

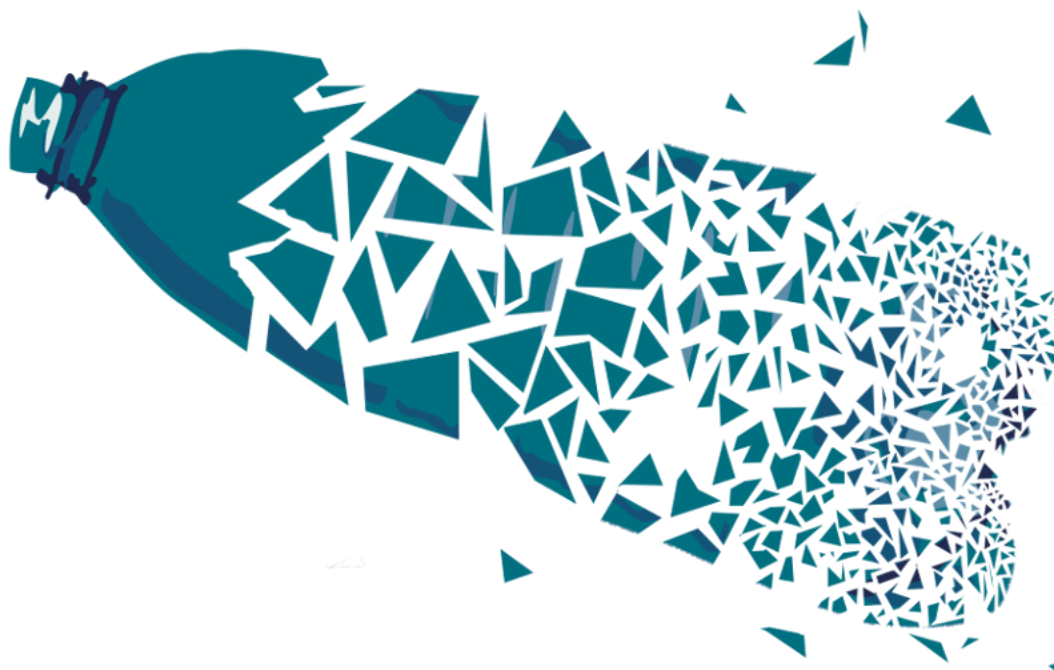


ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Τ.Ε.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**" Πλαστική ρύπανση: το πρόβλημα, οι τεχνικές διαχείρισης και οι νέες προκλήσεις:
Μικροπλαστικά"**

Σοφία Γκουλέτσα

*Επιβλέπουσα καθηγήτρια
Αναπλ. Καθ. Ελευθερία Κατσίβελα*

ΧΑΝΙΑ 2021

Αφιέρωση
Στη μικρή μου **Αλκυόνη**,
Το ελιξίριο της δικής μου ευτυχίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την εργασία αυτή, ολοκληρώνω ένα μακρύ κύκλο σπουδών στο «Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος Τ.Ε.» του πρώην ΤΕΙ Κρήτης στο Παράρτημα Χανίων, όπως ονομάζονταν το Τμήμα όταν εγώ έγινα πρωτοετής φοιτήτρια, το Σεπτέμβριο του 2012. Έκτοτε, η δική μου ζωή άλλαξε πολύ, διαμορφώθηκε με νέους όρους και πλέον δεν είμαι απλώς μια εργαζόμενη βιολόγος στο Δημόσιο σχολείο αλλά, και πιο σημαντικά, μια μητέρα εργαζόμενη που μέσα από την καθημερινότητα και την εργασία της, προσπαθεί να διδάξει στο δικό της όπως και σε όλα τα παιδιά - εφήβους την έννοια της Επιστήμης.

Καθώς οι προηγούμενες σπουδές μου εστιάζουν στη Διαχείριση του Περιβάλλοντος, ήταν μάλλον αναμενόμενο να επιλέξω ένα θέμα πτυχιακής που αφορά τα περιβαλλοντικά προβλήματα, σύγχρονα και μη.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην επιβλέπουσα καθηγήτρια του Τμήματος, Ελευθερία Κατσίβελα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, που για μεγάλο χρονικό διάστημα ταλαιπώρησα, κυρίως εξαιτίας της έλλειψης του χρόνου μου. Ωστόσο, θα ήταν μεγάλη παράλειψη να μην ευχαριστήσω το σύνολο κυριολεκτικά των διδασκόντων του Τμήματος, καθώς μέσα από τη γνώση που αποκόμισα από τα μαθήματά τους, ερμήνευσα κι εγώ, αν και όχι έφηβη πια, τον κόσμο καλύτερα.

Επίσης, να ευχαριστήσω τους λίγους στενούς μου φίλους, που πολύ καιρό με ανέχτηκαν να αποσύρομαι στην έρευνα και στην συγγραφή της «εργασίας» μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μικρή μου κόρη, που μέσα από τα δικά της μάτια, αντιμετωπίζω όλα τα προβλήματα πιο διερευνητικά αλλά και αγωνιστικά, όπως έγινε και με την περίπτωση της «Πλαστικής Ρύπανσης με τα Μικροπλαστικά».

Οκτώβριος 2021

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

- Εισηγήτρια Αναπλ. Καθ. Ελευθερία Κατσίβελα (Επιβλέπουσα καθηγήτρια)
2. Μέλος Δρ. Ηλίας Κοπανάκης
3. Μέλος MSc Λουίζα Ραΐση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πλαστικό ως υλικό, προερχόμενο από το πετρέλαιο, έχει τεράστιες επιδράσεις στη σύγχρονη ζωή, περιλαμβάνοντας την τεχνολογία, την ιατρική, τις οικιακές συσκευές, τις μονωτικές κατασκευές, τα είδη συσκευασίας και πολλές ακόμη πλευρές. Μάλιστα, η παγκόσμια παραγωγή πλαστικού έχει εικοσαπλασιαστεί από τη δεκαετία του 1960 με τάσεις ανόδου. Ταυτόχρονα όμως, δυστυχώς, δεν έχουν αναπτυχθεί και πολλές αποτελεσματικές οδοί διαχείρισης των πλαστικών απορριμμάτων, τα οποία ρυπαίνουν κάθε σημείο της Γης, ακόμη και μη κατοικημένες περιοχές. Το πρόβλημα της πλαστικής ρύπανσης είναι εμφανές, ειδικά το καλοκαίρι, σε όλες τις παραλίες καθώς περίπου το 50% των πλαστικών προϊόντων δε θα χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μία φορές, με αποτέλεσμα να καταλήγουν σε μεγάλο ποσοστό στους υδάτινους αποδέκτες, αλλά και στο έδαφος ή στον αέρα, και συχνά να καταναλώνονται από οργανισμούς με δυσάρεστες για την υγεία τους συνέπειες. Μεγάλο μέρος όμως αυτών δεν είναι ορατά, καθώς συνεχίζουν να διασπώνται με μηχανικές δράσεις, υπό την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και του αέρα, σχηματίζοντας τα μικροπλαστικά (με μέγεθος μικρότερο των 5 mm) και τα νανοπλαστικά (μεγέθους μικρότερου του 0,1 μm). Τα τεμάχια πλαστικών που απορρίπτονται στο περιβάλλον, ανεξαρτήτως μεγέθους, συνεχίζουν να διατηρούν τις ιδιότητες του μητρικού τους υλικού, με πιο ανησυχητική την ύπαρξη των πρόσθετων που πιθανόν περιέχουν, όπως πλαστικοποιητών, χρωμάτων και σταθεροποιητών, τα οποία μπορεί να περιέχουν τοξικά συστατικά, όπως βαρέα μέταλλα. Επιπλέον, το πλαστικό ως υλικό μπορεί να δεσμεύσει στην επιφάνειά του τοξικούς ανθεκτικούς οργανικούς ρυπαντές (POPs - Persistent Organic Pollutants) όπως και παθογόνους μικροοργανισμούς. Με τον τρόπο αυτό, τα πλαστικά απορρίμματα δρουν ως φορείς ρύπων και ασθενειών προς οπουδήποτε καταλήγουν, συμβάλλοντας όπως αποδεικνύεται και στη βιοσυσσώρευση τοξικών ουσιών στους οργανισμούς- καταναλωτές τους. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα στρέφεται ισχυρά προς τη διερεύνηση της επίπτωσης των πλαστικών στην ανθρώπινη υγεία, αφού βέβαια επιβεβαιώθηκε πως ο μέσος άνθρωπος εισπνέει, δέχεται μέσω του δέρματος ή καταναλώνει μέσω της τροφής και του νερού τεράστιες ποσότητες μικροπλαστικών καθημερινά. Οι παθολογικές καταστάσεις της κυτταροτοξικότητας, της φλεγμονής και της ανάπτυξης καρκινικών κυττάρων εξαιτίας της επίπτωσης των μικροπλαστικών στην κυτταρική λειτουργία θεωρούνται ήδη επιβεβαιωμένες. Σκοπός λοιπόν αυτής της εργασίας είναι η καταγραφή της χρήσης του πλαστικού, η παρούσα διαχείριση των πλαστικών απορριμμάτων και η αναζήτηση αποτελεσμάτων σχετικών με τις βιολογικές επιπτώσεις των πλαστικών και μικροπλαστικών στους ζώντες οργανισμούς.

Λέξεις-κλειδιά: πλαστικό, μικροπλαστικά, βιοσυσσώρευση και τοξικότητα πλαστικών, διαχείριση πλαστικών, πλαστικά απορρίμματα

ABSTRACT

Plastic, as a material, originating from petroleum, has great impacts and applications on modern life, such as in technological and medical advances, in houseware appliances, in insulation, packaging and many others. The worldwide production of plastics has increased 20-fold since the 1960 decade, with rising trends. At the same time, unfortunately, not many effective ways of managing plastic waste have been developed, which pollute every part of the Earth, even uninhabited areas. The problem of plastic pollution is obvious, especially in the summer on all beaches, as about 50% of plastic products will not be used more than once, resulting in a large percentage, in water recipients but also in the soil and in the air. Often, plastic waste is consumed by organisms resulting in negative health impacts. A great part of them, however, is invisible, as they keep breaking down mechanically after their rejection, under the impact of solar radiation and the air, forming the “microplastics” (size less than 5 mm) and the “nanoplastics” (size less than 0,1 μm). Plastic pieces that are rejected in the environment, irrespective of their size, maintain the properties of the maternal material. One of the most worrying properties is the additives that they probably contain, like plasticizers, colorings and stabilizers, which may contain toxic substances, such as heavy metals. In addition, plastic may absorb toxic Persistent Organic Pollutants (POPs) as well as pathogenic microorganisms. In this way, plastic litter acts as vector of pollutants and diseases to wherever they end up. As a result, it is proven that they contribute to the bioaccumulation of toxic substances in their consumers. Last years, survey has focused in the investigation of the impacts of plastics in human health, as it is proven that the average human being inhales, absorbs through skin contact or consumes via food or water huge amounts of microplastics everyday. Many studies have already shown the serious pathological impacts of microplastics in the cell function, causing cellular toxicity, inflammation and development of cancer cells. This study aims to the recording of the use of plastic, the current management of plastic waste and the exploration of results relative to the biological impacts of plastics and microplastics in living beings.

Keywords: plastic, microplastics, bioaccumulation and toxicity of plastics, plastic management, plastic litter

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	σελ. 8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	σελ. 10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ. 12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΛΑΣΤΙΚΟ	
2.1 Παρασκευή και είδη πλαστικών	σελ. 14
2.2 Χρήσεις πλαστικού	σελ. 17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ	
3.1 Κύκλος ζωής πλαστικών	σελ. 20
3.2. Κυκλικό μοντέλο οικονομίας των πλαστικών	σελ. 22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	
4.1 Πλαστικά απόβλητα	σελ. 26
4.2 Τοξικότητα πλαστικών αποβλήτων	σελ. 32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	
5.1 Στρατηγικές διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων	σελ. 41
5.2. Νομοθετικό πλαίσιο Ευρωπαϊκής Ένωσης για το πλαστικό	σελ. 43
5.3 Ανακύκλωση	σελ. 46
5.3.1 Μηχανική Ανακύκλωση	σελ. 46
5.3.2. Χημική ανακύκλωση	σελ. 52
5.4 Υγειονομική ταφή	σελ. 55
5.5 Αποτέφρωση	σελ. 57
5.6 Βιοπλαστικά- κομποστοποίηση- βιοαποικοδόμηση	σελ. 59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ	
6.1 Ορισμός μικροπλαστικών – προέλευση	σελ. 67
6.2 Οικολογικές και βιολογικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών	σελ. 71
6.2.1 Οι μικροβιακές κοινότητες «Πλαστικόσφαιρες» (Plastispheres)	σελ. 71
6.2.2 Επίδραση στις τροφικές αλυσίδες	σελ. 74
6.2.3 Επίδραση στο βένθος	σελ. 77
6.2.4 Ξενικά είδη (alien species)	σελ. 79
6.2.5 Επίδραση στη θερμοκρασία και στις θερμικές ιδιότητες	σελ. 80
6.3 Τρόποι ανθρώπινης πρόσληψης μικροπλαστικών	σελ. 81
6.3.1 Κατάποση πλαστικών	σελ. 82
6.3.2 Εισπνοή μικροπλαστικών	σελ. 84
6.3.3 Δερματική έκθεση σε μικροπλαστικά	σελ. 85
6.4 Κυτταρική πρόσληψη και ενδοκυτταρική πορεία των μικροπλαστικών	σελ. 87
6.5 Οδοί τοξικότητας των μικροπλαστικών	σελ. 88

6.5.1 Οξειδωτικό στρες και κυτταροτοξικότητα	σελ. 90
6.5.2. Διαταραχή της Ομοιόστασης και του Μεταβολισμού	σελ. 90
6.5.3 Μετατόπιση μικροπλαστικών στο κυκλοφορικό σύστημα και σε μακρινούς ιστούς	σελ. 91
6.5.4 Διαταραχή της ανοσολογικής λειτουργίας	σελ. 93
6.5.5 Νευροτοξικότητα και αυξημένη εμφάνιση νευροεκφυλιστικών ασθενειών	σελ. 93
6.5.6 Τα μικροπλαστικά ως φορείς ασθενειών και πιθανών τοξικών χημικών ουσιών	σελ. 94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	σελ. 96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	σελ. 98

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή αποτελεί την έρευνα που έκανα στα πλαίσια της πτυχιακής μου εργασίας. Αφορά την παραγωγή και κατανάλωση πλαστικού παγκοσμίως αλλά και τις επιπτώσεις των πλαστικών και μικροπλαστικών στο αβιοτικό περιβάλλον και την υγεία των οργανισμών. Σκοπός της εργασίας είναι η καταγραφή της χρήσης του πλαστικού, η παρουσίαση των τεχνικών διαχείρισης των πλαστικών απορριμμάτων, το νομοθετικό πλαίσιο που ισχύει για τη διαχείριση πλαστικών απορριμμάτων και τέλος τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων γύρω από τις βιολογικές επιπτώσεις των πλαστικών και μικροπλαστικών. Έχει υλοποιηθεί στο Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Τεχνολογιών και Εφαρμογών του Τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών, επισπεύδοντας Τμήματος του πρώην Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος Τ.Ε. της Σχολής Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου (ΕΛΜΕΠΑ) κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2020-2021 υπό την επίβλεψη της αναπληρώτριας καθηγήτριας Ελευθερίας Κατσίβελα.

Από τα 7 κεφάλαια που έχουν οργανωθεί οι πληροφορίες, στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μία **Εισαγωγή** για τη χρήση του πλαστικού, την αύξηση της παραγωγής των πλαστικών απορριμμάτων και τη μετατροπή τους σε μικροπλαστικά. Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα κύρια είδη πλαστικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πλαστικών προϊόντων. Αναφέρονται επίσης οι φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες των πλαστικών που τα έχουν καταστήσει τόσο πολύτιμα για την καθημερινή ζωή. Μέσα από γραφήματα φαίνεται η μεγάλη αύξηση της χρήσης πλαστικών υλικών τα τελευταία χρόνια. Στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται ο κύκλος ζωής των πλαστικών, από τη στιγμή της παραγωγής ενός προϊόντος μέχρι την απόρριψή του, την επαναχρησιμοποίηση ή την χρήση του ως πηγή ενέργειας. Το μοντέλο οικονομίας που μέχρι πριν λίγα χρόνια εφαρμοζόταν για τα πλαστικά ήταν το γραμμικό, όπου μετά τη χρήση ακολουθούσε η καταστροφή του προϊόντος. Λόγω της μη βιωσιμότητας αυτού του μοντέλου, τα τελευταία χρόνια υιοθετείται και για τα πλαστικά το κυκλικό μοντέλο οικονομίας, στο οποίο ένα προϊόν μετά την κύρια χρήση του επισκευάζεται, επαναχρησιμοποιείται και τελικά απορρίπτεται με όσο το δυνατό πιο περιβαλλοντικά ορθό τρόπο. Το ζήτημα της τρομερής αύξησης των πλαστικών αποβλήτων και των πιθανών συνεπειών τους σε βιοτικό και αβιοτικό περιβάλλον εξετάζει το **Κεφάλαιο 4**. Ένα σημαντικό ζήτημα της παρουσίας των πλαστικών απορριμμάτων είναι η τοξικότητα που μπορεί να προκαλέσουν, καθώς είναι εμπλουτισμένα με πολλές συνοδές ουσίες, όπως βαρέα μέταλλα, ενδοκρινικούς διαταράκτες ή πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες (PAHs, Polycyclic Aromatic Hydrocarbon). Το **Κεφάλαιο 5** περιγράφει τις τρέχουσες αλλά και μελλοντικές στρατηγικές διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων καθώς και το νομοθετικό πλαίσιο που έχει θέσει εδώ και 20 χρόνια η ΕΕ, μέσα στο οποίο και η Ελλάδα δρα. Πέρα από την ανακύκλωση, την αποτέφρωση και την, λιγότερο αειφορική, υγειονομική ταφή, μία νέα τεχνολογία πλαστικών υλικών, τα βιοπλαστικά, υπόσχονται να μειώσουν τον όγκο των πλαστικών αποβλήτων χωρίς επιβάρυνση για το περιβάλλον. Προς το παρόν, έχουν χαμηλή απήχηση και φαίνεται πως η τεχνολογία τους χρήζει βελτιώσεων, η προοπτική όμως της κομποστοποίησης των απορριμμάτων αξίζει να μελετηθεί και να επενδυθούν πόροι προς αυτή την κατεύθυνση. Στο **Κεφάλαιο 6** ορίζονται τα Μικροπλαστικά, η σύγχρονη μεγάλη μάστιγα της πλαστικής ρύπανσης. Μέσω των

μικροπλαστικών, το πλαστικό ως υλικό έχει φτάσει σε κάθε γωνιά της Γης αλλά και σε κάθε ζωντανό οργανισμό και σε κάθε τμήμα του αβιοτικού περιβάλλοντος. Εξετάζεται η προέλευση των μικροπλαστικών, οι επιπτώσεις της παρουσίας τους στους οργανισμούς και ακολουθεί μια ειδική περιγραφή της πορείας των μικροπλαστικών στον οργανισμό του ανθρώπου, οι τρόποι πρόσληψης από τον άνθρωπο και οι επιπτώσεις που έχουν καταγραφεί κυρίως σε εργαστηριακό επίπεδο από τη σύγχρονη συνεχή και μαζική έκθεση στα μικροπλαστικά. Τέλος, το **Κεφάλαιο 7** περιλαμβάνει τα **Συμπεράσματα**, τα σημαντικά σημεία που αναφέρθηκαν στην εργασία, σύγχρονους προβληματισμούς για τη διαχείριση των πλαστικών απορριμμάτων σε συνθήκες οι οποίες ευνοούν την χρήση προϊόντων μιας χρήσης για λόγους ασηψίας, όπως και για την εφαρμογή του νομοθετικού πλαισίου που ξεκίνησε να εφαρμόζεται με σκοπό τη μείωση των πλαστικών αποβλήτων συνολικά. Η εργασία ολοκληρώνεται με μερικές προτάσεις για την επίτευξη του στόχου της μείωσης των πλαστικών απορριμμάτων αλλά και της χρήσης πλαστικού συνολικά.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ABS	Acrylonitrile butadiene styrene, Ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο
AChE	Acetyl Cholinesterase, Ακετυλοχολινεστερινάση
ATP	Adenosine 5'-triphosphate, Τριφωσφορική αδενοσίνη
BBP	Butyl-Benzyl-Phthalate, Φθαλικό Βενζυλονουτύλιο
BFR	Brominated Flame Retardants, Βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας
BPA	Bisphanol A, Δισφαινόλη Α
CO ₂	Carbon Dioxide, Διοξείδιο του άνθρακα
DDT	Dichloro-diphenyl-trichloroethane, Διχλωρο- διφαινυλο- τριχλωροαιθάνιο
DEHP	Di(2- ethylhexyl) phthalate, Φθαλικός δι-(2-αιθυλεξυλ) εστέρας
DINP	Diisononyl phthalate, Φθαλικός δι-ισο-εννεύλεστέρας
DnOP	Di-N-Octyl phthalate, Φθαλικός διοκτυλεστέρας
DPB	Dibutyl phthalate, Φθαλικός διβουτυλεστέρας
EPR	Extended producer responsibility, Διευρυμένη ευθύνη του παραγωγού
EPS	Expanded polysterene, Διογκωμένη Πολυστερίνη
ERA	Environmental Risk Assessment, ΜΠΕ, Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων
FCC	Fluid catalytic Cracking, Ρευστή Καταλυτική Πυρόλυση
GHGs	Greenhouse Gases, Θερμοκηπιακά αέρια
HBCD	Hexabromocyclododecane, Εξαβρωμοκυκλοδωδεκάνιο
HCH	Hexachlorocyclohexane, Εξαχλωριούχο εξάνιο
HDPE	High-density polyethylene, Πολυαιθυλένιο μεγάλης πυκνότητας
ISO	International Organization for Standardization, Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης
Kow	Octanol-Water Partition Coefficient, Συντελεστής κατανομής διαχωρισμού n-οκτανόλης – νερού
Log	Logarithm, (δεκαδικός) Λογάριθμος
LCA	Life Cycle Analysis, Μελέτη κύκλου ζωής υλικών
LDPE	Low-density polyethylene, Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας
LDH	Lactate dehydrogenase, Γαλακτική αφυδρογονάση
LHV	Lower Heating Value, Χαμηλότερη θερμική αξία
mg/g	Milligram/ gram, Μικρογραμμάριο/γραμμάριο
mg/L	Milligram/litre, Μικρογραμμάριο/ λίτρο (μονάδα πυκνότητας)
mg/kg	Milligram/kilogram, Μικρογραμμάριο/ κιλό
Mt	Megaton, Μεγατόνος (1 Mt = 1.000.000.000 Kg)
ng/g	Nanogram/gram, Νανογραμμάριο/γραμμάριο
ng/L	Nanaogram/litre, νανογραμμάριο/ λίτρο
N ₂ O	Nitrous oxide, υποξείδιο του αζώτου
NPs	Nonylphenol, Εννεύλοφαινόλες
PAE	Phthalate acid ester, Εστέρας Φθαλικού Οξέος
PA6	Μηχανολογικό πλαστικό πολυαμίδιο
PAH	Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, Πολυκυκλικός Αρωματικός Υδρογονάνθρακας

PBDE	Polybrominated Diphenyl Ethers, Πολυβρωμιούχοι Διφαινυλ-αιθέρες
PC	Polycarbonic, Πολυκαρβονυλικό
PCB	Polychlorinated biphenyls, Πολυχλωριωμένα Δισφαινύλια
PCL	Polycaprolactone, Πολυκαπρολακτόνη
PE	Polyethylene, Πολυαιθυλένιο
PET	Polyethylene terephthalate, Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο
PHA	Polyhydroxyalkanoate , Πολύ-υδροξυ-αλκανοειδές
PLA	Polylactic acid , Πολύ-λακτικό οξύ
POP	Persistent Organic Pollutants, Ανθεκτικός οργανικός ρύπος
PP	Polypropylene, Πολυπροπυλένιο χαμηλής πυκνότητας
PS	Polystyrene, Πολυστυρένιο
PU	Polyurethane, Πολυουρεθάνη
PVC	Polyvinylchloride, Χλωριούχο πολυβινύλιο ή Πολυβινυλοχλωρίδιο
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, Καταχώρηση, Αξιολόγηση, Αδειοδότηση και Έγκριση χημικών ουσιών (Ευρωπαϊκός κανονισμός)
ROS	Reactive Oxygen Species, Δραστικές Μορφές Οξυγόνου
rPET (RPET)	Recycling PET, ανακυκλωμένο PET
TBBPA	Tetrabromobisphenol A, Τετραβρωμοδισφαινόλη Α
US\$	United States dollar, Δολάριο Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής
WWF	World Wide Fund for Nature, Παγκόσμιο Ταμείο για τη Φύση
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΗΠΑ	Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής
ΚΔΑΥ	Κέντρα Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών
ΜΠΕ	Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων
ΜΤ	Μετρικός Τόνος, ισούται με 1 τόνο (1 ΜΤ = 1.000 Kg)
ΧΑΔΑ	Χώρος Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων
ΧΥΤΑ	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων
ΧΥΤΥ	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα ζούμε σε ένα «πλαστικό κόσμο», όπου όλα σχεδόν γύρω μας περιέχουν πλαστικό ή είναι κατασκευασμένα εξ ολοκλήρου από αυτό και είναι μάλλον δύσκολο να φανταστούμε τον κόσμο απαλλαγμένο από πλαστικά. Από το 1950 που παράχθηκε η πρώτη πλαστική σακούλα [58] ως σήμερα, η παραγωγή πλαστικού έχει αυξηθεί θεαματικά σε όλο τον κόσμο, και συνεχίζει να αυξάνεται, με την σύγχρονη παραγωγή να ξεπερνά τα 300 εκατομμύρια τόνους πλαστικού ανά έτος (εικόνες 2.1 και 2.2). Το πλαστικό ως υλικό συγκεντρώνει πολλά πλεονεκτήματα, γι αυτό και έχει τόσες πολλές εφαρμογές και τύπους, ωστόσο το ζήτημα των πλαστικών απορριμμάτων και της αποτελεσματικής διαχείρισής τους έχουν προσελκύσει το παγκόσμιο ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω των εμφανών συνεπειών τους στο φυσικό περιβάλλον. Υπολογίζεται πως περισσότεροι από 9 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών αποβλήτων εισέρχονται στους ωκεανούς κάθε χρόνο, επηρεάζοντας τα θαλάσσια και παράκτια οικοσυστήματα, όπως και την ανθρώπινη υγεία. Συνεπώς, εκτιμάται πως περίπου 3.461 είδη οργανισμών επηρεάζονται από την πλαστική ρύπανση με θανατηφόρες συνέπειες για την υγεία τους, όπως η λιμοκτονία εξαιτίας της κατάποσης, το πνίξιμο από παγίδευση στα δίχτυα ή σε πλαστικές σακούλες, μέχρι και λιγότερο θανατηφόρες συνέπειες όπως η μειωμένη πρόσληψη τροφής [5].

Οι οργανισμοί που εκτίθενται στο πλαστικό δεν είναι απλά εκτεθειμένοι στα πολυμερή που το αποτελούν, αλλά και στα πρόσθετα που έχουν χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσουν τις ιδιότητες του κάθε υλικού. Συνεπώς, τα ίδια τα πρόσθετα, πολλά από τα οποία έχουν χαρακτηριστεί επικίνδυνα για την υγεία, δρουν ως πηγές ρύπανσης [34]. Επιπλέον, τα πλαστικά απόβλητα μπορούν να συσσωρεύσουν Ανθεκτικούς Οργανικούς Ρύπους (POPs) και με τον τρόπο αυτό να τους μεταφέρουν σε οργανισμούς, από τους οποίους θα καταναλωθούν κατά μήκος της τροφικής αλυσίδας [35]. Ένα ακόμη ζήτημα που εγείρουν τα πλαστικά απορρίμματα είναι η δυνατότητα να μεταφερθούν μέσω αυτών ξενικά είδη, που συχνά κυριαρχούν στο νέο οικοσύστημα που φτάνουν λόγω έλλειψης θηρευτών / ανταγωνιστών, με δυσμενείς συνέπειες για την ενδημική χλωρίδα / πανίδα. Ταυτόχρονα, τα τελευταία χρόνια αποκαλύφθηκε πως μέσω πλαστικών αποβλήτων μεταφέρονται και ακμάζουν μικροοργανισμοί, πολλοί από τους οποίους είναι παθογόνοι για φυτικούς ή ζωικούς οργανισμούς ή και για τον άνθρωπο [55].

Μία ακόμη πιο σύγχρονη απειλή της πλαστικής ρύπανσης είναι τα μικροπλαστικά, πλαστικά τεμάχια δηλαδή με διάμετρο μικρότερη των 5 mm. Τα μικροπλαστικά προέρχονται είτε από προϊόντα ομορφιάς ή ιατρικά σκευάσματα, στα οποία περιλαμβάνονται αυτούσια (πρωτογενή μικροπλαστικά), είτε από τη διάσπαση μεγαλύτερων σε μέγεθος πλαστικών αποβλήτων (δευτερογενή μικροπλαστικά). Τα μικροπλαστικά έχουν κινήσει πολλές ανησυχίες για την υγεία των οικοσυστημάτων, καθώς ως πλαστικά φέρουν όλες τις παραπάνω απειλές και ταυτόχρονα, ως μικροσκοπικά, μπορούν να φτάσουν σε κάθε οργανισμό, υδάτινο ή χερσαίο, και να απορροφηθούν.

Αν και προς το παρόν δεν υπάρχει απόδειξη ότι ο κίνδυνος της υγείας είναι εκτεταμένος, υπάρχει ανάγκη να κατανοηθεί / ποσοτικοποιηθεί η ανθρώπινη έκθεση στα πλαστικά απορρίμματα, ειδικά στη μικρότερη τάξη μεγέθους (<10μm). Πολλές μελέτες

έχουν καταλήξει σε ένα κατώτατο όριο κατανάλωσης μικροπλαστικών προτού εμφανιστεί βλάβη στην ανθρώπινη υγεία, λαμβάνοντας υπόψη συγκεντρώσεις άλλων ρύπων, περισσότερο μελετημένων. Η εκτίμηση του κινδύνου περιορίζεται επίσης από την πολυπλοκότητα της τοξικότητας των μικροπλαστικών, την αλληλεπίδρασή τους με άλλους ρύπους (π.χ. μέταλλα) ή τη συμπερίληψή τους για τις επιπτώσεις στην υγεία σε άλλες κατηγορίες ρύπων (π.χ. αιωρούμενα σωματίδια) [18]. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά που χρησιμοποιούνται στα τεστ τοξικότητας είναι συχνά πολύ διαφορετικά από αυτά που συναντώνται στο περιβάλλον, σε ό,τι αφορά τις ιδιότητες της επιφάνειας, τη διάβρωση και τα προσροφημένα χημικά υλικά και τους οργανισμούς, με αποτέλεσμα να καταλήγουν σε μη πλήρως έγκυρα συμπεράσματα [57]. Συνεπώς, οι συνέπειες των μικροπλαστικών πρέπει να διερευνηθούν περισσότερο, με δοκιμασίες πιο συγγενικές τόσο στη συγκέντρωση όσο και στις ιδιότητες των μικροπλαστικών που χρησιμοποιούνται.

Σταδιακά αυξάνεται η συνειδητοποίηση του παγκόσμιου χαρακτήρα των προκλήσεων αυτών, όπως αποδεικνύουν οι διεθνείς πρωτοβουλίες για τα θαλάσσια απορρίμματα, όπως η Παγκόσμια Σύμπραξη των Ηνωμένων Εθνών για τα Θαλάσσια Απορρίμματα και τα σχέδια δράσης που υπέβαλαν οι ομάδες G7 και G2017. Στη διεθνή διάσκεψη «Our Ocean», την οποία φιλοξένησε η ΕΕ τον Οκτώβριο του 2017, η ρύπανση από πλαστικά απορρίμματα αναγνωρίστηκε επίσης ως μία από τις κύριες πηγές πίεσης που δέχονται οι υγιείς ωκεανοί. Επίσης, ψήφισμα σχετικά με τα θαλάσσια απορρίμματα και τα μικροπλαστικά εγκρίθηκε από τη Συνέλευση του ΟΗΕ για το Περιβάλλον τον Δεκέμβριο του 2017 [28]. Ταυτόχρονα, οι διεθνείς εξελίξεις είναι ραγδαίες και διαμορφώνουν συνεχώς νέες συνθήκες, όπως η από τον Ιανουάριο του 2018 απόφαση της Κίνας να περιορίσει τις εισαγωγές ορισμένων ειδών πλαστικών αποβλήτων, στις οποίες βασίζονταν πολλές χώρες του δυτικού κόσμου [12]. Το αποτέλεσμα είναι η ώθηση προς τον περιορισμό του πλαστικού και την αντικατάστασή του από άλλα, πιο βιώσιμα υλικά, να αυξάνει ενώ ενισχύεται και το συνολικό πλάνο της κυκλικής οικονομίας σε όλα τα επίπεδα επιχειρηματικής δραστηριότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΛΑΣΤΙΚΟ

2.1. Παρασκευή και είδη πλαστικών

Τα πλαστικά ορίζονται ως τα υλικά που έχουν σαν κύριο συστατικό μια φυσική ή τεχνητή ρητίνη (πολυμερές) και που είναι δυνατό υπό κατάλληλες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας να μορφοποιηθούν χωρίς να χάσουν το σχήμα τους, όταν παύσουν να υφίστανται οι αναφερθείσες συνθήκες. Τα περισσότερα σύγχρονα πλαστικά προέρχονται από παράγωγα επεξεργασίας ορυκτών καυσίμων, κυρίως πετρελαίου και φυσικού αερίου, ενώ τα τελευταία χρόνια εμφανίζονται και βιομηχανίες που κατεργάζονται ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές, όπως παράγωγα βιοκαυσίμων προερχόμενων από καλαμπόκι ή βαμβάκι [1].

Ο Alexander Parkes παρασκεύασε το πρώτο πλαστικό πολυμερές το 1855. Ο Ουάλλας Κάροδερς (Wallace Carothers) παρασκεύασε το συνθετικό πλαστικό "Νάυλον" (Nylon) το 1935 στα εργαστήρια της εταιρίας DuPont [2,4].

Τα πλαστικά είναι σχεδόν αποκλειστικά πολυμερή μεγάλου μοριακού βάρους, εξ ου και η ονομασία πολλών εξ αυτών φέρει το πρόθεμα πολυ-. Επίσης μπορεί να περιέχουν πρόσθετα, οργανικά ή μη, για βελτίωση των ιδιοτήτων τους (μηχανική αντοχή, εμφάνιση, χρώμα και άλλα).

Τα πλαστικά αποτελούν βιομηχανικά προϊόντα που αποτελούνται από [1]:

➤ Μία ή περισσότερες συνθετικές ή φυσικές ρητίνες, στις οποίες οφείλονται τα ιδιαίτερα γνωρίσματα του πλαστικού προϊόντος. Στις φυσικές ρητίνες ανήκουν η κυτταρίνη, το μετάξι και το καουτσούκ, ενώ οι τεχνητές ρητίνες παρασκευάζονται από τη χημική βιομηχανία. Το μακρομόριο των τεχνητών ρητινών (πολυμερές) αποτελείται από πλήθος μικρότερων μορίων άλλης ουσίας (μονομερών). Εμφανίζουν την ικανότητα να σκληραίνουν υπό την επίδραση εξωτερικών παραγόντων (αύξηση ή ελάττωση θερμότητας, πίεση, αέρα, φως και άλλα). Παρασκευάζονται στη χημική βιομηχανία με χρησιμοποίηση μεγάλων ποσών ενέργειας.

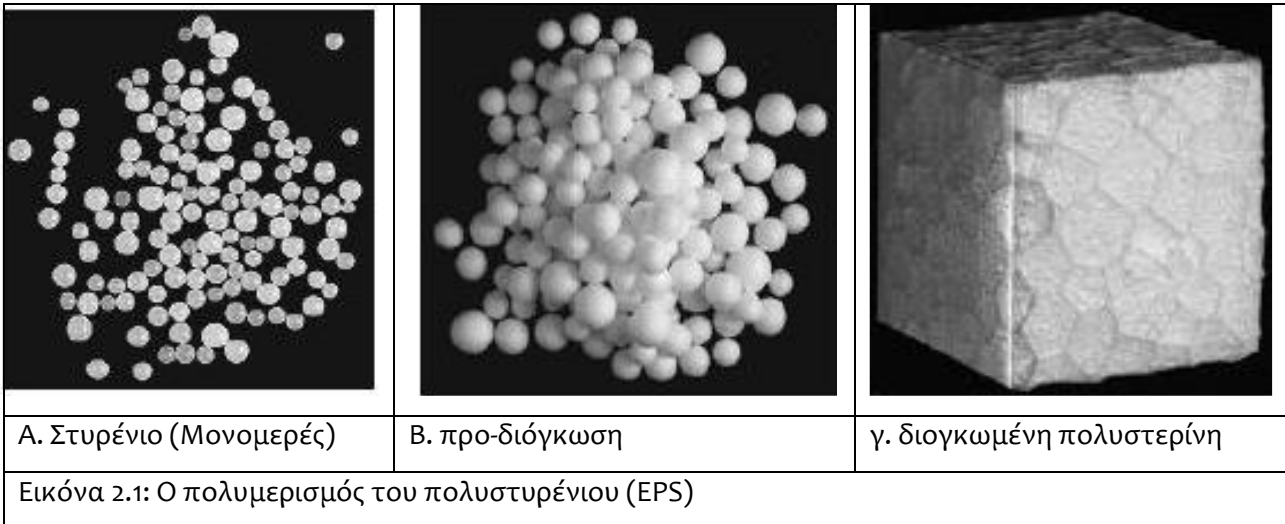
Μερικά παραδείγματα είναι τα ακόλουθα [40]:

○ Χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC – Polyvinyl chloride): Από αιθυλένιο και χλώριο προκύπτει το χλωριούχο βινύλιο (ως μονομερές), το οποίο υπό τις κατάλληλες συνθήκες σχηματίζει το πολυμερές του, το PVC. Το PVC έχει υψηλή σκληρότητα με καλές μηχανικές και μονωτικές ιδιότητες και σήμερα είναι το τρίτο πιο συχνά παραγόμενο πολυμερές. Το PVC με σχετικά χαμηλό κόστος, χημική και βιολογική αντίσταση έχει καταλήξει να χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

○ Ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS - Acrylonitrile butadiene styrene) : Το ABS είναι ένα σκληρό πλαστικό, με μεγάλη αντοχή στην κρούση και με καλή χημική αντίσταση. Χάρη σε αυτές τις δύο κύριες ιδιότητές του χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, όπως συσκευές κουζίνας, προφυλακτήρες αυτοκινήτων, ηλεκτρονικά συστήματα και πολλά άλλα.

○ Πολυστυρένιο (PS - Polystyrene) : από υγρό βενζόλιο - και το αέριο αιθυλένιο σχηματίζεται το στυρένιο (μονομερές), το οποίο μετά από φυσικοχημικές αντιδράσεις

παράγει το πολυμερές PS. Είναι ένα άκαμπτο, οικονομικό πλαστικό, ελαφρύ, το οποίο χρησιμοποιείται για σκληρά πλαστικά προφίλ και πλαστικούς σωλήνες.

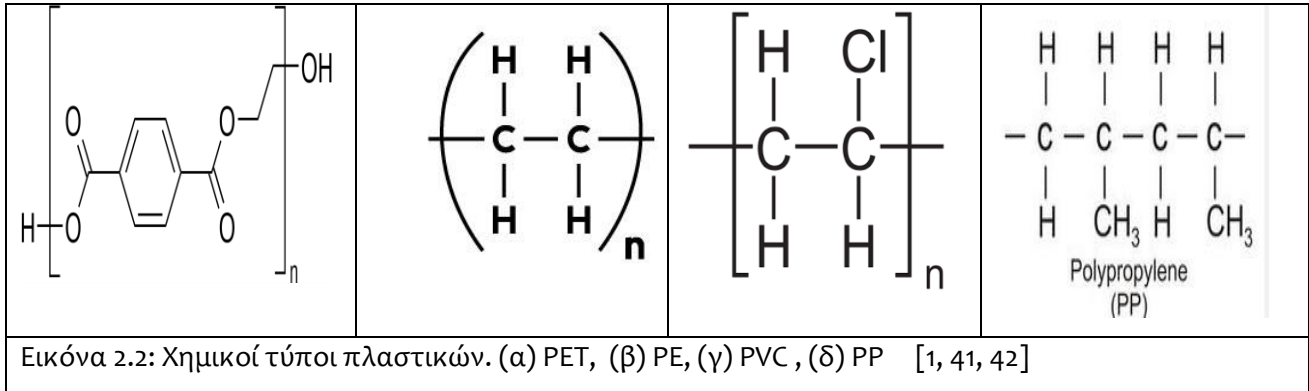


- ο Διογκωμένο Πολυστυρένιο ή διογκωμένη Πολυστερίνη (EPS – Expanded Polystyrene): Το Διογκωμένο Πολυστυρένιο είναι ένα σκληρό αφρώδες πλαστικό που αποτελείται από κλειστές κυψελίδες. Παράγεται από τον πολυμερισμό του στυρενίου, με διογκωτικό αέριο το πεντάνιο, και η τελική του μορφή είναι σε κόκκους. Είναι ευρέως διαδεδομένο στην Ελληνική αγορά με την ονομασία «ΦΕΛΙΖΟΛ». ΦΕΛΙΖΟΛ ονομαζόταν η πρώτη εταιρεία που το παρήγαγε στην Ελλάδα την δεκαετία του '70. Το όνομα αυτής προερχόταν από τα δύο συνθετικά μόνωση (insulation) και φελλός διότι η εταιρεία «ΦΕΛΙΖΟΛ» αρχικά εισήγαγε μονωτικές πλάκες φελλού. Με αυτό τον τρόπο η ονομασία του Διογκωμένου Πολυστυρενίου παρέμεινε ΦΕΛΙΖΟΛ παρόλο που δεν είχε καμία σχέση το υλικό με αυτή [65].

- ο Πολυαιθυλένιο (PE - Polyethylene): Είναι το πιο κοινό πλαστικό στον κόσμο. Κυμαίνεται από εύκαμπτο, χαμηλής πυκνότητας (LDPE - Low-density polyethylene) σε ημι-άκαμπτο, υψηλής πυκνότητας (HDPE - High-density polyethylene). Έχει εξαιρετική χημική αντοχή, που σημαίνει ότι δεν δέχεται επίθεση από ισχυρά οξέα, και είναι ανθεκτικό σε ήπια οξειδωτικά. Το πολυαιθυλένιο είναι επίσης καλός ηλεκτρικός μονωτής. Είναι ένα πολύ οικονομικό υλικό γι αυτό και χρησιμοποιείται συνήθως στη συσκευασία (όπως π.χ. στις συσκευασίες τροφίμων), στα καλώδια και στις σωληνώσεις.

- ο Πολυπροπυλένιο (PP - Polypropylene): Το πολυπροπυλένιο είναι ένα ημι-άκαμπτο, ελαφρύ, οικονομικό πλαστικό με εξαιρετική χημική και θερμική αντίσταση. Χρησιμοποιείται σε μια ευρεία ποικιλία εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της συσκευασίας και της σήμανσης, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα (π.χ. σχοινιά, θερμικά εσώρουχα και χαλιά), πλαστικά δοχεία διαφόρων τύπων, εργαστηριακός εξοπλισμός, ηχεία και εξαρτήματα αυτοκινήτων. Χρησιμοποιείται επίσης ως εναλλακτική λύση για το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC - Polyvinyl chloride) σε συστήματα σωληνώσεων και ως μόνωση για τα ηλεκτρικά καλώδια.

ο Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο (PET - Polyethylene terephthalate ή ο εστέρας του (PETE - Polyethylene terephthalate ester): είναι ένα πολυμερές συμπύκνωσης από τα μονομερή αιθανοδιόλη (γλυκόλη) και τερεφθαλικό διμεθυλεστέρα. Η μεγαλύτερη εφαρμογή του σήμερα είναι αναμφισβήτητα στην παρασκευή πλαστικών φιαλών και δοχείων στη βιομηχανία τροφίμων και γενικά ως υλικού συσκευασίας στα τρόφιμα.



➤ Μία ή περισσότερες συμπληρωματικές, οργανικές ή ανόργανες, ουσίες, οι οποίες αυξάνουν ή ελαττώνουν το βαθμό εκδήλωσης των ιδιοτήτων της ρητίνης ή βοηθούν στη μορφοποίηση των υλικών σε κατάλληλες για δόμηση μορφές. Οι συμπληρωματικές ουσίες δρουν για την τροποποίηση / βελτίωση των ιδιοτήτων της ρητίνης ή για την ενεργοποίηση της πλήρους ανάπτυξης ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της ή τον χρωματισμό της ρητίνης ή τη δημιουργία ενός αδρανούς σκελετού, του πυρήνα του στερεού πλαστικού υλικού. Μπορεί να είναι πλαστικοποιητές, καταλύτες, χρωστικές ενώσεις ή προσμίξεις και ενισχυτικά υλικά.

Μια εκτενέστερη αναφορά σχετικά με την χρησιμότητα, προσθήκη και τοξικότητα των πλαστικοποιητών παρουσιάζεται στη συνέχεια στην Ενότητα «4.2. Τοξικότητα πλαστικών αποβλήτων».

Η κατάταξη των πλαστικών πραγματοποιείται κυρίως σύμφωνα με 3 κριτήρια [1,2]:

- α. ανάλογα με την προέλευση των ρητινών: διακρίνονται σε φυσικά πλαστικά, πλαστικά από μεταποιήσεις, πλαστικά από χημικές ενώσεις και συνθετικά πλαστικά
- β. ανάλογα με τον τρόπο στερεοποίησης: κατηγοριοποιούνται σε θερμοπλαστικά, θερμοσκληρυνόμενα και ελαστομερή
- γ. ανάλογα με τη χρήση τους: χαρακτηρίζονται ως πλαστικά γενικής χρήσης, πλαστικά επικαλύψεων, πλαστικά συγκολλήσεων, υδαρή πλαστικά και πλαστικά ρητινών αντιδράσεων.

2.2. Χρήσεις πλαστικού

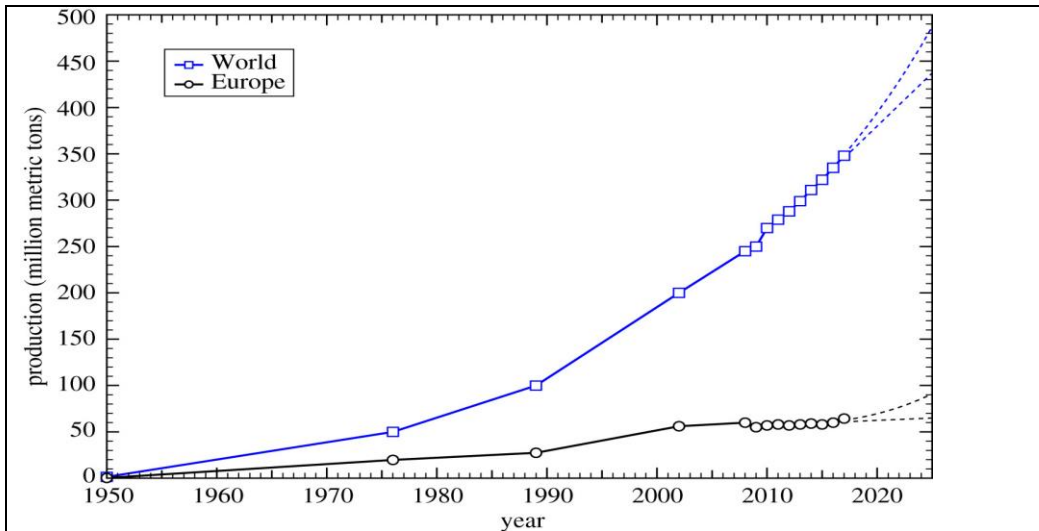
Εδώ και περισσότερα από 50 χρόνια, η παγκόσμια παραγωγή και κατανάλωση πλαστικών συνεχίζει να αυξάνει. Η παγκόσμια παραγωγή πλαστικού έχει αυξηθεί δραματικά (περίπου 230 φορές) από το 1950 σε σχεδόν 350 Μεγατόνους (Mt) ανά έτος (1 Mt = 1.000.000.000 Kg) σύμφωνα με δεδομένα του 2018. Το 2013 παράχθηκαν περίπου 299 εκατομμύρια τόνοι πλαστικού, σημειώνοντας αύξηση 4% σε σχέση με το 2012 και επιβεβαιώνοντας την ολοένα αυξητική τάση των προηγούμενων ετών, ενώ αναμένεται να διπλασιαστεί ξανά κατά την επόμενη εικοσαετία. Το 8% των παγκόσμιων αποθεμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πλαστικού, το 4% ως πρώτη ύλη και το υπόλοιπο 3% - 4% για την επεξεργασία και μεταφορά του. Τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων δεν είναι ανανεώσιμα, καθώς χρειάζονται εκατομμύρια χρόνων για το σχηματισμό τους, και η συνεχιζόμενη χρήση τους θα οδηγήσει σε εξάντληση. Εκτιμάται ότι 20% - 25% της παγκόσμιας παραγωγής του αργού πετρελαίου (93 εκατομμύρια βαρέλια την ημέρα) θα χρειάζονται μέχρι το τέλος αυτού του αιώνα για την παραγωγή πλαστικού [20,21].

Αυτή η αυξημένη παραγωγή και χρήση πλαστικού αντανakλά την καλύτερη κατανόηση και γνώση σχετικά με τη συμπεριφορά τους, η οποία απέδωσε καλύτερο έλεγχο των ιδιοτήτων τους και συνεπώς έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μεγάλου αριθμού νέων πολυμερών. Αυτή η αυξημένη γνώση έχει οδηγήσει σε μεγαλύτερη χρήση και εκμετάλλευση του πλαστικού (διάγραμμα 2.1). Αυτό γίνεται εμφανές αν αναλογιστούμε την παγκόσμια κατά κεφαλή παραγωγή πλαστικού. Ο παγκόσμιος πληθυσμός έχει αυξηθεί από 2,5 δισεκατομμύρια το 1950 σε 7,7 δισεκατομμύρια σήμερα, δηλαδή μια παγκόσμια αύξηση πληθυσμού σχεδόν τρεις φορές. Συγκριτικά, η κατά μέσο όρο παγκόσμια παραγωγή πλαστικού κατά κεφαλή αποτυπώνει μία 50-πλάσια αύξηση (διάγραμμα 2.2). Αν και αυτή η εκτίμηση δεν είναι ίδια για χρήση του πλαστικού στις αναπτυγμένες και στις αναπτυσσόμενες χώρες, αυτό που υποδεικνύει είναι η αυξανόμενη εξάρτηση της σημερινής κοινωνίας από το πλαστικό. Και παρόλο που κάποιες από τις χρήσεις του πλαστικού επαφίονται στον καθένα ως άτομο, π.χ. η χρήση πλαστικής σακούλας ή όχι, μεγάλοι όγκοι πλαστικών χρησιμοποιούνται κάθε χρόνο για κοινωνικό όφελος, όπως οι δημοτικοί πλαστικοί σωλήνες ύδρευσης / αποχέτευσης, που σε αυτή την περίπτωση οι ατομικές επιλογές είναι περιορισμένες.

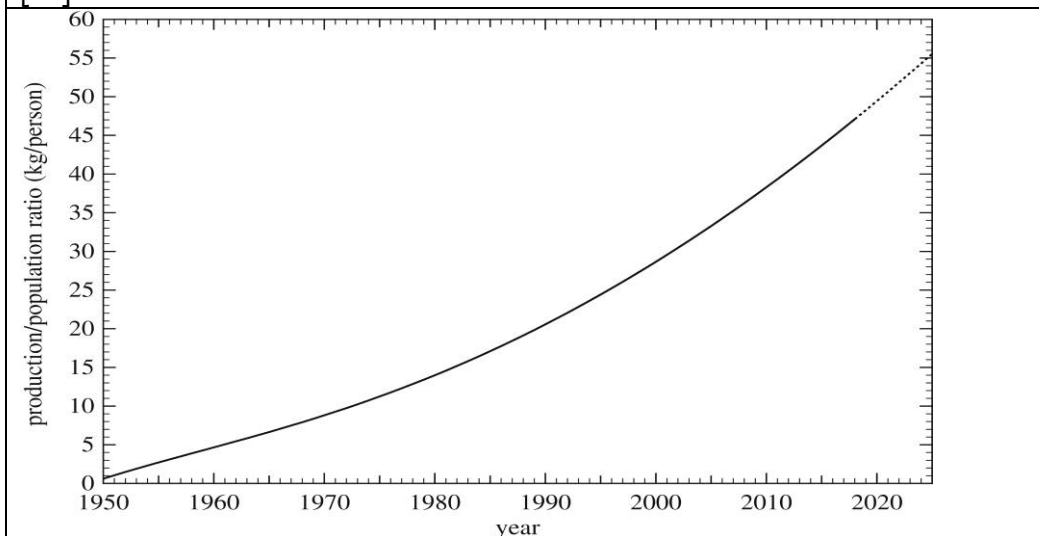
Χάρη σε μερικές από τις παρακάτω πλεονεκτικές ιδιότητες, το πλαστικό έχει υιοθετηθεί σε μεγάλο βαθμό από τις σύγχρονες κοινωνίες [1,4]:

- Πλαστικότητα υλικών, σε κάποιο στάδιο της παρασκευής τους, που καθιστά εύκολη την επεξεργασία τους
 - Πολύ χαμηλό ειδικό βάρος (0,91-1,9)
 - Πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα
 - Μεγάλη ικανότητα ηλεκτρικής μόνωσης
 - Μεγάλη αντοχή στη διάβρωση στο χρόνο και στη δράση μικροβίων
 - Μικρό κόστος παραγωγής
 - Αντοχή στη γήρανση
 - Υδατοαπορροφητικότητα (αδιαπέραστα από το νερό, ειδικά οι σιλικόνες)
 - Αντοχή σε χαμηλές θερμοκρασίες

- Ασφάλεια, καθώς δεν σπάζουν ώστε να προκύψουν επικίνδυνα κομμάτια
- Υγιεινή, είναι ασφαλής η επαφή με τρόφιμα και προστατεύουν τα προϊόντα
- Μικρή διαπερατότητα σε αέρια και υγρά
- Μεγάλη ελευθερία στο σχεδιασμό



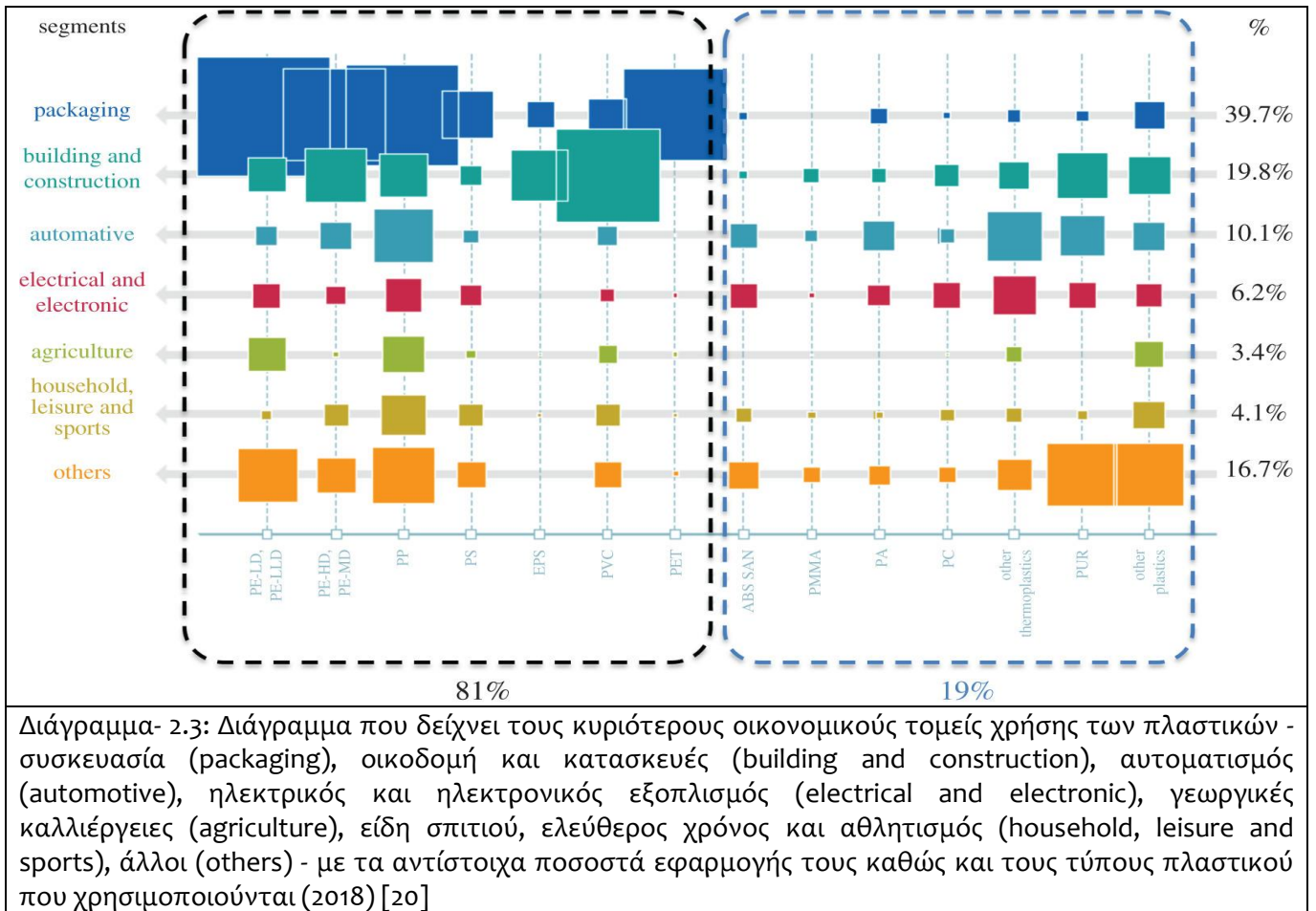
Διάγραμμα 2.1: Παγκόσμια παραγωγή πλαστικού σε εκατομμύρια μετρικών τόνους (production in million metric tons) στον κόσμο με μπλε γραμμή και στην Ευρώπη με μαύρη γραμμή. Οι διακεκομμένες γραμμές αφορούν προβλέψεις [20]



Διάγραμμα 2.2: Η κατά κεφαλή παγκόσμια παραγωγή πλαστικού [20]

Όπως προαναφέρθηκε, οι χρήσεις των πλαστικών προϊόντων είναι πολλές, από τα ηλεκτρονικά ως τα ιατρικά εργαλεία, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.3. Ωστόσο, είναι ξεκάθαρο πως ο κυριότερος τομέας χρήσης πλαστικού, που αντιστοιχεί σχεδόν στο 40% της παγκόσμιας παραγωγής του, είναι η συσκευασία. Επιπλέον, αν και εκατοντάδες είδη πλαστικών υπάρχουν, στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται πως πάνω από το 80% αυτών που χρησιμοποιούνται, είναι το πολυαιθυλένιο (PE χαμηλής πυκνότητας LDPE, και υψηλής

πυκνότητας HDPE), το πολυπροπυλένιο (PP), το πολυστυρένιο (PS, EPS) , το πολυβινυλχλωρίδιο (PVC) και το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο, (PET).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

3.1 Κύκλος ζωής πλαστικών

Το πρώτο βήμα στην κατασκευή των πλαστικών προϊόντων είναι η φάση του πολυμερισμού. Σε αυτή, το ακατέργαστο πετρέλαιο και το φυσικό αέριο συλλέγονται και μετατρέπονται σε μονομερή υδρογονανθράκων, όπως το αιθυλένιο και το προπυλένιο. Ανάλογα με το είδος του πλαστικού που πρόκειται να κατασκευαστεί, με πρόσθετη επεξεργασία προκύπτουν και άλλα ακόμη μονομερή, όπως το στυρένιο, το πολυπροπυλένιο, κλπ. Στη συνέχεια, αναπτύσσονται χημικοί δεσμοί που συνδέουν αυτές τις αλυσίδες των μονομερών σε πολυμερή. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, προστίθενται στο υλικό ουσίες που προσδίδουν συγκεκριμένες ιδιότητες καθώς και πρόσθετα για το χρώμα, την προστασία ή την αναδίπλωση των αλυσίδων.

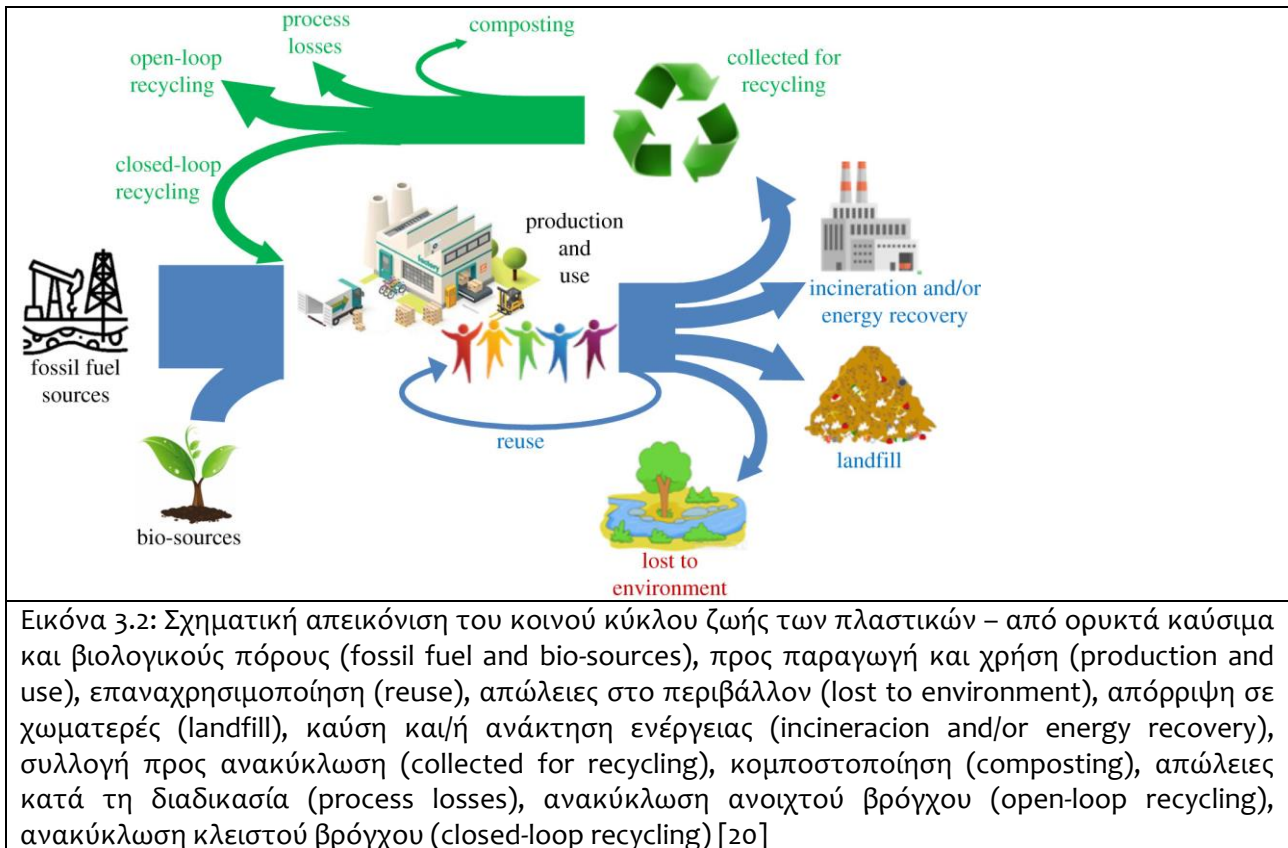
Κατά την παρασκευή τους, η ρητίνη σε μορφή σκόνης, κόκκων, λεπτών φύλλων και υγρών αναμιγνύεται με συμπληρωματικές ουσίες. Στη συνέχεια το προϊόν μορφοποιείται με διαδικασίες όπως συμπίεση, χύτευση, έγχυση, εκβολή, έλαση και εμποτισμό των διάφορων φυλλόμορφων υλικών (π.χ. υφάσματα, μεταλλικά πλέγματα κ.ά.). Τέλος, ακολουθούν οι μηχανικές διαδικασίες κοπής, λείανσης, στίλβωσης, και ό,τι άλλο χρειάζεται ανάλογα με την τελικό στόχο [4].



Εικόνα 3.1: Πλαστικά προϊόντα καθημερινής χρήσης

Τα πλαστικά προϊόντα που θα δημιουργηθούν, αν και διαφέρουν σε μορφή και ιδιότητες, θα γίνουν είτε θερμοπλαστικά είτε θερμοσκληρυνόμενα. Από εδώ και στο εξής ο κύκλος ζωής του καθενός είναι διαφορετικός. Πιο συγκεκριμένα, αν το προϊόν που θα προκύψει είναι θερμοσκληρυνόμενο, όπως για παράδειγμα οι υποξείκες κόλλες, τα φύλλα μελαμίνης, τα υλικά της μόνωσης ή τα μέρη του αυτοκινήτου, δεν μπορεί να ανακυκλωθεί. Ο κύκλος της ζωής του ολοκληρώνεται είτε με το να χρησιμοποιηθεί με νέο τρόπο (επαναχρησιμοποίηση) είτε με τελική διάθεση σε Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων ή Υπολειμμάτων (ΧΥΤΑ ή ΧΥΤΥ), ή με αποτέφρωση ή, ακόμη και με ανεξέλεγκτη απόρριψη στο φυσικό περιβάλλον, όπως π.χ. σε υδάτινα οικοσυστήματα, θάλασσες και ωκεανούς, όπως και σε μη εγκεκριμένους χώρους απόρριψης στη ξηρά (χωματερές και άλλα).

Αντίθετα, στα θερμοπλαστικά μέσω θέρμανσης διασπώνται οι χημικοί δεσμοί μεταξύ των μονομερών και μπορούν να ανασυντεθούν σε νέα μορφή. Σε κάποιες περιπτώσεις η διαδικασία της επαναχρησιμοποίησης μπορεί να επαναληφθεί άπειρες φορές. Στην πράξη όμως, τα περισσότερα πλαστικά μπορούν να ανακυκλωθούν 2 ως 3 φορές.

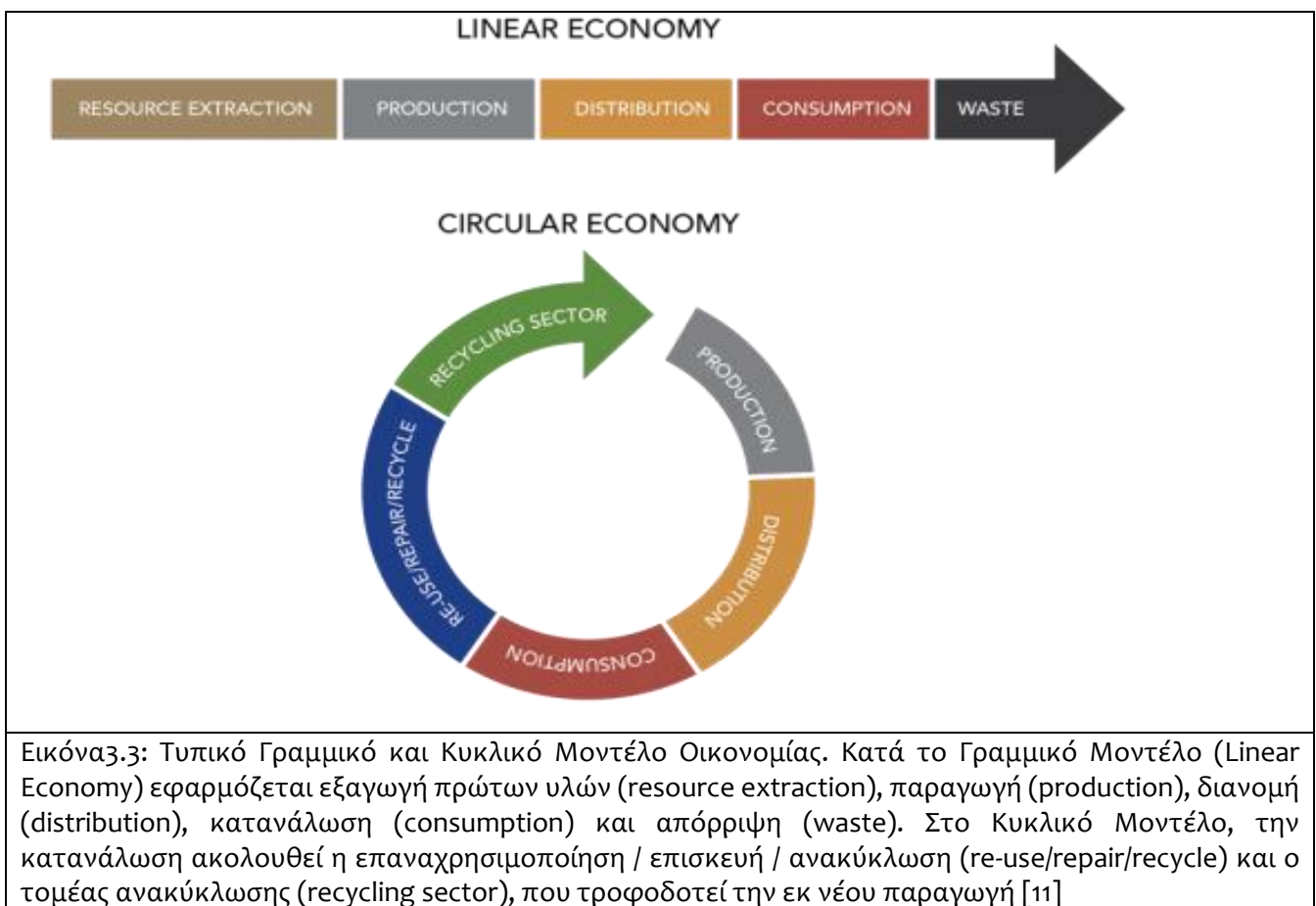


Ο κοινός κύκλος ζωής των πλαστικών απεικονίζεται στην εικόνα 3.2. Όπως υποδεικνύεται, από τη στιγμή που θα χρησιμοποιηθούν τα πλαστικά προϊόντα, το μέλλον τους είναι είτε να απορριφθούν κατευθείαν σε ΧΥΤΑ ή ΧΥΤΥ, είτε να αποτεφρωθούν με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας είτε στην καλύτερη περίπτωση να ανακυκλωθούν και σε ελάχιστες περιπτώσεις να επαναχρησιμοποιηθούν. Ο χρονικός ορίζοντας στον οποίο κάθε πλαστικό προϊόν ακολουθεί μία από αυτές τις πορείες, εξαρτάται φυσικά από τη χρήση του. Στο ένα άκρο βρίσκονται πλαστικά που μπορεί να χρησιμοποιηθούν μόνο για λίγες μέρες, όπως τα υλικά συσκευασίας, και αντιδιαμετρικά τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται για δεκαετίες, όπως αυτά στον κατασκευαστικό τομέα [20, 4, 21].

Τα σύγχρονα δεδομένα μαρτυρούν πως βρισκόμαστε μπροστά σε μία κρίση διαχείρισης των απορριμμάτων, ιδιαίτερα των πλαστικών. Το 2015 παράχθηκαν 6.300 μεγατόνοι (Mt) πλαστικών απορριμμάτων. Δυστυχώς, το 79% αυτών κατέληξε είτε σε υγειονομική ταφή είτε στο φυσικό περιβάλλον, ενώ η ανακύκλωση και η αποτέφρωση αναλογούν στο 9% και στο 12% αντίστοιχα. Επίσης, τα πλαστικά απόβλητα που καταλήγουν στους ωκεανούς και έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον του κοινού τελευταία, εκτιμώνται μεταξύ 4 Mt και 12 Mt από την ξηρά προς το θαλάσσιο περιβάλλον μόνο το έτος 2010 [20, 21,3].

3.2. Κυκλικό Μοντέλο Οικονομίας των πλαστικών

Η σημερινή παγκόσμια οικονομία είναι γραμμική, που σημαίνει ότι οι εταιρείες εξάγουν πόρους από το περιβάλλον και τους μετατρέπουν σε καταναλωτικά προϊόντα, τα οποία μεταφέρονται, χρησιμοποιούνται και θα καταλήξουν κάποια στιγμή στα απορρίμματα. Με την εξάντληση των φυσικών πόρων το γραμμικό μοντέλο παραγωγής που επικρατεί σήμερα, στο οποίο βασίζεται η οικονομία μας μετά τη Βιομηχανική Επανάσταση, δεν είναι πλέον βιώσιμο. Το κυκλικό μοντέλο είναι μια προσέγγιση που έχει ως υπόδειγμα τη φύση. Η έννοια της κυκλικής οικονομίας προκύπτει ως μια ανάγκη, ενσαρκώνοντας το όραμα μιας ιδανικής οικονομίας, στην οποία τίποτα δεν θα απορρίπτεται και τα πάντα θα επαναχρησιμοποιούνται (εικόνα 3.3) [11].



Το σύνθημα με το οποίο έγινε γνωστή η έννοια της κυκλικής οικονομίας, ήταν αυτό των 5 Rs: Reduce, Repair, Reuse, Refurbish, Recycle. Δηλαδή, από τη στιγμή δημιουργίας ενός προϊόντος και της αρχικής του χρήσης, ακολουθεί Μείωση, Επιδιόρθωση, Επαναχρησιμοποίηση, Ανακατασκευή και τελικά Ανακύκλωση [13].

Ωστόσο, τα σύγχρονα μοντέλα κυκλικής οικονομίας περιλαμβάνουν περισσότερα από απλές αντιλήψεις ανακύκλωσης, επεκτεινόμενα σε ένα επίπεδο, στο οποίο ενσωματώνονται η οικονομική δραστηριότητα με την περιβαλλοντική και κοινωνική βιωσιμότητα. Η αντίληψη της κυκλικής οικονομίας έχει αναπτυχθεί από την ιδέα της

βιωσιμότητας και ενσωματώνει αντιλήψεις, στις οποίες τα προϊόντα και τα υλικά διατηρούνται στο υψηλότερο επίπεδο της αξίας τους για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, σχεδιάζοντας τη μείωση των απορριμμάτων από την πρώτη στιγμή, όπως επίσης και την αποφυγή και εξάλειψη της μόλυνσης, της τοξικότητας και της ρύπανσης των φυσικών πόρων [21].

Στην κυκλική οικονομία, η αξία των προϊόντων, των υλικών και των φυσικών πόρων παραμένει στην οικονομία όσο το δυνατόν περισσότερο, και η παραγωγή αποβλήτων περιορίζεται στο ελάχιστο, προϋπόθεση απαραίτητη για μια βιώσιμη οικονομία με χαμηλές εκπομπές θερμοκηπιακών αερίων και αποδοτική αξιοποίηση των πόρων. Ένας άξονας της κυκλικής οικονομίας είναι ο οικο-σχεδιασμός (eco-design), όπου τα προϊόντα σχεδιάζονται έτσι ώστε να διαρκέσουν περισσότερο, να χρησιμοποιούνται λιγότερα υλικά και μικρότερη ποσότητα ενέργειας για να παραχθούν, αντικαθίστανται οι σπάνιες πρώτες ύλες με άλλες, περισσότερο άφθονες (δηλαδή με όσες είναι ανανεώσιμες και βιώσιμες), αποκαθίσταται η οικολογική ισορροπία στο περιβάλλον και τέλος έχουν τη δυνατότητα εύκολης αποσυναρμολόγησης στα συστατικά μέρη τους, ώστε να ανακτηθούν οι πολύτιμοι φυσικοί πόροι. Αυτό το νέο μοντέλο προϋποθέτει νέους τρόπους σχεδιασμού, παραγωγής και κατανάλωσης και κυρίως απαιτεί την ενεργό συμμετοχή όλων των φορέων της οικονομικής ζωής (επιχειρήσεις, τοπικές κοινότητες, πολίτες-καταναλωτές) [20].

Η υιοθέτηση ενός κυκλικού μοντέλου οικονομίας είναι ένας τρόπος βελτίωσης και άλλων τομέων της κοινωνίας, όπως η δημιουργία μιας νέας παραγωγικής δύναμης απαραίτητης για την επαν-επεξεργασία (επανακατασκευή και επιδιόρθωση) των υλικών και αγαθών, η οποία αναμένεται να αναπτυχθεί ραγδαία. Η κυκλική οικονομία έρχεται να καλύψει τις αυξανόμενες προκλήσεις μπροστά στην ανεπάρκεια των φυσικών πόρων, στην ανεργία, στη σπατάλη ενέργειας και στην αποτροπή των ανεπανόρθωτων βλαβών που προκαλεί η κατανάλωση πόρων με ρυθμό μεγαλύτερο από την ικανότητα της Γης να τους ανανεώνει, όσον αφορά στο κλίμα, στη βιοποικιλότητα και στη ρύπανση της ατμόσφαιρας, του εδάφους και των υδάτων.

Σε μια κυκλική οικονομία, ενισχύεται η χρήση των ανανεώσιμων φυσικών πόρων, με πολλαπλούς κύκλους επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης, όπου κρίνεται σκόπιμο. Στη συνέχεια και μόνο υπό προϋποθέσεις, θα γίνεται η χρήση συμβατικών, μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων. Επιπλέον, τα υλικά που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, επανεισάγονται στην οικονομία με τη μορφή νέων πρώτων υλών, αυξάνοντας έτσι την ασφάλεια του εφοδιασμού. Αυτές οι «δευτερογενείς πρώτες ύλες» μπορούν να πωληθούν και να μεταφερθούν όπως ακριβώς οι πρωτογενείς πρώτες ύλες από κλασικούς εξορυκτικούς ορυκτούς πόρους.

Ένας φυσικός πόρος που απειλείται έντονα τα τελευταία χρόνια, με εξάντληση ή ρύπανση και μόλυνση, είναι το νερό. Η λειψυδρία επιδεινώθηκε σε πολλές χώρες κατά τις τελευταίες δεκαετίες, με επακόλουθες δυσμενείς επιπτώσεις για το περιβάλλον και την οικονομία. Στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας προβλέπονται μέτρα για την αποδοτική χρήση του νερού και την επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων μετά από επεξεργασία και υπό ασφαλείς και οικονομικά αποδοτικές συνθήκες. Ειδικά τα υγρά απόβλητα αποτελούν ένα πολύτιμο αλλά εν μέρει αναξιοποίητο μέσο για την αύξηση της παροχής νερού και την άμβλυνση της πίεσης που δέχονται οι υδάτινοι πόροι παγκοσμίως λόγω υπερεκμετάλλευσης. Η επαναχρησιμοποίηση του νερού στη γεωργία συμβάλλει

επίσης στην ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών μέσω της υποκατάστασης των στερεών λιπασμάτων [10].

Βασική παράμετρος όμως στην επιτυχία της κυκλικής οικονομίας ως απάντησης στα επείγοντα προβλήματα της κλιματικής αλλαγής και των πεπερασμένων φυσικών πόρων είναι η ευαισθητοποίηση, σωστή ενημέρωση και εκπαίδευση των καταναλωτών.

Ειδικότερα στην περίπτωση των πλαστικών, οι προκλήσεις και τα προβλήματα είναι πολλά. Ένα κεντρικό σημείο είναι η κυριαρχία των ορυκτών καυσίμων ως πρώτης ύλης στην παραγωγή των πλαστικών, το οποίο έρχεται σε πλήρη αντίθεση με μια βασική αρχή της κυκλικής οικονομίας, που είναι η αποκλειστική χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι η πρόληψη, δηλαδή η μείωση στην πηγή και κατ' επέκταση η μειωμένη κατανάλωση πλαστικών. Επίσης μια άλλη αντίθεση, αφορά στη διαχείριση και τελική κατάληξη των πλαστικών μετά τη χρήση, που συνήθως είναι η απόρριψη. Ακόμη και μετά την ανάπτυξη πολλών πρακτικών ανακύκλωσης τα τελευταία χρόνια, η πλειοψηφία των πλαστικών μιας χρήσης είτε καταλήγει σε μη εγκεκριμένου χώρους απόρριψης απορριμμάτων (χωματερές), είτε με αυξανόμενο ρυθμό, στους αποτεφρωτήρες για την ανάκτηση ενέργειας. Και οι δύο αυτές πρακτικές όμως, όχι μόνο συμβάλλουν στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος, με διαφορετικούς τρόπους, αλλά αναπαριστούν και μια τεράστια απώλεια ενός πολύτιμου φυσικού πόρου.

Για να επιτευχθεί η κυκλική οικονομία στα πλαστικά, σημαντικές αλλαγές πρέπει να γίνουν σε τρέχουσες πρακτικές που περιλαμβάνουν νέες και βιώσιμες προσεγγίσεις στον οικο-σχεδιασμό, στην επαναχρησιμοποίηση, στην επιδιόρθωση και διατήρηση, στη διαχείριση, στην ανακύκλωση, στην εξοικονόμηση ενέργειας, στη μείωση της χρήσης νερού και στην χημική μετατροπή, εκτός από τις απαραίτητες κοινωνικές και οικονομικές αλλαγές που απαιτούνται. Πολλές κυβερνήσεις και κέντρα λήψης αποφάσεων, μεταξύ των οποίων και η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), τοπικές αρχές, όπως επίσης και ανεξάρτητες εταιρείες έχουν εισάγει πολιτικές που προωθούν την κυκλική οικονομία ως μία προσπάθεια συμφιλίωσης των περιβαλλοντικών ανησυχιών με την οικονομική ανάπτυξη [20].

Ήδη από το Δεκέμβριο του 2015 η Ευρωπαϊκή επιτροπή έχει εγκρίνει σχέδιο δράσης για την κυκλική οικονομία, θέτοντας στόχους και κανόνες και ανακοινώνοντας μια φιλόδοξη δέσμη μέτρων έχοντας ως περιβαλλοντικό στόχο τη μείωση της θαλάσσιας ρύπανσης και την αύξηση της ανταγωνιστικότητας σε οικονομικό επίπεδο. Στα πλαίσια αυτά, ανακοινώθηκαν πρωτοβουλίες δράσης για τα πλαστικά, τα υγρά απόβλητα, τα βιοδιασπώμενα απόβλητα, τα ηλεκτρονικά απόβλητα και άλλες κατηγορίες αποβλήτων. Συγκεκριμένα για τη διαχείριση των πλαστικών, ακολούθησε η πρόταση για τα πλαστικά μιας χρήσης στην Ευρώπη τον Μάιο του 2018 στα πλαίσια της παγκόσμιας πρώτης στρατηγικής για τα πλαστικά υλικά που εγκρίθηκε τον Ιανουάριο του 2018. Όταν υπάρχουν εναλλακτικά προϊόντα εύκολα διαθέσιμα και οικονομικά προσιτά, τα πλαστικά προϊόντα μίας χρήσης, όπως για παράδειγμα μπατονέτες, μαχαιροπήρουνα, πιάτα, καλαμάκια και αναδευτήρες, καλαμάκια στήριξης μπαλονιών από πλαστικό, προϊόντα από οξοδιασπώμενα πλαστικά και περιέκτες τροφίμων και ποτών από διογκωμένο πολυστυρένιο, θα απαγορεύονται από την αγορά. Όσον αφορά άλλα προϊόντα, δίνεται έμφαση στον περιορισμό της χρήσης τους μέσω της μείωσης της κατανάλωσης σε εθνικό επίπεδο, απαιτήσεων σχεδιασμού και επισήμανσης, καθώς και υποχρεώσεων των κατασκευαστών τους για διαχείριση των αποβλήτων/καθαρισμό [60]. Περισσότερες

πληροφορίες αναφέρονται στην ενότητα «5.2 Νομοθετικό Πλαίσιο για τη Διαχείριση Πλαστικών Αποβλήτων».

Ενώ στην Ελλάδα ακόμη βρισκόμαστε στα αρχικά βήματα για την υλοποίηση της Κυκλικής Οικονομίας, στη Φινλανδία, οι πρωτοβουλίες που λαμβάνονται είναι αν μη τι άλλο εντυπωσιακές. Κατά τη διάρκεια του σχολικού έτους 2018/2019, περισσότερα από 70.000 παιδιά και νέοι μαθητές στη Φινλανδία παρακολούθησαν μια σειρά μαθημάτων για την Κυκλική Οικονομία σε όλα τα επίπεδα της ακαδημαϊκής μόρφωσης από τα δημοτικά σχολεία μέχρι και τα Πανεπιστήμια. Η Φινλανδία εξελίσσεται ταχύτατα σε ηγέτιδα χώρα στην Κυκλική Οικονομία. Η Κυκλική Οικονομία στην εκπαίδευση γίνεται μέρος της καθημερινότητας στα σχολεία, όπου τα παιδιά σκέφτονται τρόπους για να μειώσουν τα απόβλητα τροφίμων, μαθαίνουν πώς να ταξινομούν σωστά τα απορρίμματα μέσω εκπαιδευτικών πρωτοβουλιών σε όλες τις βαθμίδες της εκπαίδευσης μέχρι και το Πανεπιστήμιο. Κατά τη διάρκεια της εκπαιδευτικής πορείας, μαθαίνουν για τα υλικά αλλά και τις επιχειρηματικές δραστηριότητες, τη σημασία απόκτησης προσωπικών δεξιοτήτων και γνώσεων για να είναι πολύτιμα μέλη μιας κοινωνίας, που έχει υιοθετήσει την Κυκλική Οικονομία. Βασικό σύνθημα της προσπάθειας: «Η Κυκλική Οικονομία είναι ένας σκοπός που αφορά τους πάντες» [11].

Τα οικονομικά οφέλη από την πλήρη εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας στον τομέα των πλαστικών μπορούν να είναι τεράστια, με τρέχουσες μελέτες να εκτιμούν περίπου το όφελος 1 τρισεκατομμύριο δολάρια Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (US\$) στην παγκόσμια οικονομία [20].

Ωστόσο, η κυκλική οικονομία ως αντίληψη δεν στερείται κριτικής. Ήδη πολλές σχολές / θεωρίες έχουν προτείνει πως επειδή η οικονομία είναι εκ φύσεως εντροπική και άρα γραμμική εξ ορισμού, η επίτευξη της κυκλικότητας θα είναι αδύνατη. Επίσης, η ανάγκη για χρήση ενέργειας μέσα στο συνολικό κύκλο ζωής των πλαστικών, παρατίθεται από πολλούς κριτές ως ένας ακόμη λόγος για τον οποίο η κυκλικότητα δεν θα μπορεί να επιτευχθεί. Ωστόσο, αυτός ο ισχυρισμός θεωρεί ως δεδομένο ότι η μελλοντική παραγωγή ενέργειας δε θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, παρόλο που η πρόσφατη παγκόσμια δράση υποδεικνύει πως η ανανεώσιμη ενέργεια είναι μία βιώσιμη εναλλακτική πρόταση στα ορυκτά καύσιμα. Παρόλες αυτές τις κριτικές, η ιδέα και οι αρχές της κυκλικής οικονομίας των πλαστικών που τη σημερινή εποχή ευρέως μελετώνται, συνεχώς αναπτύσσονται και ολοένα και περισσότερο εφαρμόζονται σε όλο τον κόσμο [20, 25].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

4.1 Πλαστικά απόβλητα

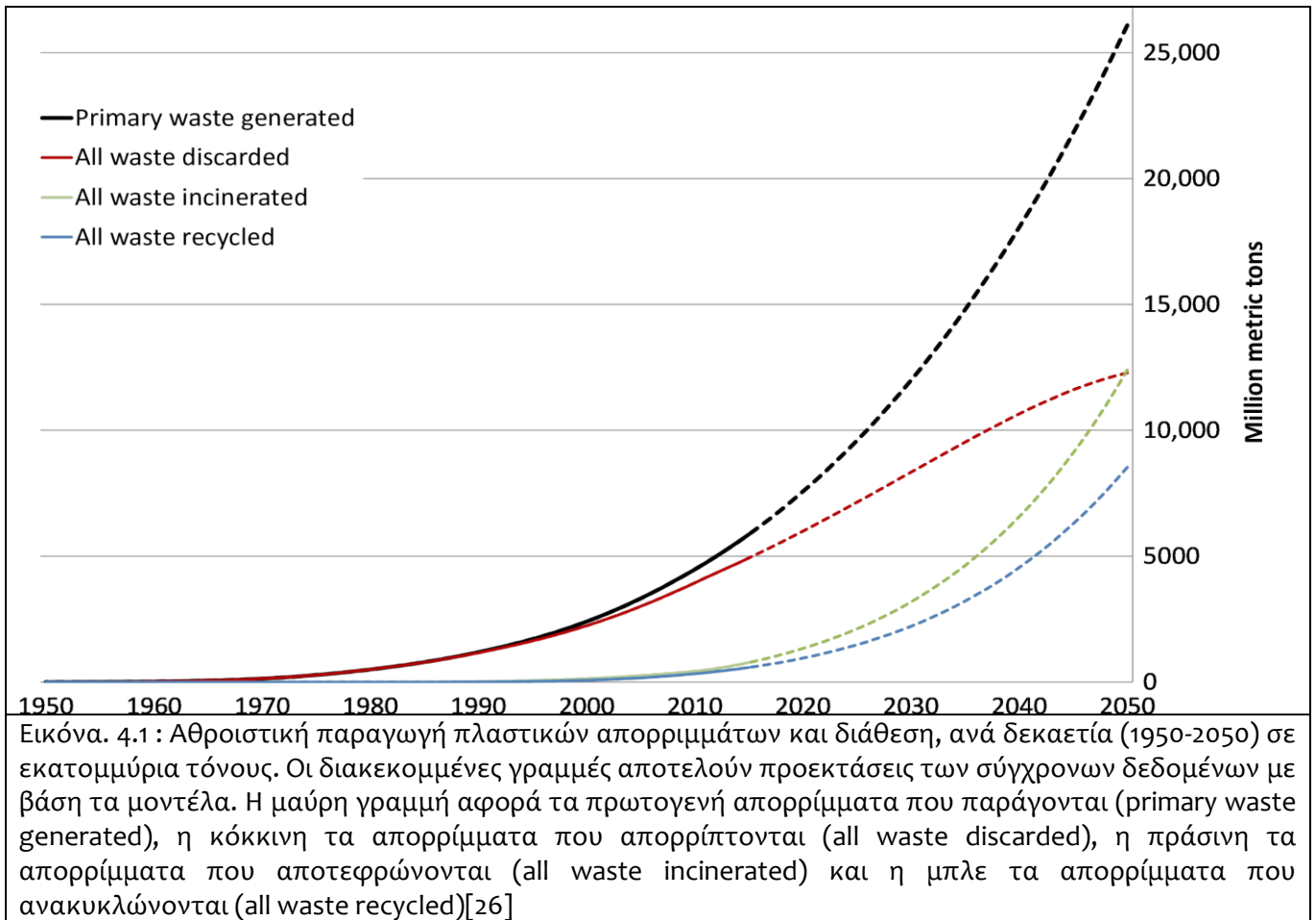
Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, η παγκόσμια παραγωγή πλαστικού έχει αυξηθεί δραματικά τα τελευταία 50 χρόνια, συνοδευόμενη φυσικά από την αντίστοιχη αύξηση της παραγωγής των πλαστικών απορριμμάτων. Τεράστιες ποσότητες συνθετικών πλαστικών έχουν διοχετευθεί τα τελευταία 70 χρόνια στο περιβάλλον εξαιτίας της φτηνής μαζικής παραγωγής πλαστικού και αποτελούν πλέον έναν από τους πιο κοινούς και επίμονους ρύπους. Πλαστικά απόβλητα έχουν εντοπιστεί σε όλες τις ωκεάνιες λεκάνες, με μία εκτίμηση 4 ως 12 εκατομμύρια τόνων να έχουν διοχετευθεί στα θαλάσσιο περιβάλλον μόνο το 2010. Η ρύπανση των υδάτινων οικοσυστημάτων αναφέρεται όλο και πιο συχνά, όπως και η χερσαία ρύπανση, στη ρύπανση με συνθετικές ίνες. Τα πλαστικά απόβλητα είναι πλέον τόσο πανταχού παρόντα, σε σημείο που έχουν προταθεί ως γεωλογικός δείκτης της αποκαλούμενης ως «Ανθρωπόκαινου εποχής», που αποκαλείται πλέον από τους επιστήμονες και ως «Εποχή του Πλαστικού» [26].

Υπάρχουν πολλές εναλλακτικές μέθοδοι, διαθέσιμες για τη διάθεση / διαχείριση των πλαστικών, όπως είναι η αποτέφρωση για ανάκτηση ενέργειας, η υγειονομική ταφή, η αεριοποίηση και η πυρόλυση για τη μετατροπή του πλαστικού σε συνθετικό αέριο ή καύσιμο αντίστοιχα, η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση. Κάθε μια από τις προαναφερθείσες μεθόδους περιλαμβάνει τα δικά της μειονεκτήματα και περιβαλλοντικούς κινδύνους. Ποικιλία μεθόδων έχει επίσης αναγνωριστεί με σκοπό την αποδόμηση των συνθετικών πλαστικών που παρήχθησαν από πολυμερισμό προς την παραγωγή αβλαβών μορίων ή την επεξεργασία τους εκ νέου μέσω μηχανικής ανακύκλωσης ή βιολογικής αποικοδόμησης. Αυτές οι τελευταίες μέθοδοι ωστόσο είναι αρκετά πολύπλοκες και δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε ευρεία κλίμακα. Προς το παρόν λοιπόν, η υγειονομική ταφή, η ανακύκλωση και η αποτέφρωση είναι οι κύριες υιοθετημένες μέθοδοι για τη διαχείριση των πλαστικών αποβλήτων [25].

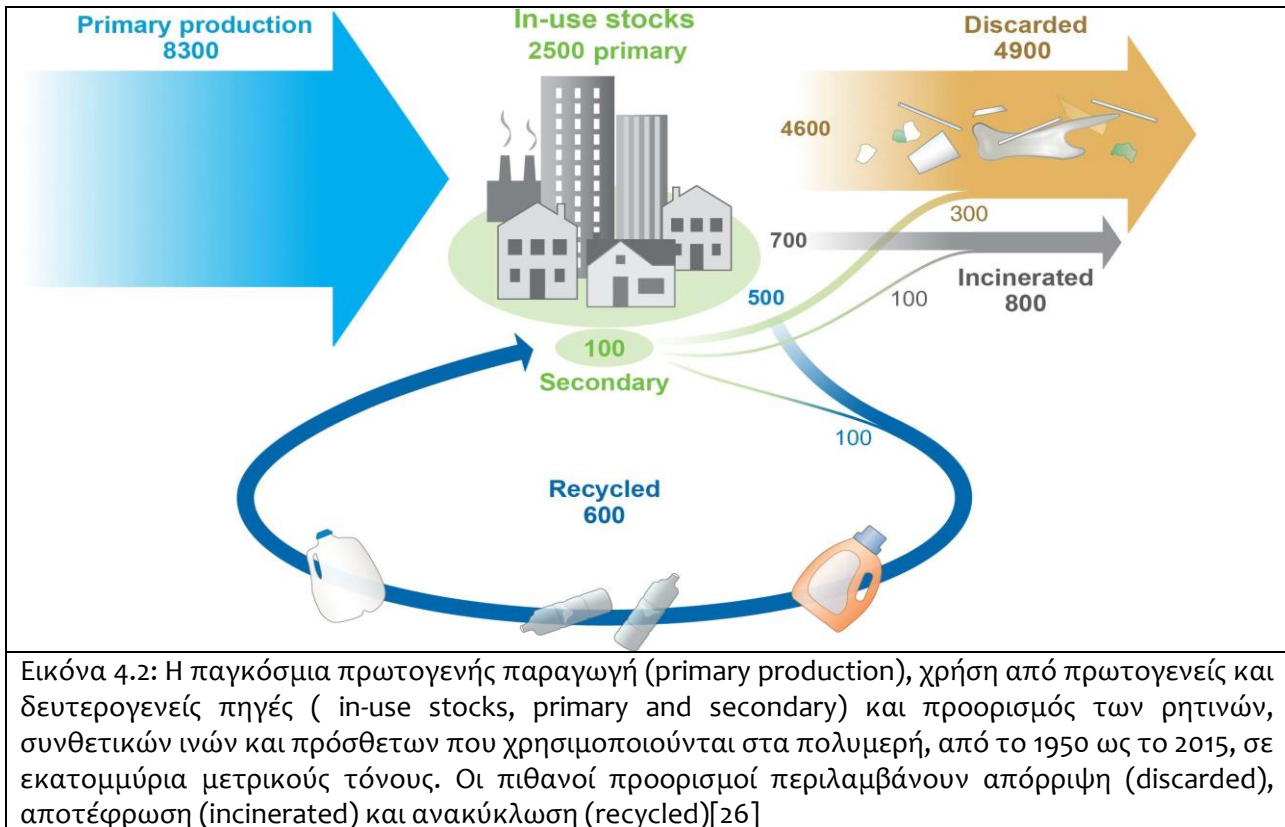
Εκτιμάται πως 2.500 Mt – ή το 30% των πλαστικών που έχουν παραχθεί συνολικά – ήταν σε χρήση το 2015. Μεταξύ 1950 και 2015, η συνολική παραγωγή πρωτογενών και δευτερογενών (ανακυκλωμένων) πλαστικών αποβλήτων είχε ανέλθει στους 6.300 Mt. Από αυτούς, περίπου 800 Mt (12%) πλαστικού είχε αποτεφρωθεί και 600 Mt (9%) είχε ανακυκλωθεί, εκ των οποίων μόνο το 10% ανακυκλώθηκε περισσότερες από μία φορές. Περίπου 4.900 Mt- ή το 60% της συνολικής παραγωγής ως το 2015- είχαν απορριφθεί και συσσωρεύονται είτε σε χώρους υγειονομικής ταφής είτε στο φυσικό περιβάλλον. Αν η παγκόσμια παραγωγή πλαστικών συνεχίσει με τους ίδιους ρυθμούς, η ανθρωπότητα θα έχει παράξει 26.000 Mt ρητινών, 6.000 Mt πολυεστέρα-πολυαμιδίου-ακρυλικών ινών και 2.000 Mt πρόσθετων ως το 2050. Προεκτείνοντας τα τρέχοντα μοντέλα διαχείρισης απορριμμάτων, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι 9.000 Mt θα έχουν ανακυκλωθεί, 12.000 Mt θα έχουν αποτεφρωθεί και 12.000 Mt θα έχουν απορριφθεί σε χώρους υγειονομικής ταφής ή στο φυσικό περιβάλλον ως το 2050 [26, 21, 9] (εικόνα 4.1)

Τα λύματα της βιομηχανίας πλαστικού και η ανεπαρκής προς το παρόν διαχείρισή τους αποτελούν ένα πολύ σημαντικό ζήτημα. Αυτά τα λύματα χαρακτηρίζονται από θολότητα, διαλυμένα στερεά, υψηλές τιμές BOD, COD και θειϊκών ιόντων. Μερικά από τα

ζητήματα που προκύπτουν είναι οι δυσάρεστες οσμές, η επιβάρυνση του επιφανειακού αλλά και του υπόγειου νερού και η ρύπανση των εδαφών, που άμεσα ή έμμεσα επηρεάζει την υδρόβια ζωή όπως και την υγεία των κατοίκων που ζουν κοντά σε εργοστάσια πλαστικών. Συχνά, επιβλαβείς χημικές ενώσεις από χλωριωμένα πλαστικά προσροφώνται στο γειτονικό έδαφος, και καταλήγουν σε γειτονικές πηγές ή σε υπόγεια ύδατα [24]. Στους χώρους υγειονομικής ταφής συσσωρεύονται επίσης συνεχώς ποικιλία πλαστικών. Πολλοί αναερόβιοι μικροοργανισμοί εκεί αποικοδομούν μία ποσότητα πλαστικών, καταλήγοντας όμως στην παραγωγή και εκπομπή μεθανίου.



Δυστυχώς, είναι πολύ μεγάλο το ποσοστό των πλαστικών που διακινούνται, δεν καταλήγουν στους κάδους ανακύκλωσης (εικόνα 4.2). Τεράστιες ποσότητες πλαστικών αποβλήτων διαρρέουν στο φυσικό περιβάλλον από ανθρωπογενείς πηγές τόσο στην ξηρά όσο και στη θάλασσα, με αποτέλεσμα να προκαλούνται σημαντικές οικονομικές και περιβαλλοντικές ζημιές. Την ίδια στιγμή, 75% των πλαστικών που έχουν συνολικά παραχθεί παγκοσμίως είναι σήμερα απόβλητα, ενώ τουλάχιστον το 1/3 από αυτά έχει ήδη καταλήξει στη φύση, με καταστροφικές συνέπειες στα οικοσυστήματα και την άγρια ζωή. Σύμφωνα με επίσημες καταγραφές, τα πλαστικά απορρίμματα έχουν αποτελέσει αιτία τραυματισμού ή και θανάτωσης περισσότερων από 270 ειδών άγριας ζωής, ενώ οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την παραγωγή και την καύση πλαστικών αναμένεται να αυξηθούν κατά 50% τα επόμενα χρόνια [23].



Κάθε χρόνο, 5 έως 13 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών υλών παγκοσμίως – 1,5% έως 4% της παγκόσμιας παραγωγής πλαστικών — καταλήγουν στους ωκεανούς. Εκτιμάται ότι τα πλαστικά απόβλητα αντιστοιχούν σε ποσοστό άνω του 80 % των θαλάσσιων απορριμμάτων [20,25,7]. Τα πλαστικά απορρίμματα στη συνέχεια μεταφέρονται από τα θαλάσσια ρεύματα, μερικές φορές σε πολύ μακρινές αποστάσεις. Άλλα ξεβράζονται στις ακτές και άλλα αποδομούνται μετατρέπόμενα σε μικροπλαστικά ή σχηματίζουν εκτάσεις γεμάτες πυκνά θαλάσσια απορρίμματα που είναι παγιδευμένα σε κυκλικά συστήματα ωκεάνιων ρευμάτων. Το 2025, η εισροή αναμένεται να είναι διπλάσια ενώ αθροιστικά το 2025 η επιβάρυνση των ωκεανών σε πλαστικό υπολογίζεται ως εικοσαπλάσια των 8 εκατομμυρίων τόνων. Η αρμόδια επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για τη Θαλάσσια Ρύπανση (United Nations Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution, GESAMP) το 2019 υπολόγισε ότι παραπάνω από το 80% της θαλάσσιας ρύπανσης προέρχεται από χερσαίες πηγές, με το 60%-95% αυτών να είναι πλαστικά απορρίμματα [5]. Το 2018, ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών έθεσε το θέμα των πλαστικών στους ωκεανούς ανάμεσα στα 6 πιο σημαντικά περιβαλλοντικά ζητήματα (μαζί με την κλιματική αλλαγή, την οξίνιση των ωκεανών και την απώλεια της βιοποικιλότητας) [23].

Εκτός από τις αρνητικές επιπτώσεις για το περιβάλλον, η θαλάσσια ρύπανση προκαλεί οικονομική ζημία σε δραστηριότητες, όπως ο τουρισμός, η αλιεία και οι θαλάσσιες μεταφορές. Παγκοσμίως, σύμφωνα με εκτιμήσεις του 2014, το περιβαλλοντικό κόστος για το θαλάσσιο οικοσύστημα από τα 10 – 20 εκατομμύρια τόνους πλαστικών που καταλήγουν στους ωκεανούς του κόσμου κάθε χρόνο, υπολογίζεται σε περίπου 13 δισεκατομμύρια US\$ το χρόνο. Αυτό συμπεριλαμβάνει οικονομικές απώλειες για τους

αλιείς και τον τουρισμό καθώς και τον χρόνο που καταναλώνεται για τον καθαρισμό παραλιών [27].



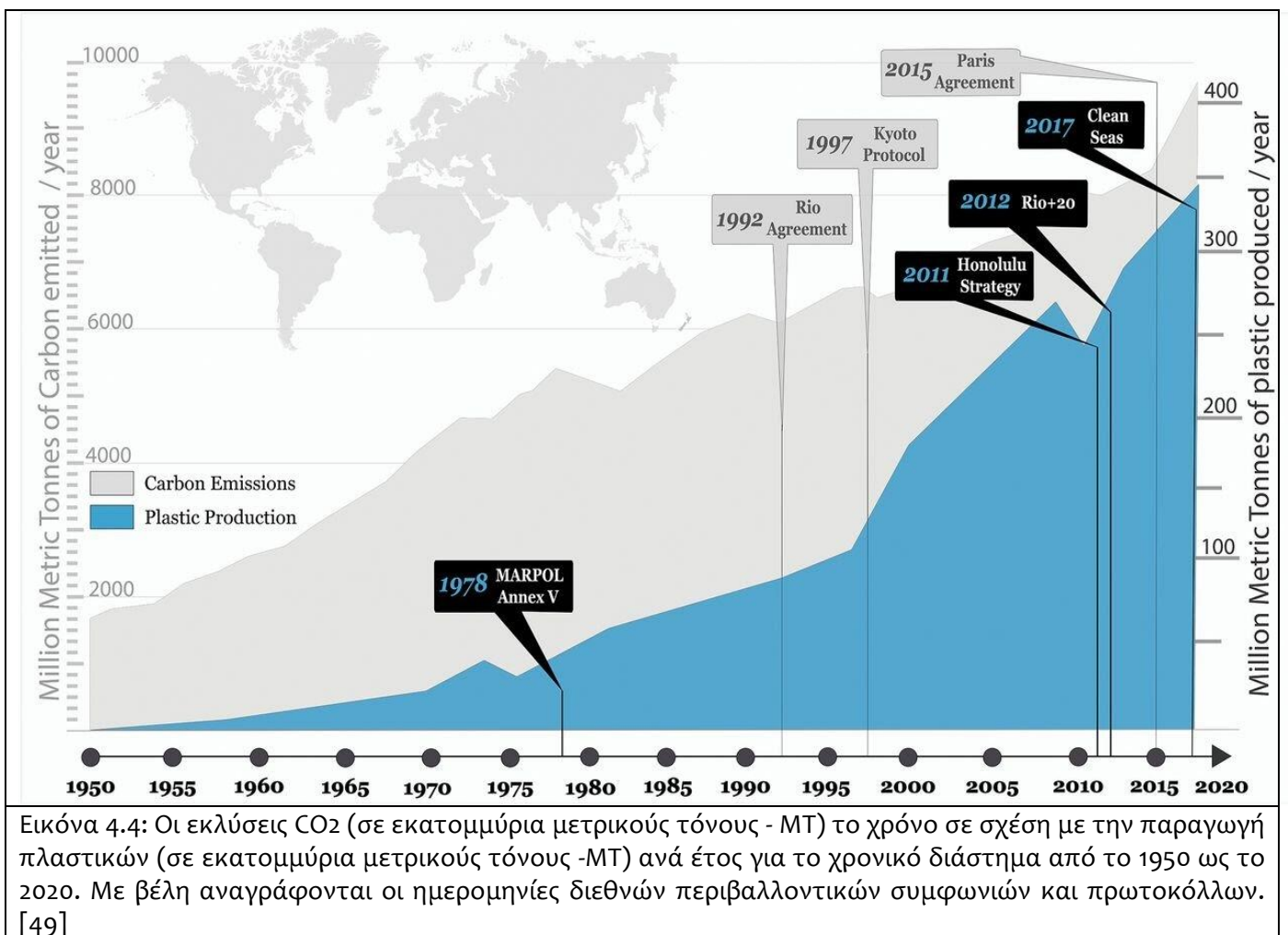
Εικόνα 4.3: Η παραγωγή πλαστικών στην Ευρώπη [31]

Περίπου 27 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών αποβλήτων παράγονται κάθε χρόνο στην Ευρώπη. Μόλις το 31 % των εν λόγω αποβλήτων συλλέγεται για ανακύκλωση ενώ το 27% κατέληξε σε χώρους υγειονομικής ταφής και τα υπόλοιπα χρησιμοποιήθηκαν ως καύσιμο υλικό για την παραγωγή ενέργειας [23]. Σημαντικό τμήμα των ανακυκλώσιμων πλαστικών μεταφέρεται από το έδαφος της ΕΕ για να υποβληθεί σε επεξεργασία σε τρίτες χώρες, στην Άπω Ανατολή και στην Αφρική, στις οποίες μπορεί να εφαρμόζονται διαφορετικά περιβαλλοντικά πρότυπα [20]. Ένα εμπόδιο συνεπώς για την αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης είναι η παράνομη μεταφορά αποβλήτων, τόσο εντός της ΕΕ όσο και σε τρίτες χώρες, η οποία συχνά οδηγεί σε οικονομικά ασύμφορη και επιβλαβή για το περιβάλλον επεξεργασία.

Συγχρόνως, σε παγκόσμια κλίμακα, τα ποσοστά υγειονομικής ταφής και αποτέφρωσης των πλαστικών απορριμμάτων παραμένουν υψηλά- στο 31 % και στο 39 %, αντιστοίχως- και μολονότι η υγειονομική ταφή μειώθηκε κατά την τελευταία δεκαετία, η αποτέφρωση έχει αυξηθεί. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, η οικονομία χάνει το 95 % της αξίας των πλαστικών υλικών συσκευασίας, δηλαδή μεταξύ 80 και 120 δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως, έπειτα από έναν ιδιαίτερα σύντομο κύκλο πρώτης χρήσης [21]. Ωστόσο, όταν δεν

είναι δυνατή η αποφυγή της δημιουργίας (μείωση της παραγωγής) ή η ανακύκλωση των αποβλήτων, η ανάκτηση της περιεχόμενης σε αυτά ενέργειας είναι συνήθως προτιμότερη –τόσο από περιβαλλοντικής όσο και από οικονομικής άποψης– από την υγειονομική ταφή τους. Η πρακτική της παραγωγής ενέργειας από απόβλητα μπορεί συνεπώς να παίξει σημαντικό ρόλο στην ανάκτηση της περιεχόμενης σε αυτά ενέργειας, αν και έχει κατηγορηθεί να δρα ανταγωνιστικά προς την οργάνωση αποτελεσματικών μοντέλων ανακύκλωσης [20].

Η ζήτηση για ανακυκλωμένα πλαστικά αντιπροσωπεύει σήμερα μόνο το 6 % της ζήτησης πλαστικών στην Ευρώπη. Τα τελευταία χρόνια, ο τομέας της ανακύκλωσης πλαστικών στην ΕΕ βίωσε τις συνέπειες, αφενός, των χαμηλών τιμών των βασικών προϊόντων και, αφετέρου, της αβεβαιότητας σχετικά με τις δυνατότητες εμπορικής διάθεσης των «δευτερογενών προϊόντων». Οι επενδύσεις σε νέο δυναμικό ανακύκλωσης πλαστικού παρέμειναν περιορισμένες λόγω των προοπτικών χαμηλής κερδοφορίας του κλάδου [12].



Σύμφωνα με στοιχεία του 2012, εκτιμάται ότι η παραγωγή πλαστικών υλών και η αποτέφρωση πλαστικών αποβλήτων προκαλούν παγκοσμίως την έκλυση περίπου 400 εκατομμυρίων τόνων CO₂ κάθε χρόνο (εικόνα 4.4). Με τη χρήση ανακυκλωμένων

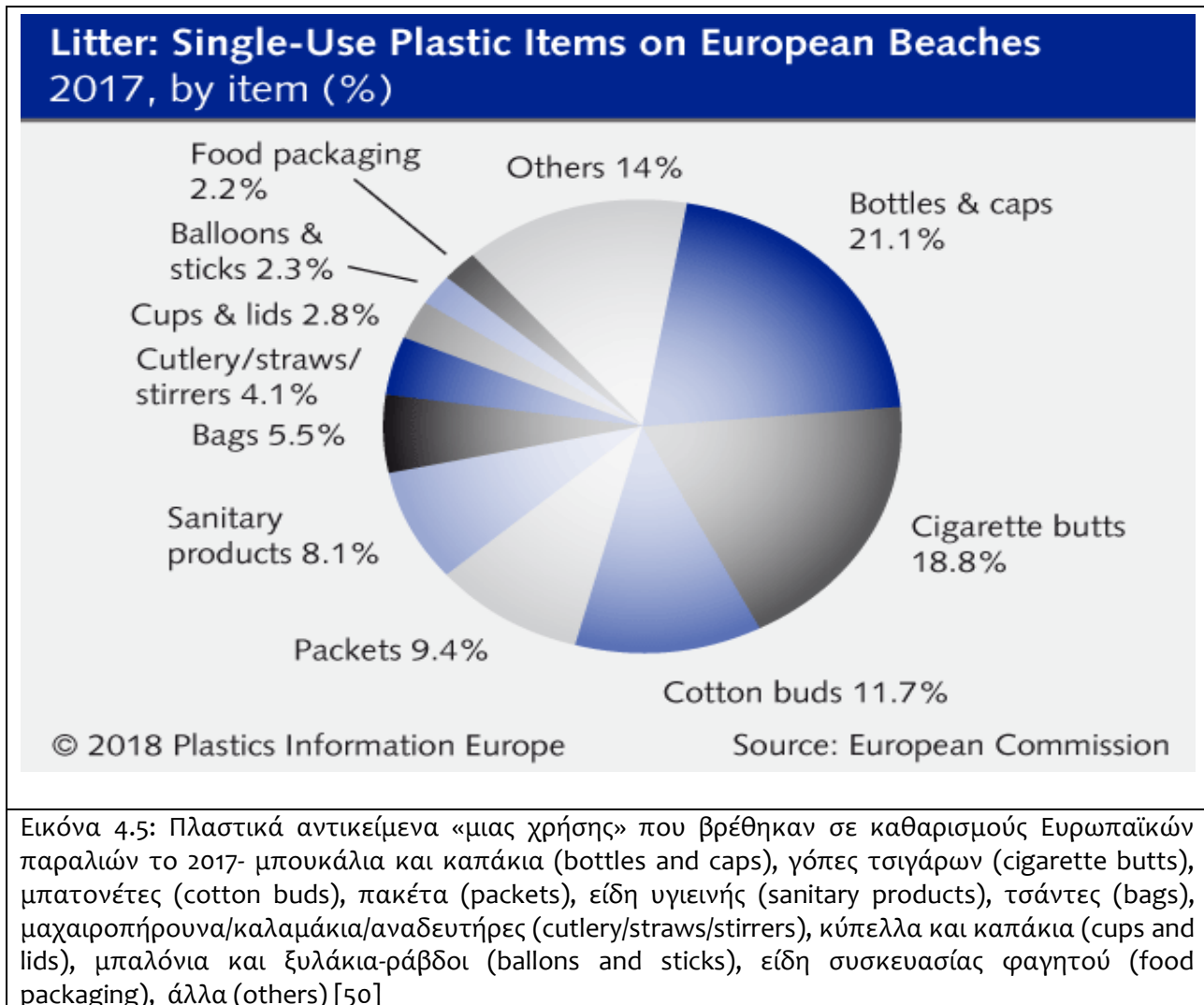
πλαστικών μπορεί να μειωθεί η εξάρτηση από την εξόρυξη ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή πλαστικών υλών και να μειωθούν οι εκπομπές CO₂. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, η ανακύκλωση ενός τόνου πλαστικών υλών εξοικονομεί περίπου 2 τόνους CO₂. Ταυτόχρονα, η δυνητική ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας που θα μπορούσε να επιτευχθεί από την ανακύκλωση όλων των πλαστικών αποβλήτων παγκοσμίως ισοδυναμεί με 3,5 δισεκατομμύρια βαρέλια πετρελαίου ετησίως[12].

Το παραπάνω παγκόσμιο φαινόμενο επιτείνεται από την αυξανόμενη ποσότητα των πλαστικών αποβλήτων που παράγονται κάθε χρόνο, και τροφοδοτείται επίσης από την αυξανόμενη κατανάλωση πλαστικών «μιας χρήσης», δηλαδή συσκευασιών ή άλλων καταναλωτικών προϊόντων τα οποία απορρίπτονται έπειτα από σύντομη χρήση, ανακυκλώνονται σπάνια και καταλήγουν συχνά ως απόβλητα (εικόνα 4.5). Πρόκειται, μεταξύ άλλων, για τις μικρές συσκευασίες, σακούλες, φλιτζάνια μιας χρήσης, καπάκια, καλαμάκια και μαχαιροπίρουνα, προϊόντα που παράγονται πολύ συχνά από πλαστικό λόγω της ελαφρότητας, του χαμηλού κόστους και των πρακτικών χαρακτηριστικών του [12].

Μία πρόσφατα καταγεγραμμένη πιθανή πορεία των πλαστικών απορριμμάτων με πολλές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία είναι η μετατροπή τους σε μικροπλαστικά. Πρόκειται για μικροσκοπικά τεμάχια πλαστικού που δημιουργούνται από τη διάσπαση μεγαλύτερων τεμαχίων πλαστικών αποβλήτων. Σημαντικές ποσότητες εισέρχονται επίσης στο περιβάλλον άμεσα, γεγονός που δυσχεραίνει την παρακολούθηση και την παρεμπόδιση τους. Το μικρό τους μέγεθος καθιστά εύκολη την πρόσληψή τους από τη θαλάσσια πανίδα και χλωρίδα ενώ μπορούν επίσης να εισέλθουν στην τροφική αλυσίδα. Πρόσφατες μελέτες εντόπισαν επίσης μικροπλαστικά στον αέρα, στο πόσιμο νερό και σε τρόφιμα όπως το αλάτι ή το μέλι, με διερευνούμενες επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου, όπως θα συζητήσουμε αναλυτικά στην παράγραφο 6.4 [12]. Ήδη γνωρίζουμε ότι τα θηλαστικά, τα ψάρια, οι θαλάσσιοι οργανισμοί αλλά και τα πτηνά είναι τα πρώτα στη σειρά θύματα της πλαστικής ρύπανσης που μαστίζει τα οικοσυστήματα του πλανήτη μας, καθώς τρέφονται με τα υπολείμματα πλαστικών συσκευασιών και μικροπλαστικά σωματίδια ακουσίως. Επιπλέον, πολλοί οργανισμοί χάνουν τη ζωή τους από τα διάφορα είδη πλαστικών που έχουν κατακλύσει τους ωκεανούς (από συσκευασίες, σακούλες, πετονιές, μικρά διχτάκια συσκευασιών αναψυκτικών έως και μεγάλα τεμαχισμένα δίχτυα) ενώ ήδη σε σχετικές μελέτες έχουν εντοπιστεί μικροπλαστικά σωματίδια στο πεπτικό σύστημα ανθρώπων [29].

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με υπολογισμούς του 2019, εισάγονται κάθε χρόνο 700.000 τόνοι πρώτης ύλης για την παραγωγή πλαστικών, 40.000 τόνοι πλαστικά απορρίμματα φεύγουν προς το περιβάλλον ενώ το 70% από αυτά καταλήγουν στη θάλασσα [14]. Μάλιστα, σύμφωνα με τα στοιχεία της Παγκόσμιας Τράπεζας το 2019, η χώρα εξακολουθεί να θάβει το μεγαλύτερο μέρος των πλαστικών απορριμμάτων, λειτουργώντας αναποτελεσματικά στο κομμάτι της ανακύκλωσης. Στην ίδια έκθεση συστήνεται για τη χώρα να προχωρήσει σε ορθή καταγραφή των πλαστικών απορριμμάτων που παράγει και διαχειρίζεται, καθώς παρουσιάζει σημαντική απόκλιση μεταξύ των ποσοτήτων που εμφανίζονται στα Κέντρα Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών (ΚΔΑΥ) και των ποσοτήτων που αναφέρονται στις εθνικές εκθέσεις της [23]. Σε αυτά αν προσθέσουμε την καταδίκη της Ελλάδας από το Δικαστήριο της ΕΕ για τη συνεχιζόμενη λειτουργία 70 Χώρων Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ) και τη μη

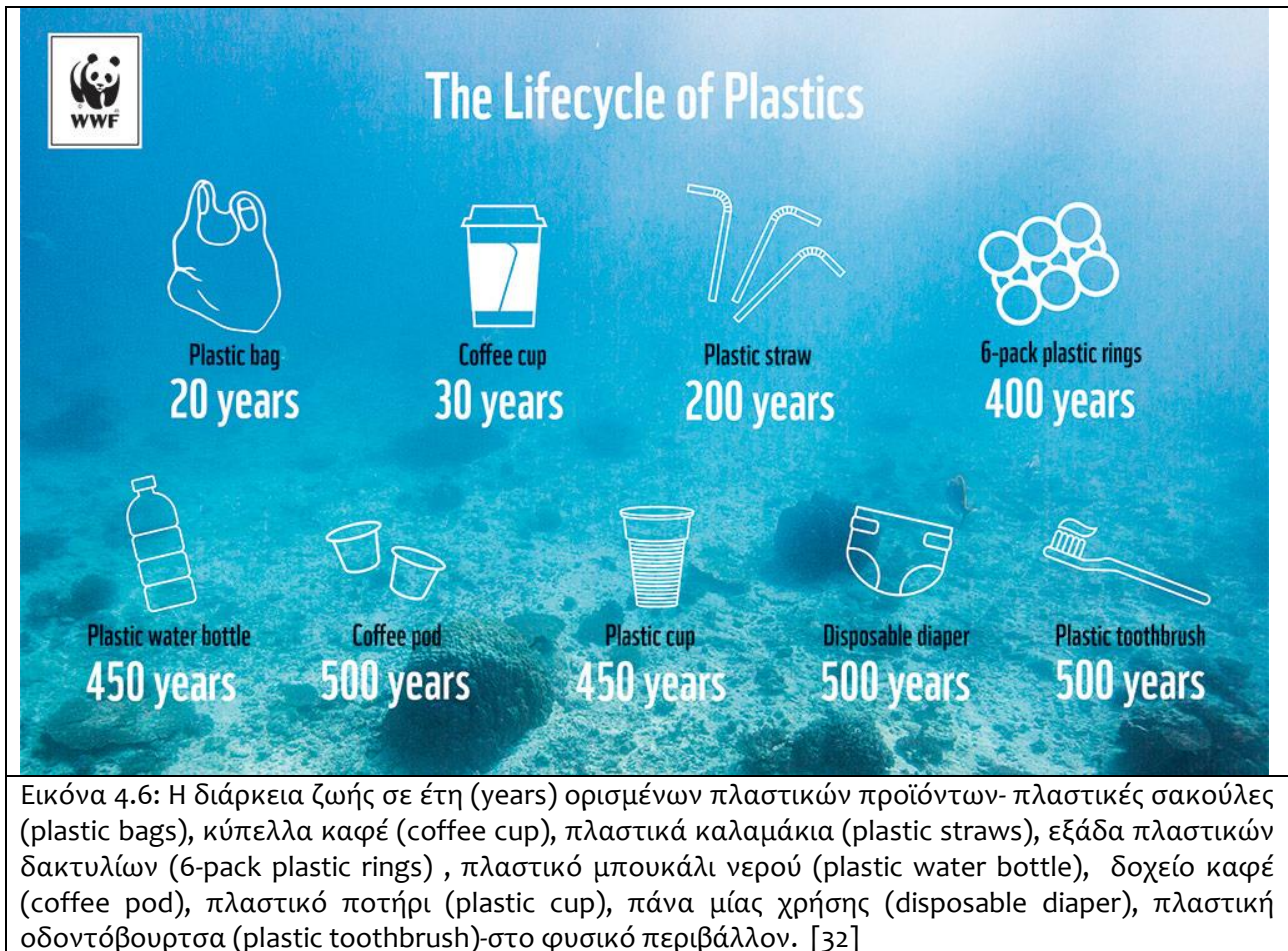
αποκατάσταση κόμη 223 [30], συμπεραίνουμε πως η χώρα μας έχει πολύ μεγάλο δρόμο να διανύσει μέχρι την επίτευξη των στόχων μείωσης χρήσης των πλαστικών.



4.2. Τοξικότητα πλαστικών αποβλήτων

Παγκόσμια, η πλαστική ρύπανση αποτελεί περίπου το 10% των απορριμμάτων. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση, πλαστικά και ρητίνες έχουν ποικίλες ιδιότητες σε ότι αφορά την απορρόφηση και την προσρόφηση των ρύπων. Τα πλαστικά έχουν χαμηλή τοξικότητα εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι αδιάλυτα στο νερό και επίσης, είναι βιοχημικά αδρανή, καθώς έχουν μεγάλο μοριακό βάρος. Η αποσύνθεσή τους είναι πολύ περισσότερο χρονοβόρα στο θαλάσσιο περιβάλλον εξαιτίας της σύστασής του και της ψυκτικής ισχύος της θάλασσας, με αποτέλεσμα τα πλαστικά απορρίμματα να παραμένουν για πολλά χρόνια αναλλοίωτα [5]. Σύγχρονες όμως έρευνες έδειξαν ότι τα πλαστικά αποσυντίθενται γρηγορότερα απ' όσο νομίζαμε, εξαιτίας της έκθεσής τους στον ήλιο (υπεριώδη ακτινοβολία), τη βροχή, και άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες [18]. Το 2018 Παγκόσμιο Ταμείο για τη Φύση (World Wide Fund for Nature - WWF) υπολόγισε τους ρυθμούς

αποικοδόμησης ορισμένων πλαστικών υλικών, όπως για παράδειγμα του πλαστικού μπουκαλιού ή της πλαστικής σακούλας (Εικόνα 4.6) [5].



Τα πλαστικά πολυμερή σπάνια χρησιμοποιούνται αυτόνομα στα τελικά προϊόντα και, όπως προαναφέρθηκε, οι πολυμερείς ρητίνες αναμειγνύονται με διάφορα πρόσθετα για βελτίωση των ιδιοτήτων του προϊόντος ή για τη διευκόλυνση της διαδικασίας παραγωγής [33]. Επίσης, μερικά πρόσθετα χρησιμοποιούνται ως μονομερή, για παράδειγμα η δισφαινόλη Α (BPA - Bisphenol A) αποτελεί το μονομερές του πολυκαρβονικού (PC - Polycarbonic) αλλά επίσης και σταθεροποιητή σε άλλα πολυμερή. Στα πρόσθετα περιλαμβάνονται ανόργανα συμπληρώματα, όπως ο άνθρακας και το πυρίτιο για την ενίσχυση του υλικού, πλαστικοποιητές που καθιστούν το υλικό εύκαμπτο, θερμικούς και υπεριώδεις σταθεροποιητές, επιβραδυντικά φλόγας, αντιοξειδωτικές και χρωστικές ενώσεις [33,34,35].

Οι φθαλικές ενώσεις, η δισφαινόλη Α (BPA), τα βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας και οι εννεύλοφαινόλες είναι τα πιο κοινά πρόσθετα που επιβαρύνουν το περιβάλλον, προσδιορίζονται ευρέως και αποδεδειγμένα πια αποτελούν κίνδυνο, τόσο για τους ζώντες οργανισμούς όσο και για το περιβάλλον [34]. Ίχνη αυτών των συστατικών μπορούν να διαφύγουν από το προϊόν στο περιβάλλον καθώς δεν είναι χημικά συνδεδεμένα με τον χημικό σκελετό του πλαστικού. Έτσι, ελευθερώνονται και καταλήγουν στο θαλάσσιο περιβάλλον μέσω πολλών διαδρομών, όπως με τα αστικά και εργοστασιακά λύματα, την

ατμοσφαιρική απόθεση, την κατακρήμνιση και την επιφανειακή απορροή των ποταμών. Επίσης μέσω της λάσπης των λυμάτων συχνά διοχετεύονται σε καλλιέργειες. Όπως προαναφέρθηκε, η διαρροή των πρόσθετων από τα μικροπλαστικά και τα μακροπλαστικά πλέον είναι γνωστό πως συμβαίνει στο θαλάσσιο περιβάλλον. Συνεπώς, η συσσώρευση πλαστικών αποβλήτων και η αποδόμησή τους είναι πιθανότατα άλλη μία οδός εισόδου των πρόσθετων στους ωκεανούς. Φυσικά, με ανάλογο τρόπο συμβαίνει η απελευθέρωση και η διοχέτευσή τους στα φυσικά χερσαία οικοσυστήματα, αυτή η οδός όμως δεν έχει μελετηθεί ικανοποιητικά ακόμη [35]. Εξαιτίας των ανησυχιών για τις συνέπειες αυτών των εκπλύσεων, η Ευρωπαϊκή Ένωση όπως και οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) έχουν περιορίσει ή απαγορεύσει τη χρήση μερικών φθαλικών ενώσεων (DEHP - Di(2-ethylhexyl) phthalate, Φθαλικός δι-(2-αιθυλεξυλ) εστέρας), DPB - Dibutyl phthalate, Φθαλικός διβουτυλεστέρας), BBP- Butyl-Benzyl-Phthalate, Φθαλικό Βενζυλοβουτύλιο), DINP - Diisononyl phthalate, Φθαλικός δι-ισο-εννεύλεστέρας), DnOP - Di-N-Octyl phthalate, Φθαλικός διοκτυλεστέρας) σε προϊόντα όπως παιχνίδια ή είδη που σχετίζονται με το παιδί [33].

Πίνακας 4.1 : Λίστα των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων πολυμερών και των τοξικών και επικίνδυνων πρόσθετων ενώσεων που περιέχουν [34]

Πολυμερές	Κατανάλωση (εκατομμύρια τόνοι) στην EU27 το 2015	Τύπος πρόσθετου	Ποσότητα σε πολυμερή (% w/w)	Επικίνδυνες ουσίες
PP	9	Αντιοξειδωτικό	0,05-3	Δισφαινόλη A, εννεύλοφαινόλες
		Επιβραδυντικό φλόγας (μόνωση καλωδίων και ηλεκτρονικές εφαρμογές)	12-18	βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας, βορικό οξύ
HDPE	8	Αντιοξειδωτικό	0,05-3	Δισφαινόλη A, εννεύλοφαινόλες
		Επιβραδυντικό φλόγας (μόνωση καλωδίων)	12-18	βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας, βορικό οξύ
LDPE	6	Αντιοξειδωτικό	0,05-3	Δισφαινόλη A, εννεύλοφαινόλες
		Επιβραδυντικό φλόγας (μόνωση καλωδίων)	12-18	βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας, βορικό οξύ
PVC	5	Πλαστικοποιητές	10-70	Φθαλικές ενώσεις
		Σταθεροποιητές	0,5-3	Δισφαινόλη A, εννεύλοφαινόλες
PUR	3,5	Επιβραδυντικό φλόγας	12-18	βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας, βορικό οξύ

Ο τύπος του πρόσθετου που θα αναμιχθεί με το πολυμερές για την παραγωγή του πλαστικού προϊόντος, εξαρτάται από το πλαστικό πολυμερές και τις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος (πίνακας 4.1).

Στη συνέχεια περιγράφονται μερικά από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πρόσθετα υλικά που περιέχουν τοξικές και επικίνδυνες ενώσεις και αναφέρονται στον πίνακα 4.1:

- Βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας: τα βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας (BFR - Brominated Flame Retardants) αποτελούν μία σειρά πρόσθετων στα πλαστικά προϊόντα με σκοπό τη μείωση της ευφλεκτότητας. Βρίσκουν εφαρμογή σε ποικιλία προϊόντων, από ηλεκτρονικές συσκευές μέχρι υλικά μόνωσης [34]. Οι τρεις κύριες ενώσεις που χρησιμοποιούνται από την πλαστική βιομηχανία και ανήκουν στα BFRs είναι οι Πολυβρωμιούχοι Διφαινυλ-αιθέρες (PBDE - Polybrominated Diphenyl Ethers), το Εξαβρωμοκυκλοδωδεκάνιο (HBCD - Hexabromocyclododecane) και η Τετραβρωμοσισφαινόλη Α (ΤΒΒΡΑ - Tetrabromobisphenol A) [34].

- Εστέρες Φθαλικού Οξέος (ΡΑΕ - Phthalate acid ester) ή φθαλικές ενώσεις είναι μια οικογένεια πρόσθετων στα πλαστικά που λειτουργούν ως σταθεροποιητές, κυρίως κατά την παραγωγή PVC. Ως αποτέλεσμα, το PVC μπορεί να περιέχει 10%-60% φθαλικών ενώσεων κατά βάρος. Καθώς οι φθαλικές ενώσεις δε συνδέονται χημικά με τον σκελετό του πολυμερούς, μπορούν εύκολα να διαρρεύσουν στο περιβάλλον κατά την κατασκευή, χρήση ή / και διάθεση. Οι εστέρες ΡΑΕ έχουν βρεθεί σε ποικιλία περιβαλλόντων και αυτό γεννά πολλές ανησυχίες, καθώς ήδη από το 2009, μία έρευνα κατέδειξε πως ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις μπορούν να λειτουργήσουν ως ενδοκρινικοί διαταράκτες [34].

- Η Δισφαινόλη Α (ΒΡΑ) είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός εκπρόσωπος της ομάδας των δισφαινολών και αποτελεί ένα από τα πιο κοινά παραγόμενα χημικά παγκοσμίως, με τιμές που ξεπερνούν τα 3 εκατ.τόνους το χρόνο. Η ΒΡΑ χρησιμοποιείται κυρίως ως μονομερές των πολυκαρβονυλικών πλαστικών (65% του όγκου) και των εποξικών ρητινών (30% όγκου), τα οποία αποτελούν, για παράδειγμα, το κύριο συστατικό της εσωτερικής επίστρωσης των αλουμινένιων κουτιών [5]. Έκπλυση της ΒΡΑ μπορεί να συμβεί από συσκευασίες ποτών και φαγητού, το οποίο αποτελεί και την κύρια πηγή έκθεσης των ανθρώπων σε αυτή την ουσία. Επίσης, η ΒΡΑ έχει αναγνωριστεί ως σημαντικός ενδοκρινικός διαταράκτης. Παρόλα αυτά, η ΕΕ δεν έχει απαγορεύσει τη χρήση της σε προϊόντα που έρχονται σε επαφή με το φαγητό αν και η χρήση της υπόκειται σε περιορισμό [37].

- Αντιοξειδωτικές ενώσεις: οι αντιοξειδωτικές ενώσεις χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα υλικά σε πολλά συνθετικά πολυμερή, περιλαμβάνοντας και τις πολυολεφίνες (κυρίως στα πλαστικά ΡΕ και ΡΡ) που αποτελούν το 60% της παγκόσμιας ζήτησης σε αντιοξειδωτικά πρόσθετα υλικά. Οι αντιοξειδωτικές ενώσεις χρησιμοποιούνται για να αποτρέψουν την φθορά των πλαστικών καθυστερώντας την οξείδωσή τους [34]. Ωστόσο, όπως άλλες κατηγορίες πρόσθετων ενώσεων, μπορούν να διαρρεύσουν απευθείας στα τρόφιμα από την πλαστική συσκευασία. Συνεπώς αποτελούν έναν άμεσο κίνδυνο για την ασφάλεια των τροφίμων [34].

- Εννεύλοφαινόλες (ΝΡ - Nonylphenols): έχουν πολλές εφαρμογές, σε χρώματα, εντομοκτόνα, απορρυπαντικά και προϊόντα προσωπικής φροντίδας. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως αντιοξειδωτικές ενώσεις και πλαστικοποιητές για την παραγωγή τελικών πλαστικών προϊόντων. Έχει βρεθεί πως διαρρέουν από τα πλαστικά μπουκάλια στο περιεχόμενο νερό καθώς επίσης και από τους αγωγούς των εργοστασίων

επεξεργασίας λυμάτων προς το περιβάλλον. Επιπλέον, θεωρούνται ενδοκρινικοί διαταράκτες. Για όλους τους παραπάνω λόγους, η χρήση τους έχει απαγορευτεί στην ΕΕ ήδη από το 1993 [38, πίνακας 4.2].

Πίνακας 4.2: Τα συνήθη πρόσθετα υλικά των πλαστικών, οι χρήσεις τους και οι κύριες επιπτώσεις τους [34]

Τύπος πρόσθετου	Λειτουργία	Επιπτώσεις
Βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας (BFR)	Μείωση αναφλεξιμότητας. Προσροφάται στο πλαστικό και από το περιβάλλον	Πιθανοί ενδοκρινικοί διαταράκτες
Φθαλικές ενώσεις	Πλαστικοποιητές, για να αυξηθεί η ευκαμπτότητα του πλαστικού, κυρίως σε PVC	Ενδοκρινικοί διαταράκτες
Εννεύλοφαινόλες	Αντιοξειδωτικά και πλαστικοποιητές σε μερικά πλαστικά	Ενδοκρινικοί διαταράκτες
Δισφαινόλη A (BPA)	Μονομερές πολυκαρβονυλικών και εποξεικών ρητινών	Ενδοκρινικοί διαταράκτες
	Αντιοξειδωτικό σε ορισμένα πλαστικά	Μίμηση οιστρογόνων

Υπάρχουν πολλές ουσίες, φυσικές και τεχνητές, που θεωρείται ότι προκαλούν ενδοκρινική διαταραχή. Μερικές φορές, οι επιπτώσεις μιας ουσίας που προκαλεί ενδοκρινική διαταραχή εμφανίζονται μόνο αφού περάσει μεγάλο χρονικό διάστημα από την έκθεση. Για παράδειγμα, η ενδομήτρια έκθεση ενός εμβρύου σε μια ουσία που προκαλεί ενδοκρινική διαταραχή μπορεί να οδηγήσει σε επιπτώσεις στην υγεία του ως ενηλίκου και πιθανώς και σε επόμενες γενεές. Στα ζώα, επιπτώσεις που μπορεί να σχετίζονται με ενδοκρινική διαταραχή έχουν παρατηρηθεί σε μαλάκια, καρκινοειδή, ψάρια, ερπετά, πτηνά και θηλαστικά σε διάφορα μέρη του κόσμου. Σε ορισμένα ζωικά είδη, τα προβλήματα στην αναπαραγωγή προκάλεσαν μείωση των πληθυσμών τους. Σε όλους τους οργανισμούς, οι ορμόνες συνδέουν το νευρικό σύστημα με τις σωματικές λειτουργίες, όπως αύξηση και ανάπτυξη, ανοσία, μεταβολισμό, αναπαραγωγή και συμπεριφορά. Οι χημικές ουσίες που ονομάζονται «ενδοκρινικοί διαταράκτες» μπορούν να επηρεάσουν το ορμονικό σύστημα προκαλώντας επιβλαβείς επιπτώσεις στον άνθρωπο και στα ζώα. Οι ουσίες που αλληλεπιδρούν με το ορμονικό σύστημα αλλά δεν προκαλούν επιβλαβείς επιπτώσεις ονομάζονται «ουσίες με ορμονική δράση» ή «ουσίες με ενδοκρινική δράση». Ωστόσο, ο διαχωρισμός μεταξύ της ενδοκρινικής δράσης και της ενδοκρινικής διαταραχής δεν είναι πάντα σαφής διότι, σε ορισμένες περιπτώσεις, η επίπτωση μπορεί να γίνει εμφανής μόνο εκ των υστέρων [39].

Στον άνθρωπο, επιδημιολογικές μελέτες έχουν δείξει ότι οι ενδοκρινικοί διαταράκτες μπορεί να ευθύνονται για μεταβολές στην υγεία του ανθρώπου κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Σε αυτές περιλαμβάνεται η μείωση του αριθμού των σπερματοζωαρίων, η αυξημένη επίπτωση δυσπλασιών των γεννητικών οργάνων σε άρρενα βρέφη, και η

αύξηση ορισμένων μορφών καρκίνου με γνωστή ευαισθησία στις ορμόνες. Ακόμη πιο αμφιλεγόμενη είναι η άποψη που έχει διατυπωθεί περί συσχέτισης με προβλήματα στη νευρική ανάπτυξη και τη σεξουαλική συμπεριφορά.

Βάσει του Ευρωπαϊκού Κανονισμού REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals, Καταχώρηση, Αξιολόγηση, Αδειοδότηση και Έγκριση χημικών ουσιών), οι ενδοκρινικοί διαταράκτες μπορούν να χαρακτηριστούν ουσίες που προκαλούν πολύ μεγάλη ανησυχία, μαζί με τα χημικά προϊόντα που αποδεδειγμένα προκαλούν καρκίνο, μεταλλάξεις και τοξικότητα στην αναπαραγωγή. Στόχος είναι η μείωση της χρήσης τους και, τελικά, η αντικατάστασή τους με ασφαλέστερες εναλλακτικές χημικές ενώσεις και κατ' επέκταση λύσεις [39].

Τα κύρια πρόσθετα των πλαστικών περιγράφονται στον πίνακα 4.3 με την συντομογραφία τους ενώ παρουσιάζεται και μία άλλη σημαντική παράμετρος ο συντελεστής κατανομής n-οκτανόλης - νερού (K_{ow} - Octanol-Water Partition Coefficient). Αυτή η παράμετρος δείχνει την κατανομή μιας χημικής ουσίας ανάμεσα σε ένα λιπόφιλο και μια υδρόφιλο μέσο. Ο K_{ow} χρησιμοποιείται για να προβλέψει αν μία χημική οργανική ουσία θα συγκεντρωθεί στους λιπώδεις ιστούς υδάτινων οργανισμών και K_{ow} τιμές υψηλότερες του 1 υποδεικνύουν πιθανή βιοσυσσώρευση στους οργανισμούς. Ιδιαίτερα χημικές οργανικές ενώσεις με τιμές $\log K_{ow}$ υψηλότερες του 5 θεωρείται βέβαιο ότι βιοσυσσωρεύονται σε οργανισμούς [36].

Πίνακας 4.3: Πρόσθετα πλαστικών και οι αντίστοιχοι συντελεστές κατανομής n-οκτανόλης-νερού ($\log K_{ow}$). [34,36]

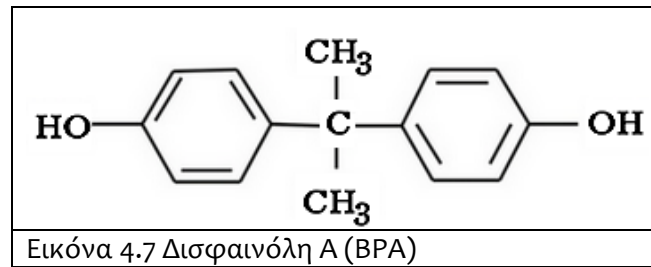
Πλήρες όνομα	Συντομογραφία	$\log K_{ow}$
Φθαλικό Βενζυλονουτύλιο	BBP	4,70
Φθαλικός δι-(2-αιθυλεξυλ) εστέρας	DEHP	7,73
Φθαλικό δι-αιθύλιο	DEP	2,54
Φθαλικό δι-ισοβουτύλιο	DiBP	4,27
Φθαλικός δι-ισο-δεκυλεστέρας	DiDP	9,46
Δι-ισονομυλο-φθαλικός εστέρας	DiNP	8,60
Φθαλικός δι-μεθυλεστέρας	DMP	1,61
Φθαλικός n-διβουτυλεστέρας	DnBP	4,27
Φθαλικός n-διοκτυλεστέρας	DnOP	7,73
Εξαβρωμοκυκλοωδεκάνιο	HBCD	5,07-5,47
Πολυβρωμιούχοι Διφαινυλαιθέρες	PBDE	5,52-11,22
Τετραβρωμοδισφαινόλη Α	TBBPA	4,5
Δισφαινόλη Α	BPA	3,40
Εννεύλοφαινόλες	NP	4,48-4,80

Στο θαλάσσιο περιβάλλον, πλαστικά υπολείμματα όπως σφαιρίδια, κομμάτια και μικροπλαστικά έχει αποδειχθεί ότι περιέχουν τοξικούς οργανικούς ρύπους, όπως είναι τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs - Polychlorinated biphenyls), οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs - Polycyclic Aromatic Hydrocarbon), οι υδρογονάνθρακες του πετρελαίου, τα οργανοχλωριωμένα ζιζανιοκτόνα, όπως το DDT

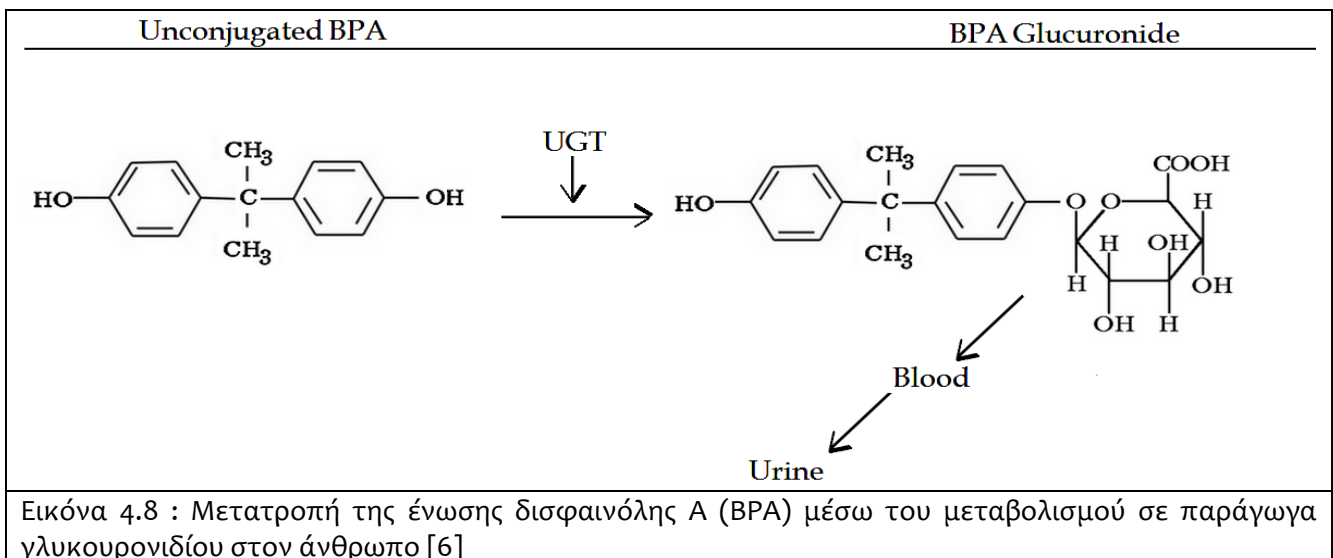
(Dichloro-diphenyl-trichloroethane, Διχλωρο- διφαινυλο- τριχλωροαιθάνιο), καθώς και οι μεταβολίτες τους, μαζί με το εξαχλωριούχο εξάνιο (HCH - Hexachlorocyclohexane), οι εννεύλοφαινόλες (NPs), τα βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας, όπως τα PBDEs, και τη δισφαινόλη Α (BPA), σε συγκεντρώσεις μεταξύ ng/g και mg/g. Μερικά από αυτά τα συστατικά προστίθενται στα πλαστικά κατά την παρασκευή τους, ενώ άλλα προσροφώνται στα πλαστικά υπολείμματα από το περιβάλλον. Με τον δεύτερο αυτό τρόπο, η συγκέντρωση των ρύπων γίνεται τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη στην επιφάνεια των πλαστικών από αυτή του περιβάλλοντος νερού. Η αφθονία αυτών των ουσιών δημιουργεί προβλήματα επιβίωσης, τόσο στην άγρια ζωή όσο και στην υγεία του ανθρώπου. Όπως έχουν καταδείξει έρευνες από το 2009 και μετά, αν γίνει κατάποση πλαστικών τμημάτων, υπάρχει περίπτωση να μεταφερθούν τοξικές ουσίες στην τροφική αλυσίδα [24]. Σε πειράματα που εξετάζουν τη μεταφορά των προσροφημένων ρύπων από τα πλαστικά προς τα θαλασσοπούλια και άλλα ζώα, αποδείχτηκε ότι ακόμη και μικρή ποσότητα πλαστικών μπορούν να διευκολύνουν αυτή τη μεταφορά μέσω της κατάποσης. Η αφθονία των πλαστικών κομματιών και ειδικά των μικροπλαστικών αυξάνει στο περιβάλλον, και καθώς αυτά έχουν μια μεγάλη επιφάνεια σε σχέση με τον όγκο τους, διευκολύνεται η οριζόντια μεταφορά ρύπων και τοξικών ουσιών – καθώς προσλαμβάνονται από μεγάλη ποικιλία οργανισμών [34]. Συνεπώς η δυνατότητα να μεταφερθούν και να απελευθερωθούν επικίνδυνες χημικές ενώσεις, όπως POPs, στην άγρια χλωρίδα και πανίδα, είναι ένα πεδίο ανησυχίας.

Έρευνες δείχνουν πως οι φθαλικές ενώσεις και η ένωση BPA επηρεάζουν την αναπαραγωγή σε όλες τις ομάδες ζώων που μελετήθηκαν και δυσχεραίνουν την ανάπτυξη σε καρκινοειδή και αμφίβια ζώα. Τα μαλάκια και τα αμφίβια φαίνεται να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε αυτές τις ενώσεις και βιολογικές επιδράσεις παρατηρήθηκαν σε χαμηλές συγκεντρώσεις εύρους ng/L ως mg/L. Αντίθετα, οι περισσότερες επιδράσεις στα ψάρια παρατηρούνται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις [34,39,35]. Οι περισσότερες πλαστικοποιητικές ενώσεις φαίνεται να δρουν παρεμβαίνοντας στην ορμονική λειτουργία, μέσω ποικίλων μηχανισμών. Οι επιδράσεις των ουσιών αυτών στις εργαστηριακές δοκιμές συμπίπτουν με τις μετρούμενες περιβαλλοντικές συγκεντρώσεις, συνεπώς φαίνεται ρεαλιστική η πιθανότητα αυτές οι χημικές ενώσεις να επηρεάζουν τους φυσικούς πληθυσμούς. Οι συγκεντρώσεις της BPA στα υδάτινα οικοσυστήματα ποικίλουν σημαντικά, αλλά μπορούν να φτάσουν ως και 21 mg/L στα χερσαία υδάτινα οικοσυστήματα, ενώ η συγκέντρωση στα ιζήματα είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή στη στήλη του νερού. Για παράδειγμα, σε έρευνα του 2009 η συγκέντρωση της BPA στον ποταμό Έλβα ήταν 0,77 mg/L στη στήλη του νερού και 343 mg/kg ξηρού βάρους στο ίζημα. Αυτά τα δεδομένα έρχονται σε πλήρη αντίθεση με το περιβαλλοντικό όριο κινδύνου που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση για την BPA, το οποίο είναι 0,12 mg/L στη στήλη του νερού και 1,6 mg/kg ξηρού βάρους στο ίζημα [35].

Η αποσύνθεση των πλαστικών πολυμερών που παλαιότερα θεωρούνταν ότι δε συμβαίνει, αποδείχθηκε ότι τελικά συντελείται όταν θερμανθούν. Μάλιστα σε δεύτερο χρόνο βρέθηκε ότι μπορεί να συμβεί αποσύνθεσή τους σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία από ότι υπολογίζονταν. Με τον τρόπο αυτό, ελευθερώνονται τα πολυμερή τους ή άλλες τοξικές ουσίες. Σύμφωνα με μελέτη του 2011, μετά από θέρμανση, σχεδόν όλα τα πλαστικά προϊόντα ελευθερώνουν ουσίες με οιστρογόνο δράση στο νερό, όπως η δισφαινόλη Α (BPA) και τα ολιγομερή του πολυστυρενίου (PS) [69].



Αυτές οι χημικές ουσίες θεωρούνται τοξικές και μπορούν να μεταβολιστούν στο σώμα του οργανισμού μετά την κατάποση. Επίσης, έχει αποδειχθεί πως βιοσυσσωρεύονται, και δυστυχώς πως η χρόνια έκθεση ενός οργανισμού – πληθυσμού έστω και σε μικρές δόσεις είναι ικανή να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα υγείας. Μεταξύ άλλων έχουν αναφερθεί υποβιβασμός στην ποιότητα του σπέρματος, μείωση των επιπέδων τεστοστερόνης και ισχυρή συσχέτιση με καρδιαγγειακά νοσήματα, διαβήτη τύπου II και ανωμαλίες στην παραγωγή των ηπατικών ενζύμων [69, 19]. Ο άνθρωπος μπορεί να εκτεθεί με ποικίλους τρόπους σε ουσίες όπως η δισφαινόλη Α και οι φθαλικές ενώσεις, δια του στόματος (μέσω του φαγητού ή του νερού ή των φαρμάκων), διαδερμικά (εξαιτίας της επαφής με πλαστικά αντικείμενα) καθώς και μέσω της αναπνοής (οι ποσότητες αυτών των ουσιών στην αερομεταφερόμενη σκόνη είναι πολύ μεγαλύτερες από το αναμενόμενο) [35].



Ειδικότερα η δισφαινόλη Α (BPA) έχει μελετηθεί εκτεταμένα καθώς από νωρίς η έρευνα στράφηκε στις πιθανές επιπλοκές της. Αρχικά μελετήθηκαν ζώα-πειραματόζωα σε τιμές έκθεσης σε BPA ανάλογες με αυτές που λαμβάνει ένας ανθρώπινος οργανισμός και σταδιακά, μέσω των δειγμάτων αίματος και ούρων, η έρευνα επεκτάθηκε και σε ανθρώπινα δεδομένα. Η ένωση BPA δεν χρησιμοποιείται μόνο στην παραγωγή πλαστικών που πρόκειται να έχουν άμεση επαφή με το φαγητό, όπως οι πλαστικές συσκευασίες και τα είδη κουζίνας, αλλά επίσης σε εσωτερικές επιστρώσεις αλουμινένιων δοχείων όπως και στα καπάκια των βάζων, σε οδοντιατρικά υλικά, στον εξοπλισμό υγείας, στο θερμικό

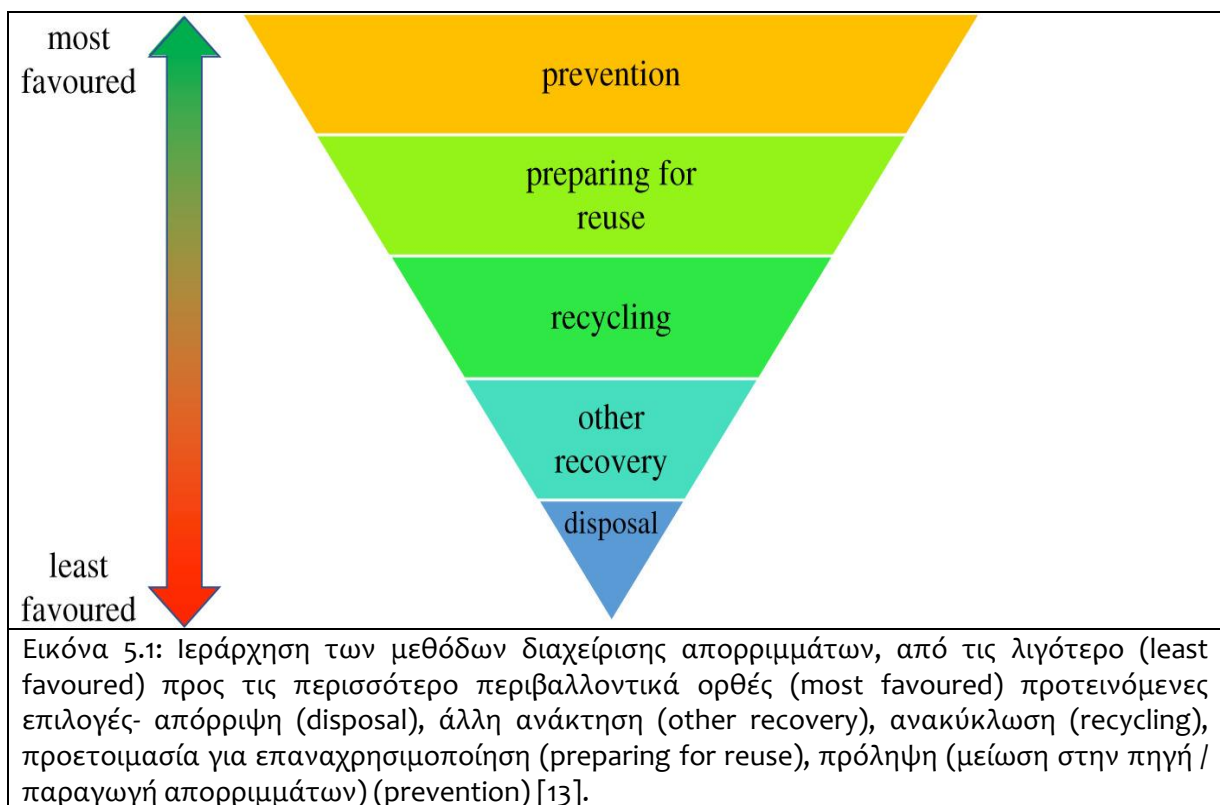
χαρτί [6]. Δημοσίευση του 2001 κατέληξε πως εκπλύθηκε από την επίστρωση αλουμινένιων δοχείων, οδοντικού νήματος και πλαστικών μπουκαλιών και είχε σαν δυνητική επίπτωση την αύξηση του σωματικού βάρους των απογόνων των πειραματόζων. Από πειράματα του 2009 γνωρίζουμε πως ακόμη και μικρή έκθεση σε δόσεις BPA οδηγούν σε σημαντική διέγερση στην παραγωγή ινσουλίνης που ακολουθείται από ανθεκτικότητα στην ινσουλίνη στα ποντίκια, σημαντική μείωση της παραγωγής σπέρματος στους αρουραίους, μείωση της μητρικής συμπεριφοράς στα ποντίκια και αποκοπή των συνάψεων του ιππόκαμπου, θυμίζοντας ένα τυπικό εγκέφαλο γήρατος [35].

Η BPA παράγεται σε μεγάλες ποσότητες καθημερινά σε όλο τον κόσμο, οι άνθρωποι εκτίθενται ποικιλοτρόπως και οι περισσότεροι έχουν μετρήσιμες ποσότητές της στον ορό του αίματος και στα ούρα. Εξαιτίας της φαινολικής δομής της έχει αποδειχθεί ότι αλληλεπιδρά με οιστρογονικούς υποδοχείς και δρα είτε ανταγωνιστικά είτε συνεργατικά στα βιοχημικά μονοπάτια οιστρογόνων. Η BPA έχει παρόμοια χημική δομή με την οιστραδιόλη, και μπορεί να συνδεθεί σε πολλαπλούς στόχους, τόσο εντός όσο και εκτός του πυρήνα του κυττάρου δρώντας ως ορμονικός διαταράκτης. Μεταβολίζεται στο συκώτι και σχηματίζει την BPA γλουκορονίδα (εικόνα 4.8) και κυρίως σε αυτή τη μορφή απεκκρίνεται με τα ούρα. Ως αποτέλεσμα, η BPA παίζει ένα ρόλο στην παθογένεια πολλών ενδοκρινικών διαταραχών, όπως η γυναικεία και ανδρική γονιμότητα, η πρόωρη εφηβεία, οι ορμονικά σχετιζόμενοι όγκοι, όπως ο καρκίνος του στήθους και του προστάτη, και πολλές ακόμη μεταβολικές διαταραχές, όπως οι πολυκυστικές ωοθήκες [6].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

5.1 Στρατηγικές διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο 4, ένα από τα κύρια προβλήματα της χρήσης του πλαστικού είναι οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Τα περισσότερα συνθετικά πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά και μπορούν να παραμείνουν στο περιβάλλον από χιλιάδες ως εκατομμύρια χρόνια, ανάλογα με το είδος του πλαστικού (εικόνα 4.6). Τεράστιες ποσότητες συνθετικών πλαστικών έχουν εισέλθει στο περιβάλλον τα τελευταία 70 χρόνια εξαιτίας της φθηνής μαζικής παραγωγής τους, με αποτέλεσμα να συγκαταλέγονται στους πιο κοινούς και ανθεκτικούς οργανικούς ρυπαντές (POPs). Υπάρχουν πολλές προοπτικές για τη διαχείριση των πλαστικών αποβλήτων, όπως η υγειονομική ταφή, η αποτέφρωση με ή χωρίς ανάκτηση ενέργειας, η εξαέρωση και η πυρόλυση για τη μετατροπή του πλαστικού σε συνθετικό πετρελαϊκό αέριο (γκάζι) ή καύσιμο, η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση, η καθεμιά με τα δικά της μειονεκτήματα και περιβαλλοντικούς κινδύνους (εικόνα 5.1) [25].



Μία ποικιλία μεθόδων έχουν επίσης ερευνητικά μελετηθεί και περιγραφεί για την αποσύνθεση των συνθετικών πλαστικών, όπως ο χημικός από-πολυμερισμός ώστε να αποδώσει μη επιβλαβή μόρια ή η νέα επεξεργασία μέσω μηχανικής ανακύκλωσης (τεμαχισμός, θέρμανση και μετάβαση των στερεών τεμαχίων στην υγρή φάση και τέλος

επαναδημιουργία προϊόντων σε νέα εκμαγεία) ή μέσω βιολογικής αποδόμησης (ενζυμική μετατροπή σε αποικοδομήσιμα οργανικά υλικά). Αυτές οι μέθοδοι ωστόσο είναι αρκετά πολύπλοκες και δεν έχουν αναπτυχθεί παρά μόνο σε πιλοτικό επίπεδο, συνεπώς δεν μπορούν ακόμα να ανταποκριθούν σε μεγάλης κλίμακας απαιτήσεις. Προς το παρόν, η απόθεση προς υγειονομική ταφή, η αποτέφρωση και η ανακύκλωση είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες και διαδεδομένες μέθοδοι διαχείρισης πλαστικών παγκόσμια [25].

Καθώς ο συνολικός όγκος των πλαστικών αυξάνει, κυβερνητικές και τοπικές αλλαγές στις πολιτικές διαχείρισης των πλαστικών έχουν μειώσει το ποσοστό των πλαστικών που καταλήγουν σε ΧΥΤΑ, ΧΥΤΥ ή ανεξέλεγκτες χωματερές - μάλιστα ορισμένες Ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Δανία και η Φιλανδία έχουν μηδενίσει την τελική απόθεση - με αντίστοιχες αυξήσεις στα ποσοστά ανακύκλωσης και αποτέφρωσης για ενεργειακή απόσβεση. Η μειούμενη εξάρτηση από την τελική απόθεση είναι φυσικά στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας, επιπλέον όμως η γρήγορη πλήρωση των υπαρχόντων χώρων υγειονομικής ταφής και η έλλειψη διαθέσιμων περιοχών για δημιουργία νέων, έχει παίξει ένα ρόλο στην αλλαγή αυτής της πολιτικής.

Για δεκαετίες, πολλές αναπτυγμένες χώρες εφαρμόζαν προγράμματα συλλογής και ανακύκλωσης των πλαστικών αποβλήτων. Στη δεκαετία του 1990, πρωτοβουλίες «διευρυμένης ευθύνης του παραγωγού, (EPR - Extended producer responsibility)» εισήχθησαν στην Ευρωπαϊκή Ένωση και σε αρκετές χώρες, μεταφέροντας το κόστος συλλογής και ανακύκλωσης των απορριμμάτων από τις τοπικές κυβερνήσεις / δήμους στους παραγωγούς. Σκοπός ήταν να ωθήσει προς μια πιο κυκλική οικονομία, δίνοντας το κίνητρο στους παραγωγούς να μειώσουν στην πηγή από το στάδιο του σχεδιασμού ακόμη, τον όγκο των απορριμμάτων και την χρήση επιβλαβών χημικών ουσιών. Οι σύγχρονες Οδηγίες από την ΕΕ θέτουν ως στόχο μία εναρμόνιση του ποσού αυτού του χρηματικού αντίτιμου (τέλους) μεταξύ των κρατών-μελών. Ωστόσο, πολλά προβλήματα ανακύπτουν και πάλι, όπως ότι με αυτό το τέλος ορισμένα προϊόντα γίνονται αντιοικονομικά. Αυτό έχει οδηγήσει πολλές χώρες σε εναλλακτικές πρακτικές, όπως η επιβολή φόρων και απαγορεύσεων επάνω σε προϊόντα, ώστε να ενθαρρυνθούν οι επιχειρήσεις στην υιοθέτηση μίας πιο κυκλικής οικονομίας [20].

Αυτά καθώς και άλλα μέτρα είναι απολύτως νόμιμα, η οικονομική πραγματικότητα όμως αποκαλύπτει ότι οι εταιρείες ωθούνται να μεταφέρουν τα απορρίμματα χωρίς διαλογή στην πηγή στο εξωτερικό, προκειμένου να μην επωμιστούν το κόστος της ασφαλούς ανακύκλωσης στην κάθε χώρα. Αυτό σημαίνει πως εδώ και δεκαετίες, ένας τεράστιος όγκος απορριμμάτων, πλαστικών και όχι μόνο, κατευθύνεται προς μια σειρά χώρες της Άπω Ανατολής και της Αφρικής. Αυτές οι χώρες απλά δεν έχουν την υποδομή να διαχειριστούν τόσο μεγάλους όγκους πλαστικών αποβλήτων όσο αυτοί που λαμβάνουν. Δεν αποτελεί συνεπώς έκπληξη ότι αυτές οι χώρες εμφανίζονται πρώτες στη λίστα των χωρών που διοχετεύουν πλαστικά στους ωκεανούς. Μόνο ένα μέρος από την πλαστική ρύπανση που διαφεύγει από αυτές προέρχεται από δικές τους πηγές πλαστικών. Παράλληλα, έχει παρατηρηθεί ότι η θαλάσσια πλαστική ρύπανση περιέχει τεράστιες ποσότητες προϊόντων που ξεκάθαρα προέρχονται από την ΕΕ και τη Βόρεια Αμερική, αλλά ελευθερώνονται στους ωκεανούς μέσω ποταμών στην Άπω Ανατολή, την Αφρική, και άλλες χώρες. Ωστόσο, πρόσφατα (από τον Ιανουάριο του 2018) η Κίνα επέβαλλε απαγόρευση εισαγωγής πλαστικών αποβλήτων στο έδαφός της, κάτι που γεννά παγκόσμιες μακροπρόθεσμες συνέπειες. Τα εξαγόμενα πλαστικά απόβλητα που δεν

παρέλαβε η Κίνα αρχικά κατευθύνθηκαν προς άλλες χώρες στη Νοτιοανατολική Ασία, αλλά πολύ πρόσφατα ένας αριθμός αυτών των χωρών, όπως η Μαλαισία, η Ινδονησία και οι Φιλιππίνες, άρχισαν επίσης να κλείνουν τις πόρτες τους στα αταξινόμητα απόβλητα. Οι προεκτάσεις που είχαν αυτές οι απαγορεύσεις στα κράτη που εξήγαγαν απορρίμματα, οδήγησαν σε μία ταχεία αλλαγή της πολιτικής στη διαχείριση αποβλήτων. Δυστυχώς, η εξαγωγή απορριμμάτων δεν θα τελειώσει σε μία μέρα και αναπόφευκτα στο άμεσο μέλλον θα εμφανιστούν άλλα κράτη που έστω για λίγο καιρό θα τα παραλαμβάνουν, ώσπου οι αναπτυσσόμενες χώρες σταματήσουν οριστικά την εξαγωγή τους [12,20].

Αναλογιζόμενοι μερικά από τα μειονεκτήματα των τρεχουσών πρακτικών διαχείρισης σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ανάγκη για πλαστικά, προκύπτει επείγουσα ανάγκη για περιβαλλοντικά και οικονομικά βιώσιμες εναλλακτικές διαχείρισης, οι οποίες ταυτόχρονα θα στοχεύουν στη μείωση της ανάγκης για τα περιορισμένα αποθέματα πετρελαίου.

5.2 Νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση πλαστικών αποβλήτων

Κατά τη διάρκεια των δυο τελευταίων δεκαετιών τα μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν υιοθετήσει μέτρα για την αντιμετώπιση της πλαστικής ρύπανσης στην Ευρώπη, μέσα από μία σειρά Οδηγιών, Στρατηγικών και Κανονισμών. Εδώ, παρατίθενται σε χρονολογική σειρά :

- 1) Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/EC, που αναφέρεται στην οικολογική κατάσταση των υδάτινων πόρων (γλυκού και αλμυρού νερού) της κάθε χώρας-μέλους [59]
- 2) Η Οδηγία Πλαίσιο για τη Θαλάσσια Στρατηγική 2008/56/EC (Άρθρα 9 & 10), με πρώτο κύκλο εφαρμογής την εξαετία 2012-2018, που στόχευε στην επίτευξη Καλής Οικολογικής Κατάστασης για τα Ευρωπαϊκά Θαλάσσια Ύδατα ως το 2020, αποτρέποντας επιπλέον επιβαρύνσεις και μειώνοντας όγκο θαλάσσιων απορριμμάτων, θέτοντας συγκεκριμένα κριτήρια και μεθοδολογικά εργαλεία [59]
- 3) Ο Κανονισμός για την Παρασκευή Καλλυντικών Προϊόντων 1223/2009/EC, που θεσπίζει κανόνες τους οποίους πρέπει να πληροί κάθε καλλυντικό προϊόν που διατίθεται στην αγορά, ώστε να εξασφαλίζεται η λειτουργία της εσωτερικής αγοράς και ένα υψηλό επίπεδο προστασίας της υγείας των καταναλωτών [59]
- 4) Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2015/720/EE για τη μείωση της χρήσης πλαστικών σακουλών μεταφοράς. Οι λεπτές πλαστικές σακούλες μεταφοράς συχνά χρησιμοποιούνται μόνο μία φορά, συνεπώς ήταν το πρώτο από τα προϊόντα μιας χρήσης που επιβάλλονταν να περιοριστεί / καταργηθεί, καθώς ήταν ευρέως ορατή η επίπτωσή τους, ιδίως στα θαλάσσια οικοσυστήματα. Αυτό που ορίζει τελικά ο νόμος είναι η επιβολή περιβαλλοντικού- ανταποδοτικού τέλους αξίας 0,09€ ανά τεμάχιο πλαστικής σακούλας. Από την επιβολή του περιβαλλοντικού τέλους εξαιρούνται βιοαποδομήσιμες (ή βιοαποικοδομήσιμες) και λιπασματοποιήσιμες πλαστικές σακούλες

- μεταφοράς και οι σακούλες που διατίθενται από τα αδειοδοτημένα περίπτερα και τις υπαίθριες και λαϊκές αγορές [63]
- 5) Η Ευρωπαϊκή Στρατηγική για τις Πλαστικές Ύλες σε μία Κυκλική Οικονομία COM/2018/028, που στοχεύει στη μετατροπή του τρόπου που τα πλαστικά προϊόντα σχεδιάζονται, παράγονται, χρησιμοποιούνται και ανακυκλώνονται στην ΕΕ [59]. Συγκεκριμένα, «η στρατηγική αυτή φιλοδοξεί να θέσει τα θεμέλια για μια νέα οικονομία των πλαστικών, στην οποία ο σχεδιασμός και η παραγωγή πλαστικών υλών και πλαστικών προϊόντων γίνονται με πλήρη σεβασμό των αναγκών επαναχρησιμοποίησης, επισκευής και ανακύκλωσης, κατασκευάζονται δε και προωθούνται περισσότερο βιώσιμα υλικά. Τούτο θα προσφέρει μεγαλύτερη προστιθέμενη αξία και ευημερία στην Ευρώπη και θα δώσει ώθηση στην καινοτομία. Θα περιορίσει τη ρύπανση από πλαστικά απορρίμματα και τις αρνητικές της επιπτώσεις στη ζωή μας και το περιβάλλον. Με την προώθηση των στόχων αυτών, η στρατηγική θα συμβάλει επίσης στην επίτευξη της προτεραιότητας που έθεσε η Επιτροπή για Ενεργειακή Ένωση με μια σύγχρονη οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και αποδοτικής χρήσης των πόρων και της ενέργειας, και θα συμβάλει ουσιαστικά στην επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης με ορίζοντα το 2030 και της συμφωνίας του Παρισιού» [10]. Τονίζεται επίσης πως σημαντική είναι η ανάληψη δράσης τόσο σε ιδιωτικό επίπεδο, από τους ίδιους τους πολίτες, όσο και σε περιφερειακό, από δήμους, κοινότητες και περιφέρειες, όπως και σε εθνικό, με θέσπιση σχετικών νόμων και τέλος σε διεθνές, ώστε να έχουν όντως αντίκτυπο οι προσπάθειες.
- 6) Οδηγία (ΕΕ) 2018/852 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 30ής Μαΐου 2018, για τροποποίηση της οδηγίας 94/62/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας (Κείμενο που παρουσιάζει ενδιαφέρον για τον ΕΟΧ). Στοχεύει στη μείωση των απορριμμάτων συσκευασίας μέσω της αύξησης του ποσοστού ανάκτησης, επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης των υλικών συσκευασίας [59]
- 7) Η Οδηγία για τα Πλαστικά – μιας χρήσης (ΕΥ) 2019/904, που στοχεύει στη μείωση του όγκου των πλαστικών απορριμμάτων μιας χρήσης και αλιευτικών εργαλείων, τα οποία εντοπίζονται συχνά σε ακτές και θαλάσσια νερά της ΕΕ [59]. Ο στόχος που τέθηκε - με βάση τα δεδομένα από τα πλαστικά απορρίμματα στις παραλίες της Ευρώπης- ώστε να διατηρηθούν καθαρές, είναι 20 τεμάχια απορριμμάτων για κάθε 100 m ακτογραμμής. Πιο συγκεκριμένα, ύστερα από έρευνες αποκαλύφθηκε ότι η το 80-85 % των θαλάσσιων απορριμμάτων που καταμετρούνται στις παραλίες είναι πλαστικά, ενώ τα πλαστικά αντικείμενα μιας χρήσης αντιστοιχούν στο 50 % και τα είδη αλιείας στο 27 % του συνόλου (βλέπε και Εικόνα 4.5). Τα πλαστικά προϊόντα μιας χρήσης περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα κοινών καταναλωτικών προϊόντων ταχείας κατανάλωσης που απορρίπτονται αφού έχουν χρησιμοποιηθεί μία φορά σύμφωνα με τον προορισμό τους, ανακυκλώνονται σπανίως και συχνά καταλήγουν στα σκουπίδια. Σημαντικό ποσοστό των αλιευτικών εργαλείων που διατίθενται στην αγορά δεν

συλλέγεται για επεξεργασία. Επομένως, τα πλαστικά προϊόντα μίας χρήσης και τα αλιευτικά εργαλεία που περιέχουν πλαστική ύλη αποτελούν ένα ιδιαίτερα σοβαρό πρόβλημα στο πλαίσιο των θαλάσσιων απορριμμάτων, ενέχουν σοβαρό κίνδυνο για τα θαλάσσια οικοσυστήματα, τη βιοποικιλότητα και την ανθρώπινη υγεία και βλάπτουν δραστηριότητες όπως ο τουρισμός, η αλιεία και η ναυτιλία [60]. Στόχος λοιπόν της Οδηγίας ήταν να απαγορεύσει οριστικά τη χρήση αυτών των προϊόντων, όπως πλαστικούς ωτοκαθαριστές (μπατονέτες), πλαστικά μαχαιροπήρουνα, πλαστικά πιάτα, καλαμάκια, πλαστικούς αναδευτήρες, πλαστικά στικ μπαλονιών, τα οποία πλέον θα μπορούν να κυκλοφορούν στην αγορά μόνο αν κατασκευάζονται από περισσότερο βιώσιμα υλικά. Ακόμη, απαγορεύονται τα δοχεία ποτών εφόσον το καπάκι τους δεν είναι απόλυτα συνδεδεμένο με το κεντρικό δοχείο. Επίσης, κάθε κράτος μέλος με θέσπιση νόμων πρέπει να περιορίσει τη χρήση πλαστικών δοχείων φαγητού και πλαστικών κυπέλων. Τέλος, κάθε κράτος μέλος οφείλει έως το 2029 να συλλέγει το 90% των πλαστικών μίας χρήσης δοχείων ποτών [61]. Το απώτερο ζητούμενο είναι η πρόληψη και η μείωση του αντίκτυπου ορισμένων πλαστικών προϊόντων στο περιβάλλον, ιδίως στο υδάτινο περιβάλλον, και στην ανθρώπινη υγεία, καθώς και η προώθηση της μετάβασης σε κυκλική οικονομία με καινοτόμα και βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα, προϊόντα και υλικά, συμβάλλοντας έτσι στην αποδοτική λειτουργία της εσωτερικής αγοράς [60].

- 8) Και τέλος, το νέο Πλάνο Δράσης της ΕΕ για την Κυκλική Οικονομία COM/2020/98 με σκοπό να επιτευχθεί μία συστηματική μετάβαση στην Κυκλική Οικονομία στην Ευρωπαϊκή Ένωση αλλά και διεθνώς [59].

Αξίζει να σημειωθεί πως στις παραπάνω Οδηγίες – Πλαίσια, και πιο συγκεκριμένα στην 2019/904 Οδηγία που αφορά τα πλαστικά μίας χρήσης, δεν περιλαμβάνονται ρυθμίσεις για τα μικροπλαστικά. Είναι πολύ πιθανό πως μια επόμενη Οδηγία θα αφορά αυτά, καθώς αναγνωρίζονται οι σημαντικές επιπτώσεις τους στην υγεία και το φυσικό περιβάλλον.

Σε ό,τι αφορά την Ελλάδα, η πρώτη νομοθετική κίνηση περιορισμού των πλαστικών απορριμμάτων έγινε το 2017 με τον Νόμο 4496, ο οποίος ουσιαστικά ενσωμάτωσε την ευρωπαϊκή Οδηγία 2015/720/ΕΕ για τη μείωση της χρήσης πλαστικών σακουλών μεταφοράς.

Επίσης, η Οδηγία 2019/904 έχει υιοθετηθεί με το Νόμο 4736/2020 τον Οκτώβριο του 2020. Σύμφωνα με το άρθρο 5 αυτού του Νόμου, από τις 3 Ιουλίου 2021 απαγορεύεται να διατίθενται στην αγορά τα πλαστικά προϊόντα μίας χρήσης που αναφέρονται και παραπάνω, καθώς και τα προϊόντα που κατασκευάζονται από οξοδιασπώμενη πλαστική ύλη. Επίσης, τίθενται ποσοστιαίοι περιορισμοί στην κατανάλωση πλαστικών προϊόντων για τα επόμενα χρόνια [62].

Συχνά, οι Οδηγίες τροποποιούνται ή εξειδικεύονται προκειμένου να περιγράψουν καλύτερα τις αναδυόμενες ανάγκες. Ειδικότερα στο ζήτημα της βιοαποικοδόμησης-λιπασματοποίησης – κομποστοποίησης των πλαστικών, που είναι μία ολοένα και μεγαλύτερη ανάγκη, όπως θα περιγραφεί και στην ενότητα 5.6, έχουν εκδοθεί πολλά πρότυπα και οδηγίες πιστοποίησης. Για παράδειγμα, η Οδηγία 94/62/ΕΚ ως ένα βαθμό τροποποιήθηκε με το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13432, το οποίο συγκεκριμενοποιούσε τις

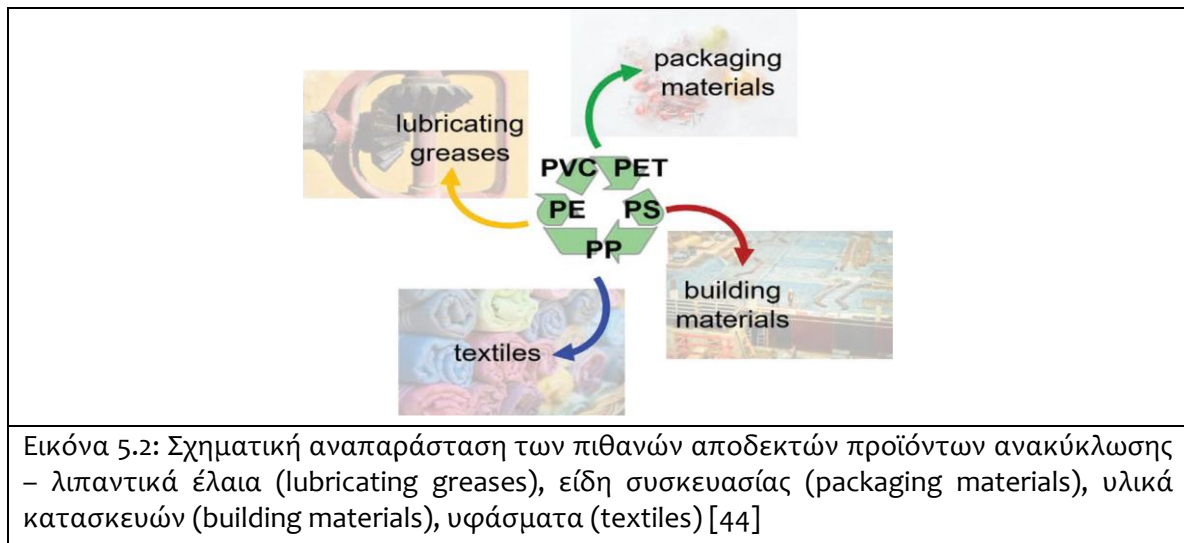
απαιτήσεις για συσκευασία ανακτήσιμη μέσω λιπασματοποίησης και βιοαποικοδόμησης. Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13432 απευθύνεται σε εταιρείες παραγωγής συσκευασιών, οι οποίες επιθυμούν να πιστοποιήσουν την κομποστοποιησιμότητα των προϊόντων τους. Ειδικά για τις βιοδιασπώμενες ή βιοαποικοδομήσιμες σακούλες, το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13432 πιστοποιεί την ιδιότητά τους να βιοαποικοδομούνται και να γίνονται λίπασμα [65]. Με ανάλογο τρόπο, το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN14995 αφορά στην αξιολόγηση ικανότητας λιπασματοποίησης των πλαστικών και συγκεκριμένα αναφέρεται στην οικιακή λιπασματοποίηση προϊόντων [66]. Επίσης, ο παγκόσμιος οργανισμός πιστοποίησης ISO (International Organization for Standardization, Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης) έχει εκδώσει ορισμένες πιστοποιήσεις, όπως η πιστοποίηση ISO 11734, που εκδόθηκε στο 1995, στα πλαίσια της αξιολόγησης της ποιότητας του νερού. Σε αυτήν περιγράφεται αναλυτικά μία προτεινόμενη μέθοδος αξιολόγησης της βιοαποικοδομησιμότητας οργανικών συστατικών από αναερόβια μικρόβια [68]. Τέλος, η πιστοποίηση ISO 17088 (εκδόθηκε αρχικά το 2012 και ανανεώθηκε το 2021) θέτει τις προϋποθέσεις για εκείνα τα πλαστικά προϊόντα που μπορούν να αποικοδομηθούν σε συνθήκες κομποστοποίησης (αερόβια) χωρίς να απομείνουν στο περιβάλλον ως κατάλοιπα ανθεκτικοί οργανικοί (POP) ή / και τοξικοί ρύποι [67].

5.3. Ανακύκλωση

Ως ένας πολύ σημαντικός μηχανισμός της κυκλικής οικονομίας για τη διατήρηση των πλαστικών εντός του συστήματος για όσο το δυνατόν περισσότερο χρονικό διάστημα, η ανακύκλωση είναι μία κατεύθυνση στην οποία στρέφεται παγκόσμια το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Τα αυξανόμενα ποσοστά ανακύκλωσης προσφέρουν τη δυνατότητα οικονομικής ανάπτυξης και μείωσης των πλαστικών απορριμμάτων που θα μπορούσαν να καταλήξουν στο περιβάλλον. Η Ομοσπονδία Βρετανικών Πλαστικών (British Plastic Federation) υπολόγισε ότι επεκτείνοντας την ικανότητα ανακύκλωσης των πλαστικών, θα δημιουργηθούν επιπλέον 25.000 θέσεις εργασίας στο Ηνωμένο Βασίλειο μέχρι το έτος 2030 [20].

5.3.1. Μηχανική ανακύκλωση

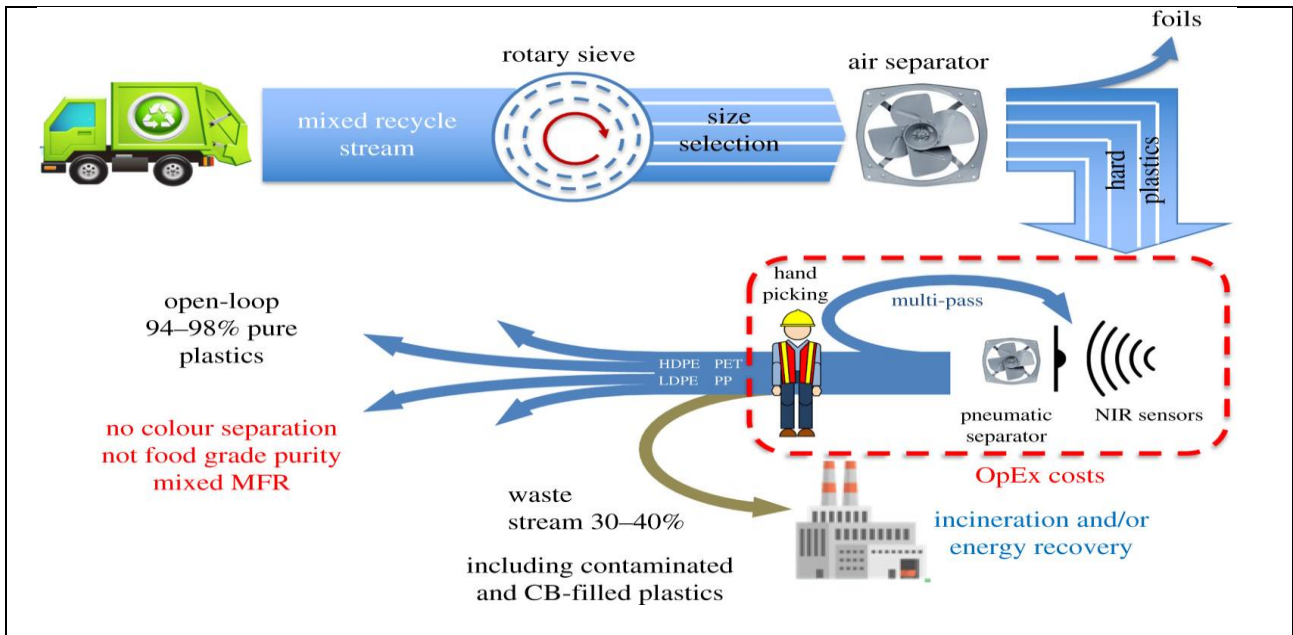
Ο κύριος προορισμός των πλαστικών είναι η μηχανική ανακύκλωση ανοιχτού βρόγχου (open-loop), η οποία συμβαίνει στην πλειοψηφία των ανακυκλούμενων πλαστικών (Εικόνα 5.3) Σήμερα, πολλά από τα ανακυκλούμενα πλαστικά μέσω μηχανικής ανακύκλωσης χρησιμοποιούνται σε πολλά διαφορετικά προϊόντα και δεν δημιουργούν αυτό το ένα προϊόν, από το οποίο προήλθαν (ανοικτός βρόγχος ανακύκλωσης). Ένα τυπικό παράδειγμα είναι το μεγάλο ποσό ανακυκλώσιμων μπουκαλιών PET, το οποίο στη συνέχεια κατευθύνεται στη βιομηχανία κατασκευής πολυεστερικών υφασμάτων (εικόνα 5.4).



Σε αυτό το πλαίσιο, τα πλαστικά μετά την κατανάλωση υφίστανται μηχανικές διεργασίες για να ανακτηθούν τα πολυμερή με όσο το δυνατόν μικρότερες αλλαγές στη χημική και φυσική υπόσταση του πλαστικού. Εφόσον ο καταναλωτής γνωρίζει ότι ένα πλαστικό είναι ανακυκλώσιμο, το τοποθετεί στον ειδικό κάδο ανακύκλωσης, απ' όπου η εταιρεία συλλογής πλαστικών το παραλαμβάνει. Σε ιδανικές συνθήκες, ακολουθεί η ταξινόμηση, το πλύσιμο και η θέρμανση ώστε υπολείμματα τροφής, ταμπέλες και άλλοι ρυπαντές ή μολυσματικοί παράγοντες να απομακρυνθούν. Στη συνέχεια, τα πλαστικά αλέθονται σε μικρά κομμάτια, πλένονται, στεγνώνουν και θερμαίνονται ξανά. Ανάλογα με τον τύπο του πλαστικού και την επιδιωκόμενη χρήση του, μπορεί να αποστειρωθούν (όπως τα πλαστικά που προορίζονται για συσκευασία τροφίμων) ή να δεχθούν πρόσθετα. Σε ορισμένες περιπτώσεις θερμαίνονται και διαμορφώνονται σε μορφή σφαιριδίων (pellets), τα οποία πωλούνται με τη μορφή αυτή στους κατασκευαστές για τις δικές τους ανάγκες [4].

Η ανακύκλωση κλειστού βρόχου, παρόλο που έχει κάποιες ομοιότητες με αυτήν του ανοικτού βρόχου, διαφέρει στο ότι, μέσω αυτής της διαδικασίας, ένα προϊόν ή ένα υλικό χρησιμοποιείται και στη συνέχεια μετατρέπεται σε νέο προϊόν επ' αόριστον, χωρίς να χάσει τις ιδιότητές του κατά τη διαδικασία ανακύκλωσης (εικόνα 5.4).

Φυσικά, η ανακύκλωση κλειστού βρόχου, όπου για παράδειγμα το υλικό που παράγεται από το ανακυκλωμένο PET μπουκάλι θα ανακυκλώνεται ώστε να παράγει νέα PET μπουκάλια και μόνο, θα ήταν προτιμότερη για μία κυκλική οικονομία αλλά, απροσδόκητα, μικρό ποσοστό ανακύκλωσης κλειστού βρόχου επιτυγχάνεται σήμερα (μικρότερο από 10%) [20]. Ένας σημαντικός παράγοντας που αποτρέπει την ευρύτερη εφαρμογή της κλειστού βρόχου ανακύκλωσης είναι οι πιθανές υπολειπόμενες τοξικές και επιβλαβείς ουσίες που δεν μπορούν εύκολα να εξαλειφθούν μέσω της μηχανικής ανακύκλωσης. Αυτό αφορά ιδιαίτερα προϊόντα στη συσκευασία τροφίμων και στον ιατρικό τομέα. Μόνο σε καταστάσεις που επιτρέπουν την ανιχνευσιμότητα και τη γνώση της προηγούμενης χρήσης των πλαστικών αντικειμένων είναι πιθανό να επιτευχθεί το αναγκαίο επίπεδο καθαρότητας μέσω της κλειστού βρόχου ανακύκλωσης [25].

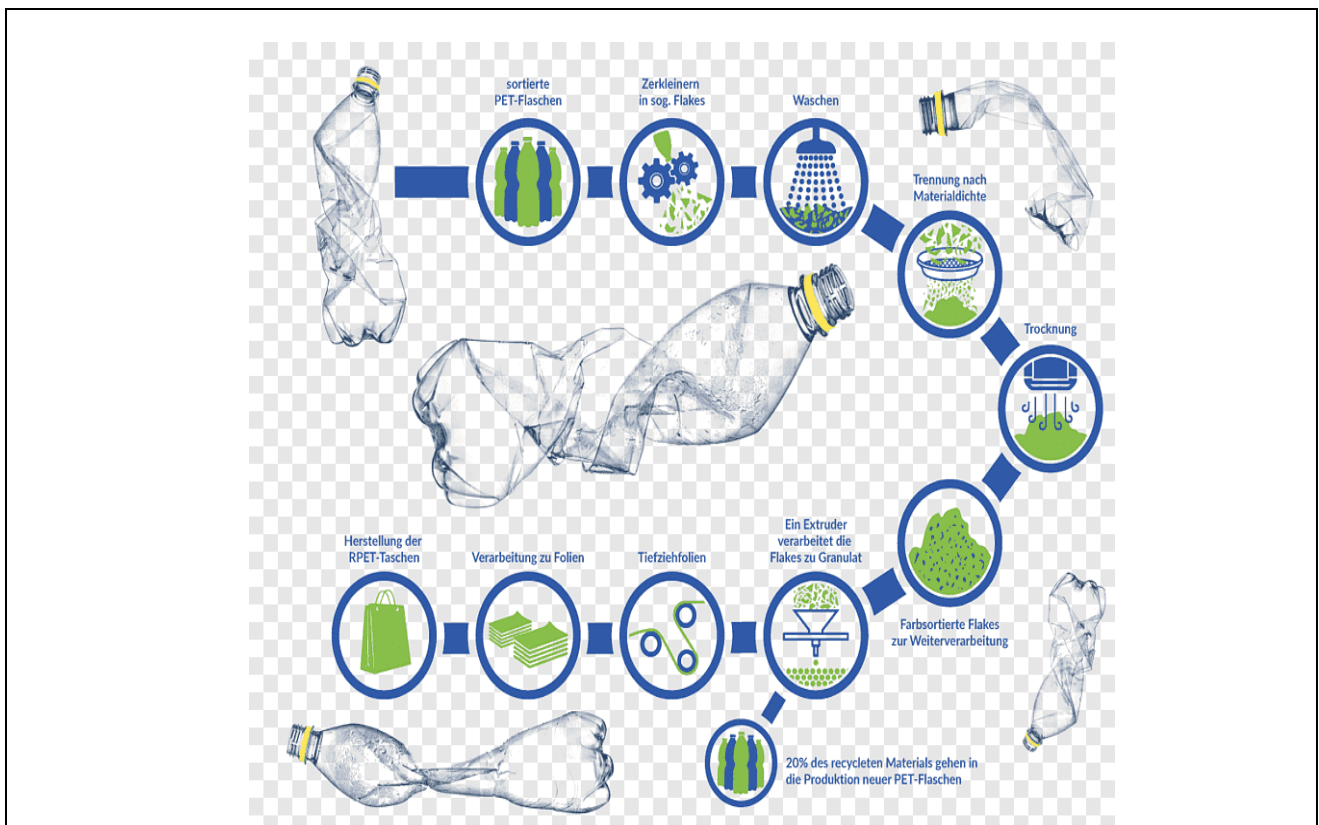


Εικόνα 5.3: Το μοντέλο μηχανικής ανακύκλωσης ανοιχτού βρόγχου (open loop) με ποικιλία πλαστικών αποβλήτων (mixed recycled stream) περιλαμβάνει: περιστροφικό κόσκινο (rotary sieve), επιλογή σύμφωνα με το μέγεθος (size selection), διαχωριστή αέρα (air separator), λεπτά φύλλα (foils), σκληρά πλαστικά (hard plastics), επαναλαμβανόμενη διαδικασία (multi-pass), διαχωρισμός χειροκίνητα (hand picking) και με αισθητήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIR sensors), ιμάντας απορριμμάτων (waste stream) που περιλαμβάνει πλαστικά με ρύπους και με αιθάλη (contaminated and CB-filled plastics), αποτέφρωση και/ή ανάκτηση ενέργειας (incineration and/or energy recovery), καθαρά πλαστικά ανοιχτού βρόγχου (open-loop pure plastics) χωρίς διαχωρισμό χρώματος (no colour separation), πλαστικά ακατάλληλα για χρήση ως συσκευασίες φαγητού (not food grade purity) και χωρίς διάκριση ως προς το Ρυθμό Ροής Τηγμένου (mixed MFR) [20]

Τα συμπεράσματα πολλών μελετών «ανάλυσης κύκλου ζωής» (LCA - Life Cycle Analysis) για το πλαστικό δείχνουν πως η μηχανική ανακύκλωση είναι ο καλύτερος τρόπος διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων εφόσον τα πλαστικά υλικά μπορούν να διακριθούν. Τα κύρια πλεονεκτήματα που αναφέρουν, σχετίζονται με την αποφυγή χρήσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή νέων πλαστικών. Ωστόσο, οι θερμομηχανικές διεργασίες που συντελούνται κατά την μηχανική επεξεργασία προκαλούν σημαντικές αλλαγές στις ιδιότητες των πολυμερών. Η συνηθέστερη επίπτωση είναι η κατάτμηση κατά μήκος της αλυσίδας του πολυμερούς ή ακραίων πλευρικών ομάδων με σχηματισμό ελευθέρων ριζών. Αυτές οι ελεύθερες ρίζες μπορεί είτε να καταστραφούν με αυτοξειδοαναγωγή οδηγώντας σε πτώση του μοριακού βάρους του πολυμερούς και αύξηση της πολυδιασποράς, όπως συμβαίνει στο PP, είτε σε μερικές περιπτώσεις να προκαλέσουν χημικές αντιδράσεις που οδηγούν σε διακλαδώσεις μεταξύ των αλυσίδων, αυξάνοντας έτσι σημαντικά το μοριακό βάρος των πολυμερών, όπως στο PE. Πολλές αλλαγές επίσης έχουν σημειωθεί στο σημείο τήξης, στο μήκος της αλυσίδας, στην ανθεκτικότητα, και αλλού (εικόνα 5.5). Για να ανακτηθούν μερικές από τις «χαμένες»

ιδιότητες, τα υλικά που προκύπτουν από τη μηχανική ανακύκλωση, αναμειγνύονται με πρωτογενή υλικά. Συνεπώς, ακόμη και στην ανακύκλωση κλειστού βρόγχου, το ποσοστό ένθεσης ανακυκλωμένου πλαστικού είναι σχετικά μικρό σε σχέση με το πρωτογενές πλαστικό [20, 4].





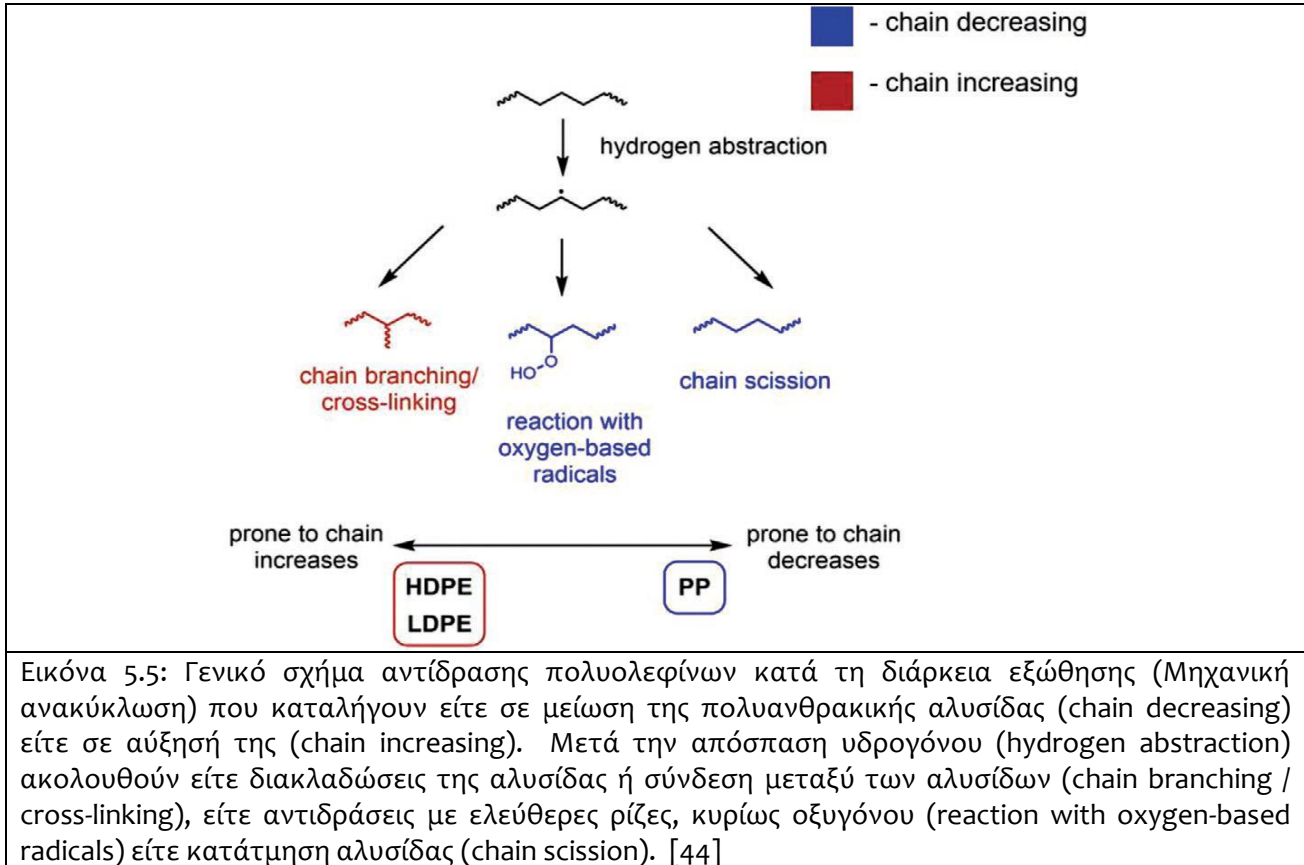
Στην ανακύκλωση κλειστού βρόγχου:

- 1) Διαλογή φιαλών PET (sortierte PET – Flaschen)
- 2) Τεμαχισμός σε νιφάδες (Zerkleinern in sog.Flakes)
- 3) Καθαρισμός (Waschen)
- 4) Διαλογή ανάλογα με την πυκνότητα του υλικού (Trennung nach Materialdichte)
- 5) Ξήρανση (Trocknung)
- 6) Διαλογή ανάλογα με το χρώμα (fabsortierte Flakes zur Weiterverarbeitung)
- 7) Μετατροπή νιφάδων σε κόκκους (Ein Extruder verarbeitet die Flakes zu Granulat)
- 8) Θερμική επεξεργασία σε φύλλα (Tiefziehfolien)
- 9) Επεξεργασία σε μεμβράνες (Verarbeitung zu Folien)
- 10) Παρασκευή σακουλών από ανακυκλωμένο PET (Herstellung der RPET – Taschen)

Το 20% του ανακυκλωμένου PET χρησιμοποιείται για την παραγωγή νέων PET φιαλών (20% des recycleten Materials gehen in die Produktion neuer PET – Flaschen)

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, αν και η μηχανική ανακύκλωση είναι σημαντική μέθοδος διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων, δεν ισχύει το ίδιο και για πλαστικά που αποτελούνται από πολλαπλά πολυμερή, για παράδειγμα τα υλικά συσκευασίας με πολλαπλά στρώματα πλαστικών, ή για τα μίγματα πλαστικών ή ακόμη και για τα πλαστικά που συνδυάζονται με άλλα υλικά. Τυπικό παράδειγμα είναι οι κλασικές συσκευασίες ποτών, που περιέχουν πολλαπλά στρώματα χαρτιού, πολυμερών (συνήθως PE) και αλουμινίου. Η ανάγκη ταξινόμησης σύμφωνα με τον τύπο του πλαστικού αναδεικνύεται, επίσης, στο μεγαλύτερο προβληματισμό στην ανακύκλωση πλαστικών. Διαφορετικοί τύποι πλαστικών συχνά δεν μπορούν να είναι ταυτόχρονα παρόντες στη

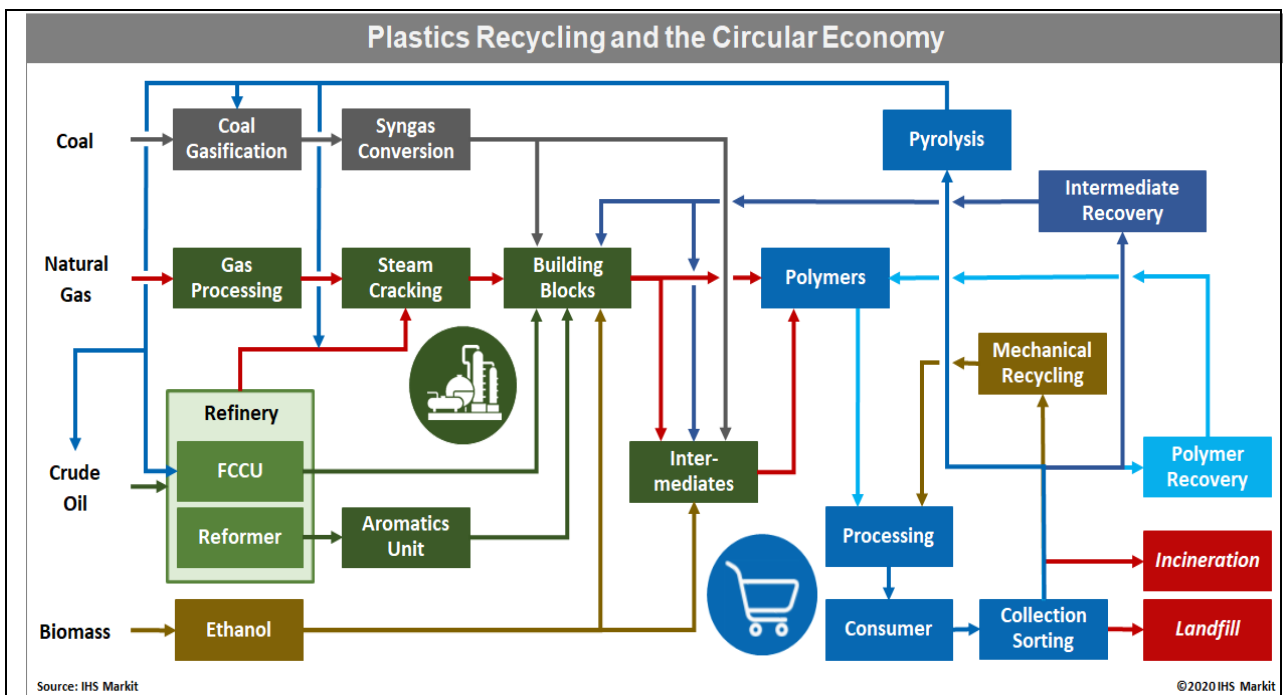
διαδικασία της ανακύκλωσης λόγω του ότι οι διαφορετικές ιδιότητές τους θα αναδειχθούν κατά τη θέρμανση, καταλήγοντας σε μια μαλακή και αχρησιμοποίητη μάζα [21].



Ένα επιπλέον σημαντικό ζήτημα στην ανακύκλωση είναι τα πρόσθετα υλικά / συμπληρωματικές ουσίες στα πλαστικά. Για ένα μόνο πλαστικό, ανάλογα με την τελική του χρήση, μπορεί να έχουν χρησιμοποιηθεί πολλοί διαφορετικοί τύποι και ποσότητες σταθεροποιητών, χρωστικών, πλαστικοποιητών, και άλλα αντιδραστήρια, τα οποία έχουν προστεθεί ώστε να παράγουν τις οπτικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες που απαιτούνταν. Σαν αποτέλεσμα, από την ποικιλία των ανακυκλώσιμων πλαστικών που καταλήγει στα εργοστάσια, θα παραχθεί ένα προϊόν με μεγάλη εν δυνάμει ποικιλία πρόσθετων. Αυτό το στοιχείο καθιστά την κλειστού βρόγχου ανακύκλωση πολύ δύσκολη, αν όχι και ανέφικτη, με δεδομένο ότι στους επεξεργαστές πρέπει να φτάσει μία απόλυτα συγκεκριμένη ύλη ώστε να παράγουν ξανά το ίδιο προϊόν. Ο μόνος τρόπος να το παρακάμψουμε αυτό είναι η διαλογή στην πηγή ελέγχοντας αυστηρά τα πλαστικά που προωθούνται στις μονάδες ανακύκλωσης [21,20].

5.3.2. Χημική ανακύκλωση

Χημική ανακύκλωση ονομάζεται η διαδικασία, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.6, στην οποία τα πολυμερή διασπώνται είτε προς τα μονομερή συστατικά τους είτε προς άλλα μικρότερα οργανικά συστατικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως χημική πρώτη ύλη για πολυμερισμό εκ νέου προς νέα πολυμερή ή να αξιοποιηθούν σε άλλες χημικές διεργασίες. Η χημική ανακύκλωση προσφέρει ευκαιρίες για εκμετάλλευση των απορριμμάτων, ώστε να παραχθούν προϊόντα προστιθέμενης αξίας για άλλες εργοστασιακές εφαρμογές ή ως εμπορικά προϊόντα. Διάφορες μέθοδοι χημικής ανακύκλωσης υπάρχουν, με τις πιο κοινές να είναι η χημειολυσία, η πυρόλυση, η υγρή καταλυτική πυρόλυση (FCC - fluid catalytic cracking) και η υδρογονοπυρόλυση. Αν και τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί για πολλές μεθόδους χημικής ανακύκλωσης, ως σήμερα το κόστος είναι υψηλό, ιδιαίτερα αν συγκριθούν με τις πετροχημικές πρώτες ύλες [21, 20].



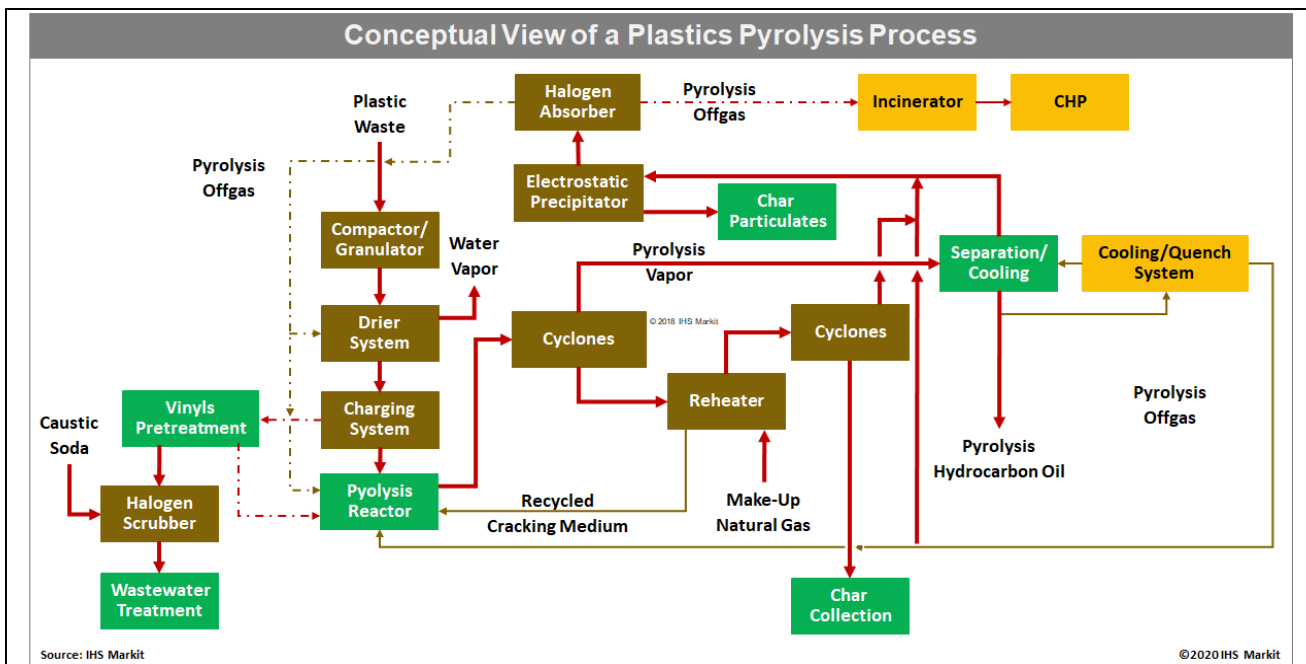
Εικόνα 5.6: Σχηματική απεικόνιση των μεθόδων χημικής ανακύκλωσης των πλαστικών στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας (plastics recycling and the circular economy) – γαιάνθρακας (coal), φυσικό αέριο (natural gas), ανεπεξέργαστο πετρέλαιο (crude oil), βιομάζα (biomass), αεριοποίηση γαιάνθρακα (coal gasification), μετατροπή αερίου σύνθεσης (syngas conversion), διάσπαση με ατμό (steam cracking), δομικά υλικά κατασκευών (building blocks), διυλιστήριο (refinery), υγρή καταλυτική πυρόλυση (FCCU), ενδιάμεσα προϊόντα (intermediates), πολυμερή (polymers), πυρόλυση (pyrolysis), αποτέφρωση (incineration), χώρος υγειονομικής ταφής, χωματερή (landfill) [45]

Η χημειολυσία είναι ένας γενικός όρος για μια ποικιλία τεχνολογιών από-πολυμερισμού, όπως η μεθανόλυση, η υδρόλυση, η γλυκόλυση, και άλλες προς σχηματισμό των μονομερών τους. Η χημειολυσία δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα πολυμερή και περιορίζεται σε πολυμερή όπως οι πολυεστέρες, κυρίως το PET, και πολυαμίδια, όπως το νάυλον, το μηχανολογικό πλαστικό πολυαμίδιο PA6 και άλλα.

Η γλυκόλυση είναι μια εμπορική διαδικασία από-πολυμερισμού του PET που περιλαμβάνει καταλυόμενες αντιδράσεις μετεστεροποίησης σε υψηλή θερμοκρασία και εφαρμόζεται σήμερα από πολλές εταιρίες. Εκτός της ανάκτησης μονομερών, η γλυκόλυση παράγει επίσης ολιγομερή προϊόντα, κυρίως πολυόλες, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση άλλων πολυμερών, όπως πολυουρεθανών, άλλων πολυεστέρων και εποξικών ρητινών [20].

Η πυρόλυση και η εξαέρωση κέρδισε έδαφος πρόσφατα χάρη στην δυνατότητα να μετατρέπει μια σειρά από πλαστικά σε συνθετικά αέρια / πετροχημικά υλικά, απαιτώντας μόνο υψηλές θερμοκρασίες ώστε να διασπάσουν θερμικά τα πλαστικά (εικόνα 5.7).

Η εξαέρωση σε θερμοκρασίες γύρω στους 600°C – 800°C οδηγεί σε παραγωγή πετρελαίου και πεπιεσμένων αερίων και το μείγμα αυτών περνά μέσα από έναν αεριοποιητή με αέρα και ατμό σε θερμοκρασίες 1.200°C – 1.500°C , έτσι ώστε να μετατραπεί σε συνθετικό υγραέριο. Το συνθετικό υγραέριο αποτελείται από υδρογόνο (H_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), μεθάνιο (CH_4), προπάνιο (C_3H_8), βουτάνιο (C_4H_{10}) και ατμό (H_2O).



Εικόνα 5.7: Απλουστευμένη σχηματική προσέγγιση της διαδικασίας πυρόλυσης των πλαστικών (conceptual view of a plastics pyrolysis process) – κοκκοποιητής (granulator), αφυγραντήρας (drier system), φορτιστής (charging system), αντιδραστήρας πυρόλυσης (pyrolysis reactor), παγίδα αερίων αλογόνων (halogen scrubber), επεξεργασία λυμάτων (wastewater treatment), συλλογή σωματιδίων κάρβουνου (char collection), κυκλώνες (cyclones), ηλεκτροστατικός κατακρημνιστής (electrostatic precipitator), ψύξη (cooling) [45]

Σε αντίθεση με την εξαέρωση, κατά την ξηρή πυρολυτική μετατροπή του πλαστικού τα υλικά διασπώνται με θέρμανση (περίπου 500°C) απουσία οξυγόνου για να παραχθεί ένας συνδυασμός πεπιεσμένων ατμών, οι οποίοι με ψύξη, σχηματίζουν διάφορα πετροχημικά καύσιμα (έλαια και κηρούς). Η πυρόλυση είναι η μέθοδος επιλογής για πλαστικά που δεν από-πολυμερίζονται εύκολα μέσω της χημειολυσίας ή δεν μπορούν εύκολα να ανακυκλωθούν μηχανικά, όπως τα μείγματα πολυμερών και οι

πολυστρωματικές συσκευασίες. Είναι συνεπώς πιο ευέλικτη ως μέθοδος για το ποια πλαστικά απορρίμματα μπορεί να διαχειριστεί. Ωστόσο, εξαιτίας της ποικιλίας των προϊόντων που προκύπτουν, απαιτείται επεξεργασία μετά την παρασκευή τους, κάτι που καθιστά τη μέθοδο οικονομικά βιώσιμη μόνο εφόσον εφαρμόζεται σε μεγάλη κλίμακα. Αυτό καταλήγει στην εφαρμογή της μόνο στα πλαστικά μεγάλου όγκου, δηλαδή PE, PP, PET, PS και PVC. Να σημειωθεί όμως, πως αντίθετα με τα άλλα μαζικής χρήσης πολυμερή, το PVC είναι ιδιαίτερα προβληματικό για πυρόλυση, εξαιτίας της παραγωγής υδροχλωρικού οξέος (HCl) και άλλων οργανοχλωριωμένων παραγώγων, που δεν είναι μόνο επικίνδυνα για την υγεία, αλλά μπορούν και να διαβρώσουν τον εξοπλισμό [20, 45].

Η υγρή πυρόλυση είναι μια θερμική καταλυτική διαδικασία αποσύνθεσης που έχει όμως μια σειρά πλεονεκτήματα σε σχέση με την ξηρή πυρόλυση. Πρώτον, τα προϊόντα της έχουν μικρότερο εύρος κατανομής μοριακού βάρους και μπορούν ακόμη και να είναι συγκεκριμένα και δεύτερον, ο καταλύτης επιτρέπει να εφαρμοστούν ηπιότερες συνθήκες αντίδρασης, άρα μειώνεται το κόστος εφαρμογής. Δύο διαφορετικές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για αυτή την καταλυτική μέθοδο πυρόλυσης, οι οποίες μπορούν να διενεργηθούν σε υγρή ή σε αέρια φάση [20].

Η αέρια υδρογονοπυρόλυση είναι μια υδρογονοκαταλυόμενη πυρόλυση που συντελείται σε συνθήκες υψηλής πίεσης υδρογόνου (περίπου 70 atm) και σε θερμοκρασία περίπου 400° C. Τα προϊόντα της έχουν υψηλό βαθμό κορεσμού, με μικρό αρωματικό περιεχόμενο και η διαδικασία εξαλείφει τα όποια πιθανά τοξικά παραπροϊόντα, όπως είναι οι πολυχλωρωμένες διοξίνες. Αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις στη μείωση του κόστους που αφορά το διαχωρισμό των προϊόντων. Οι σημαντικοί περιορισμοί είναι φυσικά το κόστος του υδρογόνου καθώς και, όπως και στην υγρή πυρόλυση, το ενδεχόμενο δηλητηρίασης του καταλύτη [20, 45].

Η σύγχρονη έρευνα στρέφεται στη διερεύνηση ενζύμων που μπορούν να διασπάσουν ποικιλία φυσικών αλλά και συνθετικών πλαστικών. Η ενζυμική κατάλυση υπόκειται σε ηπιότερες συνθήκες αντίδρασης σε σύγκριση με τις χημικές μεθόδους ανακύκλωσης. Ένζυμα – κλειδιά μέχρι στιγμής έχουν αναδειχθεί ορισμένες υδρολάσες, αφυδρογονάσες, οξειδάσες, λιπάσες και πρωτεάσες. Τα ένζυμα είναι εξειδικευμένα και συνδέονται απόλυτα με το κατάλληλο υπόστρωμα-πολυμερές, το οποίο διασπώνται είτε με οξείδωση είτε με υδρόλυση, έτσι ώστε να σχηματιστούν μονομερή και άλλα οργανικά παράγωγα. Πολλά πολυμερή είναι ευπαθή σε ενζυμική διάσπαση, όπως οι πολυεστέρες, οι πολυαιθέρες και οι πολυουρεθάνες. Άλλα συνθετικά πολυμερή όπως το PE, διασπώνται ενζυμικά μόνο αν το μοριακό βάρος του μορίου τους είναι μικρότερο από 620 g/mol, αν και ενζυμική δραστηριότητα μπορεί να επιτευχθεί σε υψηλότερου μοριακού βάρους πολυμερή, εφόσον έχουν νωρίτερα οξειδωθεί [20, 21, 45].

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χημικής ανακύκλωσης είναι η προοπτική της απομάκρυνσης πρόσθετων υλικών, ρύπων και άλλων τοξικών ουσιών από το πλαστικό, αποτρέποντας έτσι την προώθησή τους για υγειονομική ταφή ή αποτέφρωση. Ωστόσο, παρόλη την πρόοδο που έχει επιτευχθεί στην τεχνολογία της χημικής ανακύκλωσης, όλες οι μέθοδοι παραμένουν σε πιλοτικό επίπεδο εφαρμογής (Πίνακας 5.1) [20, 21, 45].

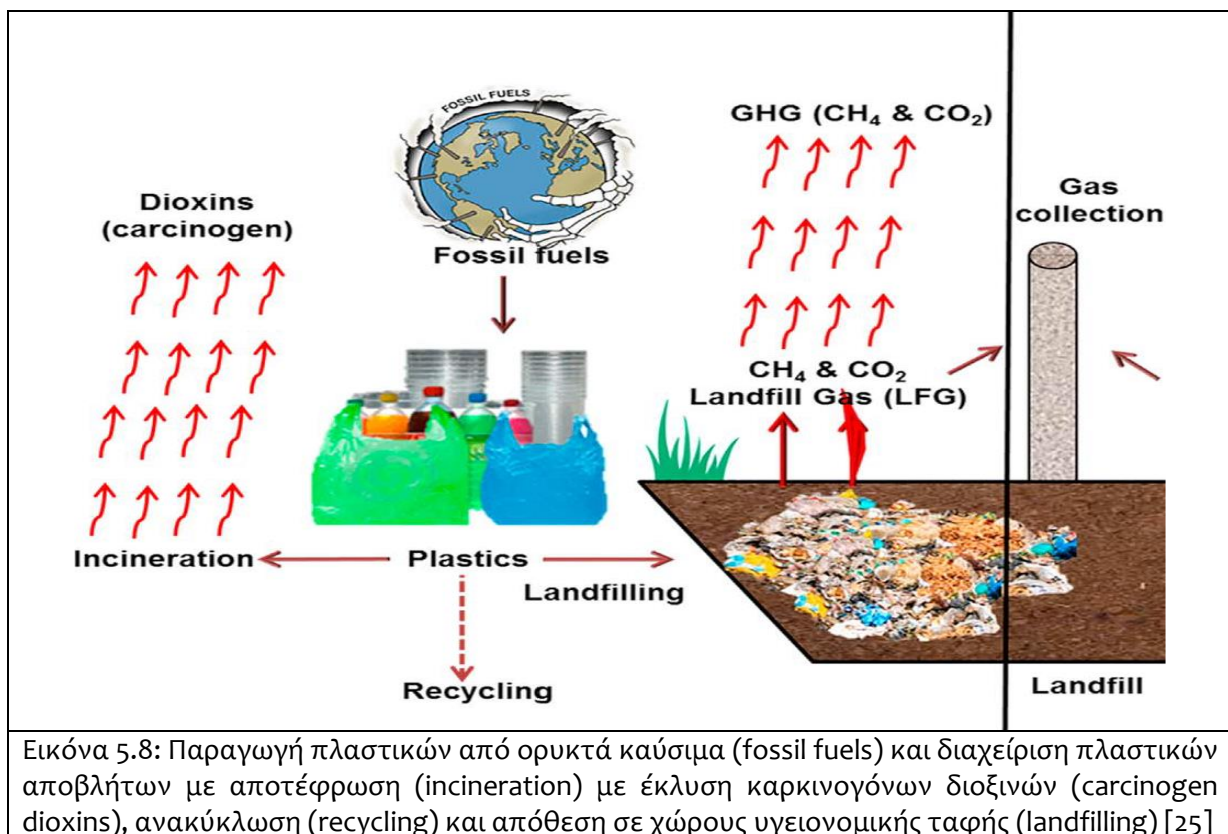
Πίνακας 5.1: Σύγκριση μηχανικών και κύριων χημικών μεθόδων επεξεργασίας πλαστικών απορριμμάτων [20]					
Μέθοδος	Τύποι πολυμερών που υφίστανται επεξεργασία	Προϊόν	Ικανό να εξυγιανθεί;	Ικανότητα επεξεργασία μείγματος πλαστικών;	Τεχνολογική ωριμότητα
Μηχανική ανακύκλωση	PE, PET, PP, PS	Πολυμερές	Όχι	Ναι	Εργοστασιακό επίπεδο
Καθαρισμός με διαλύτες	PVC, PS, PE, PP	Πολυμερές	Ναι	Όχι	Πιλοτικό επίπεδο
Χημικός αποπολυμερισμός	PET, PU, PA, PLA, PC, PHA, PEF	Μονομερή	Ναι	Όχι	Πιλοτικά εργοστάσια για PET, PU, PA
Θερμικός αποπολυμερισμός (πυρόλυση)	PMMA, PS	Μονομερή	Ναι	Όχι	Πιλοτικό επίπεδο
Θερμική διάσπαση (πυρόλυση και αεριοποίηση)	Μείγμα πλαστικών	Μείγμα υδρογονανθράκων	Ναι	Ναι	Πιλοτικό επίπεδο

5.4 Υγειονομική ταφή

Αποτελεί την πλέον παραδοσιακή μέθοδο διαχείρισης αποβλήτων, στην οποία αντιστοιχούν 4.900 Mt πλαστικών, που αναλογούν στο 60% των συνολικών πλαστικών που έχουν παραχθεί. Ωστόσο, χάρη στους περιορισμένους ελεύθερους χώρους που θα μπορούσαν να προοριστούν για χρήση ως χώροι υγειονομικής ταφής στις αναπτυγμένες χώρες, καθώς και λόγω της γενικής έλλειψης διαθέσιμης γης σε χώρες με υψηλή πυκνότητα πληθυσμού, ενθαρρύνεται η ανάπτυξη εναλλακτικών συστημάτων διαχείρισης. Τα περισσότερα πλαστικά συσκευασίας καθώς και τα μη-ανακυκλώσιμα πλαστικά σήμερα αποβάλλονται σε χώρους υγειονομικής ταφής και χωματερές. Σε παγκόσμιο επίπεδο, το πλαστικό αναλογεί στο 18% - 20% του συνολικού όγκου σκουπιδιών των χωματερών. Αναλογιζόμενοι την αειφορική διάσταση αυτής της διαχείρισης, θα βρούμε κάποια σημαντικά μειονεκτήματα (εικόνα 5.8), όπως για παράδειγμα το γεγονός πως οι διαρροές που είναι τοξικές και επιδρούν πολύ αρνητικά στην μικροχλωρίδα του εδάφους, οδηγούν στη δημιουργία άγονου εδάφους ή / και σε ρύπανση του υπόγειου νερού και των υδατικών υδροφορέων και αποθεμάτων καθώς και στην εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (CH₄, CO₂). Ακόμη και σε εγκαταστάσεις στοχευμένης διάσπασης / αποδόμησης, απαιτείται προηγουμένως διαχωρισμός των διασπώμενων από τα μη-διασπώμενα πλαστικά και ταυτόχρονα μέριμνα για τη διαχείριση των διασπώμενων

πλαστικών, διότι διαφορετικά παραμένουν για χρόνια διαθέσιμα στο έδαφος. Αυτό απεικονίζει το μέτριο ρυθμό αποικοδόμησης πλαστικών - τμήματα διασπώμενου πλαστικού έχουν βρεθεί σε εδάφη υγειονομικής ταφής ακόμη και 20 χρόνια μετά – γεγονός που καθιστά τη χρήση γης για δραστηριότητες περισσότερο ωφέλιμες, όπως η γεωργία, ανέφικτη. Ο μειωμένος ρυθμός αποικοδόμησης των πλαστικών επιδεινώνεται και από τον περιορισμένο αερισμό των χωματερών, στις οποίες γενικά οι συνθήκες που επικρατούν είναι αναερόβιες [25, 21].

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω και άλλες μέθοδοι, όπως η εξαέρωση / πυρόλυση και η βιολογική επεξεργασία χρησιμοποιούνται επίσης, σε συνδυασμό με τις κοινές μεθόδους υγειονομικής ταφής των πλαστικών (βλ. Πίνακα 5.2). Σε αντίθεση με την αποτέφρωση, η εξαέρωση / πυρόλυση δεν οδηγεί στο σχηματισμό διοξινών ή άλλων ρυπαντών. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές είναι ακριβές και τα συνθετικά υγρά / πετροχημικά που παράγονται σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις απαιτούν καθαρισμό [25].



Η μηχανική βιολογική επεξεργασία, όπως αποκαλύπτει και το όνομά της, είναι ένας συνδυασμός μηχανικών και βιολογικών μεθόδων, όπου τα ανακυκλώσιμα απόβλητα συγκεντρώνονται και υφίστανται βιολογική επεξεργασία πριν ταφούν. Η βιολογική επεξεργασία συνήθως περιλαμβάνει κομποστοποίηση / αναερόβια διάσπαση των αποβλήτων που έμειναν από τη μηχανική κατεργασία. Αν και αυτή η τεχνική είναι πολύ αποτελεσματική για μη διαχωρισμένα απόβλητα (που περιέχουν γυαλί, μέταλλα, διασπώμενα και μη-διασπώμενα πλαστικά, βιο-αποικοδομήσιμα απορρίμματα, χαρτόνια

και καουτσούκ) δεν είναι η καλύτερη μέθοδος επεξεργασίας για απόβλητα που περιέχουν μόνο πλαστικό [25].

Πίνακας 5.2: Δεδομένα σε μεγατόνους (Mt) σχετικά με τη διαχείριση των πλαστικών που χρησιμοποιούνται για ενεργειακή ανάκτηση και έχουν σταλεί σε ΧΥΤΑ ή ανακυκλώθηκαν. Τα δεδομένα αφορούν τις 28 Ευρωπαϊκές χώρες της ΕΕ, τη Νορβηγία και την Ελβετία κατά τη δεκαετία 2006-2018 [20]

Έτος (συνολικά)	Ενέργεια (Mt) (% του συνόλου)	ΧΥΤΑ (Mt) (% του συνόλου)	Ανακύκλωση (Mt) (% του συνόλου)
2006 (24,6 Mt)	7,0 (28%)	12,9 (53%)	4,7 (19%)
2018 (29,1 Mt)	12,4 (43%)	7,2 (25%)	9,4 (32%)

5.5 Αποτέφρωση

Ως εναλλακτική στρατηγική διαχείρισης απορριμμάτων, η αποτέφρωση μειώνει την ανάγκη υγειονομικής ταφής. Επιπλέον, μέσω αυτής μπορεί να επιτευχθεί ανάκτηση ενέργειας πριν την τελική καύση για την παραγωγή είτε θερμικής είτε ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ανάκτηση ενέργειας είναι ένα προφανές πλεονέκτημα συγκριτικά με την υγειονομική ταφή, όπου η εσωτερική ενέργεια του πλαστικού απλώς χάνεται στο περιβάλλον. Σε όρους ιεράρχησης τρόπων διαχείρισης των απορριμμάτων, η αποτέφρωση των πλαστικών για ανάκτηση ενέργειας θεωρείται υψηλότερης προτεραιότητας από την υγειονομική ταφή [21].

Ιδανικά, θα θεωρούνταν συμπληρωματική στρατηγική της ανακύκλωσης για όσα απορρίμματα δεν μπορούν να ανακυκλωθούν για τεχνικούς, περιβαλλοντικούς ή οικονομικούς λόγους.

Ωστόσο, η εφαρμογή της αποτέφρωσης των απορριμμάτων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί μία σταθερή ροή υλικού ώστε να λειτουργήσει το οικονομικό μοντέλο. Όπως πολλοί ερευνητές έχουν επισημάνει, η αποτέφρωση υποκινεί την αποφυγή της ανακύκλωσης, συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί ως ενάντια στην κυκλική οικονομία [20, 12].

Η αποτέφρωση απορριμμάτων μπορεί να αποδώσει μεγάλο ποσό θερμικής ενέργειας, με χαμηλότερες θερμικές αξίες (LHVs - Lower Heating Values) 42,8 MJ/kg PE και 46,5 MJ/kg για το PP. Αυτές οι τιμές είναι απόλυτα συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες τιμές των κοινών καυσίμων, με την LHV του πετρελαίου να είναι 42,3 MJ/kg και της κηροζίνης 46,5 MJ/kg. Ωστόσο, τα ανάμεικτα οικιακά πλαστικά απορρίμματα αποδίδουν κατά μέσο όρο 40% λιγότερη ενέργεια, δηλαδή έχουν LHVs που κυμαίνονται από 27 MJ/kg έως 32 MJ/kg, οι οποίες αυξάνονται σε 40,2 MJ/kg μετά το διαχωρισμό των υπόλοιπων μη-πλαστικών απορριμμάτων. Συγκριτικά, η LHV των δημοτικών στερεών αποβλήτων κυμαίνεται από 9,5 MJ/kg έως 10,5 MJ/kg. Οποσδήποτε, η καλύτερη ποιότητα και κατ'επέκταση απόδοση της καύσης των οικιακών πλαστικών προκύπτει από την καθαρότερη, χωρίς προσμείξεις, ροή [20].

Πίνακας 5.3: Ρύποι που εκλύονται κατά την καύση πλαστικών απορριμμάτων [46]				
Πρώτη ύλη	Θερμοκρασία (°C)	Χρόνος (λεπτά)	Ρύποι	Βασικά Αποτελέσματα
Πλαστικός σωλήνας / μεμβράνη	600-1000	5-25	Μέταλλα: Pb, Cd, Cu	Η πτητικότητα των μετάλλων αυξάνει με τη θερμοκρασία. Υψηλότερη υγρασία και χαμηλότερη αναλογία οξυγόνου καταστέλλουν την έκλυση μετάλλων
PE, PET, PP, NYLON, ABS, PVC	900	NG	Διοξίνες, PAHs, PCPs, PCBs	Σχηματισμός HCN
PS	951-1076	NG	Διοξίνες: PCDFs, PCDDs, PCBs	Οι PCDFs είναι οι κύριες διοξίνες που σχηματίζονται
HDPE, LDPE, PVC, PET, PS, PP	300	20	Αιωρούμενα σωματίδια, φθαλικές ενώσεις	
Δημοτικά απορρίμματα με 10% PVC	NA	NA	HCl	Το 97% του Cl εντοπίστηκε στην αιωρούμενη στάχτη. 600 ppm κατ' όγκο HCl παράχθηκε κατά την καύση
PE, PS, ABS, PP, PVC	850-1000	3-5	PBDEs, HBCDs	Τα βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας προτάθηκαν ως δείκτης των εκλύσεων από την καύση πλαστικών. Ανιχνεύθηκαν κυρίως στα αερομεταφερόμενα σωματίδια
Συνολική πρώτη ύλη για εργοστασιακούς καυστήρες	NA	NA	SO ₂	Ο τομέας παραγωγής πλαστικών ήταν υπεύθυνος για το 51,22% των συνολικών εκλύσεων SO ₂
Απορρίμματα κατά μήκος του δρόμου με άγνωστο	NA	NA	Αλκάνια, αρωματικά οξέα, PAHs	Η καύση των παραπλεύρως του δρόμου απορριμμάτων σε κλειστό χώρο

περιεχόμενο σε πλαστικό				ελευθερώνει λιγότερους ρύπους από την αποτέφρωση σε ανοιχτό χώρο
-------------------------	--	--	--	------------------------------------------------------------------

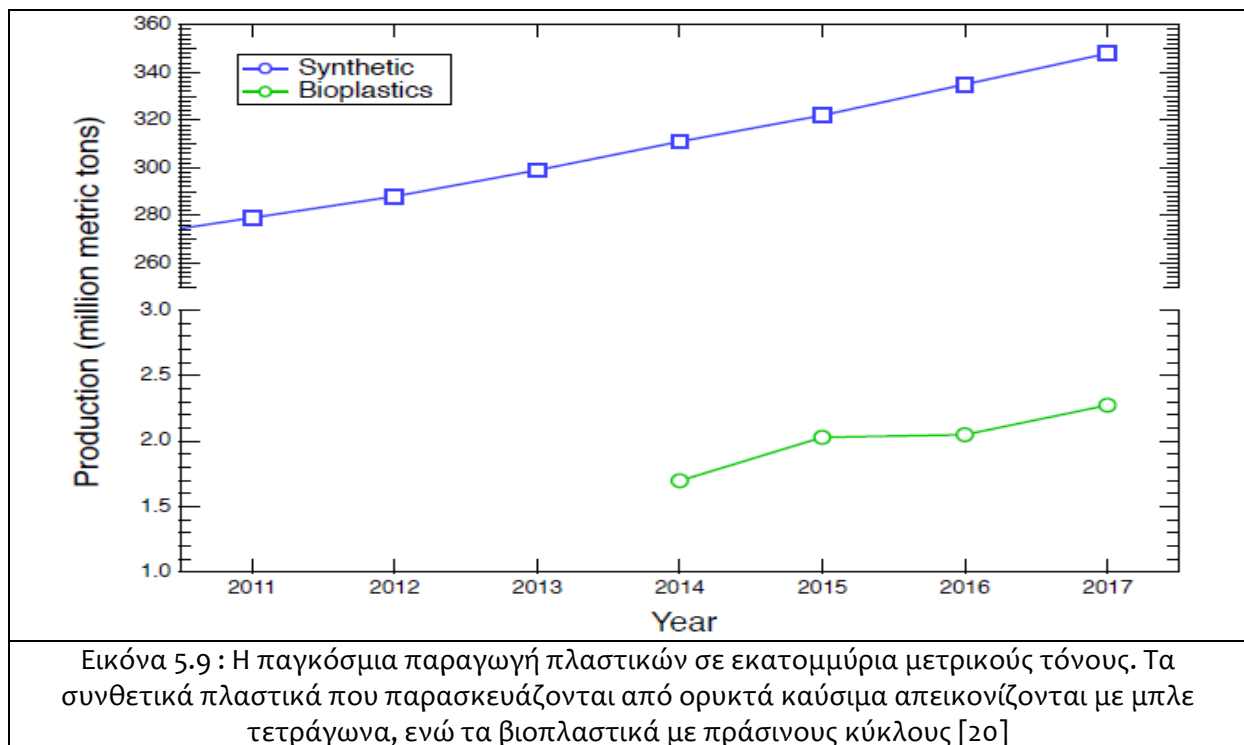
Ωστόσο, ένα παραπροϊόν της διαδικασίας της αποτέφρωσης είναι η παραγωγή και η εκπομπή ενός αριθμού θερμοκηπιακών αερίων (Green House Gases, GHGs). Τα κύρια εκπεμπόμενα θερμοκηπιακά αέρια είναι το CO₂, το CO, το υποξείδιο του αζώτου (N₂O), τα οξείδια του αζώτου (NO)_x και το CH₄. Για να μπορέσει να προκύψει όμως ένα τελικό συμπέρασμα, είναι σημαντικό να εξετάζεται ολόκληρη η διαδικασία ως ένα σύστημα (Πίνακας 5.3). Έτσι, οι μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής (LCAs - Life Cycle Analyses) των υλικών, ιδανικά, θα έπρεπε να συνδυάζονται με Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ, Environmental Risk assessments - ERAs), έτσι ώστε να γίνουν κατανοητές οι αντικρουόμενες διαδικασίες. Αναλογιζόμενοι λοιπόν τους ποικίλους παράγοντες, που περιλαμβάνουν τη συλλογή και μεταφορά των απορριμμάτων, την κατασκευή αποτεφρωτήρων, την ενσωμάτωση πόρων στους αποτεφρωτήρες, την περιβαλλοντική επίπτωση της δράσης τους και φυσικά την ανάκτηση ενέργειας, μπορούμε να αποφασίσουμε ως προς το ποια διαχειριστική μέθοδος έχει τη μικρότερη επίπτωση στο περιβάλλον. Μία λεπτομερής μελέτη για το PET έδειξε ότι για κάθε τόνο PET που καιγόταν παραγόταν 2,3 τόνοι CO₂ κατά την αποτέφρωση, αλλά αυτό το ποσό μειωνόταν (αλλά δεν εξαλειφόταν) καθώς συμψηφιζόταν από τις διαδικασίες παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Αν συνυπολογίζονταν όλοι οι παραπάνω παράγοντες, της κατασκευής, μεταφοράς, επεξεργασίας και λειτουργίας των αποτεφρωτών, θα προέκυπτε τελικά ένα καθαρό έλλειμμα στις εκπομπές CO, NO και σωματιδίων που σχετίζονται με την αποτέφρωση. Ταυτόχρονα όμως διαπιστώνεται μία καθαρή αύξηση σε διοξίνες και βαρέα μέταλλα (όπως μόλυβδος (Pb), κάδμιο (Cd), και υδράργυρος (Hg)), με τα τελευταία να προκύπτουν κυρίως από τη μεταφορά και την επεξεργασία των πλαστικών [20,25].

Η αποτέφρωση δεν θεωρείται γενικά η καλύτερη και περιβαλλοντικά ορθή επιλογή για τη διαχείριση πλαστικών απορριμμάτων. Μία συγκριτική μελέτη αποτέφρωσης και ανακύκλωσης για το πλαστικό έδειξε ότι η ανακύκλωση πλεονεκτεί σε ότι αφορά τις εκλύσεις αερίων του θερμοκηπίου και την ενεργειακή ισορροπία. Παρόλα αυτά, το αντίστροφο φάνηκε να ισχύει αν το ποσοστό του υλικού που προέκυπτε από την ανακύκλωση δεν ενσωματώνονταν σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με το πρωτογενές πλαστικό ή αν κατά την επεξεργασία του πλαστικού απαιτούνταν εκτενής καθαρισμός. Το συμπέρασμα που αυτές οι μελέτες αναδεικνύουν, είναι πως η απόφαση για την επιλογή της μεθόδου δεν είναι ποτέ μοναδική και απαιτείται λεπτομερής ανάλυση και ΜΠΕ κάθε φορά, έτσι ώστε να μειωθούν οι επιβλαβείς συνέπειες [20,21,25,44].

5.6 Βιοαποικοδόμηση - κομποστοποίηση – βιοπλαστικά

Τα βιολογικής προέλευσης πολυμερή (βιοπολυμερή), τα οποία είναι ευκολότερα βιοαποικοδομήσιμα, έχουν προταθεί ως μια εναλλακτική προς τα συμβατικά πλαστικά, τα οποία κατασκευάζονται από ορυκτά καύσιμα. Η παραγωγή των βιοπολυμερών έχει

αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια (εικόνα 5.9) καθώς μπορούν πλέον να κατασκευάζονται σε βιομηχανικό επίπεδο. Είναι πιο ακριβά από τα συμβατικά πολυμερή και αυτή τη στιγμή αναλογούν σε λιγότερο από το 1% της συνολικής παραγωγής πλαστικών. Τα βιοπολυμερή διαφέρουν από τα συμβατικά πολυμερή στην προέλευση της πρώτης ύλης. Τα βιοπολυμερή μπορεί να είναι κατασκευασμένα είτε απόλυτα από βιομάζα είτε από ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο) ως πρώτη ύλη. Η βιομάζα είναι μια ανανεώσιμη πηγή που περιλαμβάνει κυρίως λιγνίνη, πρωτεΐνες, λίπη και σάκχαρα. Τα σάκχαρα όπως το άμυλο και η κυτταρίνη προέρχονται κυρίως από ζαχαροκάλαμο και τεύτλα, το άμυλο από καλαμπόκι, σιτάρι ή πατάτες και το ρετσίνολαδο από τη ρετσίνολαδιά (σπόρος ρίκινου). Μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν παρόμοια ή την ίδια λειτουργικότητα με τα συμβατικά πλαστικά (όσα έχουν ως πρώτη ύλη το πετρέλαιο) και η βιωσιμότητά τους εξαρτάται από τις πρακτικές κατασκευής, τη διάρκεια ζωής του προϊόντος και τη διαχείριση μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους [20].



Εξαιτίας της υπερφόρτωσης των χώρων υγειονομικής ταφής, των μικρών ποσοστών που επιτυγχάνονται τελικά στην ανακύκλωση των πλαστικών και της αυξανόμενης πλαστικής ρύπανσης σε χερσαίο και υδάτινο περιβάλλον, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες και την ανάγκη αντιμετώπισης της μειούμενης ποσότητας ορυκτών καυσίμων δόθηκαν τα κίνητρα ώστε το ενδιαφέρον να στραφεί σε εκείνους τους τύπους πλαστικού που είναι βιοαποικοδομήσιμα (biodegradable), ικανά για κομποστοποίηση (compostable) και κατασκευασμένα από βιολογικούς φυσικούς πόρους, δηλαδή από βιομάζα ή βιολογικούς πόρους, τα ονομαζόμενα βιοπλαστικά (bio-based, bioplastics). Ως «βιοπλαστικό / βιοπολυμερές» ορίζεται αυτό το πολυμερές που κατασκευάστηκε από βιολογικούς πόρους ή / και βιοαποικοδομείται. Τα βιοπολυμερή που έχουν σχεδιαστεί για να αποικοδομούνται σε

εργοστασιακό κομποστοποιητή περιγράφονται ως «βιοαποικοδομήσιμα», ενώ όσα σχεδιάζονται για αποικοδόμηση σε οικιακούς κομποστοποιητές περιγράφονται ως «κομποστοποιήσιμα».

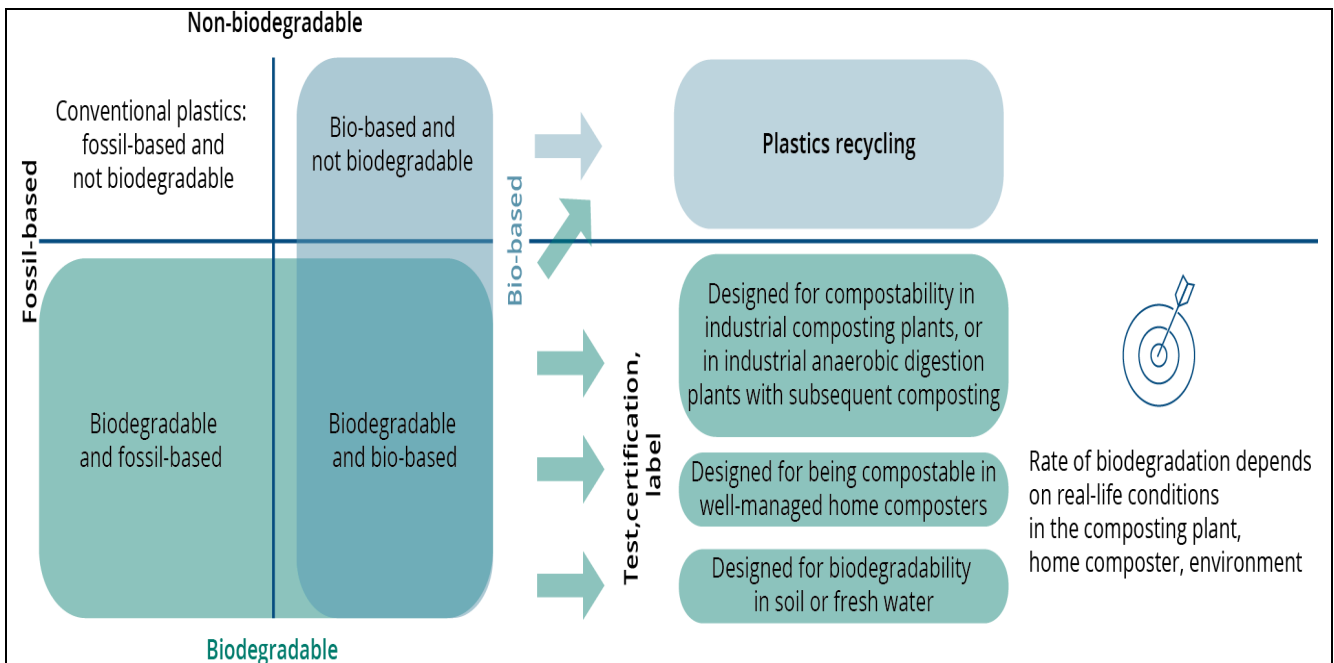
Τα βιοπολυμερή κατατάσσονται σε 3 διακριτές κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής τους [25]:

α. αυτά που παρασκευάζονται με χρήση φυσικών πολυμερών, όπως τα πλαστικά που βασίζονται στην κυτταρίνη ή το άμυλο,

β. αυτά που παρασκευάζονται με πολυμερισμό βιολογικών ολιγομερών και μονομερών μέσω ζύμωσης ή συμβατικών χημικών διαδικασιών, όπως το πολυλακτικό οξύ (PLA - Polylactic Acid) και

γ. αυτά που παρασκευάζονται με χρήση μικροβιακών πολυμερών, όπως τα πολύ-υδροξυ-αλκανοειδή (PHA - Polyhydroxyalkanoate).

Ο όρος «βιοπλαστικά» χρησιμοποιείται συχνά λανθασμένα για να περιγράψει τα πλαστικά που έχουν προέλθει από βιομάζα και ταυτόχρονα είναι και βιοαποικοδομήσιμα, δηλώνοντας έτσι μια εσφαλμένη εντύπωση ως προς τις ιδιότητες ή την προέλευση τους. Όπως φαίνεται και από την εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 5.10), δεν είναι όλα τα «βιοπλαστικά» βιοαποικοδομήσιμα, και μάλιστα όσα έχουν προέλθει από συμβατικές πηγές (ορυκτά καύσιμα), δεν μπορούν να βιοαποικοδομηθούν αλλά μόνο να ανακυκλωθούν. Ταυτόχρονα, η βιοαποικοδόμηση δεν περιορίζεται μόνο σε βιοπλαστικά / βιοπολυμερή, καθώς ορισμένα πολυμερή που έχουν προέλθει από συμβατικές πρώτες ύλες, ορυκτά καύσιμα, επίσης εμφανίζουν αυτή την περιβαλλοντικά θελκτική ιδιότητα, όπως η Πολυκαπρολακτόνη (PCL - Polycaprolactone) [21].



Εικόνα 5.10 : Κατάταξη των συμβατικών πλαστικών, βιοαποικοδομήσιμων και μη πλαστικών και βιοπλαστικών ανάλογα με τον τρόπο αποικοδόμησής τους – συμβατικά πλαστικά (conventional plastics), προέρχονται από ορυκτά καύσιμα (fossil-based), βιο-αποικοδομήσιμα (biodegradable), δυνατότητα κομποστοποίησης (compostability), οικιακοί κομποστοποιητές (home composters) [7].

Τα βιοαποικοδομήσιμα και τα ικανά προς κομποστοποίηση πλαστικά αποικοδομούνται με τη βοήθεια μικροοργανισμών υπο αερόβιες συνθήκες προς νερό, διοξείδιο του άνθρακα, άλατα και νέα βιομάζα σε δεδομένη χρονική περίοδο, ενώ υπό αναερόβιες συνθήκες αποσυντίθεται ελευθερώνοντας μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Κατά πόσο ένα τέτοιο υλικό τελικά θα αποικοδομηθεί και πόσο γρήγορα αυτό θα συμβεί εξαρτάται από τις συνθήκες, στις οποίες θα εκτεθεί κατά την απόρριψή του. Αυτές περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, τη χρονική διάρκεια, την υγρασία, την παρουσία μικροβίων, θρεπτικών ουσιών και οξυγόνου [25]. Διαφορετικοί τύποι βιοαποικοδομήσιμων και κομποστοποιήσιμων υλικών είναι σχεδιασμένοι προς αποικοδόμηση σε συγκεκριμένες συνθήκες. Αν αυτές αλλάξουν, τότε μπορεί να μην αποικοδομηθούν καθόλου ή να αποικοδομηθούν πολύ αργά ή να κατακεραματιστούν σε μικροπλαστικά. Έρευνες έχουν δείξει πειραματικά πως η αποικοδόμηση των βιοαποικοδομήσιμων πολυμερών σε αντίθεση με τα κομποστοποιήσιμα μπορεί να είναι πολύ αργή στους οικιακούς κομποστοποιητές (τυπικά η απώλεια της βιομάζας σε διάστημα 90 ημερών είναι μικρότερη από 5%). Εδώ μια σημαντική διάκριση παρατηρείται μεταξύ αποικοδόμησης - σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και υψηλές θερμοκρασίες (τυπικά στους 50° C) - ή με αναερόβια ζύμωση με συγκεκριμένη αλληλουχία βημάτων - και οικιακής αποικοδόμησης (κομποστοποίησης) σε χαμηλότερη θερμοκρασία, ώσπου να παραχθεί ως προϊόν το εδαφοβελτιωτικό κομπόστ. Τα περισσότερα πλαστικά ικανά προς κομποστοποίηση, ωστόσο, έχουν προδιαγραφές εργοστασιακής επεξεργασίας [22].

Οι μιας χρήσης πλαστικές συσκευασίες που έχουν κατασκευαστεί από πετρέλαιο, συνήθως το PET, είναι ο τύπος του πλαστικού, μέσα στο οποίο πωλούνται τα περισσότερα ποτά και φαγητά. Είναι για πολλούς λόγους η ιδανική συσκευασία - ανθεκτική, ελαφριά, πολλαπλών χρήσεων, καθαρή και φτηνή (εικόνα 5.11). Προστατεύει τα προϊόντα εξαιρετικά καλά, τα διατηρεί φρέσκα και μπορεί να αντέξει ακόμη και την οξύτητα ή την πίεση των αναψυκτικών χωρίς να διασπαστεί ή να γίνει διαπερατή για μήνες ή και χρόνια. Το βιοπλαστικό πρέπει να αντιγράψει αυτές τις ιδιότητες και το κάνει για ορισμένα υλικά. Τα δυο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα βιοπλαστικά υλικά είναι το PHA (πολύ-υδροξυ-αλκανοειδές) που παράγεται από σάκχαρα φυκών, και το PLA (πολύ-λακτικό οξύ) που προέρχεται από σάκχαρα καρπών όπως το καλαμπόκι και το ζαχαροκάλαμο. Το PLA κοστίζει όσο το ένα δέκατο του PHA, καθώς η ανάπτυξη των φυκών σε μεγάλη κλίμακα είναι ακριβή διαδικασία και μπορεί να χρειαστούν χρόνια ώστε να γίνει οικονομικά συμφέρουσα. Σήμερα, το σταθερότερο PLA χρησιμοποιείται κυρίως στα μιας χρήσης μαχαιροπήρουνα, στα καπάκια των κυπέλλων του καφέ, σε καλαμάκια και σε πολλές συσκευασίες. Το PHA, που αντιστοιχεί στο 5% της παγκόσμιας παραγωγής βιοαποικοδομήσιμων πλαστικών, χρησιμοποιείται ως εσωτερική επίστρωση των κυπέλλων του καφέ και σε ιατρικό εξοπλισμό. Ωστόσο, κανένα από τα παραπάνω βιοπλαστικά δε χρησιμοποιείται ευρέως διότι δεν συγκρίνονται σε ανθεκτικότητα με τα παραδοσιακά πλαστικά, ενώ κοστίζουν και σημαντικά περισσότερο [9].

Παρόλο που τα δύο βιοπλαστικά που χρησιμοποιούνται προς το παρόν μπορούν να αποικοδομηθούν από μικροοργανισμούς και να επανέλθουν στη φύση σε σύντομο χρονικό διάστημα, αυτό συμβαίνει μόνο όταν συλλέγονται και κομποστοποιούνται σε απόλυτα ελεγχόμενες, υψηλής θερμοκρασίας βιομηχανικές εγκαταστάσεις κομποστοποίησης. Αν τα βιοπλαστικά καταλήξουν σε χωματερές, όπως συχνά συμβαίνει, χωρίς αρκετό οξυγόνο για να βιοδιασπαστούν σε σύντομο χρονικό διάστημα αερόβια,

μπορεί να μείνουν ακέραια για αιώνες και μετά από αναερόβια μικροβιακή ζύμωση να ελευθερώσουν μεθάνιο, που είναι αέριο του θερμοκηπίου. Αν αφεθούν στο περιβάλλον, είτε στον αέρα, είτε στο νερό είτε θαμμένα στο χώμα, αποτελούν απειλή ανάλογη με τα PET πλαστικά, όπως έχει αποδειχθεί. Τέλος, καθώς από την αποδόμησή τους δεν προκύπτει πλαστικό υλικό, αν απορριφθούν στους κάδους ανακύκλωσης, λειτουργούν περισσότερο ως περιττή πρόσμιξη στο πλαστικό που πρόκειται να παραχθεί, υποβιβάζοντας έτσι την ποιότητα του ανακυκλώσιμου υλικού που θα προέκυπτε [9, 7].

Ένα ακόμη σημαντικό μειονέκτημα των βιοπλαστικών σχετίζεται με την προέλευσή τους. Καθώς προέρχονται από φυτά, συνοδεύονται και από όλα τα προβλήματα της μεγάλης-κλίμακας καλλιέργειας. Τα σάκχαρα από τα οποία κατασκευάζονται τα βιοπλαστικά, έχουν προέλθει από διαγονιδιακές καλλιέργειες που ψεκάστηκαν με εντομοκτόνα και ζιζανιοκτόνα. Αυτές οι καλλιέργειες όμως αφαιρούν γη από αυτή που προορίζεται να θρέψει έναν διαρκώς αυξανόμενο πληθυσμό. Αυτό αντικατοπτρίζει και το πρόβλημα που ανέκυψε με τα βιοκαύσιμα, επίσης, τα οποία στην αρχή είχαν αντιμετωπιστεί ως η τέλεια περιβαλλοντική λύση. Οι ειδικοί πλέον επισημαίνουν πως τόσο τα βιοκαύσιμα όσο και τα βιοπλαστικά θα αυξήσουν τη γη που χρησιμοποιείται για γεωργικές καλλιέργειες [8]. Φυσικά, όλες οι πηγές προέλευσής τους είναι φυσικές, συνεπώς ανανεώσιμες και αν γίνει σωστά η διαχείρισή τους, θα είναι και αειφορικές. Αναλύσεις για την ποσότητα των φυσικών πρώτων υλών που απαιτείται ώστε να συντεθούν πολλά από τα βιοπολυμερή, έχουν γίνει και τα μεγέθη ποικίλουν. Ενδεικτικά, η παραγωγή 1 λίτρου (L) βιο-PET απαιτεί 0,74 τόνους (t) σακχάρου ή 0,85 t αμύλου. Αυτό συνεπάγεται τη χρήση 4,63 τόνων τεύτλων ή 5,69 τόνων ζαχαροκάλαμου ή 1,21 τόνων καλαμποκιού ή 1,85 τόνων σιταριού ή 4,72 τόνων πατάτας. Αν και τα αποθέματα σακχάρων και αμύλου είναι ανανεώσιμα, δεν παύουν να είναι μέρος της τροφικής αλυσίδας και η χρήση τους στην παραγωγή βιοπλαστικών εγείρει ερωτήματα σχετικά με την βιωσιμότητά τους. Άλλα βιοπλαστικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιλαμβάνουν διαφορετικές φυσικές πηγές, όπως η κυτταρίνη και η χιτίνη. Η κυτταρίνη είναι το πιο άφθονο φυσικό βιοπολυμερές, με τεράστιες ποσότητες σε φυσικά προϊόντα. Εμπορικά, η κυτταρίνη εξάγεται από ξύλο, αγροτικά υπολείμματα, αγρωστώδη υλικά και άλλες φυτικές ουσίες. Η χιτίνη είναι το δεύτερο πιο άφθονο φυσικό βιοπολυμερές, αλλά το παράγωγό της, η χιτοσάνη, αποτελεί κυρίως προϊόν εκμετάλλευσης, καθώς είναι περισσότερο διαλυτό. Προς το παρόν είναι λίγα τα προϊόντα που παρασκευάζονται από αυτές τις πηγές, αλλά η έρευνα μένει να διερευνήσει όλες τις δυνατές χρήσεις τους, ώστε να μπορούμε να συζητάμε για εμπορικά βιοπλαστικά προερχόμενα από αυτά [20].

Παρά τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα, ένα απρόσμενο πλεονέκτημα αναδύθηκε από τη χρήση των πλαστικών που μπορούν να κομποστοποιηθούν. Η περιοχή μεγαλύτερης εφαρμογής των πλαστικών αυτών είναι η σίτιση. Από καπάκια κυπέλλων του καφέ, ως το περιτύλιγμα των σάντουιτς και τη συσκευασία των φαγητών σε πακέτο ή τη συσκευασία ευπαθών τροφών, συσκευάζοντας την τροφή σε πλαστικά που μπορούν να κομποστοποιηθούν σημαίνει- ιδανικά, τουλάχιστον- ότι το πλαστικό μαζί με όποιο περίσσειμα τροφής μείνει πάνω σε αυτό, μπορούν να κομποστοποιηθούν μαζί. Θεωρείται μια τριπλή επιτυχία γιατί μειώνεται η ποσότητα του πλαστικού που οδηγείται σε χωματερές και ΧΥΤΑ / ΧΥΤΥ, αποτρέπεται η μόλυνση των ανακυκλώσιμων υλικών με τροφή και εξασφαλίζεται ότι το περίσσειμα τροφής επιστρέφει τελικά στο χώμα, και δεν

αφήνεται να σαπίσει στη χωματερή, ελευθερώνοντας θερμοκηπιακά αέρια, όπως το μεθάνιο [7].



Εικόνα 5.11: Παραγωγή βιοπλαστικών (α) μαχαιροπήρουνων [9] και (β) ειδών συσκευασίας και καθημερινής χρήσης [47]

Άλλες δύο εφαρμογές των βιοαποικοδομήσιμων πλαστικών προέκυψαν πρόσφατα στη γεωργία. Παραδοσιακά, οι αγρότες χρησιμοποιούν φύλλα πολυαιθυλενίου για εδαφοκάλυψη των καλλιεργειών και για να συγκρατήσουν νερό, με περίπου το μισό από αυτό το πλαστικό να καταλήγει σε ανεξέλεγκτες χωματερές και να ρυπαίνει το φυσικό περιβάλλον. Το 2018 όμως, εκδόθηκε μία ευρωπαϊκή οδηγία που θέτει τα πρότυπα για αυτά τα βιοαποικοδομήσιμα φύλλα. Οι αγρότες μπορούν να αγοράζουν πλαστικά φύλλα εδαφοκάλυψης, τα οποία στη συνέχεια θα αφήνουν στο χωράφι, γνωρίζοντας ότι θα διασπαστούν και δε θα βλάψουν το χώμα. Η βιομηχανία επίσης έχει ξεκινήσει να χρησιμοποιεί βιο-λιπαντικά, αντί για τα αντίστοιχα πετροχημικής βάσης λιπαντικά. Είναι παρασκευασμένα από φυτικής προέλευσης υλικά και ακόμη και αν διαρρεύσουν, δε θα βλάψουν το περιβάλλον. Ωστόσο, αν και τα φύλλα βιοπλαστικού ή τα βιο-λιπαντικά μπορούν να διασπαστούν στο περιβάλλον, γνωρίζουμε πως τα βιοπλαστικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη συσκευασία δε θα αποικοδομηθούν [7, 9].

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πολλές Ευρωπαϊκές Οδηγίες έχουν εκδοθεί, που θέτουν τα πρότυπα για τα πλαστικά υλικά που μπορούν να βιοαποικοδομηθούν. Προϋπόθεση αποτελεί το υλικό να διασπαστεί μέσα σε βιομηχανικής κλίμακας συνθήκες κομποστοποίησης μέσα σε 5 εβδομάδες, αφήνοντας όχι παραπάνω από το 10% του αρχικού προϊόντος σε κομμάτια όχι μεγαλύτερα των 2 mm, και χωρίς καμία παρενέργεια στο χώμα, μέσω διαφυγής βαρέων μετάλλων ή αλλοίωσης της δομής του [7].

Δυστυχώς, ώσπου να είναι ικανά τα εθνικά συστήματα συλλογής απορριμμάτων να διαχειριστούν τα πλαστικά-οργανικά υλικά προς κομποστοποίηση, να είναι διαθέσιμο και κοινώς γνωστό ένα εύγλωττο σύστημα προσδιορισμού του τρόπου απόρριψης κάθε προϊόντος με τις ενδείξεις «κομποστοποιήσιμο» ή «βιοαποικοδομήσιμο» και να εμπεδωθούν συμπεριφορές αποφυγής της ανάμειξης των βιοαποικοδομήσιμων (εικόνα 5.12), φαίνεται πως χρειάζεται πολύς χρόνος και προσπάθεια. Οπωσδήποτε η θεώρηση «πως τα βιοαποικοδομήσιμα πλαστικά χωρίς περαιτέρω σχεδιασμό και πρόβλεψη για την

περιβαλλοντικά ορθή διαχείριση τους, μπορούν να αποτελέσουν από μόνα τους τη λύση στη δημιουργία και διαχείριση των πλαστικών απορριμμάτων», μόνο κινδύνους μπορεί να επιφέρει προκαλώντας τόσο λιγότερο υπεύθυνες συμπεριφορές όσο και την ανεξέλεγκτη απόρριψή τους.



Γνωστό ως «Green Dot». Το σύμβολο αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η συσκευασία είναι ανακυκλώσιμη. Χρησιμοποιείται στις συσκευασίες και σημαίνει ότι ο παραγωγός συμμετέχει σε σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης και συνεισφέρει οικονομικά για την ανακύκλωση του προϊόντος.

Το σύμβολο αυτό (Mobius loop - Ταινία του Μέμπιους) αναγράφεται στα προϊόντα που είναι κατάλληλα για ανακύκλωση. Δεν σημαίνει ότι η συσκευασία έχει φτιαχτεί από ανακυκλωμένα υλικά.



Το σύμβολο αυτό, όπως το παραπάνω, υποδεικνύει ότι το προϊόν είναι κατάλληλο για ανακύκλωση. Το ποσοστό που αναγράφεται στο εσωτερικό είναι το ποσοστό του ανακυκλωμένου υλικού που περιέχεται στο προϊόν.

Αναφέρεται στον τύπο του πλαστικού που ανακυκλώνεται. Τα μπουκάλια PET ή πολυαιθυλενίου χρησιμοποιούνται για συσκευασία νερού, αναψυκτικών και ανακυκλώνονται εύκολα.



PETE



HDPE

Το σύμβολο HDPE (υψηλής περιεκτικότητας πολυαιθυλένιο) συναντάται σε συσκευασίες καθαριστικών, σακούλες απορριμμάτων, χυμούς και σημαίνει ότι το πλαστικό ανακυκλώνεται.



V

Το PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο) έχει αντικατασταθεί από το PET στη βιομηχανία τροφίμων και χρησιμοποιείται συνήθως σε καλώδια και σωληνώσεις. Ανακυκλώνεται πιο δύσκολα από τα υπόλοιπα, ενώ η καύση του απελευθερώνει τοξικές ουσίες.



LDPE

Αναφέρεται σε πλαστικό χαμηλής περιεκτικότητας σε πολυαιθυλένιο, όπως είναι οι σακούλες τροφίμων και πλαστικές σακούλες σούπερ μάρκετ και καταστημάτων.

Είναι πιο συνηθισμένο στα καλαμάκια, τα πώματα μπουκαλιών, μπουκάλια σαλτσών και κάποια ιατρικά σιρόπια. Το PP (πολυπροπυλένιο) ανακυκλώνεται.



PP



PS

Το PS (πολυστυρένιο) είναι το υλικό που χρησιμοποιείται σε πλαστικά είδη μιας χρήσης (ποτήρια, πιάτα κ.λπ.), σε θήκες CD-DVD και ανακυκλώνεται.

Αναφέρεται στην κατηγορία πλαστικών που δεν κατατάσσονται στις προηγούμενες και συνήθως χρησιμοποιείται σε γυαλιά ηλίου, θήκες υπολογιστών και μεγάλες μπουκάλες νερού.



OTHER



Το σύμβολο υπάρχει σε γυάλινες συσκευασίες (μπουκάλια, βάζα κτλ) και προτρέπει στην ανακύκλωσή τους.

Το σύμβολο αυτό δεν συνδέεται με την ανακύκλωση, αλλά είναι μια παράκληση προς τους υπεύθυνους πολίτες να απορρίπτουν το προϊόν με τον πιο κατάλληλο τρόπο. Δύναται επίσης να τοποθετηθεί σε κάποιο σημείο όπου υπάρχει κάδος απόρριψης αποβλήτων.





Όταν υπάρχει το σύμβολο αυτό σε ένα προϊόν σημαίνει ότι κατασκευάζεται από ανακυκλωμένο αλουμίνιο και μπορεί να ανακυκλωθεί ξανά.

Σημαίνει ότι το προϊόν είναι κατασκευασμένο από ανακυκλώσιμο ατσάλι που μπορεί να ανακυκλωθεί ξανά.



Συναντάται σε χαρτί ή προϊόντα ξύλου και σημαίνει ότι το ξύλο προέρχεται από δάση με βιώσιμη διαχείριση και σύμφωνα με τις αρχές του FSC (Συμβούλιο Διαχείρισης των Δασών).

Χρησιμοποιείται για τις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές και σημαίνει ότι έχουν παραχθεί μετά τις 13 Αυγούστου 2005 και ότι δεν πρέπει να απορρίπτονται στους κάδους μαζί με τα οικιακά απόβλητα, αλλά να διατίθενται ξεχωριστά ώστε να ανακυκλώνονται.



Η μπλε-πράσινη μαργαρίτα είναι το οικολογικό σήμα της Ε.Ε. Πρόκειται για εθελοντικό σήμα που πιστοποιεί τη βελτιωμένη περιβαλλοντική επίδοση συγκεκριμένων προϊόντων ή /και υπηρεσιών ανάμεσα σε άλλα της ίδιας κατηγορίας και απονέμεται από τρίτο ανεξάρτητο φορέα βάσει πολλαπλών κριτηρίων που έχουν προκύψει έπειτα από αξιολόγηση κύκλου ζωής.

Ο Μπλε Άγγελος είναι το γερμανικό οικολογικό σήμα και ισχύουν και γι' αυτόν οι ίδιες αρχές που ισχύουν για το οικολογικό σήμα της Ε.Ε. Πρόκειται για ένα από τα πρώτα εθνικά οικολογικά σήματα με δυνατότητα απονομής σε μεγάλο αριθμό προϊόντων.



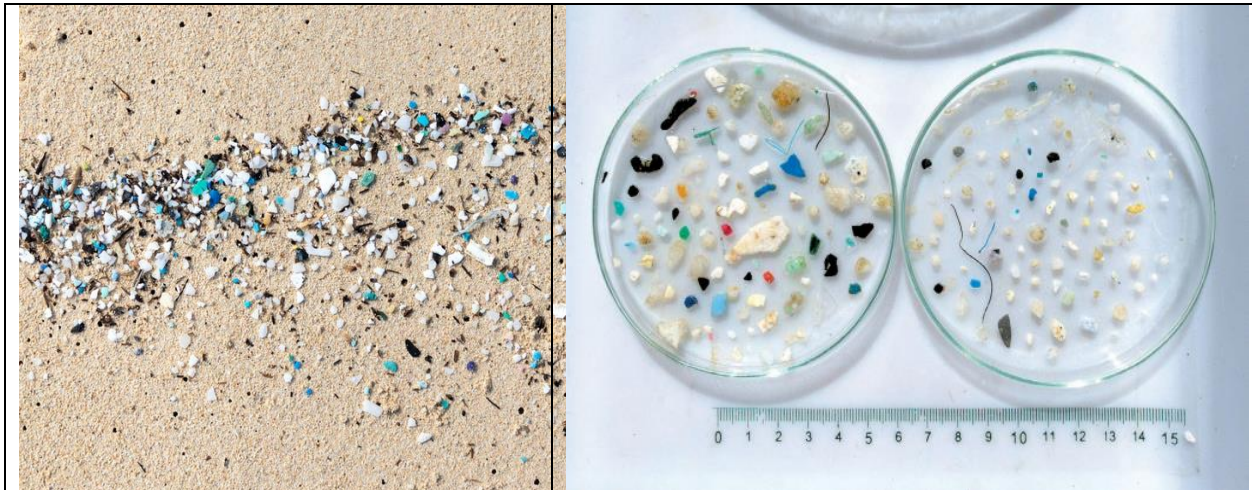
Εικόνα 5.12 : Σύμβολα που υποδεικνύουν αν η συσκευασία είναι ανακυκλώσιμη ή αποικοδομήσιμη [20]

Ταυτόχρονα, παρά την κοινωνική πίεση, η ανακάλυψη ενός οργανικής προέλευσης υλικού που να ικανοποιεί τις ανάγκες του καταναλωτή και μετά τη χρήση να μετατρέπεται σε τμήμα της φύσης και πάλι, κάνοντας ταυτόχρονα το βιοπλαστικό φτηνό και αποτελεσματικό, μένει να υλοποιηθεί. Σύμφωνα με πολλούς ειδικούς, η λύση στην πλαστική ρύπανση δεν έγκειται στην ανάπτυξη καλύτερων βιοπλαστικών υλικών, αλλά στην αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης των ήδη χρησιμοποιούμενων. Σύμφωνα με άλλους, ο περιορισμός της χρήσης των μιας-χρήσης πλαστικών υλικών συσκευασίας είναι η μόνη λύση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ

6.1. Ορισμός Μικροπλαστικών - Προέλευση

Τα μικροπλαστικά είναι πολύ μικρά τεμάχια οποιουδήποτε είδους πλαστικού που δεν ξεπερνούν σε μέγεθος τα 5 mm (100 nm – 5 mm) (εικόνα 6.1).



Εικόνα 6.1 : Μικροπλαστικά, στην άμμο και συλλεχθέντα σε τριβλία Petri για μελέτη

Τα μικροπλαστικά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, με βάση την προέλευσή τους (εικόνα 6.2) [17,31]:

- στα πρωτογενή πλαστικά και
- στα δευτερογενή πλαστικά

Τα πρωτογενή μικροπλαστικά είναι αυτά που παράγονται κατά την εξαγωγή / εξώθηση και τη λείανση / σύνθλιψη, όπως για παράδειγμα είναι τα φυσικά λειαντικά που έχουν προστεθεί σκόπιμα σε καταναλωτικά αγαθά, όπως οι οδοντόκρεμες, τα καθαριστικά χεριών και προσώπου, τα αφρόλουτρα, απορρυπαντικά, ρούχα και ιατρικός εξοπλισμός. Στα πρωτογενή μικροπλαστικά ανήκουν και τα σφαιρίδια καθαρού πλαστικού από πολυαιθυλένιο (PE), πολυπροπυλένιο (PP) και πολυστυρένιο (PS), που χάνονται κατά τη μεταφορά, όπως επίσης και προϊόντα της βιομηχανίας των αέριων ανατινάξεων. Τα πρωτογενή μικροπλαστικά λοιπόν είναι ήδη μικροσκοπικά σωματίδια όταν εισέρχονται στο περιβάλλον (πίνακας 6.1).

Τα δευτερογενή μικροπλαστικά προέρχονται από φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που οδηγούν στον τεμαχισμό των πλαστικών υπολειμμάτων που επιπλέουν στα υδατικά περιβάλλοντα. Η μηχανική καταπόνηση, όπως για παράδειγμα η κίνηση των κυμάτων, η αποδόμηση λόγω της υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας και η αποικοδόμηση από μικροβιακές κοινότητες συμβάλουν στο σχηματισμό δευτερογενών μικροπλαστικών στους ωκεανούς, που προφανώς είναι σε μέγεθος μικρότερα των πρωτογενών [17,18,28].

Τα πλαστικά σωματίδια από τη στιγμή που θα ελευθερωθούν στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι αδύνατο να επαναπροσληφθούν ή να ανακυκλωθούν. Σε αντίθεση με άλλα οργανικά υλικά, το πλαστικό δεν υφίσταται την απλή διεργασία της αποδόμησης, αντίθετα διασπάται σε μικρότερα κομμάτια (μικροπλαστικά και νανοπλαστικά). Με τον τρόπο αυτό, τα πλαστικά σωματίδια μπορούν να ταξιδέψουν σε τεράστιες αποστάσεις με τα ρεύματα των ωκεανών και τους ανέμους, όπως αποδεικνύει η παρουσία τους σε απομονωμένα ωκεάνια νησιά, σε πολικές παγετώδεις περιοχές, στην Αρκτική και την Ανταρκτική, όπως και σε ιζήματα μεγάλου βάθους. Ανάλογα λοιπόν με τη πυκνότητά τους σε σχέση με αυτή του ωκεάνιου νερού, μπορεί να εντοπιστούν στο ίζημα του βένθους, αιωρούμενα στην υδάτινη στήλη ή επιπλέοντα στην επιφάνεια [17,19,29].



Εικόνα 6.2 : Αριστερά, πρωτογενή μικροπλαστικά σε οδοντόκρεμα και δεξιά, δευτερογενή μικροπλαστικά που προκύπτουν από τη διάσπαση ενός πλαστικού ποτηριού [58]

Οι πολλές διαφορετικές πηγές από τις οποίες εκλύονται μικροπλαστικά έχουν ως αποτέλεσμα να προκύπτουν σε ποικίλα σχήματα, όπως σφαιρίδια, ίνες και μικρά τεμάχια. Η παρακολούθηση των τεμαχίων των μικροπλαστικών στα θαλάσσια οικοσυστήματα είναι χρονοβόρα και ακριβή και περιλαμβάνει κυρίως τις εξής μεθόδους [14,15]:

1. έρευνες στην παραλία,
2. έρευνες στη θάλασσα,
3. υπολογισμοί των ποσοτήτων που εισέρχονται στη θάλασσα μέσα από χερσαίες πηγές και, τελευταία,
4. υπολογισμοί των ποσοτήτων μέσα από καταγραφή τους που βρίσκουμε σε θαλάσσιους οργανισμούς, μέσω παγίδευσης τους ή μέσω κατάποσης.

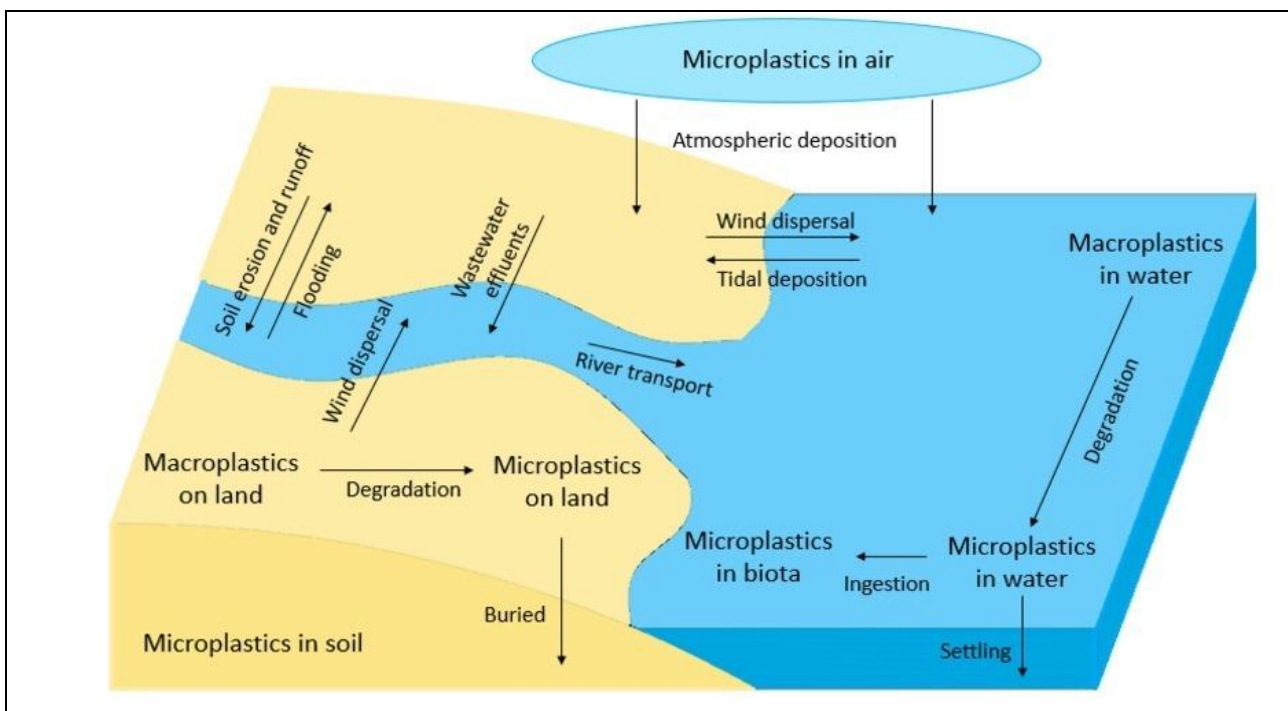
Μία σημαντική παράμετρος στη διαχείριση των μικροπλαστικών είναι η ανακύκλωση, η οποία αν και γνώριμη σε όλες τις οικονομίες, δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτική στον τομέα των μικροπλαστικών. Η αύξηση και η βελτίωση της ανακύκλωσης πλαστικών παρεμποδίζεται από την ανεπαρκή ποσότητα και ποιότητα της χωριστής αποκομιδής και διαλογής. Η διαλογή είναι επίσης απαραίτητη για την αποφυγή της εισόδου επιμολυντών στα ρεύματα ανακύκλωσης και τη διατήρηση υψηλών προτύπων ασφάλειας για τα ανακυκλωμένα υλικά [8].

Τα πρωτογενή μικροπλαστικά εισέρχονται στα θαλάσσια οικοσυστήματα κυρίως μέσω υγρών αστικών λυμάτων των νοικοκυριών ή, όπως προαναφέρθηκε, διαρροής πλαστικών σφαιριδίων και σκόνης που προκύπτουν από τις ανατινάξεις. Άλλη σημαντική πηγή για τα πρωτογενή μικροπλαστικά είναι η χρήση της λυματολάσπης των υγρών αποβλήτων- που περιέχει συνθετικές ίνες ή μικροπλαστικά που προέρχονται από προϊόντα προσωπικής φροντίδας ή προϊόντα καθαριότητας και έχουν καθιζάνει στο ίζημα και χρησιμοποιείται μετά από κατάλληλη επεξεργασία ως εδαφοβελτιωτικό για τα εδάφη. Οι ίνες είναι η πιο κοινή μορφή μικροπλαστικών, πιθανότατα εξαιτίας της συνεχούς τριβής των ρούχων και των ταπετσαριών που έχουν προέλθει από συνθετικά υφάσματα, και διοχετεύονται μέσω των υγρών λυμάτων από τα πλυντήρια ρούχων. Αν και οι συνθετικές ίνες που πρωτογενώς κατασκευάστηκαν από πολυεστέρα, ακρυλικό και πολυαμίδιο περιλαμβάνονται στα δευτερογενή μικροπλαστικά, ελευθερώνονται στο περιβάλλον μαζί με τα πρωτογενή μικροπλαστικά. Έχει υπολογιστεί ότι 1.900 ίνες αντιστοιχούν σε κάθε τεμάχιο κατά το πλύσιμο και μπορεί να ελευθερωθούν στο χερσαίο και θαλάσσιο περιβάλλον μέσω των υγρών λυμάτων και της χρήσης της λυματολάσπης που προκύπτει από τους βιολογικούς καθαρισμούς. Σε αυτό το πλαίσιο, τα εργοστάσια κλωστοϋφαντουργίας μπορεί να είναι μια σημειακή πηγή παραγωγής μικροπλαστικών στο περιβάλλον. Περιοχές σε μικρή απόσταση από εργοστάσια πλαστικών αναμένεται επίσης να έχουν υψηλή συγκέντρωση. Ενδεικτικά, έχει καταγραφεί συγκέντρωση 100.000 μικροπλαστικών τεμαχίων ανά κυβικό μέτρο (m^3) νερού κοντά σε λιμάνι της Σουηδίας που γειτνιάζε με εργοστάσιο παραγωγής πολυαιθυλενίου (PE) [18].

Τα δευτερογενή μικροπλαστικά προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η απόρριψη σκουπιδιών, και ελευθερώνονται στο περιβάλλον κατά τη συλλογή στερεών απορριμμάτων. Αυτά τα μεγάλα πλαστικά τεμάχια καθώς και τα υποπροϊόντα τους εισέρχονται στα υδάτινα οικοσυστήματα μέσω της διασποράς τους με τον άνεμο, της διάβρωσης του εδάφους ή της χερσαίας απορροής. Με ανάλογο τρόπο, τόσο τα μακροπλαστικά όσο και τα μικροπλαστικά μπορούν να μεταφερθούν κατά μήκος της ξηράς με τον άνεμο, ενώ τα πυκνότερα πολυμερή είναι πιθανό να ταφούν σε βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Η επιφανειακή απορροή από καλλιεργούμενες εκτάσεις και από αστικές περιοχές είναι μία ακόμη σημαντική πηγή μικροπλαστικού φορτίου προς τα επιφανειακά νερά. Πρόσφατες έρευνες υποδεικνύουν πως η γεωργία είναι μία από τις κύριες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που συμβάλλουν στην ρύπανση του εδάφους με μικροπλαστικά, τόσο εξαιτίας της χρήσης της λάσπης των λυμάτων, που αναφέρθηκε παραπάνω, με σκοπό τη βελτίωση των εδαφών, όσο και εξαιτίας της χρήσης γεωργικών πλαστικών, όπως τα πλαστικά οργανικά λιπάσματα με σκοπό να αυξήσουν την απόδοση της παραγωγής [31]. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί πως τα φθαρμένα ελαστικά των τροχών όπως και οι σημάνσεις των δρόμων συμβάλλουν στην ρύπανση των επιφανειακών υδάτων με μικροπλαστικά, καθώς η απορροή μετά από καταιγίδα τα μεταφέρει στα

υδάτινα οικοσυστήματα, όπου υφίστανται τη διάβρωση που αποδίδει μικροπλαστικά τεμάχια. Μεγάλες ποσότητες ινών φαίνεται πως μεταφέρονται επίσης μέσω ατμοσφαιρικής εναπόθεσης, ειδικά σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές. Πιθανές πηγές των αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών περιλαμβάνουν συνθετικές ίνες από ρούχα και νοικοκυριά, τεχνητούς χλοοτάπητες, χωματερές και καύσεις σκουπιδιών [18]. Τα μικροπλαστικά σωματίδια στην ατμόσφαιρα μεταφέρονται μέσω του ανέμου προς το υδάτινο περιβάλλον ή εναποτίθενται στο χερσαίο περιβάλλον με υγρή (βροχή, χιόνι, χαλάζι) ή ξηρή απόθεση.

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει πως η χωρική κατανομή των μικροπλαστικών μεταξύ διαφορετικών περιβαλλοντικών τμημάτων καθορίζεται από φυσικές διεργασίες, όπως ο άνεμος, τα κύματα, η επιφανειακή απορροή και οι πλημμύρες, τα οποία μεταβάλλονται λόγω κλιματικών συνθηκών. Επιπλέον, μεγάλο μέρος τους καταλήγει στο θαλάσσιο πυθμένα και στις θαλάσσιες τάφρους, που αποτελούν πλέον την μεγάλη δεξαμενή μικροπλαστικών. (εικόνα 6.3).



Εικόνα 6.3: Διαγραμματική απεικόνιση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη μεταφορά των μικροπλαστικών μεταξύ ατμόσφαιρας-νερού-εδάφους και οργανισμών – ατμοσφαιρική απόθεση (atmospheric deposition), διασπορά μέσω του ανέμου (wind dispersal), απόθεση από την παλίρροια (tidal deposition), αποδόμηση (degradation), καθίζηση (settling), κατάποση μέσω της τροφής (ingestion), ενταφιασμός (buried), πλημμύρα (flooding), διάβρωση εδάφους και απορροή (soil erosion and runoff), λύματα (waste water effluents) [18]

Αυτή η χαρακτηριστική παρουσία των μικροπλαστικών σε κάθε βιοτικό και αβιοτικό περιβάλλον αυξάνει την πιθανότητα πρόσληψης και συσσώρευσής τους στους ιστούς πολλών οργανισμών της χλωρίδας και πανίδας. Με τον τρόπο αυτό διακινούνται μέσω της τροφικής αλυσίδας, ως και τον άνθρωπο ασφαλώς, συνιστώντας ένα νέο βιοσυσσωρευόμενο ρύπο. Οι άνθρωποι συχνά είναι οι κορυφαίοι καταναλωτές σε θαλάσσιες τροφικές αλυσίδες και με δεδομένο ότι μικροπλαστικά έχουν ανιχνευθεί σε

ψάρια, ασπόνδυλα και μαλάκια, εγείρονται σοβαρά ζητήματα για την ασφάλεια των τροφίμων και τη δημόσια υγεία. Τα μικροπλαστικά έχουν μια ισχυρή ικανότητα να απορροφούν ρύπους εξαιτίας του μικρού τους όγκου και της μεγάλης επιφάνειας που διαθέτουν. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να εισάγουν πολλούς ρύπους στο τμήμα του περιβάλλοντος όπου καταλήγουν, απειλώντας την σταθερότητα του οικοσυστήματος [17, 31].

Σε έρευνα που διεξήχθη το 2019 για την αποτίμηση της ποσότητας των μικροπλαστικών που μέσω της ατμόσφαιρας γίνεται διαθέσιμη στον άνθρωπο, λήφθηκαν δείγματα από 4 πόλεις (Λονδίνο, Αμβούργο, Παρίσι και Ντονγκουάν -Κίνα). Αυτή με το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι το Λονδίνο, όπου καταγράφονται τα υψηλότερα ποσοστά μικροπλαστικών. Στο Λονδίνο, συγκέντρωσαν το πλαστικό που καθίζανε και εναποτίθονταν στην ταράτσα ενός 9-ώροφου κτιρίου, ώστε να διασφαλιστεί ότι προέρχεται μόνο από την ατμόσφαιρα. Στα οκτώ δείγματα που πήραν, μέτρησαν από 575 έως 1.008 μικροσωματίδια ανά τετραγωνικό μέτρο κάθε μέρα και προέρχονταν από ίνες ακρυλικού, κυρίως από αυτό που χρησιμοποιείται στα ρούχα. Μόνο το 8% των ευρημάτων προερχόταν από το πλαστικό συσκευασιών [50].

Το μέγεθός του ήταν μεταξύ 0,2 και 0,5 χιλιοστών, δηλαδή τέτοιο που να μπορεί να περάσει στον ανθρώπινο οργανισμό μέσω της αναπνοής ή του σάλιου. Υπάρχουν και μικρότερα σωματίδια, τα οποία μπορούν να περάσουν στο αίμα ή τους πνεύμονες, προκαλώντας προβλήματα για την υγεία, ωστόσο η σύστασή τους δεν ήταν δυνατόν να αναλυθεί στην εν λόγω έρευνα.

Σύμφωνα με εκτιμήσεις, οι άνθρωποι προσλαμβάνουν μέσω κατάποσης τουλάχιστον 50.000 μικροσωματίδια πλαστικού έκαστος κάθε χρόνο, σε όλο τον κόσμο, τα οποία μπορούν να μεταφέρουν τοξικά χημικά είδη και μικρόβια. Έτσι, όλες οι σχετικές έρευνες καλούν σε επείγουσα διερεύνηση των μικροπλαστικών στην υγεία. [50]

Το ζήτημα της παγίδευσης άγριων ζώων, κυρίως πτηνών, σε πλαστικά δίχτυα ή της κατάποσης πλαστικών από ψάρια και πτηνά δεν ήρθε πρόσφατα στη δημοσιότητα. Η πρώτη ένδειξη πως τα πλαστικά αποτελούν σοβαρό πρόβλημα για τα θαλάσσια οικοσυστήματα αναφέρθηκε όταν μικρά κομμάτια πλαστικού, μεσοπλαστικά και μικροπλαστικά, βρέθηκαν στο πεπτικό σύστημα των γλάρων στη δεκαετία του 1960, ενώ το 74% των αυγών των άλμπατρος βρέθηκαν νεκρά περιέχοντας μικροπλαστικά, στο νησί Laysan, στη Χαβάη, το 1965 [15]. Τα θαλασσοπούλια που συσσωρεύουν μικροπλαστικά στο στομάχι τους είναι πολύ καλός δείκτης των αλλαγών στην ποσότητα και τη σύσταση των πλαστικών απορριμμάτων στη θάλασσα, καθώς συλλέγουν τροφή από μεγάλες εκτάσεις, αναλύοντας το περιεχόμενο του στομάχου των νεκρών ατόμων.

6.2 Οικολογικές και βιολογικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών στο περιβάλλον

6.2.1 Οι μικροβιακές κοινότητες «Πλαστικόσφαιρες» (Plastispheres)

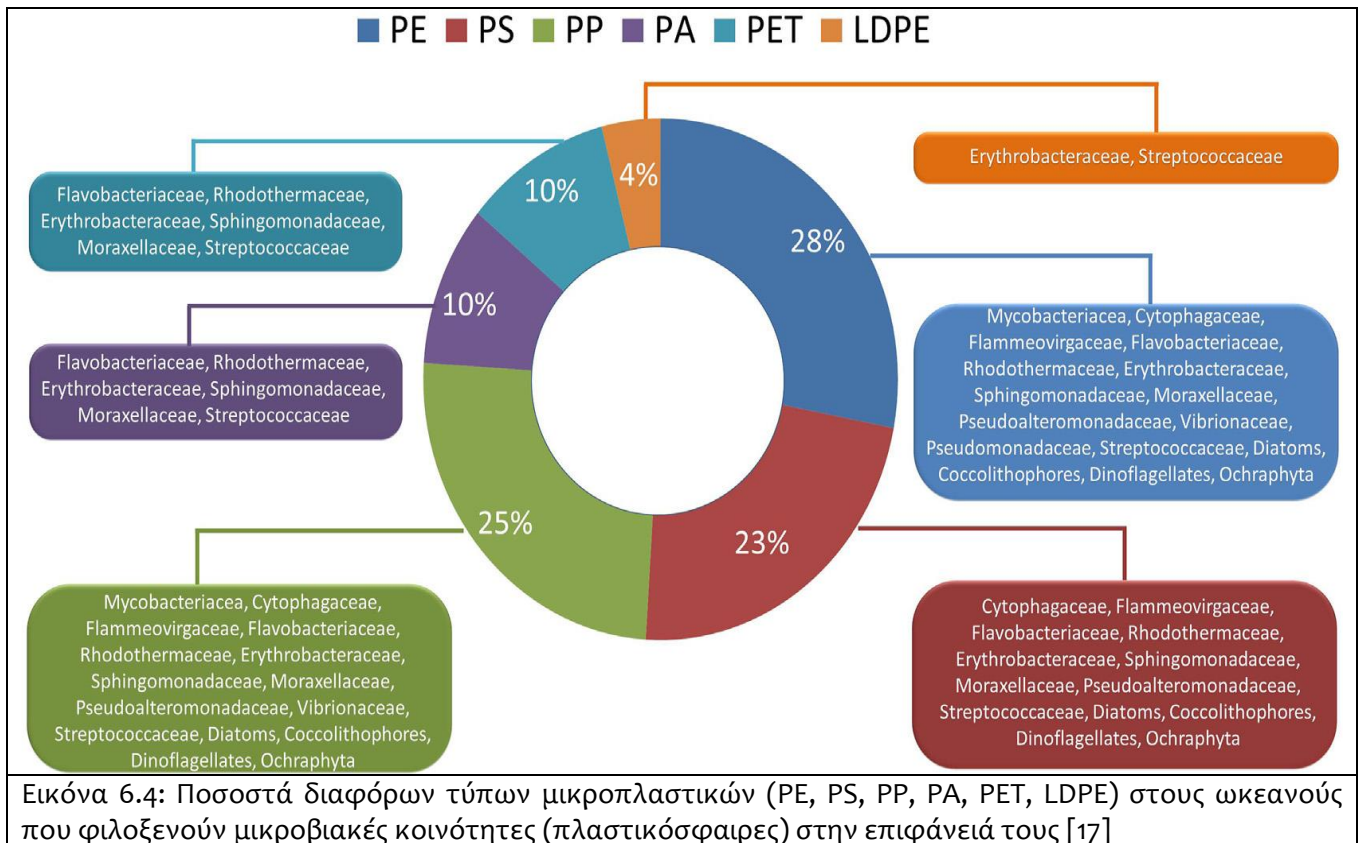
Εκτός της απορρόφησης και προσρόφησης ποικίλων οργανικών και ανόργανων συστατικών των πλαστικών απορριμμάτων στους ωκεανούς, οι επιφάνειες των μικροπλαστικών προσφέρουν υποστρώματα για αποίκηση ποικίλων μικροβιακών κοινοτήτων. Αυτά τα βιοφιλμ / βιοϋμένια (biofilms) στις επιφάνειες των μικροπλαστικών

χαρακτηρίζονται τα τελευταία χρόνια (δημοσιεύτηκε πρώτη φορά το 2013) ως «Πλαστικόσφαιρες» («Plastispheres») και αποτελούν ένα νέο οικολογικό θώκο που προέκυψε από την εισροή πλαστικών υπολειμμάτων στους ωκεανούς. Η σύσταση των μικροοργανισμών των πλαστικόσφαιρων είναι ποικίλη και συχνά διαφορετική από αυτή των γειτονικών μικροβιακών κοινοτήτων. Από τις έρευνες έχουν βρεθεί πολλοί οργανισμοί, όπως ετερότροφα βακτήρια, κυανοβακτήρια, δινομαστιγωτά, διάτομα, βρυόζωα και μύκητες ως μέλη των βιοφιλμ [17, 31].

Ο σχηματισμός των βιοφιλμ στην επιφάνεια των μικροπλαστικών επηρεάζεται από πολλούς περιβαλλοντικούς και βιογεωγραφικούς παράγοντες, όπως το μέγεθος του σωματιδίου, ο τύπος του υποστρώματος, οι ιδιότητες της επιφάνειας, η συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών καθώς και η αλατότητα του περιβάλλοντος νερού. Τα μικροβιακά βιοφιλμ μπορούν επίσης να τροποποιήσουν τα φυσικά χαρακτηριστικά των μικροπλαστικών, όπως η δομή της επιφάνειας και η πλευστότητα. Αυτές οι τροποποιήσεις μπορεί να οφείλονται στην υδρογοναθρακική φύση των μικροπλαστικών που επιτρέπει στη μικροβιακή κοινότητα των πλαστικόσφαιρων να χρησιμοποιούν τα μικροπλαστικά ως πηγή ενέργειας, διασπώντας τα παράγωγα του πετρελαίου και τα σύνθετα βιοπολυμερή σε απλούστερα. Η ποικιλία των μικροπλαστικών σε μέγεθος και πλευστότητα μπορεί να επηρεάσει την κατακόρυφη κατανομή τους στη στήλη του νερού στους ωκεανούς αλλά και την οριζόντια μεταφορά τους σε νέα περιβάλλοντα με τον άνεμο και τα ωκεάνια ρεύματα [35].

Σημαντικά έχει επιδράσει ο σχηματισμός των βιοφιλμ ακόμη και τις τροφικές αλυσίδες στα ανώτερα επίπεδα: Τα θαλασσοπούλια αναγνωρίζουν την τροφή μέσω της όσφρησης. Τα πλαστικά μπορεί να τα μπερδέψουν για τροφή επειδή έχουν φύκη και βακτήρια, τα οποία επικάθονται επάνω στην επιφάνεια τους και εκπέμπουν δυνατή οσμή θείου. Τα θαλασσοπούλια θεωρούν ότι αυτή η μυρωδιά είναι τροφή και πέφτουν στην παγίδα οπότε και καταλήγουν να τρώνε τα πλαστικά και όχι το θήραμα. Η μυρωδιά των πλαστικών επίσης παραπλανεί τα ψάρια. Κάποια κοπάδια σαρδέλας παραμένουν αδιάφορα προς τα κομματάκια των καθαρών πλαστικών αλλά τα έλκουν τα μικροπλαστικά που μυρίζουν παρόμοια με το ζωοπλαγκτόν του γένους *Euphasia* (*Euphasia spp*), το οποίο είναι κριλ που τρώνε [31].

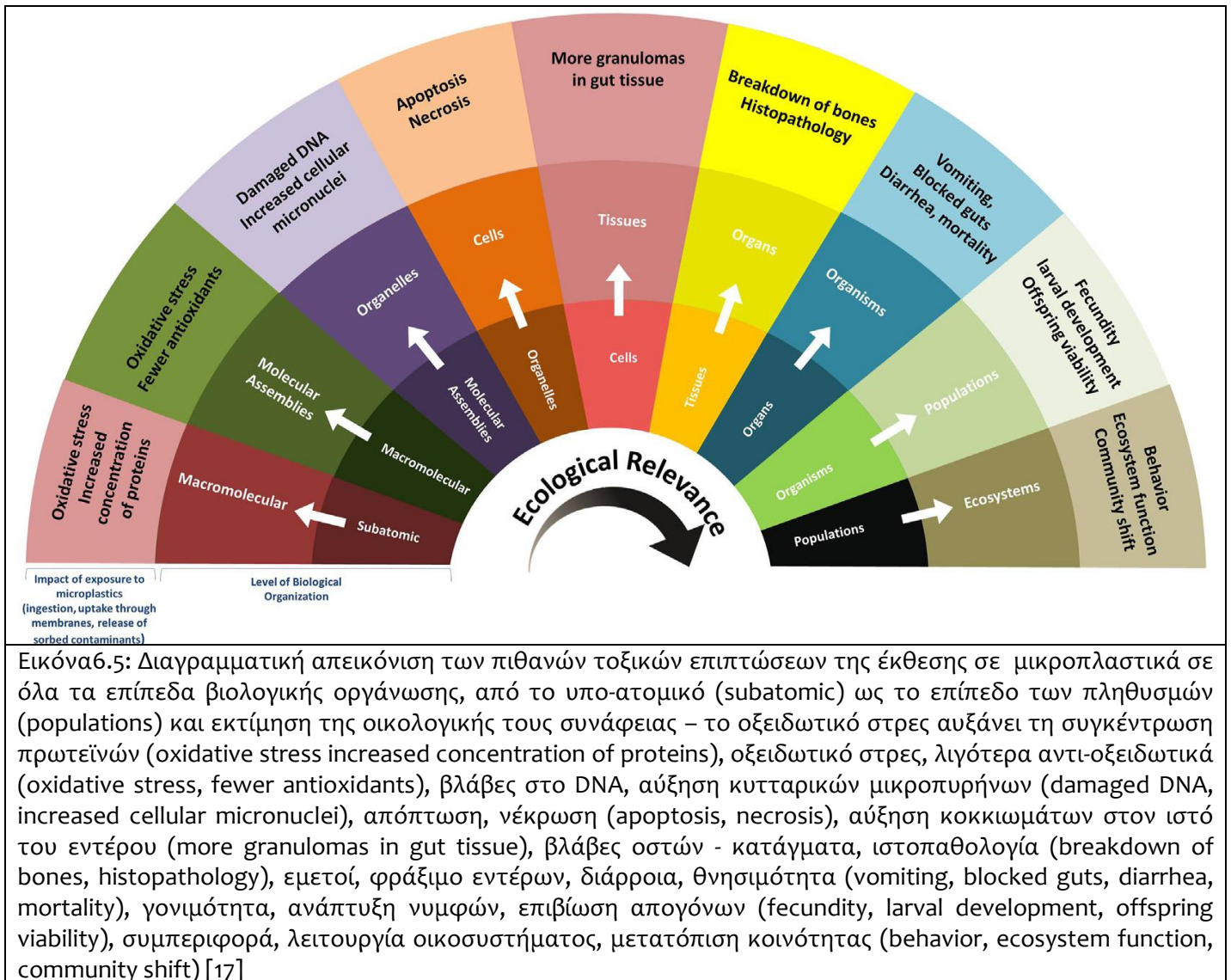
Πρόσφατα, το ενδιαφέρον έχει στραφεί προς την πιθανή επικινδυνότητα της πλαστικόσφαιρας στους ωκεανούς. Πολλά παθογόνα γένη μικροβίων, όπως τα βακτήρια *Vibrio*, *Leptolyngbya*, *Pseudomonas spp.*, βρίσκονται συχνά να συνδέονται με μικροπλαστικά, το οποίο μπορεί να έχει σοβαρές δυσάρεστες επιπτώσεις στα θαλάσσια τροφικά πλέγματα (εικόνα 6.4). Τα μικροπλαστικά παρέχουν βιότοπους για αυτά τα παθογόνα βακτήρια, καθώς η κανονική συγκέντρωσή τους στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι χαμηλή. Τα βιοφιλμ που σχηματίζονται από τέτοια παθογόνα στελέχη εξασφαλίζουν σ αυτά προστασία, αυξημένη διασπορά και πρόσβαση σε θρεπτικά υλικά. Τα μικροπλαστικά έχει επίσης αναφερθεί να προάγουν την αποίκιση πολλών επιβλαβών ειδών φυτοπλαγκτόν που σημειώνουν εξαιρετικά υψηλές τιμές του πληθυσμού (algal blooms). Είδη δινομαστιγωτών που εμφανίζουν τέτοιες ακραίες τάσεις αύξησης του πληθυσμού τους, όπως τα *Alexandrium taylori*, *Ostreopsis spp* και *Coolia spp*, έχουν ανιχνευθεί σε επιπλέοντα πλαστικά υπολείμματα στους ωκεανούς. Το φύκος *Alexandrium taylori* παράγει επίσης παραλυτικές τοξίνες για τα ψάρια [17].



Καθώς τα μικροπλαστικά πρόσφατα εισήχθησαν στους ωκεανούς και φαίνεται να προτιμώνται για εποίκισμο και ως υποστρώματα από τις μικροβιακές κοινότητες, η αναλογία των μικροβιακών κοινοτήτων που ζουν σε μικροπλαστικά σε σχέση με τα μικρόβια που ζουν ελεύθερα στους ωκεανούς, είναι πιθανό να αλλάξει με το χρόνο. Συνεπώς, εκείνα τα μικροπλαστικά με παχιά βιοφιλμ μπορεί να επηρεάσουν οικολογικές διεργασίες στο οικοσύστημα. Οι νέες επιφάνειες που τα πλαστικά έχουν εισάγει στους ωκεανούς, μπορούν επιλεκτικά να εποίκιστούν από λιγότερο ενεργά ή αδρανή μέλη της ωκεάνιας βιόσφαιρας, με αποτέλεσμα να μεταβληθούν οι ροές διαλυμένης οργανικής ουσίας. Η διαλυμένη οργανική ουσία μπορεί να αυξηθεί σημαντικά από τις εκπλύσεις μικροπλαστικού, που με τη σειρά τους οδηγούν σε αύξηση της μικροβιακής βιομάζας των ωκεανών [17,31].

6.2.2 Επίδραση στις τροφικές αλυσίδες

Προκειμένου να αναπτυχθούν αποτελεσματικά εργαλεία εκτίμησης κινδύνου στις θαλάσσιες τροφικές αλυσίδες, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η επίδρασή τους σε όλα τα επίπεδα βιολογικής οργάνωσης, από το μοριακό ως το επίπεδο του οικοσυστήματος (Εικόνα 6.5). Τα οικοσυστήματα θεωρείται πως επηρεάζονται, όταν δεδομένος αριθμός ατόμων του / των πληθυσμού / ών τους εμφανίσει διαταραγμένη υγεία ή μη φυσιολογικές λειτουργίες.



Εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους, τα μικροπλαστικά μπορούν να καταποθούν από μεγάλο αριθμό οργανισμών στους ωκεανούς και γενικότερα στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι μελέτες βιοπαρακολούθησης έχουν επιβεβαιώσει την ευρεία κατανάλωση μικροπλαστικών από ποικίλους οργανισμούς, όπως είναι τα καρκινοειδή στις εκβολές ποταμών, τα ψάρια, τα οστρακοειδή της διαπαλιρροϊκής ζώνης, τα μύδια, οι βάλανοι της θάλασσας, τα στρείδια, οι σκώληκες, τα αγγούρια της θάλασσας, τα αμφίποδα και τα υδρόβια πουλιά [28,31,35].

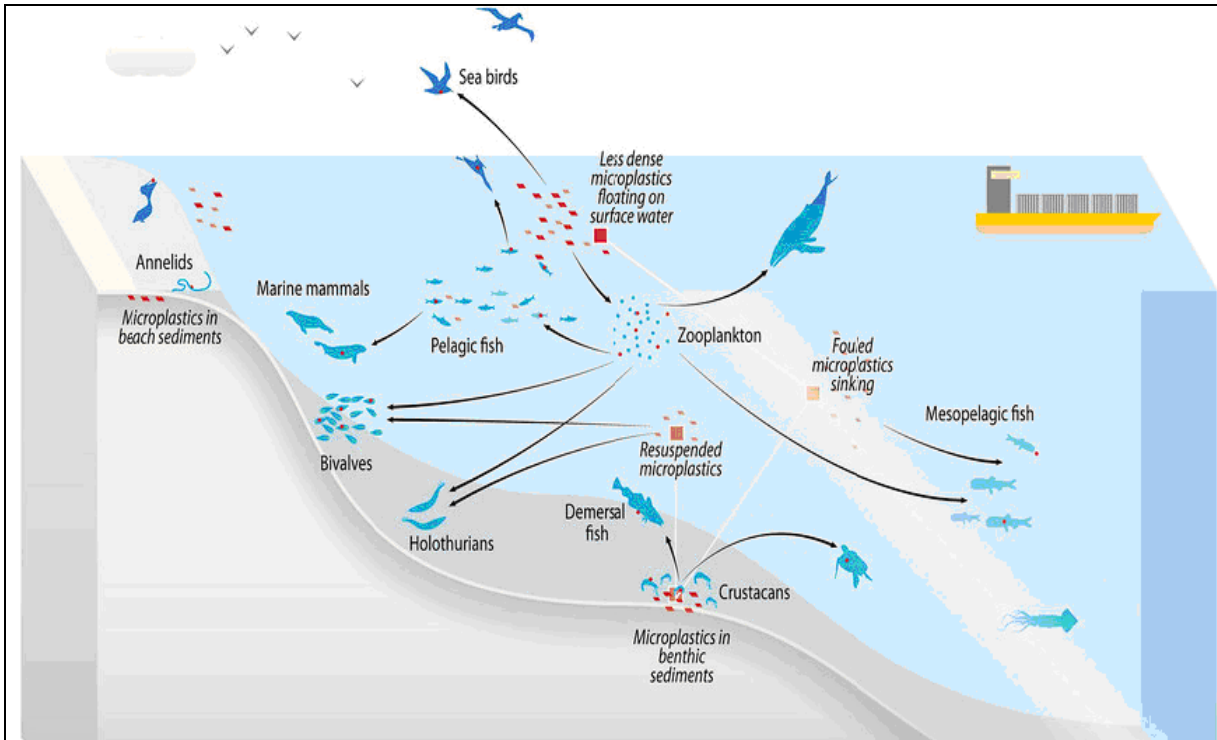
Μετά την κατάποση, που γίνεται είτε κατά λάθος είτε εσκεμμένα, τα μικροπλαστικά μεταφέρονται μέσα από το επιθήλιο της γαστρο-οισοφαγικής οδού και μπορεί να παραμείνουν στο γαστρο-οισοφαγικό μονοπάτι ή να αποβληθούν με τα κόπρανα. Στην περίπτωση της διατήρησής τους, η υγεία του οργανισμού επηρεάζεται πολύ σοβαρά, προκαλώντας τραυματισμούς ή και διατρήσεις, μειώνοντας την ικανότητα πρόσληψης των θρεπτικών ουσιών και την τροφική τους δραστηριότητα, εξαιτίας του ψευδούς αισθήματος κορεσμού. Η φυσική δομή των απορροφημένων στα μικροπλαστικά χημικών

ουσιών (όπως για παράδειγμα βαφές, αντιμικροβιακές ουσίες, αντιφλογωτικά μέταλλα, και άλλα οργανικά συστατικά,) μπορεί να επιφέρει επικίνδυνες συνέπειες στους οργανισμούς μετά την κατάποσή τους. Τα μεγαλύτερα σε μέγεθος πλαστικά μπορούν να προκαλέσουν εσωτερικές εκδορές, θρόμβωση του πεπτικού συστήματος, έλκη και εντερικές αλλοιώσεις [17].

Ωστόσο, οι τοξικές συνέπειες των προσκολλημένων χημικών ουσιών μπορεί να είναι ακόμη πιο θανατηφόρες. Οι χημικές ενώσεις που είναι συνδεδεμένες με τα μικροπλαστικά έχει αναφερθεί ότι προκαλούν κυτταρική τοξικότητα και επηρεάζουν αρνητικά τους πληθυσμούς των ψαριών, τα ενεργειακά αποθέματα σε σκώληκες και κάβουρες της παράκτιας ζώνης, τους μεταβολικούς ρυθμούς και την επιβίωση των Ασιατικών πράσινων μυδιών, όπως και την ανάπτυξη και επιβίωση του υδρόβιου καρκινοειδούς οργανισμού *Daphnia* σε συνθήκες εργαστηρίου. Μετά την έκθεση σε μικροπλαστικά, τα θαλάσσια καρκινοειδή κωπήποδα εμφανίζουν σημαντική μείωση της κατανάλωσης φυκών, που τελικά επηρεάζει την γονιμότητα και την επιβίωσή τους. Η κατάποση μικροπλαστικών από διηθηματοφάγους οργανισμούς της βενθικής βιοκοινότητας μπορεί να έχει δυσμενείς συνέπειες στις τροφικές αλυσίδες, καθώς αυτοί αποτελούν τη βάση των τροφικών αλυσίδων. Επιπλέον, οι διηθηματοφάγοι είναι περισσότερο εκτεθειμένοι στα διαλυμένα στο νερό χημικά συστατικά των μικροπλαστικών. Τελικά, τα μικροπλαστικά μπορούν να διαστρεβλώσουν την οικολογική ισορροπία σε μεγάλο βαθμό επιδρώντας στην ανάπτυξη αυτών των νεαρών και των μικρών οργανισμών [17]. Σύμφωνα με μία έρευνα σχετικά με την περιεκτικότητα μικροπλαστικών σε μύδια και στρείδια – τα οποία καλλιεργούνταν για κατανάλωση από ανθρώπους- ένας μέσος Ευρωπαίος καταναλωτής οστρακόδερμων πιθανόν καταναλώνει μέχρι και 11.000 τεμάχια μικροπλαστικών το χρόνο [31]. Όμως, οι επιπτώσεις των μικροπλαστικών στην ανθρώπινη υγεία δεν είναι πλήρως μελετημένες, όπως θα δούμε και στην επόμενη ενότητα.

Η ατομική συμπεριφορά μπορεί να τροποποιηθεί ως απόκριση σε περιβαλλοντικούς ρύπους ή αγχώδεις (στρεσογόνους) παράγοντες. Οι αλλαγές στη συμπεριφορά αποτελούν πρώιμα σημάδια ειδοποίησης που μπορούν να επηρεάσουν ολόκληρο το οικοσύστημα, καθώς συνδέουν διαδικασίες φυσιολογίας με οικολογικές διεργασίες. Η μελέτη λοιπόν των αλλαγών συμπεριφοράς των θαλάσσιων οργανισμών είναι σημαντική για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των μικροπλαστικών στα οικοσυστήματα [51]. Τα υπολείμματα πλαστικού μπορεί να είναι πολύ επικίνδυνα για το θαλάσσιο ζωοπλαγκτόν και επομένως να μεταφερθούν στην κορυφή των τροφικών αλυσίδων, προκαλώντας συμπεριφορικές διαταραχές (για παράδειγμα νανοπλαστικά να εισβάλλουν στον εγκέφαλο των ψαριών). Αυτές οι συμπεριφορικές διαταραχές μπορούν να οδηγήσουν σε σοβαρές διαταραχές στα φυσικά οικοσυστήματα. Διάφορες τέτοιες διαταραχές έχουν παρατηρηθεί σε συνθήκες εργαστηρίου. Για παράδειγμα, για την ακρίδα *Platorchestia smithi* καταγράφηκε απώλεια βάρους και μειωμένο ύψος αλμάτων, ο καθημερινός ρυθμός δραστηριοτήτων για το ψάρι-ζέβρα (*Danio rerio*) μεταβλήθηκε, μειωμένη ταχύτητα κολύμβησης βρέθηκε για το Ευρωπαϊκό λαβράκι (*Dicentrarchus labrax*), ενώ αυξημένος χρόνος κυνηγιού, μειωμένη ευαισθησία προς το φαγητό και μικρότερη ταχύτητα κολύμβησης βρέθηκαν για το ψάρι σκορπιός (*Sebastes schlegelii*). Διαφορετική συχνότητα του ρυθμού προώθησης - ακινησίας καταγράφηκε για την μέδουσα *Aurelia* sp., ενώ πολλά θαλάσσια βενθοπελαγικά ψάρια μείωσαν την ταχύτητα κολύμβησης και την κίνησή τους. Ανάλογα, μειωμένη κολύμβηση και ανταγωνιστικότητα για το φαγητό βρέθηκε για το

καλαμάρι *Neomysis japonica*. Από την άλλη πλευρά, δεν υπάρχουν προς το παρόν αρκετές πληροφορίες για τις συμπεριφορικές αλλαγές των οργανισμών σε φυσικά θαλάσσια οικοσυστήματα. Έρευνα του 2018 ανέφερε διαφοροποιημένη τροφική συμπεριφορά για το κύριο συστατικό είδος των κοραλλιογεννών υφάλων (*Lophelia pertusa*) στη Βόρειο-δυτική Μεσόγειο εξαιτίας των μικροπλαστικών [70]. Ωστόσο, έρευνα του 2020 ανέφερε πως η τυπική συμπεριφορά θηρευτή - θηράματος για το γαστερόποδο της παλιρροϊκής ζώνης (*Littorina littorea*) δε φάνηκε να επηρεάζεται από την έκθεση σε μικροπλαστικά [71, 17].



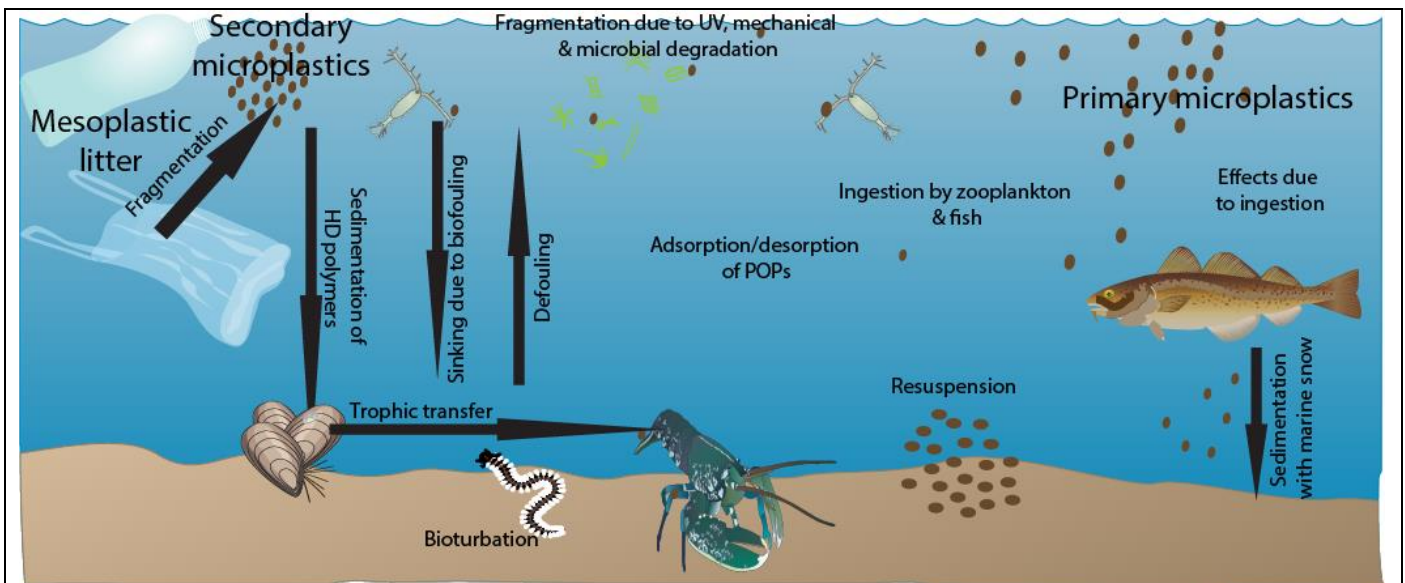
Εικόνα 6.6: Διαγραμματική απεικόνιση των τρόπων που τα μικροπλαστικά εισέρχονται στην θαλάσσια τροφική αλυσίδα – θαλασσοπούλια (sea birds), δακτυλιοσκήληκες (annelids), θαλάσσια θηλαστικά (marine mammals), δίθυρα (bivalves), ολοθούριοι (holothurians), βενθοπελαγικά ψάρια (demersal fish), καρκινοειδή (crustaceans), μεσοπελαγικά ψάρια (mesopelagic fish), ζωπλαγκτόν (zooplankton), επαναιωρούμενα μικροπλαστικών (resuspended microplastics), βύθιση προσαρτημένων μικροπλαστικών (fouled microplastics sinking) [52]

Προφανώς, η επίδραση των μικροπλαστικών δεν περιορίζεται μόνο σε φυτοπλαγκτονικά και ζωπλαγκτονικά είδη αλλά, κατά τη ροή της ύλης στην τροφική αλυσίδα, μεταφέρεται σε ανώτερους καταναλωτές και φυσικά στον άνθρωπο. Στη Μεσόγειο, τουλάχιστον 134 είδη πέφτουν θύματα της κατάποσης πλαστικών συμπεριλαμβανομένων 60 ειδών ψαριών, και των 3 ειδών χελωνών, 9 ειδών θαλασσοπουλιών και 5 ειδών θαλάσσιων θηλαστικών (φουσητήρες, πτεροφάλαινες, ρινοδέλφια, σταχτοδέλφια και ζωνοδέλφια). Σήμερα το 90% των θαλασσοπουλιών έχουν κάποιο μικρό κομμάτι πλαστικού στο στομάχι τους (το 1960 το ποσοστό αυτό ήταν

5%). Μέχρι το 2050 αυτό το ποσοστό μπορεί να έχει αγγίξει το 99%, αν δε ληφθεί δράση για τη μείωση των πλαστικών στη θάλασσα. Επίσης, το 18% των τόνων και των ξιφιών έχουν πλαστικά σκουπίδια στο στομάχι τους - κυρίως σελοφάν και PET - όπως και το 17% του είδους γαλέου *Galeus melastomus* στα νησιά των Βαλεαρίδων [31]. Τα παραπάνω είδη ψαριών αποτελούν τροφή και για τον άνθρωπο.

6.2.3 Επίδραση στο βένθος

Τα μικροπλαστικά αποτελούν επίσης μια σοβαρή απειλή για τα βενθικά οικοσυστήματα, καθώς συσσωρεύονται στα ιζήματα των πυθμένων. Τα βενθικά ιζήματα συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες μικροπλαστικών, καθιστώντας τα τελικά δεξαμενές μικροπλαστικού. Τα υψηλής πυκνότητας μικροπλαστικά κατακάθονται κατά μήκος της στήλης του νερού μέχρι το βένθος, ενώ τα χαμηλής πυκνότητας επιπλέουν στην επιφάνεια ή παραμένουν κατά μήκος της στήλης του νερού ώσπου αυξάνεται η πυκνότητά τους περισσότερο από αυτή του περιβάλλοντος νερού, οπότε τότε κατακάθονται κι αυτά. Η εναπόθεση μικροπλαστικών στον ωκεάνιο βυθό ενισχύεται από τη συσσώρευση οργανικών υπολειμμάτων στην επιφάνειά τους, την προσκόλληση φυτοπλαγκτόν και άλλων σωματιδίων καθώς και από την αποίκιση μικροβίων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω στις «πλαστικόσφαιρες».



Εικόνα 6.7: Διαγραμματική απεικόνιση πιθανής πορείας και βιολογικών αλληλεπιδράσεων των μικροπλαστικών στο θαλάσσιο / βενθικό οικοσύστημα – πρωτογενή πλαστικά (primary microplastics), δευτερογενή πλαστικά (secondary microplastics), κατακερματισμός (fragmentation), καθίζηση (sedimentation), βύθιση λόγω βιολογικής επικαθίσης και εποικισμού (sinking due to biofouling), αποσύνδεση από το βιολογικό φορέα (defouling), κατάποση με την τροφή (ingestion), επαναιώρηση (resuspension), βιοανάδευση (bioturbation), μεταφορά μέσω της τροφής (trophic transfer), προσρόφηση / εκρόφηση (adsorption / desorption)[58]

Όπως διαπιστώθηκε από μελέτες, η υπεράκτια μεταφορά μικροπλαστικών, οι ισχυρές παράκτιες καταιγίδες, η καταβύθιση του αλμυρού νερού καθώς και η κλιμακωτή

υφαλοκρηπίδα συμβάλλουν επίσης στη μεταφορά των μικροπλαστικών στα βενθικά ιζήματα. Η οριζόντια ή / και κατακόρυφη μεταφορά μικροπλαστικών από ρηχές παράκτιες περιοχές προς βαθιά ωκεάνια στρώματα επάγεται από όλες τις παραπάνω διαδικασίες. Τεράστιες ποσότητες μικροπλαστικών έχουν βρεθεί σε ωκεάνια ιζήματα, όπως έχει καταγραφεί από σοβαρά ρυπασμένες παράκτιες περιοχές, όπου τα μικροπλαστικά βρέθηκε να αποτελούν ως και το 3% του βάρους του ιζήματος [18].

Μικροπλαστικά καταγράφηκαν σε ιζήματα μεγάλου βάθους σε πολλές διαφορετικές περιοχές, όπως στο Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό, τον Νότιο Ατλαντικό Ωκεανό, τη Μεσόγειο Θάλασσα, τον Κόλπο της Γουινέας, τον Αρκτικό Ωκεανό, τον Ειρηνικό Ωκεανό και αλλού. Σε μία έρευνα του 2017 καταγράφηκε τεράστια ποσότητα μικροπλαστικών (42 - 6.595 μικροπλαστικά ανά κιλό) στο ιζήμα του Αρκτικού Ωκεανού, σε μεγάλο βάθος. Η μεγαλύτερη ποσότητα αυτών ήταν πολυαιθυλένιο (PE), πολυαμίδη (PA) και πολυπροπυλένιο (PP) [72, 17]. Ωστόσο, γενικά είναι λίγες οι μελέτες καταγραφής μικροπλαστικών σε ιζήματα μεγάλου βάθους. Αντίθετα, υπάρχουν πολλές μελέτες καταγραφής μικροπλαστικών σε ρηχά νερά, παράκτιες περιοχές, παραλίες και εκβολές ποταμών. Τα αποτελέσματα αυτών δείχνουν αφθονία μικροπλαστικών στα ιζήματα των παραλιών, των παράκτιων λιμνοθαλασσών και των ακτογραμμών [17, 73]. Το φορτίο και ο τύπος των μικροπλαστικών στα ιζήματα παράκτιων περιοχών εξαρτάται ισχυρά από τις δραστηριότητες των γειτονικών ανθρώπινων πληθυσμών. Σε γενικές γραμμές, το PE, το PP και το πολυαιθυλένιο μικρής πυκνότητας (LDPE) αποτελούν την κύρια κατηγορία μικροπλαστικών που εντοπίζονται στα ιζήματα των παραλιών και των παράκτιων περιοχών. Ωστόσο, υψηλότερης πυκνότητας ίνες πολυστυρένιου (PS) καταγράφονται συχνά σε παράκτιες περιοχές με αυξημένη εισροή πολυμερικού PS. Ανάλογα, υψηλές συγκεντρώσεις μικροϊνών που προέρχονται από υφάσματα καταγράφηκαν σε έρευνα του 2011 κοντά σε σημεία απόθεσης κέντρου επεξεργασίας λυμάτων [17]. Επιπλέον, η πλειοψηφία των ευρημάτων μικροπλαστικών στους Αρκτικούς πάγους αποτελούνταν από ίνες (περίπου 95%). Η τόσο μεγάλη αναλογία συνθετικών ινών στα ύδατα υποδεικνύει ότι είτε έχουν προέλθει από τις αποχετεύσεις, ως συστατικό των εκπλύσεων των πλυντηρίων, είτε από την τοπική δραστηριότητα των πλοίων και μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις από τα ρεύματα. Ακόλουθα των ινών σε πλήθος μικροπλαστικών μορφών στα ιζήματα είναι τα τεμάχια / κομμάτια. Μάλιστα, πολλοί ερευνητές μετά από έρευνα στα μικροπλαστικά των ιζημάτων, διαπίστωσαν και μία σχέση μεταξύ μεγέθους πολυμερούς και τύπου πλαστικού. Διαπιστώθηκε ότι όσο μειώνονταν το μέγεθος του τεμαχίου, το ποσοστό των PP πλαστικών αύξαινε, ενώ το ποσοστό των PE και PS μειώνονταν [18].

Οι οργανισμοί που τρέφονται από το υδάτινο εναιώρημα (θρυμματοφάγοι) ή από το ιζήμα (ιζηματοφάγοι) είναι οι κυρίαρχες βενθικές κοινότητες του ωκεάνιου βυθού. Αποκτούν την ενέργεια και τα θρεπτικά τους από τα υπολείμματα και το ιζήμα αντίστοιχα. Αυτοί οι οργανισμοί θα επηρεαστούν από την απόθεση μικροπλαστικών καταναλώνοντάς τα, ακριβώς όπως έχει αποδειχθεί για τους πελαγικούς θρυμματοφάγους. Ακόμη και οι οργανισμοί που ζουν στις παλιρροϊκές ζώνες, όπως τα αμφίποδα και οι θαλάσσιοι σκώληκες καταναλώνουν μικροπλαστικά και υποφέρουν κατά την πέψη από προβλήματα υγείας που επακολουθούν, όπως μειωμένους ρυθμούς επιβίωσης και μειωμένα ενεργειακά αποθέματα. Αρκετές μελέτες έχουν υποδείξει την ικανότητα των βενθικών οργανισμών, όπως οι πολύχαιτοι, τα δίθυρα και οι αστερίες να

καταπίνουν μικροπλαστικά από τον ωκεάνιο βυθό, με σοβαρές επακόλουθες επιπτώσεις στην υγεία τους. Οι βενθικοί οργανισμοί μπορούν επίσης να μεταβάλλουν τις ιδιότητες των μικροπλαστικών, καθώς και να τα μετακινούν σε μεγαλύτερα βάθη μέσα στα υποστρώματα (βιοανάδευση), ωστόσο αυτή η διαδικασία στα ωκεάνια υποστρώματα παραμένει ασαφής και ανεξερεύνητη [58].

6.2.4 Ξενικά είδη (alien species)

Με την ολοένα αυξανόμενη συγκέντρωση των μικροπλαστικών στους ωκεανούς όλου του κόσμου, δημιουργούνται περισσότερες ευκαιρίες για την εισβολή ξενικών ειδών. Τα μικροπλαστικά παρέχουν το μέσο μεταφοράς αυτών των ειδών και μπορούν έτσι να παίξουν σημαντικό ρόλο στη διασπορά πολλών θαλάσσιων οργανισμών σε νέα οικοσυστήματα. Αν και η μεταφορά θαλάσσιων οργανισμών πάνω σε μικροπλαστικά είχε διαπιστωθεί από πολύ νωρίς (από τις αρχές του 2000), το φαινόμενο της μεταφοράς ξενικών μικροοργανισμών πάνω σε τεμάχια πλαστικού (μικροπλαστικά) παραμένει σχετικά ανεξερεύνητο. Σε έρευνα του 2017 αποκαλύφθηκε η παρουσία του ξενικού παθογόνου βακτηρίου *Aeromonas salmonicida* που ευθύνεται για ασθένεια των ψαριών, πάνω σε μικροπλαστικά που εντοπίστηκαν στην Βόρεια Αδριατική, αποδεικνύοντας τη διασπορά των παθογόνων μικροβίων μέσω μικροπλαστικών. Το 2016 άλλη έρευνα είχε αποκαλύψει την παρουσία ειδών του παθογόνου βακτηρίου *Vibrio* σε πολλά τεμάχια μικροπλαστικών, επισημαίνοντας την ανάγκη για βιογεωγραφική ανάλυση των μικροπλαστικών [18, 17].

Ορισμένα φυσικά υλικά, όπως τα μακροφύκη, επίσης παρέχουν υπόστρωμα για τη διασπορά μικρών θαλάσσιων οργανισμών και μικροοργανισμών, αλλά δεν εμφανίζουν πρότυπο μεταφοράς ανάλογο με αυτό των μικροπλαστικών. Το πλαστικό έχει μεγαλύτερη διάρκεια ημιζωής συγκριτικά με τα περισσότερα επιπλέοντα υποστρώματα στη θάλασσα και μία υδροφοβική επιφάνεια που ευνοεί την μικροβιακή αποίκηση και το σχηματισμό βιοφιλμ / βιοϋμενίου, όπως περιγράφηκε και στην ενότητα «6.2.1 Πλαστικόσφαιρες». Συνεπώς, τα μικροπλαστικά αποτελούν μεγαλύτερη απειλή για τη διασπορά των ξενικών ειδών συγκριτικά με τα φυσικά υλικά. Ωστόσο, ο μηχανισμός μεταφοράς ξενικών ειδών από τα μικροπλαστικά και πώς αυτός διαφέρει σε σχέση με τον αντίστοιχο των φυσικών υλικών, δεν είναι ακόμη γνωστός, με αποτέλεσμα οι οικολογικές επιπτώσεις αυτής της μεταφοράς να μην μπορούν να οριστούν πλήρως. Ωστόσο παράμετροι όπως το μέγεθος, η τοποθεσία, ο τύπος του πλαστικού, η ποιότητα της επιφάνειας, η σταθερότητα στην περιστροφή και η πυκνότητα του υλικού, φαίνεται να παίζουν κρίσιμο ρόλο στη μετατροπή των πλαστικών σε «σχεδίες» εισβαλλόντων / ξενικών ειδών [55].

Τα ξενικά είδη μπορεί να επηρεάσουν ολόκληρες ταξινομικές βαθμίδες ή είδη ή ομάδες ειδών άμεσα, εισάγοντας ένα νέο ανταγωνιστή ή ένα νέο θηρευτή. Μπορούν επίσης να επιδράσουν έμμεσα μεταβάλλοντας τη σύνθεση του ενδιαιτήματος. Ανάλογα με τη θέση τους στην τροφική αλυσίδα, τα ξενικά είδη μπορούν να αλλάζουν την ποικιλία αλλά και την αφθονία των υπαρχόντων ειδών και από τη βάση της τροφικής πυραμίδας και από την κορυφή της. Μία μικρή αλλαγή στη σύνθεση των ειδών σε ένα τροφικό επίπεδο μπορεί να έχει πολύ σοβαρές συνέπειες σε όλο το οικοσύστημα, προκαλώντας

απώλεια ενδαιτήματος, αλλαγές στη διατροφή και τελικά εξαφάνιση κάποιων ενδημικών ειδών [55].



Εικόνα 6.8: Πλήθος ξενικών ειδών αποικίζουν μία πλαστική μπάλα που ξεβράστηκε στην ακτή [55]

6.2.5 Επίδραση στη θερμοκρασία και στις θερμικές ιδιότητες

Ένα ζήτημα που διερευνάται εδώ και μία δεκαετία περίπου, είναι αν η παρουσία μικροπλαστικών μπορεί να επιδράσει στη θερμοκρασία των ωκεανών. Τα πλαστικά μπορούν να απορροφήσουν την ηλιακή ακτινοβολία με αποτέλεσμα να αυξηθεί η θερμοκρασία τους. Αυτό μπορεί να έχει άμεση επίπτωση στην θερμοκρασία του περιβάλλοντός τους. Αυτή η επίπτωση δε φαίνεται να προκαλεί σημαντική αλλαγή στη θερμοκρασία του νερού, στα θαλάσσια περιβάλλοντα. Ωστόσο, η συγκέντρωση μικροπλαστικών αυξάνει με επιταχυνόμενο ρυθμό, και ακόμη και μια μικρή θερμοκρασιακή μεταβολή μπορεί να επιδράσει στη γονιμοποίηση, την επώαση και τις περιοδικές δραστηριότητες των θαλάσσιων οργανισμών [17, 31]. Για παράδειγμα, στα γλυκά νερά, η θερμοκρασία επηρέασε την τοξικότητα που είχαν τα μικροπλαστικά στα είδη *Daphnia magna* και *Daphnia pulex*, ενώ δεν είχε καμία επίπτωση στο είδος *Ceriodaphnia dubia*. Η εντοπισμένη αποίκιση μικροπλαστικών στους ωκεανούς μπορεί να μεταβάλει την θερμοκρασία σε περιορισμένη περιοχή, με αποτέλεσμα να προκληθούν αλλαγές σε επίπεδο πληθυσμού, κυρίως στους μικρότερους θαλάσσιους οργανισμούς, όπως το φυτοπλαγκτόν, τα φύκη και το ζωοπλαγκτόν [17].

Η τοξικότητα των μικροπλαστικών μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, μπορεί να αυξηθεί η βιοδιαθεσιμότητα βαρέων μετάλλων που συνδέονται με αυτά. Επίσης, η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να συμβάλει στη

διαδικασία αλλοίωσης των μικροπλαστικών. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τα μικροσκοπικά σωματίδια των μικροπλαστικών να γίνουν πιο κινητικά και να προκαλέσουν περισσότερη οξεία τοξικότητα. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας μπορεί να επηρεάσουν επίσης τα μικροβιακά ένζυμα των οποίων ο ρόλος θεωρείται θεμελιώδης για την ανακύκλωση των θρεπτικών [17, 35]. Ωστόσο, μένει περισσότερη έρευνα να γίνει ώστε να εκτιμηθεί ο βαθμός τοξικότητας των μικροπλαστικών σε περιβάλλον αυξημένης θερμοκρασίας.

6.3 Τρόποι ανθρώπινης πρόσληψης μικροπλαστικών

Η παρουσία των μικροπλαστικών οπουδήποτε στο περιβάλλον και σε καταναλωτικά αγαθά έχει οδηγήσει στην αναπόφευκτη έκθεση του ανθρώπου σε αυτά. Ωστόσο, οι συνέπειες στην υγεία της έκθεσής του στο πλαστικό δεν είναι πλήρως κατανοητές, αλλά πλέον υπάρχουν ισχυρές υποθέσεις για τους τρόπους έκθεσής του και τους μηχανισμούς τοξικότητας. Οι ηθικοί περιορισμοί, τα αυστηρά μέτρα βιο-ασφάλειας για τη χρήση ανθρώπινων δειγμάτων και οι περιορισμένες μέθοδοι ανίχνευσης, είναι οι λόγοι για τους οποίους η έκθεση των ανθρώπων σε μικροπλαστικά δεν είναι καλά μελετημένη. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα αν και οι επιπτώσεις των μικροπλαστικών στο θαλάσσιο περιβάλλον να έχουν αρχίσει να μελετώνται εδώ και τουλάχιστον 3 δεκαετίες, η επίδραση από τη βιοσυσσώρευση των μικροπλαστικών στον ανθρώπινο οργανισμό να είναι προϊόν μελέτης της τελευταίας δεκαετίας.

Το ανθρώπινο σώμα εκτίθεται στα μικροπλαστικά μέσω της κατάποσης της τροφής που περιέχει μικροπλαστικά, μέσω της εισπνοής μικροπλαστικών από τον αέρα και μέσω της δερματικής επαφής με αυτά, καθώς περιέχονται σε προϊόντα, υφάσματα ή στη σκόνη.

Πίνακας 6.1: Οι τύποι πλαστικών που συναντώνται κυρίως στο φυσικό περιβάλλον, οι χρήσεις τους και οι (πιθανές) επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία [24]

Τύπος πλαστικού	Επιδράσεις στην υγεία	Εφαρμογή / χρήση
PET	Πιθανά καρκινογόνο	Συσκευασίες τροφίμων και αναψυκτικών
PES	Προκαλεί δερματικά εξανθήματα, ερεθισμούς στην αναπνευστική οδό και στα μάτια	Υφάσματα, ίνες
PP		Κύπελλα, δοχεία, συσκευασίες γιαουρτιών, καλαμάκια, καπάκια μπουκαλιών
HIPS (High impact polystyrene)		Ηλεκτρονικές συσκευές, συσκευασίες φαγητού, επένδυση ψυγείου
PS	Προκαλεί αναισθησία και ζάλη, ερεθίζει το λαιμό, τη μύτη και τα μάτια. Αποθηκεύεται στο λίπος του σώματος και μεταναστεύει στο φαγητό. Αιμοποιητικοί καρκίνοι	CDs, μαχαιροπήρουνα, πιάτα, ποτήρια μιας χρήσης, συσκευασίες φαγητού
PVC	Δυσλειτουργία ήπατος, απώλεια όρασης, κώφωση, δερματικές	Films, πλαίσια παραθύρων, κουρτίνες μπάνιου, κατασκευές δαπέδου, υδρορροές,

	ασθένειες, έλκη, χρόνια βρογχίτιδα, μεταλλάξεις, επιπλοκές κύησης και καρκίνοι	υδραυλικές εγκαταστάσεις
LDPE		Films, κουρτίνες μπάνιου, πλακάκια δαπέδου, έπιπλα εξωτερικού χώρου
HDPE	Δομικές αλλαγές σε ανθρώπινα κύτταρα λόγω απελευθέρωσης οιστρογόνων	Μόνωση, σωλήνες, μπουκάλια απορρυπαντικών
PA (nylon)	Δυσλειτουργία συστημάτων οργάνων, πόνοι σπονδυλικής στήλης, πονοκέφαλος, ζαλάδα, δερματικές αλλεργίες και καρκίνοι	υφάσματα, εφαρμογές οχημάτων, χαλιά και αθλητική ένδυση
PC	Μετατροπές στην εγκεφαλική λειτουργία, το αναπαραγωγικό σύστημα και την αντίσταση στην ινσουλίνη, την ηπατική λειτουργία λόγω διαρροής Δισφαινόλης Α	Είδη κατασκευών, φακοί, φώτα φαναριών, παράθυρα ασφαλείας, ασπίδες, γυαλιά ηλίου, CDs.

6.3.1. Κατάποση μικροπλαστικών

Η κατάποση θεωρείται η κύρια οδός της έκθεσης του ανθρώπου στα μικροπλαστικά. Τα μικροπλαστικά εισέρχονται στην ανθρώπινη τροφική αλυσίδα με διαφορετικούς τρόπους. Αφενός τα ζώα καταναλώνουν μικροπλαστικά στο φυσικό τους περιβάλλον, και αφ' ετέρου κατά τη διαδικασία παρασκευής του φαγητού και μέσω της έκπλυσης πλαστικού υλικού από τις πλαστικές συσκευασίες φαγητού και ποτών καταλήγουν στα τρόφιμα και ποτά [56,57].

Όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα «4.1 Πλαστικά απόβλητα», σήμερα μικροπλαστικά έχουν ανιχνευθεί σε πολλά είδη τροφίμων και ποτών, όπως το αλάτι, η μύρα, το μέλι, η ζάχαρη, τα ψάρια, οι γαρίδες και τα δίθυρα. Επίσης, σύμφωνα με έρευνες, μικροπλαστικά υπάρχουν στο εμφιαλωμένο νερό, το νερό της βρύσης αλλά και στο νερό που συλλέχθηκε από πηγές [57]. Οι μέσες τιμές μικροπλαστικής ρύπανσης σε ορισμένα προϊόντα έχουν στατιστικά εκτιμηθεί ως εξής: θαλασσινά = 1,48 σωματίδια ανά γραμμάριο, ζάχαρη = 0,44 σωματίδια ανά γραμμάριο, μέλι = 0,10 σωματίδια ανά γραμμάριο, αλάτι = 0,11 σωματίδια ανά γραμμάριο, αλκοόλ = 32,27 σωματίδια ανά λίτρο, εμφιαλωμένο νερό = 94,37 σωματίδια ανά λίτρο, νερό βρύσης = 4,23 σωματίδια ανά λίτρο και αέρας = 9,8 σωματίδια ανά m³ [57]. Βασισμένη στην κατανάλωση τροφής, η εκτιμώμενη ποσότητα μικροπλαστικών σύμφωνα με έρευνα του 2019 ήταν 39.000-52.000 σωματίδια μικροπλαστικών ανά χρόνο και άτομο, ανάλογα με το φύλο και την ηλικία. Οι εκτιμήσεις αυτές αγγίζουν τα 74.000 έως 121.000 σωματίδια, αν προσμετρηθεί και η εισπνοή πλαστικών μικροσωματιδίων. Επιπλέον, κάθε ένας που προτιμά να πίνει αποκλειστικά και μόνο εμφιαλωμένο νερό μπορεί να προσλαμβάνει μέσω κατάποσης

ετησίως άλλα 90.000 μικροπλαστικά σωματίδια, σε αντίθεση με όσους προτιμούν το νερό της βρύσης που επιβαρύνονται με 4.000 κάθε χρόνο. Αν αναρωτηθεί κανείς τι ποσότητες μικροπλαστικών καταλήγουν στο στομάχι των παιδιών, τότε ο αριθμός φαίνεται να μειώνεται στα 40.000 ετησίως [56].

Τα μικροπλαστικά σωματίδια θα φτάσουν στο γαστρεντερικό σύστημα είτε μέσω της κατανάλωσης τροφής είτε μέσω της κάθαρσης του βλεννογόνου μετά την εισπνοή, πιθανόν οδηγώντας σε φλεγμονή, αυξημένη διαπερατότητα, και αλλαγές στη σύνθεση και το μεταβολισμό του μικροβιώματος του εντέρου [17,19]. Η έκθεση των ευρωπαίων πολιτών σε μικροπλαστικά μέσω της κατανάλωσης δίθυρων έχει εκτιμηθεί σε 11.000 μικροπλαστικά ανά άτομο και χρόνο (δεδομένα 2014) [29]. Επίσης, η κατανάλωση μικροπλαστικών μέσω του επιτραπέζιου αλατιού έχει εκτιμηθεί σε 37 και 100 μικροπλαστικά ανά άτομο και χρόνο σε Ευρώπη και Κίνα αντίστοιχα. Ωστόσο, πιο σύγχρονες έρευνες εκτιμούν ότι η ποσότητα της σκόνης που εναποτίθεται στα σκεύη κατά τη διάρκεια του γεύματος ίσως είναι πιο σημαντική από την ποσότητα των μικροπλαστικών που υπάρχουν ήδη στο φαγητό. Με ανάλογο τρόπο, εκτιμάται πως είναι δυσανάλογο το ενδιαφέρον για την περιβαλλοντική ρύπανση των τροφών σε σχέση με τη ρύπανση που προκύπτει από τη συσκευασία και τα πλαστικά δοχεία [19,56].

Μετά την κατάποση, τα μικροπλαστικά φαίνεται απίθανο να μπορούν να διεισδύσουν στο έντερο με παρακυτταρικό τρόπο, καθώς οι πόροι των πρωτεϊνικών καναλιών πάνω στις μεμβράνες των κυττάρων έχουν μέγιστο λειτουργικό μέγεθος περίπου 1,5 nm. Αντίθετα, είναι πιο πιθανό να απορροφώνται από εξειδικευμένα κύτταρα, που καλύπτουν το λεμφικό ιστό του λεπτού εντέρου, τις πλάκες Peyer, μέσω φαγοκυττάρωσης ή ενδοκύττωσης [57]. Τα αδιάλυτα σωματίδια μπορεί να ενσωματωθούν στη βλέννα του εντέρου αυξάνοντας τη διάλυτότητά τους μέσω της προσρόφησής τους σε συστατικά (πρωτεΐνες κυρίως) του εντέρου ή εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους. Μικροπλαστικά από πολυστυρένιο (PS) μεγέθους 14 nm έως και 415 nm βρέθηκαν σε τμήματα του εντέρου αρουραίου. Μεγαλύτερα μεγέθη, της τάξης των 1,09 μm δεν διαπιστώθηκαν [19]. Άλλος πιθανός μηχανισμός της ενσωμάτωσης σωματιδίων είναι η διάχυση, η μεταφορά δηλαδή των σωματιδίων μέσω του μονόστιβου επιθηλίου του εντέρου.

Τα μικροπλαστικά θα μπορούσαν να υπόκεινται σε αυτούς τους ίδιους μηχανισμούς μεταφοράς, καθώς η μεταφορά τους στο κυκλοφορικό σύστημα μετά την χορήγηση από το στόματος έχει αποδειχθεί *in vivo*. Από τη στιγμή της κατανάλωσης, τα μικροπλαστικά σωματίδια υφίστανται μετατροπές, οι οποίες επιδρούν στην ικανότητα αλλά και στους ρυθμούς απορρόφησής τους από άλλα μόρια. Υπάρχουν πολλά μόρια στη γαστροοισοφαγική οδό με τα οποία τα μικροπλαστικά τεμάχια μπορούν να αλληλεπιδράσουν (όπως λιπίδια, πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, ιόντα, νερό), και συχνά φαίνεται να περικλείονται από μία ομάδα πρωτεϊνών που σχηματίζει το λεγόμενο «στεφάνι» / «κορώνα» («corona»). Μάλιστα, ορισμένες έρευνες ακόμη και *in vitro* απέδειξαν ότι αυτά τα «στεφάνια» υφίστανται αλλαγές μέσα στη γαστροοισοφαγική οδό, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη μετατόπιση των μικροπλαστικών σωματιδίων (Εικόνα 6.9). Επιπλέον, οργανικό υλικό που βρίσκεται σε νερό θα προσκολληθεί στα μικροπλαστικά. Τελευταία, μελετήθηκε πώς το οργανικό υλικό που είναι διαθέσιμο θα αλληλεπιδράσει με μεταλλικά (οξείδια) μικροπλαστικά και φάνηκε πως αυτή η αλληλεπίδραση έχει σημαντική επίπτωση στην εναπόθεση των μικροπλαστικών σφαιριδίων [57].

Ενδεικτικά, μερικά από τα αποτελέσματα μελετών έδειξαν πως στους αρουραίους, το 6% του πολυστυρένιου (PS) μεγέθους 0,87 nm έφτασε στο κυκλοφορικό σύστημα σε 15 λεπτά μετά την από στόματος χορήγηση, ενώ η από στόματος έκθεση σε 1,25 mg/kg πολυστυρένιου (PS) μεγέθους 50 nm οδήγησε σε 34 % απορρόφηση, καθώς μεταφέρθηκε πιθανόν από το μεσεντέριο λεμφικό ιστό στο κυκλοφορικό σύστημα και συσσωρεύτηκε κυρίως στο ήπαρ. Επιπλέον, νανοσφαιρίδια μεγέθους 44 nm από PS ενσωματώθηκαν στο ανθρώπινο σώμα και ελευθερώθηκαν από ινοβλάστες στο κόλον παχύ έντερο μέσω παθητικής μεταφοράς κατά μήκος της κυτταρικής μεμβράνης. Όταν τα νανοσφαιρίδια PS των 44 nm ενσωματώθηκαν σε αδενοκαρκίνωμα στομάχου επηρέασαν τη γονιδιακή έκφραση, παρεμπόδισαν τη βιωσιμότητα του κυττάρου και προκάλεσαν προφλεγμονώδεις αντιδράσεις και μορφολογικές αλλαγές [19].

Είναι αξιοσημείωτο πως στις περισσότερες μελέτες τα πειράματα βασίζονταν σε μικροπλαστικά από PS και μόνο και απέκλειαν πλαστικά δείγματα που έχουν συλλεχθεί από θαλάσσια και χερσαία οικοσυστήματα. Άλλοι τύποι πλαστικών, όπως το PP, το PET, και το PE είναι ωστόσο, τα κύρια πολυμερή στο περιβάλλον. Συνεπώς, προκειμένου να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα, νέες εργαστηριακές μελέτες πρέπει να διεξαχθούν και με άλλου τύπου πλαστικά [57].

Η ανθρώπινη έκθεση στα μικροπλαστικά μέσω κατάποσης είναι πολύ πιθανή, καθώς η τροφή μας και το περιβάλλον είναι ρυπασμένα με αυτά. Ωστόσο, ο κίνδυνος από την κατάποση μικροπλαστικών δεν είναι σαφώς υπολογισμένος, αφού μικρή έρευνα έχει διεξαχθεί για την εκτίμηση της συνολικής ανθρώπινης έκθεσης και των συνεπειών της μακροχρόνια.

6.3.2 Εισπνοή μικροπλαστικών

Τα μικροπλαστικά ελευθερώνονται στον αέρα από πολλές πηγές εκπομπής, μεταξύ άλλων από τα συνθετικά υφάσματα, από τη διάβρωση των υλικών (λάστιχα αυτοκινήτων, κτίρια, έπιπλα) και από την επαναιώρηση τους σε επιφάνειες σε ό,τι αφορά στον εσωτερικό χώρο. Στον υπαίθριο χώρο, η έκθεση μπορεί να συμβεί αναπνέοντας ρυπασμένα αερολύματα που μεταφέρθηκαν με τα ωκεάνια κύματα ή μέσω αερομεταφερόμενων σωματιδίων από πολλές πηγές εκπομπής, φυσικές και ανθρωπογενείς, όπως βιομηχανικές δραστηριότητες, μεταφορές, μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και διαχείρισης στερεών απορριμμάτων και άλλες [57]. Μία μελέτη του 2017, από τις πρώτες που καθόρισαν την ποσότητα των αερομεταφερόμενων μικροπλαστικών, αναφέρει συγκεντρώσεις τους σε εξωτερικό χώρο της τάξης των 0,3 – 1,5 σωματίδια ανά m^3 και σε εσωτερικό χώρο 0,4 - 56,5 σωματίδια ανά m^3 (33% πολυμερή), περιλαμβάνοντας και εισπνεόμενα μεγέθη [19]. Η ατομική εισπνοή έχει υπολογιστεί σε 26 - 130 αερομεταφερόμενα σωματίδια μικροπλαστικού ανά ημέρα. Βασισμένοι σε μετρήσεις ατομικής εισπνοής από προσομοίωμα (μοντέλο μανεκέν), υπολογίστηκε ότι ένα αρσενικό άτομο με ήπια σωματική δραστηριότητα εισπνέει 272 μικροπλαστικά την ημέρα [56].

Οι διαφορετικοί υπολογισμοί σε πολλές μελέτες είναι αναμενόμενοι καθώς εξαρτώνται από διαφορετικές μεθοδολογίες δειγματοληψίας, όπως επίσης και από παράγοντες όπως οι χρήσεις του χώρου, το σύστημα καθαρισμού του αέρα, οι δραστηριότητες, τα υλικά των επίπλων και η εποχή. Οι ιδιότητες των σωματιδίων, όπως

το μέγεθος, η υδροφοβικότητα, το επιφανειακό φορτίο, οι πρωτεΐνες - στεφάνια (coronas) που θα συμβεί να βρεθούν τριγύρω και η πυκνότητα, είναι όλοι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την εναπόθεση και απορρόφηση των μικροπλαστικών από το αναπνευστικό σύστημα, με τα μικρότερα από 10 μm και λιγότερο πυκνά να φτάνουν βαθύτερα στους πνεύμονες [57].

Πρόσφατες μελέτες στην ανθρώπινη εισπνοή πλαστικών σωματιδίων υπέδειξαν πως η ατμοσφαιρική εναπόθεση είναι μία σημαντική αιτία έκθεσης του ανθρώπου σε αυτά. Μάλιστα, το κύριο συστατικό των μικροπλαστικών της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης τόσο σε αστικές περιοχές όσο και σε προάστια γύρω από το Παρίσι ήταν τα σωματίδια των συνθετικών ινών, όπου το 29% αυτών περιείχαν πετροχημικά. Στις αστικές περιοχές καταγράφηκε κατά μέσο διπλάσιος όγκος ατμοσφαιρικής εναπόθεσης συγκριτικά με τα προάστια, με τη βροχόπτωση να έχει κρίσιμο ρόλο στις καταγεγραμμένες αποθέσεις [57].

Μετά την ενσωμάτωση των μικροπλαστικών στους πνεύμονες, η φαγοκυττάρωση από τα μακροφάγα ή η μεταφορά μέσω του κυκλοφορικού ή του λεμφικού συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε μετατόπιση των σωματιδίων. Ωστόσο, η μεγάλη επιφάνεια των μικροπλαστικών σωματιδίων μπορεί να προκαλέσει την έντονη απελευθέρωση χημειοτακτικών παραγόντων που αποτρέπουν την μετανάστευση των μακροφάγων και αυξάνουν την διαπερατότητα, οδηγώντας σε χρόνια φλεγμονή (chronic inflammation), γνωστή ως «Υπερφόρτωση Σκόνης» (“dust overload”). Πράγματι, νανοσφαιρίδια PS (64 nm) οδήγησαν σε εισροή ουδετερόφιλων και φλεγμονή στους πνεύμονες αρουραίων καθώς και σε προ-φλεγμονώδη έκφραση γονιδίων στα επιθηλιακά κύτταρα εξαιτίας της επιβεβαιωμένης υψηλής οξειδωτικής δραστηριότητας που προκλήθηκε από τη μεγάλη επιφάνεια των σωματιδίων [19]. In vitro σωματίδια PVC 2 μm, προκάλεσαν σημαντική κυτταροτοξική δραστηριότητα σε αναπνευστικά κύτταρα αρουραίων και ανθρώπων καθώς και αιμόλυση (Εικόνα 6.9). Αναπνευστικά συμπτώματα που συνδέονται με την πάθηση στις αεροφόρες οδούς των πνευμόνων εντοπίζονται σε επαγγελματική έκθεση σε αερομεταφερόμενα σωματίδια στους εργαζόμενους στο συνθετικό ύφασμα και τα εργοστάσια βινυλ-χλωριδίου και πολυβινυλ-χλωριδίου. Επίσης, ίνες των 250 μm έχουν ανιχνευθεί σε βιοψίες ανθρώπινων πνευμόνων, περιλαμβανομένων των βιοψιών καρκίνων, αν και η γενεσιουργός αιτία δεν έχει ακόμη αποδειχθεί [19]. Τέλος, παραμένει σοβαρή πιθανότητα η μεταφορά παθογόνων μικροβίων από εκείνα τα μικροπλαστικά σωματίδια που λειτουργούν ως φορείς παρασίτων [57]. Έτσι, είναι πολύ πιθανό ότι υπό συνθήκες υψηλής συγκέντρωσης ή υψηλής ατομικής ευαισθησίας αερομεταφερόμενα μικροπλαστικά μπορούν να προκαλέσουν αλλοιώσεις στο αναπνευστικό σύστημα, όπως και μερική απόφραξη των αεραγωγών [17, 19, 57].

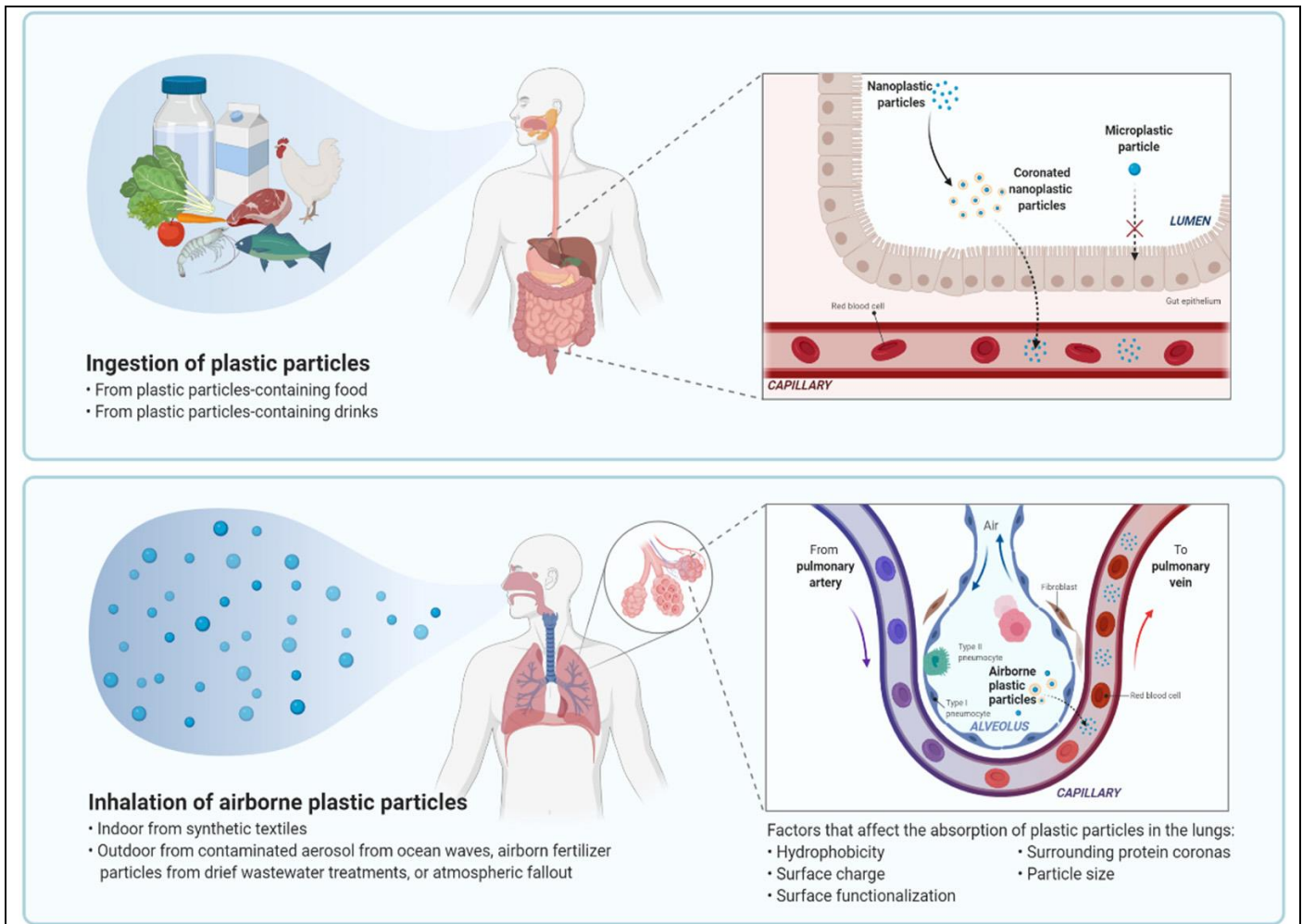
6.3.3 Δερματική έκθεση σε μικροπλαστικά

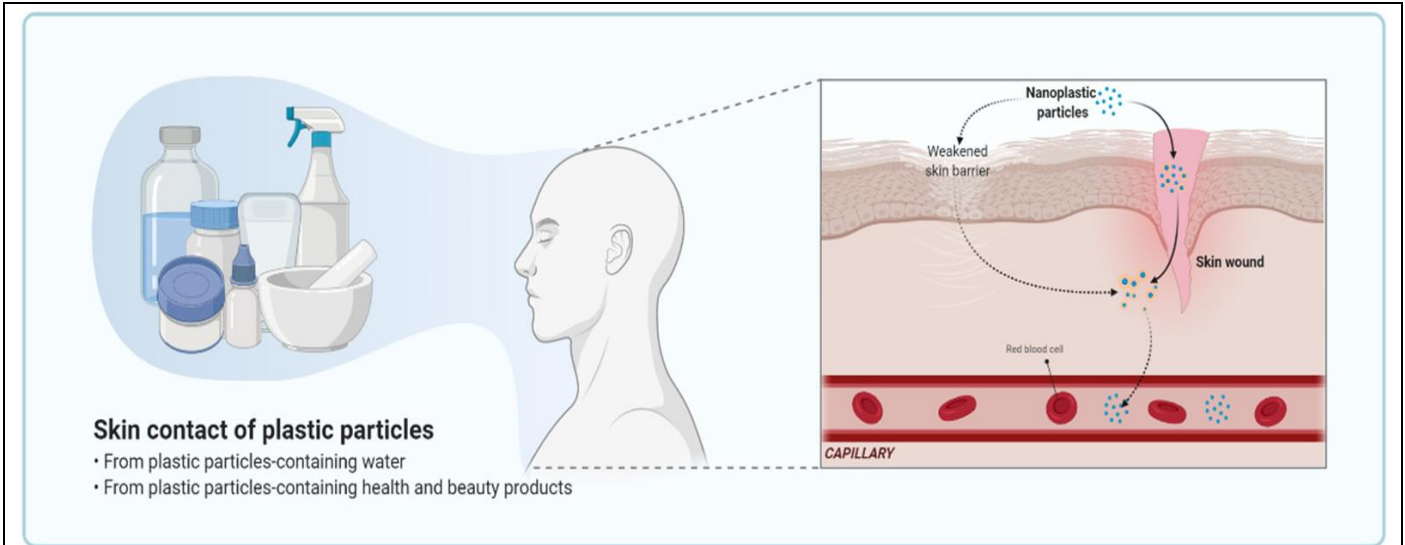
Η δερματική επαφή θεωρείται ο λιγότερο σημαντικός τρόπος έκθεσης του ανθρώπου στα μικροπλαστικά. Μικροπλαστικά σωματίδια μπορούν να εισαχθούν στο δέρμα μέσω προϊόντων υγείας και ομορφιάς ή μέσω της επαφής με νερό ρυπασμένο με πλαστικά σωματίδια. Καθώς τα μικροπλαστικά, όπως και τα νανοπλαστικά, είναι υδρόφοβα, η απορρόφησή τους από την κεράτινη στοιβάδα, τον εξωτερικό φραγμό του δέρματός μας, μέσω του νερού θεωρείται απίθανη. Αντίθετα θα μπορούσαν να

δισειδύσουν μέσω των ιδρωτοποιών αδένων, των τραυμάτων του δέρματος ή των θυλάκων των τριχών (Εικόνα 6.9) [57].

Παρόλα αυτά, η πιθανότητα τα νανοπλαστικά να μπορούν να διαπεράσουν το φραγμό του δέρματος και να προκαλέσουν τοξικότητα δεν πρέπει να εγκαταλειφθεί χωρίς αποδείξεις, ενώ είναι βέβαιο πως μέσω τραυματισμού ή φθαρμένων κυττάρων του δέρματος, τα μικροπλαστικά εισχωρούν [57]. Στη χειρουργική, τα πλαστικά είναι γνωστό ότι προκαλούν ήπια φλεγμονώδη αντίδραση και ινώδη ενθυλάκωση. Για παράδειγμα, τα χειρουργικά ράμματα από πλεγμένο πολυεστέρα και μονόστιβο πολυπροπυλένιο κατέληξαν σε ηπιότερη φλεγμονή από τα μεταξωτά μετά από 21 ημέρες. Ωστόσο, αν και από πολλές μελέτες συνάγεται ότι τα μικροπλαστικά και τα νανοπλαστικά θα μπορούσαν να προκαλέσουν φλεγμονή, οι διαφορές στις ιδιότητες των επιφανειών θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε διακριτά αποτελέσματα. Τα ανθρώπινα επιθηλιακά κύτταρα υφίστανται οξειδωτικό στρες εξαιτίας της έκθεσής τους σε μικροπλαστικά και νανοπλαστικά [19].

Συνεπώς, οι πιθανές παρενέργειες των νανοπλαστικών και η εκτεταμένη δερματική επαφή με πλαστικά σωματίδια (από τη σκόνη, τις συνθετικές ίνες και τα μικροσφαιρίδια των καλλυντικών) υποστηρίζουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σε αυτό το πεδίο.



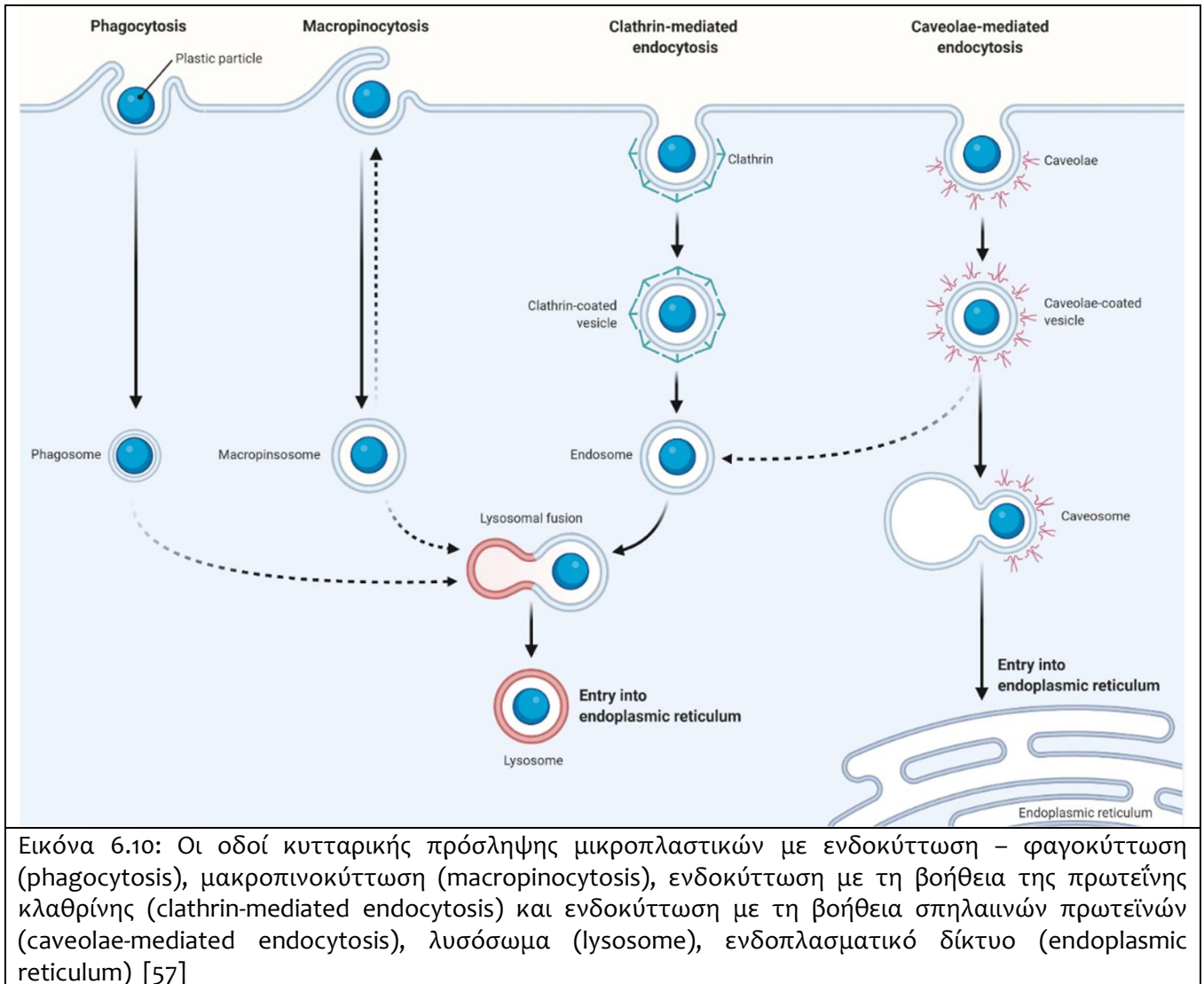


Εικόνα 6.9 : Αθροιστικά, οι τρόποι έκθεσης του ανθρώπινου οργανισμού σε μικροπλαστικά και νανοπλαστικά (αριστερά) και η μεταφορά τους στα τριχοειδή αιμοφόρα αγγεία (capillary) μέσω του εντέρου (επάνω δεξιά), των κυψελίδων του πνεύμονα (alveolus, στο μέσο δεξιά), και του δέρματος (skin, κάτω δεξιά) : κατάποση (ingestion of plastic particles), εισπνοή αερομεταφερόμενων πλαστικών σωματιδίων (inhalation of airborne plastic particles), δερματική επαφή (skin contact of plastic particles), όπως περιγράφονται στις ενότητες 6.3.1 έως και 6.3.4 και παρουσιάζονται σχηματικά στη δεξιά πλευρά της εικόνας [57]

6.4 Κυτταρική πρόσληψη και ενδοκυτταρική πορεία των μικροπλαστικών

Τα μικροπλαστικά μπορούν να απορροφηθούν από τα κύτταρα με πολλούς τρόπους. Ο κυριότερος από αυτούς είναι η ενδοκύττωση, δηλαδή η προσκόλληση στην πλασματική μεμβράνη ή η αλληλεπίδραση με πρωτεΐνες - κανάλια της μεμβράνης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό κυστιδίου μέσα στο οποίο εγκολπώνεται το σωματίδιο και τελικά εισάγεται στο κύτταρο - στόχο. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι ενδοκύττωσης, που όλοι έχει ελεγχθεί πειραματικά ότι λειτουργούν στην περίπτωση της απορρόφησης των μικροπλαστικών, και οι οποίες είναι [57]:

- η φαγοκυττάρωση,
- η μακρο-πινοκύττωση, και
- η ενδοκύττωση που λειτουργεί με τη βοήθεια των πρωτεϊνών - καναλιών, όπως η πρωτεΐνη κλαθρίνη (clathrin-mediated endocytosis) και οι σπηλαιΐνες πρωτεΐνες (caveolins, caveolae-mediated endocytosis) (Εικόνα 6.10).



Εικόνα 6.10: Οι οδοί κυτταρικής πρόσληψης μικροπλαστικών με ενδοκύττωση – φαγοκύττωση (phagocytosis), μακροπινοκύττωση (macropinocytosis), ενδοκύττωση με τη βοήθεια της πρωτεΐνης κλαθρίνης (clathrin-mediated endocytosis) και ενδοκύττωση με τη βοήθεια σπηλαιών πρωτεϊνών (caveolae-mediated endocytosis), λυσόσωμα (lysosome), ενδοπλασματικό δίκτυο (endoplasmic reticulum) [57]

6.5 Οδοί τοξικότητας των μικροπλαστικών στον άνθρωπο

Τα μικροπλαστικά που κάποτε θεωρούνταν αδρανή σωματίδια, σήμερα αντιμετωπίζονται ως πιθανοί κίνδυνοι για τους οργανισμούς, ανάλογα με το βαθμό έκθεσης και την ευαισθησία του ατόμου. Η μεγάλη επιφάνεια επαφής των μικροπλαστικών μπορεί να οδηγήσει σε οξειδωτικό στρες και απόπτωση των κυττάρων, σε κυτταροτοξικότητα και σε διαταραχή του κυτταρικού μεταβολισμού, ενώ η ανθεκτική τους φύση περιορίζει την απομάκρυνσή τους από τον οργανισμό, οδηγώντας σε χρόνια φλεγμονή η οποία αυξάνει τον κίνδυνο καρκινογένεσης [57] (Πίνακας 6.2). Από την άλλη πλευρά, τα μικροπλαστικά ως συστατικά των αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν επίσης να εμπλέκονται στην αυξημένη εμφάνιση ασθενειών του ανοσοβιολογικού συστήματος ή νευροεκφυλιστικών ασθενειών. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μπορεί να ελευθερώνουν χημικές ουσίες, από τα υποστρώματά τους ή αυτές που έχουν απορροφήσει από το περιβάλλον ή, τέλος, να δρουν ως φορείς επικίνδυνων μικροβίων [19], όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στην Ενότητα «6.2.4 Ξενικά είδη».

Πίνακας 6.2: Συγκεντρωτικά, οι πιθανές τοξικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών και νανοπλαστικών στην ανθρώπινη υγεία [57]

Τοξικές επιπτώσεις	Χαρακτηριστικά τοξικών σωματιδίων	Μέγεθος σωματιδίου	Λεπτομέρειες
Φλεγμονή	Σωματίδια πολυστυρένιου	202 nm, 535 nm	Αύξηση της ρύθμισης του IL-8
	Καρβοξυλιωμένα νανοσωματίδια πολυστυρένιου	20 nm - 1000 nm	Επαγωγή φλεγμονής σε ανθρώπινα A549 κύτταρα πνεύμονα Αύξηση της ρύθμισης του IL-8 και του IL-6
	Καρβοξυλιωμένα και αμινο-τροποποιημένα νανοσωματίδια πολυστυρένιου	120 nm	Τροποποιημένη έκφραση των υποδοχέων καθαρισμού (scavenger receptors) Αυξημένη παραγωγή IL-10 στα κύτταρα M2
	Σωματίδια πολυαιθυλενίου	0,3 μm, 10 μm	Αυξημένη έκκριση IL-6, IL-1β, TNFa σε μακροφάγα ποντικού
	Σωματίδια πολυαιθυλενίου από πλαστικά εμφυτεύματα	0,2 μm, 10 μm	Επαγωγή έκφρασης των IL-1, TNFa και RANKL Απορόφηση οστού περιπροσθετικά
	Μικροπλαστικά σωματίδια πολυστυρένιου	5 μm, 20 μm	Επαγωγή φλεγμονής στο συκώτι Αρνητικές επιδράσεις στη μεταβίβαση νευρικής ώσης
Οξειδωτικό στρες και απόπτωση	Αμινο-τροποποιημένα νανοσωματίδια πολυστυρένιου	60 nm	Ισχυρή αλληλεπίδραση και συσσωμάτωση με βλέννα Επαγωγή απόπτωσης σε όλα τα εντερικά επιθηλιακά κύτταρα
	Κατιονικά νανοσωματίδια πολυστυρένιου	60 nm	Επαγωγή αυτοφαγίας σε μακροφάγα και επιθηλιακά κύτταρα πνευμόνων ποντικού
	Λειτουργικές ομάδες PVC και PMMA	20 nm - 140 nm	Μειωμένη επιβίωση κυττάρου με μείωση του ATP και αύξηση των συγκεντρώσεων ROS
	Πρωτογενή και φθορίζοντα μικροπλαστικά πολυστυρένιου	5 μm	Αλλαγή στο μεταβολισμό αμινοξέων και χολικού οξέος Επαγωγή δυσβίωσης στη μικροχλωρίδα του εντέρου
Μεταβολική ομοίωση	Ανιονικά καρβοξυλιωμένα νανοσωματίδια πολυστυρένιου	20 nm	Ενεργοποίηση αντλιών K ⁺ στην κυτταρική μεμβράνη Εκροή ιόντων Cl ⁻ και HCO ³⁻
	Νανοσωματίδια πολυστυρένιου	30 nm	Παρεμπόδιση μεταφοράς κυστιδίων
	Κατιονικά νανοσωματίδια πολυστυρένιου	50 nm, 200 nm	Μείωση των ηπατικών επιπέδων ATP
	Πρωτογενή μικροπλαστικά πολυστυρένιου	5 μm, 20 μm	Επιδείνωση του ενεργειακού μεταβολισμού
	Μικροπλαστικά	0,5 μm, 5 μm	Μεταβολικές διαταραχές σχετιζόμενες με τη μικροχλωρίδα του εντέρου Αυξημένος κίνδυνος μεταβολικών δυσλειτουργιών στους απογόνους

6.5.1 Οξειδωτικό στρες και κυτταροτοξικότητα

Οι υπερβολικές αντι-οξειδωτικές αντιδράσεις μπορεί να οδηγήσουν σε οξειδωτικό στρες. Τα μικροπλαστικά μπορεί να είναι η αιτία αυτού του οξειδωτικού στρες, που προκαλείται από τη μεγάλη επιφάνεια επαφής τους, την απελευθέρωση υψηλής δραστηριότητας μορίων που έχουν προσροφηθεί στην επιφάνειά τους (όπως μέταλλα) ή εξαιτίας των δραστικών μορφών οξυγόνου που απελευθερώνονται κατά τη φλεγμονώδη αντίδραση. Για παράδειγμα, οξειδωτικό στρες μετά την έκθεση σε μικροπλαστικά έχει καταγραφεί στο ψάρι ζέβρα και στα ποντίκια. Μετά την εισαγωγή πρόσθετων πολυπροπυλενίου (PP), καταγράφηκε οξεία φλεγμονώδης αντίδραση που κορυφώθηκε με την απελευθέρωση οξειδωτικών ουσιών (π.χ. υπεροξειδίου του υδρογόνου) προκαλώντας υποβάθμιση, υδρόλυση, διάσπαση και πρόσθετη απόπλυση του πολυμερούς, παράγοντας ουσιαστικά ένα θετικό βρόγχο ανατροφοδότησης με την παραγωγή ελεύθερων ριζών και αποκαλύπτοντας έτσι ένα πιθανό μηχανισμό απομάκρυνσης του πλαστικού από τον ανθρώπινο οργανισμό [19].

Η κυτταροτοξικότητα είναι το αποτέλεσμα της τοξικότητας των σωματιδίων, του οξειδωτικού στρες και της φλεγμονής. Η κυτταρική ενσωμάτωση των μικροπλαστικών έχει περιγραφεί για μικροπλαστικά πολυστυρενίου PS σε κυτταρικές καλλιέργειες, περιλαμβάνοντας μακροφάγα, ερυθροκύτταρα και επιθηλιακά κύτταρα των κυψελίδων του πνεύμονα των αρουραίων. Στο εσωτερικό του κυττάρου, τα μικροπλαστικά δε συνδέονται με την πλασματική μεμβράνη, πιθανόν αλληλεπιδρώντας με άλλα κυτταρικά οργανίδια, όπως το Λυσόσωμα ή το Αδρό Ενδοπλασματικό Δίκτυο (Εικόνα 6.10). Σε *in vitro* πειράματα αποκαλύφθηκε η κυτταροτοξικότητα που προκαλούν τα μικροπλαστικά που συλλέχθηκαν από το περιβάλλον. Αντίθετα, έκθεση εγκεφαλικών και επιθηλικών ανθρώπινων κυττάρων σε σωματίδια PS και πολυαιθυλενίου PE συγκέντρωσης 0,05 - 10 mg/L δεν ήταν ικανή να προκαλέσει λύση του κυττάρου αλλά αυξημένη συγκέντρωση δραστικών μορφών οξυγόνου (ROS - Reactive Oxygen Species), συμβάλλοντας στην κυτταροτοξικότητα. Επιπλέον, η έκθεση κυτταρικών καλλιιεργειών μακροφάγων και επιθηλιακών κυττάρων του πνεύμονα σε PS των 60 nm προκάλεσε ROS και στρες στο ενδοπλασματικό δίκτυο, καθώς συσσωρεύτηκαν πρωτεΐνες που δεν είχαν αναδιπλωθεί σωστά, οδηγώντας σε αυτοφαγία [57]. Συνεπώς, η κυτταροτοξικότητα και το οξειδωτικό στρες μπορεί να είναι σημαντικοί μηχανισμοί της τοξικότητας των μικροπλαστικών.

6.5.2. Διαταραχή της Ομοιόστασης και του Μεταβολισμού

Η Ομοιόσταση επηρεάζεται από την ισορροπία μεταξύ της διαθέσιμης ενέργειας, μέσω πρόσληψης ή αποθεμάτων, και της δαπάνης. Πολλές μελέτες έχουν δείξει ότι τα μικροπλαστικά ίσως έχουν επίδραση στην ενεργειακή αυτή ομοιόσταση. Για παράδειγμα, μικροπλαστικά μπορεί να μειώσουν την πρόσληψη ενέργειας εξαιτίας:

- (α) μειωμένης τροφικής δραστηριότητας,
- (β) μειωμένης δραστηριότητας θήρευσης, που πιθανόν οφείλεται σε νευροτοξικότητα,
- (γ) έλλειψης στην πεπτική ικανότητα λόγω μετουσίωσης των πεπτικών ενζύμων,

με αποτέλεσμα να παρατηρείται μειωμένη πρόσληψη θρεπτικών. Από την άλλη, τα μικροπλαστικά μπορεί να έχουν αντίθετα αποτελέσματα, αυξάνοντας την πρόσληψη τροφής ως αποτέλεσμα της αυξημένης ενεργειακής απαίτησης ή της μειωμένης ικανότητας απορρόφησης, όπως παρατηρείται στα ποντίκια. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μπορεί να οδηγήσουν σε αρνητικό ισοζύγιο ενέργειας, χάρη στην αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση [57].

Σε *in vivo* μελέτες στα μικροπλαστικά, η αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση έχει παρατηρηθεί ως αποτέλεσμα [19]:

(α) ενεργοβόρων φλεγμονωδών αντιδράσεων,

(β) αυξημένου χρόνου παραμονής στο έντερο, με αυξημένο ενεργειακό κόστος,

(γ) αυξημένων μηχανισμών έκκρισης, όπως η έκκριση αμμωνίας ή η παραγωγή κοπράνων ή διάρροιας.

Η απώλεια των ενεργειακών αποθεμάτων κατά 50% σε θαλάσσια σκουλήκια και η σημαντική μείωση του βάρους του ήπατος σε ποντίκια, έχουν παρατηρηθεί δευτερογενώς μετά την έκθεση σε μικροπλαστικά [19].

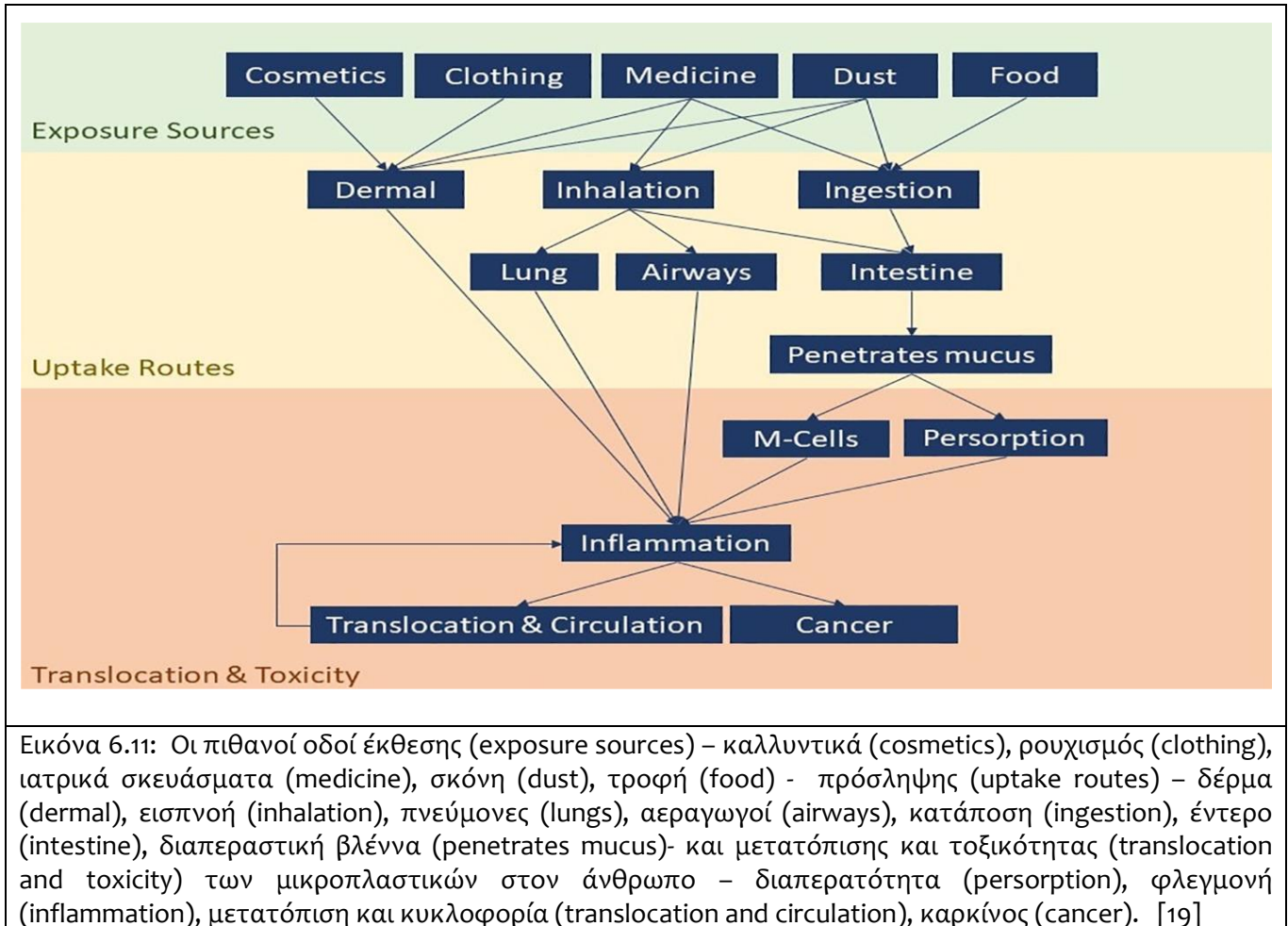
Τα μικροπλαστικά μπορούν επίσης να προκαλέσουν και μεταβολικές διαταραχές, απευθείας ή δευτερογενώς, με επιπτώσεις, όπως είναι το αρνητικό ενεργειακό ισοζύγιο. Για παράδειγμα, η έκθεση ψαριών και ποντικών σε μικροπλαστικά κατέληξε σε αύξηση της γαλακτικής αφυδρογονάσης (LDH - Lactate dehydrogenase), ενός αναερόβιου ενζύμου. Στα ψάρια *Dicentrarchus labrax* έκθεση σε 45 nm πολυμεθυλμεθακρυλικών σωματιδίων προκάλεσε τροποποίηση στους υποδοχείς των υπεροξειδιοσωμάτων που σχετίζονται με την κινητοποίηση ενεργειακών αποθεμάτων. Επιπλέον, στο ήπαρ των ποντικών προκάλεσε μείωση των επιπέδων ATP (Adenosine 5'-triphosphate, Τριφωσφορική αδενοσίνη) και μειωμένο μεταβολισμό των λιπών [19].

Στον άνθρωπο, τα μικροπλαστικά μπορεί να έχουν παρόμοιες επιδράσεις, αυξάνοντας την ενεργειακή δαπάνη, μειώνοντας την πρόσληψη θρεπτικών ή τροποποιώντας τον μεταβολισμό. Ωστόσο, η παρατήρηση τέτοιων επιπτώσεων ίσως είναι περιορισμένη εξαιτίας των χαμηλών συγκεντρώσεων έκθεσης και των υψηλών ενεργειακών αναγκών των ανθρώπων, συγκριτικά με τους υπό εξέταση οργανισμούς.

6.5.3 Μετατόπιση μικροπλαστικών στο κυκλοφορικό σύστημα και σε μακρινούς ιστούς

Μετά την έκθεση, τα μικροπλαστικά μπορεί να δράσουν τοπικά ή να μετατοπιστούν σε απομακρυσμένους ιστούς. Η μετατόπιση αυτή είναι εξαιρετικά πιθανή κατά την φλεγμονώδη αντίδραση, εξαιτίας της αυξημένης διαπερατότητας των επιθηλιακών φραγμών. Ο γαστρεντερικός βλεννογόμος μπορεί να έχει επίσης αυξημένη διαπερατότητα ως αποτέλεσμα κακής διατροφής ή / και διατροφής πλούσιας σε κορεσμένα λίπη και σάκχαρα υψηλής φρουκτόζης (μέσω αλλαγών στο μικροβίωμα του εντέρου). Η μετατόπιση μικροπλαστικών έχει αναφερθεί σε αρουραίους μετά την εισπνοή και πέψη των μικροπλαστικών, οδηγώντας μέσω της κυκλοφορίας σε μακρινούς ιστούς, όπως η σπλήνα και το ήπαρ. Στους ανθρώπους, σε ένα μοντέλο έγχυσης του πλακούντα φάνηκε ότι μικροπλαστικά PS μεγέθους 240 nm ήταν ικανά να διαπεράσουν το όριο του

πλακούντα. Η ενσωμάτωση αρνητικά φορτισμένων PS νανοσφαιριδίων μεγαλύτερων του 1 nm έχει επίσης επιβεβαιωθεί σε κυτταρικές καλλιέργειες [35].



Τα μικροπλαστικά στην κυκλοφορία του αίματος μπορεί να προκαλέσουν φλεγμονή, πνευμονική υπέρταση, αποφράξεις αγγείων, αυξημένη πηκτικότητα και κυτταροτοξικότητα των κυττάρων του αίματος. Σε μελέτες *in vitro* μικροπλαστικά PS (≤ 243 nm) οδήγησαν σε συσσώρευση και συγκόλληση τελικά των ερυθροκυττάρων, ενώ μεγέθη των 20 μm και 25 – 200 μm PP αύξησαν την αιμόλυση και οδήγησαν σε έκκριση ισταμίνης. Τα μικροπλαστικά που περνούν στην κυκλοφορία του αίματος μπορεί να φτάσουν στο συκώτι και τα νεφρά, όργανα υπεύθυνα για το μεταβολισμό και την έκκριση άχρηστων ουσιών. Σε πείραμα με φθορισμένα μικροπλαστικά PS μεγέθους 5 μm και 20 μm που χορηγήθηκαν σε ποντίκια δια στόματος με σκοπό να ελεγχθεί η κατανομή στους ιστούς φάνηκε ότι συσσωρεύτηκαν στο ήπαρ, στους νεφρούς και στο έντερο, με ενδείξεις οξειδωτικού στρες, διαταραχών στο ενεργειακό ισοζύγιο και νευροτοξικότητας. Τα μικρότερα σωματίδια (5 μm) συγκεντρώθηκαν κυρίως στο έντερο, ενώ τα μεγαλύτερα κατά μήκος των ιστών. Στον άνθρωπο, τα PS (44 nm) ενσωματώθηκαν, τόσο μέσω ενδοκύττασης όσο και διάχυσης, στα επιθηλιακά κύτταρα του φλοιού των νεφρών χωρίς επιπτώσεις στην επιβίωση των κυττάρων, το μεταβολισμό ή την εξέλιξη του κυτταρικού

κύκλου. Ωστόσο, είχαν συγκεντρωθεί στην περιοχή γύρω από τον πυρήνα και 90 λεπτά μετά δεν υπήρχαν σημάδια εκκαθάρισής τους. Μετά από ένα όριο, συνεχής συσσώρευση σωματιδίων στα νεφρικά κύτταρα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποβάθμιση της νεφρικής λειτουργίας. Σε μακρινούς ιστούς, οι ίδιοι μηχανισμοί που περιγράφονται παραπάνω ισχύουν επίσης, οδηγώντας σε δυσμενείς επιπτώσεις, φλεγμονές και αυξημένο κίνδυνο νεοπλασιών. Για παράδειγμα, όταν φτάνουν στα οστά PS και PE σωματίδια είναι ίσως υπεύθυνα για την απώλεια οστικής μάζας λόγω αυξημένης δραστηριότητας των οστεοκλαστών. Τέλος, μοντέλο τοξικοκινητικότητας- τοξικοδυναμικότητας στους αρουραίους για σωματίδια PS 5 μm και 20 μm προβλέπει υψηλότερη βιοσυσσώρευση στο ήπαρ και οι συγκεντρώσεις που υπολογίζονται ως όριο για τον άνθρωπο κυμαίνονται μεταξύ 53,3 mg/g και 5,1 mg/g σωματικού βάρους, για το μικρότερο και το μεγαλύτερο μέγεθος αντίστοιχα [19].

6.5.4 Διαταραχή της ανοσολογικής λειτουργίας

Μετά την έκθεση, τα μικροπλαστικά σωματίδια μπορεί να προκαλέσουν τοπικές ή συστηματικές ανοσολογικές αντιδράσεις, που εξαρτώνται από τη διασπορά τους στο σώμα. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις (για παράδειγμα σε γενετική ευαισθησία) η περιβαλλοντική έκθεση είναι αρκετή για να διαταράξει την ανοσολογική λειτουργία, ευνοώντας την ανάπτυξη αυτοάνοσων νοσημάτων ή ανοσοκαταστολής. Αυτοάνοσα νοσήματα μπορεί να προκληθούν από την εισπνοή σωματιδιακού υλικού που ακολουθείται από τους μηχανισμούς της μεταφοράς σε άλλα σημεία του σώματος, οξειδωτικού στρες, ελευθέρωση ανοσορυθμιστικών πρωτεϊνών και ενεργοποίηση των κυττάρων της άμυνας, με αποτέλεσμα την έκθεση σε αυτο-αντιγόνα και την παραγωγή αυτο-αντισωμάτων [35]. Για παράδειγμα, σύμφωνα με μελέτες του 2015 και 2016, η έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια φαίνεται να συνδέεται με την εμφάνιση ρευματοειδούς αρθρίτιδας [74, 19] και του συστηματικού ερυθρεματος [75, 19]. Ταυτόχρονα, σε πειράματα *in vivo* έχει καταγραφεί προσωρινή ανοσοκαταστολή σε νεογνά ποντίκια μετά την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονταν από καύση, ως αποτέλεσμα μικρότερης ενεργοποίησης των δενδριτικών κυττάρων, παραγωγή IL-10 (αντιφλεγμονώδεις κυτοκίνες) και την καταστολή λειτουργίας των T βοηθητικών λεμφοκυττάρων στην ενεργοποίηση από αυτά των T κυτταροτοξικών. Τα μικροπλαστικά, ως συστατικά των αιωρούμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα θα μπορούσαν να συμβάλλουν σε αυτή την διαταραχή της ανοσολογικής λειτουργίας αν και αυτό δεν έχει ακόμη αποδειχτεί για τους ανθρώπους [19]. Παρόλα αυτά, στα μύδια *Mytilus* spp παρουσιάζεται ανοκαταστολή και τροποποίηση της ανοσολογικής απόκρισης μετά την έκθεση σε μικροπλαστικά [58]. Συνεπώς, περαιτέρω έρευνα είναι απαραίτητη για τη διερεύνηση της ανοσολογικής επίπτωσης στο ανοσοβιολογικό σύστημα.

6.5.5 Νευροτοξικότητα και αυξημένη εμφάνιση νευροεκφυλιστικών ασθενειών

Η έκθεση σε ρύπους μπορεί να οδηγήσει σε νευροτοξικότητα, η οποία συνδέεται με νευροεκφυλιστικές ασθένειες. Η νευροτοξικότητα έχει αναφερθεί σε πειράματα *in vivo*

μετά την έκθεση σε αιωρούμενα σωματίδια, πιθανόν λόγω του οξειδωτικού στρες και της ενεργοποίησης των νευρογλοιακών κυττάρων του εγκεφάλου, εξαιτίας της άμεσης επαφής με τα σωματίδια που μεταφέρθηκαν εκεί ή εξαιτίας της επαφής τους με προφλεγμονώδεις κυτοκίνες που βρίσκονταν στην κυκλοφορία του αίματος. Το αποτέλεσμα ήταν η καταστροφή νευρώνων [57]. Η έκθεση σε ρύπους μέσω του κυκλοφορικού συστήματος, που περιλαμβάνουν και τα αιωρούμενα σωματίδια, έχει συνδεθεί με ήπια βλάβη της γνωστικής λειτουργίας στους ηλικιωμένους, με αποτέλεσμα να αυξάνει ο κίνδυνος εμφάνισης της ασθένειας Alzheimer και της συχνότητας εμφάνισης άνοιας. Μέσω των ίδιων μηχανισμών, και πάντα ανάλογα με την ευπάθεια του κάθε ατόμου, τα μικροπλαστικά θα μπορούσαν να συμβάλλουν σε αυξημένη συχνότητα νευροεκφυλιστικών ασθενειών. Σε *in vivo* πειράματα τοξικότητας, τα μικροπλαστικά φαίνεται να επηρεάζουν τη νευρωνική λειτουργία και συμπεριφορά. Στον εγκέφαλο του Ευρωπαϊκού λαβρακιού *Dicentrarchus labrax*, έχει αναφερθεί ότι τα μικροπλαστικά προκαλούν αναστολή της ακετυλοχολινεστερινάσης, (AChE - Acetyl Cholinesterase), οξειδωτικό στρες με αύξηση των λιπιδικών επιπέδων στο υπεροξειδιοσώματα και αύξηση επίσης στην αναερόβια παραγωγή ενέργειας. Στο ίδιο είδος, η έκθεση σε μικροπλαστικά έχει φανεί ότι επηρεάζει την κολυμβητική δραστηριότητα, το οποίο αποτελεί ένδειξη συμπεριφοράς. Η έκθεση σε PS μικροπλαστικά έχει επίσης αναφερθεί να προκαλεί δυσμενείς συνέπειες στη νευροδιαβίβαση των ποντικών, όπως αυξημένη δραστηριότητα της AChE και αλλαγές στους νευροδιαβιβαστές του πλάσματος. Σε *in vitro* μελέτες χρησιμοποιώντας νευρικά κύτταρα, η προσθήκη νανοσφαιριδίων PS 40-70 nm έδειξε ότι προκάλεσαν τοξικότητα και αλλαγές στη μεταβολική δραστηριότητα, ανάλογα με τον τύπο του κυττάρου και τη συγκέντρωση, με αυξημένη τοξικότητα μετά από μακρές περιόδους παραμονής των σφαιριδίων PS [19].

Η αποδεδειγμένη νευροτοξικότητα σε πειράματα επαφής των μικροπλαστικών με κύτταρα και οργανισμούς σε συνδυασμό με την ανθρώπινη έκθεση σε αερομεταφερόμενα σωματίδια, των οποίων τα μικροπλαστικά αποτελούν βασικό συστατικό, αναδεικνύει την ανάγκη να διερευνηθεί πώς τα μικροπλαστικά μπορεί να εμπλέκονται στην νευροτοξικότητα στους ανθρώπους, η οποία συμβάλει σε αυξημένο κίνδυνο εμφάνισης νευροεκφυλιστικών ασθενειών.

6.5.6 Τα μικροπλαστικά ως φορείς ασθενειών και πιθανών τοξικών χημικών ουσιών

Εκτός της τοξικότητας, τα μικροπλαστικά μπορεί να παρουσιάζουν επίσης βιολογικό κίνδυνο. Μονομερή και πρόσθετα μπορεί να διαφύγουν από τη μήτρα του μικροπλαστικού μέσα στον οργανισμό, εκθέτοντας τους ιστούς σε χημικές ενώσεις, όπως είναι οι φθαλικές ενώσεις και η δισφαινόλη Α που είναι γνωστοί ενδοκρινικοί διαταράκτες, δηλαδή ακόμη και σε ελάχιστες συγκεντρώσεις παρεμβαίνουν στη φυσιολογική λειτουργία του ενδοκρινικού συστήματος. Εκτός των συστατικών τους, η μεγάλη επιφάνεια επαφής των μικροπλαστικών τα καθιστά ικανά να λειτουργήσουν ως φορείς μικροβίων ή χημικών ουσιών με τις οποίες έρχονται σε επαφή. Για παράδειγμα, σημαντικής επίδρασης ρύποι από το περιβάλλον όπως οι πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs) και τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCBs) έχουν αναγνωριστεί πάνω σε μικροπλαστικά. Όταν καταναλώνονται, τα μικροπλαστικά εκθέτουν τους

οργανισμούς σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις αυτών των επικίνδυνων ρύπων [35]. Ωστόσο, η έκθεση σε αυτούς τους ρύπους μέσω των μικροπλαστικών μοιάζει αμελητέα σε σχέση με αυτή από την πρόσληψη μέσω της τροφής. Παρόλα αυτά, η επίδραση στην ανθρώπινη υγεία από πρόσθετα, μονομερή και προϊόντα διάσπασης που προκύπτουν από τα πλαστικά και τα μικροπλαστικά, πρέπει να διερευνηθεί περισσότερο.

Οι μικροοργανισμοί μπορούν επίσης να εποικίσουν την επιφάνεια των μικροπλαστικών, όπως για παράδειγμα το παθογόνο βακτήριο *Vibrio spp*, όπως συζητήθηκε στις ενότητες 6.2.1 και 6.2.4 . Σε αυτή την περίπτωση, τα μικροπλαστικά λειτουργούν ως φορείς, μεταφέροντας μικρόβια στους ανθρώπινους ιστούς, προστατεύοντάς τα μικρόβια από το ανοσοβιολογικό σύστημα των οργανισμών και τελικά προκαλώντας βλάβη, η οποία μπορεί να ευνοήσει τη μόλυνση. Επιπλέον, τα μικροπλαστικά μετέβαλλαν και αύξησαν τελικά την ποικιλία του μικροβιώματος στο έντερο εδαφόβιων οργανισμών (του εξάποδου *Folsomia candida*). Η ίδια επίδραση μπορεί να προκύψει και στους ανθρώπους, μετά την πέψη σημαντικού αριθμού μικροπλαστικών. Οι μεταβολές στο εντερικό μικροβίωμα μπορεί να έχουν δυσμενείς συνέπειες, όπως είναι ο πολλαπλασιασμός παθογόνων ειδών, η αύξηση της εντερικής διαπερατότητας και η ενδοτοξιναιμία [19].

Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι αρνητικές επιπτώσεις από την απελευθέρωση χημικών ή μικροβίων που έχουν προσροφηθεί σε μικροπλαστικά είναι ισχυρά εξαρτημένες από τον τύπο του μικροπλαστικού, το χρόνο εκκαθάρισης και τη μεταφορά του στους ιστούς, από τον ρυθμό απελευθέρωσης και την έκταση του ρύπου καθώς και από τη μεταφορά του μέσω του κυκλοφορικού συστήματος και τις συνέπειές του [19,57].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η έρευνα αυτή υλοποιήθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας μου στο Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Τεχνολογιών και Εφαρμογών του Τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών, το οποίο είναι το επισπεύδον Τμήμα του πρώην Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος Τ.Ε. και ανήκει στη Σχολή Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου (ΕΛΜΕΠΑ). Κατά κύριο λόγο έγινε βιβλιογραφική αναζήτηση σε άρθρα επιστημονικών περιοδικών, σε εκδόσεις της ΕΕ και ιστοσελίδες σχετικά με το πρόβλημα της πλαστικής ρύπανσης, το ισχύον και το προηγούμενο νομοθετικό πλαίσιο, την έκταση της επιστημονικής έρευνας για τα μικροπλαστικά και τις επιπτώσεις τους στην υγεία και το περιβάλλον.

Όπως προκύπτει από όλες τις παραπάνω ενότητες, το ζήτημα της ρύπανσης από πλαστικά αποτελεί κορυφαίας σημασίας θέμα τόσο για την αισθητική, την οικονομία και την ηθική μας απέναντι στα διαφορετικά οικοσυστήματα του φυσικού περιβάλλοντος όσο και για την υγεία όλων των ζώντων οργανισμών συμπεριλαμβανομένου και του ίδιου του ανθρώπου. Τα τελευταία χρόνια η έρευνα στρέφεται προς τη διερεύνηση και του προβλήματος των μικροπλαστικών, όπως και των ακόμη μικρότερων νανοπλαστικών, που φέρουν τις ιδιότητες των πρωτογενών πλαστικών από τα οποία προήλθαν, αλλά και την δυνατότητα να βρίσκονται παντού, σε κάθε σημείο του οικοσυστήματος αλλά και του ανθρώπινου σώματος. Προς το παρόν επιβεβαιωμένα γνωρίζουμε πως οι οργανισμοί καταναλώνουν πλαστικά, εξαιτίας των οποίων είτε θα οδηγηθούν στο θάνατο είτε θα γίνουν φορείς των πλαστικών τεμαχίων προς τα υπόλοιπα μέλη της τροφικής αλυσίδας. Γνωρίζουμε επίσης βασικές οδούς μεταφοράς των μικροπλαστικών στο σώμα των οργανισμών και τις βασικές παρενέργειες που μπορούν αυτά να προκαλέσουν, στα πλαίσια της βραχυπρόθεσμης παρατήρησης και καταγραφής τους στα επιστημονικά εργαστήρια. Επίσης, ως αυτή τη στιγμή η σχετική έρευνα έχει προκαλέσει τόσο έντονα το παγκόσμιο ενδιαφέρον, που διεθνείς οργανισμοί και φορείς όπως η ΕΕ, νομοθετούν δεσμευτικά προς την κατεύθυνση της μείωσης της χρήσης των πλαστικών.

Δυστυχώς, αν και φαίνεται πως οι συνθήκες ευνοούν πιο τολμηρά βήματα, αυτή η περίοδος χρονικά συμπίπτει με την πανδημία COVID-19, που έχει αυξήσει την ανάγκη για προϊόντα μιας χρήσης (μάσκες μίας χρήσης, γάντια, συσκευασίες φαγητού - ποτού). Ενδεικτικά, μόνο τον Φεβρουάριο 2019 στην Κίνα η ανάγκη για προϊόντα ατομικής προστασίας μίας χρήσης αυξήθηκε από γιατρούς και νοσηλευτικό προσωπικό ως και 12 φορές [64]. Τέτοιες κινήσεις θέτουν εκτός στόχου τα προγράμματα περιορισμού των πλαστικών και φυσικά αφήνουν τεράστιο οικολογικό αποτύπωμα για πολλά χρόνια.

Είναι προφανής η ανάγκη για διεξοδικότερη έρευνα στις πηγές των πλαστικών και μικροπλαστικών που τα οδηγούν στο περιβάλλον, στις συνέπειες που οι οργανισμοί υφίστανται από αυτά, τα μικροπλαστικά και τα νανοπλαστικά, και εν γένει την καλύτερη κατανόηση των επιπτώσεών τους. Επίσης, υπολείπεται η έρευνα σχετικά με τις μεθόδους για αποτελεσματικότερη ανακύκλωση ή και με το σχεδιασμό τεχνολογιών που θα μπορούσαν να παγιδεύουν τα μικροπλαστικά πριν διαφύγουν από τις πηγές εκπομπής τους, όπως για παράδειγμα από τα συστήματα αποχέτευσης. Ταυτόχρονα όμως, είναι ανάγκη να παρθούν αποτελεσματικότερα και πιο αυστηρά μέτρα για την ώθηση στην παραγωγή και κατανάλωση βιοαποδομήσιμων πλαστικών, την αποτελεσματικότερη

διαλογή με βάση το είδος του πλαστικού και, τελικά, στην μονόδρομη πορεία προς την κυκλική οικονομία, όπου κάθε προϊόν που κατασκευάζεται ισοδυναμεί με μία πρώτη ύλη και ένα ποσό ενέργειας πολύτιμο και αναντικατάστατο, και ως τέτοιο πρέπει να εκτιμηθεί. Ο υπερ-καταναλωτισμός της κοινωνίας έχει ακριβό κόστος, και στην περίπτωση των πλαστικών, δυστυχώς, αυτό το πληρώνουν πρώτοι οι αμέτοχοι πληθυσμοί στα φυσικά οικοσυστήματα.

Η διεθνής συνεργασία είναι καθοριστικής σημασίας για την αντιμετώπιση του ζητήματος αυτού. Οι ωκεανοί και οι θάλασσες αποτελούν παγκόσμιο αγαθό και κοινή κληρονομιά και, αν δεν αντιστραφεί η παρούσα τάση, οι συνέπειες που θα υποστούν οι μελλοντικές γενιές που θα κληρονομήσουν τα υποβαθμισμένα θαλάσσια οικοσυστήματα θα είναι τραγικές για την ανθρώπινη υγεία. Με βάση αυτά, κατά τη γνώμη μου, οφείλουμε να είμαστε αισιόδοξοι, μαχητικοί και υποστηρικτικοί τόσο στη στοχευμένη έρευνα όσο και στην υλοποίηση σχετικών δράσεων / νομοθετημάτων ατομικής και κοινωνικής ευθύνης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Wikipedia, 2021. Πλαστικό. Διαθέσιμο από <https://el.wikipedia.org/wiki/πλαστικό> (προσβάσιμο 17/5/2021)
2. Οικονόμου Ν., Στεφανίδου Μ., Μαυρίδου Σ., 2013. Ειδικά θέματα δομικών υλικών, Ενότητα: Πλαστικά υλικά, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη
3. Bloomberg the company and it's products, 2018. World' s Plastic Burden: Weight of a Billion African elephants, Διαθέσιμο από <https://www.bloomberquint.com/charts/worlds-plastic-burden-weight-of-a-billion-african-elephants#!/homepage>, (προσβάσιμο 18/5/2021)
4. General Kinematics, 2020. The life cycle of plastic. Διαθέσιμο από <https://www.generalkinematics.com/blog/the-life-cycle-of-plastic/> (προσβάσιμο στις 18/5/2021)
5. Coastal Care, 2019. When the mermaids cry: the great plastic tide. Διαθέσιμο από <https://plastic-pollution.org/> (προσβάσιμο στις 15/5/2021)
6. Konieczna Al., Rutkowska A., Rachoń D., 2015. Health risk of exposure to Bisphenol A (BPA), National Institute of Public Health 661, 5-11
7. European Environment Agency, 2020. Biodegradable and compostable plastics- challenges and opportunities. Διαθέσιμο από <https://www.eea.europa.eu/publications/biodegradable-and-compostable-plastics/biodegradable-and-compostable-plastics-challenges> (προσβάσιμο στις 18/5/2021)
8. Yale Environment 320, 2020. Why bioplastics will not solve the World's Plastics Problem. Διαθέσιμο από <https://e360.yale.edu/features/why-bioplastics-will-not-solve-the-worlds-plastics-problem> (προσβάσιμο στις 18/5/2021)
9. BBC, 2019. "why biodegradables won't solve the problem". Διαθέσιμο από <https://www.bbc.com/future/article/20191030-why-biodegradables-wont-solve-the-plastic-crisis> (προσβάσιμο στις 20/6/2021)
10. Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2015. Το κλείσιμο του κύκλου- ένα σχέδιο δράσης της ΕΕ για την κυκλική οικονομία. Διαθέσιμο από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614> (προσβάσιμο στις 17/5/2021)
11. ΑΗΠΙ, 2020. Κυκλική οικονομία. Διαθέσιμο από <https://www.ahpi.gr/kykliki-oikonomia/>. (προσβάσιμο στις 18/5/2021)
12. Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2018. Ευρωπαϊκή στρατηγική για τις πλαστικές ύλες σε μια κυκλική οικονομία. Διαθέσιμο από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=COM:2018:28:FIN> (προσβάσιμο στις 17/5/2021)
13. ΟΕΒ Κύπρου, (Χαραλάμπους Ανθή), 2020. Πλαστικά και μετάβαση στην κυκλική οικονομία: προκλήσεις και προοπτικές. Διαθέσιμο από <http://cypruscircular.oeb.org.cy/> (προσβάσιμο στις 17/5/2021)
14. «Αρχιπέλαγος», 2020. Επικίνδυνη η έκταση της πλαστικής ρύπανσης στις ελληνικές θάλασσες, ΔΤ . Διαθέσιμο από: <https://archipelago.gr/epikindyni-i-ektasi-tis-plastikis-rypansis-tis-ellinikes-thalasses/>, (προσβάσιμο στις 15/5/2021)
15. Ryan G. P. et al., 2009, Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment, Philosophical transactions of the Royal Society (364), 1999-2012
16. Deng L. et al., 2020, Public attitudes towards microplastics: perceptions, behaviors and policy implications, Resources, Conservation & Recycling (163), 105096

17. Khalid N., Aqeel M., Noman A., Hashem M., Mostafa Y. S., Alhaithloul H. A. S., Alghanem S. M., 2021, *Linking effects of microplastics to ecological impacts in marine environments*, Chemosphere (264) Part 2, 128541, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128541>
18. Akdogan Z., Guven B., 2019, *Microplastics in the environment: A critical review of current understanding and identification of future research needs*, Environmental Pollution 254, Part A, 113011, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113011>
19. Prata J.C., P. da Costa J., Lopes I., Duarte A. C., Rocha-Santos T., 2020, *Environmental exposure to microplastics: An overview on possible human health effects*, Science of Total Environment 702, review, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134455>
20. Bucknall D., 2020, *Plastics as a materials system in a circular economy*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 378, no. 2176, 20190268, <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0268>
21. Payne J., McKeown P., Jones M. D., 2019, *A circular economy approach to plastic waste*, Polymer Degradation and Stability, 165, ISSN 0141-3910, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.05.014>
22. Chidambarampadmavathy K., Karthikeyan O. P., Heinmann K., 2017, *Sustainable bio-plastic production through landfill methane recycling*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.71, 555-562, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.083>
23. ΝΑΥΤΕΜΠΟΡΙΚΗ, 2019. WWF: Η Ελλάδα εξακολουθεί να θάβει το μεγαλύτερο μέρος των πλαστικών αποβλήτων της. Διαθέσιμο από <https://www.naftemporiki.gr/story/1450888/wwf-i-ellada-eksakolouthei-na-thabei-to-megalutero-meros-ton-plastikon-apobliton-tis>. (προσβάσιμο στις 15/05/2021)
24. Ilyas M., Ahmad W., Khan H., Yousaf S., Khan K., Nazir S., 2018, *Plastic waste as a significant threat to environment – a systematic literature review*, Rev Environ Health (334), 383-406, <https://doi.org/10.1515/reveh-2017-0035>
25. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L., 2017, *Production, use, and fate of all plastics ever made*, Research Article, Science Advances, vol.3, no.7, 1700782
26. UNEP, 2014. *Valuing Plastics: The Business Case for Measuring, Managing and Disclosing Plastic Use in the Consumer Goods Industry*. Διαθέσιμο από <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9238> (προσβάσιμο στις 15/5/2021)
27. UNEP, 2018. *Our planet is drowning in plastic pollution- it's time for change!* Διαθέσιμο από <https://www.unep.org/interactive/beat-plastic-pollution/> (προσβάσιμο στις 15/5/2021)
28. Εφημερίδα των Συντακτών, 2019. *Στην εποχή των πλαστικών*. Διαθέσιμο από https://www.efsyn.gr/nisides/213538_stin-epohi-ton-plastikon (προσβάσιμο στις 15/5/2021)
29. WWF, 2019. *Η περιβαλλοντική νομοθεσία στην Ελλάδα, ειδική ενότητα: ΠΛΑΣΤΙΚΑ*. Διαθέσιμο από https://www.contentarchive.wwf.gr/images/pdfs/WWF_NOMO2019.pdf (προσβάσιμο στις 15/5/2021)
30. WWF, 2018. *Αποφεύγοντας την παγίδα των πλαστικών- Σώζοντας τη Μεσόγειο από την Πλαστική Ρύπανση*, αναφορά. Διαθέσιμο από <https://www.contentarchive.wwf.gr/images/pdfs/med-plastic-report.pdf> (προσβάσιμο στις 15/5/2021)
31. WWF, 2018. *The lifecycle of plastics*. Διαθέσιμο από <https://www.wwf.org.au/news/blogs/the-lifecycle-of-plastics#gs.1hbwfu> (προσβάσιμο στις 16/5/2021)

32. wikipedia, 2021. Plastic. Διαθέσιμο από <https://en.wikipedia.org/wiki/Plastic#Additives> (προσβάσιμο στις 16/5/2021)
33. Hermabessiere L., Dehaut A., Paul-Pont I., Lacroix C., Jezequel R., Soudant P., Duflos G., 2017. Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: A review. Chemosphere (182), 781-793, ISSN 0045-6535, <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.096>
34. Thompson R. C., Moore C. J., vom Saal F. S., Swan S. H., 2009. Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends, Review. Philosophical Transactions of the Royal Society B (364), 2153-2166, doi:10.1098/rstb.2009.0053
35. Net S., Sempere R., Delmont A., Paluselli A., Ouddane B., 2015. Occurrence, fate, behavior and ecotoxicological state of phthalates in different environmental matrices, Environ Sci Technol. 49 (7), ISSN 4019-35, doi: 10.1021/es505233b
36. ΤΑ ΧΗΜΙΚΑ ΣΤΗ ΖΩΗ ΜΑΣ, 2020. Διαφαινόλη Α. Διαθέσιμο από <https://chemicalsinourlife.echa.europa.eu/el/bisphenol-a> (προσβάσιμο στις 16/5/2021)
37. EUR-lex-access to European union Law, 2020. Council Regulation (EEC) No 793/93 of 23 of March 1993 on the evaluation and control of the risks of existing substances. Διαθέσιμο από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31993R0793> (προσβάσιμο στις 16/5/2021)
38. ECHA, European Chemicals Agency, Ενδοκρινικοί Διαταράκτες. Διαθέσιμο από <https://echa.europa.eu/el/hot-topics/endocrine-disruptors> (προσβάσιμο 17/5/2021)
39. Leonidis TOOLS & PLASTICS, Υλικά. Διαθέσιμο από <https://leonidis.gr/ilika/>. (Προσβάσιμο στις 18/5/2021)
40. Pspatial Audio, 2020. Polyvinyl chloride (PVC) and other stuff... what are records made of? Διαθέσιμο από <http://pspatialaudio.com/pvc.htm>. (προσβάσιμο 18/5/2021)
41. Aire plastics, Plastics manufacturing Solutions, 2016. Everything you ever wanted to know about polyethelene but were afraid to ask. Διαθέσιμο από <https://www.aireplastics.com/plastic-types-polyethylene/>. (Προσβάσιμο 18/5/2021)
42. PNG EGG, 2021. PET bottle recycling_text_textile. Διαθέσιμο από <https://www.pngegg.com/en/png-tzcpj> (προσβάσιμο στις 19/5/2021)
43. Schyns Z. O G. et al., 2020. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A REVIEW, MACROMOLECULAR RAPID COMMUNICATIONS, 42, 2000415-2000442
44. HIS Markit, 2020. Chemical recycling of plastic wastes- an new business opportunity in the Arabian gulf. Διαθέσιμο από <https://ihsmarkit.com/research-analysis/chemical-recycling-of-plastics-waste.html> (προσβάσιμο στις 18/5/2021)
45. Song B. and Hall P., 2020. Densification of Biomass and Waste Plastic Blends as a Solid Fuel: Hazards, Advantages, and Perspectives. Mini REVIEW article. Front. Energy Res. 8:58, <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00058>
46. Bioplastics, 2020. The future of Food packaging. Διαθέσιμο από <http://bioplastics-future.eu/how-to-make-bioplastic/> (προσβάσιμο στις 19/5/2021)
47. Bioplastics magazine, 2017. Bioplastics : a growing success. διαθέσιμο από <https://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/04122017-Bioplastics-a-growing-success.php> (προσβάσιμο στις 19/5/2021)
48. PSCI education, 2020. Single use Plastic and Alternatives. Διαθέσιμο από <https://psci.princeton.edu/tips/2020/3/30/single-use-plastic-amp-alternatives> (προσβάσιμο στις 19/5/2021)

49. Εφημερίδα των Συντακτών, 2019. Στον οργανισμό μας 50.000 μικροσωματίδια πλαστικού κάθε χρόνο. Διαθέσιμο από https://www.efsyn.gr/epistimi/epistimonika-nea/224710_ston-organismo-mas-50000-mikrosomatidia-plastikoy-kathe-hrono (προσβάσιμο στις 27/5/2021)
50. Wong B. B. M. and Candolin U., 2015. Behavioral responses to changing environments. Behavioral Ecology, 26(3), 665-673. <https://doi.org/10.1093/beheco/aru183>
51. GRID ARENDAL, A UNEP Partner, 2018. How plastics enter the food web. Διαθέσιμο από <https://www.grida.no/resources/6904> (προσβάσιμο στις 27/5/2021)
52. GRID ARENDAL, A UNEP Partner, 2018. How microplastics are generated. Διαθέσιμο από <https://www.grida.no/resources/6929> (προσβάσιμο στις 27/5/2021)
53. GRID ARENDAL, A UNEP Partner, 2016. Which plastics sink and which float in seawater? Διαθέσιμο από <https://www.grida.no/resources/6930> (προσβάσιμο στις 27/5/2021)
54. School of Aquatic and Fishery Sciences, College of the Environment, University of Washington, 2018. A hitchhiker's guide to the ocean. Διαθέσιμο από <https://sites.uw.edu/bevanseries/2018/03/06/a-hitchhikers-guide-to-the-ocean/> (προσβάσιμο στις 18/6/2021)
55. Εφημερίδα των Συντακτών, 2019. Πόσα μικροπλαστικά φάγαμε σήμερα; Διαθέσιμο από https://www.efsyn.gr/nisides/199759_posa-mikroplastika-fagame-simera (προσβάσιμο στις 18/6/2021)
56. Yee, M.S.-L.; Hii, L.-W.; Looi, C.K.; Lim, W.-M.; Wong, S.-F.; Kok, Y.-Y.; Tan, B.-K.; Wong, C.-Y.; Leong, C.-O, 2021. Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health. Nanomaterials, 11(2): 496. DOI:10.3390/nano11020496
57. Norwegian Institute for Water Research, 2014. Microplastics in marine environments: Occurrence, distribution and effects. REPORT. Διαθέσιμο από <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M319/M319.pdf> (προσβάσιμο στις 18/6/2021)
58. Charitou A., Aga-Spyridopoulou R. N., Mylona Z., Beck R., McLellan F., Addamo A. M., 2021. Investigating the knowledge and attitude of the Greek public towards marine plastic pollution and the EU Single-Use Plastics Directive. Marine Pollution Bulletin, 166, 112182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112182>
59. Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2019. Οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου σχετικά με τη μείωση των επιπτώσεων ορισμένων πλαστικών προϊόντων στο περιβάλλον. Διαθέσιμο από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019L0904&qid=1624183443645&from=EN#d1e771-1-1>. (προσβάσιμο στις 20/06/2021)
60. European Commission- Press Release, 2018. Single-use Plastics: New EU rules to reduce marine litter, Διαθέσιμο από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content> (προσβάσιμο στις 20/6/2021)
61. LAWSPOT, 2020. Απαγόρευση πλαστικών μίας χρήσης : Δημοσιεύθηκε ο νόμος 4736/2020 για την ενσωμάτωση της οδηγίας 2019/904. Διαθέσιμο από <https://www.lawspot.gr/nomika-nea/apagoreysi-plastikon-mias-hrisis-dimosieythike-o-nomos-4736-2020-gia-tin-ensomatosi-tis> . (προσβάσιμο στις 20/6/2021)
62. EOAN, 2021. Πλαστική Σακούλα Μεταφοράς. Διαθέσιμο από https://www.eoan.gr/wp-content/uploads/EOAN_ENHMEROTIKO/%CE%A0%CE%9B%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9

[A%CE%97_%CE%A3%CE%91%CE%9A%CE%9F%CE%A5%CE%9B%CE%91_2021_%CE%94%CE%95%CE%A0%CE%95_final.pdf](#) (προσβάσιμο στις 20/6/2021)

63. Tanveer M. Adyel, 2020. *Accumulation of plastic waste during COVID-19*. INSIGHTS, Science, Vol 369, Issue 6509, 11 September 2020, p.1314

64. Γ.Κ. ΡΙΖΑΚΟΣ Α.Β.Ε.Τ.Ε. ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ, ΜΟΝΩΣΗ, ΔΟΜΗΣΗ, ΔΙΑΚΟΣΜΗΣΗ. Διαθέσιμο από <https://www.rizakos.gr/enimerosi/downloads/item/80-diogkomeno-polystylenio.html> (προσβάσιμο στις 26/7/2021)

65. ISO4U, 2021. ΕΛΟΤ EN 13432. Διαθέσιμο από <https://iso4u.gr/13432> (προσβάσιμο στις 21/8/2021)

66. TÜV AUSTRIA, 2018. Πιστοποίηση της βιοαποικοδομησιμότητας των πλαστικών. Διαθέσιμο από <https://tuvaustriahellas.gr/ypiresies/vioapikodomisima-plastika-ok-compost-ok-biograde-seedling/> (προσβάσιμο στις 21/8/2021)

67. ISO, 2021. ISO17088:2012 *Specifications for compostable plastics*. Διαθέσιμο από <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:17088:ed-2:v1:en> (προσβάσιμο στις 21/8/2021)

68. ISO, 1995. ISO11734:1995 *Water quality – evaluation of the “ultimate” anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge – method by measurement of the biogas production*. Διαθέσιμο από <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11734:ed-1:v1:en> (προσβάσιμο στις 21/8/2021)

69. Yang C.Z., Yaniger S.I., Jordan V. C., Klein D. J. and Bittner G. D., 2011. *Most Plastic Products Release Estrogenic Chemicals: A Potential Health Problem That Can Be Solved*. *Environmental Health Perspectives*, 119 (7). <https://doi.org/10.1289/ehp.1003220>

70. Chapron, L., Peru, E., Engler, A., Ghiglione, J., Meistertzheim, A., Pruski, A., Purser, A. V_ etion, G., Galand, P., Lartaud, F., 2018. *Macro-and microplastics affect coldwater corals growth, feeding and behaviour*. *Sci. Rep.* 8, 1e8.

71. Doyle, D., Frias, J., Nash, R., Gammell, M., 2020. *Current environmental microplastic levels do not alter emergence behaviour in the intertidal gastropod *Littorina littorea**. *Mar. Pollut. Bull.* 151, 10859.

72. Bergmann, M., Mützel, S., Primpke, S., Tekman, M.B., Trachsel, J., Gerdts, G., 2019. *White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the alps to the arctic*. *Sci. Adv.* 5, eaax1157

73. Bayo, J., Rojo, D., Olmos, S., 2019. *Abundance, morphology and chemical composition of microplastics in sand and sediments from a protected coastal area: the Mar Menor lagoon (SE Spain)*. *Environ. Pollut.* 252, 1357 - 1366.

74. Bernatsky, S., Smargiassi, A., Barnabe, C., Svenson, L.W., Brand, A., Martin, R.V., Hudson, M., Clarke, A.E., Fortin, P.R., van Donkelaar, A., Edworthy, S., Bélisle, P., Joseph, L., 2016. *Fine particulate air pollution and systemic autoimmune rheumatic disease in two Canadian provinces*. *Environ. Res.* 146, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.12.021>.

75. Fernandes, E., Silva, C.A., Braga, A.L.F., Sallum, A.M.E., Campos, L.M.A., Farhat, S.C.L., 2015. *Exposure to air pollutants and disease activity in juvenile-onset systemic lupus erythematosus patients*. *Arthritis Care Res.* 67 (11), 1609–1614. <https://doi.org/10.1002/acr.22603>.