mechanisms and deposition patterns of microplastics. Furthermore, the thesis explores the potential risks posed by airborne microplastics to human health and the environment.

Keywords: microplastics, environment, atmosphere, public health

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|---|----|
| Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση του κύκλου των ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών | 18 |
| Εικόνα 2: Απεικόνιση την επαναιώρησης, μεταφοράς και σάρωσης των μικροπλαστικών.. | 26 |
| Εικόνα 3: Απεικόνιση των εναέριων μέσων μεταφοράς των MPs μέσω υγρής και ξηρής εναπόθεσης..... | 36 |
| Εικόνα 4: Πιθανοί κίνδυνοι των MPs στον άνθρωπο..... | 44 |

ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

MPs Μικροπλαστικά

NPs Νανοπλαστικά

PA Πολυαμίδιο

PE Πολυαιθυλένιο

PP Πολυπροπυλένιο

PET Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο

PS Πολυστυρόλιο

PVC Πολυβινυλοχλωρίδιο

PC Πολυανθρακικά

PA Πολυαμίδια

PUR Πολυουρεθάνη

UV Υπεριώδης ακτινοβολία

POD Τοξικολογικό σημείο εκκίνησης

MOE Περιθώριο έκθεσης

POP Ανθεκτικοί οργανικοί ρύποι

AChE Η δραστηριότητα της ακετυλοχολινεστεράσης των ερυθροκυττάρων

PAHs Πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες

PCBs Πολυχλωριωμένα διφαινύλια

BPA Δισφαινόλη Α

PVC Πολυβινυλοχλωρίδιο

PBDEs Πολυβρωμιωμένοι διφαινυλαιθέρες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως πλαστικά ορίζονται τα συνθετικά πολυμερή που συνήθως παρασκευάζονται με πολυμερισμό μονομερών που προέρχονται από λάδι ή αέριο με την προσθήκη διαφορετικών χημικών προσθέτων (Thompson et al, 2009). Είναι ένα από τα πιο καθολικά χρησιμοποιούμενα και πολλαπλών χρήσεων υλικά παγκοσμίως λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους όπως η ευελιξία, το μικρό βάρος, η αντοχή, η ανθεκτικότητα, η αντίσταση στη διάβρωση, η υψηλή θερμική και ηλεκτρική μόνωση (Thompson et al., 2009; Halden et al., 2010). Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση της παραγωγής των πλαστικών στους 360 εκατομμύρια τόνους ετησίως τα τελευταία 70 χρόνια.

Η χρηστική αξία του πλαστικού είναι τεράστια. Χρησιμοποιείται σε μια μυριάδα καταναλωτικών και δομικών προϊόντων, ιδίως στη συσκευασία, την κατασκευή και την αυτοκινητοβιομηχανία. Τα πολυμερή που αναπτύσσονται κυρίως είναι πολυπροπυλένιο (19,4%), πολυαιθυλένιο (χαμηλή (17,4%) και υψηλή (12,4%) πυκνότητα), πολυβινυλοχλωρίδιο (10%), πολυουρεθάνη (7,9%) και τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (7,9%). Αυτά τα πολυμερή δεν είναι βιοαποδομήσιμα, επομένως συσσωρεύονται σε χώρους υγειονομικής ταφής ή στο φυσικό περιβάλλον (Barnes et al., 2009).

Η εκτεταμένη χρήση πλαστικού διευκολύνει τη σύγχρονη ζωή όμως έχει οδηγήσει σε σοβαρή ρύπανση σε περιβάλλοντα του πλανήτη (Barnes et al., 2009). Πάνω από τρία εκατομμύρια τόνων πλαστικό παράγεται ετησίως και μεγάλο μέρος τους καταλήγει σε απόβλητα (PlasticsEurope, 2018).

Η ρύπανση από μικροπλαστικά προκαλεί ανησυχία παγκοσμίως και πολλές μελέτες επικεντρώνονται στις συγκεντρώσεις των μικροπλαστικών στο οικοσύστημα. Αν και έχουν γίνει πολλές μελέτες με διαφορετικές μεθόδους για την εύρεση μικροπλαστικών, δεν έχει τεκμηριωθεί κάποια τυπική μέθοδος και είναι δύσκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Μέθοδοι ανίχνευσης θα αναλυθούν παρακάτω.

Σε συνδυασμό με φυσικοχημικούς παράγοντες όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, οι καιρικές συνθήκες, η μικροβιακή δράση και η τριβή πραγματοποιείται διάσπαση του πλαστικού και αποδόμηση σε σωματίδια μικρότερα των 5mm τα οποία ορίζονται σαν μικροπλαστικά (Thomson et al.,2004; Yan et al.,2019).

Υπάρχει περίπτωση να προέρχονται και από σωματίδια όπως μικροσφαιρίδια από καλλυντικά και οδοντόκρεμα (Auta et al., 2017). Μόλις απελευθερωθούν στο περιβάλλον, τα πλαστικά διαβρώνονται, διασπώνται δηλαδή προοδευτικά σε μικρότερα θραύσματα με την πάροδο του χρόνου. Επιπρόσθετα η συσσώρευση πλαστικών απορριμμάτων ασκεί πίεση στο περιβάλλον. Η ρύπανση από μικροπλαστικά (MPs) έχει γίνει μια παγκόσμια

πρόκληση λόγω της υπερεκμετάλλευσης πλαστικών προϊόντων και της μη συστηματικής απόρριψης πλαστικών απορριμμάτων.

Ο όρος «μικροπλαστικό» επινοήθηκε για πρώτη φορά το 2004 για να περιγράψει μικρά πλαστικά σωματίδια (από χιλιοστά έως σωματίδια μεγέθους μικρότερου του χιλιοστού) (Thompson et al., 2004), αλλά μόλις το 2008 ορίστηκαν από την Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (The National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA) ως πλαστικά σωματίδια μικρότερα από 5 mm (www.MarineDebris.noaa.gov). Ένας πιο πρόσφατος ορισμός τοποθετεί το κατώτερο όριο του εύρους μεγέθους ως 1 μm (Hartmann et al., 2019) ενώ άλλοι συγγραφείς έχουν ορίσει τα μικροπλαστικά (MPs) ως σωματίδια με διάμετρο < 10 mm (Graham et al., 2009), μεταξύ 2 και 6 mm, < 2 mm ή < 1 mm (Claessens et al., 2011). Ωστόσο, δεν υπάρχει ακόμη ένας καθολικά αποδεκτός ορισμός του σχετικού εύρους μεγέθους των σωματιδίων.

Τα μικροπλαστικά έχουν ανιχνευτεί παντού στο περιβάλλον, ιδιαίτερα στο υδάτινο όπως ωκεανοί αλλά και στην ατμόσφαιρα και στο χερσαίο κι έχουν εντοπιστεί και σε αρκετούς υδρόβιους οργανισμούς (Rezania et al., 2018; De Souza Machado et al., 2018).

Η ανησυχία για την ατμοσφαιρική ρύπανση από πλαστικά έχει προκαλέσει μεγάλη ανησυχία καθώς πιθανά απειλεί την ανθρώπινη υγεία λόγω του ότι δεν φαίνονται και εισπνέονται απευθείας (Gasperi et al., 2018; Prata J.C., 2018).

Οι μετρήσεις για αερομεταφερόμενα πλαστικά έχουν πραγματοποιηθεί σε λίγες πόλεις όπως το Πεκίνο, το Λονδίνο, το Παρίσι η Ντονγκουάν και η Σαγκάη (Chen et al., 2020; Wright et al., 2020).

Σε Σαγκάη και Ντονγκουάν οι μετρήσεις αντίστοιχα έδειξαν « $1,42 \pm 1,42$ n/m³ και 36 ± 7 n/m³/ημέρα», και φάνηκε ότι τα μικροπλαστικά αποτελούν πιθανή πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Κύρια πηγή των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα είναι τα υφάσματα από συνθετικό υλικό που παράγονται και χρησιμοποιούνται καθημερινά απελευθερώνοντας μικροΐνες (Di and Wang, 2018; Liu et al., 2019).

Στην αύξηση των μικροπλαστικών επιπλέον συμβάλλουν η αποτέφρωση των απορριμμάτων, βιομηχανικές εκπομπές, υλικά οικοδομών, διάβρωση προϊόντων, τα καυσαέρια και η σκόνη που αναρτάται εκ νέου (Chen et al., 2020; Li et al., 2020).

Επιπλέον η αυξανόμενη συγκέντρωση αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών είναι συνδεδεμένη με ανθρωπογενείς δραστηριότητες, μετεωρολογικές συνθήκες όπως άνεμος και βροχοπτώσεις και την πυκνότητα του πληθυσμού (Liu et al., 2019).

Σύμφωνα με έρευνες τα μικροπλαστικά μεταφέρονται μακριά και μπορούν να επηρεάσουν και απομακρυσμένες περιοχές (Allen et al, 2019). Λόγω του μικρού μεγέθους εισπνέονται από τους ανθρώπους και η συσσώρευσή τους στους ιστούς ενδέχεται να προκαλέσουν δυσμενείς επιπτώσεις όπως οξειδωτικό στρες, φλεγμονές, χαμηλούς ρυθμούς ανάπτυξης και προβλήματα αναπαραγωγής (Peng et al., 2017; Wright et al., 2013).

Η συσσώρευση πλαστικών απορριμμάτων ασκεί πίεση στο περιβάλλον. Η ρύπανση από μικροπλαστικά (MPs) έχει γίνει μια παγκόσμια πρόκληση λόγω της κατάχρησης πλαστικών προϊόντων και της μη συστηματικής διαχείρισης πλαστικών απορριμμάτων.

Οι αρχικές μελέτες για τα MPs και τις επιπτώσεις τους είχαν περιοριστεί σε υδάτινα και χερσαία οικοσυστήματα, αλλά πρόσφατες έρευνες επικεντρώνονται επίσης σε MPs στον αέρα, όπως και η παρούσα εργασία. Οι επιπτώσεις τους στην ποιότητα του αέρα των πόλεων και στην ατμοσφαιρική μεταφορά σε παρθένους οικοτόπους αποτελούν αιτίες σοβαρής ανησυχίας. Ωστόσο, η έκταση και η σημασία των επιπτώσεων των MPs των αιωρούμενων σωματιδίων (PM) στην ανθρώπινη υγεία δεν είναι σαφώς κατανοητές. Επιπλέον, η επίδραση των αερομεταφερόμενων MPs στην ποιότητα του αέρα εσωτερικού και εξωτερικού χώρου παραμένει άγνωστη.

Τα MPs έχουν εντοπιστεί όχι μόνο στο νερό και το έδαφος, αλλά και στον αέρα και αποτελούν μια υποτιμημένη, αλλά πιθανή πηγή έκθεσης μέσω του αναπνευστικού συστήματος και του στόματος στον άνθρωπο. Τα αερολύματα ομίχλης/νερού στον αέρα, που μπορεί επίσης να είναι μια πιθανή πηγή, αλλά η συνεισφορά τους ως πηγή ρύπανσης της ατμόσφαιρας δεν έχει εκτιμηθεί πλήρως.

Τα αερομεταφερόμενα MPs (ίνες, θραύσματα, νήματα) που έχουν εντοπιστεί μέχρι στιγμής σε όλο τον κόσμο κυμαίνονται από 2 μm έως 1 mm, με τη βισκόζη και το PA, το πολυαιθυλένιο (PE), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS), το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), η πολυουρεθάνη (PUR) και το πολυακρυλονιτρίλιο (PAN) να είναι τα κυρίαρχα πολυμερή. Επιπλέον, μελέτες επιβεβαιώνουν ότι τα πλαστικά που εμπλέκονται σε εφαρμογές συσκευασίας όπως το πολυστυρένιο (PS), το πολυαιθυλένιο (PE), το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και το βιοθενίδιο (μια εμπορική βιοδιασπώμενη μάρκα) αλλοιώνονται και δημιουργούν MPs πολύ πιο γρήγορα στον αέρα παρά στο νερό. Ως εκ τούτου, ο κίνδυνος έκθεσης σε αερομεταφερόμενα MPs είναι πολύ υψηλός για τους βιομηχανικούς εργάτες (κυρίως βιομηχανίες πολυμερών, συσκευασιών, κοπιδιών, κλωστοϋφαντουργίας), αλλά η αποτελεσματικότητα της προσωπικής προστασίας που είναι διαθέσιμη για αυτούς είναι αβέβαιη.

Τα μικροπλαστικά είναι μια αναδυόμενη ανησυχία παγκοσμίως (PlasticsEurope, 2018; Zeng, 2018). Ο κοινός ορισμός των μικροπλαστικών είναι ένα πλαστικό σωματίδιο μεγέθους 5 mm έως 100 nm (Thompson et al., 2004). Ένας πιο πρόσφατος ορισμός των μικροπλαστικών ακολουθεί τη λογική διαφοροποίηση κατά μήκος της τυπικής διεθνούς ονοματολογίας μονάδων (μονάδες SI) των μικροπλαστικών = 5 mm – 1 μm (Hartmann et al., 2019). Λόγω της εξελισσόμενης έρευνας για τα πλαστικά σωματίδια, τα νανοπλαστικά προκαλούν επίσης ιδιαίτερη ανησυχία επειδή αναμένεται να είναι πανταχού παρόντα με τα ομόλογά τους (Bergman et al., 2015; Hartmann et al., 2019).

Η εκτεταμένη εφαρμογή του πλαστικού έχει φέρει μεγάλη ευκολία στη σύγχρονη ζωή, αλλά έχει επίσης οδηγήσει σε σοβαρή πλαστική ρύπανση σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Περισσότεροι από 3 εκατομμύρια τόνοι πλαστικού παράγονται κάθε χρόνο, και μεγάλο μέρος αυτών θα γίνει πλαστικό απόβλητο. Η πλαστική ρύπανση έχει γίνει μια αυξανόμενη ανησυχία. Υπό την επίδραση φυσικών και χημικών παραγόντων όπως η μηχανική τριβή, οι καιρικές συνθήκες, η υπεριώδης ακτινοβολία και η μικροβιακή δράση, το πλαστικό θα διασπαστεί ή θα αποικοδομηθεί σε μικρά πλαστικά σωματίδια. Τα σωματίδια <5 mm ορίζονται ως μικροπλαστικά (MPs). Τα μικροπλαστικά μπορούν επίσης να προέρχονται από σωματίδια που κατασκευάζονται αρχικά σε μικρά μεγέθη, όπως τα μικροσφαιρίδια από οδοντόκρεμα και καλλυντικά. Δημοσιευμένες ερευνητικές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην παρακολούθηση των μικροπλαστικών σε οικοσυστήματα, ιδιαίτερα σε ωκεανούς, ποτάμια, λίμνες, χερσαία και ατμοσφαιρικά περιβάλλοντα.

Αποτελέσματα ερευνών έδειξαν ότι τα μικροπλαστικά είναι πανταχού παρόντα στο περιβάλλον και βρίσκονται ακόμη και σε υδρόβιους οργανισμούς. Επειδή τα μικροπλαστικά στην ατμόσφαιρα μπορούν να εισπνευστούν απευθείας, μπορεί να αποτελέσουν πιθανή απειλή για την ανθρώπινη υγεία, η οποία έχει προσελκύσει παγκόσμια ανησυχία. Ωστόσο, οι γνώσεις σχετικά με τη μικροπλαστική ρύπανση στην ατμόσφαιρα είναι περιορισμένες.

Τα νανοπλαστικά συνήθως κατηγοριοποιούνται ως πλαστικά σωματίδια μικρότερα από 1 μm, κάτι που αποτελεί επίσης σημαντική προτεραιότητα όσον αφορά την ασφάλεια των θαλασσινών καθώς και την ενίσχυση της μεταφοράς ρύπων στο περιβάλλον και τους πιθανούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία (Bank and Hansson, 2019; Hartmann et al., 2019; Zeng, 2018). Ωστόσο, τα περιβαλλοντικά νανοπλαστικά δεν έχουν ακόμη ποσοτικοποιηθεί ευρέως.

1.1. Πηγές και προέλευση

Οι πηγές των μικροπλαστικών είναι ποικίλες και ταξινομούνται ως πρωτογενείς από άμεση απελευθέρωση μικροσωματιδίων ή σκονών και χρησιμοποιούνται σε προϊόντα υγιεινής και σαν πρώτες ύλες στη βιομηχανία

και τα δευτερογενή που προκύπτουν από μεγαλύτερα πλαστικά λόγω τριβής, φθοράς και κατάτμησης (Cole et al., 2011).

Σε έρευνες που πραγματοποιήθηκαν η ταυτοποίηση των πολυμερών οδήγησε στις πηγές των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα. Οι χημικές τους συνθέσεις αποτελούνταν κυρίως από πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο, πολυστυρένιο και τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο. Το πολυαιθυλένιο προέρχεται από υλικά όπως οι σακούλες και χρησιμοποιείται λόγω της χαμηλής του πυκνότητας (PlasticsEurope, 2018).

Το πολυστυρένιο που έχει θερμομονωτικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιείται κυρίως στις μεταποιητικές βιομηχανίες. Το πολυπροπυλένιο και το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο χρησιμοποιούνται κυρίως στην παραγωγή υφασμάτων. Φαίνεται πως την βασική πηγή αερομεταφερομένων μικροπλαστικών αποτελούν τα υφάσματα από συνθετικά υλικά (Allen et al., 2019).

Το 2016 αυξήθηκε 6% η παραγωγή κλωστούφαντουργικών προϊόντων και η παραγωγή συνθετικών υφασμάτων ξεπέρασε τα 60 εκατομμύρια τόνους. Οι συνθετικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως γιατί είναι ανθεκτικές με ευχάριστη αίσθηση στο άγγιγμα (Gasperi et al., 2018; Liu et al., 2019).

Οι ίνες απελευθερώνονται κατά τη χρήση, το πλύσιμο και στέγνωμα των ρούχων με αναφορά στις 1900 ίνες σε μία πλύση. Μεγάλες ποσότητες απελευθερώνονται και κατά την κοπή και επεξεργασία των υφασμάτων στις βιομηχανίες (Browne et al., 2011).

Εκτός από τις βιομηχανικές εκπομπές άλλες πηγές μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα αποτελούν τα στερεά απορρίμματα, η αποτέφρωση απορριμμάτων, η αποδόμηση των μεγάλων πλαστικών συσκευασιών, μικροσωματίδια που απελευθερώνονται λόγω μετακινήσεων στο δρόμο, επαναιώρηση της σκόνης και η μετακίνηση του ανέμου. Τα πλαστικά απορρίμματα και τα συνθετικά υφάσματα που απορρίπτονται σε «ΧΥΤΑ (Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων)» αποδομούνται σε μικροπλαστικά λόγω τριβής και έκθεσης σε UV ακτινοβολία (Dris et al., 2016).

Η μετακίνηση των οχημάτων ειδικότερα σε κέντρα πόλεων με κίνηση οδηγεί σε παραγωγή μικροπλαστικών από την επαναιώρηση της σκόνης των δρόμων αλλά και της τριβής των ελαστικών (Klein and Fischer, 2019).

Οι μετακινήσεις του ανέμου φαίνεται να είναι η αιτία που εντοπίζονται μικροπλαστικά στον αέρα απομακρυσμένων και αραιοκατοικημένων περιοχών. Σύμφωνα με τον Allen et al. (2019) ανιχνεύτηκαν μικροπλαστικά στα Πυρηναία Όρη τα οποία είναι δύσκολα προσβάσιμα στον άνθρωπο όπου συμπεραίνεται η μετακίνηση μικροπλαστικών σε μεγάλες αποστάσεις μέσω της ατμόσφαιρας.

1.2. Μέθοδοι Ανίχνευσης Μικροπλαστικών στην Ατμόσφαιρα

Τα μικροπλαστικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως πρωτογενή ή δευτερεύοντα πλαστικά. Τα πρωτογενή μικροπλαστικά είναι σκόπιμα κατασκευασμένα μικροπλαστικά σωματίδια για συγκεκριμένες εφαρμογές (για παράδειγμα μικροσφαιρίδια). Τα δευτερεύοντα μικροπλαστικά δημιουργούνται από τον κατακερματισμό και την αποικοδόμηση των μακροπλαστικών, συμπεριλαμβανομένων των ινών από συνθετικά υφάσματα (Zeng, 2018). Μια τέτοια διάκριση έχει πιθανή σημασία για τη μελέτη της ατμοσφαιρικής μεταφοράς λόγω της διαφοράς στο σχήμα που μπορεί να επηρεάσει την αεροδυναμική της και επομένως την ατμοσφαιρική μεταφορά. Υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι τα μικροπλαστικά εισέρχονται στο περιβάλλον σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός πλαστικού προϊόντος - από τους παραγωγούς έως τη διαχείριση απορριμμάτων, με δυνατότητα μεταφοράς τροφικών και έκθεσης στην ανθρώπινη υγεία (Bank and Hansson, 2019).

Τα μικροπλαστικά έχουν βρεθεί σε αρκετά διαφορετικά μέσα, από εδάφη έως υδάτινα συστήματα (π.χ. ωκεανούς, ποτάμια, ακτές και βάλτους) και στο πεπτικό σύστημα τόσο των σπονδυλωτών όσο και των ασπόνδυλων (Auta et al., 2017; Li et al., 2018; Prata et al., 2019). Η πλειοψηφία των ερευνών μέχρι σήμερα έχει επικεντρωθεί στο θαλάσσιο περιβάλλον. Ωστόσο, δίνεται όλο και μεγαλύτερη προσοχή σε άλλα περιβαλλοντικά τμήματα. Η ατμόσφαιρα είναι μια σημαντική οδός μέσω της οποίας πολλά αιωρούμενα υλικά μεταφέρονται σε περιφερειακό ή παγκόσμιο επίπεδο. (Bank and Hansson, 2019).

Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι τα ατμοσφαιρικά μικροπλαστικά σωματίδια μπορούν να μεταφερθούν στον αέρα της επιφάνειας των ωκεανών και ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές (Allen et al., 2019; Klein and Fischer, 2019; Liu et al., 2019). Η ατμόσφαιρα περιλαμβάνει είδη διεργασιών, π.χ. η ταχύτητα και οι κατευθύνσεις του ανέμου, τα ρεύματα πάνω/κάτω, η ανύψωση μεταφοράς και οι αναταράξεις. Ως εκ τούτου, θεωρούνται ως σημαντικοί φορείς που επηρεάζουν τη μεταφορά μικροπλαστικών και οι οποίοι επηρεάζουν περαιτέρω τον μηχανισμό ροής και τη δυναμική πηγής-βύθισης της πλαστικής ρύπανσης τόσο σε θαλάσσιο όσο και σε χερσαίο περιβάλλον (Bank and Hansson, 2019; Liu et al., 2019; Zhang et al., 2019). Επί του παρόντος, λόγω της εισπνοής και του συνδυασμού τους με άλλους ρύπους (υδράργυρος ή PAH), τα μικροπλαστικά πιστεύεται ότι αποτελούν αναδυόμενο συστατικό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Gasperi et al., 2018; Liu et al., 2019; Wright et al., 2020).

Σε σύγκριση με την πληθώρα των μελετών μικροπλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον και τον αυξανόμενο αριθμό μελετών σε χερσαία περιβάλλοντα (Auta et al., 2017; Prata et al., 2019), η έρευνα για τα μικροπλαστικά της ατμόσφαιρας έχει μόλις πρόσφατα κερδίσει την προσοχή των ερευνητών.

Μέχρι σήμερα, πολύ λίγες μελέτες έχουν διεξαχθεί για την ανίχνευση μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα. Η πλειονότητα των μελετών που έχουν δημοσιευτεί μέχρι στιγμής επικεντρώνεται στην ατμοσφαιρική εναπόθεση, μια παθητική συλλογή εναποτιθέμενου υλικού σε μια επιλεγμένη τοποθεσία.

Αρκετές μελέτες ήταν διαχρονικές (που εκτείνονται σε πολλές εποχές έως και 12 μήνες) (Dris, 2016; Klein and Fischer, 2019), αλλά δεν έχει ακόμη πραγματοποιηθεί εκτεταμένη ή μακροπρόθεσμη παρακολούθηση και μια παγκόσμια προοπτική της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από μικροπλαστικά.

Μέχρι σήμερα, έρευνα για την ανίχνευση αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών έχει πραγματοποιηθεί μόνο σε λίγες πόλεις και περιοχές, όπως το Παρίσι, το Λονδίνο, το Αμβούργο, η κομητεία Asaluyeh, η Καλιφόρνια, το Dongguan, η Σαγκάη, το Πεκίνο και τα Γαλλικά Πυρηναία. Για παράδειγμα, η μόλυνση από μικροπλαστικά στην ατμόσφαιρα ήταν $1,42 \pm 1,42 \text{ n/m}^3$ και $36 \pm 7 \text{ n/m}^2/\text{ημέρα}$ στη Σαγκάη και στο Dongguan, αντίστοιχα. Αυτές οι μελέτες έδειξαν ότι τα μικροπλαστικά έχουν γίνει μια πιθανή πηγή μόλυνσης στην ατμόσφαιρα. Το κύριο σχήμα των ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών είναι ινώδες, επειδή τα συνθετικά υφάσματα είναι η κύρια πηγή ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών.

Μεγάλες ποσότητες μικροϊνών απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα κατά την παραγωγή και την καθημερινή χρήση των υφασμάτων. Επιπλέον, η τριβή ή η διάβρωση πλαστικών προϊόντων, οικοδομικών υλικών, αποτέφρωσης απορριμμάτων, βιομηχανικών εκπομπών, καυσαερίων και επαναιώρησης σκόνης συμβάλλουν επίσης στην αύξηση των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα. Η συγκέντρωση των αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών συνδέεται πιθανότατα με ανθρωπογενείς δραστηριότητες, πυκνότητα πληθυσμού, επίπεδα εκβιομηχάνισης και μετεωρολογικές συνθήκες όπως βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις και άνεμος.

Επίσης τα μικροπλαστικά μπορούν να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις και να επηρεάσουν απομακρυσμένες περιοχές μέσω της ατμοσφαιρικής μεταφοράς. Λόγω των μικρότερων μεγεθών τους, τα μικροπλαστικά στον αέρα θα μπορούσαν να εισπνευστούν από τον άνθρωπο. Η συσσώρευση μικροπλαστικών στους ιστούς μπορεί να προκαλέσει μια σειρά από δυσμενείς επιπτώσεις σε έναν οργανισμό, συμπεριλαμβανομένου του οξειδωτικού στρες, του παθολογικού στρες, της φλεγμονής, των μειωμένων ρυθμών ανάπτυξης και της αναπαραγωγικής τοξικότητας. Εκτός από την τοξικότητα των σωματιδίων των μικροπλαστικών, τα πρόσθετα, οι χρωστικές και οι προσροφημένοι τοξικοί ρύποι και μικροοργανισμοί θα μπορούσαν επίσης να θέτουν κινδύνους για την υγεία (Dris et al., 2017).

Για να κατανοηθεί καλύτερα η αφθονία των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα και την απειλή τους για την υγεία των οργανισμών, πολλές μελλοντικές μελέτες θα πρέπει να επικεντρωθούν στον ποσοτικό προσδιορισμό και την ταυτοποίηση των μικροπλαστικών σε όλο τον κόσμο.

Η πλήρης μικροπλαστική ανάλυση περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια: δειγματοληψία, προετοιμασία, ταυτοποίηση και περαιτέρω ανάλυση. Ωστόσο, ένα σύνολο τυποποιημένων πρωτοκόλλων λειτουργίας δεν έχει ακόμη καθιερωθεί για τη συλλογή δειγμάτων και την επακόλουθη ανάλυση. Οι ποικίλες πειραματικές μέθοδοι επηρεάζουν τη σύγκριση και την ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων από διαφορετικές μελέτες για μικροπλαστικά. Μέχρι πρόσφατα, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνταν για την ανίχνευση μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα ήταν περιορισμένες, ιδιαίτερα στη διαδικασία δειγματοληψίας. Αυτό το ζήτημα επηρεάζει περαιτέρω έρευνα παρακολούθησης μικροπλαστικών αερομεταφερόμενων. Ως εκ τούτου, απαιτούνται ολοκληρωμένες και τυποποιημένες δειγματοληψίες και μέθοδοι ανάλυσης για μικροπλαστικά στην ατμόσφαιρα (Dris et al., 2017).

Ο στόχος αυτής της ανασκόπησης είναι να παρουσιάσει την τρέχουσα γνώση σχετικά με κοινές προσεγγίσεις για την αναγνώριση και ποσοτικοποίηση των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα. Συζητούνται επίσης οι περιορισμοί, ο ποιοτικός έλεγχος και η διασφάλιση ποιότητας αυτών των μεθοδολογιών. Αυτή η ανασκόπηση θα παρέχει καλύτερη κατανόηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται σήμερα και θα συμβάλει στη μελλοντική έρευνα για την ανίχνευση μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα.

1.2.1. Συλλογή δειγμάτων

Η πλειονότητα της δημοσιευμένης έρευνας ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών μέχρι σήμερα έχει πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας έναν παθητικό συλλέκτη (ολική εναπόθεση), που περιγράφεται στις μεθοδολογίες που δημοσιεύθηκαν από τους Allen et al. (2019), Cai et al. (2017), Dris et al. (2017) και Klein and Fischer (2019).

Οι πρώτες μελέτες χρησιμοποιούσαν μη τυποποιημένο εξοπλισμό συλλογής, συλλέγοντας μια σειρά υγρών ή/και ξηρών εναποθέσεων για διαφορετικές περιόδους και ποσότητες βροχοπτώσεων. Ωστόσο, οι πρόσφατες πρόοδοι στην παθητική δειγματοληψία της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης έχουν οδηγήσει σε ένα τυποποιημένο σύστημα μετάλλου/γυαλιού που σχεδιάστηκε από το NILU (Νορβηγικό Ινστιτούτο Έρευνας για τον Αέρα). Αυτό το σύστημα παρέχει μια τυποποιημένη μέθοδο χωρίς πλαστικό για παθητική ατμοσφαιρική εναπόθεση, η οποία είναι ιδανική για την έρευνα των μικροπλαστικών.

Τα πλεονεκτήματα των δειγματοληπτών ολικής ή μαζικής εναπόθεσης είναι η ευκολία χρήσης, η τυποποίηση της μεθοδολογίας και η μη απαίτηση παροχής ρεύματος στον χώρο μελέτης. Η εφαρμογή αυτής της τυποποιημένης μεθόδου δειγματοληψίας επιτρέπει τη διεξαγωγή μελετών σε απομακρυσμένες τοποθεσίες με ελάχιστη υποδομή με πολύ χαμηλό κόστος αλλά με ένα τυπικό πρωτόκολλο συλλογής. Ένας άλλος λόγος για τη χρήση ενός τυποποιημένου δειγματολήπτη είναι ότι ο όγκος του φυσήματος (σωματίδια που ανυψώνουν

τον άνεμο έξω από τη χοάνη συλλογής πριν από την παγίδευση) είναι ένας γνωστός όγκος που επιτρέπει τη σύγκριση με άλλο αποτιθέμενο υλικό επιπρόσθετα με άλλες πλαστικές μελέτες.

Η μέθοδος δειγματοληψίας επηρεάζει την ανίχνευση των συγκεντρώσεων μικροπλαστικών στον αέρα. Επί του παρόντος, υπάρχουν δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη δειγματοληψία αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών: παθητική ατμοσφαιρική εναπόθεση και ενεργοί αντλούμενοι δειγματολήπτες.

Η δειγματοληψία σκόνης εξωτερικών και εσωτερικών χώρων έχει ληφθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους δειγματοληψίας, όπως π.χ. σάρωση, δειγματοληψία κενού και ενεργή άντληση, η οποία μπορεί να προκαλέσει δυσκολία στη σύγκριση δεδομένων. Οι Liu et al. (2019) συνέλεξαν την εναπόθεση σκόνης σε εσωτερικούς χώρους χρησιμοποιώντας βούρτσες από τρίχες χοίρου και μεταφέρθηκε σε σακούλες δειγμάτων όσο το δυνατόν πληρέστερα (άγνωστη ποσότητα υλικού που συγκρατήθηκε στη βούρτσα). Ενώ αυτή η μέθοδος μπορεί να αναπαραχθεί εύκολα, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η σχετική ποσότητα του αέρα που λήφθηκε ή εάν τα μικροπλαστικά που συλλέχτηκαν ήταν αποκλειστικά από ατμοσφαιρική εναπόθεση. Οι Abbasi et al. (2017) ερεύνησαν τη σκόνη εξωτερικού περιβάλλοντος για βαρέα μέταλλα, μικροπλαστικά και ορυκτολογικά, συλλέγοντας δείγματα χρησιμοποιώντας ένα δοχείο συλλογής και βούρτσα.

Ομοίως, οι Dehghani et al. (2017) συνέλεξαν σκόνη δρόμου για μικροπλαστική ανάλυση χρησιμοποιώντας αντιστατική ξύλινη βούρτσα. Αυτή η μελέτη ήταν προσεκτική ώστε να σημειώσει τις μετεωρολογικές συνθήκες πριν και κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας, επιλέγοντας χρόνους δειγματοληψίας με συγκεκριμένες περιόδους ξηρασίας που προηγούνται των χρονικών περιόδων δειγματοληψίας για να προσπαθήσει να παράσχει μια ένδειξη της διάρκειας της ξηρής εναπόθεσης. Αυτό είναι χρήσιμο σε περαιτέρω συγκριτική ανάλυση της εναπόθεσης μικροπλαστικών. Ωστόσο, είναι δύσκολο να συγκριθούν άμεσα αυτά τα ευρήματα με πραγματικούς συλλέκτες ατμοσφαιρικής εναπόθεσης (όπως ο συλλέκτης NILU), καθώς η ποσότητα του υπολειμματικού μικροπλαστικού που απομένει στην επιφάνεια του δείγματος είναι άγνωστη.

Οι ενεργοί αντλούμενοι δειγματολήπτες, η αποτελεσματική μέθοδος δειγματοληψίας ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών, χρησιμοποιούνται με επιτυχία στη δειγματοληψία γνωστών όγκων αέρα σε καθορισμένες περιόδους σε επιλεγμένες τοποθεσίες. Αυτή είναι μια εξαιρετικά αποτελεσματική μέθοδος συλλογής δειγμάτων που ακολουθεί ένα τυπικό πρωτόκολλο συλλογής, μπορεί να συσχετιστεί με συγκεκριμένες μετεωρολογικές συνθήκες τοποθεσίας και γνωστές συνθήκες χερσαίας/ωκεάνιας επιφάνειας. Η δειγματοληψία ενεργού αντλούμενου αέρα είναι μια καθιερωμένη μέθοδος για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (μικροπλαστικά και άλλοι καθιερωμένοι ατμοσφαιρικοί ρύποι), που

χρησιμοποιείται την τελευταία δεκαετία και περισσότερο για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής χημείας όπως ο υδράργυρος, ο μόλυβδος, ο άνθρακας και τα μικρόβια (Dommergue et al., 2019). Οι Dris et al. (2017) χρησιμοποίησαν μια μεθοδολογία δειγματοληψίας με αντλία ενεργού αέρα για να επιτρέψει τη δειγματοληψία (φιλτράρισμα) ενός γνωστού όγκου αέρα εσωτερικού χώρου. Αυτό παρέχει μια πρόοδο στην τυποποίηση του πρωτοκόλλου δειγματοληψίας και, ενώ είναι πιο εντατικό σε πόρους δειγματοληψίας (απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας και εξοπλισμού), είναι εξαιρετικά αναπαραγόμενο.

Σε συνδυασμό με τους Dris et al. (2017), οι Liu et al. (2019) χρησιμοποίησαν ενεργούς δειγματολήπτες τοποθετημένους σε στέγες, αντλώντας $100 \pm 0,1$ L/min, για τη δειγματοληψία μικροπλαστικού περιεχομένου μάζας αέρα της πόλης της Σαγκάης και σε μια περαιτέρω μελέτη για τη δειγματοληψία μικροπλαστικού αέρα ωκεανού σε ένα θαλάσσιο ταξίδι στη Θάλασσα της Κίνας (Μελέτη Νήσων Σαγκάη-Μαριάνα) (Liu et al., 2019).

Οι δειγματολήπτες παθητικής ατμοσφαιρικής εναπόθεσης παρέχουν μια συγκεκριμένη ένδειξη τοποθεσίας και χρόνου της ποσότητας μικροπλαστικού που πέφτει στην επιφάνεια (π.χ. αστικό οδόστρωμα, αγροτικό πεδίο ή απομακρυσμένη κορυφή βουνού). Τα δείγματα ενεργού αντλούμενου αέρα δίνουν ένδειξη της ποσότητας μικροπλαστικών στη μάζα του αέρα που μπορεί να μην εναποτίθεται. Ως αποτέλεσμα, συνιστάται η χρήση παθητικών δειγματοληπτών για τη συλλογή της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης (υγρή ή/και ξηρή) σε συνδυασμό με δειγματοληψία ενεργού αντλούμενου αέρα για να αποκτήσετε μια πλήρη εικόνα του περιεχομένου MPs αέρα (Liu et al., 2019).

Για να διασφαλιστεί η εγκυρότητα, η αυστηρότητα και η μελλοντική συγκριτική ικανότητα όλων των δημοσιευμένων ερευνών για τα μικροπλαστικά, είναι ζωτικής σημασίας να δηλωθούν με σαφήνεια τα ακόλουθα σε όλες τις επιτόπιες και εργαστηριακές μελέτες: τον τύπο του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία μικροπλαστικών, τη διάρκεια και τις ημερομηνίες όλων των δειγματοληψιών (που αντιπροσωπεύουν τη χρονική περίοδο), τη χωρική θέση των δειγμάτων (θέση και υψόμετρο). Αυτές οι πληροφορίες, σε συνδυασμό με τους αναλυτικούς περιορισμούς του εξοπλισμού (π.χ. ο περιορισμός στο μέγεθος των σωματιδίων, ο τύπος σωματιδίων) θα διασφαλίσουν ότι τα ερευνητικά ευρήματα μπορούν να συγκριθούν με άλλες, διεθνείς, μικροπλαστικές μελέτες. Επιπλέον, η χρήση πολλαπλών μεθόδων δειγματοληψίας σε μία τοποθεσία (δηλαδή αντλία αέρα + δειγματολήπτης ξηρής/υγρής εναπόθεσης) θα παρέχει μικροπλαστικά δείγματα αντιπροσωπευτικά τόσο της μάζας του αέρα όσο και της εναπόθεσης και θα επιτρέψει τον ποσοτικό προσδιορισμό της μελλοντικής σάρωσης (δηλαδή με βροχοπτώσεις).

1.2.2. Παθητική ατμοσφαιρική εναπόθεση

Τα σωματίδια, συμπεριλαμβανομένων των μικροπλαστικών που αιωρούνται στον αέρα, μπορούν να καθιζάνουν στην επιφάνεια της γης λόγω της βαρύτητας και λόγω καιρικών συνθηκών, όπως ο άνεμος ή η βροχόπτωση. Επομένως, το επίπεδο μικροπλαστικού στη συνολική ατμοσφαιρική πτώση (υγρή και ξηρή εναπόθεση) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της μικροπλαστικής ρύπανσης στον αέρα. Η ολική ατμοσφαιρική εναπόθεση μπορεί να λαμβάνεται συνεχώς χρησιμοποιώντας έναν παθητικό συλλέκτη.

Το υπόλειμμα συλλέγεται μέσω μιας χοάνης από ανοξείδωτο χάλυβα ή γυαλί και αποθηκεύεται σε μια γυάλινη φιάλη τοποθετημένη στο κάτω μέρος της χοάνης. Τα γυάλινα μπουκάλια είναι αρκετά μεγάλα για να συλλέγουν το νερό της βροχής. Η συσκευή διαθέτει επίσης ένα σταθερό στήριγμα, όπως κουτί και βραχίονα.

Οι Dris et al. (2015, 2016) χρησιμοποίησαν ένα αδιαφανές κουτί για την υποστήριξη και την προστασία της συσκευής δειγματοληψίας. Το σύστημα παθητικής δειγματοληψίας είναι μια ιδανική μέθοδος για τη δειγματοληψία ατμοσφαιρικής εναπόθεσης μικροπλαστικών, λόγω της ευκολίας χρήσης και λήψης δείγματος. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για δειγματοληψία σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς πρόσβαση σε ρεύμα ή για μακροχρόνια συνεχή συλλογή, όπως εβδομαδιαία ή μηνιαία. Επίσης, δεν υπάρχει διακοπή στη συλλογή της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης από τους χώρους δειγματοληψίας. Αυτή η συσκευή τοποθετείται σε μη προστατευμένη θέση δειγματοληψίας, όπως η οροφή του κτιρίου. Κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης, οι καιρικές συνθήκες θα πρέπει να καταγράφονται για επακόλουθη ανάλυση συσχέτισης μεταξύ του καιρού και της εναπόθεσης μικροπλαστικών. Μετά από κάθε συλλογή, τα δείγματα σε κάθε γυάλινη φιάλη μεταφέρονται προσεκτικά και αποθηκεύονται, χωριστά. Το χωνί και το μπουκάλι ξεπλένονται με απεσταγμένο νερό για να ανακτηθούν όλα τα σωματίδια. Όλα τα δείγματα καλύπτονται για την αποφυγή μόλυνσης και αποθηκεύονται μέχρι το επόμενο στάδιο επεξεργασίας. Η καθίζηση μικροπλαστικών σωματιδίων από την ατμόσφαιρα αναφέρεται ως ο αριθμός των αντικειμένων ανά τετραγωνικό μέτρο ανά ημέρα.

Ως εργαλεία συλλογής μικροπλαστικών σωματιδίων τόσο από το εξωτερικό όσο και από το εσωτερικό περιβάλλον χρησιμοποιούνται συνήθως ηλεκτρικές σκούπες και βούρτσες. Τα δείγματα σκουπίζονται με ηλεκτρική σκούπα ή σκουπίζονται και στη συνέχεια μεταφέρονται σε σάκους δειγμάτων για περαιτέρω προετοιμασία. Στη μελέτη των Dris et al. (2017) χρησιμοποιήθηκε μια ηλεκτρική σκούπα για τη συλλογή δειγμάτων σκόνης σε δύο διαμερίσματα στο Παρίσι. Οι Abbasi et al. (2019) διερεύνησαν τη σκόνη του δρόμου για εναπόθεση μικροπλαστικών με μεταλλικά τηγάνια και ξύλινες βούρτσες. Ωστόσο, επειδή η πηγή των μικροπλαστικών στη σκόνη δεν είναι αποκλειστικά από την ατμοσφαιρική εναπόθεση, αυτά τα αποτελέσματα δεν

είναι συγκρίσιμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο ως συμπλήρωμα των αποτελεσμάτων της εναπόθεσης μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα.

1.2.3. Ενεργοί αντλούμενοι δειγματολήπτες

Ορισμένα όργανα άντλησης χρησιμοποιούνται ευρέως στη μελέτη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, όπως η μόλυνση από PM₁₀ και PM_{2,5} (σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρο <10 μm και <2,5 μm, αντίστοιχα). Τα μικροπλαστικά είναι ένα υποσύνολο σωματιδίων και επομένως αυτές οι μέθοδοι, σε συνδυασμό με την επεξεργασία δειγμάτων που επιτρέπει την αναγνώριση μικροπλαστικών, έχουν αναπτυχθεί για χρήση με μικροπλαστικά. Το σύστημα ενεργού αντλούμενου δειγματολήπτη περιλαμβάνει μια μονάδα αντλίας και έναν αντικαταστάσιμο σωλήνα ή άλλες συσκευές με φίλτρα. Οι Abbasi et al. (2019) χρησιμοποίησαν έναν εναλλάκτη φίλτρου με σωλήνα εισαγωγής για τη συλλογή αιωρούμενων σωματιδίων και οι Liu et al. (2019) τοποθέτησαν φίλτρα Whatman GF/A σε διαχωριστές από κράμα αλουμινίου στην κορυφή της εισόδου για δειγματοληψία. Ο ρυθμός ροής εισαγωγής της αντλίας μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις διαφορετικών μελετών. Στη μελέτη των Dris et al. (2017), χρησιμοποιήθηκε μια αντλία για τη δειγματοληψία εσωτερικού αέρα στα 8 L/min για 4-7 ώρες στο ύψος αναπνοής ενός ενήλικα και συνολικά δειγματοληψία 5-20 m³ όγκων εξωτερικού αέρα για 10-40 ώρες. Ένας ρυθμός ροής 100 L/min εφαρμόστηκε για πάνω από 1 ώρα για τη διερεύνηση της αφθονίας των ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών σε διαφορετικά ύψη (1,7 μ, 33 μ και 80 μ) στη Σαγκάη. Σε σύγκριση με την παθητική μέθοδο δειγματοληψίας, αυτή είναι μια εξαιρετικά αποδοτική προσέγγιση, αλλά η ηλεκτρική ισχύς είναι απαραίτητη για τη μέθοδο ενεργητικής άντλησης. Το πλεονέκτημα της ενεργητικής μεθόδου δειγματοληψίας είναι ότι μπορεί να συλλέξει γρήγορα ατμοσφαιρικά μικροπλαστικά σωματίδια στον εξωτερικό ή τον εσωτερικό αέρα. Επιπλέον, η συσκευή δειγματοληψίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του αριθμού των μικροπλαστικών που εισπνέονται από τον άνθρωπο κάθε μέρα όταν οι δειγματοληψίες διεξάγονται σε ύψος αναπνοής και στο μέσο ρυθμό αναπνοής ενός ενήλικα. Κατά τη διάρκεια της περιόδου δειγματοληψίας, το σύστημα άντλησης λειτουργεί συνεχώς και οι καιρικές συνθήκες πρέπει επίσης να καταγράφονται ταυτόχρονα. Μετά τη δειγματοληψία, τα σωματίδια μεταφέρονται προσεκτικά και αποθηκεύονται γρήγορα για το επόμενο στάδιο επεξεργασίας. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο δειγματοληψίας, η ποσότητα μικροπλαστικών μπορεί να εκφραστεί ως ο αριθμός των στοιχείων ανά κυβικό μέτρο.

Μια καλά σχεδιασμένη στρατηγική δειγματοληψίας και κατάλληλα εργαλεία δειγματοληψίας αποτελούν τη βάση τέτοιων μελετών μικροπλαστικών, επειδή διάφοροι παράγοντες θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Η ρύπανση μικροπλαστικών στην ατμοσφαιρική σε μια περιοχή συσχετίζεται στενά με τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, την πυκνότητα του πληθυσμού

και το βαθμό εκβιομηχάνισης. Για παράδειγμα, η συγκέντρωση των αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών σε ένα αστικό περιβάλλον στο Παρίσι είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή σε μια προάστια τοποθεσία και οι υψηλότερες συγκεντρώσεις μικροπλαστικών στον αέρα βρέθηκαν στο χώρο ενός σχολείου στο Dongguan. Επιπλέον, οι συγκεντρώσεις των αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών μειώνονται με την αύξηση του ύψους πάνω από το έδαφος. Η αφθονία των μικροπλαστικών στα 1,7 μέτρα ήταν μεγαλύτερη από αυτή στα 80 μέτρα πάνω από το έδαφος στη Σαγκάη. Η ατμοσφαιρική μικροπλαστική ρύπανση ποικίλλει επίσης εποχιακά ή με ξηρές/υγρές περιόδους. Επιπλέον, οι καιρικές συνθήκες όπως οι βροχοπτώσεις, οι χιονοπτώσεις και τα φαινόμενα ανέμου, έχουν αντίκτυπο στις συγκεντρώσεις και την εναπόθεση μικροπλαστικών στον αέρα στις τοποθεσίες δειγματοληψίας και στη συνέχεια επηρεάζουν τη συλλογή των δειγμάτων. Κατά τη διαδικασία δειγματοληψίας, οι καιρικές συνθήκες θα πρέπει να καταγράφονται για να αποκαλυφθεί η συσχέτιση μεταξύ της αφθονίας των μικροπλαστικών στον αέρα και των μετεωρολογικών γεγονότων. Επομένως, η θέση, το ύψος, η περίοδος, ο καιρός και οι μέθοδοι δειγματοληψίας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν ξεκινήσει η διαδικασία δειγματοληψίας με βάση τις απαιτήσεις της μελέτης όταν υιοθετείται είτε η παθητική ατμοσφαιρική εναπόθεση είτε η ενεργή δειγματοληψία (Dris et al, 2017).

1.2.4. Η προετοιμασία των δειγμάτων

Αν και δεν έχουν καθιερωθεί τυποποιημένες μέθοδοι για την προετοιμασία του δείγματος, δύο διαδικασίες έχουν εφαρμοστεί σε πολλαπλές μελέτες αξιολόγησης μικροπλαστικών σε διάφορα περιβάλλοντα.

Αρχικά, τα οργανικά υλικά που έχουν προσροφηθεί στην επιφάνεια των μικροπλαστικών αφαιρούνται, κάτι που είναι απαραίτητο για τον επακόλουθο διαχωρισμό, ταυτοποίηση και χαρακτηρισμό. Αρκετά οξειδωτικά (H_2O_2), οξέα (HNO_3 , HCl), αλκάλια (KOH , $NaOH$) και ένζυμα έχουν χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση της οργανικής ύλης. Μέχρι σήμερα, τα μικροπλαστικά σωματίδια από την ατμόσφαιρα έχουν υποστεί επεξεργασία με διάλυμα υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) ή υποχλωριώδους νατρίου ($NaClO$) για οργανική απομάκρυνση. Τυπικά, τα δείγματα υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με διάλυμα 30% υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) σε θερμοκρασία δωματίου για την απομάκρυνση της οργανικής ύλης. Στο έργο των Klein et al. (2019), 6–14% $NaClO$ σε αναλογία όγκου 0,15:1 υιοθετήθηκε για 24 ώρες κάτω από απαγωγέα καπνού για να διαλυθεί η βιολογική ύλη. Επιπλέον, το αντιδραστήριο Fenton (ένα μείγμα H_2O_2 και ιόντος σιδήρου, Fe^{2+}) προτάθηκε ως μεθοδολογία βελτίωσης για την απομόνωση μικροπλαστικών από δείγματα. Σε σύγκριση με το H_2O_2 , το Fenton ήταν πιο αποτελεσματικό στην πέψη της οργανικής ύλης και μπορεί να γίνει μια δημοφιλής μέθοδος για τη διάλυση της οργανικής ύλης σε μελλοντικές μελέτες μικροπλαστικών. Σε

ορισμένες περιπτώσεις, τα δείγματα χρειάστηκαν να υποβληθούν σε επεξεργασία καθαρισμού για 5 λεπτά με υπερήχους σε ένα καθαρό γυάλινο ποτήρι γεμάτο με αρκετό απεσταγμένο νερό ή καθαρή αιθανόλη για την απομάκρυνση του υλικού που είχε προσροφηθεί στην επιφάνεια των μικροπλαστικών.

Μετά την απομάκρυνση της οργανικής ύλης, τα μικροπλαστικά πρέπει να διαχωριστούν από τα σωματίδια του ατμοσφαιρικού δείγματος. Ο διαχωρισμός πυκνότητας είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την απομόνωση μικροπλαστικών από περιβαλλοντικά δείγματα. Στο εργαστήριο, διαλύματα χλωριούχου ψευδαργύρου με πυκνότητα 1,6–1,7 g/cm³ χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό μικροπλαστικών δειγμάτων, η οποία θεωρείται η πιο αποτελεσματική μέθοδος για τον διαχωρισμό πολλαπλών μικροπλαστικών σωματιδίων. Εκτός από το ZnCl₂, διαλύματα χλωριούχου νατρίου (1,2 g/cm³), ιωδιούχου νατρίου (1,8 g/cm³) ή άλλων διαλυμάτων αλάτων έχουν εφαρμοστεί σε μελέτες που διερευνούν μικροπλαστικά που συλλέγονται από άλλα περιβάλλοντα. Κατά τη διαδικασία διαχωρισμού, το διάλυμα του μείγματος αναδεύεται ελαφρά για να αποτραπεί η προσρόφηση των μικρών σωματιδίων ή της σκόνης πάνω στα μικροπλαστικά πριν από την εναπόθεση. Για τη βελτίωση της απόδοσης της εκχύλισης και την ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης, προτείνεται η ανακύκλωση των διαλυμάτων αλατιού και η επανάληψη της διαδικασίας εκχύλισης. Μετά τον διαχωρισμό, τα σωματίδια ξηραίνονται και αποθηκεύονται για περαιτέρω ανάλυση (Dris et al., 2017).

1.3. Αναγνώριση μικροπλαστικών

Μετά τη δειγματοληψία και τον καθαρισμό, τα μικροπλαστικά στα δείγματα απαιτούν ταυτοποίηση. Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση μικροπλαστικών στο υδάτινο και χερσαίο περιβάλλον μπορούν επίσης να υιοθετηθούν για την αναγνώριση μικροπλαστικών που μεταφέρονται στον αέρα. Γενικά, η ταυτοποίηση αποτελείται από τη μορφολογική ανάλυση (αφθονία, μέγεθος, σχήμα και χρώμα) και τη χημική ανάλυση (σύσταση πολυμερών).

1.3.1. Οπτική παρατήρηση

Η απλούστερη και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος αναγνώρισης είναι η οπτική επιθεώρηση. Ο χαρακτηρισμός των μικροπλαστικών σωματιδίων, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους, του σχήματος και του χρώματος, παρατηρείται και ταξινομείται με τη βοήθεια ειδικών μικροσκοπίων όπως τα στερεομικροσκόπια. Ορισμένα προγράμματα λογισμικού χρησιμοποιούνται για ανάλυση εικόνας και ποσοτικοποίηση της αφθονίας. Για παράδειγμα, στο λογισμικό Histolab και DinoCapture χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών στο Παρίσι και στο Dongguan, αντίστοιχα.

Για να αποφευχθεί ο υψηλός κίνδυνος εσφαλμένης αναγνώρισης, συνιστώνται διάφορα κριτήρια κατά την οπτική αναγνώριση μικροπλαστικών με στερεομικροσκόπιο (είναι μια τεχνική που δημιουργεί την ψευδαίσθηση του βάθους σε μια εικόνα): δεν υπάρχουν ορατές οργανικές ή κυτταρικές δομές στα μικροπλαστικά, οι ίνες πρέπει να έχουν το ίδιο πάχος σε όλο το μήκος. Το χρώμα των μικροπλαστικών πρέπει να είναι ευδιάκριτο και ομοιογενές και τα διαφανή ή λευκά σωματίδια θα πρέπει να επιβεβαιώνονται χρησιμοποιώντας μικροσκόπια υψηλής ανάλυσης ή άλλες μεθόδους. Η μέθοδος οπτικής αναγνώρισης είναι κατάλληλη για την ταχεία μέτρηση μεγάλου αριθμού μικροπλαστικών.

Ωστόσο, υπάρχουν πολλά μειονεκτήματα στη χρήση της οπτικής επιθεώρησης. Τα ινώδη είναι πιο εύκολο να αναγνωριστούν από άλλα σχήματα και τα χρωματιστά σωματίδια είναι πιο εύκολο να αναγνωριστούν από τα λευκά και διαφανή σωματίδια. Δεδομένου ότι τα στερεομικροσκόπια δεν μπορούν να διακρίνουν με ακρίβεια μεταξύ φυσικών και συνθετικών σωματιδίων, συνιστάται η χρήση τόσο της μικροσκοπίας όσο και άλλων αναλυτικών μεθόδων για την αναγνώριση των δειγμάτων-στόχων. Επιπλέον, τα αποτελέσματα επηρεάζονται έντονα από την υποκειμενικότητα και τη φροντίδα του εξεταστή, την ποιότητα του μικροσκοπίου και τα σχήματα, τα χρώματα και τα μεγέθη των σωματιδίων, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της αφθονίας των μικροπλαστικών. Για μικροπλαστικά σωματίδια <math><500\ \mu\text{m}</math>, η οπτική αναγνώριση δεν εφαρμόζεται πάντα. Καθώς τα μικροπλαστικά μειώνονται σε μέγεθος, η αφθονία αυξάνεται πολύ και η ακρίβεια της ταυτοποίησης μειώνεται, γεγονός που έχει δημιουργήσει σημαντικές προκλήσεις στην αναγνώριση μικροπλαστικών. Ως εκ τούτου, απαιτούνται πιο αξιόπιστες μέθοδοι, τεχνολογίες και όργανα για περαιτέρω ανάλυση και αναγνώριση μικροπλαστικών, ιδιαίτερα για τα μικρότερα σωματίδια. (Chen et al, 2020)

1.3.2. Υπέρυθρος μετασχηματισμός Fourier (FTIR)

Η φασματοσκοπία υπέρυθρων μετασχηματισμού Fourier (FTIR) είναι η πιο κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της πολυμερικής σύνθεσης των μικροπλαστικών. Η φασματοσκοπία FTIR μπορεί να παρέχει μοναδικά φάσματα για κάθε δείγμα. Διαφορετικά δείγματα έχουν διαφορετικές συνθέσεις, με αποτέλεσμα διαφορετικές φασματικές εικόνες. Συγκρίνοντας το φάσμα των σωματιδίων-στόχων με αυτά των γνωστών υλικών σε βιβλιοθήκες, μπορεί να εντοπιστεί άμεσα ο τύπος του πολυμερούς που συνθέτει τα μικροπλαστικά. Σε σύγκριση με την οπτική ανάλυση, το FTIR μπορεί να αναλύσει σωματίδια με μικρό μέγεθος και τα αποτελέσματα της ταυτοποίησης είναι πιο αξιόπιστα. Για παράδειγμα, η φασματοσκοπία micro-FTIR (micro-FTIR) είναι μια ιδανική τεχνολογία για την αναγνώριση αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών, επειδή είναι καλύτερη στην ανίχνευση μικροπλαστικών σωματιδίων έως και $20\ \mu\text{m}$ (Cai et al, 2017).

Οι χημικές συνθέσεις των μικροπλαστικών στην ατμοσφαιρική πτώση ή στον αέρα από το Dongguan, τη Σαγκάη και το Παρίσι αναγνωρίστηκαν χρησιμοποιώντας micro-FTIR και βρέθηκαν ορισμένα πολυμερή, όπως πολυαιθυλένιο (PE), πολυπροπυλένιο (PP) και πολυστυρένιο (PS). Επιπλέον, η φασματοσκοπία FTIR με εξασθενημένη ολική ανάκλαση (ATR-FTIR) και η φασματοσκοπία FTIR με διάταξη εστιακού επιπέδου (FPA-FTIR) έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε μελέτες για μικροπλαστικά. Το ATR-FTIR είναι πιο κατάλληλο για τον εντοπισμό ακανόνιστων μικροπλαστικών σωματιδίων μεγαλύτερων από 500 μm, ενώ το FPA-FTIR μπορεί να αναγνωρίσει όλα τα μικροπλαστικά σωματίδια σε διηθητικό χαρτί με διαλογή. Ωστόσο, αυτές οι δύο μέθοδοι δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών, λόγω του μικρότερου μεγέθους των μικροπλαστικών που μεταφέρονται στον αέρα.

Όλες οι τεχνολογίες FTIR απαιτούν ακριβή όργανα και η χρήση του FTIR για την αναγνώριση μικροπλαστικών είναι χρονοβόρα εργασία που απαιτεί καλά εκπαιδευμένους χειριστές, γεγονός που έχει αποτρέψει τη χρήση του FTIR για τον χαρακτηρισμό μεγάλου αριθμού μικροπλαστικών σε αυτές τις μελέτες. Αν και το FTIR έχει ορισμένους περιορισμούς, παραμένει μια αξιόπιστη τεχνική και η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για τον χαρακτηρισμό μικροπλαστικών που συλλέγονται από το περιβάλλον (Hao and Wang, 2021; Chen et al, 2020 ; Cai et al, 2017).

1.3.3. Φασματοσκοπία Raman

Η φασματοσκοπία Raman είναι μια κοινή τεχνική για την ανίχνευση μικροπλαστικών σε διάφορα περιβάλλοντα. Αφού κατευθυνθεί ένα λέιζερ με ένα μόνο μήκος κύματος σε ένα δείγμα στόχου, παράγονται και ανιχνεύονται διαφορετικοί τύποι διέγερσης λόγω της ανάκλασης, της διασποράς και της απορρόφησης από ένα δείγμα (Chen et al, 2020).

Η μετατόπιση συχνότητας σχετίζεται με τη μοριακή δομή και τα χημικά συστατικά των δειγμάτων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναγνώριση μικροπλαστικών πολυμερών. Παρόμοια με τις τεχνικές FTIR, η φασματοσκοπία Raman απαιτεί μόνο μικρές ποσότητες μικροπλαστικών από διαφορετικά περιβάλλοντα και παράγει εξαιρετικά αξιόπιστα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η φασματοσκοπία Raman χρησιμοποιήθηκε για την αναγνώριση και τον χαρακτηρισμό των τύπων μικροπλαστικών που συλλέχθηκαν από την ατμοσφαιρική πτώση στα Γαλλικά Πυρηναία και εντοπίστηκαν PS, PE, PP, τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET). Επιπλέον, οι βελτιστοποιημένες τεχνολογίες της φασματοσκοπίας Raman μπορούν να εφαρμοστούν στην αναγνώριση μικροπλαστικών.

Το micro-Raman (συνδυασμός εξοπλισμού φασματικής απεικόνισης Raman και μικροσκοπίας) μπορεί να ανιχνεύσει μικρότερα μικροπλαστικά έως και 1 μm και αυτή η ανάλυση δεν μπορεί να επιτευχθεί με άλλες μεθόδους. Τα

δείγματα πρέπει να υποβάλλονται σε αφαίρεση οργανικής ύλης για να αποφευχθεί ο υψηλός φθορισμός υποβάθρου πριν από τη χρήση της φασματοσκοπίας micro-Raman.

Σε σύγκριση με τις τεχνικές IR, οι βιβλιοθήκες φάσματος των πολυμερών που δημιουργήθηκαν με τη φασματοσκοπία Raman δεν είναι ακόμη καλά εδραιωμένες και τα πρόσθετα θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ακρίβεια των φασματικών αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η επιλογή κατάλληλου μήκους κύματος λέιζερ για τη φασματοσκοπία Raman είναι απαραίτητη για την αύξηση της έντασης του σήματος και τη μείωση του δυναμικού φθορισμού που εκπέμπεται από ένα δείγμα για την παραγωγή ακριβούς φασματικής εικόνας. Ωστόσο, η φασματοσκοπία Raman εξακολουθεί να είναι μια ισχυρή αναλυτική μέθοδος στις μελέτες μικροπλαστικών (Hao and Wang, 2021 ; Chen et al, 2020).

1.3.4. Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) είναι επίσης ένα κοινό όργανο που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση μικροπλαστικών. Μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής έντασης δημιουργείται και σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος. Εικόνες υψηλής ανάλυσης (<0,5 nm ανάλυση) των λεπτομερειών της επιφάνειας παράγονται λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της δέσμης ηλεκτρονίων και του δείγματος. Τα μικροπλαστικά μπορούν να αναγνωριστούν από τα σωματίδια του δείγματος συγκρίνοντας τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας τους. Τα μοτίβα μηχανικής αποικοδόμησης των μικροπλαστικών μπορούν να ληφθούν εξετάζοντας την υφή της επιφάνειας όπως αυλάκια, κοιλώματα, σπασίματα και νιφάδες στα μικροπλαστικά χρησιμοποιώντας SEM. Για παράδειγμα, οι κοιλότητες και οι αυλακώσεις στην επιφάνεια των αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών μπορεί να αποδοθούν σε σύγκρουση και τριβή που προκαλείται από την ατμοσφαιρική δυναμική και τα σπασίματα μπορεί να προκληθούν από τη δράση του ανέμου. Επιπλέον, ο συνδυασμός SEM και φασματοσκοπίας ακτίνων χ διασποράς ενέργειας (SEM-EDS) μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τη στοιχειακή σύνθεση των σωματιδίων. Για παράδειγμα, η στοιχειακή σύνθεση των μικροπλαστικών από την αιωρούμενη σκόνη προσδιορίστηκε μέσω του SEM-EDS. Αν και το SEM έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την αναγνώριση μικροπλαστικών, είναι μια χρονοβόρα μέθοδος στην προπαρασκευή και παρατήρηση δειγμάτων. Επομένως, το SEM δεν είναι κατάλληλο για την αναγνώριση μεγάλου αριθμού μικροπλαστικών (Hao and Wang, 2021; Wang et al, 2017).

1.4. Αέρια χρωματογραφία πυρόλυσης-φασματομετρία μάζας

Είναι απαραίτητο να αποφεύγεται η μόλυνση από μικροπλαστικά για την ακρίβεια των δεδομένων κατά τη διεξαγωγή μελετών σε αερομεταφερόμενα

μικροπλαστικά. Η τοποθεσία δειγματοληψίας, το ύψος, η περίοδος και ο καιρός πρέπει να καθοριστούν πριν από την έναρξη της δειγματοληψίας. Πρώτον, ο ερευνητής θα πρέπει να είναι προσεκτικός στη λειτουργία του συστήματος δειγματοληψίας κατά τον άνεμο και πρέπει να συλλέγονται επαναληπτικά δείγματα (τουλάχιστον 3) για να βελτιωθεί η αξιοπιστία των δεδομένων παρακολούθησης.

Όταν η δειγματοληψία μικροπλαστικών διεξάγεται σε εσωτερικό περιβάλλον, οι ανθρώπινες δραστηριότητες θα πρέπει να είναι συνεπείς σε κάθε τοποθεσία. Στο εργαστήριο, θα πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται μια μέθοδος εκχύλισης με υψηλά ποσοστά ανάκτησης μικροπλαστικών για την ενίσχυση της ακρίβειας των δεδομένων. Όλα τα δείγματα θα πρέπει να υποβάλλονται σε επεξεργασία σε κουκούλα στρωτής ροής και θα πρέπει να φοράτε βαμβακερά ρούχα και γάντια νιτριλίου καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας επεξεργασίας για να μειωθεί η μόλυνση του περιβάλλοντος (Dris et al, 2015).

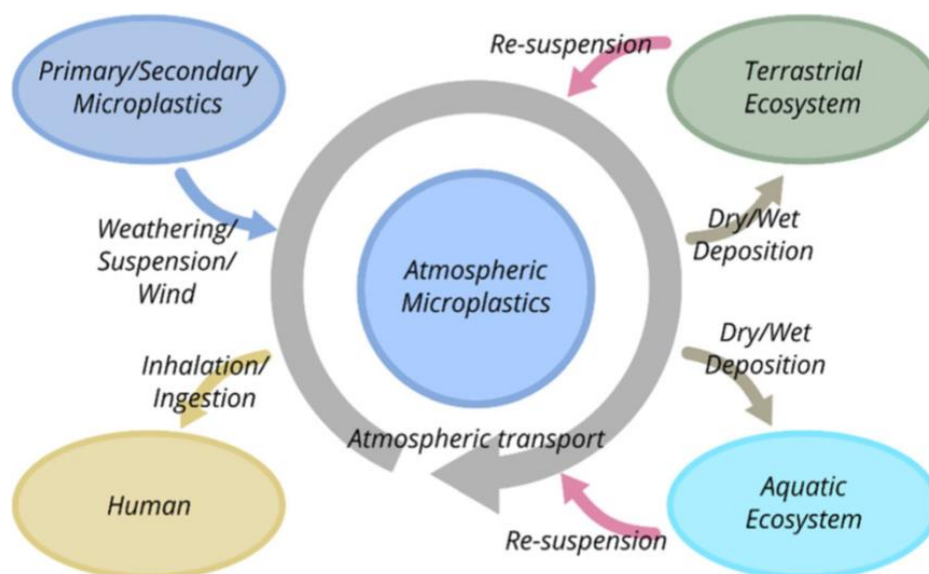
Στη διαδικασία μελέτης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μη πλαστικά εργαλεία και τα γυάλινα μπουκάλια, οι χοάνες και άλλες συσκευές που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία θα πρέπει να ξεπλένονται προσεκτικά 3 φορές με απεσταγμένο νερό για να ανακτηθούν τα σωματίδια που έχουν προσκολληθεί στην επιφάνειά τους. Επειδή τα μικροπλαστικά είναι πανταχού παρόντα στον αέρα, πρέπει να διεξαχθεί μια σειρά από λευκές δοκιμές για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, τα κενά θα πρέπει να υποβάλλονται στις ίδιες διαδικασίες με τα δείγματα και η πιθανή μόλυνση στο εσωτερικό του απορροφητήρα στρωτής ροής θα πρέπει να αξιολογείται χρησιμοποιώντας ένα δίσκο που περιέχει ένα καθαρό φίλτρο. Για την εξάλειψη των στατιστικών σφαλμάτων, κάθε δείγμα θα πρέπει να υποβάλλεται σε στατιστική ανάλυση από τρεις ερευνητές με τα ίδια κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επιπλέον, η μεγαλύτερη εφαρμογή φασματοσκοπικών τεχνικών στον χημικό χαρακτηρισμό των μικροπλαστικών θα βελτιώσει επίσης την ακρίβεια των αποτελεσμάτων (Dris et al, 2015).

1.5. Η εναπόθεση των μικροπλαστικών της ατμόσφαιρας

Σύμφωνα με τους Dris et al. (2015) τα μικροπλαστικά της ατμόσφαιρας δυνητικά μεταφέρονται μέσω του αέρα και εναποτίθενται στο υδατικό περιβάλλον και αποτελούν πηγή μόλυνσης για τα υδάτινα και χερσαία οικοσυστήματα και φαίνεται να είναι σημαντικός παράγοντας επιβάρυνσης του γλυκού νερού. Άλλοι ερευνητές υπέθεσαν πως τα μικροπλαστικά στο νερό οφείλονται σε ατμοσφαιρική πτώση και έτσι εναποτίθενται κ στο χερσαίο περιβάλλον όπου με τον άνεμο και τις καταιγίδες μεταφέρονται (Abbasi et al., 2019).

Η ανταλλαγή των μικροπλαστικών μεταξύ των οικοσυστημάτων αποτελούν τον κύκλο μικροπλαστικών στο περιβάλλον (Εικόνα 1). Τα μικροπλαστικά στην ατμόσφαιρα θεωρητικά εισπνέονται αμέσως και συσσωρεύονται στους

πνεύμονες των ανθρώπων όπου έχουν εντοπιστεί ίνες μήκους πάνω από 250 μm (Liu et al.,2019).



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση του κύκλου των ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών (Can-Güven, Emine, 2021)

Για την κατανόηση της κατάληξης και των πηγών των ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών χρειάζεται να χαρακτηριστούν και να αναγνωρισθεί η χημική τους σύσταση. Οι ίνες που ανιχνεύονται κυρίως είναι οργανικά ή ανόργανα συστατικά αλλά και φυσικής προέλευσης (Gasperi et al., 2018) . Τα ρούχα φαίνεται να είναι η βασική πηγή ινών στην ατμόσφαιρα είτε είναι συνθετικές είτε φυσικές (Cai et al. 2017). Μέσω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων μπορεί να αυξηθεί ο αριθμός των ινών όπως το άπλωμα των ρούχων όπου διασπώνται σε μικροΐνες (Liu et al. 2019).

Πηγή ινών αποδείχτηκε πως είναι το καουτσούκ και το γυαλί. (Asrin και Dirareze 2019). Άλλες πηγές που ανιχνεύτηκαν στα δείγματα ατμοσφαιρικού αέρα αποτελούν τα θραύσματα από μεγάλα πλαστικά προϊόντα όπως διαφημιστικές πινακίδες και οικοδομικά υλικά, από υλικά επικάλυψης αλλά και πλαστικές σακούλες (Cai et al. 2017; Liu et al, 2019).

Αν και οι μελέτες είναι περιορισμένες, μικροπλαστικά από συνθετικές και φυσικές ίνες έχουν αναφερθεί και στον αέρα εσωτερικών χώρων σε μικρότερα επίπεδα από το εξωτερικό περιβάλλον. Κυρίαρχο πολυμερές ήταν ο πολυεστέρας που μπορεί να προέρχεται από χαλιά, έπιπλα και ρούχα. Ανιχνεύτηκε επίσης κυτταρίνη από χαρτιά και βαμβάκι καθώς και μικροΐνες από διάφορα υλικά όπως υλικά συσκευασίας (Dris et al. 2017 ; Vianello et al. 2019).

Τα επίπεδα των μικροπλαστικών παρουσιάζουν εποχιακή διακύμανση με υψηλότερα επίπεδα άνοιξη, καλοκαίρι και χειμώνα και χαμηλότερα το φθινόπωρο (Zhou et al. 2017).

Αυξημένα επίπεδα μικροπλαστικών βρέθηκαν σε αστικές περιοχές το οποίο συσχετίστηκε με την υψηλή κατανάλωση πλαστικών ειδών λόγω του πληθυσμού (Abbasi et al., 2019). Η αφθονία μικροπλαστικών στις πόλεις σχετίζεται επίσης με τη χρήση οικοδομικών υλικών, τη βιομηχανική δραστηριότητα, την κίνηση στους δρόμους, τις χημικές αντιδράσεις στον αέρα και την αποτέφρωση των απορριμμάτων (Li et al. 2020). Τα μικροπλαστικά λόγω του χαμηλού τους βάρους μεταφέρονται στο νερό και τον αέρα διανύοντας μεγάλες αποστάσεις κι έχουν εντοπιστεί ακόμα και στην περιοχή της Αρκτικής (Waller et al. 2017).

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί η κύρια πηγή μικροπλαστικών στον αέρα είναι τα συνθετικά υφάσματα. Περισσότεροι από 60 εκατομμύρια τόνοι συνθετικών υφασμάτων παρήχθησαν το 2016 και οι παραγωγές κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων αυξήθηκαν με ρυθμό περίπου 6% ετησίως. Λόγω της υψηλής ελαστικότητας και αντοχής στην τριβή, και της λεπτής αφής και αίσθησης, οι συνθετικές ίνες χρησιμοποιούνται ευρέως παγκοσμίως. Οι μικρές ίνες σχίζονται εύκολα από τα ρούχα και άλλα προϊόντα από ίνες κατά τη χρήση, τον καθαρισμό και το στέγνωμα. Έχει αναφερθεί ότι απελευθερώνονται περίπου 1900 ίνες σε μία πλύση.

Επιπλέον, η λείανση, ο τεμαχισμός και η κοπή συνθετικών υφασμάτων στη βιομηχανία μπορεί επίσης να παράγει πολλές μικροσκοπικές ίνες. Εκτός από τα συνθετικά υφάσματα, τα MPs στον αέρα έχουν επίσης άλλες πιθανές πηγές: την υποβάθμιση μεγάλων πλαστικών, τα απόβλητα σε χώρους υγειονομικής ταφής ή την αποτέφρωση, τις βιομηχανικές εκπομπές, τα σωματίδια που απελευθερώνονται από την κυκλοφορία, την εκ νέου ανάρτηση σκόνης και την αιολική μεταφορά. Τα πλαστικά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των υφασμάτων, συσσωρεύονται σε χώρους υγειονομικής ταφής και μερικά αποικοδομούνται σε μικροπλαστικά μετά από ακτινοβολία UV-A και φυσική τριβή. Επιπλέον, η ατελής αποτέφρωση των σκουπιδιών θα απελευθερώσει μεγάλη ποσότητα μικροπλαστικών και ως αποτέλεσμα οι ρύποι μεταφέρονται από πόλεις σε απομακρυσμένες χερσαίες τοποθεσίες σε μεγάλη απόσταση μέσω της ατμόσφαιρας (Dris et al, 2017).

Τα αερομεταφερόμενα μικροπλαστικά μπορούν να αποτελούν πηγή μόλυνσης σε χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα. Τα μικροπλαστικά στην ατμόσφαιρα δυνητικά μεταφέρονται από τον άνεμο και εναποτίθενται στο υδάτινο περιβάλλον (Napper et al, 2016). Οι Dris et al. (2016) πρότειναν ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση αντιπροσωπεύει μια σημαντική πηγή MPs στα οικοσυστήματα του γλυκού νερού. Επιπλέον, οι Dris et al. (2017) υπέθεσαν ότι ορισμένοι ρύποι στο υδάτινο περιβάλλον μπορεί να προέρχονται από ατμοσφαιρικές κρούσεις, λόγω των παρόμοιων προτύπων υποβάθμισης των

μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα και στις θαλάσσιες παραλίες και λίμνες. Τα MPs εναποτίθενται επίσης δυνητικά στην επιφάνεια του χερσαίου περιβάλλοντος και τα καθιζάνοντα MPs μπορεί να αιωρηθούν εκ νέου στον αέρα από τον άνεμο ή να μεταφερθούν στο υδάτινο περιβάλλον μέσω επιφανειακής απορροής και όμβριων υδάτων. Έτσι, η ανταλλαγή MPs μεταξύ των εναέριων, χερσαίων και υδάτινων οικοσυστημάτων συνιστά έναν δυναμικό κύκλο MPs στο περιβάλλον.

Επιπλέον, τα MPs στον αέρα που εισπνέονται δυνητικά συσσωρεύονται στους πνεύμονες ενηλίκων και παιδιών. Ίνες με μήκος >250μm έχουν παρατηρηθεί στον ανθρώπινο πνευμονικό ιστό. Οι Schneider et al. (1996) υπολόγισαν ότι περίπου 21 μικροπλαστικά μπορεί να εισπνέονται από έναν πολίτη στη Σαγκάη κάθε μέρα, με δυνητικές επιπτώσεις όπως οξεία και χρόνια φλεγμονή.

Η μεταφορά μικροπλαστικών μέσω της ατμόσφαιρας έχει θεωρηθεί κρίσιμη πηγή για τη θαλάσσια ρύπανση. Λόγω μικρού μεγέθους και χαμηλής πυκνότητας τα μικροπλαστικά μεταφέρονται εύκολα με τον άνεμο και υπάρχει διάδοση σε απομακρυσμένα μέρη (Liu et al, 2019). Υπήρξε θετική συσχέτιση του αριθμού μικροπλαστικών και του αέρα υποδεικνύοντας έτσι ότι είναι παράγοντας μεταφοράς τους. Ωστόσο δεν υπήρξε συσχέτιση με τους τύπους των μικροπλαστικών. Η χρονική διακύμανση στη μεταφορά φαίνεται να επηρεάζεται και από τους μετεωρολογικούς παράγοντες του τόπου όπως η υγρασία, το χιόνι, ο αέρας, η βροχή και η πίεση (Allen et al, 2019). Οι βροχοπτώσεις φάνηκαν να είναι σημαντικός παράγοντας επιβάρυνσης τη ρύπανσης από μικροπλαστικά (Dris et al. 2015). Άλλη έρευνα παρουσίασε αδυναμία συσχέτισης του αριθμού των μικροπλαστικών με τη βροχή και τη θερμοκρασία ενώ υπήρξε με τον αέρα και τις καταιγίδες (Klein and Fischer, 2019). Σε έρευνα που έγινε για την ποιότητα του αέρα πάνω από τον ωκεανό διαπιστώθηκε συγκέντρωσή μικροπλαστικών που εντοπιζόταν κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας και συσχετίστηκε με την καθίζηση λόγω της αυξημένης υγρασίας (Liu et al. 2019).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Η αφθονία υλικών σχετίζεται στενά με τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Για παράδειγμα, οι άνθρωποι που ζουν στη Σαγκάη συνήθως στεγνώνουν τα ρούχα, τα σεντόνια, τα μαξιλάρια και τις κουβέρτες τους κάτω από ροή αέρα και ηλιακό φως, κρεμώντας τα σε μπαλκόνια. Κατά την έκθεσή τους στο φως του ήλιου, η υπεριώδης ακτινοβολία θα προκαλούσε τη διάσπαση και την υποβάθμιση των συνθετικών υφασμάτων σε μικροΐνες. Αυτή η συνήθεια & συμβάλει ουσιαστικά στην αερομεταφερόμενη συγκέντρωση MPs. Επιπλέον, το τοπικό περιβάλλον, όπως το υψόμετρο και το γεωγραφικό περιβάλλον, επηρεάζει την αφθονία των MPs. Σε αυξανόμενα υψόμετρα, οι συγκεντρώσεις των αερομεταφερόμενων MPs μειώνονται (Ziajahromi et al., 2017; Ziajahromi et al., 2018).

Αξίζει να τονιστεί πως τα μικροπλαστικά μεταφέρονται σε διαφορετικά περιβάλλοντα με διαφορετικές διαδικασίες οι οποίες επηρεάζουν την ποσότητα των μικροπλαστικών και τον εντοπισμό τους στις πιο δυσπρόσιτες περιοχές. Οι διαφορές ανά περιοχή αλλά και τα χαρακτηριστικά τους δεν σχετίζονται μόνο με την πηγή αλλά και από άλλους παράγοντες όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες, ο πληθυσμός και οι δραστηριότητες. Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι παράγοντες της ρύπανσης από μικροπλαστικά και οι διαδικασίες που τα οδηγούν στην ατμόσφαιρα.

2.1 Πληθυσμός

Σε μια έρευνα που έγινε στο Παρίσι και στα προάστια της πόλης φάνηκε πως η ποσότητα μικροπλαστικών ήταν πολύ υψηλότερη στην πυκνοκατοικημένη πόλη του Παρισιού (Dris et al., 2015; Dris et al., 2016). Παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά στις συγκεντρώσεις MPs μεταξύ αστικών και προαστιακών περιοχών. Διαπιστώθηκε ότι η Σαγκάη είχε υψηλότερη συγκέντρωση MPs από το Παρίσι, πόλη που έχει το μισό του πληθυσμού της Σαγκάης. Μία από τις πιθανές εξηγήσεις είναι ότι στις πυκνοκατοικημένες περιοχές όπου υπάρχουν πολλές ανθρωπογενείς δραστηριότητες παράγονται μικροπλαστικά σε τοπικό επίπεδο.

Στην Κίνα αντίστοιχα διαπιστώθηκε ότι οι νότιες περιοχές έχουν μεγαλύτερη ποσότητα μικροπλαστικών από τις βόρειες περιοχές, γεγονός που

υποδηλώνει πως το επίπεδο διαβίωσης και ο πληθυσμός συνδέονται με τη ρύπανση μικροπλαστικών (Liu et al., 2019).

Σε κοιτώνες Πανεπιστημίου όπου έγιναν μετρήσεις, η συγκέντρωση των μικροπλαστικών ήταν τριπλάσια το Σαββατοκύριακο από ότι τις καθημερινές, γεγονός που δείχνει ότι οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες αλλάζουν την κατανομή τους όπου, στην συγκεκριμένη περίπτωση, οι φοιτητές παραμένουν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στους κοιτώνες τους τα Σαββατοκύριακα (Zhang et al., 2020).

Οι συγκεντρώσεις MPs σε εσωτερικούς χώρους παρουσιάστηκαν μόνο στη μελέτη από τους Dris et al. (2017). Οι συγκεντρώσεις σε εσωτερικούς χώρους είναι σημαντικά υψηλότερες από τις εξωτερικές συγκεντρώσεις. Η αραίωση που προκαλείται από την ανανέωση του αέρα σε εξωτερικά περιβάλλοντα εξηγεί ενδεχομένως αυτή τη διαφορά. Στα δείγματα σκόνης που συλλέχθηκαν σε εσωτερικό περιβάλλον περιείχαν υψηλότερες συγκεντρώσεις MPs από τα δείγματα σκόνης εξωτερικού περιβάλλοντος, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στη μεγαλύτερη αφθονία μικροπλαστικών σε εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον, διάφορα έπιπλα, κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, οικοδομικά υλικά, συνήθειες διαβίωσης και δραστηριότητες επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις μικροπλαστικών στα δωμάτια. Για παράδειγμα, τα χαλιά ή η χρήση παραδοσιακών μεθόδων καθαρισμού (χειρωνακτικές) στα δωμάτια συμβάλλουν ουσιαστικά στην αύξηση μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα, ενώ η χρήση ηλεκτρικής σκούπας τα μειώνει (Waller et al., 2017).

Η πυκνότητα πληθυσμών ωστόσο δεν αποτελεί το μοναδικό παράγοντα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το Λονδίνο, που έχει μικρότερο πληθυσμό από το Παρίσι αλλά υπερέχει στη συγκέντρωση μικροπλαστικών γεγονός που δηλώνει ότι θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν και άλλες προϋποθέσεις όπως οι ανθρωπίνες δραστηριότητες και ο μεταβαλλόμενος πληθυσμός κάθε περιοχής.

2.2 Ανθρώπινη δραστηριότητα

Μία από τις πιθανές εξηγήσεις είναι ότι μια πυκνοκατοικημένη περιοχή μπορεί να οδηγήσει σε έντονες ανθρωπογενείς δραστηριότητες και να δημιουργήσει περισσότερα μικροπλαστικά. Η συγκέντρωση σχετίζεται στενά με το ρυθμό των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της Σαγκάης που αναφέρθηκε και ανωτέρω όσον αφορά τις συνήθειες που ακολουθούν για το πλύσιμο, στέγνωμα και άπλωμα των ρούχων. Επιπλέον, το τοπικό περιβάλλον, όπως το υψόμετρο και το γεωγραφικό περιβάλλον, επηρεάζει την αφθονία των μικροπλαστικών. Σε αυξανόμενα υψόμετρα, οι συγκεντρώσεις των MPs μειώνονται (Ziajahromi et al., 2017 ; Ziajahromi et al., 2018).

Οι βασικές πηγές αερομεταφερόμενων MPs περιλαμβάνουν ρούχα από συνθετικό ύφασμα, έπιπλα, υλικά κατασκευής, τριβή ελαστικών και αστική

σκόνη. Επιπλέον, τα αερομεταφερόμενα MPs που προέρχονται από την επαναιώρηση της εναποτιθέμενης ρύπανσης που παράγεται από τα αυτοκίνητα, αιωρούνται στην ατμόσφαιρα, παρασύρονται και συσσωρεύουν περαιτέρω ρυπαίνοντας υδάτινα ή χερσαία περιβάλλοντα. Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμένες μόνο γνώσεις σχετικά με τις συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων MPs παγκοσμίως τόσο στον αέρα εξωτερικού όσο και εσωτερικού.

Μια μελέτη σχετικά με την ύπαρξη MPs στη σκόνη του δρόμου έριξε φως σε μια υποτιμημένη πηγή αυτών που μεταφέρονται στον αέρα. Τα δείγματα σκόνης του δρόμου (<5 mm) που ανακτήθηκαν από 15 τοποθεσίες στο Asaluyeh, στο νότιο Ιράν, βρέθηκαν να κυριαρχούνται από MPs (σφαίρες, φιλμ και ίνες) και σωματίδια μικροκαουτσούκ (MR), με μέσο όρο έως και 900 MPs και 250 MRs ανά 15 g του δείγματος αντίστοιχα. Οι συγγραφείς παρασκεύασαν δείγματα 15 g με 35 ml 30% H₂O₂ για να αφαιρέσουν την οργανική ύλη, έτσι ώστε τα ταυτοποιημένα σωματίδια να συμπεραίνονται ότι είναι συνθετικά.

Από την παραπάνω μελέτη, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η αυξημένη κίνηση των οχημάτων και η αστική οδική κυκλοφορία θα μπορούσαν να δημιουργήσουν συνθετικά σωματίδια MR μέσω της τριβής των ελαστικών και να οδηγήσουν σε αιωρούμενα σωματίδια (PM). Τα αδρανή υλικά ελαστικών και χρωμάτων είναι σημαντικές πηγές αστικής σκόνης που συμβάλλουν στην αύξηση MPs στην ατμόσφαιρα. Οι Jarlskog et al. (2020) αναγνώρισαν MPs ελαστικών και πίσσας από το οδόστρωμα, τα όμβρια ύδατα και τα δείγματα ιζήματος, επισημαίνοντας ότι αποτελούν κύρια πηγή εκπομπών. Αρκετές μελέτες έχουν αναφέρει ότι η τριβή των ελαστικών οχημάτων θα μπορούσε να είναι μια σημαντική πηγή για τη συσσωμάτωση MPs στον αστικό αέρα. Επίσης οι επιστήμονες αναγνώρισαν και ποσοτικοποίησαν τα συνθετικά υλικά φθοράς των ελαστικών από περιβαλλοντικά δείγματα στις οδικές αποχετεύσεις του Plymouth (H.B.), όπου διαπιστώθηκε ότι τα συσσωματώματα από τη φθορά των ελαστικών στο δρόμο συνέβαλαν σημαντικά στη ρύπανση από MR στο δίκτυο αποχέτευσης.

Σύμφωνα με τις παραπάνω διαπιστώσεις, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην περιβαλλοντική εκτίμηση της ρύπανσης από MPs των αστικών εξωτερικών χώρων από την τριβή των ελαστικών. Γενικά, τα MPs που εκπέμπονται από την τριβή των ελαστικών είναι χονδροειδείς σωματιδιακοί ρύποι. Η ροή αέρα και τα ισχυρά ρεύματα αέρα που αναδύονται από την περιστροφή (κίνηση) των ελαστικών στα οχήματα (τροχοί) μπορούν επίσης να εκπέμπουν και να μεταφέρουν PM στον αέρα. Οι προσεγγίσεις μοντελοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατανόηση της τριβής και της απελευθέρωσης των MPs από το ελαστικό ή οποιαδήποτε άλλη πηγή.

Ομοίως, MPs μπορούν επίσης να εκπέμπονται από σωματίδια φθοράς των φρένων, τα οποία περιέχουν κατά κύριο λόγο μέταλλα και πλαστικά (ίνες,

συνδετικά υλικά από την επένδυση των φρένων, κ.λπ.). Ομοίως, τα MPs που εκπέμπονται από τις βαφές είναι υποτιμημένες πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου, καθώς τα χρώματα λατέξ που συνήθως συνδυάζουν νερό και πλαστικά έχουν αυξηθεί δραματικά σε δημοτικότητα. Για παράδειγμα, οι Rist et al. (2020) εντόπισαν πολλά θραύσματα χρωμάτων στις ακτές της Αρκτικής, υποδηλώνοντας ότι η βαφή πλοίων θα μπορούσε να είναι μια υποτιμημένη πηγή όχι μόνο θαλάσσιων, αλλά και αερομεταφερόμενων MPs. Ακόμη και οι πλαστικές σακούλες μιας χρήσης μπορούν να εκπέμπουν MPs στον εσωτερικό ή τον εξωτερικό αέρα. Οι πλαστικές μεμβράνες που χρησιμοποιούνται για την εδαφοκάλυψη σε περιοχές γεωργικής γης μπορούν επίσης να εκπέμπουν υψηλές συγκεντρώσεις MPs στο περιβάλλον. Η αποτέφρωση είναι και αυτή άλλη μια πιθανή, αλλά δυστυχώς λιγότερο εξερευνημένη πηγή για τα αερομεταφερόμενα μικροπλαστικά. Για παράδειγμα, οι Yang et al. (2021) εντόπισαν περίπου 360-102.000 σωματίδια ανά μετρικό τόνο MPs (κυρίως PP και PS) στην τέφρα των αποτεφρωτηρίων αστικών στερεών αποβλήτων (μαζική καύση και ρευστοποιημένη κλίνη) σε διάφορες κινεζικές πόλεις, γεγονός που οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η αποτέφρωση αποτελεί μια πιθανή πηγή MPs απόρριψης στο περιβάλλον. Ωστόσο, η μελέτη δεν εξέτασε εάν εμφανίζονται MPs στην ιπτάμενη τέφρα των αποτεφρωμένων στερεών αποβλήτων, κάτι που στην περίπτωση αυτή θα μπορούσε να είναι μια πιθανή πηγή για τα αερομεταφερόμενα MPs.

Οι χώροι ανεξέλεγκτοι διάθεση απορριμμάτων (χωματερές) αποτελούν μια πιθανή πηγή για τη μεταφορά MPs στον αέρα. Για παράδειγμα, οι Chai et al. (2020) ανέφεραν ότι το έδαφος κοντά σε μια χωματερή ηλεκτρονικών απορριμμάτων στο Guiyu της Κίνας ήταν πολύ μολυσμένο με MPs (έως 34.100 σωματίδια kg^{-1}), υπογραμμίζοντας μια πιθανή ατμοσφαιρική μεταφορά. Σε δειγματοληψία που πραγματοποίησαν οι Gonzalez-Pleiter et al. (2021) σχετικά με τα αερομεταφερόμενα MPs μέσω αεροσκαφών (δειγματοληψία αέρα εντός και πάνω από το πλανητικό οριακό στρώμα) διαπίστωσε ότι ο αέρας των πόλεων ήταν γενικά μολυσμένος από θραύσματα, ενώ ο αέρας της υπαίθρου ήταν κυρίως μολυσμένος από ίνες.

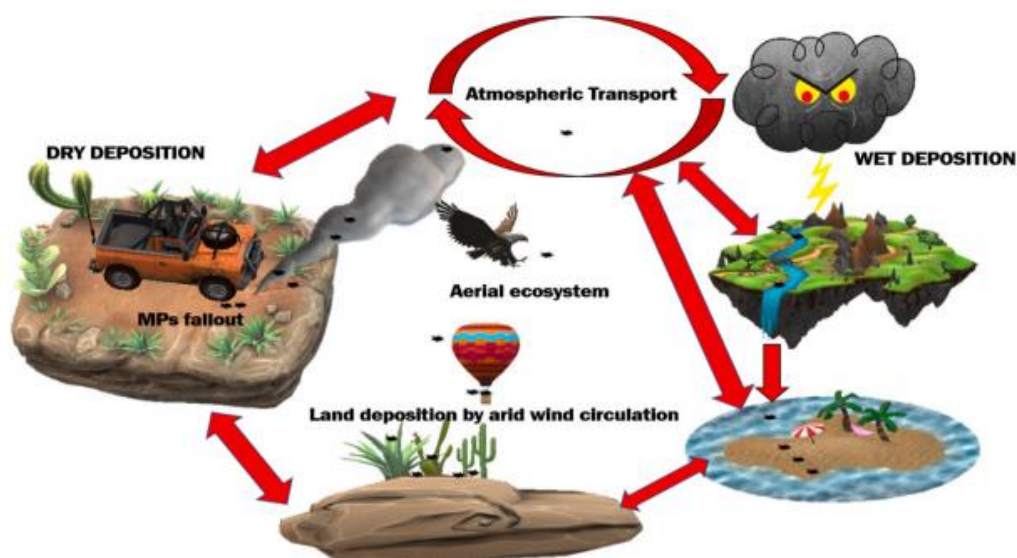
Οι συνθετικές υφαντικές ίνες αναγνωρίζονται ως κύρια πηγή MPs στην ατμόσφαιρα. Η ανάλυση του ατμοσφαιρικού αέρα της πόλης Dongguan στην Κίνα, έδειξε ότι τα PE, PP και PS είναι οι κυρίαρχοι τύποι αστικών MPs. Η συγκέντρωση MPs στον αέρα του Λονδίνου εκτιμήθηκε ότι είναι 20 φορές υψηλότερη από οποιαδήποτε απομακρυσμένη αγροτική τοποθεσία, γεγονός που συνάγει την επιρροή τοπικών πηγών όπως οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες οι μετακινήσεις οχημάτων.

Παρά τον περιορισμένο αριθμό μελετών, η ανίχνευση των πιθανών πηγών και τύπων μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση των μηχανισμών μετανάστευσης. επειδή οι τύποι, τα σχήματα και

οι πηγές των αερομεταφερόμενων MPs κατανέμονται άνισα σε όλο τον κόσμο, ανάλογα με τις περιφερειακές ανθρωπογενείς δραστηριότητες, την πυκνότητα του πληθυσμού και τις πρακτικές διάθεσης και διαχείρισης απορριμμάτων. Ωστόσο, πολλές μελέτες στερούνται εποχιακής δειγματοληψίας και, ως εκ τούτου, απαιτείται η συνδυαστική προσέγγιση της δειγματοληψίας υγρής και ξηρής εναπόθεσης για την κατανόηση της αφθονίας της ατμοσφαιρικής ρύπανσης MPs και της απόθεσής της σε χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα.

Αν και αναγνωρίζεται ότι είναι ένα διαρκώς αυξανόμενο παγκόσμιο ζήτημα, υπάρχει έλλειψη δεδομένων για την ατμοσφαιρική εναπόθεση και μεταφορά μικροπλαστικών, με εξαίρεση μερικές μεγαλουπόλεις (Λονδίνο, Παρίσι, Asaluyeh, Dongguan).

Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, πρέπει να βελτιωθούν τυπικές μέθοδοι και πρωτόκολλα για τον χαρακτηρισμό και την ποσοτικοποίηση των MPs όχι μόνο στον αέρα (περιβάλλον καθώς και σε εσωτερικούς χώρους) αλλά και σε οποιαδήποτε περιβαλλοντική τοποθεσία. Η ελαχιστοποίηση της μόλυνσης του περιβάλλοντος σε όλη την ανάλυση MPs είναι αρκετά δύσκολη. Αν και πολλές ερευνητικές δημοσιεύσεις ασχολούνται και δίνουν έμφαση στην ατμοσφαιρική μεταφορά σωματιδίων MPs, οι περισσότερες πτυχές συμπεριλαμβανομένων των μηχανισμών και των πιθανών οδών είναι άγνωστες και πρέπει να επικεντρωθούν σε μελλοντική έρευνα. Η γνώση της εναέριας εναπόθεσης, της μεταφοράς, της σάρωσης και της καθίζησης των σωματιδίων MPS είναι ζωτικής σημασίας για τη χαρτογράφηση των πιθανών πηγών και την πρόβλεψη των αντίστοιχων επιπτώσεων στα ευαίσθητα οικοσυστήματα (βλέπε εικόνα 2) (PlasticsEurope, 2016).



Εικόνα 2: Απεικόνιση την επαναϊώρησης, μεταφοράς και σάρωσης των μικροπλαστικών.

Εάν μπορούν να εντοπιστούν οι ευάλωτες περιοχές, μπορεί να μελετηθεί ο βαθμός στον οποίο οι ρύποι συμβάλλουν στη σωματιδιακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε αυτές τις περιοχές. Η βιβλιογραφία σχετικά με τους ρυθμούς φόρτωσης αερομεταφερόμενων MPs από αστικές περιοχές σε απομακρυσμένες ή αγροτικές τοποθεσίες είναι πολύ σπάνια. Επομένως, μελλοντικές μελέτες πρέπει να διερευνήσουν τους μηχανισμούς και τις οδούς ατμοσφαιρικής μεταφοράς τόσο του πρωτεύοντος όσο και του δευτερεύοντος MPs. (PlasticsEurope, 2016)

2.3 Μετεωρολογικοί παράγοντες

Η συγκέντρωση και η εναπόθεση των MPs επηρεάζονται από ορισμένους παράγοντες, όπως οι βροχοπτώσεις, ο άνεμος, η πυκνότητα πληθυσμού, το τοπικό περιβάλλον και οι ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι μετεωρολογικές συνθήκες δείχνουν σημαντικές συσχετίσεις με τους αριθμούς MPs στην ατμόσφαιρα. Οι Dris et al. (2017) παρατήρησαν 5 φορές περισσότερες ίνες κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης. Στη μελέτη των μικροπλαστικών που πραγματοποιήθηκε στα βουνά των Πυρηναίων, τόσο οι βροχοπτώσεις όσο και οι χιονοπτώσεις παρουσίασαν θετική συσχέτιση με την εναπόθεση MPs. Επιπλέον, τα καταγεγραμμένα δεδομένα υποδηλώνουν ότι η αερομεταφερόμενη εναπόθεση και μεταφορά MPs μπορεί να επηρεαστεί από την κίνηση του ανέμου, λόγω των χαμηλών πυκνοτήτων και των μικρών μεγεθών. Η ανάλυση συσχέτισης αποκάλυψε θετικές επιδράσεις των βροχοπτώσεων, των χιονοπτώσεων και των ανέμων και της έντασης, αντί της διάρκειας, στην εναπόθεση MPs. Καθώς η συγκέντρωση των μικροπλαστικών στην ατμοσφαιρική κατακρήμνιση αυξάνεται, η περιεκτικότητα των MPs στην ατμόσφαιρα μειώνεται. Επιπλέον, η κατεύθυνση του ανέμου δείχνει επίσης ισχυρή συσχέτιση με τις συγκεντρώσεις των αερομεταφερόμενων MPs. Οι Free et al. (2014) παρατήρησαν αύξηση της μόλυνσης από μικροπλαστικά με αλλαγή κατεύθυνσης από δυτικούς ανέμους σε νότιους ανέμους. Άλλες μελέτες τεκμηρίωσαν υψηλότερη αφθονία αερομεταφερόμενων MPs σε τοποθεσίες με αντίθετο αέρα. Μεταξύ αυτών των μελετών των MPs στην ατμόσφαιρα, οι τοποθεσίες δειγματοληψίας με πυκνό πληθυσμό είχαν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων MPs.

Οι παράγοντες κινδύνου που σχετίζονται με τα MPs αυξάνονται με τη διάβρωση των πλαστικών απορριμμάτων όταν εκτίθενται σε περιβαλλοντικές συνθήκες. Η συμπεριφορά των αερομεταφερόμενων MPs διαφέρει από τα επίγεια ή τα υδάτινα πλαστικά. Μικροπλαστικά που εκτίθενται στο περιβάλλον (υπεριώδεις ακτίνες, υδρολογικές συνθήκες όπως οι αναταράξεις) υφίστανται με τον καιρό αυτή την μεταβολή λόγω των παραπάνω συνθηκών και αποτελούν μεγαλύτερη απειλή για το περιβάλλον και την υγεία από τα «παρθένα» (φρέσκα/χωρίς να έχουν υποστεί μεταβολές) μικροπλαστικά.

Τα πλαστικά από την φύση τους είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά υλικά, πράγμα που καθιστά δύσκολη την βιοδιάσπασή τους. Παράγοντες, ωστόσο, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η υψηλή θερμοκρασία, η τριβή που υφίστανται λόγω του αέρα ή των κυμάτων, μπορεί να οδηγήσουν στην γήρανσή τους και κατ' επέκταση στην διάσπασή τους σε μικρότερα κομμάτια (Gardette et al, 2013).

Οι υψηλές θερμοκρασίες έχουν την ικανότητα να οδηγούν τα πολυμερή σε μια υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους, κάνοντάς τα πιο «μαλακά». Πιο συγκεκριμένα, η αλλαγή αυτή των ιδιοτήτων των πολυμερών οφείλεται είτε σε ανάπτυξη διακλαδώσεων είτε σε μεταβολές ορισμένων ομάδων, των μακρομορίων. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία που εφαρμόζεται πάνω στο πλαστικό τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της γήρανσης που επιτυγχάνεται. Θερμοκρασίες κάτω από την T_g (“θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης”) του πολυμερούς όταν αυτό δεν βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας, οδηγούν σε θερμοκρασιακή υποβάθμιση. Οι αλλαγές των ιδιοτήτων που επέρχονται λόγω θερμοκρασίας είναι οι εξής:

1. Δυσκαμψία
2. Τάση διαρροής
3. Αλλαγή της πυκνότητας
4. Αλλαγή των ρεολογικών ιδιοτήτων
5. Δυσθραυστότητα
6. Ψαθυροποίηση κ.α

Η UV-A ακτινοβολία είναι ένας επιπλέον παράγοντας αλλοίωσης των πλαστικών. Τα πλαστικά που βρίσκονται εκτεθειμένα στο περιβάλλον υπόκεινται αρκετά σε UV ακτινοβολία. Η ενέργεια της υπεριώδους ακτινοβολίας του ηλίου, απορροφάται επιλεκτικά, από τους ακόρεστους δεσμούς της πολυμερικής αλυσίδας και τις φωτοευαίσθητες ομάδες που τυχόν περιέχονται σε αυτή. Αποτέλεσμα της απορρόφησης αυτής είναι η ρήξη των δεσμών και ακολούθως η θραύση των μακρομοριακών αλυσίδων. Προϊόν της θραύσης αυτής είναι η δημιουργία ελεύθερων ριζών. Το είδος των δεσμών που μπορούν να απορροφήσουν ηλιακή ενέργεια, εξαρτάται από τη δομή και την φυσική κατάσταση του πολυμερούς γι' αυτό και η υποβάθμιση συμβαίνει σε διαφορετικά μήκη κύματος, ανάλογα με την φύση του πολυμερούς. Για παράδειγμα, το PE καταστρέφεται περίπου στα 300nm.

Ακόμα, η υγρασία επηρεάζεται από την υπεριώδη ακτινοβολία οδηγώντας στην παραγωγή ελεύθερων ριζών. Οι ελεύθερες ρίζες είναι καταλυτικός παράγοντας τόσο για την έναρξη όσο και την διάδοση της όλης διαδικασίας αποδόμησης. Έτσι, η αποδόμηση είναι πολύ πιο αργή σε ζεστά και ξηρά κλίματα συγκριτικά με πιο ζεστά και υγρά κλίματα. Ως αποδόμηση ορίζεται

μια ακολουθία χημικών μεταβολών που μειώνουν δραστικά το μέσο μοριακό βάρος και τη μηχανική ακεραιότητα του πολυμερούς, που διαμορφώνονται κατά κύριο λόγο από αντιδράσεις όπως φωτο-και θερμική οξειδωση, υδρόλυση και βιοαποδόμηση που προκαλείται από μικροβιακή δραστηριότητα (Singh and Sharma, 2008). Παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τον ρυθμό αποδόμησης είναι οι εξής:

- η τυπολογία του πολυμερούς
- η παρουσία πρόσθετων χημικών
- η διαθεσιμότητα του συστήματος σε οξυγόνο
- η θερμοκρασία του περιβάλλοντος κ.α.

Πιο συγκεκριμένα, αυξημένες θερμοκρασίες ευνοούν την γήρανση των πλαστικών. Έτσι, το καλοκαίρι όπου η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει έως 40°C, η γήρανση των πλαστικών είναι σημαντικά ταχύτερη από ότι σε ψυχρότερο θαλασσινό νερό και θαλάσσια ιζήματα (Andrady,2011). Σε συνδυασμό με τη φυσική γήρανση, οι καταιγίδες ισχυροί άνεμοι, τα κύματα και η λείανση με άμμο μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλή συγκέντρωση πλαστικών υπολειμμάτων στις παραλίες.

Οι ερευνητές διερεύνησαν τις μακροχρόνιες διαδικασίες γήρανσης και προσρόφησης των MPs PS στον αέρα, το θαλασσινό νερό και το γλυκό νερό και σε υψηλές θερμοκρασίες (75°C) και παρατήρησαν ένα χαρακτηριστικό σχηματισμό δεσμού καρβονυλίου (C=O) σε αερομεταφερόμενα MPs που είχαν υποστεί τις μεταβολές αυτές λόγω επίδρασης των παραπάνω για μεγάλο χρονικό διάστημα. Καθώς ο δεσμός C=O είναι εξαιρετικά δραστικός, αλλάζει την υφή της επιφάνειας και τα χαρακτηριστικά των MPs (λακκούβες, αυλακώσεις), γεγονός που μπορεί να ενισχύσει τη συμπεριφορά προσρόφησης τους. Επομένως, η περιβαλλοντική έκθεση μπορεί να επηρεάσει τα χαρακτηριστικά προσρόφησης των MPs.

Για παράδειγμα, τα MPs PE που εκτίθενται στον αέρα μπορούν να προσροφήσουν τον χαλκό και την τετρακυκλίνη πιο αποτελεσματικά από τα φρέσκα ή παρθένα (μη εκτεθειμένα) σωματίδια. Ως εκ τούτου, τα «ηλικιωμένα» αερομεταφερόμενα MPs μπορεί να έχουν τη δική τους εγγενή τοξικότητα εκτός από τα χημικά πρόσθετα ή τους προσροφημένους συνυπάρχοντες ρύπους και, ως εκ τούτου, ενέχουν υψηλότερους κινδύνους για την υγεία από τα φρέσκα ή παρθένα MPS που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα.

Η έκθεση σε εναέρια MPs ή νανοπλαστικά (NPs) μπορεί να συμβεί μέσω ωκεάνιων κυμάτων (θαλάσσιος ψεκασμός), ατμοσφαιρικών σωματίδια από λάσπη λυμάτων, αποτέφρωση απορριμμάτων, χωματερές, δομικά υλικά, πλαστικά θραύσματα από έπιπλα σπιτιού, σωματίδια λόγω κυκλοφορίας

(φθορά ελαστικών/φρένων), βιομηχανικές εκπομπές, σωματίδια εδαφοκάλυψης. Τα MPs μπορούν να προσροφήσουν/απορροφήσουν συνυπάρχοντες ρύπους όπως πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs), πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs), αντιβιοτικά, καθώς και πρόσθετα όπως δισφαινόλη Α (BPA), φθαλικές ενώσεις και άλλους ενδοκρινικούς διαταρράκτες στο περιβάλλον (Wang et al, 2020).

Η θερμοκρασία παίζει καθοριστικό ρόλο στην προσρόφηση και την απελευθέρωση των προσθέτων στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, οι Ranjan et al. (2021) παρατήρησαν την απελευθέρωση ~25.000 μικρών σωματιδίων MPs από μια επένδυση PE ενός ζεστού χάρτινου κυπέλλου, με ίχνη βαρέων μετάλλων. Αρκετές μελέτες επιβεβαιώνουν την τοξικότητα των MPs που συνδέεται με εντερική απόφραξη, εσωτερίκευση από λευκά αιμοσφαίρια, εγκεφαλικό οξειδωτικό στρες και μεταβολικές διαταραχές. Οι ερευνητές εξέτασαν προσεκτικά τις αιολικές μεταφορές, την ανθρώπινη έκθεση, τις επιπτώσεις στην υγεία και γενικότερα την παρουσία των αερομεταφερόμενων MPs και τους παράγοντες που ευνοούν την απόθεσή τους.

Παγκοσμίως, η έκθεση και οι επιπτώσεις στην υγεία των αερομεταφερόμενων MPs είναι πολύ λιγότερο κατανοητές από τους υδάτινους/χερσαίους MPs, επειδή σε πολλές χώρες λείπει λεπτομερής τεκμηρίωση των κύριων τύπων, πηγών και συγκεντρώσεων MPs στον αέρα του περιβάλλοντος. Τα τελευταία χρόνια, αναδύονται έρευνες προκειμένου να υπάρξει περαιτέρω διερεύνηση σχετικά με την αφθονία και τις πιθανές απειλές των MPs στο εναέριο περιβάλλον. Ωστόσο, πολύ λίγα είναι γνωστά για τα αερομεταφερόμενα MPs και απαιτούνται πιο εκτεταμένες μελέτες για τη συνεισφορά τους στην έρευνα για την ατμοσφαιρική ρύπανση καθώς και στην ανάπτυξη πολιτικών αντιμετώπισής τους. Αν και η έρευνα για τον χαρακτηρισμό των αερομεταφερόμενων MPs ξεκίνησε το 2015, υπάρχουν μόλις 40 επιστημονικά άρθρα που τεκμηριώνουν ατμοσφαιρικά MPs και NPs.

Για την κατανόηση των ατμοσφαιρικών επιπτώσεων των MPs, είναι απαραίτητη η κατανόηση των χαρακτηριστικών φθοράς και αποσύνθεσης διαφόρων πλαστικών στον αέρα. Για παράδειγμα, το PS παράγει δευτερογενές MPs πολύ γρήγορα στον αέρα καθώς οι μοριακές αλυσίδες των πολυμερών μπορούν να σπάσουν εύκολα από την ακτινοβολία UV. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι τα πλαστικά που παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα (μεγάλη διάρκεια ζωής) αποσυντίθενται λιγότερο συχνά αλλά εξακολουθούν να δημιουργούν MPs (Liu et al, 2019).

Η διασπορά κομπόστ, λάσπη λυμάτων, ελαστικών, βαφών προσδιορίζονται ευρέως ως πιθανές πηγές ατμοσφαιρικών MPs. Καθώς τα ποσοστά εναέριας καθίζησης των πλαστικών σωματιδίων ποικίλλουν ανάλογα με τη θέση (τοπική εκπομπή) ανάλογα με την πηγή και τον τύπο του πολυμερούς, η απελευθέρωση MPs στον αέρα ποικίλλει ανάλογα με τη γεωγραφία (κατανομή

γης, νερό, κλίμα, άνεμος) και το πρότυπο χρήσης γης (γεωργία, βιομηχανίες). Η συγκέντρωση και τα χαρακτηριστικά των αερομεταφερόμενων MPs εξαρτώνται από τον άνεμο και την απόσταση από τις περιοχές πηγής. Μετεωρολογικοί παράγοντες όπως η ταχύτητα του ανέμου, η ανάμειξη των οριακών στρωμάτων, η θερμοκρασία κ.λπ., επηρεάζουν επίσης τη μεταφορά των ατμοσφαιρικών MPs PM. Μια αύξηση στη συγκέντρωση των συνθετικών MPs σε χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα κατά τη διάρκεια του χειμώνα υποδηλώνει ότι η βροχόπτωση και οι βροχοπτώσεις μπορούν δυνητικά να επηρεάσουν τη συγκέντρωση των ατμοσφαιρικών MPs (Liu et al, 2019).

Οι έντονες βροχοπτώσεις (μουσώνες) οδηγούν στην εναπόθεση μικροσκοπικών ατμοσφαιρικών σωματιδίων στην επιφάνεια της γης και εκπέμπονται πίσω στην ατμόσφαιρα μέσω των μετα-μουσώνων ανέμων (ροή από ζώνες υψηλής πίεσης σε ζώνες χαμηλής πίεσης) με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εστίες ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Liu et al, 2019),

Οι άνεμοι των μουσώνων παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην ηπειρωτική διασυννοριακή μεταφορά αερομεταφερόμενων MPs. Για παράδειγμα, ο καλοκαιρινός μουσώνας της Ανατολικής Ασίας μπορεί να μεταφέρει μερικούς από τους ατμοσφαιρικούς MPs από το Βιετνάμ στη νοτιοανατολική Κίνα μέσω των Φιλιππίνων και της Μαλαισίας. Οι Rezaei et al., (2022) παρατήρησαν ότι υπήρχε μια μεγάλη συγκέντρωση MPs στα διαβρωμένα από τον άνεμο ιζήματα φυσικών και γεωργικών εδαφών σε αναλογία 2,83–7,63 (περιεκτικότητα MPs στο διαβρωμένο υλικό προς εκείνη στο αρχικό έδαφος), υποδηλώνοντας βασικό ρόλο στη μεταφορά ατμοσφαιρικών MPs με τον άνεμο. Οι Brahney et al. (2020) ανέφερε την ευαισθησία των MPs στην αιολική παρέμβαση λόγω υγρής και ξηρής εναπόθεσης.

Τα αερομεταφερόμενα MPs τείνουν να έχουν πυκνότητες χαμηλότερες από τα ορυκτά του εδάφους και ως εκ τούτου τα σωματίδια σκόνης MPs παραμένουν στον αέρα για παρατεταμένη περίοδο σε σύγκριση με φυσικά συσσωματώματα σκόνης ίδιου μεγέθους, τα οποία διευκολύνουν τη μεταφορά τους σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Έτσι, η ατμόσφαιρα είναι ένα πιθανό μέσο για τη μεταφορά των MPs σε ευρύτερα μεγάλες γεωγραφικές περιοχές όπου ευδοκούν ορισμένοι τύποι φυτών και ζώων: επίγεια, υδάτινα και εναέρια.

Οι αλληλεπιδράσεις αέρα-θαλάσσης διαμορφώνονται από τη νέφωση και τους μετεωρολογικούς παράγοντες, οι οποίοι παίζουν ρόλο στην παγκόσμια μεταφορά ατμοσφαιρικών σωματιδίων. Τα ατμοσφαιρικά ρεύματα είναι εξίσου σημαντικά με τα ωκεάνια ρεύματα στην παγκόσμια μεταφορά MPs. Η πίεση του ανέμου και ο θαλάσσιος ψεκασμός σχηματίζουν αερολύματα θαλάσσιου αλατιού και MPs (<0,2 έως >2000 μm) διασπείροντας τα σωματίδια της επιφάνειας της θάλασσας σε αστικές περιοχές κοντά στις ακτές, οι οποίες μπορεί επίσης να έχουν ένα δικό τους φορτίο σε MPs, που παραμένει σε

μεγάλο βαθμό άγνωστο. Οι Liu et al. (2019) παρείχαν αποδεικτικά στοιχεία για την ατμοσφαιρική μεταφορά MPs από το χερσαίο στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Μέσω συνεχούς δειγματοληψίας αιωρούμενων ατμοσφαιρικών MPs στον δυτικό Ειρηνικό Ωκεανό, στη προαναφερόμενη μελέτη παρατηρήθηκαν αερομεταφερόμενα MPs με σταθερή μορφολογία και σύνθεση, με υψηλή αφθονία στην ατμόσφαιρα κατά μήκος των ακτών ($0,13 \pm 0,24$ στοιχεία m^{-3}) σε αντίθεση με την πελαγική περιοχή ($0,01 \pm 0,01$ τεμάχια m^{-3}), που απέδειξε σημαντική ατμοσφαιρική μεταφορά MPs στο θαλάσσιο περιβάλλον (Liu et al, 2019).

Ωστόσο, μια άλλη μελέτη των Liu et al. (2020) βρήκε ασυνέπεια στα μεγέθη και στη σύνθεση των MPs μεταξύ των αερολυμάτων και της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης, υποδηλώνοντας μόνο μικρή ατμοσφαιρική μεταφορά στον ωκεανό σε αντίθεση με τις εισροές των ποταμών.

Οι Bergmann et al., (2019) εντόπισαν MPs από το πολικό χιόνι, υποδηλώνοντας σημαντική ρύπανση στην ατμόσφαιρα της Αρκτικής.

Οι συγγραφείς υπέδειξαν το μηχανισμό συγκέντρωσης MPs ως ένα σημαντικό μονοπάτι όπου τα MPs μπορούν να μεταφερθούν μέσω της ατμόσφαιρας, να περάσουν μέσα από σύννεφα, να δεσμευτούν με το χιόνι και να εναποτεθούν στην τούνδρα.

Οι Klein και Fischer (2019) διαπίστωσαν ότι οι ατμοσφαιρικές μεταφορές ήταν υπεύθυνες για την αυξημένη συσσώρευση θραυσμάτων MPs στις αγροτικές περιοχές, τα ελατοδάση και τις αστικές περιοχές του Αμβούργου της Γερμανίας. Επίσης επισήμαναν ότι τα MPs (κυρίως $<200 \mu m$ θραύσματα PA και ίνες) που υπάρχουν σε παρόχθια επιφανειακά εδάφη και υποεπιφανειακά εδάφη απομακρυσμένων βουνών κατά μήκος του ποταμού Yangtze στην Κίνα θα μπορούσαν να έχουν μεταφερθεί με ατμοσφαιρική εναπόθεση μαζί με την επιφανειακή απορροή του δρόμου και την απόρριψη λυμάτων.

Οι Selvam et al. (2020) εντόπισαν φυσικά και συνθετικά MPs από τα δείγματα θαλάσσιου αλατιού της ακτής Tuticorin (Tamilnadu) στην Ινδία. Αν και η μελέτη επικεντρώθηκε κυρίως στην καθίζηση και την επαναιώρηση από τον ωκεανό, οι συγγραφείς δεν μπορούσαν να αγνοήσουν την ατμοσφαιρική μεταφορά ως πιθανή οδό μετάδοσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

3.1 Υδάτινο περιβάλλον

Οι ποσότητες το μικροπλαστικών στον ωκεανό είναι συνεχώς αυξανόμενες. Κατά δήλωσή του ΟΗΕ το 2017, 51 τρισεκατομμύρια μικροπλαστικά βρέθηκαν στις θάλασσες, εισχωρώντας έτσι στην τροφική αλυσίδα. Μικροπλαστικά έχουν βρεθεί στα φαγητά και σε ποτά όπως είναι το νερό και η μπίρα. Μικροπλαστικά έχουν βρεθεί προσφάτως και σε ανθρώπινα περιπτώματα. Το ευρωπαϊκό κοινοβούλιο το 2018 θέσπισε νέους κανόνες για την αύξηση της ανακύκλωσης των πλαστικών απορριμμάτων και επιπρόσθετα κάλεσε την Ευρωπαϊκή επιτροπή να απαγορεύσει τα μικρά πλαστικά σε προϊόντα καλλυντικών και απορρυπαντικών μέχρι το 2020 αλλά και νέα μέτρα για την μείωση της απελευθέρωσης μικρό πλαστικών από την κλωστοϋφαντουργία, τα χρώματα και τα τσιγάρα. Επίσης υποστήριξε να απαγορευτεί η χρήση πλαστικών μίας χρήσης για την συχνά καταλήγουν στη θάλασσα (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2018).

Τα μικροπλαστικά ορίστηκαν ως πλαστικά σωματίδια με μεγέθη μικρότερα από 5 mm, τα οποία μπορούν να προέρχονται από την αποσύνθεση μεγάλων πλαστικών προϊόντων ή να παραχθούν απευθείας από τους κατασκευαστές. Ως αναδυόμενος ρύπος, οι εμφανίσεις και οι συμπεριφορές των μικροπλαστικών σε διαφορετικούς περιβαλλοντικούς τομείς προσελκύουν αυξανόμενη προσοχή. Τα συστήματα γλυκού νερού όπως το νερό των ποταμών και το νερό της λίμνης, είναι σημαντικοί φορείς μικροπλαστικών, όπου μικροπλαστικά από διαφορετικές πηγές συγκεντρώνονται και μεταφέρονται με τις ροές νερού, καταλήγοντας σε θαλάσσια συστήματα. Ωστόσο, η εμφάνιση μικροπλαστικών στα αστικά νερά θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο τόσο τους υδρόβιους οργανισμούς όσο και τους ανθρώπους. Για παράδειγμα, οι υδρόβιοι μικροοργανισμοί μπορούν να καταναλώσουν μικροπλαστικά απευθείας ή μέσω θηραμάτων που περιέχουν MPs, κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της κατανάλωσης θρεπτικών ουσιών και μείωση της αναπαραγωγικής ικανότητας ή ακόμη σε ορισμένες περιπτώσεις στον θάνατο.

Επιπλέον, τα μικροπλαστικά θα μπορούσαν επίσης να περάσουν από τη συμβατική διαδικασία επεξεργασίας του πόσιμου νερού και να αποβάλουν τοξικές οργανικές ουσίες κατά την απολύμανση, απειλώντας τη δημόσια υγεία. Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας να εντοπιστούν πλήρως οι πιθανές πηγές που συμβάλλουν στη μικροπλαστική ρύπανση στα ύδατα και να ληφθούν μέτρα για την εξάλειψη της απελευθέρωσης μικροπλαστικών από διαφορετικές πηγές.

Προηγούμενες μελέτες πρότειναν ότι η μονάδα επεξεργασίας λυμάτων (WWTP) είναι μια σημαντική οδός για την απελευθέρωση μικροπλαστικών στα ύδατα. Επιπλέον, η αστική απορροή αναγνωρίστηκε επίσης ως πιθανή πηγή για τη μεταφορά μικροπλαστικών σε ποτάμια και λίμνες. Πιο πρόσφατα, μελέτες έδειξαν ότι τα μικροπλαστικά θα μπορούσαν να αιωρούνται στην ατμόσφαιρα με σημαντική αφθονία και για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Έχει αναφερθεί ότι οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα αστικών κέντρων μπορεί να ποικίλουν από ~1 σωματίδιο/m³ έως 35 σωματίδια/m³. Μερικοί ερευνητές υπέθεσαν ότι τα μικροπλαστικά μπορούν να παρασυρθούν στην ατμόσφαιρα μέσω μηχανικών διεργασιών όπως η κίνηση των ελαστικών του οχήματος, τα ισχυρά φαινόμενα ανέμου και ο ψεκασμός στη θάλασσα (Brahney et al., 2020).

Σύμφωνα με διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες, η ατμοσφαιρική εναπόθεση μικροπλαστικών θα μπορούσε να χωριστεί σε ξηρή και υγρή απόθεση. Ωστόσο, το εάν το γεγονός της βροχής θα επηρεάσει την εναπόθεση μικροπλαστικών είναι πάντα υπό συζήτηση. Μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε μια απομακρυσμένη λεκάνη απορροής (Huai River Basin) συντήρησης διαπίστωσε ότι η βροχόπτωση έδειξε μέτρια έως σημαντική συσχέτιση με τις ροές εναπόθεσης μικροπλαστικών. Ενώ για τις αστικές περιοχές, μια σύντομη επικοινωνία των Klein et al. (2019) πρότεινε ότι η εναπόθεση μικροπλαστικών δεν έδειξε σημαντική συσχέτιση με τη βροχόπτωση, αλλά συσχετίστηκε με την ταχύτητα του ανέμου.

Ωστόσο, μια πρώιμη μελέτη των Dris et al. (2015) που πραγματοποιήθηκε στο Παρίσι (Γαλλία) πρότεινε ότι τα γεγονότα της βροχής μπορεί να προάγουν την εναπόθεση μικροπλαστικών σε αστικές περιοχές. Στην πραγματικότητα, η αφθονία των ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών θα μπορούσε να επηρεαστεί σημαντικά από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Τα χαρακτηριστικά ρύπανσης των μικροπλαστικών στις αστικές περιοχές μπορεί να διαφέρουν από τις απομακρυσμένες περιοχές, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά πρότυπα εναποθέσεων. Ως εκ τούτου, η ατμοσφαιρική εναπόθεση μικροπλαστικών σε αστικές περιοχές θα πρέπει να διερευνηθεί μεμονωμένα για να κατανοηθούν τα χαρακτηριστικά ρύπανσης και να υπολογιστεί πώς τα γεγονότα της βροχής επηρέασαν τη ροή εναπόθεσης. Επίσης, αξίζει τον κόπο να εντοπιστούν πιθανοί παράγοντες ή δείκτες που μπορεί να συσχετίζονται με τη ροή εναποθέσεων μικροπλαστικών, για να αξιολογηθεί πώς η ατμοσφαιρική εναπόθεση συνέβαλε στη ρύπανση από μικροπλαστικά στα αστικά συστήματα νερού.

Άλλα ευρήματα αναφέρουν ότι τα πλαστικά απορρίμματα στη θάλασσα $\mu\mu\mu$ προέρχονται από την αλιεία (από τα πλαστικά δίχτυα) καθώς και από τον θαλάσσιο τουρισμό. Οι ξενοδοχειακές εγκαταστάσεις σε παράκτιες περιοχές οδηγούν σε μεγάλες ποσότητες πλαστικών απορριμμάτων τα οποία συσσωρεύονται στην επιφάνεια της θάλασσας, στο βυθό και στις ακτές.

Εκτιμάται ότι το 70% των πλαστικών βυθίζονται λόγω βάρους και δημιουργούν ιζήματα στο βυθό (Hammer et al, 2012).

Η πλειονότητα των πλαστικών είναι ανθεκτικά στη βιοδιάσπαση και με τη UV-A ακτινοβολία, τις υψηλές θερμοκρασίες και την τριβή κατακερματίζονται σε μικροπλαστικά. Εκτιμάται ότι υπάρχουν 200.000 μικροπλαστικών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο επιφάνειας ωκεανού. Τα μικροπλαστικά μπορούν να εισέλθουν σε λίμνες, ποτάμια, περιφερειακές θάλασσες και ωκεανούς λόγω υπερχειλίσης στην επεξεργασία λυμάτων, ειδικά όταν υπάρχουν ισχυρές βροχοπτώσεις (Ivar do Sul, 2014).

Τα θηλαστικά των θαλασσών καθώς και τα πουλιά πλήττονται από την κατάποση μικροπλαστικών. Μελέτες εστιάζουν στην απορροφητικότητα μικροπλαστικών και από το πλαγκτόν που εν συνεχεία εισέρχεται στην τροφική αλυσίδα. Γίνεται έκπλυση τοξικών ουσιών που βιοσυσσωρεύονται και απειλούν την τροφική αλυσίδα με σοβαρές επιπτώσεις σε θαλάσσιους και μη θαλάσσιους οργανισμούς και στον άνθρωπο (Koelmans et al, 2014).

Τα μικροπλαστικά αποτελούν τον κυρίαρχο ρύπο των θαλασσών. Στο οικοσύστημα “Laurentian Great Lakes ecosystem” μεταξύ Καναδά και ΗΠΑ βρέθηκαν έως και 450.000 μικροπλαστικά ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο λόγω ρευμάτων και υπερχειλίσης λυμάτων (Eriksen, 2013). Επιπλέον τα μικροπλαστικά έχουν τη δυνατότητα να απορροφούν έμμονους οργανικούς χημικούς ρύπους.

Μικροπλαστικά από 0 έως 1,5 mm υπάρχουν σε όλα τα επίπεδα της τροφικής αλυσίδας διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στη χαμηλή τροφική πανίδα, με άγνωστες συνέπειες. Σε μια έρευνα ζωοπλαγκτού στη Μεσόγειο θάλασσα, βρέθηκαν μικροπλαστικά από 0,3 έως 5mm με διάφορες μορφές (Collignon et al., 2012).

Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται στην παραγωγή πολλών πλαστικών είναι τα σωματίδια πλαστικής ρητίνης (pellet 2mm-5mm) τα οποία έχουν ανευρεθεί παγκοσμίως σε θαλάσσια ύδατα ακόμη και σε παραλίες με άμμο. Η διαρροή τους συνέβη κατά τη μεταφορά τους προς τα εργοστάσια (ίσως από λάθος χειρισμό) και βρέθηκαν σε πολλές αμμώδεις παραλίες. Σφαιρίδια πολυαιθυλενίου βρέθηκαν και σε πίσσα στη Μεσόγειο θάλασσα. Τα pellet στις παραλίες ήταν κυρίως ίνες καθώς και ακρυλικά υποδηλώνοντας ότι προέρχονται από λύματα και λύματα πλυντηρίων. Το 80% των δειγμάτων περιείχαν PVC, πολυαμίδια και πολυεστέρες. Τα τελευταία περίπου 20 χρόνια η μικροπλαστική ρύπανση έχει τριπλασιαστεί (Hidalgo-Ruz et al., 2012).

Δείγματα ιζήματος από πολύ βαθιά νερά σε παγκόσμια κλίμακα αναλύθηκαν για την παρουσία μικροπλαστικών με χρήση άλατος υψηλής πυκνότητας και τα αποτελέσματα έδειξαν την παρουσία μικρό πλαστικών στον πυθμένα και τη στήλη νερού (έννοια που χρησιμοποιείται στην ωκεανογραφία για να περιγράψει τα φυσικά (θερμοκρασία, αλατότητα, δειξοδυσση φωτός) και χημικά

χαρακτηριστικά θαλασσινού νερού (pH, διαλυμένο οξυγόνο, θρεπτικά άλατα) για διαφορετικά βάθη και για ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο). Έρευνες έδειξαν πως τα μικροπλαστικά κατανέμονται στη στήλη του νερού στα ιζήματα και στα βαθιά νερά με υψηλότερες συγκεντρώσεις στις ακτές που έχουν μεγάλη επισκεψιμότητα.

Έχουν παρατηρηθεί συγκεντρώσεις μικροπλαστικών στον πάγο της αρκτικής που αποδεικνύουν τη συσσώρευσή τους μακριά από πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Μελέτες έχουν ασχοληθεί με τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών σε ψάρια και ασπόνδυλα όπως και με τη μεταφορά τοξικών ουσιών και τη βιοσυσσώρευση, την έκπλυση ουσιών όπως οι φθαλικές ενώσεις καθώς και για προβλήματα υγείας. Η ανησυχία των επιστημόνων εμφανίστηκε όταν βρέθηκαν πλαστικά μέσα στο στομάχι ψαριών του Ειρηνικού ωκεανού. Αποδείχτηκε πως το μέγεθος των ψαριών έπαιζε σημαντικό ρόλο στην ποσότητα των ανευρεθέντων πλαστικών, δηλαδή όσο μεγαλύτερα ήταν τα ψάρια τόσο μεγαλύτερη ήταν και η ποσότητα των πλαστικών σε αυτά. Η πλειονότητα των καταποθέντων ήταν συνθετικές-τεχνητές ίνες (βλέπε εικόνα 3) (Lusher et al, 2013).



Εικόνα 3: Μικροπλαστικά στο πεπτικό σύστημα των ψαριών. (Possato et al, 2011)

3.2 Ατμόσφαιρα

Στον αέρα, μπορούν να βρεθούν διάφορα είδη ινών. Οι ίνες μπορεί να είναι είτε φυσικές είτε ανθρωπογενείς. Οι τεχνητές ίνες μπορούν επίσης να ταξινομηθούν ως ανόργανες (άνθρακες, κεραμικές, γυαλί) ή οργανικές. Στην τελευταία αυτή κατηγορία, οι οργανικές ίνες παράγονται με μετασχηματισμό φυσικών προϊόντων (τεχνητές ίνες) ή από συνθετικά πολυμερή. Σε όλο τον κόσμο, περισσότεροι από 90 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι υφαντικών ινών παρήχθησαν το 2016. Τα δύο τρίτα αυτής της παραγωγής είναι συνθετικές, πλαστικές ίνες και τα ποσοστά παραγωγής αυξάνονται ετησίως με ρυθμό περίπου 6,6% την τελευταία δεκαετία. Άλλες ίνες περιλαμβάνουν κυτταρινικές

ίνες (6%) και φυσικές ίνες (27%, κυρίως βαμβάκι). Η εμπορική χρήση πλαστικών ινών λεπτής διαμέτρου (1–5 μm) έχει επίσης αυξηθεί, όπως στη βιομηχανία αθλητικών ενδυμάτων. Αυτές οι μικρές ίνες μπορεί να απορρίπτονται και να απελευθερώνονται άμεσα ή έμμεσα καθώς φθείρονται τα ρούχα ή κατά το πλύσιμο ή/και το στέγνωμα. Επιπλέον, ο βιομηχανικός τεμαχισμός ή άλεση συνθετικού υλικού μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό λεπτών σωματιδίων. Τα ινώδη MPs μπορεί επίσης να υποστούν φωτοοξειδωτική αποικοδόμηση στο περιβάλλον, μαζί με διάτμηση του ανέμου ή/και τριβή έναντι άλλων σωματιδίων του περιβάλλοντος, που τελικά κατακερματίζονται σε λεπτά σωματίδια. Ο κίνδυνος εισπνοής ινωδών MPs μετά από εκτεταμένη μόλυνση σε διαφορετικά μέρη αξίζει ιδιαίτερης προσοχής, τόσο λόγω της κλίμακας της παγκόσμιας παραγωγής τους όσο και λόγω της δυνατότητάς τους να κατακερματίζονται σε μικρότερες, πιο βιοδιαθέσιμες ίνες. Η ανθρώπινη έκθεση σε MPs θα μπορούσε επίσης να συμβεί μέσω της κατάποσης, για παράδειγμα τα ινώδη MPs μπορούν να καθίσουν στο πάτωμα. Τα παιδιά – λόγω ερπυσμού και συχνής επαφής χέρι με στόμα – καταπίνουν σκόνη σε καθημερινή βάση (Dris et al, 2017).

Μέχρι σήμερα, και από όσο είναι γνωστό μόνο δύο μελέτες έχουν αποδείξει την παρουσία ινωδών MPs στο ατμοσφαιρικό διαμέρισμα, υποδηλώνοντας έτσι πιθανή ανθρώπινη έκθεση. Μια προηγούμενη μελέτη τόνισε την ύπαρξη αναπνεύσιμων οργανικών ινών στο εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον, αλλά δεν έκανε διάκριση μεταξύ φυσικών και συνθετικών υλικών. Ενώ άλλες μελέτες έχουν προτείνει την εμφάνιση ατμοσφαιρικών MPs, δεν παρασχέθηκαν άμεσα στοιχεία.

Αξιολογήθηκε η παρουσία ινωδών MPs στη συνολική ατμοσφαιρική εναπόθεση (“Total Atmospheric Fallout”, TAF) - συμπεριλαμβανομένης της ξηρής και υγρής εναπόθεσης) σε μια αστική και σε μια προαστιακή τοποθεσία του Παρισιού. Η συνολική ατμοσφαιρική εναπόθεση (TAF) συγκεντρωνόταν συνεχώς στις στέγες των κτιρίων. Το ινώδες υλικό αντιπροσώπευε σχεδόν όλο το υλικό που συλλέχτηκε, ενώ το υπόλοιπο ήταν σπάνια μικρά πλαστικά θραύσματα (μικρότερα από 100 μm). Με βάση μια περίοδο παρακολούθησης 1 $\frac{1}{2}$ έτους, αντίστοιχα και στις δύο τοποθεσίες, υπολογίστηκε ότι η συγκέντρωση των ινών ήταν μεταξύ 2 και 355 /·m³ /·ημέρα. Οι ροές TAF ήταν συστηματικά υψηλότερες στην αστική τοποθεσία από ότι στην προαστιακή, πιθανώς συνδεδεμένη με την πυκνότητα του γύρω πληθυσμού. Οι βροχοπτώσεις φαίνεται επίσης να είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη ροή των θραυσμάτων. Παρά την απουσία σημαντικής ποσοτικής συσχέτισης μεταξύ των συγκεντρώσεων των ινών και των χαρακτηριστικών των γεγονότων βροχής (βάθος βροχόπτωσης, ένταση, κ.λπ.), η συνολική ατμοσφαιρική εναπόθεση (TAF) κατά τις περιόδους υγρών καιρικών συνθηκών είναι πάντα σημαντικά μεγαλύτερο από ό,τι κατά τις περιόδους χωρίς βροχοπτώσεις. Μετά τον χημικό χαρακτηρισμό, φάνηκε ότι το 29% των ινών που αξιολογήθηκαν από τη TAF ήταν πλαστικές, με την πλειοψηφία να

είναι από κυτταρίνη ή φυσικής προέλευσης. Αξιολογήθηκε η κατανομή μήκους των ινών που συλλέχθηκαν μεγαλύτερες από 50 μm . Κατά τη μέτρηση του μήκους των ινών, οι μικρότερες κατηγορίες μεγεθών [200–400 μm] και [400–600 μm] ήταν κυρίαρχες, ενώ οι ίνες στις μεγαλύτερες σειρές μεγεθών ήταν σπάνιες. Έχουν ανιχνευθεί λίγες ίνες μήκους μεταξύ 50 μm (όριο παρατήρησης) και 200 μm . Η διάμετρος των ινών κυμαινόταν κυρίως μεταξύ 7 και 15 μm (Gasperi et al, 2018).

Στη συνέχεια ερευνήθηκαν οι ίνες στον αέρα εξωτερικού και εσωτερικού χώρου, καθώς και την καθιζόμενη σκόνη εσωτερικού χώρου. Τρεις χώροι που περιλαμβάνουν δύο διαμερίσματα και ένα γραφείο επιλέχθηκαν σε μια πυκνή αστική περιοχή του Παρισιού. Έγινε δειγματοληψία εξωτερικού αέρα σε κοντινή απόσταση από το χώρο του γραφείου, όπου γινόταν επίσης η παρακολούθηση της TAF. Μια αντλία έλαβε δείγμα 8 λίτρων/λεπτό αέρα εσωτερικού χώρου σε φίλτρα από ίνες χαλαζία (1,6 μm). Οι όγκοι των δειγμάτων διέφεραν ανάλογα με την παρουσία των επιβατών. Η ίδια μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του εξωτερικού αέρα. Συνολικά, οι συγκεντρώσεις σε εσωτερικούς χώρους κυμαίνονταν από 1,0 έως 60 $\text{ίνες}\cdot\text{m}^{-3}$. Οι εξωτερικές συγκεντρώσεις ήταν σημαντικά χαμηλότερες, κυμαινόμενες μεταξύ 0,3 και 1,5 $\text{ίνών}\cdot\text{m}^{-3}$. Ο ρυθμός εναπόθεσης των ινών στα εσωτερικά περιβάλλοντα κυμαινόταν μεταξύ 1.586 και 11.130 $\text{ίνών}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{ημέρα}$. Η σκόνη συλλέχθηκε χρησιμοποιώντας μια συμβατική ηλεκτρική σκούπα και η ανάλυση αποκάλυψε μια συγκέντρωση ινών που κυμαίνεται από 190 έως 670 ίνες/ml (Gasperi et al, 2018).

Σύμφωνα με τον χημικό χαρακτηρισμό, το 67% των ινών εσωτερικού χώρου ήταν κατασκευασμένα από φυσικό υλικό, κυρίως από κυτταρίνη ενώ το υπόλοιπο 33% των ινών περιείχε πετροχημικά με κυρίαρχο το πολυπροπυλένιο. Παρόμοια κατανομή μεγέθους προσδιορίστηκε για τον εσωτερικό αέρα, τον εξωτερικό αέρα και της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης (TAF) με μικρές διαφορές. Αυτές οι διαφορές μεταξύ των διαμερισμάτων έγκεινται στο μέγεθος των μακρύτερων ινών που έχουν παρατηρηθεί: ενώ οι ίνες της τάξης των 4.650-4.850 μm μπορούν να βρεθούν στην πτώση σκόνης, δεν παρατηρείται ίνα μεγαλύτερη από 3.250 μm στον αέρα εσωτερικού χώρου, που είναι σχεδόν διπλάσιο από τις μεγαλύτερες ίνες στον εξωτερικό αέρα (1.650 μm). Μεγαλύτερες ίνες παρατηρούνται κατά την πτώση της σκόνης επειδή κατακάθονται πιο γρήγορα και συσσωρεύονται στο πάτωμα. Ενώ οι ίνες κάτω των 50 μm δεν καταμετρήθηκαν λόγω του κατώτερου ορίου παρατήρησης, το μοτίβο κατανομής μεγέθους υποδηλώνει ότι ενδέχεται να υπάρχουν πολύ μικρότερες ίνες (Gasperi et al, 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Η ατμόσφαιρα αποτελεί έναν τεράστιο χώρο συσσώρευσης μικροπλαστικών και τα μικροπλαστικά μπορεί να είναι υπεύθυνα για την καταστροφή των οικοσυστημάτων και την ανάπτυξη διαφόρων προβλημάτων στους οργανισμούς. Εναποτίθενται στο αναπνευστικό σύστημα, στο δέρμα και στα τρόφιμα, με άγνωστες συνέπειες για την ανθρώπινη υγεία. Ίνες μέχρι 250 nm έχουν ανευρεθεί στο ανθρώπινο αναπνευστικό σύστημα και οι μικροπλαστικές ίνες (μεγέθους από 200nm έως 600nm) αποτελούν κίνδυνο για τον ευπαθή πληθυσμό (Dris et al., 2017).

Παρακολουθώντας την ποιότητα του αέρα στο εσωτερικό περιβάλλον όπου οι άνθρωποι είναι πιο πιθανό να εκτεθούν, και υπολογίζοντας τον ανθρώπινο παλιρροϊκό όγκο στα 6 λίτρα ανά λεπτό, προκύπτει ότι το κατώτερο αναπνευστικό σύστημα του ανθρώπου μπορεί να εκτεθεί από 26 μέχρι 130 τεμάχια αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών την ημέρα. Αυτό θέτει σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και συγκεκριμένα τις ευπαθείς ομάδες όπως είναι τα παιδιά και τα άτομα που πάσχουν από χρόνιες αναπνευστικές ασθένειες. Αυτό συμβαίνει γιατί τα μικροπλαστικά αλληλοεπιδρούν με οργανικές ύλες λόγω της μεγάλης επιφάνειά τους και επιπλέον είναι δύσκολη η απομάκρυνση των πολυμερών από το αναπνευστικό σύστημα και ιδίως των ινών. Επίσης επιβαρύνεται η υγεία λόγω απελευθέρωσης επικίνδυνων ουσιών όπως είναι οι πλαστικοποιητές από την επιφάνειά τους (Gasperi et al., 2015; Chang, 2010).

Καθώς οι συγκεντρώσεις στο εξωτερικό περιβάλλον είναι χαμηλότερες από τις συγκεντρώσεις στο εργασιακό περιβάλλον, οι ασθένειες που προέρχονται από φλεγμονώδεις αντιδράσεις θα είναι λιγότερο σοβαρές και η απειλή για νεοπλασματική νόσο θα είναι μικρότερη στο γενικότερο πληθυσμό. Παρόλα αυτά, η έκθεση σε αερομεταφερόμενα νανοσωματίδια ενδέχεται να προκαλέσει καρδιαγγειακή νόσο, αλλεργίες και αυτοάνοσα νοσήματα (Borm, 2002).

Συγκεντρώσεις χαμηλές όπως τα 40 mg/m³ αέρα μπορούν να προκαλέσουν ξαφνικό θάνατο σε ασθενείς με άσθμα και καρδιοαναπνευστική νόσο, ωστόσο η έκθεση σε αντίστοιχες συγκεντρώσεις αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών μπορεί να επιτευχθεί μόνο σε εργασιακό περιβάλλον.

Τα πλαστικά εμπεριέχουν μονομερή και πρόσθετα χημικά τα οποία θεωρούνται ενδοκρινικοί διαταράκτες. Έχουν ήδη ανιχνευτεί στο ανθρώπινο σώμα και στα ανθρώπινα υγρά σε συγκεντρώσεις μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες καθώς και γαστρεντερικό σύστημα γεγονός που οδηγεί στο

συμπέρασμα ότι πιθανότατα εισχώρησαν στο ανθρώπινο σώμα δια μέσω της εισπνοής (Thompson et al., 2009).

Η πιθανότητα να εισέλθουν αερομεταφερόμενα ινώδη MPs στο αναπνευστικό σύστημα θα εξαρτηθεί από το μέγεθος. Είναι σημαντικό να γίνει η διάκριση μεταξύ των όρων εισπνεύσιμο και αναπνεύσιμο. Τα σωματίδια και οι ίνες που μπορούν να εισέλθουν στη μύτη και στο στόμα και να εναποτίθενται στον ανώτερο αναπνευστικό σύστημα καλούνται εισπνεύσιμα, ενώ εκείνα που εναποτίθενται στο κατώτερο αναπνευστικό καλούνται αναπνεύσιμα. Η εναπόθεση στον αεραγωγό είναι συνάρτηση της αεροδυναμικής διαμέτρου, δηλαδή σωματίδια με αεροδυναμική διάμετρος μεγαλύτερη από 5 μm .

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας ορίζει ως ίνα κάθε σωματίδιο που έχει μήκος $>5 \mu\text{m}$, διάμετρο $<3 \mu\text{m}$ και αναλογία διαστάσεων (μήκος προς διάμετρο) $> 3:1$. Τα ινώδη MPs που υπερβαίνουν αυτά τα κριτήρια μπορεί να εισπνευστούν, αλλά είναι πιθανό να υποβληθούν σε βλεννογόνο κάθαρση από το ανώτερο αναπνευστικό, οδηγώντας σε γαστρεντερική έκθεση. Ορισμένα ινώδη MPs μπορούν ωστόσο να αποφεύγουν τους μηχανισμούς βλεννογονοειδούς κάθαρσης του πνεύμονα, ειδικά σε άτομα με μειωμένους μηχανισμούς κάθαρσης.

Το πλαστικό είναι υλικό αδρανές, όμως οι ίνες του (και ειδικά εκείνες που έχουν μεγαλύτερο μήκος) μπορούν να προκαλέσουν φλεγμονώδεις αντιδράσεις μετά από μακροχρόνια έκθεση. Η φλεγμονή οδηγεί σε γενοτοξικότητα γιατί συνεχώς σχηματίζονται ελεύθερες ρίζες οξυγόνου. Έτσι αυξάνεται η πιθανότητα πνευμονικής ίνωσης και καρκίνου (Mossman et al. 2007).

Η βιο-ανθεκτικότητα των εισπνεόμενων ινών MPs σχετίζεται με την ανθεκτικότητα και τη δυνατότητα κάθαρσης από τον πνεύμονα. Οι δοκιμές *in vitro* έδειξαν ότι οι πλαστικές ίνες είναι εξαιρετικά ανθεκτικές στο φυσιολογικό υγρό: οι ίνες πολυπροπυλενίου, πολυαιθυλενίου και πολυανθρακικού δεν έδειξαν σχεδόν καμία διαλυτότητα ή αλλαγή στην επιφάνειά τους και τα χαρακτηριστικά σε ένα συνθετικό εξωκυτταρικό πνευμονικό υγρό μετά από 180 ημέρες. Αυτό υποδηλώνει ότι οι πλαστικές ίνες είναι ανθεκτικές και είναι πιθανό να επιμείνουν στον πνεύμονα. Η παραμονή στους βιολογικούς ιστούς συνδέεται επίσης με το μήκος, οι μακρύτερες παραμένουν περισσότερο (Mossman et al. 2007).

Πλαστικές ίνες έχουν παρατηρηθεί στον πνευμονικό ιστό, υποδηλώνοντας ότι οι πλαστικές ίνες μπορούν να διεισδύσουν στον κατώτερο αναπνευστικό. Η ιστοπαθολογική ανάλυση βιοψιών πνεύμονα από εργαζόμενους στην κλωστοϋφαντουργία (πολυαμίδιο, πολυεστέρας, πολυολεφίνη και ακρυλικό) έδειξε κοκκιωματώδεις βλάβες που περιείχαν ξένο σώμα, και υποτίθεται ότι είναι σκόνη ακρυλικού, πολυεστέρα ή/και νάιλον. Αυτές οι παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν ότι ορισμένες ίνες αποφεύγουν τους μηχανισμούς κάθαρσης. Μελέτες μεταξύ των εργαζομένων σε βιομηχανίες παραγωγής νάιλον (ίνες)

δείχνουν ότι δεν υπάρχουν ενδείξεις αυξημένου κινδύνου καρκίνου, αν και οι εργαζόμενοι είχαν υψηλότερο επιπολασμό αναπνευστικού ερεθισμού. Η διάμεση πνευμονοπάθεια είναι μια κατάσταση που σχετίζεται με την εργασία προκαλώντας βήχα, δύσπνοια και μειωμένη πνευμονική ικανότητα σε εργαζόμενους που επεξεργάζονται είτε παρα-αραμιδικές, πολυεστερικές ή/και ίνες νάιλον. Οι εργαζόμενοι παρουσιάζουν επίσης κλινικά συμπτώματα παρόμοια με την αλλεργική κυψελίτιδα. Αυτά τα αποτελέσματα για την υγεία είναι ενδεικτικά της δυνατότητας των MPs να πυροδοτήσουν τοπικές βιολογικές αποκρίσεις, δεδομένης της πρόσληψης και της παραμονής τους στον ανθρώπινο οργανισμό (Gasperi et al, 2018).

Ενώ αυτές οι επιπτώσεις είναι διαφορετικές από αυτές που παρατηρούνται μετά την έκθεση στον αμίαντο, η γνώση της τοξικολογίας του αμίαντο μπορεί εν μέρει να βοηθήσει στην πρόβλεψη των επιπτώσεων στην υγεία των ινών MPs. Στις ίνες με βάση το πυριτικό άλας, το μήκος και η βιοαντίσταση στον αεραγωγό/πνεύμονα είναι τα χαρακτηριστικά που διέπουν την τοξικότητα και τους μηχανισμούς αυτής της τοξικότητας. Το αν ισχύει το ίδιο και για τους ινώδεις ρύπους μένει να διαπιστωθεί.

4.1 Επιδράσεις σωματιδίων : φλεγμονή και δευτερογενής τοξικότητα

Πέρα από ένα ορισμένο επίπεδο έκθεσης/δόση, όλες οι ίνες φαίνεται να προκαλούν φλεγμονή μετά από χρόνια έκθεση. Το γενικό παράδειγμα για την τοξικότητα των ινωδών σωματιδίων, που βασίζεται στον αμίαντο και τις ανθρωπογενείς υαλώδεις ίνες είναι ότι κατά την επαφή με τα κύτταρα, απελευθερώνονται ενδοκυτταρικοί αγγελιοφόροι και κυτταροτοξικοί παράγοντες που οδηγούν σε φλεγμονές των πνευμόνων. Αυτό δυνητικά οδηγεί σε δευτερογενή γονοτοξικότητα μετά τον υπερβολικό και συνεχή σχηματισμό δραστικών ριζών οξυγόνου (ROS). Η ίνωση και σε ορισμένες περιπτώσεις ο καρκίνος μπορεί να εκδηλωθεί μετά από παρατεταμένη φλεγμονή. Η τοξικότητα είναι μεγαλύτερη για τις μακρύτερες ίνες, καθώς δεν μπορούν να φαγοκυτταρωθούν επαρκώς, διεγείροντας τα κύτταρα να απελευθερώσουν φλεγμονώδεις μεσολαβητές που συμβάλλουν στην ίνωση.

Έχει βρεθεί ότι μη διαλυτά σωματίδια χαμηλής τοξικότητας προκαλούν όγκους στους πνεύμονες και φλεγμονή σε αρουραίους, ωστόσο λείπουν πληροφορίες σχετικά με το εάν αυτό μεταφράζεται στους ανθρώπους. Το πλαστικό θεωρείται συνήθως αδρανές, ωστόσο η βιοαντοχή του και το σχήμα των ινωδών MPs θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε φλεγμονή.

4.2 Χημικές αντιδράσεις

4.2.1 Συναφείς προσμίξεις

Τα αερομεταφερόμενα ινώδη MPs μπορούν να μεταφέρουν ρύπους που προσροφούνται από το περιβάλλον λόγω της υδρόφοβης επιφάνειάς τους.

Σε αστικά περιβάλλοντα, όπου συνυπάρχουν με εκπομπές κυκλοφορίας, μπορεί να φέρουν PAH και μέταλλα. Στη συνέχεια, θα μπορούσαν να προκύψουν επιπτώσεις στο αναπνευστικό σύστημα μετά την εκρόφηση των σχετικών μολυσματικών ουσιών που οδηγούν (μεταξύ άλλων) σε πρωτογενή γονοτοξικότητα. Για παράδειγμα, μπορεί να προκύψουν σταθερές και ασταθείς βλάβες του DNA μετά από τον μεταβολισμό των PAH σε ινώδη MPs.

4.2.2 Οικιακοί ρύποι

Το πλαστικό μπορεί να περιέχει μονομερή, πρόσθετα και αδρανές χρωστικές ουσίες, πολλά από τα οποία θα μπορούσαν να προκαλέσουν επιπτώσεις στην υγεία, συμπεριλαμβανομένης και της αναπαραγωγικής τοξικότητας, της καρκινογένεσης και της μεταλλαξιογένεσης. Για παράδειγμα, η ρύπανση του περιβάλλοντος με οικιακή σκόνη που περιέχει πολυβρωμιωμένους διφαινυλαιθέρες ή φθαλικούς εστέρες είναι ευρέως τεκμηριωμένη σε παγκόσμια κλίμακα, πιθανώς λόγω των εκπομπών από ινώδη MPs που προκύπτουν από τη φθορά πλαστικών υφασμάτων οικιακής χρήσης (Gasperi et al, 2018).

4.3 Ασθένειες που προκαλούνται από μικροπλαστικά που αερομεταφέρονται

Οι επαγγελματικοί νόσοι που αναφέρονται φαίνεται να προκύπτουν από την τοξικότητα έπειτα από εισπνοή μικροπλαστικών. Η απόκριση των ανθρώπων στα εισπνεόμενα μικροπλαστικά εξαρτάται από την ευαισθησία και τον ατομικό μεταβολισμό και μπορεί να έχει άμεσες αντιδράσεις στους βρόγχους (όπως το άσθμα) και έμμεσες όπως κυψελίτιδα, χρόνια πνευμονία, χρόνια βρογχίτιδα και πνευμοθώρακα (Beckett, 2000).

Επαγγελματικές ασθένειες έχουν εντοπιστεί στους εργαζόμενους της κλωστοϋφαντουργικής βιομηχανίας που χρησιμοποιούν συνθετικά PVC και παρουσιάζουν προβλήματα στην αναπνευστική οδό και πνευμονοπάθεια λόγω της ερεθιστικότητας των μικροπλαστικών (Marsh et al, 1994). Έχει προκύψει θάνατος δύο ανθρώπων από αναπνευστική ανεπάρκεια μετά από χρόνια εισπνοής πολυακρυλικών σωματιδίων σε μέρη με ανεπαρκή αερισμό (Song et al, 2009). Η εισπνοή συνθετικών φαίνεται να έχει παρόμοια τοξικότητα με την εισπνοή οργανικών ινών και χρειάζεται παραπάνω έρευνα για τη θέσπιση ορίων έκθεσης. Για τη σκόνη βαμβακιού έχουν θεσπιστεί όρια έκθεσης για την εργασία τα οποία είναι $1\text{mg}/\text{m}^3$ (OSHA, 2013) και ενδεχομένως να υποδεικνύει τα αναμενόμενα όρια και για τις συνθετικές ίνες.

4.4 Μηχανισμοί τοξικότητας

Για την πλήρη κατανόηση της τοξικότητας των αερομεταφερούμενων μικροπλαστικών είναι αναγκαία η κατανόηση των μηχανισμών που εμπλέκονται ως υπεύθυνοι για την έκθεση των τμημάτων στο αναπνευστικό

σύστημα κατά την εισπνοή. Η δυσκολία του μηχανισμού κάθαρσης προκαλεί τοξικότητα από την έκθεση σε σκόνη, οξειδωτικό στρες και κυτταροτοξικότητα μετά από φλεγμονές. Πιθανολογείται πως όλα τα ανωτέρω συμβάλλουν στη δημιουργία νεοπλασματικών βλαβών. Οι επιδράσεις στον οργανισμό ενδέχεται να παρατηρούνται σε κλινικές και ιστολογικές εξετάσεις. Αφού εισχωρήσουν στον ανθρώπινο οργανισμό, τα μικροπλαστικά εναποτίθενται στον πνεύμονα γεγονός που εξαρτάται από την ανατομία του οργάνου, τη φυσιολογία των ασθενών και τις ιδιότητες που έχουν τα σωματίδια. Τα σωματίδια ομαδοποιούνται με χρήση της Αεροδυναμικής Ισοδύναμης Διαμέτρου (AED) η οποία κατηγοριοποιεί τα σωματίδια ανάλογα με την πυκνότητα και τη διάμετρο. Το πολυαιθυλένιο ως παράδειγμα, έχει χαμηλή πυκνότητα και ενδέχεται να φτάσει στους πιο κάτω αεραγωγούς. Στους άνω αεραγωγούς γίνεται εναπόθεση έπειτα από πρόσκρουση σωματιδίων που διατηρούν την ορμή τους και στους πιο μικρούς αεραγωγούς καθιζάνουν τα σωματίδια λόγω βαρύτητας όπου και διαχέονται. Οι ίνες ωστόσο, έχουν μεγαλύτερο δυναμικό διείδυσης (Carvalho et al, 2011). Επιπλέον έχουν μεγάλη επιφάνεια και δύσκολα αποβάλλονται. Αυτός είναι και ο λόγος που έχουν βρεθεί στους πνεύμονες σε διάσταση μέχρι και 250mm. Σε αντίθεση, το πεπτικό σύστημα εκτίθεται ελάχιστα (Donaldson and Tran, 2002). Επίσης, τα σωματίδια εισχωρούν, μέσω των λεμφαδένων, στο αίμα και στη συνέχεια μπορούν να επηρεάσουν άλλα όργανα (Song et al, 2009).

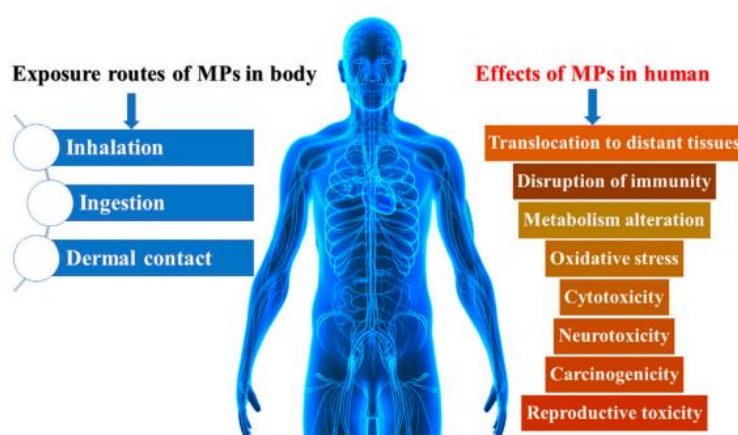
4.5 Ατμοσφαιρική ρύπανση και καρκίνος

Η ρύπανση του αέρα φαίνεται να σχετίζεται με θανάτους από καρκίνο του πνεύμονα και καρδιοπνευμονική νόσο λόγω της συσσώρευσης των ρύπων στον οργανισμό. Αν ο οργανισμός είναι ευαίσθητος ακόμα και σωματίδια χαμηλής τοξικότητας μπορούν να προκαλέσουν νόσο ειδικά εάν έχουν εξασθενήσει οι μηχανισμοί που τα αποβάλλουν (Donaldson and Tran, 2002).

Οι ανεπιθύμητες αυτές ενέργειες οφείλονται στην φλεγμονή που προκαλούν τα εισπνεόμενα σωματίδια έπειτα από απελευθέρωση πρωτεασών και κυτοκινών και δραστικές ρίζες οξυγόνου (ROS, Reactive Oxygen Species) (Schwarze et al, 2006). Η συσσώρευση σωματιδίων, το οξειδωτικό στρες και η κυτταροτοξικότητα είναι αλληλένδετες και προκαλούν φλεγμονές. Η συσσώρευση στους πνεύμονες επιβαρύνει το μηχανισμό κάθαρσης για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω απώλειας κινητικότητας των κυψελιδικών μακροφάγων, λόγω μεγάλου όγκου των σωματιδίων ή από σωματίδια μεγάλου όγκου που απελευθερώνουν τοξικούς παράγοντες που αυξάνουν τη διαπερατότητα των αγγείων (Tran et al., 2000).

Μετά από την είσοδο των μικροπλαστικών στο πεπτικό σύστημα γίνεται πρόσληψη από τα τοιχώματα του εντέρου και διαπιστώθηκε η μεταφορά τους (μετά από μελέτες σε ζώα και ανθρώπους) μέσω των τοιχωμάτων του. Κατά τη μεταφορά τους πιθανολογείται πως προσροφούν μόρια τα οποία μετακινούν προς τα επιθηλιακά κύτταρα. (Powell et al., 2010). Έτσι,

πυροδοτούνται αντιδράσεις στο ανοσοποιητικό σύστημα. Εκλύονται μονομερή και προκαλούν χρόνια τοξικότητα στον άνθρωπο. Για παράδειγμα το βινυλοχλωρίδιο έχει κατηγορηθεί για την πρόκληση καρκίνου και το στυρένιο για νευρολογικά προβλήματα. Μικροπλαστικά έχουν ανευρεθεί σε τρόφιμα, ποτά, θαλασσινά, μπίρα, ζάχαρη, αλάτι και στον αέρα επομένως ο άνθρωπος κινδυνεύει τόσο από την κατάποση όσο και από εισπνοή και από τη δερματική επαφή, με αντίστοιχες παρενέργειες. (εικόνα 4) (Dris et al., 2017).



Εικόνα 4: Πιθανοί κίνδυνοι των MPs στον άνθρωπο

Εδώ και πολλά χρόνια τα πλαστικά έχουν θεωρηθεί πως προκαλούν νεοπλασίες. Ωστόσο παλιότερα δεν υπήρχαν επαρκείς αποδείξεις. Η χρόνια φλεγμονή καθώς και ο ερεθισμός που προκαλούν τα μικροπλαστικά όταν καταναλώνονται αλλοιώνουν το DNA προκαλώντας την εμφάνιση καρκίνου. (Prata 2018). Έχει φανεί ότι τα νανοπλαστικά προκαλούν οξειδωτικό στρες αλλά και ερεθισμούς λόγω της διέγερσης των αγγείων από προφλεγμονώδεις παράγοντες και οδηγούν σε δημιουργία καρκίνου (Chang ,2010).

4.6 Τοξικές επιδράσεις στον άνθρωπο

Η παρουσία μικροπλαστικών στα θαλασσινά θέτει σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία από τη στιγμή που αποτελεί ένα σημαντικό προϊόν της διατροφής του. Η επιβάρυνση του εντερικού σωλήνα από μικροπλαστικά προκαλεί τη μεταφορά τους και σε άλλα μέρη του ανθρώπινου σώματος. Από την άλλη μεριά, οι τοξικές επιδράσεις στα ψάρια ίσως αποτελούν ένα αίτιο για τη μείωση του πληθυσμού τους, γεγονός που θέτει ένα σοβαρό πρόβλημα στους λαούς που τα ψάρια είναι η βασική τροφή τους (Kor et all, 2020).

Οίδημα αλλά και απόφραξη δημιουργούνται λόγω της βιοσυσσώρευσης των νανοπλαστικών στους ιστούς (Wright et al., 2013). In vitro βρέθηκε πως τα μικροπλαστικά συγκεντρώνονται στο μεταβολικό σύστημα και στο στομάχι των καβουριών και εν συνεχεία στα ψάρια. Μέσω αυτών φάνηκε να

μεταφέρονται και μικροοργανισμοί (Wang et al., 2016). Η έκθεση στα μικροπλαστικά έχει κατηγορηθεί για το οξειδωτικό στρες, την κυτταροτοξικότητα και τη μεταφορά τους σε διάφορους ιστούς (Galloway, 2015). Τα μικροπλαστικά, όπως προαναφέρθηκε, παραμένουν για μεγάλο χρονικό διάστημα στα οικοσυστήματα και εντός των οργανισμών προκαλώντας σοβαρές επιπτώσεις, ακόμη και τον θάνατο (Smith et al., 2018).

4.6.1 Κυτταροτοξικότητα και οξειδωτικό στρες

Μικροπλαστικά βρέθηκαν και σε ανθρώπους που νοσούν με «φλεγμονώδη νόσο του εντέρου» (Yan et al., 2021). Οι Wu et al. (2019) αναφέρθηκαν στη διτάραξη της μιτοχονδριακής μεμβράνης από τα πλαστικά και στο γεγονός ότι γίνονται φορείς μικροβίων και χημικών ουσιών από το περιβάλλον (Kelly and Fussel, 2012). Τα μεγαλύτερα τεμάχια πολυαιθυλενίου αυξάνουν την ανάπτυξη κυτοκινών που προκαλούν φλεγμονή. Ο πολυμερισμός τους προκαλεί την παραγωγή δραστικών ριζών οξυγονου. Ο συνδυασμός τους με UV-A ακτινοβολία και την ύπαρξη μετάλλων ενισχύουν κατά πολύ την ανάπτυξη ελευθέρων ριζών. Επιπλέον η γήρανσή τους δημιουργεί ελεύθερες ρίζες οξυγόνου οι οποίες αυξάνουν την οξείδωση στους ιστούς (Gewert et al., 2015). Τα νανοπλαστικά από πολυστερένιο έχει φανεί πως προκαλούν οξείδωση στα επιθηλιακά κύτταρα.

Έχει φανεί πως είναι κυτταροτοξικά και απελευθερώνουν ελεύθερες ρίζες όντας βλαπτικά για τον εγκέφαλο και το επιθήλιο. Επίσης η επαφή νανοπλαστικών με τα μακροφάγα και το επιθήλιο των πνευμόνων απελευθερώνει ρίζες οξυγόνου και προκαλούν συσσωμάτωση των πρωτεϊνών εντός του ενδοπλασματικού δικτύου και κυτταρόλυση (Chiu et al., 2015). Το πολυστερένιο είναι κυτταροτοξικό στα αδενωματώδη κύτταρα του λεπτού εντέρου. Συνεπάγεται λοιπόν πως οι άνθρωποι που εκτίθενται στα μικροπλαστικά ίσως υποστούν κυτταροτοξικότητα και οξειδωτικό στρες (Wu et al., 2019).

Τα μικροπλαστικά στα θαλάσσια όντα μπορούν επίσης να επηρεάσουν το μεταβολισμό τους, αλλοιώνοντας τα μεταβολικά ένζυμα και διαταράζοντας το ενεργειακό ισοζύγιο. Στον άνθρωπο, που οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι μεγαλύτερες και έχει πιο σύνθετο μεταβολικό σύστημα, επηρεάζεται ακόμα περισσότερο. Έχουν αναφερθεί δυσλειτουργίες στο ανοσοποιητικό σύστημα του ανθρώπου έπειτα από έκθεση σε μικροπλαστικά και κυρίως σε πιο ευπαθή άτομα με αποτέλεσμα να πυροδοτούνται αυτοάνοσα νοσήματα και ανοσοκαταστολή (Prata et al., 2020).

Η μακροχρόνια καταστροφή των κυττάρων από την έκθεση στα μικροπλαστικά, η δημιουργία ανοσορυθμιστών και η δυσλειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος συμβάλουν στην πρόκληση αυτοάνοσων νοσημάτων. Έχουν επίσης κατηγορηθεί για τον ερυθρηματώδη λύκο και άλλες ρευματικές ασθένειες (Farhat et al., 2011).

Τα μικροπλαστικά μεταφέρονται σε άλλους ιστούς μέσω του αίματος. Η εισαγωγή τους στο καρδιαγγειακό σύστημα μπορεί να προκαλέσει φλεγμονή, κυτταροτοξικότητα, οίδημα αγγείων, απόφραξη και αύξηση αρτηριακής πίεσης. Επιπλέον τα νανοπλαστικά φάνηκε *in vitro* πως προκαλούν πήξη ερυθρών αιμοσφαιρίων και προσκόλληση στο επιθηλιακό τοίχωμα. Επιβαρύνουν επίσης την αιμόλυση και αυξάνουν την ισταμίνη. Επιπλέον με τη φλεγμονή που προκαλούν κάνουν πιο πορώδη την μεμβράνη του επιθηλίου και έτσι μεταφέρονται πιο εύκολα (Prata et al., 2020). Έχει φανεί πως τα νανοσωματίδια μπορούν να διαπεράσουν το φραγμό του πλακούντα και ενδεχομένως να μετακινούνται μέσω αυτού (Wick et al., 2010). Τα νανοσωματίδια που συσσωρεύονται φαίνεται να επιβαρύνουν και τα νεφρά. Τα μικροπλαστικά τα οποία μετακινούνται σε διάφορους ιστούς οδηγούν σε φλεγμονή που επιμένει, προκαλώντας δυσλειτουργία οργάνων και αυξημένο ρίσκο νεοπλασίας (Prata et al., 2020). Επίσης, φαίνεται πως τα μικροπλαστικά διεγείρουν τους οστεοκλάστες οδηγώντας σε απώλεια οστικής μάζας (Liu et al., 2015).

4.6.2 Νευροτοξικότητα

Η νευροτοξικότητα, λόγω έκθεσης στα μικροπλαστικά, έχει τεκμηριωθεί έπειτα από εμφάνιση κυττάρων του ανοσοποιητικού συστήματος στον εγκέφαλο και του οξειδωτικού στρες. Αυτό πιθανότατα οφείλεται σε σωματίδια που μεταφέρονται ή από τις κυτοκίνες που προκαλούν τραυματισμό των νευρώνων λόγω φλεγμονής. Η επίδραση των μικροπλαστικών διαπιστώθηκε στις *in vivo* έρευνες (MohanKumar et al., 2008). Η έκθεση στα μικροπλαστικά φάνηκε να επηρεάζει την δραστικότητα της ερυθροκυτταρικής ακετυλχοληστερασινάσης (Erythrocyte acetylcholinesterase activity, AChE) στον Κεντρικό Νευρικό Σύστημα και να προκαλεί αλλοίωση των νευροδιαβιβαστών. Τα μικροπλαστικά εμπεριέχουν βιοενεργά χημικά τα οποία οδηγούν σε τοξικότητα και μείωση της μεταβολικής δραστηριότητας των εγκεφαλικών κυττάρων (Deng et al., 2017).

4.7 Τα μικροπλαστικά σε συνδυασμό με άλλους ρύπους

Η χρήση μικροπλαστικών στην βιομηχανική παραγωγική διαδικασία συμπεριλαμβάνει χρώματα και πρόσθετα χημικά. Έχουν ανιχνευτεί έμμονοι οργανικοί ρύποι, φθαλικές ενώσεις, BPA (δισφαινόλη Α), τρικλοζάνη, δισφαινόνη, οργανοκασσιτερικές ενώσεις και επιβραδυντικά φλόγας από βρωμιο.

Έμμονοι οργανικού ρύποι (POPs) προστίθενται στα πλαστικά (Prata et al., 2020). Οι φθαλικές ενώσεις χρησιμοποιούνται ως «μαλακτικά» πλαστικών με τη μείωση της έλξης των μοριακών αλυσίδων εντός του συνθετικού πολυμερούς πολυκαρβονικό μονομερές που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία συσκευασίας. Τα POPs, τα PAHs, τα PCBs και τα μέταλλα όπως το νικέλιο, ο

μόλυβδος, ο ψευδάργυρος και το κάδμιο έχουν ανευρεθεί σε μικροπλαστικά (Wright et al., 2020).

Οι χημικές ουσίες που βρίσκονται στην επιφάνεια των μικροπλαστικών μετακινούνται σε σταθερό ρυθμό όταν αποδομούνται. Τα χημικά αυτά φάνηκαν να έχουν αλληλεπίδραση με κάποιες ορμόνες ακόμα και όταν οι συγκεντρώσεις τους είναι χαμηλές (Cole et al., 2011).

Τα μικροπλαστικά λειτουργούν επίσης ως φορείς μικροβίων προς τους ιστούς και προκαλούν προφλεγμονώδεις απαντήσεις, αυξάνοντας τον κίνδυνο λοιμώξεων. Όταν έρθουν σε επαφή με χημικά και βακτήρια, η μεγάλη τους επιφάνεια τα μετατρέπει σε φορείς (Prata et al., 2020).

Τα μονομερή και οι ουσίες που μεταφέρονται πάνω στα μικροπλαστικά απειλούν την ανθρώπινη υγεία. Υπάρχουν βακτήρια τα οποία πολλαπλασιάζονται στην επιφάνεια των μικροπλαστικών όπως το *Vibrio sp.* Φαίνεται πως τα μικροπλαστικά επηρεάζουν και το μικροβίωμα του εντέρου (Zhu et al., 2018).

Η πολύ μεγάλη έκθεση σε μικροπλαστικά μέσω κατανάλωσής τους απειλεί την ανθρώπινη υγεία. Όλα τα μικρόβια και τα χημικά των μικροπλαστικών έχουν σοβαρές παρενέργειες και εξαρτώνται από την ποσότητα και συγκέντρωση των ουσιών που καταναλώνονται καθώς και τον τύπο τους. Επιπλέον οι επιπτώσεις εξαρτώνται από τον τρόπο μεταφοράς, την απελευθέρωσή τους και τη τοξικότητα που προκαλούν στα κύτταρα (Prata et al., 2020).

Η χρήση της δισφαινόλης - Α προκαλεί επιπτώσεις στο ενδοκρινικό σύστημα. Έχει την ιδιότητα να προσκολλάται στις τροφές και έτσι καταναλώνεται από τους ανθρώπους. Έχει ανευρεθεί στο χοιρινό, στον τόνο και στο νερό της βρύσης (Colin et al., 2014).

Σε εξετάσεις ούρων 167 ανδρών η δισφαινόλη - Α φάνηκε αντιστρόφως ανάλογη με τα επίπεδα οιστραδιόλης και του Β αναστολέα (ποσοστό τεστοστερόνης) οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι διαταράσσει τη σωστή λειτουργία του ενδοκρινικού συστήματος. Μακροχρόνια έκθεση ενδέχεται να συμβάλει στην παχυσαρκία γιατί διαταράσσει τις ορμόνες στο λιπώδη ιστό, έχοντας αλληλεπίδραση με τη λιποπρωτεϊνική λιπάση (LPL), την αρωματάση και τους ρυθμιστές λιπογένεσης. Φαίνεται επίσης να συνδέεται με τον καρκίνο του μαστού σε ανθρώπους και θαλάσσια θηλαστικά (Michalowicz, 2014). Αρκετά χημικά που έχουν βρεθεί στα πλαστικά και στα μικροπλαστικά όπως το στυρένιο χαμηλού μοριακού βάρους, πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, PVC, PCB και PBDE, φάρμακα που εμπεριέχουν μεταβολίτες έχουν τοξικότητα προς τον άνθρωπο και διαταράσσουν την ορμονική ισορροπία (Michalowicz, 2014).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα έχουν τη δυνατότητα να ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις και να διασπείρονται παγκοσμίως. Αυτά τα ευρήματα είναι συμβατά με προηγούμενες μελέτες, επισημαίνοντας την ύπαρξη μικροπλαστικών παγκοσμίως.

Οι συγγραφείς Dris, Abbasi, Thompson, Prata, Barnes, De Souza Machado, Gasperi, Liu, Wu, και Song αποτελούν μερικούς από τους ερευνητές που έχουν εξετάσει τα μικροπλαστικά στην ατμόσφαιρα. Αυτές οι μελέτες έχουν εξετάσει διάφορες πτυχές των μικροπλαστικών, όπως η πηγή προέλευσης, οι μέθοδοι ανίχνευσης, οι ποσότητες στην ατμόσφαιρα και οι πιθανές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον. Μέσω της σύγκρισης αυτών των μελετών, έχει διαμορφωθεί μια πιο πλήρης εικόνα για την παρουσία και τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα.

Η έρευνα για τη ρύπανση από μικροπλαστικά περιλαμβάνει μια πληθώρα μελετών που εξετάζουν την παρουσία, τη διανομή, τις πηγές και τις επιπτώσεις των μικροπλαστικών σε διάφορα περιβάλλοντα. Οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει διάφορες μεθοδολογίες και προσεγγίσεις για να εξετάσουν αυτό το πολύπλοκο ζήτημα.

Στη μελέτη τους, οι Thompson et. al. (2004) πραγματοποίησαν ένα από τα πρώτα πιλοτικά ερευνητικά έργα για τα μικροπλαστικά στο θαλάσσιο περιβάλλον. Έψαξαν τις πηγές και την πορεία των μικροπλαστικών, επισημαίνοντας τον ρόλο των πλαστικών αποβλήτων από προϊόντα καταναλωτών και δραστηριοτήτων αλιείας. Αυτή η μελέτη έδωσε έμφαση στις πιθανές οικολογικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών στους θαλάσσιους οργανισμούς.

Οι Colin et. al. (2018) επικεντρώθηκαν στην παρουσία μικροπλαστικών στο πόσιμο νερό. Η μελέτη περιλάμβανε την ανάλυση δειγμάτων νερού από βρύσες σε διάφορες τοποθεσίες, αποκαλύπτοντας την παρουσία ινών και θραυσμάτων μικροπλαστικών. Τα ευρήματα προκάλεσαν ανησυχίες σχετικά με το πιθανό κατάποση των μικροπλαστικών μέσω του πόσιμου νερού και τις επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία.

Οι Zhang et. al. (2017) εξέτασαν την παρουσία μικροπλαστικών σε υδάτινα οικοσυστήματα. Οι ερευνητές συγκέντρωσαν δείγματα νερού από λίμνες και ποτάμια, χρησιμοποιώντας φασματοσκοπικές τεχνικές για την αναγνώριση και την ποσοτικοποίηση των μικροπλαστικών σωματιδίων. Η έρευνα αυτή αποκάλυψε την ευρεία διασπορά των μικροπλαστικών σε εσωτερικά υδάτινα περιβάλλοντα και υπογράμμισε την ανάγκη για αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης.

Ο Gasperi et. al. (2018) εξέτασαν την παρουσία μικροπλαστικών σε αστικά υδάτινα συστήματα. Η μελέτη περιλάμβανε την ανάλυση δειγμάτων νερού

από ποτάμια και κανάλια, με έμφαση στην ταξινόμηση και τον χαρακτηρισμό των μικροπλαστικών. Τα αποτελέσματα αποκάλυψαν την ύπαρξη υψηλών συγκεντρώσεων μικροπλαστικών σε αστικά υδάτινα περιβάλλοντα, καθιστώντας σαφές τον ρόλο των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων

Οι Wright et. al. (2013) πραγματοποίησαν μια συνολική ανασκόπηση της έρευνας για τα μικροπλαστικά, εστιάζοντας στη θαλάσσια περιβάλλοντα. Οι ερευνητές ανέδειξαν την παγκόσμια εξάπλωση των μικροπλαστικών, τις πηγές τους, την κυκλοφορία τους στην αλυσίδα τροφής και τις επιπτώσεις τους στα θαλάσσια οικοσυστήματα. Αυτή η ανασκόπηση συνδέει τις ερευνητικές ευρήματα από πολλές μελέτες, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα του προβλήματος.

Ο Lusher et. al. (2017) αλλά και οι Possatto et al. (2011) επικεντρώθηκαν στην ανάλυση της παρουσίας μικροπλαστικών στις θάλασσες και τους ωκεανούς του πλανήτη. Μελέτησαν δείγματα νερού και θαλάσσιων οργανισμών από διάφορες περιοχές, εντοπίζοντας και αναλύοντας τα μικροπλαστικά σωματίδια. Τα ευρήματα αποκάλυψαν μια ευρέως διαδεδομένη παρουσία μικροπλαστικών σε διάφορα θαλάσσια περιβάλλοντα, που υπογραμμίζει την έκταση του προβλήματος και τις επιπτώσεις τους στα ψάρια.

Ο Hidalgo-Ruz et. al. (2012) πραγματοποίησαν μια μελέτη για την παρουσία μικροπλαστικών στους ωκεανούς. Οι ερευνητές ανέλυσαν δείγματα νερού από διάφορες περιοχές των ωκεανών και εντόπισαν μικροπλαστικά σωματίδια σε υψηλές συγκεντρώσεις. Αυτή η μελέτη επιβεβαίωσε τη διείσδυση των μικροπλαστικών σε απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές και την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και δράση για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Οι Dris et. al. (2016) διεξήγαγαν μια μελέτη για την παρουσία μικροπλαστικών στον ατμοσφαιρικό αέρα. Συλλέγοντας δείγματα αέρα από διάφορες τοποθεσίες, ανέλυσαν την περιεκτικότητά τους σε μικροσωματίδια πλαστικού. Η μελέτη εντόπισε μικροπλαστικά στα δείγματα, υποδεικνύοντας ότι τα μικροπλαστικά συνιστούν ένα πρόβλημα και στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Οι Abbasi et. al. (2019) πραγματοποίησαν μια συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για τα μικροπλαστικά στον αέρα. Εξέτασαν μελέτες που διερευνούσαν την παρουσία και την κατανομή των μικροπλαστικών σε δείγματα αέρα από διάφορες περιοχές. Η ανασκόπηση αναδείκνυε την ευρεία διάδοση των μικροπλαστικών στον ατμοσφαιρικό αέρα και επισήμαινε την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα στον τομέα αυτόν.

Οι Dris et. al. (2015) μελέτησαν την παρουσία μικροπλαστικών σε πόλεις. Ανέλυσαν δείγματα αέρα από αστικές περιοχές και εντόπισαν μικροπλαστικά σωματίδια σε σημαντικές συγκεντρώσεις. Η μελέτη υπογράμμισε τη συσχέτιση

μεταξύ της αστικής δραστηριότητας, των πηγών μικροπλαστικών και της παρουσίας τους στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Οι Li et. al. (2020) διεξήγαγαν μια μελέτη για την παρουσία μικροπλαστικών στον αέρα των αστικών περιοχών. Μέσω συλλογής δειγμάτων αέρα και ανάλυσης τους, ανέδειξαν την ύπαρξη μικροπλαστικών σωματιδίων στον ατμοσφαιρικό αέρα των πόλεων. Η μελέτη αποκάλυψε τη σημαντική παρουσία μικροπλαστικών στις αστικές περιοχές και την ανάγκη για μέτρα για τη μείωση της ρύπανσης.

Αυτές οι μελέτες συμβάλλουν συλλογικά στην κατανόηση της ρύπανσης από μικροπλαστικά, αναφέροντας διάφορες πτυχές, όπως ο πληθυσμός, η διανομή, οι πηγές και οι οικολογικές επιπτώσεις. Είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη τα συνολικά ευρήματα αυτών των ερευνητικών προσπαθειών για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών και πολιτικών διαχείρισης για την αντιμετώπιση αυτής της παγκόσμιας περιβαλλοντικής πρόκλησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ρύπανση από μικροπλαστικά έχει γίνει παγκόσμιο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Τα τελευταία χρόνια, ορισμένες μελέτες έχουν δείξει ότι τα μικροπλαστικά είναι παντού στην ατμόσφαιρα. Τα συνθετικά υφάσματα είναι η κύρια πηγή αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών. Επιπλέον, η υποβάθμιση και ο κατακερματισμός των πλαστικών προϊόντων, η αποτέφρωση απορριμμάτων, οι βιομηχανικές εκπομπές και οι εκπομπές από την κυκλοφορία και η εκ νέου ανάρτηση σκόνης μπορεί επίσης να αυξήσουν τη συγκέντρωση των αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών. Ο άνεμος μπορεί να μεταφέρει ρύπους μέσω της ατμόσφαιρας σε μεγάλη απόσταση, και έτσι οι ρύποι είναι παρόντες παντού παγκοσμίως, ακόμη και σε απομακρυσμένες ορεινές λεκάνες απορροής και πολικές περιοχές. Επομένως, τα αερομεταφερόμενα μικροπλαστικά αντιπροσωπεύουν μια πηγή μόλυνσης στα χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες και οι καιρικές συνθήκες, όπως οι βροχοπτώσεις, οι χιονοπτώσεις και ο άνεμος, έχουν επιβεβαιωθεί ότι επηρεάζουν την αφθονία και την εναπόθεση μικροπλαστικών στον αέρα. Η εισπνοή ή η κατάποση μικροπλαστικών μπορεί να προκαλέσει φλεγμονή των ιστών. Επιπλέον, η απελευθέρωση επικίνδυνων χημικών και μικροοργανισμών από την επιφάνεια του MPs μπορεί να αυξήσει τους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία.

Η γνώση των αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών παραμένει επί του παρόντος περιορισμένη. Μελέτες μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα εκπονήθηκαν μόνο σε λίγες πόλεις και περιοχές και ανέφεραν μόνο μια απλή ανάλυση της αφθονίας, του σχήματος, του μεγέθους, του χρώματος και της χημικής σύνθεσης. Επιπλέον, οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες δεν ήταν τυποποιημένες. Κατά τη δειγματοληψία, πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την ακρίβεια των συγκεντρώσεων μικροπλαστικών και μια μεγάλη ποσότητα μικροπλαστικών με μέγεθος <50μm δεν μπορεί να συλληχθεί λόγω του ορίου των φίλτρων. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι δειγματοληψίας και ανίχνευσης για μελλοντική έρευνα. Εν τω μεταξύ, θα πρέπει να καθιερωθεί μια τυπική προσέγγιση αναγνώρισης και ταξινόμησης για καλύτερη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών από διαφορετικές μελέτες. Απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για τον εντοπισμό των συγκεντρώσεων των αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών, των πηγών των αερομεταφερόμενων MPs, των παραγόντων που εμπλέκονται στην κατανομή και εναπόθεση MPs στον αέρα, των ρύπων που προσροφούνται στα αερομεταφερόμενα μικροπλαστικά και της ανταλλαγής MPs μεταξύ διαφορετικών οικοσυστημάτων για την καλύτερη κατανόηση των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, οι επιπτώσεις της εισπνοής και της κατάποσης MPs στην ανθρώπινη υγεία πρέπει να τεκμηριώνονται καλά για να αναπτυχθούν μέτρα πρόληψης και θεραπείας στο μέλλον.

Η ρύπανση από μικροπλαστικά και οι κίνδυνοι της για την περιβαλλοντική υγεία έχουν γίνει μια αναδυόμενη παγκόσμια ανησυχία του κοινού. Αυτή η ανασκόπηση παρέχει μια περίληψη των τρεχουσών εργαστηριακών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα. Τα αποτελέσματα από διαφορετικές μελέτες που έχουν παρακολουθήσει μικροπλαστικά δεν είναι συγκρίσιμα, λόγω της ποικιλίας των μεθόδων που χρησιμοποιούνται. Η έλλειψη ισοδυναμίας έχει γίνει μείζον ζήτημα στην ανίχνευση μικροπλαστικών που θα επηρεάσει τη χρησιμότητα των υφιστάμενων παγκόσμιων δεδομένων για αναλύσεις μεγάλης κλίμακας μικροπλαστικών, όπως οι ετήσιες αλλαγές στις συγκεντρώσεις των μικροπλαστικών στον αέρα, η μεταφορά αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών σε μεγάλες αποστάσεις και ο καταμερισμός της πηγής μικροπλαστικά στην ατμόσφαιρα. Ως εκ τούτου, πρέπει να καθιερωθεί η τυποποίηση των μεθόδων για την ανίχνευση μικροπλαστικών στο πεδίο και στο εργαστήριο για τη μελλοντική παρακολούθηση των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα και για να επιτραπούν συγκρίσεις παγκόσμιων συγκεντρώσεων μικροπλαστικών στον αέρα, οι οποίες θα μπορούσαν να αποσαφηνίσουν την πηγή της ρύπανσης στην ατμόσφαιρα και διευκολύνουν την ανάπτυξη θεραπειών ή πολιτικών.

Η πρώτη πρόκληση για την ανίχνευση μικροπλαστικών στον αέρα είναι η συλλογή μικροπλαστικών δειγμάτων. Η παθητική ατμοσφαιρική εναπόθεση και οι ενεργοί αντλούμενοι δειγματολήπτες είναι δύο μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές μελέτες για τη συλλογή αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών. Η ατμοσφαιρική καθίζηση παρέχει τις πληροφορίες σχετικά με τα ατμοσφαιρικά μικροπλαστικά σωματίδια που εναποτίθενται στην επιφάνεια των τοποθεσιών δειγματοληψίας, όπως δρόμοι, στέγες και βουνά, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών. Αυτή η μέθοδος είναι πιο κατάλληλη για τη μακροχρόνια συνεχή συλλογή δειγμάτων ή τη δειγματοληψία σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς την απαίτηση για ισχύ. Ο ενεργός αντλούμενος δειγματολήπτης χρησιμοποιείται συνήθως για την ταχεία συλλογή ατμοσφαιρικών δειγμάτων και παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα μικροπλαστικά σωματίδια που αιωρούνται στην ατμόσφαιρα. Σε σύγκριση με την παθητική ατμοσφαιρική εναπόθεση, η πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια είναι απαραίτητη και ο όγκος του αέρα μπορεί να φιλτράρεται ποσοτικά. Ωστόσο, οι τρέχουσες μέθοδοι δειγματοληψίας δεν μπορούν να συλλέξουν όλα τα μικροπλαστικά σε μια τοποθεσία δειγματοληψίας. Καθώς το μέγεθος των σωματιδίων μειώνεται, η ποσότητα των πλαστικών υπολειμμάτων αυξάνεται δραματικά. Πολλά μικρότερα μικροπλαστικά ή νανοπλαστικά δεν μπορούν να συλλεχθούν χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους δειγματοληψίας, λόγω του περιορισμού του μεγέθους των πόρων του φίλτρου σε ενεργούς δειγματολήπτες και της δυσκολίας εναπόθεσης μικρών αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών, γεγονός που επηρεάζει σοβαρά τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης

μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα. Τα φίλτρα με μικρότερο μέγεθος πόρων προτείνεται να χρησιμοποιηθούν στη συλλογή και προετοιμασία δειγμάτων. Ως εκ τούτου, πρέπει να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι και τεχνικές δειγματοληψίας για τη δειγματοληψία των μικρότερων μικροπλαστικών σε μελλοντικές μελέτες για την παρακολούθηση μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα. Για να επιτευχθεί μια ολοκληρωμένη, ετήσια αξιολόγηση της ατμοσφαιρικής μικροπλαστικής ρύπανσης, απαιτείται διαδικασία πολλαπλών δειγμάτων. Συνιστάται η δειγματοληψία να γίνεται κατά τη διάρκεια ξηρών/υγρών περιόδων και διαφορετικών εποχών. Η ακρίβεια των μεθόδων δειγματοληψίας επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες (βροχόπτωση, χιονοπτώσεις και άνεμοι), οι διάφορες συσκευές δειγματοληψίας και τα μέτρα λειτουργίας. Ως εκ τούτου, προτείνεται να συνδυαστούν δύο μέθοδοι σε μια μελέτη για να αποκτηθεί μια ολοκληρωμένη και ακριβής γνώση της μικροπλαστικής ρύπανσης στην ατμόσφαιρα.

Στο εργαστήριο, τα μικροπλαστικά εξάγονται από τα δείγματα και το H_2O_2 χρησιμοποιείται συχνά για την πέψη της οργανικής ύλης. Ωστόσο, ορισμένες αναφορές έχουν δείξει ότι τα οξειδωτικά και τα οξέα μπορεί να βλάψουν την επιφάνεια των μικροπλαστικών ή να διαλύσουν πολύ μικρά μικροπλαστικά, μειώνοντας την ακρίβεια αναγνώρισης και χαρακτηρισμού των μικροπλαστικών. Επομένως, είναι σημαντικό να ελέγχεται η συγκέντρωση του οξειδωτικού παράγοντα, η θερμοκρασία και ο χρόνος αντίδρασης. Λόγω της έλλειψης αυστηρών και καθολικών μεθόδων για τον γρήγορο και ακριβή προσδιορισμό του σχήματος, του χρώματος, του μεγέθους και της χημικής σύστασης ενός μεγάλου αριθμού μικροπλαστικών, συνιστάται η υιοθέτηση περισσότερων από μία μεθόδων αναγνώρισης σε μελέτες παρακολούθησης ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών για την εξάλειψη στατιστικά λάθη και να επιτευχθεί ένα ολοκληρωμένο αποτέλεσμα. Αρχικά, τα παρασκευασμένα δείγματα θα πρέπει να ταξινομηθούν και να μετρηθούν κατά σχήμα, μέγεθος και χρώμα χρησιμοποιώντας μεθόδους οπτικής αναγνώρισης όπως η στερεομικροσκόπηση. Επιπλέον, μικροσκοπία υψηλής ανάλυσης και μικροσκοπία φθορισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση των μικρότερων μικροπλαστικών και η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης μπορεί να υιοθετηθεί στις μελέτες που περιγράφουν λεπτομερώς τα μεγέθη και την υφή της επιφάνειας των σωματιδίων. Μετά τη μορφολογική ταυτοποίηση, η φασματοσκοπία FTIR και Raman χρησιμοποιούνται συνήθως για τον χαρακτηρισμό των μικροπλαστικών και την αναγνώριση των τύπων πολυμερών τους. Το Py-GC/MS είναι ικανό να προσδιορίζει τη χημική σύσταση των μικροπλαστικών με πρόσθετα. Για την καλύτερη μελέτη των μικροπλαστικών στο μέλλον, προτείνεται η ανάπτυξη ορισμένων νέων τεχνολογιών και η καθιέρωση μιας σειράς τυποποιημένων μεθόδων για την ανίχνευση μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα.

Δεδομένης της τρέχουσας γνώσης που συζητείται σε αυτή την εργασία, περαιτέρω έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη μεθόδων και οργάνων υψηλής απόδοσης για δειγματοληψία, εξαγωγή και ταχεία αναγνώριση μεγάλου αριθμού μικροπλαστικών χειροκίνητα ή αυτόματα. Σύντομα θα πρέπει να καθιερωθούν τυπικές μεθοδολογίες για να διευκολυνθούν περαιτέρω μελέτες για την ταυτοποίηση μικροπλαστικών και να επιτραπούν συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών δεδομένων από την παγκόσμια έρευνα. Επιπλέον, θα πρέπει να αναπτυχθούν αξιόπιστες στρατηγικές και μοντέλα για την εκτίμηση των πιθανών κινδύνων των μικροπλαστικών για το οικολογικό περιβάλλον, ιδιαίτερα για τον άνθρωπο. Αυτή η ανασκόπηση προσφέρει καλύτερη κατανόηση των τρεχουσών μεθόδων και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών και παρέχει τη βάση για τη θέσπιση τυπικών μεθοδολογιών για την παγκόσμια αξιολόγηση της μικροπλαστικής ρύπανσης.

Πλέον έχει γίνει η εμφανής η πρόσληψη των μικροπλαστικών από τους ανθρώπους η οποία όπως αναφέρθηκε είναι όχι μόνο από κατάποση αλλά και από την εισπνοή και μέσω του δέρματος, διεισδύοντας και σε ιστούς όπως ο εγκέφαλος και το ήπαρ. Οι μελέτες δεν είναι επαρκείς για την πλήρη κατανόηση προσρόφησης των τοξικών ουσιών και επιπλέον από που προέρχονται επακριβώς με πιθανότητα να είναι από το περιβάλλον ή εγγενής ή συνδυαστικά.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα απαιτεί μια πολύπλευρη προσέγγιση που περιλαμβάνει διάφορους εμπλεκόμενους φορείς απαιτώντας επιπλέον πόρους και δαπάνες. Αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης αποβλήτων και μείωσης της κατανάλωσης πλαστικών είναι σημαντικά για να αποτραπεί η εκπομπή μικροπλαστικών στο περιβάλλον. Επιπλέον, η ανάπτυξη κανονισμών για τη δειγματοληψία και την ανάλυση των ατμοσφαιρικών μικροπλαστικών θα διευκολύνει τις ακριβείς συγκρίσεις μεταξύ μελετών και θα ενισχύσει την κατανόησή μας για την κατανομή και την τύχη τους.

Συνοψίζοντας, η εργασία αναδεικνύει την ευρεία παρουσία των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα και υπογραμμίζει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα για να αξιολογηθούν οι πιθανές επιπτώσεις τους. Η κατανόηση των πηγών, των μηχανισμών μεταφοράς και των οικολογικών επιπτώσεων των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα είναι ζωτική για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών αντιμετώπισης και τη διατήρηση της υγιούς ατμόσφαιρας. Με βάση τα ευρήματα της βιβλιογραφίας, βγαίνει το συμπέρασμα ότι οι μικροπλαστικοί ρύποι στην ατμόσφαιρα απαιτούν προσεκτική διαχείριση και μέτρα πρόληψης.

Η ενίσχυση της ευαισθητοποίησης και η εκπαίδευση του κοινού σχετικά με το πρόβλημα των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα είναι σημαντική.

Ενημερωτικές εκστρατείες, εκπαιδευτικά προγράμματα και συνεισφορά στη δημιουργία ευαισθητοποίησης μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της ρύπανσης από μικροπλαστικά στην ατμόσφαιρα.

Τέλος, είναι σημαντικό να διεξαχθούν περαιτέρω έρευνες για την αναγνώριση και την αξιολόγηση των δυνητικών κινδύνων των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα. Αντίστοιχες έρευνες πρέπει να διεξαχθούν και στην Ελλάδα. Αυτή η γνώση είναι απαραίτητη για να ληφθούν προληπτικά μέτρα και να επιτευχθεί η προστασία της υγείας του πληθυσμού και του περιβάλλοντος.

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία αναδεικνύει την παρουσία των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα και την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και δράση. Η αντιμετώπιση του προβλήματος των μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα απαιτεί συνεργασία μεταξύ επιστημόνων, καταναλωτών, βιομηχανίας και εκπροσώπων του δημόσιου τομέα. Μόνο με ολοκληρωμένη προσέγγιση και συντονισμένες προσπάθειες μπορεί να επιτευχθεί η μείωση της εκπομπής μικροπλαστικών στην ατμόσφαιρα και να διασφαλιστεί ένα υγιές και βιώσιμο περιβάλλον για τις μελλοντικές γενεές.

BIBΛIOΓPAΦIA

- Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., Kelly, F.J., Dominguez, A.O., Jaafarzadeh, N., 2019. Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran. *Environ. Pollut.* 244, 153–164.
- Allen S., D. Allen, V.R. Phoenix, G. Le Roux, P. Dur_antez Jim_enez, A. Simonneau, et al., 2019, *Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment*, *Nat. Geosci.* 12 ,339e344.
- Andrady, A.L, 2011, *“Microplastics in the marine environment,” Mar Pollut Bull*, vol. 62, no. 8, pp. 1596–1605
- Asrin N ,Dipareza A ,2019, Microplastics in ambient air (case study:Urip
- Auta, C.U. Emenike, S.H. Fauziah (2017), *Distribution and importance of microplastics in the marine environment: a review of the sources, fate, effects, and potential solutions* *Environ. Int.*, 102 pp. 165-176
- Bank, M. S., & Hansson, S. V. ,2019, *The plastic cycle: a novel and holistic paradigm for the anthropocene*.
- Barnes D.K, F. Galgani, R.C. Thompson, M. Barlaz, 2009, *Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments*, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 364 1985e1998.
- Beckett, W.S., 2000. *Occupational respiratory diseases*. *N. Engl. J. Med.* 342 (6), 406e413.
- Bergmann, M., Gutow, L., & Klages, M. ,2015, *Marine anthropogenic litter* (p. 447). Springer Nature.
- Brahney, M. Hallerud, E. Heim, M. Hahnenberger, and S. Sukumaran, Jun. 2020 *“Plastic rain in protected areas of the United States,” Science (1979)*, vol. 368,
- Browne, M.A., Crumps, P., Niven, S.J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., Thompson, R.,2011. *Accumulation of microplastic on shorelines woldwide: sources and sinks*. *Environ.Sci. Technol.* 45 (21), 9175–9179.
- Bull 62:3902–3909. <https://doi.org/10.1360/n972017-00956>
- Cai, J. Wang, J. Peng, Z. Tan, Z. Zhan, X. Tan, et al. (2017), *Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: preliminary research and first evidence* *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24 pp. 24928-24935
- Campanale, C., Massarelli, C., Savino, I., Locaputo, V., and Uricchio, V. F. ,2020, *A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health*. *Ijerph* 17 (4), 1212

- Carvalho, T.C., Peters, J.-I., Williams III, R.O., 2011. *Influence of particle size on regional lung deposition - what evidence is there?* Int. J. Pharm. 406, 1e10
- Chai, X. Li, H. Liu, G. Lu, Z. Dang, and H. Yin, (2020) "Bacterial communities on soil microplastic at Guiyu, an E-Waste dismantling zone of China," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 195, p. 110521
- Chang, C. ,2010, The immune effects of naturally occurring and synthetic nanoparticles. *Journal of autoimmunity*, 34(3), J234-J246.
- Chen G., Q. Feng, J. Wang, 2020, *Mini-review of microplastics in the atmosphere and their risks to humans*, *Sci. Total Environ.* 703, 135504.
- Chin Sci ,2018, *Microplastics in surface waters and sediments of the three Gorges reservoir, China*, *Sci. Total Environ.*, 616–617 (2018), pp. 1620-1627
- Chiu, H.-W., Xia, T., Lee, Y.-H., Chen, C.-W., Tsai, J.-C., and Wang, Y.-J. 2015, *Cationic Polystyrene Nanospheres Induce Autophagic Cell Death through the Induction of Endoplasmic Reticulum Stress*. *Nanoscale* 7 (2)
- Claessens, S. de Meester, L. van Landuyt, K. de Clerck, and C. R. Janssen, (2011) "Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast," *Mar Pollut Bull*, vol. 62, no. 10, pp. 2199–2204, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.06.030.
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S., 2011, *Microplastics as contaminants in the marine environment: a review*. *Marine pollution bulletin*, 62(12), 2588-2597.
- Collignon, A., Hecq, J. H., Glagani, F., Voisin, P., Collard, F., & Goffart, A., 2012, *Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea*. *Marine pollution bulletin*, 64(4), 861-864
- Colin, A., Bach, C., Rosin, C., Munoz, J.-F., and Dauchy, X., 2014, *Is Drinking Water a Major Route of Human Exposure to Alkylphenol and Bisphenol Contaminants in France?* *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 66 (1), 86–99.
- Crawford, B. Quinn (2017), *10 - microplastic identification techniques* C.B. Crawford, B. Quinn (Eds.), *Microplastic Pollutants* pp. 219-267
- Dehgani, Q., Izadpanah, S., & Shahnava, A., 2017, *The effect of oral corrective feedback on beginner and low intermediate students' speaking achievement*. *Jordan Journal of Modern Languages and Literature*, 9(3), 279-294.
- De Souza Machado et al., 2018, "Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris," 2009. [Online]. Available: www.MarineDebris.noaa.gov
- De Souza Machado, W. Kloas, C. Zarfl, S. Hempel, M.C. Rillig ,2018, *Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems* *Global Change Biol.*, 24 (2018), pp. 1405-1416

- Deng, Y., Zhang, Y., Lemos, B., and Ren, H., 2017, *Tissue Accumulation of Microplastics in Mice and Biomarker Responses Suggest Widespread Health Risks of Exposure*. *Sci. Rep.* 7 (1), 46687–46710
- Di M., J. Wang, 2018, *Microplastics in surface waters and sediments of the three Gorges reservoir, China*, *Sci. Total Environ.* 616e617 1620e1627.
- Dommergue, A., Amato, P., Tignat-Perrier, R., Magand, O., Thollot, A., Joly, M., ... & Larose, C. ,2019, *Methods to investigate the global atmospheric microbiome*. *Frontiers in Microbiology*, 10, 243.
- Donaldson, K., Tran, C.L., 2002. *Inflammation caused by particles and fibers*. *Inhal.Toxicol.* 14, 5e27
- Dris R, Gasperi J, Mirande C, Mandin C, Guerrouache M, Langlois V, Tassin B: ,2017, *A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments*. *Environ Pollut* 2017, 221:453–458.
- Dris R, Gasperi J, Saad M, Mirande C, Tassin B, 2016, *Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment?* *Mar Pollut Bull* 2016, 104:290–293.
- Dris, J. Gasperi, C. Mirande, C. Mandin, M. Guerrouache, V. Langlois, et al. 2017 *A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments* *Environ. Pollut.*, 221 (2017), pp. 453-458
- Dris, R., Gasperi, J., Rocher, V., Mohamed, S., Tassin, B., 2015. *Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris*. *Environ. Chem.* 12.
- Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., Tassin, B., 2016. *Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment?* *Mar. Pollut. Bull.* 104 (1–2), 290–293.
- Eriksen M, Mason S, Wilson S, Box C, Zellers A, Edwards W.,2013, *Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes*. *Mar Pollut Bull* 778(1-2):177-182
- Farhat, S. C. L., Silva, C. A., Orione, M. A. M., Campos, L. M. A., Sallum, A. M. E., and Braga, A. L. F.,2011, *Air Pollution in Autoimmune Rheumatic Diseases: a Review*. *Autoimmun. Rev.* 11 (1), 14–21
- Free CM, Jensen OP, Mason SA, Eriksen M, Williamson NJ, Boldgiv B ,2014, *: High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake*. *Mar Pollut Bull* 2014, 85:156–163.
- Fries, J.H. Dekiff, J. Willmeyer, M.T. Nuelle, M. Ebert, D. 2013, *Remy Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy* *Environ. Sci. Process. IMPsacts.*, 15, pp. 1949-1956
- Galloway, T. S. ,2015, *“Micro- and Nano-Plastics and Human Health,” in Marine Anthropogenic Litter* (Cham: Springer), 343–366.

- Gardette, M., Perthue, A., Gardette, J. L., Janecska, T., Földes, E., Pukánszky, B., & Therias, S. (2013). Photo-and thermal-oxidation of polyethylene: comparison of mechanisms and influence of unsaturation content. *Polymer Degradation and Stability*, 98(11), 2383-2390.
- Gasperi, J., Dris, R., Mirande-Bret, C., Mandin, C., Langlois, V., Tassin, B., 2015, September. First overview of microplastics in indoor and outdoor air. In: Paper Presented at 15th EuCheMS International Conference on Chemistry and the Environment, Leipzig, Germany.
- Gasperi J., S.L. Wright, R. Dris, F. Collard, C. Mandin, M. Guerrouache, et al., 2018 , *Microplastics in air: are we breathing it in?* Curr. Opin. Environ. Sci. Health 11e5.
- González-Pleiter, M., Edo, C., Velázquez, D., Casero-Chamorro, M. C., Leganés, F., Quesada, A., ... & Rosal, R. (2020). *First detection of microplastics in the freshwater of an Antarctic Specially Protected Area*. Marine Pollution Bulletin, 161, 111811.
- González-Pleiter, M., Edo, C., Aguilera, Á., Viúdez-Moreiras, D., Pulido-Reyes, G., González-Toril, E., ... & Rosal, R. (2021). *Occurrence and transport of microplastics sampled within and above the planetary boundary layer*. *Science of the Total Environment*, 761, 143213.
- Graham and J. T. Thompson, 2009, "Deposit- and suspension-feeding sea cucumbers (Echinodermata) ingest plastic fragments," *J Exp Mar Biol Ecol*, vol. 368, no. 1, pp. 22–29, Jan. 2009
- Halden R., 2010, "Plastics and Health Risks," *Annu Rev Public Health*, vol. 31, no. 1, pp. 179–194, Mar. 2010
- Hammer J, Kraak MH, Parsons JR. , 2012, *Plastics in the marine environment: the dark side of a modern gift*. In: Whitacre DM (Ed). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer Science– Business Media, Berlin, 2012, pp. 2-41.
- Hao Dua, Jun Wang, 2021, *Characterization and environmental impacts of microplastics*, *Gondwana Research* 98 (2021) 63–75
- Harrison, J.J. Ojeda, M.E. Romero-Gonzalez ,2012, *The applicability of reflectance micro-Fourier-transform infrared spectroscopy for the detection of synthetic microplastics in marine sediments* Sci. Total Environ., 416 pp. 455-463
- Hartmann *et al.*, 2019, "Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris," *Environ Sci Technol*, vol. 53, no. 3, pp. 1039–1047
- Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson RC, Thiel M. 2012, *Microplastics in the marine environment: a review of methods used for identification and quantification*. *Environ. Sci. Technol.*, 46: 3060–3075, 2012.

- Ivar do Sul JA, Costa MF. 2014, *The present and future of microplastic pollution in the marine environment*. Review. Environ Pollut 185:352- 364
- Järllskog, I., Strömvall, A. M., Magnusson, K., Gustafsson, M., Polukarova, M., Galfi, H., ... & Andersson-Sköld, Y. 2020, *Occurrence of tire and bitumen wear microplastics on urban streets and in sweepsand and washwater*. Science of the Total Environment, 729, 138950.
- Kappler, M. Fischer, B.M. Scholz-Bottcher, S. Oberbeckmann, M. Labrenz, D. Fischer, et al. 2018, *Comparison of mu-ATR-FTIR spectroscopy and py-GCMS as identification tools for microplastic particles and fibers isolated from river sediments* Anal. Bioanal. Chem., 410 pp. 5313-5327
- Klein, M., Fischer, E.K., 2019. *Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany*. Sci. Total Environ. 685, 96–103.
- Koelmans AA, Gouin T, Thompson R, Wallace N, Courtney A. 2014, *Plastics in the marine environment*. Environ Toxicol Chem 33(1):5-10
- Kor, K., and Mehdinia, A. (2020). Neustonic Microplastic Pollution in the Persian Gulf. Mar. Pollut. Bull. 150, 110665.
- Lee, J. An, J. Kim, and J.-H. Kwon, 2022, "Enhanced settling of microplastics after biofilm development: A laboratory column study mimicking wastewater clarifiers," *Environmental Pollution*, vol. 311, p. 119909, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119909.
- Li Y., H. Liu, J. Paul Chen (2018), *Microplastics in freshwater systems: a review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection* Water Res., 137 pp. 362-374
- Li Y., L. Shao, W. Wang, M. Zhang, X. Feng, W. Li, D. Zhang, (2020) *Airborne fiber particles: types, size and concentration observed in Beijing*, Sci. Total Environ.705, 135967.
- Liu K. , X. Wang, T. Fang, P. Xu, L. Zhu, D. Li, 2019, *Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai*, Sci. Total Environ. 675, 462e471.
- Liu, A., Richards, L., Bladen, C. L., Ingham, E., Fisher, J., and Tipper, J. L. (2015). *The Biological Response to Nanometre-Sized Polymer Particles*. Acta Biomater. 23, 38–51. doi:10.1016/j.actbio.2015.05.016
- Liu, X., Tian, X., Xu, X., and Lu, J. (2018). *Design of a Phosphinate-based Bioluminescent Probe for Superoxide Radical Anion Imaging in Living Cells*. Luminescence 33 (6), 1101–1106. doi:10.1002/bio.3515
- Liu, Y., Jia, X., Zhu, H., Zhang, Q., He, Y., Shen, Y., et al. (2022). *The Effects of Exposure to MPs on Grass Carp (Ctenopharyngodon Idella) at the Physiological, Biochemical, and Transcriptomic Levels*. Chemosphere 286, 131831. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131831

- Lusher AL, McHugh M, Thompson RC.2013, *Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel*. Mar. Pollut. Bull., 67: 94–99
- Lusher, A., Hollman, P., & Mendoza-Hill, J. ,2017, *Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety*. FAO.
- Marsh, J.P., Mossman, B.T., Driscoll, K.E., Schins, R.F., Borm, P.J.A., 1994. *Effects of aramid, a high strength synthetic fiber, on respiratory cells in vitro*. Drug Chem.Toxicol. 17 (2), 75e92.
- Michałowicz, J. (2014). Bisphenol A–Sources, Toxicity and Biotransformation. Environ. Toxicol. Pharmacol. 37 (2), 738–758.
- MohanKumar, S. M., Campbell, A., Block, M., and Veronesi, B. ,2008, *Particulate Matter, Oxidative Stress and Neurotoxicity*. Neurotoxicology 29 (3), 479–488.
- Napper IE, Thompson RC, 2016, : *Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: effects of fabric type and washing conditions*. Mar Pollut Bull 2016, 112: 39–45.
- Occupational Safety & Health Administration [OSHA], 2013. Cotton Dust (Raw).Retrieved from. <https://www.osha.go>
- Pacherres CO, Hughes KA (2017) Microplastics in the Antarctic
- Peng J, J. Wang, L. Cai, 2017, *Current understanding of microplastics in the environment: occurrence, fate, risks, and what we should do*, Integrated Environ.Assess. Manag. 13 476e482.
- PlasticsEurope, *Plastics e the Facts 2018: an analysis of European plasticsproduction, demand and waste data*, Plast. Eur. Assoc. Plast. Manuf. Bruss.1e60.
- PlasticsEurope: *Plastics - the Facts 2016, an analysis of European latest plastics production, demand and waste data*. Plast Eur Assoc Plast Manuf Bruss P40 2016
- Possatto FE, Barletta M, Costa MF, et al. 2011 *Plastic debris ingestion by marine catfish: An unexpected fisheries impact*. Mar Pollut Bull 62(5):1092-1102
- Prata J.C, 2018, *Airborne microplastics: consequences to human health?* Environ. Pollut. 234, 115e126.
- Prata, J.P. da Costa, A.V. Girão, I. Lopes, A.C. Duarte, T. Rocha-Santos ,2019, *Identifying a quick and efficient method of removing organic matter without damaging microplastic samples* Sci. Total Environ., 686 , pp. 131-139
- Ranjan, A. Joseph, and S. Goel, 2021, “*Microplastics and other harmful substances released from disposable paper cups into hot water,*” *J Hazard Mater*, vol. 404, p. 124118, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124118.

- Rezaei, S. Abbasi, H. Pourmahmood, P. Oleszczuk, C. Ritsema, and A. Turner, 2022 “*Microplastics in agricultural soils from a semi-arid region and their transport by wind erosion,*” *Environ Res*, vol. 212, p. 113213, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.envres.2022.113213.
- Rezania, J. Park, M.F. Md Din, S. Mat Taib, A. Talaiekhosani, K. Kumar Yadav, et al. 2018, *Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: a review of recent studies* Mar. Pollut. Bull., 133 (2018), pp. 191-208
- Rist, S., Vianello, A., Winding, M. H. S., Nielsen, T. G., Almeda, R., Torres, R. R., & Vollertsen, J. (2020). *Quantification of plankton-sized microplastics in a productive coastal Arctic marine ecosystem. Environmental Pollution*, 266, 115248.
- Schneider T, Burdett G, Martinon L, Brochard P, Guillemin M, Teichert U, Draeger U: 1996, *Ubiquitous fiber exposure in selected sampling sites in Europe.* Scand J Work Environ Health 1996, 22:274–284.
- Selvam, S., Jesuraja, K., Venkatramanan, S., Chung, S. Y., Roy, P. D., Muthukumar, P., & Kumar, M. , 2020, *Imprints of pandemic lockdown on subsurface water quality in the coastal industrial city of Tuticorin, South India: A revival perspective. Science of the Total Environment*, 738, 139848.
- Singh and N. Sharma,2008, “*Mechanistic implications of plastic degradation,*” *Polym Degrad Stab*, vol. 93, no. 3, pp. 561–584,
- Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M., and Neff, R. A. (2018). *MPs in Seafood and the Implications for Human Health.* Curr. Environ. Health Rep. 5 (3), 375–386
- Song, S.H. Hong, M. Jang, G.M. Han, M. Rani, J. Lee, et al. 2015, *A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples* Mar. Pollut. Bull., 93 pp. 202-209
- Song, Y., Li, X., Du, X., 2009. *Exposure to nanoparticles is related to pleural effusion,pulmonary fibrosis and granuloma.* Eur. Respir. J. 34, 559e587.
- Sumoharjo Street and Mayjend Sungkono Street of Surabaya City ,
- Schwarze, P.E., Ovrevik, J., Lag, M., Refsnes, M., Nafstad, P., Hetland, R.B., Dybing, E.,2006. Particulate matter properties and health effects: consistency of epidemiological and toxicological studies. Hum. Exp. Toxicol. 25, 559e579.
- Thompson R.C, Y. Olsen, R.P. Mitchell, A. Davis, S.J. Rowland, A.W. John, et al., 2004 *Lost at sea: where is all the plastic?* Science 304 838. (Thomson et al.,2004)
- Thompson S. H. Swan, C. J. Moore, and F. S. vom Saal, Jul. 2009 “*Our plastic age,*” *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1526, pp. 1973–1976,

- Tran, C.L., Buchanan, D., Cullen, R.T., Searl, A., Jones, A.D., 2000. Inhalation of poorly soluble particles. II. Influence of particle surface area on inflammation and clearance. *Inhal. Toxicol.* 12, 1113e1126.
- Vianello, R.L. Jensen, L. Liu, J. Vollertsen (2019), Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin *Sci. Rep.*, 9 p. 8670
- Waller CL, Griffiths HJ, Waluda CM, Thorpe SE, Loaiza I, Moreno B, Pacherres CO, Hughes KA, 2017,; *Microplastics in the Antarctic marine system: an emerging area of research.* *Sci Total Environ* 2017, 598:220–227..
- Wang, J. Wang 2018, *Investigation of microplastics in aquatic environments: an overview of the methods used, from field sampling to laboratory analysis* *Trend Anal. Chem.*, 108 (2018), pp. 195-202
- Wang, Z. Tan, J. Peng, Q. Qiu, M. Li (2016)The behaviors of microplastics in the marine environment *Mar. Environ. Res.*, 113, pp. 7-17
- Wang, Z. M., Wagner, J., Ghosal, S., Bedi, G., & Wall, S. (2017). SEM/EDS and optical microscopy analyses of microplastics in ocean trawl and fish guts. *Science of the Total Environment*, 603, 616-626.
- Wang, T., Wang, L., Chen, Q., Kalogerakis, N., Ji, R. and Ma, Y., 2020. Interactions between microplastics and organic pollutants: Effects on toxicity, bioaccumulation, degradation, and transport. *Science of The Total Environment*, 748, p.142427.
- Wright S.L, J. Ulke, A. Font, K.L.A. Chan, F.J. Kelly, 2020, *Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport*, *Environ. Int.* 136 ,105411.
- Wright S.L, R.C. Thompson, T.S. Galloway, 2013, *The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review*, *Environ. Pollut.* 178 483e492.
- Wu, B., Wu, X., Liu, S., Wang, Z., and Chen, L. (2019). Size-dependent Effects of Polystyrene MPs on Cytotoxicity and Efflux Pump Inhibition in Human Caco-2 Cells. *Chemosphere* 221, 333–341.
- Wu, S., Wu, M., Tian, D., Qiu, L., and Li, T. (2020). Effects of Polystyrene Microbeads on Cytotoxicity and Transcriptomic Profiles in Human Caco-2 Cells. *Environ. Toxicol.* 35 (4), 495–506
- Xu et al. (2019) *Multi-method determination of the below-cloud wet scavenging coefficients of aerosols in Beijing, China* *Atmos. Chem. Phys.*
- Yan, H. Nie, K. Xu, Y. He, Y. Hu, Y. Huang, et al.2019, Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River estuary, China *Chemosphere*, 217 pp. 879-886
- Yang, Y., Liu, W., Zhang, Z., Grossart, H. P., & Gadd, G. M. (2020). *Microplastics provide new microbial niches in aquatic environments.* *Applied microbiology and biotechnology*, 104, 6501-6511.

Zhang X, Y. Leng, X. Liu, K. Huang, J. Wang, 2019, *Microplastics' pollution and risk assessment in an urban river: a case study in the Yongjiang river, Nanningcity, South China*, *Expos. Health* 12 (2019) 141e151.

Zhang, S. Kang, S. Allen, D. Allen, T. Gao, M. Sillanpää, 2020, *Atmospheric microplastics: a review on current status and perspectives* *Earth Sci. Rev.*, 203 (2020), p. 103118.

Zhu, D., Chen, Q. L., An, X. L., Yang, X. R., Christie, P., Ke, X., et al. (2018). *Exposure of Soil Collembolans to MPs Perturbs Their Gut Microbiota and Alters Their Isotopic Composition*. *Soil Biol. Biochem.* 116, 302–310.

Ziajahromi et al. 2017, *Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater-based microplastics* *Water Res.*

Ziajahromi et al. 2018, *Environmentally relevant concentrations of polyethylene microplastics negatively impact the survival, growth and emergence of sediment-dwelling invertebrates* *Environ. Pollut.*

Ευρωπαϊκό κοινοβούλιο, 2018 , “Μικροπλαστικά: πηγές, επιπτώσεις, λύσεις” .
<https://www.europarl.europa.eu/news/el/headlines/society/20181116STO19217/mikroplastika-piges-epiptoseis-luseis>