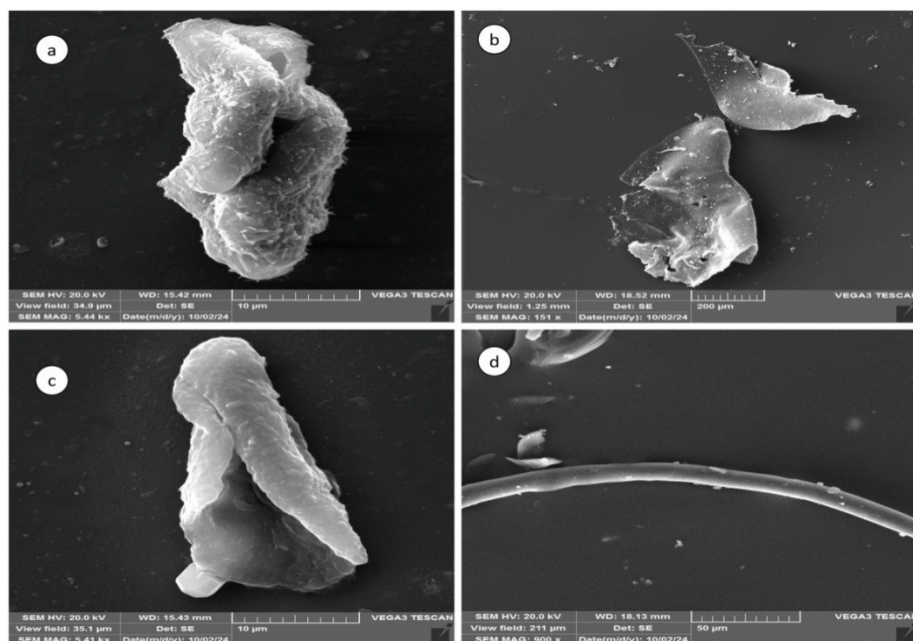


ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μ.Π.Σ.: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Η ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΣΤΗ ΜΕΙΩΣΗ
ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ: ΑΝΑΛΥΣΗ
ΠΡΟΚΛΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΣΤΗ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΩΝ»**



Κωνσταντίνα Λιόκου

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Χρυσή Κασσιανή Καραπαναγιώτη

Πάτρα

Σεπτέμβριος 2026

ΔΗΛΩΣΗ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/ δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.

Επιτρέπω στο Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο να τηρεί αντίγραφα της εργασίας μου για σκοπούς αρχειοθέτησης, διαφύλαξης και μη κερδοσκοπικής επιστημονικής και εκπαιδευτικής χρήσης και να τα διαθέτει μέσω του Ιδρυματικού Αποθετηρίου ή άλλης ηλεκτρονικής πλατφόρμας, σύμφωνα με την Πολιτική Προστασίας Πνευματικών Δικαιωμάτων του Ιδρύματος.

Η Διπλωματούχος,

Λιόκου Κωνσταντίνα



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΔΗΛΩΣΗ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ.....	2
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ, ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT.....	6
ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ.....	7
KEYWORDS.....	7
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	7
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	10
2.1 ΠΛΑΣΤΙΚΟ.....	10
2.2 ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ.....	12
2.3 ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ.....	14
2.4 ΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ, ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ.....	15
3. ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΠΛΑΣΤΙΚΑ/ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ.....	16
3.1 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ.....	17
3.2 ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....	18
3.3 ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ.....	20
3.4 ΜΕΤΡΑ ΓΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΕΡΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ.....	22
4. ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ.....	24
4.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΟΟΣΑ.....	24
4.1.1 Ο ΟΟΣΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΕΜΠΟΡΙΟ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	25
4.2 ΣΥΝΗΘΙΣΜΕΝΕΣ ΤΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ.....	26
4.2.1 ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΤΑΦΗ.....	26

4.2.2 ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ.....	27
4.2.3 ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗ.....	27
4.3 ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΩΝ.....	28
5. ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ.....	31
5.1 ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	33
5.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	33
5.3 ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ.....	34
5.3.1 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....	35
5.3.2 ΒΙΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ.....	36
5.3.3 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΒΙΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ.....	38
5.3.4 ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΒΙΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ.....	39
6. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΣΤΗΝ Ε.Ε. ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	41
6.1 ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ.....	44
7. ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΩΝ.....	45
7.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ.....	50
8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ.....	53
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	60

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ, ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

Πίνακας 1.....	11
Πίνακας 1 (συνέχεια).....	12
Πίνακας 2.....	30
Πίνακας 2 (συνέχεια).....	31

Πίνακας 3.....	37
Πίνακας 4.....	41
Πίνακας 4 (συνέχεια).....	42
Πίνακας 5.....	46
Πίνακας 5 (συνέχεια).....	47
Εικόνα 1.....	13
Εικόνα 2.....	18
Εικόνα 3.....	22
Εικόνα 4.....	29
Σχήμα 1.....	15
Σχήμα 2.....	32
Σχήμα 3.....	50

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία αύξηση της παραγωγής και χρήσης πλαστικών υλικών και προϊόντων έχει οδηγήσει αναπόφευκτα σε μία περιβαλλοντική κρίση παγκόσμιας εμβέλειας, με τον τεράστιο όγκο πλαστικών αποβλήτων και την ανεξέλεγκτη ρύπανση των υδάτινων και χερσαίων οικοσυστημάτων από μικροπλαστικά να απειλούν τόσο το περιβάλλον, όσο και την ανθρώπινη υγεία. Εν όψει του προβλήματος αυτού, η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά βιβλιογραφικά τη συμβολή της κυκλικής οικονομίας ως μοντέλο μείωσης της ρύπανσης από μικροπλαστικά, εστιάζοντας στις προκλήσεις και τις βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων συσκευασιών.

Στην αρχή, αποσαφηνίζονται βασικές έννοιες για βέλτιστη κατανόηση και παρουσιάζονται τα αίτια, οι μηχανισμοί διασποράς, καθώς και οι συνέπειες της ρύπανσης από μικροπλαστικά στο περιβάλλον και τον άνθρωπο. Ακολουθεί παρουσίαση των επί δεκαετιών εφαρμοζόμενων πρακτικών διαχείρισης των πλαστικών απορριμμάτων και των περιορισμών τους κι έπειτα σε πιο καινοτόμες και περιβαλλοντικά ευνοϊκές πρακτικές, εστιάζοντας στη μετάβαση προς ένα κυκλικό μοντέλο. Παράλληλα, αναλύεται και το βασικό ρυθμιστικό πλαίσιο σε κυρίως ευρωπαϊκό επίπεδο, αλλά και εθνικό. Τέλος, συνοψίζονται οι βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης σε μία αξιολόγηση, με βάση την οποία προκύπτουν και τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας.

ABSTRACT

The rapid increase in the production and use of plastic materials and products has inevitably led to a global environmental crisis, with the enormous volume of plastic waste and the uncontrolled pollution of aquatic and terrestrial ecosystems by microplastics threatening both the environment and human health. In light of this problem, this thesis conducts a literature review on the contribution of the circular economy as a model for reducing microplastic pollution, focusing on the challenges and best practices in the management of plastic packaging waste.

First, key concepts are clarified for optimal understanding, and the causes, dispersion mechanisms, and consequences of microplastic pollution on the environment and humans are presented. This is followed by a presentation of plastic waste management practices and their limitations that have been in place for decades, and then a shift toward more innovative and environmentally friendly practices, focusing on the

transition to a circular model. At the same time, the basic regulatory framework is analyzed, primarily at the European level but also at the national level. Finally, best management practices are summarized in an assessment, which forms the basis for the final conclusions of the study.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ

Κυκλική οικονομία – πλαστικό – μικροπλαστικά – απορρίμματα – διαχείριση αποβλήτων – ρύπανση – πλαστικές συσκευασίες – βέλτιστες πρακτικές – ανακύκλωση – βιοδιασπώμενα πλαστικά – βιωσιμότητα – οικολογικός σχεδιασμός

KEYWORDS

Circular economy – plastic – microplastics – waste – waste management – pollution – plastic packaging – best practices – recycling – biodegradable plastics – sustainability – eco-design

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η παρούσα εργασία αποτελεί βιβλιογραφική ανασκόπηση και βασίζεται σε δευτερογενή έρευνα. Η συλλογή του υλικού που επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε, πραγματοποιήθηκε μέσω αναζήτησης σε διεθνής βάσεις επιστημονικών δεδομένων (Scopus, Science Direct, MDPI, Google Scholar, Science), χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες λέξεις κλειδιά. Η αναζήτηση περιορίστηκε σε δημοσιεύσεις της τελευταίας εξαετίας (πλην ελαχίστων εξαιρέσεων), με έμφαση σε άρθρα επιστημονικών περιοδικών, μελέτες διεθνών οργανισμών και νομοθετικά κείμενα.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ραγδαία αύξηση της παραγωγής και κατανάλωσης πλαστικού έχει οδηγήσει σε μία παγκόσμια περιβαλλοντική κρίση η οποία χαρακτηρίζεται τόσο από τον τεράστιο όγκο των πλαστικών απορριμμάτων (όπως τα απόβλητα πλαστικών συσκευασιών), όσο και από την ανεξέλεγκτη μόλυνση των οικοσυστημάτων από μικροπλαστικά. Αυτή η διπλή απειλή θέτει μία από τις πιο κρίσιμες προκλήσεις βιωσιμότητας του 21^{ου} αιώνα, καθώς οι τρέχουσες πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων αδυνατούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τη διάρκεια ζωής των πλαστικών αποβλήτων.

Παραδοσιακά, η διαχείριση των στερεών αποβλήτων βασιζόταν στο γραμμικό μοντέλο «παραγωγή – χρήση – απόρριψη», το οποίο είναι θεμελιωδώς μη βιώσιμο για υλικά όπως το πλαστικό. Ως απάντηση, το πρότυπο της «κυκλικής οικονομίας» αναδύθηκε ως ένα μετασχηματιστικό πλαίσιο. Η κυκλική οικονομία στοχεύει στη διατήρηση των πόρων σε χρήση για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη χρονική περίοδο, ανακτώντας και αναγεννώντας τα προϊόντα και τα υλικά στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Η εφαρμογή της στα πλαστικά απαιτεί ριζικές αλλαγές στον σχεδιασμό, στην παραγωγή, στην κατανάλωση και κυρίως στη διαχείριση των αποβλήτων.

Παρόλο που η κυκλική οικονομία προωθείται ευρέως, η αποτελεσματική της εφαρμογή σε σύνθετες ροές αποβλήτων, όπως στις πλαστικές συσκευασίες, παραμένει δύσκολη, ιδίως όσον αφορά υλικά που είναι δύσκολο να ανακυκλωθούν και την πρόληψη της διάσπασης που οδηγεί στον σχηματισμό μικροπλαστικών. Ένα από τα βασικά ζητήματα προς επίλυση είναι μία ολοκληρωμένη στρατηγική που θα συνδέει άμεσα τη βελτίωση της ανακύκλωσης των συσκευασιών με την αντιμετώπιση των μηχανισμών μέσω των οποίων το πλαστικό διαφεύγει στο περιβάλλον ως μικροσωματίδια.

Ως εκ τούτου, η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην ανάλυση των προκλήσεων, των πρακτικών και των μελλοντικών στόχων για την ενσωμάτωση των στρατηγικών μετριασμού των μικροπλαστικών και της διαχείρισης των πλαστικών συσκευασιών σε ένα συνεκτικό πλαίσιο κυκλικής οικονομίας. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η εργασία αξιολογεί κριτικά τις καινοτόμες τεχνολογίες, αναλύει τις ισχύουσες πολιτικές κυκλικής οικονομίας τόσο σε εθνικό, όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο, καθώς και τους στόχους που έχουν τεθεί για το μέλλον, με σκοπό την επιτάχυνση της κυκλικής μετάβασης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ρύπανση από πλαστικά αποτελεί ολοένα και μεγαλύτερη πρόκληση τόσο για το περιβάλλον και τα οικοσυστήματα, όσο και για την βιοποικιλότητα και την ανθρώπινη υγεία. Πλέον, σημειώνεται παραγωγή της τάξης των 400 έως 430 εκατομμυρίων τόνων πλαστικού ετησίως και κατά συνέπεια, παράγονται από τους καταναλωτές περίπου 300 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών αποβλήτων. Βέβαια, με την πάροδο των ετών εξελίχθηκαν και οι τεχνικές ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης υλικών όπως το πλαστικό. Ωστόσο, μόνο το 9% των πλαστικών προϊόντων ανακυκλώνεται σε παγκόσμια κλίμακα, ποσοστό καθόλου ικανοποιητικό δεδομένου του ποσοστού ζήτησης και χρήσης τους.. Αυτό το αποτέλεσμα εξηγείται εν μέρει λόγω της νοοτροπίας απευθείας απόρριψης των προϊόντων αυτών μετά τη χρήση και των μη αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης πλαστικών μίας χρήσης, από μία μεγάλη μερίδα του πληθυσμού ανά τον κόσμο. Επίσης, οι προδιαγραφές για να ανακυκλωθεί το πλαστικό είναι αρκετά περιοριστικές και έτσι η ανακύκλωση όσο αποτελεσματική και να είναι, δεν γίνεται να θεωρηθεί ως το κύριο μέσο για την αντιμετώπιση της ρύπανσης από πλαστικά.

Το πρόβλημα της ρύπανσης από πλαστικά δημιουργεί και παράπλευρες ροές ρύπανσης, καθώς με την πάροδο του χρόνου τα πλαστικά θρυμματίζονται σε μικρότερα κομμάτια, σε μεγέθη τα οποία είναι ικανά να διασκορπιστούν στα οικοσυστήματα μέσω των φυσικών και καιρικών φαινομένων. Τα παραγόμενα μικροπλαστικά διεισδύουν σταδιακά στην τροφική αλυσίδα. Η πανίδα του εκάστοτε ρυπασμένου – από μικροπλαστικά – οικοσυστήματος προσλαμβάνει με την τροφή τα μικροσωματίδια πλαστικών, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση τοξινών στους ιστούς τους. Επομένως, οι τοξίνες αυτές μεταφέρονται και σε άλλα είδη συμπεριλαμβανομένων των ανθρώπων, απειλώντας την υγεία.

Η διαχείριση των αποβλήτων συσκευασιών έχει καταστεί κρίσιμο μέλημα στην επιδίωξη της βιώσιμης ανάπτυξης, ιδιαίτερα σε ευρωπαϊκό πλαίσιο, στο οποίο οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί και στόχοι είναι σχετικά αυστηροί. Το ζήτημα των αποβλήτων είναι πρωταρχικής σημασίας, καθώς η ανθρώπινη δραστηριότητα αποτελεί τον μοναδικό υπαίτιο της δημιουργίας απορριμμάτων και της ρύπανσης. Όσον αφορά στη διαχείριση πλαστικών απορριμμάτων συσκευασιών, οι καταναλωτές εμφανίζουν ποικίλες συμπεριφορές. Τα κύρια κίνητρα πίσω από τις συμπεριφορές αυτές περιλαμβάνουν περιβαλλοντικές ανησυχίες και οικολογικές αξίες, αλλά οι

ελλυπείς γνώσεις σχετικά με την ανακύκλωση και τα χαρακτηριστικά των συσκευασιών που αφορούν το περιβάλλον αποτελούν σημαντικό εμπόδιο.

Με επίκεντρο τη βέλτιστη διαχείριση πλαστικών συσκευασιών, η προσοχή πρέπει να στραφεί σε στρατηγικές που σχετίζονται με όλα τα επίπεδα παραγωγής και κατανάλωσης, δηλαδή από τον σχεδιασμό προϊόντων μέχρι την ανακύκλωση, την εφαρμογή πολιτικών ευθύνης στον παραγωγό, καθώς και την βελτίωση της χωριστής συλλογής. Ο συνδυασμός καινοτόμων τεχνολογιών, σαφών κανονισμών και δραστικών αλλαγών σχετικά με την συμπεριφορά των καταναλωτών αποσκοπεί στη μείωση των μικροπλαστικών, στην προστασία της βιοποικιλότητας και στη δημιουργία βιώσιμων αλυσίδων εφοδιασμού.

Στις ενότητες που ακολουθούν θα δούμε αναλυτικά όλες τις πτυχές αυτών των ζητημάτων.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Με σκοπό την μέγιστη κατανόηση των θεμάτων που θα αναλυθούν σε επόμενες ενότητες, είναι θεμιτή η αποσαφήνιση των βασικών όρων που «πρωταγωνιστούν», καθώς και κάποια ιστορικά στοιχεία ώστε να υπάρχει μία αλληλουχία των εξελίξεων που έχουν μεσολαβήσει μέχρι σήμερα.

2.1 ΠΛΑΣΤΙΚΟ

Ως «πλαστικός» ορίζεται αυτός που μπορεί να διαμορφώνει ή να διαμορφώνεται, που είναι κατάλληλος για πλάσιμο, για διαμόρφωση, εύπλαστος (Ινστιτούτο Νεοελληνικών Σπουδών [Ίδρυμα Μανόλη Τριανταφυλλίδη], 1998). Πιο ειδικά, τα πλαστικά αποτελούν πολυμερικά υλικά υψηλού μοριακού βάρους, τα οποία προέρχονται από την διάσπαση υλικών με βάση τον άνθρακα, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο κ.ά. και διαθέτουν την ικανότητα να διαμορφωθούν/σχηματιστούν σε συνθήκες θέρμανσής τους ή όταν υφίστανται κατασκευή και να διατηρούν το τελικό τους σχήμα μετά την ψύξη.

Αν και τα πλαστικά υλικά υπάρχουν σε όλη την ιστορία, το συνθετικό πλαστικό γνώρισε μεγάλο μέρος της σημαντικής του ανάπτυξης κατά τη διάρκεια της δεύτερης βιομηχανικής επανάστασης, με τη χημική σύνθεση και τη μαζική παραγωγή να αυξάνονται κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Η προέλευσή τους ξεκίνησε με φυσικά πολυμερή, όπως είναι το καουτσούκ και το σελλάκ, τα οποία αυτά ακατέργαστα υλικά ήταν πρόδρομοι των συνθετικών εναλλακτικών, με την κυτταρίνη να διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο (Stanley et al., 2025). Μιας και η ιστορία των

πλαστικών έχει πλούσια εξέλιξη, στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1), με στοιχεία που συλλέχθηκαν σύμφωνα με Stanley et al. (2025), συνοψίζονται τα πιο βασικά ορόσημα στην ιστορία.

Ιστορικό χρονοδιάγραμμα πλαστικών	
Χρονιά 1862	Ο Alexander Parkes σηματοδοτεί ένα σημαντικό ορόσημο με την καινοτομία του πρώτου συνθετικού πλαστικού, την «Παρκεσίνη» (Parkesine). Με την εφεύρεση αυτή, τέθηκαν οι βάσεις για μελλοντικές καινοτομίες στη βιομηχανία πλαστικών.
Χρονιά 1907	Ο Leo Baekeland δημιούργησε τον «Βακελίτη» (Bakelite), ο οποίος αποτέλεσε το πρώτο πλήρως συνθετικό πλαστικό. Αυτή η ανακάλυψη προκάλεσε μία αύξηση στην παραγωγή πλαστικών και επέστησε την προσοχή στη δυνατότητα των συνθετικών πολυμερών να αντικαταστήσουν παραδοσιακά υλικά, όπως ξύλο, γυαλί και μέταλλο.
Χρονιά 1935	Ο Wallace Carothers δημιούργησε το «Νάιλον» (Nylon), σηματοδοτώντας την πρώτη εξέχουσα παραγωγή συνθετικών ινών. Έγινε ζωτικής σημασίας κατά τη διάρκεια του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου, κατά τον οποίο επιταχύνθηκε σημαντικά η μαζική παραγωγή πλαστικών.
Δεκαετία 1940	Πολυμερή, όπως το πολυαιθυλένιο και το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE), ήταν απαραίτητα για στρατιωτικές εφαρμογές. Μέχρι το τέλος του πολέμου, τα πλαστικά εισχώρησαν σε βιομηχανίες που κυμαίνονταν από την άμυνα έως τα καταναλωτικά αγαθά, θέτοντας τις βάσεις για μια κλιμάκωση της παραγωγής πλαστικών μετά τον πόλεμο.
Δεκαετία 1950	Βασικές εξελίξεις στη δεκαετία του 1950, ιδιαίτερα η ανακάλυψη του πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) και του πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (LDPE), έφεραν επανάσταση στις συσκευασίες τροφίμων και ποτών λόγω των ελαφρών και ανθεκτικών στην υγρασία χαρακτηριστικών τους.
Δεκαετία 1960	Σημειώθηκε εκθετική αύξηση στη χρήση πλαστικού σε συσκευασίες, είδη οικιακής χρήσης και υφάσματα, χάρη στις καινοτομίες σε νέα πολυμερή, όπως το πολυπροπυλένιο. Τέτοια υλικά πρόσφεραν οικονομική αποδοτικότητα και ευελιξία, οδηγώντας σε ευρεία εφαρμογή σε ποικίλους τομείς.

Πίνακας 1: Σύντομο ιστορικό χρονοδιάγραμμα των πλαστικών σύμφωνα με Stanley et al. (2025).

Ιστορικό χρονοδιάγραμμα πλαστικών (συνέχεια)	
Δεκαετία 1970	Το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), που εφευρέθηκε το 1941, κέρδισε επίσης αναγνώριση τη δεκαετία του 1970 για την παραγωγή μπουκαλιών.
Δεκαετίες 1980-1990	Η χρήση πλαστικών μίας χρήσης σηματοδότησε μια καθοριστική αλλαγή στη συμπεριφορά των καταναλωτών, καθώς είδη όπως οι πλαστικές σακούλες και τα καλαμάκια έγιναν καθολικά λόγω της ευκολίας και του χαμηλού κόστους τους. Αυτό το καταναλωτικό κίνημα αύξησε σημαντικά τα πλαστικά απόβλητα, οδηγώντας σε αυξημένες περιβαλλοντικές ανησυχίες. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και του 1990, αυξήθηκε η ευαισθητοποίηση σχετικά με την οικολογική καταστροφή της πλαστικής ρύπανσης.
Σήμερα	Τα πλαστικά διαπερνούν σχεδόν κάθε πτυχή της ζωής, επηρεάζοντας τους τομείς της υγειονομικής περίθαλψης, των μεταφορών, της ηλεκτρονικής και των κατασκευών. Η αξιοσημείωτη αντοχή, η ανθεκτικότητα και η χημική τους σταθερότητα τα έχουν καταστήσει απαραίτητα για την κατασκευή ιατρικών συσκευών, εξαρτημάτων αυτοκινήτων και υλικών συσκευασίας. Τα χαρακτηριστικά που καθιστούν τα πλαστικά ανθεκτικά δημιουργούν επίσης προκλήσεις στη διαχείριση των αποβλήτων, κυρίως όσον αφορά στη θαλάσσια ρύπανση και τη συσσώρευση μη βιοδιασπώμενων αποβλήτων.

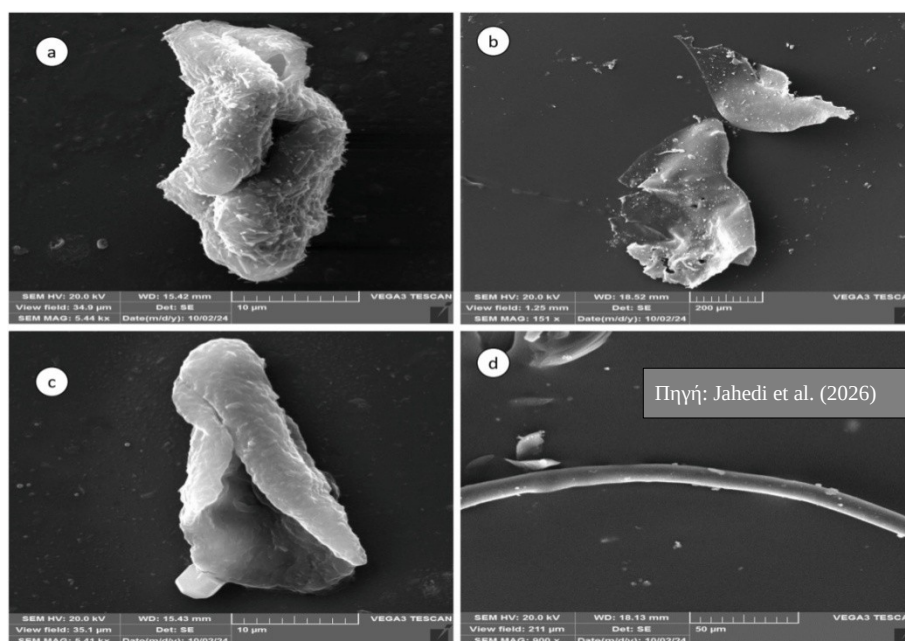
Πίνακας 1 (συνέχεια): Σύντομο ιστορικό χρονοδιάγραμμα των πλαστικών σύμφωνα με Stanley et al. (2025).

Όπως προκύπτει και από τον Πίνακα 1, πλέον, δεδομένης της χαμηλής τιμής (συγκριτικά με άλλα υλικά), της ευελιξίας, της ανθεκτικότητας και της αντοχής τους, τα πλαστικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς στρατηγικούς τομείς παγκοσμίως, όπως η συσκευασία, οι κατασκευές, οι μεταφορές, η γεωργία και η ιατρική.

2.2 ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ

Τα μικροπλαστικά είναι σωματίδια με όλες τους τις διαστάσεις τους μικρότερες από τα 5mm, περιλαμβάνουν μία μεγάλη ποικιλία τύπων, σχημάτων – θραύσματα, ίνες, κόκκοι, νιφάδες και σφαίρες (Elizalde-Velázquez et al., 2021) – χρωμάτων και μεγεθών και κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα πρωτογενή και τα δευτερογενή (Karapanagioti and Kalavrouziotis, 2020).

Σύμφωνα με τους Καραπαναγιώτη και Καλαβρουζιώτη (2020), τα πρωτογενή μικροπλαστικά παράγονται αρχικά σε μεγέθη έως και 100nm (τα σωματίδια μεγέθους <100nm ταξινομούνται ως νανοπλαστικά), ενώ τα δευτερογενή μικροπλαστικά προκύπτουν από την αποσύνθεση μεγαλύτερων αντικειμένων. Τα μικροπλαστικά σωματίδια είναι δυνατόν να είναι σφαιρικά κομμάτια, θραύσματα, ίνες ή μεμβράνες και μπορεί να είναι κατασκευασμένα από διάφορα πολυμερή. Ο σκοπός κατασκευής των πρωτογενών μικροπλαστικών είναι για συγκεκριμένες εφαρμογές, δηλαδή περιλαμβάνουν σφαιρίδια που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία πλαστικών για την κατασκευή μεγαλύτερων πλαστικών αντικειμένων και μικροσφαιρίδια (μικροσκοπικές σφαίρες ή κόκκους) τα οποία προστίθενται σε διάφορα προϊόντα, όπως για παράδειγμα σε οδοντόκρεμες, απολεπιστικά προϊόντα και καλλυντικά. Τα δευτερεύοντα μικροπλαστικά, που όπως προαναφέρθηκε προέρχονται από την αποσύνθεση μεγαλύτερων πλαστικών αντικειμένων, είναι η αναπόφευκτη συνέπεια της αποικοδόμησης των κατασκευασμένων προϊόντων μέσω διαδικασιών όπως η φωτοαποικοδόμηση και οι φυσικές, χημικές και βιολογικές αλληλεπιδράσεις. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα πλαστικά θραύσματα από την αποσύνθεση απορριμμάτων, τα υπολείμματα ελαστικών, οι μικροΐνες από υφάσματα, τα προϊόντα αποσύνθεσης από χρώματα οδικής σήμανσης, δίχτυα αλιείας, οικιακά αντικείμενα και άλλα απορριφθέντα πλαστικά υπολείμματα.



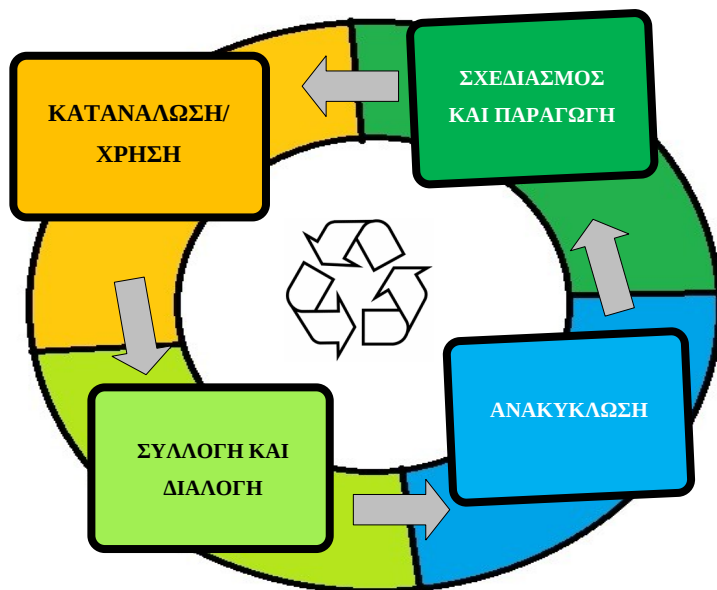
Εικόνα 1: Απεικόνιση μικροπλαστικών σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης:

(a) θραύσμα, (b) φιλμ, (c) θραύσμα, (d) ίνα.

Όταν τα πλαστικά σωματίδια αποσυντίθενται αποκτούν νέες φυσικές και χημικές ιδιότητες, αυξάνοντας την πιθανή τοξική τους επίδραση στους οργανισμούς (Karapanagioti and Kalavrouziotis, 2020). Όπως προαναφέρθηκε και στην εισαγωγή, τα μικροπλαστικά είναι δυνατόν να έχουν τοξική επίδραση στην ανθρώπινη υγεία καθώς ενέχουν κινδύνους από σωματίδια, χημικές ουσίες και από μικροοργανισμούς, ή ακόμη μπορεί να συνδέονται με χημικές ουσίες είτε λόγω της προσθήκης πλαστικοποιητών κατά την κατασκευή τους, είτε λόγω της προσρόφησης χημικών ουσιών από το περιβάλλον (Karapanagioti and Kalavrouziotis, 2020).

2.3 ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ

Το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας ορίζει την κυκλική οικονομία ως ένα «πράσινο μοντέλο ανάπτυξης» και αποτελεί ουσιαστικό στοιχείο του ευρωπαϊκού και παγκόσμιου οικονομικού μοντέλου. Ο βασικός στόχος αυτού του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση και επιλογή πόρων οι οποίοι να είναι πιο «πράσινοι», με σκοπό την παραγωγή προϊόντων και υπηρεσιών. Δηλαδή, με ελαχιστοποίηση ή ακόμη και μηδενισμό των αποβλήτων σε όλα τα στάδια παραγωγής, αλλά και μετά το τέλος του κύκλου ζωής των προϊόντων (ΥΠΕΝ, 2020). Η κυκλική οικονομία θα έλεγε κανείς ότι είναι μια προσέγγιση προσανατολισμένη στην εύρεση λύσεων, η οποία ενσωματώνει κλειστούς βρόχους (loops) στη ροή των υλικών κατά μήκος της αλυσίδας αξίας, αντικαθιστώντας το μοντέλο αδιάλειπτης γραμμικής ροής από την παραγωγή και την χρήση έως το τέλος του κύκλου ζωής τους (Pilaritiya and Ratnayake, 2024). Για να επικρατήσει όμως το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας, βασικό βήμα είναι η μετάβαση σε βιώσιμα πρότυπα – τόσο κατά την παραγωγή, όσο και κατά την κατανάλωση των προϊόντων – ώστε να συμβαδίζουν με την επίτευξη των παγκόσμιων στόχων που έχουν τεθεί για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και κατά συνέπεια, την διατήρηση των οικοσυστημάτων και της βιοποικιλότητας. Για παράδειγμα, σύμφωνα με το ΥΠΕΝ (2020), τα αναμενόμενα οφέλη της κυκλικής οικονομίας στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης περιλαμβάνουν τη μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου 2-4%, εξοικονόμηση 600 δισεκατομμυρίων ευρώ για τις επιχειρήσεις, δημιουργία περισσότερων των 2 εκατομμυρίων θέσεων εργασίας και ανάπτυξη έως 6% με ταυτόχρονη εξοικονόμηση πόρων (σήμερα το 80% των προϊόντων μετατρέπονται σε απόβλητα εντός των πρώτων 6 μηνών από την διάθεσή τους στην αγορά).



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση των βασικών βημάτων που αποτελούν ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας.

2.4 ΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ, ΒΙΟΑΠΟΙΚΟΔΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗ

Οι όροι «αποικοδόμηση», «βιοαποικοδόμηση» και «αποσύνθεση» συχνά συγχέονται όταν μιλάμε για υλικά και απορρίμματα, οπότε θεωρείται απαραίτητος ο διαχωρισμός τους. Η αποικοδόμηση (degradation), αναφέρεται στη μη αναστρέψιμη διεργασία που οδηγεί σε σημαντική αλλαγή της δομής ενός υλικού, η οποία συνήθως χαρακτηρίζεται από την αλλαγή ιδιοτήτων (π.χ. μοριακή μάζα ή δομή, μηχανική αντοχή) ή/και από θρυμματισμό, επηρεάζεται από περιβαλλοντικές συνθήκες, προχωρά σε μία χρονική περίοδο και περιλαμβάνει ένα ή και περισσότερα στάδια (International Organization for Standardization, ISO, 2013).

Η βιοαποικοδόμηση (biodegradation), αναφέρεται στην υποβάθμιση που προκαλείται από βιολογική δραστηριότητα, ιδίως από ενζυμική δράση, η οποία οδηγεί σε σημαντική αλλαγή στη χημική δομή ενός υλικού (ISO, 2013) και μπορεί να συμβεί είτε υπό αερόβιες, είτε αναερόβιες συνθήκες (Afshar et al., 2024). Κατά την αερόβια

βιοαποικοδόμηση, το δείγμα μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και βιομάζα, ενώ στην αναερόβια το δείγμα μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και βιομάζα (Afshar et al., 2024). Η αποσύνθεση αναφέρεται στη φυσική διάσπαση ενός υλικού σε μικρά θραύσματα (ISO, 2013), αποτελώντας μία πιο γενική έννοια που μπορεί να περικλείει τις δύο προηγούμενες.

Οι όροι «βιοαποικοδόμηση» και «βιοαποδομησιμότητα» χρησιμοποιούνται συχνά λανθασμένα ως συνώνυμα, ενώ είναι δύο αλληλένδετες έννοιες και όχι ταυτόσημες: η βιοαποικοδόμηση, όπως αναφέραμε παραπάνω, αναφέρεται στην πραγματική αποικοδόμηση που προκαλείται από βιολογική δραστηριότητα, ενώ η βιοαποδομησιμότητα αναφέρεται μόνο στη δυνατότητα ενός υλικού να υποστεί βιοαποικοδόμηση (Afshar et al., 2024).

3. ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΠΛΑΣΤΙΚΑ/ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΑ

Η αυξημένη παραγωγή αλλά και χρήση πλαστικών προϊόντων σε καθημερινή βάση και ιδιαίτερα στις «ανεπτυγμένες» κοινωνίες, έχει οδηγήσει και σε αυξημένα επίπεδα περιβαλλοντικής ρύπανσης. Αυτή η έξαρση γίνεται έντονα αντιληπτή στα θαλάσσια οικοσυστήματα, καθώς μεγαλύτερα πλαστικά αποσυντίθενται απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες μικροπλαστικών σωματιδίων στα υδάτινα περιβάλλοντα, συμπεριλαμβανομένων των υδάτινων στηλών και ιζημάτων (Hoang et al., 2025).

Έρευνες που διεξάγονται τακτικά την τελευταία δεκαετία, εκτιμούν πως πάνω από 250.000 τόνοι πλαστικών υπολειμμάτων βρίσκονται συσσωρευμένοι στους ωκεανούς, με βασικότερο αίτιο την μη-κατάλληλη διαχείριση των αποβλήτων (Hoang et al., 2025). Επιπλέον, έχουν αναφερθεί υψηλές συγκεντρώσεις μικροπλαστικών σωματιδίων τόσο στα επιφανειακά θαλάσσια ύδατα, όσο και στα βάθη της θάλασσας, στους θαλάσσιους πάγους, στις ακτές αλλά και στις διάφορες βιοκοινότητες κάποιων ηπείρων ανά τον κόσμο.

Ωστόσο, η παρουσία μικροπλαστικών στα συστήματα γλυκού νερού έχει τύχει μικρότερης προσοχής, καθώς έχουν διεξαχθεί μόνο λίγες μελέτες σχετικά με τα επιφανειακά ύδατα και τα ιζήματα στην Ευρώπη, τη Βόρεια Αμερική και την Ασία (Elizalde-Velázquez et al., 2021). Ως εκ τούτου, εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με τα μικροπλαστικά σε διάφορα συστήματα γλυκού νερού σε όλο τον κόσμο.

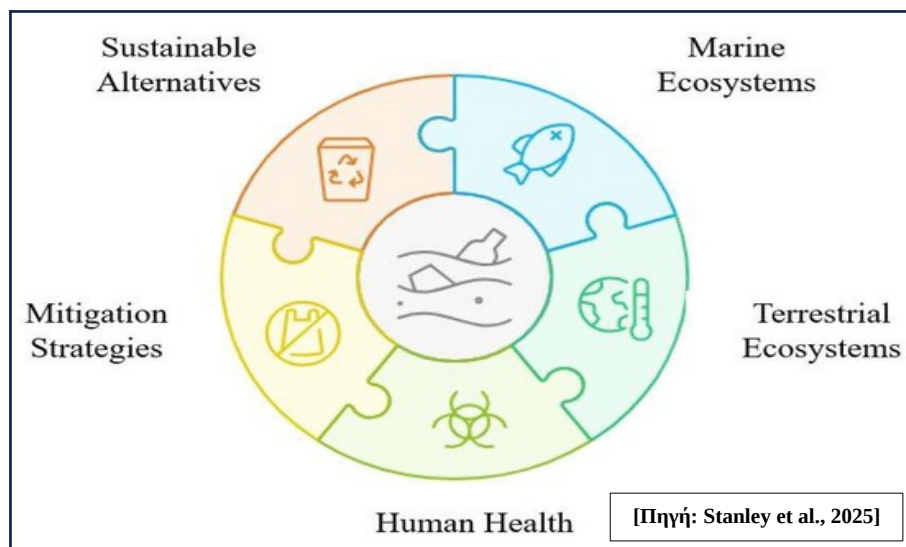
3.1 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ

Όσον αφορά στα υδάτινα οικοσυστήματα, τα αλόγιστα απορριφθέντα πλαστικά απόβλητα καταλήγουν στα θαλάσσια περιβάλλοντα απειλώντας τα, καθώς αποτελεί συχνό φαινόμενο η κατανάλωσή τους από την πανίδα. Τα μικροπλαστικά είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα σε αυτές τις περιπτώσεις, διότι συναντώνται επίμονα στα οικοσυστήματα αυτά και διαθέτουν την τάση να βιοσυσσωρεύονται εντός της τροφικής αλυσίδας προκαλώντας βλάβες στους οργανισμούς λόγω της τοξικότητας που απελευθερώνουν.

Τα χερσαία οικοσυστήματα επηρεάζονται εξίσου από πλαστική ρύπανση, με βασική συνέπεια την υποβάθμιση του εδάφους – και κατά συνέπεια των υπόγειων υδάτων – από περιστατικά όπως η υπερχειλίση σε Χ.Υ.Τ.Α. (Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων). Τα μικροπλαστικά και σε αυτή την περίπτωση προκαλούν ανησυχία. Σύμφωνα με Stanley et al. (2025), η ανησυχία αυτή είναι πιο έντονη στον γεωργικό τομέα, καθώς η τεχνική της πλαστικής επίστρωσης (plastic mulching) χρησιμοποιείται συχνά από αγρότες. Οι αρνητικές επιπτώσεις αυτής της πρακτικής είναι κυρίως η υποβάθμιση της υγείας του εδάφους, η οποία οδηγεί σε υπογονιμότητα του εδάφους, απώλεια θρεπτικών συστατικών και απελευθέρωση τοξικών προσθέτων όπως η BPA (Bisphenol A) στο έδαφος (Stanley et al., 2025).

Εκτός από τα οικοσυστήματα και την πανίδα της εκάστοτε περιοχής, η ρύπανση από πλαστικά, καταλήγει σταδιακά να είναι απειλή και για την ανθρώπινη υγεία. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα στην περίπτωση των μικροπλαστικών σωματιδίων, μιας και μπορούν να εντοπιστούν σε τρόφιμα και στο πόσιμο νερό και έτσι να καταναλωθούν από τον άνθρωπο. Όπως και με την πανίδα, η κατανάλωσή τους εγείρει ανησυχίες αναφορικά με την τοξικότητα των μικροσωματιδίων αυτών. Πιο συγκεκριμένα, χημικές ουσίες, όπως η BPA και οι φθαλικές ενώσεις, μπορούν να διαταράξουν το ενδοκρινικό σύστημα, με αποτέλεσμα να μπορεί να προκληθεί ζημία στο αναπαραγωγικό σύστημα και στην ανάπτυξη γενικά. Επιπλέον, η BPA μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία, όπως καρδιαγγειακές παθήσεις, χρόνια νεφρική νόσο, γενετικές ανωμαλίες και αναπτυξιακές διαταραχές, καρκίνο και χρόνια αναπνευστική νόσο (Pilaritiya and Ratnayake, 2024). Η παρουσία BPA είναι ανιχνεύσιμη στο αίμα των εγκύων γυναικών, στο αμνιακό υγρό, στον ιστό του πλακούντα και στο αίμα του ομφάλιου λώρου, υποδεικνύοντας έκθεση του

εμβρύου, το οποίο αργότερα εκτίθεται συχνά στην BPA μέσω της χρήσης πλαστικών μπουκαλιών βρεφικής σίτισης (Pilaritiya and Ratnayake, 2024).



Εικόνα 2: Τα πέντε κύρια θέματα που σχετίζονται με τη ρύπανση από πλαστικά.

3.2 ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Προκειμένου να καταλήξουμε σε κάποια κατάλληλη στρατηγική διαχείρισης και περιορισμού των μικροπλαστικών, κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός των τρόπων με τους οποίους μεταφέρονται και κατανέμονται στο περιβάλλον.

Η παρουσία και η χωρική κατανομή των μικροπλαστικών στα υδάτινα συστήματα ποικίλει σημαντικά ανάλογα με τα εκάστοτε περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά. Ενδεικτικά, σε μικρά υδάτινα σώματα στην Κίνα καταγράφηκε μέγιστη συγκέντρωση 21,52 σωματιδίων/L, τιμή σημαντικά υψηλότερη από εκείνη μεγαλύτερων υδάτινων συστημάτων, γεγονός που αποδίδεται στον μικρότερο όγκο νερού και συνεπώς, στη μειωμένη δυνατότητα αραίωσης των ρύπων (Elizalde-Velázquez et al., 2021). Ωστόσο, σε αντίθεση με αυτά τα αποτελέσματα, οι Gray et al. (2018) διαπίστωσαν ότι τα μικροπλαστικά έφτασαν σε συγκεντρώσεις έως και 88 σωματιδίων/L σε διάφορα δείγματα θαλασσινού νερού και αυτές οι διαφορές θα μπορούσαν να εξηγηθούν λόγω των διαφορετικών περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών (Elizalde-Velázquez et al., 2021). Για παράδειγμα, στο θαλασσινό νερό, η ποσότητα αλατιού και διαλυμένων στερεών μπορεί να ενισχύσει την απορρόφηση των μικροπλαστικών, δημιουργώντας υψηλότερες συγκεντρώσεις αυτών των ρύπων, ενώ άλλοι βασικοί παράγοντες που

επηρεάζουν την αφθονία και την κατανομή των μικροπλαστικών είναι ο άνεμος και η επιφανειακή απορροή, οι εγγενείς ιδιότητες των μικροπλαστικών και η πυκνότητα του πληθυσμού (Elizalde-Velázquez et al., 2021).

Η μεταφορά των μικροπλαστικών επηρεάζεται από διάφορους εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως οι μετεωρολογικοί. Οι πιο κοινοί μετεωρολογικοί παράγοντες είναι η βροχόπτωση, ο άνεμος και η ηλιακή ακτινοβολία, οι οποίοι καθορίζουν σημαντικά την μετανάστευση και την κατάληξη των μικροσωματιδίων.

Μελέτες που έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν έχουν σταθεί στο συμπέρασμα πως η επιφανειακή απορροή που είναι αποτέλεσμα των βροχοπτώσεων, αποτελεί βασικό μηχανισμό εισόδου των μικροπλαστικών στα υδάτινα περιβάλλοντα, καθώς η βροχόπτωση έχει τη δυνατότητα να απομακρύνει τα αιωρούμενα πλαστικά μικροσωματίδια από την ατμόσφαιρα και παράλληλα να μεταβάλλει τις υδροδυναμικές συνθήκες που επηρεάζουν τη μεταφορά τους στο υδάτινο σώμα. Σύμφωνα με διεξοδική εξέταση των An et al. (2024) σε ποικίλα άρθρα, επιβεβαιώνεται ότι η βροχόπτωση επηρεάζει τη μεταφορά και την αφθονία μικροπλαστικών σε τέσσερις βασικές πτυχές: την υδροδυναμική, την επιφανειακή απορροή του νερού, την υγρή εναπόθεση/καθίζηση και την φυσικοχημική ιδιότητα. Οι μελέτες δείχνουν ότι η περιεκτικότητα σε μικροπλαστικά στους ποταμούς ενδέχεται να αυξάνεται μετά από βροχή, με υποστηριζόμενους παράγοντες, όπως οι πλημμύρες και η διάβρωση που φέρνουν χερσαία μικροπλαστικά στο νερό. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι καταιγίδες και οι παρατεταμένες βροχοπτώσεις προκαλούν πρόσθετη αφθονία και ποικιλία των μικροπλαστικών στα επιφανειακά ύδατα, ενώ στις καθιζήσεις παρατηρείται η αντίθετη τάση.

Ο άνεμος είναι μία ακόμη βασική οδός μεταφοράς των μικροπλαστικών από τις χερσαίες πηγές προς κοιλότητες νερού, καθώς και σε απομακρυσμένες – ακόμη και δυσπρόσιτες στον άνθρωπο – αλπικές περιοχές. Επιπλέον, ο άνεμος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα μικροπλαστικά που επιπλέουν στην επιφάνεια του νερού, ειδικά τον αφρό πολυστερίνης, ενώ τα επιπλέοντα μικροπλαστικά αυξάνουν την οριζόντια μεταναστευτική τους ικανότητα υπό την επίδραση του ανέμου (An et al., 2024). Η ροή καθίζησης των μικροπλαστικών πολυμερών στο νερό αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, και τα μικροπλαστικά πολυμερή υψηλής

πυκνότητας επηρεάζονται περισσότερο από τη δύναμη του ανέμου από ότι εκείνα χαμηλής πυκνότητας (An et al., 2024).

Η ηλιακή ακτινοβολία έχει διττή επίδραση στην μεταφορά και κατανομή των μικροπλαστικών. Πρώτον, η ηλιακή ακτινοβολία επιδρά στις φυσικοχημικές ιδιότητες και τη μορφολογία της επιφάνειας των μικροπλαστικών, δημιουργώντας μια ευαισθησία ως προς τη «γήρανση» και αποσύνθεση του υλικού. Τόσο η έκθεση στο φως όσο και η επακόλουθη φυσική αποσάθρωση επηρεάζουν την αποσύνθεση των πλαστικών, αλλάζουν το μέγεθος των μικροπλαστικών και στη συνέχεια επηρεάζουν τη μετανάστευση και την κατανομή τους στα υδάτινα σώματα. Όσο αυξάνεται η ηλιακή ακτινοβολία, τόσο αυξάνεται η θερμοκρασία στα υδάτινα σώματα επηρεάζοντας τις φυσικοχημικές ιδιότητες του νερού με επακόλουθη αλλαγή στις βιολογικές δραστηριότητες, επομένως και στην μετανάστευση και κατανομή των μικροπλαστικών.

3.3 ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Με βάση την πρόβλεψη των Stubbins et al. (2021), η συσσώρευση των πλαστικών αποβλήτων έως το 2035 θα είναι ίση με την ποσότητα των ψαριών στους ωκεανούς (Pilaritiya and Ratnayake, 2024). Παρόμοιες εκτιμήσεις και απόψεις έχουν σχηματίσει αρκετοί μελετητές της επιστημονικής κοινότητας, ιδιαίτερα από το 2020 κι έπειτα με την έξαρση του COVID-19, αναφέροντας σε διαφορετικές δηλώσεις πως η ρύπανση από πλαστικά θα είναι η επόμενη πανδημία που θα κληθεί να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα.

Σύμφωνα με δεδομένα του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ), η διαρροή πλαστικού στο περιβάλλον προβλέπεται να διπλασιαστεί, τριπλασιάζοντας έτσι τη συσσώρευση πλαστικού στα υδάτινα περιβάλλοντα έως το 2060. Πιο συγκεκριμένα, με την τωρινή κατάσταση γύρω από την χρήση πλαστικών, προβλέπεται η ποσότητα που θα διαρρέει στο περιβάλλον από έναν μέσο όρο 22.000.000 τόνων το 2019 να αγγίξει κατά μέσο όρο τους 44.000.000 τόνους το 2060. Επίσης, εκτιμάται πως η διαρροή μακροπλαστικών θα εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει το σημαντικό μερίδιο της τάξης 87% της συνολικής διαρροής, ενώ η συμβολή των μικροπλαστικών στη συνολική διαρροή αναμένεται να διπλασιαστεί σε απόλυτο βάρος, αποτελώντας το 13% το 2060. Όσον αφορά στα μακροπλαστικά, υπολογίζεται πως η κυριότερη πηγή τους (~99%) θα αποτελεί η ανεπαρκής

διαχείριση αποβλήτων, ενώ η διαρροή μικροπλαστικών θα εξακολουθεί να αποτελεί ζήτημα προερχόμενο από ποικίλες πηγές, συμπεριλαμβανομένης της ιλύος λυμάτων, της τριβής ελαστικών και φυσικά η ανεξέλεγκτη απόρριψη απορριμμάτων αναμένεται να καταστεί η ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή διαρροής.

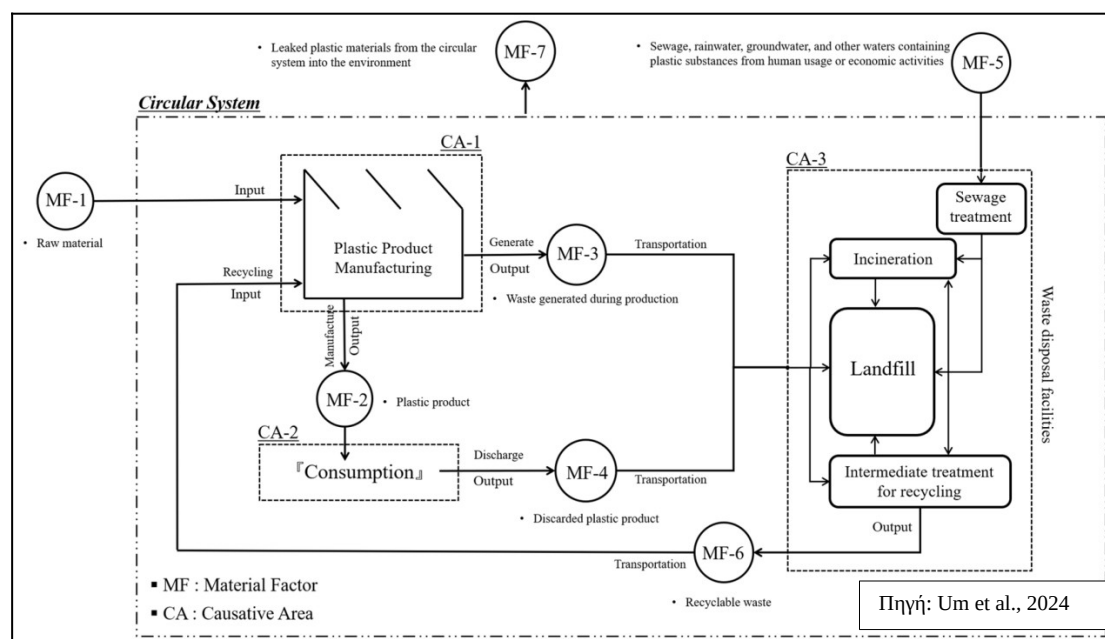
Οι Cui et al. (2025) μέσω προσομοιώσεων πολλαπλών σεναρίων συνέκριναν συστηματικά τη μελλοντική κατανομή μικροπλαστικών στο Στενό της Ταϊβάν και στα παράκτια ύδατα της Νορβηγίας υπό δύο συνθήκες και βασιζόμενοι σε αυτό προέβλεψαν τις συγκεντρώσεις μικροπλαστικών σε αυτές τις περιοχές για την περίοδο 2028-2032. Πιο ειδικά, οι προσομοιώσεις ανέδειξαν δύο περιοχές με εκ διαμέτρου αντίθετα χαρακτηριστικά και δυναμική, που παρόλα αυτά σημειώνουν και οι δύο άνοδο στη συσσώρευση μικροσωματιδίων πλαστικών:

- Το στενό της Ταϊβάν, που αποτελεί ζώνη υψηλής συσσώρευσης, αναμένεται να αποτελέσει μία φυσική δεξαμενή μικροπλαστικών, με ιδιαίτερα υψηλές τιμές, κυμαινόμενες μεταξύ 312 και 376 σωματίδια/ m^3 . Η συσσώρευση αυτή αποδίδεται στον συνδυασμό των ισχυρών ωκεάνιων ρευμάτων, της ανθρώπινης δραστηριότητας και των γεωγραφικών χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης περιοχής.
- Στη θάλασσα της Νορβηγίας παρατηρείται εποχιακή διακύμανση, δηλαδή τον χειμώνα ο πάγος περιορίζει την διασπορά των μικροσωματιδίων, ενώ η τήξη του την άνοιξη και το καλοκαίρι απελευθερώνει τα εγκλωβισμένα σωματίδια. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε αξιοσημείωτη αύξηση της συγκέντρωσης από 15 σε 53 σωματίδια/ m^3 , τα οποία στη συνέχεια, λόγω γεωγραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής, μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις έως και απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές.

Αυτά τα ευρήματα επιβεβαιώνουν περαιτέρω ότι οι χωροχρονικές διακυμάνσεις στην κατανομή των μικροπλαστικών διέπονται από την αλληλεπίδραση τριών κύριων μηχανισμών: της έντασης των οικονομικών παρεμβάσεων, της καθυστερημένης απόκρισης των περιβαλλοντικών συστημάτων και της επιρροής των γεωγραφικών εμποδίων (Cui et al., 2025).

3.4 ΜΕΤΡΑ ΓΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΕΡΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

Η εφαρμογή ενός μοντέλου που βασίζεται στις αρχές της κυκλικής οικονομίας αποτελεί μία ελπιδοφόρα λύση για την αντιμετώπιση των μικροπλαστικών που έχουν διαρρεύσει στο περιβάλλον. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται ένα κυκλικό μοντέλο που περιλαμβάνει όλα τα στάδια, από την παραγωγή του πλαστικού προϊόντος έως και την διαχείριση των αποβλήτων που θα προκύψουν, τονίζοντας και τις διαρροές μικροπλαστικών προς το περιβάλλον από κάθε διαδικασία.



Εικόνα 3: Απεικόνιση κυκλικού συστήματος πλαστικών προϊόντων και των σημείων διαρροής υλικών προς το περιβάλλον (MF-1: πρώτη ύλη (ακατέργαστο πλαστικό), MF-2: πλαστικό προϊόν, MF-3: απόβλητα που παράγονται κατά την παραγωγή, MF-4: απορριφθέν πλαστικό προϊόν, και MF-5: λύματα, όμβρια ύδατα, υπόγεια ύδατα και άλλα ύδατα που περιέχουν πλαστικές ουσίες από ανθρώπινη χρήση ή οικονομικές δραστηριότητες, MF-6: ανακυκλώσιμα απόβλητα, MF-7: πλαστικά υλικά που διαρρέουν από το κυκλικό σύστημα στο περιβάλλον· CA-1: κατασκευή πλαστικών προϊόντων, CA-2: χρήση πλαστικών προϊόντων και CA-3: διάθεση αποβλήτων).

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι εν λόγω διαρροές, απαιτείται η λήψη μέτρων που θα διασφαλίζουν τον περιορισμό της απώλειας υλικών, ιδιαίτερα στις «περιοχές αιτίας» (CA) του διαγράμματος παραπάνω, όπου παρατηρείται αυξημένος κίνδυνος διαφυγής. Πρώτον, θα πρέπει να μειωθεί η εισροή πλαστικών πρώτων υλών. Αυτό

μπορεί να επιτευχθεί με δύο βασικούς τρόπους: αφενός, μέσω της μεγιστοποίησης των συστημάτων ανακύκλωσης, ώστε να μειωθεί η απόρριψη σε χώρους υγειονομικής ταφής και την υιοθέτηση εναλλακτικών υλών αντί του πλαστικού, και αφετέρου, μέσω της ελαχιστοποίησης των όγκων παραγωγής, μειώνοντας έτσι τη συνολική ποσότητα πλαστικού εντός του κυκλικού συστήματος (Um et al., 2024).

Δεύτερον, θα πρέπει να περιοριστεί η διαρροή μικροπλαστικών από το κυκλικό σύστημα στο περιβάλλον (για παράδειγμα, τα μικροπλαστικά που παράγονται ενδέχεται να διαρρεύσουν από το σύστημα κατά τη διάρκεια της παραγωγής) (Um et al., 2024). Κατά τη διάρκεια της κατανάλωσης και της απόρριψης, τα μικροπλαστικά ενδέχεται να διαρρεύσουν όταν προϊόντα που τα περιέχουν ή αποτελούνται από αυτά απορρίπτονται από τους χρήστες ή διατίθενται παράνομα ή ακούσια (Um et al., 2024). Στη φάση της απόρριψης, το τρέχον σύστημα επεξεργασίας συχνά παραβλέπει τη διαχείριση των μικροπλαστικών, οδηγώντας σε ακούσιες απώλειες λόγω ανεπαρκών μεθόδων επεξεργασίας μικροπλαστικών, περιορισμών των εγκαταστάσεων και έλλειψης ευαισθητοποίησης των υπευθύνων διαχείρισης (Um et al., 2024).

Τρίτον, απαιτείται η εφαρμογή ενός στρατηγικού σχεδίου για την αποτελεσματική διαχείριση των μικροπλαστικών εντός του κυκλικού συστήματος. Για το σκοπό αυτό, ορισμένα απόβλητα ή προϊόντα αποβλήτων που σχετίζονται με μικροπλαστικά έχουν ταξινομηθεί ως «απόβλητα μικροπλαστικών» (Microplastic Waste, MPW) (Um et al., 2024) και για να αντιμετωπιστούν πιο αποτελεσματικά, κρίσιμος είναι ο εντοπισμός του σταδίου παραγωγής τους, ώστε να αποτρέπεται η διαρροή στην πηγή. Με βάση, λοιπόν, την επισήμανση των περιοχών υψηλού κινδύνου διαρροής (CA-1, CA-2, CA-3) (Εικόνα 4), θα πρέπει να υπάρχει έλεγχος των αποβλήτων που παράγονται σε κάθε φάση. Συγκεκριμένα, εάν κατά την ανάλυση διαπιστωθεί ότι κάποιο ρεύμα είναι ρυπασμένο με μικροπλαστικά, αυτό πρέπει να απομονώνεται άμεσα και να υπόκειται σε κατάλληλη διαχείριση. Δηλαδή, εάν τα επίπεδα μικροπλαστικών υπερβαίνουν ένα προκαθορισμένο όριο, τα απόβλητα θα πρέπει να μεταφέρονται σε ειδική εγκατάσταση διάθεσης. Αντίστοιχα, εάν στην εγκατάσταση διάθεσης εντοπιστεί υψηλή περιεκτικότητα σε μικροπλαστικά, θα πρέπει είτε να εφαρμόζεται ξεχωριστή μέθοδος επεξεργασίας, είτε να δημιουργείται ειδική εγκατάσταση για τη διαχείρισή τους (Um et al., 2024).

4. ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Ο ΟΗΕ (Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών) όρισε τα απόβλητα ως «Υλικά που δεν είναι βασικά προϊόντα και για τα οποία ο παραγωγός δεν έχει περαιτέρω χρήση όσο αφορά τους δικούς του σκοπούς παραγωγής, μετατροπής ή κατανάλωσης και τα οποία θέλει να απορρίψει» (Pilaritiya and Ratnayake, 2024). Παρόλο που η παραγωγή αποβλήτων έχει μία μακρά ιστορία, όσο περνάνε τα χρόνια τα απόβλητα που παράγονται είναι περισσότερα και πιο σύνθετα, με αποτέλεσμα την σταδιακή απώλεια της ικανότητας απορρόφησής τους από το περιβάλλον.

Ο Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ) πρότεινε τη διεξαγωγή εθνικών ερευνών για τον εντοπισμό των πηγών των πλαστικών απορριμμάτων στην ξηρά και στους ωκεανούς, καθώς και την ανάπτυξη πολιτικών για την ελαχιστοποίηση της χρήσης πλαστικών σε κάθε χώρα (Um et al., 2024). Στην Σύνοδο Κορυφής της G7 (Group of Seven), συζητήθηκε το Σχέδιο Δράσης της G20 (Group of Twenty) για τα θαλάσσια απορρίμματα, ένα σχέδιο που αποσκοπεί στη διερεύνηση των επιπτώσεων των θαλάσσιων απορριμμάτων (συμπεριλαμβανομένων των μικροπλαστικών) στο περιβάλλον, στην ανάπτυξη μέτρων για την προστασία του περιβάλλοντος και στην εφαρμογή αυτών των μέτρων σε ένα κυκλικό σύστημα που λαμβάνει υπόψη τον κύκλο ζωής των πλαστικών (Um et al., 2024).

4.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΟΟΣΑ

Ο Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ), αποτελεί έναν διεθνή οργανισμό που συνεργάζεται με τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τα ενδιαφερόμενα μέρη και τους πολίτες με σκοπό τη θέσπιση διεθνών προτύπων βασισμένων σε τεκμήρια και η εύρεση λύσεων σε κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις. Στην ιστοσελίδα του ΟΟΣΑ, μεταξύ άλλων, υπάρχουν αξιοσημείωτες προβλέψεις για τα πλαστικά ως προϊόντα και ως απόβλητα με βάση τα έως τώρα δεδομένα, καθώς και κάποιες δημοσιεύσεις που σχετίζονται με αυτά τα ζητήματα.

Σύμφωνα, λοιπόν, με δημοσιεύσεις του ΟΟΣΑ για τα πλαστικά, η παραγωγή και χρήση πλαστικών έφτασε τους 435.000.000 τόνους το 2020, από 234.000.000 τόνους το 2000. Χωρίς κάποια περαιτέρω δράση, με αυτόν τον ρυθμό, η ετήσια παραγωγή, χρήση και παραγωγή πλαστικών αποβλήτων προβλέπεται να αυξηθεί κατά 70% το

2040 συγκριτικά με το 2020. Λαμβάνοντας υπόψη τις τρέχουσες πολιτικές, η διαρροή πλαστικών στο περιβάλλον θα σημειώσει σημαντική αύξηση τις επόμενες δύο δεκαετίες. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι παρά τα αυξημένα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων, λόγω των προβλεπόμενων τάσεων στην παραγωγή και χρήση πλαστικών, η διαρροή τους σε χερσαία και υδάτινα οικοσυστήματα αναμένεται να αυξηθεί κατά 50% το 2040 (σε 30.000.000 τόνους) συγκριτικά με το 2020. Όλες οι περιοχές θα συμβάλλουν σε αυτό και ομοίως αναμένεται να συμβάλλουν αντίστοιχα και στην αύξηση διαρροής μικροπλαστικών, προβλέπει ο ΟΟΣΑ.

4.1.1 Ο ΟΟΣΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΕΜΠΟΡΙΟ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Στον ΟΟΣΑ έχει δημοσιευτεί από τους Brown et al. (2025) μία εργασία σχετικά με το εμπόριο πλαστικών αποβλήτων, το οποίο αποτελούσε μία διαδεδομένη εναλλακτική μέθοδο διαχείρισης για χώρες με σημαντική έλλειψη υποδομών επεξεργασίας των πλαστικών απορριμμάτων τους.

Σύμφωνα λοιπόν με τους Brown et al. (2025), η Κίνα, που προηγουμένως αποτελούσε τη μεγαλύτερη χώρα προορισμού για τις εξαγωγές πλαστικών αποβλήτων, ξεκίνησε να περιορίζει τις εισαγωγές της σε μεγάλο βαθμό το 2010 και πιο εντατικά το 2013 με την πολιτική “Green Fence”. Έπειτα, το 2017 η πολιτική “National Sword” περιορίζει τις εισαγωγές που υπερβαίνουν ένα – δύσκολο να ληφθεί – επίπεδο μόλυνσης. Η πολιτική του 2017 απαγορεύει ουσιαστικά τις περισσότερες εξαγωγές πλαστικών απορριμμάτων με προορισμό την Κίνα και οδηγεί, έτσι, σε έμμεσες επιπτώσεις, καθώς αναδυόμενοι εισαγωγείς ανταποκρίθηκαν στις επακόλουθες αυξήσεις στις εισαγωγές με δικούς τους εμπορικούς περιορισμούς. Σημειωτέον, σύμφωνα με την εργασία, ότι τα κράτη της Νοτιοανατολικής Ασίας το 2018 θέσπισαν απαγορεύσεις εισαγωγών, συμπεριλαμβανομένης της Ταϊλάνδης, του Βιετνάμ και της Μαλαισίας.

Το 2021 τέθηκαν σε ισχύ τροποποιήσεις στην διεθνή πολιτική για το εμπόριο αποβλήτων, ενισχύοντας περαιτέρω τους ελέγχους για το εμπόριο σε πλαστικά απόβλητα. Οι Brown et al. (2025) αναφέρουν πως η πρωταρχική αιτία αυτών των αλλαγών ήταν οι ανησυχίες σχετικά με την έλλειψη ορθής περιβαλλοντικής διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων στις χώρες προορισμού των εξαγωγών τους. Υπάρχουν διμερείς ή περιφερειακές συμφωνίες ή ρυθμίσεις που επιτρέπουν πιο

ελεύθερο εμπόριο μη επικίνδυνων πλαστικών απορριμμάτων, όπως για παράδειγμα μεταξύ ΗΠΑ και Καναδά, καθώς και εντός της ενιαίας αγοράς της Ε.Ε.

Αναφέρεται, επιπλέον, πως σημειώθηκε αύξηση από το 2014 έως το 2023 τόσο στο μερίδιο του όγκου του παγκόσμιου εμπορίου εξαγωγών από χώρες του ΟΟΣΑ, όσο και στο μερίδιο που εισάγεται στις χώρες αυτές. Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό εξαγωγών τους αυξήθηκε σε αυτό το διάστημα από 67% σε 91%, ενώ το ποσοστό εισαγωγών από 20% σε 66%.

4.2 ΣΥΝΗΘΙΣΜΕΝΕΣ ΤΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Ανάλογα με τις υποδομές και τους πόρους που διαθέτει κάθε χώρα, χρησιμοποιείται ευρέως και κάποια τεχνική διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων. Παγκοσμίως, έχουν υιοθετηθεί αρκετές στρατηγικές με την πάροδο των ετών, με κυρίαρχες την υγειονομική ταφή, την ανακύκλωση και την αποτέφρωση.

4.2.1 ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΤΑΦΗ

Η υγειονομική ταφή πλαστικών αποβλήτων – αν και η παλαιότερη παγκοσμίως εκ των τεχνικών διαχείρισης απορριμμάτων – είναι η λιγότερο προτιμώμενη τεχνική εξαιτίας των άμεσων και μακροπρόθεσμων περιβαλλοντικών επιπτώσεων που εγκυμονεί τόσο για το έδαφος όσο και για τα υπόγεια ύδατα (σχηματισμός στραγγισμάτων, εκπομπές μεθανίου, κ.ά.). Το μείζον θέμα σε αυτή τη μέθοδο είναι η ανθεκτικότητα των πλαστικών απορριμμάτων, καθώς τα πλαστικά έχουν την δυνατότητα να παραμείνουν αμετάβλητα για παραπάνω από 1.500 χρόνια (Fayshal, 2024). Παρόλο που η τεχνική αυτή βρισκόταν στο προσκήνιο για πολλά χρόνια, πλέον ολοένα και περισσότερες χώρες προσπαθούν να θεσπίσουν πιο βιώσιμες στρατηγικές διαχείρισης και αποθαρρύνεται η χρήση χωματερών για τέτοιου είδους υλικά. Το 2006, στα απόβλητα που απορρίφθηκαν σε Χ.Υ.Τ.Α. σε παγκόσμια εμβέλεια, υπολογίζονται πάνω από 12.000.000 τόνοι πλαστικών, με κορύφωση στους 13.000.000 τόνους το 2015 κι έπειτα σημειώνεται μείωση στους 10.000.000 τόνους έως το 2020 (Fayshal, 2024). Αυτή η πτώση στην ποσότητα των πλαστικών σε Χ.Υ.Τ.Α. υποδηλώνει μία θετική μετατόπιση στον τρόπο διαχείρισης αποβλήτων, με τις προσπάθειες να στοχεύουν επιτέλους στην απεξάρτηση από τις χωματερές και κατά συνέπεια, τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

4.2.2 ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

Η επιλογή της ανακύκλωσης υλικών ως τρόπος διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων αποτελεί μία πιο βιώσιμη επιλογή, ώστε να επιτευχθεί αξιοποίηση των περιορισμένων πόρων, αλλά και να ελαχιστοποιηθούν όσο το δυνατόν στο μέγιστο οι αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον. Η διαδικασία της ανακύκλωσης περιλαμβάνει την πρωτογενή, την δευτερογενή/μηχανική, την τριτογενή/χημική και την τεταρτογενή ανακύκλωση (Fayshal, 2024). Επίσης, περιλαμβάνονται οι διαδικασίες συλλογής, διαλογής, επεξεργασίας και μετατροπής των πλαστικών απορριμμάτων σε νέα προϊόντα ή υλικά. Κατά την περίοδο 2006-2020, ο ρυθμός ανακύκλωσης σχεδόν διπλασιάστηκε και σημειώνει συνεχόμενη αύξηση, με την τεταρτογενή ανακύκλωση, γνωστή και ως διαδικασία ανάκτησης ενέργειας, να έχει γνωρίσει ευρεία διάδοση (Fayshal, 2024). Η χημική ανακύκλωση και η ανακύκλωση με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας περιλαμβάνουν διάφορες κοινές τεχνικές, με διαφορές στο τελικό προϊόν. Οι πιο δημοφιλείς τεχνικές τέτοιου είδους είναι κάποιες θερμοχημικές μετατροπές: η αεριοποίηση (gasification), η πυρόλυση (pyrolysis) και η υδροθερμική υγροποίηση (hydrothermal liquefaction, HTL).

4.2.3 ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗ

Η αποτέφρωση αποτελεί μία επίσης δημοφιλή τεχνική διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων, ιδιαίτερα σε περιοχές που δεν διαθέτουν επαρκή χώρο για Χ.Υ.Τ.Α. ή επαρκείς υποδομές μετατροπής των αποβλήτων σε ενέργεια. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η σημαντική ελαχιστοποίηση του όγκου των αποβλήτων υπό επεξεργασία και η παραγωγή ενέργειας ως τελικό προϊόν. Ωστόσο, αν και δεν έχει άμεσες επιπτώσεις στο έδαφος και τα ύδατα όπως η υγειονομική ταφή, εγείρει ανησυχίες λόγω της παραγωγής επικίνδυνων εκπομπών (διοξίνες, φουράνια, βαρέα μέταλλα, κ.ά.) που απειλούν την ανθρώπινη υγεία και επιδεινώνουν το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η αποτέφρωση περιλαμβάνει την ελεγχόμενη καύση πλαστικών αποβλήτων σε υψηλές θερμοκρασίες, που συνήθως κυμαίνονται από 850°C έως 1.200°C (Fayshal, 2024). Πολλές χώρες προσπαθώντας να επωφεληθούν από τα θετικά της τεχνικής υιοθέτησαν την αποτέφρωση ως κύρια μέθοδο διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων, αλλά όπως και με την υγειονομική ταφή, ψάχνουν εναλλακτικές λύσεις βάζοντας σε προτεραιότητα την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

4.3 ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΩΝ

Εστιάζοντας στα πλαστικά απόβλητα συσκευασιών, σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του ΕΟΑΝ (Ελληνικός Οργανισμός ΑΝακύκλωσης), το 2018 στην χώρα μας παρήχθησαν περίπου 815 χιλιάδες τόνοι απόβλητα συσκευασιών - 4% παραπάνω από το 2017 - εκ των οποίων περίπου το 1/4 (202.100 τόνοι) αποτελούνταν από πλαστικά. Επίσης, από τους 202.000 τόνους αποβλήτων πλαστικών συσκευασιών που παρήχθησαν το 2018, λιγότερο από το 50% (80.420 τόνοι) ανακυκλώθηκε/αποτεφρώθηκε, ποσοστό που ναι μεν ξεπέρασε τον προσδοκώμενο στόχο (22,5% → 39,8%), αλλά δεν υπήρξε ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση των υλικών αυτών και συνεχίζει να αυξάνεται η ποσότητα των αποβλήτων αυτών μέχρι και σήμερα. Επομένως, το πρόβλημα με τα απορρίμματα που προκύπτουν από τις πλαστικές συσκευασίες και κατ' εξακολούθηση οι επίμονες και ολοένα αυξανόμενες συνέπειες που ακολουθούν, συνεχίζει να χρήζει άμεσης αντιμετώπισης.

Μετέπειτα, το 2021, ο τομέας των συσκευασιών αναδείχθηκε ως η μεγαλύτερη πηγή πλαστικών αποβλήτων στην Ευρώπη, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 40% της συνολικής ζήτησης πλαστικών, καθώς υπολογίστηκε πως, κατά μέσο όρο, ένας πολίτης της Ε.Ε. παρήγαγε 35,9 κιλά αποβλήτων πλαστικών συσκευασιών, με αύξηση 27% την τελευταία δεκαετία (Operato et al., 2025). Παρά τις προόδους στην αποδοτικότητα των υλικών και τις προσπάθειες βιωσιμότητας, το μέσο ποσοστό ανακύκλωσης πλαστικών συσκευασιών στην Ε.Ε. ήταν περίπου 40% το 2022, σημαντικά χαμηλότερο από αυτό των χάρτινων/χαρτονένιων συσκευασιών (83,2%) και των μετάλλων (76,9%) (Operato et al., 2025).

Έως και σήμερα, έχει εκτιμηθεί ότι οι τόνοι πλαστικών αποβλήτων που είναι διασκορπισμένα παγκοσμίως στο περιβάλλον, ανέρχονται στους 5 δισεκατομμύρια, με χρόνους παραμονής των υπολειμμάτων τους από εκατοντάδες χρόνια έως και ολόκληρες χιλιετίες. Σε αυτή την ρύπανση συμβάλλει σημαντικά ο τομέας των τροφίμων και των ποτών, καθώς χρησιμοποιούνται υπέρογκες ποσότητες πλαστικών μίας χρήσης για την συσκευασία των πόσιμων και βρώσιμων προϊόντων που καταναλώνουμε καθημερινά.

Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 5), που αντλήθηκε από τη σελίδα του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, απεικονίζονται τα ατομικά ετήσια κιλά απορριφθέντων συσκευασιών στην Ε.Ε., με το 19% να είναι πλαστικό.

Απορρίμματα συσκευασίας στην Ε.Ε

Κιλά ανά άτομο



Εικόνα 4: Ατομικά ετήσια απορριφθέντα απορρίμματα συσκευασίας στην Ε.Ε.

Ωστόσο, ο καθολικός αποκλεισμός των πλαστικών δεν δύναται να θεωρηθεί λύση προς ώρας στο παρόν πρόβλημα της ρύπανσης από πλαστικά – και κατά συνέπεια μικροπλαστικά – διότι υπερέχουν αισθητά σε σχέση ποιότητας-τιμής συγκριτικά με άλλα υλικά σε ποικίλους τομείς. Η αυξανόμενη εξάρτηση από τις πλαστικές συσκευασίες και τα προϊόντα, τόσο για τους κατασκευαστές όσο και για τους καταναλωτές, αποδίδεται στις ελκυστικές τους ιδιότητες συμπεριλαμβανομένης της ευελιξίας, της λειτουργικότητας, της οικονομικής τους αποδοτικότητας και του ελαφριού τους βάρους (Stanley et al., 2025).

Πολύ έντονα η αύξηση της ζήτησης και χρήσης πλαστικών προϊόντων, παρατηρείται στον τομέα της συσκευασίας και ενώ η εκτεταμένη χρήση τους είναι σε αναλογία με το αρνητικό αντίκτυπο στα οικοσυστήματα, η ανθεκτικότητα και η ικανότητα εύκολης επεξεργασίας τους υπερτερούν όταν κληθούμε να επιλέξουμε. Με σκοπό να μετριαστούν οι υπέρογκες ποσότητες πλαστικών υλικών μετά τον κύκλο ζωής τους, ιδιαίτερα τα πλαστικά προϊόντα μιας χρήσης, πραγματοποιούνται προσπάθειες ευαισθητοποίησης και ενθάρρυνσης των βιομηχανιών και του κοινού να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά πλαστικά προϊόντα με βιώσιμα υλικά και αναβάθμιση των τεχνικών ανακύκλωσης.

Στις ανεπτυγμένες χώρες, η συσκευασία αποτελεί περίπου το 2% του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος, με τα περισσότερα υλικά συσκευασίας να χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων (Operato et al., 2025). Στην Ε.Ε., η βιομηχανία συσκευασίας αποτελεί σημαντικό οικονομικό τομέα, με την αγορά να αποτιμάται σε περίπου 153 δισεκατομμύρια ευρώ το 2024 και να αναμένεται να αυξηθεί σε 186 δισεκατομμύρια ευρώ έως το 2029 (Operato et al., 2025). Μέχρι σήμερα, εκτιμάται ότι τουλάχιστον 5 δισεκατομμύρια τόνοι πλαστικών αποβλήτων είναι διασκορπισμένοι στο περιβάλλον παγκοσμίως, με χρόνους παραμονής των υπολειμμάτων να κυμαίνονται από εκατοντάδες χρόνια έως χιλιετίες (Operato et al., 2025). Ο τομέας των τροφίμων και ποτών συμβάλλει σημαντικά σε αυτήν την ρύπανση, με τα πλαστικά μίας χρήσης που χρησιμοποιούνται για τη συσκευασία ποτών, νωπών κρεάτων, φρούτων και λαχανικών να προκαλούν ιδιαίτερη ανησυχία (Operato et al., 2025).

Παρακάτω, στον Πίνακα 2, περιλαμβάνονται τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πλαστικά σε συσκευασίες τροφίμων και ποτών, με κάποια παραδείγματα εφαρμογών.

Πλαστικό υλικό συσκευασίας	Παραδείγματα εφαρμογής
Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET)	Μπουκάλια ποτών (νερό, χυμοί, αναψυκτικά), βάζα τροφίμων, μεμβράνες, δίσκοι
Πολυπροπυλένιο (PP)	Κουπάκια γιαουρτιού, δοχεία τροφίμων, καλαμάκια, μπουκάλια και κουπάκια, δοχεία κατάλληλα για φούρνο μικροκυμάτων
Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC)	Μεμβράνες περιτυλίγματος κατεψυγμένων τροφίμων, δοχεία και μεμβράνη τροφίμων, μπουκάλια για βρώσιμα έλαια, δίσκοι
Πολυστυρόλιο (PS)	Δίσκοι τροφίμων (π.χ. κρέας), δοχεία φαγητού για πακέτο
Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE)	Σακούλες ψωμιού, συσκευασίες κατεψυγμένων τροφίμων, φιάλες με σωληνάκι
Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE)	Φιάλες γάλακτος, δοχεία χυμών, επαναχρησιμοποιούμενες τσάντες για ψώνια
Πολυαμίδιο (PA)	Συσκευασίες κρέατος υπό κενό, μεμβράνες συσκευασίας τυριών

Πίνακας 2: Βασικότερα πλαστικά υλικά συσκευασιών. (Πηγή: Operato et al., 2025)

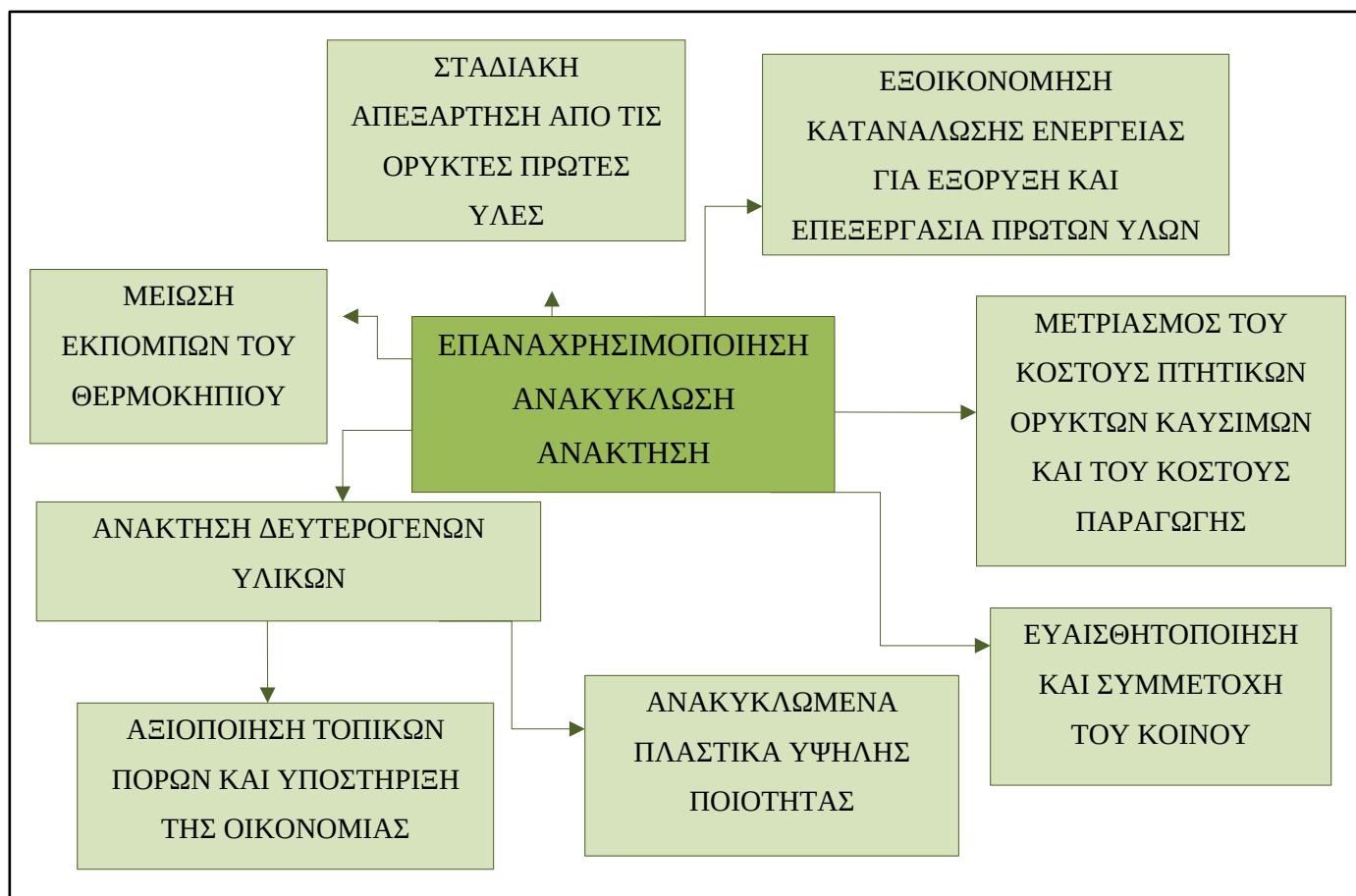
Πλαστικό υλικό συσκευασίας	Παραδείγματα εφαρμογής
Συμπολυμερές αιθυλενίου-βινυλικής αλκοόλης (EVOH)	Μεμβράνες φραγμού για προϊόντα ευαίσθητα στο οξυγόνο (π.χ. κρέας, τυρί, παιδικές τροφές)
Πολυγαλακτικό οξύ (PLA)	Κομποστοποιήσιμα δοχεία τροφίμων, ποτήρια μίας χρήσης
Διογκωμένο πολυστυρένιο (EPS)	Δίσκοι τροφίμων, δοχεία φαγητού για πακέτο, ποτήρια καφέ μίας χρήσης, υλικό προστασίας
Διογκωμένο πολυπροπυλένιο (EPP)	Δοχεία παράδοσης τροφίμων, ανθεκτικές συσκευασίες μεταφοράς τροφίμων
Διογκωμένο πολυαιθυλένιο (EPE)	Επενδύσεις προστασίας, περιτυλίγματα για ευαίσθητα τρόφιμα

Πίνακας 2 (συνέχεια): Βασικότερα πλαστικά υλικά συσκευασιών. (Πηγή: Operato et al., 2025)

5. ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ

Όπως προαναφέρθηκε, τα πλαστικά απόβλητα αγγίζουν ανησυχητικά επίπεδα, με αδυναμία επαρκούς διαχείρισής τους. Ως ανθρωπότητα, παράγουμε περισσότερους από 300.000.000 τόνους ετησίως, αλλά ανακυκλώνεται ορθά μόνο περίπου το 20% (Moujoud et al., 2025). Αυτό το ποσοστό ανακύκλωσης οφείλεται κυρίως στα μεικτά υλικά, τα χημικά πρόσθετα και τον ανεπαρκή σχεδιασμό των πλαστικών προϊόντων, με αποτέλεσμα να καθίσταται η διαδικασία της ανακύκλωσης περίπλοκη και αναποτελεσματική.

Επομένως, η μετάβαση σε ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας για τα πλαστικά προσφέρει ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών οφελών, καθώς αποτελεί λύση να ξεπεραστεί το κλασικό γραμμικό μοντέλο «take – make – dispose» και υποστηρίζει τους στόχους που ορίζονται στους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (Moujoud et al., 2025). Κάποια βασικά οφέλη αναφέρονται παρακάτω στο Σχήμα 1.



Σχήμα 2: Οφέλη ανακύκλωσης ως μέρος του μοντέλου της κυκλικής οικονομίας.

Η κυκλική οικονομία ευνοεί την ορθότερη διαχείριση αποβλήτων, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε μία αλυσίδα θετικών επιπτώσεων, ιδιαίτερα όσον αφορά στα πλαστικά απορρίμματα. Δηλαδή, η αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων αποτρέπει την διαρροή πλαστικών και μικροπλαστικών στα περιβάλλοντα, αποφεύγοντας έτσι την πλαστική ρύπανση των οικοσυστημάτων και περιορίζοντας την βλάβη που προκαλούν τόσο στην άγρια ζωή, όσο και στην ανθρώπινη υγεία. Για να επιτευχθεί βέβαια μια ορθότερη διαχείριση, απαιτείται και μείωση του τεράστιου όγκου που παράγεται, βελτίωση των διεργασιών ανακύκλωσης και ένας πιο οικολογικός σχεδιασμός των προϊόντων. Για παράδειγμα, είναι προτιμότερη η χρήση ενός μόνο υλικού ανά προϊόν και η αποφυγή προσθέτων, που όπως αναφέραμε, δυσχεραίνουν την ανακύκλωση και γενικά την διαχείριση αποβλήτων που προκύπτουν από τέτοιου είδους προϊόντα.

5.1 ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Τα τελευταία χρόνια έχουν σημειωθεί σημαντικές εξελίξεις που βελτίωσαν τις τεχνικές επεξεργασίας των πλαστικών που απορρίπτονται. Η μηχανική ανακύκλωση, που είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος, περιλαμβάνει διαλογή, καθαρισμό και ανακατασκευή των πλαστικών σε νέες πρώτες ύλες, ενώ η χημική ανακύκλωση προσφέρει μια εναλλακτική λύση, διασπώντας τα πλαστικά στα βασικά δομικά τους στοιχεία μέσω μεθόδων, όπως είναι η πυρόλυση και η διαλυτική διάσπαση (Moujoud et al., 2025). Οι βελτιωμένες τεχνολογίες διαλογής, όπως είναι η φασματοσκοπία εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας (Near-Infrared, NIR), έχουν διευκολύνει την ακριβή αναγνώριση διαφορετικών πολυμερών, με αποτέλεσμα ανακυκλωμένα υλικά καλύτερης ποιότητας (Moujoud et al., 2025). Επιπλέον, οι ψηφιακές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των μηχανικά αναγνώσιμων δεικτών και των ενσωματωμένων ιχνηθετών, ενισχύουν περαιτέρω την αποτελεσματικότητα της ανακύκλωσης, βοηθώντας στην ακριβή αναγνώριση των υλικών, μειώνοντας τη μόλυνση και βελτιώνοντας την ανακυκλωσιμότητα των σύνθετων προϊόντων (Moujoud et al., 2025).

5.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Αναφέρθηκαν στην παραπάνω υποενότητα εξελίξεις σχετικά με τις μεθόδους επεξεργασίας πλαστικών απορριμμάτων και ιδιαίτερα εκείνες που ευνοούν τις διαδικασίες ανακύκλωσης και ανάκτησης πρώτων υλών. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές συχνά είναι αρκετά ενεργοβόρες και εξακολουθούν να εκκρεμούν προκλήσεις για το πώς θα γίνουν και πιο οικονομικά βιώσιμες. Επομένως, παρά την πρόοδο που σημειώνεται, η ανακύκλωση, ως βασικός πυλώνας στο πλάνο της κυκλικής οικονομίας, αντιμετωπίζει ακόμη αξιοσημείωτους περιορισμούς.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η υποβάθμιση των πολυμερών, η οποία συχνά μειώνει την ποιότητα του ανακυκλωμένου πλαστικού, περιορίζοντας έτσι την επαναχρησιμοποίηση υψηλής αξίας (Moujoud et al., 2025). Οι οικονομικοί παράγοντες διαδραματίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο εμποδίζοντας την ανακύκλωση, καθώς οι χαμηλές τιμές του πετρελαίου καθιστούν τα πρωτογενή πλαστικά (virgin

plastics) πιο ανταγωνιστικά από άποψη κόστους, σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος συλλογής και διαλογής που μειώνει την κερδοφορία (Moujoud et al., 2025).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι διαδικασίες της ανακύκλωσης πλαστικών περιπλέκονται από την πολυπλοκότητα της σύστασης των σύγχρονων πλαστικών προϊόντων που παράγονται, συμπεριλαμβανομένων των συσκευασιών πολλαπλών υλικών. Άρα, η αντιμετώπιση όλων αυτών των ζητημάτων απαιτεί προηγμένες τεχνολογίες διαχωρισμού και τροποποίηση στον σχεδιασμό αυτών των προϊόντων, ώστε να διασφαλιστεί μία συμβατότητα με τα συστήματα ανακύκλωσης.

5.3 ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ

Η εξέλιξη της τεχνολογίας αναφέρθηκε παραπάνω πως έχει ευνοήσει στη βελτίωση των τεχνικών διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων. Παράλληλα έχει ευνοήσει – όπως παρατηρούμε και από τις ποσότητες πλαστικών απορριμμάτων που έχουν καταγραφεί – και την παραγωγή πλαστικών προϊόντων και ιδιαίτερα εκείνων που αφορούν συσκευασίες και προϊόντα μίας χρήσης. Αναφερθήκαμε, επίσης, εκτενώς στις συνέπειες των πλαστικών που καταλήγουν στο περιβάλλον και την επικίνδυνη διασπορά μικροπλαστικών. Η πρόκληση που αντιμετωπίζουμε, λοιπόν, με την τωρινή κατάσταση είναι η έλλειψη βιωσιμότητας όσον αφορά στα πλαστικά προϊόντα. Έχουν γίνει κάποια βήματα στις πλαστικές συσκευασίες ώστε να παραμείνουν αποδοτικές αλλά και βιώσιμες, ωστόσο λόγω της περίπλοκης σύστασης που συχνά καταλήγουν να έχουν δεν είναι εφικτό να ανακυκλωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν, με αποτέλεσμα να καταλήγουν με τα κοινά απορρίμματα.

Τα τελευταία χρόνια, διερευνώνται και ορισμένες εναλλακτικές λύσεις για την αντικατάσταση του πλαστικού μίας χρήσης (π.χ. με το χαρτί με επικάλυψη), ώστε να καλυφθεί η αυξανόμενη ζήτηση για πιο φιλικές προς το περιβάλλον συσκευασίες. Ωστόσο, κάθε τύπος υλικού έχει ξεχωριστές ιδιότητες που επηρεάζουν τις περιβαλλοντικές του επιπτώσεις: (α) το πλαστικό παρέχει προστασία, αλλά απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά την ανακύκλωση (β) το γυαλί είναι εύκολα ανακυκλώσιμο, αλλά μπορεί να είναι βαρύ στη μεταφορά (γ) το μέταλλο είναι ανακυκλώσιμο, αλλά η ανακύκλωσή του απαιτεί ενέργεια και (δ) το χαρτί είναι βιοδιασπώμενο, αλλά η χρήση του μπορεί να συμβάλλει στην αποψίλωση των δασών (Barca et al., 2024).

5.3.1 ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Οι Moujoud et al. (2025) αναφέρονται σε ένα άρθρο (από τα πρακτικά του 1ου Διεθνούς Συνεδρίου για την Έξυπνη Διοίκηση στη Βιομηχανική και Λογιστική Μηχανική (SMILE 2025)) στον οικολογικό σχεδιασμό ως μία λύση για βιώσιμη διαχείριση των πλαστικών αποβλήτων. Ο οικολογικός σχεδιασμός (Eco-Design) ή σχεδιασμός για το περιβάλλον (Design for Environment, DfR) ισχυρίζονται πως ενσωματώνει περιβαλλοντικές παραμέτρους στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων, αντιμετωπίζοντας τις επιπτώσεις σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής, από την εξόρυξη πόρων έως και την διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής. Ευθυγραμμίζοντας τις αποφάσεις σχεδιασμού με τις αρχές βιωσιμότητας, ο οικολογικός σχεδιασμός βελτιστοποιεί τη χρήση πόρων, μειώνει τα απορρίμματα και προωθεί οικολογικά υπεύθυνα προϊόντα, καθώς αυτή η προσέγγιση του κύκλου ζωής διασφαλίζει ότι όλες οι φάσεις συμβάλλουν στους στόχους βιωσιμότητας (Moujoud et al., 2025). Οι βασικές αρχές του οικολογικού σχεδιασμού περιλαμβάνουν την επιλογή ανακυκλώσιμων υλικών, την ελαχιστοποίηση ενεργοβόρων διεργασιών και τη διευκόλυνση της επαναχρησιμοποίησης, της επισκευής ή της ανακύκλωσης (Moujoud et al., 2025). Για παράδειγμα, ο αρθρωτός σχεδιασμός (σχεδιασμός με βάση τα δομικά στοιχεία) μπορεί να κάνει τα προϊόντα πιο ανθεκτικά και πιο εύκολα να επισκευαστούν ή να αναβαθμιστούν, το οποίο στα πλαστικά θα μπορούσε να σημαίνει χρήση τυποποιημένων εξαρτημάτων και αποσπώμενων συνδέσμων για την παράταση της διάρκειας ζωής και τη μείωση αποβλήτων (Moujoud et al., 2025).

Η επιλογή ανακυκλώσιμων υλικών είναι το πρωταρχικό βήμα του οικολογικού σχεδιασμού και αποτελεί βασικό μέρος, διότι – μιλώντας για πλαστικά – η επιλογή ευρέως ανακυκλώσιμων υλικών όπως PE, PP και PET απλοποιεί την διαδικασία ανακύκλωσης και κατά συνέπεια μειώνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στο πλαίσιο του περιβαλλοντικού σχεδιασμού είναι η διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων, με πιο διαδεδομένη τη χρήση βιοδιασπώμενων πλαστικών, υπερτερώντας σε περιβαλλοντικά οφέλη βέβαια έναντι της απόδοσής τους ως προϊόντα.

Σύμφωνα με τους Moujoud et al. (2025), μία άλλη σημαντική προσέγγιση είναι ο σχεδιασμός για αποσυναρμολόγηση (Design for Disassembly, DfD), ο οποίος διασφαλίζει ότι τα προϊόντα μπορούν με ευκολία να αποσυναρμολογηθούν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Αναφέρουν λοιπόν, πως χαρακτηριστικά, όπως είναι οι

αφαιρούμενες κόλλες και οι ετικέτες που ξεπλένονται, καθώς και η αποφυγή χρωστικών (όπως η αιθάλη, η οποία διαταράσσει την αυτοματοποιημένη διαλογή) μειώνουν την μόλυνση στην ανακύκλωση πλαστικών, βελτιώνοντας έτσι την ανάκτηση υλικών υψηλής ποιότητας.

Αυτές οι επιλογές που ικανοποιούν τις αρχές του οικολογικού σχεδιασμού καθιστούν τα πλαστικά πιο κατάλληλα για επαναχρησιμοποίηση σε προϊόντα συσκευασιών. Ωστόσο, αρκετές προκλήσεις περιορίζουν την ευρεία υιοθέτηση του σχεδιασμού για το περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων κυρίως της αδύναμης συνεργασίας μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών, της έλλειψης βιομηχανικών προτύπων και της έντονης εξάρτησης από ανεπίσημα συστήματα ανακύκλωσης (ιδιαίτερα σε χώρες χαμηλού και μεσαίου εισοδήματος) (Moujoud et al., 2025). Ένα άλλο εμπόδιο, σύμφωνα με τους Moujoud et al. (2025), αποτελεί το κενό στη γνώση, δηλαδή πολλοί σχεδιαστές δεν διαθέτουν εργαλεία και δεδομένα για να ευθυγραμμίσουν τις αποφάσεις σχεδιασμού με τις διαδικασίες ανακύκλωσης, τη συμπεριφορά των υλικών και τις απαιτήσεις της αγοράς. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για δομημένα συστήματα που θα καταγράφουν και θα μοιράζονται τη γνώση του DfR, επιτρέποντας έτσι την καλύτερη ενσωμάτωση πρακτικών φιλικών προς την ανακύκλωση στην ανάπτυξη προϊόντων (Moujoud et al., 2025).

5.3.2 ΒΙΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ

Η διαδικασία παραγωγής των βιοδιασπώμενων πλαστικών διαφέρει ανάλογα με την προέλευση της πρώτης ύλης, με αρχικό στάδιο παραγωγής να αποτελεί η μετατροπή της πρώτης ύλης σε βασικά δομικά στοιχεία και μονομερή (Afshar et al., 2024). Στην περίπτωση των πολυμερών ορυκτής προέλευσης, εφαρμόζεται η μέθοδος της πυρόλυσης για τη διάσπαση των υδρογονανθράκων σε θεμελιώδη μονομερή, όπως το αιθυλένιο και το προπυλένιο. Αντιθέτως, για τα πολυμερή βιολογικής προέλευσης χρησιμοποιούνται τεχνικές μικροβιακής ζύμωσης για τη μετατροπή της βιομάζας σε δομικά στοιχεία (όπως το γαλακτικό οξύ για την παραγωγή του PLA) ή απευθείας σε πολυμερή (όπως οι πολυεστέρες PHA) υπό ελεγχόμενες συνθήκες (Afshar et al., 2024). Η τελική διαμόρφωση των προϊόντων επιτυγχάνεται μέσω πολυμερισμού και βιομηχανικών μεθόδων όπως η εξώθηση και η θερμοδιαμόρφωση (Soroudi & Jakubowicz, 2013). Κρίσιμο στάδιο αποτελεί η ενσωμάτωση προσθέτων και η ανάμειξη πολυμερών, τα οποία προσδίδουν στο παραγόμενο πλαστικό υλικό τις

απαιτούμενες φυσικοχημικές ιδιότητες (αντοχή, ευκαμψία κ.ά.) ή ενισχύουν τη βιοδιασπαισιμότητά του διευκολύνοντας την προσέλκυση μικροοργανισμών και κατά συνέπεια, διευκολύνει την αποσύνθεση σε φυσικά περιβάλλοντα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις κάποια βιοδιασπώμενα πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατα των συμβατικών πολυμερών από τα οποία παράγονται κατά κανόνα τα πλαστικά υλικά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 3.

Συμβατικά πολυμερή	Εναλλακτικό πολυμερές	Χρήση
Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (High-Density Polyethylene, HDPE). Πολυπροπυλένιο (Polypropylene, PP). Πολυστυρένιο (Polystyrene, PS).	Πολυγαλακτικό οξύ (Polyactic Acid, PLA).	Γεωργικές μεμβράνες εδαφοκάλυψης, συσκευασίες τροφίμων, μπουκάλια υγρών προϊόντων, σακούλες.
Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (High-Density Polyethylene, HDPE). Πολυπροπυλένιο (Polypropylene, PP).	Πολυυδροξυαλκανοϊκά (Polyhydroxyalkanoates, PHAs), με συνδυασμό σταθεροποιητών όπως ανόργανα πληρωτικά και ίνες γυαλιού. Πολυυδροξυβουτυρικό (Polyhydroxybutyrate, PHB), με προσθήκη πλαστικοποιητών όπως γλυκερόλη, πολυαιθυλενογλυκόλη και σορβιτόλη.	Ιατρικές και γεωργικές εφαρμογές, συσκευασίες τροφίμων – περιέκτες και καπάκια, μαχαιροπίρουνα και καλαμάκια, εσωτερική επίστρωση σε χάρτινα ποτήρια μίας χρήσης.
Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (High-Density Polyethylene, HDPE). Πολυπροπυλένιο (Polypropylene, PP). Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (Low-Density Polyethylene, LDPE). Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (Polyethylene terephthalate, PET).	Μείγματα αμύλου, δηλαδή η ανάμειξη φυσικού αμύλου από πατάτα, καλαμπόκι, σιτάρι με άλλα πολυμερή.	Σακούλες, υλικά συσκευασίας, γεωργικές μεμβράνες.

Πίνακας 3: Εναλλακτικά βιοδιασπώμενα πολυμερή ως υποκατάστατα των συμβατικών πολυμερών και χαρακτηριστικές χρήσεις τους.

5.3.3 ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΒΙΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

Τα βιοδιασπώμενα πλαστικά δεν είναι όλα ίδια, ούτε είναι όλα ικανά να διασπαστούν με τον ίδιο τρόπο, άρα και δεν είναι όλα τους ακίνδυνα για το περιβάλλον, όπως αυθαίρετα θεωρείται αυτονόητο συνήθως λόγω της ονομασίας τους. Τα εν λόγω υλικά μπορούν να είναι είτε βιολογικής προέλευσης, είτε ορυκτών καυσίμων και συχνά έχουν διαφορετική συμπεριφορά αποικοδόμησης ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν και όχι βάση της προέλευσής τους. Τα περισσότερα εμπορικά βιολογικά πλαστικά προέρχονται από βιομάζα πρώτης γενιάς, λόγω καθιερωμένων και τεχνολογικά προηγμένων συστημάτων παραγωγής, με χαρακτηριστικό παράδειγμα ένα βιολογικό και βιοδιασπώμενο πολυγαλακτικό οξύ (Polylactic Acid, PLA) το οποίο παράγεται από ζάχαρη που προέρχεται από καλαμπόκι (Afshar et al., 2024). Λέγοντας «πρώτη γενιά», εννοούνται τα πλαστικά από βρώσιμες καλλιέργειες, όπως αναφέρθηκε και στο παράδειγμα με το καλαμπόκι.

Αυτό φαινομενικά θεωρείται μία ασφαλής επιλογή για πλαστικό υλικό και ακίνδυνο για το περιβάλλον στο τέλος του κύκλου ζωής του. Ωστόσο, οι καλλιεργητικές πρακτικές που χρησιμοποιούν λιπάσματα και φυτοφάρμακα, οι οποίες σχετίζονται με την παραγωγή πρώτης γενιάς ενδέχεται να επηρεάσουν σημαντικά τα θαλάσσια και γλυκά νερά, οδηγώντας πιθανότατα σε ευτροφισμό, όξινη του εδάφους, ρύπανση των υδάτων και του εδάφους και μεταβολές στη χρήση γης (Afshar et al., 2024).

Οπότε, μία προτιμότερη εναλλακτική είναι η βιομάζα «δεύτερης γενιάς», δηλαδή παραγωγή πλαστικών από απόβλητα, όπως γεωργικά υπολείμματα, άχυρα, ιλύς από βιολογικό καθαρισμό κ.ά. Το βασικό πλεονέκτημα της επιλογής δεύτερης γενιάς έναντι της πρώτης, αποτελεί τόσο η αξιοποίηση απορριμμάτων, άρα και ορθότερη διαχείρισή τους, όσο και η αποφυγή χρήσης τροφής για παραγωγή προϊόντων αντί για κατανάλωση. Ωστόσο, ακόμη και σε αυτήν την περίπτωση υπάρχουν μειονεκτήματα που δεν γίνεται να μην ληφθούν υπόψη. Αν και η βιομάζα δεύτερης γενιάς είναι με την πρώτη ματιά πιο συμφέρουσα για παραγωγή βιοπλαστικών, έχει αρνητικό αντίκτυπο, περιβαλλοντικά, λόγω της διαδικασίας που ακολουθείται. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία διύλισης αυτής της βιομάζας και στη συνέχεια η επεξεργασία της, αποτελεί σημείο συμφόρησης, καθώς είναι ενεργοβόρες διαδικασίες και υπάρχει και το τεχνολογικό εμπόδιο έως τώρα για να πραγματοποιηθούν με τον βέλτιστο τρόπο. Επομένως, χρησιμοποιώντας την παραπάνω πρώτη ύλη για

παραγωγή πλαστικών πιο φιλικών στο περιβάλλον, έχουμε συχνά το αντίθετο αποτέλεσμα, καθώς επιδεινώνεται το φαινόμενο της κλιματικής και ενεργειακής κρίσης.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τους Afshar et al. (2024), μία πιο ορθή χρήση βιομάζας σε αυτή την περίπτωση είναι η λεγόμενη «τρίτης γενιάς», δηλαδή τα μικροφύκη. Σε αυτή την περίπτωση ξεφεύγουμε από τις γεωργικές καλλιέργειες και τα υπολείμματά τους και μιλάμε για νερό. Η αξιοποίηση των μικροφυκών παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές ως μία εναλλακτική πρώτη ύλη για την παραγωγή πλαστικών, διότι διαθέτει σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις δύο προηγούμενες επιλογές που αναφέραμε. Πιο συγκεκριμένα, τα φύκια μπορούν να εντοπιστούν σε μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις, σε αλμυρό ή υπολειμματικό νερό, ενισχύοντας έτσι την παγκόσμια φωτοσυνθετική ικανότητα, συμβάλλοντας στον περιορισμό της ερημοποίησης και την αύξηση της ικανότητας μετατροπής του διοξειδίου του άνθρακα σε πρώτες ύλες (Afshar et al., 2024). Επιπλέον, πλεονεκτούν λόγω του εξαιρετικά υψηλού ρυθμού ανάπτυξης, αλλά και στην ικανότητά τους να προσαρμόζονται σε ποικίλα περιβάλλοντα (Afshar et al., 2024). Ωστόσο, παρά τα πολύ ιδανικά φαινομενικά οφέλη των μικροφυκών ως πρώτη ύλη, έχει επισημανθεί ότι η βελτιστοποίηση της διαδικασίας μετατροπής τους είναι απαραίτητη για την αξιοποίηση του πλήρους περιβαλλοντικού δυναμικού (Afshar et al., 2024).

5.3.4 ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΒΙΟΔΙΑΣΠΩΜΕΝΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ

Τα τελευταία δύο χρόνια γίνεται λόγος για ένα «επαναστατικό» εύρημα από την ιαπωνική επιστημονική κοινότητα, το οποίο θα μπορούσε να έχει άψογη εφαρμογή στις πλαστικές συσκευασίες, με σκοπό την μείωση των πλαστικών και μικροπλαστικών σωματιδίων που διαρρέουν στο περιβάλλον.

Αρχικά, τα ιδανικά πλαστικά για ένα βιώσιμο μέλλον θα πρέπει να πληρούν ορισμένα κριτήρια: (α) ευκολία ανακύκλωσης ώστε να καταστεί δυνατή μία κυκλική οικονομία, (β) ευκολία βιολογικής υποβάθμισης, ειδικά όταν εισέρχονται ακούσια σε θαλάσσια περιβάλλοντα, (γ) μη τοξικότητα τόσο για το περιβάλλον, όσο και για τον άνθρωπο και (δ) περιορισμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (Cheng et al., 2024). Βέβαια, κρίσιμο κρίνεται αυτά τα κριτήρια να συνδυάζονται με τις κλασικές φυσικοχημικές ιδιότητες των πλαστικών, που τους προσδίδουν όλα τα «ελκυστικά»

τους χαρακτηριστικά (όπως ανθεκτικότητα) και όχι να τις αναιρούν. Το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζεται ακόμη και στα εναλλακτικά πλαστικά που βασίζονται σε ανανεώσιμους πόρους αντί για ορυκτά, είναι η δημιουργία μικροπλαστικών όταν βρεθούν σε διάβρωση. Επομένως, τα πλαστικά επόμενης γενιάς θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να διασπώνται με ευκολία σε συστατικά μονομερή υπό βιολογικές συνθήκες, οι οποίες προκαλούνται από ερεθίσματα όπως οι ηλεκτρολύτες στους ωκεανούς, ώστε να επιτρέπεται ο αποτελεσματικός μεταβολισμός τους (Cheng et al., 2024).

Οι Cheng et al. (2024) δημοσίευσαν μία αναλυτική μελέτη που βασίζεται σε πειράματα με θέμα τη δημιουργία ενός πλαστικού υλικού, του οποίου η σύσταση του επιτρέπει μόλις βρεθεί σε θαλασσινό νερό να διαλυθεί εντός μερικών ωρών χωρίς να αφήσει μικροπλαστικά πίσω. Η μελέτη, λοιπόν, παρουσιάζει μία κατηγορία καινοτόμων υπερμοριακών πλαστικών (Supramolecular Plastics, SPs) που συνδυάζουν την ανθεκτικότητα των συμβατικών πλαστικών με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Τα εν λόγω πλαστικά βασίζονται στην μη-ομοιοπολική σύνθεση ιοντικών μονομερών και το καινοτόμο στοιχείο της μεθόδου παρασκευής τους αποτελεί η χρήση εξαμεταφωσφορικού νατρίου (Sodium Hexametaphosphate, SHMP) και ιόντων γουανιδινίου (Guanidinium Ion), τα οποία μέσω της διαδικασίας αυθόρμητου διαχωρισμού φάσης υγρού-υγρού (Liquid-Liquid Phase Separation, LLPS) και ακολούθως της αφαλάτωσης, σχηματίζουν ένα πυκνό και σταθερό δίκτυο το οποίο λόγω της αφαλάτωσης διαθέτει ισχυρούς δεσμούς. Ωστόσο, παρά την τόσο ισχυρή μηχανική αντοχή αυτών των υλικών, διατηρούν την θερμοπλαστικότητά τους επιτρέποντας έτσι την αντίστοιχη επεξεργασία τους.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα, σύμφωνα με την έρευνα των Cheng et al. (2024), είναι ο μηχανισμός αποσύνθεσής τους, ο οποίος είναι εξαιρετικά ευνοϊκός από περιβαλλοντικής σκοπιάς. Όπως αναφέρθηκε πιο γενικά και προηγουμένως, αντίθετα με τα συμβατικά πλαστικά, τα υπερμοριακά αυτά πλαστικά διασπώνται πλήρως στα αρχικά τους μονομερή όταν βρεθούν παρουσία ηλεκτρολυτών, όπως είναι το θαλασσινό νερό, χωρίς να αφήσουν πίσω υπολείμματα μικροπλαστικών. Επίσης, είναι βιολογικά συμβατά υλικά, δίνοντας τη δυνατότητα να μεταβολιστούν από τους μικροοργανισμούς, καθώς και να ανακυκλωθούν σε πλαίσιο κυκλικής οικονομίας με μεγάλα ποσοστά ανάκτησης. Τέλος, διεξήγαγαν και κάποια πειράματα με πολυσακχαρίτες βιολογικής προέλευσης και συγκεκριμένα με θεική χονδροϊτίνη

(Chondroitin Sulfate, ChS), καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως μπορεί να υπάρξει υλικό βιολογικής προέλευσης με διατήρηση υψηλής αντοχής και χαμηλής τοξικότητας.

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, μπορούμε να πούμε πως τέτοιου είδους πλαστικά είναι πολλά υποσχόμενα για την επίτευξη μία κυκλικής οικονομίας στον κύκλο ζωής των πλαστικών συσκευασιών και την καταπολέμηση της πλαστικής ρύπανσης, όταν και αν φυσικά καταστούν διαθέσιμα στην αγορά.

6. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΣΤΗΝ Ε.Ε. ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Το 2020 τέθηκε σε εφαρμογή το Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία, με σκοπό την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης και της μετάβασης της Ε.Ε. σε ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας, στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και του στόχου για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται συνοπτικά με χρονολογική σειρά οι ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα το ευρωπαϊκό σχέδιο δράσης για την μετάβαση σε κυκλική οικονομία, όπως αυτές καταγράφονται στη σελίδα του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου.

Χρονολογία	Ενέργειες
2022	✓ Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προτείνει τα πρώτα μέτρα για ταχύτερη μετάβαση σε μοντέλο κυκλικής οικονομίας, μαζί με μία πρόταση για νέους κανόνες συσκευασιών, που συνάδουν με την Ε.Ε. ✓ Το Κοινοβούλιο εγκρίνει την αναθεώρηση κανόνων για τους έμμονους οργανικούς ρύπους, στοχεύοντας στον περιορισμό των επιβλαβών χημικών ουσιών, τόσο στη διαδικασία παραγωγής προϊόντων, όσο και στη διαχείριση αποβλήτων.
2023	✓ Η Επιτροπή προτείνει επιπλέον μέτρα και μία πρόταση ρύθμισης των πράσινων αξιώσεων από εταιρείες και τη διασφάλιση του δικαιώματος επισκευής προϊόντων.

Πίνακας 4: Βασικές προτάσεις και θεσπίσεις κανόνων του σχεδίου δράσης της Ε.Ε.

Χρονολογία	Ενέργειες
2023	✓ Η Επιτροπή προτείνει αναθεώρηση της οδηγίας πλαισίου περί αποβλήτων, ώστε να προωθηθεί η αειφόρος διαχείριση των απορριμμάτων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων και τροφίμων. ✓ Εγκρίνεται ο νόμος περί κρίσιμων πρώτων υλών, ο οποίος επιδιώκει, μεταξύ άλλων, τη μείωση της εξάρτησης της Ε.Ε. από εισαγόμενες κρίσιμες πρώτες ύλες, η συντήρηση και επαναχρησιμοποίηση πολύτιμων πρώτων υλών.
2024	✓ Το Κοινοβούλιο εγκρίνει τη θέσπιση ενός συστήματος πιστοποίησης σε επίπεδο Ε.Ε. για την αφαίρεση άνθρακα. ✓ Οι ευρωβουλευτές εγκρίνουν μία συμφωνία με το Συμβούλιο για επικαιροποίηση των κανόνων της Ε.Ε. για τους καταναλωτές, απαγορεύοντας την ψευδή οικολογική σήμανση και παρέχοντας περισσότερες πληροφορίες στους καταναλωτές σχετικά με τα προϊόντα. ✓ Το Κοινοβούλιο εγκρίνει μία θέση σχετικά με ένα σύστημα επαλήθευσης των περιβαλλοντικών ισχυρισμών των εταιρειών. ✓ Το Κοινοβούλιο εγκρίνει νέους κανόνες, οι οποίοι συμπεριλαμβάνουν τη διασφάλιση ευκολότερης και φθηνότερης επισκευής προϊόντων αντί της αγοράς νέων, τη δημιουργία αγοράς βιώσιμων και αποδοτικών (από πλευράς πόρων) προϊόντων.

Πίνακας 4 (συνέχεια): Βασικές προτάσεις και θεσπίσεις κανόνων του σχεδίου δράσης της Ε.Ε.

Όπως προαναφέρθηκε, οι αρχές που διέπουν ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας πρέπει να εφαρμόζονται σε όλα τα στάδια – από εκείνο του σχεδιασμού έως τον καταναλωτή – ώστε να είναι αποτελεσματικό το μοντέλο. Το σχέδιο δράσης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, εκτός από προτάσεις και θέσπιση κανόνων (Πίνακας 4), περιλαμβάνει και παράρτημα με τους βασικούς τομείς που κρίνονται κρίσιμοι για μία επιτυχημένη κυκλική οικονομία. Μεταξύ άλλων, αναφέρονται οι πλαστικές ύλες και οι συσκευασίες. Σύμφωνα με την τελευταία ενημέρωση των μέτρων που εγκρίθηκαν από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο με σκοπό τη μείωση των πλαστικών απορριμμάτων το 2025, στους νέους κανονισμούς περιλαμβάνονται καινούργιοι στόχοι μείωσης, απαγόρευση ορισμένων πλαστικών μίας χρήσης, ανακυκλώσιμες συσκευασίες και συστήματα συλλογής για ανακύκλωση.

Επιπλέον, οι αναθεωρημένοι αυτοί κανονισμοί μεριμνούν και για την μάζιγα των μικροπλαστικών, μέσω προσπάθειας θέσπισης νομοθεσίας κατά την οποία οι εταιρείες που χειρίζονται πλαστικά υλικά να είναι υποχρεωμένες να αποφύγουν τυχόν απώλειες και να περιορίσουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις τυχόν διαρροές που μπορεί να προκύψουν. Όσον αφορά στα πλαστικά μίας χρήσης, από το 2019 έχει εγκριθεί από το Κοινοβούλιο νόμος απαγόρευσης αυτών των πλαστικών (π.χ. πιάτα, μαχαιροπίρουνα κτλ.) και απαίτηση από τις αντίστοιχες υπεύθυνες εταιρείες συσκευασίας αγαθών να συμμετέχουν στο κόστος διαχείρισης των απορριπτόμενων πλαστικών.

Στα τέλη του 2021, αναθεωρήθηκε και καταστήθηκε πιο συγκεκριμένο το εθνικό σχέδιο δράσης στη χώρα μας με την «Κυκλική Οικονομία: Το Νέο Σχέδιο Δράσης της Ελλάδας», με διάρκεια έως το 2025. Σύμφωνα με το ΥΠΕΝ, το σχέδιο αυτό βρισκόταν σε εναρμόνιση με εκείνο της Ε.Ε., ήταν συμβατό με τους στόχους-δεσμεύσεις και τις οδηγίες που περιλαμβάνονται στο τελευταίο, όπως επίσης λαμβάνει υπόψη τις νέες νομοθεσίες της Ελλάδας που σχετίζονται με τα απορρίμματα, τα πλαστικά μίας χρήσης και την εναλλακτική διαχείριση. Ουσιαστικά, το σχέδιο δράσης είναι μία κατευθυντήρια γραμμή οδηγιών με ισχύ 4 χρόνια (στην προκειμένη περίπτωση τα έτη 2021-2025) και περιλαμβάνει 71 δράσεις οι οποίες έχουν στόχο να καταστεί η οικονομία της χώρας βιώσιμη και ανταγωνιστική (ΥΠΕΝ, 2020).

Με τη λήξη της περιόδου 2021-2025, η χώρα μας θέτει σε εφαρμογή το Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης με ισχύ 2026-2030. Στο πλαίσιο του προγράμματος αυτού, η Ελλάδα θέτει ως προτεραιότητα την «πράσινη ανάπτυξη», ως συνέχεια της προηγούμενης περιόδου, κατά την οποία εστίασαμε στη διαχείριση των αποβλήτων και την προστασία του περιβάλλοντος. Προτεραιότητα στο παρόν σχέδιο αποτελούν οι φυσικοί πόροι και η ορθή διαχείρισή τους ώστε να επιτευχθεί η αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης που διανύουμε, πάντα με βασικό σύμμαχο ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας. Όπως αναγράφεται και στο δημοσιευμένο έγγραφο του Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης 2026-2030, ο στόχος της πράσινης ανάπτυξης και του πράσινου μετασχηματισμού εξειδικεύεται σε τρεις επιμέρους ειδικούς στόχους: (1) την προώθηση βιώσιμης ανάπτυξης, (2) την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μέσω καθαρής ενέργειας και εξοικονόμησης πόρων και (3) την

ενίσχυση της ανθεκτικότητας απέναντι στην κλιματική αλλαγή μέσω ορθής διαχείρισης ενέργειας, νερού και αποβλήτων.

6.1 ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Στην τρέχουσα περίοδο που διανύουμε, η νομοθεσία στη χώρα μας που αφορά τα πλαστικά και συγκεκριμένα, στοχεύει στη μείωση της ρύπανσης από πλαστικά προϊόντα μίας χρήσης, βασίζεται στον νόμο 4736/2020. Ο συγκεκριμένος νόμος ενσωματώνει την Οδηγία της Ε.Ε. 2019/904, η οποία σχετίζεται με την μείωση των επιπτώσεων ορισμένων πλαστικών προϊόντων στο περιβάλλον και λοιπές διατάξεις (ΦΕΚ 200/Α', 2020).

Αρχικά, με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης των πλαστικών προϊόντων μίας χρήσης, έχουν τεθεί ορισμένοι ποσοστιαίοι στόχοι για κάθε έτος που διανύουμε, δηλαδή για παράδειγμα μείωση κατανάλωσης στο 30% έως το 2024 συγκριτικά με το 2022, έως το 2026 στο 60% πάλι συγκριτικά με το 2022 και ούτω καθεξής. Για την επίτευξη των στόχων αυτών, επιβλήθηκε από την έναρξη του 2022 εισφορά που σχετίζεται με προϊόντα αυτής της κατηγορίας που διατίθενται στα καταστήματα εστίασης, καθώς και επιβολή από τις επιχειρήσεις αυτές εναλλακτικών επαναχρησιμοποιήσιμων προϊόντων, ώστε να επιλέγει ο καταναλωτής. Αξιοσημείωτος είναι ο κανονισμός που δίνει την επιλογή στον καταναλωτή να διαθέτει μαζί του κάποιο επαναχρησιμοποιήσιμο εναλλακτικό προϊόν για να παραλάβει το πόσιμο ή βρώσιμο αγαθό που θα καταναλώσει από το κατάστημα, με την προϋπόθεση ότι κρίνεται κατάλληλο για την συγκεκριμένη χρήση. Παράλληλα επιβάλλεται στην επιχείρηση να διατηρεί μικρότερο το κόστος όταν εφαρμόζεται η παραπάνω εναλλακτική από το αρχικό κόστος με την επιλογή μίας χρήσης.

Έπειτα, σε επόμενο άρθρο αναφέρεται ένας δραστικός κανονισμός σε ισχύ από το 2021, ο οποίος περιορίζει ορισμένα πλαστικά προϊόντα μίας χρήσης στην αγορά, παρέχοντας βέβαια εναλλακτική λύση. Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνει μπατονέτες (εξαιρουμένων εκείνων για ιατρικά βοηθήματα), μαχαιροπίρουνα, πιάτα, καλαμάκια (εξαιρουμένων ορισμένων κατηγοριών), αναδευτήρες ποτών, στηρίγματα μπαλονιών (εξαιρείται η επαγγελματική/βιομηχανική χρήση), δοχεία ποτών και τροφίμων από διογκωμένο πολυστυρένιο και γενικά, όλα τα πλαστικά προϊόντα που οξοδιασπώνται, άρα και θρυμματίζονται αφήνοντας μικροπλαστικά πίσω.

Επίσης, από το 2024, υπάρχει η απαίτηση για πλαστικά προϊόντα που φέρουν καπάκι να είναι κατασκευασμένα με τρόπο τέτοιο ώστε το καπάκι να βρίσκεται προσαρτημένο στο δοχείο. Στο ίδιο άρθρο, αναφέρεται πως από το 2025 οι φιάλες φτιαγμένες από PET πρέπει να περιλαμβάνουν ανακυκλωμένο πλαστικό σε ποσοστό τουλάχιστον 25%, ενώ το ποσοστό ανεβαίνει στο 35% έως το 2030 για όλες τις φιάλες ποτών στην αγορά.

Επιπλέον, από το 2021, οι παραγωγοί φέρουν και την ευθύνη της σήμανσης στα πλαστικά προϊόντα μίας χρήσης, ώστε να είναι ενήμερος ο καταναλωτής για την διαχείρισή τους μετά τη χρήση. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει η υποχρέωση ενημέρωσης από τον παραγωγό προς τον καταναλωτή για τις επιλογές διαχείρισης του αποβλήτου που προκύπτει μετά τη χρήση, καθώς και τους τρόπους απόρριψης που πρέπει να αποφεύγονται μαζί με τις περιβαλλοντικές συνέπειες που εγκυμονούν ενός τέτοιου τρόπου. Ο κύριος τρόπος που πληροφορείται ο καταναλωτής είναι η ανεξίτηλη και ευδιάκριτη σήμανση που φέρει η συσκευασία.

Τέλος, τίθενται αισιόδοξοι στόχοι που αφορούν στην ανακύκλωση των πλαστικών αποβλήτων που προκύπτουν από προϊόντα μίας χρήσης, συμπεριλαμβανομένων των πλαστικών φιαλών μαζί με τα καπάκια και τα καλύμμά τους. Πιο ειδικά, δίνεται βαρύτητα στη χωριστή συλλογή για ανακύκλωση των απορριμμάτων αυτών, καθώς αναφέρεται στο άρθρο 13 ότι «έως το έτος 2029, η χωριστή συλλογή για ανακύκλωση των αποβλήτων αυτών θα πρέπει να είναι ίση τουλάχιστον με το 90% αυτών των προϊόντων μίας χρήσης που διατίθενται στην αγορά σε ένα δεδομένο έτος, κατά βάρος».

7. ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΩΝ

Σε ένα άρθρο τους, οι Ding και Zhu (2023) εξέτασαν την κρίση των πλαστικών αποβλήτων συσκευασίας και κατέληξαν στο συμπέρασμα πως η αντιμετώπισή της απαιτεί τον συνδυασμό του σχεδιασμού στην αρχή του κύκλου ζωής με βελτιωμένες τεχνολογίες ανακύκλωσης στο τέλος του. Οι συγγραφείς επισημαίνουν πως το μείζον πρόβλημα δεν είναι μόνο η συλλογή και η επεξεργασία των απορριμμάτων από συσκευασίες, αλλά κυρίως ο ίδιος ο σχεδιασμός της συσκευασίας. Η ικανότητα ενός απορρίμματος να ανακυκλωθεί επηρεάζεται καθοριστικά εξαρχής από την επιλογή

των υλικών, τη δομή, την προσθήκη διακοσμητικών στοιχείων, ενώ οι πολλαπλές στρώσεις και τα σύνθετα υλικά δυσχεραίνουν τη διαλογή και παράλληλα αυξάνουν το κόστος επεξεργασίας.

Άρα, ουσιαστικά ως μία βέλτιστη πρακτική διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων συσκευασιών αποτελεί η πρόληψη, δηλαδή τα μέτρα που λαμβάνονται για το προϊόν πριν αυτό γίνει απόβλητο. Ο σχεδιασμός για ανακύκλωση, που αναφέρουν οι Ding και Zhu (2023), είναι ίσως η πιο κρίσιμη στρατηγική πρόληψης. Υπό αυτό το πρίσμα, στο άρθρο (Ding & Zhu, 2023) προτείνεται ως προτεραιότητα ο σχεδιασμός για ανακύκλωση με μονοϋλικά, απλούστερες δομές, ευκολότερη αποσυναρμολόγηση και περιορισμό περιττών επιστρώσεων, χρωμάτων/μελανιών, ετικετών και εξαρτημάτων.

Επιπλέον, ο σχεδιασμός για ανακύκλωση μπορεί όχι μόνο να μειώσει τις εκπομπές πλαστικού, αλλά και να αυξήσει την ποσότητα πλαστικών αποβλήτων που ανακυκλώνονται (Ding & Zhu, 2023). Τα κύρια σημεία που περιλαμβάνονται στον σχεδιασμό έχουν ως εξής (Πίνακας 5):

Σχεδιασμός για ανακύκλωση		
1.	Ανακυκλώσιμα υλικά και σήμανση	Η δυνατότητα ανακύκλωσης ενός προϊόντος εξαρτάται από τις ιδιότητες των υλικών του και από το αν αυτές διατηρούνται μετά τη χρήση. Για τον λόγο αυτό, δεδομένου ότι δεν είναι ανακυκλώσιμα όλα τα υλικά, είναι απαραίτητη η σαφής σήμανση των υλικών και των ανακυκλώσιμων εξαρτημάτων.
2.	Τεχνικές και μέθοδοι ανάκτησης	Οι μέθοδοι ανακύκλωσης διαφέρουν ανάλογα με το είδος του υλικού και του εξαρτήματος, καθώς ορισμένα υλικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν άμεσα, ενώ άλλα απαιτούν προηγουμένως επεξεργασία. Επομένως, ο σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις διαθέσιμες τεχνικές ανάκτησης και τις δυνατότητες εφαρμογής τους.

Πίνακας 5: Οι κύριοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό για ανακύκλωση.

Σχεδιασμός για ανακύκλωση		
3.	Οικονομία της ανακύκλωσης	Η οικονομική βιωσιμότητα αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για να επιτευχθεί η ανακύκλωση. Οι σχεδιαστές οφείλουν να γνωρίζουν τις συνθήκες της αγοράς ανακυκλώσιμων υλικών, το κόστος συλλογής και επεξεργασίας, καθώς και τις μεθόδους αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή.
4.	Δομή και σχεδιασμός ανακυκλώσιμων εξαρτημάτων	Βασική προϋπόθεση για την επιτυχία της ανακύκλωσης είναι η απλή αποσυναρμολόγηση χωρίς φθορές και με χαμηλό κόστος. Συνεπώς, τα προϊόντα πρέπει να σχεδιάζονται ως σύνολα λειτουργικών μονάδων που είναι εύκολα προσβάσιμες, απλές στη συναρμολόγηση, αλλά και στον διαχωρισμό.

Πίνακας 5 (συνέχεια): Οι κύριοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό για ανακύκλωση.

Η σημασία του σχεδιασμού γίνεται ακόμη πιο εμφανής όταν εξεταστούν τα σύνθετα και πολλαπλών στρώσεων υλικά συσκευασίας. Αν και τέτοιου τύπου υλικά επιλέγονται με σκοπό την εξασφάλιση της προστασίας του προϊόντος, την μεγαλύτερη αντοχή και διάρκεια ζωής, η ανακύκλωσή τους κρίνεται ιδιαίτερα δύσκολη, μιας και το να ανακτηθεί ξεχωριστά η κάθε στρώση δεν είναι απλή διαδικασία, με αποτέλεσμα η τελική διαχείριση να περιλαμβάνει αποτέφρωση ή ταφή. Για τους λόγους αυτούς, στις μελέτες που δημοσιεύονται δίνεται έμφαση σε λύσεις που αποσκοπούν σε πιο απλές μορφές συσκευασίας, ή που περιλαμβάνουν σχεδιασμό υλικών που είναι εξ αρχής συμβατά με την διαλογή και τις διεργασίες της ανακύκλωσης, αντί να επικεντρώνονται σε λύσεις που προσπαθούν εκ των υστέρων να διορθώσουν το δύσχρηστο προϊόν (Ding & Zhu, 2023, Arijeniwa et al., 2024).

Ωστόσο, ο σχεδιασμός δεν επαρκεί από μόνος του χωρίς την αποτελεσματική συλλογή και διαλογή. Οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί σε αυτόν τον τομέα δείχνουν ότι η περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα των συστημάτων διαχείρισης εξαρτάται σε καθοριστικό βαθμό από την διαλογή στην πηγή, από την ποσότητα και την ποιότητα των ανακυκλωμένων πλαστικών και από τον περιορισμό των εκπομπών που συνδέονται με την διαδικασία της επεξεργασίας των αποβλήτων (Ding & Zhu, 2023).

Στη βιβλιογραφία επισημαίνεται πως και η ποιότητα της ανακύκλωσης εξαρτάται επίσης από την διαλογή στην πηγή, αλλά και από τις τεχνολογίες διαχωρισμού, όπως η επίπλευση, η ηλεκτροστατική διαλογή με αισθητήρες ή υπέρυθρη ανίχνευση, καθώς και από την δυνατότητα που δίνεται για μηχανική ή χημική επεξεργασία των ρευμάτων που προκύπτουν (Ding & Zhu, 2023, Arijeníwa et al., 2024). Η μηχανική ανακύκλωση εξακολουθεί να παραμένει η πιο αποτελεσματική λύση για πιο καθαρά ρεύματα, ωστόσο όταν υπάρχουν προσμίξεις και πολλαπλές στρώσεις υλικών μειώνεται η απόδοσή της, ενώ η χημική ανακύκλωση προσφέρει περισσότερες δυνατότητες επεξεργασίας για τα σύνθετα πλαστικά, αλλά με μειονέκτημα το μεγαλύτερο ενεργειακό και οικονομικό κόστος (Ding & Zhu, 2023, Arijeníwa et al., 2024).

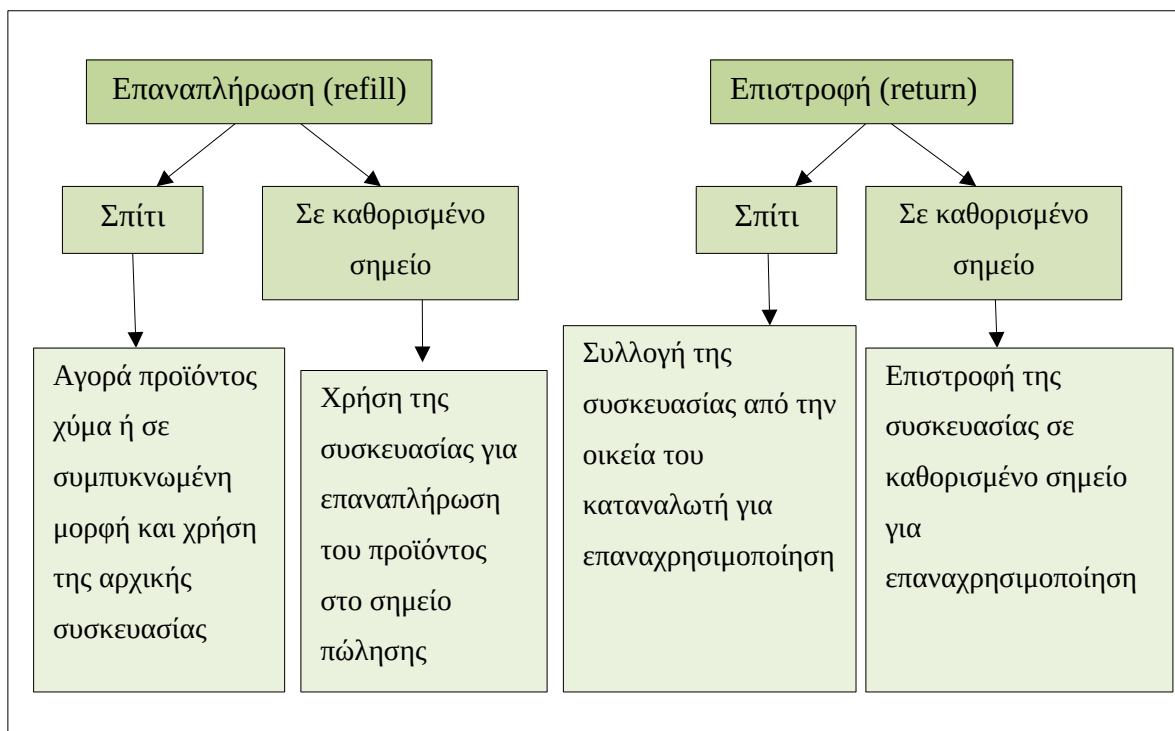
Για τα μεικτά ή μολυσμένα πλαστικά, λοιπόν, η χημική ανακύκλωση αποτελεί σημαντική συμπληρωματική λύση, καθώς μέσω διεργασιών όπως η πυρόλυση, η αεριοποίηση και η αποπολυμερίωση, τα απορρίμματα διασπώνται στα βασικά χημικά τους συστατικά, τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για τα νέα πλαστικά ή για άλλες χημικές εφαρμογές (Arijeníwa et al., 2024). Όπως προαναφέρθηκε, όμως, η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν δεν είναι επαρκής η μηχανική ανακύκλωση, αλλά συνοδεύεται από μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις και από την ανάγκη ύπαρξης κατάλληλων υποδομών. Κατά συνέπεια, δεν αποτελεί υποκατάστατο της πρόληψης και του ορθού σχεδιασμού, παρά μόνο εργαλείο για σύνθετα ρεύματα αποβλήτων.

Πέρα από την κλασική ανακύκλωση, ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας αποκτούν οι πρακτικές της ανακύκλωσης υψηλής αξίας (upcycling), της επαναχρησιμοποίησης (reuse) και της ανακατασκευής (remanufacture), καθώς παρατείνουν τον κύκλο ζωής των πλαστικών συσκευασιών και διατηρούν την αξία του υλικού για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η ανακύκλωση υψηλής αξίας δεν περιορίζεται απλώς στην επανεπεξεργασία του αποβλήτου, αλλά στοχεύει στη μετατροπή του σε προϊόν υψηλότερης αξίας, χωρίς απαραίτητα να αλλοιώνεται πλήρως η βασική πολυμερική του δομή (Arijeníwa et al., 2024). Με αυτόν τον τρόπο, το πλαστικό απόβλητο δεν αντιμετωπίζεται πλέον ως τελικό υπόλειμμα προς διάθεση, αλλά αντιθέτως επανεντάσσεται στην παραγωγική διαδικασία ως χρήσιμος πόρος. Για παράδειγμα, τα πλαστικά μπουκάλια μπορούν να μετατραπούν σε τσάντες, κοσμήματα και είδη διακόσμησης σπιτιού. Ανακυκλώνοντας τα πλαστικά απόβλητα,

αυτά τα δημιουργικά προϊόντα αποκτούν προστιθέμενη αξία, καθιστώντας τα πιο ελκυστικά για τους καταναλωτές και συμβάλλοντας σε μια νοοτροπία κυκλικής οικονομίας (Arijenīwa et al., 2024).

Στην περίπτωση της επαναχρησιμοποίησης και της ανακατασκευής, ενισχύεται ακόμη περισσότερο η παραπάνω λογική, επειδή μειώνεται η ανάγκη για παραγωγή νέων πρώτων υλών και περιορίζεται η ποσότητα των αποβλήτων που καταλήγουν σε διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Σε ένα κυκλικό σύστημα, η έμφαση μετατοπίζεται από την απλή απόρριψη και επεξεργασία των απορριμμάτων προς την πρόληψη της δημιουργίας τους και προς τον επανασχεδιασμό προϊόντων, ώστε να παραμείνουν λειτουργικά για περισσότερους κύκλους χρήσης (Arijenīwa et al., 2024). Για παράδειγμα, ορισμένοι τύποι πλαστικών αποβλήτων, όπως τα μπουκάλια PET και οι πλαστικές σακούλες, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν και να μετατραπούν σε δομικά υλικά (π.χ. οικολογικά τούβλα και πλαστική ξυλεία αντίστοιχα) (Arijenīwa et al., 2024). Έτσι, σε αυτό το πλαίσιο, η συσκευασία δεν θεωρείται πλέον ένα υλικό μίας χρήσης, αλλά ένα υλικό που μπορεί να εισέρχεται επανειλημμένα στην αλυσίδα αξίας, συμβάλλοντας στη μείωση κατανάλωσης πόρων, αλλά και στον περιορισμό της ρύπανσης.

Η επαναχρησιμοποίηση ως μέθοδος βρίσκεται σε υψηλότερη θέση από την ανακύκλωση στην ιεραρχία της διαχείρισης αποβλήτων, καθώς αποτρέπει την δημιουργία απορριμμάτων συγκριτικά με την ανακύκλωση που στοχεύει στην επεξεργασία του αποβλήτου. Στο πλαίσιο αυτό, μπορούμε να διακρίνουμε διάφορα μοντέλα επαναχρησιμοποίησης πλαστικών συσκευασιών, τα οποία συνοψίζονται στο Σχήμα 2, με βασική διάκριση τρόπους που εφαρμόζονται οικιακά και τρόπους που απαιτούν συνεργασία με καθορισμένα σημεία πώλησης ή και φορείς που αναλαμβάνουν τη συλλογή.



Σχήμα 3: Βασικά μοντέλα επαναχρησιμοποίησης συσκευασίας.

Βέβαια, εκτός από τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος διαχείρισης αποβλήτων, καθοριστικό ρόλο στην αποτελεσματικότητά του διαδραματίζουν και οι θεσμικές και κανονιστικές παρεμβάσεις. Η διευρυμένη ευθύνη του παραγωγού ενισχύει το κίνητρο για βέλτιστο σχεδιασμό, μιας και μεταφέρεται ένα σημαντικό μέρος της ευθύνης για το τέλος ζωής του προϊόντος στον παραγωγό, ενώ παράλληλα οι στόχοι που τίθενται για ανακυκλωμένα υλικά και οι εκάστοτε εταιρικές δεσμεύσεις για πλήρως ανακυκλώσιμες ή επαναχρησιμοποιήσιμες συσκευασίες πιάζουν την αγορά να κινηθεί σε πιο κυκλικά μοντέλα (Arijeniwa et al., 2024). Σε συνδυασμό με τα παραπάνω, η ενημέρωση των καταναλωτών και η σαφής σήμανση είναι απαραίτητα βήματα, καθώς μέχρι και σήμερα η άγνοια και η σύγχυση γύρω από το «πού» και «πώς» απορρίπτεται κάθε συσκευασία, λειτουργούν ως τροχοπέδη για την ανακύκλωση (Arijeniwa et al., 2024).

7.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

Ένα σύστημα που είναι διαδεδομένο σε ευρωπαϊκές χώρες και μπορεί να εφαρμοστεί σε ορισμένα πλαστικά προϊόντα που λειτουργούν ως συσκευασίες, είναι εκείνο της «Επιστροφής Εγγύησης». Ως Σύστημα Επιστροφής Εγγύησης (Deposit Refund

System, DRS) ορίζεται μία «πρόσθετη χρέωση στην τιμή δυνητικά ρυπογόνων προϊόντων, με επιστροφή της επιβάρυνσης που χορηγείται όταν αποφεύγεται η ρύπανση με την επιστροφή των προϊόντων ή των υπολειμμάτων τους» ((Picuno et al., 2025)). Συνδυάζει φορολογικούς μηχανισμούς και κίνητρα που επικεντρώνονται στον καταναλωτή, σχεδιασμένους να ενθαρρύνουν την επιστροφή χρησιμοποιημένων αγαθών, ελαχιστοποιώντας έτσι την περιβαλλοντική ρύπανση (Picuno et al., 2025). Η βασική αρχή του συστήματος είναι να παρέχεται στους καταναλωτές έκπτωση ή επιστροφή της επιβάρυνσης που προστίθεται στο προϊόν ποτού στο σημείο αγοράς, όταν η συσκευασία επιστρέφεται σε ένα καθορισμένο σημείο συλλογής αφού αδειάσει και μάλιστα, στη διεθνή βιβλιογραφία υποδηλώνεται ότι το σύστημα αυτό μπορεί να εξυπηρετήσει διάφορες λειτουργίες στο πλαίσιο της διαχείρισης αποβλήτων (Picuno et al., 2025).

Πιο συγκεκριμένα, μπορούν: (α) να αυξήσουν την ποιότητα και την ποσότητα των συλλεγόμενων υλικών και να μειώσουν τη ρύπανση, (β) να συμβάλουν σε υψηλά ποσοστά συλλογής πολύτιμων και ανακυκλώσιμων υλικών και (γ) να μετατοπίσουν το κόστος και τις ευθύνες που σχετίζονται με τη φάση τέλους κύκλου ζωής του προϊόντος από τους δήμους στους παραγωγούς, τονίζοντας τη σημασία των κανονισμών για την Εκτεταμένη Ευθύνη του Παραγωγού (Picuno et al., 2025).

Όπως προκύπτει από ανάλυση των Picuno et al. (2021), τα DRS για φιάλες PET αποτελούν ένα αποδοτικό παράδειγμα στρατηγικής συλλογής, καθώς στην Ολλανδία εκτιμάται ότι το ποσοστό συλλογής ανέρχεται στο 95% των φιαλών, ενώ στη Γερμανία σχεδόν το 92% των φιαλών που διατίθενται στην αγορά συλλέγεται επιτυχώς και διοχετεύεται σε μηχανική ανακύκλωση. Αντίθετα, στην Αυστρία όπου δεν χρησιμοποιούνται DRS, το ποσοστό χωριστής συλλογής φιαλών PET ανέρχεται μόλις στο 64% (Picuno et al., 2021). Σε μεταγενέστερη ανάλυση των Picuno et al. (2025), για την εφαρμογή και τις επιπτώσεις των εν λόγω συστημάτων σε ευρωπαϊκές χώρες, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η απόδοση ενός Συστήματος Επιστροφής Εγγύησης καθορίζεται από ένα σύνολο κοινωνικών, οικονομικών και νομοθετικών παραγόντων. Οι υψηλότερες αξίες επιστροφής και τα περισσότερα σημεία επιστροφής αυξάνουν σημαντικά τα ποσοστά επιστροφής σε επιτυχημένα συστήματα, ενώ παράλληλα η εξισορρόπηση των περιβαλλοντικών οφελών με τις εκπομπές μεταφοράς, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την βιωσιμότητα ενός συστήματος (Picuno et al., 2025).

Από την συγκριτική ανάλυση των χωρών: Γερμανία, Ολλανδία και Αυστρία (Picuno et al., 2021), προκύπτει ότι το 32% των φιαλών που συλλέγονται μέσω DRS ανακυκλώνονται σε εφαρμογές με τρόφιμα – άρα εφαρμόζεται σύστημα κλειστού βρόχου – ποσοστό το οποίο είναι να μην ικανοποιητικό συγκριτικά με άλλα ρεύματα υλικών, αλλά με αβέβαιες προοπτικές περαιτέρω αύξησης. Η επίτευξη κυκλικού συστήματος περιορίζεται κυρίως από παράγοντες σχετιζόμενους με την ποιότητα, καθώς η ύπαρξη τόσο εκ προθέσεως προστιθέμενων ουσιών, όσο και ακούσια προστιθέμενων, δημιουργεί αβεβαιότητα για την ασφάλεια των τροφίμων και την δυνατότητα πλήρους κυκλικότητας (Picuno et al., 2021).

Οι Picuno et al. (2021), καταλήγουν ότι χώρες με υψηλό βαθμό αστικοποίησης μπορούν είτε να θέσουν χαμηλό στόχο ανακύκλωσης και να λειτουργούν «μέτρια» συστήματα χωριστής συλλογής, είτε να θέσουν υψηλό στόχο ανακύκλωσης και να βασιστούν σε συνδυασμό των DRS και μηχανικής ανάκτησης. Η Γερμανία αποτελεί χώρα που συνδυάζει με επιτυχία ένα σύστημα χωριστής συλλογής με ένα Σύστημα Επιστροφής Εγγύησης, επιτυγχάνοντας ποσοστό ανακύκλωσης της τάξης του 43% (Picuno et al., 2021). Η Ολλανδία αν και ξεχωρίζει με τα υψηλότερα ποσοστά συλλογής μέσω DRS και την ανάκτηση από μεικτά απόβλητα, παρουσιάζει χαμηλότερο συνολικό ποσοστό ανακύκλωσης λόγω των προκλήσεων της χωριστής συλλογής στα αστικά κέντρα (Picuno et al., 2021). Η Αυστρία, χωρίς DRS, ούτε ανάκτηση από μεικτά απορρίμματα, εμφανίζει χαμηλότερο ποσοστό ανακύκλωσης, διότι ρίχνει το βάρος στη θερμική επεξεργασία, με 81% θερμική υποκατάσταση στην τσιμεντοβιομηχανία (Picuno et al., 2021).

Ωστόσο, τα DRS δεν μπορούν εύκολα να επεκταθούν σε όλες τις κατηγορίες πλαστικών συσκευασιών, παρά μόνο στις φιάλες και τα κουτιά, καθώς η μέχρι τώρα επιτυχία τους βασίζεται στο τόσο περιορισμένο εύρος τους, καθιστώντας απαραίτητη την ύπαρξη ενός συστήματος χωριστής συλλογής για όλους τους τύπους πλαστικών απορριμμάτων συσκευασιών (Picuno et al., 2021). Ενώ οι βιομηχανικοί φορείς υποστηρίζουν την τυποποίηση των συστημάτων αυτών για επίτευξη της μεγιστοποίησης της οικονομικής και τεχνικής αξίας στην αλυσίδα αξίας των πλαστικών φιαλών, παραμένουν σημαντικές προκλήσεις τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε περιφερειακό επίπεδο (Picuno et al., 2025). Δηλαδή, απαιτείται εναρμόνιση νομικών απαιτήσεων, αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού κόστους, αλλά και του μεταφορικού κόστους (Picuno et al., 2025).

Τέλος, η ανάλυση των Picuno et al. (2025) εφιστά την προσοχή στην ανάγκη για συνεχή αξιολόγηση και βελτίωση των στρατηγικών εφαρμογής του Συστήματος Επιστροφής Εγγύησης στο πλαίσιο των εξελισσόμενων πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων, με τον σχεδιασμό του DRS να πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις με την εφαρμογή του. Οι δύο μελέτες αυτές (Picuno et al., 2021 και Picuno et al., 2025), συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι η πορεία προς μια κυκλική οικονομία απαιτεί εναρμονισμένες πολιτικές παρεμβάσεις οι οποίες αντιμετωπίζουν τόσο την ποσότητα, όσο και την ποιότητα των ανακυκλωμένων πλαστικών.

8. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ

Στις παραπάνω ενότητες εξετάστηκαν οι κυριότερες πρακτικές διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων συσκευασιών που πραγματοποιούνται. Στόχος σε αυτή την ενότητα είναι η κριτική αξιολόγηση αυτών των πρακτικών ως προς την αποτελεσματικότητα, τη βιωσιμότητα, αλλά και τους περιορισμούς τους, συνθέτοντας τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη βιβλιογραφική ανάλυση.

Αρχικά, ο οικολογικός σχεδιασμός όπως περιγράφηκε από τους Moujoud et al. (2025), ενσωματώνει περιβαλλοντικές παραμέτρους σε όλο τον κύκλο ζωής τους πλαστικού προϊόντος. Ενώ αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά την πρακτική αυτή εύστοχη ως προς τον σκοπό που μας ενδιαφέρει στη διαχείριση των αποβλήτων που μελετάμε, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί. Συγκεκριμένα, η ευρεία υιοθέτησή της σε όλο το φάσμα της διαδικασίας διαχείρισης πλαστικών απορριμμάτων περιορίζεται από την αδυναμία πλήρους και ικανοποιητικής συνεργασίας μεταξύ των συμμετεχόντων φορέων και μερών, την έλλειψη βιομηχανικών προτύπων και ορισμένες ελλείψεις στις υπάρχουσες γνώσεις αλλά και στα κατάλληλα εργαλεία των σχεδιαστών, ώστε να ευθυγραμμιστούν οι αποφάσεις που πρέπει να παρθούν με τις απαιτήσεις ανακύκλωσης.

Επίσης, η πρόληψη μέσω του σχεδιασμού για ανακύκλωση, αποτελώντας μια πιο εξειδικευμένη και πολύτιμη πρακτική που εμπεριέχεται στην φιλοσοφία του οικολογικού σχεδιασμού, αναδεικνύεται μέσω της βιβλιογραφίας ως η πλέον θεμελιώδης στρατηγική διαχείρισης. Οι Ding και Zhou (2023), υποστηρίζουν ότι η ικανότητα ενός απορρίμματος να ανακυκλωθεί επηρεάζεται καθοριστικά από τον

αρχικό σχεδιασμό της συσκευασίας, με χρήση μονοϋλικών, απλούστερες δομές και περιορισμό περιττών χρωμάτων, επιστρώσεων και ετικετών, έτσι ώστε να αυξηθεί σημαντικά η δυνατότητα ανακύκλωσης. Βέβαια, η εφαρμογή αυτών των βημάτων αντικρούεται από πρακτικούς περιορισμούς, καθώς η χρήση των επιπλέον υλικών και στρωμάτων που θέλουμε να αποφύγουμε εξυπηρετούν σκοπούς ανθεκτικότητας, πρακτικότητας και προώθησης των προϊόντων. Η ανακύκλωσή τους όμως σε τέτοια μορφή είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη, με αποτέλεσμα η τελική τους διαχείριση να περιλαμβάνει συνήθως είτε αποτέφρωση, είτε υγειονομική ταφή. Συνεπώς, υπάρχει μια σύγκρουση μεταξύ λειτουργικής απόδοσης και δυνατότητας ανακύκλωσης, η οποία δεν είναι δυνατόν να επιλυθεί πάντοτε με απλή αντικατάσταση υλικών.

Έπειτα, στο πλαίσιο της ανακύκλωσης ως μέσο διαχείρισης, οι τεχνολογίες επεξεργασίας και διαλογής είναι εξέχουσας σημασίας. Από τη μία, η μηχανική ανακύκλωση παραμένει διαδεδομένη και οικονομικά αποδοτική μέθοδος όσον αφορά σε καθαρά ρεύματα πλαστικών. Η απόδοσή της, βέβαια, μειώνεται αισθητά όταν υπάρχουν προσμείξεις και πολλά στρώματα υλικών, οδηγώντας συχνά σε υποβάθμιση της ποιότητας του ανακυκλωμένου πλαστικού (Ding & Zhu, 2023, Arijeníwa et al., 2024). Από την άλλη, η χημική ανακύκλωση περιλαμβάνοντας διεργασίες όπως η πυρόλυση, η αεριοποίηση και αποπολυμερίωση, συμπληρώνει την μηχανική ανακύκλωση, λειτουργώντας συμπληρωματικά για σύνθετα και μολυσμένα απόβλητα (Arijeníwa et al., 2024). Ο περιορισμός σε αυτή την περίπτωση είναι το υψηλό οικονομικό και ενεργειακό κόστος, με αποτέλεσμα να περιορίζεται προς το παρόν η δυνατότητα εξέλιξης και ευρείας χρήσης των τεχνικών αυτών. Φυσικά, στην αποτελεσματικότητα των παραπάνω τεχνολογιών ρόλο διαδραματίζουν και οι προηγμένες τεχνολογίες διαλογής. Η φασματοσκοπία εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIR) και οι ψηφιακοί ιχνηθέτες ενδείκνυνται ως εργαλεία βελτίωσης της ακρίβειας αναγνώρισης πολυμερών υλικών, αλλά και για την μείωση της μόλυνσης των ρευμάτων (Moujoud et al., 2025). Παρόλα αυτά, σύμφωνα με τους Ding και Zhu (2023), η αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών αυτών εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα διαλογής στην πηγή, γεγονός που μεταθέτει την ευθύνη στην συμπεριφορά του καταναλωτή και τις υποδομές συλλογής της εκάστοτε περιοχής.

Με γνώμονα, λοιπόν, την σημασία της διαλογής στην πηγή για να επιτύχει οποιοδήποτε σύστημα ανακύκλωσης, το Σύστημα Επιστροφής Εγγύησης (DRS) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα στρατηγικής που συνδυάζει οικονομικά

κίνητρα προς τον καταναλωτή με περιβαλλοντικούς στόχους. Με βάση τη μελέτη των Picuno et al. (2021), οι χώρες που εφαρμόζουν DRS για φιάλες PET επιτυγχάνουν εντυπωσιακά υψηλότερα ποσοστά συλλογής προς διοχέτευση για κάποιο είδος επεξεργασίας, συγκριτικά με χώρες που δεν εφαρμόζουν τέτοιο σύστημα. Φυσικά, όπως σε όλες τις μεθόδους υπάρχουν κι εδώ περιορισμοί. Τα εν λόγω συστήματα αντιμετωπίζουν δυσκολία εφαρμογής σε όλες τις κατηγορίες πλαστικών συσκευασιών, περιορίζοντας την συλλογή μόνο σε φιάλες και κουτιά (Picuno et al., 2021). Επιπλέον, από την ίδια μελέτη (μεταξύ Γερμανίας, Ολλανδίας και Αυστρίας, Picuno et al., 2021) προέκυψε ότι από τις φιάλες που συλλέγονται με DRS, μόνο το 32% ανακυκλώνονται σε εφαρμογές κλειστού βρόχου στον τομέα των τροφίμων, ποσοστό που παραμένει στάσιμο λόγω αμφιβολιών που σχετίζονται με την ποιότητα και την ασφάλεια τροφίμων. Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση των DRS είναι κοινωνικοί, οικονομικοί και νομοθετικοί, καθώς οι υψηλότερες αξίες επιστροφής και η μεγαλύτερη πυκνότητα σημείων επιστροφής σαφώς αυξάνουν τα ποσοστά συλλογής, παραμένοντας όμως το πρόβλημα εξισορρόπησης των περιβαλλοντικών οφελών με τις εκπομπές μεταφοράς, κρίνοντας τη βιωσιμότητα του συστήματος (Picuno et al., 2025).

Παραμένοντας στο πλαίσιο της ανακύκλωσης αλλά και της πρόληψης δημιουργίας απορρίμματος, αναφέρθηκαν οι πρακτικές της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης υψηλής αξίας, οι οποίες παρατείνουν τον κύκλο ζωής των πλαστικών και παράλληλα διατηρούν την αξία του υλικού. Από την οπτική της περιβαλλοντικής προστασίας, η επαναχρησιμοποίηση πλαστικών συσκευασιών μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των μικροπλαστικών στο περιβάλλον, καθώς κάθε κύκλος χρήσης αποτρέπει την πιθανή εισαγωγή ενός νέου απορρίμματος στα οικοσυστήματα και κατά συνέπεια, προλαμβάνει την πιθανή του αποσύνθεση, άρα και απελευθέρωση μικροσωματιδίων. Επιπλέον, οι συσκευασίες που σχεδιάζονται για επαναχρησιμοποίηση είναι πιο ανθεκτικές και λιγότερο επιρρεπείς σε αποσύνθεση, με αποτέλεσμα να μην τίθεται και η ανθρώπινη υγεία σε κίνδυνο από την χρήση. Ωστόσο, η εφαρμογή τους παραμένει περιορισμένη συγκριτικά με τον συνολικό όγκο αποβλήτων προς διαχείριση, συνεπώς προς ώρας λειτουργούν ως συμπληρωματικές και όχι ως κεντρικές πρακτικές.

Επίσης, υπάρχει και η κατηγορία των βιοδιασπώμενων και πιο καινοτόμων πλαστικών υλικών, η οποία είναι μία ελκυστική αλλά σύνθετη εναλλακτική λύση. Οι

Afshar et al. (2024) έχουν δημοσιεύσει μία ανάλυση των διαφορετικών γενεών βιομάζας που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τέτοιων πλαστικών, αποκαλύπτοντας ότι κάθε επιλογή συνοδεύεται από κάποιους αντισταθμιστικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες: (α) η βιομάζα πρώτης γενιάς, αν και είναι τεχνολογικά ώριμη, ανταγωνίζεται τις καλλιέργειες τροφίμων και συνδέεται με ευτροφισμό, όξινη εδάφους και μεταβολές στη χρήση γης, (β) η βιομάζα δεύτερης γενιάς – γεωργικά υπολείμματα – αξιοποιεί τα απόβλητα, αλλά απαιτεί ενεργοβόρες διεργασίες, (γ) ενώ η βιομάζα τρίτης γενιάς – μικροφύκη – διαθέτει σημαντικές προοπτικές λόγω του ρυθμού ανάπτυξης και της δυνατότητας καλλιέργειας σε μη καλλιεργήσιμες εκτάσεις, αλλά παραμένει εμπόδιο η βελτιστοποίηση της μετατροπής τους. Σε ό,τι αφορά στα καινοτόμα πλαστικά, οι Cheng et al. (2024) παρουσίασαν μία κατηγορία υπερμοριακών πλαστικών που φαίνεται να συνδυάζουν τη μηχανική αντοχή με πλήρη διάσπαση σε θαλασσινό νερό, χωρίς να μένουν υπολείμματα μικροπλαστικών. Πρόκειται για μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση, ιδιαίτερα σε εφαρμογές και τομείς που σπάνια αποφεύγεται η διαρροή υλικών στο περιβάλλον. Ωστόσο, δεν πρόκειται για μία τεχνολογικά και εμπορικά ώριμη λύση, καθώς η διαθεσιμότητα και η κλίμακα παραγωγής αυτού του είδους πλαστικών παραμένουν ανοιχτά ερωτήματα.

Καταλύτης για την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών αποτελεί η διευρυμένη ευθύνη του παραγωγού, μετατοπίζοντας το κόστος διαχείρισης από τους δημοτικούς φορείς στους παραγωγούς. Παράλληλα με αυτή την τακτική, η ευρωπαϊκή νομοθεσία θέτει φιλόδοξους και συγκεκριμένους στόχους: (1) σταδιακός περιορισμός των πλαστικών μίας χρήσης, (2) συνεχώς αυξανόμενο ποσοστό ανακυκλωμένου υλικού πρέπει να περιέχεται στις φιάλες PET, (3) ενώ η χωριστή συλλογή των φιαλών θα πρέπει να αγγίζει το 90% έως το 2029. Οι στόχοι αυτοί είναι μεν φιλόδοξοι, αλλά η αποτελεσματικότητά τους δεν είναι απλή υπόθεση. Εξαρτάται από την ύπαρξη των κατάλληλων υποδομών, την συμμόρφωση των παραγωγών και την ενεργή συμμετοχή των καταναλωτών. Οι Arijeniwa et al. (2024) τονίζουν ότι η σαφής σήμανση στα προϊόντα και η αντίστοιχη ενημέρωση του καταναλωτικού κοινού παραμένουν αδύναμα σημεία, καθώς η σύγχυση που επικρατεί γύρω από το «πού» και «πώς» απορρίπτονται οι συσκευασίες ανάλογα με το είδος τους μπορεί να υπονομεύσει ακόμη και το πιο καλοσχεδιασμένο σύστημα συλλογής.

Από την συνολική αυτή αξιολόγηση των βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης προκύπτει ότι καμία πρακτική από μόνη της δεν επαρκεί στο 100% για την αντιμετώπιση της μάστιγας των πλαστικών αποβλήτων συσκευασιών. Οι μελέτες των Picuno et al. (2021,2025) και των Ding και Zhu (2023) συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι η πορεία προς κάποιο μοντέλο κυκλικής οικονομίας απαιτεί εναρμονισμένες πολιτικές παρεμβάσεις που αντιμετωπίζουν τόσο την ποσότητα όσο και την ποιότητα των ανακυκλωμένων πλαστικών, σε συνδυασμό με τον σχεδιασμό του προϊόντος στην αρχή του κύκλου ζωής του. Η ορθή και αποτελεσματική διαχείριση προϋποθέτει ένα μοντέλο που συνδυάζει: (α) σχεδιασμό για ανακύκλωση και πρόληψη στην πηγή, (β) βελτιωμένες τεχνολογίες συλλογή και διαλογής, (γ) οικονομικά κίνητρα (π.χ. DRS), (δ) ένα συγκεκριμένο και αυστηρό ρυθμιστικό πλαίσιο και (ε) ουσιαστική ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των καταναλωτών. Φυσικά, ένα ορισμένο μοντέλο δεν είναι αποτελεσματικό σε κάθε χώρα, περιοχή, εποχή και ούτω καθεξής. Η ιεράρχηση των παρεμβάσεων διαφοροποιείται ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες, δηλαδή για παράδειγμα, σε χώρες με υψηλό βαθμό αστικοποίησης μπορεί να συνδυαστεί το DRS με την μηχανική ανάκτηση, ενώ σε χώρες με έλλειψη ανεπτυγμένων υποδομών μπορεί να εφαρμοστεί μία διαφορετική προσέγγιση.

Τέλος, για να μεταβούμε από το γραμμικό μοντέλο διαχείρισης στο κυκλικό (που είναι και βασικός στόχος για να επιτύχουν όλα τα συστήματα διαχείρισης) απαιτείται συστημικός σχεδιασμός, με συντονισμένες δράσεις σε όλα τα επίπεδα: από τον σχεδιαστή και τον παραγωγό μέχρι τις ρυθμιστικές αρχές και τους καταναλωτές, καθώς και συνεχή αξιολόγηση και αναπροσαρμογή των στρατηγικών όποτε και όπου κρίνεται απαραίτητο. Επομένως, η ανάπτυξη καινοτόμων υλικών, η βελτιστοποίηση των υποδομών και η καλλιέργεια μίας φιλοσοφίας κυκλικής οικονομίας συνιστούν τους βασικούς άξονες για την επόμενη φάση της επιθυμητής μετάβασης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η διαχείριση πλαστικών αποβλήτων συσκευασιών, με απώτερο σκοπό την αποφυγή διαρροής μικροπλαστικών στο περιβάλλον, δεν είναι απλό ζήτημα που επιλύεται με μία μόνο τεχνική ή μέθοδο. Αντιθέτως, επειδή αποτελεί ένα πρόβλημα με ποικίλες παραμέτρους, απαιτεί τον συνδυασμό διαφόρων πρακτικών και συντονισμένων ρυθμιστικών παρεμβάσεων σε όλο το μήκος του κύκλου ζωής του πλαστικού. Κάθε

πρακτική που αναφέρθηκε φέρει ορισμένα πλεονεκτήματα που την καθιστούν κατάλληλη για πλαστικά απόβλητα από χρήση πλαστικών συσκευασιών, αλλά παράλληλα διαθέτει αδύναμα σημεία τα οποία στέκονται εμπόδιο για την αυτοτελή εφαρμογή και αποτελεσματικότητά της. Ακόμη και καινοτόμες λύσεις που φαίνονται πολλά υποσχόμενες (όπως τα βιοδιασπώμενα πλαστικά υλικά), συνοδεύονται αντισταθμιστικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες ή και παραμένουν σε πρώιμο στάδιο ωριμότητας, με αποτέλεσμα να μην είναι ακόμη ευρέως εφαρμόσιμες.

Η βασική συμβολή της παρούσας ανασκόπησης έγκειται στην ανάδειξη του γεγονότος ότι η απόλυτη μετάβαση σε μία κυκλική οικονομία – και η εξάλειψη του μοτίβου του γραμμικού μοντέλου («παραγωγή – χρήση – απόρριψη») στην κατανάλωση – είναι απαραίτητη και δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί με μεμονωμένες τεχνολογικές ή θεσμικές παρεμβάσεις. Απαιτείται ένα μοντέλο που θα στηρίζεται σε αλληλένδετους άξονες: (1) σχεδιασμός για ανακύκλωση και πρόληψη στην πηγή/επαναχρησιμοποίηση, (2) προηγμένες τεχνολογίες συλλογής και διαλογής, (3) κίνητρα για «ενεργοποίηση» του καταναλωτή, (4) αυστηρό και ορισμένο ρυθμιστικό πλαίσιο και (5) στοχευμένη ενημέρωση και ευαισθητοποίηση του καταναλωτικού κοινού. Εάν γίνονται εκπτώσεις στους βασικούς κρίκους αυτής της αλυσίδας και λείπει έστω και ένας, τότε υπονομεύεται η συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο το περιβάλλον αλλά και την ανθρώπινη υγεία.

Φυσικά, δεν υπάρχει ένα καθολικό και αλάνθαστο σύστημα διαχείρισης το οποίο εφαρμόζεται πάντα και υπό κάθε προϋπόθεση. Η ιεράρχηση των μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν διαφοροποιείται και εξαρτάται άμεσα από τις τοπικές συνθήκες και ανάγκες. Γι' αυτό συχνά στη βιβλιογραφία, συναντάμε σε επιλεγμένες χώρες τις μελέτες που διεξάγονται για να αξιολογηθεί κάποια πρακτική διαχείρισης, διότι οι γεωγραφικές και κοινωνικοοικονομικές παράμετροι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για την επιτυχία ή αποτυχία μίας στρατηγικής. Βέβαια, είναι επίσης πολύ συχνό το φαινόμενο να παραβλέπεται σε μία βιβλιογραφική ανασκόπηση η περιοχή που εξετάζεται κάθε πρακτική, με αποτέλεσμα να παραμένουν πολύ θεωρητικές οι προοπτικές επιτυχίας τους παντού.

Επομένως, για να μεταβούμε σε κυκλικό μοντέλο διαχείρισης των πλαστικών συσκευασιών απαιτείται ένας συστηματικός σχεδιασμός, συνεχής αξιολόγηση,

αναπροσαρμογή των στρατηγικών και συντονισμένες δράσεις σε όλα τα επίπεδα: από τον σχεδιαστή του προϊόντος και τον παραγωγό του, μέχρι τις ρυθμιστικές/νομοθετικές αρχές και τον καταναλωτή. Η ανάπτυξη καινοτόμων υλικών, η βελτιστοποίηση των υποδομών και η γενικότερη καλλιέργεια μίας φιλοσοφίας κυκλικής οικονομίας αποτελούν τους κύριους πυλώνες για την επόμενη φάση της μετάβασης. Το ζητούμενο πλέον δεν είναι το «αν» θα αλλάξει ο τρόπος διαχείρισης, αλλά το «πόσο σύντομα» και «ποιες είναι οι προτεραιότητες», ώστε να είναι ευνοϊκό το αποτέλεσμα τόσο για το περιβάλλον, όσο και για τον άνθρωπο ταυτόχρονα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσσες δημοσιεύσεις:

Afshar, S. V., Boldrin, A., Astrup, T. F., Daugaard, A. E., & Hartmann, N. B. (2024). Degradation of biodegradable plastics in waste management systems and the open environment: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140000. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140000>

An, X., Wang, Y., Adnan, M., Li, W., & Zhang, Y. (2024). Natural Factors of Microplastics Distribution and Migration in Water: A Review. *Water*, 16(11), 1595. <https://doi.org/10.3390/w16111595>

Arijeniwa, V. F., Akinsemolu, A. A., Chukwugozie, D. C., Onawo, U. G., Ochulor, C. E., Nwauzoma, U. M., Kawino, D. A., & Onyeaka, H. (2024). Closing the loop: A framework for tackling single-use plastic waste in the food and beverage industry through circular economy- a review. *Journal of Environmental Management*, 359, 120816. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120816>

Barca, A., D'Adamo, I., Gastaldi, M., & Leal Filho, W. (2024). Managing waste packaging for a sustainable future: A strategic and efficiency analysis in the European context. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05493-6>

Cheng, Y., Hirano, E., Wang, H., Kuwayama, M., Meijer, E. W., Huang, H., & Aida, T. (2024). Mechanically strong yet metabolizable supramolecular plastics by desalting upon phase separation. *Science*, 386(6724), 875–881. <https://doi.org/10.1126/science.ado1782>

Cui, B., Qi, H., Liu, M., Liu, M., Huang, W., Huang, P., Wang, C., Zheng, X., Ke, H., & Cai, M. (2025). Multi-scenario simulation of future marine microplastic distribution under data scarcity: A deep learning approach. *Water Research*, 286, 124233. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124233>

Ding, Q., & Zhu, H. (2023). The Key to Solving Plastic Packaging Wastes: Design for Recycling and Recycling Technology. *Polymers*, 15(6), 1485. <https://doi.org/10.3390/polym15061485>

Elizalde-Velázquez, G. A., & Gómez-Oliván, L. M. (2021). Microplastics in aquatic environments: A review on occurrence, distribution, toxic effects, and implications for human health. *Science of The Total Environment*, 780, 146551. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146551>

Fayshal, M. A. (2024). Current practices of plastic waste management, environmental impacts, and potential alternatives for reducing pollution and improving management. *Heliyon*, 10(23), e40838. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40838>

Hoang, H. G., Nguyen, N. S. H., Zhang, T., Tran, H.-T., Mukherjee, S., & Naidu, R. (2025). A review of microplastic pollution and human health risk assessment: Current knowledge and future outlook. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1606332. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1606332>

Jahedi, F., Turner, A., & Jaafarzadeh Haghighi Fard, N. (2026). Spices under the microscope: First detection and characterization of microplastics in turmeric, black pepper, and chili. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 13, 101334. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2026.101334>

Karapanagioti, H. (with Kalavrouziotis, I. K.). (2020). *Microplastics in Water and Wastewater—2nd Edition* (1st ed). IWA Publishing.

Moujoud, Y., Bouloiz, H., & Gallab, M. (2025). Closing the Loop: Achieving a Sustainable Future for Plastics Through Eco-Design and Recycling. *SMILE 2025*, 3. <https://doi.org/10.3390/engproc2025097003>

OECD. (2022). Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>

Operato, L., Panzeri, A., Masoero, G., Gallo, A., Gomes, L., & Hamd, W. (2025). Food packaging use and post-consumer plastic waste management: A comprehensive review. *Frontiers in Food Science and Technology*, 5, 1520532. <https://doi.org/10.3389/frfst.2025.1520532>

Pellengahr, F., Corella-Puertas, E., Mattelin, V., Saadi, N., Bertella, F., Boulay, A.-M., & Van Der Meer, Y. (2025). Modeling marine microplastic emissions in Life

Cycle Assessment: Characterization factors for biodegradable polymers and their application in a textile case study. *Frontiers in Toxicology*, 7, 1494220. <https://doi.org/10.3389/ftox.2025.1494220>

Picuno, C., Van Eygen, E., Brouwer, M. T., Kuchta, K., & Thoden Van Velzen, E. U. (2021). Factors Shaping the Recycling Systems for Plastic Packaging Waste—A Comparison between Austria, Germany and The Netherlands. *Sustainability*, 13(12), 6772. <https://doi.org/10.3390/su13126772>

Picuno, C., Gerassimidou, S., You, W., Martin, O., & Iacovidou, E. (2025). The potential of Deposit Refund Systems in closing the plastic beverage bottle loop: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 212, 107962. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107962>

Pilapitiya, P. G. C. N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>

Raj, M., Ghosh, A., Ilame, T., & Kumar, S. (2025). Plastic waste management strategies: Planning through sustainable lens and way forward towards circular economy. *Discover Sustainability*, 6(1), 361. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01103-1>

Rani, R., Malik, S., Kumar, D., Kumar, R., Mukherjee, S., Saharan, B. S., & Duhan, J. S. (2024). Advances in the role of microorganisms, waste management strategies and policies on microplastic abatement in the era of bio-circular economy. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 39, 101595. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101595>

Ratnayake, A. S., Gunawardhana, G. M. S. S., & Perera, U. L. H. P. (2024). The biography of microplastics (MPs): Occurrences, sources, weathering/degradation, characterization, ecological/human risks, removal methods, policy development, and current trends and future perspectives. *Anthropocene Coasts*, 7(1), 30. <https://doi.org/10.1007/s44218-024-00064-8>

Stanley, J., Culliton, D., Jovani-Sancho, A.-J., & Neves, A. C. (2025). The Journey of Plastics: Historical Development, Environmental Challenges, and the Emergence of Bioplastics for Single-Use Products. *Eng*, 6(1), 17.
<https://doi.org/10.3390/eng6010017>

Um, N., Cho, S.-J., & Yoon, Y.-S. (2024a). New Management Strategy Framework for Effectively Managing Microplastic in Circular System from Plastic Product Manufacturing to Waste Treatment Facility. *Sustainability*, 16(22), 10054.
<https://doi.org/10.3390/su162210054>

Um, N., Cho, S.-J., & Yoon, Y.-S. (2024b). *New Policy Framework for Effective Managing Microplastic in Circular System Form Plastic Product Manufacturing to Waste Treatment Facility*. *Environmental and Earth Sciences*.
<https://doi.org/10.20944/preprints202410.1048.v1>

Λιαδικτυακές ιστοσελίδες:

Plastics Europe. (2023). Recommendations on the Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR). <https://plasticseurope.org/media/ppwr-recommendations/>

European Commission. (2018). Plastic Waste: a European strategy to protect the planet, defend our citizens and empower our industries.
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_18_5

European Parliament. (2025). Plastic in the ocean: the facts, effects and new EU rules.
<https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20181005STO15110/plastic-in-the-ocean-the-facts-effects-and-new-eu-rules>

European Parliament. (2024). How the EU wants to achieve a circular economy by 2050. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20210128STO96607/how-the-eu-wants-to-achieve-a-circular-economy-by-2050>

European Parliament. (2024). How to reduce plastic waste: EU measures explained.
<https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20180830STO11347/how-to-reduce-plastic-waste-eu-measures-explained>

Τριανταφυλλίδης, Μ. Λεξικό της κοινής νεοελληνικής. Κέντρο Ελληνικής Γλώσσας (διαδικτυακή έκδοση).

https://www.greek-language.gr/greekLang/modern_greek/tools/lexica/triantafyllides/index.html

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Κυκλική Οικονομία.
<https://ypen.gov.gr/perivallon/kykliki-oikonomia/>

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Νέο Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία. <https://ypen.gov.gr/perivallon/kykliki-oikonomia/16052-2/>

Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης (ΕΟΑΝ). Τι υλικά ανακυκλώνουμε.
<https://www.eoan.gr/%ce%b5%ce%bd%ce%b7%ce%bc%ce%ad%cf%81%cf%89%cf%83%ce%b7/%cf%84%ce%b9-%cf%85%ce%bb%ce%b9%ce%ba%ce%ac-%ce%b1%ce%bd%ce%b1%ce%ba%cf%85%ce%ba%ce%bb%cf%8e%ce%bd%ce%bf%cf%85%ce%bc%ce%b5/>

Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης (ΕΟΑΝ). Συσκευασίες και Απόβλητα Συσκευασιών. <https://www.eoan.gr/%ce%b5%ce%bd%ce%b1%ce%bb%ce%bb%ce%b1%ce%ba%cf%84%ce%b9%ce%ba%ce%ae-%ce%b4%ce%b9%ce%b1%cf%87%ce%b5%ce%af%cf%81%ce%b9%cf%83%ce%b7/%cf%83%cf%85%cf%83%ce%ba%ce%b5%cf%85%ce%b1%cf%83%ce%af%ce%b5%cf%82-%ce%b1%cf%80%cf%8c%ce%b2%ce%bb%ce%b7%cf%84%ce%b1-%cf%83%cf%85%cf%83%ce%ba%ce%b5%cf%85%ce%b1%cf%83%ce%b9%cf%8e%ce%bd/>

International Organization for Standardization. Vocabulary.
<https://www.iso.org/obp/ui/#home>

Διαδικτυακά έγγραφα:

Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (2025). Κανονισμός (ΕΕ) 2025/40 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19^{ης} Δεκεμβρίου 2024 για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας, την τροποποίηση του κανονισμού (ΕΕ) 2019/1020 και της οδηγίας (ΕΕ) 2019/904 και την κατάργηση της οδηγίας 94/62/ΕΚ.
https://www.eoan.gr/wp-content/uploads/2025/02/OJ_L_202500040_EL_TXT.pdf

Νόμος 4736/2020 - ΦΕΚ 200/Α/20-10-2020. *Ενσωμάτωση της Οδηγίας (ΕΕ) 2019/904 σχετικά με τη μείωση των επιπτώσεων ορισμένων πλαστικών προϊόντων στο περιβάλλον και λοιπές διατάξεις*. Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας. <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/n-47362020-fek-200a-20102020>

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2020). *Κυκλική Οικονομία: Το Νέο Σχέδιο Δράσης της Ελλάδας*. <https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2022/03/SXEDIO-DRASHS-KO-8.pdf>

Υπουργείο Οικονομικών. (2025). *Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης 2026-2030*. https://www.opengov.gr/minfin/wp_content/uploads/2025/10/final_%CE%95%CE%98%CE%9D%CE%99%CE%9A%CE%9F-%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%93%CE%A1%CE%91%CE%9C%CE%9C%CE%91-%CE%91%CE%9D%CE%91%CE%A0%CE%A4%CE%A5%CE%9E%CE%97%CE%A3-2026-2030_track-changes-2-1.pdf