



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΤΩΝ
ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΩΝ ΧΥΜΟΥ ΤΕΡΕΦΘΑΛΙΚΟΥ ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ (PET)
ΚΑΙ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ Tetra Pak

ΜΑΡΙΝΑ ΣΤΡΑΜΑΡΚΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΑΡΑΛΕΚΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020

Συγκριτική Μελέτη Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος των Συσκευασιών Χυμού Τερεθφαλικού Πολυαιθυλενίου
(PET) και Πολλαπλών Στρωμάτων Tetra Pak

Στους γονείς μου,
Θεόδωρο και Μαργαρίτα

Μαρίνα Στραμάρκου

Ευχαριστίες

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2019-2020 στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Τεχνοοικονομικά Συστήματα» στο Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης Και Τεχνολογίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Δημήτριου Καραλέκα.

Με την ευκαιρία ολοκλήρωσης αυτής της προσπάθειας, θα ήθελα να ευχαριστήσω εκ βαθέων τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Δημήτρη Καραλέκα, για την εμπιστοσύνη και την ενθάρρυνση που μου προσέφερε για την ανάθεση του εν λόγω θέματος και την συνεχή στήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησής του. Οι πολύτιμες γνώσεις και οι συμβουλές του αποτέλεσαν καταλυτικό παράγοντα για την πραγματοποίηση της παρούσας Εργασίας.

Πολλά θερμά ευχαριστώ θα ήθελα να πω στον Δόκτωρ Χρήστο Μπουκουβάλα, ο οποίος ανήκει στο εργαστηριακό διδακτικό προσωπικό του ΕΜΠ και ήταν πάντα πρόθυμος και διαθέσιμος να με βοηθήσει στην υλοποίηση της Εργασίας και να επιλύσει τυχόν απορίες και προβληματισμούς μου. Η βοήθειά του ήταν ανεκτίμητη και η συνεργασία μας, από μέρους μου, ήταν άψογη. Επιπλέον, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στις μεταδιδακτορικές ερευνήτριες Παναγιώτα Ελένη και Σοφία Παπαδάκη.

Τέλος, θα ήθελα από καρδιάς να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Θεόδωρο και Μαργαρίτα, για την ολόψυχη αγάπη τους και την ενθάρρυνσή τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και τη συγγάτοικο και φίλη μου, Εύα, για τη στήριξή της.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη	1
Abstract	2
Κεφάλαιο 1. Συσκευασίες Χυμών	3
1.1. Εισαγωγή	3
1.2. Συσκευασίες PET	6
1.2.1. Εισαγωγή	6
1.2.2. Παραγωγή PET	6
1.2.3. Πλεονεκτήματα PET	7
1.2.4. Εφαρμογές PET	8
1.2.5. Εφαρμογές σε χυμούς.....	9
1.2.6. Παραγωγή περιεκτών PET	10
1.2.7. Ανακύκλωση συσκευασιών PET	11
1.2.8. Μειονεκτήματα Χρήσης PET σε συσκευασίες χυμών.....	13
1.3. Συσκευασίες Tetra Pak	14
1.3.1. Εισαγωγή	14
1.3.2. Σύνθεση και στρώματα Tetra Pak	14
1.3.3. Παραγωγή Tetra Pak	15
1.3.4. Ιδιότητες και Πλεονεκτήματα Tetra Pak	16
1.3.5. Εφαρμογές Tetra Pak.....	17
1.3.6. Μειονεκτήματα Tetra Pak	18
1.3.7. Ανακύκλωση Tetra Pak	18
Κεφάλαιο 2. Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής	22
2.1. Εισαγωγή	22
2.2. Ορισμός, Αρχές και Σκοπός της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής	25
2.3. Μεθοδολογία και Στοιχεία της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής	27
2.3.1. Σκοπός και πλαίσιο μελέτης	28
2.3.2. Απογραφή κύκλου ζωής.....	29
2.3.3. Εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων	31
2.3.4. Εκτίμηση βελτιώσεων.....	34
2.4. Εργαλεία Λογισμικού και μέθοδοι αξιολόγησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων.....	35
Κεφάλαιο 3. Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής για τις συσκευασίες Tetra Pak και PET	38
3.1. Προσδιορισμός σκοπού και αντικειμένου της μελέτης	38
3.1.1. Λειτουργική Μονάδα.....	38

3.1.2. Ροές Αναφοράς.....	39
3.1.3. Όρια συστήματος και εξαιρούμενες διεργασίες.....	39
3.2. Απογραφή δεδομένων κύκλου ζωής.....	41
3.2.1. Εισαγωγή.....	41
3.2.2. Απογραφή δεδομένων για τη συσκευασία PET.....	43
3.2.3. Απογραφή δεδομένων για τη συσκευασία Tetra Pak.....	44
3.3. Εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των συσκευασιών.....	46
3.3.1.Εισαγωγή.....	46
3.3.2.Περιβαλλοντικό αποτύπωμα συσκευασιών PET και Tetra Pak.....	52
3.4. Ερμηνεία και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	72

Περίληψη

Η συσκευασία παρέχει πολλές ζωτικές λειτουργίες, όπως προστασία, αποθήκευση και συντήρηση προϊόντων, καθώς και παροχή πληροφοριών στους καταναλωτές. Ωστόσο, ο συνολικός κύκλος ζωής της συσκευασίας δημιουργεί σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς η παραγωγή του εκμεταλλεύεται φυσικούς πόρους και ενέργεια και προκαλεί περιβαλλοντικές εκπομπές. Επιπλέον, τα απορρίμματα συσκευασιών, τα οποία αποτελούν δεύτερο μεγαλύτερο κλάσμα αστικών απορριμμάτων μετά το οργανικό κλάσμα, δημιουργούν αυξανόμενα ζητήματα διάθεσής τους.

Τα τελευταία χρόνια δίνεται μεγάλη έμφαση στις περιβαλλοντικές επιδόσεις των υγρών τροφίμων, και ιδίως στα συστήματα συσκευασίας χυμών. Οι χυμοί προσφέρονται στους καταναλωτές σε ένα ευρύ φάσμα εναλλακτικών συσκευασιών, με κυρίαρχες επιλογές τη συσκευασία τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (PET) και την πολυστρωματική συσκευασία Tetra Pak. Οι τεχνικές αξιολόγησης κύκλου ζωής (LCA) χρησιμοποιούνται συχνά για τη βελτίωση της κατανόησης, καθώς και για τη σύγκριση των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών διαφορετικών συστημάτων συσκευασίας χυμού.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των δύο πιο κοινών επιλογών συσκευασίας χυμού, εστιάζοντας στην παραγωγή τους καθώς και στην τελική τους διάθεση (υγειονομική ταφή, αποτέφρωση και ανακύκλωση). Μέσω της Αξιολόγησης Κύκλου ζωής, πραγματοποιείται σύγκριση των περιβαλλοντικών αποτυπωμάτων των συσκευασιών PET και Tetra Pak και εντοπίζεται η πιο φιλική προς το περιβάλλον συσκευασία χυμού.

Λέξεις κλειδιά: κλιματική αλλαγή, αποτύπωμα άνθρακα, αξιολόγηση κύκλου ζωής

Abstract

Food packaging provides many vital functions including protection, storage and preservation of products, as well as, information to consumers. However, the overall packaging life cycle generates significant environmental impacts since its production exploits natural resources and energy and causes environmental emissions. Moreover, packaging wastes generate increasing disposal issues, being the second largest fraction of municipal wastes after the organic fraction.

During the last years there is focus on the environmental performance of liquid food, and especially juice packaging systems. Juices are offered to consumers in a wide range of packaging alternatives with polyethylene terephthalate (PET) and Tetra Pak multilayer packaging being the dominant options. Life cycle assessment (LCA) techniques have frequently been used to improve the understanding, as well as, to compare the environmental characteristics of different juice packaging systems.

This Diploma Thesis assesses the environmental impact of the two commonest juice packaging options, including their production along with their final disposal (landfilling, incineration and recycling). The aim is to compare the footprints of PET and Tetra Pak packaging, identify the hot spots and finally discover the most environmentally benign juice packaging.

Keywords: climate change, carbon footprint, life cycle assessment

Κεφάλαιο 1. Συσκευασίες Χυμών

1.1. Εισαγωγή

Οι παραδοσιακές λειτουργίες της συσκευασίας τροφίμων είναι η συγκράτηση και προστασία των τροφίμων από διαδικασίες αποδόμησης και υποβάθμισης, καθώς και η παροχή πληροφοριών στους καταναλωτές, όπως είναι τα συστατικά και οι διατροφικές αξίες. Η συσκευασία παρέχει προστασία από τρεις κύριες κατηγορίες εξωτερικών επιρροών: (α) φυσική προστασία από μηχανικές βλάβες και περιλαμβάνει απορρόφηση κραδασμών κατά τη διανομή, (β) βιολογική προστασία έναντι μικροοργανισμών, εντόμων και άλλων ζώων και (γ) χημική προστασία που ελαχιστοποιεί τις συνθέσεις που προκαλούνται από περιβαλλοντικές επιδράσεις, όπως έκθεση σε αέρια (συνήθως οξυγόνο), υγρασία ή φως (Ramos *et al.*, 2015).

Ο τομέας των τροφίμων και ποτών αντιπροσωπεύει περίπου το 70% των συνολικών συσκευασιών που καταναλώνονται, με τον τομέα των ποτών να χρησιμοποιεί εκατομμύρια τόνους συσκευασιών ετησίως (Finkbeiner *et al.*, 2010). Η συσκευασία χυμών είναι το πιο ανταγωνιστικό τμήμα της παγκόσμιας βιομηχανίας συσκευασίας ποτών. Η συσκευασία αποτελεί σημαντικό ζήτημα στη διατήρηση των χυμών φρούτων και λαχανικών. Ως αποτέλεσμα της αναδυόμενης κατανάλωσης χυμών, η παγκόσμια αγορά συσκευασίας έχει σημειώσει ισχυρή ανάπτυξη και ο κλάδος της συσκευασίας έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως ως προς τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της (Falguera and Ibarz, 2014).

Τα υλικά που παραδοσιακά χρησιμοποιούνται στη συσκευασία τροφίμων περιλαμβάνουν το γυαλί, τα μέταλλα, όπως αλουμίνιο, το χαρτί και τα πλαστικά. Οποιοδήποτε και να είναι το υλικό συσκευασίας και εφόσον έρχεται σε επαφή με το τρόφιμο, θα πρέπει να πληροί κάποιες γενικές απαιτήσεις:

- να είναι μη τοξικό και συμβατό με τα τρόφιμα
- να προστατεύει από αέρια, υγρασία, φως και οσμές
- να είναι ανθεκτικό
- να απορρίπτεται εύκολα και να είναι φιλικό προς το περιβάλλον
- να έχει χαμηλό κόστος
- να διαθέτει δυνατότητες που να διασφαλίζουν την απουσία νοθείας (π.χ. διαφορετικούς τύπους σφράγισης) (Falguera and Ibarz, 2014).

Η σωστή επιλογή του υλικού συσκευασίας παίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ποιότητας και της φρεσκάδας του προϊόντος κατά τη διανομή και την αποθήκευση. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφορετικών τύπων υλικών που χρησιμοποιούνται στη συσκευασία χυμών. Οι συσκευασίες συχνά συνδυάζουν διάφορα υλικά

για να εκμεταλλευτούν τις λειτουργικές ή αισθητικές ιδιότητες κάθε υλικού. Οι εξελίξεις σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνουν την ανάπτυξη συστημάτων πολλαπλών στρωμάτων ή υλικών με χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Ramos *et al.*, 2015).

Πίνακας 1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τυπικών υλικών που χρησιμοποιούνται στη συσκευασία τροφίμων (Ramos *et al.*, 2015)

Τύπος υλικού	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Γυαλί	Επαναχρησιμοποιήσιμο και ανακυκλώσιμο Άοσμο και χημικά αδρανές Αδιαπέραστο από αέρια και ατμούς Διατήρηση της φρεσκάδας για μεγάλο χρονικό διάστημα Χρήσιμο για αποστείρωση με θερμότητα Καλή μόνωση Παραγωγή σε πολλά διαφορετικά σχήματα Οι παραλλαγές στο χρώμα προστατεύουν φωτο-ευαίσθητο περιεχόμενο Διαφανές	Βαρύ Μεγάλο κόστος μεταφοράς Εύθραυστο Ευαίσθησία σε θραύση από εσωτερική πίεση, κρούση ή θερμικό σοκ
Χαρτί και Χαρτόνι	Ελαφρύ Οικονομικό σε σύγκριση με άλλα συστήματα συσκευασίας Ανακυκλώσιμο Αποτελεσματική, χαμηλού κόστους προστασία Διατίθεται σε διάφορες μορφές προσαρμοσμένες σε διαφορετικές συνθήκες διατροφής Εύκολος χειρισμός από τους καταναλωτές Πολύ καλή αναλογία αντοχής/ βάρους	Κακές ιδιότητες φραγμού στο φως και την υγρασία Δεν χρησιμοποιείται για μεγάλα χρονικά διαστήματα Όταν χρησιμοποιείται ως κύρια συσκευασία, είναι επικαλυμμένο ή ελασματοποιημένο για βελτίωση των λειτουργικών και προστατευτικών ιδιοτήτων Ο συνδυασμός με άλλα υλικά δυσκολεύει την ανακύκλωση
Πλαστικό	Εύκαμπτο Χημικά ανθεκτικό Φθηνό Ελαφρύ Μεγάλο εύρος φυσικών και οπτικών ιδιοτήτων Εύκολη εκτύπωση Σχηματίζεται, γεμίζεται και σφραγίζεται στην ίδια γραμμή παραγωγής	Μεταβλητή διαπερατότητα σε φως, αέρια, ατμούς και μόρια χαμηλού μοριακού βάρους

Παραδοσιακά, τα ποτά και οι χυμοί συσκευάζονται σε γυάλινους περιέκτες που καλύπτονταν με πλαστικό ή μεταλλικό φελλό για τον περιορισμό της πρόσληψης οξυγόνου και τη διατήρηση της οργανοληπτικής ποιότητά τους. Ωστόσο, η παραγωγή και η χρήση γυάλινων φιαλών έχουν αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, μεγάλο κόστος παραγωγής, θραύονται εύκολα και είναι συγκριτικά βαριά.

Η χρήση πλαστικών και κυρίως του τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (polyethylene terephthalate, PET) στη συσκευασία χυμών είναι αυξημένη λόγω του χαμηλού κόστους των υλικών και των λειτουργικών πλεονεκτημάτων, όπως η θερμική στεγανότητα, οι οπτικές ιδιότητες και τα απεριόριστα μεγέθη και σχήματα, έναντι των παραδοσιακών υλικών, όπως το γυαλί. Παρόλα αυτά, η μεταβλητή διαπερατότητα στο φως, στα αέρια και σε μόρια χαμηλού μοριακού βάρους, καθώς και η μη καταλληλότητα για την προστασία της ποιότητας των ποτών που είναι ευαίσθητα στο οξυγόνο κατά τη διάρκεια μεγάλων περιόδων αποτελούν σημαντικούς προβληματισμούς για τη χρήση των πλαστικών (Ramos *et al.*, 2015).

Με τους καταναλωτές να απαιτούν προϊόντα υψηλότερης ποιότητας και ασφάλειας σε προσιτές τιμές και τον αυξανόμενο ανταγωνισμό, ο βιομηχανικός τομέας παραγωγής έχει βιώσει ορισμένες σημαντικές αλλαγές στα συστήματα συσκευασίας. Μία από αυτές είναι και η πολυστρωματική συσκευασία, η οποία αποτελεί συνδυασμό πολλών στρωμάτων πλαστικού, χαρτιού και μετάλλων. Ο συνδυασμός υλικών έχει ως αποτέλεσμα το πρόσθετο πλεονέκτημα των ιδιοτήτων από κάθε μεμονωμένο υλικό και συχνά μειώνει τη συνολική ποσότητα του υλικού συσκευασίας που απαιτείται (Ramos *et al.*, 2015).

Οι πολυστρωματικές συσκευασίες τύπου Tetra Pak μπορούν να έχουν έως και οκτώ στρώματα εύκαμπτων υλικών όπως φύλλα χαρτιού, πλαστικές μεμβράνες και μεταλλικά φύλλα και παρέχουν βελτιωμένη προστασία των χυμών φρούτων από μικροοργανισμούς, υδρατμούς, οξυγόνο και φως. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν είναι τα ασηπτικά και αδρανή χαρακτηριστικά τους, καθώς και το χαμηλό βάρος και το κόστος τους. Ωστόσο, η προτίμηση για αυτόν τον τύπο συσκευασίας οφείλεται στην ευκολία με την οποία μπορεί να σφραγιστεί και να σφραγιστεί εκ νέου (Falguera and Ibarz, 2014).

Οι συσκευασίες PET και Tetra Pak αποτελούν τις συνηθέστερες επιλογές για τα προϊόντα χυμών φρούτων και θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια.

1.2. Συσκευασίες PET

1.2.1. Εισαγωγή

Το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (polyethylene terephthalate, PET) είναι ένα πολυμερές μακράς αλυσίδας που ανήκει στη γενική οικογένεια των πολυεστέρων. Το PET σχηματίζεται από τα ενδιάμεσα τερεφθαλικό οξύ (terephthalic acid, TPA) και αιθυλενογλυκόλη (ethylene glycol, EG), που προέρχονται από το αργό πετρέλαιο. Στην πιο αγνή του μορφή, είναι ένα άμορφο υαλώδες υλικό, το οποίο υπό την επίδραση των άμεσων τροποποιητικών προσθέτων αναπτύσσει κρυσταλλικότητα. Η κρυσταλλικότητα μπορεί επίσης να αναπτυχθεί με θερμική επεξεργασία του τήγματος πολυμερούς.

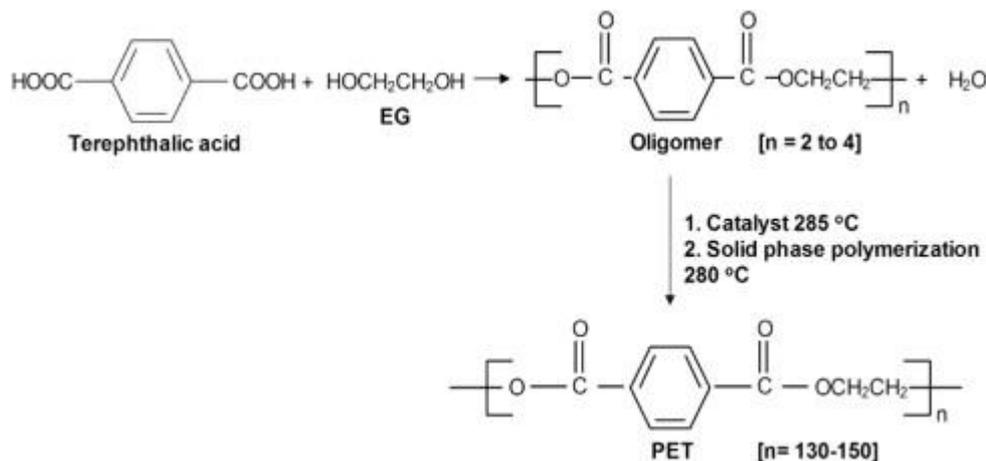
Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 το PET αναπτύχθηκε ως ταινία και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε βίντεο, φωτογραφικές και ακτινογραφικές (X-ray) ταινίες, καθώς και σε ευέλικτες συσκευασίες. Αργότερα, τροποποιήθηκε για να χρησιμοποιηθεί σε αντικείμενα με έγχυση και εκβολή, κυρίως ενισχυμένα με ίνες γυαλιού. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, παρήχθη με χύτευση με εμφύσηση (blow moulding) το πρώτο PET τρισδιάστατων προσανατολισμένων δομών ξεκινώντας την ταχεία εκμετάλλευση και εφαρμογή του σε ελαφριές, σκληρές, άθραυστες φιάλες (Sinha, Patel and Patel, 2010).

1.2.2. Παραγωγή PET

Γενικά, οι πολυεστέρες παρασκευάζονται με αντίδραση διλειτουργικών οξέων και αλκοολών, παρουσία ενός καταλύτη μετάλλου. Το βασικό στάδιο πολυμερισμού είναι γνωστό ως αντίδραση συμπύκνωσης, κατά την οποία τα μόρια αντιδρούν και απελευθερώνουν ένα απλό προϊόν. Αυτή ακολουθείται από μια δεύτερη αντίδραση πολυμερισμού, η οποία λαμβάνει χώρα στη στερεά φάση.

Τα ενδιάμεσα για την κατασκευή PET (καθαρό τερεφθαλικό οξύ και αιθυλενογλυκόλη) προέρχονται από το αργό πετρέλαιο. Κατά τη θέρμανσή τους, παράγεται ένα μονομερές, ο δις υδροξυαιθυλ-τερεφθαλικός εστέρας, αναμιγμένο με πολυμερή χαμηλού μοριακού βάρους (ολιγομερή). Στη συνέχεια, το μίγμα αντιδρά περαιτέρω, απομακρύνοντας την περίσσεια αιθυλενογλυκόλης και σχηματίζοντας το PET (Σχήμα 1). Σε αυτό το στάδιο το PET είναι ένα ιξώδες τετηγμένο υγρό, το οποίο εξωθείται και συνθλίβεται με το νερό για να σχηματίσει ένα άμορφο υαλώδες υλικό. Ορισμένα PET παράγονται επίσης χρησιμοποιώντας τεχνολογίες βασισμένες στον διμεθυλεστέρα του τερεφθαλικού οξέος (dimethyl ester of terephthalic acid, DMT). Το απαιτούμενο PET υψηλού μοριακού βάρους κατασκευάζεται σε ένα δεύτερο στάδιο πολυμερισμού που διεξάγεται σε στερεά κατάσταση σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό απομακρύνει αποτελεσματικά όλες τις πτητικές προσμίξεις, όπως ακεταλδεΐδη, ελεύθερες

γλυκόλες και νερό. Το υψηλό μοριακό βάρος είναι απαραίτητο για καλές μηχανικές ιδιότητες που παρέχουν δυσκαμψία, αντοχή και αντοχή στον ερπυσμό, ενώ ταυτόχρονα δίνει επαρκή ευελιξία για να αντιστέκεται στην ρήξη και τη θραύση υπό πίεση (Sinha, Patel and Patel, 2010).



Σχήμα 1. Παραγωγή τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (PET)

Μόλις σχηματιστεί το πολυμερές, θα πρέπει να καθαριστεί. Οι διαδικασίες απόσταξης υπό κενό καθαρίζουν εύκολα την αιθυλενογλυκόλη, ενώ το τερεφθαλικό οξύ καθαρίζεται με επαναλαμβανόμενη κρυστάλλωση. Τέτοια υλικά υψηλής καθαρότητας και υψηλού μοριακού βάρους χρειάζονται για εφαρμογές συσκευασίας τροφίμων. Καταλύτες χρησιμοποιούνται σε υπερβολικά μικρές συγκεντρώσεις για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων και την εξασφάλιση πρακτικών οικονομικών. Ο πιο κοινός καταλύτης είναι το τριοξείδιο του αντιμονίου, αλλά χρησιμοποιούνται επίσης και άλατα τιτανίου, γερμανίου, κοβαλτίου, μαγγανίου, μαγνησίου και ψευδαργύρου και μικρές ποσότητες παραμένουν ενθυλακωμένες εντός της μήτρας του πολυμερούς ή στην ίδια την πολυμερή αλυσίδα (Sinha, Patel and Patel, 2010).

1.2.3. Πλεονεκτήματα PET

Το PET προτιμάται ως συσκευασία για πολλά προϊόντα διατροφής, ιδίως ποτά και μεταλλικά νερά. Οι λόγοι που οδήγησαν στην πλήρη επικράτηση του PET σαν υλικού συσκευασίας στα τρόφιμα είναι οι παρακάτω ιδιότητές του, που το καθιστούν σχεδόν αναντικατάστατο:

- Πλήρης διαφάνεια. Οι συσκευασίες PET προσφέρουν καθαρότητα και μηδενική μετανάστευση που έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη δυνατή κατάσταση του συσκευασμένου προϊόντος.
- Ασφάλεια. Το PET είναι άθραυστο και επιτρέπει την ασφαλή διακίνηση και αποθήκευση των προϊόντων χωρίς προβλήματα.

- Ικανότητα φραγής. Το PET έχει πολύ χαμηλή διαπερατότητα σε οξυγόνο, διοξείδιο του άνθρακα και νερό διατηρώντας έτσι τα προϊόντα σε άριστη κατάσταση και συμβάλλοντας στη διατήρηση της διάρκειας ζωής.
- Ελαφρύ βάρος και υψηλή μηχανική αντοχή. Οι περιέκτες που παράγονται έχουν μικρό βάρος και λεπτό τοίχωμα πράγμα που ουσιαστικά σημαίνει οικονομία κλίμακας στο κόστος μεταφοράς και καλύτερη ικανότητα τοποθέτησης στα ράφια των σημείων λιανικής πώλησης.
- Ευελιξία διαμόρφωσης. Το PET μπορεί να δώσει περιέκτες σχεδόν οποιασδήποτε μορφής, χρώματος και διαμέτρου καλύπτοντας ανάγκες ειδικού σχεδιασμού που είναι αδύνατες ή ασύμφορες σε άλλα υλικά.
- Ανακυκλωσιμότητα. Το PET είναι πλήρως ανακυκλώσιμο αφού μπορεί να καθαρισθεί, να κοπεί σε νιφάδες και να χρησιμοποιηθεί εκ νέου για παραγωγή πλαστικών αντικειμένων. Το ανακυκλωμένο PET χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή προϊόντων με μεγάλη διάρκεια ζωής όπως δίσκοι εστιατορίων, πλαστικά παιχνίδια, καθίσματα γηπέδων, πλαστικά χαλιά κλπ. Βάσει των διεθνών συμφωνιών έχει κωδικό σήμανσης ανακύκλωσης τον αριθμό 1 ¹. Η ανακύκλωση του PET θα περιγραφεί αναλυτικά στις επόμενες Ενότητες.

1.2.4. Εφαρμογές PET

Για περισσότερα από 100 χρόνια, τα πλαστικά προϊόντα έχουν φέρει επανάσταση στον τρόπο ζωής. Το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο είναι ένα ιδιαίτερα αξιοσημείωτο παράδειγμα. Το παγκόσμιο μέγεθος αγοράς συσκευασιών PET το 2020 είναι 53160 εκατομμύρια δολάρια, ενώ αναμένεται να φτάσει τα 66640 εκ δολάρια έως το 2026, με σύνθετο ρυθμό ετήσιας ανάπτυξης (CAGR) 3,8% κατά τη διάρκεια του 2021-2026 ². Η Ασία, η Ευρώπη και η Βόρεια Αμερική αποτελούν τους μεγαλύτερους χρήστες συσκευασιών PET.

Οι πιο κοινές χρήσεις των πλαστικών προϊόντων PET είναι:

- Μπουκάλια και δοχεία. Λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που αναφέρονται παραπάνω, το PET χρησιμοποιείται συχνά με τη μορφή πλαστικών φιαλών για χυμό, νερό και σόδα. Χάρη στην καλή συγκράτηση υγρών που προσφέρει, χρησιμοποιείται επίσης στην αποθήκευση προσυσκευασμένων δοχείων τροφίμων.

¹ <http://www.petkentrakis.gr/company/history-pet/> , τελευταία επίσκεψη: 05/10/2020

² <http://www.wboc.com/story/42617305/global-pet-packaging-market-2020-industry-analysis-size-share-trends-market-demand-growth-opportunities-and-forecast-2026-covid-19-impact> , τελευταία επίσκεψη: 02/10/2020

- Ρούχα. Το ανακυκλωμένο PET είναι πολύ συνηθισμένο στην κατασκευή υφασμάτων από πολυεστέρα και ένας από τους σημαντικότερους προμηθευτές ινών για τη βιομηχανία ενδυμάτων στην Κίνα
- Πανιά σκαφών. Λόγω της αντοχής και της ευελιξίας του, το ανακυκλωμένο PET χρησιμοποιείται ακόμη και για την ανάπτυξη πανιών σκαφών υψηλής απόδοσης.
- Χαλιά. Η ευελιξία και η ποικιλία των ανακυκλωμένων προϊόντων PET το καθιστούν λειτουργικό σε μαλακά χαλιά ³.

1.2.5. Εφαρμογές σε χυμούς

Λόγω των εξαιρετικών μηχανικών ιδιοτήτων του, της καθαρότητάς του, της αντοχής στην υπεριώδη ακτινοβολία και των καλών ιδιοτήτων φραγμού οξυγόνου, όλο και περισσότεροι έτοιμοι προς κατανάλωση χυμοί ψυγείου συσκευάζονται σε διαφανείς φιάλες κατασκευασμένες από PET (Ros-Chumillas *et al.*, 2007). Μάλιστα, η αυξανόμενη χρήση φιαλών PET για την παραγωγή χυμών αναμένεται να αυξήσει τη ζήτηση της αγοράς με ρυθμό 3,91% από το 2020 έως το 2027 ⁴. Επιπλέον, όπως είχε πει σε συνέντευξή του ο Διευθύνων Σύμβουλος της Tetra Pak, ο κύριος ανταγωνισμός της Tetra Pak προέρχεται από βιομηχανίες που παράγουν τύπους συσκευασιών PET λόγω του χαμηλότερου κόστους παραγωγής ⁵.

Παρόλα αυτά, η μακροχρόνια έκθεση σε φως ενδέχεται να είναι υποβαθμιστικός παράγοντας για ορισμένους χυμούς συσκευασμένους σε διαφανή δοχεία. Όπως έχει αποδειχθεί από έρευνα της Ros-Chumillas, οι χυμοί πορτοκάλι συσκευασμένοι σε μονοστρωματικό PET παρουσίασαν τη χαμηλότερη διάρκεια ζωής στο ράφι (shelf life) και συγκράτηση ασκορβικού οξέος κατά τη διάρκεια αποθήκευσής τους σε σύγκριση με το πολυστρωματικό PET και το γυαλί. Οι φιάλες ποτών που κατασκευάζονται από PET αναμεμιγμένες με μικρές ποσότητες ναφθαλικού πολυαιθυλενίου (PEN) μπορεί να παρέχουν μεγαλύτερη προστασία φωτός σε προϊόντα ευαίσθητα στην υπεριώδη ακτινοβολία, παρόλα αυτά η ανάμιξη αυξάνει το κόστος παραγωγής φιαλών (Ros-Chumillas *et al.*, 2007).

³ <https://cupbarn.com/popular-packaging-for-juices/#:~:text=Three%20most%20popular%20packaging%20for,glass%2C%20carton%2C%20and%20PET.>, τελευταία επίσκεψη: 02/10/2020

⁴ <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-pet-bottle-market>, τελευταία επίσκεψη: 02/10/2020

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Tetra_Pak, τελευταία επίσκεψη: 02/10/2020

1.2.6. Παραγωγή περιεκτών PET

Οι περιέκτες PET παράγονται με μηχανές δύο ειδών:

Μηχανές ενός σταδίου (One-step, hot preform method)

Η λειτουργία της μηχανής αυτής περιλαμβάνει όλες τις φάσεις επεξεργασίας από κόκκο PET σε έτοιμο περιέκτη. Το πρόπλασμα εξέρχεται από το καλούπι έγχυσης και στη συνέχεια ενώ είναι ακόμα ζεστό προωθείται στο φυσητό καλούπι για να παραχθεί ο περιέκτης. Η μέθοδος αυτή έχει ως πλεονέκτημα το γεγονός ότι τα προπλάσματα δεν αποθηκεύονται και έτσι αποφεύγονται προβλήματα φθοράς (γρατζουνιές, χτυπήματα κλπ) αλλά από την άλλη πλευρά έχει το μειονέκτημα της χαμηλής ταχύτητας παραγωγής. Οι μηχανές τέτοιου τύπου προτιμώνται για μικρομεσαίες παραγωγές.

Μηχανές δύο σταδίων (Two-step, cold preform method)

Η λειτουργία περιλαμβάνει δύο μηχανές. Στην πρώτη που είναι η μηχανή έγχυσης (injection) παράγονται τα προπλάσματα, τα οποία στη συνέχεια αποθηκεύονται. Στη δεύτερη μηχανή, τη φυσητική (blowing), τα προπλάσματα αναθερμαίνονται και στη συνέχεια παράγονται οι περιέκτες. Η μέθοδος αυτή προτιμάται στις μεγάλες παραγωγές αφού οι φυσητικές μηχανές φθάνουν σε πολύ μεγάλες αποδόσεις.

Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία παραγωγής του PET σε μηχανές δύο σταδίων ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

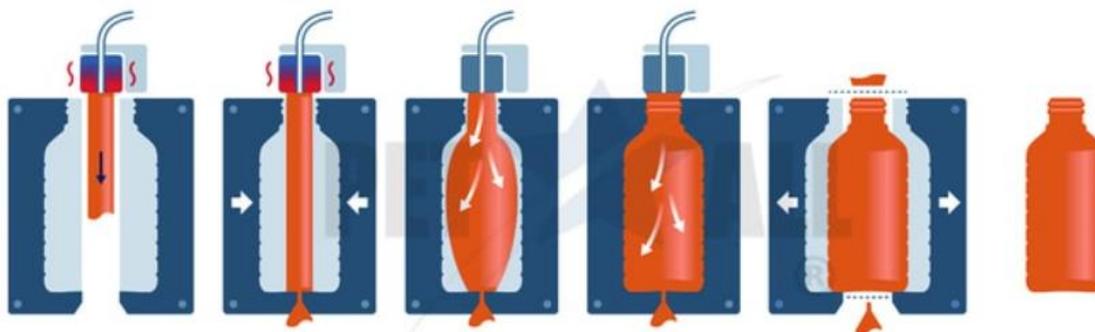
- Ξήρανση:
Το PET απορροφά υγρασία από την ατμόσφαιρα. Για το λόγο αυτό το υλικό ξηραίνεται πριν την επεξεργασία του.
- Πλαστικοποίηση:
Το ξηραμένο υλικό σε κόκκους συμπιέζεται και θερμαίνεται σε κοχλία περιστροφής. Στη συνέχεια, εγχύεται στην κοιλότητα του καλουπιού και ψύχεται σε πολύ σύντομο χρόνο παράγοντας το πρόπλασμα (preform). Το πρόπλασμα εξάγεται από το καλούπι και είναι έτοιμο για περαιτέρω επεξεργασία και θέρμανση. Η βέλτιστη κατανομή της θερμοκρασίας στο πρόπλασμα επιτυγχάνεται με κατάλληλη ρύθμιση των υπερύθρων λυχνιών στο φούρνο, έτσι να είναι έτοιμο για διαδικασία παραγωγής.
- Διαμόρφωση περιέκτη:
Το θερμό πρόπλασμα με τη βοήθεια αέρα εκτείνεται σε όλη την επιφάνεια ενός καλουπιού με συγκεκριμένο σχήμα, με στόχο να προσανατολίζονται οι κρύσταλλοι και να αυξάνεται η αντοχή του PET. Το PET θερμαίνεται σε τέτοια θερμοκρασία, ώστε τα μόρια της αλυσίδας του να έχουν τη δυνατότητα να εκτυλιχθούν και να

προσανατολισθούν με έκταση και όχι να σπάσουν. Η έκταση του υλικού είναι διαξονική και ομοιογενής. Τα μόρια του προσανατολισμένου PET έχουν την ικανότητα να ενεργούν ομαδικά και όχι ατομικά δίνοντας έτσι τη δυνατότητα στον παραγόμενο περιέκτη να έχει λεπτό τοίχωμα, αυξημένη ικανότητα μηχανικής αντοχής, διαπερατότητας και χημικής αντίστασης.

- Εκβολή περιέκτη:

Το τελικό προϊόν εκβάλλεται από το καλούπι ⁶.

Τα στάδια της διαμόρφωσης περιεκτών- φιαλών PET εμφανίζονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Στάδια διαμόρφωσης φιαλών PET μέσω χύτευσης με εμφύσηση (blow molding) ⁷

1.2.7. Ανακύκλωση συσκευασιών PET

Η ανακύκλωση PET αντιπροσωπεύει ένα από τα πιο επιτυχημένα και διαδεδομένα παραδείγματα ανακύκλωσης πολυμερών. Η κύρια κινητήρια δύναμη που είναι υπεύθυνη για αυτήν την αυξημένη ανακύκλωση PET μετά τον καταναλωτή είναι η ευρεία χρήση του, ιδιαίτερα στη βιομηχανία ποτών. Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του PET, το οποίο εξηγεί και την ευρεία εφαρμογή του στην κατασκευή συσκευασιών για τις βιομηχανίες τροφίμων είναι ότι δεν έχει παρενέργειες στον άνθρωπο. Πρέπει να επισημανθεί, ότι το PET δεν δημιουργεί άμεσο κίνδυνο για το περιβάλλον, αλλά λόγω του σημαντικού κλάσματος όγκου στο ρεύμα αποβλήτων και της υψηλής αντοχής του στους ατμοσφαιρικούς και βιολογικούς παράγοντες, θεωρείται επιβλαβές υλικό. Ως εκ τούτου, η ανακύκλωση PET δεν χρησιμεύει μόνο ως μερική λύση στο πρόβλημα των στερεών αποβλήτων, αλλά συμβάλλει επίσης στη διατήρηση ενέργειας. Τα προϊόντα που κατασκευάζονται από ανακυκλωμένα πλαστικά μπορούν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση ενέργειας 50-60% σε σύγκριση με την

⁶ <http://www.petkentrakis.gr/company/history-pet/>, τελευταία επίσκεψη: 02/10/2020

⁷ <https://plastictechnologiesinc.com/Blow%20Molding.html>, τελευταία επίσκεψη: 02/10/2020

παραγωγή του ίδιου προϊόντος από παρθένα ρητίνη. Η ανακύκλωση του PET μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλούς τρόπους και να ταξινομηθεί σε τέσσερις κατηγορίες:

- Πρωτογενής ανακύκλωση (βιομηχανικά απορρίμματα πριν τον καταναλωτή): Είναι η ανακύκλωση καθαρών, μη μολυσμένων αποβλήτων ενός τύπου που παράγονται κατά την κατασκευή πλαστικών ειδών. Διασφαλίζει την απλότητα και το χαμηλό κόστος, ειδικά όταν γίνεται μέσα στο εργοστάσιο. Τα ανακυκλωμένα απορρίμματα αναμιγνύονται είτε με παρθένο υλικό είτε χρησιμοποιούνται ως υλικό δεύτερης ποιότητας.
- Δευτερογενής (μηχανική) ανακύκλωση: Το πολυμερές διαχωρίζεται από μολυντικές ουσίες του και μπορεί να επανεπεξεργαστεί εύκολα και να δημιουργηθούν κόκκοι (granulates) με συμβατική εκβολή. Η μηχανική ανακύκλωση περιλαμβάνει τη διαλογή και τον διαχωρισμό των αποβλήτων, τη μείωση του μεγέθους τους, την διήθηση με τήξη (melt filtration) και την αναμόρφωση του πλαστικού υλικού. Το κύριο μειονέκτημα είναι η υποβάθμιση των ιδιοτήτων του προϊόντος σε κάθε κύκλο και ότι τα ανακυκλωμένα είδη είναι ακατάλληλα για χρήση σε τρόφιμα.
- Τριτογενής (χημική) ανακύκλωση: Περιλαμβάνει μετασχηματισμό αλυσίδας πολυμερούς. Η ραχοκοκαλιά του πολυμερούς αποικοδομείται σε μονομερείς μονάδες ή διαρρηγνύεται τυχαία σε θραύσματα μεγαλύτερης αλυσίδας με σχηματισμό αερίων προϊόντων. Η χημική ανακύκλωση πραγματοποιείται είτε με διάλυση σε διαλύτες συμπεριλαμβανομένου του νερού είτε με πυρόλυση. Οι διαλύτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάσπαση των εστερικών ομάδων είναι: το νερό (υδρόλυση), οι αλκοόλες (αλκοόλυση), τα οξέα (οξόλυση), οι γλυκόλες (γλυκόλυση) και οι αμίνες (αμινόλυση). Τα παραγόμενα μονομερή καθαρίζονται με απόσταξη και ξήρανση και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πολυμερών με τη μορφή κυρίως ινών, φιλμ, φύλλων και φιαλών.
- Τεταρτογενής ανακύκλωση (ανάκτηση ενέργειας): Το ενεργειακό περιεχόμενο των πλαστικών αποβλήτων μπορεί να ανακτηθεί με καύση (incineration). Όταν η συλλογή, η διαλογή και ο διαχωρισμός των πλαστικών αποβλήτων είναι δύσκολοι ή οικονομικά μη βιώσιμοι, ή τα απόβλητα είναι τοξικά και επικίνδυνα στον χειρισμό, η καλύτερη επιλογή διαχείρισης αποβλήτων είναι η καύση με στόχο την ανάκτηση της χημικής ενέργειας που αποθηκεύεται στα πλαστικά απόβλητα με τη μορφή θερμικής ενέργειας. Αυτό πραγματοποιείται σε αποτεφρωτήρες, όπου τα απόβλητα καίγονται παρουσία αέρα με ελεγχόμενο τρόπο για τη μετατροπή υδρογονανθράκων του πλαστικού σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η θερμότητα που παράγεται από την καύση πλαστικών με τη μορφή υπέρθερμου ατμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

μέσω γεννητριών στροβίλων και η υπολειμματική θερμότητα από τη ροή αποβλήτων για θέρμανση κατοικιών και βιομηχανικών κτιρίων. Το υπόλειμμα τήγματος από τον αποτεφρωτήρα είναι απαλλαγμένο από κινδύνους τοξικότητας και μπορεί να απορριφθεί μέσω υγειονομικής ταφής.

Μεταξύ των παραπάνω τεχνικών ανακύκλωσης, η μόνη αποδεκτή σύμφωνα με τις αρχές της αιεφόρου ανάπτυξης είναι η χημική ανακύκλωση, καθώς οδηγεί στο σχηματισμό πρώτων υλών (μονομερή) από τις οποίες κατασκευάζεται το πολυμερές (Sinha, Patel and Patel, 2010).

1.2.8. Μειονεκτήματα Χρήσης PET σε συσκευασίες χυμών

Παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το PET κατά την εφαρμογή του σε συσκευασίες χυμών, τα οποία γίνονται ακόμα πιο εμφανή όταν συγκρίνεται με εναλλακτικές συσκευασίες, όπως το γυαλί, η χρήση του είναι περίπλοκη λόγω δύο σημαντικών μειονεκτημάτων του υλικού. Ενώ το PET προσφέρει επαρκή φραγμό αρώματος και οξυγόνου, δεν είναι κατάλληλο για την προστασία της ποιότητας των ποτών που είναι ευαίσθητα στο οξυγόνο κατά τη διάρκεια μεγάλων περιόδων αποθήκευσης. Γι' αυτόν τον λόγο και το PET χρησιμοποιείται κατά κόρον σε χυμούς ψυγείου μικρής διάρκειας. Επιπλέον, οι οπτικές αλλαγές, όπως το ξεθώριασμα των χρωμάτων ή το καφέ, είναι πολύ πιο εμφανείς στα μπουκάλια PET, λόγω των λεπτών τοιχωμάτων τους, από τα γυάλινα μπουκάλια.

Η βιομηχανία επικεντρώνεται στην εξεύρεση τρόπων βελτίωσης των φραγμών αερίων των φιαλών PET με εξίσου οικονομικά αποδοτικές λύσεις. Υπάρχουν πολλά εναλλακτικά πολυμερή υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση του PET, όπως το διαυγές πολυπροπυλένιο, διάφορα βιοπλαστικά και το ναφθαλικό πολυαιθυλένιο (polyethylene naphthalate, PEN). Ωστόσο, προς το παρόν οι ιδιότητες φραγμού αρώματος και αερίων είναι κατώτερες σε σύγκριση με το PET και τα παραπάνω υλικά θα καταστούν κατάλληλα για ποτά φρούτων μόνο με πρόσθετο φράγμα. Τέτοια συστήματα βρίσκονται επί του παρόντος στο στάδιο ανάπτυξης⁸.

8

<https://cupbarn.com/popular-packaging-for-juices/#:~:text=Three%20most%20popular%20packaging%20for,glass%2C%20carton%2C%20and%20PET>, τελευταία επίσκεψη: 01/10/2020

1.3. Συσκευασίες Tetra Pak

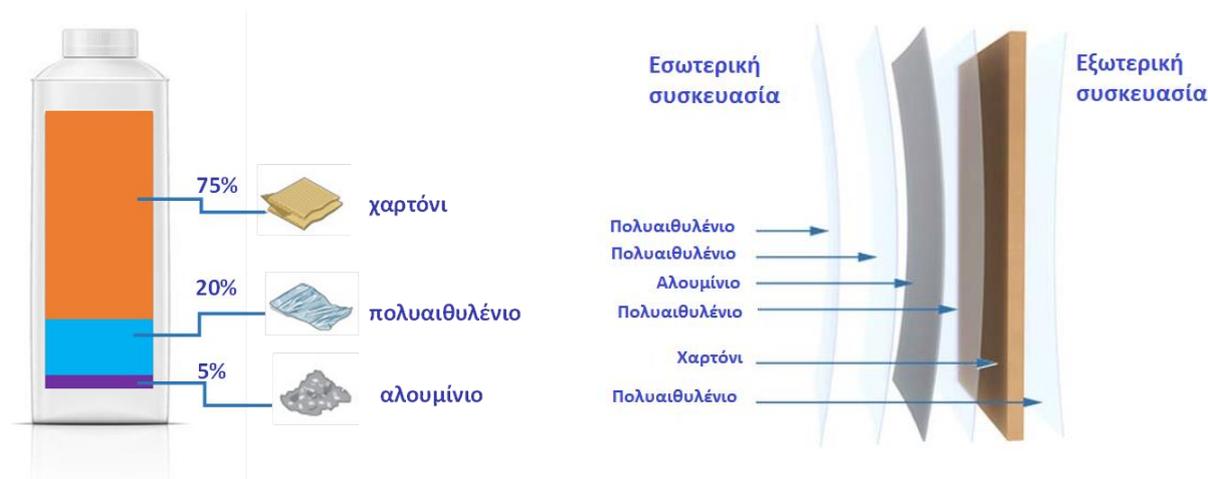
1.3.1. Εισαγωγή

Η συσκευασία Tetra Pak αποτελεί συσκευασία πολλαπλών υλικών, με βάση το χαρτί για την αποθήκευση υγρών προϊόντων διατροφής και συνήθως ευπαθών τροφίμων, όπως χυμοί και γαλακτοκομικά προϊόντα. Η συσκευασία Tetra Pak εισήχθη στην αγορά για πρώτη φορά από την εταιρεία R. Rausing το 1952. Αρχικά αυτή η συσκευασία κατασκευάστηκε από κερωμένο χαρτί. Μετά το 1969, αναπτύχθηκε η κυβοειδής συσκευασία με ασηπτικές ιδιότητες και σε αυτή τη μορφή εξελίχθηκε λίγο στο σχήμα που μπορεί πλέον να αναγνωριστεί από τα ράφια των καταστημάτων. Το όνομα της συσκευασίας προέρχεται από την ιδέα του Erik Wallenberg να φτιάξει ένα τετράεδρο πλαστικό επικαλυμμένο δοχείο (Zawadiak, 2017).

1.3.2. Σύνθεση και στρώματα Tetra Pak

Σήμερα, η συσκευασία Tetra Pak αποτελείται από έξι στρώματα σκληρού χαρτιού, πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (low density polyethylene, LDPE) και αλουμινόχαρτου (Al). Το χαρτόνι αποτελεί το 75% της μάζας συσκευασίας και χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει την άκαμπτη μορφή του τελικού προϊόντος καθώς και για την αύξηση της αντοχής του υλικού. Επίσης, το στρώμα χαρτονιού, το οποίο έχει λευκανθεί, χρησιμεύει για την εκτύπωση των διάφορων παραστάσεων και των πληροφοριών που δίνει η συσκευασία. Το φύλλο αλουμινίου (5%) χρησιμοποιείται λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων φραγής για παράγοντες όπως το φως, το οξυγόνο, οι υδρατμοί, οι οσμές και οι μικροοργανισμοί. Επιπλέον, το αλουμίνιο, επειδή έχει καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, συμβάλλει στη γρήγορη θέρμανση των πλαστικών μεμβρανών και συνεπώς διευκολύνει τη θερμοσυγκόλληση της πολύφυλλης μεμβράνης για το σχηματισμό του περιέκτη. Το LDPE, που χρησιμοποιείται στο 20% και υπάρχει σε 4 στρώματα, έχει πολλές λειτουργίες: προστατεύει το στρώμα χαρτιού από την επαφή με την εξωτερική υγρασία, προστατεύει το στρώμα αλουμινίου από την άμεση επαφή με το περιεχόμενο της συσκευασίας, προσκολλά και συνδέει τα στρώματα μεταξύ τους και επιτρέπει τη θερμοσφράγιση (heat-sealing). Το πολυαιθυλένιο θεωρείται από τα πλέον χημικά αδρανή πλαστικά γι' αυτό και χρησιμοποιείται σε επαφή με το τρόφιμο στην κατασκευή του περιέκτη (Ebadí *et al.*, 2016; Zawadiak, 2017). Τα ποσοστά του κάθε υλικού και τα στρώματα της συσκευασίας Tetra Pak εμφανίζονται στο Σχήμα 3.

Επιπλέον, στη συσκευασία χρησιμοποιούνται πολυμερή, όπως το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (high density polyethylene, HDPE) σε κύπελλα και καπάκια, καθώς και φιλμ τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (PET), τα οποία ενισχύουν τις θερμικά σφραγισμένες άκρες συσκευασίας (Zawadiak, 2017).



Σχήμα 3. Ποσοστά χαρτονιού, πολυαιθυλενίου και αλουμινίου (αριστερά) και τα διάφορα στρώματα (δεξιά) στη συσκευασία Tetra Pak ⁹

1.3.3. Παραγωγή Tetra Pak

Η παραγωγή συσκευασιών Tetra Pak αποτελείται την παραγωγή των επιμέρους υλικών και την σύνδεση μεταξύ τους.

- **Παραγωγή αλουμινίου.** Η παραγωγή φύλλου αλουμινίου μπορεί να περιγραφεί σε τρεις φάσεις: (refining), τήξη (smelting) και επεξεργασία (processing). Η πρώτη ύλη του αλουμινίου είναι το μέταλλευμα βωξίτη, το οποίο εξορύσσεται και μεταποιείται σε οξείδιο του αργιλίου (αλουμίνα) μέσω της μεθόδου Bayer, μια μέθοδο θερμοχημικής πέψης (thermochemical digestion). Στη συνέχεια, ακολουθεί μια ηλεκτρολυτική διαδικασία (Hall-Héroult) για την απόκτηση υγρού μετάλλου αλουμινίου. Το υγρό αλουμίνιο, σε θερμοκρασία άνω των 700 °C χύνεται σε καλούπια. Οι πλάκες από χυτό αλουμίνιο θερμαίνονται στους 525 °C περίπου και περνούν μέσω μιας σειράς κυλίνδρων έως ότου να επιτευχθεί είτε το απαιτούμενο πάχος πλάκας είτε έως ότου το μέταλλο να είναι αρκετά λεπτό (3mm) για ψυχρή έλαση. Η ψυχρή έλαση μπορεί να παράγει φύλλα τόσο λεπτά όσο 0,006 mm (Alexandru Mihai Grumezescu, 2019).
- **Παραγωγή χαρτονιού.** Η πρώτη ύλη στην κατασκευή του χαρτιού είναι ένας πολτός, δηλαδή η χημικά ή μηχανικά παραγόμενη μάζα των φυτικών ινών ξύλου, βαμβακιού ή λιναριού και άλλων φυτών, με νερό και διάφορα πρόσθετα (για χρώμα, αδιαπερατότητα κ.λπ.). Το μίγμα αποτελείται από 91% νερό ((Ε.Φ.Ε.Τ.), Συσκευασίας και (ΣΥ.ΒΙ.Π.Υ.Σ.), 2015). Το χαρτόνι έχει μια εξωτερική στρώση που έχει λευκανθεί για τη βελτίωση της ποιότητας εκτύπωσης (Falguera and Ibarz, 2014).

⁹ <https://www.tetrapak.com/packaging/materials>, τελευταία επίσκεψη: 29/09/2020

- **Παραγωγή πολυαιθυλενίου.** Η πρώτη ύλη για το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE) είναι το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Το πετρέλαιο και το αέριο υφίστανται μια σειρά διεργασιών για την παραγωγή κόκκων LDPE: διύλιση, σπάσιμο (cracking) και πολυμερισμό (Falguera and Ibarz, 2014).
- **Παραγωγή πολυστρωματικής συσκευασίας.** Η επικάλυψη εκβολής (extrusion coating) είναι μία από τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενός μεγάλου εύρους λεπτών πολυστρωματικών δομών. Στην ελασματοποίηση εκβολής (extrusion lamination), το τηγμένο πολυμερές εφαρμόζεται ως συγκολλητική στιβάδα μεταξύ δύο υποστρωμάτων για να σχηματίσει μια πολυστρωματική δομή. Το υπόστρωμα είναι το χαρτόνι, το οποίο έχει εκτυπωθεί. Για την πλαστικοποίηση και συγκόλληση με το φύλλο αλουμινίου χρησιμοποιούνται διαφορετικές διαδικασίες, όπως, υγρή ή ξηρή συγκόλληση των στρωμάτων με θερμοπλαστική κόλλα ή τεχνικές πλαστικοποίησης και εκβολής θερμού τήγματος. Στη συνέχεια δημιουργούνται ρολά και κόβονται οι συσκευασίες (Falguera and Ibarz, 2014; Alexandru Mihai Grumezescu, 2019).

Η Tetra Pak χρησιμοποιεί τεχνολογία ασηπτικής συσκευασίας. Στην ασηπτική επεξεργασία το προϊόν και η συσκευασία αποστειρώνονται ξεχωριστά και στη συνέχεια συνδυάζονται και σφραγίζονται σε αποστειρωμένη ατμόσφαιρα, σε αντίθεση με την κονσερβοποίηση, όπου το προϊόν και η συσκευασία συνδυάζονται πρώτα και μετά αποστειρώνονται. Όταν περιέχουν θερμικά επεξεργασμένα τρόφιμα (ultra-heat treated, UHT), όπως οι χυμοί, οι ασηπτικές συσκευασίες μπορούν να διατηρηθούν χωρίς ψύξη για έως και ένα έτος, με αποτέλεσμα το κόστος διανομής και αποθήκευσης, καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις να μειώνονται σημαντικά και να επεκτείνεται η διάρκεια ζωής των προϊόντων (Andreas Barkman, Cecilia and Lars Lundahl, 2018).

1.3.4. Ιδιότητες και Πλεονεκτήματα Tetra Pak

Η καινοτομία και η δημοτικότητα της Tetra Pak οφείλεται στην επιτυχή ενσωμάτωση της ασηπτικής επεξεργασίας και των εξαιρετικά υψηλών θερμοκρασιών (ultra-high temperatures, UHT) σε μία διεργασία. Αυτό επιτρέπει τη αποθήκευση των συσκευασμένων τροφίμων σε θερμοκρασία δωματίου παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής του προϊόντος για έως και ένα έτος. Έτσι, ευαίσθητα και ευπαθή τρόφιμα μπορούν να διανεμηθούν σε μεγαλύτερες αποστάσεις χωρίς την ύπαρξη ψύξης. Επιπλέον, η πολυστρωματική συσκευασία χυμών παρέχει μια λύση αποδοτικής χρήσης πόρων και ελαφρού βάρους. Τα ορθογώνια κουτιά ζυγίζουν λιγότερο από

το γυαλί ή το μέταλλο, εξοικονομώντας έτσι χώρο λόγω της αποτελεσματικής ικανότητας στοίβαξης που δεν είναι δυνατή με δοχεία ή μπουκάλια ¹⁰.

1.3.5. Εφαρμογές Tetra Pak

Οι εφαρμογές των συσκευασιών Tetra Pak είναι ποικίλες και μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Ασηπτικές συσκευασίες. Εφαρμόζονται σε υγρά τρόφιμα, όπως οι χυμοί, και τους επιτρέπουν να διατηρούν το χρώμα, την υφή, τη φυσική γεύση και τη θρεπτική αξία για έως και 12 μήνες, χωρίς την ανάγκη συντηρητικών ή ψύξης.
- Συσκευασίες για παγωμένα ποτά (Chilled packages). Έχουν σχεδιαστεί για να προστατεύουν τα φρέσκα προϊόντα ψυγείου, όπως το γάλα.
- Συσκευασίες τροφίμων. Έχουν σχεδιαστεί για προϊόντα τροφίμων σταθερά στο ράφι (shelf-stable), όπως λαχανικά, φασόλια, ντομάτες, έτοιμα γεύματα, τροφές για κατοικίδια, σούπες και σάλτσες, τα οποία παραδοσιακά συσκευάζονταν σε μεταλλικούς περιέκτες, γυάλινα βάζα και σακούλες (rouches) ¹¹.

Το σύνολο των συσκευασιών εμφανίζεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Γκάμα συσκευασιών Tetra Pak για διάφορες χρήσεις <https://www.tetrapak.com/packaging>

¹⁰ <https://www.theguardian.com/sustainable-business/tetra-pak-versus-plastic-bottles-water>, τελευταία επίσκεψη: 29/09/2020

¹¹ <https://www.tetrapak.com/packaging>, τελευταία επίσκεψη: 01/10/2020

1.3.6. Μειονεκτήματα Tetra Pak

Το κύριο μειονέκτημα της συσκευασίας Tetra Pak και ο λόγος για τον οποίο έχει επικριθεί περισσότερο είναι η δυσκολία στην ανακύκλωση, ιδιαίτερα αν συγκριθεί με άλλες φιάλες, όπως οι γυάλινες. Δεδομένου ότι οι ασηπτικές συσκευασίες περιέχουν διαφορετικά στρώματα πλαστικού και αλουμινίου εκτός από το ακατέργαστο χαρτί, δεν μπορούν να ανακυκλωθούν ως "κανονικά" απορρίμματα χαρτιού σε δημοτικές εγκαταστάσεις ανακύκλωσης, αλλά πρέπει να μεταβούν σε ειδικές μονάδες ανακύκλωσης για το διαχωρισμό των διαφορετικών υλικών που δεν είναι εύκολα προσβάσιμες. Τα προϊόντα Tetra Pak έχουν αναγνωριστεί ως πρόβλημα στερεών αποβλήτων από πολλές ΜΚΟ και περιβαλλοντικές ομάδες για τον λόγο της κατάληξης τους σε χώρους υγειονομικής ταφής σε περίπτωση που δεν ανακυκλωθούν¹².

Άλλο ένα μειονέκτημα αυτού του είδους συσκευασίας είναι η μη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των υλικών, και συγκεκριμένα του χαρτιού που ανακυκλώνεται, εντός της βιομηχανικής αλυσίδας για εκ νέου παραγωγή συσκευασιών. Οι ίνες χαρτιού που παράγονται είναι υψηλής ποιότητας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή νέων χάρτινων προϊόντων, όχι όμως σε συσκευασίες υγρών τροφίμων.

1.3.7. Ανακύκλωση Tetra Pak

Οι ίνες χαρτιού που προκύπτουν από την ανακύκλωση συσκευασιών Tetra Pak μετατρέπονται σε χαρτοπολτό υψηλής ποιότητας και χρησιμοποιούνται στην παραγωγή βιομηχανικών και καταναλωτικών προϊόντων. Αυτό δεν ισχύει όμως και για το ανακτηθέν μείγμα πλαστικών/πολυμερών και αλουμινίου (PolyAl). Η διαδικασία επεξεργασίας των αποβλήτων Tetra Pak περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

Αρχικά η μάζα των συσκευασιών καθαρίζεται από τα άλλα σκουπίδια, όπως πλαστικές σακούλες και πετραδάκια, από τους υπαλλήλους του μύλου. Ύστερα οι συσκευασίες τοποθετούνται σε έναν μεγάλο κάδο με νερό, στον λεγόμενο πολτοποιητή, όπου στροβιλίζονται για περίπου 20 λεπτά. Ο στροβιλισμός διαχωρίζει τις ίνες μέσω της τριβής και βοηθάει το χαρτί να διαλυθεί πιο γρήγορα. Οι ίνες απορροφούν το νερό και γίνονται μέρος ενός πολτού ινών. Τα μη χάρτινα στοιχεία είτε επιπλέουν είτε βουλιάζουν και μπορούν να διαχωριστούν, να διαλυθούν ή να διηθηθούν.

Οι ίνες του χάρτινου πολτού που προκύπτουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή νέων χάρτινων προϊόντων, όπως χαρτιά εκτυπώσεων, χάρτινες σακούλες,

¹² <https://www.environmentalleader.com/2011/04/tetra-pak-to-double-carton-recycling/>, τελευταία επίσκεψη: 01/10/2020

χαρτιά υγιεινής, χαρτιά επένδυσης για κουτιά γκοφρέ, χαρτόκουτα, χαρτί για προμήθειες γραφείου. Δεν μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν ξανά σε συσκευασίες υγρών τροφίμων.

Το μείγμα αλουμινίου και πολυαιθυλενίου περνάει στη δεύτερη φάση ανακύκλωσης, κατά την οποία το μείγμα καθαρίζεται από ένα 10% πολυτοποιημένων ινών που έχει απομείνει και τοποθετείται σε έναν τεράστιο κυλινδρικό σωλήνα, όπου δεν υπάρχει καθόλου αέρα. Εκεί πραγματοποιείται η πυρόλυση. Σε θερμοκρασία 400° C, το πολυαιθυλένιο διασπάται και μετατρέπεται σε αέριο, η σύσταση του οποίου είναι παρόμοια με εκείνη του φυσικού αερίου. Το αέριο αυτό χρησιμοποιείται για να καλύψει 10% των αναγκών του μύλου σε ενέργεια. Το αλουμίνιο παραμένει ως έχει και πωλείται ως πρώτη ύλη (Zawadiak, 2017).

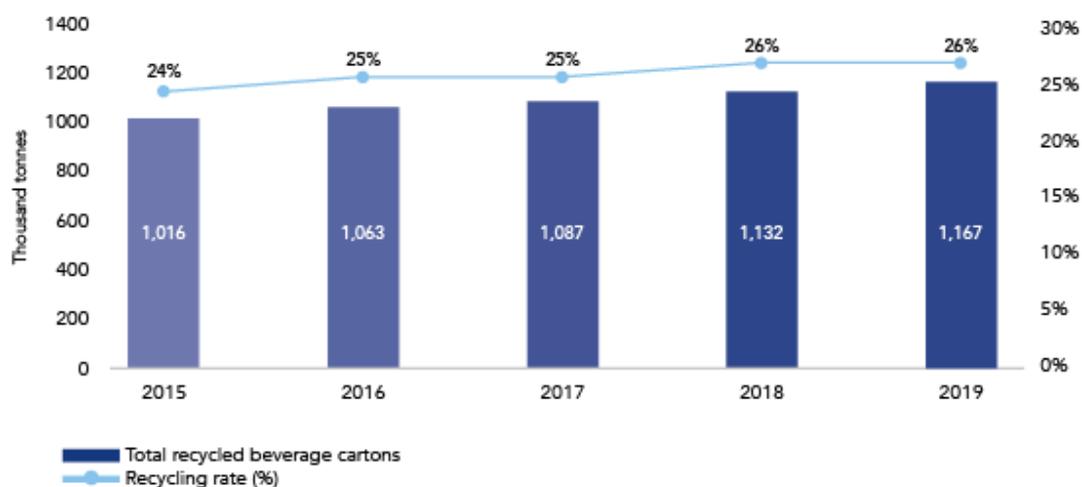
Η Tetra Pak συνεργάζεται με την εταιρία επεξεργασίας αποβλήτων Veolia με στόχο την πλήρη ανακύκλωση των υλικών των χάρτινων συσκευασιών ποτών και τροφίμων. Στο πλαίσιο της νέας συνεργασίας, το εξαγόμενο PolyAl θα επεξεργάζεται σε ειδικές εγκαταστάσεις και θα μετατρέπεται σε πρώτες ύλες που θα χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία πλαστικών. Με τον τρόπο αυτό, αναμένεται να αυξηθεί η ζήτηση και η αξία του ανακυκλωμένου PolyAl, γεγονός που θα συνεισφέρει στη συνέχεια στην πιο αποτελεσματική συλλογή και ανακύκλωση των χάρτινων συσκευασιών ποτών και τροφίμων ¹³.

Παρά τη δυσκολία και το αυξημένο κόστος ανακύκλωσης των συσκευασιών Tetra Pak, ο συνολικός όγκος ανακυκλωμένων συσκευασιών και τα ποσοστά ανακύκλωσης σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια. Το 2010, 30 δισεκατομμύρια χρησιμοποιημένες συσκευασίες ανακυκλώθηκαν, διπλασιάζοντας τον αριθμό από το 2002. Από το 2011, το 20% των συσκευασιών ανακυκλώνεται παγκοσμίως, με χώρες όπως το Βέλγιο, η Γερμανία, η Ισπανία και η Νορβηγία να εμφανίζουν τοπικά ποσοστά ανακύκλωσης άνω του 50% ¹⁴. Τα παγκόσμια στοιχεία ανακύκλωσης για τα πέντε τελευταία χρόνια φαίνονται στο Σχήμα 4, ενώ στην Εικόνα 2 εμφανίζεται ο παγκόσμιος χάρτης με τις χώρες που ανακυκλώνουν μόνο τις ίνες χαρτιού, τα στρώματα πολυαιθυλενίου- αλουμινίου (PolyAl) και ολόκληρες τις συσκευασίες Tetra Pak.

¹³ <https://www.tetrapak.com/gr/about/newsarchive/tetra-pak-veolia> , τελευταία επίσκεψη: 01/10/2020

¹⁴ <https://www.environmentalleader.com/2011/04/tetra-pak-to-double-carton-recycling/>, τελευταία επίσκεψη: 29/09/2020

Συγκριτική Μελέτη Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος των Συσκευασιών Χυμού Τερεθαλικού Πολυαιθυλενίου (PET) και Πολλαπλών Στρωμάτων Tetra Pak



Σχήμα 4. Παγκόσμιος συνολικός όγκος ανακυκλωμένων συσκευασιών ποτών και ποσοστό ανακύκλωσης¹⁵



¹⁵ <https://www.tetrapak.com/sustainability/environmental-impact/a-value-chain-approach/sustainability-measuring-and-reporting/envir-performance-data#recycling>, τελευταία επίσκεψη: 29/09/2020

Εικόνα 2. Παγκόσμιος χάρτης με τις χώρες που ανακυκλώνουν τις ίνες χαρτιού (fibers), τα στρώματα πολυαιθυλενίου- αλουμινίου (PolyAl) και ολόκληρες τις συσκευασίες Tetra Pak (integrated) ¹⁶

¹⁶ <https://www.tetrapak.com/sustainability/recycling/building-recycling-value-chains>. τελευταία επίσκεψη: 29/09/2020

Κεφάλαιο 2. Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής

2.1. Εισαγωγή

Παρά την αδιαμφισβήτητη χρησιμότητά της, ο τομέας της συσκευασίας παράγει περίπου το 2% του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος στις ανεπτυγμένες χώρες και περίπου το ήμισυ αυτής της συσκευασίας χρησιμοποιείται για τρόφιμα. Συνολικά, ο κύκλος ζωής της συσκευασίας δημιουργεί σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Πράγματι, η παραγωγή της συσκευασίας εκμεταλλεύεται φυσικούς πόρους και ενέργεια και προκαλεί περιβαλλοντικές εκπομπές. Επιπλέον, τα απορρίμματα συσκευασίας δημιουργούν αυξανόμενα ζητήματα διάθεσης, καθιστώντας τα το δεύτερο μεγαλύτερο κλάσμα αστικών απορριμμάτων μετά το οργανικό κλάσμα και το ποσοστό αυξάνεται κάθε χρόνο (Bertolini *et al.*, 2016). Η συμβολή της συσκευασίας στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στις αλυσίδες εφοδιασμού τροφίμων έχει οδηγήσει σε σχεδιασμό νομοθεσιών, όπως το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο (1994), αλλά και σε διεξαγωγή πολλών ερευνών (Tencati *et al.*, 2016; Beitzen-Heineke, Balta-Ozkan and Reefke, 2017) που εστιάζουν στη διαχείριση συσκευασιών.

Οι χυμοί φρούτων αποτελούν ένα από τα υψηλότερα κλάσματα της συσκευασίας. Επομένως, είναι κρίσιμο να αξιολογηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ολόκληρου του κύκλου ζωής τους, προκειμένου να εφαρμοστούν βελτιώσεις που προωθούν τη βιωσιμότητα. Δεδομένου ότι οι συσκευασίες PET και Tetra Pak αποτελούν τις συνηθέστερες επιλογές για τα προϊόντα χυμών φρούτων, η μελέτη αυτή επικεντρώνεται στις δύο αυτές εναλλακτικές συσκευασίας, ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ τους και να βρεθεί η πιο φιλική προς το περιβάλλον επιλογή (Pasqualino, Meneses and Castells, 2011).

Το πρώτο βήμα προς την βελτίωση μιας διεργασίας ή ενός προϊόντος είναι η ορθή καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης με σκοπό την αξιολόγηση και την σύγκριση της με κάθε μελλοντική αλλαγή (Boustead, 1993). Η σύγκριση υλικών και διεργασιών με στόχο τον προσδιορισμό του βέλτιστου από περιβαλλοντικής άποψης δεν είναι καθόλου εύκολη. Η αξιολόγηση κύκλου ζωής - AKZ (Life Cycle Analysis) ή LCA, όπως επικράτησε στη διεθνή βιβλιογραφία, είναι μία σχετικά νέα επιστημονική μέθοδος η οποία αναπτύχθηκε για να βοηθήσει στην αντιμετώπιση των οξυμένων, τα τελευταία χρόνια, περιβαλλοντικών προβλημάτων, παρουσιάζοντας μια μεγάλη ποικιλία παραλλαγών. Σκοπός της είναι να εκτιμήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οποίες συνδέονται με μια δεδομένη δραστηριότητα που εξετάζεται (π.χ. την παραγωγή ενός προϊόντος, την ανάπτυξη μιας διεργασίας κ.λπ.) καθόλον τον κύκλο που διαγράφει από την γέννηση έως το θάνατό της (Vigon, 1993; Tukker, 2000; Finnveden *et al.*, 2009; Handbook and Assessment, 2010).

Μια πρώτη διάκριση ανάμεσα στις διάφορες μεθόδους ΑΚΖ γίνεται με βάση τον σκοπό της μελέτης. Ως εκ τούτου, υπάρχουν αναλυτικές μέθοδοι και εργαλεία που δίνουν έμφαση σε μια συγκεκριμένη οικονομική δραστηριότητα (για παράδειγμα την κατασκευή ενός έργου), η οποία αποτελεί το άμεσο αντικείμενο, και σε αυτήν την περίπτωση αναφέρονται κυρίως στην Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Environmental Impact Assessment -EIA) και την Εκτίμηση Κινδύνου (Risk Assessment - RA). Οι δύο αυτές μεθοδολογίες χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα, καθώς παρουσιάζουν μια ξεκάθαρη νομική βάση και μια σειρά τυποποιημένων μεθοδολογιών. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν μεθοδολογίες, οι οποίες διευρύνουν αυτόν τον σκοπό επιχειρώντας την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από ολόκληρο τον κύκλο ζωής μιας συγκεκριμένης οικονομικής δραστηριότητας (για παράδειγμα η κυκλοφορία ενός προϊόντος από την παραγωγή έως την τελική απόθεσή του). Η δεύτερη κατηγορία διακρίνεται με την σειρά της σε δύο υποκατηγορίες: την Ανάλυση Ροής Περιεχομένου (Substance Flow Analysis - SFA) και την Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis - LCA). Στην ανάλυση ροής περιεχομένου η προσοχή εστιάζεται σε ένα συγκεκριμένο περιεχόμενο στοιχείο, όπως για παράδειγμα το χλώριο, το κάδμιο ή ο φώσφορος. Η ροή του στοιχείου αυτού αναλύεται δια μέσου όλων των διεργασιών και προϊόντων της δραστηριότητας ως προς κάθε περιβαλλοντική επίπτωση. Αντίθετα, στην αξιολόγηση κύκλου ζωής, η προσοχή πέφτει σε ένα συγκεκριμένο προϊόν, υλικό, διεργασία ή υπηρεσία μελετώντας κάθε εισροή και εκροή αυτών. Οι δύο παραπάνω υποκατηγορίες είναι συμπληρωματικές και μάλιστα πολλές φορές εμφανίζονται ταυτόχρονα (Udo de Haes, 1993; Γεωργακέλλου, 1998; Kloepffer, 2008).

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να διευκρινιστούν δύο έννοιες οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τις μελέτες αξιολόγησης κύκλου ζωής. Πρόκειται για την Οικολογική Εκτίμηση (Ecological Assessment) και την Περιβαλλοντική Εκτίμηση (Environmental Assessment). Η οικολογική εκτίμηση είναι γενικότερη έννοια η οποία συνδέει περιβαλλοντικές επιπτώσεις με κοινωνικές και οικονομικές επιβαρύνσεις ή ελαφρύνσεις. Αντίθετα, η περιβαλλοντική εκτίμηση είναι πιο περιορισμένη έννοια και εστιάζεται μόνο στην επίδραση που δέχεται η φύση και το περιβάλλον από μια συγκεκριμένη δραστηριότητα. Βέβαια η διάκριση ανάμεσα σε αυτές τις δύο έννοιες είναι λεπτή και όχι πάντοτε εύκολη. Για παράδειγμα, οι επιδράσεις της παραγωγής ενός προϊόντος, καθώς και το περιβάλλον και η υγιεινή της εργασίας μέσα από την οποία προκύπτει το προϊόν αυτό, παρόλο που αποτελούν τμήμα των οικολογικών εκτιμήσεων μπορούν να συμπεριληφθούν και σε περιβαλλοντικές εκτιμήσεις εάν ο άνθρωπος θεωρηθεί ως τμήμα της φύσης. Οι πιο γνωστές έννοιες οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία των οικολογικών εκτιμήσεων είναι η Ανάλυση Γραμμής Προϊόντος (Product Line Analysis) και η Εκτίμηση Τεχνολογίας (Technological Assessment) όπου και οι δύο περιλαμβάνουν στην ανάλυσή τους

κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Από την πλευρά των περιβαλλοντικών εκτιμήσεων τα σημαντικότερα είδη μελετών είναι η Οικολογική Εξέταση (Eco-Test) και το Οικολογικό Σήμα (Eco-Label) ή Ετικέτα Προϊόντος (Product Label), όπου η ανάλυση περιλαμβάνει ένα μικρό αριθμό περιβαλλοντικών κριτηρίων, και η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis - LCA) ή Οικολογικό Ισοζύγιο (Eco-Balance), όπου η ανάλυση περιλαμβάνει έναν απεριόριστα μεγάλο αριθμό περιβαλλοντικών κριτηρίων καταλήγοντας σε αντίστοιχα μεγάλο αριθμό αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά στη συνέχεια, είτε παρουσιάζονται χωρίς περαιτέρω επεξεργασία, είτε συγκεντρώνονται σε λίγες (ή και μία μόνο) περιβαλλοντικές παραμέτρους (Baumann & Tillman, 2004; Finnveden et al., 2009; Γεωργακέλλου, 1998).

Σε μια τυπική μελέτη οικολογικής ανάλυσης και εκτίμησης της γραμμής ενός προϊόντος, περιλαμβάνονται εκτός από περιβαλλοντικά ζητήματα (όπως η κατανάλωση πρώτων υλών και ενέργειας, η ρύπανση ατμοσφαιρικού αέρα και υδάτων, στερεά απορρίμματα, οι επιπτώσεις στην χλωρίδα και την πανίδα κ.λπ.), ζητήματα κοινωνικά (όπως οι συνθήκες εργασίας, η ασφάλεια, η προσωπική ελευθερία, η πολιτιστική πληρότητα, η ευελιξία κ.λπ.), καθώς και οικονομικά ζητήματα (όπως το κόστος ανά μονάδα, η ποιότητα του προϊόντος, το μέγεθος παραγωγής κ.λπ.) (Guinée et al., 2011). Σε ό,τι αφορά τη θεματολογία της ΑΚΖ περιλαμβάνονται, μεταξύ άλλων, θέματα σχετικά με διάφορα χημικά προϊόντα (π.χ. απορρυπαντικά), με οικοδομικά υλικά, συσκευασία, τρόφιμα κ.λπ. (Andersson and Ohlsson, 1994; Heijungs, Huppes and Guinée, 2010; Castell et al., 2013; De Marco et al., 2015). Η προτίμηση σε συγκεκριμένα υλικά και προϊόντα (όπως τα υλικά συσκευασίας) αντανακλά την ίδια την κυρίαρχη δύναμη που βρίσκεται πίσω από την ανάπτυξη της μεθόδου ανάλυσης του κύκλου ζωής και έχει συντελέσει αποφασιστικά σε αυτήν. Δύναμη που δεν είναι άλλη από την πίεση που αισθάνονται ορισμένες βιομηχανίες να αποδείξουν την περιβαλλοντική ανωτερότητα των προϊόντων τους (Junnila, 2008; Roy et al., 2009; Coelho and McLaren, 2013). Η πίεση αυτή απορρέει από το όλο και πιο μεγάλο ενδιαφέρον της κοινής γνώμης για την εξακρίβωση της σχέσης μεταξύ του περιβάλλοντος και των προϊόντων αλλά και μεταξύ του περιβάλλοντος και των επιχειρήσεων που τα παράγουν. Αποκορύφωμα της τάσης αυτής είναι ότι η ΑΚΖ συμπεριελήφθη στα διεθνή πρότυπα περιβαλλοντικής διαχείρισης ISO 14000 όπου ορίζονται οι γενικές απαιτήσεις για τη διενέργεια των ΑΚΖ και για τη συγγραφή εκθέσεων με τα αποτελέσματά τους (ISO-14040) (ISO, 2006). Χωρίς αμφιβολία, τα γεγονότα αυτά καταδεικνύουν την ευνοϊκή, για την αξιολόγηση κύκλου ζωής, δυναμική της διαμορφούμενης κατάστασης σήμερα (Γεωργακέλλου, 1998; Klöpffer, 2003; Guinée et al., 2011).

2.2. Ορισμός, Αρχές και Σκοπός της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ΑΚΖ έχει κάνει μέχρι σήμερα την εμφάνισή της στη διεθνή βιβλιογραφία με διάφορα ονόματα και παραλλαγές. Η ύπαρξη όλων αυτών των παραλλαγών οφείλεται είτε σε μικροδιαφορές στην μεθοδολογία είτε απλώς σε διαφορετική ονομασία του ίδιου πράγματος. Για τον ίδιο λόγο, έχουν προταθεί και αρκετοί ορισμοί όπου συνήθως ο ένας συμπληρώνει τον άλλο. Σύμφωνα με τους ορισμούς αυτούς: Η αξιολόγηση κύκλου ζωής είναι η διαδικασία καταγραφής και ανάλυσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος (χρήσης ενέργειας και πρώτων υλών, ρύπανση ατμόσφαιρας, νερού, εδάφους κ.α.) καθ' όλη την διάρκεια του κύκλου ζωής του, από τη σύλληψη μέχρι την απόρριψή του. Η βασική αρχή της μεθόδου είναι ότι η ρύπανση του περιβάλλοντος μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε στάδιο της ζωής ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας. Αλλαγές σε κάποιο από τα στάδια αυτά είναι πιθανόν να έχουν θετικές ή αρνητικές συνέπειες στα υπόλοιπα στάδια δημιουργώντας οποιασδήποτε μορφής ρύπανσης, καταναλώνοντας ενέργειας και πρώτες ύλες. Τα διάφορα περιβαλλοντικά προγράμματα και στρατηγικές εστιάζονται συνήθως στην ρύπανση ενός μόνο μέσου (αέρα, υδάτων ή εδάφους) με αποτέλεσμα συχνά οι προσπάθειες μείωσης της ρύπανσης του μέσου αυτού να έχουν ως συνέπεια την αύξηση της ρύπανσης κάποιου άλλου μέσου. Το γεγονός αυτό εμφανίζεται πολλές φορές με την μορφή αλυσίδας. Για παράδειγμα, η αποτέφρωση αστικών και λοιπών απορριμμάτων επιλέγεται συχνά σαν λύση στην διαχείριση στερεών, ωστόσο αυτή απαιτεί μεγάλες μονάδες καύσης, οι οποίες με τη σειρά τους επιβαρύνουν το περιβάλλον με την εκπομπή στον ατμοσφαιρικό αέρα μεγάλων ποσοτήτων αέριων ρυπαντών και μάλιστα πολλές φορές εξαιρετικά επικίνδυνων. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτή η αέρια ρύπανση αναπτύχθηκε ειδική τεχνολογία ελέγχου και περιορισμού των ρυπαντών αυτών, η οποία με την σειρά της έχει ως επακόλουθο την δημιουργία υγρών ρυπαντών, οι οποίοι αν δεν θα ελεγχθούν μολύνουν τα ύδατα. Συνεπώς, η ΑΚΖ μπορεί να συντελέσει, όχι μόνο στο να εξακριβωθεί εάν κάποια προτεινόμενη αλλαγή σε προϊόν ή διεργασία έχει ενδεχομένως αρνητικές παρενέργειες στο περιβάλλον, αλλά και στο να καταγραφούν οι παρενέργειες αυτές ποσοτικά (Baumann and Tillman, 2004).

Η αξιολόγηση κύκλου ζωής έχει ως κύριο στόχο τον αντικειμενικό υπολογισμό και ανάλυση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που σχετίζονται με προϊόντα, διεργασίες ή δραστηριότητες. Ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται προσδιορίζοντας και καταγράφοντας την χρήση ενέργειας και πρώτων υλών καθώς και την κάθε είδους ρύπανση του περιβάλλοντος καθ' όλη την διάρκεια της ζωής του προϊόντος ή της δραστηριότητας που μελετάται. Αποτέλεσμα της καταγραφής αυτής είναι να καθίσταται δυνατή τόσο η εκτίμηση των συνολικών επιπτώσεων του προϊόντος ή της δραστηριότητας στο περιβάλλον, όσο και η βελτίωση της κατάστασης ύστερα από σχετικές προτάσεις και αλλαγές. Πέρα όμως από τον

κύριο αυτό σκοπό, υπάρχουν και άλλοι επιμέρους στόχοι οι οποίοι τίθενται κάθε φορά και ανάλογα με την περίπτωση μπορεί να είναι:

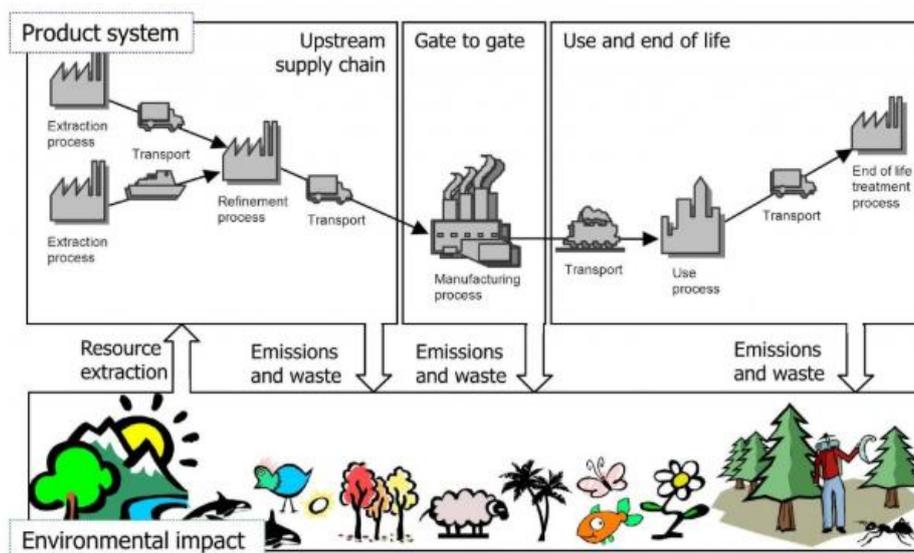
1. η λήψη αποφάσεων για το περιβάλλον με βάση επιστημονικές μεθοδολογίες και όχι με αυθαίρετες εκτιμήσεις,
2. η θέσπιση περιβαλλοντικών κανόνων και ο καθορισμός αντίστοιχων προτεραιοτήτων στη σχεδίαση και παραγωγή διαφόρων προϊόντων,
3. η αξιολόγηση ενός υλικού σε σχέση με ένα άλλο σε διάφορες εφαρμογές (π.χ. στη συσκευασία) και γενικά ο προσδιορισμός του ρόλου διαφόρων υλικών στις σύγχρονες στρατηγικές διαχείρισης του περιβάλλοντος,
4. η δημιουργία επιστημονικού υπόβαθρου με βάση το οποίο θα αποδεικνύεται η αναγκαιότητα υιοθέτησης οικονομικών μέτρων, εφόσον υπάρχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον από προϊόντα ή δραστηριότητες (π.χ. φορολόγηση ορισμένων απορριμμάτων ή αέριων ρυπαντών όπως το CO₂),
5. η ανάδειξη μεθόδων ανάκτησης υλικών και γενικά διαχείρισης αποβλήτων σε σχέση με όλες τις δυνατές εναλλακτικές λύσεις,
6. η δημιουργία μιας αξιόπιστης βάσης ανταλλαγής πληροφοριών στον τομέα της περιβαλλοντικής διαχείρισης, ώστε να είναι ευκολότερη η συνεργασία μεταξύ των διαφόρων φορέων με σκοπό περιβαλλοντικά οφέλη,
7. ο εφοδιασμός των επιχειρήσεων με επιχειρήματα που θα τις διευκολύνουν στο πεδίο του οικολογικού μάρκετινγκ (eco-marketing ή green marketing) υπό την προϋπόθεση ότι η μεθοδολογία της AKZ είναι ομοιόμορφη και τυποποιημένη προκειμένου να μην γίνεται καταστρατήγηση και αντιδεοντολογική χρήση των διαφόρων στοιχείων,
8. η ανατροπή υφιστάμενων δυσμενών περιβαλλοντικών απόψεων της κοινής γνώμης για διάφορα προϊόντα ή δραστηριότητες που ενδεχομένως να είναι λανθασμένες (π.χ. η αντίληψη πολλών για τη βιομηχανία πλαστικών),
9. η δημιουργία μιας βάσης για την εφαρμογή προγραμμάτων ολικής ποιότητας περιβάλλοντος (Environmental Total Quality Programs),
10. η θέσπιση επιστημονικών κριτηρίων με βάση τα οποία θα απονέμονται τα οικολογικά σήματα (eco-labels) στα διάφορα προϊόντα,
11. η ενημέρωση των πολιτών σχετικά με τις επιπτώσεις στο περιβάλλον από προϊόντα που χρησιμοποιούν και δραστηριότητες που ασκούν. Αυτή επιτυγχάνεται είτε με την κοινοποίηση των αποτελεσμάτων μελετών αξιολόγησης κύκλου ζωής σε κάθε ενδιαφερόμενο φορέα (κρατικές αρχές, οικολογικές ομάδες κ.λπ.), είτε με την εφαρμογή της οικολογικής σήμανσης στα προϊόντα (οικολογική ετικέτα ή οικολογικό σήμα) είτε, τέλος, με την πιστοποίηση αυτών για την περιβαλλοντική τους ποιότητα (certification), και

12. η αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων σχετικά με την επίδρασή τους στο περιβάλλον (Γεωργακέλλου, 1998).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, μπορεί να υποστηριχθεί ότι στόχος της αξιολόγησης κύκλου ζωής είναι η μέτρηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης ενός οικονομικού συστήματος κατά την διάρκεια της ζωής του, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποσοτική προσέγγιση. Παρόλο που αυτό μέχρι σήμερα είχε να κάνει κυρίως με προϊόντα, η ΑΚΖ σχετίζεται και με οποιοδήποτε άλλο οικονομικό σύστημα, όπως για παράδειγμα πρώτες ύλες, υπηρεσίες, επιχειρησιακές στρατηγικές και κρατικές πολιτικές.

2.3. Μεθοδολογία και Στοιχεία της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής

Η αξιολόγηση κύκλου ζωής μελετά τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις προϊόντων ή υπηρεσιών σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους - από την εξόρυξη πόρων, από όλα τα στάδια παραγωγής και μεταφοράς, έως τη χρήση και το τέλος της ζωής του προϊόντος.



Σχήμα 5. Περιγραφή μεθοδολογίας Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ)

Η μεθοδολογία της ΑΚΖ., όπως προτείνεται από την SETAC, αποτελείται από τέσσερα στάδια:

- (1) τον καθορισμό του σκοπού και του πλαισίου της μελέτης,
- (2) την απογραφή δεδομένων κύκλου ζωής (LCI– Life Cycle Inventory),
- (3) την εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής και
- (4) την εκτίμηση βελτιώσεων.



Σχήμα 6. Πλαίσιο Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής

Το τελευταίο στάδιο μίας ΑΚΖ κατά ISO συνίσταται στην ερμηνεία και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο στάδιο ο προσδιορισμός του στόχου και της έκτασης της μελέτης καθορίζεται από τον σκοπό, το αντικείμενο, και τη μελλοντική εφαρμογή της μελέτης. Από αυτό το στάδιο εξαρτάται και ορίζεται η κατεύθυνση της μελέτης, το βάθος της, και οι απαιτήσεις της τελικής αναφοράς και της επανεξέτασής της. Κατά την αναλυτική απογραφή δεδομένων του κύκλου ζωής, συλλέγονται και παρουσιάζονται στοιχεία εισόδου και εξόδου του υπό εξέταση συστήματος (Baumann and Tillman, 2004).

2.3.1. Σκοπός και πλαίσιο μελέτης

Για την σωστή καταγραφή και εκτίμηση των επιπτώσεων καθορίζεται για κάθε μελέτη η λειτουργική μονάδα αναφοράς. Ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας αποτελεί ένα θεμελιώδες βήμα για την αποφυγή ασαφειών κατά τη διατύπωση του σκοπού. Η λειτουργική μονάδα συντελεί στη δημιουργία μιας βάσης σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών κύκλων ζωής ενός προϊόντος, και μεταξύ διαφόρων σεναρίων ή υποθέσεων που μελετώνται. Επίσης είναι ένα μέτρο απόδοσης του συστήματος. Θα πρέπει να είναι πλήρως καθορισμένη, μετρήσιμη και σχετική με τα δεδομένα εισόδου και εξόδου.

Ένας εύκολος διαχωρισμός του συστήματος σε υποσυστήματα μπορεί να γίνει με βάση τα στάδια του κύκλου ζωής. Κάθε στάδιο ή διεργασία μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα υποσύστημα του συνολικού συστήματος. Αντιμετωπίζοντας τα στάδια ως υποσυστήματα, διευκολύνεται η συγκέντρωση των δεδομένων για την αναλυτική απογραφή του όλου συστήματος που γίνεται με στόχο τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων για μελλοντική αξιοποίηση ή βελτίωση του προϊόντος. Η μονάδα πάνω στην οποία πραγματοποιείται η ανάλυση μπορεί να είναι

οτιδήποτε ανταποκρίνεται με συνέπεια στην παραγωγική διαδικασία. Για παράδειγμα μια δυνατή μονάδα χρήσης (λειτουργική μονάδα) για AKZ στο σαπούνι θα μπορούσε να είναι μια μεμονωμένη πλάκα. Με την βοήθεια ενός διαγράμματος ροής γίνεται πιο παραστατικός ο τρόπος για την παρουσίαση των συστατικών ενός συστήματος, καθώς περιλαμβάνει μόνο εκείνα τα στάδια του κύκλου ζωής που αναλύονται. Δηλαδή μόνο τα στάδια που έχουν συμπεριληφθεί εντός των ορίων του συστήματος, τα οποία συνδέονται παραστατικά με βέλη που έχουν τη φορά της εξέλιξης της ζωής του προϊόντος.

2.3.2. Απογραφή κύκλου ζωής

Από την στιγμή που οι ροές αναφοράς και τα όρια του συστήματος έχουν οριστεί, το επόμενο βήμα στην AKZ είναι ο καθορισμός των αλληλεπιδράσεων του καθενός από τα συστήματα με το περιβάλλον. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις εμπίπτουν σε δύο κατηγορίες: τις εισροές/καταναλώσεις και τις εκροές/εκπομπές. Οι εισροές περιλαμβάνουν την εξόρυξη μετάλλων και ορυκτών, αλλά και τη χρήση των φυτικών και ζωικών πηγών. Οι εκπομπές είναι εκλύσεις ουσιών στον αέρα, το νερό και το έδαφος. Για κάθε μία από τις διεργασίες που εξετάζονται και ορίζονται στα διαγράμματα ροής καταγράφονται και επεξεργάζονται οι ροές υλικών και ενέργειας και οι αντίστοιχες εκπομπές που προκύπτουν, τα οποία γενικά ονομάζονται δεδομένα εισόδου-εξόδου. Για την διαδικασία αυτή ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Η συλλογή δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει την προδιαγραφή όλων των ροών εισόδου και εξόδου των διεργασιών εντός του συστήματος (ροές προϊόντων/υλικών από και προς άλλες διαδικασίες τις μονάδας, και στοιχειώδη ροών από και προς το περιβάλλον).

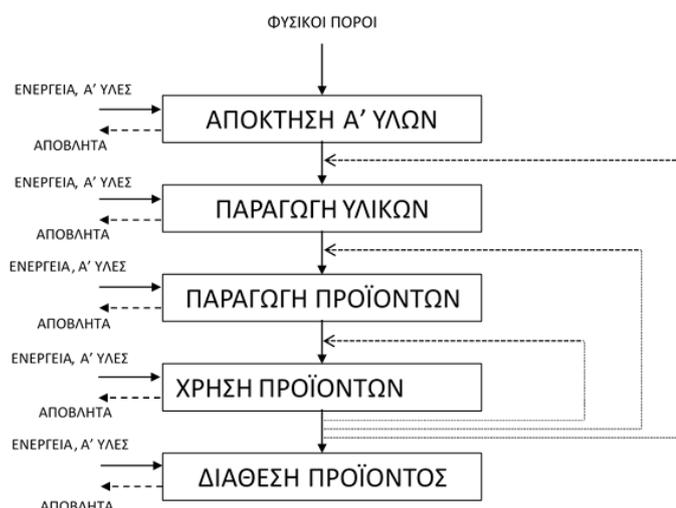
2. Η κανονικοποίηση στη λειτουργική μονάδα πάνω στην οποία προσαρμόζονται και αποδίδονται ποσοτικά τα δεδομένα του συστήματος ή του προϊόντος υπό μελέτη που συλλέγονται. Για παράδειγμα, 1 kg υλικού ή ένα τελικό προϊόν όπως ένα αυτοκίνητο ή 1 χλμ. μετακίνησης, κλπ.

3. Ο καταμερισμός ή αλλιώς η κατανομή των εκπομπών και εξαγωγών των πόρων μέσα σε μια δεδομένη διαδικασία στα διάφορα προϊόντα που προκύπτουν από αυτήν, π.χ. από μία μονάδα διύλισης πετρελαίου παρέχονται νάφθα, βενζίνη, πετρέλαιο κ.λπ.

4. Η αξιολόγηση των δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων (μέσω κυρίως της εκτέλεσης μιας ανάλυσης ευαισθησίας)

Το αποτέλεσμα της απογραφικής ανάλυσης, που αποτελείται από τις στοιχειώδεις ροές που σχετίζονται με τη λειτουργική μονάδα, καλείται συχνά πίνακας απογραφής του κύκλου ζωής. Οι πίνακες απογραφής, καθώς και η περιγραφή των δεικτών κατανομής και αξιολόγησης των δεδομένων, περιγράφονται συνήθως σε ξεχωριστή παράγραφο απογραφής του κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory, LCI).

Η ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στις αναλυτικές απογραφές κατά το στάδιο αυτό αποτελεί υπόθεση υψίστης σημασίας λόγω της μεγάλης ανομοιομορφίας των πηγών προέλευσης και της ευρύτητας του αντικειμένου που εξετάζεται. Οι πηγές αυτές μπορεί να είναι πρωτογενείς ή δευτερογενείς και να προέρχονται από επιστημονικές μελέτες, επιστημονικά άρθρα ή αναφορές, βιομηχανικές και κρατικές, στοιχεία από αισθητήρες και μηχανήματα καταγραφής πάνω στο ίδιο το σύστημα που εξετάζεται, εταιρίες και επαγγελματίες του χώρου, οι οποίοι μπορούν ύστερα από προσωπική συνεννόηση να προσφέρουν πληροφορίες σχετικά με το σύστημα προς μελέτη, ή και ισοζύγια μάζας και ενέργειας που προκύπτουν κατά την μελέτη του συστήματος και άλλες παρόμοιες μελέτες ΑΚΖ. Η ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται συμβάλλει στην αξιοπιστία των μεθόδων ΑΚΖ, καθώς ακόμα και αν παρουσιάζεται υψηλή ποιότητα δεδομένων, η ΑΚΖ μπορεί να μην οδηγεί στην απάντηση των ερωτημάτων της μελέτης. Σε κάθε τελική έκθεση καταγράφεται η προέλευση, η χρονική περίοδος και ο χώρος αναφοράς των δεδομένων. Παρόλα αυτά το στάδιο της απογραφής μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις, αβεβαιότητες και κενά. Για το λόγο αυτό οι παραπάνω παράμετροι πρέπει να αναλύονται και να παρουσιάζονται στο στάδιο του πεδίου ορισμού της μελέτης. Ως εκ τούτου, απαραίτητως πρέπει να ακολουθεί και μια ανάλυση ευαισθησίας των δεδομένων με σκοπό την έγκαιρη επισήμανση των περιορισμών της μελέτης και την ανάλογη κρίση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Baumann and Tillman, 2004).



Σχήμα 7. Πλαίσιο Απογραφής στην ΑΚΖ

Στην περίπτωση που οι διεργασίες και τα συστήματα καταλήγουν σε πολυλειτουργικά ή πολλαπλά προϊόντα (έξοδοι συστήματος), η κατανομή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αποτελεί το επόμενο βήμα. Ως εκ τούτου, σε πολλές διεργασίες όπου παρουσιάζονται περισσότερο από ένα προϊόν (κοινή παραγωγή) είναι απαραίτητο να διαιρεθούν οι

περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαδικασίας μεταξύ των προϊόντων. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω κατανομής/καταμερισμού ή επέκτασης του εξεταζόμενου συστήματος. Για την παραγωγή τροφίμων, που αποτελεί μια πολυσύνθετη διαδικασία που παράγει εμπορεύσιμα προϊόντα και υποπροϊόντα, καθώς και σημαντικά κατάλοιπα, η διαδικασία του καταμερισμού είναι αναπόφευκτη. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας των συστημάτων κατάλληλα κριτήρια κατανομής πρέπει να υιοθετούνται, προκειμένου να διανεμηθούν οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις μεταξύ των υποσυστημάτων της αλυσίδας (Baumann and Tillman, 2004).

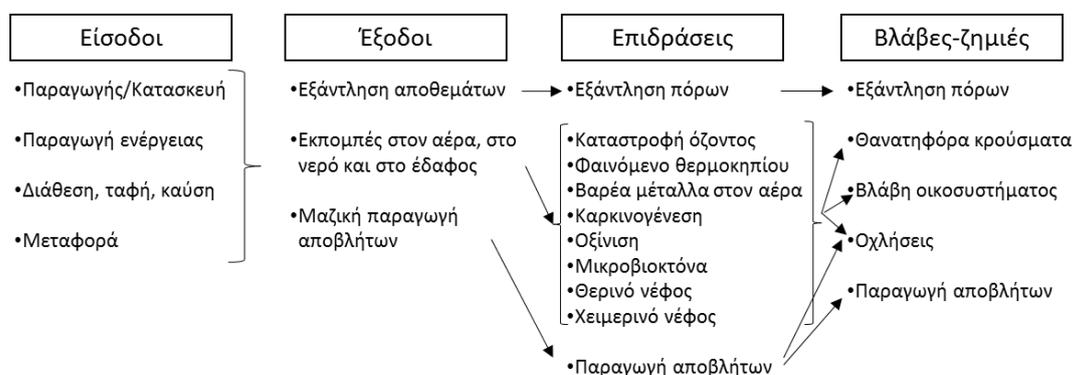
2.3.3. Εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Την καταγραφή ακολουθεί η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η οποία δίνει μία προοπτική στα δεδομένα και στις πληροφορίες εισόδου και εξόδου. Από την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που οφείλονται στα απόβλητα και τους ρύπους που παράγονται, και από τις επιπτώσεις της κατανάλωσης πρώτων υλών και αποθεμάτων, μπορεί να γίνει κατανοητή η σχέση των δεδομένων εισόδου και εξόδου του συστήματος με το περιβάλλον. Αναγνωρίζοντας την επίδραση που μπορεί να έχουν αυτά στο περιβάλλον μπορεί να προκύψουν λύσεις για την εκτίμηση του εξεταζόμενου συστήματος. Η ανάλυση των επιπτώσεων γίνεται συνήθως με τη χρήση περιβαλλοντικών δεικτών..

Η εκτίμηση επιπτώσεων συνήθως περιγράφεται ως μια βήμα προς βήμα ερμηνεία του σταδίου της απογραφής και αποτελεί μια ποσοτική ή/και ποιοτική διαδικασία με τα εξής στάδια:

Απογραφή ⇒ Ταξινόμηση ⇒ Χαρακτηρισμός (⇒ Κανονικοποίηση) ⇒ Αξιολόγηση.

Στο στάδιο της ταξινόμησης, τα δεδομένα που έχουν καταγραφή στο στάδιο της απογραφής του κύκλου ζωής εκχωρούνται σε διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων με βάση τις προβλεπόμενες περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.



Σχήμα 8. Σχηματική απεικόνιση ταξινόμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Στην συνέχεια ακολουθεί το στάδιο του χαρακτηρισμού, όπου η πιθανή συμβολή στην κάθε κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων πολιτικοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τόσο το μέγεθος όσο και την βαρύτητα των κατηγοριών του καταλόγου απογραφής. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για το στάδιο του χαρακτηρισμού, ωστόσο συνήθως εφαρμόζεται η χρήση ισοδύναμων συντελεστών. Οι ισοδύναμοι συντελεστές παρουσιάζουν το ποσοστό συμμετοχής μιας ουσίας στην υπό εξέταση κατηγορία επιπτώσεων σε σχέση με ουσία αναφοράς. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του φαινομένου του θερμοκηπίου η ουσία αναφοράς είναι το CO₂ και η συμμετοχή γνωστών αερίων του θερμοκηπίου μετατρέπεται σε ισοδύναμα kg CO₂. Ως εκ τούτου, ο χαρακτηρισμός δίνει τη δυνατότητα άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων της απογραφής σε κάθε κατηγορία περιβαλλοντικού προβλήματος. Δηλαδή, οι ισοδύναμοι συντελεστές ερμηνεύουν τις εισροές της απογραφής σε άμεσα συγκρίσιμους δείκτες.

Ωστόσο, δεν υπάρχει μια γενικώς αποδεκτή μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων για τον προσδιορισμό των κατάλληλων περιβαλλοντικών δεικτών. Αντίθετα έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι όπως οι: CML 2, ILCD recommended method, ReCiPe, Eco-Indicator 99, IMPACT 2002+ κ.α., οι οποίες βασίζονται σε συγκεκριμένες φάσεις εκτίμησης επιπτώσεων και σε συγκεκριμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η κάθε μέθοδος παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Γι' αυτό το λόγο πριν την επιλογή της, πρέπει να γίνει μια πρώτη διάκριση όσον αφορά τη θέση και συνάφεια των επιπτώσεων στην αλυσίδα όπως περιγράφεται στη μεθοδολογία.

Ο υπολογισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων έγκειται είτε στις κύριες-μέσες κατηγορίες επιπτώσεων (mid-point) είτε στις τελικές κατηγορίες επιπτώσεων (end-point), είτε και στις δύο ανάλογα με τη μέθοδο. Για παράδειγμα στην περίπτωση του φαινομένου του θερμοκηπίου μια μέση κατηγορία είναι τα ισοδύναμα κιλά CO₂ που εκπέμπονται, ενώ η αντίστοιχη τελική κατηγορία είναι οι επιπτώσεις στην υγεία ή στη βιοποικιλότητα που προκύπτουν από την αλλαγή του κλίματος και στην συγκεκριμένη περίπτωση εκφράζονται ως απώλεια ζωής. Στα τελικά σημεία περιγράφονται με μεγαλύτερη ακρίβεια ποιες είναι οι επιπτώσεις στο περιβάλλον, ωστόσο όμως λόγω της πρόσθετης μοντελοποίησης της εξέλιξης των ουσιών υπάρχει αβεβαιότητα.

Η σύγκριση μεταξύ δεικτών κατηγορίας επιπτώσεων είναι ένα προαιρετικό βήμα σε μερικές εφαρμογές AKZ κατά ISO 14042. Στην κοινή πρακτική της AKZ, αυτό το προαιρετικό βήμα, στηρίζεται όχι μόνο στις φυσικές επιστήμες, αλλά πολύ συχνά και στις κοινωνικές επιστήμες και, σε μερικές περιπτώσεις, στις οικονομικές. Για να απαντηθούν τα παραπάνω θέματα χρησιμοποιούμε την κανονικοποίηση, την ομαδοποίηση και τη στάθμιση των δεδομένων.

Κατά την κανονικοποίηση το συνολικό αποτέλεσμα ενός δείκτη κατηγορίας επίπτωσης κανονικοποιείται σε σχέση με μια τιμή αναφοράς (για παράδειγμα το μέσο ετήσιο περιβαλλοντικό φορτίο σε μια χώρα) όπου ο συνολικός δείκτης κατηγορίας επίπτωσης διαιρείται με αυτήν την τιμή αναφοράς. Στόχος της κανονικοποίησης είναι να τοποθετήσει τα αποτελέσματα της εκτίμησης επιπτώσεων σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, και να ρυθμίσει τα αποτελέσματα ώστε να έχουν κοινές διαστάσεις (Pennington *et al.*, 2006). Εναλλακτικά, τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης, παρέχουν το πρωτογενές υλικό για τα στάδια της ομαδοποίησης και της στάθμισης. Η ομαδοποίηση αποτελεί μια ποιοτική ή ημιποσοτική διαδικασία κατά την οποία πραγματοποιείται ταξινόμηση των αποτελεσμάτων και ιεράρχησή τους στις κατηγορίες επιπτώσεων, οδηγώντας σε μια ευρεία ταξινόμηση, ή ιεράρχηση, των κατηγοριών επιπτώσεων σύμφωνα με τη βαρύτητά τους. Μια τέτοια ταξινόμηση ευνοεί την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη σχετική σημαντικότητα των διαφορετικών κατηγοριών επιπτώσεων. Τέλος, η στάθμιση αναφέρεται στη χρήση αριθμητικών συντελεστών οι οποίοι βασίζονται σε αξιακές επιλογές, εξυπηρετώντας τη σύγκριση ανάμεσα στις διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων καθώς τα αποτελέσματα δεικτών πολλαπλασιάζονται με τους παράγοντες στάθμισης και προστίθενται για να διαμορφώσουν ένα συνολικό αποτέλεσμα. Η στάθμιση εφαρμόζεται τόσο σε κανονικοποιημένα ή και σε μη-κανονικοποιημένα αποτελέσματα ¹⁷.

Πίνακας 2. Συνηθέστερες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων ¹⁷

Κατηγορία Περιβαλλοντικής Επίπτωσης	Κλίμακα	Κατηγοριοποίηση εκπομπών
Φαινόμενο του θερμοκηπίου	Παγκόσμια	CO ₂ , NO ₂ , CH ₄ , CFCs, HCFCs
Στρατοσφαιρικό όζον	Παγκόσμια	CFCs, HCFCs, Αλογονούχες ενώσεις
Όξινη	Περιφερειακή ή Τοπική	SO _x , NO _x , HCl, HF, NH ₄
Ευτροφισμός	Τοπική	PO ₄ , NO, NO ₂ , NH ₄
Φωτοχημικό νέφος	Τοπική	NMHC (non methane hydrocarbon)

¹⁷ <https://tosca-life.info/getting-started-guides/life-cycle-assessment/>, τελευταία επίσκεψη: 03/09/2020

Τοξικότητα εδάφους	Τοπική	Χημικές τοξικές ουσίες με δημοσιευμένη θανατηφόρα επίπτωση σε τρωκτικά
Τοξικότητα νερού	Τοπική	Χημικές τοξικές ουσίες με δημοσιευμένη θανατηφόρα επίπτωση σε ψάρια
Ανθρώπινη υγεία	Παγκόσμια, Περιφερειακή ή Τοπική	Συνολικές εκπομπές στον αέρα, στο νερό και στο έδαφος
Μείωση φυσικών πόρων	Παγκόσμια, Περιφερειακή ή Τοπική	Ποσότητες ορυκτών και φυσικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται
Χρήση γης	Παγκόσμια, Περιφερειακή ή Τοπική	Διαθεσιμότητα γης
Χρήση νερού	Περιφερειακή ή Τοπική	Έλλειμα υδάτινου δυναμικού

2.3.4. Εκτίμηση βελτιώσεων

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων, κατ' επέκταση η εκτίμηση των βελτιώσεων του συστήματος προς μελέτη, είναι το στάδιο κατά το οποίο τα αποτελέσματα των προηγούμενων σταδίων και οι παραδοχές εξετάζονται και αξιολογούνται από την άποψη πληρότητας, ευρωστίας και συνάγονται τα τελικά συμπεράσματα. Το πρότυπο ISO 14043 προσδιορίζει τρεις κύριες κατηγορίες δραστηριοτήτων: την αξιολόγηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων, καθώς και την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων και τη διατύπωση προτάσεων. Οι δραστηριότητες αυτές επιτυγχάνονται υστέρα από διασφάλιση της κοινής επεξεργασίας γενικών και ειδικών θεμάτων που τα ενδιαφερόμενα μέρη θέλουν να συζητήσουν κατά τη διάρκεια της φάσης ερμηνείας. Ανάμεσα τους:

- η επιλογή των υποθέσεων και των στοιχείων προς έλεγχο και ανάλυση κατά την φάση της ερμηνείας (πχ. οι προδιαγραφές ειδικών προϊόντων και συστημάτων, οι επιλογές μεθοδολογίας, και τα χρησιμοποιούμενα πρότυπα στοιχείων και υπολογισμού),
- η εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας και της ανάλυσης αβεβαιότητας,
- ο προσδιορισμός της ακρίβειας των αποτελεσμάτων LCA που υπολογίστηκαν (λόγω της αβεβαιότητας των στοιχείων στη διαδικασία που μελετάται),
- ο προσδιορισμός του εύρους ζώνης των αποτελεσμάτων LCA (σε σχέση με τον προσδιορισμό της ακρίβειας αυτών των αποτελεσμάτων και της επάρκειας, ποιότητας και αποτελεσματικότητας της ανάλυσης ευαισθησίας),

- η πιθανή ρύθμιση του στόχου της μελέτης LCA και η πιθανή αναθεώρηση της περαιτέρω διαδικασίας,
- οι προθέσεις όσον αφορά μια πιθανή επαναληπτική προσέγγιση στις φάσεις (από την άποψη της κατανομής και της στάθμισης) και
- ο περαιτέρω προγραμματισμός της διαδικασίας διαχείρισης (Baumann and Tillman, 2004).

2.4. Εργαλεία Λογισμικού και μέθοδοι αξιολόγησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει ένα ευρύ φάσμα εμπορικών εργαλείων λογισμικού για τη διεξαγωγή μελετών AKZ ή για την υποστήριξη των διαφόρων φάσεων και εφαρμογών μιας AKZ. Μερικά από αυτά τα εργαλεία έχουν αναπτυχθεί για συγκεκριμένους τομείς της βιομηχανίας (π.χ. κατασκευές, διαχείριση αποβλήτων, γεωργία, ενέργεια, ανακύκλωση κ.λπ.), ενώ άλλα προορίζονται για τη συντριπτική πλειονότητα των βιομηχανιών. Τα λογισμικά Gabi, OpenLCA και SimaPro είναι σήμερα το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο λογισμικό LCA στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ και είναι αποδεκτά από την κοινότητα LCA ως αξιόπιστες και κυρίαρχες επιλογές.

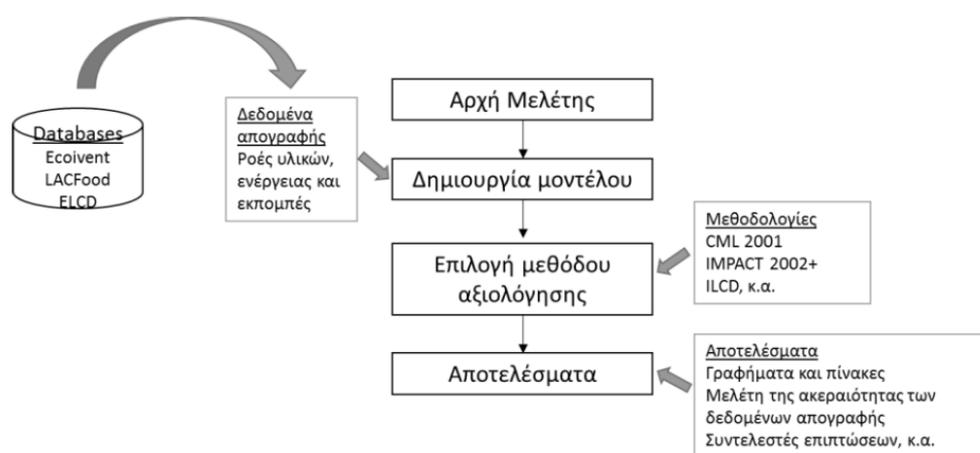
Τα λογισμικά αυτά παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες ως προς τις μεθόδους εκτίμησης επιπτώσεων που προσφέρουν. Ωστόσο, η βασική διαφορά ανάμεσά τους είναι η πληθώρα των βάσεων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθεί το μοντέλο της διεργασίας. Τα περισσότερα από τα λογισμικά έχουν τις δικές τους βάσεις δεδομένων. Οι πιο διαδεδομένες βάσεις δεδομένων αναγράφονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Μερικές δημοφιλείς βάσεις δεδομένων και βασικά χαρακτηριστικά

Βάση Δεδομένων	Προμηθευτής	Ιστοσελίδα	Δεδομένα
Gabi	Gabi software	http://www.gabi-software.com/databases/gabi-databases	15000 εργοστάσια και διεργασίες με πρωτογενή δεδομένα από συνεργαζόμενες εταιρίες και τη μεγαλύτερη κάλυψη βιομηχανικών δεδομένων LCI παγκοσμίως σε τομείς γεωργίας, κατασκευών, χημικών
EcoInvent	Ecoinvent Centre	http://www.ecoinvent.org/database/	πάνω από 4000 βιομηχανικές διεργασίες στους τομείς: ενέργεια, μεταφορές, κατασκευαστικά υλικά, χημικά, βιομηχανίες χαρτιού, γεωργία και διαχείριση αποβλήτων

U.S. LCI	NREL, USA	http://www.nrel.gov/lci/database/	423 διεργασίες που καλύπτουν τις πιο σημαντικές πληροφορίες που αφορούν την απογραφή δεδομένων για την ενέργεια, τις μεταφορές και την παραγωγή υλικών (γεωργικών, χημικών, πλαστικών, μεταλλικών, ξύλου) στη Β. Αμερική
LCA Food	2.-0 LCA Consultants, Denmark	http://www.lcafood.dk/	περιβαλλοντικές πληροφορίες για 500 διεργασίες τροφίμων σε διαφορετικά στάδια της αλυσίδας παραγωγής στη Δανία.
ELCD	European Commission	http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/dataset	327 διεργασίες σε Ευρωπαϊκό επίπεδο που σχετίζονται με επιχειρήσεις και άλλες πηγές για τα κυρίαρχα υλικά, την ενέργεια, τις μεταφορές και τη διαχείριση αποβλήτων. Τα αντίστοιχα δεδομένα έχουν επισήμως εγκριθεί.

Τα περισσότερα από τα λογισμικά ακολουθούν τα βήματα που φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα για την πραγματοποίηση της ΑΚΖ μιας δοσμένης διεργασίας.



Σχήμα 9. Μεθοδολογικό διάγραμμα για την ανάκτηση των πιθανών παραγόντων από τα λογισμικά

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί μελέτη ΑΚΖ με χρήση του λογισμικού Gabi ts v8.7. Το GaBi προσφέρει μια πλήρη σουίτα λογισμικού, η οποία διευκολύνει τη διαδικασία επιλογής του καλύτερου συνόλου δεδομένων για τα στοιχεία απογραφής μέσω βάσεων δεδομένων και βοηθάει στην διαδικασία σχεδιασμού των διαγραμμάτων ροής μιας διεργασίας. Χρησιμοποιώντας τη λειτουργία αναφοράς που προσφέρει το λογισμικό συλλέγονται δεδομένα σε κάθε σημείο της διαδικασίας σχεδιασμού και προσδιορίζεται στοχευμένα το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Οι τεκμηριωμένες βάσεις δεδομένων του

GaBi είναι και αυτές σύμφωνες με τα Διεθνή στάνταρ Κύκλου Ζωής, αλλά πωλούνται από τους προμηθευτές μεμονωμένα σε διάφορες τιμές. Ωστόσο, λόγω του όγκου των επιλογών ως προς τις βάσεις δεδομένων αυτής της αρθρωτής πλατφόρμας, το GaBi είναι συμβατό με τα πρότυπα ISO 14040 και 14044 και είναι εξαιρετικά ευέλικτο. Η ενσωματωμένη βάση δεδομένων έχει 4.500 σύνολα δεδομένων, και το λογισμικό λειτουργεί επίσης με την Ecoinvent¹⁸.

Το εργαλείο λογισμικού Gabi περιλαμβάνει:

- α) μια εφαρμογή για το χρήστη για τη μοντελοποίηση του συστήματος του προϊόντος/διεργασίας,
- β) μια βάση δεδομένων διεργασιών μονάδων κύκλου ζωής,
- γ) μια βάση δεδομένων εκτίμησης των επιπτώσεων με στοιχεία που υποστηρίζονται από διάφορες μεθοδολογίες αξιολόγησης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής, και
- δ) μια αριθμομηχανή που συνδυάζει αριθμούς από βάσεις δεδομένων, σύμφωνα με τη μοντελοποίηση του συστήματος του προϊόντος στο περιβάλλον εργασίας του χρήστη (Herrmann and Moltesen, 2015).

¹⁸ <http://www.linkcycle.com/how-to-conduct-a-life-cycle-analysis-cheaply-or-free/>.

<https://www.iso.org/standard/37456.html>, τελευταία επίσκεψη: 03/10/2020

Κεφάλαιο 3. Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής για τις συσκευασίες Tetra Pak και PET

Η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) αποτελεί ένα εργαλείο κατάλληλο για την εκτίμηση περιβαλλοντικών και ενεργειακών επιδόσεων σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας (Baumann & Tillman, 2004b; Roy et al., 2009). Ιδανικά, μια πλήρης μελέτη πρέπει να περιλάβει την παραγωγή, τη βιομηχανική επεξεργασία, την αποθήκευση, τη διανομή και το τέλος ζωής. Όμως όλα τα στάδια αυτά συνθέτουν ένα σε βάθος πολύπλοκο σύστημα. Ως εκ τούτου, απαιτείται, λοιπόν, να εδραιωθούν κάποιες παραδοχές και απλοποιήσεις οι οποίες θα επιτρέψουν τη μοντελοποίηση του πολυσύνθετου αυτού προβλήματος, ξεκινώντας από τον ορισμό του σκοπού της μελέτης.

3.1. Προσδιορισμός σκοπού και αντικειμένου της μελέτης

Κάθε διεξαγόμενη μελέτη ΑΚΖ ξεκινά με μια ρητή δήλωση του σκοπού και του αντικειμένου μελέτης της, η οποία με τη σειρά της καθορίζει τα εμπόδια και το πλαίσιο της μελέτης. Αυτό είναι ένα βασικό βήμα και τα πρότυπα ISO απαιτούν ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής μιας ΑΚΖ να είναι σαφώς καθορισμένοι και συνεπείς με την επιδιωκόμενη εφαρμογή.

Ο στόχος αυτής της ανάλυσης LCA είναι η **αξιολόγηση και σύγκριση δύο διαφορετικών αλυσίδων διεργασιών για την ανάπτυξη και το τέλος ζωής δύο συσκευασιών χυμών φρούτων:**

- **μπουκάλια τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (PET)**
- **πολυστρωματικές συσκευασίες Tetra Pak**

Οι αναπτυγμένες συσκευασίες θα συγκριθούν μεταξύ τους ως προς τις περιβαλλοντικές τους πτυχές και επιπτώσεις για την εύρεση της πιο φιλικής προς το περιβάλλον συσκευασίας. Επιπλέον, θα εντοπιστούν και θα αξιολογηθούν οι επιβαρυνμένες διεργασίες ή ροές υλικών που καταναλώνονται.

3.1.1. Λειτουργική Μονάδα

Η λειτουργική μονάδα είναι ένα ποσοτικό μέτρο της λειτουργίας του συστήματος που μελετάται. Παρέχει μια αναφορά στην οποία σχετίζονται οι εισοδοι και οι έξοδοι στο σύστημα προϊόντων. Αυτό επιτρέπει τη σύγκριση δύο ή περισσότερων διαφορετικών προϊόντων. Στο πλαίσιο της εργασίας, η **λειτουργική μονάδα θεωρείται η συσκευασία που περιέχει ένα λίτρο χυμού**, εξαιρώντας το καπάκι (πώμα) της συσκευασίας. Τα δύο είδη συσκευασιών ζυγίστηκαν για διευκόλυνση μελλοντικών υπολογισμών, με τη συσκευασία PET ενός λίτρου

χυμού ψυγείου να έχει βάρος 48.80 gr και την αντίστοιχου περιεχόμενου όγκου χυμού πολυστρωματική συσκευασία Tetra Pak να είναι ίση με 34.96 gr.

Τα προϊόντα και οι γραμμές παραγωγής που χρησιμοποιούνται για την εκπλήρωση αυτής της λειτουργικής μονάδας ονομάζονται ροές αναφοράς.

3.1.2. Ροές Αναφοράς

Τα προϊόντα και οι διαδρομές παραγωγής που εξετάστηκαν αναφέρονται σε **συστήματα παραγωγής και τέλους ζωής, δηλαδή ανακύκλωσης/ καύσης/ υγειονομικής ταφής**, των συσκευασιών.

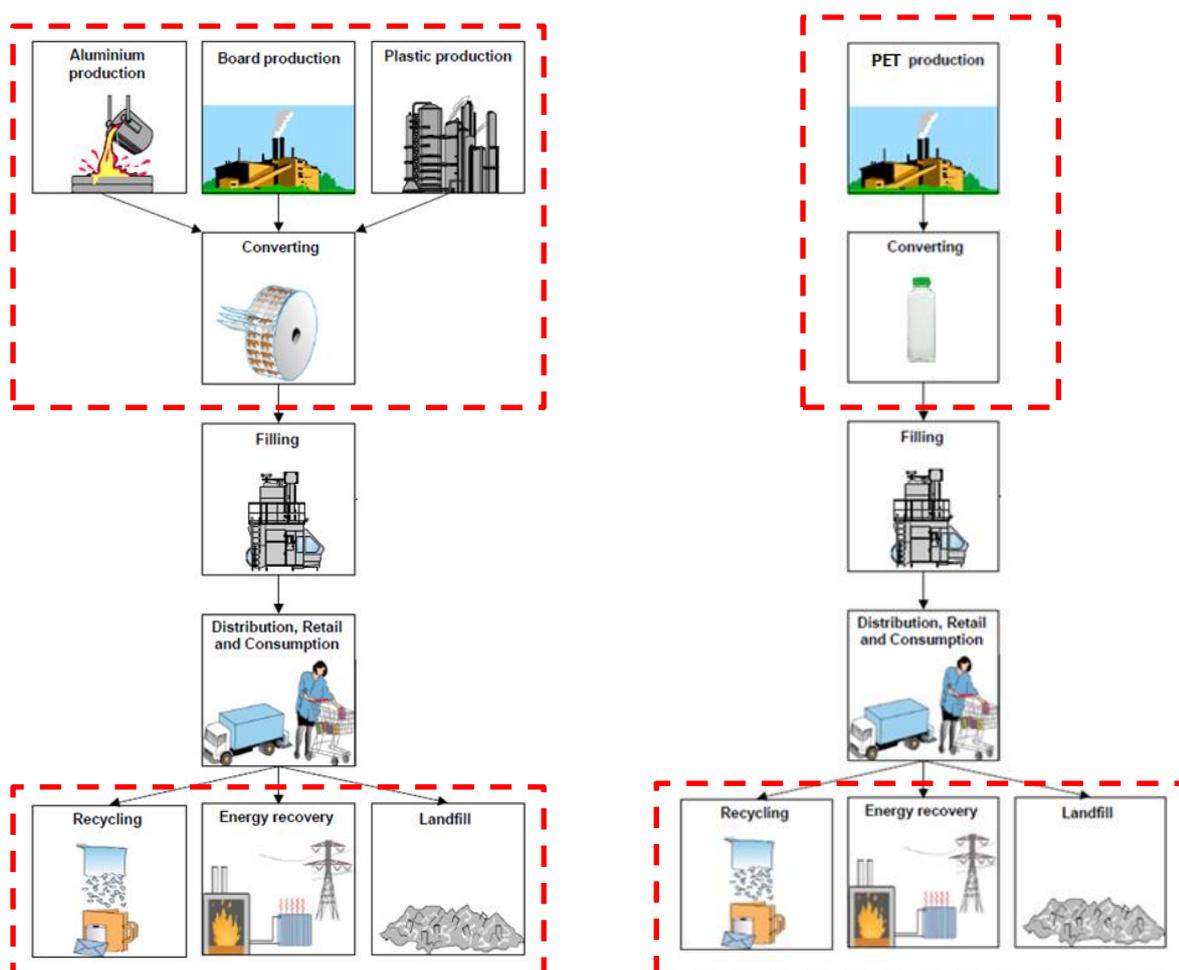
Συγκεκριμένα, για την παραγωγή φιαλών PET, εξετάστηκε η παραγωγή κόκκων PET (πρώτη ύλη), η ξήρανσή τους και η εκβολή τους. Όσον αφορά στο τέλος ζωής τους, στην παρούσα μελέτη οι συσκευασίες PET μεταφέρονται προς ανακύκλωση σε ποσοστό 30%, προς καύση σε ποσοστό 40% και υγειονομική ταφή σε ποσοστό 30%.

Αντίστοιχα, στην παραγωγή Tetra Pak συμπεριλαμβάνονται η παραγωγή των πρώτων υλών, δηλαδή, φύλλων πολυαιθυλενίου (PE), σκληρού χαρτιού, φύλλων αλουμινίου, και στη συνέχεια η σύνδεσή τους και η κατασκευή της πολυστρωματικής συσκευασίας. Το τέλος ζωής αναφέρεται σε ανακύκλωση σε ποσοστό 26%, σε καύση σε ποσοστό 29.6% και σε υγειονομική ταφή σε ποσοστό 46.4%. Κατά την ανακύκλωση, ουσιαστικά μόνο το 75% που αντιπροσωπεύει το κλάσμα χαρτιού στη συσκευασία, ανακυκλώνεται και παράγει ίνες χαρτιού (σε ποσοστό 80% του συνολικού χαρτιού) που χρησιμοποιούνται για παραγωγή προϊόντων χαρτιού εκτός συσκευασιών. Από 1 kg συσκευασίας που πηγαίνει για ανακύκλωση παράγονται 0.6 kg ινών χαρτιού, ενώ το υπόλοιπο ποσό (0.4 kg), το οποίο αποτελείται από 0.20 kg πολυαιθυλένιο, 0.5 kg αλουμίνιο και 0.15 kg μη ανακυκλώσιμου χαρτιού, διατίθεται προς καύση (σε ποσοστό 39%) και προς υγειονομική ταφή (σε ποσοστό 61%). Συνολικά δηλαδή, από 1 kg Tetra Pak συσκευασίας, τα 0.16 kg ανακυκλώνονται, τα 0.33 kg καίγονται και τα 0.51 kg μεταφέρονται σε χώρους υγειονομικής ταφής.

3.1.3. Όρια συστήματος και εξαιρούμενες διεργασίες

Ο στόχος μιας AKZ στη βιομηχανία είναι να καλύψει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από το λίκνο έως τον τάφο (cradle to grave), δηλαδή τον πλήρη κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Ωστόσο, η συμπερίληψη σε μια ολοκληρωμένη μελέτη AKZ όλων των τομέων δεν είναι πάντα εφικτή, μπορεί να περιλαμβάνει υπέρογκο φόρτο εργασίας ή να αυξάνει σημαντικά και επικίνδυνα την πολυπλοκότητα της ανάλυσης. Για να κρατηθεί η μελέτη διαχειρίσιμη, η περιοχή που καλύπτεται πρέπει να είναι περιορισμένη, σε τέτοιο βαθμό όμως όπου τουλάχιστον όλες οι μεγάλες αλλαγές, από την άποψη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται από

την επιλογή της διαδρομής να περιλαμβάνονται στο σύστημα. Επειδή στόχος της παρούσας μελέτης είναι η σύγκριση των αποτυπώματων δύο ειδών συσκευασιών, οι διεργασίες που φέρουν μεγαλύτερες αλλαγές είναι η παραγωγή τους και η διαχείριση των αποβλήτων τους (τέλος ζωής). **Η πλήρωση (γέμισμα) με χυμό, η μεταφορά και η διανομή, καθώς και η χρήση των συσκευασιών δεν συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη** καθώς δεν φέρουν μεγάλες αλλαγές μεταξύ των δύο ειδών στο περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και αυξάνουν την πολυπλοκότητα της ανάλυσης. Οι διεργασίες που εξετάζονται και οι διεργασίες που εξαιρούνται από τη μελέτη παρουσιάζονται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10. Σύστημα διεργασιών που εξετάζονται (εντός του κόκκινου πλέγματος) και εξαιρούνται της μελέτης (εκτός του πλέγματος) για τη συσκευασία Tetra Pak (αριστερά) και τη συσκευασία PET (δεξιά)

Όσον αφορά τα γεωγραφικά όρια, η Ευρώπη επιλέχθηκε ως η γεωγραφική περιοχή που εφαρμόζεται η μελέτη, ενώ όσον αφορά τα χρονικά όρια, το χρονικό πλαίσιο είναι από το έτος 2018, το έτος της έκδοσης του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε, έως σήμερα.

3.2. Απογραφή δεδομένων κύκλου ζωής

3.2.1. Εισαγωγή

Έπειτα από τον καθορισμό του στόχου και του αντικειμένου μελέτης της ΑΚΖ, το επόμενο βήμα είναι η σύνδεση όλων των δραστηριοτήτων με ποσοτικά δεδομένα, δηλαδή η απογραφή δεδομένων του κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory -LCI). Η απογραφή δεδομένων είναι η φάση της ΑΚΖ που περιλαμβάνει τη συλλογή και την ποιοτική/ ποσοτική αναγνώριση των εισροών και των εκροών για ένα δεδομένο σύστημα προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του ή για μία μόνο διεργασία. Αυτό συνεπάγεται απογραφή όλων των υλικών/ πρώτων υλών και των εισροών ενέργειας και όλων των εκπομπών στον αέρα, το νερό και το έδαφος. Έτσι, διαμορφώνεται μια λίστα με την ποσότητα ενέργειας ή υλικών που χρησιμοποιούνται σε κάθε διεργασία κατά την κατασκευή ενός προϊόντος και την ποσότητα στερεών, υγρών ή αέριων αποβλήτων που δημιουργούνται κατά την κατασκευή, τη χρήση και την τελική διάθεσή του προϊόντος. Η απογραφή δεδομένων του κύκλου ζωής περιλαμβάνει τη συλλογή δεδομένων και τη συγκέντρωσή τους σε έναν πίνακα απογραφής δεδομένων κύκλου ζωής.

Η συλλογή δεδομένων αποτελεί την πιο χρονοβόρα εργασία σε μια μελέτη ΑΚΖ, καθώς χρειάζεται να γίνει καταγραφή ποιοτικών και ποσοτικών πληροφοριών για όλες τις στοιχειώδεις ροές του συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τον όγκο των δεδομένων ή αντίθετα την έλλειψη διαθέσιμων πληροφοριών για κάποιες διεργασίες και προϊόντα είναι δυνατό να παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις στην ποιότητα των δεδομένων εισόδου και εξόδου. Συνήθως τα δεδομένα εισόδου, όπως η κατανάλωση ενέργειας και πρώτων υλών, είναι άμεσα διαθέσιμα καθώς καταχωρούνται από τις εταιρείες, τα εργοστάσια, τους ερευνητές και τους παραγωγούς. Αυτό δεν συμβαίνει πάντα με τα δεδομένα εξόδου, τα οποία πολλές φορές είναι ελλιπή καθώς καταγράφονται μόνο οι ροές των προϊόντων που παράγονται και όχι των παραπροϊόντων, υπολειμμάτων ή φύρας που προκύπτει κατά την διεργασία. Παρόλα αυτά, το πρόβλημα της μπορεί να αποφευχθεί με την κατάστρωση και τον υπολογισμό ισοζυγίων μάζας και ενέργειας (Alting, Bilberg and Larsen, 1988).

Αυτό το υποκεφάλαιο περιγράφει λεπτομερώς τις εμπλεκόμενες διεργασίες σε καθένα από τα συστήματα προϊόντων που αξιολογούνται (συσκευασίες PET και Tetra Pak), καθώς και τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του LCI για αυτά τα συστήματα. Η διαδικασία ανάλυσης απογραφής γίνεται σύμφωνα με τη λειτουργική μονάδα (συσκευασία για ένα λίτρο χυμού), τα διαγράμματα ροής (αφορούν την παραγωγή και το τέλος ζωής) και τα

όρια του συστήματος για κάθε προϊόν. Τα δεδομένα, που χρησιμοποιούνται σε αυτήν τη μελέτη, προέρχονται από μετρήσεις (βάρους και επιφάνειας) που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, από πηγές βιβλιογραφίας και συγκεκριμένα δημοσιεύσεις σε ερευνητικά περιοδικά και αναφορές στην ιστοσελίδα της Tetra Pak και από τις πιο κοινές βάσεις δεδομένων LCA, GaBi και Ecoinvent.

Το πιο δύσκολο σημείο στη συλλογή δεδομένων ήταν η ανακύκλωση της συσκευασίας Tetra Pak. Σύμφωνα με τα τελευταία επίσημα στοιχεία της Tetra Pak, το 2019 ανακυκλώθηκε παγκοσμίως το 26% των συσκευασιών της (Tetra Pak, 2020). Στον χάρτη που εμφανίζεται στην ίδια αναφορά και παρουσιάζει τα εργοστάσια σε παγκόσμια κλίμακα που ανακυκλώνουν τις συσκευασίες, η πλειοψηφία των μονάδων (57.06% και συγκεκριμένα 97 στις 170) ανακυκλώνουν μόνο το χαρτί παράγοντας ίνες, οι οποίες όμως δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά σε συσκευασίες. Λόγω αυτού του ποσοστού, στην παρούσα μελέτη, θεωρήθηκε ότι στο 26% των συσκευασιών που οδηγούνται προς ανακύκλωση, ουσιαστικά ανακυκλώνεται μόνο το 75% του υλικού που αντιπροσωπεύει το χαρτί, ενώ το υπόλοιπο 25% που αντιπροσωπεύει το αλουμίνιο και το πολυαιθυλένιο οδηγείται για καύση σε ποσοστό 39% και υγειονομική ταφή σε ποσοστό 61% (από τη βάση δεδομένων Gabi). Το χαρτί που πηγαίνει προς ανακύκλωση μπορεί να παράγει ίνες σε ποσοστό 80%, όπως αναφέρεται στη μελέτη του Xie (Xie *et al.*, 2013). Από το υπόλοιπο 20%, το 39% πηγαίνει προς καύση και το 61% προς υγειονομική ταφή.

Η διεργασία ανακύκλωσης της συσκευασίας Tetra Pak πραγματοποιείται αρχικά στον πολτοποιητή, δεδομένα για τον οποίο δεν υπήρχαν στις βάσεις του Gabi και βρέθηκαν από επίσημες ιστοσελίδες εταιριών κατασκευής πολτοποιητών¹⁹. Έγινε υπόθεση μιας μέσης δυναμικότητας (250 τόνοι ανά ημέρα) και βρέθηκαν οι καταναλώσεις σε ενέργεια και νερό, δεδομένης της τελικής υγρασίας που έχει ο πολτός στο τέλος της διεργασίας.

Το μοντέλο απογραφής εφαρμόστηκε μέσω αποκλειστικού λογισμικού, συγκεκριμένα του λογισμικού LCA GABI ts (v8.7.0.18). Το GaBi υπολογίζει τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς και άλλες σημαντικές ποσότητες ενός συστήματος προϊόντων βάσει σχεδίων. Σε ένα σχέδιο, το σύστημα που μελετάται αποτελείται από διεργασίες και ροές. Σε όρους LCA, ένα σχέδιο αντιπροσωπεύει το σύστημα με τα όριά του, οι διεργασίες αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα και οι ροές αντιπροσωπεύουν όλες τις εισόδους και τις εξόδους που σχετίζονται με το σύστημα. Οι ροές

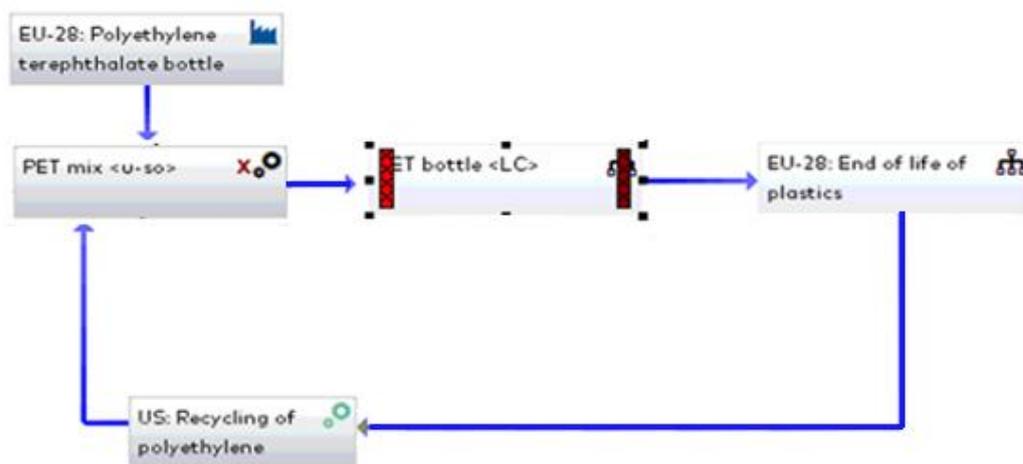
¹⁹ <https://parason.com/products/pulping/parason-d-type-pulper/>, τελευταία επίσκεψη: 13/09/2020

συνδέουν σχέδια ή διεργασίες μέσα στο σύστημα ή καθορίζουν τις ροές εισόδου / εξόδου του συστήματος.

Τα αποτελέσματα της απογραφικής ανάλυσης συλλέχθηκαν σε πίνακες, στους οποίους παρουσιάζονται οι στοιχειώδεις ροές εισόδου και εξόδου. Οι μονάδες κατά την απογραφή ακολουθούν ένα τυποποιημένο πρότυπο SI, ώστε να εξομαλύνονται οι διαφορές στα δεδομένα και να εκφράζονται σε σχέση με ένα δεδομένο εξόδου ενός σταδίου ή τη λειτουργία του προϊόντος.

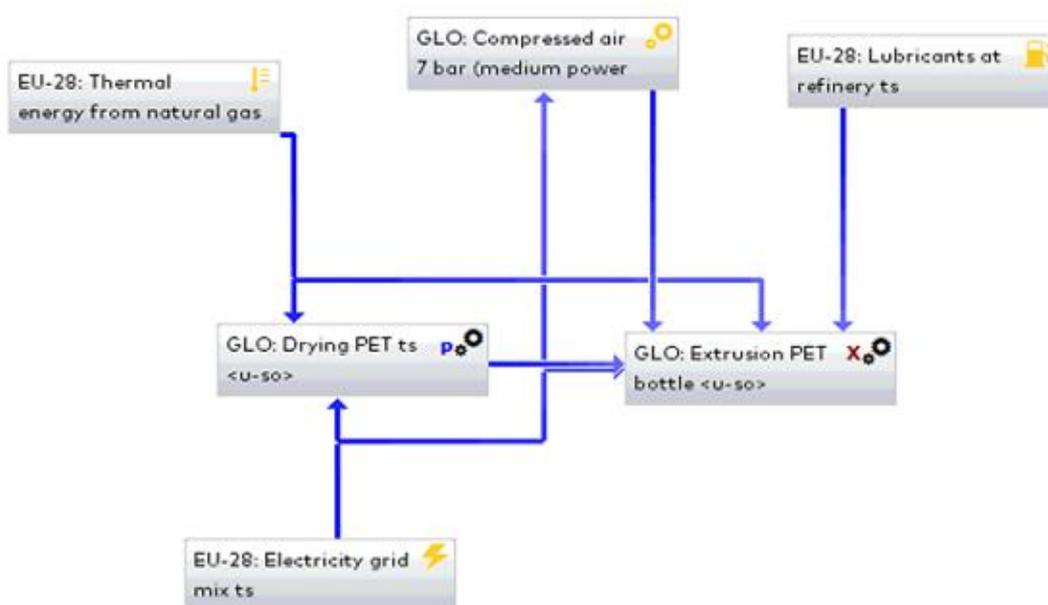
3.2.2. Απογραφή δεδομένων για τη συσκευασία PET

Το Σχήμα 11 παρουσιάζει το ολικό σύστημα παραγωγής και τέλους ζωής τη συσκευασίας PET, ενώ στο Σχήμα 12 αναλύεται πιο λεπτομερώς η παραγωγή μπουκαλιού PET, η οποία στο γενικό Σχήμα 11 εμφανίζεται ως διεργασία PET bottle <LC>. Στον Πίνακα 5, αναγράφονται δεδομένα εισόδου και εξόδου για τις κυριότερες διεργασίες παραγωγής φιαλών PET, την ξήρανση και την εκβολή.



Σχήμα 11. LCA σύστημα παραγωγής και τέλους ζωής συσκευασίας PET

Συγκριτική Μελέτη Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος των Συσκευασιών Χυμού Τερεφθαλικού Πολυαιθυλενίου (PET) και Πολλαπλών Στρωμάτων Tetra Pak



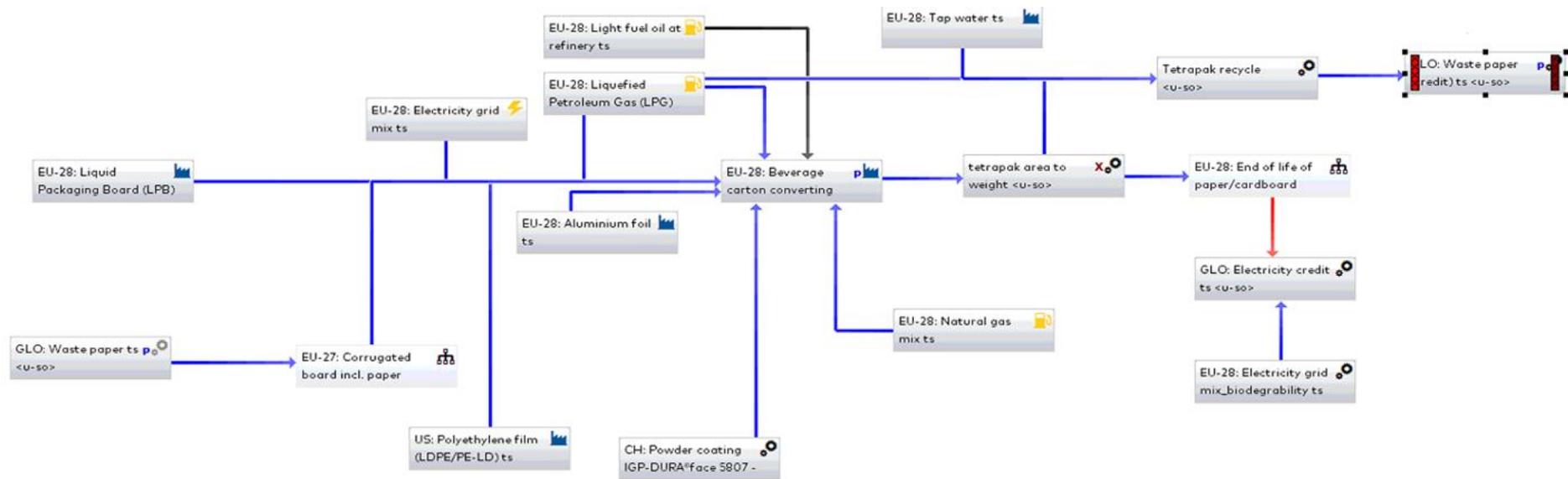
Σχήμα 12. LCA σύστημα παραγωγής συσκευασίας PET

Πίνακας 4. Απογραφή κύκλου ζωής με δεδομένα εισόδου και εξόδου για τις διεργασίες ξήρανσης PET και εκβολής μπουκαλιών PET

Διεργασίες	Εισροές/ Εκροές	Ροές	Ποσότητες	Μονάδες
Ξήρανση	Εισροές	Ηλεκτρική ενέργεια	0.00015	MJ
		Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET)	0.04888	kg
		Θερμική ενέργεια	0.01450	MJ
	Εκροές	Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET)	0.04880	kg
		Υδρατμοί	0.00010	kg
Εκβολή	Εισροές	Συμπιεσμένος αέρας	0.00117	Nm ³
		Ηλεκτρική ενέργεια	0.13469	MJ
		Λιπαντικά	0.00001	kg
		Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET)	0.04880	kg
		Θερμική ενέργεια	0.02094	MJ
	Εκροή	Συσκευασία PET	1	pcs

3.2.3. Απογραφή δεδομένων για τη συσκευασία Tetra Pak

Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται το LCA διάγραμμα ροών και διεργασιών όσον αφορά την παραγωγή και στο τέλος ζωής της συσκευασίας Tetra Pak και στον Πίνακα 6 αναγράφονται δεδομένα εισόδου και εξόδου για την παραγωγή και το τέλος ζωής της συσκευασίας Tetra Pak.



Σχήμα 13. LCA σύστημα παραγωγής και τέλους ζωής συσκευασίας Tetra Pak

Πίνακας 5. Απογραφή κύκλου ζωής με δεδομένα εισόδου και εξόδου για τις διεργασίες παραγωγής και τέλους ζωής συσκευασιών Tetra Pak

Διεργασίες	Εισροές/ Εκροές	Ροές	Ποσότητες	Μονάδες	
Παραγωγή Tetra Pak	Εισροές	Φύλλο αλουμινίου	0.00136	kg	
		Φύλλο πολυαιθυλενίου (PE)	0.00079	kg	
		Μελάνι εκτύπωσης	0.00014	kg	
		Χαρτόνι	0.00080	kg	
		Πολυστρωματικό φύλλο (LPB)	0.02131	kg	
		Ηλεκτρική ενέργεια	0.02493	MJ	
		Ελαφρά καύσιμα	0.0000023	kg	
		Υγρό πετρέλαιο (LPG, 70% προπάνιο, 30% βουτάνιο)	0.00003	kg	
		Φυσικό αέριο	0.00020	kg	
	Νερό	0.00883	kg		
			Συσκευασία Tetra Pak	1	pcs
		Εκροές	Επικίνδυνα απόβλητα	0.000026	kg
			Νιτρικά οξείδια	0.000000010	kg
			Πτητικές οργανικές ενώσεις εκτός μεθανίου (NMVOC)	0.000000048	kg
			Διοξείδιο του θείου	0.000000012	kg
			Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC)	0.000007853	kg
			Διοξείδιο του άνθρακα	0.00053	kg
			Μονοξείδιο του άνθρακα	0.000000202	kg
			Αιωρούμενα σωματίδια (>PM10)	0.000000001	kg
	Μεθάνιο		0.000000049	kg	
	Διοξείδιο του αζώτου	0.000000534	kg		
	Εισροές	Συσκευασία Tetra Pak	1	pcs	
Τέλος Ζωής	Εκροές	Απόβλητα για καύση	0.01151	kg	
		Απόβλητα για υγειονομική ταφή	0.01800	kg	
		Απόβλητα για ανακύκλωση	0.00546	kg	

3.3. Εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των συσκευασιών

3.3.1.Εισαγωγή

Το επόμενο βήμα της αξιολόγησης κύκλου ζωής είναι η μετάφραση των δεδομένων απογραφής σε πραγματικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η χρήση πόρων και οι εκπομπές ρυπογόνων ροών στον αέρα, στο έδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα μπορούν δυνητικά να προκαλέσουν ζημιά στο περιβάλλον μέσα από μια αλυσίδα μεταβολών. Γενικά η πιθανή ζημιά είναι εξαρτώμενη από τον χρόνο και τον τόπο στον οποίο παρουσιάζεται (Udo de Haes and Jolliet, 1999; Pennington *et al.*, 2006).

Στην AKZ χρησιμοποιείται ένα προσεγγιστικό μοντέλο που αποτελεί μια απλοποίηση της πραγματικότητας (Brenttrup et al., 2004). Πιο συγκεκριμένα, οι διαφορές στον χρόνο και τον χώρο δεν λαμβάνονται ενεργά υπόψη, αλλά οι επιπτώσεις υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μέσες συνθήκες (Bessou et al., 2011; Birkved & Hauschild, 2006).

Η εκτίμηση της πιθανής βλάβης του περιβάλλοντος που προκύπτει από μια συσκευασία χυμού ενός λίτρου έγινε μέσω της διαδικασίας αξιολόγησης των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (AEKZ) ή Life cycle impact assessment (LCIA). Σε αυτή τη φάση, τα αποτελέσματα απογραφής κατατάχθηκαν σε διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων. Στην συνέχεια ακολούθησε ο χαρακτηρισμός, ο οποίος προσφέρει την αξιολόγηση του μεγέθους των πιθανών επιπτώσεων σε αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της (π.χ., η μοντελοποίηση των πιθανών επιπτώσεων του διοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου στην κλιματική αλλαγή). Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιήθηκε άμεση σύγκριση των απογραφικών δεδομένων σε κάθε κατηγορία, καθώς οι παράγοντες χαρακτηρισμού αναφέρονται ως ισοδύναμοι παράγοντες. Τέλος, ακολούθησε η αποτίμηση των αποτελεσμάτων μέσω της αξιολόγησης της σχετικής σημασίας των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων κατά τα στάδια της ταξινόμησης και του χαρακτηρισμού.

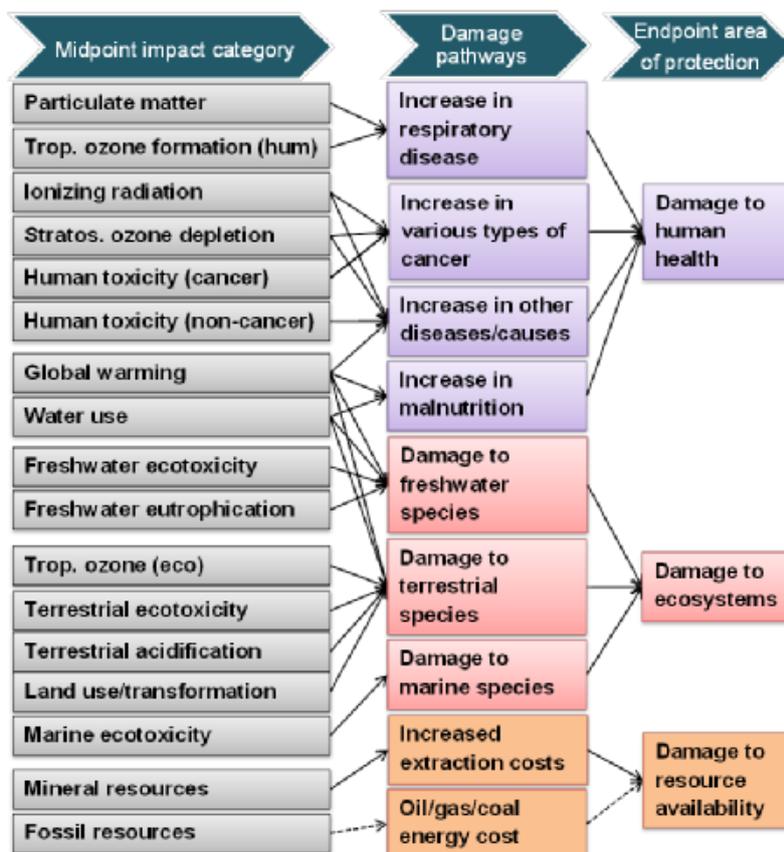
Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της AKZ πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού GaBi 8.7²⁰,²¹. Με την χρήση των εργαλειοθηκών και των βάσεων δεδομένων αυτών των λογισμικών μοντελοποιήθηκαν και προσομοιώθηκαν οι διάφορες προτεινόμενες γραμμές παραγωγής και τέλους ζωής, ενώ χρησιμοποιώντας ενσωματωμένη τη μεθοδολογία υπολογισμού επιπτώσεων της ReCiPe 2016 έγινε η αξιολόγηση των επιπτώσεων κάθε εφαρμοζόμενης τεχνολογίας και υλικού συσκευασίας.

Η μεθοδολογία ReCiPe 2016 μπορεί να θεωρηθεί ως συγχώνευση δύο μεθοδολογιών, λαμβάνοντας τους δείκτες μέσου σημείου από το CML 2 Baseline 2000 (Centre for Environmental Studies (CML)), και τους δείκτες τελικού σημείου από το Ecoindicator 99. Το ReCiPe καθορίζει δείκτες σε δύο επίπεδα: δείκτες μέσου και τελικού σημείου. Οι δείκτες μέσου σημείου είναι δεκαοκτώ, έχουν υψηλή βεβαιότητα, αλλά είναι δύσκολο να ερμηνευθούν. Εστιάζονται σε μεμονωμένα περιβαλλοντικά προβλήματα και είναι παρόμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται στη μεθοδολογία CML. Οι δείκτες τελικού σημείου δείχνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε τρία υψηλότερα επίπεδα συγκέντρωσης, όπως την επίδραση στην ανθρώπινη υγεία, τη βιοποικιλότητα και την έλλειψη πόρων. Η μετατροπή των μεσαίων σημείων σε τελικά απλοποιεί την ερμηνεία των αποτελεσμάτων LCIA. Ωστόσο, με κάθε βήμα

²⁰ <https://www.pre-sustainability.com/>, τελευταία επίσκεψη: 04/10/2020

²¹ <http://www.gabi-software.com/index/>, τελευταία επίσκεψη: 04/10/2020

συγκέντρωσης, αυξάνεται η αβεβαιότητα στα αποτελέσματα²². Το παρακάτω σχήμα παρέχει μια επισκόπηση της δομής του ReCiPe.



Σχήμα 14. Κατηγορίες επίπτωσης μέσου και τελικού σημείου της μεθοδολογίας ReCiPe 2016 και η σχέση μεταξύ τους. Η διακεκομμένη γραμμή σημαίνει ότι δεν υπάρχει σταθερός συντελεστής μέσου-προς-τελικού σημείου για τους ορυκτούς πόρους²³

Οι κύριες κατηγορίες επιπτώσεων που εξετάζονται στη μεθοδολογία ReCiPe είναι οι ακόλουθες:

1. **Κλιματική Αλλαγή (Climate Change).** Η κλιματική αλλαγή μπορεί να οριστεί ως η αλλαγή στην παγκόσμια θερμοκρασία που δημιουργεί η απελευθέρωση «αερίων θερμοκηπίου» από την ανθρώπινη δραστηριότητα στην ατμόσφαιρα. Οι μεγάλες εκπομπές αυτών των αερίων έχουν αξιοσημείωτη επίδραση στο κλίμα, οδηγώντας σε αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας, η οποία αναμένεται να προκαλέσει κλιματικές διαταραχές, ερημοποίηση,

²² <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-lcia-documentation/recipe/>, τελευταία επίσκεψη: 04/10/2020

²³ <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>, τελευταία επίσκεψη: 04/10/2020

αύξηση της στάθμης της θάλασσας και εξάπλωση των ασθενειών. Η κλιματική αλλαγή είναι μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της οικονομικής δραστηριότητας και μία από τις πιο δύσκολες στην αντιμετώπιση λόγω της ευρείας κλίμακας. Οι δείκτες εκφράζονται σε kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (kg CO₂ eq).

2. Σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων (Fine Particulate Matter Formation). Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν πολύπλοκα μείγματα εξαιρετικά μικρών στερεών ή υγρών σωματιδίων με μεγάλη ποικιλία σε σχήμα, μέγεθος και σύσταση και η ρύπανση τους μπορεί να οφείλεται σε έναν αριθμό συστατικών, συμπεριλαμβανομένων οξέων (όπως νιτρικά και θειικά), οργανικών χημικών ουσιών, μετάλλων και σωματιδίων εδάφους ή σκόνης. Ένα πλήθος προβλημάτων υγείας, ειδικά της αναπνευστικής οδού, συνδέονται με τη μόλυνση των σωματιδίων. Τα αερολύματα με μικρή διάμετρο (PM 2.5 για διάμετρο μικρότερη από 2.5 μm) θεωρούνται πολύ επικίνδυνα για την υγεία λόγω της βαθύτερης διείσδυσης (Acero, Rodríguez and Ciroth, 2014). Για τον παράγοντα του σχηματισμού αιωρούμενων σωματιδίων λαμβάνεται υπόψη η πρόσληψη σωματιδίων PM 2.5 από τον ανθρώπινο πληθυσμό. Ο δείκτης της κατηγορίας εκφράζεται σε kg ισοδύναμων PM_{2,5} (kg PM_{2.5} eq).

3. Μείωση ορυκτών πόρων (Fossil Depletion). Αυτή η κατηγορία επιπτώσεων ασχολείται με την προστασία της ανθρώπινης ευημερίας και υγείας, καθώς και την προστασία των οικοσυστημάτων. Αναφέρεται στην κατανάλωση μη βιολογικών πόρων, όπως είναι τα ορυκτά καύσιμα. Ο δείκτης μείωσης ορυκτών καθορίζεται για κάθε εξόρυξη ορυκτών καυσίμων και εκφράζεται σε kg ισοδύναμων πετρελαίου (kg oil eq.) με βάση τη συγκέντρωση των αποθεμάτων και το ρυθμό εξαγωγής.

4. Κατανάλωση γλυκών υδάτων (Freshwater Consumption). Η ανθρώπινη ευημερία και η υγεία των οικοσυστημάτων επηρεάζονται σοβαρά από τις αλλαγές στο παγκόσμιο κύκλο νερού που προκαλείται κυρίως από ανθρώπινες δραστηριότητες. Η κατανάλωση νερού αντιπροσωπεύει αποσύρσεις γλυκού νερού που εξατμίζονται, ενσωματώνονται σε προϊόντα και απόβλητα, μεταφέρονται σε διαφορετικές λεκάνες απορροής ή απορρίπτονται στη θάλασσα μετά τη χρήση (Pfister, Koehler and Hellweg, 2009). Για τους ανθρώπους, η μείωση της διαθεσιμότητας γλυκού νερού οδηγεί σε ανταγωνισμό μεταξύ διαφορετικών χρήσεων νερού. Πολύ λίγη άρδευση θα οδηγήσει σε μειωμένη παραγωγή καλλιεργειών και κατά συνέπεια σε αυξημένο υποσιτισμό μεταξύ του τοπικού πληθυσμού. Ο δείκτης εκφράζεται με κυβικά μέτρα γλυκού νερού που καταναλώνονται [m³].

5. Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Freshwater Ecotoxicity). Αναφέρεται στην κατηγορία των επιπτώσεων στα οικοσυστήματα γλυκού νερού, ως αποτέλεσμα των εκπομπών τοξικών ουσιών και βαρέων μετάλλων στο νερό. Η εκτίμηση της τοξικότητας βασίστηκε σε μέγιστες ανεκτές συγκεντρώσεις στο νερό για τα οικοσυστήματα. Ο δείκτης οικοτοξικότητας περιγράφει

την έκταση της έκθεσης σε τοξικές ουσίες και τις επιπτώσεις από αυτή. Εκφράζεται ως kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου (kg 1,4 DB eq).

6. Ευτροφισμός των γλυκών υδάτων (Freshwater Eutrophication). Ο ευτροφισμός περιλαμβάνει όλες τις επιπτώσεις που οφείλονται σε αύξηση των εκπομπών των θρεπτικών συστατικών στο περιβάλλον (κυρίως το υδάτινο). Η συσσώρευση χημικών θρεπτικών ουσιών σε υδάτινα οικοσυστήματα οδηγεί σε υπερβολική και ανώμαλη ανάπτυξη φυτών και φυκιών, η οποία προκαλεί σοβαρές μειώσεις στους πληθυσμούς των ζώων και υποβάθμιση της ποιότητας του νερού. Οι εκπομπές φωσφόρου στο νερό έχουν επιπτώσεις στον ευτροφισμό, γι' αυτό και ο δείκτης εκφράζεται ως kg ισοδύναμου φωσφόρου για τα γλυκά ύδατα (kg P eq.).

7. Τοξικότητα στον άνθρωπο συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου (Human Toxicity, Cancer). Η κατηγορία αυτή αφορά στις επιπτώσεις των τοξικών ουσιών στο ανθρώπινο περιβάλλον, εστιάζοντας στον καρκίνο. Αντικατοπτρίζει την πιθανή βλάβη μιας μονάδας χημικής ουσίας που απελευθερώνεται στο περιβάλλον και βασίζεται τόσο στην εγγενή τοξικότητα μιας ένωσης όσο και στην πιθανή δόση της. Οι χημικές ουσίες, κυρίως αρσενικό, διχρωμικό νάτριο και υδροφθόριο, προκαλούνται, ως επί το πλείστον, από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτές πηγές και είναι δυνητικά επικίνδυνες για τον άνθρωπο μέσω εισπνοής, κατάποσης και ακόμη και επαφής. Ο δείκτης περιγράφει την αύξηση του κινδύνου εμφάνισης καρκίνου και εκφράζεται ως kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου (kg 1,4 DB eq).

8. Τοξικότητα στον άνθρωπο εκτός καρκίνου (Human Toxicity, Non-Cancer). Η κατηγορία αυτή, όπως και η προηγούμενη, αφορά στις επιπτώσεις των τοξικών ουσιών στην ανθρώπινη υγεία, εξαιρώντας, όμως, τον καρκίνο και εστιάζοντας σε άλλες ασθένειες. Ο δείκτης περιγράφει την αύξηση του κινδύνου εμφάνισης ασθενειών εκτός καρκίνου και εκφράζεται ως kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου (kg 1,4 DB eq).

9. Ιονίζουσα Ακτινοβολία (Ionizing Radiation). Είναι μια κατηγορία επιπτώσεων στην ΑΚΖ που σχετίζεται με τη βλάβη στην ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα και συνδέεται με τις εκπομπές ραδιονουκλεϊδίων σε έναν κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Η κατηγορία λαμβάνει υπόψη τους τύπους ακτινοβολίας α-, β-, γ-ακτινών. Ο δείκτης ιονίζουσας ακτινοβολίας εκφράζεται με becquerel ισοδύναμου κοβαλτίου -60 (ένα συνθετικό ραδιενεργό ισότοπο κοβαλτίου) στον αέρα (Bq C-60 eq. to air).

10. Χρήση γης (Land Use). Η χρήση γης καλύπτει τη διαδικασία μετασχηματισμού, κατοχής και χαλάρωσης της γης που οδηγεί σε απώλεια ειδών. Η χρήση γης (δηλαδή γεωργικές και αστικές δραστηριότητες) αλλάζει το έδαφος και αποκλείει τη γη ως κατάλληλο βιότοπο για

πολλά είδη. Ο δείκτης εκφράζεται ως ισοδύναμα ετήσιας καλλιέργειας επί το έτος (Annual crop eq.·y).

11. Θαλάσσια οικότοξικότητα (Marine Ecotoxicity). Αναφέρεται στις επιπτώσεις των τοξικών ουσιών στα θαλάσσια οικοσυστήματα κατά τρόπο αντίστοιχο με τις επιπτώσεις στα γλυκά ύδατα. Ο δείκτης περιγράφει την έκταση της έκθεσης σε τοξικές ουσίες και τις επιπτώσεις από αυτή και εκφράζεται ως kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου (kg 1,4 DB eq).

12. Θαλάσσιος ευτροφισμός (Marine Eutrophication). Ο θαλάσσιος ευτροφισμός συμβαίνει λόγω της απορροής και της έκπλυσης των φυτικών θρεπτικών συστατικών από το έδαφος και της απόρριψης αυτών σε θαλάσσια συστήματα. Αυτό οδηγεί στην επακόλουθη αύξηση των επιπέδων των θρεπτικών ουσιών, δηλαδή του αζώτου (N). Ο δείκτης εκφράζεται ως kg ισοδύναμου αζώτου (kg N eq.) για τα θαλάσσια ύδατα.

13. Μείωση μετάλλων (Metal Depletion). Σχετίζεται με την εξόρυξη ανόργανων ουσιών που πραγματοποιούνται για τις εισροές υλών και ενέργειας στο σύστημα που μελετάται. Η πρωτογενής εξόρυξη ενός μετάλλου θα οδηγήσει σε μια συνολική μείωση του βαθμού μεταλλεύματος. Ο δείκτης μείωσης εκφράζεται ως kg ισοδύναμου χαλκού (kg Cu eq.).

14. Δημιουργία φωτοχημικού όζοντος για τα οικοσυστήματα (Photochemical Ozone Formation, Ecosystems). Το όζον είναι προστατευτικό στη στρατόσφαιρα, αλλά στο επίπεδο του εδάφους σε υψηλή συγκέντρωση είναι επιβλαβές για την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα και επίσης μπορεί να βλάψει τις καλλιέργειες. Το φωτοχημικό όζον σχηματίζεται από την αντίδραση πτητικών οργανικών ενώσεων και οξειδίων του αζώτου παρουσία θερμότητας και ηλιακού φωτός. Η κατηγορία επιπτώσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ποσότητες μονοξειδίου του άνθρακα (CO), διοξειδίου του θείου (SO₂), οξειδίων του αζώτου (NO_x), και πτητικών οργανικών ενώσεων εκτός του μεθανίου (non methane volatile organic compounds, NMVOC). Ο δείκτης εκφράζεται σε kg ισοδύναμων οξειδίων του αζώτου (kg NO_x eq.).

15. Δημιουργία φωτοχημικού όζοντος για την ανθρώπινη υγεία (Photochemical Ozone Formation, Human Health). Αντίστοιχα, το φωτοχημικό όζον σε υψηλή συγκέντρωση είναι επιβλαβές τα οικοσυστήματα και μπορεί να βλάψει τις καλλιέργειες. Ο δείκτης εκφράζεται σε kg ισοδύναμων οξειδίων του αζώτου (kg NO_x eq.).

16. Μείωση της στοιβάδας του στρατοσφαιρικού όζοντος (Stratospheric Ozone Depletion). Λόγω της μείωσης του στρατοσφαιρικού όζοντος από διάφορα αέρια, φτάνει στην επιφάνεια της γης μεγαλύτερο ποσοστό της UV-B ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό έχει επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, την υγεία των ζώων, τα χερσαία και υδάτινα

οικοσυστήματα και τους βιοχημικούς κύκλους. Υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα σχετικά με τις συνδυασμένες επιδράσεις διαφορετικών αερίων στη στρατόσφαιρα με τις χλωριωμένες και βρωμιωμένες ενώσεις που είναι αρκετά σταθερές ώστε να φτάσουν στη στρατόσφαιρα, να έχουν τις σημαντικότερες επιπτώσεις. Οι χλωροφθοράνθρακες (chlorofluorocarbons, CFCs) και οι υδροχλωροφθοράνθρακες (hydrochlorofluorocarbons, HCFCs) είναι οι κύριες αιτίες της εξάντλησης του όζοντος. Ο δείκτης εκφράζεται σε kg ισοδύναμων χλωροφθορανθράκων (kg CFC-11 eq.).

17. Επίγεια Οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity). Αναφέρεται και εξετάζει τις επιπτώσεις των τοξικών ουσιών στα χερσαία οικοσυστήματα. Εκφράζεται σε kg ισοδύναμου 1,4-δихλωροβενζολίου (kg 1,4 DB eq.).

18. Επίγεια Οξίνιση (Terrestrial Acidification). Τα όξινα αέρια αντιδρούν με το νερό στην ατμόσφαιρα για να σχηματίσουν την «όξινη βροχή», μια διαδικασία γνωστή ως απόθεση οξέος. Όταν πέφτει αυτή η βροχή, συχνά σε μια σημαντική απόσταση από την αρχική πηγή του αερίου (π.χ. η Σουηδία δέχεται την όξινη βροχή που προκαλείται από αέρια που εκπέμπονται στο Ηνωμένο Βασίλειο), προκαλείται βλάβη του οικοσυστήματος σε διαφορετικό βαθμό, ανάλογα με τη φύση των οικοσυστημάτων. Τα αέρια που προκαλούν εναπόθεση οξέος περιλαμβάνουν την αμμωνία (NH₃), τα οξειδία του αζώτου (NO_x) και τα οξειδία του θείου (SO_x). Οι ουσίες που προκαλούν οξίνιση (μείωση του pH) μπορούν να επιφέρουν ένα ευρύ φάσμα επιπτώσεων στο έδαφος, τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα, τους ζώντες οργανισμούς και σε υλικά αγαθά, όπως κτίρια. Ο δείκτης οξίνισης εκφράζεται ως kg ισοδύναμου διοξειδίου του θείου (kg SO₂ eq.) (Guinée *et al.*, 2002; Baumann and Tillman, 2004; Acero, Rodríguez and Cirotto, 2014; Huijbregts *et al.*, 2016, 2017).

3.3.2. Περιβαλλοντικό αποτύπωμα συσκευασιών PET και Tetra Pak

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής και του τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού PET και Tetra Pak αναλύεται στη συνέχεια για όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων της ReCiPe.

1. Κλιματική Αλλαγή (Climate Change)

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής οφείλονται αποκλειστικά στις εκπομπές CO₂ και λιγότερο στις εκπομπές μεθανίου και υποξειδίου του αζώτου, που προκύπτουν από την καύση φυσικού αερίου, για τις θερμικές διεργασίες, και λιγνίτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, αναμένεται διεργασίες που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια να παρουσιάζουν ελαφρώς πιο επιβαρυνμένο προφίλ για κάθε MJ που καταναλώνεται.

Το αποτύπωμα άνθρακα για τις δύο συσκευασίες ενός λίτρου χυμού εμφανίζεται στο Γράφημα 1. Το αποτύπωμα για τη συσκευασία Tetra Pak υπολογίστηκε ίσο με 0.046 kg ισοδύναμου

CO₂, ενώ το αποτύπωμα της συσκευασίας PET βρέθηκε να είναι 2.6 φορές αυξημένο και ίσο με 0.121 kg ισοδύναμου CO₂. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν και με τη μελέτη του Finkbeiner, στην οποία οι συσκευασίες χυμού PET έχουν τριπλάσιο αποτύπωμα άνθρακα σε σχέση με τις βασισμένες στο χαρτί συσκευασίες (Finkbeiner *et al.*, 2010), αλλά και με αναφορές της Tetra Pak (Kartonverpackungen, Gmbh and Gmbh, 2007).

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, οι κύριοι λόγοι που έχουν τη μεγαλύτερη επιβάρυνση στην κατηγορία αυτή είναι η παραγωγή χαρτιού, η παραγωγή φιλμ αλουμινίου και το τέλος ζωής που περιλαμβάνει την υγειονομική ταφή και καύση, εξαιρώντας την ανακύκλωση, για τις συσκευασίες Tetra Pak, ενώ στη συσκευασία PET τη μεγαλύτερη επιβάρυνση έχει η παραγωγή των κόκκων PET (PET granulates). Αυτή η παρατήρηση συμφωνεί με μελέτες της Tetra Pak (Markwardt *et al.*, 2017), στις οποίες βρέθηκε ότι στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων ένα από τα μεγαλύτερα ποσοστά του περιβαλλοντικού φόρτου που προκαλείται είναι από την παραγωγή των μεμονωμένων υλικών συστατικών των συσκευασιών χυμών.

Συγκεκριμένα για το χαρτί, η βασική πηγή των πρωτογενών ινών χαρτιού είναι τα δέντρα. Τα δέντρα συλλέγονται για την παραγωγή χαρτιού και δεν απορροφούν πλέον διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο το μετατρέπουν σε οργανικές ενώσεις, οπότε και το χαρτί θα έχει μεγάλη επίπτωση στην κλιματική αλλαγή που σχετίζεται με το διοξείδιο του άνθρακα.

Η παραγωγή πλαστικού πολυαιθυλενίου για τα διάφορα στρώματα της συσκευασίας δείχνει επιβάρυνση χαμηλότερη από εκείνη της παραγωγής χαρτιού, το οποίο εξηγείται εύκολα από το χαμηλότερο ποσοστό αυτού του υλικού (20%) από το χαρτί (75%) (Markwardt *et al.*, 2017).

Οι συσκευασίες Tetra Pak περιέχουν επίσης φύλλο αλουμινίου, η παραγωγή του οποίου έχει μεγάλη συμβολή στην κλιματική αλλαγή. Οι μεγαλύτερες συνεισφορές αερίων θερμοκηπίου αποδίδονται στις διεργασίες μονάδας εξόρυξης και ηλεκτρόλυσης της αλουμίνιας με την ηλεκτρική και τη θερμική ενέργεια, να είναι οι κύριοι συντελεστές σε αυτές τις υψηλότερες τιμές (56% και 13% αντίστοιχα) (Nunez and Jones, 2016).

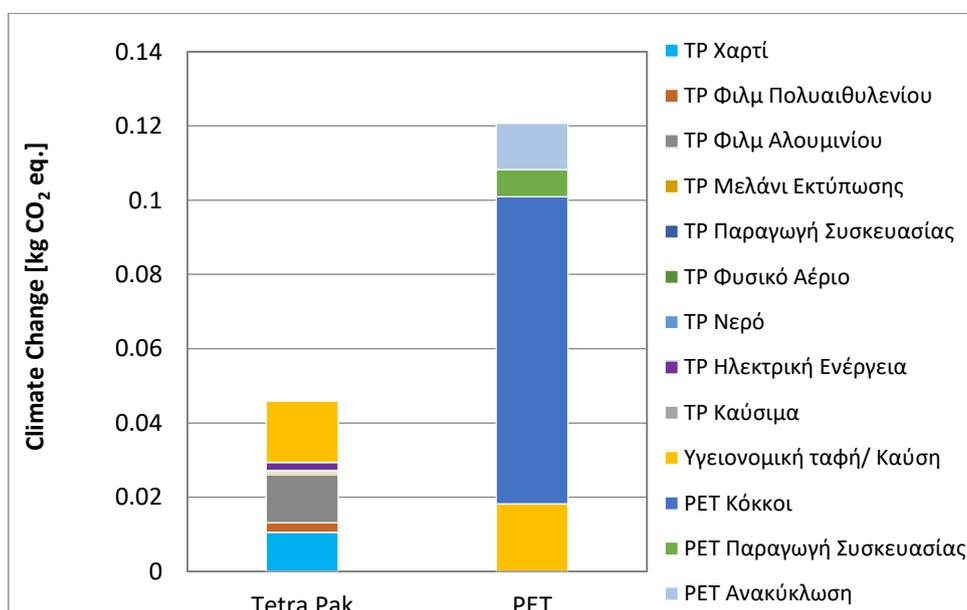
Όσον αφορά τις συσκευασίες PET, το μεγαλύτερο μέρος των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων προκαλείται επίσης από την παραγωγή του βασικού υλικού των φιαλών, το PET. Το πλαστικό αυτό είναι βασισμένο στα ορυκτά καύσιμα (fossil based) και γενικά όσο περισσότερα πλαστικά βασισμένα στα ορυκτά καύσιμα περιέχει μια συσκευασία, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση στο περιβάλλον. Επιπλέον, το βάρος της συσκευασίας PET είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της Tetra Pak, γι' αυτό και το αποτύπωμα είναι αυξημένο.

Η διεργασία μετατροπής (converting process) και παραγωγής της συσκευασίας γενικά παίζει πολύ μικρό έως ασήμαντο ρόλο. Παράγει εκπομπές, οι οποίες συμβάλλουν στην κατηγορία

επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε σχεδόν αμελητέο ποσοστό. Κύρια πηγή των εκπομπών που σχετίζονται με αυτήν την κατηγορία είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διεργασία μετατροπής.

Ο τομέας του τέλους ζωής που αφορά στην καύση και την υγειονομική ταφή θεωρείται επίσης σημαντικός σε αυτήν την κατηγορία επιπτώσεων και για τα δύο είδη συσκευασίας. Αυτό συμβαίνει λόγω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά την καύση των υλικών συσκευασίας σε εγκαταστάσεις αστικών στερεών αποβλήτων (Markwardt *et al.*, 2017).

Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι το αποτύπωμα της ανακύκλωσης του Tetra Pak εμπεριέχεται στις καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας και νερού σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν.



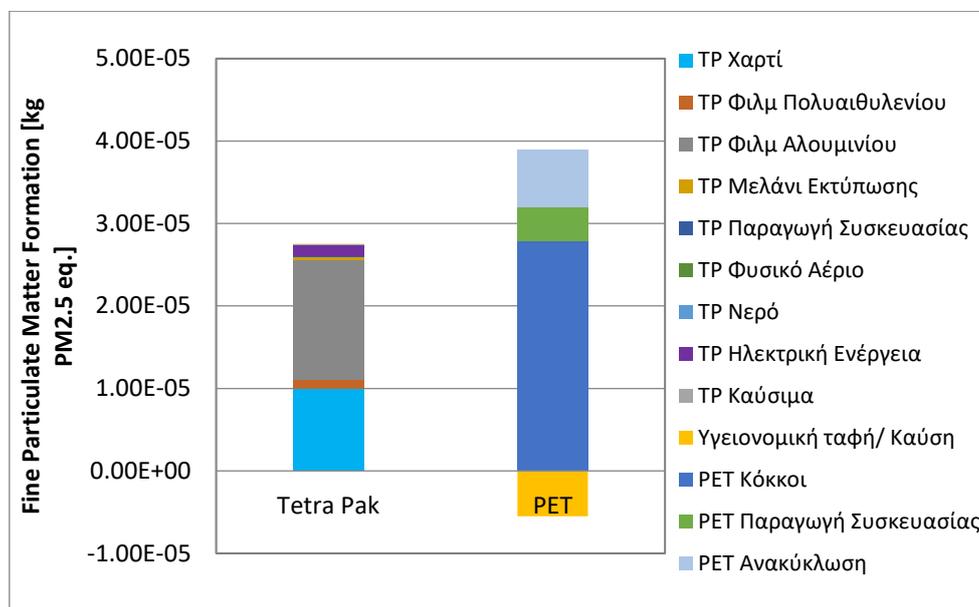
Γράφημα 1. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στην κλιματική αλλαγή (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα- kg CO₂ eq.)

2. Σχηματισμός αιωρούμενων σωματιδίων (Fine Particulate Matter Formation)

Η ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλεί πρωτογενή και δευτερογενή αερολύματα ή αλλιώς αιωρούμενα σωματίδια. Τα δευτερογενή αερολύματα PM_{2.5} σχηματίζονται στον αέρα από τις εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO₂), αμμωνίας (NH₃) και οξειδίων του αζώτου (NO_x), μεταξύ άλλων.

Όπως φαίνεται στο Γράφημα 2, το αποτύπωμα της Tetra Pak είναι χαμηλότερο και σε αυτήν την κατηγορία (ίσο με 2.75⁻⁵ kg PM_{2.5} eq) από τη συσκευασία PET (3.35⁻⁵ kg PM_{2.5} eq). Οι κύριοι τομείς που συμβάλλουν στον σχηματισμό αιωρούμενων σωματιδίων είναι το χαρτί και το φιλμ αλουμινίου για την Tetra Pak και οι κόκκοι PET για τη συσκευασία PET.

Για τον διαχωρισμό της κυτταρίνης που απαιτείται για την παραγωγή χαρτιού από τις λιγνιτικές ίνες ξύλου, εφαρμόζεται η λεγόμενη «διαδικασία Kraft», στην οποία χρησιμοποιούνται υδροξείδιο του νατρίου και θειούχο νάτριο. Αυτό οδηγεί σε πρόσθετες εκπομπές SO₂, συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στον σχηματισμό αερολυμάτων (Markwardt *et al.*, 2017).

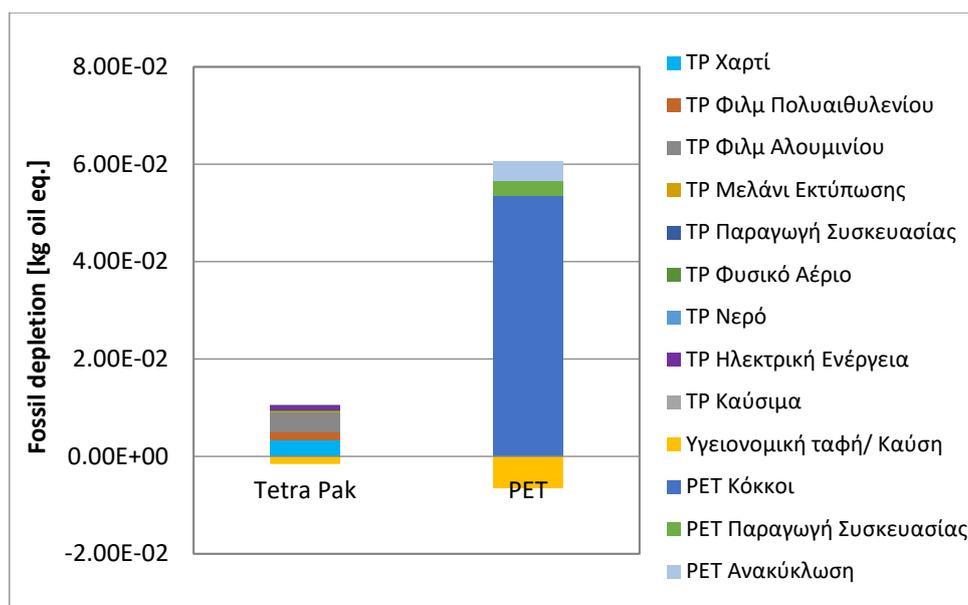


Γράφημα 2. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στον σχηματισμό αιωρούμενων σωματιδίων (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμων PM_{2,5} -kg PM_{2,5} eq.)

3. Μείωση ορυκτών πόρων (Fossil Depletion)

Οι επιδράσεις της παραγωγής και του τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak και PET στη μείωση των ορυκτών πόρων παρουσιάζονται στο επόμενο Σχήμα. Η συσκευασία ενός λίτρου χυμού από PET έχει το εξαπλάσιο αποτύπωμα σε αυτήν την κατηγορία συγκριτικά με την αντίστοιχη συσκευασία Tetra Pak (0.054 και 0.009 kg ισοδύναμων πετρελαίου). Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η πρώτη συσκευασία αποτελείται αποκλειστικά από PET, το οποίο παρασκευάζεται από ορυκτά καύσιμα (αέριο και πετρέλαιο), ενώ η δεύτερη αποτελείται από 75% χαρτί, το οποίο προέρχεται από μη ορυκτές πηγές και μόνο από 20% πολυαιθυλένιο που έχει ως βάση το πετρέλαιο και 5% αλουμίνιο, η κύρια πηγή του οποίου είναι ο συνδυασμός ορυκτών του βωξίτη. Η υγειονομική ταφή και καύση και των δύο συσκευασιών έχουν αρνητικό αποτύπωμα, καθώς η καύση αποβλήτων οδηγεί στην παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, εξοικονομώντας έτσι πετρέλαιο και άλλα συμβατικά καύσιμα.

Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν και με επίσημες αναφορές της Tetra Pak (Kartonverpackungen, Gmbh and Gmbh, 2007).

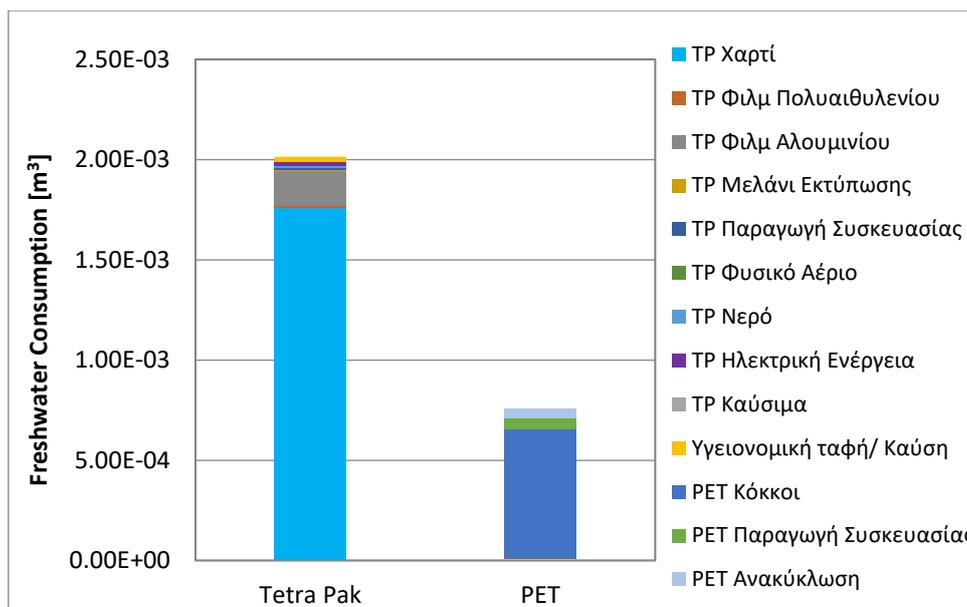


Γράφημα 3. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στη μείωση ορυκτών πόρων (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμων πετρελαίου - kg oil eq.)

4. Κατανάλωση γλυκών υδάτων (Freshwater Consumption)

Η κατανάλωση γλυκών υδάτων για τα δύο είδη συσκευασίας παρουσιάζεται στο Γράφημα 4. Για την παραγωγή και το τέλος ζωής μιας συσκευασίας Tetra Pak ενός λίτρου χυμού χρειάζονται 0.002 κυβικά μέτρα νερού, με την παραγωγή του στρώματος χαρτιού μόνο να χρειάζεται το 90% της συνολικής κατανάλωσης (0.0018 m³). Αντίθετα, το αποτύπωμα της συσκευασίας PET δεν απαιτεί μεγάλες καταναλώσεις νερού με το αποτύπωμα να υπολογίζεται στα 0.00076 m³ γλυκού νερού για κάθε συσκευασία.

Πρώτη ύλη για την παραγωγή χαρτιού είναι οι ίνες κυτταρίνης και ένα βασικό στάδιο είναι η ανάμειξη της κυτταρίνης με μεγάλες ποσότητες νερού. Συγκεκριμένα, ο πολτός έχει πυκνότητα περίπου 1,2 %, ενώ το υπόλοιπο μέρος αποτελείται από νερό. Απαιτήσεις νερού υπάρχουν επίσης και κατά την ανακύκλωση της συσκευασίας Tetra Pak, όταν ο χαρτοπολτός ή /και το χαρτί ανακύκλωσης θα οδηγηθούν στον αναλυτή (pulper), στον οποίο γίνεται η πολτοποίηση με νερό και διαχωρίζονται οι ίνες κυτταρίνης από τις υπόλοιπες ξένες ύλες (Ε.Φ.Ε.Τ. Ενιαίος Φορέας Ελέγχου Τροφίμων and Σύνδεσμος Βιομηχανιών Παραγωγής Υλικών & Συσκευασίας ΣΥ.ΒΙ.Π.Υ.Σ., 2015).

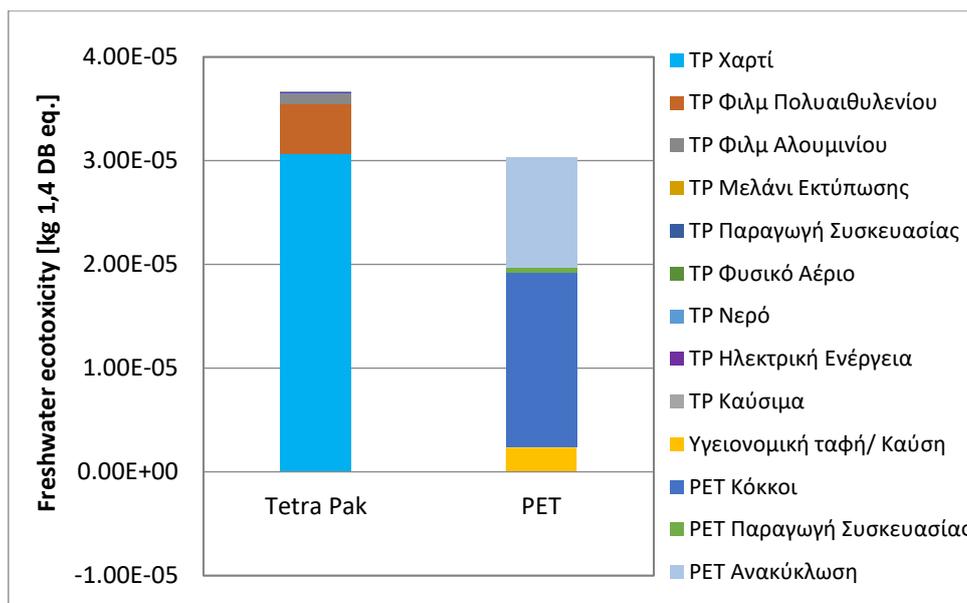


Γράφημα 4. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στην κατανάλωση γλυκών υδάτων (εκφρασμένες σε κυβικά μέτρα νερού- m³)

5. Οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (Freshwater Ecotoxicity)

Οι επιπτώσεις των δύο ειδών συσκευασιών χυμού στην οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων εμφανίζονται στο Γράφημα 5. Η κάθε συσκευασία ενός λίτρου χυμού Tetra Pak επιβαρύνει την οικοτοξικότητα με $3.66 \cdot 10^{-5}$ kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου, ενώ η συσκευασία PET εμφανίζει ελαφρώς χαμηλότερη επιβάρυνση ίση με $3.04 \cdot 10^{-5}$ kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου.

Ο τομέας που επιβαρύνει περισσότερο την κατηγορία αυτή είναι η παραγωγή χαρτιού, για το οποίο απαιτούνται μεγάλες ποσότητες χημικών βοηθητικών υλών και προσθέτων χαρτοποίησης, όπως οξέα ή βάσεις για έλεγχο του pH, θειικό αργίλιο για βελτίωση της συγκράτησης των ινών, αντιαφριστικά, γεμιστικά υλικά, λευκαντικά και παρεμποδιστές διαβρώσεων του εξοπλισμού. Τα παραπάνω καταλήγουν σε υδάτινους αποδέκτες και προκαλούν χημικές επιμολύνσεις (Ε.Φ.Ε.Τ. Ενιαίος Φορέας Ελέγχου Τροφίμων and Σύνδεσμος Βιομηχανιών Παραγωγής Υλικών & Συσκευασίας ΣΥ.ΒΙ.Π.Υ.Σ., 2015).

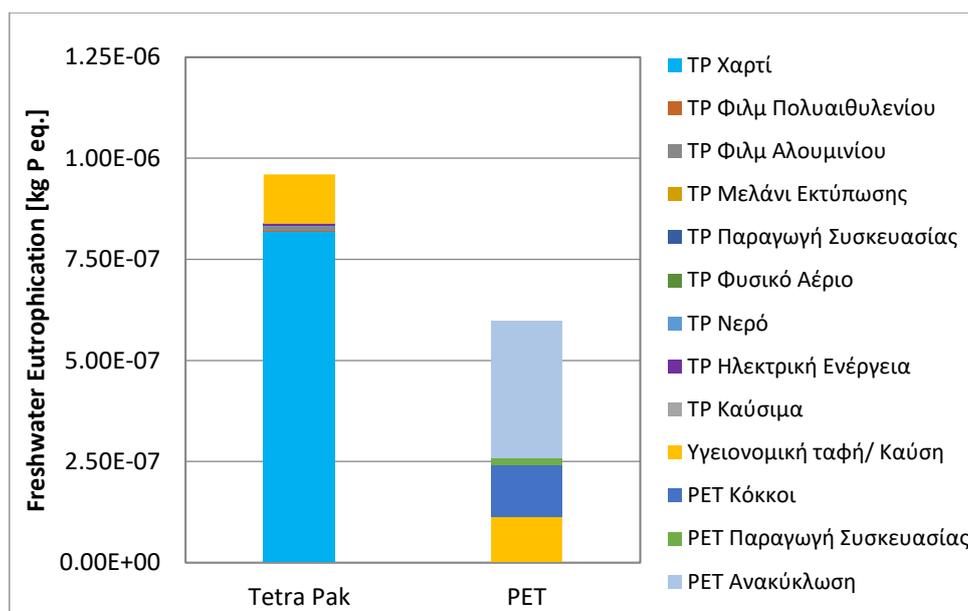


Γράφημα 5. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στην οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμου 1,4-δихλωροβενζολίου- kg 1,4 DB eq.)

6. Ευτροφισμός των γλυκών υδάτων (Freshwater Eutrophication)

Στην κατηγορία επιπτώσεων 'Ευτροφισμός των γλυκών υδάτων' η παραγωγή και το τέλος ζωής της συσκευασίας Tetra Pak συμβάλλουν $9.60 \cdot 10^{-7}$ kg ισοδύναμου φωσφόρου, ενώ οι αντίστοιχες διεργασίες για τη συσκευασία PET προκαλούν σχεδόν τη μισή επιβάρυνση με $5.98 \cdot 10^{-7}$ kg ισοδύναμου φωσφόρου (Γράφημα 6).

Η παραγωγή χαρτονιού παράγει εκπομπές που προκαλούν σημαντικότερες συνεισφορές τόσο στον ευτροφισμό των γλυκών υδάτων όσο και στον επίγειο ευτροφισμό, το τελευταίο σε μικρότερο βαθμό. Περίπου το ήμισυ του «Δυναμικού υδρόβιου ευτροφισμού» προκαλείται από το χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (chemical oxygen demand, COD). Καθώς η παραγωγή χαρτιού προκαλεί συνεισφορές οργανικών ενώσεων στα επιφανειακά ύδατα, λαμβάνει χώρα υπερβολική ποσότητα αντιδράσεων που καταναλώνουν οξυγόνο, γεγονός που συνεπώς μπορεί να οδηγήσει σε έλλειψη οξυγόνου στο νερό (Markwardt *et al.*, 2017).



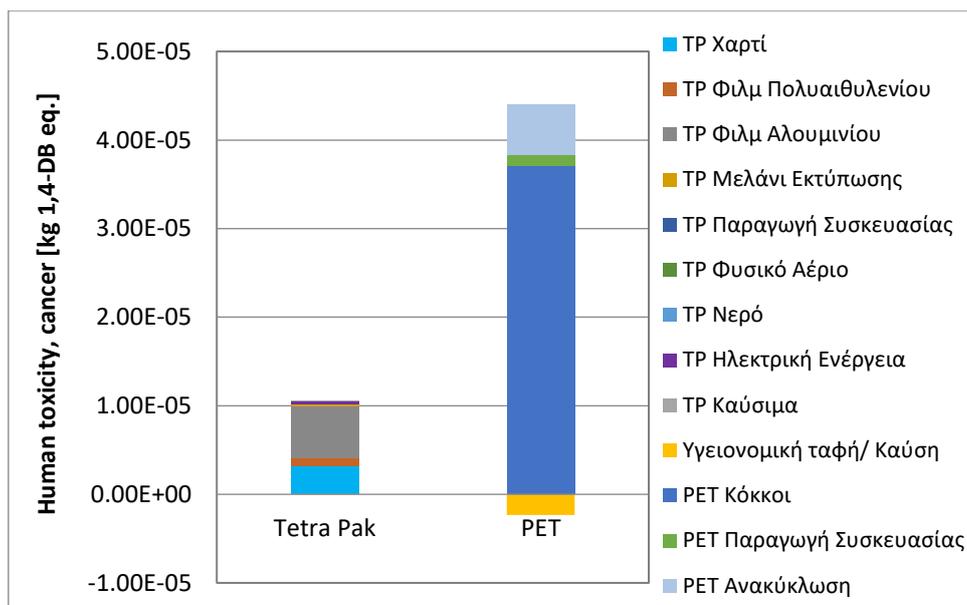
Γράφημα 6. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στον ευτροφισμό των γλυκών υδάτων (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμου φωσφόρου - kg P eq.)

7. Τοξικότητα στον άνθρωπο συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου (Human Toxicity, Cancer)

Η τοξικότητα στον άνθρωπο περιλαμβάνει την περιβαλλοντική ανθεκτικότητα μιας χημικής ουσίας, τη συσσώρευσή της στην ανθρώπινη τροφική αλυσίδα και την τοξικότητά της. Στην κατηγορία ανθρώπινης τοξικότητας, η συσκευασία PET εμφανίζει τέσσερις φορές μεγαλύτερη τιμή συνεισφοράς, ίση με $4.17 \cdot 10^{-5}$ kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου, σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή της συσκευασίας Tetra Pak, ίση με $1.05 \cdot 10^{-5}$ kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου (Γράφημα 7).

Οι επιβαρύνσεις από την παραγωγή PET είναι ο υψηλότερος συνεισφέρων στο συνολικό φορτίο. Η παρασκευή PET περιλαμβάνει τη χρήση αντιμονίου, συνήθως με τη μορφή τριοξειδίου του αντιμονίου (Sb_2O_3) ως καταλύτη, μεταξύ άλλων ουσιών. Το αντιμόνιο είναι ένα μέταλλο που χρησιμοποιείται ως κλινική θεραπεία για παρασιτικές λοιμώξεις και ως καταλύτης στην κατασκευή πλαστικών. Μετά την κατασκευή, μπορεί να βρεθεί ανιχνεύσιμη ποσότητα αντιμονίου στην επιφάνεια του προϊόντος. Αυτό το υπόλειμμα μπορεί να αφαιρεθεί με πλύσιμο. Ωστόσο, το αντιμόνιο μπορεί να θεωρηθεί τοξική ουσία και ταξινομείται ως πιθανό καρκινογόνο για τον άνθρωπο από τον Διεθνή Οργανισμό Έρευνας για τον Καρκίνο. Γι' αυτό η ευρωπαϊκή νομοθεσία είναι πολύ αυστηρή και οριοθετεί μέγιστες συγκεντρώσεις αντιμονίου από τους κατασκευαστές φιαλών PET ²⁴.

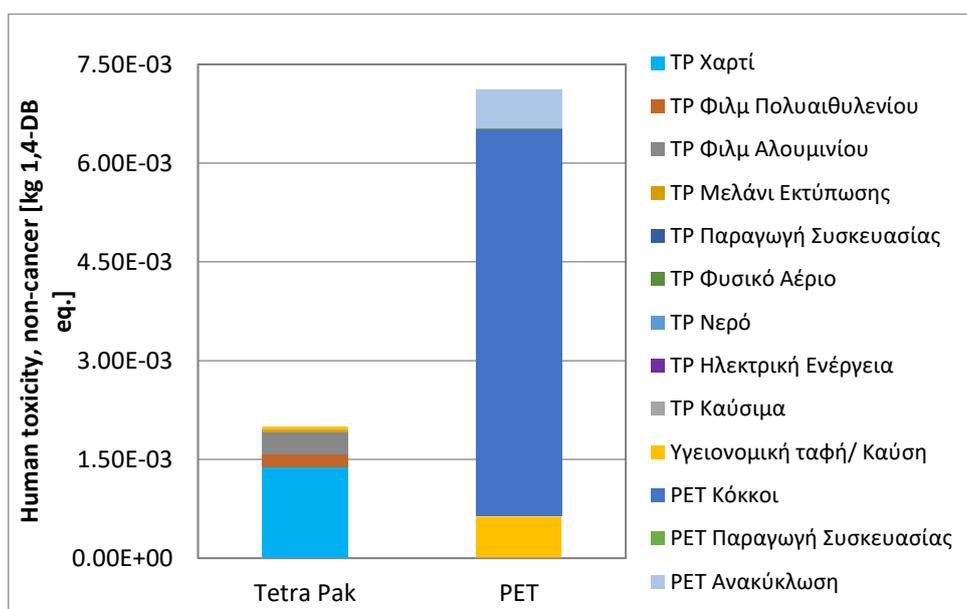
²⁴ <https://packagingeurope.com/antimony-and-bottled-water/>, τελευταία επίσκεψη: 04/10/2020



Γράφημα 7. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στην τοξικότητα στον άνθρωπο συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου -kg 1,4 DB eq.)

8. Τοξικότητα στον άνθρωπο εκτός καρκίνου (Human Toxicity, Non-Cancer)

Όπως και στην προηγούμενη κατηγορία, η συσκευασία PET εμφανίζει βαρύτερο περιβαλλοντικό φορτίο, ίσο με $7.11 \cdot 10^{-3}$ kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου, συγκριτικά με τα $2.00 \cdot 10^{-3}$ kg που επιβαρύνει η συσκευασία Tetra Pak (Γράφημα 8). Η παραγωγή PET είναι υπεύθυνη για το 83% περίπου του συνολικού φόρτου για τους παραπάνω λόγους.

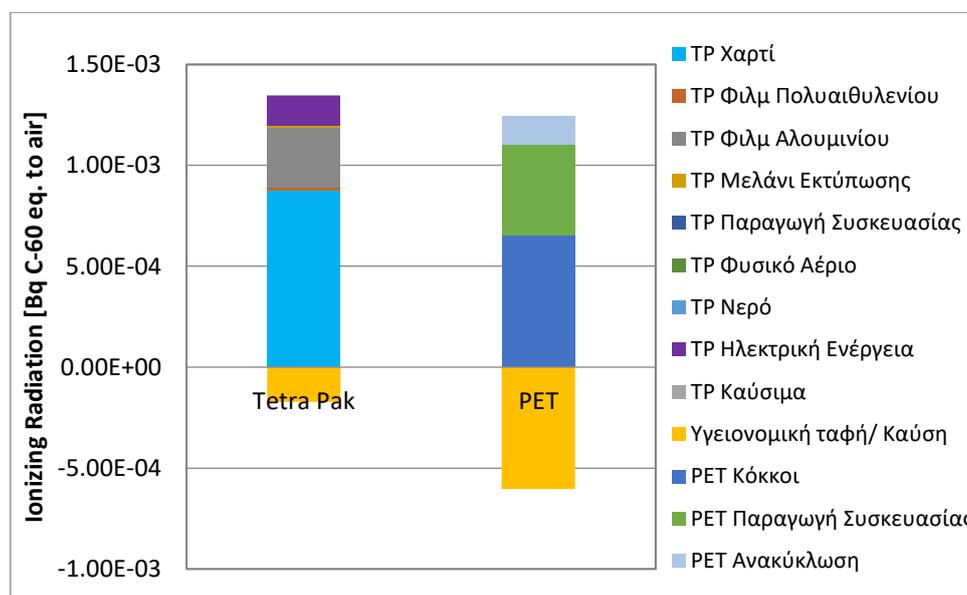


Γράφημα 8. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στην τοξικότητα στον άνθρωπο εκτός καρκίνου (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου - kg 1,4 DB eq.)

9. Ιονίζουσα Ακτινοβολία (Ionizing Radiation)

Οι συνεισφορές της παραγωγής και του τέλους ζωής των δύο ειδών συσκευασίας χυμού στην ιονίζουσα ακτινοβολία εμφανίζονται στο Γράφημα 9, με τη συσκευασία Tetra Pak να εμφανίζει αποτύπωμα ίσο με $1.18 \cdot 10^{-3}$ becquerel ισοδύναμου κοβαλτίου-60 στον αέρα και την PET $6.40 \cdot 10^{-4}$ becquerel.

Το τέλος ζωής που περιλαμβάνει την καύση και την υγειονομική ταφή των συσκευασιών έχει αρνητική τιμή και θεωρείται πλεονέκτημα (credits). Οι αρνητικές τιμές είναι συνώνυμες με τα καθαρά περιβαλλοντικά οφέλη και αποδίδονται στις αποφευχθείσες εκπομπές. Γενικά, η ιονίζουσα ακτινοβολία αναφέρεται στις ανθρωπογενείς εκπομπές ραδιονουκλεϊδίων στο περιβάλλον. Αυτές οι εκπομπές παράγονται κατά τον κύκλο πυρηνικών καυσίμων (nuclear fuel cycle) που περιλαμβάνει την εξόρυξη, την επεξεργασία και τη διάθεση αποβλήτων, καθώς και κατά τη διάρκεια άλλων ανθρώπινων δραστηριοτήτων, όπως η καύση άνθρακα και η εξόρυξη φωσφορικών πετρωμάτων (Huijbregts *et al.*, 2016). Εφόσον η καύση των αποβλήτων οδηγεί στην παραγωγή και ανάκτηση ενέργειας, αποφεύγοντας τη χρήση ορυκτών καυσίμων, ο τομέας αυτός του τέλους ζωής έχει αρνητικό πρόσημο στις επιβαρύνσεις (όφελος) για ιονίζουσα ακτινοβολία.



Γράφημα 9. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στην ιονίζουσα ακτινοβολία (εκφρασμένες σε becquerel ισοδύναμου κοβαλτίου-60 στον αέρα -Bq C-60 eq. to air)

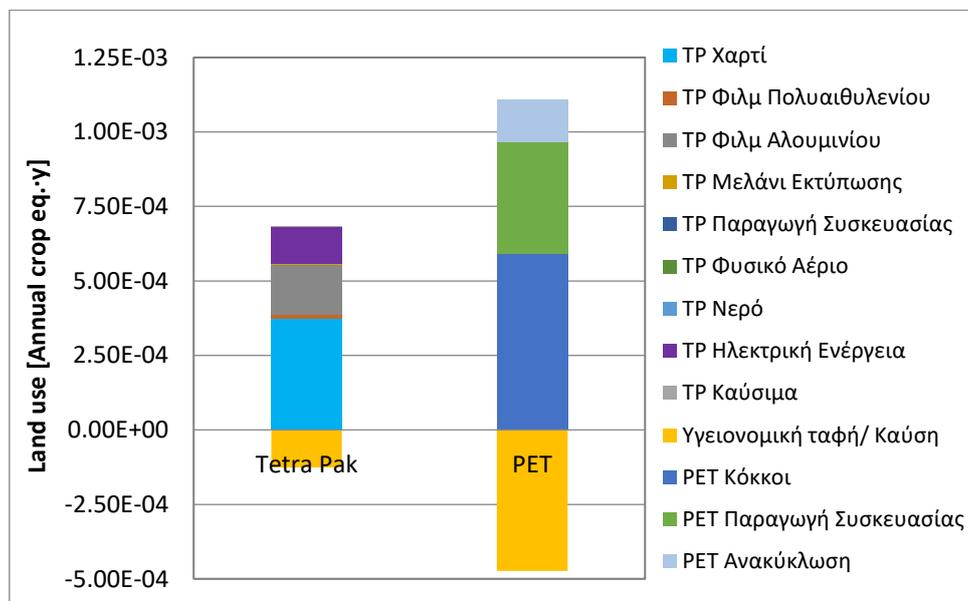
10. Χρήση γης (Land Use)

Η χρήση γης για την παραγωγή και το τέλος ζωής της συσκευασίας Tetra Pak υπολογίζεται ίση με $5.57 \cdot 10^{-4}$ ισοδύναμα ετήσιας καλλιέργειας επί το έτος, και της φιάλης χυμού PET είναι ελαφρώς αυξημένη και ίση με $6.38 \cdot 10^{-4}$ αντίστοιχα ισοδύναμα.

Η βασική πηγή πρωτογενών ινών για την παραγωγή χαρτιού στην πολυστρωματική συσκευασία Tetra Pak είναι τα δέντρα, επομένως απαιτείται επαρκής έκταση για την παροχή αυτής της πρώτης ύλης. Η ζήτηση χαρτιού καλύπτεται από δασικές εκτάσεις και χώρους παραγωγής στην Ευρώπη και αντικατοπτρίζεται σε αυτήν την κατηγορία, γι' αυτό και ο τομέας της παραγωγής χαρτιού αποτελεί τη μεγαλύτερη επιβάρυνση (Markwardt *et al.*, 2017).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η χρήση γης δεν αναφέρεται μόνο στη χρήση δασών, λιβαδιών και καλλιεργειών, αλλά και τεχνητών περιοχών, όπως αστικές και βιομηχανικές περιοχές, οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα, καθώς και χώροι απορρίψεων.

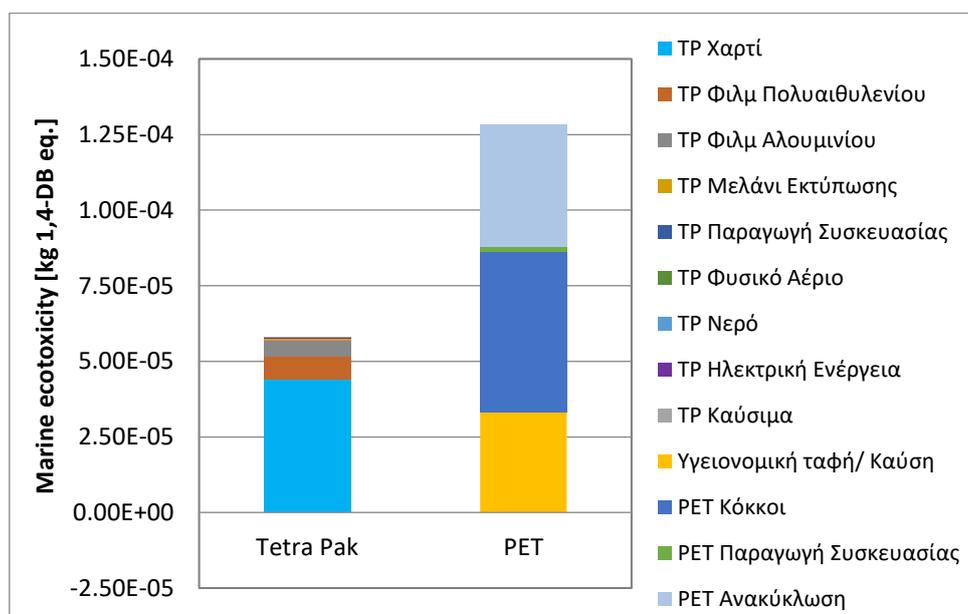
Όσον αφορά στο τέλος ζωής, η υγειονομική ταφή και καύση των χρησιμοποιημένων συσκευασιών δεν έχουν περιβαλλοντική επιβάρυνση (credits) και στις δύο περιπτώσεις, ενώ η ανακύκλωση, η οποία στην περίπτωση της Tetra Pak αποτυπώνεται στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, επιβαρύνει την κατηγορία. Αυτό έχει παρατηρηθεί και στη μελέτη της Foolmaun, όπου όταν οι φιάλες PET προορίζονταν για 100% υγειονομική ταφή ή 75% καύση και 25% υγειονομική ταφή είχαν μικρό αποτύπωμα στη χρήση γης, ενώ στο σενάριο της ανακύκλωσης κατά 75% και υγειονομικής ταφής κατά 25% το αποτύπωμα των φιαλών σχεδόν δεκαπλασιαζόταν (Foolmaun and Ramjeeawon, 2013).



Γράφημα 10. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στη χρήση γης (εκφρασμένες σε ισοδύναμα ετήσιας καλλιέργειας επί το έτος - Annual crop eq.-y)

11. Θαλάσσια οικολογικότητα (Marine Ecotoxicity)

Όπως φαίνεται στο Γράφημα 11, η συνεισφορά της συσκευασίας PET στη θαλάσσια οικοτοξικότητα είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την επιβάρυνση της συσκευασίας Tetra Pak, με τιμές ίσες με $1.28 \cdot 10^{-4}$ και $5.80 \cdot 10^{-5}$ kg ισοδύναμου 1,4-δихλωροβενζολίου, αντίστοιχα. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί πως το προφίλ της θαλάσσιας οικοτοξικότητας είναι εντελώς διαφορετικό από την οικοτοξικότητα των γλυκών υδάτων (Κατηγορία 5), αναδεικνύοντας τη διαφορά μεταξύ των δύο υδάτινων αποδεκτών.

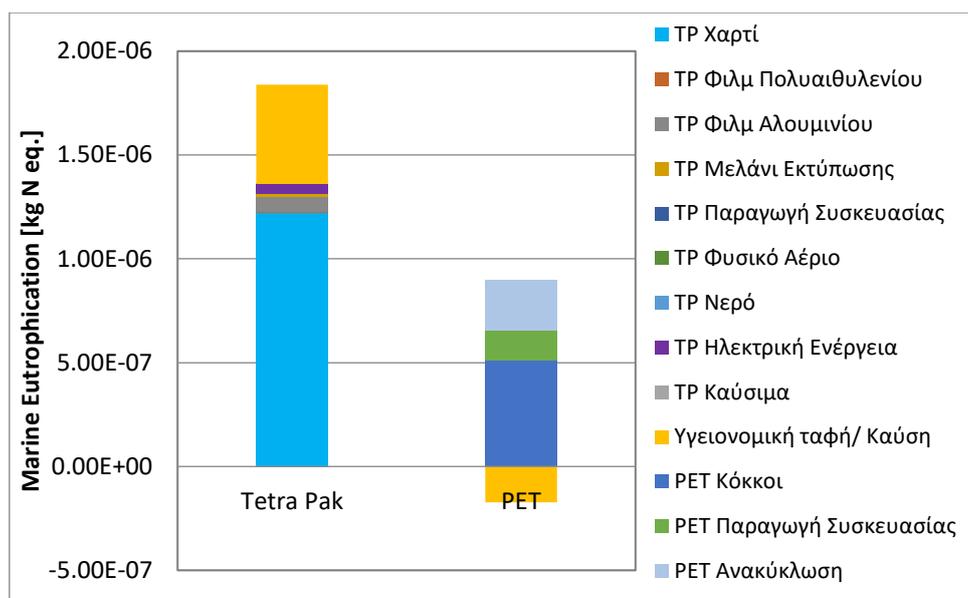


Γράφημα 11. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στη θαλάσσια οικοτοξικότητα (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμου 1,4-δихλωροβενζολίου- kg 1,4 DB eq.)

12. Θαλάσσιος ευτροφισμός (Marine Eutrophication)

Στην κατηγορία του θαλάσσιου ευτροφισμού, όπως και στην κατηγορία του ευτροφισμού γλυκών υδάτων (Κατηγορία 6), η επιβάρυνση της συσκευασίας ενός λίτρου χυμού PET είναι πολύ χαμηλότερη από την επιβάρυνση της αντίστοιχης συσκευασίας Tetra Pak, και συγκεκριμένα αποτελεί το 40% περίπου της τελευταίας. Στα $1.84 \cdot 10^{-6}$ kg ισοδύναμου αζώτου που συνολικά συνεισφέρει η Tetra Pak, το 66.4% οφείλεται στην παραγωγή ενός μόνο υλικού, του χαρτιού. Το υψηλό αυτό ποσοστό εμφανίστηκε και στον ευτροφισμό γλυκών υδάτων, αλλά σε αυτήν την περίπτωση οφείλεται στις υψηλές εκπομπές οξειδίων του αζώτου κατά την παραγωγή χαρτιού (Markwardt *et al.*, 2017). Το φορτίο της συσκευασίας PET παρουσιάζεται στο Γράφημα 12 και υπολογίστηκε ίσο με $7.25 \cdot 10^{-7}$ kg ισοδύναμου αζώτου.

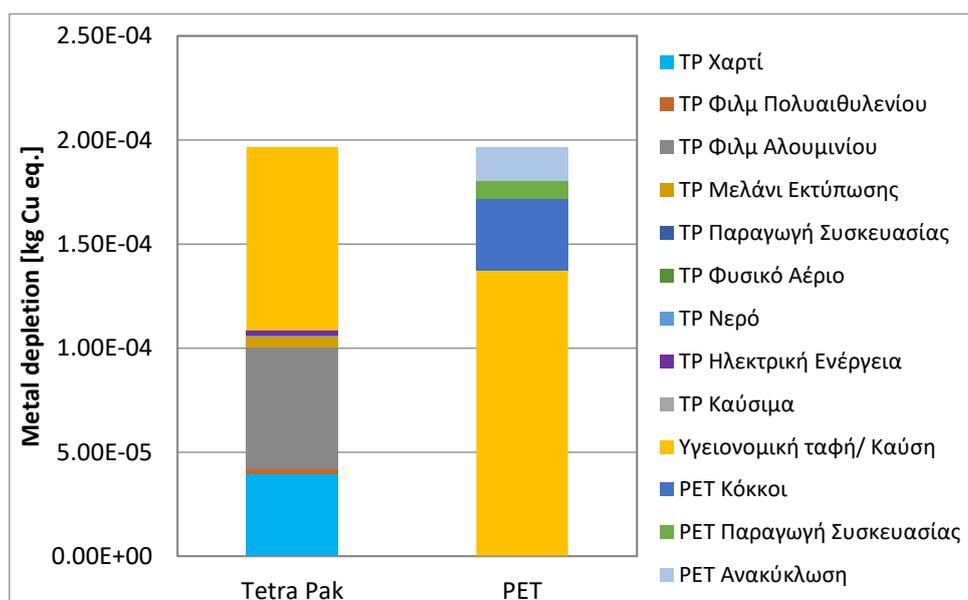
Συγκριτική Μελέτη Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος των Συσκευασιών Χυμού Τερεθθαλικού Πολυαιθυλενίου (PET) και Πολλαπλών Στρωμάτων Tetra Pak



Γράφημα 12. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στον θαλάσσιο ευτροφισμό (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμου αζώτου - kg N eq.)

13. Μείωση μετάλλων (Metal Depletion)

Η συνεισφορά της παραγωγής και του τέλους ζωής των δύο ειδών συσκευασίας στην κατηγορία επιπτώσεων της μείωσης μετάλλων παρουσιάζουν αμελητέα διαφορά, όπως φαίνεται και στο επόμενο Σχήμα. Ο πιο σημαντικός συντελεστής για το φορτίο της μείωσης μετάλλων αποτελεί και στις δύο περιπτώσεις το τέλος ζωής των συσκευασιών, μη συμπεριλαμβανομένης της ανακύκλωσης. Αυτό σημαίνει πως η αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης θα μειώσει τις επιπτώσεις στην κατηγορία αυτή.

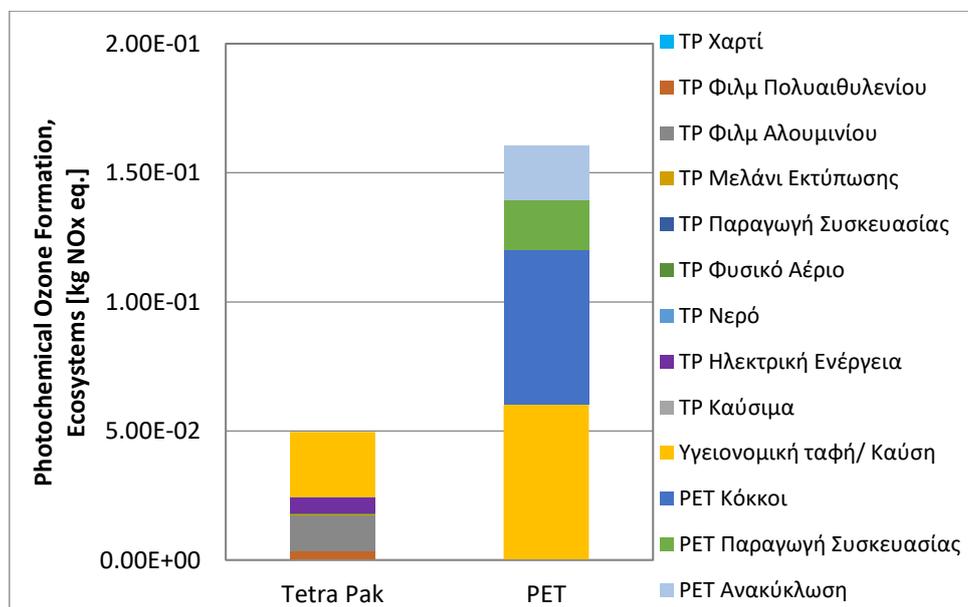


Γράφημα 13. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στη μείωση μετάλλων (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμου χαλκού- kg Cu eq.)

14. Δημιουργία φωτοχημικού όζοντος για τα οικοσυστήματα (Photochemical Ozone Formation, Ecosystems)

Οι επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής της συσκευασίας PET και Tetra Pak στη δημιουργία φωτοχημικού όζοντος προβάλλονται στο Γράφημα 14. Η PET συσκευασία παρουσιάζει αποτύπωμα μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερο από αυτό της πολυστρωματικής συσκευασίας, ίσα με 0.16 και 0.05 kg ισοδύναμων οξειδίων του αζώτου, αντίστοιχα.

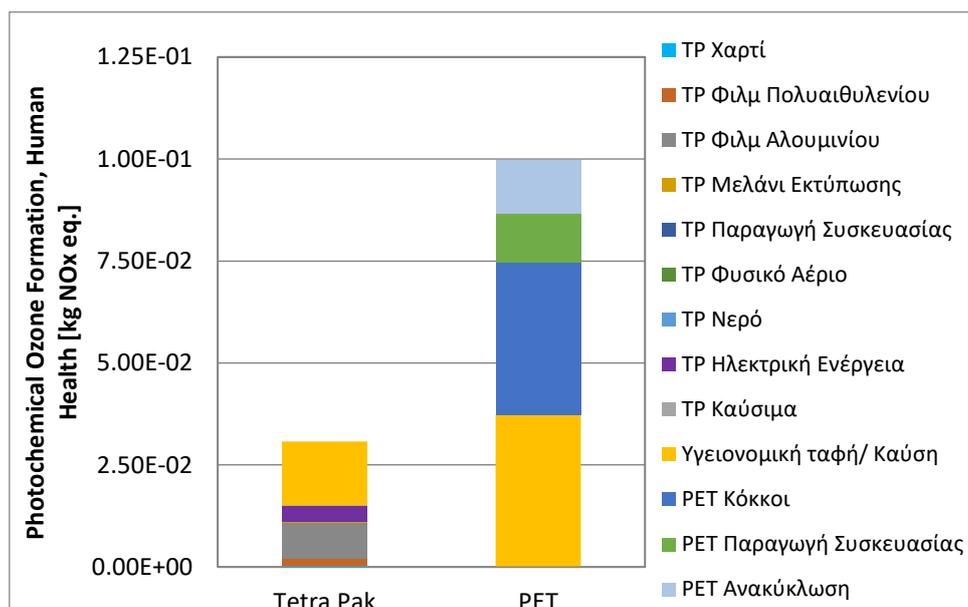
Το τέλος ζωής των συσκευασιών είναι ο τομέας που επιβαρύνει περισσότερο τα αποτυπώματα σε ποσοστό 37.40 για την PET και 50.80 για την Tetra Pak. Γενικά, ο σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος είναι μια μη γραμμική διαδικασία που εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες και τις συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου (NO_x) και των πτητικών οργανικών ενώσεων εκτός του μεθανίου (NMVOC) (Huijbregts *et al.*, 2016). Κατά την καύση απόβλητων, εκπέμπονται ενώσεις, όπως πτητικές οργανικές ενώσεις εκτός μεθανίου (NMVOC), οξείδια του αζώτου, διοξείδιο του θείου, υδροχλώριο και σωματίδια (PM), τα οποία όμως δεν συμβάλουν σημαντικά στις συνολικές εκπομπές και ελέγχονται από αυστηρή νομοθεσία. Τα οξείδια του αζώτου είναι προϊόντα όλων των διεργασιών καύσης καυσίμων ή/ και αέρα. Τα οξείδια του αζώτου σχηματίζονται κατά την καύση κατά κύριο λόγο μέσω οξειδωσης του αζώτου στα απόβλητα (σε χαμηλές θερμοκρασίες) και λιγότερο μέσω οξειδωσης του ατμοσφαιρικού αζώτου (σε υψηλότερες θερμοκρασίες) (Ole-Kenneth Nielsen, Malene Nielsen, Katja Hjelgaard, Peter Coleman, Otto Rentz and Haydn Jones, 2019).



Γράφημα 14. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στη δημιουργία φωτοχημικού όζοντος για τα οικοσυστήματα (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμων οξειδίων του αζώτου -kg NO_x eq.)

15. Δημιουργία φωτοχημικού όζοντος για την ανθρώπινη υγεία (Photochemical Ozone Formation, Human Health)

Το προφίλ της δημιουργίας φωτοχημικού όζοντος εστιασμένης στην ανθρώπινη υγεία είναι παρόμοιο με της προηγούμενης κατηγορίας, η οποία επικεντρωνόταν στις επιπτώσεις στα οικοσυστήματα. Η συσκευασία PET έχει τρεις φορές μεγαλύτερη τιμή επιπτώσεων (0.1 kg ισοδύναμων οξειδίων του αζώτου) από τη συσκευασία Tetra Pak (0.03 kg ισοδύναμων οξειδίων του αζώτου). Η καύση και η υγειονομική ταφή αποτελούν και πάλι σημαντικούς συντελεστές για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω.



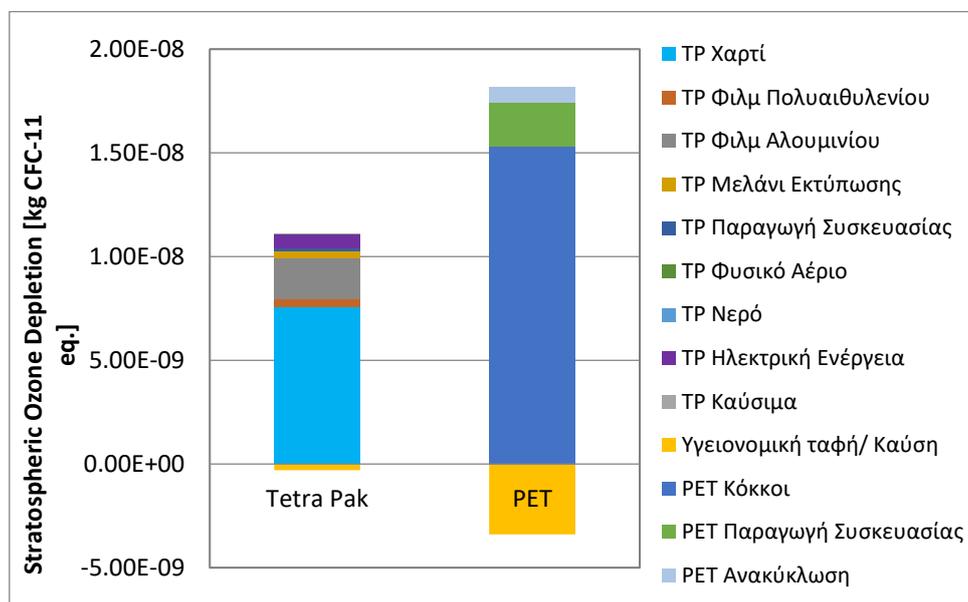
Γράφημα 15. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στη δημιουργία φωτοχημικού όζοντος για την ανθρώπινη υγεία (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμων οξειδίων του αζώτου -kg NOx eq.)

16. Μείωση της στοιβάδας του στρατοσφαιρικού όζοντος (Stratospheric Ozone Depletion)

Η επιβάρυνση μιας συσκευασίας ενός λίτρου χυμού κατασκευασμένη από PET στην κατηγορία μείωσης της στοιβάδας του στρατοσφαιρικού όζοντος είναι ίση με $1.48 \cdot 10^{-8}$ kg ισοδύναμων χλωροφθορανθράκων, σε σύγκριση με την επιβάρυνση της Tetra Pak που ισούται με $1.08 \cdot 10^{-8}$ kg. Οι χημικές ουσίες που καταστρέφουν το όζον είναι σχετικά ανθεκτικές και έχουν ομάδες χλωρίου ή βρωμίου στα μόρια τους που αλληλεπιδρούν με το όζον (κυρίως) στη στρατόσφαιρα (Huijbregts *et al.*, 2016).

Οι κύριοι τομείς που συντελούν στο φορτίο είναι οι παραγωγές των πρωτογενών υλικών που απαιτούνται για την κατασκευή των συσκευασιών και συγκεκριμένα οι παραγωγές του PET και του χαρτιού, το οποίο αποτελεί το 75% της πολυστρωματικής συσκευασίας. Αντίθετα, η καύση/ υγειονομική ταφή εμφανίζονται ως credits στην κατηγορία. Το αποτέλεσμα αυτό

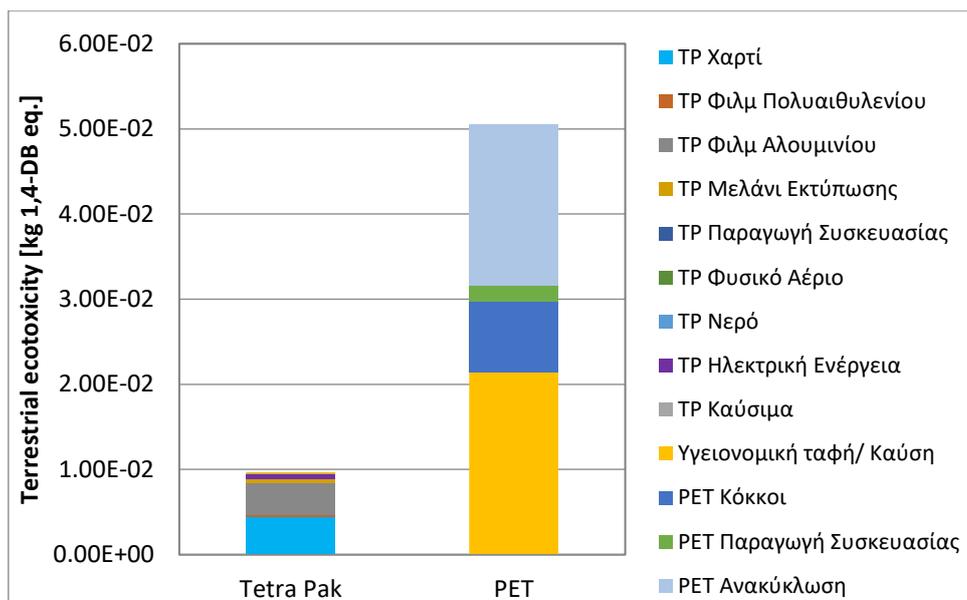
συμφωνεί και με τη μελέτη του Foolmaun, όπου το σενάριο του μέγιστου ποσοστού καύσης αποβλήτων συνεπάγεται με μεγαλύτερο αρνητικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, δηλαδή όφελος, στην κατηγορία (Foolmaun and Ramjeeawon, 2013)



Γράφημα 16 Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στη μείωση της στοιβάδας του όζοντος (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμων χλωροφθορανθράκων -kg CFC-11 eq.)

17. Επίγεια Οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity)

Σε αντίθεση με την οικοτοξικότητα γλυκών υδάτων, στην κατηγορία επίγεια οικοτοξικότητας, η συσκευασία PET οδηγεί σε υψηλότερη επιβάρυνση από τη συσκευασία Tetra Pak με τιμές ίσες με 0.051 και 0.010 kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου, αντίστοιχα. Αυτό δηλώνει πως οι κύριες εκπομπές 1,4 διχλωροβενζολίου από τη συσκευασία Tetra Pak καταλήγουν στις λίμνες και τους υδάτινους αποδέκτες γλυκού νερού, ενώ οι εκπομπές 1,4 διχλωροβενζολίου από την παραγωγή και το τέλος ζωής της συσκευασίας PET οδηγούνται σε θαλάσσιους αποδέκτες (Κατηγορία 11) και στο βιομηχανικό έδαφος. Σημαντικό μερίδιο του φόρτου της PET συσκευασίας αποτελεί το τέλος ζωής που περιλαμβάνει την καύση και την υγειονομική ταφή των αποβλήτων, αλλά και η ανακύκλωση.



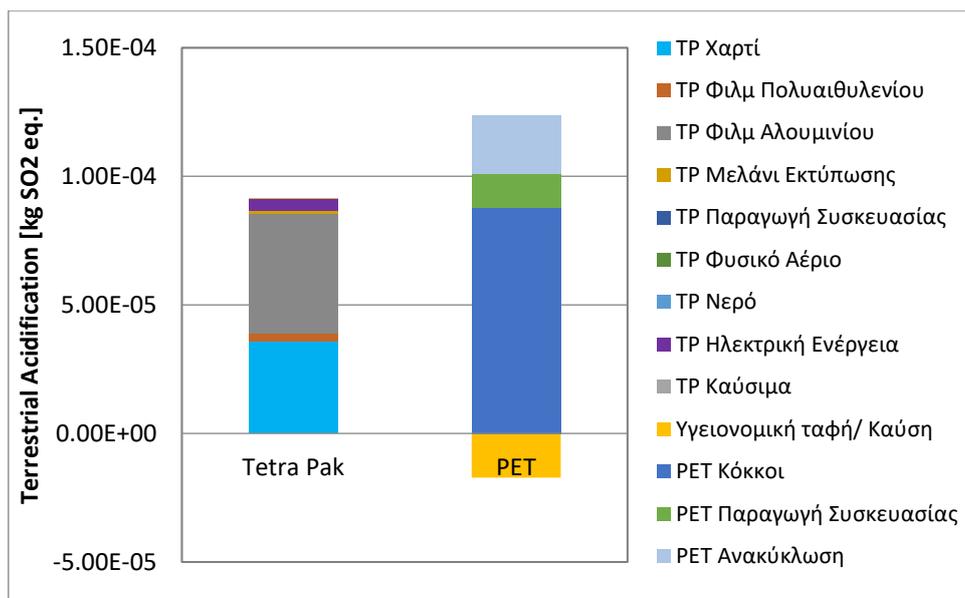
Γράφημα 17. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στην επίγεια οικοτοξικότητα (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμου 1,4-διχλωροβενζολίου- kg 1,4 DB eq.)

18. Επίγεια Οξίνιση (Terrestrial Acidification)

Η παραγωγή και τέλος ζωής της PET συσκευασίας επιβαρύνουν με φορτίο $9.15 \cdot 10^{-5}$ kg ισοδύναμου διοξειδίου του θείου την επίγεια όξινση, ενώ οι αντίστοιχες διεργασίες για την Tetra Pak συσκευασία έχουν μειωμένο φορτίο και ίσο με $1.07 \cdot 10^{-4}$ kg ισοδύναμου SO_2 . Τα φορτία οφείλονται κατά κύριο λόγο στην παραγωγή των πρώτων υλών, δηλαδή των κόκκων PET και του χαρτιού και αλουμινίου.

Όσον αφορά στο χαρτί, η διεργασία Kraft για τον διαχωρισμό της κυτταρίνης από τις λιγνιτικές ίνες ξύλου χρησιμοποιεί υδροξείδιο του νατρίου και θειούχο νάτριο, που οδηγούν σε πρόσθετες εκπομπές SO_2 , συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στο δυναμικό οξίνισης (Markwardt *et al.*, 2017).

Συγκριτική Μελέτη Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος των Συσκευασιών Χυμού Τερεφθαλικού Πολυαιθυλενίου (PET) και Πολλαπλών Στρωμάτων Tetra Pak

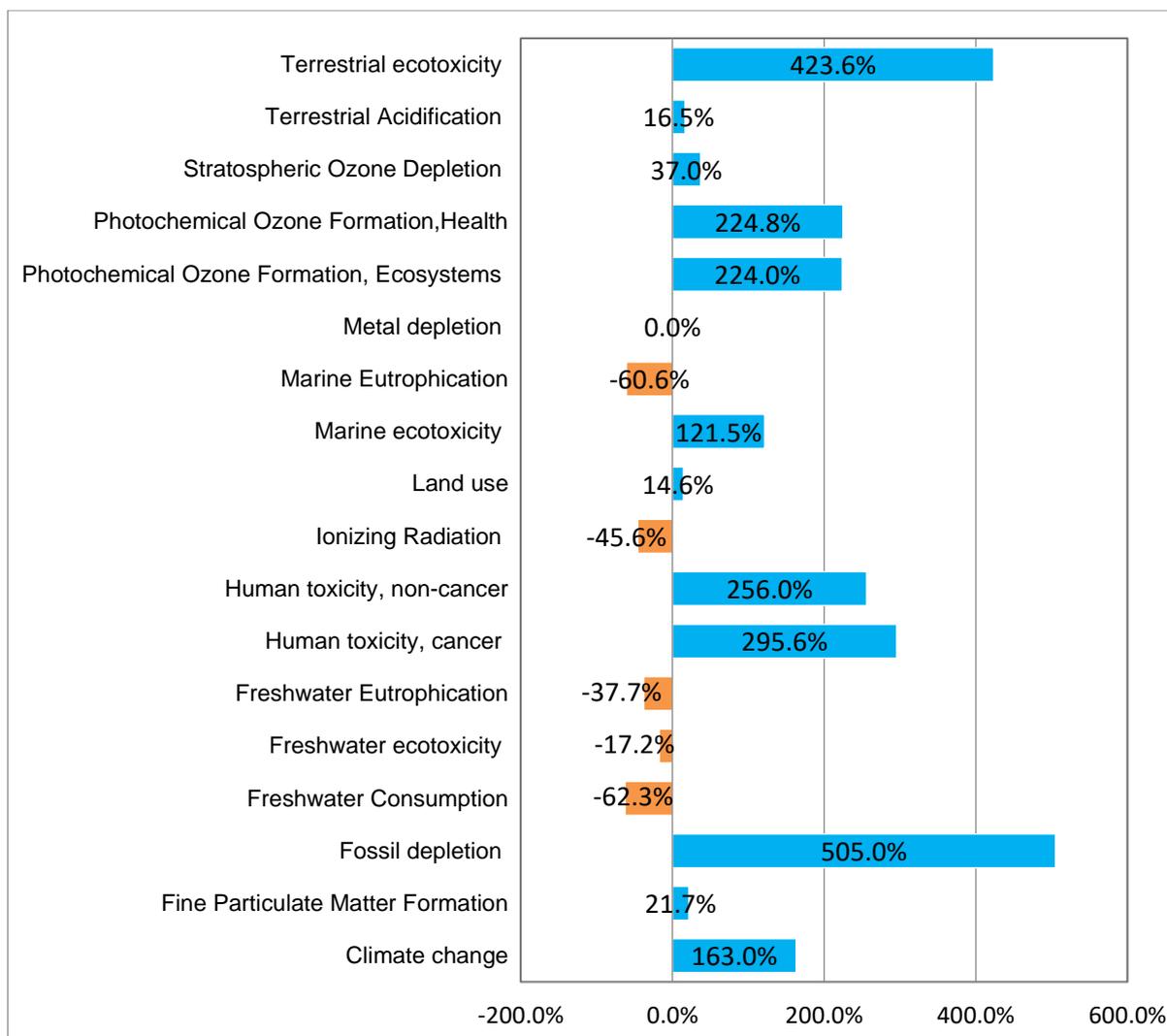


Γράφημα 18. Επιπτώσεις παραγωγής και τέλους ζωής των συσκευασιών χυμού Tetra Pak (TP) και PET στην επίγεια οξίνιση (εκφρασμένες σε kg ισοδύναμου διοξειδίου του θείου -kg SO₂ eq.)

3.4. Ερμηνεία και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η εκτίμηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της πολυστρωματικής συσκευασίας Tetra Pak και της συσκευασίας τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (PET) πραγματοποιήθηκε μέσω των δεκαοκτώ κατηγοριών επιπτώσεων, όπως αυτές προτείνονται στη μεθοδολογία ReCiPe. Από το σύνολο των κατηγοριών, στις 12 φάνηκε ότι η παραγωγή και το τέλος ζωής της συσκευασίας PET είχε μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση, στις 5 κατηγορίες η συσκευασία Tetra Pak εμφάνισε βαρύτερο φορτίο, ενώ σε μία κατηγορία οι επιπτώσεις των δύο ειδών συσκευασίας χυμού ήταν ίσες. Οι αναλυτικές κατηγορίες εμφανίζονται στο Γράφημα 19.

Συγκριτική Μελέτη Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος των Συσκευασιών Χυμού Τερεθφαλικού Πολυαιθυλενίου (PET) και Πολλαπλών Στρωμάτων Tetra Pak



Γράφημα 19. Ποσοστά κατά τα οποία η συσκευασία Tetra Pak αποτελεί καλύτερη (θετικά, με μπλε χρώμα) και χειρότερη (αρνητικά, με πορτοκαλί χρώμα) εναλλακτική από τη συσκευασία PET για καθεμία από τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων ReCiPe 2016

Η συσκευασία Tetra Pak παρουσιάζει αρνητικά ποσοστά, που υποδεικνύουν και κατωτερότητα σε σχέση με τη συσκευασία PET, στις κατηγορίες που αφορούν κυρίως στον υδροφόρο ορίζοντα, όπως είναι οι κατηγορίες του ευτροφισμού, της κατανάλωσης και της οικοτοξικότητας γλυκών υδάτων, καθώς και του θαλάσσιου ευτροφισμού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παραγωγή της κύριας πρώτης ύλης της πολυστρωματικής συσκευασίας, του χαρτιού, το οποίο αποτελεί το 75% των συνολικών υλικών της. Η παραγωγή χαρτιού απαιτεί τεράστιους όγκους νερού σε διάφορα στάδιά της, οι οποίοι αντλούνται από πηγές γλυκού νερού, όπως τα ποτάμια και οι λίμνες. Επιπλέον, κάνει χρήση διαφόρων χημικών που συνεισφέρουν οργανικές ενώσεις στα επιφανειακά ύδατα, οδηγούν σε υπερβολική ποσότητα αντιδράσεων που καταναλώνουν οξυγόνο και έχουν ως τελικό αποτέλεσμα την έλλειψη οξυγόνου στο νερό (Markwardt et al., 2017).

Όσον αφορά στη συσκευασία PET, ο τομέας που επιβαρύνει σε άκρως σημαντικό ποσοστό το περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε δώδεκα από τις δεκαοκτώ κατηγορίες είναι η παραγωγή της πρώτης ύλης των φιαλών, των κόκκων PET. Το τέλος ζωής που συνδέεται με την καύση και την υγειονομική ταφή των χρησιμοποιημένων φιαλών PET σε οκτώ κατηγορίες έχει αρνητικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, δηλαδή περιβαλλοντικό όφελος, ενώ σε τέσσερις κατηγορίες (μείωση μετάλλων, σχηματισμός φωτοχημικού όζοντος που έχει επιπτώσεις στην υγεία και τα οικοσυστήματα και επίγεια οικοτοξικότητα) είναι ο κύριος συντελεστής στο περιβαλλοντικό φορτίο εξαιτίας των εκπομπών που παράγονται κατά την καύση.

Συμπερασματικά, η συσκευασία χυμού Tetra Pak βρέθηκε περιβαλλοντικά ανώτερη από την εναλλακτική συσκευασία PET σε 12 εκ των 18 συνολικών κατηγοριών επιπτώσεων. Μάλιστα, οι διαφορές των δύο συσκευασιών είναι αξιοσημείωτες στις κατηγορίες επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και της κατανάλωσης ορυκτών πόρων, η περιβαλλοντική σημασία των οποίων εκτιμάται από την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Περιβάλλοντος ως «πολύ υψηλή» και «υψηλή» αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τα οφέλη της συσκευασίας χυμού Tetra Pak στην παρατεταμένη διάρκεια ζωής των χυμών, καθώς και το μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα στην πλειοψηφία των κατηγοριών επιπτώσεων, μπορεί να αναφερθεί συνολικά ότι υπάρχουν σαφή περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα για την πολυστρωματική συσκευασία χυμού Tetra Pak έναντι στη φιάλη χυμού PET.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Acero, A. P., Rodríguez, C. and Citroth, A. (2014) 'LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories', *openLCA*.
- Alexandru Mihai Grumezescu, A. M. H. (2019) *Trends in Beverage Packaging Volume 16: The Science of Beverages*.
- Alting, L., Bilberg, A. and Larsen, N. E. (1988) 'Extended Applications of Simulation in Manufacturing Systems', *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. doi: 10.1016/S0007-8506(07)61667-9.
- Andersson, K. and Ohlsson, T. (1994) 'Life cycle assessment (LCA) of food products and production systems', 51(May).
- Andreas Barkman, Cecilia, A. and Lars Lundahl, E. Ø. (2018) *Investigating the life-cycle environmental profile of liquid food packaging systems Tetra Brik Aseptic and apple juice*.
- Baumann, H. and Tillman, A.-M. (2004) *The Hitch Hiker's Guide to LCA, Studentlitteratur Lund*.
- Beitzen-Heineke, E. F., Balta-Ozkan, N. and Reefke, H. (2017) 'The prospects of zero-packaging grocery stores to improve the social and environmental impacts of the food supply chain', *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.09.227.
- Bertolini, M. et al. (2016) 'Comparative Life Cycle Assessment of Packaging Systems for Extended Shelf Life Milk', *Packaging Technology and Science*. doi: 10.1002/pts.2235.
- Boustead, I. (1993) 'General principles for life cycle assessment databases', *Journal of Cleaner Production*, 1(3-4), pp. 167-172. doi: 10.1016/0959-6526(93)90008-Y.
- Castell, A. et al. (2013) 'Life Cycle Assessment of alveolar brick construction system incorporating phase change materials (PCMs)', *Applied Energy*. Elsevier Ltd, 101, pp. 600-608. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.06.066.
- Coelho, C. R. V and McLaren, S. J. (2013) 'Rethinking a product and its function using LCA - Experiences of New Zealand manufacturing companies', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(4), pp. 872-880. doi: 10.1007/s11367-012-0526-4.
- Ebadi, M. et al. (2016) 'The effect of beverage storage packets (Tetra Pak™) waste on mechanical properties of wood-plastic composites', *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. doi: 10.1177/0892705715618745.

- Falguera, V. and Ibarz, A. (2014) *Juice processing: Quality, safety and value-added opportunities, Juice Processing: Quality, Safety and Value-Added Opportunities*. doi: 10.1201/b16740.
- Finkbeiner, M. et al. (2010) 'Towards life cycle sustainability assessment', *Sustainability*. doi: 10.3390/su2103309.
- Finnveden, G. et al. (2009) 'Recent developments in Life Cycle Assessment.', *Journal of environmental management*. Elsevier Ltd, 91(1), pp. 1–21. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.
- Foolmaun, R. K. and Ramjeeawon, T. (2013) 'Comparative life cycle assessment and social life cycle assessment of used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius', *International Journal of Life Cycle Assessment*. doi: 10.1007/s11367-012-0447-2.
- Guinée, J. B. et al. (2002) 'life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. Ila: Guide. I Ib: Operational annex. III: Scientific background', *The Netherlands: Ministry of* doi: 10.1007/BF02978784.
- Guinée, J. B. et al. (2011) 'Life cycle assessment: past, present, and future.', *Environmental science & technology*, 45(1), pp. 90–96. doi: 10.1021/es101316v.
- Handbook, I. and Assessment, L. C. (2010) *ILCD Handbook: Review schemes for Life Cycle Assessment (LCA) First edition EUR 24710 EN - 2010*. doi: 10.2788/39791.
- Heijungs, R., Huppes, G. and Guinée, J. B. (2010) 'Life cycle assessment and sustainability analysis of products, materials and technologies. Toward a scientific framework for sustainability life cycle analysis', *Polymer Degradation and Stability*, 95(3), pp. 422–428. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2009.11.010.
- Herrmann, I. T. and Moltesen, A. (2015) 'Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? - A comparative assessment of SimaPro and GaBi', *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.08.004.
- Huibregts, M. A. . et al. (2016) 'ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level - Report 1 : characterization', *National Institute for Public Health and the Environment*.
- Huibregts, M. A. J. et al. (2017) 'ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level', *International Journal of Life Cycle Assessment*. doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.

ISO (2006) 'ISO 14040: Life Cycle Assessment — Principles and Framework', *Environmental Management*, 3, p. 28. doi: 10.1002/jtr.

Junnila, S. (2008) 'Life cycle management of energy-consuming products in companies using IO-LCA', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13(5), pp. 432–439. doi: 10.1007/s11367-008-0015-y.

Kartonverpackungen, F., Gmbh, E. and Gmbh, T. P. (2007) *Life cycle assessment Beverage cartons under test*.

Kloepffer, W. (2008) 'Life Cycle Sustainability Assessment of Products (with Comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95)', *International Journal Life Cycle Assessment*, 13(2), pp. 89–95. doi: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2008.02.376>.

Klöpffer, W. (2003) 'Life-Cycle based methods for sustainable product development', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(3), pp. 157–159. doi: 10.1007/BF02978462.

De Marco, I. *et al.* (2015) 'Reduction of carbon dioxide emissions during the vinification stages of a white wine produced in Italy', *Chemical Engineering Transactions*, 43(2012), pp. 2173–2178. doi: 10.3303/CET1543363.

Markwardt, S. *et al.* (2017) 'Comparative Life Cycle Assessment of Tetra Pak carton packages and alternative packaging systems for liquid food on the Nordic market', *Institute for Energy and Environmental Research*, 49(April), p. 445.

Nunez, P. and Jones, S. (2016) 'Cradle to gate: life cycle impact of primary aluminium production', *International Journal of Life Cycle Assessment*. doi: 10.1007/s11367-015-1003-7.

Ole-Kenneth Nielsen, Malene Nielsen, Katja Hjelgaard, Peter Coleman, Otto Rentz, D. O. and Haydn Jones, M. W. and M. W. (2019) *EEA Report No 13/2019*.

Pasqualino, J., Meneses, M. and Castells, F. (2011) 'The carbon footprint and energy consumption of beverage packaging selection and disposal', *Journal of Food Engineering*. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2010.11.005.

Pennington, D. W. *et al.* (2006) 'Risk and regulatory hazard-based toxicological effect indicators in life-cycle assessment (LCA)', *Human and Ecological Risk Assessment*, 12(3), pp. 450–475. doi: 10.1080/10807030600561667.

Pfister, S., Koehler, A. and Hellweg, S. (2009) 'Assessing the environmental impacts of

freshwater consumption in LCA', *Environmental Science and Technology*. doi: 10.1021/es802423e.

Ramos, M. *et al.* (2015) 'New Trends in Beverage Packaging Systems: A Review', *Beverages*. doi: 10.3390/beverages1040248.

Ros-Chumillas, M. *et al.* (2007) 'Quality and shelf life of orange juice aseptically packaged in PET bottles', *Journal of Food Engineering*. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.048.

Roy, P. *et al.* (2009) 'A review of life cycle assessment (LCA) on some food products', *Journal of Food Engineering*, 90(1), pp. 1–10. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016.

Sinha, V., Patel, M. R. and Patel, J. V. (2010) 'Pet waste management by chemical recycling: A review', *Journal of Polymers and the Environment*. doi: 10.1007/s10924-008-0106-7.

Tencati, A. *et al.* (2016) 'Prevention policies addressing packaging and packaging waste: Some emerging trends', *Waste Management*. doi: 10.1016/j.wasman.2016.06.025.

Tetra Pak (2020) *Sustainability Report 2020*.

Tukker, A. (2000) 'Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment', *Environmental Impact Assessment Review*, 20(4), pp. 435–456. doi: 10.1016/S0195-9255(99)00045-1.

Udo de Haes, H. A. (1993) 'Applications of life cycle assessment: expectations, drawbacks and perspectives', *Journal of Cleaner Production*, 1(3–4), pp. 131–137. doi: 10.1016/0959-6526(93)90002-S.

Udo de Haes, H. A. and Jolliet, O. (1999) 'How Does ISO/DIS 14042 on Life Cycle Impact Assessment Accomodate Current best Available Practice?', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 4(2), pp. 75–80.

Vigon, B. (1993) 'Life -cycle Improvements Analysis: Procedure Development and Demonstration', in *IEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp. 151–156.

Xie, M. *et al.* (2013) 'Life cycle assessment of composite packaging waste management - A Chinese case study on aseptic packaging', *International Journal of Life Cycle Assessment*. doi: 10.1007/s11367-012-0516-6.

Zawadiak, J. (2017) 'Tetra Pak Recycling – Current Trends and New Developments',

Συγκριτική Μελέτη Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος των Συσκευασιών Χυμού Τερεθαλικού Πολυαιθυλενίου (PET) και Πολλαπλών Στρωμάτων Tetra Pak

American Journal of Chemical Engineering. doi: 10.11648/j.ajche.20170503.12.

Γεωργακέλλου, Δ. (1998) 'ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ: ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΟ ΟΡΓΑΝΟ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ', *ΣΠΟΥΔΑΙ*, Τόμος 49, Τεύχος 1ο-4ο, Πανεπιστήμιο Πειραιώς.

Ε.Φ.Ε.Τ. Ενιαίος Φορέας Ελέγχου Τροφίμων and Σύνδεσμος Βιομηχανιών Παραγωγής Υλικών & Συσκευασίας ΣΥ.ΒΙ.Π.Υ.Σ. (2015) *Οδηγός Ορθής Παραγωγικής Πρακτικής («Ο.Π.Π.») για τα Υλικά και Αντικείμενα που προορίζονται να έρθουν σε Επαφή με Τρόφιμα («Υ.Α.Ε.Τ.»)*.