



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΠΜΣ Ενεργειακά και Περιβαλλοντικά Έργα

**Τίτλος Μεταπτυχιακής-Διπλωματικής Εργασίας**

Τεχνική, οικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση χημικής ανάκτησης - ανακύκλωσης  
πλαστικών υψηλής προστιθέμενης αξίας

**Γκίκας Νικόλαος**  
**Επιβλέπουσα: Δρ Αιμ. Κονδύλη**

Cohort XI  
Αθήνα, Οκτώβριος 2023

This page was intentionally left blank

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Η Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

**Κονδύλη Αιμιλία**

Καθηγήτρια

**Καλδέλλης Ιωάννης**

Καθηγητής

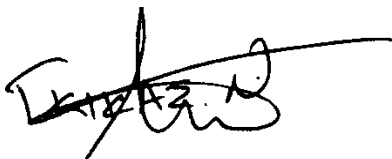
**Παπαποστόλου Χριστιάνα**

Επίκουρη Καθηγήτρια

## Δήλωση Συγγραφέα Μεταπτυχιακής Εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γκίκας Νικόλαος του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 202108 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Ενεργειακά και Περιβαλλοντικά Έργα του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε η αναδυόμενη μέθοδος χημικής ανακύκλωσης των πλαστικών αποβλήτων και παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν την περιβαλλοντική, οικονομική και τεχνολογική απόδοση της. Αρχικά γίνεται αναφορά του προβλήματος των πλαστικών παραθέτοντας στοιχεία για τις ποσότητες παραγωγής και διαχείρισης αυτών. Έπειτα αναλύονται οι στόχοι που έχει θέσει η ΕΕ και η Ελλάδα για την πάταξη του προβλήματος των πλαστικών και η πρόοδος αυτών. Τέλος αναφέρεται η τεχνολογική ωριμότητα των τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης καθώς και η περιβαλλοντική και οικονομική τους απόδοση. Από την ανάλυση των παραπάνω τα κύρια συμπεράσματα είναι ότι η παραγωγή των πλαστικών προϊόντων και κατα συνέπεια των αποβλήτων θα συνεχίσει να αυξάνεται παγκοσμίως. Υλικά του τομέα της συσκευασίας όπως PE, PP κ.α. (πολυολεφίνες) είναι τα πιο δημοφιλή και απαρτίζουν το μεγαλύτερο ποσοστό και παραγωγής και αποβλήτων. Οι στόχοι που έχει θέσει η ΕΕ δεν είναι εύκολο να επιτευχθούν από όλες τις χώρες κράτη μέλη πόσο μάλλον με την αλλαγή της νομοθεσίας για την μέτρηση του ανακυκλωμένου περιεχομένου. Τεχνολογίες όπως η θερμική πυρόλυση είναι η πιο εμπορική παγκοσμίως παράγοντας ήδη προϊόντα με χημικά ανακυκλωμένο περιέχομενο. Τα περιβαλλοντικά και οικονομικά στοιχεία περί χημικής ανακύκλωσης είναι ενδεικτικά και χρειάζεται περισσότερη έρευνα και διαφάνεια από τους οργανισμούς και τις εταιρείες. Παρόλα αυτά η χημική ανακύκλωση προβλέπουν ότι θα αποτελέσει πυλώνα στήριξης στο τομέα διαχείρισης των πλαστικών στο μέλλον συμπληρώνοντας την ήδη υπάρχουσα μηχανική. Στην ΕΕ για να συμβεί αυτό πρέπει να θεσμοθετηθούν επιπλέον θέματα και διευκρινίσεις που αφορούν την χημική ανακύκλωση ώστε να επιταχυνθεί η ένταξη της. Τέλος η σκοπιμότητα κατασκευής μιας μονάδας χημικής ανακύκλωσης στον Ελλαδικό χώρο αμφισβητείται προς το παρόν λόγω έλλειψης σημαντικών στοιχείων που θα δώσουν το πράσινο φώς για την επένδυση.

*Λέξεις Κλειδιά: Χημική ανακύκλωση, Κυκλική οικονομία, EU recycling targets, Πυρόλυση*

## **Abstract**

In this paper, the emerging method of chemical recycling of plastic waste is developed and data concerning its environmental, economic and technological performance are presented. Firstly, the problem of plastics is discussed, providing data on the quantities produced and managed. Then, the objectives set by the EU and Greece to combat the problem of plastics and their progress are analyzed. Finally, the technological maturity of chemical recycling technologies and their environmental and economic performance is mentioned. From the analysis of the above the main conclusions are that the production of plastic products and consequently waste will continue to increase worldwide. Materials in the packaging sector such as PE, PP etc. (polyolefins) are the most popular and make up the largest proportion of both production and waste. The targets set by the EU are not easy to achieve by all Member States, especially with the change in legislation on the measurement of recycled content. Technologies such as thermal cracking are the most commercially viable worldwide, already producing products with chemically recycled content. The environmental and economic data on chemical recycling are indicative and more research and transparency is needed by organizations and companies. However, chemical recycling is predicted to be a pillar of support in the plastics management sector in the future, complementing the existing mechanical recycling. In the EU, for this to happen, additional issues and clarifications concerning chemical recycling need to be established in order to accelerate its integration. Finally, the feasibility of constructing a chemical recycling plant in Greece is currently questioned due to the lack of significant data that would give the green light for the investment.

*Keywords: Chemical recycling, Circular economy, EU recycling targets, Pyrolysis*

## Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών «Ενεργειακά και Περιβαλλοντικά Έργα» του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Στις σπουδές μου ήταν καθοριστική η συμβολή των καθηγητών μου στα γνωστικά αντικείμενα που παρακολούθησα, στους οποίους οφείλω να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες για τη συμβολή τους στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Ιδιαίτερα επιθυμώ να ευχαριστήσω την καθηγήτρια μου και επιβλέπουσα την παρούσα διπλωματική εργασία, Δρ Αιμιλία Μ. Κονδύλη, για την επιστημονική και συμβουλευτική καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας με τις εύστοχες και πολύ εποικοδομητικές παρατηρήσεις της.

Οφείλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τους συμφοιτητές μου για τις ωραίες ακαδημαϊκές στιγμές που περάσαμε κατά την διάρκεια της φοίτησης μας καθώς επίσης και την οικογένεια μου για την στήριξη της.

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα Εικόνων .....	9
Περιεχόμενα Πινάκων .....	11
1. Εισαγωγή .....	12
2. Βασικοί ορισμοί ανακύκλωσης και ευρωπαϊκή κυκλική οικονομία.....	16
2.1. Πολυμερή και μηχανική ανακύκλωση.....	16
2.2. Ορισμός χημικής ανακύκλωσης.....	18
2.2. Ο Ρόλος της χημικής ανακύκλωσης στην κυκλική οικονομία.....	20
2.3. Ευρωπαϊκοί στόχοι και πλαστικά απόβλητα.....	22
2.3.1. Ευρώπη .....	22
2.3.2. Ελλάδα .....	25
2.4. Νέα μέθοδο υπολογισμού ποσοστών ανακύκλωσης συσκευασιών .....	25
3. Τα Πλαστικά με αριθμούς και ονόματα.....	27
3.1. Παγκόσμια δεδομένα πλαστικών .....	27
3.2. Ευρωπαϊκά δεδομένα πλαστικών.....	31
3.3. Ελληνικά δεδομένα πλαστικών.....	34
3.4. Παγκόσμια, Ευρωπαϊκά και Ελληνικά δεδομένα πλαστικών αποβλήτων και στοιχεία διαχείρισης τους .....	34
3.5. Στόχοι ΕΕ και πρόοδος .....	41
3.5.1. PPWD & WFD (Στόχος ανακύκλωσης συσκευασιών & αστικών αποβλήτων).....	41
3.5.2. Landfill Target (Στόχος μείωσης ταφής απορριμάτων) .....	45
3.5.3. Circular Party Alliance Target (Στόχος συμμαχίας CPA).....	47
3.6. Σύνοψη.....	48
4. Τεχνολογίες Χημικής Ανακύκλωσης.....	49
4.1. Εμπορικές τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης.....	50
4.1.1. Conventional & Catalytic Pyrolysis (Συμβατική και καταλυτική πυρόλυση).....	50
4.1.2. Gasification (Αεριοποίηση) .....	52
4.1.3. Depolymerization (Αποπολυμερισμός) .....	53
4.2. Υπο ανάπτυξη τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης .....	54
4.2.1. Plasma Pyrolysis (Πυρόλυση πλάσματος).....	54
4.2.2. Microwave-assisted pyrolysis (Πυρόλυση υποβοηθούμενη με μικροκύματα).....	55
4.2.3. Pyrolysis with in line reforming (Πυρόλυση με αναμόρφωση εν σειρά) .....	55
4.2.4. Hydrocracking (Υδρογονοδιάσπαση).....	56
4.2.5. Plasma gasification (Αεριοποίηση πλάσματος) .....	57



4.3. Εμπορικές μονάδες χημικής ανακύκλωσης .....	58
4.4. Εμπορικά Proof of Concept προϊόντα χημικής ανακύκλωσης.....	61
4.5. Σύνοψη.....	65
5. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης.....	68
5.1. Βιβλιογραφική επισκόπηση .....	68
5.2. Συνοψη.....	74
6. Οικονομική αξιολόγηση χημικών μεθόδων ανακύκλωσης.....	75
6.1. Βιβλιογραφική επισκόπηση .....	75
6.2. Σύνοψη.....	78
7. Μελλοντικές προβλέψεις χημικής ανακύκλωσης και ανάλυση σκοπιμότητας μονάδας στον Ελλαδικό χώρο .....	79
7.1. Μελλοντικές προβλέψεις χημικής ανακύκλωσης .....	79
7.2. Σκοπιμότητα μονάδας χημικής ανακύκλωσης Ελλάδα.....	81
8. Αποτελέσματα και συζήτηση.....	82
9. Βιβλιογραφία .....	85
Παράρτημα Ι.....	89
Παράρτημα ΙΙ.....	91

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Περιοχή Great Pacific Garbage Patch [3].....	13
Εικόνα 2: Δομή πολυστερενίου και μονομερές στυρενίου [5]. .....	16
Εικόνα 3: Συστήματα ανακύκλωσης βάσει ερευνητικής βιβλιογραφίας [10]. .....	19
Εικόνα 4: Ιεραρχία αποβλήτων ΕΕ [11]. .....	19
Εικόνα 5: Κύκλος ζωής πλαστικών με προσθήκη μεθόδου χημικής ανακύκλωσης [14]. .....	21
Εικόνα 6: Στόχοι ΕΕ για μείωση, επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση αποβλήτων [18].....	24
Εικόνα 7: Αλλαγή στο σημείο μέτρησης ανακύκλωσης βάσει οδηγίας ΕΕ 2019/665 [21]......	26
Εικόνα 8: Ετήσια παραγωγή πλαστικού παγκοσμίως απο το έτος 1950 έως 2021 [24].....	27
Εικόνα 9: Αποδόμηση αύξησης χρήσης πλαστικών βάσει βασικού σεναρίου [25]. .....	28
Εικόνα 10: Αύξηση χρήσης πλαστικού σε χώρες και περιοχές το 2019 με το 2060 [25].....	29
Εικόνα 11: Παγκόσμια εξέλιξη της παραγωγής και προέλευσης των πλαστικών [26]. .....	29
Εικόνα 12: Κατανομή παγκόσμιου ποσοστού παραγόμενων πλαστικών ανα πολυμερές 2021 [26] .....	30
Εικόνα 13: Κατανομή της παγκόσμιας χρήσης πλαστικών ανα εφαρμογή 2021 [26].....	30
Εικόνα 14: Ευρωπαϊκή εξέλιξη παραγωγής πλαστικών 2018-2021 [26]. .....	31
Εικόνα 15: Διάρθρωση παραγόμενου ποσοστού ανα τύπο πολυμερών εν έτη 2021 [26]. .....	32
Εικόνα 16: Ευρωπαϊκή ζήτηση εταιρειών παραγωγής ανα τύπο πολυμερών [26]. .....	33
Εικόνα 17: Ποσοστό ζήτησης ανα τύπο πλαστικού και εφαρμογή στην ΕΕ [26]. .....	33
Εικόνα 18: Παγκόσμια παραγωγή πλαστικών αποβλήτων απο το 1980 έως το 2018 [29]. .....	35

Εικόνα 19: Πρωτογενής παραγωγή πλαστικών αποβλήτων ανα τύπο πολυμερούς, 2019 [30].	35
Εικόνα 20: Συλλεχθέντα πλαστικά απόβλητα ΕΕ το 2020 [26].	37
Εικόνα 21: Τρόποι διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων ανά χώρα της ΕΕ το 2020 [26].	37
Εικόνα 22: Πλαστικά απόβλητα και διαχείριση απο την ΕΕ 2020 [32].	38
Εικόνα 23: Επεξεργασία πλαστικών αποβλήτων, Ελλάδα, 2010-2016 [27].	39
Εικόνα 24: Όγκος και διαχείριση πλαστικών συσκευασιών ΕΕ 2020 [26].	41
Εικόνα 25: Ανακύκλωση πλαστικών συσκευασιών ανά χώρα ΕΕ και στόχος οδηγίας PPWD [26].	42
Εικόνα 26α,β: Προοπτική επιτυχίας των στόχων για ανακύκλωση των αστικών αποβλήτων και των αποβλήτων συσκευασίας μελών της ΕΕ [18].	43
Εικόνα 27: Ποσοστά υγειονομικής ταφής αστικών αποβλήτων στην Ευρώπη ανά χώρα [34].	46
Εικόνα 28: Ποσοστό και όγκος ανακυκλωμένων πλαστικών ΕΕ 2018-2021 [26].	47
Εικόνα 29: Ιστορική και μελλοντική πρόβλεψη των ανακυκλωμένων πλαστικών, σύμφωνα με την ιστορική πορεία, για την επίτευξη των σημερινών στόχων καθώς και του CPA [32].	48
Εικόνα 30: Διαδρομές ανακύκλωσης στερέων πλαστικών αποβλήτων [35].	49
Εικόνα 31: Σχηματική αναπαράσταση πιθανής διαδρομής παραγωγής πολυαιθυλενίου και πολυπροπυλενίου απο πλαστικά απόβλητα [36].	51
Εικόνα 32: Επισκόπηση πιθανών εφαρμογών syngas [36].	53
Εικόνα 33: Βήματα παραγωγής TACOIL απο την Plastic Energy [40].	58
Εικόνα 34α-ζ: Εμπορικά προϊόντα διάφορων εταιρειών τα οποία περιλαμβάνουν χημικά ανακυκλωμένο περιεχόμενο πολυμερούς.	62
Εικόνα 35α,β: Συσκευασία μοτσαρέλας με επωνυμία Zottarella [56], παγωτού Remaxigel [57].	64
Εικόνα 36: Οπτική γωνία αποβλήτων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χημικής ανακύκλωσης [59].	69
Εικόνα 37: Οπτική γωνία προϊόντος: περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής παρθένου LDPE μέσω χημικής ανακύκλωσης σε σύγκριση με το παρθένο LDPE [59].	70
Εικόνα 38: Οπτική γωνία προϊόντων και αποβλήτων: περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής μικτών πλαστικών προϊόντων [59].	70
Εικόνα 39: Συνοπτική επισκόπηση της κλιματικής αλλαγής που σχετίζεται με τη διαχείριση 1 τόνου διαφόρων πλαστικών αποβλήτων [61].	72
Εικόνα 40: Συμβατικό κόστος κύκλου ζωής για τη διαχείριση 1 τόνου διαλεγμένων αποβλήτων συσκευασίας PS [61].	75
Εικόνα 41: Συμβατικό κόστος κύκλου ζωής για τη διαχείριση 1 τόνου διαλεγμένων αποβλήτων εύκαμπτων συσκευασιών Mixed Plastic Olefins [61].	76
Εικόνα 42: Σενάριο κυκλικότητας και πλαστικών αποβλήτων 2020-2050 (Mt) [32].	80
Εικόνα 43: Προγραμματισμένες επενδύσεις μονάδων χημικής ανακύκλωσης στην Ευρώπη, δεδομένα Μάιος 2023 [65].	80
Εικόνα 44: Παράδειγμα υπολογισμού απόδοσης plastic to plastic στην περίπτωση πυρόλυσης ανάμικτων πολυμερών χρησιμοποιώντας την μέθοδο εξισιρρόπησης μάζας [37].	90
Εικόνα 45: Απεικόνιση μοντέλου ισοζυγίου μάζας [68].	91

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Ανάλυση σύστασης πολυμερών πλαστικών αποβλήτων σε kg [31]. .....	36
Πίνακας 2: Ποσοστά δέσμευσης για διάφορα κλάσματα αποβλήτων στην Ελλάδα, 2019 [33].....	40
Πίνακας 3: Προοπτικές των κρατών μελών της ΕΕ για την επίτευξη των στόχων ανακύκλωσης αποβλήτων συσκευασίας ανά υλικό το 2025 [18]. .....	44
Πίνακας 4: Εμπορικές μονάδες χημικής ανακύκλωσης [39], [42-44]. .....	60
Πίνακας 5: Κύρια σημεία και διαφορές μεταξύ εμπορικών τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης. ....	65
Πίνακας 6: Λειτουργικά στοιχεία και κατηγοριοποίηση τεχνολογιών βάσει TRL [35]. .....	66
Πίνακας 7: Αποτελέσματα LCA για 1 kg ανάμικτα πλαστικά απόβλητα [60]. .....	71
Πίνακας 8: Αποτελέσματα LCA για 1 kg παρθένου και χημικά ανακυκλωμένου LDPE [60].....	72
Πίνακας 9: Καθαρό εισόδημα των διαφόρων τρόπων χημικής ανακύκλωσης [61]. .....	77
Πίνακας 10: Υπολογισμένες ενδεικτικές αποδόσεις από πλαστικό σε πλαστικό για συστήματα χημικής ανακύκλωσης [37]. .....	90

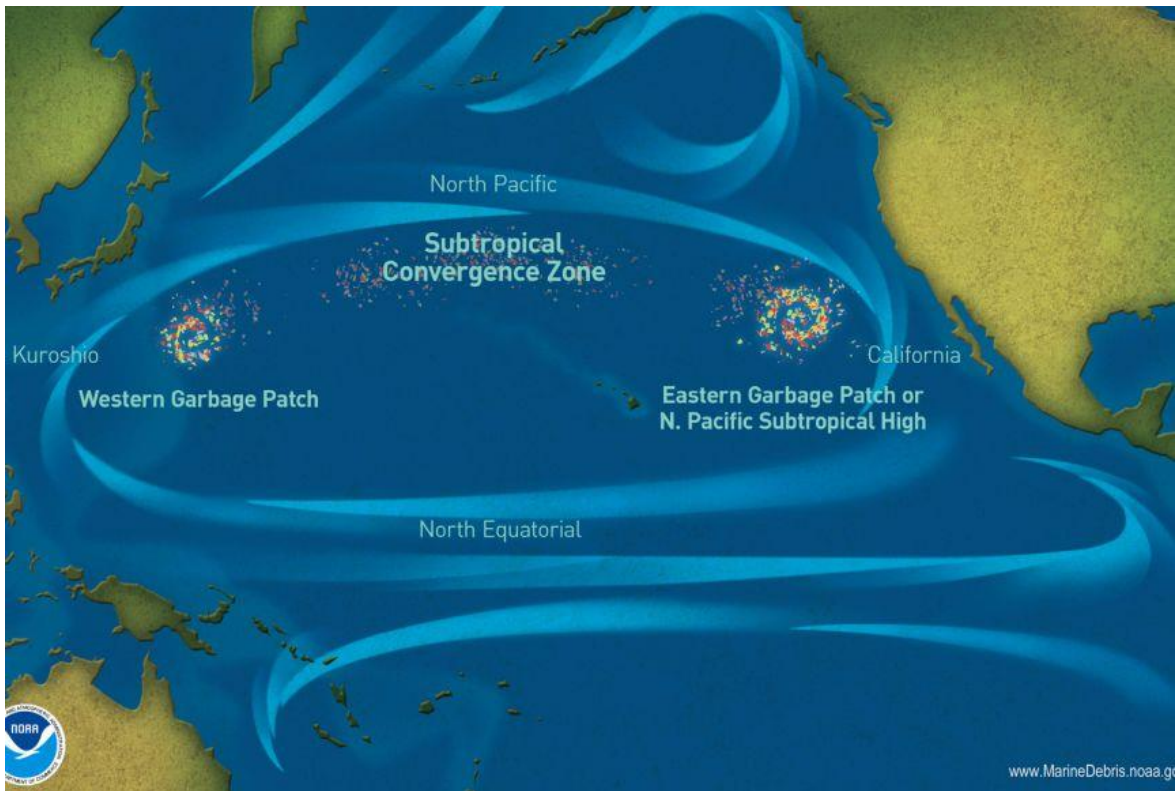
## 1. Εισαγωγή

Η μεγάλη κλίμακας βιομηχανική παραγωγή των πλαστικών απο την δεκαετία του 1940 έχει επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τις παγκόσμιες οικονομίες. Λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων τους και του χαμηλού κόστους, τα πλαστικά χρησιμοποιούνται σχεδόν σε κάθε τομέα όπως η αποθήκευση και διανομή τροφίμων, οι μεταφορές, τα ηλεκτρονικά, η υγειονομική περίθαλψη και τα κτίρια. Ο ρυθμός αύξησης της παραγωγής πλαστικών κατά τη διάρκεια των δεκαετιών ήταν και είναι εκθετικός και μπορεί να συγκριθεί μόνο με αυτόν του χάλυβα και του τσιμέντου. Εκτιμάται ότι η παραγωγή πλαστικού έχει σημειώσει 230 φορές μεγαλύτερη αύξηση από τη δεκαετία του 1950 και έχουν παραχθεί περισσότεροι από 8 δισεκατομμύρια τόνοι πλαστικού σε όλο τον κόσμο με την πάροδο των ετών. Η συνεχιζόμενη αύξηση της παραγωγής πλαστικού έχει συνδεθεί με ένα ευρύ φάσμα επιπτώσεων στο περιβάλλον, το κλίμα και την ανθρώπινη υγεία που εμφανίζονται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του πλαστικών. Σημαντικό μερίδιο αυτών των επιπτώσεων αποδίδεται στον τρόπο διαχείρισης των πλαστικών στο στάδιο του τέλους κύκλου ζωής τους (End Of Life-EOL) [1].

Σύμφωνα με τον οργανισμό OECD από τους 353 εκατομμύρια τόνους πλαστικού αποβλήτων που παρήχθησαν παγκοσμίως το 2019, μόνο το 9 % ανακυκλώθηκε σωστά. Τα υπόλοιπα κατέληξαν σε αποτεφρωτήρες (19 %), σε ελεγχόμενες χωματερές (50 %) ή σε ανεπίσημες διαδρομές που συχνά οδηγούν σε διαρροή των πλαστικών στο περιβάλλον. Για την ΕΕ, η Plastics Europe εκτιμά ότι από τα 30 εκατομμύρια τόνους πλαστικών αποβλήτων που παράγονται ετησίως, το 35 % αποστέλλεται αποτελεσματικά προς ανακύκλωση με το υπόλοιπο να αποστέλλεται σε αποτέφρωση με ανάκτηση ενέργειας (42 %) ή σε υγειονομική ταφή (23 %). Η πρακτική της αποτέφρωσης και της υγειονομικής ταφής πλαστικού κάθε χρόνο συνεπάγεται σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η απελευθέρωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και διαρροή ρυπαντών στο χερσαίο και θαλάσσιο περιβάλλον [1].

Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα θαλάσσιας ρύπανσης απο πλαστικά είναι η θαλάσσια περιοχή Great Pacific Garbage Patch (GPGP). Η GPGP είναι μια περιοχή ανάμεσα στην Καλιφόρνια και την Χαβάη στον Βόρειο Ειρηνικό ωκεανό όπως φαίνεται στην Εικόνα 1 όπου υπάρχει συσσώρευση θαλάσσιων σκουπιδίων. Η GPGP καλύπτει μια εκτιμώμενη έκταση 1,6 εκατομμυρίων τετραγωνικών χιλιομέτρων, μια έκταση τριπλάσια από το μέγεθος της Γαλλίας. Η ποσότητα πλαστικών στην GPGP εκτιμήθηκε ότι είναι περίπου 80.000 τόνοι. Επίσης εκτιμήθηκε ότι επιπλέον στην περιοχή περίπου 1,8 τρισεκατομμύρια κομμάτια πλαστικού που ισοδυναμεί με 250 κομμάτια για κάθε άνθρωπο στον κόσμο. Εκτιμάται ότι 1,15 έως 2,41 εκατομμύρια τόνοι

πλαστικού εισέρχονται κάθε χρόνο στον ωκεανό από τα ποτάμια. Πάνω από το 50% της ποσότητας έχουν πυκνότητα μικρότερη αυτή του νερού, πράγμα που σημαίνει ότι επιπλέουν στην επιφάνεια της θάλασσας και λόγω της μεγάλης ανθεκτικότητας τους στο θαλάσσιο περιβάλλον ταξιδεύουν προς τα ανοιχτά των ωκεανών. Εκεί λόγω των ρευμάτων παγιδεύονται και αποικοδομούνται με τον καιρό σε μικροπλαστικά που επηρεάζουν την βιοποικιλότητα των θαλασσών [2].



Εικόνα 1: Περιοχή Great Pacific Garbage Patch [3]

Αξιοσημείωτο επίσης είναι το γεγονός που αποκάλυψε μια έρευνα ότι βρέθηκε πλαστική σακούλα στο βαθύτερο σημείο των ωκεανών, στην τάφρο των Μαριανών στον Ειρηνικό ωκεανό σε βάθος 10975 μέτρων [4]. Αυτό αποδεικνύει ότι η θαλάσσια ρύπανση είναι ικανή να φτάσει και έχει φτάσει στα πιο αφιλόξενα και απόμερα μέρη του πλανήτη. Σαφώς και η χερσαία ρύπανση από τα πλαστικά είναι εξίσου σημαντική.

Πολιτικές διαχείρισης αποβλήτων που στοχεύουν σε συγκεκριμένα «ρεύματα» πλαστικών όπως για παράδειγμα στις συσκευασίες υπάρχουν από το 1990. Τον τελευταίο καιρό στην ΕΕ έχει εισαχθεί δυναμικά στην πολιτική ατζέντα αποτελώντας έναν τομέα προτεραιότητας από το πρώτο

σχέδιο για την Ευρωπαϊκή Κυκλική Οικονομία χαράζοντας πορεία και οδηγίες για μείωση, επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση πλαστικών [1].

Παρά τις οδηγίες η προσπάθεια διαχείρισης τόσο μεγάλου όγκου πλαστικών αποβλήτων που τείνει να αυξάνεται αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία που απαιτεί επιπλέον υποδομές, βελτιώσεις στα συστήματα συλλογής, διαχείρισης, ανακύκλωσης (μηχανικής) κ.α.

Μέσα από όλες τις λύσεις που δίνονται με τις βελτιώσεις σε όλους τους τομείς, εισέρχεται και η έννοια της χημικής ανακύκλωσης, η οποία πιθανολογείται ότι θα βοηθήσει στην βελτίωση και αύξηση της κυκλικότητας των πλαστικών συμπληρώνοντας τις υπάρχουσες μηχανικές μεθόδους ανακύκλωσης [1].

Η συγκεκριμένη εργασία λοιπόν αποσκοπά στο να διερενήσει την δυναμική της χημικής ανακύκλωσης στην σημερινή εποχή πλαστικών υψηλής προστιθέμενης αξίας αναλύοντας μεθόδους ανακύκλωσης, περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οικονομικά στοιχεία, εφαρμογές της υπο μελέτη τεχνολογίας κ.α. Θα αναφερθούν επίσης οι δράσεις και οι στόχοι της ΕΕ για την προώθηση της κυκλικής οικονομίας και του ευρύτερου πλάνου της ως προς τα απόβλητα και τα πλαστικά καθώς επίσης και στοιχεία σχετικά με την κατάσταση των πλαστικών ως προς την παραγωγή, ανακύκλωση στην ΕΕ και στην Ελλάδα.

Τα ερευνητικά ερωτήματα που δύναται να απαντήσει η συγκεκριμένη εργασία είναι:

- Ποσότητες πλαστικών αποβλήτων στην Ελλάδα και ΕΕ.
- Ποσότητες πλαστικών που ανακυκλώνονται.
- Ποσότητες υψηλής προστιθέμενης αξίας πλαστικών αποβλήτων.
- Τρέχουσα κατάσταση και εμπειρία πάνω στον τομέα της μηχανικής ανακύκλωσης πλαστικών στην Ελλάδα και στην ΕΕ.
- Τρέχουσα κατάσταση και εμπειρία πάνω στον τομέα της χημικής ανακύκλωσης πλαστικών στην Ελλάδα και στην ΕΕ.
- Ποιές είναι οι υπάρχουσες τεχνολογίες για την χημική ανακύκλωση των πλαστικών.
- Ποιές είναι οι πιο υποσχόμενες τεχνολογίες / τεχνική αξιολόγηση.
- Ποιές είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις για την εφαρμογή τους.
- Ποιά είναι η πιθανή σκοπιμότητα μια τέτοιας νέας επένδυσης.

Για την απάντηση των παραπάνω ερευνητικών ερωτημάτων θα πραγματοποιηθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση απο ερευνητικές πηγές και γκρίζα βιβλιογραφία.

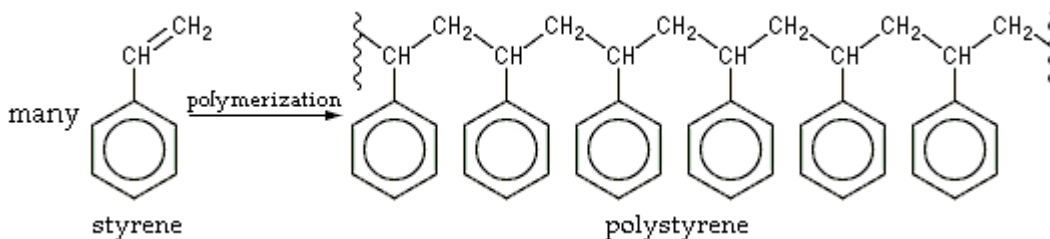
Αναλυτικότερα η διάρθρωση των κεφαλαίων της εργασίας είναι η εξής:

- **Κεφάλαιο 2:** Βασικοί ορισμοί ανακύκλωσης και ευρωπαϊκή κυκλική οικονομία: Στην αρχή του κεφαλαίου θα αναπτυχθούν εισαγωγικές έννοιες και τα προβλήματα που υπόκεινται η μηχανική ανακύκλωση. Έπειτα θα αποτυπωθεί ο ορισμός της χημικής ανακύκλωσης και πως συμβάλλει στην κυκλική οικονομία και στους στόχους της ΕΕ.
- **Κεφάλαιο 3:** Παγκόσμια, Ευρωπαϊκά και Ελληνικά δεδομένα παραγωγής πλαστικών προϊόντων και αποβλήτων. Επίσης παρατίθενται η πορεία/εξέλιξη των στόχων που έχει η θέση ΕΕ για το ποσοστά ανακύκλωσης συσκευασίας, αστικών αποβλήτων καθώς και υγειονομικής ταφής.
- **Κεφάλαιο 4:** Αναλύονται οι εμπορικές και οι πειραματικές τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης. Επίσης παρατίθενται παραδείγματα εμπορικών μονάδων και χημικά ανακυκλωμένων προϊόντων απο εκάστοτε εταιρείες.
- **Κεφάλαιο 5:** Αναλύονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης.
- **Κεφάλαιο 6:** Αναλύονται διαθέσιμα οικονομικά στοιχεία τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης.
- **Κεφάλαιο 7:** Παρατίθενται προβλέψεις για το μέλλον της χημικής ανακύκλωσης καθώς και αναλύεται η προσωπική γνώμη του συγγραφέα για την σκοπιμότητα κατασκευής μονάδας χημικής ανακύκλωσης στον Ελλαδικό χώρο.
- **Κεφάλαιο 8:** Περίληψη αποτελεσμάτων, συζήτηση και περαιτέρω προτάσεις έρευνας.

## 2. Βασικοί ορισμοί ανακύκλωσης και ευρωπαϊκή κυκλική οικονομία

### 2.1. Πολυμερή και μηχανική ανακύκλωση

Τα πλαστικά ή αλλιώς στην επιστημονική τους ονομασία πολυμερή είναι μακριές οργανικές αλυσίδες μορίων που αποτελούνται από μικρότερα μόρια μονάδες που ονομάζονται μονομερή. Στην Εικόνα 2 απεικονίζεται το πολυστενένιο το οποίο σαν μονομερές του έχει το στυρένιο [5].



Εικόνα 2: Δομή πολυστενενίου και μονομερές στυρενίου [5].

Τα πολυμερή ταξινομούνται κατά πολλούς τρόπους: με βάση τον τρόπο πολυμερισμού, της δομής τους, τις ιδιότητες τους, τις εφαρμογές τους κ.α. Στην συγκεκριμένη εργασία μας αρκείται η γνώση ως προς την ταξινόμηση με βάση τις ιδιότητες τους. Ως εκ τούτου τα πολυμερή χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες με βάση των ιδιοτήτων στα θερμοπλαστικά, τα θερμοσκληρυνόμενα και τα ελαστομερή [5].

#### Θερμοπλαστικά

Είναι πολυμερή τα όποια λιώνουν και διαμορφώνονται αρκετές φορές χωρίς σημαντικές χημικές αλλαγές στην δομή τους π.χ. PP, PVC, PE κ.α.

#### Θερμοσκληρυνόμενα

Τα πολυμερή αυτά υπόκεινται σε μη αντιστρεπτή αλλαγή στην δομή τους μόλις θερμανθούν και γίνονται άκαμπτα και σκληραίνουν. Αν επαναθερμανθούν θα αποσυντεθούν χωρίς να λιώσουν όπως τα θερμοπλαστικά. Ένα παράδειγμα θερμοσκληρυνόμενου πολυμερούς αποτελεί ο βακελίτης.

#### Ελαστομερή

Τα συγκεκριμένα πολυμερή έχουν την ιδιότητα της μεγάλης ελαστικότητας υπό συνθήκες παραμόρφωσης. Παράδειγμα αποτελεί το φυσικό καουτσούκ ή η σιλικόνη.



Η μηχανική ανακύκλωση αναφέρεται σε διαδικασίες που αποσκοπούν στην ανάκτηση πλαστικών μέσω μηχανικών διεργασιών (άλεση, πλύση, διαχωρισμός, ξήρανση, ανακύκλωση και ανάμιξη), παράγοντας έτσι ανακυκλώσιμα υλικά που μπορούν να μετατραπούν σε πλαστικά προϊόντα, υποκαθιστώντας τα πρωτογενή πλαστικά. Είναι σήμερα η κυρίαρχη μέθοδος ανακύκλωσης πλαστικών αποβλήτων από οικονομική και περιβαλλοντική πλευρά. Για τη μηχανική ανακύκλωση, ενδιαφέρον αποτελούν κυρίως τα θερμοπλαστικά υλικά λόγω της ιδιότητας που αναφέρθηκε παραπάνω και μπορούν να μετατραπούν σε προϊόντα μέσω τεχνικών όπως η χύτευση με έγχυση ή η εξώθηση [6].

Μερικοί από τους κύριους περιορισμούς της μηχανικής ανακύκλωσης όπως αναφέρονται [1] είναι:

- Εισροή ομογενοποιημένων ρευμάτων αποβλήτων πλαστικών πράγμα που απαιτεί καλή διαλογή και καθάρισμα άρα δεν ενδείκνυται για ανάμικτα πλαστικά απόβλητα
- Η ποιότητα των ανακυκλωμένων πλαστικών τείνει να φθίνει με την επαναλαμβανόμενη διαδικασία ανακύκλωσης πράγμα που αποτελεί πρόβλημα σχετικά με τις εφαρμογές επαφής τροφίμων με πλαστικά.

Όσο αφορά την υποβάθμιση των πλαστικών υλικών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, την υποβάθμιση που προκαλείται από την επανεπεξεργασία (θερμική) και την υποβάθμιση από την ζωή του προϊόντος.

Η θερμική-μηχανική υποβάθμιση προκαλείται από τη θέρμανση και την μηχανική διάτμηση του πολυμερούς κατά την επεξεργασία του τήγματος. Οι πιο συνηθισμένοι μηχανισμοί που εμφανίζονται σε εμπορικά πολυμερή είναι η διάσπαση αλυσίδας και η διακλάδωση αλυσίδας. Η διάσπαση της αλυσίδας συμβαίνει κυρίως σε τερματικές εξαρτημένες ομάδες και μειώνει το μοριακό βάρος του πολυμερούς και συνεπώς και τις ιδιότητές του. Η διακλάδωση της αλυσίδας έχει ως αποτέλεσμα την διασύνδεση και την αύξηση του μοριακού βάρους. Αυτές οι επιδράσεις της θερμικής-μηχανικής υποβάθμισης μπορούν να αντισταθμιστούν με την προσθήκη διαφόρων πρόσθετων [7].

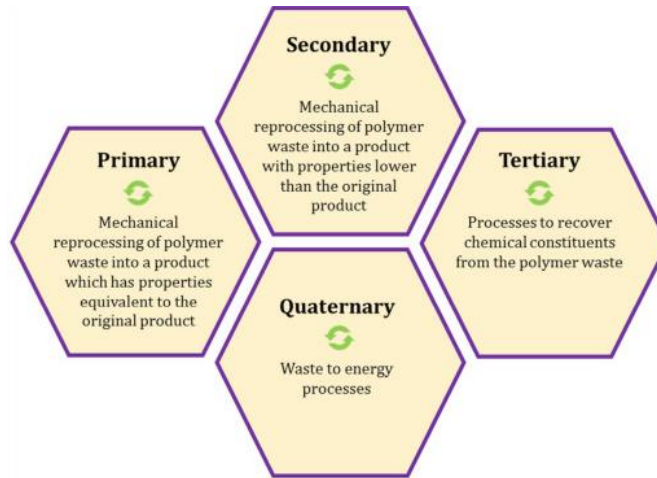
Στην υποβάθμιση από κύκλο ζωής του προϊόντος περιλαμβάνεται ένας συνδυασμός θερμότητας, οξυγόνου, ακτινοβολίας, υγρασίας και μηχανικών τάσεων. Δεδομένων των παραπάνω παραγόντων η υποβάθμιση προκαλείται κυρίως από διαδικασίες φωτοξείδωσης. Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά από την υποβάθμιση με θέρμανση [7].

Υπάρχουν περιπτώσεις που τα ανακυκλωμένα υλικά απο μηχανική ανακύκλωση πληρούν τις προϋποθέσεις του τομέα τροφίμων αλλά γενικά αντιμετωπίζουν δυσκολίες [7]. Αυτό μαζί με τις ποσότητες αποβλήτων που θα αναλυθούν περαιτέρω αργότερα αναδεικνύουν απο μόνα τους την ανάγκη συμπληρωματικών προσεγγίσεων ανακύκλωσης για τα πλαστικά όπως η χημική ανακύκλωση.

## 2.2. Ορισμός χημικής ανακύκλωσης

Η οδηγία-πλαίσιο για τα απόβλητα της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2008) (Waste Framework Directive-WFD) ορίζει την ανακύκλωση ως "κάθε εργασία ανάκτησης με την οποία τα απόβλητα επανακατασκευάζονται σε προϊόντα, υλικά ή ουσίες είτε για τους αρχικούς είτε για άλλους σκοπούς. Μέσα στον όρο περιλαμβάνει την επανεπεξεργασία οργανικών υλικών, αλλά δεν περιλαμβάνει την ανάκτηση ενέργειας και την επανεπεξεργασία σε υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα ή για εργασίες πλήρωσης" [8]. Με λίγα λόγια ο ορισμός της χημικής ανακύκλωσης στην Ευρώπη περιλαμβάνεται και ακολουθεί τον υφιστάμενο ορισμό για την ανακύκλωση όπως περιγράφεται παραπάνω και εξαιρεί την χρήση του παραγόμενου προϊόντος ως καυσίμου [9].

Στην ερευνητική βιβλιογραφία, η χημική ανακύκλωση αναφέρεται ως τριτογενής ανακύκλωση σε ένα σύστημα ανακύκλωσης τεσσάρων επιπέδων όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3. Το πρωτογενές και το δευτερογενές επίπεδο περιλαμβάνουν φυσικές διεργασίες και αναφέρονται ως μηχανική ανακύκλωση, ενώ η τεταρτογενής ανακύκλωση παράγει ενέργεια από τα πλαστικά απόβλητα. Η τριτογενής ανακύκλωση καλύπτει τόσο την ανάκτηση των πλαστικών όσο και την παραγωγή καυσίμων και άλλων ουσιών. Αυτό σημαίνει ότι στην ερευνητική βιβλιογραφία, η έννοια της ανακύκλωσης είναι ευρύτερη από ό,τι στην WFD [8].



Εικόνα 3: Συστήματα ανακύκλωσης βάσει ερευνητικής βιβλιογραφίας [10].

Σε άλλες περιοχές του κόσμου όπως για παράδειγμα στην Βόρεια Αμερική ο όρος Προηγμένη Ανακύκλωση (Advanced Recycling) ή Ενισχυμένη Ανακύκλωση (Enhanced Recycling) είναι συνώνυμος της χημικής ανακύκλωσης, αλλά εκεί περιλαμβάνει εφαρμογές για καύσιμα, σε σύγκριση με την Ευρώπη [9].

Στην ΕΕ ο συγκεκριμένος ορισμός αποτελεί πηγή συζήτησης π.χ. με την ταξινόμηση της τεχνολογίας της θερμικής πυρόλυσης και με το πλαίσιο της ιεράρχησης των αποβλήτων όπως αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 4 παρακάτω λόγω του ότι οι εταιρείες έχουν την δυνατότητα να επιλέξουν αν θα παράγουν καύσιμο (το οποίο δεν θα προσμετράται σαν ανακύκλωση καθώς ανηκεί στην κατηγορία ανάκτησης - recovery) ή αν θα πωλούν τα προϊόντα τους ως προϊόντα/πρώτες ύλες για την παραγωγή νέων προϊόντων ή πλαστικών (το οποίο θα προσμετράται σαν ανακύκλωση) [9].



Εικόνα 4: Ιεραρχία αποβλήτων ΕΕ [11].

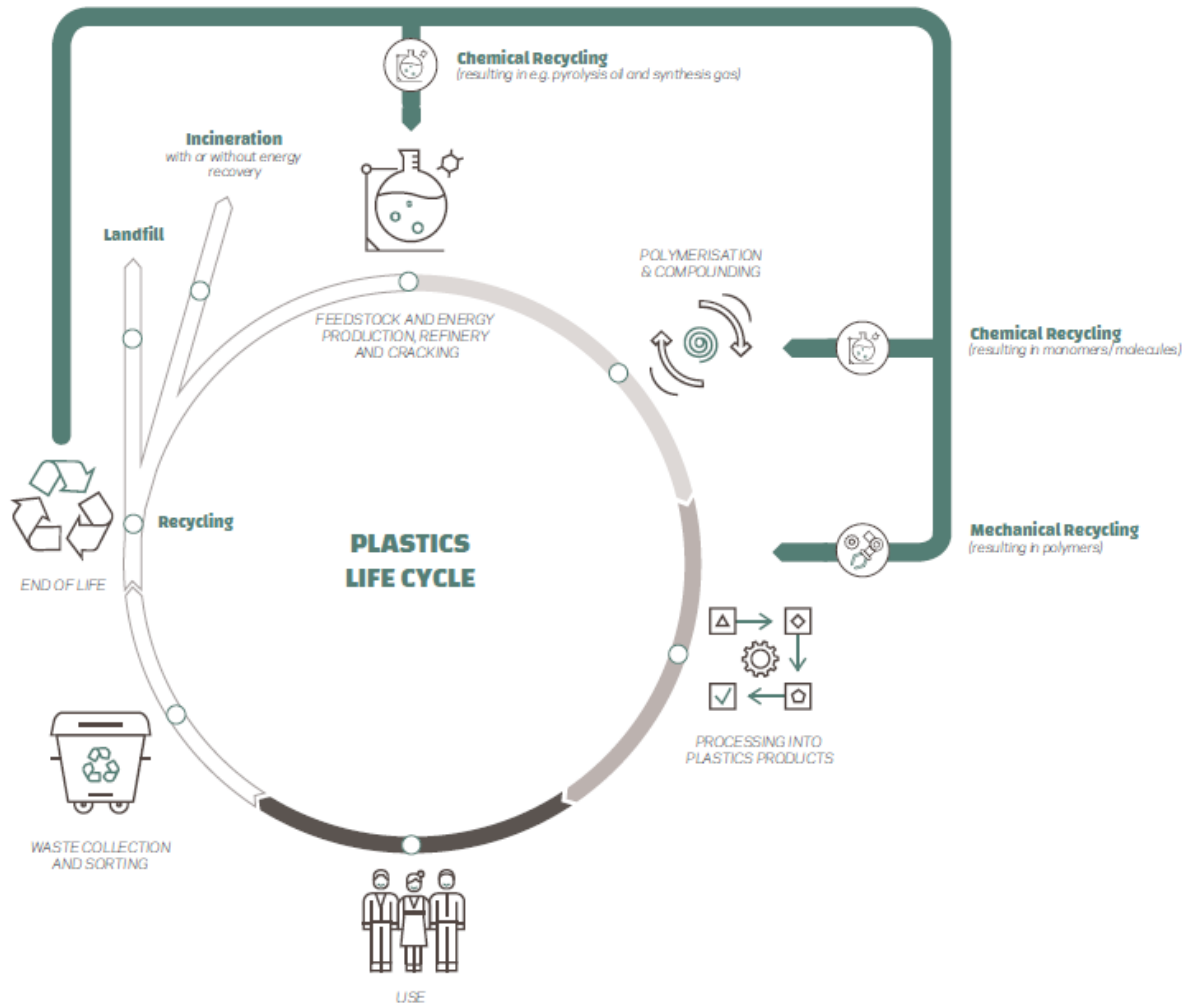
Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται η ιεράρχηση των μεθόδων διαχείρισης των αποβλήτων από την οδηγία της ΕΕ όπου η πρόληψη των αποβλήτων είναι η πλέον προτιμώμενη μέθοδος, ακολουθούμενη από την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση, την ανάκτηση και τέλος στην διάθεση, η οποία χρησιμοποιείται μόνο όταν άλλες εναλλακτικές λύσεις δεν είναι δυνατές [8].

Ο αυτού καθε αυτού ορισμός της χημικής ανακύκλωσης σαν μέθοδο έχει αποτυπωθεί διαφορετικά από πολλούς οργανισμούς. Για παράδειγμα ο διεθνής οργανισμός προτύπων ISO με την έκδοση του προτύπου 15270:2008 ορίζει την χημική ανακύκλωση ως «μετατροπή σε μονομερή ή παραγωγή νέων πρώτων υλών αλλάζοντας την χημική δομή των πλαστικών αποβλήτων μέσω cracking, gasification ή depolymerization εξαιρώντας την ανάκτηση ενέργειας και την αποτέφρωση (incineration)» [12]. Ένας άλλος ορισμός που έχει υιοθετηθεί από την βιομηχανία είναι του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου Χημικής Βιομηχανίας (Cefic) που το 2020 αναφέρει την χημική ανακύκλωση ως «μια διεργασία όπου η χημική δομή των πολυμερών αλλάζει και μετρατρέπεται σε χημικά δομικά μέρη περιλαμβάνοντας μονομερή όπου έπειτα χρησιμοποιούνται σαν πρώτη ύλη για χημικές διεργασίες» [8]. Παρακάτω θα γίνει εκτενέστερη αναφορά και σε ποιές μεθόδους αναφέρεται η χημική ανακύκλωση βάσει του ορισμού της.

## 2.2. Ο Ρόλος της χημικής ανακύκλωσης στην κυκλική οικονομία

Η Ευρωπαϊκή πράσινη συμφωνία (European Green Deal) βρίσκεται στην καρδιά των φιλοδοξιών της ΕΕ για να γίνει κλιματική ουδέτερη μέχρι το 2050. Η ΕΕ έχει χαράξει έναν δρόμο για να γίνει πρωτοπόρα παγκοσμίως στην κυκλική οικονομία και τις καθαρές τεχνολογίες. Για να επιτευχθεί αυτό ανάμεσα σε όλα αυτά που πρέπει να γίνουν απαιτούνται συμπληρωματικές μέθοδοι ανακύκλωσης και επιχειρηματικά μοντέλα. Μια λύση που προτείνεται για την αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης των πλαστικών είναι αυτή της χημικής ανακύκλωσης που μπορεί να αποκτήσει έναν σημαντικό ρόλο στην αξιοποίηση των EOL αποβλήτων [13]. Οι τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον των βιομηχανιών και των επιστημόνων για διάφορους λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι η παγκόσμια αύξηση της παραγωγής αποβλήτων, που συχνά περιλαμβάνουν επικίνδυνα υλικά και η περιβαλλοντική ρύπανση που προκαλείται από αυτή την αύξηση σε συνδυασμό με αναποτελεσματικές πρακτικές διαχείρισης. Ο δεύτερος λόγος είναι η γραμμική οικονομία της

κατανάλωσης που οδηγεί στην εξάντληση των φυσικών πόρων, στην κλιματική αλλαγή και στη ρύπανση, η οποία επηρεάζει δραματικά την βιωσιμότητα της ανθρώπινης κοινωνίας [8]. Στην Εικόνα 5 απεικονίζεται η νέα διαδρομή κυκλικότητας που προσδίδει η χημική ανακύκλωση στον ήδη υπάρχον κύκλο ζωής των πλαστικών.



Εικόνα 5: Κύκλος ζωής πλαστικών με προσθήκη μεθόδου χημικής ανακύκλωσης [14].

Όπως αναφέρεται στην έκθεση [8] για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης και την επίτευξη των στόχων της ΕΕ η χημική ανακύκλωση χαρακτηρίζεται μια τεχνολογία που:

- Θεωρείται επιπρόθετη μέθοδος διαχείρισης αποβλήτων της πλέον διαδεδομένης μηχανικής μεθόδου που μπορεί συνεισφέρει στην μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν στο περιβάλλον, στην αντικατάσταση μη αποτελεσματικών πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων όπως η αποτέφρωση και η υγειονομική ταφή.

- Αποτελεί ένα επιπρόθετο εργαλείο για την αύξηση της κυκλικότητας των πλαστικών αποβλήτων με την δυνατότητα ανακύκλωσης «μολυσμένων» και μικτών ρευμάτων πλαστικών που αποτελούν την πλειοψηφία των κοινών απορριμάτων.
- Έχει την δυνατότητα να εξαλείψει τις επικίνδυνες ουσίες στα ανακυκλωμένα υλικά παράγοντας ασφαλέστερα και βιώσιμα υλικά.

## 2.3. Ευρωπαϊκοί στόχοι και πλαστικά απόβλητα

### 2.3.1. Ευρώπη

Τον Ιανουάριο του 2018 η ΕΕ υιοθέτησε μια στρατηγική για ενίσχυση της μείωσης των πλαστικών αποβλήτων η οποία είναι μέρος του σχεδίου δράσης για την κυκλική οικονομία (Circular Economy Action Plan - CEAP). Η συγκεκριμένη στρατηγική είναι υψίστης σημασίας για την πράσινη μετάβαση και την επίτευξη των στόχων της βιωσιμότητας το 2030, της συνθήκης του Παρισιού και των στόχων της βιομηχανικής πολιτικής της ΕΕ. Η στρατηγική για τα πλαστικά στοχεύει στην προστασία του περιβάλλοντος και την μείωση της θαλάσσιας ρύπανσης, στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στην απεξάρτηση από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα. Επίσης είχε σκοπό να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο τα πλαστικά προϊόντα σχεδιάζονται, παράγονται, χρησιμοποιούνται και ανακυκλώνονται στην ΕΕ [15]. Μερικές από τις δράσεις αναφέρονται παρακάτω [15]:

- Νέοι κανονισμοί όσο αφορά τις πλαστικές συσκευασίες για βελτίωση ανακυκλωσιμότητας και αύξηση ζήτησης για ανακυκλωμένο πλαστικό
- Βελτίωση της διαλογής των πλαστικών αποβλήτων
- Έκδοση οδηγίας για τα πλαστικά μιας χρήσης και τον εξοπλισμό ψαρέματος
- Στήριξη της καινοτομίας για την ανάπτυξη πιο έξυπνων και πιο ανακυκλώσιμων πλαστικών υλικών, για να γίνουν οι διαδικασίες ανακύκλωσης πιο αποτελεσματικές και για τον εντοπισμό και την απομάκρυνση επικίνδυνων ουσιών και ρύπων από τα ανακυκλωμένα πλαστικά

Τον Δεκέμβριο του 2018 η Ευρωπαϊκή επιτροπή ίδρυσε την Κυκλική Συμμαχία Πλαστικών (Circular Party Alliance - CPA) για να βοηθήσει την βιομηχανία των πλαστικών να επιτύχει τον στόχο που έχει δεσμευτεί, να διαθέτει στην αγορά της ΕΕ κάθε χρόνο 10 εκατομμύρια τόνους πλαστικών ανακυκλωμένων υλικών σε τελικά προϊόντα έως το 2025. Η Συμμαχία καλύπτει

ολόκληρη την αλυσίδα των πλαστικών και περιλαμβάνει περισσότερους από 300 οργανισμούς που εκπροσωπούν τη βιομηχανία, ερευνητικούς οργανισμούς και δημόσιες αρχές [16].

Σύμφωνα με την έκθεση “Roadmap to 10 Mt recycled by content by 2025” [16] από την CPA η επίτευξη του στόχου βασίζεται στον εντοπισμό τριών κύριων εμποδίων για την αύξηση της χρήσης ανακυκλωμένων πλαστικών στην Ευρώπη:

- Η κατάλληλη ποιότητα των ανακυκλωμένων πλαστικών, προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις της εφαρμογής δεύτερης ζωής
- Η διαθεσιμότητα και η ασφάλεια εφοδιασμού ανακυκλωμένων πλαστικών
- Η ανταγωνιστικότητα (ελκυστικότητα/αποδοχή) των ανακυκλωμένων πλαστικών έναντι των πρωτογενών πλαστικών

Η CPA [16] πιστεύει ότι είναι δυνατόν να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια και να επιτευχθεί ο στόχος των 10 Mt της ΕΕ μέσω τεσσάρων τομέων δράσης:

- Βελτίωση του σχεδιασμού των πλαστικών προϊόντων
- Αύξηση της συλλογής των πλαστικών αποβλήτων και βελτίωση της ποιότητας της διαλογής
- Επενδύσεις στην ανάπτυξη και εφαρμογή καλύτερων τεχνολογιών ανακύκλωσης
- Ουσιώδης/δομική στήριξη της ζήτησης ανακυκλωμένου περιεχομένου

Τον Μαίο του 2020 η Ευρωπαϊκή επιτροπή υιοθέτησε το νέο σχέδιο για την κυκλική οικονομία (CEAP) που αποτελεί ένα από τα κύρια κλαδιά του European Green Deal. Τό νέο σχέδιο αποσκοπεί σε ενέργειες για όλο τον κύκλο ζωής των προϊόντων. Στοχεύει στην σχεδίαση των προϊόντων, στην προώθηση των διαδικασιών κυκλικής οικονομίας, ενθαρρύνει την βιώσιμη κατανάλωση και τέλος στοχεύει στην αποφυγή των αποβλήτων κρατώντας τους πόρους στην ευρωπαϊκή οικονομία για όσο είναι δυνατόν [17]. Όσο αφορά τα πλαστικά το σχέδιο προβλέπει μείωση και αξιοποίηση των ανακυκλούμενων αποβλήτων εστιάζοντας στα πιο σημαντικά ρεύματα πλαστικών αποβλήτων που είναι οι συσκευασίες, τα δομικά υλικά και τα οχήματα στο τέλος ζωής τους. Μερικοί από τους στόχους [8] που έχουν τεθεί είναι:

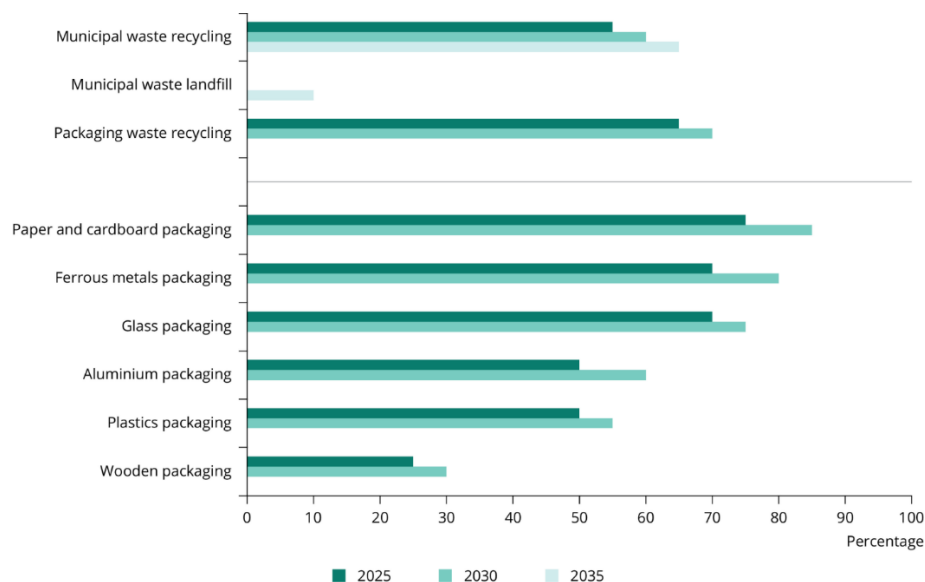
- **Αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης και προετοιμασίας επαναχρησιμοποίησης αστικών αποβλήτων κατ’ ελάχιστο σε 55%, 60% και 65% κατά βάρος έως το 2025, το 2030 και το 2035 αντίστοιχα.**

Ο στόχος αυτός περιλαμβάνεται στην οδηγία Waste Framework Directive 2008/98/EC η οποία αφορά γενικά την διαχείριση των αποβλήτων στην ΕΕ. Η επίτευξη του ποσοστού πρέπει να μετράται με βάση το βάρος των συσκευασιών που προετοιμάζονται για επαναχρησιμοποίηση ή ανακυκλώνονται.

- **Ανακύκλωση πλαστικών αποβλήτων συσκευασίας σε 50 % έως το 2025 και σε 55% έως το 2030 κατα βάρος αντίστοιχα με την οδηγία για τα αστικά απόβλητα.**

Ο στόχος αυτός περιλαμβάνεται στην οδηγία Packaging and Packaging Waste Directive (PPWD) 94/62/EC η οποία εκτός άλλων έθεσε τις βασικές απαιτήσεις και τα σημαντικότερα κριτήρια που πρέπει να πληρούν οι συσκευασίες για να διατίθενται στην αγορά της ΕΕ. Μεταξύ διαφόρων χαρακτηριστικών, οι απαιτήσεις αυτές αναφέρουν ότι οι συσκευασίες πρέπει να κατασκευάζονται με τρόπο που να επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση, την ανακυκλωσιμότητα και την αξιοποίησή τους.

Συγκεντρωτικά οι στόχοι της ΕΕ μέσω των οδηγιών EU WFD 2008/98/EC, EU PPWD 94/62/EC για την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων απεικονίζονται στην Εικόνα 6 παρακάτω. Επίσης απεικονίζεται ο στόχος από την οδηγία EU Landfill Directive, 1999/31/EC (καινούργια τροποποίηση 2018/850) για μείωση των αποβλήτων προς απόθεση στις χωματερές στο 10% έως το 2035.



Εικόνα 6: Στόχοι ΕΕ για μείωση, επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση αποβλήτων. Οι στόχοι για τα αστικά απόβλητα αναφέρονται σε ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση και οι στόχοι για τις συσκευασίες σε ανακύκλωση [18].



Απο τους στόχους φαίνεται ότι ο πήγης της ΕΕ έχει ανέβει ψηλά και η μετάβαση σε μια οικονομία κυκλική και όχι γραμμική δεν είναι εύκολη υπόθεση.

### 2.3.2. Ελλάδα

Όσο αφορά τους ελληνικούς στόχους για την διαχείριση των αποβλήτων, η Ελλάδα ευθυγραμμίζεται με τους ευρωπαϊκούς στόχους όπως αυτοί απεικονίζονται στην Εικόνα 6 παραπάνω με την μόνη διαφορά ότι θέτει έναν πιο φιλόδοξο στόχο σε σχέση με την υγειονομική ταφή αποβλήτων με βάση τον νόμο 2018/850 της ΕΕ. Η Ελλάδα σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της υγειονομικής ταφής αστικών αποβλήτων στο 10% μέχρι το 2030 και όχι μέχρι το 2035 που προβλέπεται από την ΕΕ. Επίσης επιλέγει να μην χρησιμοποιήσει την δυνατότητα παρέκκλισης από τον στόχο που θα της επέτρεπε να τον πετύχει μέχρι το 2040 [19].

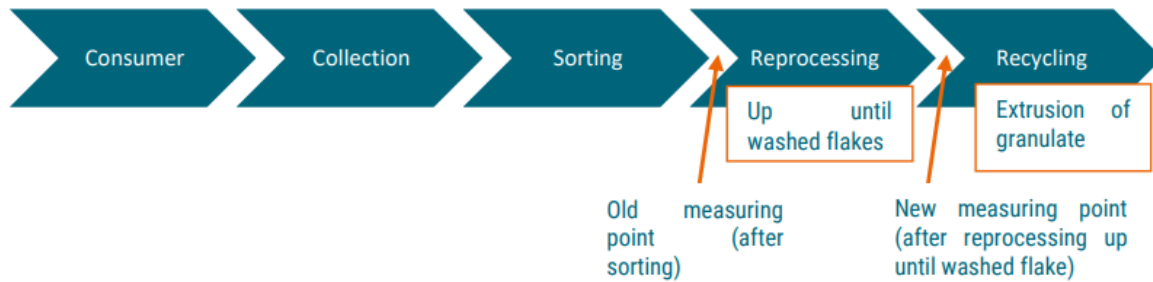
### 2.4. Νέα μέθοδο υπολογισμού ποσοστών ανακύκλωσης συσκευασιών

Σύμφωνα με την εκτελεστική απόφαση της ΕΕ 2019/665 της επιτροπής στις 17/04/2019 “οι κανόνες υπολογισμού για την επίτευξη των στόχων για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας για το 2025 και το 2030, οι οποίοι καθορίζονται στο άρθρο 6α παράγραφοι 1 και 2 της οδηγίας 94/62/ΕΚ, διευκρινίζουν ότι για τον υπολογισμό του στόχου της ανακύκλωσης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο απορρίμματα που εισέρχονται στην εργασία ανακύκλωσης ή απορρίμματα που έχουν φθάσει σε καθεστώς αποχαρακτηρισμού αποβλήτων και, κατά γενικό κανόνα, η μέτρηση των απορριμμάτων θα πρέπει να γίνεται κατά την είσοδο στην εργασία ανακύκλωσης”. Αυτό διαφέρει από τη μέθοδο υπολογισμού που χρησιμοποιούνταν μέχρι το 2020, όπου δεν έπρεπε να γίνουν αφαιρέσεις από την παραγωγή διαλογής [20].

Συγκεκριμένα, στο εξής η ανακύκλωση θα υπολογίζεται σε μεταγενέστερο σημείο της αλυσίδας όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 7. Ενώ προηγουμένως οι ανακυκλωμένες ποσότητες μετρούνταν κατά την έξοδο από τα κέντρα διαλογής, αυτό γίνεται τώρα όταν πραγματοποιείται η ανακύκλωση. Συνεπώς, το σημείο υπολογισμού βρίσκεται στις εταιρείες ανακύκλωσης, αφού απομακρυνθούν τυχόν προσμίξεις και ακατάλληλες ουσίες από τα διαλεγμένα υλικά στα κέντρα ανακύκλωσης [21].

Για τις πλαστικές συσκευασίες, η ποσότητα των ανακυκλωμένων υλικών πρέπει να μετράται ακριβώς πριν από την είσοδο σε διαδικασία πελλετοποίησης, εξώθησης ή χύτευσης ή στο στάδιο

όπου παρέχονται ως πλαστικές νιφάδες για άμεση χρήση σε τελικό προϊόν χωρίς περαιτέρω επεξεργασία [21].



Εικόνα 7: Αλλαγή στο σημείο μέτρησης ανακύκλωσης βάσει οδηγίας ΕΕ 2019/665 [21].

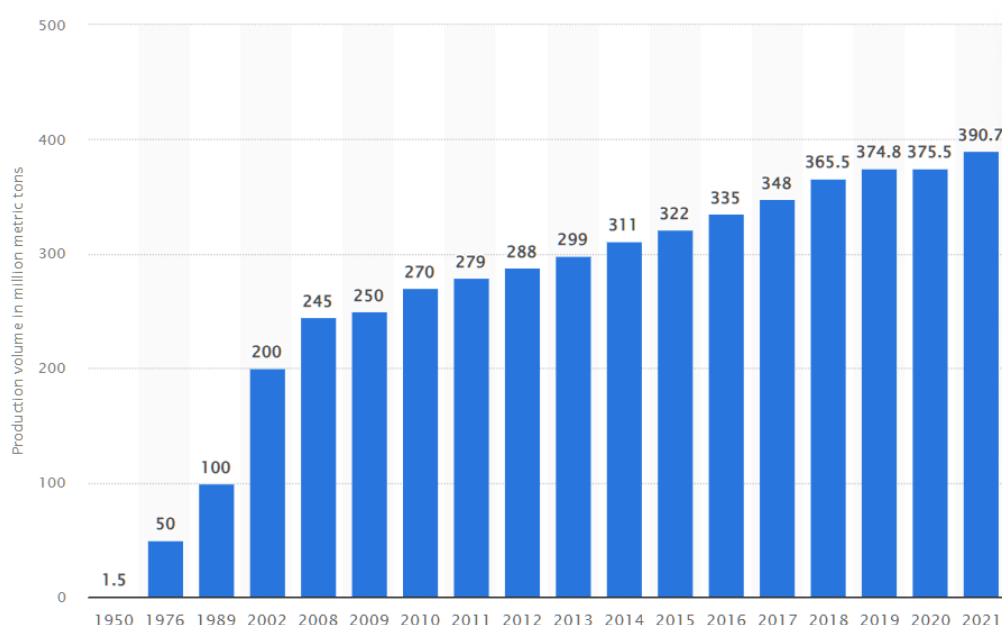
Η αλλαγή στο σημείο μέτρησης των ανακυκλούμενων υλικών επιφέρει και αρνητική αλλαγή στο ήδη υπάρχον ποσοστό ανακύκλωσης. Ταυτόχρονα επηρεάζει την επίτευξη των απαιτούμενων στόχων της ΕΕ ωθώντας σε αύξηση αποτελεσματικότητας του συστήματος διαχείρισης αποβλήτων και παραγωγής υλικών συσκευασιών υψηλής ανακυκλωσιμότητας.

Παρακάτω όπου τα υπολογιζόμενα ποσοστά αναφέρονται στην καινούργια μέθοδο θα αναγράφεται.

### 3. Τα Πλαστικά με αριθμούς και ονόματα

#### 3.1. Παγκόσμια δεδομένα πλαστικών

Στην Εικόνα 8 παρακάτω απεικονίζεται η ετήσια παραγωγή πλαστικών παγκοσμίως από το 1950 έως το 2021. Παρατηρείται ότι υπάρχει συνεχιζόμενη αύξηση της παραγόμενης ποσότητας με την μόνη καμπή την περίοδο 2019-2020 λόγω της πανδημίας COVID-19. Πιο συγκεκριμένα το διάστημα 2000 με 2019 η παραγωγή έχει διπλασιαστεί. Αυτό όπως αναφέρεται οφείλεται στην αύξηση του πληθυσμού και τα υψηλότερα εισοδήματα [22]. Επίσης καθώς το 99% των πλαστικών παράγεται από ορυκτά καύσιμα η παραγωγή τους είναι στενά συνδεδεμένη με την πετροχημική βιομηχανία. Η ταχεία ανάπτυξη τροφοδοτείται επίσης και από την διαθεσιμότητα φθηνού σχιστολιθικού αερίου και αιθανίου που είναι βασικό για την παραγωγή ορισμένων πλαστικών [23].

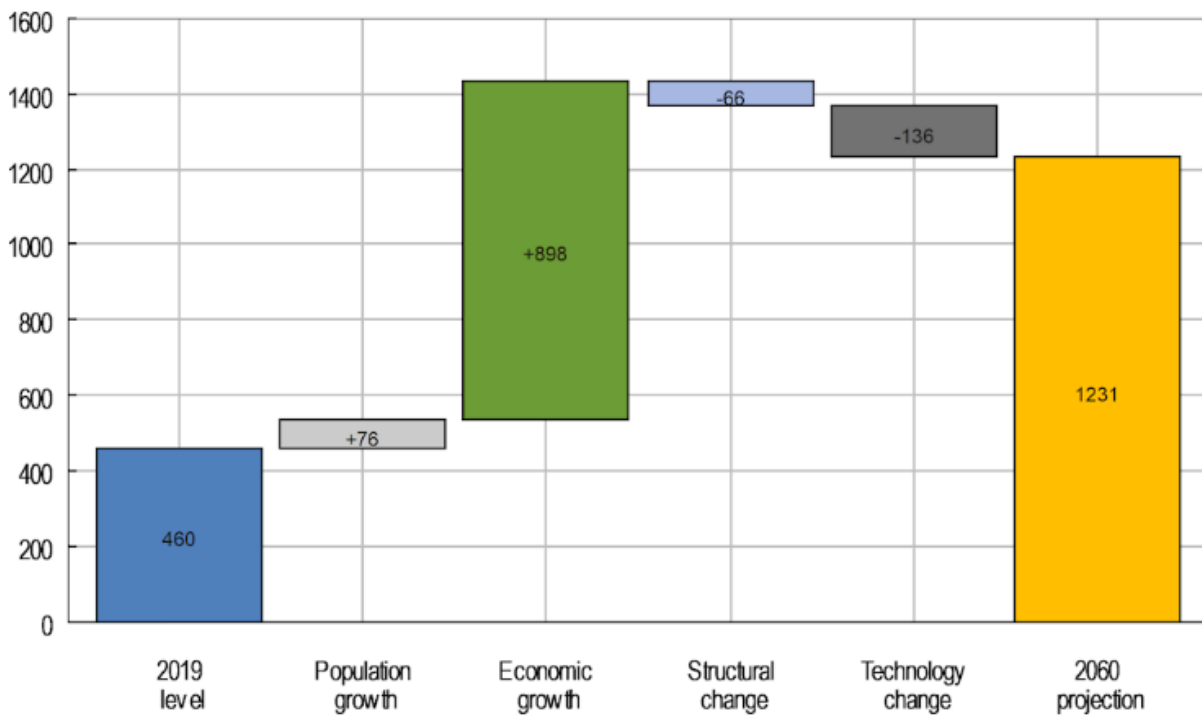


Εικόνα 8: Ετήσια παραγωγή πλαστικού παγκοσμίως από το έτος 1950 έως 2021 [24].

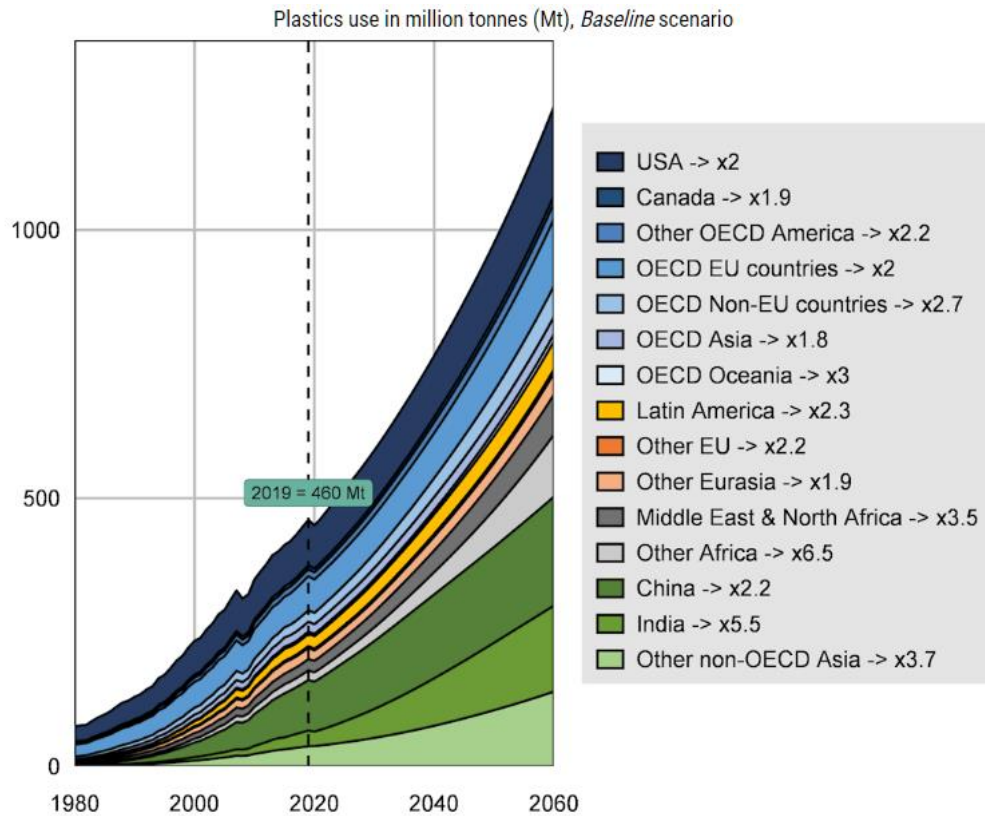
Σύμφωνα με προβλέψεις ενός βασικού σεναρίου που περιλαμβάνει τις συνεχιζόμενες κοινωνικοοικονομικές εξελίξεις και την οικονομική ανάπτυξη, συμπεριλαμβανομένης της ανάκαμψης από την πανδημία COVID-19 βλέπουν τις αναδυόμενες και αναπτυσσόμενες οικονομίες να φτάνουν τις χώρες με υψηλότερο εισόδημα. Το σενάριο προβλέπει ότι η παγκόσμια χρήση πλαστικών θα τριπλασιαστεί την περίοδο 2019-2060 φτάνοντας τους 1231 Mt ετησίως από 460 Mt το 2019 [25]. Στην Εικόνα 8 απεικονίζεται η κινητήριος δύναμη που οδηγεί σε μια τέτοια

αύξηση σύμφωνα με το βασικό σενάριο. Παρατηρείται ότι η αύξηση στην χρήση πλαστικού οφείλεται κυρίως στην οικονομική ανάπτυξη με +898 Mt και στην αύξηση του πληθυσμού με +76 Mt. Καμπή σε αυτήν την αύξηση θα μπει απο την αλλαγή της δομής της οικονομίας με -66 Mt και απο τις αποδοτικότερες διαδικασίες παραγωγής με -136 Mt [25].

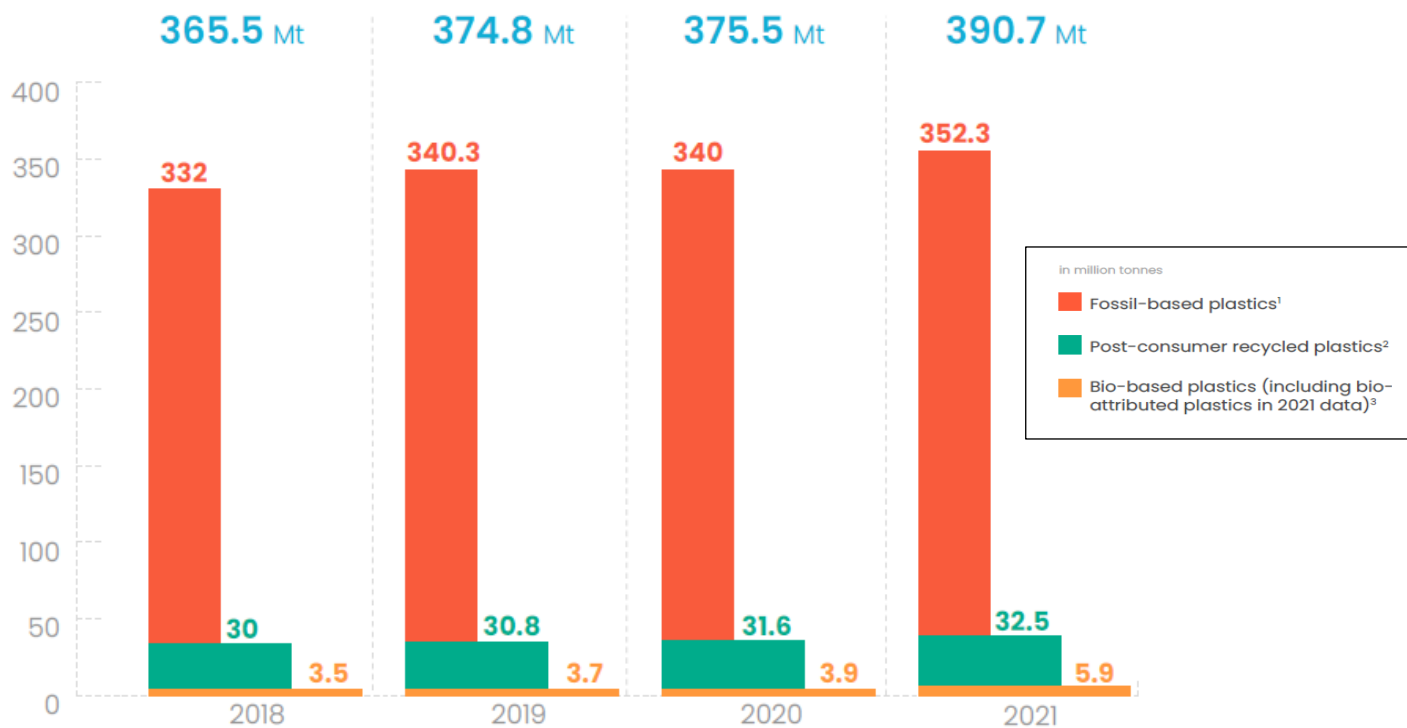
Με την αύξηση της οικονομίας οι αναπτυσσόμενες χώρες και περιοχές θα αυξήσουν κατα πολύ την χρήση σε πλαστικό σε σχέση με τις ανεπτυγμένες χώρες. Στο διάγραμμα της Εικόνας 10 παρατηρείται ότι η υπο σαχάρια Αφρική θα αυξήσει την χρήση της σε πλαστικό 6.5 φορές και η Ινδία 5.5 φορές το 2060 σε σχέση με το 2019 [25]. Αυτό γεννά και ερωτήματα κατά πόσο η διαχείριση όλων αυτών των αποβλήτων που θα παραχθούν θα είναι αποδοτική.



Εικόνα 9: Αποδόμηση αύξησης χρήσης πλαστικων βάσει βασικού σεναρίου [25].

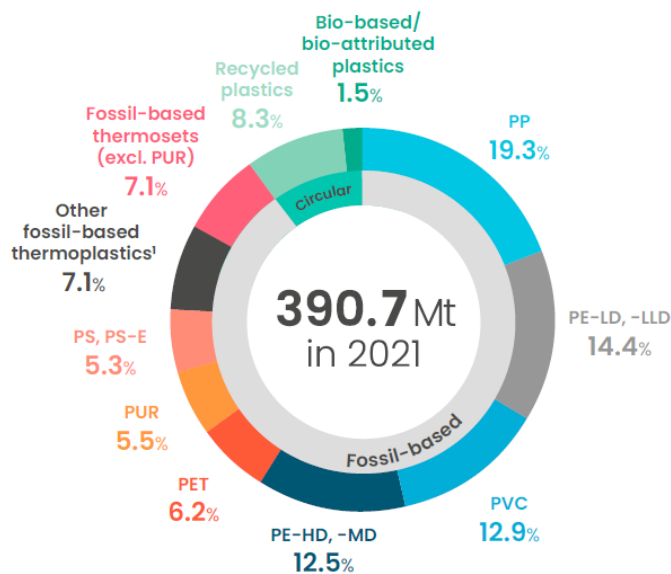


Εικόνα 10: Αύξηση χρήσης πλαστικού σε χώρες και περιοχές το 2019 με το 2060 [25].

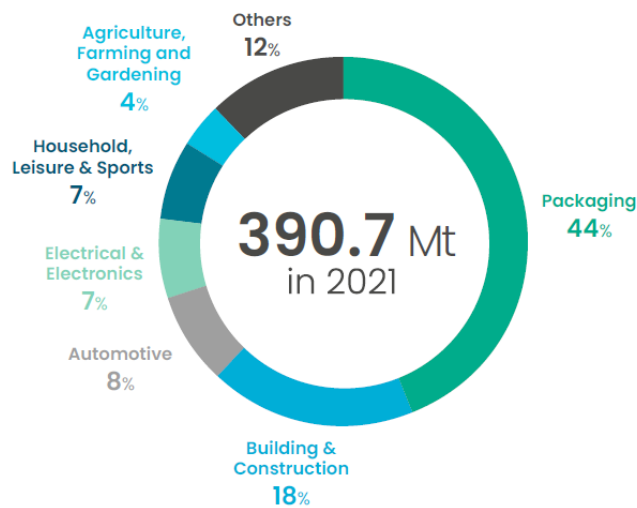


Εικόνα 11: Παγκόσμια εξέλιξη της παραγωγής και προέλευσης των πλαστικών [26].

Στην Εικόνα 11 απεικονίζεται η εξέλιξη της παγκόσμιας παραγωγής πλαστικών τα τελευταία χρόνια χωρισμένη ανα τομείς προέλευσης. Για το 2021 η παραγωγή πλαστικών απο ορυκτά καυσίμα ήταν (90,2%), απο ανακύκλωση πλαστικών μετά απο κατανάλωση (8,3%) και απο βιοπλαστικά (1,5%). Στα δεδομένα του γραφηματος δεν περιλαμβάνονται πολυμερή που δεν χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή πλαστικών εξαστημάτων και προϊόντων (π.χ. για κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, κόλλες κλπ). Συνεχίζοντας την ανάλυση παρακάτω στην Εικόνα 12 απεικονίζεται η κατανομή των πολυμερών που απαρτίζουν το παγκόσμιο ποσοστό πλαστικών καθώς και στην Εικόνα 13 οι τομείς εφαρμογής που απορροφούν το ποσοστό αυτό εν έτη 2021.



Εικόνα 12: Κατανομή παγκόσμιου ποσοστού παραγόμενων πλαστικών ανα τύπο πολυμερούς 2021 [26].



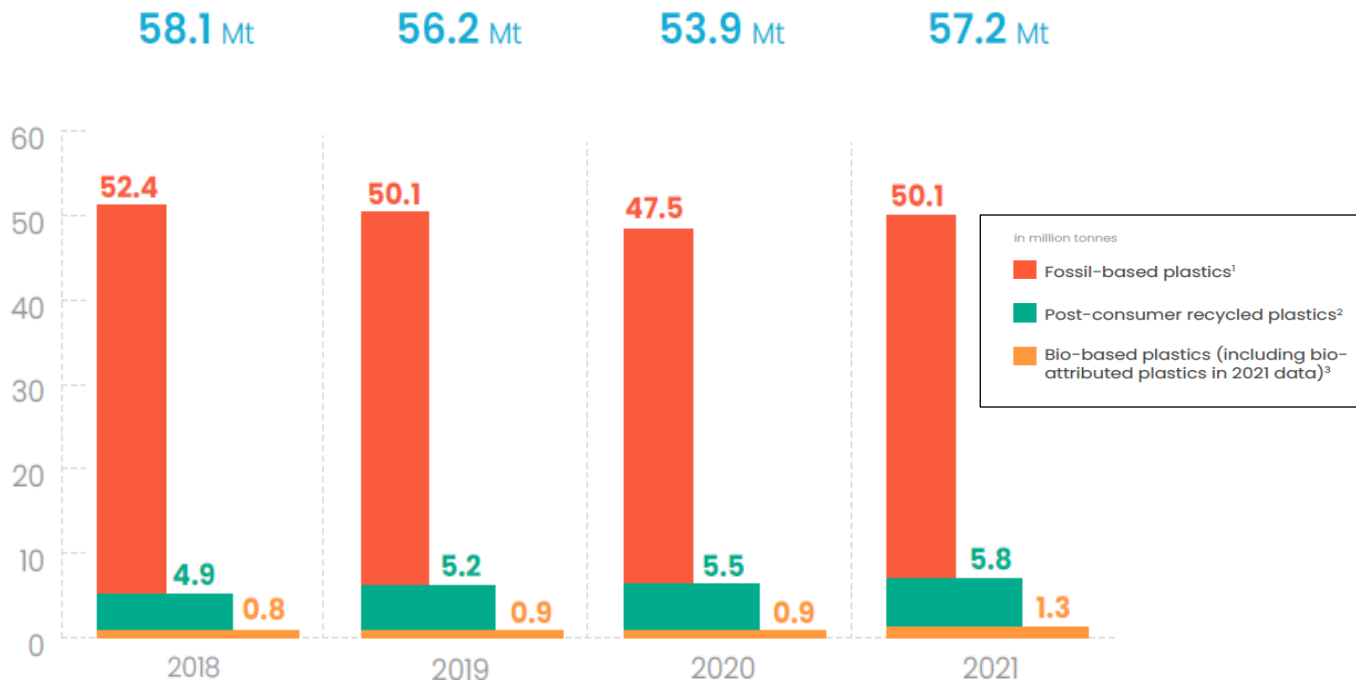
Εικόνα 13: Κατανομή της παγκόσμιας χρήσης πλαστικών ανα εφαρμογή 2021 [26].

Απο το διάγραμμα της Εικόνας 12 παρατηρείται ότι το 9.8 % των παραγόμενων πλαστικών παγκοσμίως προέρχεται κυκλικά. Επίσης βλέπουμε ότι οι πολυολεφίνες (PP, PE) απαρτίζουν το μεγαλύτερο ποσοστό παγκοσμίως ~46,2% επι του συνόλου των παραγόμενων πολυμερών απο ορυκτούς πόρους πράγμα που επιβεβαιώνεται και απο το γράφημα της Εικόνα 13 καθώς οι πολυολεφίνες είναι απο τα κυρίαρχα πολυμερή για την παραγωγή συσκευασιών που απαρτίζουν το 44% παγκοσμίως των εφαρμογών των πλαστικών ακολουθώντας οι κατασκευές με 18%.

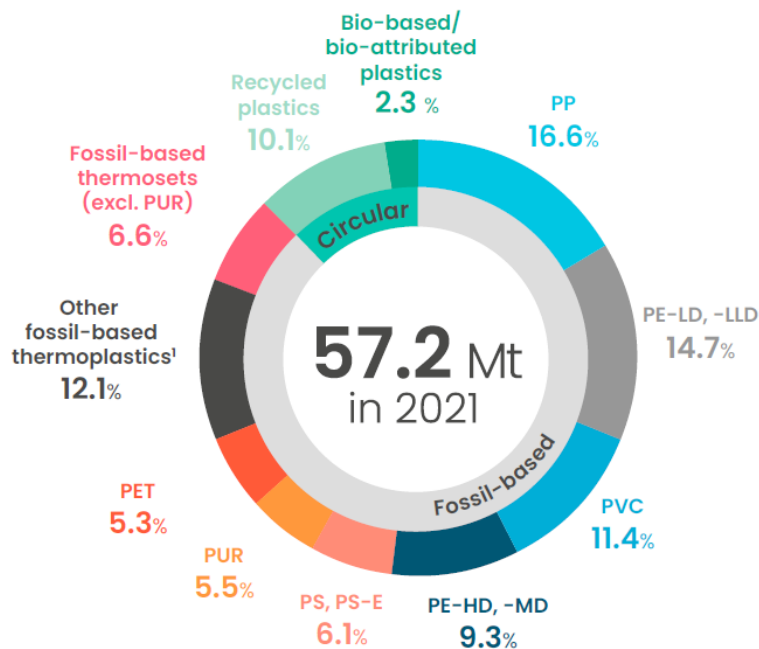
### 3.2. Ευρωπαϊκά δεδομένα πλαστικών

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα ευρωπαϊκα δεδομένα όσο αφορούν την παραγωγή και την σύνθεση των πλαστικών.

Στην Εικόνα 14 απεικονίζεται η ευρωπαϊκή εξέλιξη παραγωγής πλαστικών απο το 2018 εως το 2021. Κατα αντιστοιχία και εδώ παρουσιάζονται τα δεδομένα για παραγωγή απο ορυκτά καύσιμα, ανακύκλωση και βιοπλαστικά. Στα δεδομένα του γραφηματος δεν περιλαμβάνονται πολυμερή που δεν χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή πλαστικών εξαστημάτων και προϊόντων (π.χ. για κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα, κόλλες κλπ). Επίσης στο γράφημα της Εικόνας 15 αποτυπώνεται η διάρθρωση του ευρωπαϊκού παραγόμενου ποσοστού ανα τύπο πολυμερών το έτος 2021.



Εικόνα 14: Ευρωπαϊκή εξέλιξη παραγωγής πλαστικών 2018-2021 [26].

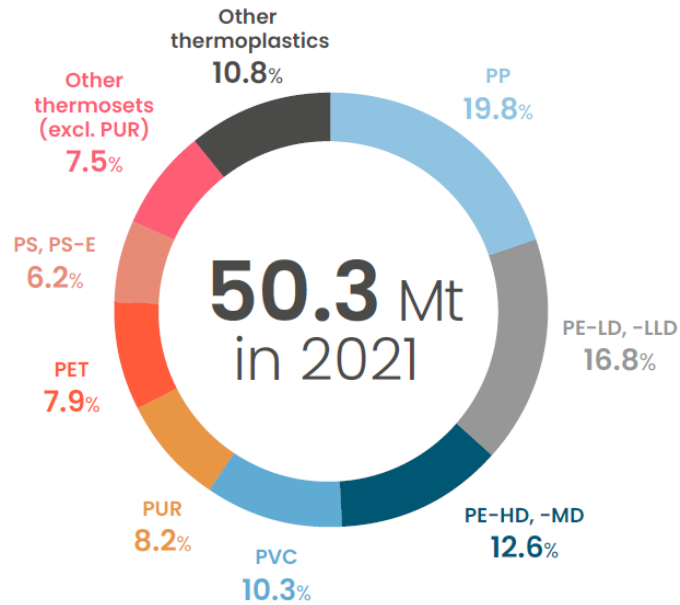


Εικόνα 15: Διάρθρωση παραγόμενου ποσοστού ανα τύπο πολυμερών εν έτη 2021 [26].

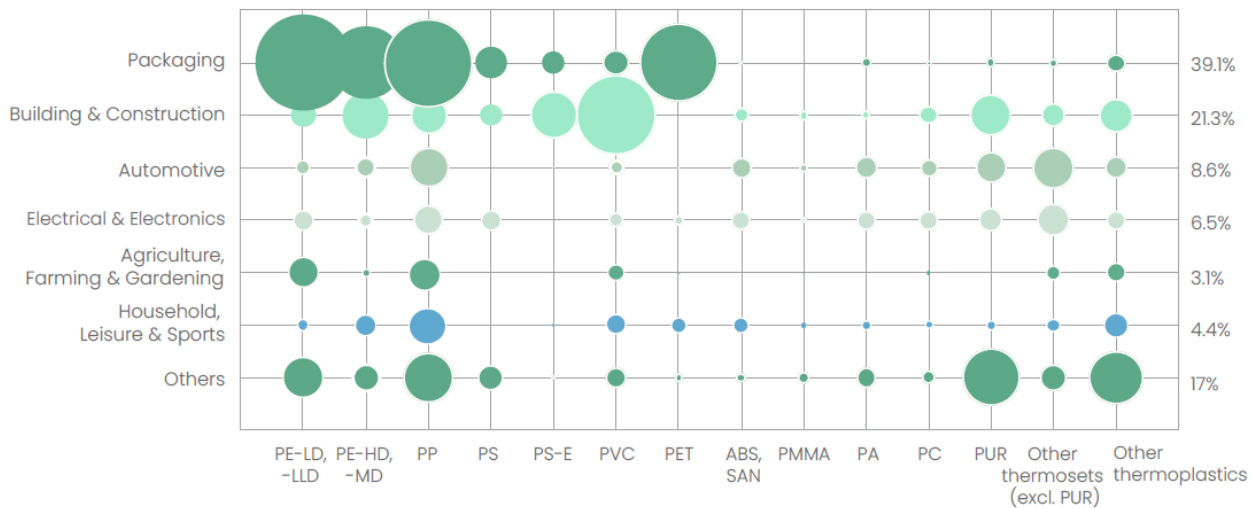
Απο την ανάλυση των Εικόνας 14 προκύπτει ότι το ποσοστό παραγωγής πλαστικών στην Ευρώπη μετα απο μια περίοδο καμψής λόγω του COVID-19 ανακάμπτει και φτάνει τους 57.2 Mt το 2021. Επίσης παρατηρείται ότι το ποσοστό ανακυκλούμενων πλαστικών και βιοπλαστικών έχει μια αύξηση χρόνο με τον χρόνο. Απο το συνολικό ποσοστό το 2021 το 10.1% προήλθε απο ανακυκλωμένα πλαστικά, το 2.3% απο βιοπλαστικά και το υπόλοιπο 87.6% απο ορυκτά καύσιμα. Στην περαιτέρω ανάλυση της Εικόνας 15 παρατηρείται κάτι ανάλογο με τα παγκόσμια δεδομένα όπου οι πολυολεφίνες απαρτίζουν το 40,6% επι του συνόλου των παραγόμενων απο ορυκτά πόρους πλαστικών.

Η ζήτηση πολυμερών το 2021 απο τις εταιρείες παραγωγής πλαστικών στην ΕΕ άγγιξε τους 50.3 Mt [26]. Απο την συνολική ζήτηση περίπου το 49,2 % αποτελείται απο πολυολεφίνες όπως φαίνεται στο σχημα της Εικόνας 16 παρακάτω. Επίσης στην Εικόνα 17 απεικονίζεται το ποσοστό ζήτησης ανα τύπο πλαστικού και εφαρμογή στην ΕΕ.





Εικόνα 16: Ευρωπαϊκή ζήτηση εταιρειών παραγωγής ανα τύπο πολυμερών [26].



Εικόνα 17: Ποσοστό ζήτησης ανα τύπο πλαστικού και εφαρμογή στην ΕΕ [26].

Αναλύοντας την Εικόνα 17 συμπεραίνεται ότι ο τομέας της συσκευασίας αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό εφαρμογών με κυρίαρχα πολυμερή τις πολυολεφίνες και το PET με επόμενο τον τομέα των κατασκευών και της αυτοκινητοβιομηχανίας.

### 3.3. Ελληνικά δεδομένα πλαστικών

Σύμφωνα με την αναφορά [27] απο το Ίδρυμα Οικονομικών & Βιομηχανικών Ερευνών (IOBE) απο έρευνα της Eurostat το 2018 οι εισαγωγές πρωτογενών πλαστικών πρώτων υλών στην Ελλάδα ξεπέρασε τους 652 kt. Επίσης προκύπτει ότι η εισαγωγή δευτερογενών πρώτων υλών δεν ξεπέρασε τους 25 kt. Η εγχώρια παραγωγή πλαστικών πρώτων υλών με εκτιμησεις του Σύνδεσμου Βιομηχανιών Πλαστικών Ελλάδος (ΣΒΠΕ) κυμάνθηκε στους 362 kt.

Στον αντίποδα η παραγωγή πλαστικών στην χώρα εμφανίζεται αρκετά υψηλότερη με βάση τα στοιχεία της PRODCOM (Eurostat) που αναφέρει ότι η Ελλάδα παρήγαγε 2.1 Mt πλαστικών προϊόντων το 2018, ενώ εισήχθησαν 692 kt για να καλύψουν την εγχώρια ζήτηση. Επίσης αναφέρει ότι έγινε εξαγωγή περίπου 755 kt. Καταλήγει ότι η κατανάλωση πλαστικών προϊόντων στην Ελλάδα ανήλθε στους 2 Mt TO 2018 [27].

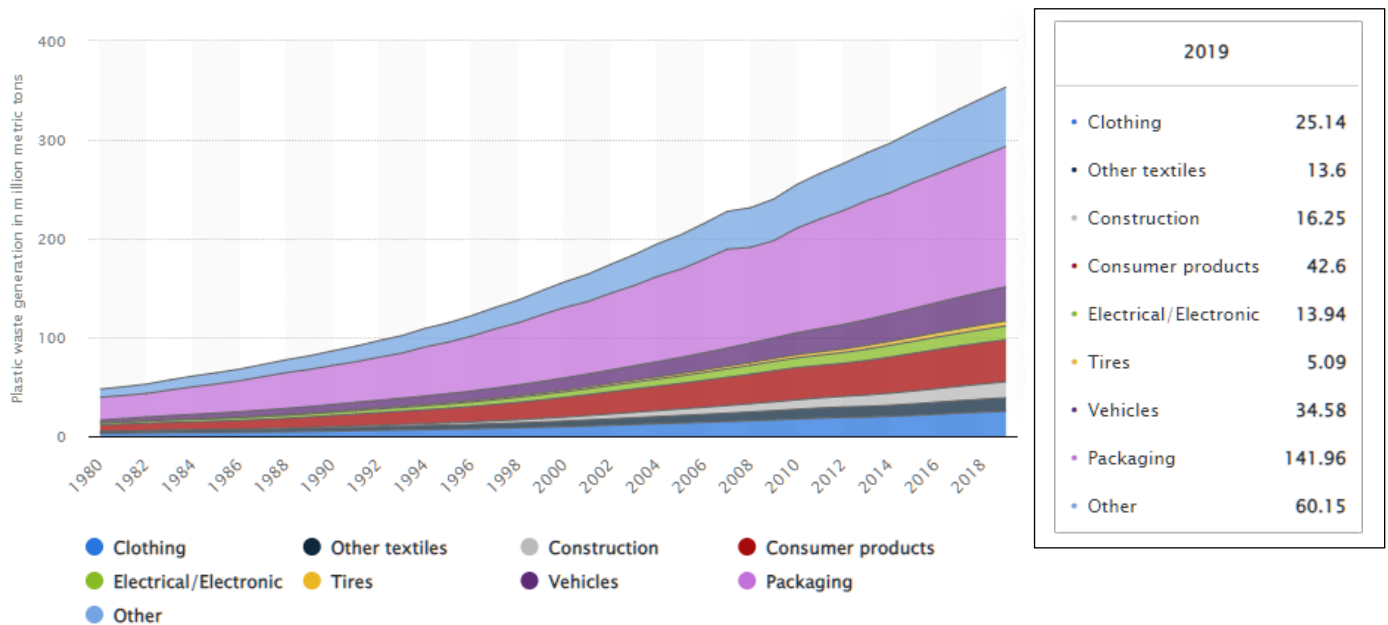
Σύμφωνα με έκθεση της WWF [28] το 0.3 % της παγκόσμιας παραγωγής πλαστικών προϊόντων παράγεται στην Ελλάδα και ανέρχεται σε 940 kt ετησίως εκ των οποίων περίπου οι 190 kt είναι απορρίματα συσκευασίας. Επίσης αναφέρει ότι παράγονται εγχώρια 600 kt παρθένου πλαστικού εκ των οποίων οι 400 kt εξάγονται (κυρίως πολυπροπυλένιο). Αντίθετα με την έκθεση του IOBE υποστηρίζει ότι εισάγονται 500 kt και 300 kt δευτερογενών υλικών.

### 3.4. Παγκόσμια, Ευρωπαϊκά και Ελληνικά δεδομένα πλαστικών αποβλήτων και στοιχεία διαχείρισής τους

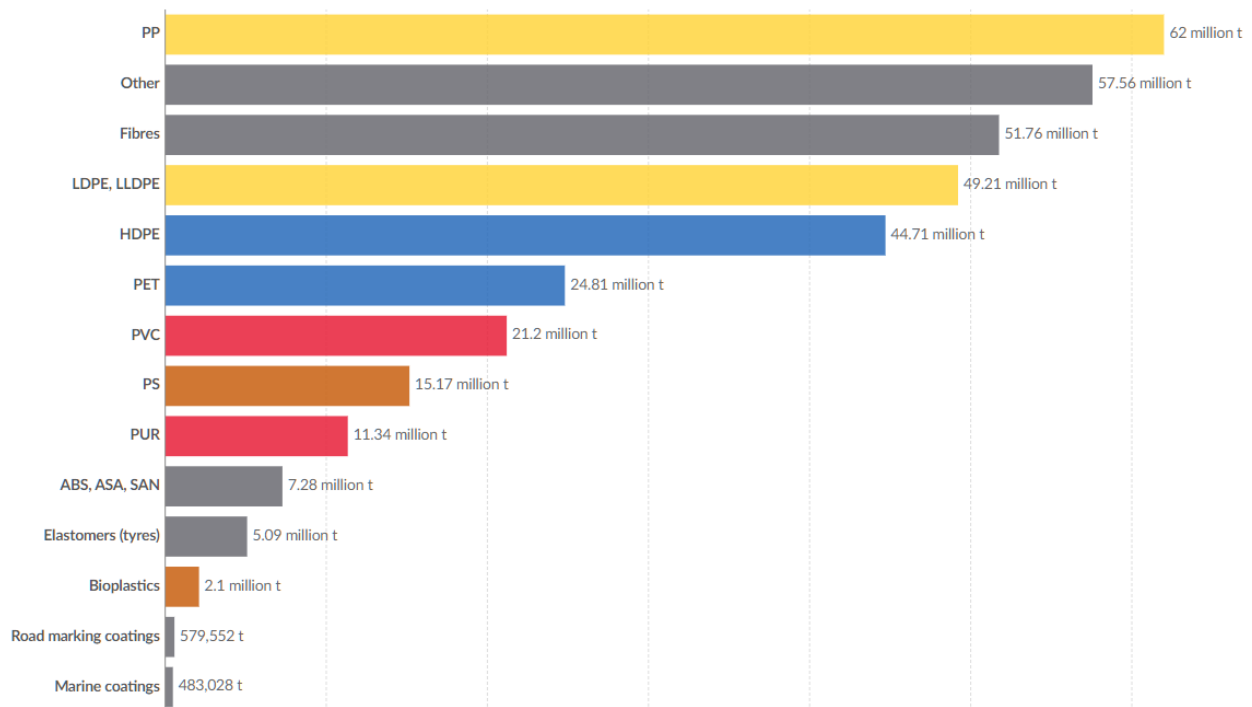
Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα διαθέσιμα στοιχεία όσο αφορά τα παραχθέντα ή τα συλλεχθέντα απόβλητα και σε μερικές περιπτώσεις τους τρόπους διαχείρισής τους.

Σε παγκόσμιο επίπεδο σύμφωνα με το διάγραμμα της Εικόνας 18 η παγκόσμια παραγωγή πλαστικών αποβλήτων το 2019 ανέρχεται στους 353 Mt. Παρατηρείται ότι ο κλάδος των συσκευασιών είναι πρώτος σε παραχθέντα απόβλητα με ~141 Mt το 2019, που αποτελεί το 40% επι του συνόλου. Απο άλλη οπτική γωνία στην Εικόνα 19 απεικονίζεται η παραγωγή πρωτογενών πλαστικών αποβλήτων ανα τύπο πολυμερούς εν έτη 2019. Ο χρωματικός διαχωρισμός δείχνει την ανακυκλωσιμότητα του εκάστοτε τύπου πολυμερούς με το μπλέ να υποδεικνύει μεγάλη ανακυκλωσιμότητα, το κίτρινο μέτρια και το κόκκινο πιο σπάνια. Απο την συγκεκριμένη ανάλυση προκύπτει ότι υλικά όπως LDPE, PS, PUTE, PVC και PP με τις αντίστοιχες μεγάλες ποσότητες αποβλήτων είναι σπανίως ή μερικώς ανακλώσιμα. Ένα μέρος του συγκεκριμένου προβλήματος

με την ανακυκλωσιμότητα των συγκεκριμένων υλικών πιστεύεται ότι θα λύσει η χημική ανακύκλωση.



Εικόνα 18: Παγκόσμια παραγωγή πλαστικών αποβλήτων από το 1980 έως το 2018 [29].



Εικόνα 19: Πρωτογενής παραγωγή πλαστικών αποβλήτων ανά τύπο πολυμερούς, 2019. Ο χρωματικός διαχωρισμός υποδηλώνει την ανακυκλωσιμότητα του συγκεκριμένου τύπου πολυμερούς με το μπλέ να είναι ευρέως και το κόκκινο σπανίως ανακυκλώσιμα [30].

Σύμφωνα με έρευνα στην Φινλανδία [31] μελετήθηκε η σύσταση πλαστικού σε ρεύματα πλαστικών αποβλήτων και αποβλήτων κατασκευής. Το 1<sup>ο</sup> ρεύμα προς μελέτη πάρθηκε απο επιχείρηση αποβλήτων κατασκευής στο οποίο διαχωρίστηκαν χειρονακτικά η ποσότητα των 86.11 kg πλαστικών που εμπεριέχονταν σε αυτό. Το 2<sup>ο</sup> ρεύμα με ποσότητα 57.74 kg πάρθηκε απο επιχείρηση αποβλήτων όπου τα πλαστικά είχαν διαχωρισθεί μηχανικά με οπτικούς ανιχνευτές. Επίσης πάρθηκε και ένα μικρό δείγμα της τάξης του 1.1 kg απο το ρεύμα μηχανικής διαλογής για εξακρίβωση αξιοπιστίας αποτελέσματος. Η ταυτοποίηση του εκάστοτε πολυμερούς πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας φορητό φασματογράφο. Τα αποτελέσματα της έρευνας απεικονίζονται στον Πίνακα 1.

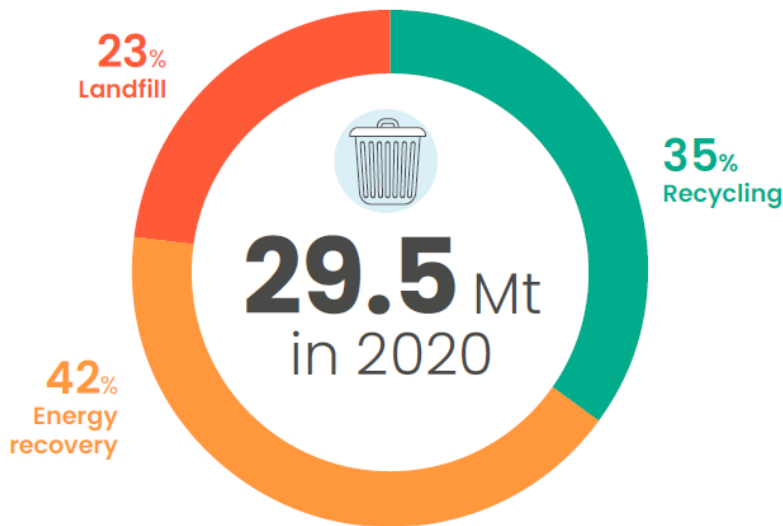
Πίνακας 1: Ανάλυση σύστασης πολυμερών πλαστικών αποβλήτων σε kg [31].

Stream	ABS	PA	PC	PE	PET	PMMA	PP	PS	PVC	Un <sup>1</sup> /d <sup>2</sup> *
1	33.91	9.44	0.52	8.44	1.10	0.64	21.45	0.09	9.69	14.71/30.39
2	0.74	-	-	28.42	0.12	-	48.27	5.66	0.05	16.73/49.27
2*	4.91	-	-	6.55	0.32	0.61	53.01	3.73	0.15	30.72/62.00

<sup>1</sup> Unidentified, <sup>2</sup> Dark-colored polymers, \* share of dark color material in unidentified material.

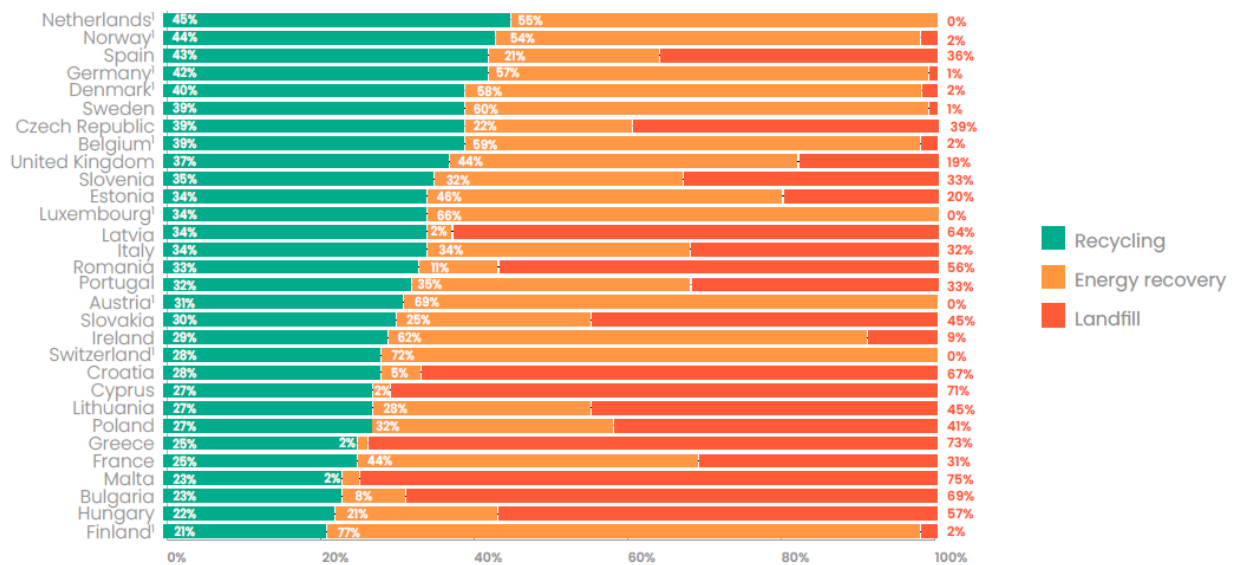
Απο την ανάλυση του Πίνακα 1 προκύπτει ότι στο 1<sup>ο</sup> ρεύμα πλαστικών αποβλήτων απο την κατασκευή αποτελείται κυρίως απο ABS (πράγμα που δικαιολογείται λόγω ανομοιομορφίας του δείγματος), PP και PVC. Στο 2<sup>ο</sup> ρεύμα παρατηρείται πρώτο με διαφορά το PP και δεύτερο το PE πράγμα που επιβεβαιώνεται και στο τρίτο ρεύμα.

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο σύμφωνα με την Plastics Europe η Ευρώπη το 2020 σύλλεξε 29.5 Mt πλαστικών αποβλήτων μετά απο κατανάλωση εκ των οποίων οι 15 Mt απο μικτή συλλογή και οι 14,5 Mt με διαχωριστική συλλογή μεμονωμένων προϊόντων. Αναφέρεται ότι η ανακύκλωση στα προϊόντα απο ξεχωριστή συλλογή ήταν 13 φορές μεγαλύτερη απο τον μικτό διαχωρισμό. Όσο αφορά την διαχείριση όπως φαίνεται και στην Εικόνα 20 το 35% επι του συνόλου των 29.5 Mt οδηγήθηκε προς ανακύκλωση, το 42% προς ανάκτηση ενέργειας και το 23% σε υγειονομική ταφή [26].



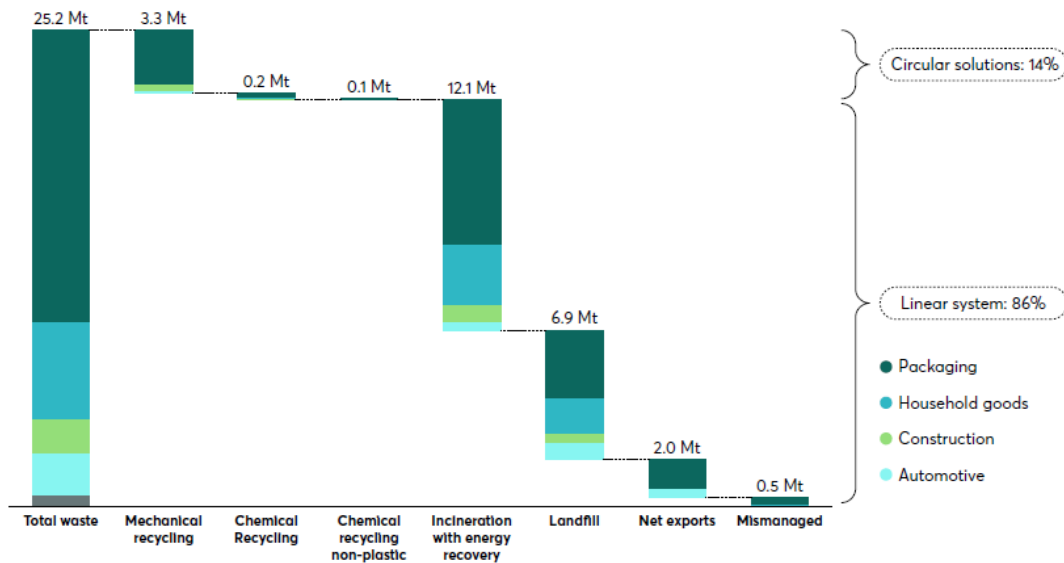
Εικόνα 20: Συλλεχθέντα πλαστικά απόβλητα ΕΕ το 2020 [26].

Αν αναλύθούν τα δεδομένα της Εικόνας 21 όπου απεικονίζει την διαχείριση των πλαστικών αποβλήτων ανα χώρα το 2020 παρατηρούμε ότι η Ελλάδα είναι στην δεύτερη θέση σε υγειονομική ταφή με 73%, στις τελευταίες θέσεις σε ανάκτηση ενέργειας με ποσοστό 2% και προφανώς πολύ χαμηλά στο ποσοστό ανακύκλωσης με 25% [26]. Αυτό επιβεβαιώνει την χρόνια πολιτική μας για ταφή απορριμάτων και απουσία υποδομών και οργανωμένου σχεδίου διαχείρισης. Στον αντίποδα από τα δεδομένα της εικόνας παρατηρείται ότι χώρες όπως η Ολλανδία, η Αυστρία η Ελβετία κλπ έχουν μηδενικό ποσοστό πλαστικών αποβλήτων που καταλήγει σε ταφή.



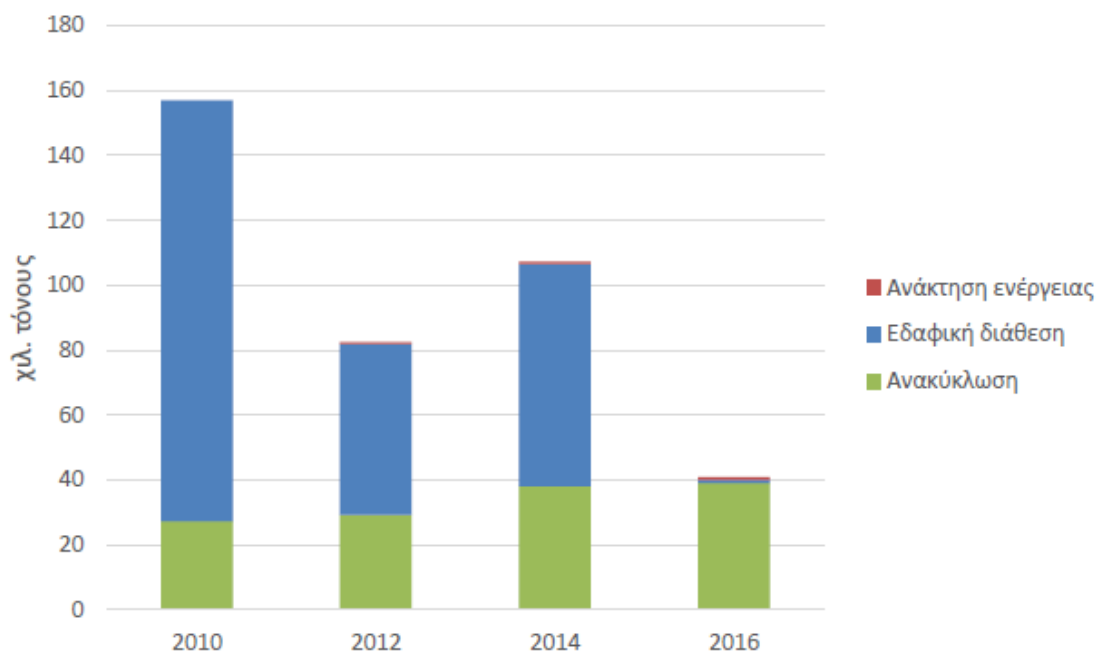
Εικόνα 21: Τρόποι διαχείρισης πλαστικών αποβλήτων ανά χώρα της ΕΕ το 2020 [26].

Με βάση την αναφορά του Systemiq [32] στην Εικόνα 22 απεικονίζεται η κατάσταση των πλαστικών αποβλήτων και η διαχείρισή τους στην Ευρώπη. Τα δεδομένα δείχνουν ότι το 14% επι του συνόλου των 25.2 Mt ανακυκλώνεται κυκλικά και το 86% του συνολικού όγκου απαρτίζει το γραμμικό σύστημα διαχείρισης. Πιο ειδικά το κυκλικό σύστημα περιλαμβάνει την χημική ανακύκλωση με ~0.8% (0.2 Mt), τις απώλειες λόγω πυρόλυσης και αεριοποίησης χημικής ανακύκλωσης με 0.1% και τέλος την μηχανική ανακύκλωση με ποσοστό 13% (3.3 Mt) επι του συνόλου των πλαστικών αποβλήτων.



Εικόνα 22: Πλαστικά απόβλητα και διαχείριση απο την ΕΕ 2020 [32].

Τα διαθέσιμα στοιχεία για την κατάσταση στην Ελλάδα όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 23 απο την Eurostat αναφέρουν ότι οι συνολικές ποσότητες πλαστικών αποβλήτων το 2016 διαμορφώθηκαν στους 257 kt έχοντας μειωθεί ~65% σε σχέση με το 2006 όπου ήταν 755 kt. Το 2016 ανακυκλώθηκαν περίπου 39 χιλ. τόνοι πλαστικών αποβλήτων ενώ προς υγειονομική ταφή κατέληξαν μόλις 1,0 χιλ. τόνοι [27].



Εικόνα 23: Επεξεργασία πλαστικών αποβλήτων, Ελλάδα, 2010-2016 [27].

Συγκρίνοντας τα παραπάνω στοιχεία με τα αντίστοιχα του 2014 παρατηρείται σημαντική μείωση των αποβλήτων που οδηγούνται στην ταφή (-92%), χωρίς να ενισχύονται αντίστοιχα άλλες μέθοδοι διαχείρισης. Αυτό φαίνεται να οφείλεται εν μέρει στην αλλαγή της μεθοδολογίας καταγραφής των αποβλήτων που από το 2016 και στη συνέχεια στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στις δηλώσεις του ηλεκτρονικού μητρώου αποβλήτων.

Διαφορετικοί όγκοι πλαστικών αποβλήτων προκύπτουν από τα στοιχεία του Ελληνικού Οργανισμού Ανακύκλωσης (ΕΟΑΝ) που αφορούν τα απόβλητα συσκευασίας τα οποία προέρχονται από καταγραφές ποσοτήτων των επιμέρους συστημάτων εναλλακτικής διαχείρισης που δραστηριοποιούνται στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα αναφέρει ότι το 2017 παρήχθησαν περίπου 188 χιλ. τόνοι πλαστικής συσκευασίας, εκ των οποίων ανακυκλώθηκαν περίπου 78 χιλ. τόνοι, ήτοι περίπου 41,4% (έναντι ελάχιστου στόχου 22,5% της ΚΥΑ 9268/469/2007 και στόχου σχεδιασμού 70% του ΕΣΔΑ για το 2020).

Η έκθεση του IOBE [27] αναφέρει ότι διασταυρώνοντας τα στοιχεία από τις παραπάνω πηγές, φαίνεται πως υπάρχει σημαντική υποεκτίμηση στα δεδομένα της Eurostat σχετικά με τις ποσότητες πλαστικών αποβλήτων που διαχειρίζονται στην Ελλάδα, καθώς και στις ποσότητες που οδηγούνται στην ταφή, οι οποίες δεν συνάδουν με την ευρύτερη εικόνα της διαχείρισης στερών αποβλήτων που περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα. Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό διάθεσης πλαστικών αποβλήτων σε ΧΥΤΑ υπολογίζεται με τα στοιχεία από την επεξεργασία αποβλήτων ότι δεν ξεπερνά το 2,5%, όταν σύμφωνα με τα στοιχεία για τη διαχείριση των αστικών

στερεών αποβλήτων (τα οποία δεν είναι διαθέσιμα ανά υλικό), πάνω από 80% των ΑΣΑ οδηγούνται στην ταφή.

Η παραπάνω ανάλυση των διαθέσιμων στοιχείων εμπεριέχει ενδείξεις για δυο σημαντικά προβλήματα. Πρώτον, υπάρχουν σημαντικές ελλείψεις στο σύστημα καταγραφής των ροών των αποβλήτων και των ανακυκλώσιμων υλικών, οι οποίες πρέπει να διορθωθούν για να αποκτήσει και η πολιτική για τη διαχείριση των αποβλήτων αξιοπιστία. Είναι εύλογο οι ποσότητες πλαστικών που προορίζονται για κατανάλωση σε ένα έτος να μην αντιστοιχεί στις ποσότητες που καταλήγουν σε απόβλητα, καθώς μερικά πλαστικά προϊόντα έχουν σύντομη διάρκεια χρήσης και άλλα πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής και χρήσης. Ωστόσο, οι διαφορές που καταγράφονται στα επίσημα στοιχεία της Eurostat μεταξύ των σταδίων ζωής των πλαστικών προϊόντων, ειδικά όσον αφορά την ποσότητα που καταλήγει σε εδαφική διάθεση, δημιουργεί βάσιμες αμφιβολίες για την ορθότητα των στοιχείων [27].

Σύμφωνα με τα στοιχεία της έκθεσης [33] αξιολόγησης έγκαιρης προειδοποίησης σχετικά με τους στόχους του 2025 για τα αστικά απόβλητα και τα απόβλητα συσκευασίας της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος προς την Ελλάδα προκύπτει ότι η κατά κεφαλήν παραγωγή απο το 2014 έως το 2019 πλαστικών αποβλήτων συσκευασίας έχει αυξηθεί απο 17 σε 21 kg.

Εν συνεχεία παραθέτει στοιχεία για το σύνολο και την σύσταση των αστικών στερών αποβλήτων καθώς και το ποσοστό συλλογής τους όπως απεικονίζονται στον Πίνακα 2 παρακάτω. Απο τα στοιχεία του πίνακα για το πλαστικό φαίνεται ότι η συνολική ποσότητα στα στερεά αστικά απόβλητα ήταν ~781 kt απο τους οποίους συλλέχθηκε το 11% ήτοι ~86,6 kt.

Πίνακας 2: Ποσοστά δέσμευσης για διάφορα κλάσματα αποβλήτων στην Ελλάδα, 2019 [33].

	Residual waste composition (%) <sup>(b)</sup>	Residual waste composition (tonnes) <sup>(a)</sup>	Separately collected amounts (tonnes) <sup>(b)</sup>	Materials in total MSW (tonnes)	Capture rates (%)
Reference year	2019	2019	2019		
Mixed municipal waste, total		4 542 267			
Paper and cardboard	16.1 %	731 305	629 514	1 360 819	46 %
Metals	3.1 %	140 810	66 766	207 576	32 %
Glass	4.4 %	199 860	35 809	235 669	15 %
Plastic	15.3 %	694 967	86 663	781 630	11 %
Bio-waste	48.4 %	2 198 457	196 416	2 394 873	8 %
Textiles					
Wood	4.1 %	186 233	15 174	201 407	8 %

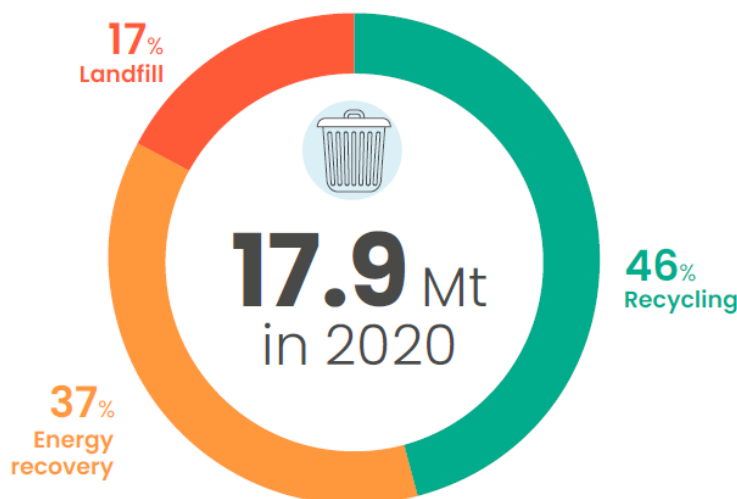


### 3.5. Στόχοι ΕΕ και πρόοδος

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η πρόοδος των ευρωπαϊκών και ελληνικών στόχων σε σχέση με τα πλαστικά όπως αυτοί παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.3. Πιο συγκεκριμένα θα αναλυθεί η πρόοδος για τον στόχο της οδηγίας EU WFD 2008/98/EC (αύξηση του ποσοστού ανακύκλωσης και προετοιμασίας επαναχρησιμοποίησης αστικών αποβλήτων κατ' ελάχιστο σε 55%, 60% και 65% κατά βάρος έως το 2025, το 2030 και το 2035 αντίστοιχα), EU PPWD 94/62/EC (ανακύκλωση πλαστικών αποβλήτων συσκευασίας σε 50 % έως το 2025 και σε 55% έως το 2030), EU Landfill Directive, 1999/31/EC (καινούργια τροποποίηση 2018/850) για μείωση των αποβλήτων προς απόθεση στις χωματερές στο 10% έως το 2035 και τον επιχειρηματικό στόχο του Circular Party Alliance για 10 Mt ανακυκλωμένα πλαστικά υλικά έως το 2025.

#### 3.5.1. PPWD & WFD (Στόχος ανακύκλωσης συσκευασιών & αστικών αποβλήτων)

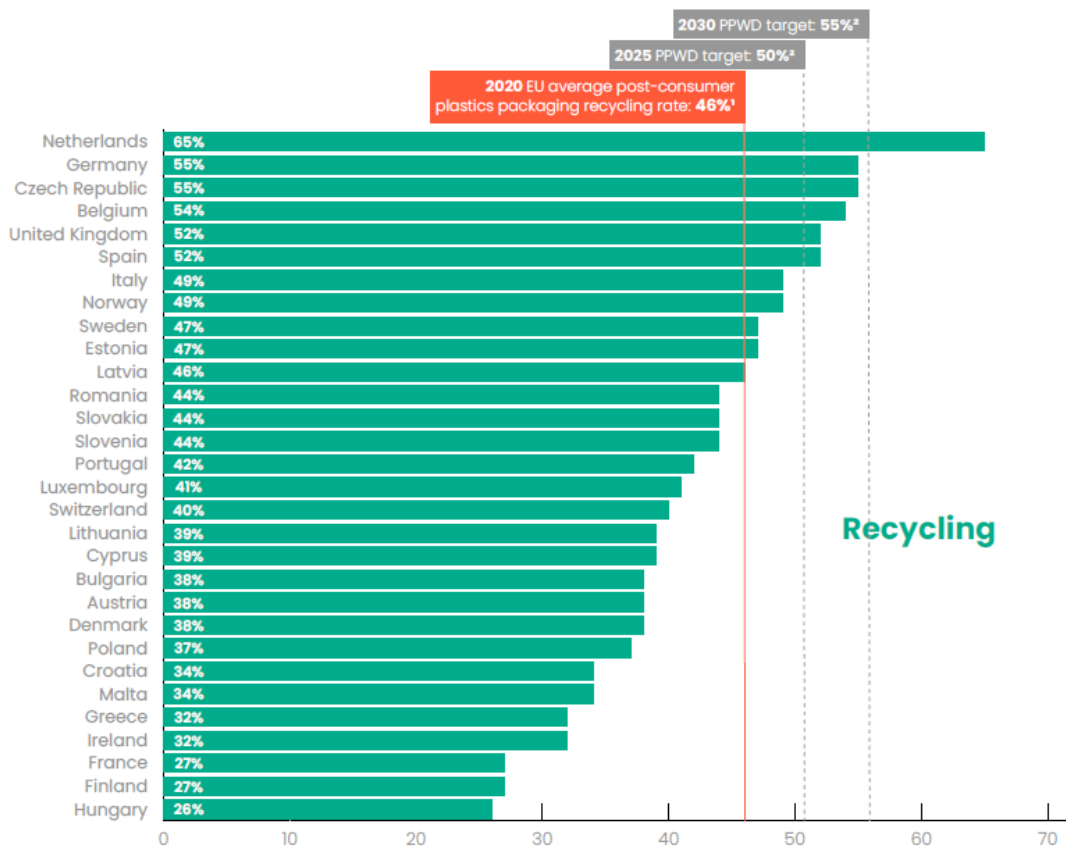
Στην Ευρώπη όσο αφορά τις συσκευασίες το 2020 συλλέχθηκαν 17.9 Mt πλαστικών αποβλήτων εκ των οποίων το 17% κατέληξε σε υγειονομική ταφή, το 37% σε ανάκτηση ενέργειας και το 46% σε ανακύκλωση (μια αύξηση του 4% σε σχέση με το 2018 όπου ήταν 42%) όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 24 παρακάτω [21].



Εικόνα 24: Όγκος και διαχείριση πλαστικών συσκευασιών ΕΕ 2020 [26].

Συγκεντρώνοντας τα στοιχεία της εκάστοτε χώρας της ΕΕ για το 2020 για την ανακύκλωση πλαστικών συσκευασιών η Plastic Europe [26] στην Εικόνα 25 παρουσιάζει την πρόοδο σχετικά με τον στόχο PPWD.

Το ποσοστό ανακύκλωσης 46% της ΕΕ θα ισοδυναμούσε δυνητικά με 32% σύμφωνα με τη νέα μεθοδολογία υπολογισμού της ανακύκλωσης των πλαστικών συσκευασιών όπως αυτή αποτυπώθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

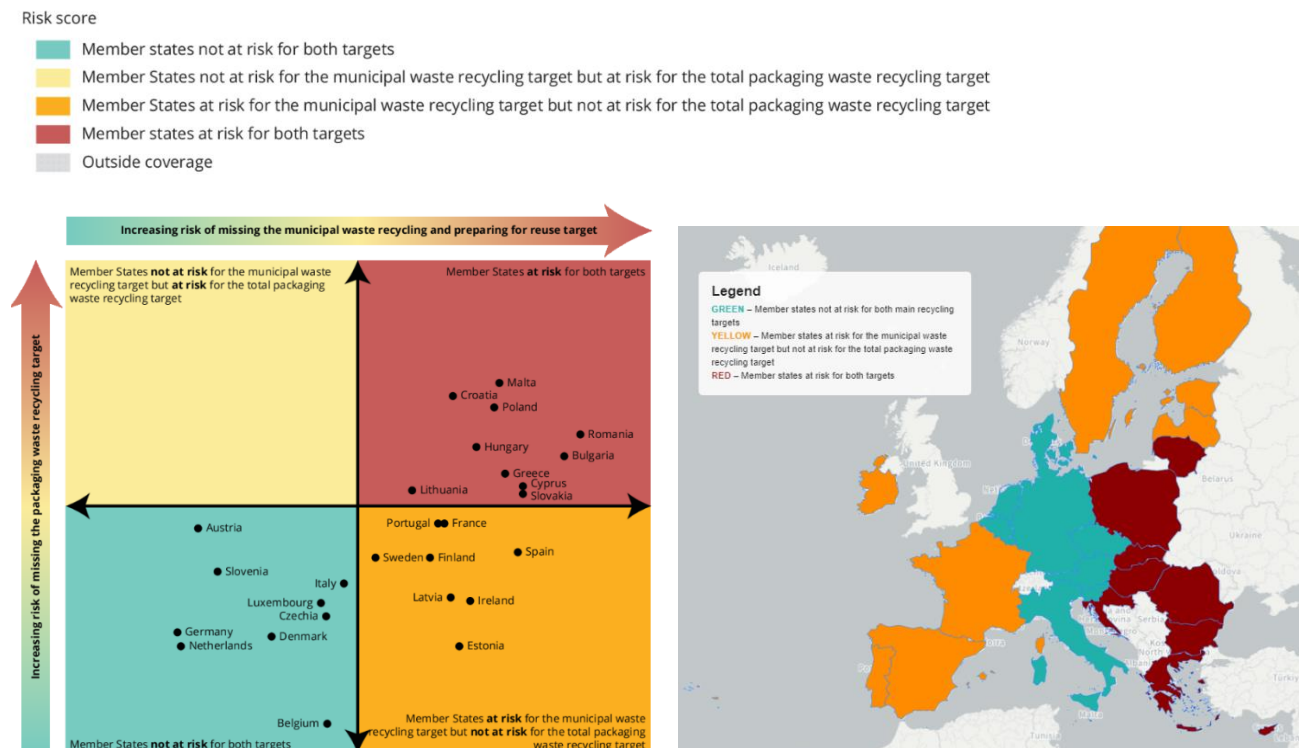


Εικόνα 25: Ανακύκλωση πλαστικών συσκευασιών ανά χώρα ΕΕ και στόχος οδηγίας PPWD [26].

Απο την ανάλυση της Εικόνας 25 προκύπτει ότι ο μέσος όρος ανακύκλωσης πλαστικών συσκευασιών εν έτη 2020 στην ΕΕ όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι 46%. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται ότι τον στόχο του 2025 για 50% ανακύκλωση πετυχαίνουν προς στιγμήν 6 χώρες της ΕΕ και ακόμα λιγότερες τον στόχο του 2030 για 55% ανακύκλωση με την Ολλανδία να είναι η μοναδική. Η Ελλάδα βάσει των στοιχείων βρίσκεται στις χαμηλότερες θέσεις ανακύκλωσης πλαστικών συσκευασιών με ποσοστό 32% πράγμα που δείχνει ότι βρίσκεται πολύ μακριά απο τον στόχο. Θυμίζεται ότι ο υπολογισμός είναι με την παλιά οδηγία.

Η Ευρωπαϊκή επιτροπή σε συνεργασία με την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος [18] έκδοσαν στις εκάστοτε ευρωπαϊκές χώρες έγκαιρες προειδοποιητικές αναφορές 3 χρόνια πριν απο την προβλεπόμενη επίτευξη των στόχων ανακύκλωσης για να προσδιορίσουν την προοπτική καθε κράτους στο να πετύχει τους στόχους αλλά και να αναγνωρίσει προβλήματα που θα σταθούν

εμπόδιο στην επίτευξη του, δίνοντας καθοδηγητικές δράσεις [18]. Η αξιολόγηση που εκδόθηκε στις χώρες το 2022 έδειξε ότι 10 μέλη της ΕΕ ενδέχεται να μην πετύχουν τον στόχο του 2025 για 55% ανακύκλωση αστικών αποβλήτων και τον στόχο για 65% ανακύκλωση για όλο το φάσμα αποβλήτων συσκευασίας. Επίσης αναφέρει ότι 8 μέλη ενδέχεται να πετύχουν τον στόχο για τα αστικά απόβλητα αλλά όχι τον στόχο για τις συσκευασίες [18]. Στην Εικόνα 26α,β παρακάτω αποτυπώνεται η χαρτογράφηση και η απεικόνιση των αναφορών για τις χώρες της ΕΕ.











Εικόνα 26α,β: Προοπτική επιτυχίας των στόχων για ανακύκλωση των αστικών αποβλήτων και των αποβλήτων συσκευασίας μελών της ΕΕ [18].

Απο την ανάλυση της Εικόνας 26α,β προκύπτει ότι η επίτευξη των στόχων σχετίζεται και κατά κάποιον τρόπο γεωγραφικά. Αυτό ενδέχεται να έχει να κάνει με θέμα κουλτούρας, οικονομικής κατάστασης της εκάστοτε χώρας. Οι χώρες που είναι σε κίνδυνο να μην επιτύχουν κανέναν από τους δύο στόχους βρίσκονται στην ανατολική Ευρώπη συμπεριλαμβανομένου και της Ελλάδας. Στον αντίποδα οι χώρες που είναι πιθανόν να επιτύχουν και τους δύο στόχους βρίσκονται στην κεντρική Ευρώπη και τέλος οι χώρες με κίνδυνο να μην πετύχουν τον στόχο περί ανακύκλωσης αστικών αποβλήτων αλλά με επιτυχία στο τομέα των συσκευασιών βρίσκονται στην δυτική και βόρεια Ευρώπη. Συνεχίζοντας την έρευνα βαθύτερα η Ευρωπαϊκή υπηρεσία περιβάλλοντος

προβάλλει με τον Πίνακα 3 παρακάτω την προοπτική επίτευξης των στόχων ανακύκλωσης του 2025 ανα υλικό συσκευασίας.

Πίνακας 3: Προοπτικές των κρατών μελών της ΕΕ για την επίτευξη των στόχων ανακύκλωσης αποβλήτων συσκευασίας ανά υλικό το 2025 [18].

	 Paper and cardboard	 Ferrous metals	 Aluminium	 Glass	 Plastic	 Wood	
Austria	✓	✓	✓	✓	✗	✓	Austria
Belgium	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Belgium
Bulgaria	✓	✓	✓	✗	✗	✓	Bulgaria
Croatia	✗	✗	✗	✗	✗	✗	Croatia
Cyprus	✓	✓	✗	✗	✗	✓	Cyprus
Czechia	✓	✓	✗	✓	✓	✓	Czechia
Denmark	✓	✗	✓	✓	✗	✓	Denmark
Estonia	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Estonia
Finland	✓	✓	✓	✓	✗	✓	Finland
France	✓	✓	✓	✓	✗	✓	France
Germany	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Germany
Greece	✓	✓	✗	✗	✗	✓	Greece
Hungary	✓	✓	✓	✗	✗	✓	Hungary
Ireland	✓	✓	✓	✓	✗	✓	Ireland
Italy	✓	✓	✓	✓	✗	✓	Italy
Latvia	✓	✓	✓	✓	✗	✓	Latvia
Lithuania	✓	✓	✓	✗	✓	✓	Lithuania
Luxembourg	✓	✓	✓	✓	✗	✓	Luxembourg
Malta	✗	✗	✗	✗	✗	✗	Malta
Netherlands	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Netherlands
Poland	✓	✓	✓	✗	✗	✓	Poland
Portugal	✓	✗	✗	✗	✗	✓	Portugal
Romania	✓	✗	✗	✗	✗	✓	Romania
Slovakia	✗	✓	✗	✓	✗	✓	Slovakia
Slovenia	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Slovenia
Spain	✗	✓	✗	✓	✗	✓	Spain
Sweden	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Sweden

 Member State not at risk of missing the target   
  Member State at risk of missing the target

Βάσει των αποτελεσμάτων του Πίνακα 3 παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των κρατών μελών δύναται να μην επιτύχει τον στόχο της συσκευασίας για το πλαστικό. Αντίθετα οι στόχοι για υλικά όπως το χαρτί και τα φερριτικά μέταλλα δύναται να επιτευχθούν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι υποδομές και η διαχείριση των συγκεκριμένων υλικών είναι εδραιωμένες σε καλό βαθμό. Βέβαια σημαντικό ρόλο παίζει ότι το ρεύμα αποβλήτων σε αυτά τα υλικά είναι ομογενοποιημένο, πράγμα που δεν συμβαίνει με το πλαστικό καθώς το ρεύμα κυρίως αποτελείται από ανάμικτα πλαστικά απόβλητα που είναι δύσκολο να διαχειριστούν λόγω υποδομών και τεχνολογιών. Η Ελλάδα μαζί με την δυσκολία επίτευξης του στόχου για το πλαστικό, υπάρχει και κίνδυνος να μην επιτύχει τους στόχους για το αλουμίνιο και το γυαλί. Αυτό όπως προαναφέρεται δείχνει έλλειψη υποδομών και διαχείρισης.

Ένας άλλος λόγος που ο στόχος των πλαστικών θεωρείται δύσκολος έγκειται στον πολύπλοκο σχεδιασμό της ανακύκλωσης τους που συχνά την εμποδίζει, συμβάλλοντας σε υψηλές απώλειες διαλογής κατά την επεξεργασία. Οι νέοι κανόνες υπολογισμού που θα λαμβάνουν υπόψη αυτές τις απώλειες αναμένεται να επηρεάσουν αρνητικά τα ποσοστά ανακύκλωσης των πλαστικών συσκευασιών. Η πρόοδος στο σχεδιασμό των συσκευασιών για ανακύκλωση θα είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη υψηλότερων ποσοστών ανακύκλωσης [18].

Συγκεκριμένα η έγκαιρη έκθεση της Ευρωπαϊκής υπηρεσίας περιβάλλοντος προς την Ελλάδα αναφέρει ότι η ανακύκλωση πλαστικών συσκευασιών στην Ελλάδα είναι 37.6% μη έχοντας λάβει υπόψη την καινούργια μέθοδο υπολογισμού της απόφασης 2019/1885 που υπολογίζεται ότι θα μειώσει το ποσοστό σε 29.7% δηλαδή 20.3 % απο τον στόχο του 2025 για 50 % ανακύκλωση. Καταλήγει ότι η προοπτική για να επιτύχει η Ελλάδα τον στόχο επι των πλαστικών είναι 24% επι του συνολικού βαθμού [33].

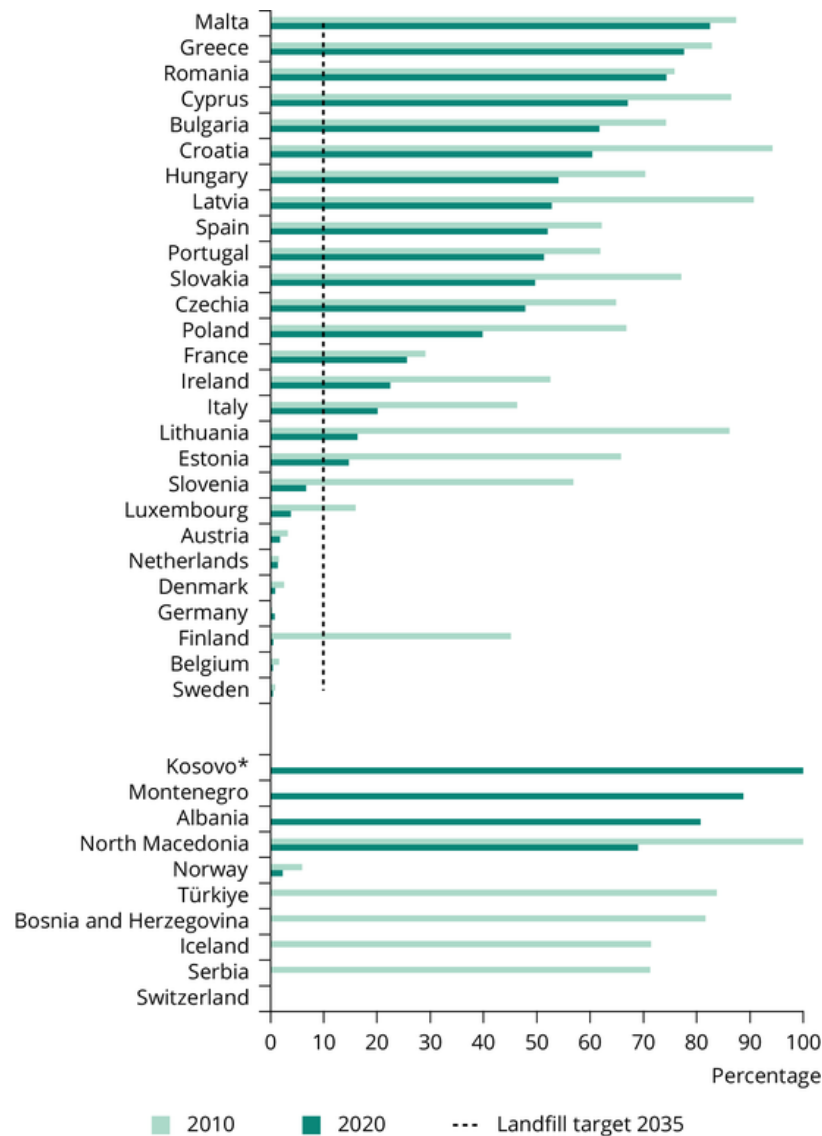
Επίσης η έκθεση της υπηρεσίας προς την Ελλάδα αναφέρει ότι βρίσκεται 34 % απο τον στόχο του 55% για την ανακύκλωση στερεών αποβλήτων έχοντας ποσοστό 21%. Λαμβάνοντας υπόψη την καινούργια μέθοδο υπολογισμού της απόφασης 2019/1885 ενδέχεται να μειωθεί το υπάρχων ποσοστό ανακύκλωσης 5%. Καταλήγει ότι η προοπτική για να επιτύχει η Ελλάδα τον στόχο είναι 25% επι του συνολικού βαθμού [33].

Στην προηγούμενη έκθεση έγκαιρης προειδοποίησης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (2018) η αξιοπιστία των στατιστικών στοιχείων για τα απόβλητα συσκευασίας αμφισβητήθηκε και συστήθηκε στην Ελλάδα να "επαναφέρει" τα αναφερόμενα στοιχεία για τις συσκευασίες έτσι ώστε να είναι συνεπείς και ακριβείς. Τα στοιχεία που παρείχε η Ελλάδα, όσον αφορά την ποσότητα και την σύνθεση των αστικών αποβλήτων, υποδηλώνουν ότι η ποσότητα των αποβλήτων συσκευασίας (όπως αντιπροσωπεύεται από συσκευασίες που διατίθενται στην αγορά) είναι πολύ χαμηλότερη από την ποσότητα που υποδηλώνουν τα στοιχεία για τα αστικά απόβλητα.

### 3.5.2. Landfill Target (Στόχος μείωσης ταφής απορριμάτων)

Σύμφωνα με έρευνα της Ευρωπαϊκής υπηρεσίας περιβάλλοντος [34] στην Εικόνα 27 απεικονίζεται ο στόχος και η πρόοδος για μείωση της υγειονομικής ταφής απορριμάτων των εκάστοτε χωρών της ΕΕ. Η ίδια υπηρεσία αναφέρει η Ελλάδα μαζί με άλλες χώρες κινδυνούν να μην επιτύχουν τον στόχο (υπευθυμίζεται ότι βάσει του ΕΣΔΑ 2020 η Ελλάδα τον στόχο αυτόν θέλει να το επιτύχει έως το 2030). Απο το διάγραμμα παρατηρείται ότι η Ελλάδα είναι απο πρώτες χώρες σε αποθήση

αστικών απορριμάτων προς ταφή και ότι σε 10 χρόνια η μείωση που έχει επιτευχθεί είναι ανεπαρκής. Αυτό θεωρείται αναμενόμενο καθώς στην Ελλάδα δεν λειτουργούν μονάδες ανάκτησης ενέργειας πλὴν ενός μικρού ποσοστού, υπάρχει έλλειψη διαχείρισης αποβλήτων και υποδομών και καταλήγουν όλα προς υγειονομική ταφή.



Εικόνα 27: Ποσοστά υγειονομικής ταφής αστικών αποβλήτων στην Ευρώπη ανά χώρα [34].

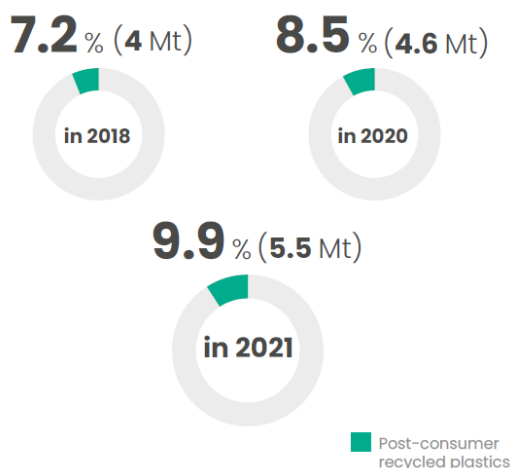
Συγκεκριμένα η έγκαιρη έκθεση [33] της Ευρωπαϊκής υπηρεσίας περιβάλλοντος προς την Ελλάδα αναφέρει ότι βρίσκεται 67.7% απο τον στόχο μη έχοντας λάβει υπόψιν την καινούργια μέθοδο υπολογισμού της απόφασης 2019/1885 που ενδέχεται να ανεβάσει το ποσοστό. Καταλήγει ότι η προοπτική για να επιτύχει η Ελλάδα τον στόχο είναι 0% επι του συνολικού βαθμού καταγράφοντας μείωση τα τελευταία 5 χρόνια μόνο 6.2%.

Για το ποσοστά επίτευξης υγειονομικής ταφής γίνεται λόγος καθώς η ανάγκη για διαχείριση προς επίτευξη των στόχων έχει αυξηθεί και λύσεις όπως η χημική ανακύκλωση μπορεί να είναι πιθανές.

### 3.5.3. Circular Party Alliance Target (Στόχος συμμαχίας CPA)

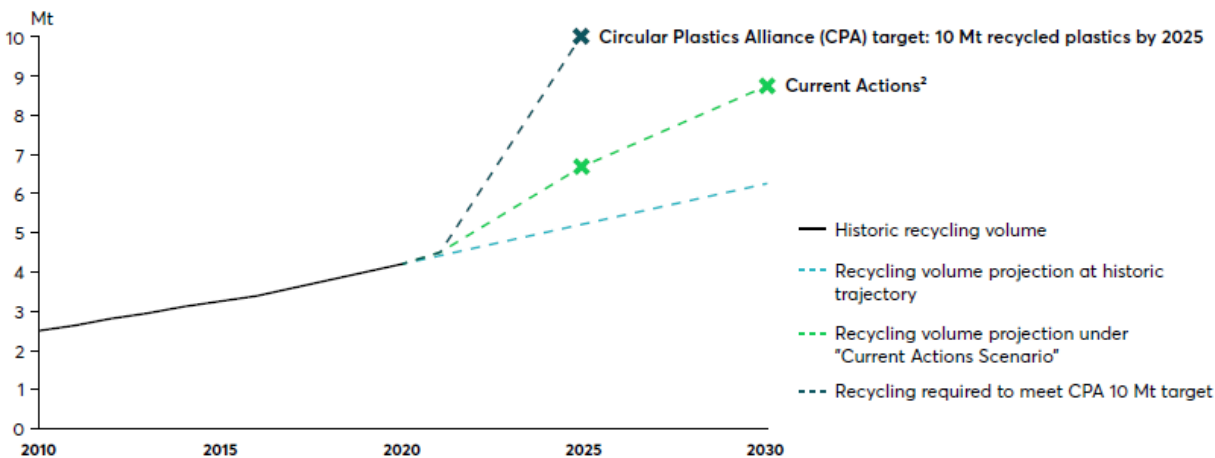
Ο στόχος για διάθεση 10 Mt ανακυκλωμένων πλαστικών προϊόντων κάθε χρόνο έως το 2025 αποτελεί όπως αποδεικνύεται έναν δύσκολο δρόμο. Στο σχέδιο εργασιών σχεδιασμού που δημοσιεύθηκε τον Νοέμβριο του 2020, η CPA εκτίμησε ότι για να φτάσει τον στόχο με την προϋπόθεση απόδοσης 70%, θα πρέπει να γίνει διαλογή τουλάχιστον 15 Mt ανακυκλώσιμων πλαστικών απορριμμάτων κάθε χρόνο στην Ευρώπη [16].

Σύμφωνα με την Plastics Europe [26] όπως φαίνεται στην Εικόνα 28 τα ανακυκλωμένα πλαστικά το 2021 άγγιξαν τους 5.5 Mt και κατείχαν ένα μερίδιο του 9.9% επι του συνόλου με μια σταδιακή αύξηση απο το 2018 που ήταν ~ 4Mt.



Εικόνα 28: Ποσοστό και όγκος ανακυκλωμένων πλαστικών ΕΕ 2018-2021 [26].

Απο την πλευρά της η Systemiq [32] με την έκθεση της προβλέπει οτι με την υπάρχοντα πολιτική δεν θα επιτευχθεί ο στόχος μέχρι το 2025. Στην Εικόνα 29 απεικονίζεται γραφικά το κενό που πρέπει να καλυφθεί για να επιτευχθεί ο στόχος των 10 Mt το 2025. Παρατηρείται βάσει του γραφήματος ότι το κενό αυτό είναι περίπου 3 Mt. Δεδομένου του δύσκολου περιβάλλοντος για τη μηχανική ανακύκλωση σήμερα, η επίτευξη αυτών των στόχων απαιτεί οριζόντια συνεργασία μεταξύ των φορέων της αλυσίδας αξίας για υποστηρικτική πολιτική και δράσεις από τις μάρκες και τους λιανοπωλητές για την αγορά ανακυκλωμένων πλαστικό.



Εικόνα 29: Ιστορική και μελλοντική πρόβλεψη των ανακυκλωμένων πλαστικών, σύμφωνα με την ιστορική πορεία, για την επίτευξη των σημερινών στόχων καθώς και του CPA [32].

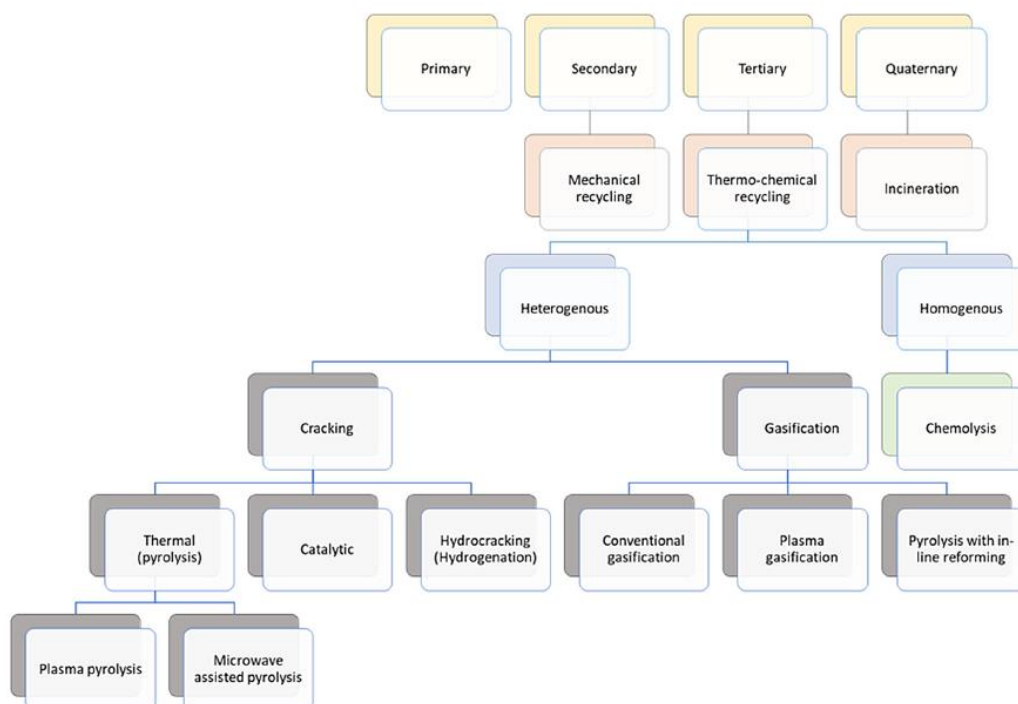
### 3.6. Σύνοψη

Συνοψίζοντας απο το παραπάνω κεφάλαιο επιβεβαιώθηκε η γενική αύξηση παραγωγής πλαστικών και αποβλήτων αντίστοιχα με τον τον τομέα της συσκευασίας να είναι ο μεγαλύτερος πρωταγωνιστής. Στο τομέα της συσκευασίας είδαμε ότι πολυμερή όπως οι πολυολεφίνες απαρτίζουν το μεγαλύτερο ποσοστό. Όσο αφορά τα ελληνικά δεδομένα περί αποβλήτων και πλαστικών αμφισβητείται η εγγυρότητα τους πράγμα που ενδεχομένως οφείλεται στο τρόπο καταγραφής των παραπάνω. Επίσης σημαντικό σημείο του κεφαλαίου είναι η ανάλυση περι στόχων ανακύκλωσης και διαχείρισης των πλαστικών καθώς και των αστικών αποβλήτων. Η ΕΕ έχει ανεβάσει τον πήχη στους στόχους ανακύκλωσης πολύ ψηλά και μερικές χώρες δυσκολεύονται να τους πιάσουν μαζί και η Ελλάδα. Η επίτευξη των στόχων θα δυσκολέψει ακόμα περισσότερο με τον νέο κανονισμό προσμέτρησης των ανακυκλωμένων υλικών. Ήδη απο υπολογισμούς παρατηρούνται τα τωρινά ποσοστά ανακύκλωσης να μειώνονται. Η Ελλάδα σε βαθύτερη ανάλυση βάσει της έκθεσης έγκαιρης προειδοποίησης της ΕΕ θα δυσκολευτεί να πιάσει όλους τους στόχους ανακύκλωσης και διαχείρισης με τον στόχο για μείωση υγειονομικής ταφής απορριμάτων να φαίνεται ακατόρθωτος. Γενικά παρατηρείται ότι η φιλοδοξία των στόχων και η εξέλιξη τους δεν συνάβει χρονολογικά με τα τωρινά δεδομένα ώστε να επιτευχθούν στον προβλεπόμενο χρόνο.



## 4. Τεχνολογίες Χημικής Ανακύκλωσης

Όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο αλλαγές στην χημική δομή του πλαστικού είναι ένα σημαντικό κριτήριο για να ξεχωρίσει η τεχνολογία της χημικής ανακύκλωσης από άλλες μεθόδους. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το πολυμερές σπάει σε μονομερή χρησιμοποιώντας την βοήθεια θερμότητας ή χημικών αναλόγων την τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Τεχνολογίες που χρησιμοποιούν θερμότητα είναι η θερμική πυρόλυση με ή χωρίς την βοήθεια καταλύτη, η αεριοποίηση κλπ. καθώς και τεχνολογίες που χρησιμοποιούν χημικά (διαλύτες με την βοήθεια καταλύτη ή όχι) είναι η χημειόλυση ή αποπολυμερισμός. Σε κάποιες βιβλιογραφίες αναφέρουν και την ανακύκλωση με διαλύτες ως μεθοδο χημικής ανακύκλωσης πράγμα που αντιτίθεται με τον ορισμό καθώς η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν σπάει το πολυμερές σε μονομέρη παρά μόνο το καθαρίζει και το διαχωρίζει από τα απόβλητα/ακαθαρσίες και τα επιπρόσθετα του [12],[21]. Παρακάτω στην Εικόνα 30 θα αναλυθούν οι τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης και χωρίζοντας τις σε εμπορικές και περαματικές μεθόδους όπως αξιολογήθηκαν από τους Solis & Silveira (2020) [35] μέσω ενός δείκτη ωριμότητας TRL (Technology Readiness Level). Τεχνολογίες με TRL 8-9 δείχνουν μεγάλη ωριμότητα και εμπορική εφαρμοσιμότητα, TRL 4-7 μικρή εταιρεία με τεχνολογία υπό ανάπτυξη και τέλος με TRL 1-5 πειραματικό στάδιο τεχνολογίας σε πανεπιστημιακό/ερευνητικό επίπεδο.



Εικόνα 30: Διαδρομές ανακύκλωσης στερεών πλαστικών αποβλήτων [35].

## 4.1. Εμπορικές τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης

### 4.1.1. Conventional & Catalytic Pyrolysis (Συμβατική και καταλυτική πυρόλυση)

Η διαδικασία της πυρόλυσης η αλλιώς cracking χρησιμοποιεί θερμότητα σε ένα εύρος θερμοκρασιών 300-650°C σε ένα περιβάλλον απουσίας οξυγόνου για να διασπάσει τα πολυμερή σε ένα μείγμα ελαφριών υδρογοναθράκων και μονομερών. Οι παράμετροι λειτουργίας όπως θερμοκρασία, πίεση και χρόνος αναμονής επηρεάζουν το τελικό προϊόν, με σημαντικότερη την θερμοκρασία καθώς ελέγχει την αντίδραση της διάσπασης [1]. Η διάσπαση γίνεται μέσω δονήσεων στις πολυμερικές αλυσίδες απο την θερμοκρασία όπου αρχικά τα μικρά μόρια εξατμίζονται έχοντας ξεπεράσει τις δυνάμεις Van der Waals που τα συγκρατούν και έπειτα όταν οι δυνάμεις ξεπεράσουν αυτές της συνοχής των ανθράκων στην πολυμερική αλυσίδα θα υποστούν διάσπαση οδηγώντας σε ρίζες [36]. Θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 500°C θα αποδώσουν περισσότερα αέρια ή προϊόντα άνθρακα (char) ενώ θερμοκρασίες της τάξης των 300-500°C θα αποδώσουν περισσότερο υγρό προϊόν. Η πυρόλυση μπορεί να έχει ως πρώτη ύλη ανάμικτα πολυολεφινικά απόβλητα συμπεριλαμβανομένου και πλαστικά πολλαπλών στρωμάτων με υψηλότερο βαθμό ακαθαρσιών απο την μηχανική ανακύκλωση με όλους βέβαια τους περιορισμούς σε πρώτες ύλες που εμπεριέχει.

Σε περίπτωση που το παραγόμενο υγρό πυρόλυσης είναι υψηλής ποιότητας μπορεί να διοχετευθεί σε έναν steam cracker σε μια εγκατάσταση παραγωγής πολυμερών όπου θα διασπαστεί σε μονομερή όπως αιθυλένιο και προπυλένιο όπου στην συνέχεια να προχωρήσουν σε παραγωγή πολυαιθυλενίου και πολυπροπυλενίου. Αν δεν πληρεί τις προδιαγραφές το παραγόμενο υγρό προϊόν υπάγεται σε περαιτέρω επεξεργασία για να φτάσει το επιθυμητό αποτέλεσμα.

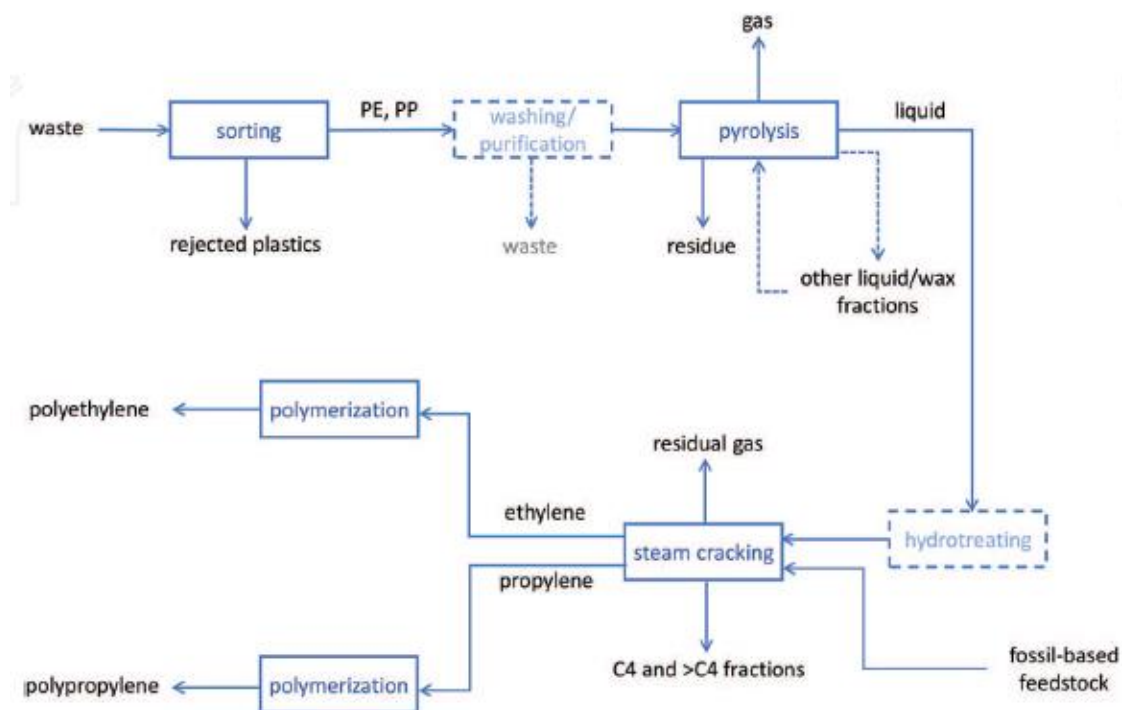
Σε σύγκριση με τη μηχανική ανακύκλωση, όπως προαναφέρθηκε η πυρόλυση έχει μεγαλύτερες δυνατότητες για την αξιοποίηση αποβλήτων από μικτά ρεύματα και για εφαρμογές με επαφή τροφίμων. Μια πρόκληση που συνδέεται με την εφαρμογή της πυρόλυσης αφορά τη σταθερή ροή σταθερής ποιότητας πρώτων υλών σε μεγάλες ποσότητες που απαιτούνται για να την καταστήσουν οικονομικά βιώσιμη καθώς και τις πολύπλοκες διαδικασίες καθαρισμού και διαχωρισμού. Η επεξεργασία των παραπροϊόντων που παράγονται κατά τη διάρκεια της διεργασίας μπορεί επίσης να είναι δύσκολη και δαπανηρή [1].

Η καταλυτική πυρόλυση είναι παρόμοια με την συμβατική πυρόλυση μόνο που χρησιμοποιεί καταλύτες π.χ. ζεόλιθους και αλούμινα για να μειώσει την θερμότητα της αντίδρασης και να

αύξηση την ταχύτητα της. Σε σχέση με την συμβατική πυρόλυση παράγει υψηλότερα ποσοστά «πετρελαίου» υγρού προϊόντος με τον σωστό καταλύτη. Ωστόσο η καταλυτική πυρόλυση είναι ευαίσθητη σε επιμόλυνση από τα πλαστικά απόβλητα λόγω παρουσίας συστατικών χλωρίου και αζώτου που μπορούν να απενεργοποιήσουν τον καταλύτη. Επίσης ο καταλύτης είναι επιρρεπής σε βουλώματα του πορώδους του λόγω παρουσία ανόργανων συμπεριλαμβανομένων ενώσεων στα πλαστικά απόβλητα [8]. Συνεπώς απαιτείται προεπεξεργασία για την προστασία του καταλύτη. Η καταλυτική πυρόλυση είναι περιορισμένη σε καθαρά πολυμερή όπως πολυολεφίνες και πολυστυρένιο [8].

Σύμφωνα με έκθεση από τους Solis & Silveira (2020) [35] σχετικά με την ωριμότητα της τεχνολογίας η καταλυτική και η συμβατική πυρόλυση βαθμολογείται με TRL 9 που θεωρείται ώριμη και εμπορική.

Στην Εικόνα 31 απεικονίζεται σχηματικά πιθανή διαδρομή παραγωγής PP και PE από πλαστικά απόβλητα των ίδιων υλικών.



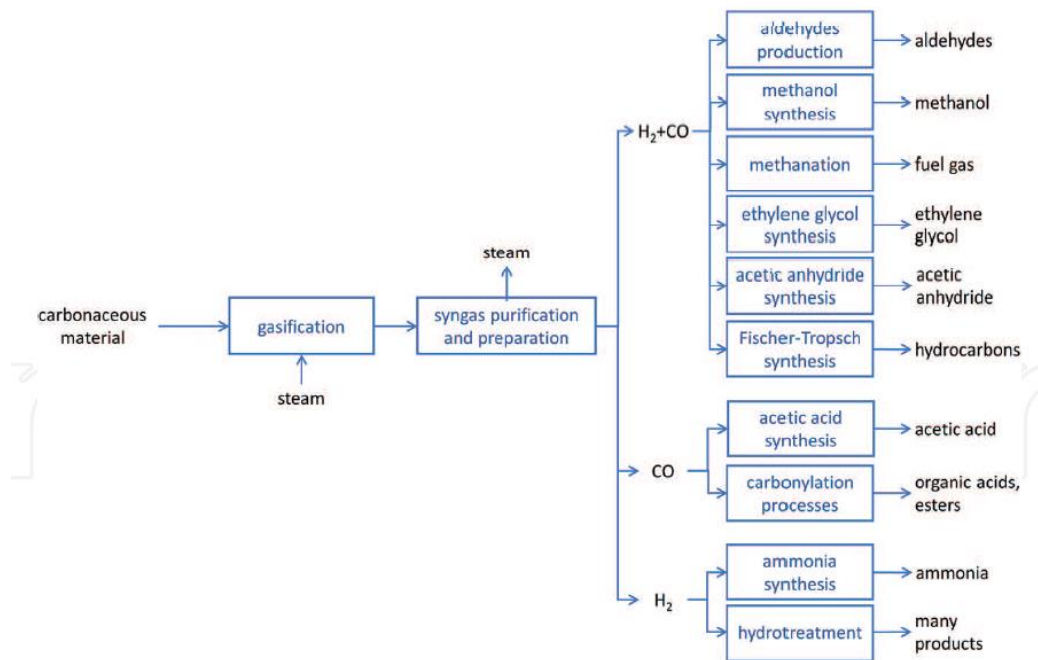
Εικόνα 31: Σχηματική αναπαράσταση πιθανής διαδρομής παραγωγής πολυαιθυλενίου και πολυπροπυλενίου από πλαστικά απόβλητα [36].

Σύμφωνα με έρευνα [37] απο το CE Delft για λογαριασμό του υπουργείου περιβάλλοντος της Ολλανδίας (βλεπε Παράρτημα I) υπολόγισαν το plastic to plastic yield για κάθε εμπορική μέθοδο με πραγματικά στοιχεία απο την βιομηχανία χρησιμοποιώντας την μέθοδο ισοζυγίου μάζας (βλέπε Παράρτημα II). Για την μέθοδο τη πυρόλυσης η απόδοση υπολογίστηκε στο 49% με πρώτη ύλη κυρίως ανάμικτες πολυολεφίνες [37].

Η BASF αναφέρει ότι γενικά 2 τόνοι πλαστικών αποβλήτων χρειάζονται για παράγει 1 τόνο πλαστικού. Πιο συγκεκριμένα αναφέρει ποσοστό απόδοσης 50% για πρώτη ύλη MK 352 με σκοπό την παραγωγή HDPE [38].

#### 4.1.2. Gasification (Αεριοποίηση)

Η τεχνολογία της αεριοποίησης περιλαμβάνει μερική οξείδωση των πλαστικών αποβλήτων σε θερμοκρασία (500-1300°C) υπο την παρουσία ενός οξειδωτικού παράγοντα π.χ. ένα μείγμα ατμού και καθαρού οξυγόνου ή απλά αέρας. Η διαδικασία αυτή σπάει τα πολυμερή και παράγεται ένα μείγμα υδραγοναθράκων και syngas το οποίο εμπεριέχει κυρίως υδρογόνο, μονοξείδιο και διοξείδιο του άνθρακα. Ανάλογα τον οξειδωτικό παράγοντα (αέρας, ατμός ή συνδυασμός) αλλάζει και η σύσταση του syngas. Το syngas μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ενέργειας, την παραγωγή χημικών καθώς και πολυμερών μέσω ενδιάμεσων σταδίων δημιουργίας μεθανόλης ή ελαφριών υδρογοναθράκων. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών η αεριοποίηση έχει μεγάλη ευελίξια σε πρώτες ύλες και θεωρητικά κάθε πλαστικό μπορεί να είναι πρώτη ύλη για αυτήν. Αυτό είναι καλο πλεονέκτημα καθώς η τεχνολογία στοχεύει σε επεξεργασία ανάμικτων πλαστικών ρεμάτων αποβλήτων και σε σχεδόν οποιαδήποτε πηγή άνθρακα π.χ. απόβλητα τροφίμων. Οι τεχνολογίες αεριοποίησης χρησιμοποιούνται ευρέως στην παραγωγή καυσίμων και όχι τόσο στην παραγωγή πλαστικών ακόμα. Λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας σε πίσσα στο αέριο που παράγεται από πλαστικά απόβλητα, η απόδοση της διεργασίας μειώνεται και το προϊόν χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία πριν από τη χρήση. Επιπλέον, η διεργασία είναι ενεργοβόρα συνεπώς απαιτεί μεγάλες ποσότητες πρώτης ύλης για να είναι οικονομικά βιώσιμη [1][8].



Εικόνα 32: Επισκόπηση πιθανών εφαρμογών syngas [36].

Η έκθεση από τους Solis & Silveira (2020) [35] σχετικά με την ωριμότητα της τεχνολογίας βαθμολογεί την αεριοποίηση με TRL 9 όπου θεωρείται ώριμη και εμπορική. Στο διάγραμμα ροής της Εικόνας 32 απεικονίζονται πιθανές εφαρμογές του syngas.

Σύμφωνα με την έρευνα [37] από το CE Delft (βλέπε Παράρτημα Ι) η απόδοση plastic to plastic για την αεριοποίηση με πρώτη ύλη ανάμικτα πλαστικά απόβλητα υπολογίστηκε στο 34%.

#### 4.1.3. Depolymerization (Αποπολυμερισμός)

Η διαδικασία του αποπολυμερισμού όπως αναφέρθηκε «σπάει» το πολυμερές σε μονομερή με την βοήθεια χημικών. Έπειτα τα μονομερή ανακτώνται από το μείγμα της αντίδρασης και διαχωρίζονται από ανεπιθύμητες προσμίξεις. Τα μονομερή εν συνεχεία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή νέων πολυμερών ή χρησιμοποιούνται μαζί με «παρθένα» μονομερή για την παραγωγή νέων πολυμερών [1].

Επομένως ο αποπολυμερισμός μπορεί να αντιμετωπίσει το ζήτημα υψηλών απαιτήσεων σε καθαρότητα υλικών όπως π.χ. στην τομέα των τροφίμων (συσκευασίες). Η τεχνολογία αυτή δέχεται σαν πρώτη ύλη πολυμερή πολυσυμπήκνωσης όπως PET, PA, PU κ.α. επειδή έχουν χαμηλή θερμότητα αποπολυμερισμού καθώς και ομογενοποιημένα ρεύματα αποβλήτων [8]. Υπάρχουν διαφορετικές τεχνικές αποπολυμερισμού αναλόγως τον χημικό παράγοντα που χρησιμοποιείται

για την διάσπαση των πολυμερικών αλυσίδων. Μερικές απο αυτές είναι η γλυκόλυση, η μεθανόλυση, η υδρόλυση, η αλκοόλυση και η αμινόλυση [8].

Ακόμη αναφέρεται ότι τα ανακυκλωμένα υλικά είναι πιο ακριβά από τα αντίστοιχα παρθένα- ως εκ τούτου, για να καταστεί η διαδικασία οικονομικά βιώσιμη, απαιτείται τεράστια ποσότητα εισροών αποβλήτων [8]. Ωστόσο στην έκθεση απο τους Solis & Silveira (2020) [35] σχετικά με την ωριμότητα της τεχνολογίας ο αποπολυμερισμός βαθμολογείται με TRL 9 που θεωρείται ώριμη και εμπορική. Παγκοσμίως λειτουργούν πολλά πιλοτικά εργοστάσια εστιασμένα στον αποπολυμερισμό του PET [21]. Η γλυκόλυση χρησιμοποιείται εμπορικά απο την Du Pont/DOW, Goodyear κ.α., η υδρόλυση εμπορικά και πιλοτικά απο την Carbios, Gr3n κ.α., η μεθανόλυση αντίστοιχα απο την Loop industries [8].

Σύμφωνα με την ερευνα [37] απο το CE Delft (βλέπε Παράρτημα I) η απόδοση plastic to plastic με πρώτη ύλη το PET υπολογίστηκε στο 97%.

## 4.2. Υπο ανάπτυξη τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης

### 4.2.1. Plasma Pyrolysis (Πυρόλυση πλάσματος)

Η πυρόλυση με πλάσμα ενσωματώνει τις θερμοχημικές ιδιότητες του πλάσματος στη συμβατική πυρόλυση για την πλήρη διάσπαση των μονομερών των πλαστικών αποβλήτων για την παραγωγή syngas, το οποίο αποτελείται κυρίως από CO, H<sub>2</sub> και μικρές ποσότητες ανώτερων υδρογονανθράκων. Η διαδικασία διαρκεί 0,01-0,5 sec και λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 1730 και 9730°C [35]. Ένα πλεονέκτημα επι της συμβατικής πυρόλυσης είναι ότι υπάρχει υψηλή παραγωγή αερίου και χαμηλό ποσοστό πίσσας λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που την διασπά. Επιπλέον λόγω των θερμοκρασιών η πυρόλυση πλάσματος μπορεί να αποσυνθέσει τοξικά συστατικά που υπάρχουν στα απόβλητα μειώνοντας την δημιουργία χλωρίου απο HCl. Η τεχνολογία εκλύει χαμηλούς ρύπους αλλά είναι πολυ ενεργοβόρα. Ως εκ τούτου χρησιμοποιείται προς στιγμήν για την καταστροφή τοξικών αποβλήτων καθώς και σε ερευνητικό επίπεδο για την ανακύκλωση πλαστικών αποβλήτων [8]. Η αξιολόγηση απο τους Solis & Silveira, 2020 σχετικά με το TRL είναι 4 [35].

#### 4.2.2. Microwave-assisted pyrolysis (Πυρόλυση υποβοηθούμενη με μικροκύματα)

Η πυρόλυση πλαστικών αποβλήτων με τη βοήθεια μικροκυμάτων περιλαμβάνει ανάμιξη πλαστικών με ένα διηλεκτρικό υλικό ή απορροφητικών ουσιών όπως ενεργός άνθρακας, διοξείδιο του πυριτίου ή γραφένιο στα πλαστικά απόβλητα υψηλής απορρόφησης μικροκυμάτων. Η θερμότητα που απορροφάται από τα μικροκύματα μεταφέρεται στα πλαστικά με αγωγιμότητα. Οι πηγές μικροκυματικής ακτινοβολίας επιτρέπουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες και ρυθμούς θέρμανσης και επιτυγχάνουν υψηλή μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα και της μεταφοράς θερμότητας στο φορτίο [8].

Η διαδικασία έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με μια συμβατική διαδικασία. Η πυρόλυση με τη βοήθεια μικροκυμάτων μπορεί να αντιμετωπίσει δύο σημαντικά μειονεκτήματα της συμβατικής πυρόλυσης - τις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και τους αργούς χρόνους αντίδρασης. Επιτυγχάνει ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας, προσφέρει μεγαλύτερο έλεγχο της διαδικασίας, υψηλότερους ρυθμούς θέρμανσης και μεγαλύτερη ταχύτητα παραγωγής [35].

Η τεχνολογία χαρακτηρίζεται επίσης από την επιλεκτική θέρμανση του υλικού. Το μέγεθος της θέρμανσης εξαρτάται από τη διηλεκτρική αντοχή του υλικού. Γενικά, τα πλαστικά έχουν φτωχή διηλεκτρική αντοχή και, όταν αναμιγνύονται με διηλεκτρικό απορροφητικό, η απόδοση της θέρμανσης μπορεί να διαφέρει για διαφορετικά υλικά. Μεγάλες διακυμάνσεις στη σύνθεση των πλαστικών αποβλήτων θα μπορούσαν να αποτελέσουν πρόκληση.

Δεδομένου ότι η απόδοση θέρμανσης ποικίλλει για διαφορετικά απορροφητικά μέσα, μπορεί να είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά τα διηλεκτρικά απορροφητικά σε βιομηχανική κλίμακα [8]. Ως αποτέλεσμα, η εν λόγω τεχνολογία έχει αναπτυχθεί μόνο σε εργαστηριακές και πιλοτικές κλίμακες. και η απουσία ισχυρής μεθοδολογίας για την κλιμάκωση της διαδικασίας εμποδίζει τις δυνατότητες εφαρμογής της. Ως εκ τούτου, οι Solis και Silveira (2020) απέδωσαν στην τεχνολογία αυτή TRL 4 [35].

#### 4.2.3. Pyrolysis with in line reforming (Πυρόλυση με αναμόρφωση εν σειρά)

Η πυρόλυση με αναμόρφωση in-line αναπτύχθηκε για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής υδρογόνου χωρίς πίσσα από πλαστικά απόβλητα, η οποία συνήθως φτάνει πάνω από 30% [35]. Η διαδικασία περιλαμβάνει την πυρόλυση των πλαστικών αποβλήτων στον πρώτο αντιδραστήρα και την αναμόρφωση του προϊόντος της πυρόλυσης στον επόμενο. Στα πλεονεκτήματα της διεργασίας περιλαμβάνονται οι χαμηλότερες θερμοκρασίες (500-900°C) σε σύγκριση με την αεριοποίηση,

γεγονός που μειώνει το κόστος παραγωγής και η απουσία επαφής μεταξύ των ακαθαρσιών των πλαστικών αποβλήτων και του καταλύτη, γεγονός που ελαχιστοποιεί το κόστος των καταλυτών που απαιτούνται για το στάδιο της αναμόρφωσης και την απενεργοποίηση τους. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η απουσία εφαρμογής σε βιομηχανική κλίμακα, καθώς υπάρχουν μόνο πιλοτικές λειτουργίες [8]. Ως εκ τούτου, η εν λόγω τεχνολογία έχει λάβει TRL 4 από τους Solis και Silveira (2020), γεγονός που υποδηλώνει ότι η τεχνολογία βρίσκεται στο στάδιο της ανάπτυξης [35].

#### 4.2.4. Hydrocracking (Υδρογονοδιάσπαση)

Η υδρογονοπυρόλυση επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης υδρογόνου στη διαδικασία πυρόλυσης. Πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 350 και 500°C, ενώ το υδρογόνο παρέχεται σε υψηλή πίεση (70atm). Η διεργασία μειώνει τα αρωματικά, τις ολεφίνες και τον σχηματισμό κωκ, ενώ η προσθήκη υδρογόνου έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση ετεροατόμων, όπως βρώμιο, χλώριο και φθόριο, τα οποία μπορεί να υπάρχουν στα πλαστικά απόβλητα, με αποτέλεσμα την παραγωγή υψηλότερης ποιότητας προϊόντων. Επιπλέον, η υδρογονοπυρόλυση παρέχει υψηλού κορεσμού υγρά προϊόντα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα ως καύσιμο μεταφοράς ή για την παραγωγή ενέργειας χωρίς περαιτέρω αναβάθμιση [8]. Επιπλέον, η διεργασία μπορεί να χειριστεί μείγμα πλαστικών αποβλήτων [7]. Σε αυτή τη διαδικασία, τα πλαστικά απόβλητα εκτίθενται πρώτα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και υγροποιούνται, με αποτέλεσμα να απελευθερώνονται από μη αποστάξιμες ουσίες. Στη συνέχεια, το υγρό αναμιγνύεται με τον καταλύτη που μειώνει τη θερμοκρασία της διεργασίας και βελτιώνει την ποιότητα και την απόδοση του παραγόμενου «πετρελαίου». Ωστόσο, οι κύριες προκλήσεις για αυτή την τεχνολογία είναι το υψηλό κόστος του υδρογόνου και οι υψηλές δαπάνες επένδυσης μαζί με τα λειτουργικά έξοδα, τα οποία περιορίζουν την κλιμάκωση σε βιομηχανική λειτουργία. Τέλος, η υδρογονοπυρόλυση ορισμένων τύπων πλαστικού (π.χ. PVC) μπορεί επίσης να αποδώσει επικίνδυνες ουσίες που θα απαιτούσαν πρόσθετο κόστος διαχείρισης [8]. Οι Solis και Silveira (2020) [35] απέδωσαν στην τεχνολογία αυτή TRL 7 λόγω πρωτότυπου της χημικής τεχνολογίας για τα απόβλητα.



#### 4.2.5. Plasma gasification (Αεριοποίηση πλάσματος)

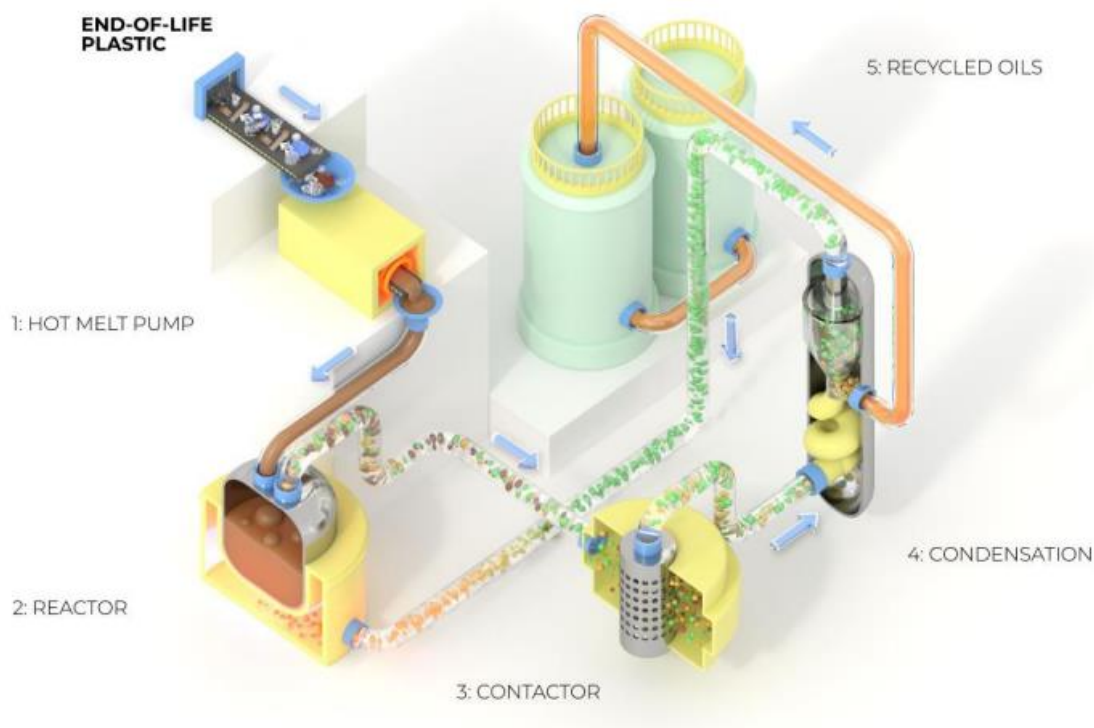
Η αεριοποίηση με πλάσμα είναι μια αλλοθερμική διεργασία όπου η θερμότητα παράγεται από θερμικό πλάσμα, το οποίο συνήθως παράγεται από πυρσούς πλάσματος συνεχούς ρεύματος μη μεταφερόμενου τόξου. Το πλάσμα, ένα ηλεκτρικά αγώγιμο μέσο (ιονισμένο αέριο), παράγεται μέσω πυρσών πλάσματος με τη θέρμανση αερίου (συνήθως αέρα) σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, μέχρι περίπου 3900 °C. Οι θερμοκρασίες της διεργασίας μπορεί να φτάσουν τους 14.000°C. Οι παράμετροι λειτουργίας όπως η θερμοκρασία αντίδρασης, ο χρόνος παραμονής που κυμαίνεται μεταξύ λιγότερο από 30 min έως 3 h, και οι ρυθμοί ροής του οξειδωτικού του αερίου πλάσματος επηρεάζουν τη διαδικασία αεριοποίησης με πλάσμα. Η διεργασία μπορεί να διαχειριστεί όλους τους τύπους πλαστικών αποβλήτων, έχει μεγάλη ανοχή σε χαμηλής ποιότητας πρώτη ύλη και οδηγεί σε υψηλής καθαρότητας αέριο syngas σύνθεσης με χαμηλή περιεκτικότητα σε πίσσα [35]. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις για τη μεταφορά αυτής της τεχνολογίας σε βιομηχανική κλίμακα, όπως οι υψηλές επενδύσεις και το λειτουργικό κόστος και η υψηλή ενεργειακή απαίτηση [8]. Μια μονάδα αεριοποίησης πλάσματος με περίπου 1200-2500 MJ/τόνο αποβλήτων, η απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας θα ήταν 5-10% της ενέργειας των αποβλήτων και 15-20% της ακαθάριστης ισχύος παραγωγής [35]. Αν και η αεριοποίηση πλάσματος έχει εφαρμοστεί εμπορικά και οι Solis και Silveira (2020)[35] απέδωσαν στην τεχνολογία αυτή TRL 8, έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως για την καταστροφή διαφόρων επικίνδυνων αποβλήτων και όχι για την ανακύκλωση πλαστικών. Ως εκ τούτου, θεωρούμε την αεριοποίηση πλάσματος ως μια αναδυόμενη τεχνολογία για την ανακύκλωση πλαστικών αποβλήτων [8].

### 4.3. Εμπορικές μονάδες χημικής ανακύκλωσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν παραδείγματα εμπορικών μονάδων χημικής ανακύκλωσης ανα τεχνολογία κυρίως στην Ευρώπη.

#### Πυρόλυση

Ένα παράδειγμα είναι η εταιρεία Plastic Energy η οποία διαθέτει δυο εργοστάσια στην Σεβίλλη και την Αλμερία δυναμικότητας 5500 τόνων παραγόμενου «πετρελαίου πυρόλυσης» ετησίως το καθένα (feedstock~7000 t/waste yearly each) [12]. Η εταιρεία χρησιμοποιεί θερμή αναεροβική μετατροπή που περιλαμβάνει τήξη, αεριοποίηση, συμπύκνωση και διύλιση όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 33. Σαν ρεύμα αποβλήτων δέχεται όλα τα πλαστικά απόβλητα με έμφαση κυρίως στις πολυολεφίνες. Η εταιρεία αναφέρει ποσοστό απόδοσης σε παραγόμενο TACOIL 72-75% όπου πωλείται στην πετροχημική βιομηχανία, 18% syngas που χρησιμοποιείται για την ιδιοκατανάλωση ενέργειας του εργοστασίου και 8-10% κωκ που πωλείται στις βιομηχανίες τσιμέντου [40]. Σε άλλη πηγή η Plastic Energy αναφέρει ότι κάθε τόνος πλαστικών αποβλήτων παράγει 850 λίτρα TACOIL [46]. Η εταιρεία σκοπεύει να επεκταθεί παγκοσμίως κλείνοντας συνεργασίες για κατασκευή μοναδών τα επόμενα χρόνια με μεγάλες εταιρείες όπως η Exxonmobil, Sabic, Ineos, Petronas, Total κ.α. [41].



Εικόνα 33: Βήματα παραγωγής TACOIL από την Plastic Energy [40].

Ένα παράδειγμα εμπορικής λειτουργίας πυρόλυσης είναι η μονάδα της Indaver στο Βέλγιο, η οποία παράγει υγρούς υδρογονάνθρακες, παραφίνες απο ανάμικτα πλαστικά απόβλητα PE, PP δυναμικότητας 7000 τόνων ετησίως [39].

Όσο αφορά την τεχνολογία της καταλυτικής πυρόλυσης η εταιρεία Quantafuel με συνέταιρο την BASF λειτουργούν μια μονάδα δυναμικότητας 20 kt ετησίως πλαστικών αποβλήτων στο Aarhus της Δανίας για την παραγωγή υγρών και αέριων υδρογοναθράκων. Οι εταιρείες σε συνεργασία και με την Remondis σκοπεύουν να κατασκευάσουν εργοστάσιο δυναμικότητας 250 kt τόνων ετησίως στην Γερμανία μέχρι το 2025 με την Remondis να προμηθεύει τα πλαστικά απόβλητα και την Quantafuel την τεχνολογία. Το παραγόμενο προϊόν θα καλύπτει μερικές απο τις ανάγκες της BASF [39].

### Αεριοποίηση

Ένα παράδειγμα εμπορικής λειτουργίας αεριοποίησης είναι η μονάδα της Enerkem στο Edmonton του Καναδά, η οποία παράγει 38 εκατομμύρια λίτρα μεθανόλης βιοκαυσίμου, στη συνέχεια αιθανόλης και αιθυλενίου από 100 kt πλαστικών αποβλήτων. Το εργοστάσιο χρησιμοποιεί τεχνολογία αεριοποίησης με ατμό σε αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης. Επίσης η ίδια εταιρεία κατασκευάζει ένα ακόμα εργοστάσιο στον Καναδά που θα παράγει 125 εκατομμύρια λίτρα βιοκαυσίμων και χημικών από μη ανακυκλωμένα αστικά απόβλητα και δασικά υπολείμματα. Η εταιρεία έκανε και την παρουσία της σε Ευρωπαϊκό έδαφος μαζί με την Repsol όπου σχεδιάζουν την κατασκευή ενός εργοστασίου στην Ταραγόνα της Ισπανίας που θα επεξεργάζεται 400 kt μη ανακυκλωμένων στερεών αποβλήτων απο τις γύρω περιοχές και θα παράγει 220 εκατομμύρια λίτρα μεθανόλης [42].

Ένα άλλο παράδειγμα εμπορικής λειτουργίας είναι το Showa Denko Kawasaki εργοστάσιο απο την Ebara και την Ube στην Ιαπωνία που λειτουργεί απο το 2003 και επεξεργάζεται 70 kt πλαστικών αποβλήτων, χρησιμοποιώντας το παραγόμενο αέριο υδρογόνο για την σύνθεση αμμωνίας, ξηρός πάγος [43].

### Αποπολυμερισμός

Ένα παράδειγμα εμπορικής λειτουργίας του αποπολυμερισμού είναι η μονάδα της Ioniga στο Geleen της Ολλανδίας η όποια επεξεργάζεται 10.000 τόνους PET ετησίως με την μέθοδο της γλυκόλυσης και παράγει ενδιάμεσα για την παραγωγή ανακυκλωμένου PET που θα χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές τροφίμων [44].

Στον Πίνακα 4 παρακάτω απεικονίζονται συγκεντρωτικά μερικές απο τις εμπορικές μονάδες χημικής ανακύκλωσης ανα τεχνολογία με έμφαση στην Ευρώπη.

Πίνακας 4: Εμπορικές μονάδες χημικής ανακύκλωσης [39], [42-44].

Εταιρεία	Χώρα	Τεχνολογία	Τροφοδοσία Αποβλήτων	Προϊόντα	Δυναμικότητα (tpy)	Συνεργάτης
Plastic Energy	2 x Ισπανία	Πυρόλυση	PE, PP, PS	Υγροί HCs	7000	SABIC
Indaver	Βέλγιο	Πυρόλυση	PE, PP Ανάμικτα	Υγροί HCs, παραφίνες	7000	INEOS etc.
Recycling Technologies	Ην. Βασίλειο	Πυρόλυση	Πλαστικά απόβλητα	Υγροί HCs	7000	Nestle, Mars, Total
Pyrum	Γερμανία	Πυρόλυση	Πλαστικά απόβλητα, Ελαστικά αυτοκινήτων	Υγροί & Αέριοι HCs	7000	BASF
Quantafuel	Ολλανδία/Δανία	Πυρόλυση	Πλαστικά απόβλητα	Υγροί & Αέριοι HCs, coke	20000	BASF
New Energy	Ουγγαρία	Πυρόλυση	Ελαστικά αυτοκινήτων	Υγροί HCs	9000	BASF
Enerkem	Καναδάς	Αεριοποίηση	Πλαστικά απόβλητα	38 ML μεθανόλης→ αιθυλένιο	100000	-
Showa Denko	Ιαπωνία	Αεριοποίηση	Πλαστικά απόβλητα	NH <sub>3</sub> , dry ice,	70000	
Ioniga	Ολλανδία	Αποπολυμερισμός (Γλυκόλυση)	PET	Ενδιάμεσα παρ. PET	10000	-

Βάσει δυναμικότητας οι μονάδες χαρακτηρίζονται ως [39]:

- Μέχρι 10000 tpy → συνήθως proof of concept εμπορικές μονάδες κυρίως για προσέλκυση επενδυτών.
- 10000 με 30000 tpy → εμπορικές μονάδες κανονικού βεληνεκούς με περιορισμένες πάλι δυνατότητες.
- Πάνω απο 30000 tpy → μονάδες που μπορούν να υποστηρίξουν μια μεγάλη χημική βιομηχανία.

#### 4.4. Εμπορικά Proof of Concept προϊόντα χημικής ανακύκλωσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα εμπορικά προϊόντα που φτιάχνονται από χημικές ανακυκλώμενες μεθόδους μέσω των εταιρειών που μεσολαβούν.

##### Plastic Energy-SABIC

Η Plastic Energy όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι μια εμπορικά ενεργή εταιρεία χημικής ανακύκλωσης με έδρα την Ισπανία που είναι η πρώτη εταιρεία χημικής ανακύκλωσης στην ΕΕ που πήρε πιστοποίηση REACH [45].

Η πιστοποίηση REACH (ακρωνύμιο των Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals) όπως αναφέρεται [45] είναι ένας ευρωπαϊκός κανονισμός που στοχεύει στην:

- Προστασία του περιβάλλοντος και της υγείας του ανθρώπου από την χρήση χημικών
- Αξιολόγηση ασφάλειας των χημικών ουσιών προς χρήση στην ΕΕ

Η Plastic Energy προμηθεύει το TACOIL (από το ακρωνύμιο Thermo Anaerobic Conversion Oil όπου είναι η μέθοδο που χρησιμοποιεί) στη Repsol, η οποία το μετατρέπει σε ρητίνες, και στη Sabic, η οποία τις μετατρέπει σε "κυκλικά πιστοποιημένα πολυμερή. Σε όλο αυτό το διάστημα έχουν αναπτυχθεί συνεργασίες της SABIC με την Unilever, την Tupperware, την Mondelez και την TESCO [41].

Η Sabic σαν εταιρεία μεσάζοντας προμηθεύεται το TACOIL από την Plastic Energy και το διοχετεύει σε έναν naphtha cracker στο Geleen της Ολλανδίας για να παράξει πλαστικά πανομοιότυπα με τα «παρθένα» [46]. Η SABIC μέσα από το portfolio της Trucircle πιστοποιημένη με ISCC και σε συνεργασία με τις υπόλοιπες εταιρείες παράγουν τα κάτωθι προϊόντα όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 33α-ζ παρακάτω:

- Unilever - Magnum tub (*Εικόνα 34α*)
- Unilever - Knorr bouillon powder container (*Εικόνα 34β*)
- Estee Lauder - tube pack Active Charcoal Mask (*Εικόνα 34γ*)
- Melitta Single Portions - Avoury (*Εικόνα 34δ*)
- Tupperware - Eco Straw & New Tumbler (*Εικόνα 34ε*)
- Mondelez - Philadelphia Cream Cheese (*Εικόνα 34ζ*)



Εικόνα 34α-ζ: Εμπορικά προϊόντα διάφορων εταιρειών τα οποία περιλαμβάνουν χημικά ανακυκλωμένο περιεχόμενο πολυμερούς.

Πιο αναλυτικά τα Magnum tubs (Εικόνα 34α) αρχικά ήταν διαθέσιμα 600.000 χιλιάδες σε Ισπανία, Βέλγιο και Ολλανδία από το 2019. Έπειτα η εταιρεία διέθεσε πάνω από 7 εκατομμύρια τον Αύγουστο του 2020 σε όλη την Ευρώπη από 100% πιστοποιημένο ανακυκλούμενο κυκλικό PP [47]. Η SABIC έκανε εκτίμηση ότι μέχρι το τέλος του 2020 η επωνυμία θα έχει χρησιμοποιήσει 160 τόνους ανακυκλώμενο πλαστικό [46].

Για τα Knorr bouillon powder container (Εικόνα 34β - [49]) η Unilever σκοπεύει να παράγει περίπου 1 εκατομμύριο δοχειάκια αποθήκευσης, που ισοδυναμεί σε εξοικονόμηση 2000 τόνων παρθένου πλαστικού PP [48]. Η Estee Lauder - tube pack Active Charcoal Mask (Εικόνα 34γ) αποτελείται από ανακυκλωμένο PP στο καπάκι και ανακυκλωμένο PE στο σωληνάριο [47].

Οι οργανικές κάψουλες τσαγιού Anoury - Melitta Single Portions (Εικόνα 34δ) [43] καθώς και το ποτήρι με το καλάμακι Tupperware - Eco Straw & New Tumbler (Εικόνα 34ε) θα αποτελούνται και από ανακυκλωμένο χημικό PP [50]. Η εταιρεία Mondelez με το Philadelphia Cream Cheese (Εικόνα 34ζ) από το 2022 στην Ευρώπη θα παράγονται χρησιμοποιώντας 5% ανακυκλωμένα υλικά προερχόμενα από χημική ανακύκλωση [51].

Η εταιρεία Repsol στην σειρά προϊόντων Reciclex έχει ενσωματώσει ποσόστο χημικά ανακυκλωμένων πολυολεφίνων. Η σειρά περιλαμβάνει εύκαμπτα υλικά συσκευασίας από LDPE, άκαμπτα υλικά συσκευασίας από HDPE, πλαστικά έπιπλα από PP κ.α. [52].

Η εταιρεία BASF εδραιώνοντας συνεργασίες με την Quantafuel και την ARCUS οι οποίοι είναι ειδικοί σε πυρόλυση ανάμικτων πλαστικών αποβλήτων και την Pyrum και New Energy όπου ειδικεύονται στην πυρόλυσης τέλους κύκλου ζωής των ελαστικών αυτοκινήτων εισήχθη στον κλάδο των χημικά ανακυκλώμενων προϊόντων. Με ονομασία ChemCycling το νέο της project χρησιμοποιεί την πρώτη ύλη από την χημική ανακύκλωση των παραπάνω εταιρειών για την παραγωγή προϊόντων της στο χαρτοφυλάκιο της Cycled. Η πρώτη ύλη ενσωματώνεται στα προϊόντα Cycled μέσω ισοζυγίου μάζας ελεγχόμενο από τρίτο φορέα στην γραμμή παραγωγής της BASF στο Verbund. Το πιλοτικό πρόγραμμα που ξεκίνησε το 2021 έχει σήμερα στο χαρτοφυλάκιο του πάνω από 200 ισορροπημένα προϊόντα Cycled πιστοποιημένα με ISCC plus. Τα Cycled προϊόντα της BASF έχουν καλύψει ένα εύρος εφαρμογών σε συσκευασίες φαγητών ή φαρμάκων, καθημερινότητα και αθλητισμός καθώς και αυτοκινητοβιομηχανία [41]. Μερικά παραδείγματα θα απεικονιστούν παρακάτω.

### Υλικό Ultramid Cycled

Πρώτες ύλες για το υλικό αυτό αποτελούν τα ανάμικτα πλαστικά απόβλητα, τα EOL λάστιχα αυτοκινήτων, απόβλητα από την παραγωγή PA και B2B απόβλητα καταναλωτών [53]. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται στις συσκευασίες τροφίμων όπως φαίνεται παρακάτω, στο τομέα των υφασμάτων, υποδημάτων κ.α.

Το Ultramid Cycled χρησιμοποιείται για την ύφανση ενός νήματος που μπορεί να επεξεργαστεί όπως το συμβατικό πολυαμίδιο σε υφάσματα, σακίδια πλάτης και ρούχα. Τα πρώτα παντελόνια VAUDE με βάση τα παλιά ελαστικά αυτοκινήτων έχουν ήδη κυκλοφορήσει στην αγορά από την άνοιξη του 2022. Περίπου πέντε τέτοια παντελόνια εξωτερικού χώρου μπορούν να κατασκευαστούν από το «πετρέλαιο» πυρόλυσης που η Pyrum εξάγει από ένα μόνο παλιό ελαστικό [54].

Η εταιρεία Mercedes-Benz για την παραγωγή του πλαστικού για το χερούλι της πόρτας για επιλεγμένα μοντέλα σε συνεργασία με την BASF η οποία συνδύασε εναλλακτικές πρώτες ύλες σε μια προσέγγιση ισοζυγίου μάζας: πετρέλαιο πυρόλυσης που παράγεται στην Pyrum Innovations από παλιά ελαστικών και βιομεθάνιο από γεωργικά απόβλητα και υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων. Το πλαστικό που προέκυψε το πολυαμίδιο Ultramid 6 με 30% ενίσχυση από ίνες γυαλιού, διαθέτει τις ίδιες ιδιότητες με το πλαστικό πρώτης ποιότητας, καθιστώντας το ιδανικό υλικό για απαιτητικά εξαρτήματα οχημάτων [55].

Στην Εικόνα 35α,β παρακάτω απεικονίζονται προϊόντα από την σειρά Cycled της BASF.



Εικόνα 35α,β: Συσκευασία μοτσαρέλας με επωνυμία Zottarella [56], συσκευασία παγωτού Remaxigel [57].



Αναλυτικότερα όσο αφορά την Εικόνα 35α η νεα συσκευασία μοτσαρέλας με 2/3 ανακυκλωμένο πλαστικό είναι διαθέσιμη απο τον Μαίο του 2020 [56], Στην Εικόνα 35β η Imballaggi Alimentari, μια ιταλική εταιρεία που ειδικεύεται στην παραγωγή συσκευασιών παγωτού διέθεσε στην αγορά τα κουτιά Remaxigel από Styropor Cycled. Τα κουτιά από EPS (διογκούμενο πολυστυρένιο) διαθέτουν εξαιρετικές επιδόσεις και σχεδιάστηκαν κυρίως για χειροποίητα παγωτά [57].

#### 4.5. Σύνοψη

Στον Πίνακα 5 απεικονίζονται τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, η απόδοση και τα ρεύματα αποβλήτων που διαχειρίζονται οι εμπορικές τεχνολογίες. Βάσει τα αποτελέσματα της αξιολόγησης TRL των τεχνολογιών απο τους Solis & Silveira (2020) [35] οι τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης για ρεύματα ανάμικτων αποβλήτων χωρίζονται σε εμπορικές και μη όπως απεικονίζονται στον Πίνακα 6. Επίσης στον Πίνακα 6 απεικονίζονται στοιχεία με το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας, την ευαισθησία στις πρώτες ύλες καθώς και εν μέρη τον βαθμό διάσπασης που τους αναλογεί.

Πίνακας 5: Κύρια σημεία και διαφορές μεταξύ εμπορικών τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης.

Technology	Feedstock [8]	Yield [9],[37]	Advantages	Disadvantages
Pyrolysis	HDPE, LDPE, PP, PMMA, PS, ABS, RU, mixed PE/PP/PS, Fiber-reinforced composites, multi layered plastic packaging	Mass yield from plastic waste to oil: 70-85% ,plastic to plastic yield 49%	-Απλή τεχνολογία -Ευέλικτη διεργασία -Δεν χρειάζεται σημαντική διαλογή	-Αναβάθμιση προϊόντων πριν απο χρήση -Χαμηλή ανεκτικότητα στο PVC -Ευαίσθητη ως προς μόλυνση πρώτων υλών -Υψηλη ενεργειακή κατανάλωση
Catalytic Pyrolysis	HDPE, LDPE, PP, PS	84 % + (waste to oil)	Σε σύγκριση με την συμβατική: -Χαμηλότερη θερμοκρασία διεργασίας -Υψηλότερος βαθμός απόδοσης -Ταχύτερη διεργασία -Προϊόν παρόμοιο με το αντίστοιχο απο ορυκτά καύσιμα -Χαμηλότερο κόστος παραγωγής και ενεργειακής κατανάλωσης -Πιθανή μετατροπή 100% των πλαστικών αποβλήτων	-Ευαίσθητη ως προς την μόλυνση πρώτων υλών -Απενεργοποίηση καταλύτη απο ανεπιθύμητες ουσίες και φραγή απο ανόργανα σωματίδια
Gasification	All types of plastics, mixed plastics	34% plastic to plastic	-Υψηλός βαθμός διάσπασης πολυμερών -Πολλαπλή χρήση syngas -Κατάλληλο για μείγματα πλαστικών	-Κόστος και απαιτητικό ενεργειακά -Απαιτείται καθαρισμός προϊόντων syngas -Αποθέσεις πίσσας και κωκ -Απαιτείται υψηλός όγκος πρώτων υλών για να είναι κερδοφόρο
Chemolysis	PET, PU, PC, PA, PLA, PLLA	97% plastic to plastic	Παράγει υψηλής καθαρότητας προϊόντα Λειτουργικό ήδη για PET	-Κατάλληλη για ομογενοποιημένα πλαστικά -Κατάλληλο για πολυμερη πολυσυμπυκνωση -Υψηλό όγκο για να είναι αποδοτική

Πίνακας 6: Λειτουργικά στοιχεία και κατηγοριοποίηση τεχνολογιών βάσει TRL [35].

Technology	Scale of operation (at present)	Temperature (°C) (in process)	Sensitivity (to feedstock quality)	Polymer breakdown (affecting yield and material recovery)	TRL
Conventional pyrolysis	Commercial	300-700	High	Moderate	9
Plasma pyrolysis	Laboratory	1800-10000	Low	Very Detailed	4
Microwave assisted pyrolysis	Laboratory	Up to 1000	Medium	Detailed	4
Catalytic cracking	Commercial	450-550	High	Moderate	9
Hydrocracking	Pilot	375-500	High	Detailed	7
Conventional gasification	Commercial	700-1200	Medium	Detailed	9
Plasma gasification	Commercial in decomposing hazardous waste	1200-15000	Low	Very detailed	8
Pyrolysis with in-line reforming	Pilot	500-900	Medium	Detailed	4

Οι ιδανικές ροές αποβλήτων όπως αναφέρονται [12] για την χημική ανακύκλωση είναι:

- Ανάμικτα αποβλήτα που περιέχουν διαφορετικά θερμοπλαστικά πολυμερή που είναι δύσκολο να διαχωριστούν (π.χ. ορισμένοι τύποι πολυστρωματικών συσκευασιών, απόβλητα από κομμάτια αυτοκινήτων κ.α.).
- Απόβλητα με υψηλό επίπεδο ακαθαρσιών, όπως πλαστικά απόβλητα που έχουν ανασυρθεί από τη θάλασσα, συμπεριλαμβανομένων αλιευτικών εργαλείων, απόβλητα που περιέχουν κόλλες ή γράσο κ.λ.π).
- Απόβλητα πλαστικών μικρού μεγέθους που διαφεύγουν από τις εγκαταστάσεις διαλογής αποβλήτων.
- Απόβλητα από διαδικασίες μηχανικής ανακύκλωσης.
- Θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά, όπως στρώματα πολυουρεθάνης, πλαστικά που χρησιμοποιούνται για τη μόνωση ψυγείων κ.λπ.
- Πλαστικά στο τέλος του κύκλου ζωής τους που έχουν ανακυκλωθεί μηχανικά αρκετές φορές.
- Απόβλητα που περιέχουν απαγορευμένες ουσίες που πρέπει να εξαχθούν από τα ανακυκλωμένα πλαστικά

Συνοψίζοντας με την βοήθεια του Πίνακα 5,6 απο τις προαναφερθείσες εμπορικές τεχνολογίες ότι η καταλυτική πυρόλυση λύνει πολλά προβλήματα απο την συμβατική χαμηλώνοντας την θερμοκρασία και αυξάνοντας την ταχύτητα της αντίδρασης που μειώνει το κόστος και βελτιώνει το τελικό προϊόν. Παρόλα αυτά η καταλυτική πυρόλυση είναι επιρρεπής σε απενεργοποίηση και μόλυνση του καταλύτη απο οργανικές ενώσεις και ακαθαρσίες στα ρεύματα αποβλήτων. Η αεριοποίηση φαίνεται ότι είναι μια πολυ ενεργοβόρα διεργασία η οποία απαιτεί πολυ μεγάλο όγκο αποβλήτων για να είναι οικονομικά κερδοφόρα παρόλο που επεξεργάζεται θεωρητικά όλα τα ρεύματα των αποβλήτων. Ο αποπολυμερισμός μπορεί να παράξει καλής ποιότητας πολυμερή αλλά υπόκεινται στον περιορισμό ομοιογενούς ρεύματος πλαστικων αποβλήτων κυρίως πολυσυμπύκνωσης όπως PET.

Απο τις υπό ανάπτυξη τεχνολογίες πολλαπλά πλεονεκτήματα έχει η τεχνολογία της υδρογονοδιάσπασης όπου παράγει καλύτερης ποιότητας προϊόν απο την πυρόλυση χωρίς τοξικές ενώσεις το οποίο δεν χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία. Τα μειονεκτήματα είναι το υψηλό λειτουργικό και επενδυτικό κόστος. Στο ίδιο μήκος κύματος και οι τεχνολογίες πλάσματος που απαιτούν πολλή ενέργεια με την αεριοποίηση πλάσματος να εφαρμόζεται για καταστροφή τοξικών αποβλήτων. Πολλά υποσχόμενη είναι και η τεχνολογία της Pyrolysis with line informing όπου λύνει το πρόβλημα της μόλυνσης του καταλύτη. Τέλος η πυρόλυση με την βοήθεια μικροκύματων έχει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με την συμβατική πυρόλυση όπως χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και ταχύτερο χρόνο αντίδρασης αλλά βρίσκεται σε πειραματικό επίπεδο.

Απο τις εμπορικές μεθόδους αυτή με την μεγαλύτερη επιρροή είναι η πυρόλυση καθώς όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο έχει περάσει απο το στάδιο proof of concept σιγά σιγά. Απόδειξη αυτών είναι οι συνεργασίες και τα νέα προϊόντα που κατασκευάζονται έχοντας μέσα χημικά ανακυκλωμένο υλικό σε ποσοστό απο εταιρείες όπως η SABIC με την σειρά προϊόντων Trucircle, η Repsol με την αντίστοιχη σειρά Reciclex και η BASF με την Ccycled.

## 5. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης

### 5.1. Βιβλιογραφική επισκόπηση

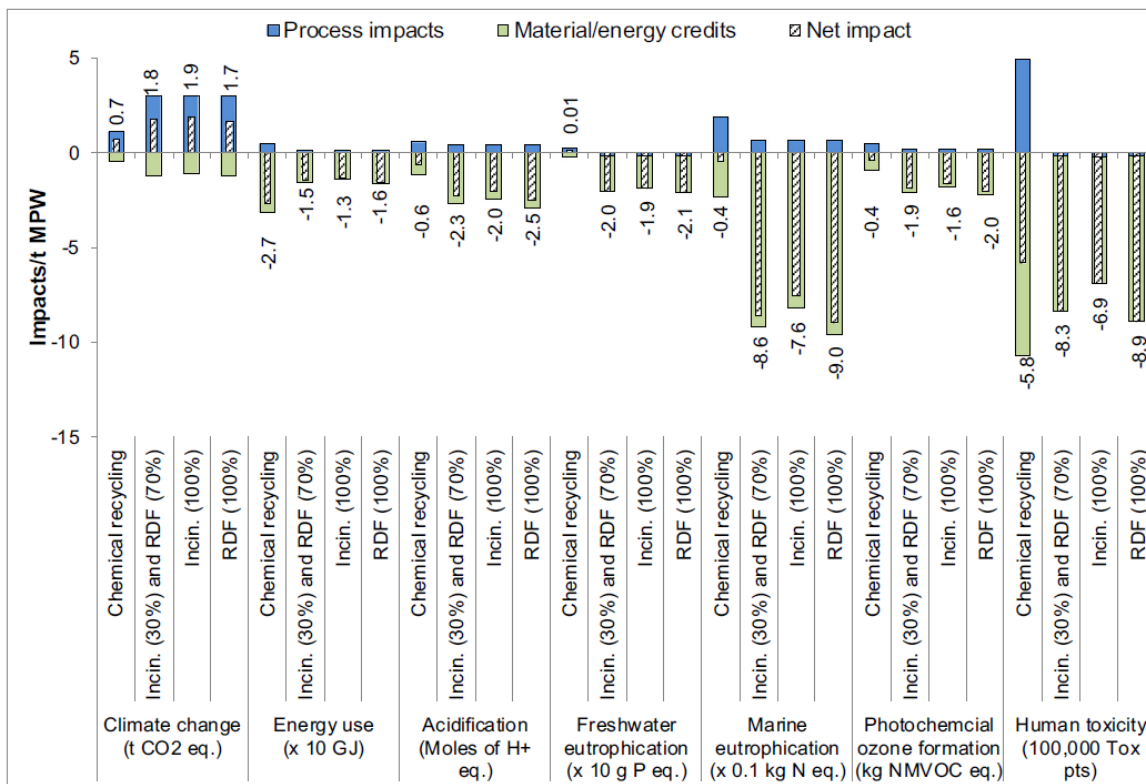
Όσο αφορά την περιβαλλοντική επιβάρυνση και τα οφέλη που μπορεί να έχει η χημική ανακύκλωση αυτά προέρχονται από σύγκριση μεταξύ αυτής και υπόλοιπων εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων. Στις περισσότερες δημοσιευμένες έρευνες από ανεξάρτητους οργανισμούς ή εταιρείες που ασχολούνται με την χημική ανακύκλωση μελετάνε τις επιπτώσεις από την οπτική γωνία των αποβλήτων και των προϊόντων. Πιο επεξηγηματικά από την οπτική γωνία των αποβλήτων συγκρίνουν τις επιπτώσεις ή τα οφέλη που έχει μια ποσότητα αποβλήτων αν επεξεργαστεί με χημική ανακύκλωση, με αποτέφρωση για ανάκτηση ενέργειας και τέλος αν θα οδηγηθεί σε υγειονομική ταφή. Από την οπτική γωνία του προϊόντος συγκρίνουν αντίστοιχα τα οφέλη ή τις επιπτώσεις που έχει η ανακύκλωση χημικά ή μηχανικά με την παραγωγή μια παρθένας ποσότητας πλαστικού από ορυκτούς πόρους. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από μερικές έρευνες αξιολόγησης κύκλου ζωής (LCA) από τις οποίες θα παρθεί μια γενική ενδεικτική εικόνα για την περιβαλλοντική απόδοση των τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης.

Σε έρευνα [58] του ο οργανισμός CE Delft (2020) μελέτησε και εκτίμησε τα πιθανά οφέλη της χημικής ανακύκλωσης διαφόρων ρευμάτων πλαστικών σε σχέση με την κλιματική αλλαγή. Η μελέτη επικεντρώθηκε σε τρία ρεύματα πλαστικών αποβλήτων: απώλειες από συστήματα μηχανικής ανακύκλωσης, ομοιόμορφα ρεύματα που είναι δύσκολο να ανακυκλωθούν μηχανικά (δίσκοι PET κ.α.) και μικτά πλαστικά τύπου DKR 350. Τα ανθρακικά αποτυπώματα για τις τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης προκύπτουν από μελέτες LCA οι οποίες βασίζονται σε πληροφορίες σχετικά με τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας της τεχνολογίας επεξεργασίας. Τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν από διάφορες εταιρείες και συμπληρώθηκαν με πληροφορίες από την επιστημονική βιβλιογραφία και τις εκτιμήσεις εμπειρογνομώνων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι βασισμένα στην Ολλανδία και στο αντίστοιχο μείγμα ηλεκτρικού ρεύματος κλπ.

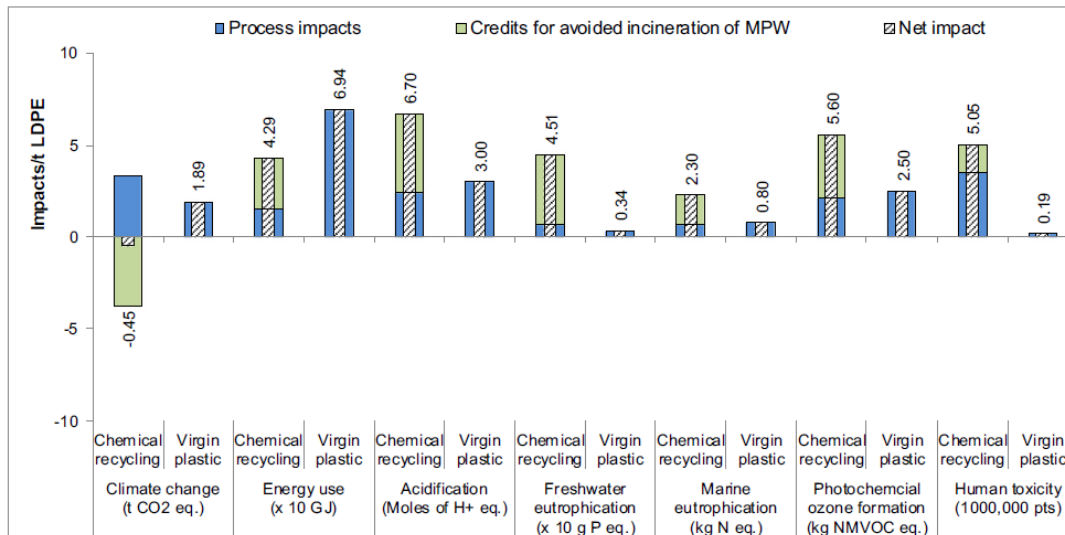
Η έρευνα συμπεραίνει ότι τα οφέλη από την κλιματική αλλαγή διαφέρουν ανά τεχνολογία και ρεύμα αποβλήτων. Λόγω του εύρους των διαθέσιμων τεχνολογιών και του διαφορετικού αποτυπώματος άνθρακα, η χημική ανακύκλωση δεν θα πρέπει να θεωρείται ως μια ενιαία επιλογή επεξεργασίας. Επίσης αναφέρει ότι τεχνολογίες με χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα όπως ο αποπολυμερισμός είναι συγκρίσιμες με τη μηχανική ανακύκλωση ανά κιλό εισροών υλικού. Αντίθετα, η αεριοποίηση και η πυρόλυση προσφέρουν χαμηλότερες μειώσεις των επιπτώσεων

στην κλιματική αλλαγή. Το αποτύπωμα άνθρακα αυτών των θερμικών τεχνολογιών βρίσκεται μεταξύ του αποτυπώματος άνθρακα της μηχανικής ανακύκλωσης και της αποτέφρωσης με ανάκτηση ενέργειας. Η έρευνα καταλήγει ότι τα αποτελέσματα είναι ενδεικτικά και περιέχουν αβεβαιότητα καθώς οι τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης είναι σε υπό εξέλιξη.

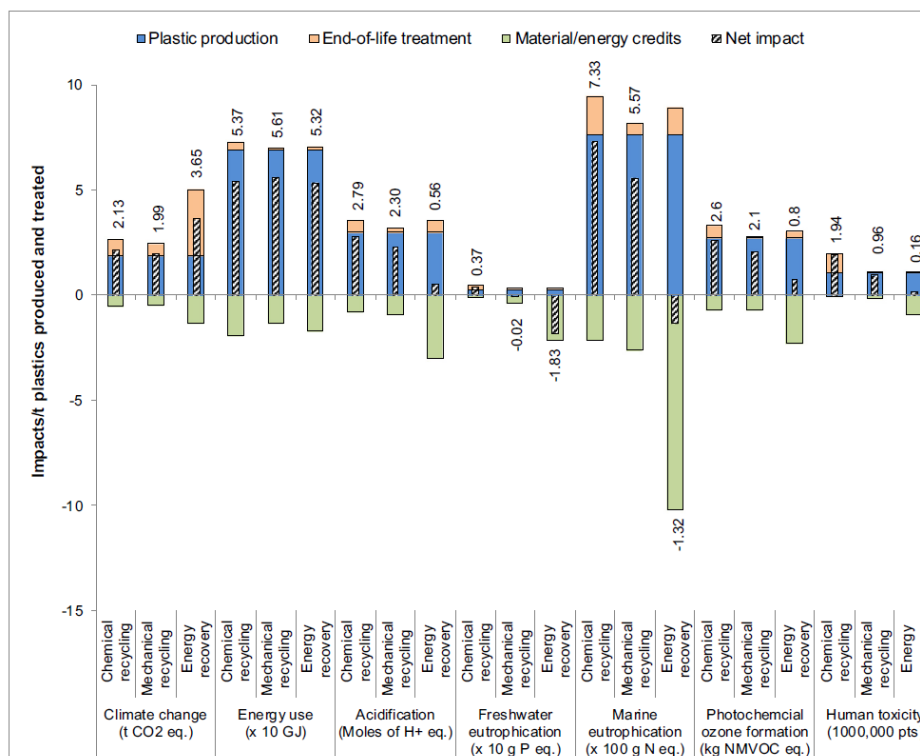
Ο Harish Jeswani et. al (2020) [59] σε συνεργασία με την BASF και άλλους φορείς σε μέλετη που πραγματοποίησαν χρησιμοποίησαν την μέθοδο LCA για να συγκρίνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χημικής ανακύκλωσης μικτών πλαστικών αποβλήτων με την μέθοδο της πυρόλυσης με εναλλακτικές μεθόδους διαχείρισης όπως η μηχανική ανακύκλωση και η αποτέφρωση για ανάκτηση ενέργειας. Πραγματοποίησαν τρεις μελέτες LCA απο διαφορετικές οπτικές γωνίες: απόβλητα, προϊόν και εναν συνδυασμό των δύο τα αποτελέσματα των οποίων απεικονίζονται αντίστοιχα στις Εικόνες παρακάτω.



Εικόνα 36: Οπτική γωνία αποβλήτων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χημικής ανακύκλωσης μέσω πυρόλυσης των μικτών πλαστικών αποβλήτων σε σύγκριση με την ανάκτηση ενέργειας από τα αυτά [59].



Εικόνα 37: Οπτική γωνία προϊόντος: περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής παρθένου LDPE μέσω χημικής ανακύκλωσης σε σύγκριση με το παρθένο LDPE [59].



Εικόνα 38: Οπτική γωνία προϊόντων και αποβλήτων: περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής μικτών πλαστικών προϊόντων και της επεξεργασίας τους στο τέλος του κύκλου ζωής τους μέσω της χημικής και μηχανικής ανακύκλωσης και της ενέργειας ανάκτησης [59].

Απο την ανάλυση του γραφήματος της Εικόνας 38 φαίνεται ότι η μηχανική ανακύκλωση έχει την χαμηλότερη και η ενεργειακή ανάκτηση την υψηλότερη επιβάρυνση στο περιβάλλον σε εκπομπές CO<sub>2</sub> με την χημική ανακύκλωση να στο ενδιάμεσο. Όσο αφορά την χρήση ενέργειας τα δεδομένα είναι πανομοιότυπα και λίγο υπερ της ανάκτησης ενέργειας. Γενικά για όλους τους άλλους δείκτες που απεικονίζονται παρατηρείται ότι η ανάκτηση ενέργειας υπερτερεί των υπολοίπων θετικά και παρομοιάς η μηχανική ανακύκλωση της χημικής. Πλην των αναφερόμενων η μελέτη [59] δείχνει ότι:

- ότι η χημική ανακύκλωση στην οπτική γωνία των αποβλήτων μέσω πυρόλυσης έχει 50% χαμηλότερες επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή και στη χρήση ενέργειας στον κύκλο ζωής από την επιλογή ανάκτησης ενέργειας.
- το δυναμικό κλιματικής αλλαγής μεταξύ χημικής ανακύκλωσης και μηχανικής είναι συγκρίσιμο.
- η ανακύκλωση των μικτών πλαστικών αποβλήτων με πυρόλυση έχει χαμηλότερες επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή από την παρθένα παραγωγή ορυκτών πόρων (~-2,3 t CO<sub>2</sub> eq./t)

Η έκθεση εσωκλύει καταλήγοντας ότι τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δείχνουν ότι δεν υπάρχει καμία απολύτως προτεινόμενη τεχνολογία από περιβαλλοντικής άποψης είτε για την επεξεργασία είτε για την ανακύκλωση των μικτών πλαστικών αποβλήτων και ότι η αξιολόγηση θα γίνει ανάλογα την κατηγορία των επιπτώσεων που εξετάζεται συγκεκριμένα.

Σε έκθεση [60] της το 2020 η Plastic Energy σε συνεργασία με την Quantis μελέτησαν με την χρήση LCA το ανθρακικό αποτύπωμα και την χρήση πόρων των πλαστικών αποβλήτων από την οπτική γωνία των αποβλήτων και της παραγωγής προϊόντων. Όσον αφορά την πλευρά των αποβλήτων (Πίνακας 7) η χημική ανακύκλωση είναι η δεύτερη καλύτερη επιλογή μετά την υγειονομική ταφή στην επίβαρυνση της κλιματικής αλλαγής. Όσον αφορά τη χρήση πόρων το χημικά ανακυκλωμένο LDPE αποδείχθηκε η καλύτερη επιλογή λόγω της αποφυγής παραγωγής παρθένου νάφθας από ορυκτούς πόρους. Δεν λαμβάνονται υπόψιν τα μειονεκτήματα και οι επιπτώσεις της υγειονομικής ταφής.

Πίνακας 7: Αποτελέσματα LCA για 1 kg ανάμικτα πλαστικά απόβλητα [60].

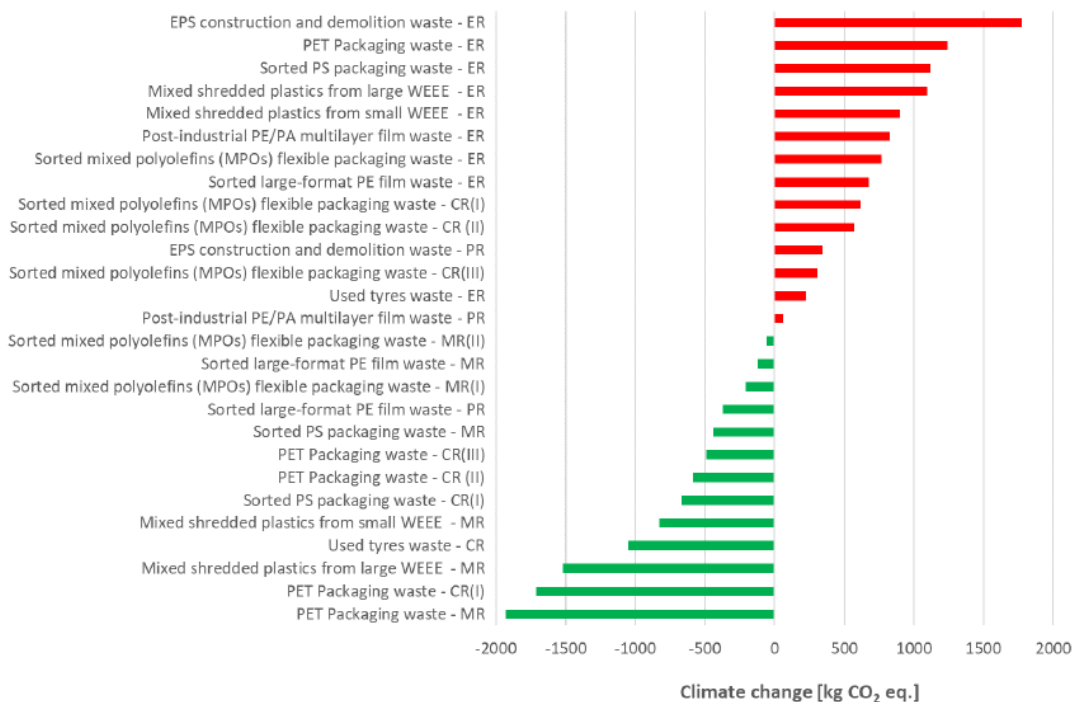
Indicator (Units)	Chemically recycled LDPE (pyrolysis)	Incineration with energy recovery	with Landfill
Climate change (kg CO <sub>2</sub> -eq)	0.55	1.60	0.15
Resources use, fossil (MJ)	-31.10	-26.54	0.36

Όσον αφορά την προσέγγιση παραγωγής προϊόντων (Πίνακας 8) σε ότι αφορά την κλιματική αλλαγή το ανακυκλωμένο LPDE απο την μηχανική ανακύκλωση έχει το καλύτερο αντίκτυπο σε σχέση με το παρθένο και το χημικά ανακυκλωμένο.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα LCA για 1 kg παραγόμενου παρθένου και χημικά ανακυκλωμένου LDPE [60].

Indicator (Units)	Chemically recycled virgin-like LDPE (pyrolysis)	Virgin (fossil) LDPE	Mechanically recycled virgin-like LDPE
Climate change (kg CO <sub>2</sub> -eq)	0.86	1.90	-0.45
Resources use, fossil (MJ)	39.54	80.08	22.14

Σύμφωνα με Ευρωπαϊκή έρευνα απο τους Garcia et al. (2023) [61] μελετήθηκε η συγκριτική περιβαλλοντική αξιολόγηση των τεχνολογιών ανακύκλωσης πλαστικών αποβλήτων και ανάκτησης ενέργειας, χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα εγκαταστάσεων. Οι τεχνολογίες ανακύκλωσης περιλαμβάνουν τη μηχανική, τη φυσική και τη χημική ανακύκλωση. Η έρευνα μελετά πολλούς δείκτες επιβάρυνσης της εκάστοτε τεχνολογίας στο περιβάλλον με τον κύριο δείκτη να είναι το ανθρακικό αποτύπωμα. Στο γράφημα της Εικόνας 39 παρακάτω απεικονίζει μια περίληψη των αποτελεσμάτων όσο αφορά τον προαναφερθέν δείκτη.



Εικόνα 39: Συνοπτική επισκόπηση της κλιματικής αλλαγής που σχετίζεται με τη διαχείριση 1 τόνου διαφόρων πλαστικών αποβλήτων. Οι αρνητικές τιμές (πράσινες ράβδοι) αντιπροσωπεύουν καθαρή εξοικονόμηση



αερίων του θερμοκηπίου, ενώ οι θετικές (κόκκινες ράβδοι) αντιπροσωπεύουν καθαρή επιβάρυνση με αέρια του θερμοκηπίου. CR: χημική ανακύκλωση, ER: ανάκτηση ενέργειας, MR: μηχανική ανακύκλωση, PR: φυσική ανακύκλωση [61].

Ως προς περιβαλλοντικής άποψης η μελέτη [61] καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η επιλογή της προτεινόμενης επιλογής διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων θα πρέπει να βασίζεται σε:

- μεγιστοποίηση της ανάκτησης των υλικών με παράλληλη ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της επεξεργασίας, κυρίως σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας (αντανακλώντας την περιβαλλοντική απόδοση)
- ιδιαιτερότητα του ρεύματος πλαστικών αποβλήτων και την απαιτούμενη κατ' αυτόν τον τρόπο επεξεργασία

Επίσης κατέληξε στο γεγονός ότι όλοι οι τύποι ανακύκλωσης είναι προτιμότεροι από την ανάκτηση ενέργειας σε όλα αναλυθέντα σενάρια, ιδίως για τα μικτά απόβλητα πολυολεφινών που επί του παρόντος δεν ανακυκλώνονται μηχανικά, διότι η εξοικονόμηση περιβαλλοντικών πόρων από την ανάκτηση ενέργειας δεν επαρκεί για να αντισταθμίσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την αποτέφρωση των αποβλήτων και τις σχετικές εκπομπές CO<sub>2</sub>.

Για ορισμένα ρεύματα αποβλήτων (π.χ. απόβλητα PET, απόβλητα συσκευασίας EPS, απόβλητα MPO, απόβλητα PE/PA), η μηχανική και η φυσική ή χημική ανακύκλωση μπορούσαν να συγκριθούν άμεσα, καθώς η εισροή-αντιμετώπιση των αποβλήτων θεωρήθηκε ίδια. Δεν κατέστη δυνατό να προκύψει σαφής κατάταξη καθώς η μία από αυτές είχε καλύτερες επιδόσεις σε ορισμένες κατηγορίες επιπτώσεων και χειρότερες σε άλλες.

Όσο αφορά τους περιβαλλοντικούς δείκτες κριτήριο της μεγιστοποίησης της ανάκτησης των υλικών με παράλληλη ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της επεξεργασίας εξακολουθεί να ισχύει ιδίως για την καταστροφή του όζοντος και την χρήση ορυκτών πόρων. Ωστόσο, για ορισμένες κατηγορίες (οξίνιση, σωματίδια, ιονίζουσα ακτινοβολία, ανθρώπινη τοξικότητα κ.α.), η ανάκτηση ενέργειας μπορεί να έχει καλύτερες επιδόσεις από τις άλλες οδούς διαχείρισης. Ο κύριος λόγος είναι ότι για ορισμένες ουσίες που εκπέμπονται στον αέρα, όπως τα NO<sub>x</sub>, το SO<sub>2</sub>, οι εκπομπές σκόνης ή μετάλλων οι σημερινοί αποτεφρωτήρες στην Ευρώπη επιτυγχάνουν κατά μέσο όρο πολύ χαμηλότερες εκπομπές από το μέσο μείγμα παραγωγής ενέργειας της EE - το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό τόσο των επιπτώσεων από την κατανάλωση ενέργειας της ανακύκλωσης όσο και των εξοικονομήσεων/πιστώσεων από την ανάκτηση ενέργειας. Καθώς το ευρωπαϊκό ενεργειακό μείγμα θα γίνεται καθαρότερο, η διαφορά μεταξύ της ανακύκλωσης και

της ανάκτησης ενέργειας θα αυξηθεί περαιτέρω υπέρ της ανακύκλωσης, υποστηρίζοντας έτσι την εγκυρότητα της ιεραρχίας των αποβλήτων της ΕΕ.

Ένας βασικός περιορισμός της μελέτης ήταν η έλλειψη διαθέσιμων δεδομένων σχετικά με τα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων στην ανακύκλωση αποβλήτων (χαρακτηρισμός, προέλευση. Λαμβάνοντας υπόψη τα σενάρια που διερευνήθηκαν, όπου η μηχανική και η χημική ανακύκλωση αποτελούν εναλλακτικές επιλογές διαχείρισης, δεν κατέστη δυνατό να καθοριστεί μια σαφής κατάταξη.

## 5.2. Συνοψη

Απο τις παραπάνω μελέτες η κάθε μια με τους περιορισμούς της και τις υποθέσεις της πηγάζει ότι οι εκπομπές CO<sub>2</sub> της χημικής ανακύκλωσης με την μέθοδο του αποπολυμερισμού είναι συγκρίσιμες με αυτές της μηχανικής. Οι θερμικές μέθοδοι χημικής ανακύκλωσης απο την άλλη στέκονται ανάμεσα στην αποτέφρωση και την μηχανική καθώς πάνω απο την υγειονομική ταφή (αν και η υγειονομική ταφή δεν θεωρείται προτεινόμενη μέθοδο διαχείρισης γιατί είναι στην τελευταία γραμμή του τριγώνου διαχείρισης αποβλήτων της οδηγίας WFD). Επίσης απο μεριά παραγωγής προϊόντος φαίνεται ότι η χημική ανακύκλωση τοποθετείται ανάμεσα στην μηχανική και την νέα παρθένα παραγωγή πλαστικού. Απο την άλλη μεριά ότι αφορά του άλλους περιβαλλοντικούς δείκτες (πλην κλιματικής αλλαγής και χρήση ενέργειας) η αποτέφρωση έχει χαμηλότερο αντίκτυπο απο τις άλλες τεχνολογίες.

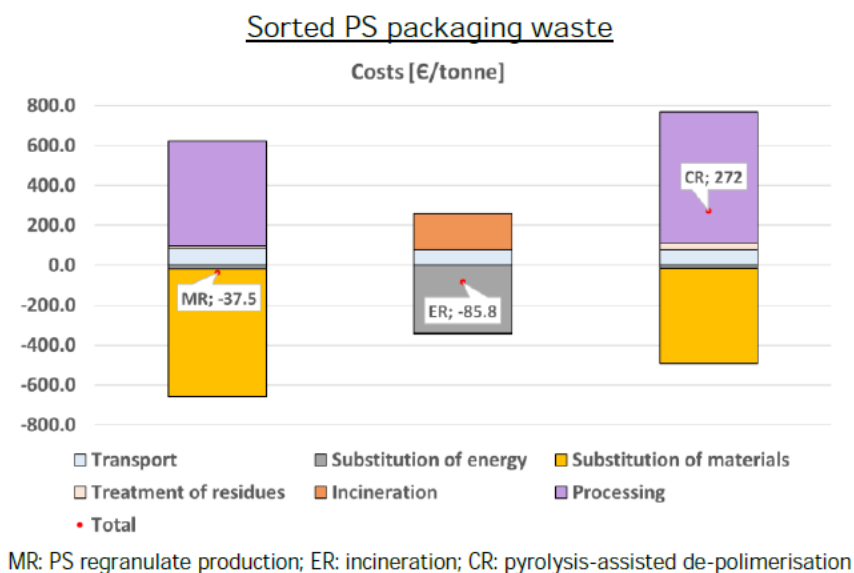
Όπως αναφέρει ο (Keller et al., 2022) [62] ενώ ένας αυξανόμενος αριθμός LCA έχει διεξαχθεί σε διάφορες τεχνολογίες CR εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετά εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν για την ακριβή εκτίμηση των επιπτώσεων αυτών των αναδυόμενων τεχνολογιών. Τα κοινά ζητήματα αφορούν την έλλειψη διαφάνειας, πληρότητας και συγκρισιμότητας των LCA.

Μια άλλη πρόκληση είναι η γενική έλλειψη σχετικών δεδομένων. Για παράδειγμα, υπάρχουν ελάχιστα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με τα χαρακτηριστικά και την προέλευση των αποβλήτων που εισάγονται στην ανακύκλωση, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό των κατάλληλης επιλογής διαχείρισης αποβλήτων [61]. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των LCA εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις τεχνολογίες και τα συγκεκριμένα ρεύματα αποβλήτων που αναλύονται. Ωστόσο, δεδομένης της σημερινής έλλειψης δεδομένων και διαφάνειας στις LCA, τα αποτελέσματα αυτά πρέπει να ερμηνεύονται με προσοχή.

## 6. Οικονομική αξιολόγηση χημικών μεθόδων ανακύκλωσης

### 6.1. Βιβλιογραφική επισκόπηση

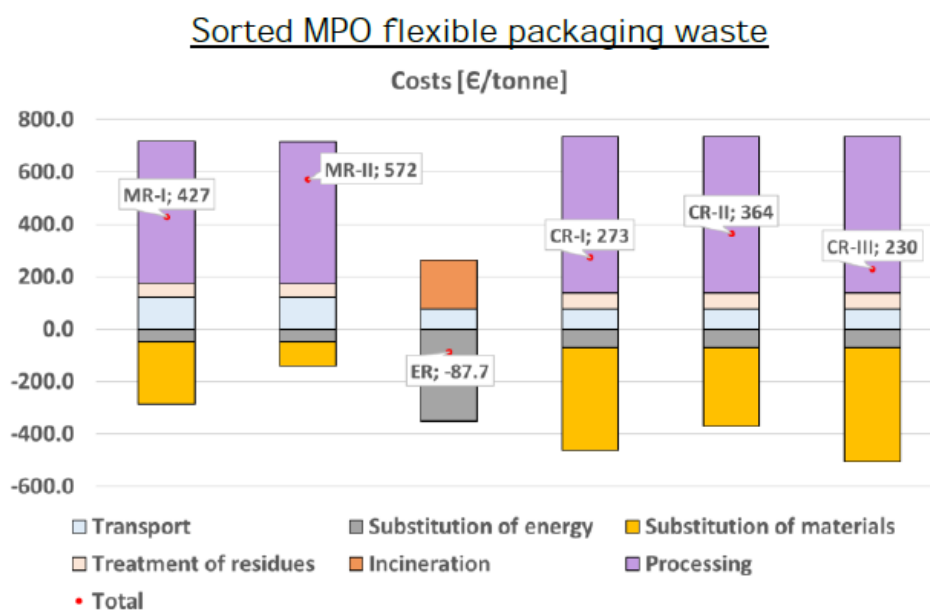
Σύμφωνα με Ευρωπαϊκή έρευνα απο τους Garcia et al. (2023) [61] μελετήθηκαν τα κόστη κύκλου ζωής ενός τόνου πλαστικών αποβλήτων τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης για συγκεκριμένα ρεύματα αποβλήτων. Στα διαγράμματα των Εικόνων 40, 41 απεικονίζονται δύο περιπτώσεις υπολογισμού, μια για απόβλητα συσκευασίας PS και μια για ανάμικτα πλαστικά πολυλεφινικά απόβλητα συσκευασίας. Οι θετικές τιμές στα διαγράμματα αντικατοπτρίζουν το κόστος, ενώ οι αρνητικές τιμές αντικατοπτρίζουν τα έσοδα. Το συνολικό κόστος της διαχείρισης των αποβλήτων σε επίπεδο σεναρίου υπολογίστηκε ως η διαφορά μεταξύ του αθροίσματος του κόστους που σχετίζεται με την πορεία διαχείρισης και των εσόδων που προκύπτουν από την πώληση τυχόν προϊόντων που προκύπτουν από την εν λόγω πορεία. Οι συνεισφορές στο κόστος συγκεντρώθηκαν σε έξι κατηγορίες που αντιπροσωπεύουν τις κύριες διαδικασίες και δραστηριότητες των σεναρίων που διερευνήθηκαν και περιλαμβάνουν την: μεταφορά, επεξεργασία, αποτέφρωση, επεξεργασία υπολειμμάτων, υποκατάσταση ενέργειας, υποκατάσταση υλικών.



Εικόνα 40: Συμβατικό κόστος κύκλου ζωής για τη διαχείριση 1 τόνου διαλεγμένων αποβλήτων συσκευασίας PS [61].

Απο την ανάλυση της Εικόνας 40 παρατηρείται ότι η αποτέφρωση με ανάκτηση ενέργειας οδηγεί στην μεγαλύτερη εξοικονόμηση για την διαχείριση των αποβλήτων συσκευασίας PS ακολουθούμενη απο την μηχανική ανακύκλωση και τέλος με την χημική ανακύκλωση να οδηγεί

σε καθαρό κόστος. Η μέθοδος χημικής ανακύκλωσης που εξετάζεται εδώ είναι πυρόλυση υποβοηθούμενη με αποπολυμερισμό. Βασικές συνεισφορές στο κόστος: Η μηχανική ανακύκλωση συνεπάγεται μετρίως χαμηλότερο κόστος επεξεργασίας σε σχέση με τη χημική ανακύκλωση, ενώ επιτυγχάνει μεγαλύτερα έσοδα από την υποκατάσταση υλικών. Αυτό οφείλεται στην υψηλότερη απόδοση (70%) που επιτυγχάνεται για το κύριο προϊόν από τη μηχανική ανακύκλωση, δηλαδή το αναγεννημένο PS, σε σύγκριση με το στυρένιο που παράγεται μέσω της χημικής ανακύκλωσης (47%), καθώς και στην υψηλότερη τιμή πώλησης του αναγεννημένου PS σε σύγκριση με το στυρένιο. Για την ανάκτηση ενέργειας, το συνολικό ισοζύγιο δείχνει καθαρή εξοικονόμηση επειδή τα έσοδα που σχετίζονται με την ενέργεια που ανακτάται από τα απόβλητα συσκευασίας PS αντισταθμίζουν το κόστος διαχείρισης των αποβλήτων όπως θεωρήθηκε στην έρευνα [61].



MR-I: MPO, PP and HDPE regranulate production; MR-II: MPO agglomerate production; ER: incineration; CR-I: conventional pyrolysis; CR-II: conventional pyrolysis; CR-III hydrothermal pyrolysis

Εικόνα 41: Συμβατικό κόστος κύκλου ζωής για τη διαχείριση 1 τόνου διαλεγμένων αποβλήτων εύκαμπτων συσκευασιών Mixed Plastic Olefins [61].

Όλα τα σενάρια μηχανικής και χημικής ανακύκλωσης συνεπάγονται σημαντικό κόστος για την επεξεργασία, λόγω του λειτουργικού κόστους αν και το κόστος κεφαλαίου είναι επίσης σημαντικό. Το κόστος αυτό δεν αντισταθμίζεται από τα έσοδα από την ανάκτηση υλικών και ενέργειας, με αποτέλεσμα να προκύπτει καθαρό κόστος. Για παράδειγμα τα έσοδα από την υποκατάσταση υλικών από τη μηχανική ανακύκλωση είναι χαμηλότερα από τα CR-I και CR-III λόγω της μέτριας απόδοσης όσον αφορά την ανάκτηση υλικών (41-42%), και των συγκριτικά χαμηλότερων τιμών των κύριων ανακυκλωμένων υλικών. Αντίθετα, για την ανάκτηση ενέργειας

το συνολικό ισοζύγιο δείχνει καθαρή εξοικονόμηση επειδή τα έσοδα που συνδέονται με την ενέργεια που ανακτάται από τα απόβλητα εύκαμπτων συσκευασιών ΜΡΟ αντισταθμίζουν το κόστος επεξεργασίας των αποβλήτων [61].

Σε συνέχεια της έρευνας απο τους Garcia et al. (2023) [61] προσπάθησαν να υπολογίσουν τα CAPEX και OPEX διάφορων χημικών διεργασιών ανακύκλωσης και με την βοήθεια των προαναφερθέντων και των τιμών ανα τόνο προϊόντων feedstock να προσδιορίσουν το καθαρό εισόδημα των διαφόρων χημικών διεργασιών. Σημειώνεται ότι τα CAPEX και OPEX της βιβλιογραφίας με αυτά απο τους συμμετέχοντες της έρευνας έχουν τεράστια διαφορά για την πυρόλυση ανάμικτων πλαστικών αποβλήτων. Τα αποτελέσματα της έρευνας παρουσιάζονται στον Πίνακα 9 παρακάτω. Στον πίνακα όλα τα υπολογιζόμενα δεδομένα είναι συνδυασμός απο στοιχεία της βιβλιογραφίας και της έρευνας.

*Πίνακας 9: Καθαρό εισόδημα των διαφόρων τρόπων χημικής ανακύκλωσης. Πρώτη στήλη: σενάριο 50%: χαμηλότερη τιμή πρώτων υλών απο των αναφερθέντων, Δεύτερη στήλη: σενάριο υψηλών τιμών πρώτης ύλης, Τρίτη στήλη: υπολογιζόμενες τιμές βάσει ανάλυσης LCC [61].*

Pathway	Net income (low feedstock price) (€/t)	Net income (high feedstock price) (€/t)	Net income (LCC values, high feedstock price) (€/t)
Dissolution (average)	184	100	305
Glycolysis (average)	87	-21	403
Methanolysis (average)	-63	-171	-223
Pyrolysis (partial average <sup>35</sup> )	-161	-305	-92
Gasification (literature)	-357	-501	-501

Η πυρόλυση, η μεθανόλυση και η αεριοποίηση έχουν αρνητικό καθαρό εισόδημα σε όλα τα σενάρια. Η γλυκόλυση και η διάλυση, αντίθετα, έχουν πάντα θετικό καθαρό εισόδημα, εκτός απο τη γλυκόλυση στο σενάριο υψηλής τιμής πρώτης ύλης, όπου το καθαρό εισόδημα είναι αρνητικό. Η πυρόλυση και η αεριοποίηση αφορά αναμικτά ρεύματα πλαστικών και οι λοιπές μέθοδοι, επεξεργασία διογκωμένου πολυστυρενίου (EPS). Όπως αναφέρεται υπάρχει μεγάλο χάσμα μεταξύ δεδομένων της βιβλιογραφίας με αυτά της έρευνας, π.χ. χρησιμοποιήθηκαν εξ ολοκλήρου βιβλιογραφικά δεδομένα και η μέθοδος της διάλυσης και η γλυκόλυσης είχαν αρνητικά

εισοδήματα. Για αυτό τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών λόγω της ρευστότητας των στοιχείων αποτελούν ενδεικτικές συγκρίσιμες τιμές.

Βασισμένοι στην θεωρητική προσέγγιση προχώρησαν στον υπολογισμό της breakeven τιμής του αργού πετρελαίου που συσχετίζεται με την τιμή της νάφθας (η οποία είναι από τα κύρια προϊόντα πυρόλυσης) ώστε η πυρόλυση να επιτύχει θετικό πρόσημο εσόδων. Θεωρείται ότι αύξηση της τιμής του αργού πετρελαίου κατά 1% μεταφράζεται σε μια αύξηση της τιμής της νάφθας κατά 0,96%. Τα θεωρητικά υπολογιζόμενα έσοδα της πυρόλυσης πρέπει να αυξηθούν 75% ως εκ τούτου η σχετική αύξηση των τιμών του αργού πετρελαίου θα είναι 78,1%. Λαμβάνοντας υποψήν ως βάση τη μέση τιμή του αργού πετρελαίου BRENT το 2021, η τιμή του αργού πετρελαίου στην οποία η πυρόλυση επιτυγχάνει θετικό καθαρό εισόδημα είναι περίπου 126 USD/βαρέλι. Χρονολογικά και θεωρητικά ορίστηκε το 2033 σαν έτος επίτευξης της τιμής από την έρευνα.

Οι Larrain et al. (2021) [63] εκτίμησαν η μηχανική ανακύκλωση θα παραμείνει ασύμφορη στην Ευρώπη για ένα διάστημα 15 ετίας, εκτός εάν οι τιμές του πετρελαίου αυξηθούν αισθητά ή υπάρξει πολιτική στήριξης. Οι μονάδες χημικής ανακύκλωσης αναφέρεται ότι επιτυγχάνουν κερδοφορία μόνο με μεγάλες ποσότητες πλαστικών της τάξης των 50-100 kt [64]. Ωστόσο η πυρόλυση που παρουσιάζεται ως η καλύτερη μέθοδος χημικής ανακύκλωσης δεν θα είναι ελκυστική εάν οι τιμές του πετρελαίου είναι χαμηλότερες των 100 USD/βαρέλι [64].

## 6.2. Σύνοψη

Από τα στοιχεία της έρευνας παραπάνω προκύπτει ότι στα δύο σενάρια, ένα για διαχείριση πολυστυρενίου και το άλλο για ανάμικτες συσκευασίες πολυολεφίνων η αποτέφρωση είναι η πιο οικονομική οδός με επόμενη την μηχανική ανακύκλωση ή την χημική ανάλογα την περίπτωση και τις παραδοχές υπολογισμού. Από τον θεωρητικό υπολογισμό των CAPEX και OPEX για τον προσδιορισμό των εσόδων η χημική ανακύκλωση με αεριοποίηση και πυρόλυση ήταν σε όλα τα σενάρια τιμών αρνητική. Γενικά αναφέρεται έλλειψη στοιχείων και διαφάνεια αυτών π.χ. η μεγάλη διαφορά θεωρητικών τιμών με αναφερόμενες τιμές από την έρευνα για την πυρόλυση. Τέλος διασαφηνίζεται η συσχέτιση μεταξύ τιμών αργού πετρελαίου και βιωσιμότητας χημικής ανακύκλωσης μέσω των τιμών νάφθας.

## 7. Μελλοντικές προβλέψεις χημικής ανακύκλωσης και ανάλυση σκοπιμότητας μονάδας στον Ελλαδικό χώρο

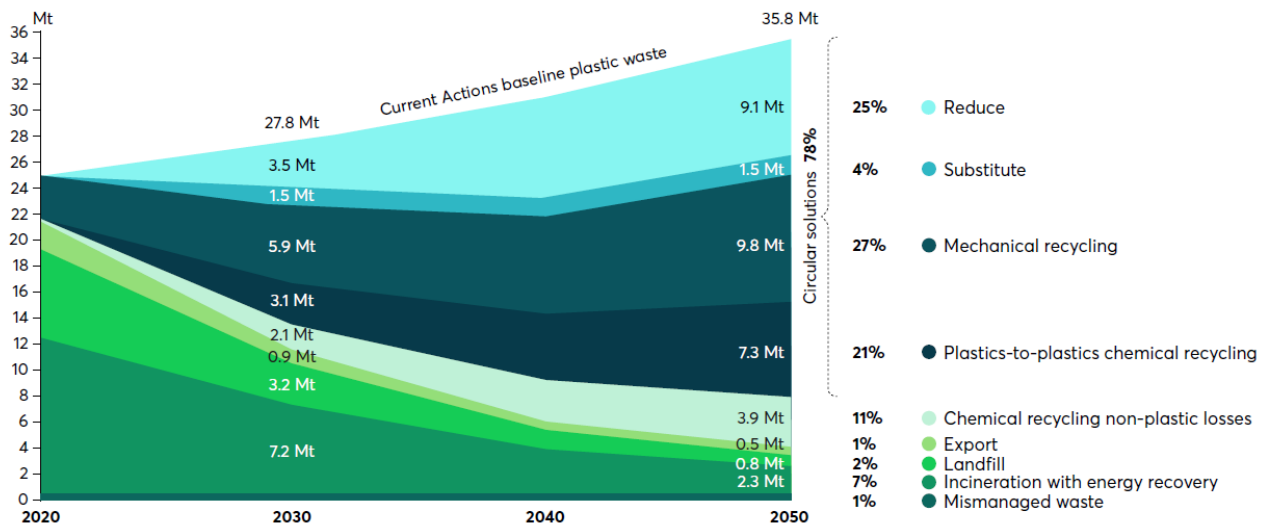
### 7.1. Μελλοντικές προβλέψεις χημικής ανακύκλωσης

Το 2018 η Κίνα και άλλες χώρες απαγόρευσαν τις εισαγωγές πλαστικών αποβλήτων λόγω του ότι στις παραπάνω χώρες κατέληγαν είτε χαμηλής ποιότητας πλαστικά ή πλαστικά των οποίων η ανακύκλωση ήταν εξαιρετικά δύσκολη με αποτέλεσμα σημαντικοί όγκοι πλαστικών αποβλήτων να κατέληγαν είτε για καύση είτε για ταφή. Εκ τότε ανανεώθηκε και η συνθήκη της Βασιλείας (Basil Convection) η οποία περιέλαβε τους περιορισμούς μετακίνησης αποβλήτων και ορισμένα είδη πλαστικών αποβλήτων χαμηλής ποιότητας που ανακυκλώνονται δύσκολα ή των οποίων ο βαθμός καθαρότητας είναι χαμηλός. Δεδομένων των απαγορεύσεων δημιουργήθηκε σε μεγαλύτερο βαθμό η ανάγκη αύξησης διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων στην ΕΕ [27],[66]. Επίσης με τους αυστηρούς στόχους για ανακύκλωση που έχει θέσει εναλλακτικές μέθοδοι όπως η χημική ανακύκλωση έρχεται πάλι στο προσκήνιο αυτήν την φορά με νέα δεδομένα.

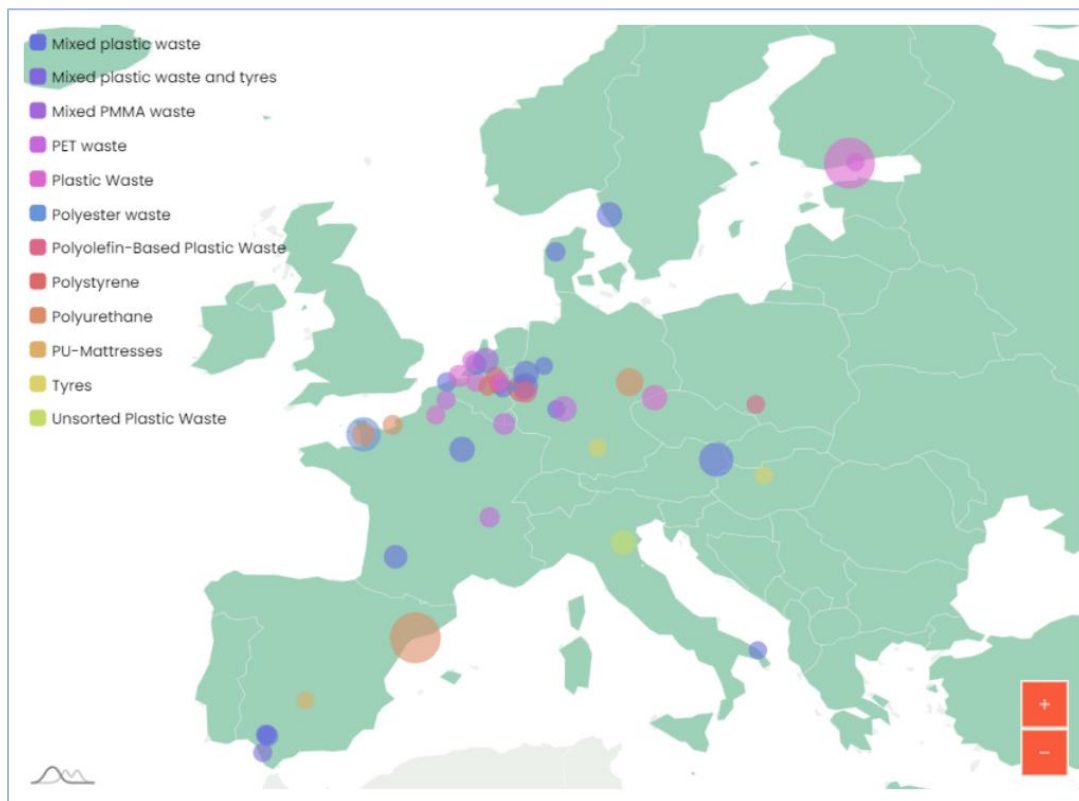
Όπως αναφέρει το Systemiq [32] οι προβλέψεις για χημική ανακύκλωση σε ένα σενάριο της υπάρχουσας πολιτικής της ΕΕ το 2030 θα καταλαμβάνει ένα ποσοστό του 4% επί του 30% της κυκλικής οικονομίας. Πιο συγκεκριμένα αναφέρει ότι το 2025 τα χημικά ανακυκλωμένα θα είναι 0.4 Mt και το 2030 1 Mt σπο 0.2 Mt που αναφέρεται το 2020.

Σε ένα βέλτιστο κυκλικό σενάριο όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 42 παρακάτω με 78% κυκλικότητα το 2050 η χημική ανακύκλωση καταλαμβάνει το 21% επί του συνόλου. Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι το 2030 στο βέλτιστο σενάριο θα ανακυκλώνονται 3.1 Mt και το 2050 7.3 Mt.

Η Plastics Europe σε άρθρο της [65] αναφέρει ότι τα μέλη του οργανισμού σκοπεύουν να επενδύσουν 8 δισεκατομμύρια ευρώ στην αγορά της χημικής ανακύκλωσης ώστε να ανακυκλώνονται χημικά το 2025 0.9 Mt πλαστικών και το 2030 2.8 Mt αντίστοιχα. Στην Εικόνα 43 απεικονίζονται οι προγραμματισμένες επενδύσεις μονάδων περιλαμβανομένων και των πιλοτικών project στην Ευρώπη.



Εικόνα 42: Σενάριο κυκλικότητας και πλαστικών αποβλήτων 2020-2050 (Mt) [32].



Εικόνα 43: Προγραμματισμένες επενδύσεις μονάδων χημικής ανακύκλωσης στην Ευρώπη, δεδομένα Μάιος 2023 [65].

Απο τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι τα θεωρητικά δεδομένα δείχνουν ότι η χημική ανακύκλωση έχει μέλλον στην ΕΕ. Αυτό εν μέρη επιβεβαιώνεται και από την προσπάθεια που γίνεται από μερικές εταιρείες να παράξουν προϊόντα με χημικά ανακυκλωμένο υλικό όπως αναφέραμε παραπάνω.



## 7.2. Σκοπιμότητα μονάδας χημικής ανακύκλωσης Ελλάδα

Απο την παραπάνω βιβλιογραφική έρευνα συμπεραίνουμε ότι στην περίπτωση της Ελλάδας η κατασκευή μιας μονάδας χημικής ανακύκλωσης δεν θα πρέπει να είναι ο πρωταρχικός στόχος μας για το εγγύς μέλλον. Η τεχνολογία της χημικής ανακύκλωσης και ιδιαίτερα της πυρόλυσης είναι στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης και αμφιταλαντεύεται ανάμεσα στο proof of concept και το commercial scalability της σε ότι αφορά την ανακύκλωση ανάμικτων πλαστικών ρευμάτων. Εξάλλου η χημική ανακύκλωση όπως έχει αναφερθεί δύναται να λειτουργήσει συμπληρωματικά της μηχανικής για τα δύσκολα ρεύματα ανακύκλωσης. Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια η Ελλάδα θα δυσκολευτεί να πιάσει τους Ευρωπαϊκούς στόχους με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα διαχείρισης (μηχανική ανακύκλωση κ.α.) που είναι εμπορικά για πολύ καιρό. Το να επενδυθούν χρήματα σε μια πολύπλοκη τεχνολογία της οποίας τα δεδομένα περι οικονομικών, περιβαλλοντικών επιπτώσεων, λειτουργικών παραμέτρων σπανίζουν δεν είναι και ότι πιο φρόνιμο προς ώρας. Αντί αυτού το επενδυτικό κόστος θα πρέπει να επενδυθεί στην ενδυνάμωση της ευαισθητοποίησης της κοινωνίας περι ρύπανσης πλαστικών αποβλήτων με αυστηρότερα κριτήρια και κίνητρα για την διαχείριση των προσωπικών αποβλήτων του καθενός ώστε να αλλάξει ριζικά η κουλτούρα. Θυμίζεται ότι η ΕΕ για τον στόχο μείωση απόθεσης αποβλήτων προς ταφή μας δίνει ποσοστό επιτυχίας 0%. Τέλος να επισημανθεί ότι στην Ελλάδα δεν υπάρχουν αποτεφρωτήρες για ανάκτηση ενέργειας πλύν ενός μικρού ποσοστού αποβλήτων της τάξης του 2% που καίγεται στους κλιβάνους των τσιμεντοβιομηχανιών.

Στο μελλοντικό σενάριο που θα επιλέγαμε την εγκατάσταση μιας μονάδας χημικής ανακύκλωσης πυρόλυσης στην Ελλάδα θα ήταν λογικό απο πλευρά τοποθεσίας και όχι περιβαλλοντικών επιπτώσεων να τοποθετηθεί στην Δυτική Αττική. Αυτό απορρέει απο το γεγονός ότι τα αστικά απόβλητα υπάρχουν σε μεγάλο όγκο και ότι κοντά υπάρχουν διυλιστηριακές μονάδες που θα μπορούσαν να επεξεργαστούν το παραγόμενο "πετρέλαιο". Να σημειωθεί επίσης οτι τεχνολογίες αεριοποίησης και θερμικής πυρόλυσης υπάρχουν και λειτουργούν στον Ελλαδικό χώρο σε διυλιστηριακές μονάδες για επεξεργασία κλασμάτων αργού άρα κατα κάποιο τρόπο υπάρχει μια μορφή τεχνογνωσίας και γνώσης προβλημάτων που θα μπορούσαν να προκύψουν.

## 8. Αποτελέσματα και συζήτηση

Στο πλαίσιο της εργασίας έγινε προσπάθεια διερεύνησης και απάντησης των ερευνητικών ερωτημάτων που ειπώθηκαν στα εισαγωγικά κεφάλαια. Απαντήθηκαν όλα στο βαθμό και στο βάθος της βιβλιογραφικής έρευνας που διεξήχθη. Παρακάτω θα συγγραφεί μια παράγραφο που εσωκλείει τα κύρια σημεία της έρευνας.

Το κομμάτι της διαχείρισης των πλαστικών αποβλήτων όπως αποτυπώνεται και απο τα νούμερα είναι ένα αγκάθι για τον πλανήτη μας και τα ημιτελή αποτελέσματα της διαφαίνονται στα βαθύτερα σημεία των ωκεανών και σε κάθε σημείο στεριάς. Η παραγωγή πλαστικών και αντίστοιχα αποβλήτων ταυτόχρονα έχει αυξηνητική τάση και η κινητήριος δύναμη του μέλλοντος θα είναι η οικονομική ευημερία αναπτυσσόμενων κρατών. Η μηχανική ανακύκλωση είναι η επικρατέστερη μέθοδο διαχείρισης στην σημερινή εποχή σε σχέση με την αναδυόμενη χημική αλλά αντιμετωπίζει προβλήματα διαχείρισης μικτών πλαστικών αποβλήτων, υποβαθμίζει την ποιότητα των πλαστικών και δεν παράγει στις περισσότερες περιπτώσεις πλαστικά ικανά για εφαρμογές τροφίμων. Σύμφωνα με τα στοιχεία στο την Plastics Europe το 2020 η Ευρώπη παρήγαγε 29.5 Mt μετά καταναλωτικών πλαστικών τα οποία διαχειρίστηκε κάνοντας 35% μηχανική ανακύκλωση, 23% ταφή και 45% αποτέφρωση για ανάκτηση ενέργειας. Στα ελληνικά δεδομένα η εικόνα είναι πιο θολή καθώς αμφισβητείται η εγγυρότητα των στοιχείων από την ΕΕ και γενικά δεν συνάβουν μεταξύ τους. Γενικά όμως φαίνεται ότι το 2019 παρήγαμε ~781 kt πλαστικά απόβλητα από τα οποία συλλέξαμε το 15.3%. Με στοιχεία από την Plastics Europe του 2020 φαίνεται ότι η ταφή απορριμάτων είναι η επικρατέστερη μέθοδος διαχείρισης πλαστικών στην Ελλάδα συνεχιζόμενη από 25 % μηχανική ανακύκλωση και 2% ανάκτηση ενέργειας. Σε ότι αφορά τα πολυμερή πιο συγκεκριμένα από στοιχεία του 2015 φαίνεται ότι στις πρώτες θέσεις ανα τύπο πολυμερούς στα πλαστικά απόβλητα βρίσκονται το LDPE, PP, HDPE κλπ, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από δειγματοληπτικές έρευνες σε αστικά απόβλητα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι τα συγκεκριμένα πλαστικά αποτελούν την ναυαρχίδα του τομέα των συσκευασιών που απαρτίζουν παντού την καθημερινή μας ζωή. Για την πάταξη του προβλήματος των πλαστικών μέσα από άλλες ενέργειες και οδηγίες η ΕΕ έχει θέσει στόχους ανακύκλωσης πλαστικών και άλλων υλικών συσκευασίας, αστικών απορριμάτων, μείωσης υγειονομικής ταφής κ.α. για τα κράτη μέλη της οι οποίοι μέσα από αναθεωρήσεις στο τρόπο μέτρησης ανακυκλωμένων προϊόντων γίνονται όλο και πιο δύσκολοι. Η Ελλάδα βάσει την έρευνα της ΕΕ αναφέρεται ότι κινδυνεύει να μην πιάσει τους στόχους ανακύκλωσης και αστικών απορριμάτων καθώς και θεωρείται ακατόρθωτο να πιάσει τον στόχο για μείωση υγειονομικής ταφής. Προτεινόμενη και

αναδυομένη λύση αποτελεί η χημική ανακύκλωση των πλαστικών που δίνει περισσότερες εναλλακτικές για την διαχείριση του γραμμικού συστήματος σε μοντέλο κυκλικής οικονομίας. Η ΕΕ στο πλαίσιο της χημικής ανακύκλωσης δεν θεωρεί την παραγωγή καυσίμων από πλαστικά χημική ανακύκλωση όπως άλλα κράτη παγκοσμίως. Υπάρχουν εμπορικές τεχνολογίες όπως η πυρόλυση, η αεριοποίηση και ο αποπολυμερισμός καθώς και αρκετές σε πειραματικό στάδιο που τείνουν να λύσουν τα προβλήματα των εμπορικών. Για την επεξεργασία μικτών αποβλήτων που αποτελεί και το αγκάθι της διαχείρισης πλαστικών η πυρόλυση και η αεριοποίηση είναι ένα βήμα μπροστά. Η πυρόλυση φαίνεται ότι είναι η πιο ανεπτυγμένη τεχνολογία έχοντας και εμπορικές proof of concept μονάδες οι οποίες σε συνεργασία με εταιρείες παραγωγής πλαστικών διοχετεύουν προϊόντα με χημικά ανακυκλωμένο περιεχόμενο στην αγορά. Οι εν λόγω εταιρείες πιέζουν την ΕΕ να θεσμοθετήσει οδηγία για χρήση του ισοζυγίου μάζας στην περίπτωση των χημικά ανακυκλωμένων υλικών καθώς δεν υπάρχουν οι υποδομές ούτε η ποσότητα για να σταθεί σαν ξεχωριστή παραγωγή ακόμα. Αυτό υποστηρίζουν θα βοηθήσει στην μετάβαση της βιομηχανίας και θα αποφευχθεί το υπάρχον σύστημα ιδιωτικών εταιρειών πιστοποίησης που η κάθε μια έχει τα δικά της πρότυπα. Η περιβαλλοντική και η οικονομική συμπεριφορά της χημικής ανακύκλωσης είναι ακόμη ένα θολό τοπίο καθώς υπάρχει έλλειψη στοιχείων και οι περισσότερες μελέτες παράγουν ενδεικτικά αποτελέσματα. Πρέπει να υπάρξει μεγαλύτερη διαφάνεια των στοιχείων και των μελετών και επίσης πιο εξειδικευμένες μελέτες για την παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Ως εκ τούτου από τις υπάρχουσες μελέτες περιβαλλοντικά ενδεικτικά φαίνεται ότι χημική ανακύκλωση παράγει λιγότερους ρύπους από την αποτέφρωση και περισσότερους από μηχανική ανακύκλωση. Ως προς την σύγκριση μεταξύ παραγωγής παρθένου υλικού από ορυκτούς πόρους η χημική ανακύκλωση παράγει λιγότερους. Από οικονομική απόψεως η αποτέφρωση είναι η πιο οικονομικά ωφέλιμη μέθοδος ανάλογα βέβαια και τα ρεύματα αποβλήτων που επεργάζεται. Η χημική ανακύκλωση σε όλα τα σενάρια πυρόλυσης και αεριοποίησης είχε αρνητικό εισόδημα με βάση ερευνητικά και βιβλιογραφικά δεδομένα. Υπάρχει καθαρή συσχέτιση μεταξύ τιμών αργού πετρελαίου και οικονομικής βιωσιμότητας της χημικής ανακύκλωσης. Οι προβλέψεις δείχνουν ότι θα υπάρξει ανάπτυξη της τεχνολογίας χημικής ανακύκλωσης στο εγγύς μέλλον. Η χημική ανακύκλωση δεν πάει να αντικαταστήσει την μηχανική παρά μόνο να την συμπληρώσει ώστε να πετύχουν μεγαλύτερα ποσοστά ανακύκλωσης μαζί.

Τέλος σε ότι αφορά την σκοπιμότητα κατασκευής μονάδας χημικής ανακύκλωσης στην Ελλάδα δεν θεωρώ ότι θα πρέπει να είναι ο πρωταρχικός σκοπός μας προς το παρόν σαν εναλλακτική μέθοδο διαχείρισης καθώς τα στοιχεία σπανίζουν και χρειάζεται περισσότερη έρευνα και διαφάνεια για μια τέτοια επένδυση.

Σαν περαιτέρω έρευνα θα είχε νοήμα να μελετηθεί πιο ειδικά εάν οι μονάδες ανακύκλωσης ή ΚΔΑΥ πληρούν τις προϋποθέσεις ποσοτήτων για χημική ανακύκλωση στην Ελλάδα σαν προαπαιτούμενη έρευνα για μια πιο ειδική τεχνικοοικονομική ανάλυση όταν τα στοιχεία για τις εκάστοτε τεχνολογίες γίνουν ξεκάθαρα. Θα μπορούσε να συνταχθεί ένα πλάνο τοποθεσίας και γενικά εγκατάστασης της υποτιθέμενης μονάδας.

## 9. Βιβλιογραφία

- [1] Vasileios Rizos, Patricia Urban, Edoardo Righetti, Amin Kassab, Chemical Recycling of Plastics Centre for European Policy Studies, CEPS In-Depth Analysis, (2023)-11
- [2] <https://theoceancleanup.com/great-pacific-garbage-patch/> (Accessed 9/2023)
- [3] <https://education.nationalgeographic.org/resource/great-pacific-garbage-patch/> (Accessed 9/2023)
- [4] <https://education.nationalgeographic.org/resource/plastic-bag-found-bottom-worlds-deepest-ocean-trench/> (Accessed 9/2023)
- [5] [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic\\_Chemistry/Supplemental\\_Modules\\_\(Organic\\_Chemistry\)/Polymers/Polymer\\_Fundamentals](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Organic_Chemistry/Supplemental_Modules_(Organic_Chemistry)/Polymers/Polymer_Fundamentals) (Accessed 9/2023)
- [6] European Bioplastics, Mechanical Recycling, background (2020)
- [7] Kim Ragaert, Laurens Delva, Kevin Van Geem, Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste, Waste Management Volume 69, (2017), 24-58
- [8] The European Chemicals Agency, Chemical Recycling of Polymeric Materials from Waste in the Circular Economy, (2021)
- [9] <https://www.chemicalrecyclingeurope.eu/copy-of-about-chemical-recycling> (Accessed 9/2023)
- [10] Veena Sahajwalla, Vaibhav Gaikwad, The present and future of e-waste plastics recycling, Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry Volume 13, (2018), 102-107
- [11] [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en) (Accessed 9/2023)
- [12] Chemical Recycling in Spain:Fostering a Circular Future (2021)
- [13] <https://cefic.org/policy-matters/innovation/chemical-recycling/> (Accessed 9/2023)
- [14] Chemical Recycling: Greenhouse gas emission reduction potential of an emerging waste management route, Cefic, October (2020)
- [15] [https://environment.ec.europa.eu/strategy/plastics-strategy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/plastics-strategy_en) (Accessed 9/2023)
- [16] Circular Plastics Alliance, Roadmap to 10 Mt recycled content by 2025, September (2021)
- [17] [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en) (Accessed 9/2023)
- [18] <https://www.eea.europa.eu/publications/many-eu-member-states/> (Accessed 9/2023)
- [19] Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων, Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, (2020)
- [20] Εκτελεστική Απόφαση (ΕΕ) 2019/665 της Επιτροπής, 17η Απριλίου 2019, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης
- [21] NTCP & HTP, Recycling pathways of post-consumer plastic packaging waste in Europe, (2022) Rep. No: NTCP.2022.019

- [22] OECD Library, Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options
- [23] <https://www.genevaenvironmentnetwork.org/resources/updates/plastic-production-and-industry/> (Accessed 9/2023)
- [24] <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/> (Accessed 9/2023)
- [25] OECD Library, Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060
- [26] Plastics Europe, Plastics – The Facts 2022, Brussels: Plastics Europe (2022)
- [27] Ίδρυμα Οικονομικών & Βιομηχανικών Ερευνών, Ο κλάδος πλαστικών στην Ελλάδα-Συμβολή στην ελληνική οικονομία, προκλήσεις και προοπτικές ανάπτυξης, Δεκέμβριος (2019)
- [28] WWF, Η Πλαστική ρύπανση στην Ελλάδα (2019)
- [29] <https://www.statista.com/statistics/1339124/global-plastic-waste-generation-by-application/> (Accessed 9/2023)
- [30] <https://ourworldindata.org/grapher/plastic-waste-polymer> (Accessed 9/2023)
- [31] Lahtela, V.; Hyvärinen, M.; Kärki, T. Composition of Plastic Fractions in Waste Streams: Toward More Efficient Recycling and Utilization. *Polymers* (2019), 11, 69
- [32] “SYSTEMIQ (2022). ReShaping Plastics: Pathways to a Circular, Climate Neutral Plastics System in Europe.”
- [33] European Environment Agency, Early warning assessment related to the 2025 targets for municipal waste and packaging waste, Greece (2022)
- [34] European Environment Agency, Diversion of waste from landfill in Europe, Nov. (2022)
- [35] Martyna Solis, Semida Silveira, Technologies for chemical recycling of household plastics - A technical review and TRL assessment, *Waste Management*, (2020) 105,128-138
- [36] Daria Frączak, Chemical Recycling of Polyolefins (PE, PP): Modern Technologies and Products, (2021)
- [37] Martijn Broeren, Meis Uijttewaal and Geert Bergsma, Monitoring chemical recycling, How to include chemical recycling in plastic recycling monitoring?, CE Delft, March (2022)
- [38] [https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemcycling/FAQ\\_ChemCycling.html](https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemcycling/FAQ_ChemCycling.html) (Accessed 9/2023)
- [39] Arkadi Maisels, Andreas Hiller, Franz-Georg Simon Chemical Recycling for Plastic Waste: Status and Perspectives, *ChemBioEng Rev.* (2022),9, No. 6, 541–555
- [40] Plastic energy chemical recycling in practice
- [41] Record, Chemical and physico-chemical recycling of plastic waste, (2022)
- [42] <https://enerkem.com/company/facilities-projects/> (Accessed 9/2023)

- [43] [https://www.eep.ebara.com/en/business\\_technology/technology\\_3.html#:~:text=Ebara%20Ube%20Process%20Pressurized%20twin,%20high%2Dtemperature%20gasification%20furnace](https://www.eep.ebara.com/en/business_technology/technology_3.html#:~:text=Ebara%20Ube%20Process%20Pressurized%20twin,%20high%2Dtemperature%20gasification%20furnace) (Accessed 9/2023)
- [44] <https://ioniqa.com/applications/> (Accessed 9/2023)
- [45] [https://environment.ec.europa.eu/topics/chemicals/reach-regulation\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/chemicals/reach-regulation_en) (Accessed 9/2023)
- [46] <https://www.packworld.com/news/sustainability/article/21221095/magnum-tub-is-first-to-use-certified-circular-plastic> (Accessed 9/2023)
- [47] [https://www.sabic.com/en/Images/SABIC-Certified-Circular-Polymers-from-TRUCIRCLE-Portfolio-Final\\_tcm1010-26465.pdf](https://www.sabic.com/en/Images/SABIC-Certified-Circular-Polymers-from-TRUCIRCLE-Portfolio-Final_tcm1010-26465.pdf) (Accessed 9/2023)
- [48] <https://www.csregypt.com/en/knorr-in-new-recyclable-packs-to-cut-plastic-waste/> (Accessed 9/2023)
- [49] <https://www.sabic.com/en/news/25543-unilever-s-knorr-bouillon-powder-containers-made-with-sabics-certified-circular-pp> (Accessed 9/2023)
- [50] [https://www.sabic.com/en/Images/Tupperware-eco-straw-and-tumbler\\_tcm1010-22022.pdf](https://www.sabic.com/en/Images/Tupperware-eco-straw-and-tumbler_tcm1010-22022.pdf) (Accessed 9/2023)
- [51] <https://www.foodingredientsfirst.com/news/small-eco-step-mondelez-commits-to-5-recycled-plastic-for-philadelphia%20range.html#:~:text=03%20Jun%202020%20%2D%2D%2D%20Mondel%20C4%93z,according%20to%20the%20snacking%20giant> (Accessed 9/2023)
- [52] [https://www.repsol.com/imagenes/global/en/repsol\\_recyclex\\_english\\_version\\_tcm14-168282.pdf](https://www.repsol.com/imagenes/global/en/repsol_recyclex_english_version_tcm14-168282.pdf) (Accessed 9/2023)
- [53] [https://chemicals.basf.com/global/en/Monomers/polyamide\\_intermediates/sustainable\\_polyamide\\_solutions/ultramid\\_ccycled.html](https://chemicals.basf.com/global/en/Monomers/polyamide_intermediates/sustainable_polyamide_solutions/ultramid_ccycled.html) (Accessed 9/2023)
- [54] <https://www.vaude.com/de/en/blog/post/sustainable-outdoor-gear-made-from-recycled-waste-tires.html> (Accessed 9/2023)
- [55] <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2022/10/p-22-370.html> (Accessed 9/2023)
- [56] [https://chemicals.basf.com/global/en/Monomers/polyamide\\_intermediates/sustainable\\_polyamide\\_solutions/ultramid\\_ccycled.html#accordion\\_v2-79d6adff2d-item-e1f6868f2d](https://chemicals.basf.com/global/en/Monomers/polyamide_intermediates/sustainable_polyamide_solutions/ultramid_ccycled.html#accordion_v2-79d6adff2d-item-e1f6868f2d) (Accessed 9/2023)
- [57] <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2023/01/p-23-101.html> (Accessed 9/2023)
- [58] Exploration chemical recycling - Extended summary, CE Delft, January (2020)
- [59] Harish Jeswani, Christian Krüger, Manfred Russ, Maike Horlacher, Florian Antony, Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery, Science of The Total Environment, Volume 769, 15 May (2021)
- [60] Quantis, Life cycle assessment of plastic energy technology for the chemical recycling of mixed plastic waste, (2020)
- [61] Garcia-Gutierrez, P., Amadei, A.M., Klenert, D., Nessi, S., Tonini, D., Tosches, D., Ardente, F. and Saveyn, H., Environmental and economic assessment of plastic waste recycling A comparison of mechanical, physical, chemical recycling and energy recovery of plastic waste, Publications Office of the European Union, Luxembourg, (2023)

- [62] Keller, Florian; Voss, Raoul; Lee, Roh Pin, Overcoming Challenges of Life Cycle Assessment (LCA) & Techno-Economic Assessment (TEA) for Chemical Recycling, (2022)
- [63] Macarena Larrain, Steven Van Passel, Gwenny Thomassen, Bart Van Gorp, Trang T. Nhu, Sophie Huysveld, Kevin M. Van Geem, Steven De Meester, Pieter Billen, Techno-economic assessment of mechanical recycling of challenging post-consumer plastic packaging waste, Resources, Conservation and Recycling Volume 170, July (2021)
- [64] Josiane Nikiema, Zipporah Asiedu, A review of the cost and effectiveness of solutions to address plastic Pollution, Environmental Science and Pollution Research volume 29, pages 24547–24573 (2022)
- [65]<https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/recycling/chemical-recycling/> (Accessed 9/2023)
- [66][https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/joltreau\\_plastic\\_waste\\_after\\_chinas\\_ban\\_2022.pdf](https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/joltreau_plastic_waste_after_chinas_ban_2022.pdf) (Accessed 9/2023)
- [67] Homer C. Genuino, M. Pilar Ruiz, Hero J. Heeres, Sascha R.A. Kersten, Pyrolysis of mixed plastic waste (DKR-350): Effect of washing pre-treatment and fate of chlorine, Fuel Processing Technology, Aug. (2020), vol 233
- [68] <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/chemical-recycling-101.aspx> (Accessed 9/2023)



## Παράρτημα I

### CE Delft Survey [37]

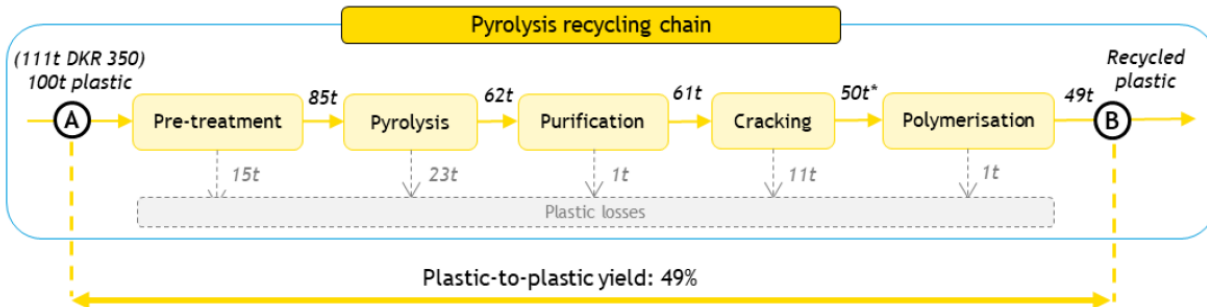
Το Ολλανδικό υπουργείο περιβάλλοντος ανέθεσε στον οργανισμό CE Delft [37] να διερευνήσει πως η χημική ανακύκλωση μπορεί να ενσωματωθεί στα ήδη υπάρχοντα συστήματα ανακύκλωσης τους. Ο οργανισμός από την πλευρά του κάλεσε τις επιχειρήσεις για συλλογή στοιχείων μέσα από μια μορφή ερωτηματολογίου και αναλύοντας τα δεδομένα υπολόγισε την απόδοση «plastic to plastic» για τις εμπορικές τεχνολογίες χημικής ανακύκλωσης.

Η απόδοση «plastic to plastic» ορίζεται ως η μάζα του ανακυκλωμένου πλαστικού που είναι έτοιμο για σύνθεση διαιρούμενη με τη μάζα του πλαστικού στα πλαστικά απόβλητα που αποστέλλονται στην ανακύκλωση μετά τη συλλογή και τη διαλογή. Τα σημεία αυτά αντιστοιχούν στα σημεία A και B στο σχήμα της Εικόνας 44 αντίστοιχα. Το σημείο A αναφέρεται ως "σημείο μέτρησης" και βρίσκεται μετά τη συλλογή των απορριπτόμενων πλαστικών και τη διαλογή τους σε τυποποιημένα κλάσματα. Το σημείο B αναφέρεται ως το σημείο όπου το ανακυκλωμένο πλαστικό είναι έτοιμο για ανάμειξη/ανακύκλωση.

Η απόδοση «plastic to plastic» αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη τεχνολογία ανακύκλωσης που λειτουργεί σε συγκεκριμένες συνθήκες. Η απόδοση μπορεί να επηρεαστεί από τις εφαρμοζόμενες τεχνολογίες, την πρώτη ύλη, τις συνθήκες λειτουργίας κ.λ.π. Επομένως είναι σημαντικό να γίνεται λεπτομερής καταγραφή των παραμέτρων υπολογισμού. Παρακάτω στην Εικόνα 44 αναλύεται λεπτομερώς η περίπτωση υπολογισμού της απόδοσης «plastic to plastic» ανακύκλωσης με την μέθοδο της πυρόλυσης ρεύματος ανάμικτων αποβλήτων DKR 350 χρησιμοποιώντας την μέθοδο της εξισορρόπησης μάζας για να κατανείμει το ανακυκλωμένο περιεχόμενο στην παραγωγή αιθυλενίου/PE. Το ρεύμα DKR 350 [67] είναι ένα μείγμα μετακαταναλωτικών πλαστικών που περιλαμβάνει PE, PP, PS, PET, πολυστρωματικά εύκαμπτα υλικά, μαζί με σημαντικές ποσότητες βιογενών και ανόργανων υπολειμμάτων και αλογόνων.

Επειδή το DKR 350 ενδέχεται ότι περιέχει 10% μη πλαστικά υλικά θεωρείται ότι έχουν 111 t αρχικά άρα ~100 t αναμικτα πλαστικά. Αρχικά όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 44 λόγω του ότι η πυρόλυση λειτουργεί καλύτερα με πολυλεφινικά πολυμερή οι ανεπιθύμητοι τύποι πολυμερών απομακρύνονται σε ένα στάδιο προεπεξεργασίας. Στην συνέχεια το ρεύμα αποστέλλεται προς πυρόλυση όπου παράγεται το «πετρέλαιο» και το άεριο πυρόλυσης που πολλές φορές χρησιμοποιείται για καύσιμο στην μονάδα. Το υγρό υδρογοναθράκων καθαρίζεται σε

επόμενο στάδιο για να μπορεί να συνδυαστεί με πετροχημική νάφθα στον steam cracker όπου έχουμε παραγωγή μεταξύ άλλων αιθελυνίου, το οποίο σε τελικό στάδιο οδηγείται προς πολυμερισμό PE. Τελικά απο τους 100 t ανάμικτων πλαστικών κατέληξαν να πολυμεριστούν οι 49 t άρα η υπολογισμένη απόδοση για την συγκεκριμένη μέθοδο με τις συγκεκριμένες παραμέτρους αγγίζει το 49%.



Εικόνα 44: Παράδειγμα υπολογισμού απόδοσης plastic to plastic στην περίπτωση πυρόλυσης ανάμικτων πολυμερών χρησιμοποιώντας την μέθοδο εξισορρόπησης μάζας [37].

Στον Πίνακα 10 απεικονίζονται όλα τα ποσοστά απόδοσης για τις διαφορετικές χημικές και μηχανικές τεχνολογίες ανακύκλωσης με τα συγκεκριμένα ρεύματα αποβλήτων.

Πίνακας 10: Υπολογισμένες ενδεικτικές αποδόσεις από πλαστικό σε πλαστικό για συστήματα χημικής ανακύκλωσης [37].

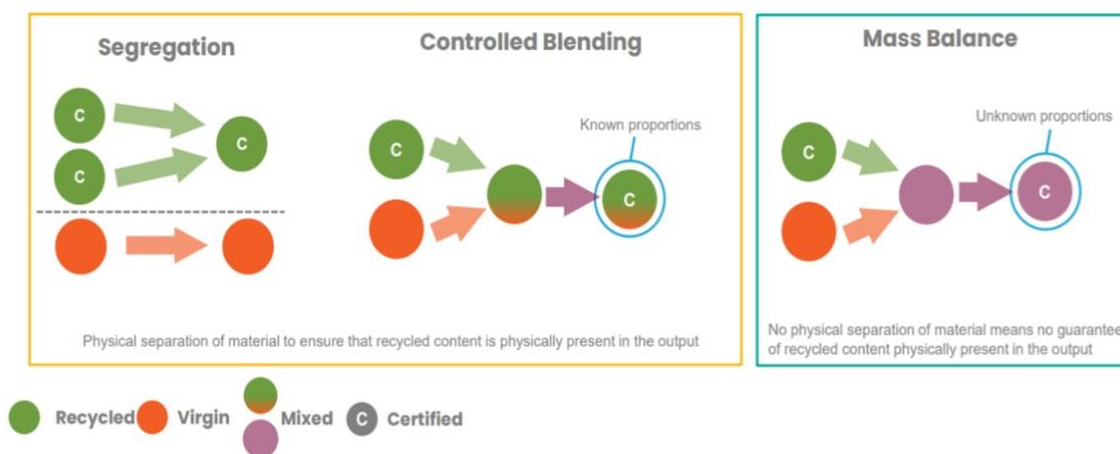
Technology	Number of respondents/sources	Plastic/feedstock type	Plastic-to-plastic yield	Remarks
Incineration with energy recovery	1	Any plastic	0%	
Mechanical recycling	2	LDPE/foils	78-97%	(Brouwer, et al., 2018) (CE Delft, 2021) Based on estimations and subject to uncertainties
	2	PP	94-100%	
	2	PET	95-100%	
	2	HDPE	95-100%	
	2	Mixed plastic waste	56-83%	
Solvent-based extraction	1	PS	100%	
Depolymerisation	2	PET	97%	
Pyrolysis	6	PE/PP/Mixed plastic waste/Foils	49%	Losses can occur during further sorting, pyrolysis itself and steam cracking. Plastic-to-plastic yield is valid when pyrolysis and downstream processes target plastic production (not fuel) and when mass balancing is applied to allocate recycled content to plastics.
Gasification	2	Mixed plastic waste	34% <sup>a</sup>	Plastic-to-plastic yield for conversion to polyolefins (PE or PP). Losses occur during gasification and conversion to final products. Yields correspond to situation where hydrogen is added during the process. Assumed a methanol to olefin conversion yield of 44% (based on chemical reaction). No losses during polymerisation assumed.

Απο την αναλυση του Πίνακα 10 παρατηρείται γενικά η υψηλή απόδοση των τεχνολογιών μηχανικής ανακύκλωσης όσο αφορά ρεύματα ομογενοποιημένων προϊόντων σε αντίθεση με ρεύματα ανάμικτων όπου η απόδοση μειώνεται. Για τα συγκεκριμένα ανάμικτα ρεύματα ενδεικτικά η χημική ανακύκλωση πετυχαίνει χαμηλότερα ποσοστά απόδοσης plastic to plastic με την πυρόλυση να κυμαίνεται γύρω στο 50 % και την αεριοποίηση στο 35%. Στην αντίπερα όχθη παρατηρείται ότι ο αποπολυμερισμός πετυχαίνει απόδοση 95+% με ομογενοποιημένα ρεύματα αποβλήτων.

## Παράρτημα II

### Μέθοδος ισοζυγίου μάζας [41]

Δεδομένου ότι υπάρχει γενικά ένα σημαντικό χάσμα μεταξύ της δυναμικότητας των υφιστάμενων βιομηχανικών εγκαταστάσεων και των αρχικών όγκων των ανακυκλωμένων υλικών, η μετατροπή 100% χημικά ανακυκλωμένων υλικών αν είναι εφικτή είναι τεχνικά και οικονομικά δύσκολη. Αυτό θα οδηγήσει στην "αραίωση" του ανακυκλωμένου υλικού με το ορυκτό υλικό. Ο όρος "ισοζύγιο μάζας" αναφέρεται σε ένα είδος μοντέλου αλυσίδας επιτήρησης. Τα μοντέλα αλυσίδας επιτήρησης είναι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά, την παρακολούθηση και τον έλεγχο πληροφοριών σχετικά με τα υλικά που εισέρχονται και εκείνα που εξέρχονται από ένα σύστημα. Η συμμαχία ISEAL αναφέρει ότι στο μοντέλο ισοζυγίου μάζας ελέγχεται ο όγκος του πιστοποιημένου προϊόντος που εισέρχεται στην επιχείρηση και ένας ισοδύναμος όγκος προϊόντος που εξέρχεται από την επιχείρηση μπορεί να πωληθεί ως πιστοποιημένος [41]. Μια απεικόνιση του ισοζυγίου μάζας απεικονίζεται στην Εικόνα 45 παρακάτω.



Εικόνα 45: Απεικόνιση μοντέλου ισοζυγίου μάζας [68].

Ο Γαλλικός Οργανισμός Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ADEME) σε έκθεση που δημοσίευσε επικεντρώνεται κυρίως στην εφαρμογή της προσέγγισης του ισοζυγίου μάζας στην πυρόλυση. Όπως αναφέρεται στην έκθεση, η ποσότητα των ελαίων πυρόλυσης που παράγονται σήμερα δεν επαρκεί για να είναι το μοναδικό υλικό που εισέρχεται σε έναν steam cracker. Συνεπώς, τα έλαια πυρόλυσης που προέρχονται από ανακυκλωμένα πλαστικά αποτελούν ένα πολύ περιορισμένο μέρος της εισόδου ενός steam cracker σε σύγκριση με τη συμβατική νάφθα. Ως εκ τούτου, οι παραγωγοί πλαστικών οδηγούνται στη χρήση της προσέγγισης του ισοζυγίου μάζας. Ενώ η πιστοποίηση ISO 22095:2020 (Chain of custody - General terminology and models) παρέχει ορισμένες γενικές κατευθυντήριες γραμμές για το ισοζύγιο μάζας, δεν υπάρχει ακόμη κανένα διεθνώς αναγνωρισμένο πρότυπο που να καθορίζει ποιές προϋποθέσεις πρέπει να τηρούνται για τη χρήση αυτής της προσέγγισης. Ελλείψει ενός τέτοιου προτύπου, έχουν δημιουργηθεί ιδιωτικά συστήματα πιστοποίησης για την πιστοποίηση ενός προϊόντος που αναπτύχθηκε βάσει μιας προσέγγισης ισοζυγίου μάζας (π.χ. ISCC, RED Cert GmbH, UL κ.λπ.). Στο πλαίσιο αυτό, ένα από τα κύρια ζητήματα που επισημαίνει η ADEME είναι το γεγονός ότι κάθε μεμονωμένο σύστημα πιστοποίησης θεσπίζει το δικό του σύνολο απαιτήσεων για το ισοζύγιο μάζας [41].