



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής
Έρευνας



ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ LCA (Life Cycle Assessment) ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΦΙΑΛΩΝ PET ΚΑΙ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ

ΠΑΠΟΥΤΣΑΚΗ ΙΩΑΝΝΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Σταύρος Πόνης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022

Πίνακας περιεχομένων

Ευρετήριο Διαγραμμάτων, Εικόνων και Πινάκων.....	4
Περίληψη.....	7
Ευχαριστίες.....	8
1. Εισαγωγή.....	9
1.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της βιομηχανικής δραστηριότητας.....	9
1.2 Ορισμός, Ιστορία και Στόχοι της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής.....	13
2. Στάδια του Κύκλου Ζωής των Προϊόντων.....	15
2.1 Εξόρυξη Πρώτων Υλών (Raw Material Extraction).....	16
2.2 Κατασκευή & Επεξεργασία (Manufacturing & Processing).....	19
2.3 Μεταφορά (Transportation).....	23
2.4 Τελική Διάθεση & Χρήση (Retail & Usage).....	26
2.5 Απόρριψη (Disposal).....	27
2.5.1 Υγειονομική ταφή.....	27
2.5.2 Αποτέφρωση.....	29
2.5.3 Ανακύκλωση.....	30
3. Φάσεις Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής των Προϊόντων.....	33
3.1 Καθορισμός στόχου και πεδίου μελέτης (Goal and Scope Definition).....	34
3.1.1 Λειτουργική Μονάδα (Functional Unit).....	35
3.1.2 Όριο Συστήματος.....	36
3.2 Ανάλυση Συλλογής Δεδομένων (Inventory Analysis).....	38
3.2.1 Αναγνώριση των διαδικασιών για το μοντέλο LCI.....	39
3.2.2 Συλλογή των δεδομένων.....	40
3.2.3 Σχεδιασμός και Ποιοτικός Έλεγχος Μοναδιαίων Διαδικασιών.....	41
3.2.4 Κατασκευή του μοντέλου LCI.....	41
3.2.5 Τελική αναφορά.....	41
3.3 Εκτίμηση επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment - LCIA).....	42
3.3.1 Επιλογή κατηγοριών επιπτώσεων, δεικτών κατηγοριών και μοντέλων χαρακτηρισμού.....	42
3.3.2 Ταξινόμηση.....	43
3.3.3 Χαρακτηρισμός.....	44
3.3.4 Κανονικοποίηση.....	45
3.3.5 Στάθμιση.....	46
3.3.6 Ομαδοποίηση.....	46
3.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων (Interpretation).....	47
3.4.1 Αναγνώριση καίριων ζητημάτων.....	47
3.4.2 Αξιολόγηση.....	48
3.4.3 Διατύπωση συμπερασμάτων και συστάσεων.....	50
4. Μελέτη περίπτωσης: PET.....	51
4.1 Γενικές γνώσεις.....	51
4.1.1 Γιατί PET;.....	51
4.1.2 Σύσταση του υλικού.....	52
4.1.3 Πρώτες ύλες και κατασκευή.....	52
4.1.5 Ανακύκλωση.....	55
4.2 Συλλογή Βιβλιογραφίας.....	58
4.2.1 Μεθοδολογία συλλογής βιβλιογραφίας.....	58
4.2.2 Αποτελέσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης.....	59
4.3 Βιβλιογραφική αξιολόγηση.....	64

4.3.1 Μελέτη των ανασκοπήσεων.....	64
4.3.2 Μελέτη των άρθρων.....	67
5. Μελέτη περίπτωσης: WEEE.....	73
5.1 Γενικές Γνώσεις.....	73
5.1.1 Γιατί WEEE;.....	73
5.1.2 Πρώτες ύλες.....	74
5.1.3 Κατασκευή.....	74
5.1.4 Ανακύκλωση.....	76
5.2 Συλλογή της βιβλιογραφίας.....	77
5.2.1 Μεθοδολογία συλλογής βιβλιογραφίας.....	77
5.2.2 Αποτελέσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης.....	78
5.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	82
5.3.1 Μελέτη των ανασκοπήσεων.....	82
5.3.2 Μελέτη των άρθρων.....	85
6. Τελική Αποτίμηση και Συμπεράσματα.....	91
Βιβλιογραφία.....	94
Βιβλιογραφία (διαδικτυακοί σύνδεσμοι).....	109

Ευρετήριο Διαγραμμάτων, Εικόνων και Πινάκων

Διάγραμμα 1.1: Παγκόσμια ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά πρωτογενή πηγή [1].....	10
Διάγραμμα 1.2: Ετήσιες εκπομπές CO ₂ (*109 τόνοι) ανά ήπειρο [2].....	11
Διάγραμμα 1.3: Σενάρια θέρμανσης του πλανήτη ανάλογα τις ετήσιες εκπομπές GHG [2].....	11
Διάγραμμα 1.4: Εκπομπές GHG ανά οικονομικό τομέα για το 2016 [2].....	12
Διάγραμμα 2.1: Ποσοστά χρήσης ενέργειας στις Η.Π.Α ανά οικονομικό τομέα για το 2020 [8].....	22
Διάγραμμα 2.2: Διάγραμμα της κατανάλωσης ενέργειας στη παραγωγική βιομηχανία (1950-2020) [8].....	23
Διάγραμμα 2.3: Ποσοστά εκπομπών CO ₂ κάθε τρόπου μεταφοράς.....	25
Διάγραμμα 2.4 Σύγκριση των εκπομπών CO ₂ των διαφορετικών μεθόδων μεταφορών (gr CO ₂ / (km*tn)) [11].....	26
Διάγραμμα 2.5: Παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τα έτη 1990-2021 ανά ήπειρο [12].....	27
Διάγραμμα 2.6: Ποσοστά ανακύκλωσης αστικών απορριμμάτων (2005-2019).....	32
Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα που απεικονίζει τη διαδρομή από τα αποτελέσματα της LCI στους δείκτες τελικού σημείου.....	45
Διάγραμμα 4.1: Γράφημα που απεικονίζει τις ποσότητες πλαστικών ανά βιομηχανικό τομέα [23]	51
Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα ροής των διαφορετικών τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης.....	56
Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των μπουκαλιών PET ανά έτος.....	58
Διάγραμμα 4.4: Ταξινόμηση των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των PET ανά κατηγορία και έτος. Από αυτές, οι 45 (52%) δημοσιεύτηκαν τα τελευταία 5 έτη, στοιχείο ενδεικτικό του αυξημένου ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας για το αντικείμενο μελέτης. Ταυτόχρονα, το γεγονός πως οι 5 από τις 6 ανασκοπήσεις (reviews) έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία 4 χρόνια τα καθιστά αξιόπιστα ως προς τη σχετικότητά τους με τις τελευταίες εξελίξεις στο εκάστοτε αντικείμενο μελέτης.....	60
Διάγραμμα 4.5: Ταξινόμηση των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των PET ανά περιοδικό δημοσίευσης, για περιοδικά με 5 ή περισσότερες δημοσιεύσεις. Στο περιοδικό “Resources, Conservation and Recycling” δημοσιεύτηκαν 14 άρθρα και reviews, τα περισσότερα από κάθε άλλο περιοδικό. Γενικά, παρατηρήθηκε μεγάλη διασπορά στις δημοσιεύσεις, με τις 40 (46%) να δημοσιεύονται σε 29 διαφορετικά περιοδικά.....	60
Διάγραμμα 4.6: Σχηματική απεικόνιση της κατανομής των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των PET ανά περιοδικό δημοσίευσης.....	61
Διάγραμμα 4.7: Σχηματική απεικόνιση του αριθμού των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των PET ανά χώρα του πρώτου συγγραφέα για χώρες με 5 ή περισσότερες δημοσιεύσεις. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, οι Η.Π.Α. και οι παραπάνω χώρες της Ευρώπης συνεισφέρουν τις περισσότερες δημοσιεύσεις στο παρόν αντικείμενο μελέτης.....	62
Διάγραμμα 4.8: Γράφημα που απεικονίζει τη συχνότητα εμφάνισης των διαφορετικών ορίων συστήματος μιας LCA.....	69
Διάγραμμα 5.1: Μεταβολή των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE ανά έτος.....	77
Διάγραμμα 5.2: Ταξινόμηση των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE ανά κατηγορία και έτος. Από αυτές, οι 53 (64%) δημοσιεύτηκαν τα τελευταία 6 έτη, στοιχείο ενδεικτικό του αυξημένου ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας για το αντικείμενο μελέτης. Ταυτόχρονα, το γεγονός πως οι 5 από τις 6 ανασκοπήσεις (reviews) έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία 3 χρόνια τα καθιστά αξιόπιστα ως προς τη σχετικότητά τους με τις τελευταίες εξελίξεις στο εκάστοτε αντικείμενο μελέτης.....	78

Διάγραμμα 5.3: Ταξινόμηση των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE ανά περιοδικό δημοσίευσης, για περιοδικά με 4 ή περισσότερες δημοσιεύσεις. Στο περιοδικό “Resources, Conservation and Recycling” δημοσιεύτηκαν 14 άρθρα και reviews, τα περισσότερα από κάθε άλλο περιοδικό. Γενικά, παρατηρήθηκε μεγάλη διασπορά στις δημοσιεύσεις, με τις 29 (35%) να δημοσιεύονται σε 25 διαφορετικά περιοδικά.....	79
Διάγραμμα 5.4: Σχηματική απεικόνιση της κατανομής των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE ανά περιοδικό δημοσίευσης.....	79
Διάγραμμα 5.5: Σχηματική απεικόνιση του αριθμού των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE ανά χώρα του πρώτου συγγραφέα για χώρες με 5 ή περισσότερες δημοσιεύσεις. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η Κίνα και οι παραπάνω χώρες της Ευρώπης συνεισφέρουν τις περισσότερες δημοσιεύσεις στο παρόν αντικείμενο μελέτης.....	80
Διάγραμμα 5.6: Γράφημα που παρουσιάζει τη συχνότητα εμφάνισης προϊόντων ανά κατηγορία (WEEE Directive 2018/19/EU).....	86
Διάγραμμα 5.7: Γράφημα που αναπαριστά τη κατανομή των δημοσιεύσεων ανάλογα το όριο/α συστήματος που πραγματεύονταν.....	87
Διάγραμμα 5.8: Γράφημα που παρουσιάζει τη συχνότητα εμφάνισης μεθόδων LCIA.....	88
Διάγραμμα 5.9: Γράφημα που παρουσιάζει τη συχνότητα χρήσης λογισμικών LCIA.....	89
Εικόνα 1.1: Σχεδιάγραμμα του γενικού μοντέλου της κυκλικής οικονομίας [4].....	13
Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων.....	16
Εικόνα 2.2: Ανοιχτό ορυχείο χαλκού [5].....	17
Εικόνα 2.3: Παράδειγμα κατεργασίας.....	19
Εικόνα 2.4: Παράδειγμα χύτευσης.....	20
Εικόνα 2.5: Παράδειγμα σφυρηλάτησης.....	20
Εικόνα 2.6: Συγκόλληση με πληρωτικό υλικό.....	20
Εικόνα 2.7: Τρισδιάστατη εκτύπωση κυρίως σώματος εμβολοφόρας μηχανής.....	21
Εικόνα 2.8: Σχηματική αναπαράσταση πλάγιας τομής ενός σύγχρονου ΧΥΤΑ.....	29
Εικόνα 2.9: Σχηματική αναπαράσταση μονάδας αποτέφρωσης.....	30
Εικόνα 3.1: Σχήμα που αναπαριστά το γενικό πλαίσιο διεξαγωγής μιας LCA.....	33
Εικόνα 3.2: Διάγραμμα σύνοψης των διαφορετικών ορίων συστήματος.....	36
Εικόνα 3.3: Σχήμα που απεικονίζει τη μοναδιαία διαδικασία ως ένα “μαύρο κουτί” στο οποίο αντιστοιχίζονται είσοδοι και έξοδοι.....	38
Εικόνα 3.4: Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων δεν πραγματοποιείται μόνο μια φορά, αλλά όλη η LCA αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία, με κάθε κύκλο να ελαττώνει την αβεβαιότητα στα αποτελέσματα.....	47
Εικόνα 4.1: Ο χημικός τύπος του PET.....	52
Εικόνα 4.2: Χημική αντίδραση TPA με μεθανόλη για τη παραγωγή τереφθαλικού διμεθυλεστερά.....	53
Εικόνα 4.3: Χημική αντίδραση τереφθαλικού διμεθυλεστερά με EG για τη παραγωγή τереφθαλικού δις(2-υδροξεθυλίου).....	53
Εικόνα 4.4: Χημική αντίδραση πολυμερισμού του τереφθαλικού δις (2-υδροξεθύλιο) και του τереφθαλικού οξέος για τη παραγωγή PET.....	53
Εικόνα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων διαμόρφωσης καλουπιού με έγχυση.....	54
Εικόνα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων διαμόρφωσης καλουπιού με εμφύσηση.....	54
Εικόνα 4.7: Απεικόνιση των πεδίων αναζήτησης βιβλιογραφικών πηγών.....	59
Εικόνα 4.8: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας συλλογής βιβλιογραφικών πηγών που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των PET, ξεκινώντας από τη χρήση των λέξεων-κλειδιών, συνεχίζοντας με την εφαρμογή των φίλτρων και την αξιολόγηση κατά περιεχόμενο, καταλήγοντας σε 87 σχετικές δημοσιεύσεις από 2083 που προέκυψαν από το πρώτο βήμα.....	63
Εικόνα 5.1: Παράδειγμα WEEE από υπολογιστές και περιφερειακά εξαρτήματα [35].....	73

Εικόνα 5.2: Σύσταση ενός τυπικού φορητού υπολογιστή [36].....	74
Εικόνα 5.3: Πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος.....	75
Εικόνα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση.....	75
Εικόνα 5.5: Παρουσίαση των πεδίων αναζήτησης.....	78
Εικόνα 5.6: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας συλλογής βιβλιογραφικών πηγών που πραγματοποιούνται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE, ξεκινώντας από τη χρήση των λέξεων-κλειδιών, συνεχίζοντας με την εφαρμογή των φίλτρων και την αξιολόγηση κατά περιεχόμενο, καταλήγοντας σε 83 σχετικές δημοσιεύσεις από 2563 που προέκυψαν από το πρώτο βήμα.....	81
Πίνακας 2.1: Ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας στον βιομηχανικό τομέα ανά υποκατηγορία (βιομηχανική παραγωγή, εξόρυξη, οικοδομή, γεωργία).....	22
Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαθέσιμων τρόπων μεταφοράς φορτίων..	25
Πίνακας 3.1: Ιδιότητες των λαμπτήρων LED και λειτουργική μονάδα.....	35
Πίνακας 3.2: Κατάλογος Δεικτών Κατηγοριών Μεσαίου και Τελικού Σημείου.....	43
Πίνακας 4.1: Πίνακας με τις λέξεις-κλειδιά που εμφανίζονται συχνότερα στις μελετώμενες δημοσιεύσεις, ως άθροισμα και ποσοστό του συνόλου αυτών. Εκτός των τυπικών λέξεων κλειδιών, όπως το “life-cycle-assessment”, μια ενδιαφέρουσα λέξη-κλειδί είναι το “incineration”, δηλαδή η αποτέφρωση των πλαστικών αποβλήτων, μια επιλογή EoL που εξετάζεται στη παρούσα ανασκόπηση.....	62
Πίνακας 4.2: Αξιολογήσεις ερευνητικού έργου και σύγχρονες πρακτικές.....	64
Πίνακας 4.3: Ανασκοπήσεις που περιλαμβάνουν εφαρμογή της LCA.....	66
Πίνακας 4.4: Κατανομή των παρουσιαζόμενων εναλλακτικών υλικών.....	68
Πίνακας 4.5: Συχνότητα εμφάνισης μεθόδων LCIA.....	70
Πίνακας 4.6: Παρουσίαση των χαρακτηριστικών των φιαλών PET ανά κατηγορία βάσει της τυπολογίας των Iacovidou et al. (2020).....	72
Πίνακας 5.1: Πίνακας με τις λέξεις-κλειδιά που εμφανίζονται συχνότερα στις μελετώμενες δημοσιεύσεις, ως άθροισμα και ποσοστό του συνόλου αυτών. Η πλεοψηφία αυτών αποτελούν όρους που απαντώνται στο λεξιλόγιο της μεθόδου LCA, με εξαίρεση τον όρο “ταλαντωτής” (oscillators), ένα εξάρτημα που απαντάται σε προϊόντα ηλεκτρονικού εξοπλισμού.....	80
Πίνακας 5.2: Αξιολογήσεις ερευνητικού έργου και σύγχρονες πρακτικές.....	82
Πίνακας 5.3: Ανασκοπήσεις και κεφάλαια βιβλίων που αναφέρονται στην LCA.....	84

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή σε συνδυασμό με άλλα φλέγοντα περιβαλλοντικά ζητήματα, όπως η εξάντληση των φυσικών πόρων και η οξείδωση του εδάφους, απειλούν το οικοσύστημα και, κατά συνέπεια, την ίδια τη θέση του ανθρώπου σε αυτό. Συνεπώς δεν αποτελεί έκπληξη η ραγδαία αύξηση της πίεσης που ασκείται σε τομείς της οικονομίας για υιοθέτηση περιβαλλοντικά φιλικών πολιτικών και πρακτικών. Έτσι δημιουργείται η ζήτηση για εργαλεία τα οποία θα έχουν ως σκοπό την εκτίμηση των επιπτώσεων ενός προϊόντος στο περιβάλλον από το σχεδιασμό του μέχρι τη τελική του απόρριψη, δηλαδή σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Από τα διαθέσιμα εργαλεία εδώ θα μελετηθεί η αξιολόγηση κύκλου ζωής (life cycle assessment-LCA), μια μέθοδος μέσω της οποίας όλες οι ροές υλικών και ενέργειας που συνεπάγεται ένα προϊόν καταγράφονται και αξιολογούνται ως προς την επίδρασή τους σε βάση πλήθος περιβαλλοντικών ζητημάτων.

Αρχικά θα εξηγηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των φάσεων του κύκλου ζωής των προϊόντων. Έπειτα θα παρατεθούν τα στάδια μιας τυπικής LCA και των σημαντικότερων στοιχείων και διαδικασιών που τα σχηματίζουν. Τέλος θα πραγματοποιηθεί μια αξιολόγηση της βιβλιογραφίας που αφορά την εφαρμογή της LCA στον κύκλο ζωής δύο ομάδων προϊόντων: τις φιάλες τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου και των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Τέλος, θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα από την αξιολόγηση των παραπάνω βιβλιογραφικών συλλογών, ενώ θα παρατεθούν και ορισμένες προτάσεις που θα αφορούν την ερευνητική προσπάθεια γύρω από την εφαρμογή της LCA στα παραπάνω προϊόντα.

Ευχαριστίες

Με τη δημοσίευση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της σύνταξης και ολοκλήρωσής της.

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σταύρο Πόνη για την εμπιστοσύνη που μου έδωσε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και για τη καθοδήγηση και το αμείωτο ενδιαφέρον του, ιδιαίτερα στις τωρινές περιόδους όπου οι υγειονομικές συνθήκες κατέστηκαν δυσκολότερη τη μεταξύ μας επικοινωνία.

Επίσης, ευχαριστώ τους υποψήφιους διδάκτορες και επιστημονικούς συνεργάτες του κ. Πόνη, Θεόδωρο-Νικόλαο Μαρουτά και Ελένη Αρετουλάκη για τη συνεχή τους υποστήριξη κατά τη διάρκεια του ερευνητικού μου έργου, χωρίς την οποία η παρούσα δημοσίευση θα ήταν αδύνατη.

Τέλος, θα ήθελα εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

1. Εισαγωγή

1.1. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της βιομηχανικής δραστηριότητας

Αποτελεί αναντίρρητη αλήθεια το γεγονός πως το βιοτικό επίπεδο του παγκόσμιου πληθυσμού έχει ανέβει, ιδίως στις ανεπτυγμένες χώρες, η αύξηση του οποίου είχε ως αποτέλεσμα την αλλαγή των καταναλωτικών του συνηθειών. Ο μέσος καταναλωτής αγοράζει περισσότερα προϊόντα, ενώ φαινόμενο που παρατηρείται εντονότερα στον τομέα της τεχνολογίας, αλλάζει τον εξοπλισμό του συχνότερα από παλαιότερα χρόνια.

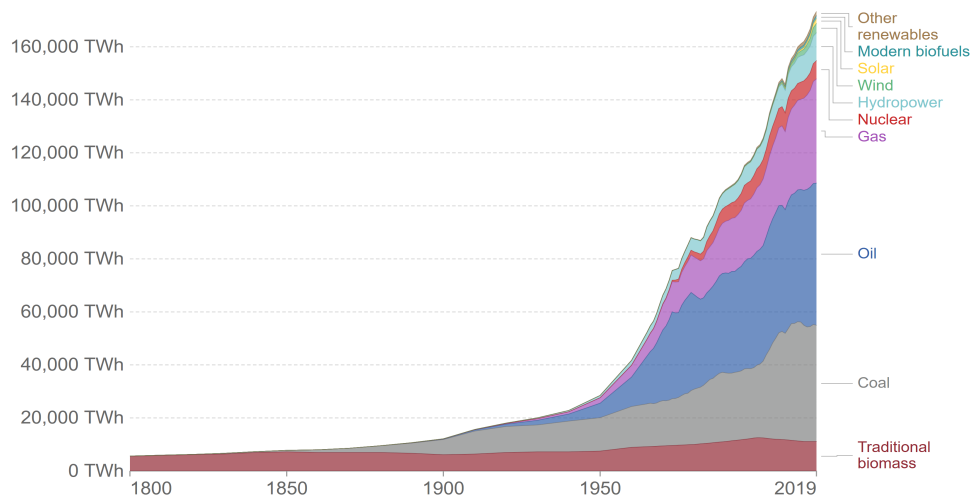
Έτσι, ο τομέας της βιομηχανίας επεκτάθηκε και αύξησε τη παραγωγικότητά του, ώστε να ικανοποιήσει την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση. Ωστόσο, η αύξηση αυτή ήρθε μαζί με κόστος για το περιβάλλον. Κόστος το οποίο αντικατοπτρίζεται σε πληθώρα περιβαλλοντικών ζητημάτων.

Ένα από αυτά αποτελεί η ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, η οποία σε παγκόσμιο επίπεδο ξεπερνά πλέον τις 170,000 TWh, όπως δείχνει το παρακάτω γράφημα. Παράλληλα, τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, άνθρακας και φυσικό αέριο) αποτελούν συνολικά το 79% του ενεργειακού μείγματος [1].

Global primary energy consumption by source

Primary energy is calculated based on the 'substitution method' which takes account of the inefficiencies in fossil fuel production by converting non-fossil energy into the energy inputs required if they had the same conversion losses as fossil fuels.

Our World
in Data



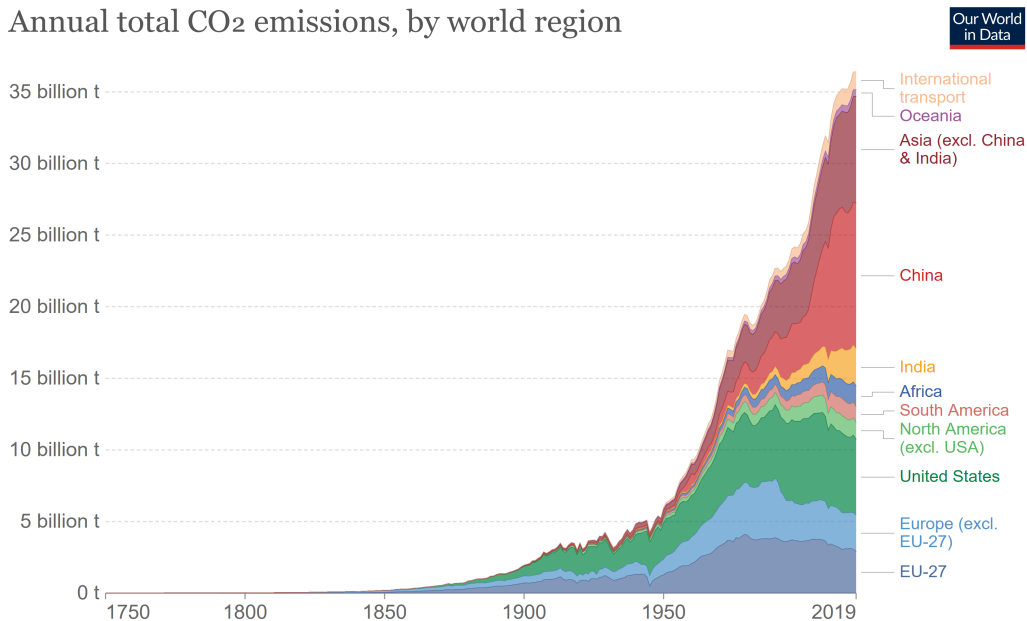
Source: Vaclav Smil (2017) & BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Διάγραμμα 1.1: Παγκόσμια ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά πρωτογενή πηγή [1]

Η κατανάλωση τέτοιων πηγών όμως συνδέεται και με άλλα περιβαλλοντικά ζητήματα, με ίσως το πιο σημαντικό να αποτελούν οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίων (Greenhouse Gas-GHG). Η οικονομική και πληθυσμιακή ανάπτυξη της κοινωνίας είχε ως αποτέλεσμα τη ραγδαία αύξηση των ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και άλλων GHGs, όπως το μεθάνιο (CH₄) και το διοξείδιο του αζώτου (N₂O). Η εκθετική αυτή αύξηση μπορεί να φανεί για τις εκπομπές CO₂ και από το παρακάτω διάγραμμα [2]:

Annual total CO₂ emissions, by world region



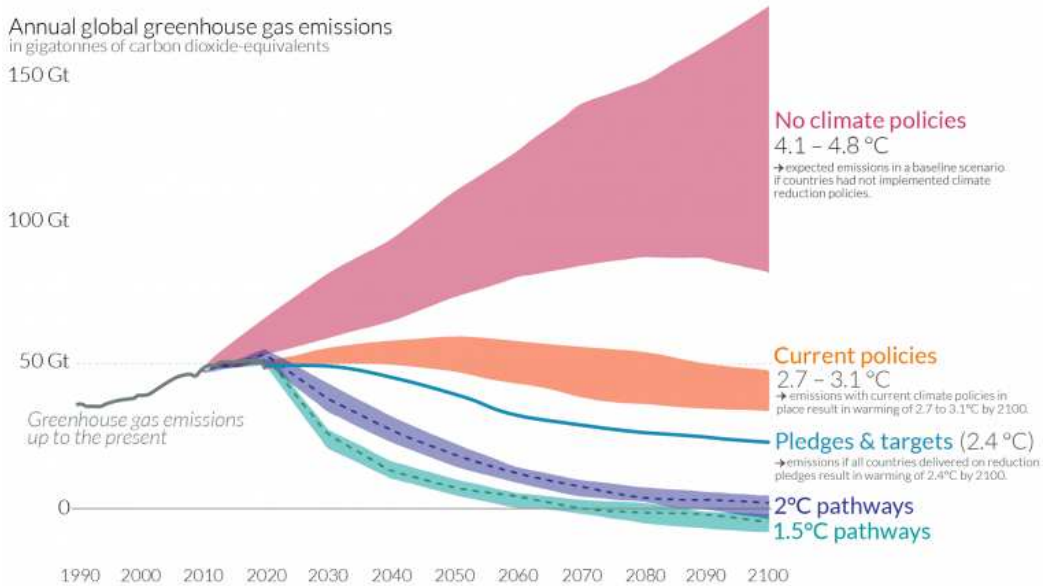
Source: Our World in Data based on the Global Carbon Project OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY
 Note: This measures CO₂ emissions from fossil fuels and cement production only – land use change is not included. 'Statistical differences' (included in the GCP dataset) are not included here.

Διάγραμμα 1.2: Ετήσιες εκπομπές CO₂ (*10⁹ τόνοι) ανά ήπειρο [2]

Οι εκπομπές αυτές έχει αποδειχθεί ότι οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας της γης, η οποία, όπως οι Ritchie and Roser (2020) αναφέρουν, οδηγεί σε πλήθος περιβαλλοντικών ζητημάτων, όπως είναι τα ακραία καιρικά φαινόμενα (πλημμύρες, περιόδους ξηρασίας κ.λπ.) και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας. Με τις τωρινές κλιματικές πολιτικές, μέχρι το 2100 η μέση θερμοκρασία της γης θα ανέβει κατά περίπου 3°C, μέγεθος μεγαλύτερο από τον στόχο των 2°C που τέθηκε στη Συμφωνία των Παρισίων για τη Κλιματική Αλλαγή [3]

Global greenhouse gas emissions and warming scenarios

– Each pathway comes with uncertainty, marked by the shading from low to high emissions under each scenario.
 – Warming refers to the expected global temperature rise by 2100, relative to pre-industrial temperatures.



Data source: Climate Action Tracker (based on national policies and pledges as of May 2021).
 OurWorldInData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems. Last updated: July 2021.
 Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie & Max Roser.

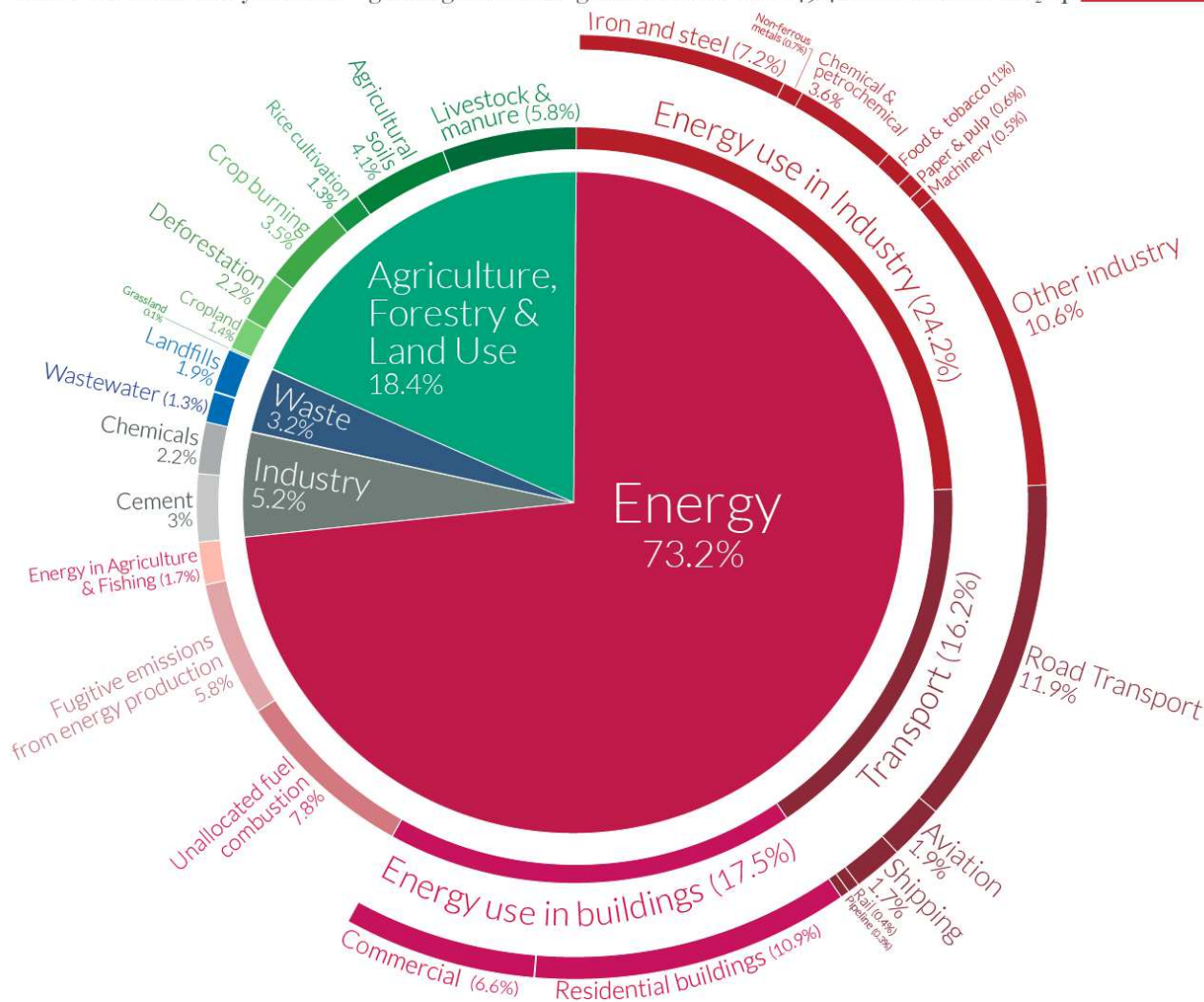
Διάγραμμα 1.3: Σενάρια θέρμανσης του πλανήτη ανάλογα τις ετήσιες εκπομπές GHG [2]

Ωστόσο, δεν συνεισφέρουν με την ίδια βαρύτητα όλοι οι τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας. Όπως φαίνεται από το παρακάτω γράφημα, στη βιομηχανία αποδίδεται το 29.4% των συνολικών εκπομπών GHG για το 2016, με μόνο ένα μικρό μέρος αυτών να προέρχεται από καθαρά βιομηχανικές διεργασίες, ενώ το υπόλοιπο να οφείλεται στη χρήση ενέργειας από αυτές. Σε αυτές τις εκπομπές μπορούν να προστεθούν και αυτές που παράγονται λόγω της διακίνησης των προϊόντων (1.7% επί του συνόλου), διαδικασία που λαμβάνει όλο και μεγαλύτερη σημασία σε μια οικονομία, στην οποία οι επιχειρήσεις διεθνοποιούν τις δραστηριότητές τους.

Global greenhouse gas emissions by sector

Our World in Data

This is shown for the year 2016 – global greenhouse gas emissions were 49.4 billion tonnes CO₂eq.



OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Source: Climate Watch, the World Resources Institute (2020).

Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie (2020).

Διάγραμμα 1.4: Εκπομπές GHG ανά οικονομικό τομέα για το 2016 [2].

Ταυτόχρονα, και άλλα περιβαλλοντικά ζητήματα, όπως η μόλυνση των υδάτων και της γης και η εξάλειψη της βιοποικιλότητας, σχετίζονται άμεσα με τη βιομηχανική δραστηριότητα. Έτσι, κατέστη πλέον αναγκαία η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνεπάγεται η παραγωγή, η χρήση και η απόρριψη (δηλαδή, όλος ο κύκλος ζωής) των παραγόμενων προϊόντων.

Η ανάγκη αυτή σχετίζεται και με την υιοθέτηση της ιδέας της Κυκλικής Οικονομίας: ένα μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης, στο οποίο εντάσσονται διεργασίες επανένταξης των

χρησιμοποιούμενων υλικών στο κύκλο ζωής (ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση, επισκευή κ.λπ), με σκοπό την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων και την ελάττωση της χρήσης πρώτων υλών. Πλέον, λαμβάνονται αποφάσεις σε επίπεδο διεθνούς πολιτικής για την εφαρμογή της φιλοσοφίας της κυκλικής οικονομίας.



Εικόνα 1.1: Σχεδιάγραμμα του γενικού μοντέλου της κυκλικής οικονομίας [4].

Έχοντας όλα τα παραπάνω υπόψη, τις τελευταίες δεκαετίες δημιουργήθηκε η ανάγκη για ένα εργαλείο ποσοτικοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής των βιομηχανικών προϊόντων. Σήμερα οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό δύο εργαλείων για την ικανοποίηση της παραπάνω ανάγκης:

- Η **ανάλυση περιβαλλοντικών εισόδων-εξόδων** (Environmental Input-Output Analysis-EEIO), η οποία χρησιμοποιείται στην περιβαλλοντική λογιστική ως εργαλείο που αντικατοπτρίζει τις περιβαλλοντικές επιδόσεις δομών παραγωγής και κατανάλωσης σε μία ή περισσότερες οικονομίες, και
- Η **αξιολόγηση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment-LCA)**, η οποία αξιολογεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του.

Στο πλαίσιο της παρούσας δημοσίευσης, θα εξεταστεί η δεύτερη.

1.2 Ορισμός, Ιστορία και Στόχοι της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής

Τι είναι όμως η αξιολόγηση κύκλου ζωής και ποιους στόχους εξυπηρετεί η εφαρμογή της; Η παγκόσμια συνομοσπονδία οργανισμών τυποποίησης ISO (International Standard Organization) ορίζει την LCA ως:

Η συλλογή και αξιολόγηση των εισροών, των εκροών και των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του (ISO 14040:2006)

Άλλος ορισμός, ο οποίος δίνεται από τους Klöpffer et al. (2013), ορίζει την LCA ως εξής:

Η LCA μελετά τις περιβαλλοντικές πτυχές και τις πιθανές επιπτώσεις καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του προϊόντος, δηλαδή από την απόκτηση πρώτων υλών μέσω της παραγωγής, μέχρι τη χρήση και απόρριψη. Οι γενικές κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που πρέπει να ληφθούν υπόψη περιλαμβάνουν τη χρήση πόρων, την ανθρώπινη υγεία και τις οικολογικές συνέπειες.

Παρόλο που η βασική λειτουργία της LCA δεν έχει αλλάξει, η μέθοδος αυτή έχει υποστεί σοβαρές μετατροπές κατά την ιστορία της. Ας αναφέρουμε ορισμένα στοιχεία (Anders Bjørn et al., 2018):

Μέθοδοι που προδρόμησαν την LCA ξεκίνησαν να εφαρμόζονται από το 1960, έχοντας την ονομασία “Ανάλυση Πόρων και Περιβαλλοντικού Προφίλ” (Resource and Environmental Profile Analysis-REPA), με τον όρο LCA να χρησιμοποιείται ευρέως κατά το 1990. Η **πρώτη δημοσίευση έρευνας LCA πραγματοποιήθηκε το 1974** από την Υπηρεσία Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ με τίτλο “Resource and Environmental Profile Analysis of Nine Beverage Container Alternatives” και πραγματευόταν τη σύγκριση των περιβαλλοντικών αντικτύπων φιαλών ποτών με διαφορετικά υλικά κατασκευής και σχεδιασμό της συσκευασίας, όσον αφορά την ανακυκλωσιμότητά του.

Κατά τη δεκαετία του 1990 επήλθε σημαντική πρόοδος στη μεθοδολογία και τα εργαλεία της LCA, με τη **κυκλοφορία των πρώτων λογισμικών LCA**, ονόματι GaBi και SimaPro, το 1989 και 1990 αντίστοιχα, και με τη δημοσίευση του **ISO 14040:1997**, η οποία, με τη τυποποίηση των βημάτων της LCA, έθεσε ένα σταθερό πλαίσιο για τη διενέργεια κάθε μελλοντικής μελέτης.

Ο 21ος αιώνας χαρακτηρίζεται για την LCA από την **αύξηση της περιπλοκότητας** των συστημάτων στην οποία εφαρμόζεται, τη **βελτιστοποίηση των μεθοδολογιών** και την **ένταξη επιπλέον περιβαλλοντικών επιπτώσεων** σε αυτή, όπως η οξύνιση του εδάφους και ο ευτροφισμός του νερού, ζητήματα τα οποία αφορούν το εκάστοτε προϊόν σε τοπικό επίπεδο και όχι μόνο σε παγκόσμιο. Παράλληλα, επιχειρήθηκε η ανάπτυξη μεθόδων LCA, οι οποίες θα ποσοτικοποιούν και τις **κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις** του κύκλου ζωής των προϊόντων (Social LCA, Economic LCA).

Ωστόσο, από τα παραπάνω δεν έχουν καταστεί φανερά τα οφέλη που προκύπτουν από την υλοποίηση μιας LCA, καθώς και ποιους αφορούν. Από την εξέταση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, μπορούν να προκύψουν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα:

1) Τα αποτελέσματα της LCA μπορούν να αποτελέσουν πληροφορίες χρήσιμες για τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των περιβαλλοντικών πολιτικών αποφάσεων.

2) Όσον αφορά την ίδια τη βιομηχανία, η LCA μπορεί να εφαρμοστεί,

- Στην υποστήριξη αποφάσεων στον σχεδιασμό προϊόντων και διαδικασιών, αλλά και στην επιλογή προμηθευτών και υπεργολάβων, καθώς αναγνωρίζονται οι φάσεις του κύκλου ζωής που επιβαρύνουν το περιβάλλον, όχι μόνο εντός του εργοστασίου, αλλά εντός ολόκληρης της εφοδιαστικής αλυσίδας,
- Στην προώθηση των παρεχόμενων προϊόντων ως φιλικά προς το περιβάλλον (ειδική σήμανση, γνωστή και ως Ecolabeling), αποτελώντας ένα σοβαρό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα, και
- Στην ανάπτυξη και επιλογή δεικτών αξιολόγησης της περιβαλλοντικής επίδοσης προϊόντων ή μονάδων παραγωγής, χρήσιμη στη μεταξύ τους σύγκριση.

Συνεπώς, η αξιολόγηση κύκλου ζωής αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τη χαρτογράφηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων και την υποστήριξη αποφάσεων. Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά πρόσφατη, και εξελίσσεται συνεχώς, και στον τομέα των διαθέσιμων εργαλείων, αλλά στην παγκόσμια εξάπλωσή της, η οποία ωστόσο βρίσκει ορισμένα εμπόδια, τα οποία προκύπτουν από το οικονομικό, τεχνολογικό και γνωσιακό χάσμα μεταξύ ανεπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών.

Αναγνωρίζοντας την αξία της μεθόδου αυτής, αντικείμενο της παρούσας δημοσίευσης θα αποτελέσει η πρόοδος και οι τωρινές πρακτικές της LCA σε δύο τομείς προϊόντων: τις πλαστικές φιάλες τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (Polyethylene terephthalate-PET) και τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα. Προτού όμως πραγματοποιηθεί η ανάλυση αυτή, καθίσταται αναγκαία η παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου της LCA, η οποία και θα αποτελέσει το αντικείμενο μελέτης των επόμενων κεφαλαίων.

2. Στάδια του Κύκλου Ζωής των Προϊόντων

Κάθε προϊόν επηρεάζει το περιβάλλον, είτε σε τοπικό είτε σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς για τον σχεδιασμό, την παραγωγή και τη διαχείριση των απορριμμάτων που προκύπτουν από τη χρήση του απαιτούνται υλικά, ενέργεια, καθώς και μηχανήματα, με όλες τις διαδικασίες συντήρησης που συνεπάγονται. Συνεπώς, καθίσταται αντιληπτό το γεγονός πως, ανεξαρτήτως μεγέθους, κόστους και τεχνολογίας, όλα τα προϊόντα αφήνουν ένα περιβαλλοντικό αποτύπωμα, είτε με τη μορφή χημικών ενώσεων που απελευθερώνονται είτε με τους πόρους που χρησιμοποιήθηκαν.

Κάθε στάδιο από το οποίο το προϊόν περνά, συνεισφέρει διαφορετικά στο αποτύπωμα αυτό. Συνεπώς, καθίσταται λογική η εξέταση των σταδίων αυτών, των οποίων η συγκεκριμένη και αλληλένδετη σειρά ονομάζεται **κύκλος ζωής του προϊόντος**. Οι φάσεις αυτής, στη γενική τους μορφή, είναι πέντε:

- Εξόρυξη πρώτων υλών,
- Κατασκευή και Επεξεργασία,
- Μεταφορά και Διανομή,
- Χρήση, και
- Απόρριψη/Ανακύκλωση.



Εικόνα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων του κύκλου ζωής των προϊόντων.

2.1 Εξόρυξη Πρώτων Υλών (Raw Material Extraction)

Η πρώτη φάση του κύκλου ζωής περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών απόκτησης των πρώτων υλών από το περιβάλλον και τη προετοιμασία τους με σκοπό τη χρήση τους σε συστήματα παραγωγής. Οι βιομηχανίες που έχουν ως αντικείμενό τους την εξαγωγή πρώτων υλών εντάσσονται σε μία από τις παρακάτω ομάδες:

- 1) Μεταλλεία: Αποτελούν οι βιομηχανίες εξόρυξης σιδηρούχων και μη σιδηρούχων μεταλλευμάτων,
- 2) Λατομεία μη μεταλλικών ορυκτών: Εδώ ανήκουν οι βιομηχανίες εξόρυξης ορυκτών για βιομηχανική χρήση, όπως είναι ο μαγνησίτης, το φθόριο, η καολίνη και η ποτάσα, και για χρήση σε οικοδομικές εργασίες, για ορυκτά όπως είναι ο γύψος, το χαλίκι και διάφοροι πηλοί,
- 3) Βιομηχανίες ξυλείας, και
- 4) Βιομηχανίες εξόρυξης ορυκτών καυσίμων, δηλαδή γαιάνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου.



Εικόνα 2.2: Ανοιχτό ορυχείο χαλκού [5]

Καθώς η πρώτη ύλη που λαμβάνεται από το περιβάλλον δεν είναι καθαρή, πρέπει να υποστεί ορισμένες διεργασίες, ώστε να είναι έτοιμη για χρήση. Για παράδειγμα, το πετρέλαιο περνά από το στάδιο της διύλισης, δηλαδή το στάδιο διαχώρισής του σε κλάσματα, όπως η βενζίνη, διάφορα λιπαντικά λάδια, και το υγραέριο.

Η σημασία της φάσης της αυτής καθίσταται προφανής: αποτελεί τον πρώτο κρίκο στην αλυσίδα της βιομηχανικής δραστηριότητας και ταυτόχρονα ένα σημαντικό μέρος της παγκόσμιας οικονομίας, με τις μεγάλες εταιρείες στον τομέα της εξόρυξης να προσφέρουν επαγγελματική αποκατάσταση σε τουλάχιστον 3.7 εκατ., ενώ άλλα 20 με 25 εκατ. εργάζονται σε μονάδες εξόρυξης μικρής κλίμακας.

Η ανάγκη για πρώτες ύλες αντικατοπτρίζεται και στην αύξηση των δραστηριοτήτων εξόρυξης. Από τη δεκαετία του 1970, η εξόρυξη μετάλλων αυξήθηκε κατά περισσότερο από 75%, των μη

μεταλλικών βιομηχανικών ορυκτών κατά 53% και των δομικών υλικών κατά 106 %. Η παγκόσμια έκταση της χερσαίας έκτασης που επηρεάζεται από την εξόρυξη κυμαίνεται μεταξύ 300,000 και 800,000 χλμ [6]:

Ωστόσο, η λειτουργία της συνεπάγεται σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συνοπτικά, αυτές είναι:

- η υποβάθμιση του εδάφους
- η χρήση επικίνδυνων χημικών και η μόλυνση που προκύπτει από την απόρριψη χημικών αποβλήτων,
- η εντατική χρήση νερού και η μόλυνση που προκύπτει από την απόρριψή του, και
- η μόλυνση του αέρα και το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τα προβλήματα αυτά συνδέονται, όχι μόνο με την ύπαρξη αυτή καθεαυτή των βιομηχανιών αυτών, αλλά και με τα παρακάτω ζητήματα [6]:

α) Η εξάντληση των "μεγάλων" πηγών

Δεδομένου ότι οι περισσότερες από τις "πλουσιότερες" τοποθεσίες με κοιτάσματα ορυκτών υψηλής ποιότητας εξορύσσονται, πρέπει να επαναχρησιμοποιηθούν "φτωχότερες" τοποθεσίες, δηλαδή με λιγότερο ορυκτό πλούτο και περισσότερο πέτρωμα προς επεξεργασία. Η ανάκτηση αυτών των πόρων απαιτεί την απομάκρυνση και διάθεση πολύ μεγαλύτερων ποσοτήτων υπερφορτωμένου υλικού και απορριμμάτων, η οποία έχει οδηγήσει σε παγκόσμια μεταστροφή στη κλίμακα εξόρυξης, από περιορισμένους άξονες ορυχείων που ακολουθούν συγκεκριμένες φλέβες μεταλλεύματος ή εμπλουτισμένα κοιτάσματα, σε μεγάλης κλίμακας ανοικτά ορυχεία.

Τέτοιες μορφές εξόρυξης παράγουν σημαντικούς όγκους αποβλήτων, τα οποία είναι μείγματα θρυμματισμένων πετρωμάτων και υγρών επεξεργασίας από μύλους, πλυντήρια ή συμπυκνωτές, ορυκτά, ορυκτά καύσιμα και άλλους δυνητικά επικίνδυνους ρύπους. Αυτή η μετατόπιση οδηγεί στην ανάπτυξη του παγκόσμιου αποτυπώματος του τομέα.

β) Εξόρυξη μικρής κλίμακας

Άλλα προβλήματα προκύπτουν από την εξόρυξη μικρής κλίμακας, πρακτική η οποία είναι ευρέως διαδεδομένη, ειδικά στις αναπτυσσόμενες οικονομίες, και είναι συχνά παράνομη και ως εκ τούτου ανεξέλεγκτη. Έτσι, συχνά καταλήγει σε υψηλά επίπεδα ρύπανσης.

Για παράδειγμα, η ανεξέλεγκτη χρήση κυανίου και υδραργύρου στην εξόρυξη χρυσού οδηγεί σε ρύπανση των εδαφών, των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων και εκθέτει τους εργαζόμενους και τους τοπικούς πληθυσμούς σε σοβαρούς κινδύνους για την υγεία τους. Η εξόρυξη μικρής κλίμακας είναι η μεγαλύτερη πηγή ρύπανσης υδραργύρου στον κόσμο.

γ) Εγκαταλελειμμένα ορυχεία

Επιπλέον, υπάρχουν προβλήματα που σχετίζονται με έρημα και εγκαταλελειμμένα ορυχεία, τα οποία αποτελούν απειλή για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Γενικά, υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι προβλημάτων:

1) Παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων από εξόρυξη μετάλλων και άνθρακα.

Συνήθως συγκεντρωμένα σε μεγάλους λόφους στην επιφάνεια του εδάφους, η σύνθεση αυτών των αποβλήτων ποικίλει, αν και συχνά περιέχουν ένα μείγμα χημικά αδρανών και αντιδραστικών συστατικών.

2) Παραγωγή αντιδρώντων ορυκτών αποβλήτων. Συνήθως ως λεπτόκοκκες αποθέσεις, τα απορρίμματα αυτά είναι συνήθως πλούσια σε θειούχα ορυκτά, δημιουργώντας όξινες

αποσταγγίσεις, προκαλώντας μεγαλύτερη περιβαλλοντική ανησυχία από τους σωρούς χαλασμάτων.

3) Δημιουργία όξινων νερών εκκένωσης που περιέχουν αυξημένες συγκεντρώσεις μεταλλοειδών.

Απο τα παραπάνω καθίσταται προφανές το γεγονός πως η εξόρυξη πρώτων υλών χωρίς την εφαρμογή κανονισμών για την προστασία του περιβάλλοντος, όπως δηλαδή πραγματοποιείται σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, μπορεί να οδηγήσει, όχι μόνο στη μόλυνση και υποβάθμιση του εδάφους, αλλά και του νερού και της ατμόσφαιρας.

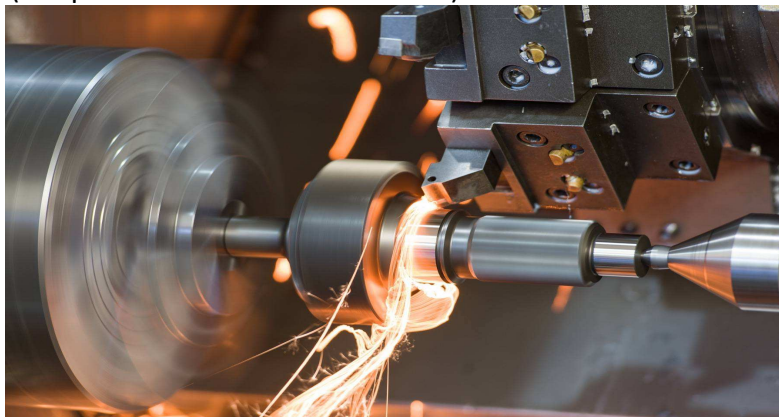
2.2 Κατασκευή & Επεξεργασία (Manufacturing & Processing)

Κατά τη δεύτερη φάση του κύκλου ζωής πραγματοποιούνται όλες οι μηχανικές, χημικές ή βιολογικές **διεργασίες που απαιτούνται για την παραγωγή ενός προϊόντος**, δηλαδή τη **μετατροπή των πρώτων υλών σε προϊόντα** με τη χρήση εργασίας, εργαλείων, μηχανών και ενέργειας. Η βιομηχανία που έχει ως αντικείμενο της την παραγωγή προϊόντων ανήκει στον λεγόμενο **“δευτερογενή τομέα”** της οικονομίας.

Οι διεργασίες που ανήκουν στη φάση αυτή ποικίλουν και μπορούν να ομαδοποιηθούν στις παρακάτω κατηγορίες, με τη λίστα να μην εξαντλεί το σύνολό τους:

Κατεργασίες αποβολής υλικού

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι κατεργασίες κατά τις οποίες ένα υλικό, με αφαίρεση μέρους του, διαμορφώνεται σε ένα επιθυμητό μέγεθος και σχήμα. Παραδείγματα τέτοιων κατεργασιών αποτελούν η τόννευση, το πλάνισμα και η κοπή. Οι κατεργασίες αυτές πραγματοποιούνται σήμερα όλο και συχνότερα από μηχανές ελεγχόμενες από υπολογιστή μέσω προγράμματος ψηφιακού ελέγχου (Computer Numerical Control-CNC).



Εικόνα 2.3: Παράδειγμα κατεργασίας αποβολής υλικού: Τόννευση

Κατεργασίες διαμόρφωσης με καλούπι

Όλες κατεργασίες συνεπάγονται τη διαμόρφωση πρώτης ύλης, υγρής ή εύπλαστης, χρησιμοποιώντας ένα εξάρτημα μέσα στο οποίο θα χυθεί η ύλη αυτή για να λάβει το επιθυμητό σχήμα (το οποίο ονομάζεται και καλούπι) ονομάζονται κατεργασίες διαμόρφωσης με καλούπι. Η πιο γνωστή κατεργασία που ανήκει στην ομάδα αυτή αποτελεί η χύτευση, αλλά υπάρχουν και άλλες, όπως η κνιομεταλλουργία και η διαμόρφωση γυαλιών και πλαστικών με εμφύσηση.



Εικόνα 2.4: Παράδειγμα χύτευσης μετάλλου



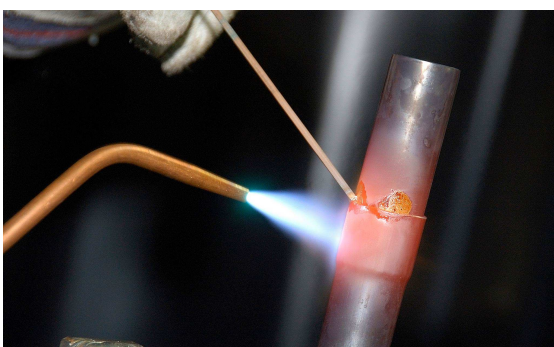
Εικόνα 2.5: Παράδειγμα σφυρηλάτησης

Κατεργασίες διαμόρφωσης

Ως κατεργασία διαμόρφωσης ορίζεται κάθε κατεργασία επεξεργασίας, η οποία συνεπάγεται μηχανική παραμόρφωση του τεμαχίου εργασίας. Το τεμάχιο εργασίας αναδιαμορφώνεται χωρίς προσθήκη ή αφαίρεση υλικού, με τη μάζα του να παραμένει αμετάβλητη. Παραδείγματα τέτοιων κατεργασιών αποτελούν η σφυρηλάτηση, η κάμψη και η διέλαση (εξώθηση μετάλλου μέσα από ειδική μήτρα).

Κατεργασίες συγκολλήσεων

Όλες οι κατεργασίες κατά τις οποίες υλικά (συνήθως μέταλλα ή πλαστικά) ενώνονται με μη αναστρέψιμο τρόπο ονομάζονται κατεργασίες συγκόλλησης. Η κατεργασία αυτή μπορεί να περιλαμβάνει θέρμανση των υλικών στο σημείο τήξης και ένωσή τους σε ένα μέσω της ταυτόχρονης ψύξης τους ή τη τήξη ενός τρίτου υλικού, το οποίο ονομάζεται και πληρωτικό, με σημείο τήξης χαμηλότερο αυτού των προς ένωση υλικών, και την εφαρμογή του στο σημείο συνένωσής τους.



Εικόνα 2.6: Συγκόλληση με πληρωτικό υλικό.

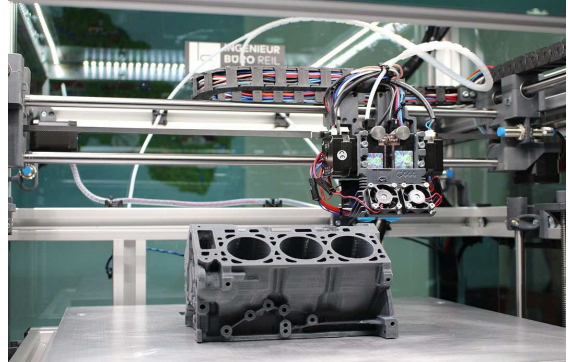
Συναρμολογήσεις

Ένα μεγάλο μέρος προϊόντων αποτελούνται από πολλαπλά μέρη, των οποίων η συνένωση πραγματοποιείται μέσω μηχανικών κινήσεων. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται συναρμολόγηση.

Συνήθως η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σταδιακά, με το προϊόν να περνά από διαφορετικές θέσεις εργασίας, όπου τα κομμάτια τοποθετούνται σε σειρά μέχρι να ολοκληρωθεί. Η σειρά αυτή ονομάζεται και γραμμή συναρμολόγησης. Η κάθε εργασία μπορεί να πραγματοποιείται είτε χειροκίνητα είτε με τη βοήθεια αυτόματων μηχανών.

Τρισδιάστατη εκτύπωση (Additive Manufacturing)

Ως τρισδιάστατη εκτύπωση ή προσθετική κατασκευή (πλέον οι όροι ταυτίζονται) ορίζεται κάθε κατασκευή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου από ένα ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο ή ένα μοντέλο CAD. Η μέθοδος αυτή πλέον έχει εξελιχθεί σε βαθμό που καθίσταται δυνατή η εφαρμογή της σε βιομηχανικό επίπεδο.



Εικόνα 2.7: Τρισδιάστατη εκτύπωση κυρίως σώματος εμβολοφόρας μηχανής

Άλλες κατεργασίες

Πέραν των παραπάνω, υπάρχουν και πολλές άλλες κατεργασίες, οι οποίες θα αναφερθούν συνοπτικά:

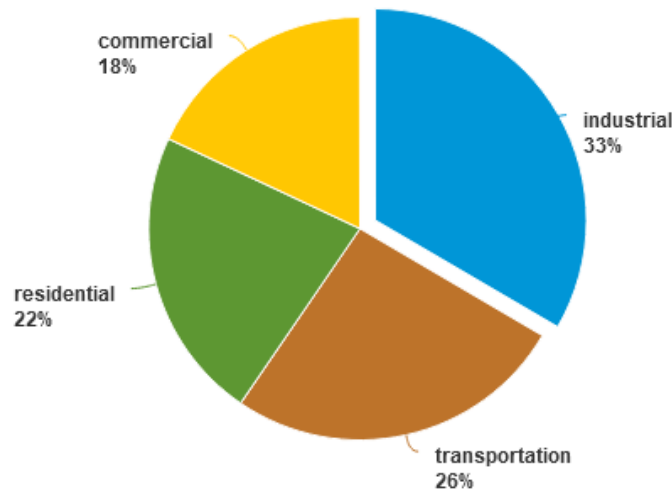
- **Χημικές κατεργασίες**, οι οποίες μετατρέπουν πρώτες ύλες όπως ορυκτά καύσιμα, μέταλλα και νερό σε προϊόντα όπως ανόργανες (π.χ αμμωνία, θειικό οξύ) και οργανικές (π.χ φαινόλες) χημικές ενώσεις, πολυμερή και λιπάσματα,
- **Κατασκευή ημιαγωγών συσκευών**, οι οποίες απαντώνται σε εξαρτήματα όπως επεξεργαστές και τσιπ μνήμης, απαραίτητα στοιχεία για ηλεκτρονικές συσκευές,

Συνεπώς, καθίσταται φανερό η μεγάλη ποικιλία των διεργασιών κατασκευής και επεξεργασίας προϊόντων. Προφανώς, τα περιβαλλοντικά ζητήματα τα οποία προκύπτουν από την εκάστοτε βιομηχανική δραστηριότητα συνδέονται άρρηκτα με τις μεταχειριζόμενες πρώτες ύλες, καθώς και με τη φύση της εκάστοτε κατεργασίας. Για παράδειγμα, στη βιομηχανία χύτευσης τα δύο πιο σημαντικά ζητήματα που αφορούν το περιβάλλον είναι **τα απόβλητα χυτηρίου**, τα οποία σχετίζονται άμεσα με τον τύπο μετάλλου, τον τύπο κλιβάνου και την τεχνολογία χύτευσης που χρησιμοποιείται, και **οι επικίνδυνοι ατμοσφαιρικοί ρύποι**, οι οποίοι περιλαμβάνουν αέρια, τα οποία δημιουργούνται όταν καλούπια που περιέχουν υλικά άνθρακα υποβάλλονται σε υψηλές θερμοκρασίες, όπως συμβαίνει κατά την έκχυση χυτών μετάλλων (το βενζόλιο) [7].

Αν όμως υπάρχει ένα ζήτημα, το οποίο αφορά συνολικά όλη τη βιομηχανία, αυτό είναι η χρήση ενέργειας, η αύξηση της οποίας αποτελεί μέγιστο περιβαλλοντικό ζήτημα. Στις Η.Π.Α. η βιομηχανική δραστηριότητα ήταν υπεύθυνη για το ένα τρίτο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, με το 77% να αφορά τις παραγωγικές βιομηχανίες.

Share of total U.S. energy consumption by end-use sectors, 2020

Total = 92.94 quadrillion British thermal units



Source: U.S. Energy Information Administration, *Monthly Energy Review*, Table 2.1, April 2021, preliminary data
Note: Sum of individual percentages may not equal 100 because of independent rounding.

Διάγραμμα 2.1: Ποσοστά χρήσης ενέργειας στις Η.Π.Α. ανά οικονομικό τομέα για το 2020 [8]

Percentage shares of industrial energy consumption by the four major types of industries in the *Annual Energy Outlook Reference case for 2020*

77%

manufacturing

12%

mining

7%

construction

5%

agriculture

Πίνακας 2.1: Ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας στον βιομηχανικό τομέα ανά υποκατηγορία (βιομηχανική παραγωγή, εξόρυξη, οικοδομή, γεωργία)

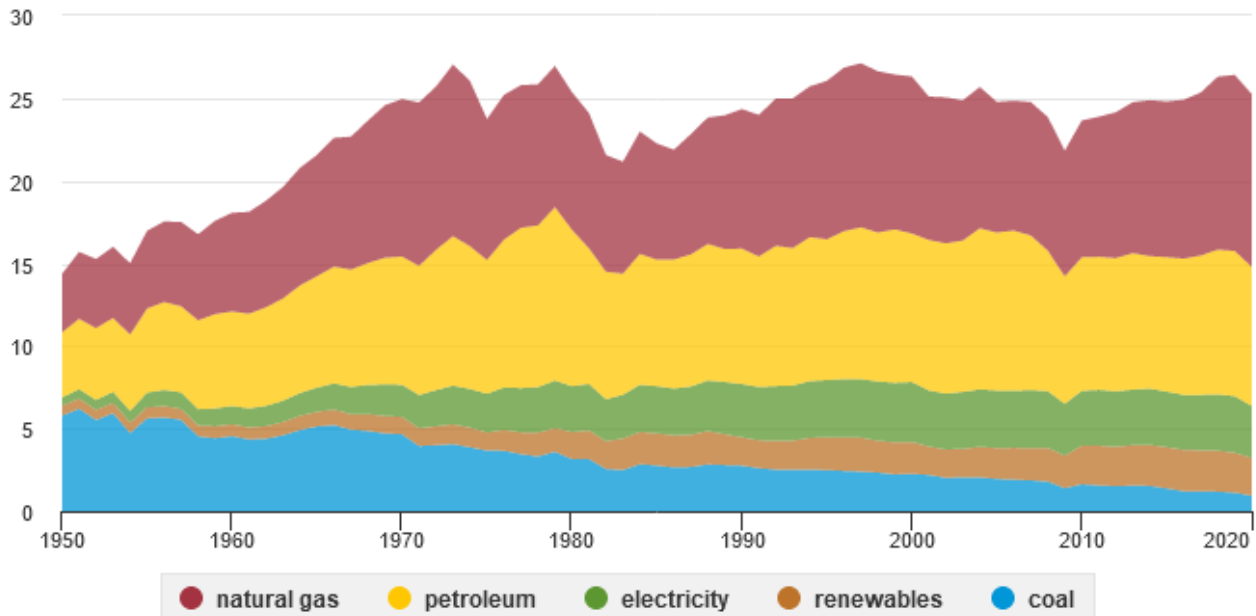
Πρέπει εδώ να αναφερθεί και το γεγονός πως τα τελευταία χρόνια έχει αλλάξει σημαντικά το εφαρμοζόμενο ενεργειακό μίγμα για την κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών. Για παράδειγμα, στις Η.Π.Α. από το 1950 (4,212 TWh ή 14.37 τετράκις Btu) μέχρι το 2020 (7,400 TWh ή 25.25 τετράκις Btu) ή το μείγμα ενέργειας αποτελείται λιγότερο από άνθρακα (1950: 40.2%, 2020: 3.7%) και πολύ περισσότερο από πετρέλαιο (1950: 27.4%, 2020: 33.3%) και φυσικό αέριο (1950: 24.7%, 2020: 41.4%), ενώ έχει επέλθει σημαντική πρόοδος στην ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο μίγμα (1950: 4.2%, 2020: 9.1%).

Ωστόσο, η πρόοδος αυτή δεν αρκεί. Πρέπει οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας να λάβουν όλο και μεγαλύτερο μέρος του ενεργειακού μίγματος των βιομηχανιών, ώστε η εξάρτηση από τα επιβλαβή για το περιβάλλον ορυκτά καύσιμα να αποδυναμωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο.

U.S. industrial sector energy use by source, 1950-2020



quadrillion British thermal units



Note: Includes energy sources used as feedstocks in manufacturing products. Electricity is retail sales of electricity to the sector and excludes electric system energy losses associated with the retail sales.



Source: U.S. Energy Information Administration, *Monthly Energy Review*, Table 2.4, April 2021

Διάγραμμα 2.2: Διάγραμμα της κατανάλωσης ενέργειας στη παραγωγική βιομηχανία (1950-2020) [8]

2.3 Μεταφορά (Transportation)

Αφού ολοκληρωθούν οι φάσεις επεξεργασίας των προϊόντων, το επόμενο στάδιο αποτελεί η μεταφορά τους, ώστε εν τέλει να διατεθούν προς κατανάλωση. Ωστόσο, η διάκριση της λειτουργίας αυτής ως ξεχωριστή φάση στον κύκλο ζωής δεν καταδεικνύει τη πραγματική επίδρασή της σε αυτόν. Μεταφορά υλικών ή προϊόντων δεν πραγματοποιείται απαραίτητα μόνο μια φορά (εργοστάσιο → τελική διάθεση), αλλά πολλαπλές, όπως φαίνεται από τα παρακάτω παραδείγματα:

- Βιομηχανία Πρώτων Υλών → Εργοστάσιο
- Μεταφορές μεταξύ εργοστασίων (αν οι φάσεις παραγωγής γίνονται σε διαφορετικές μονάδες)
- Εργοστάσιο → Αποθήκες → Τελική Διάθεση
- Απορριπτόμενα προϊόντα → Μονάδες Διαχείρισης EoL (βλ. Κεφ. 2.5)

Συνεπώς, η διαδικασία της μεταφοράς πρέπει να γίνει κατανοητή περισσότερο σαν συνδεδεμένος κρίκος μεταξύ των φάσεων του κύκλου ζωής και όχι σαν ξεχωριστή φάση.

Οι μέθοδοι μεταφοράς των προϊόντων ποικίλουν, με τους διαθέσιμους τύπους να αποτελούν οι εξής:

- Αεροπορικές μεταφορές,
- Οδικές μεταφορές,
- Σιδηροδρομικές μεταφορές,
- Θαλάσσιες μεταφορές,
- Αγωγοί (π.χ πετρελαίου ή φυσικού αερίου), και
- Συνδυασμός των παραπάνω.

Η τελική επιλογή τρόπου μεταφοράς αποτελεί ένα πολυπαραγοντικό πρόβλημα, στο οποίο εμπλέκονται ζητήματα όπως η **απόσταση** μεταξύ σημείου άφιξης και αναχώρησης, η ύπαρξη ή μη ανάγκης **διάσχησης συνόρων**, η **τάξη μεγέθους της ποσότητας** των μεταφερόμενων αγαθών, η **χρονική περίοδος** στην οποία πρέπει να πραγματοποιηθεί η μεταφορά, καθώς και το αν επείγει η μεταφορά αυτή (ανοχή ή μη σε καθυστερήσεις). Κάθε τρόπος μεταφοράς έχει τα δικά του δυνατά σημεία, αλλά και τις αδυναμίες του, στοιχεία τα οποία θα παρουσιαστούν συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Τρόπος Μεταφορών	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αεροπορικές	-->Οι μεταφορές με αεροπλάνο είναι πιο γρήγορες από τις οδικές, τις σιδηροδρομικές και τις θαλάσσιες. -->Η χρονική ακρίβεια με την οποία εκτελούνται τα αεροπορικά δρομολόγια τους προσδίδει αξιοπιστία.	-->Πολύ υψηλότερο κόστος λόγω του κόστους καυσίμων, συντήρησης, τελών διακίνησης, και άλλων. -->Περιορισμοί στο μέγεθος και το βάρος των αγαθών που μπορεί να μεταφέρει ένα αεροπλάνο.
Οδικές (φορτηγά)	-->Μικρότερο κόστος μεταφορών (σε σύγκριση με τις αεροπορικές και με τις θαλάσσιες). -->Περισσότερες επιλογές για τη μεταφορά ευαίσθητων ή επικίνδυνων υλικών. -->Ευκολότερη παρακολούθηση της πορείας των φορτίων.	-->Απαιτείται περισσότερος χρόνος για τη μεταφορά (μέση ταχύτητα φορτηγών: από 80 μέχρι 100 km/h). -->Μικρός βαθμός ελέγχου της κατάστασης των προϊόντων (ενδεχόμενες ζημιές από το ταξίδι ή από λάθη στις φορτοεκφορτώσεις).
Σιδηροδρομικές	-->Προσφέρουν μεγαλύτερη μεταφορική ικανότητα (μεγαλύτερο φορτίο), για αυτό χρησιμοποιείται για τη μεταφορά βαρέων χύδην φορτίων (π.χ κάρβουνο). -->Μικρότερες πιθανότητες καθυστερήσεων, καθώς τα τρένα εκτελούν τα δρομολόγια τους με χρονική ακρίβεια.	-->Η προσβασιμότητα των σιδηροδρομικών γραμμών είναι μικρότερη από αυτή των οδικών γραμμών, με αποτέλεσμα οι μεταφορές αυτές να συνδυάζονται συνήθως με οδικές. -->Η ταχύτητά τους είναι μικρότερη από αυτή των οδικών και των αεροπορικών μεταφορών.
Θαλάσσιες	-->Τα φορτηγά πλοία έχουν τεράστια μεταφορική ικανότητα, καθώς σε ένα δρομολόγιο μπορούν να μεταφέρουν χιλιάδες τόνους αγαθών. Έτσι, προτιμώνται για τη μεταφορά μαζικών ποσοτήτων ή μεγάλων σε μέγεθος προϊόντων. -->Μικρότερο κόστος σε σχέση με τις αεροπορικές μεταφορές. Τα αγαθά είναι πιο ασφαλή σε σχέση με άλλους τρόπους, καθώς η	-->Οι θαλάσσιες μεταφορές είναι αναμφισβήτητα πολύ αργές, σε βαθμό που είναι ακατάλληλες αν η ταχύτητα αποτελεί προτεραιότητα.

διαδρομή είναι σταθερή και είναι αποθηκευμένα εντός κοντέινερ.

Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαθέσιμων τρόπων μεταφοράς φορτίων.

Η ανάπτυξη του διεθνούς εμπορίου έχει οδηγήσει στην επέκταση των εφοδιαστικών αλυσίδων και την αύξηση της περιπλοκότητάς τους, ενώ η αύξηση των απαιτήσεων των καταναλωτών για περισσότερα και ποικίλα προϊόντα έχει οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση των διεθνών δρομολογίων μεταφοράς αγαθών. Ωστόσο, η αύξηση αυτή συνεπάγεται ένα κόστος για το περιβάλλον, το οποίο αντικατοπτρίζεται στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από τη λειτουργία του κλάδου αυτού.

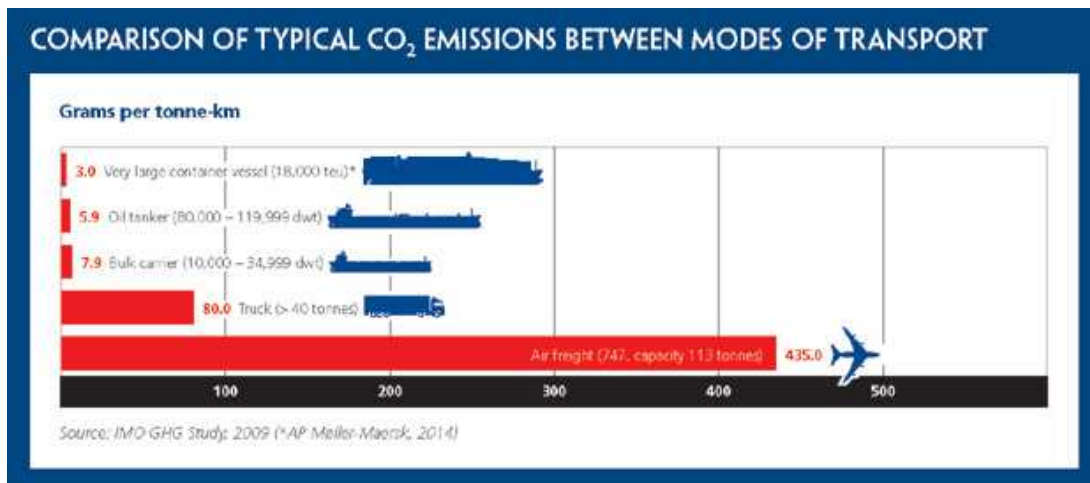
Όπως αναφέρεται στη διάσκεψη του International Transport Forum για το 2016 [9], οι διεθνείς μεταφορές φορτίων οφείλονται για το 30% των εκπομπών CO₂ που αντιστοιχούν στον τομέα των μεταφορών και που δημιουργούνται από την καύση ορυκτών καυσίμων, με το μέγεθος αυτό να ισούται με 7% των συνολικών εκπομπών CO₂ παγκοσμίως. Συνολικά εκτιμάται πως το 2010 οι ετήσιες εκπομπές CO₂ από τη μεταφορά φορτίων (εμπόριο) ισούταν με 2.108 δισ. τόνους.

Άλλες πηγές αναφέρουν πως οι οδικές μεταφορές φορτίων αντιστοιχούν μόνες τους στο 30% των συνολικών εκπομπών CO₂ του τομέα των μεταφορών, οι αεροπορικές αντιστοιχούν στο 2.2%, οι θαλάσσιες στο 10.6%, ενώ οι σιδηροδρομικές μεταφορές και οι αγωγοί είναι υπεύθυνοι για το 3% των εκπομπών αυτών.



Διάγραμμα 2.3: Ποσοστά εκπομπών CO₂ κάθε τρόπου μεταφοράς

Ωστόσο, για να σχηματίσει κανείς μια πιο πλήρη εικόνα του περιβαλλοντικού αντίκτυπου του τομέα των εμπορικών μεταφορών και να είναι σε θέση να λάβει αποφάσεις για τη λειτουργία της εφοδιαστικής του αλυσίδας, πρέπει να του είναι γνωστά, εκτός από το κόστος και την ταχύτητα της κάθε μεθόδου, και οι επιπτώσεις των διαφορετικών τύπων μεταφοράς σε μοναδιαίο επίπεδο (δηλαδή, ανά μεταφερόμενο τόνο και χιλιόμετρο διανυούμενης απόστασης). Οι ενδεικτικές τιμές που προκύπτουν από τον παρακάτω πίνακα δείχνουν πως οι θαλάσσιες μεταφορές είναι κατάλληλες για τη μεταφορά μαζικών φορτίων σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ οι αεροπορικές θα πρέπει να επιλέγονται όταν καθίσταται επείγουσα η μεταφορά μικρών και ελαφριών φορτίων.



Διάγραμμα 2.4 Σύγκριση των εκπομπών CO₂ των διαφορετικών μεθόδων μεταφορών (gr CO₂ /((km*tn)) [11]

Παρόλες τις προσπάθειες που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια για τη μείωση του περιβαλλοντικού αντικτύπου των μεταφορών, είτε βελτιώνοντας την απόδοση των μηχανών των οχημάτων είτε με τη βελτιστοποίηση των δικτύων των αλυσίδων εφοδιασμού είτε με διάφορες απόπειρες αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων με φιλικότερα στο περιβάλλον καύσιμα (π.χ φυσικό αέριο, ηλεκτρικό ρεύμα, υδρογόνο, βιοντίζελ κ.λπ), είμαστε ακόμα εξαρτώμενοι από τα ορυκτά καύσιμα για την κάλυψη των αναγκών του διεθνούς εμπορίου. Συνεπώς πρέπει να δίνεται μεγάλη βάση στη μελέτη των επιπτώσεων της φάσης αυτής στον κύκλο ζωής ενός προϊόντος.

2.4 Τελική Διάθεση & Χρήση (Retail & Usage)

Αφού τα προϊόντα φτάσουν στον τελικό καταναλωτή, ακολουθεί η φάση της χρήσης τους. Στη φάση αυτή περιλαμβάνονται, όχι μόνο διαδικασίες εφαρμογής των προϊόντων για την ικανοποίηση αναγκών (οι οποίες είτε έχουν προβλεφθεί στον σχεδιασμό τους είτε δεν έχουν προβλεφθεί είτε σκοπίμως αγνοήθηκαν), αλλά και διαδικασίες συντήρησης, αναβάθμισης ή μετατροπής τους.

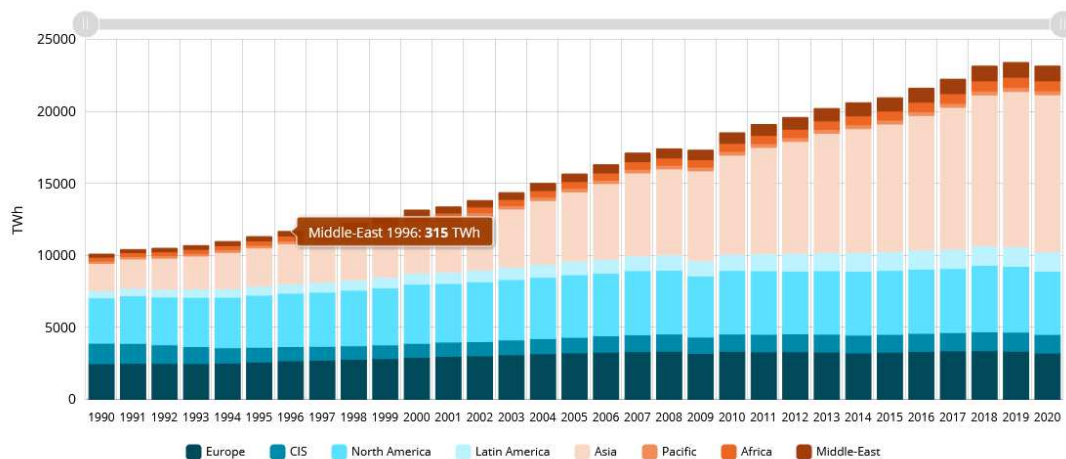
Για παράδειγμα, ένα πληκτρολόγιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως περιφερειακός εξοπλισμός υπολογιστή, αλλά ο χρήστης μπορεί να πραγματοποιήσει και άλλες ενέργειες με αυτό: μπορεί να το καθαρίσει με ειδικά προϊόντα, ή μπορεί να κολλήσει πάνω στα πλήκτρα αυτοκόλλητα με γράμματα άλλης γλώσσας από αυτή που είχαν τα πλήκτρα (π.χ ρώσικα).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της φάσης αυτής ποικίλουν σημαντικά αναλόγως το μελετούμενο προϊόν. Για παράδειγμα, ένα έπιπλο δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με τη χρήση του, καθώς αυτή δε συνεπάγεται τη χρήση ενέργειας ή άλλων φυσικών πόρων. Αντίθετα, μια ηλεκτρική συσκευή απαιτεί τη σύνδεσή της στο ηλεκτρικό δίκτυο ή μπαταρίες, και κατά συνέπεια τη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, για να λειτουργήσουν.

Το 2020 είχαμε τη πρώτη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με προηγούμενα έτη (22900 TWh, -1.1% εν σχέσει με το 2019), με τις χώρες της Ασίας, και ιδιαίτερα τη Κίνα, να σημειώσουν τη μεγαλύτερη αύξηση τα τελευταία 30 χρόνια.

Η αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα ζητήματα που έχει να αντιμετωπίσει ο άνθρωπος σήμερα, καθώς η παραγωγή της ακόμα βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, η καύση των οποίων συνεπάγεται καταστρεπτικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (εκπομπές ρύπων και αερίων θερμοκηπίου, μόλυνση της ατμόσφαιρας και της γης κ.λπ)

Στην περίπτωση πολλών συσκευών, η αντικατάστασή τους με νέα και πιο φιλικά στο περιβάλλον (όπως είναι για παράδειγμα τα ψυγεία και οι λαμπτήρες) συνεπάγεται τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Ωστόσο, η συνεχής ανανέωση του ηλεκτρικού εξοπλισμού σημαίνει τη χρήση περισσότερων υλικών στην παραγωγή, και κατά συνέπεια την εξόρυξή τους, επιβαρύνοντας το περιβάλλον. Συνεπώς, πρέπει να μετρώνται και να συγκρίνονται οι επιπτώσεις αυτές και να επιλέγεται η πιο συμφέρουσα λύση, διαδικασία για την οποία σχεδιάστηκε η LCA.



Διάγραμμα 2.5: Παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τα έτη 1990-2021 ανά ήπειρο [12]

2.5 Απόρριψη (Disposal)

Η τελευταία φάση του κύκλου ζωής των προϊόντων αποτελεί η φάση διαχείρισης του τέλους της (End Of Life Phase). Ένα προϊόν θεωρείται ότι έφτασε στο τέλος της ζωής του, όταν πλέον δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και δεν αξίζει ή δεν καθίσταται δυνατή η επιδιόρθωσή του.

Υπάρχουν πολλές εναλλακτικές επιλογές διαθέσιμες στις στρατηγικές διαχείρισης του τέλους ζωής των προϊόντων. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής: ανακύκλωση, αποτέφρωση και υγειονομική ταφή.

2.5.1 Υγειονομική ταφή

Οι ΧΥΤΑ (Χώροι Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων) είναι χώροι, όπου αποθηκεύονται απόβλητα και υλικά μιας χρήσης. Στο παρελθόν οι χώροι αυτοί (που ήταν γνωστοί και ως χωματερές) δεν παρακολουθούνταν, μόλυναν τα υπόγεια νερά και την ατμόσφαιρα και προσέλκυαν παράσιτα που μεταφέρουν ασθένειες. Σήμερα, οι χώροι υγειονομικής ταφής ρυθμίζονται και οι υπάλληλοι διαχείρισης αποβλήτων περνούν από διάφορα βήματα για την ασφαλή αποθήκευση των αποβλήτων. Μερικά από τα υποπροϊόντα της αποσύνθεσης των απορριμμάτων που κανονικά θα μολύνουν την ατμόσφαιρα, όπως το μεθάνιο, συλλέγονται τώρα και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [13].

Οι ΧΥΤΑ χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, με μία τέταρτη νεοεμφανιζόμενη να επιτρέπει τη διαχείριση οργανικών αποβλήτων. Αυτές είναι οι εξής:

1) Χώροι Υγειονομικής Ταφής Οικιακών Απορριμμάτων (Municipal Solid Waste Landfills-MSWLF): Οι ΧΥΤΑ αυτοί είναι ειδικά σχεδιασμένοι για την αποθήκευση οικιακών απορριμμάτων, καθώς και άλλων τύπων μη επικίνδυνων αποβλήτων. Συνήθως εκεί καταλήγουν τα σκουπίδια που πετάγονται στους τοπικούς κάδους απορριμμάτων.

Μια υποκατηγορία των MSWLF αποτελούν οι βιοαντιδραστήρες χώροι υγειονομικής ταφής, στους οποίους προστίθενται ειδικά υγρά και αέρια για την ταχύτερη οργανική αποδόμηση και σταθεροποίηση των αποβλήτων.

2) Χώροι Υγειονομικής Ταφής Βιομηχανικών Αποβλήτων (Industrial Waste Landfills): Όπως αναφέρεται στο όνομά τους, οι χώροι αυτοί είναι σχεδιασμένοι για την αποθήκευση αποβλήτων που προέρχονται από βιομηχανικές αλλά και εμπορικές δραστηριότητες. Χρησιμοποιούνται για την ταφή κυρίως δύο ειδών αποβλήτων: **οικοδομικών μάζων** (ΧΥΤΑ κατασκευών και κατεδαφίσεων) και **απόβλητα από τη καύση άνθρακα**. Τα κύρια υλικά που πηγαίνουν σε αυτούς τους ΧΥΤΑ είναι τσιμέντο, μόλυβδος, τούβλα και ξύλα από οικοδομικές εργασίες.

3) Χώροι Υγειονομικής Ταφής Τοξικών Αποβλήτων (Hazardous Waste Landfills): Για προφανείς λόγους, οι χώροι υγειονομικής ταφής επικίνδυνων αποβλήτων είναι οι πιο στενά ρυθμισμένοι και δομημένοι χώροι υγειονομικής ταφής, ώστε οι πιθανότητες διαρροής τους στο περιβάλλον να ελαχιστοποιηθούν.

Ωστόσο, για να καταστεί κατανοητή η λειτουργία ενός ΧΥΤΑ, πρέπει να αναφερθούν τα δομικά του μέρη. Ένας σύγχρονος ΧΥΤΑ αποτελείται από τα παρακάτω (βλ. Εικόνα 2.4.1):

α) **Ένα σύστημα εσωτερικής επένδυσης** για να εμποδίζει τα απόβλητα να έρχονται σε επαφή με το περιβάλλον - ιδιαίτερα τα υπόγεια ύδατα. Από κάτω προς τα πάνω, το σύστημα αποτελείται από μια στρώση πηλού, μια πλαστική επένδυση και ένα προστατευτικό στρώμα άμμου.

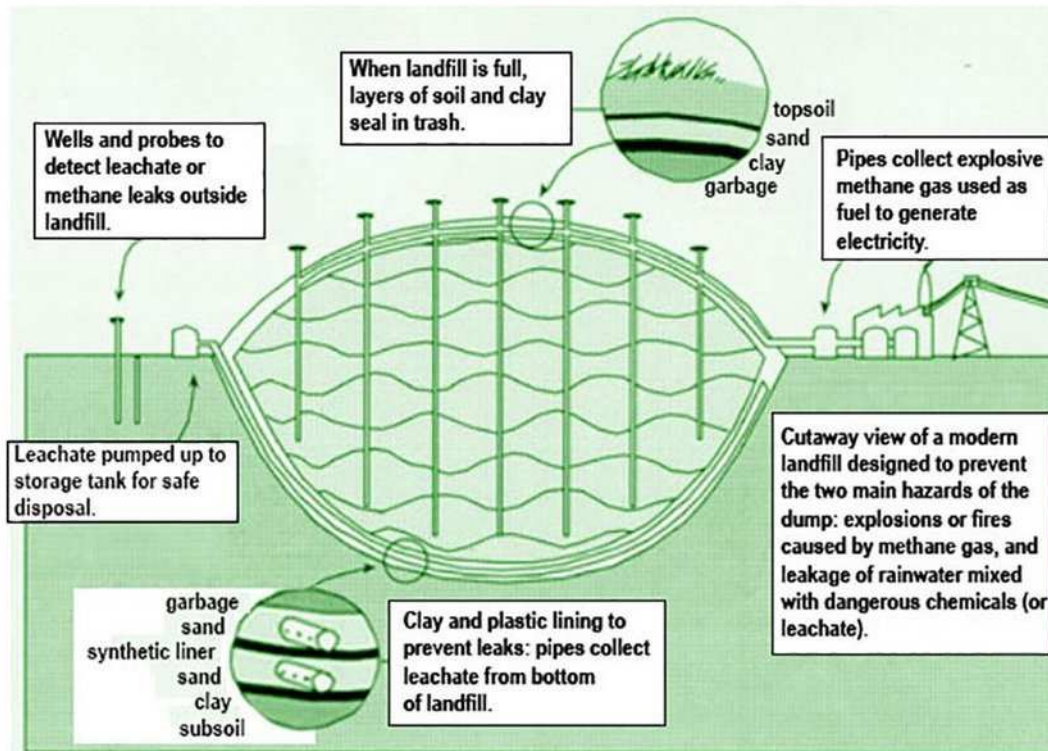
β) **Τα κελιά**, τα οποία είναι συγκεκριμένες περιοχές, όπου τα απόβλητα απορρίπτονται και συμπιέζονται (θρυμματίζονται). Κάθε κελί καλύπτεται από χώμα, ενώ γεμίζεται ένα κελί τη φορά.

γ) **Το σύστημα αποχέτευσης των ομβρίων**, το οποίο συλλέγει το νερό της βροχής που πέφτει στον ΧΥΤΑ. Το σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει πλαστικούς σωλήνες αποστράγγισης που συλλέγουν νερό και το μεταφέρουν σε δεξαμενή ασφαλής αποθήκευσης. Αυτό το νερό δεν έχει έρθει σε επαφή με τα σκουπίδια.

δ) **Το σύστημα συλλογής στραγγισμάτων** συλλέγει υγρά - που ονομάζονται εκπλύματα - που αποτελούν μέρος των απορριμμάτων και κάθε νερό (π.χ. νερό της βροχής) που έρχεται σε επαφή με τα σκουπίδια. Αυτό το νερό περνάει μέσα από τον ΧΥΤΑ, όπως το νερό που διαπερνά μέσα από τα υπολείμματα ενός καφέ. Καθώς το νερό κινείται μέσα στα σκουπίδια, μαζεύει ρύπους. Πρέπει να συλλέγεται και να καθαρίζεται ενδελεχώς.

ε) **Τα συστήματα συλλογής μεθανίου** συλλέγουν αέριο μεθάνιο που δημιουργήθηκε κατά την αποσύνθεση των σκουπιδιών. Τα βακτήρια διασπούν τα σκουπίδια. Το υποπροϊόν είναι αέριο υγειονομικής ταφής που είναι περίπου μισό μεθάνιο και μισό διοξείδιο του άνθρακα με πολύ μικρές ποσότητες αζώτου και οξυγόνου. Το αέριο μεθάνιο παρουσιάζει κίνδυνο, επειδή μπορεί να εκραγεί ή/και να καεί. Το μεθάνιο συλλέγεται ενεργά σε μια σειρά σωλήνων, στη συνέχεια αερίζεται παθητικά ή καίγεται μέσω μιας φωτοβολίδας. Το μεθάνιο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάκτηση ενέργειας

στ) Το **τελικό κάλυμμα** τοποθετείται στον ΧΥΤΑ όταν κλείσει. Το τελικό κάλυμμα έχει μια στρώση πηλού στο κάτω μέρος, μια πλαστική επένδυση στη μέση και μια στρώση χώματος στην κορυφή. Το κάλυμμα σφραγίζει τα απόβλητα από τον αέρα και μειώνει την ποσότητα νερού που εισέρχεται στον ΧΥΤΑ. Αποτρέπει επίσης διάφορα ζώα όπως πουλιά, αρουραίους, ποντίκια και ιπτάμενα έντομα να εισχωρήσουν στα απόβλητα [14].



Εικόνα 2.8: Σχηματική αναπαράσταση πλάγιας τομής ενός σύγχρονου ΧΥΤΑ

2.5.2 Αποτέφρωση

Ένας άλλος, λιγότερο συνήθης τρόπος διαχείρισης των αποβλήτων, τουλάχιστον σε σύγκριση με τη ταφή τους, είναι η καύση και αποτέφρωσή τους. Στον τομέα της διαχείρισης αποβλήτων, η μέθοδος ονομάζεται “waste-to-energy”, καθώς ταυτόχρονα λαμβάνουν χώρα δύο δραστηριότητες: η τελική μεταχείριση των απορριμμάτων και η παραγωγή ενέργειας (ηλεκτρική) από τη θερμότητα που εκλύεται λόγω της καύσης τους, τουλάχιστον στις σύγχρονες μονάδες.

Κύριος σκοπός της αποτέφρωσης αποτελεί η μείωση της μάζας και του όγκου των απορριμμάτων, μειώνοντας τη γη που χρειάζεται για τη ταφή τους μετά τη καύση τους, με τη μείωση αυτή να φτάνει το 80 με 85%, πάντα αναλόγως τα απορριπτόμενα υλικά. Η διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται η αποτέφρωση συντίθεται συνήθως από τα παρακάτω βήματα [15]:

1) Προετοιμασία αποβλήτων: Τα υπερμεγέθη απορρίμματα αφαιρούνται και ανακτώνται ορισμένα ανακυκλώσιμα υλικά (π.χ μέταλλα). Τα υπόλοιπα απόβλητα συχνά τεμαχίζονται πριν εισέλθουν στον αποτεφρωτή.

2) Καύση: Τα απόβλητα καίγονται σε οξυγονωμένο θάλαμο καύσης. Τα υλικά καίγονται σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, ανάλογα το απόβλητο (συνήθως 1,000 με 1,200°C). Σε αυτές τις θερμοκρασίες, τα απόβλητα πρέπει να καίγονται εντελώς, αφήνοντας παρά μόνο αέρια και τέφρα.

Έτσι, απομένει η μέθοδος της ανάκτησης υλικών, η οποία απαιτεί έναν συνδυασμό μηχανικών, θερμικών και χημικών διεργασιών για την υλοποίησή της. Η γενική μέθοδος διαχείρισης περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- 1) Συλλογή και ταξινόμηση των απορριμμάτων σε υποομάδες,
- 2) Συμπύεση των αποβλήτων και διάσπασή τους σε μικρά κομμάτια,
- 3) Θέρμανσή τους και σχηματισμός υλικών έτοιμων για χρήση από τη βιομηχανία.

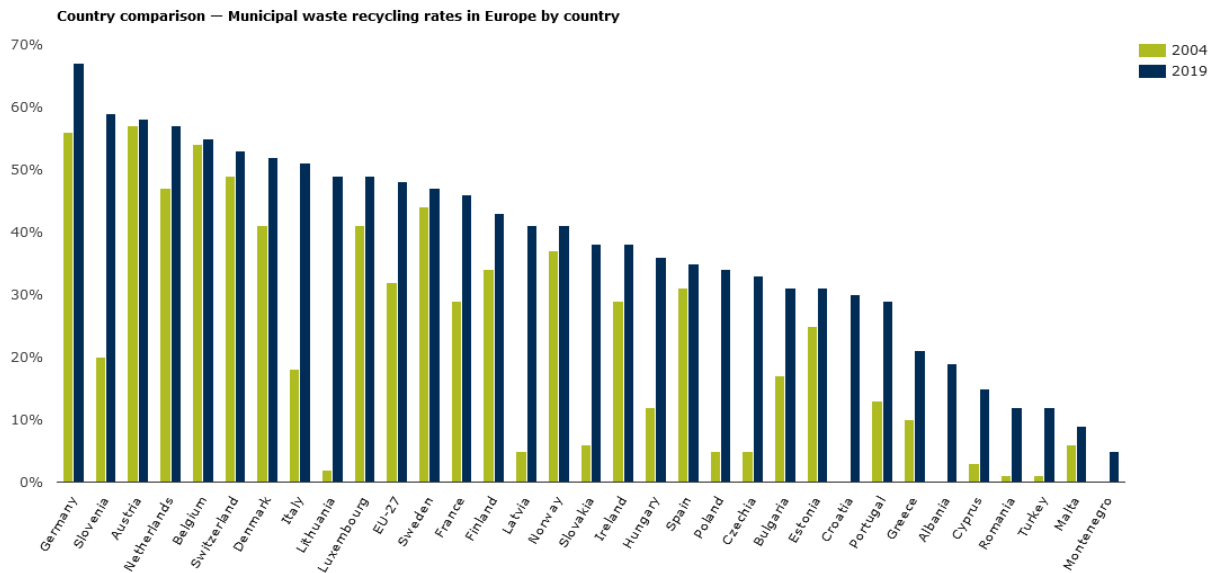
Αυτή η διαδικασία μπορεί να αποφέρει υλικά, τα οποία έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τα πρωτογενή (ανακύκλωση χωρίς υποβάθμιση-**recycling**) ή υλικά με χαμηλότερη ποιότητα και λειτουργικότητα από τα πρωτογενή (ανακύκλωση με υποβάθμιση-**downcycling**). Συνήθως τα πρώτα χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη στον ίδιο κύκλο ζωής, ενώ τα δεύτερα χρησιμοποιούνται στη παραγωγή άλλων προϊόντων, όπου η απώλεια μέρους των ιδιοτήτων τους δεν αποτελεί πρόβλημα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ανακύκλωσης χωρίς την υποβάθμιση του υλικού αποτελεί η ανακύκλωση ανοξείδωτου χάλυβα, από τη τήξη του οποίου μπορούν να ανακτηθούν τα συστατικά μέταλλά του (σίδηρος, νικέλιο, χρώμιο κ.λπ) χωρίς απώλειες στη ποιότητά τους. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την οικονομική αξία των μετάλλων αυτών οδηγούν σε πολύ υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης (85% της συνολικής παραγωγής, [16])

Αντίστοιχο παράδειγμα ανακύκλωσης με υποβάθμιση αποτελεί η ανακύκλωση σκυροδέματος, το οποίο λαμβάνεται από απόβλητα κατεδαφίσεων. Αφού το σκυρόδεμα θρυμματιστεί και λάβει τη μορφή κόκκων χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη στην οδοποιία (98%), με μόνο ένα πολύ μικρό μέρος του να αντικαθιστά άμμο ή χαλίκι για την παραγωγή πρωτογενούς σκυροδέματος [17]

Οι διαδικασίες ανακύκλωσης αποτελούν μονόδρομο για την εξοικονόμηση υλικών και ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών ρύπων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι συσκευασίες αλουμινίου, η παραγωγή νέων από ανακυκλωμένα κουτιά οδηγεί σε μείωση της χρήσης ενέργειας κατά 95% σε σύγκριση με τη χρήση πρωτογενούς βωξίτη [18].

Φυσικά, έχει επέλθει πρόοδος στο βαθμό με τον οποίο τα κράτη διαχειρίζονται τα απόβλητά τους. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το ποσοστό ανακύκλωσης των αστικών αποβλήτων έχει αυξηθεί από 32% το 2005 στο 48% το 2019, με χώρες όπως η Σλοβενία και η Λιθουανία να σημειώνουν τεράστια πρόοδο (από 20 σε 59% και από 2 σε 49% αντίστοιχα) [19].



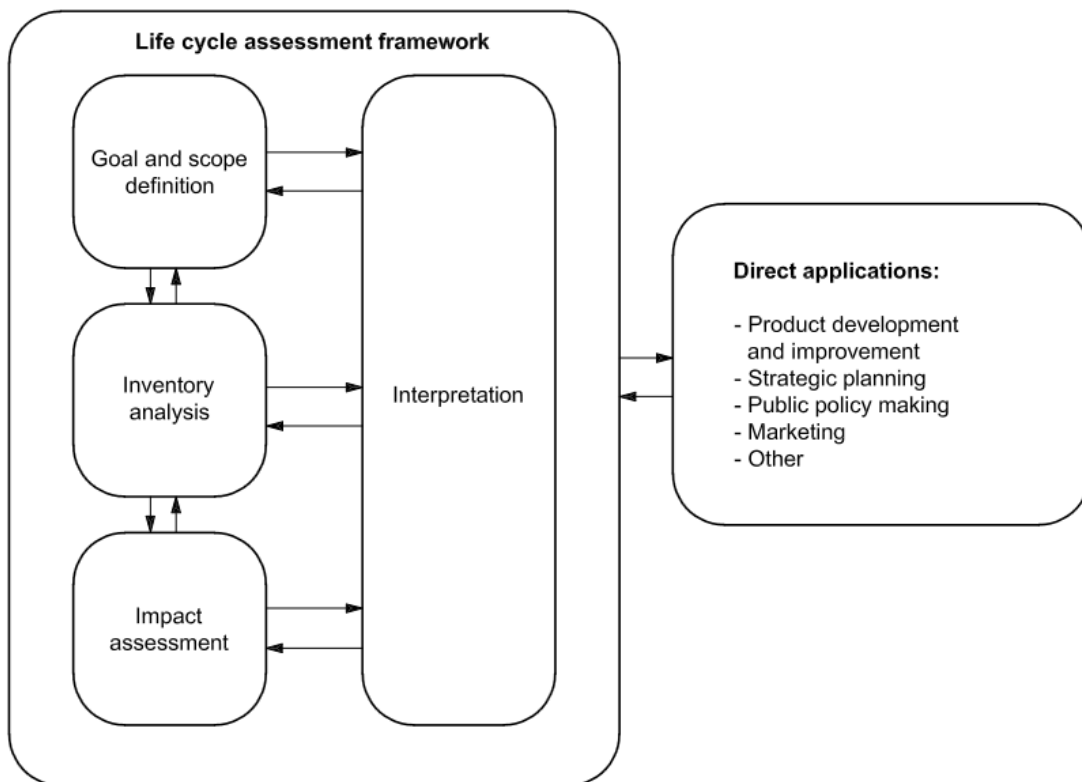
Διάγραμμα 2.6: Ποσοστά ανακύκλωσης αστικών απορριμμάτων (2005-2019)

Ωστόσο, ακόμα υπάρχει χώρος για βελτίωση, τον οποίο και οι χώρες θα πρέπει να εκμεταλλευτούν για να μεγιστοποιήσουν τα περιβαλλοντικά οφέλη από την ανακύκλωση. Ειδικότερα, το 2015 ο μέσος όρος ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων χαρτιού ήταν 46%, ενώ το μέγιστο ποσοστό εκτιμούνται σε 82%, με δυναμικό επιπλέον εξοικονόμησης 17.2 εκατ. τόνους υλικών, 150.6 TWh ενέργειας, και μείωσης ρύπων κατά 8.5 εκατ. τόνους ισοδύναμου CO₂ [20]

Αυτή λοιπόν την επίτευξη των μέγιστων δυνατών στόχων για τη μετάβαση σε ένα όλο και πιο κυκλικό μοντέλο οικονομίας υποστηρίζει το εργαλείο της LCA. Για την κατανόησή του όμως απαιτείται η γνώση της μεθόδου διεξαγωγής της, τουλάχιστον σε θεωρητική βάση. Έτσι, το επόμενο κεφάλαιο θα αφιερωθεί στις φάσεις από τις οποίες περνά.

3. Φάσεις Ανάλυσης του Κύκλου Ζωής των Προϊόντων

Από το 1997, οπότε και δημοσιεύθηκαν οι πρώτες εκδόσεις των προτύπων για τη διεξαγωγή αναλύσεων κύκλου ζωής, οι μελέτες LCA τηρούν τις γενικές αρχές που περιλαμβάνονται στα ISO 14040:2006 και ISO 14044:2006, τα οποία παρέχουν γενικές οδηγίες για το πως πρέπει να εκτελεστεί η LCA αξιόπιστα και με διαφάνεια. Ο κύριος σκοπός είναι η **αξιολόγηση των περιβαλλοντικών πτυχών ενός προϊόντος** ή μιας διαδικασίας που ποσοτικοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κάθε σταδίου ζωής. Οι τέσσερις κύριες φάσεις είναι: (1) ο ορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής (Goal And Scope Definition), (2) η απογραφή κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory-LCI), (3) η εκτίμηση επιπτώσεων του κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment-LCIA), και (4) η ερμηνεία του κύκλου ζωής (Interpretation).



Εικόνα 3.1: Σχήμα που αναπαριστά το γενικό πλαίσιο διεξαγωγής μιας LCA.

3.1 Καθορισμός στόχου και πεδίου μελέτης (Goal and Scope Definition)

Στην πρώτη φάση κάθε μελέτης LCA πρέπει να καθορίζονται τα θεμελιώδη στοιχεία που συνθέτουν τη δομή της, ήτοι οι στόχοι και το πεδίο διεξαγωγής της. Εδώ απαντώνται σημαντικές ερωτήσεις όπως “Γιατί διεξάγεται αυτή η μελέτη;”, “Ποιες ερωτήσεις έχει σκοπό να απαντήσει και σε ποιους απευθύνεται;”. Ουσιαστικά, οι στόχοι καθορίζουν το γενικό πλαίσιο της LCA, το οποίο αποτελεί τη βάση του πεδίου μελέτης.

Αυτό επηρεάζει πολύ την LCA, επειδή οι αποφάσεις που πραγματοποιούνται σε μεταγενέστερες φάσεις της πρέπει να είναι συνεπείς με τους ορισμένους στόχους. Η σημασία αυτή εξηγείται στο ISO 14044 ως εξής:

Ο στόχος και το πεδίο εφαρμογής μιας LCA πρέπει να καθορίζονται σαφώς και να είναι συνεπείς με την προβλεπόμενη εφαρμογή. Λόγω της επαναληπτικής φύσης του LCA, το πεδίο εφαρμογής μπορεί να μεταβληθεί κατά τη διάρκεια της μελέτης.

Βάσει του ISO 14040:2006, ο ορισμός των στόχων πρέπει να περιέχει:

- Τις προβλεπόμενες εφαρμογές των αποτελεσμάτων,
- Ενδεχόμενους περιορισμούς λόγω μεθοδολογικών επιλογών,
- Τους λόγους για τη διεξαγωγή της μελέτης,
- Το κοινό στο οποίο απευθύνονται τα αποτελέσματα της μελέτης,
- Τις προς δημοσίευση συγκριτικές μελέτες, αν η μελέτη LCA είναι συγκριτικού χαρακτήρα
- Τους υπεύθυνους της μελέτης, τους χρηματοδότες της και όλα τα εμπλεκόμενα μέλη.

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του καθορισμού των στόχων της μελέτης αποτελεί το **πλαίσιο απόφασης** της μελέτης. Ουσιαστικά, η σύνδεση των λόγων διεξαγωγής της μελέτης (οι οποίοι πρέπει να είναι σαφείς) με τις προβλεπόμενες εφαρμογές της οδηγεί στην αναγνώριση τριών διαφορετικών τέτοιων πλαισίων, ενώ κάθε LCA πρέπει να αντιστοιχίζεται σε μια από αυτές:

1) Κατάσταση Α: Υποστήριξη Αποφάσεων Μικροεπιπέδου: Τα αποτελέσματα της μελέτης προορίζονται για να υποστηρίξουν μια απόφαση, αλλά καθώς η κλίμακα του συστήματος προϊόντων που μελετήθηκε είναι μικρή, ανεξάρτητα από τη λήψη της απόφασης, η απόφαση αυτή δεν θα προκαλέσει διαρθρωτικές αλλαγές στα συστήματα με τα οποία αλληλεπιδρά το εξεταζόμενο σύστημα προϊόντων.

2) Κατάσταση Β: Υποστήριξη Αποφάσεων Μέσο/Μακροεπιπέδου: Τα αποτελέσματα της μελέτης προορίζονται για την υποστήριξη μιας απόφασης, ενώ η κλίμακα του συστήματος προϊόντος που μελετήθηκε είναι τέτοια, ώστε οι αποφάσεις που λαμβάνονται, αναμένεται να προκαλέσουν αλλαγές διαρθρωτικού χαρακτήρα σε μία ή περισσότερες διαδικασίες των συστημάτων, με τα οποία το μελετώμενο προϊόν αλληλεπίδρασε.

2) Κατάσταση Γ: Λογιστική Μελέτη: Η μελέτη δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη αποφάσεων και έχει καθαρά περιγραφικό χαρακτήρα. Τεκμηριώνει αυτό που έχει ήδη συμβεί ή τι θα συμβεί λόγω αποφάσεων που έχουν ήδη ληφθεί. Επομένως, η παρουσία της μελέτης LCA δεν θα οδηγήσει σε αλλαγές (μικρές ή δομικές) σε άλλα συστήματα. Αλληλεπιδράσεις με άλλα συστήματα (είτε λήψη θέση στο παρελθόν ή στο μέλλον) μπορεί είτε να συμπεριληφθούν στο μοντέλο συστήματος προϊόντος (Κατάσταση Γ1) είτε λαμβάνονται υπόψη στην LCA μέσω κατανομής (βλ. Κεφ. 3.2) (Κατάσταση Γ2).

Με τους στόχους της LCA να είναι σαφείς, ακολουθεί το βήμα του καθορισμού του πεδίου μελέτης της LCA, το οποίο αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- 1) Τα **γεωγραφικά και χρονικά όρια** στα οποία θα λάβει χώρα η μελέτη, καθώς και τις **τεχνολογίες** που είναι σχετικές με τον κύκλο ζωής του μελετούμενου προϊόντος,
- 2) Τις **περιβαλλοντικές παραμέτρους** που θα αξιολογηθούν (βλ. Κεφ. 3.3),
- 3) Τη **σχετική οπτική** που θα εφαρμοστεί στη μελέτη, δηλαδή αν η μελέτη θα είναι συγκριτική ή αποδοτική,
- 4) Τον ορισμό της **λειτουργικής μονάδας**, και
- 5) Τον καθορισμό των **ορίων του συστήματος**.

Οι δύο τελευταίοι όροι θα εξηγηθούν στις παρακάτω παραγράφους:

3.1.1 Λειτουργική Μονάδα (Functional Unit)

Το πρότυπο ISO 14040:2006 ορίζει τη **λειτουργική μονάδα** ως εξής:

Η λειτουργική μονάδα είναι το μέγεθος, το οποίο ορίζει την ποσοτικοποίηση των προσδιορισμένων λειτουργιών (χαρακτηριστικά απόδοσης) των μελετούμενων προϊόντων. Ο πρωταρχικός σκοπός μιας λειτουργικής μονάδας είναι να παρέχει ένα σημείο αναφοράς για τις εισόδους και εξόδους του συστήματος. Αυτή η αναφορά είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων της LCA.

Η επιλογή της λειτουργικής μονάδας είναι αρκετά σημαντική στην LCA, καθώς η εφαρμογή του καθορίζει τη ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής για **όλες τις φάσεις της**, από την παραγωγή μέχρι την απόρριψη και την ανακύκλωση. Όπως αναφέρουν οι Lu et al. (2017)., μια σωστή μονάδα πρέπει να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όσο το δυνατόν περισσότερες λειτουργίες του πεδίου εφαρμογής.

Οι Bjørn et al.(2018) αναφέρουν πως, καθώς η λειτουργική μονάδα πρέπει να εκφράζει όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μελετώμενων συστημάτων, πρέπει αυτή να προκύπτει από τις ιδιότητες αυτού. Έτσι, χωρίζουν τις ιδιότητες αυτές σε **“υποχρεωτικές”** και σε ιδιότητες **“θέσης”**, με τις πρώτες να αποτελούν τα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να έχει το προϊόν, ώστε να μπορεί να θεωρείται επιλογή από τον καταναλωτή ή να ικανοποιεί νομικές υποχρεώσεις (π.χ μια φιάλη νερού δεν πρέπει να στάζει), ενώ οι δεύτερες είναι προαιρετικές ιδιότητες, οι οποίες το καθιστούν ελκυστικό στον καταναλωτή, προσφέροντάς του ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα (π.χ η αθόρυβη λειτουργία ενός ανεμιστήρα ή η ποικιλία διαθέσιμων χρωμάτων ενός κινητού τηλεφώνου).

Ένα παράδειγμα ακολουθεί παρακάτω, παραθέτοντας τις ιδιότητες μιας λάμπας LED και τη λειτουργική μονάδα:

Υποχρεωτικές ιδιότητες	Ιδιότητες θέσης
<ul style="list-style-type: none"> • Φωτισμός χώρου με σταθερή ένταση φωτός • Τήρηση κανονισμών 	<ul style="list-style-type: none"> • Δυνατότητα επιλογής από ποικιλία διαθέσιμων χρωμάτων και σχημάτων • Εύκολη εγκατάσταση • Ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας
<p>Λειτουργική Μονάδα: Φωτισμός 10 m² με 500 lux για 60.000 ώρες με φάσμα φωτός ημέρας στα 5.600 K.</p>	

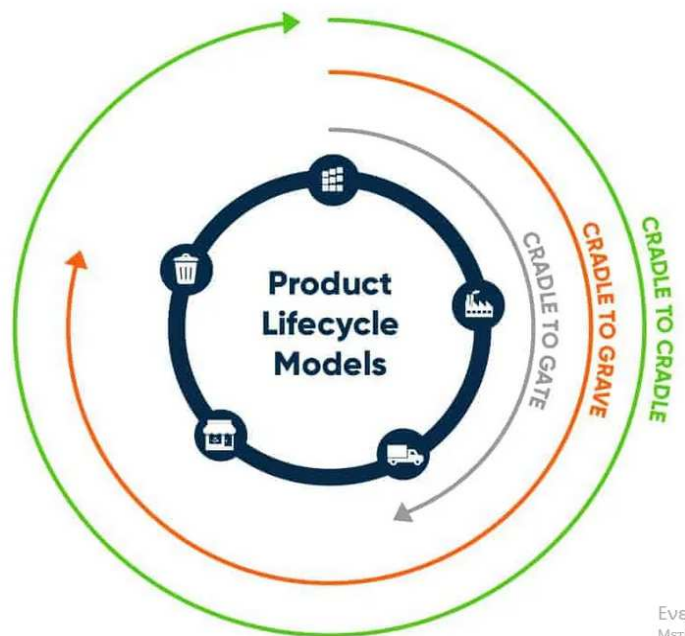
Πίνακας 3.1: Ιδιότητες των λαμπτήρων LED και λειτουργική μονάδα

Από τη λειτουργική μονάδα προκύπτει η **ροή αναφοράς**, η οποία αποτελεί τη ποσότητα του μελετώμενου προϊόντος, η οποία απαιτείται για την ικανοποίηση των αναγκών που αναφέρει η λειτουργική μονάδα. Στο παραπάνω παράδειγμα η ροή αναφοράς ισούται με ορισμένο αριθμό λαμπών LED.

3.1.2 Όριο Συστήματος

Καίριας σημασίας απόφαση αποτελεί η επιλογή του συστήματος, στο οποίο περικλείεται ο κύκλος ζωής του προϊόντος (ονομάζεται και σύστημα προϊόντος). Τα όρια του συστήματος αυτού περιλαμβάνουν τις **βασικές λειτουργίες**, οι οποίες αποτελούν τη βάση του ορισμού της λειτουργικής μονάδας του (Klöpffer et al., 2013).

Ανάλογα με τις διαδικασίες που λαμβάνονται υπόψη στην εκάστοτε μελέτη LCA, και ανάλογα με τις εισόδους και τις εξόδους οι οποίες καταμετρώνται, μπορούμε να λάβουμε πληθώρα παραλλαγών της μεθόδου, οι οποίες και θα παρουσιαστούν παρακάτω. Παρόλο που υπάρχουν αναρίθμητες εναλλακτικές επιλογές για όρια συστήματος, εδώ θα εξεταστούν τα “ιδανικά” όρια (δηλαδή, αυτά τα οποία περικλείουν ολόκληρες φάσεις ζωής), τα οποία είναι τα εξής: cradle-to-grave, cradle-to-gate, gate-to-gate, και cradle-to-cradle.



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα σύνοψης των διαφορετικών ορίων συστήματος.

Cradle-to-grave

Ως “cradle-to-grave” ορίζουμε τη **πλήρη αξιολόγηση κύκλου ζωής**, από την απόκτηση των πρώτων υλών μέχρι τη χρήση και την τελική απόρριψη, περιλαμβάνοντας όλα τα ενδιάμεσα στάδια. Παρατηρήθηκε ότι ένα μεγάλο μέρος των μελετών επιχειρούν αυτήν την προσέγγιση, ενώ οι Ramesh et al. (2020) ενισχύουν την υπόθεση αυτή αναφέροντας στην ανασκόπησή τους πως τα όρια “cradle-to-grave” και “cradle-to-gate” (η οποία θα εξηγηθεί παρακάτω) αποτελούν τις πιο συχνά εφαρμοζόμενες προσεγγίσεις στις μελέτες περίπτωσης.

Ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα μελετών περίπτωσης με προσέγγιση “cradle-to-grave” αποτελεί η μελέτη των Schmid et al. (2018), η οποία πραγματεύεται την εκτίμηση των

περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής φούρνων μικροκυμάτων, και η συγκριτική LCA που περιλαμβάνεται στη μελέτη των Welz et al. (2011).

Cradle-to-gate

Μια άλλη προσέγγιση στην αξιολόγηση κύκλου ζωής αποτελεί η “cradle-to-gate”, στην οποία εξετάζονται το σύνολο των φάσεων **από τη παραγωγή μέχρι των πρώτων υλών μέχρι τη “πύλη” του εργοστασίου** (εξού και ο όρος “cradle-to-gate”), δηλαδή οι φάσεις της διανομής, της χρήσης και τις απόρριψης δεν μελετώνται. Παραδείγματα μελετών με προσέγγιση “cradle-to-gate” αποτελούν η συγκριτική μελέτη των Chen et al. (2016), στην οποία αξιολογούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής φιαλών με πρώτη ύλη PET ή βιοπολυμερή, και η περιβαλλοντική αξιολόγηση της παραγωγής ινών από απόβλητα φιαλών PET από τους Shen et al. (2010).

Gate-to-gate

Όπως έχει γνωστοποιηθεί, η παραδοσιακή προσέγγιση εφαρμογής LCA είναι η “cradle-to-grave”. Ωστόσο, η LCA έχει επίσης εφαρμοστεί για να αξιολογηθεί **ένα συγκεκριμένο στάδιο στον κύκλο ζωής** ορισμένων προϊόντων, όπως το στάδιο παραγωγής ή το στάδιο διαχείρισης του προϊόντος στο τέλος της ζωής του (End of Life-EoL) ή το στάδιο διαχείρισης των αποβλήτων (Ismail et al., 2019).

Το παραπάνω παρατηρήθηκε και στη μελετούμενη βιβλιογραφία, όπου οι “gate-to-gate” μελέτες εξέταζαν τη φάση της ανακύκλωσης (από τη διαδικασία της παραλαβής των αποβλήτων μέχρι την επανένταξη των ανακυκλωμένων υλικών στην παραγωγή).

Cradle-to-cradle ή Παραγωγή Κλειστού/Ανοιχτού Βρόχου (Closed/Open Loop Production)

Το όριο συστήματος μπορεί να περιλαμβάνει και τη φάση της ανακύκλωσης των παραγόμενων αποβλήτων. Σύμφωνα με το ISO 14040:2006, υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι διαδικασιών ανακύκλωσης: **κλειστού βρόχου** και **ανοικτού βρόχου**. Ο πρώτος συμβαίνει, όταν το υλικό επανεισάγεται στον ίδιο τύπο διαδικασίας για την παραγωγή του ίδιου προϊόντος. Στο δεύτερο, το υλικό επανεισάγεται σε άλλη διαδικασία για την παραγωγή διαφορετικών προϊόντων.

Ο κύκλος ανοικτού βρόχου προσφέρει διαφορετικούς τρόπους απόκτησης του νέου υλικού, συμπεριλαμβανομένων της μηχανικής και ημι-μηχανικής ανακύκλωσης, καθώς και της ανακύκλωσης επαναφοράς σε ολιγομερή ή σε μονομερή (Gomes et al., 2019).

Η ανακύκλωση κλειστού βρόχου είναι τεχνικά πιο δύσκολη και απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία πριν το ανακυκλωμένο PET μπορεί να αναμειχθεί με πολυμερές από πρωτογενή παραγωγή. Παραδείγματος χάριν, Για να χρησιμοποιηθεί ανακυκλωμένο PET στη παραγωγή φιαλών, απαιτείται μια διαδικασία απολύμανσης, η οποία αποδίδει ανακυκλωμένο PET υψηλής ποιότητας (Lonca et al., 2020). Όπως αναφέρουν οι Teixeira et al. (2020), η επιστροφή ή μη του προϊόντος στον ίδιο κύκλο παραγωγής επηρεάζει την επιλογή της λειτουργικής μονάδας και, κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα της LCA.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί πως η ανακύκλωση δεν αποτελεί μονόδρομο για κάθε κύκλο ζωής. Για παράδειγμα, η LCA που πραγματοποίησαν οι Lonca et al. (2020) στα πλαίσια της μελέτης ανακύκλωσης κλειστού βρόχου στην αγορά PET των Η.Π.Α. αποκάλυψε ότι η αύξηση της ανακύκλωσης κλειστού βρόχου στη βιομηχανία φιαλών δεν συνεπάγεται μείωση της παραγωγής πρωτογενούς PET, ούτε μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ως προς τη προοπτική του συνόλου της αγοράς.

3.2 Ανάλυση Συλλογής Δεδομένων (Inventory Analysis)

Για τη δεύτερη φάση της LCA θα γίνει και πάλι επίκληση του προτύπου ISO 14040:2006, στο οποίο η συλλογή δεδομένων αξιολόγησης κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory-LCI) ορίζεται ως:

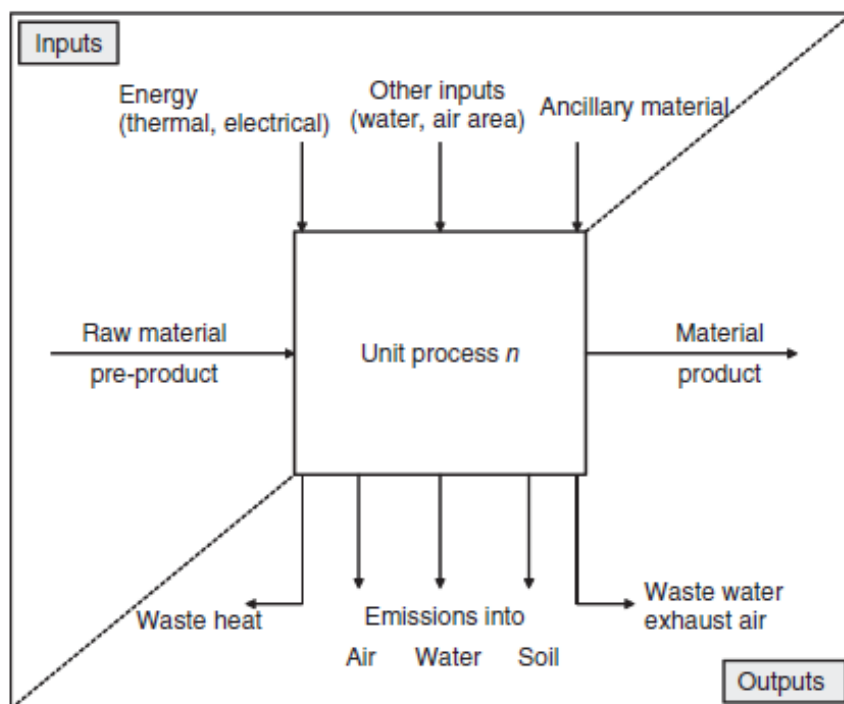
Η φάση της αξιολόγησης του κύκλου ζωής που περιλαμβάνει τη συλλογή και τον ποσοτικό προσδιορισμό των εισροών και εκροών για ένα προϊόν καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

Αντίστοιχα ορίζουν τη φάση αυτή και οι Horowitz et al. (2018), οι οποίοι καθορίζουν τον στόχο της LCI ως τον **προσδιορισμό** και την **ποσοτικοποίηση** των περιβαλλοντικών παραγόντων που διαπερνούν τα όρια του συστήματος. Η διαδικασία αυτή συχνά απαιτεί τους περισσότερους πόρους και τη μεγαλύτερη προσπάθεια από τους ερευνητές που υλοποιούν την LCA, καθώς είναι συνήθως αδύνατη η συλλογή όλων των δεδομένων με την ύψιστη ποιότητα.

Έτσι, απαιτείται μια δομημένη προσέγγιση στη φάση της LCI, ώστε να γίνεται βέλτιστη εκμετάλλευση του χρόνου και των πόρων που είναι διαθέσιμα, και να λαμβάνουν προσοχή οι διαδικασίες που έχουν τη μεγαλύτερη βαρύτητα εντός του συστήματος.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί πως η διαδικασία της ανάλυσης αποθεμάτων είναι επαναληπτική. Καθώς τα δεδομένα συλλέγονται και μαθαίνονται περισσότερα το σύστημα, ενδέχεται να εντοπιστούν νέες απαιτήσεις δεδομένων ή περιορισμοί που απαιτούν αλλαγή στη συλλογή δεδομένων, έτσι ώστε οι στόχοι της μελέτης να εξακολουθούν να επιτυγχάνονται. Μερικές φορές μπορεί να εντοπιστούν ζητήματα που απαιτούν αναθεωρήσεις του στόχου ή του πεδίου της μελέτης.

Για την κατανόηση της φάσης αυτής, πρέπει να γίνει αναφορά σε έναν από τους όρους που αφορούν την LCA: **τη μοναδιαία διαδικασία**, η οποία ορίζεται ως το μικρότερο στοιχείο που λαμβάνεται υπόψη στην LCI για το οποίο ποσοτικοποιούνται τα δεδομένα εισόδου και εξόδου.



Εικόνα 3.3: Σχήμα που απεικονίζει τη μοναδιαία διαδικασία ως ένα “μαύρο κουτί” στο οποίο αντιστοιχίζονται εισόδοι και έξοδοι.

Μια μοναδιαία διαδικασία μπορεί να είναι μια χημική αντίδραση, μια μεταφορά, αλλά μπορεί και να αναπαριστά και τις διεργασίες μιας ολόκληρης μονάδας παραγωγής (π.χ ένα συναρμολογητήριο), ανάλογα με το επίπεδο λεπτομέρειας, το οποίο υιοθετείται κατά τη μοντελοποίηση της συλλογής των δεδομένων. Στις μοναδιαίες διαδικασίες αντιστοιχίζονται είσοδοι, συγκεκριμένα υλικά, ενέργεια και πόροι (νερό κ.λπ), και έξοδοι, συγκεκριμένα προϊόντα, απόβλητα για διαχείριση και εκπομπές ρύπων. Οι πόροι και οι παραγόμενοι ρύποι δεν μπορούν να αποτελέσουν είσοδο ή έξοδο άλλης μοναδιαίας διεργασίας. Έτσι, ονομάζονται **στοιχειώδεις ροές**.

Τώρα είναι δυνατή η παράθεση των βημάτων κατάστρωσης μιας LCI. Να σημειωθεί ότι ο τρόπος μοντελοποίησης μιας LCI που θα παρουσιαστεί παρακάτω υιοθετεί μια **προσέγγιση βασισμένη σε διαδικασίες** (process-based LCI), δηλαδή βασίζεται σε γνώσεις σχετικά με τις βιομηχανικές διαδικασίες που συμμετέχουν σε έναν κύκλο ζωής και τις φυσικές ροές που τις συνδέουν.

3.2.1 Αναγνώριση των διαδικασιών για το μοντέλο LCI

Αρχικά απαιτείται ο σχεδιασμός του συνόλου των διαδικασιών, για τις οποίες πρέπει να συλλεχθούν πληροφορίες. Καθώς τα όρια του συστήματος είναι δεδομένα από την προηγούμενη φάση της LCA, εδώ απλά αναγνωρίζονται όλες οι διεργασίες εντός αυτού. Από το βήμα αυτό θα προκύψουν δύο “προϊόντα”: η απεικόνιση του συνόλου των διαδικασιών και των μεταξύ τους συνδέσεων που ονομάζεται **“σύστημα στο προσκήνιο”**, και μια απεικόνιση-προσέγγιση του συστήματος αυτού στο οποίο οι πληροφορίες των βάσεων δεδομένων LCI θα εφαρμοστούν, γνωστή και ως **“σύστημα παρασκηνίου”**.

Ξεκινώντας από τη ροή αναφοράς, κατασκευάζουμε το σύστημα προσκηνίου ακολουθώντας τη φυσική ροή του προϊόντος, με τα εξής επίπεδα διαδικασιών να προκύπτουν:

i. Επίπεδο 0: Αρχικά αναγνωρίζεται η διαδικασία, από την οποία προκύπτει η ροή αναφοράς (στο παράδειγμα με τους λαμπτήρες LED του κεφ. 3.1, η ροή αναφοράς προκύπτει από την τελική φάση συναρμολόγησης του λαμπτήρα).

ii. Επίπεδο 1: Εδώ περιλαμβάνονται όλες οι διαδικασίες, οι οποίες ενσωματώνονται στη ροή αναφοράς. Στο παράδειγμα των λαμπτήρων LED, όλες οι διαδικασίες των εξαρτημάτων τους αποτελούν διαδικασίες επιπέδου 1.

iii. Επίπεδο 2: Στο επίπεδο 2 ανήκουν όλες οι διαδικασίες υποστηρικτικού χαρακτήρα (οι οποίες δεν ενσωματώνονται στη ροή αναφοράς), όπως είναι οι μεταφορές και οι παροχές ενέργειας.

iv. Επίπεδο 3: Ακολουθούν οι διαδικασίες, οι οποίες απαιτούνται για την παροχή υπηρεσιών στο επίπεδο 0, όπως είναι για παράδειγμα η έρευνα, η διεύθυνση και οι πωλήσεις.

v. Επίπεδο 4: Στο τέταρτο και τελευταίο επίπεδο εντάσσονται όλες οι διαδικασίες, οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατασκευή και τη συντήρηση της υποδομής που απαιτείται για την υλοποίηση των διαδικασιών του επιπέδου 0. Στο παραπάνω παράδειγμα, στο επίπεδο 4 ανήκουν οι διαδικασίες συντήρησης των μηχανών συναρμολόγησης των λαμπτήρων LED.

Πρακτικά, οι διαδικασίες των επιπέδων 3 και 4 συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο LCI, καθώς η ατομική συνεισφορά τους στους δείκτες επιπτώσεων είναι αμελητέα, ενώ ταυτόχρονα τα απαραίτητα δεδομένα είναι συχνά δυσεύρετα.

Σε αυτό το σημείο καθίσταται θεμιτή η αναφορά δύο ζητημάτων που οι υπεύθυνοι ερευνητές της LCA πρέπει να αντιμετωπίσουν. Το πρώτο είναι αυτό της **πολυλειτουργικότητας**, δηλαδή της ιδιότητας ορισμένων διαδικασιών να παραδίδουν πολλαπλά προϊόντα, κάποια από τα οποία δεν χρησιμοποιούνται από τη ροή αναφοράς της μελέτης. Το ζήτημα αυτό αντιμετωπίζεται με τρεις τρόπους (ISO 14044, 2006a):

- Υποδιαίρεση: Αύξηση της λεπτομέρειας ανάλυσης και διάσπαση της διαδικασίας σε μικρότερες. Αυτός είναι και ο προτιμότερος τρόπος αντιμετώπισης της πολυλειτουργικότητας και θα πρέπει να επιλέγεται, άμα είναι δυνατό.
- Επέκταση συστήματος: Αλλαγή της λειτουργικής μονάδας, έτσι ώστε να περιλαμβάνει τις λειτουργίες που χαρακτηρίζουν το προϊόν.
- Κατανομή: Διαίρεση των ροών εισόδου ή εξόδου μιας διαδικασίας ή ενός συστήματος προϊόντος μεταξύ του υπό μελέτη προϊόντος και ενός ή περισσότερων άλλων συστημάτων προϊόντων. Θα πρέπει, όταν είναι δυνατόν, να βασίζεται είτε σε αιτιώδη φυσική σχέση είτε σε μια κοινή αντιπροσωπευτική φυσική παράμετρο είτε στην οικονομική αξία (τελευταία λύση)

3.2.2 Συλλογή των δεδομένων

Με το πεδίο μελέτης και το σύνολο των διαδικασιών σαφώς καθορισμένα, ακολουθεί η συλλογή των δεδομένων που απαιτούνται για την LCI. Η διαδικασία αυτή έχει επαναληπτικό χαρακτήρα, καθώς τα αποτελέσματα της εκτίμησης των επιπτώσεων (που θα συζητηθούν στο Κεφ. 3.3) μπορεί να καθοδηγήσουν τους ερευνητές σχετικά με το σε ποια δεδομένα πρέπει να εστιάσουν, επανεξετάζοντας το βήμα αυτό.

Η πιο σημαντική απόφαση αποτελεί η επιλογή της επιθυμητής ακρίβειας για κάθε μοναδιαία διαδικασία. Καθώς η συλλογή δεδομένων πολύ υψηλής ακρίβειας είναι ένα κοστοβόρο εγχείρημα, αφού απαιτούνται άμεσες μετρήσεις στους χώρους, όπου διενεργούνται οι διεργασίες για τη λήψη των ακριβέστερων δεδομένων, οι ερευνητές πρέπει από την αρχή να επιλέξουν σε ποιες διαδικασίες θα εστιάσουν, οι οποίες συνήθως βρίσκονται στο επίπεδο 0 και 1.

Οι άλλοι δύο παράγοντες που καθορίζουν τον βαθμό δυσκολίας συλλογής δεδομένων είναι η πηγή τους, καθώς και η προσβασιμότητά σε αυτά. Για παράδειγμα, οι ερευνητές έχουν στη διάθεσή τους το διαδίκτυο για αναζήτηση σε βάσεις δεδομένων, αλλά μπορεί να απαιτηθεί η επαφή με τους μηχανικούς που είναι υπεύθυνοι για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των φάσεων κατασκευής του μελετούμενου συστήματος για τη συλλογή δεδομένων ροής σε εσωτερικές διαδικασίες.

Το σύνολο των δεδομένων για τις διαδικασίες εντός του συστήματος περιλαμβάνει **επιστημονικές γνώσεις** σχετικές με το αντικείμενο μελέτης, καθώς **ποσοτικά δεδομένα** που αφορούν τις μοναδιαίες διαδικασίες εντός του ορίου συστήματος (αποδόσεις, εισόδους και εξόδους υλικών και ενέργειας κ.λπ). Στην πρώτη εντάσσονται, σύμφωνα με τους Klöppfer et al. (2013), οι παρακάτω φυσικές αρχές:

- Η Αρχή Διατήρησης της Μάζας,
- Η Αρχή Διατήρησης της Ενέργειας (πρώτη αρχή της θερμοδυναμικής)
- Η Αύξηση της Εντροπίας (δεύτερη αρχή της θερμοδυναμικής) - συχνά χρησιμοποιούμενη στις LCI παραγωγής χημικών
- Αρχές στοιχειομετρίας - βάση για όλες τις χημικές αντιδράσεις
- $E = mc^2$ (ισοδυναμία μάζας-ενέργειας)

Αντίστοιχα, στη δεύτερη κατηγορία μπορούν να ενταχθούν πληροφορίες και δεδομένα από μετρήσεις που πραγματοποιούν οι ερευνητές, από ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία σχετική με το αντικείμενο μελέτης, αλλά και από ενσωματωμένες βάσεις δεδομένων σε λογισμικά για LCA.

3.2.3 Σχεδιασμός και Ποιοτικός Έλεγχος Μοναδιαίων Διαδικασιών

Μετά τη συλλογή δεδομένων, ακολουθεί η διαδικασία σχεδιασμού μοναδιαίων διαδικασιών για το σύστημα παρασκηνίου. Όπως αναφέρθηκε, ο τύπος των δεδομένων που συλλέγονται μπορεί να ποικίλει. Έτσι, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι όλα τα δεδομένα έχουν τη μορφή ροών. Οι στοιχειώδεις ροές πρέπει να βρίσκονται σε μια μονάδα που ταιριάζει με αυτή των συντελεστών χαρακτηρισμού που θα εφαρμοστούν (βλ. Κεφ. 3.3) και όλες οι ροές πρέπει να αντιστοιχούν σε μία μονάδα της ροής αναφοράς μιας διαδικασίας μονάδας.

Κατά το σχεδιασμό μοναδιαίων διαδικασιών ενδέχεται να προκληθούν σφάλματα. Μπορεί οι διαδικασίες να μην είναι πλήρεις, δηλαδή να λείπουν ροές, ή οι ροές να έχουν λανθασμένες καταγεγραμμένες ποσότητες. Συνεπώς, οι ερευνητές πρέπει πάντα να ελέγχουν τις διαδικασίες που σχεδιάζουν προτού τις χρησιμοποιήσουν σε ένα μοντέλο LCI. Ο έλεγχος αυτός έχει δύο σκέλη:

1) **Έλεγχος της πληρότητας των ροών:** Μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με γνώση αντίστοιχων διαδικασιών, είτε με την εφαρμογή των παραπάνω φυσικών αρχών για την αναγνώριση εκπομπών ή ροών αποβλήτων που μπορεί να λείπουν.

2) **Έλεγχος των ποσοτήτων των ροών:** Η κύρια μέθοδος ελέγχου των ποσοτήτων είναι η εφαρμογή της αρχής διατήρησης της μάζας. Ωστόσο, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα στοιχεία της ατμόσφαιρας (για παράδειγμα, οξυγόνο και άζωτο) στις εισόδους, αλλιώς ίσως να παρατηρηθεί παραβίαση της αρχής χωρίς αυτό στη πραγματικότητα να συμβαίνει. Έπειτα, οι αρχές διατήρησης ενέργειας και οι αρχές στοιχειομετρίας μπορεί να χρειαστεί να εφαρμοστούν.

3.2.4 Κατασκευή του μοντέλου LCI

Με τις μοναδιαίες διαδικασίες ολοκληρωμένες, είναι δυνατή η κατασκευή του ολοκληρωμένου μοντέλου LCI, συνδέοντας όλες τις μοναδιαίες διαδικασίες μεταξύ τους, με όλες τις ροές να προκύπτουν σε σχέση με τη ροή αναφοράς. Το μοντέλο αυτό αναπαρίσταται με ένα διάγραμμα ροής, το οποίο συνδέει τις μοναδιαίες διαδικασίες που σχεδιάστηκαν στο προηγούμενο βήμα.

Από αυτό το μοντέλο μπορούν να υπολογιστούν τα αποτελέσματα της LCI, τα οποία είναι οι συνολικές ροές εισόδων και εξόδων του συστήματος. Στην πράξη, η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται από το λογισμικό, το οποίο έχουν επιλέξει οι ερευνητές, καθώς το μέγεθος των μεταχειριζόμενων δεδομένων δεν επιτρέπει υπολογισμούς με το χέρι. Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν τη βάση της αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος.

3.2.5 Τελική αναφορά

Τέλος, απαιτείται η σύνταξη της αναφοράς της φάσης LCI, στην οποία πρέπει να τεκμηριωθούν εγγράφως όλα τα αποτελέσματά της και να παρουσιαστούν με συνοπτικό και κατανοητό τρόπο στους αποδέκτες της. Η αναφορά αυτή προτείνεται να περιέχει:

- **Ένα διάγραμμα ροής**, το οποίο να αναπαριστά το μοντέλο της LCI στο επίπεδο των συστημάτων προσκηνίου και παρασκηνίου,
- **Έναν πίνακα για κάθε μοναδιαία διαδικασία**, ο οποίος θα περιέχει όλες τις εισόδους και τις εξόδους που το αφορούν, καθώς και την πηγή από την οποία η πληροφορία για κάθε ροή λήφθηκε,
- **Μια λίστα** με τις θεμελιώδεις ροές που προκύπτουν από το μοντέλο της LCI,
- Τις **παραδοχές** που έγιναν αποδεκτές για κάθε φάση του κύκλου ζωής.

3.3 Εκτίμηση επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment - LCIA)

Μετά τη φάση της ανάλυσης LCI, μπορεί κάποιος να πει πως το επόμενο βήμα αποτελεί η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της, αφού όλες οι εκπομπές ρύπων και οι χρήσεις πόρων έχουν υπολογιστεί για κάθε διαδικασία, οπότε απομένει μόνο η σύγκριση μεταξύ τους.

Ωστόσο, η φάση της εκτίμησης των επιπτώσεων αποτελεί αναγκαίο κομμάτι μιας πλήρους LCA. Το πρότυπο ISO 14040:2006 ορίζει τη φάση της εκτίμησης επιπτώσεων ως:

Η φάση της LCA, στην οποία κατανοούνται και αξιολογούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις για κάθε στοιχειώδη ροή από τη συλλογή δεδομένων κύκλου ζωής (LCI).

Μια LCA πρέπει να περιλαμβάνει εξέταση και ποσοτικοποίηση σημαντικών περιβαλλοντικών πτυχών, οι οποίες αφορούν εισροές και εκροές που μπορούν να αλληλεπιδράσουν με το περιβάλλον, και των επακόλουθων πιθανών περιβαλλοντικές επιπτώσεων, οι οποίες σχετίζονται με ένα εξεταζόμενο σύστημα προϊόντων. Το πρώτο μέρος καλύπτεται από τη φάση της ανάλυσης LCI, αλλά για το δεύτερο απαιτείται η φάση της εκτίμησης επιπτώσεων. Παράλληλα, ο όγκος των πληροφοριών που περιλαμβάνονται στο LCI το καθιστούν δύσκολο στη διαχείριση και, συνεπώς, απαιτείται η συμπύκνωσή τους.

Το στάδιο εκτίμησης επιπτώσεων αποτελείται από υποχρεωτικά και προαιρετικά βήματα, τα οποία και θα αναλυθούν παρακάτω. Τα πρώτα τρία είναι υποχρεωτικά για την LCIA, ενώ για τα επόμενα τρία επαφίεται στην κρίση των ερευνητών για την υλοποίησή τους.

3.3.1 Επιλογή κατηγοριών επιπτώσεων, δεικτών κατηγοριών και μοντέλων χαρακτηρισμού

Το πρώτο βήμα αξιολόγησης των θεμελιωδών ροών αποτελεί η επιλογή των βάσεων, πάνω στις οποίες θα πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση αυτή. Συγκεκριμένα, επιλέγονται:

- **Κατηγορίες επιπτώσεων**, οι οποίες αποτελούν περιβαλλοντικά προβλήματα βάσει των οποίων μια LCA διενεργείται.
- **Δείκτες κατηγορίας**, δηλαδή τα μέτρα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, και
- **Παράγοντες χαρακτηρισμού**, τα οποία περιγράφουν τις σχέσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου LCI και των δεικτών κατηγορίας.

Ουσιαστικά, επιλέγονται τα περιβαλλοντικά ζητήματα, τα οποία επιβαρύνει ο κύκλος ζωής του προϊόντος (π.χ κλιματική αλλαγή), στη συνέχεια αποφασίζονται οι συντελεστές με τους οποίους θα αξιολογηθεί η επιβάρυνση αυτή (π.χ Δυναμικό Θέρμανσης του Πλανήτη), και τέλος αποφασίζεται η “μονάδα μέτρησης” με την οποία θα αξιολογηθεί η συνεισφορά κάθε φάσης του κύκλου ζωής στους συντελεστές αυτούς (π.χ kg CO₂-eq)

Η επιλογή όλων των παραπάνω πρέπει προφανώς να σχετίζεται άμεσα με τους στόχους και το πεδίο έρευνας της μελέτης LCA, να πραγματεύονται περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με το μελετούμενο σύστημα προϊόντων και η επιλογή τους να τεκμηριώνονται στην αναφορά της μελέτης.

Στην πράξη, κατά την είσοδο στο στάδιο εκτίμησης επιπτώσεων, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου καθοδηγεί τον χρήστη στα επόμενα στάδια. Επιλέγει κατηγορίες επιπτώσεων, δείκτες κατηγοριών, μοντέλα χαρακτηρισμού και καθορίζει ποια προαιρετικά στοιχεία θα περιληφθούν στην ανάλυση. Παραδείγματα μεθόδων LCIA αποτελούν: IPCC, CML, ReCiPe, ILCD 2011 (Bałazińska et al., 2020).

Οι μέθοδοι LCIA χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις μεθόδους μεσαίου σημείου (midpoint methods) και τις μεθόδους τελικού σημείου (endpoint methods).

- Στις μεθόδους **μεσαίου σημείου** χρησιμοποιούνται δείκτες μεσαίου σημείου, οι οποίοι εστιάζουν σε ένα περιβαλλοντικό ζήτημα έκαστος, όπως είναι η τοξικότητα του νερού και η χρήση ορυκτών πηγών.
- Στις μεθόδους **τελικού σημείου** πραγματοποιείται σύμπτυξη των παραπάνω δεικτών σε τρεις “περιοχές προστασίας” των συμφερόντων της κοινωνίας: (1) Επίπτωση στην Ανθρώπινη Υγεία, (2) Ζημιά στα Οικοσυστήματα, και (3) Επίδραση στη Διαθεσιμότητα Πόρων [21].

Δείκτες Μεσαίου Σημείου	Δείκτες Τελικού Σημείου
Κλιματική αλλαγή	Ανθρώπινη Υγεία
Εξάντληση του όζοντος της στρατόσφαιρας	
Οξίνιση (χερσαία, γλυκού νερού)	
Ευτροφισμός (χερσαίος, γλυκού νερού, θαλάσσιος)	
Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος	
Οικοτοξικότητα (χερσαία, γλυκού νερού, θαλάσσια)	Ποιότητα Οικοσυστήματος
Τοξικότητα στον άνθρωπο (καρκινογόνος ή μη)	
Σχηματισμός σωματιδίων	
Ιονίζουσα ακτινοβολία	
Χρήση γης	
Χρήση νερού	Διαθεσιμότητα Πόρων Οικοσυστήματος
Χρήση αβιοτικών πόρων (π.χ ορυκτά καύσιμα)	
Χρήση βιοτικών πόρων (π.χ αλιεία)	
Θόρυβος	
Παθογόνα	

Πίνακας 3.2: Κατάλογος Δεικτών Κατηγοριών Μεσαίου και Τελικού Σημείου.

3.3.2 Ταξινόμηση

Έπειτα πραγματοποιείται η ταξινόμηση των στοιχειωδών ροών που προκύπτουν από την ανάλυση LCI στις κατηγορίες επιπτώσεων που επιλέχθηκαν παραπάνω. Για παράδειγμα, μια εκπομπή CO₂ αντιστοιχίζεται στην κατηγορία της κλιματικής αλλαγής. Μερικές από τις εκπεμπόμενες ουσίες μπορεί να έχουν πολλαπλές επιπτώσεις με δύο τρόπους:

- 1) **Παράλληλα:** Μια ουσία έχει πολλές ταυτόχρονες επιπτώσεις, όπως το SO₂, το οποίο προκαλεί οξίνιση και είναι τοξικό για τον άνθρωπο όταν εισπνέεται.
- 2) **Σε σειρά:** Μια ουσία έχει αρνητική επίδραση η οποία καθίσταται η ίδια αιτία κάποιας άλλης. Για παράδειγμα, το SO₂ προκαλεί οξίνιση, η οποία στη συνέχεια μπορεί να οδηγήσει στην

εμφάνιση βαρέων μετάλλων στο έδαφος, τα οποία είναι τοξικά για τον άνθρωπο και τα οικοσυστήματα.

Αυτό το βήμα απαιτεί κατανόηση και εξειδικευμένη γνώση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και επομένως τυπικά αντιμετωπίζεται αυτόματα από το λογισμικό LCA (χρησιμοποιώντας πίνακες ταξινόμησης βασισμένους σε ειδικούς) και όχι εργασία που πρέπει να αναλάβουν οι ερευνητές LCA.

3.3.3 Χαρακτηρισμός

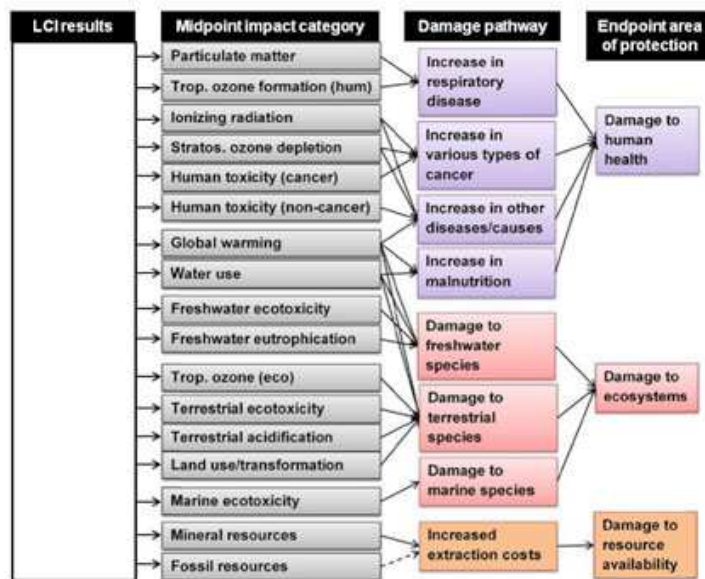
Στο τελευταίο υποχρεωτικό βήμα αξιολογούνται όλες οι στοιχειώδεις ροές του LCI ανάλογα με το βαθμό που συμβάλλουν στον αντίστοιχο τους αντίκτυπο. Για το σκοπό αυτό, όλες οι στοιχειώδεις ροές (P), ταξινομημένες εντός συγκεκριμένης κατηγορίας επιπτώσεων n, πολλαπλασιάζονται με τον αντίστοιχο συντελεστή χαρακτηρισμού τους ΣΧ και αθροίζονται όλες οι σχετικές παρεμβάσεις i (εκπομπές ή εξαγωγές πόρων) με αποτέλεσμα A για την κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων (εκφράζεται σε συγκεκριμένη μονάδα ίδια για όλες τις στοιχειώδεις ροές στην ίδια κατηγορία επιπτώσεων):

$$A_n = \sum_i P_i * \Sigma X_i$$

Ένας **συντελεστής χαρακτηρισμού** (ΣΧ) αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά ανά ποσότητα μιας στοιχειώδους ροής σε συγκεκριμένο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας επιστημονικά έγκυρα μοντέλα του περιβαλλοντικού μηχανισμού αντιπροσωπεύοντας όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά την αιτιολογική αλυσίδα των γεγονότων που οδηγούν σε επιπτώσεις στο περιβάλλον για όλες τις στοιχειώδεις ροές που συμβάλλουν σε αυτόν τον αντίκτυπο.

Η μοντελοποίηση ενός συντελεστή χαρακτηρισμού περιλαμβάνει τη χρήση διαφορετικών μοντέλων και παραμέτρων και συνήθως διεξάγονται από ειδικούς για μια συγκεκριμένη κατηγορία επιπτώσεων. Καθώς σε αυτό το σημείο αποφασίζονται διάφορες παραδοχές και μεθοδολογικές επιλογές, αυτό μπορεί να επηρεάσει την απόδοση, όπως αυτή αντικατοπτρίζεται στις διαφορές των αποτελεσμάτων που μπορεί να παρατηρηθούν για τον ίδιο αντίκτυπο κατά την εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων LCIA, φαινόμενο που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την ερμηνεία του αποτελέσματος της φάσης LCIA.

Οι συντελεστές χαρακτηρισμού είναι δύο ειδών: αυτοί που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του αντίκτυπου των στοιχειωδών ροών στους δείκτες μεσαίου σημείου, και αυτοί που απαιτούνται για τη σύνδεση των δεικτών μεσαίου σημείου με τους δείκτες τελικού σημείου, με τους τελευταίους να ονομάζονται και **συντελεστές χαρακτηρισμού ζημίας**.



Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα που απεικονίζει τη διαδρομή από τα αποτελέσματα της LCI στους δείκτες τελικού σημείου.

3.3.4 Κανονικοποίηση

Οι βαθμολογίες για τους διαφορετικούς δείκτες μεσαίου σημείου εκφράζονται σε μονάδες που ποικίλλουν μεταξύ των κατηγοριών επιπτώσεων και αυτό καθιστά αδύνατη τη μεταξύ τους συσχέτιση και σύγκριση. Για την υποστήριξη τέτοιων συγκρίσεων, είναι απαραίτητο να τις θέσουμε σε κοινή βάση.

Αυτός είναι ο σκοπός του βήματος της ομαλοποίησης, όπου συγκρίνονται οι επιπτώσεις του συστήματος προϊόντος σε εκείνες ενός συστήματος αναφοράς όπως μια χώρα, ο κόσμος ή ένας βιομηχανικός τομέας. Με τη συσχέτιση των διαφορετικών δυναμικών επιπτώσεων σε μια κοινή κλίμακα, μπορούν να εκφραστούν σε κοινές μονάδες μέτρησης, οι οποίες παρέχουν μια εικόνα για το ποια από τα δυναμικά αυτά είναι μεγαλύτερα και ποια μικρότερα, σε σχέση με το σύστημα αναφοράς.

Η κανονικοποίηση μπορεί να είναι χρήσιμη για να:

- Δώσει μια εντύπωση για τα σχετικά μεγέθη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων,
- Παρουσιάσουν τα αποτελέσματα σε μορφή κατάλληλη για μετέπειτα στάθμιση, και να
- Ελεγχθούν η συνέπεια και η αξιοπιστία της μεθόδου LCIA.

Οι τυπικές αναφορές είναι οι συνολικές επιπτώσεις ανά κατηγορία επιπτώσεων:

- Γεωγραφική ζώνη που μπορεί να είναι παγκόσμια, ηπειρωτική, εθνική, περιφερειακή ή τοπική
- Κάτοικο γεωγραφικής ζώνης (π.χ. έκφραση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται ανά άτομο)
- Βιομηχανικό τομέα μιας γεωγραφικής ζώνης (π.χ. εκφράζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από αυτό το σύστημα προϊόντων σε σχέση με παρόμοιες βιομηχανικές δραστηριότητες)
- Βασικό σενάριο αναφοράς, όπως ένα άλλο σύστημα προϊόντων (π.χ. έκφραση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος προϊόντων σε σχέση με ένα παρόμοιο σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιεί την καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία)

Η ομαλοποίηση εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας **συντελεστές κανονικοποίησης** (ΣΚ). Αυτοί υπολογίζονται ανά κατηγορία επιπτώσεων με τη διεξαγωγή LCI και LCIA στο σύστημα αναφοράς, δηλαδή με την ποσοτικοποίηση όλων των περιβαλλοντικών παρεμβάσεων P για όλες τις

στοιχειώδεις ροές i για το σύστημα αναφοράς και εφαρμογή συντελεστών χαρακτηρισμού ΣX ανά στοιχειώδους ροή i , αντίστοιχα, για κάθε κατηγορία επιπτώσεων n . Η αναφορά κανονικοποίησης τυπικά διαιρείται με τον πληθυσμό Π της περιοχής αναφοράς x , προκειμένου να εκφραστεί ο ΣK ανά μέσο κάτοικο της περιοχής αναφοράς (κατά κεφαλήν επιπτώσεις). Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται ο συνολικός αντίκτυπος του συστήματος αναφοράς ανά κατηγορία επιπτώσεων, με αποτέλεσμα έναν ΣK ανά κατηγορία επιπτώσεων n :

$$\Sigma K_n = \frac{\sum_i \Sigma X_i * P_i}{\Pi_n}$$

Το κανονικοποιημένο αποτέλεσμα (KA) για ένα σύστημα προϊόντος υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το υπολογιζόμενο αποτέλεσμα A για το σύστημα προϊόντος με τον σχετικό ΣK ανά κατηγορία επιπτώσεων n :

$$KA_n = A_n * \Sigma K_n$$

3.3.5 Στάθμιση

Η στάθμιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί ποιες επιπτώσεις είναι πιο σημαντικές και πόσο σημαντικές. Αυτό το βήμα μπορεί να εφαρμοστεί μόνο μετά το στάδιο κανονικοποίησης και επιτρέπει την ιεράρχηση των κατηγοριών επιπτώσεων κατανέμοντας διαφορετικά ή ίσα βάρη σε κάθε δείκτη κατηγορίας.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει επιστημονική ή αντικειμενική βάση για αυτό το βήμα. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο στάθμισης, αυτή θα βασίζεται πάντα στις υποκειμενικές επιλογές ενός ατόμου ή μιας ομάδα ατόμων. Η στάθμιση μπορεί να είναι χρήσιμη για να:

- Συγκεντρωθούν τα αποτελέσματα ενός ή περισσότερων δεικτών (Σημείωση: Σύμφωνα με το ISO 14040/14044 δεν υπάρχει καμία επιστημονική βάση για τη συμπύκνωση των αποτελεσμάτων LCA σε ένα μόνο αποτέλεσμα ή βαθμολογία λόγω υποκείμενης αξίας)
- Πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ κατηγοριών επιπτώσεων, και
- Παρουσιαστούν τα αποτελέσματα εφαρμόζοντας μια υποκειμενική ιεράρχηση βασισμένη σε ηθικές αξίες.

3.3.6 Ομαδοποίηση

Το τελευταίο προαιρετικό βήμα αποτελεί η τοποθέτηση των κατηγοριών επιπτώσεων σε μία ή περισσότερες ομάδες ή συστάδες (όπως ορίζονται στη φάση καθορισμού στόχων και πεδίου μελέτης) και μπορούν να περιλαμβάνουν ταξινόμηση ή κατάταξη, εφαρμόζοντας μία από τις δύο παρακάτω μεθόδους:

- 1) **Ταξινόμηση** και ομαδοποίηση κατηγοριών επιπτώσεων μεσαίου σημείου σε ονομαστική βάση (π.χ. με βάση χαρακτηριστικά που σχετίζονται με εκπομπές ή πόρους, ή κατά παγκόσμια, κρατική ή τοπική κλίμακα)
- 2) **Κατάταξη** των κατηγοριών επιπτώσεων σύμφωνα με ένα υποκειμενικό σύνολο (π.χ. υψηλή, μεσαία ή χαμηλή προτεραιότητα).

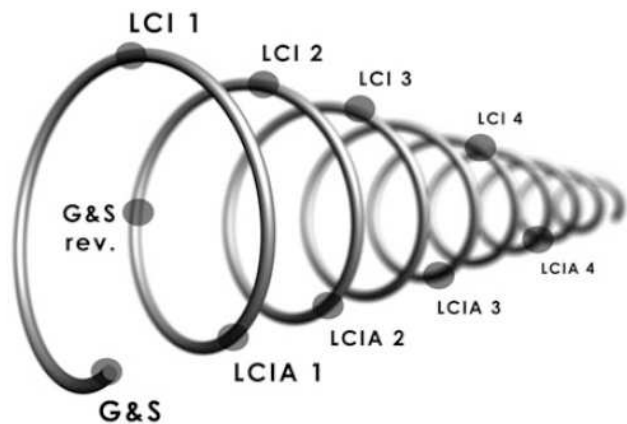
3.4 Ερμηνεία αποτελεσμάτων (Interpretation)

Η φάση της ερμηνείας των αποτελεσμάτων, η οποία είναι και η τελευταία φάση της LCA, ορίζεται στο ISO 14040:2006 ως:

Η φάση της LCA, στην οποία τα ευρήματα από την ανάλυση LCI και την LCIA εξετάζονται από κοινού ή, στην περίπτωση μελετών LCI, μόνο τα ευρήματα της LCI. Η φάση της ερμηνείας θα πρέπει να αποφέρει αποτελέσματα που είναι σύμφωνα με τον καθορισμένο στόχο και πεδίο μελέτης και τα οποία καταλήγουν σε συμπεράσματα, εξηγούν περιορισμούς και παρέχουν συστάσεις.

Κεντρικά στοιχεία της φάσης ερμηνείας όπως η ανάλυση ευαισθησίας και η ανάλυση αβεβαιότητας (τα οποία θα παρουσιαστούν παρακάτω) εφαρμόζονται επίσης σε όλη τη διαδικασία της LCA μαζί με εργαλεία εκτίμησης επιπτώσεων ως μέρος των επαναληπτικών βρόχων που χρησιμοποιούνται σε κάθε φάση της.

Ταυτόχρονα, στη φάση της ερμηνείας πρέπει να παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της LCA με κατανοητό τρόπο, ο οποίος θα βοηθά τους χρήστες να αξιολογήσουν την αξιοπιστία και τις πιθανές αδυναμίες της.



Εικόνα 3.4: Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων δεν πραγματοποιείται μόνο μια φορά, αλλά όλη η LCA αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία, με κάθε κύκλο να ελαττώνει την αβεβαιότητα στα αποτελέσματα.

Η ερμηνεία προχωρά σε τρία στάδια:

- 1) Αναγνώριση των σημαντικών ζητημάτων (βασικές διαδικασίες, σημαντικές στοιχειώδεις ροές και παραδοχές) στις άλλες φάσεις του LCA.
- 2) Αξιολόγηση των ζητημάτων αυτών ως προς την επίδρασή τους στα αποτελέσματα της LCA, καθώς και την πληρότητα και την συνέπεια με την οποία οι ερευνητές τα διαχειρίστηκαν στη μελέτη.
- 3) Διατύπωση συμπερασμάτων και συστάσεων βάσει των αποτελεσμάτων της αξιολόγησης.

3.4.1 Αναγνώριση καίριων ζητημάτων

Το πρότυπο ISO δεν παρέχει άμεση καθοδήγηση για την αναγνώριση των σημαντικών παραμέτρων της εκάστοτε μελέτης. Συνεπώς, σε κάθε μελέτη πρέπει να διατυπώνονται, ανάλογα με την ποιότητα των δεδομένων, τα κριτήρια σπουδαιότητας, τα οποία είναι έγκυρα. Η ταυτοποίηση των σημαντικών ζητημάτων αποσκοπεί στον εντοπισμό παραμέτρων για τις οποίες παρουσιάζονται πραγματικά σημαντικές ποσοτικές διαφορές σε σχέση με άλλες, περιλαμβάνοντας και αβεβαιότητες δεδομένων. Τα καίρια ζητήματα-παραμέτροι μπορεί να παρουσιαστούν σε οποιαδήποτε φάση της LCA. Για παράδειγμα, μπορεί να αποτελούν δεδομένα της LCI, αποτελέσματα κατηγοριών επιπτώσεων ή συνεισφορές διαδικασιών του κύκλου ζωής.

Η “κατανομή” της σημασίας σύμφωνα με το ίδιο πρότυπο πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας:

- Τα αποτελέσματα των ήδη ολοκληρωμένων φάσεων LCI και LCIA,

- Τα στοιχεία της μεθοδολογικής προσέγγισης, με παραδείγματα να αποτελούν οι κανόνες κατανομής (βλ. Κεφ. 3.2.1), τα όρια συστήματος, οι κατηγορίες επιπτώσεων και τα μοντέλα εκτίμησης επιπτώσεων,
- Τις επιλογές που εφαρμόζονται στη μελέτη στα προαιρετικά βήματα ομαδοποίησης/στάθμισης και ομαλοποίησης στο αξιολόγηση επιπτώσεων φάσης, και
- Το ρόλο και την ευθύνη των ενδιαφερομένων μερών.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ πως ο προσδιορισμός των σημαντικών ζητημάτων βασίζεται στα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας στη φάση της αξιολόγησης (βλ. Κεφ. 3.4.2) σε συνδυασμό με πληροφορίες σχετικά με βασικές παραδοχές και αβεβαιότητες για πιθανές καίριες παραμέτρους στην ανάλυση αποθεμάτων και την εκτίμηση επιπτώσεων. Ταυτόχρονα, στη φάση της αξιολόγησης λαμβάνονται τα αναγνωρισμένα σημαντικά ζητήματα ως σημαντική πληροφορία. Έτσι, οι δύο διαδικασίες εκτελούνται **σε επανάληψη**.

3.4.2 Αξιολόγηση

Κατά το βήμα της αξιολόγησης δημιουργείται η βάση για τα συμπεράσματα και τις συστάσεις που διατυπώνονται στο τελευταίο βήμα της ερμηνείας. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO, κύριος στόχος της αξιολόγησης είναι η ενίσχυση της εμπιστοσύνης των ενδιαφερόμενων μερών στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της LCA στις σημαντικές παραμέτρους. Λαμβάνεται υπόψη η χρήση των ακόλουθων τριών τεχνικών:

- Έλεγχος πληρότητας,
- Έλεγχος ευαισθησίας, και
- Έλεγχος συνέπειας.

Ο **έλεγχος πληρότητας** σχετίζεται με όλες τις πληροφορίες, ιδίως με τις σημαντικές παραμέτρους. Έλεγχοι πληρότητας πραγματοποιούνται για την LCI και την εκτίμηση επιπτώσεων προκειμένου να καθοριστεί ο βαθμός, στον οποίο τα διαθέσιμα δεδομένα είναι πλήρη για τις διαδικασίες και τις επιπτώσεις, οι οποίες προσδιορίστηκαν ως σημαντικά ζητήματα. Σε περίπτωση κενών, η LCI ή η εκτίμηση επιπτώσεων θα πρέπει να επαναληφθεί με βελτιστοποιημένα δεδομένα ή να πραγματοποιηθούν με επαναληπτική προσέγγιση.

Ο **έλεγχος ευαισθησίας** είναι ίσως η πιο συχνά εφαρμοζόμενη ποσοτική τεχνική κατά τη φάση της αξιολόγησης. Ο στόχος του ελέγχου ευαισθησίας αποτελεί η εκτίμηση των αβεβαιοτήτων στα αποτελέσματα της LCA λόγω της ποιότητας δεδομένων, της επιλογής των κανόνων κατανομής και της επιλογής των κατηγοριών επιπτώσεων. Τα κυρίως διερευνώμενα σενάρια είναι αυτά που διαφέρουν στη μοντελοποίηση του συστήματος προϊόντων σε μία μόνο παράμετρο της έρευνας.

Ο **έλεγχος συνέπειας** πραγματοποιείται για να διερευνηθεί εάν οι παραδοχές, οι μέθοδοι και τα δεδομένα που έχουν εφαρμοστεί στη μελέτη είναι συμβατά με τους στόχους και το πεδίο εφαρμογής. Σε περίπτωση σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών συστημάτων προϊόντων ελέγχεται επίσης, εάν οι κανόνες κατανομής και τα όρια συστήματος καθώς και η εκτίμηση επιπτώσεων εφαρμόζεται με συνέπεια σε όλα τα συστήματα προϊόντων. Όταν εντοπίζονται ασυνέπειες, η επιρροή τους στα αποτελέσματα της μελέτης αξιολογείται και θεωρείται ότι εξάγει συμπεράσματα από τα αποτελέσματα.

Για τη πραγματοποίηση της αξιολόγησης των ζητημάτων εφαρμόζονται μαθηματικές και μη μαθηματικές μέθοδοι. Οι Heijungs et al. (2005) λαμβάνουν υπόψη τους πέντε μαθηματικές

μεθόδους οι οποίες είναι κατάλληλες για τη φάση της ερμηνείας. Αυτές θα παρουσιαστούν παρακάτω:

Ανάλυση συνεισφοράς

Η ανάλυση συνεισφοράς είναι μια μεθοδολογία, η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της επίδρασης παραγόντων εντός μιας διαδικασίας. Χρησιμοποιείται συχνά για την αξιολόγηση της επίδοσης συστημάτων που δεν βρίσκονται σε πειραματικές συνθήκες (δηλαδή, το σύστημα εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου αντιμετωπίζονται “πραγματικές καταστάσεις”) [22]. Για την LCA αυτό μπορεί να συνεπάγεται καθορισμό της συνεισφοράς ενός ή ορισμένων φάσεων του κύκλου ζωής σε μια κατηγορία επιπτώσεων (αποτέλεσμα δείκτη). Αυτή η προσέγγιση συχνά ονομάζεται ανάλυση τομέα.

Ανάλυση διαταραχής

Από ορισμένες απόψεις, η ανάλυση είναι κοντά σε αυτό που μπορεί να αναφερθεί ως ανάλυση ευαισθησίας. Η βασική ιδέα της ανάλυσης διαταραχής είναι η εξής: μια μικρή (οριακή) μεταβολή των παραμέτρων εισόδου οδηγεί σε μικρότερες ή μεγαλύτερες αποκλίσεις της προκύπτουσας εξόδου, και ότι η γνώση των ποιων παραμέτρων οδηγεί σε μεγάλες αποκλίσεις, έχει μεγάλη χρησιμότητα.

Ο βαθμός, στον οποίο η διαταραχή μιας συγκεκριμένης εισροής διαδίδεται σε ένα ορισμένο αποτέλεσμα εξόδου μπορεί να εκφραστεί ως ένας πολλαπλασιαστής. Για παράδειγμα, εάν η αύξηση 2% μιας ροής εισόδου οδηγεί σε αύξηση 3% ενός αποτελέσματος εξόδου, θεωρείται ότι ο πολλαπλασιαστής που συνδέει αυτά τα δύο στοιχεία είναι 1.5.

Η ανάλυση διαταραχής μπορεί να πραγματοποιηθεί σε τέσσερα επίπεδα της LCA: στην ανάλυση LCI, στον χαρακτηρισμό, την κανονικοποίηση και τη στάθμιση της LCIA. Ωστόσο, με την αύξηση των ροών εισόδου που απαιτούνται, για τις οποίες πραγματοποιείται ανάλυση, απαιτούνται περισσότερα δεδομένα εισόδου, και ως εκ τούτου μπορούν να διαταραχθούν περισσότερες ροές εξόδου.

Ανάλυση αβεβαιότητας

Η ανάλυση αβεβαιότητας είναι μια συστηματική ανάλυση της διάδοσης της αβεβαιότητας από τις εισόδους δεδομένων στα αποτελέσματα. Η αβεβαιότητα αυτή ονομάζεται **μεταβλητότητα**, η οποία προκαλείται από διακυμάνσεις σε μια ποσότητα ή διαδικασία, ενώ μπορεί να συμβεί, επειδή μια παράμετρος αυξομειώνεται φυσικά με την πάροδο του χρόνου, με τη τοποθεσία ή μέσα σε μια ομάδα.

Το πιο σύνηθες εφαρμοζόμενο εργαλείο ανάλυσης αβεβαιότητας αποτελεί η **προσομοίωση Monte Carlo**, με το οποίο, σε περίπτωση που οι παράμετροι εισόδου ακολουθούν κάποια στατιστική κατανομή (η πιο συνηθισμένη είναι η κατανομή Gauss), λαμβάνονται επαναλαμβανόμενα τυχαία δείγματα από στατιστική διανομή που καθορίζονται για κάθε μεταβλητή παράμετρο, εκτελεί τον αλγόριθμο με τον οποίο υπολογίζεται το αποτέλεσμα πολλές φορές και δημιουργεί τη καμπύλη κατανομής του (Hayes et al., 2007). Σε απλές περιπτώσεις, η παράμετρος εξόδου μπορεί να χαρακτηριστεί από τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της (π.χ 2 ± 0.1 ppm SO₂). Περιορισμοί στη μεθοδολογία μπορεί να προκύψουν από τη διαθεσιμότητα ή μη στατιστικών στοιχείων για τα δεδομένα εισόδου (που συχνά είναι απλές εκτιμήσεις) και τους χρόνους υπολογισμού, ανάλογα την υπολογιστική ισχύ που απαιτείται, η οποία είναι συνάρτηση της πολυπλοκότητας του μελετούμενου συστήματος.

Συγκριτική ανάλυση

Στον πυρήνα της, η συγκριτική ανάλυση δεν είναι κάτι παραπάνω από μια συστηματική μέθοδο παρουσίασης των αποτελεσμάτων LCA για διαφορετικά εναλλακτικά συστήματα προϊόντων

ταυτόχρονα. Μπορεί να πραγματοποιηθεί στην ανάλυση LCI, καθώς και στις φάσεις του χαρακτηρισμού, της κανονικοποίησης και της στάθμισης της LCIA.

Οι μελετούμενες εισροές και εκπομπές μπορούν να παρουσιαστούν με τις απόλυτες τιμές τους στην εκάστοτε κλίμακα και μονάδα τους. Εναλλακτικά, μπορεί η στοιχειώδης ροή ή η κατηγορία επιπτώσεων να παρουσιαστεί ως κλάσμα μιας επιλεγμένης ροής αναφοράς, της οποίας ο δείκτης έχει οριστεί στο 1.

Η συγκριτική ανάλυση μπορεί να φαίνεται απλή, ωστόσο κρύβει κινδύνους. Μπορεί εύκολα να οδηγήσει τους ερευνητές σε αβάσιμους ισχυρισμούς για την επίδοση των συστημάτων προϊόντων χωρίς να ληφθεί υπόψη η επίδραση των αβεβαιοτήτων.

Ανάλυση διακριτότητας

Η τελευταία μέθοδος καθίσταται κατάλληλη ειδικά για συγκριτικές LCA, στις οποίες ο στόχος αποτελεί μια κατάταξη μεταξύ διαφορετικών συστημάτων προϊόντων. Η ιδέα της ανάλυσης διακριτότητας βασίζεται στην επιθυμία συνδυασμού των αναλύσεων αβεβαιότητας και σύγκρισης. Ουσιαστικά, η προσέγγιση συνοψίζεται στην εφαρμογή προσομοίωσης Monte Carlo για όλα τα συστήματα ταυτόχρονα και μέτρηση της συχνότητας, στην οποία το ένα προϊόν έχει καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση από το άλλο.

Εν τέλει, για η συστήματα, δημιουργείται ένας πίνακας nxn (με η τον αριθμό εναλλακτικών συστημάτων) με τα ποσοστά, για τα οποία η μία εναλλακτική (στήλες) έχει καλύτερη επίδοση σε σχέση με άλλη (γραμμές). Αν το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο από ένα συγκεκριμένο αριθμό (συνήθως 95%), τότε θεωρείται ότι η πρώτη εναλλακτική είναι σαφώς καλύτερη από την άλλη.

Το κύριο ζήτημα εδώ είναι ότι η ανάλυση διακριτότητας αγνοεί τις ποσοτικές διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων, πραγματοποιώντας έναν διαχωρισμό σε μικρότερο και μεγαλύτερο. Ταυτόχρονα, καθώς η ανάλυση διακριτότητας είναι μια ειδική μορφή ανάλυσης αβεβαιότητας, τα προβλήματα που σχετίζονται με τη μέθοδο αυτή ισχύουν και εδώ (ανάγκη για υπολογιστική ισχύ, ζητήματα με τη ποιότητα δεδομένων) (Heijungs & Kleijn, 2001).

3.4.3 Διατύπωση συμπερασμάτων και συστάσεων

Με βάση τα αποτελέσματα των προηγούμενων βημάτων της ερμηνείας και αξιοποιώντας τα κύρια ευρήματα από τις προηγούμενες φάσεις της LCA, στην τελευταία φάση της οι ερευνητές πρέπει να προβούν σε συμπεράσματα και να εντοπίσουν περιορισμούς στη μελέτη, και να αναπτύξουν συστάσεις προς τα ενδιαφερόμενα μέρη, πάντα σύμφωνα με τους ορισμένους στόχους και τις προβλεπόμενες εφαρμογές των αποτελεσμάτων.

Οι συστάσεις που βασίζονται στα τελικά συμπεράσματα της μελέτης θα πρέπει να είναι λογικές συνέπειές τους. Θα πρέπει να βασίζονται μόνο στα σημαντικά ζητήματα και να σχετίζονται με την προβλεπόμενη εφαρμογή της μελέτης, όπως ορίζεται στον ορισμό του στόχου.

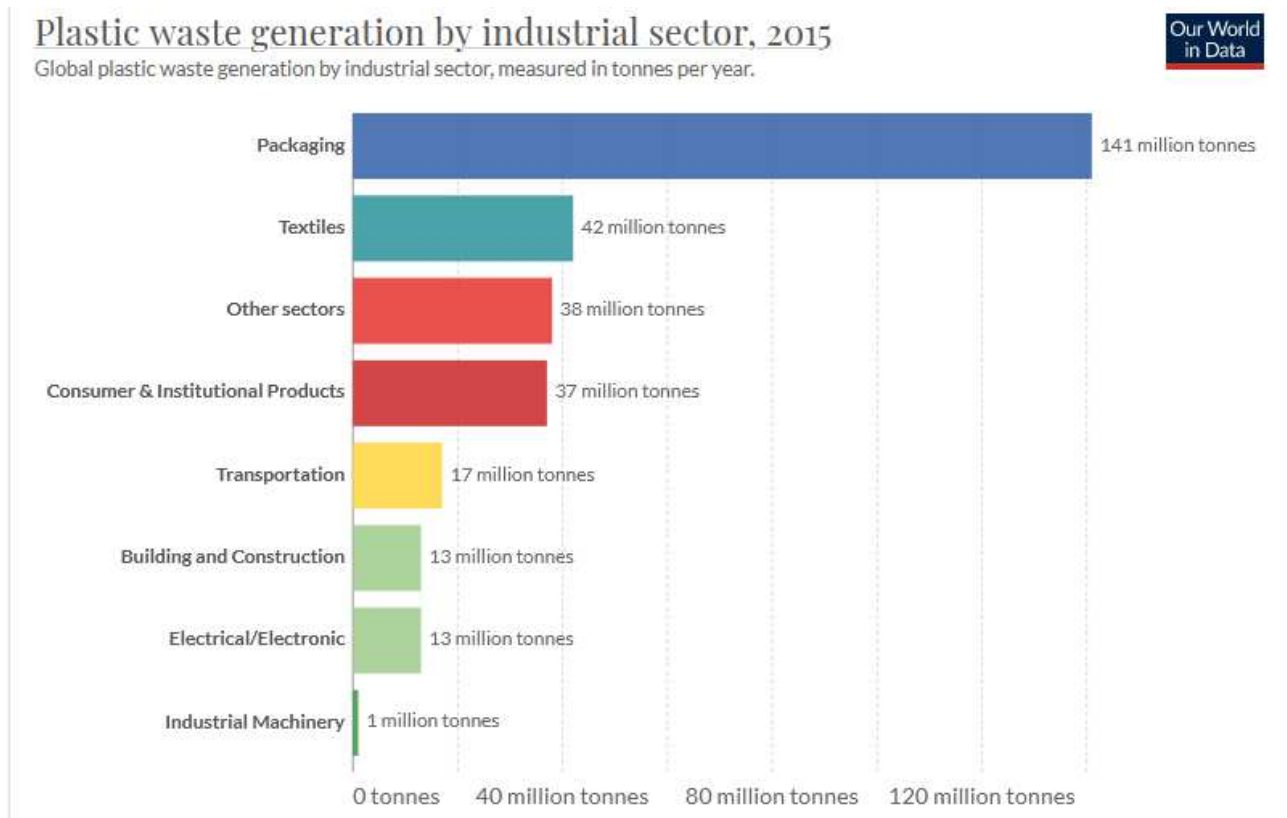
Με όλα τα παραπάνω καθίσταται κατανοητό το πλαίσιο διεξαγωγής μιας LCA. Οι πληροφορίες που παρουσιάστηκαν στα δύο προηγούμενα κεφάλαια έχουν γενικό χαρακτήρα και έχουν ως στόχο την εξοικείωση του αναγνώστη με τη μελετούμενη μέθοδο. Στη συνέχεια ακολουθούν τα κύρια αντικείμενα μελέτης της παρούσας δημοσίευσης, τα οποία αποτελούν οι παρούσες πρακτικές στην έρευνα LCA για τις πλαστικές φιάλες PET και για τον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, καθώς και τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που έχουν προκύψει.

4. Μελέτη περίπτωσης: PET

4.1 Γενικές γνώσεις

4.1.1 Γιατί PET;

Εδώ και πολλά χρόνια τα πλαστικά αποτελούν ίσως τα πλέον χρησιμοποιούμενα υλικά στη καθημερινή μας ζωή, με την παραγωγή τους να αυξάνεται συνεχώς για την ικανοποίηση των ολοένα αυξανόμενων αναγκών των καταναλωτών. Αξίζει να αναφερθεί πως παγκόσμια παραγωγή πλαστικών (πολυμερείς ρητίνες και ίνες) έφτασε τους 381 εκατομμύρια τόνους το 2015, ενώ αθροιστικά έχουν παραχθεί 7,82 δις. τόνοι πλαστικών από το 1950 μέχρι το 2015 [23]. Από την παραπάνω ποσότητα, οι 141 εκατ. τόνοι (ή το 37%) χρησιμοποιήθηκαν σε συσκευασίες.



Διάγραμμα 4.1: Γράφημα που απεικονίζει τις ποσότητες πλαστικών ανά βιομηχανικό τομέα [23].

Συνεπώς, δεν αποτελεί παράδοξο το ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας γύρω από τη διαχείριση των πλαστικών συσκευασιών. Η παρούσα δημοσίευση πραγματεύεται τις συσκευασίες φιαλών από τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET), οι οποίες είναι το πιο συχνά καταναλισκόμενο πλαστικό προϊόν, όπως αναφέρουν οι Toscano et al. (2019).

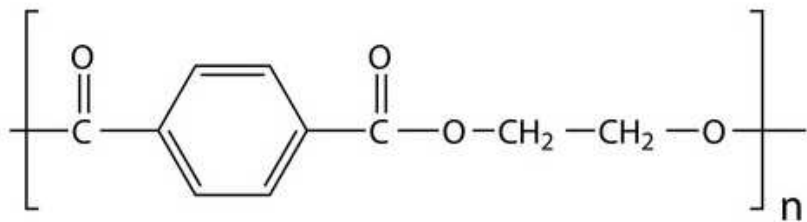
Για να καταστεί κατανοητή η σημασία του υλικού αυτού στη βιομηχανία, αρκεί να αναφερθεί πως το 2019 παρήχθησαν 12,7 εκατομμύρια τόνοι φιαλών PET παρήχθησαν παγκοσμίως. Μεταξύ αυτών, τη μεγαλύτερη ομάδα συνέστησαν οι συσκευασίες νερού, ακολουθούμενες από τις συσκευασίες ανθρακούχων αναψυκτικών, χυμών φρούτων, μπίρας και άλλων φιαλών και βάζων τροφίμων και μη τροφίμων (Balazińska et al., 2020).

Προβλέπεται ότι ακολουθώντας τα ίδια πρότυπα χρήσης, 12.000 εκατομμύρια τόνοι πλαστικών απορριμμάτων θα έχουν απορριφθεί σε χώρους υγειονομικής ταφής ή στο φυσικό περιβάλλον

έως το 2050, αριθμός υπερδιπλάσιος των εκτιμώμενων 5800 εκατομμυρίων τόνων πλαστικών απορριμμάτων που είχαν παραχθεί από πρωτογενείς πηγές έως το 2015 (Kouloumpis et al., 2020)

4.1.2 Σύσταση του υλικού

Το τereφθαλικό πολυαιθυλένιο (Polyetherene Terephthalate-PET) είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που ανήκει στην κατηγορία των πολυεστέρων. Χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή ρούχων, συσκευασιών τροφίμων, καθώς και στην κατασκευή κομματιών αυτοκινήτων. Οι ιδιότητες που το καθιστούν δημοφιλές στην παραγωγή των παραπάνω προϊόντων είναι, μεταξύ άλλων, η υψηλή του ελαστικότητα, η διαφάνειά του, και, ανάλογα με τη διαδικασία σχηματισμού του, η αντοχή του σε κρούση, καθώς και η αντοχή στη φθορά λόγω υγρασίας. Ωστόσο, η συμπεριφορά του δεν είναι καλή σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς από 60°C και πάνω η σύστασή του επηρεάζεται από κετόνες, καθώς και από αρωματικούς και χλωριούχους υδρογονάνθρακες [24].



Εικόνα 4.1: Ο χημικός τύπος του PET.

4.1.3 Πρώτες ύλες και κατασκευή

Κάθε βιομηχανική μονάδα υλοποιεί τις δικές τις πρακτικές κατά τη παραγωγή φιαλών PET, τόσο σε τεχνικό όσο και σε διαχειριστικό επίπεδο. Ωστόσο, οι πρακτικές αυτές έχουν ορισμένα θεμελιώδη κοινά χαρακτηριστικά τα οποία θα μελετηθούν στη παρούσα υποενότητα.

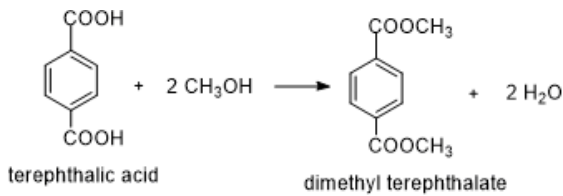
Στη περίπτωση του PET, δύο είναι οι βασικές χημικές ενώσεις που απαιτούνται για τη παραγωγή του: η **1,2 αιθανοδιόλη ή αιθυλενογλυκόλη** (ethyleneglycol-EG) και το **τερεφθαλικό οξύ** (Terephthalic Acid-TPA), ενώσεις που έχουν ως πρώτη ύλη υδρογονάνθρακες, που αποτελούν παράγωγα του πετρελαίου. Η πρώτη ένωση είναι ένα άχρωμο και άοσμο υγρό σε θερμοκρασία δωματίου (σε ατμοσφαιρική πίεση: σημείο τήξης -13°C, σημείο βρασμού 198°C [25]) ενώ η δεύτερη έχει τη μορφή λευκής κρυσταλλικής σκόνης (αποσυντίθεται στους 300°C σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης [26])

Με τις παραπάνω ουσίες διαθέσιμες καθίσταται δυνατή η κατασκευή των φιαλών PET, η οποία σε γενικές γραμμές περιλαμβάνει τα εξής στάδια: παρασκευή του πλαστικού πολυμερούς/ρητίνης, παρασκευή προμορφωμάτων και τον σχηματισμό φιαλών με καλούπια (Horowitz et al., 2018). Κάθε στάδιο αναλύεται ως εξής:

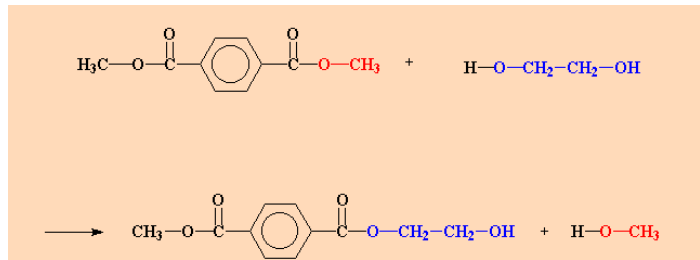
1) Παρασκευή του πολυμερούς PET [27]: Αρχικά, το τereφθαλικό οξύ συνδυάζεται με μεθανόλη για να παράγει τereφθαλικό διμεθυλεστέρα και νερό. Αυτό το προϊόν στη συνέχεια συνδυάζεται με αιθυλενογλυκόλη σε θερμοκρασία 152°C για να δημιουργήσει μια άλλη ουσία, γνωστή ως τereφθαλικό δις(2-υδροξεθύλιο) και μεθανόλη.

Έπειτα, πραγματοποιείται η διαδικασία πολυμερισμού συμπύκνωσης του Bis (2-υδροξεθύλιο) και του τereφθαλικού οξέος λαμβάνει χώρα σε κενό στους 277°C, παράγοντας αλυσίδες PET και

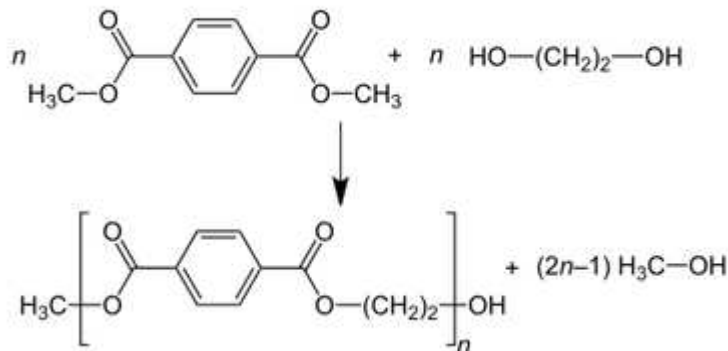
αιθυλενογλυκόλης, οι οποίες αφαιρούνται συνεχώς κατά τη διαδικασία πολυμερισμού και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή επιπλέον PET. Τέλος, η παραγόμενη ρητίνη PET κόβεται σε μικρά κομμάτια, ενώ μπορεί να αναμειχθεί με ανακυκλωμένο PET το οποίο επανεντάσσεται στο κύκλο ζωής.



Εικόνα 4.2: Χημική αντίδραση TPA με μεθανόλη για τη παραγωγή τερεφθαλικού διμεθυλεστέρα.



Εικόνα 4.3: Χημική αντίδραση τερεφθαλικού διμεθυλεστέρα με EG για τη παραγωγή τερεφθαλικού δις(2-υδροξεθυλίου).



Εικόνα 4.4: Χημική αντίδραση πολυμερισμού του τερεφθαλικού δις (2-υδροξεθύλιο) και του τερεφθαλικού οξέος για τη παραγωγή PET.

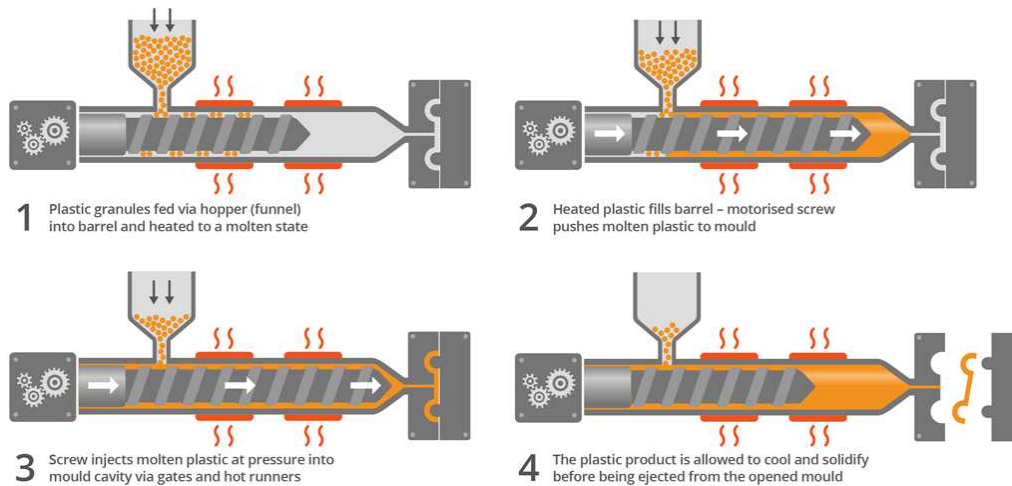
2) Παρασκευή των προμορφωμάτων: Οι κατασκευαστές των φιαλών λαμβάνουν το παραπάνω μείγμα υλικού, το οποίο θερμαίνουν στους 260°C περίπου (για φιάλες μίας χρήσης). Έπειτα, επιλέγεται μία από τις διαθέσιμες μεθόδους διαμόρφωσης σε καλούπι, με τις πιο γνωστές να αποτελούν η διαμόρφωση με εμφύσηση και η διαμόρφωση με έγχυση [28].

Διαμόρφωση με έγχυση

Τα πλαστικά σφαιρίδια εισέρχονται στο βαρέλι μιας μηχανής χύτευσης με έγχυση, όπου το πλαστικό λιώνει από τη θερμότητα και τη διάτμηση της βίδας τροφοδοσίας. Το πλαστικό στη συνέχεια εγχέεται σε καλούπια πολλαπλής κοιλότητας, όπου παίρνει το σχήμα μακρικών, λεπτών σωλήνων. Αυτοί οι σωλήνες, που ονομάζονται παρισόν, περιλαμβάνουν συνήθως τους σχηματισμένους λαιμούς και τις κλωστές που θα χρησιμοποιηθούν για να καλύψουν τα μπουκάλια που θα παραχθούν. Τα προμορφώματα αυτά, αποστέλλονται εύκολα στις εγκαταστάσεις εμφιάλωσης καθώς είναι πολύ πιο συμπαγή από τα πλήρως διαμορφωμένα μπουκάλια.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επαναθέρμανσης, τα παρισόν φορτώνονται σε έναν τροφοδότη και περνούν μέσα από έναν διαχωριστή, ο οποίος προσανατολίζει τα παρισόν για τροφοδοσία στη μηχανή χύτευσης με εμφύσηση. Τα παρισόν θερμαίνονται περνώντας από θερμαντήρες

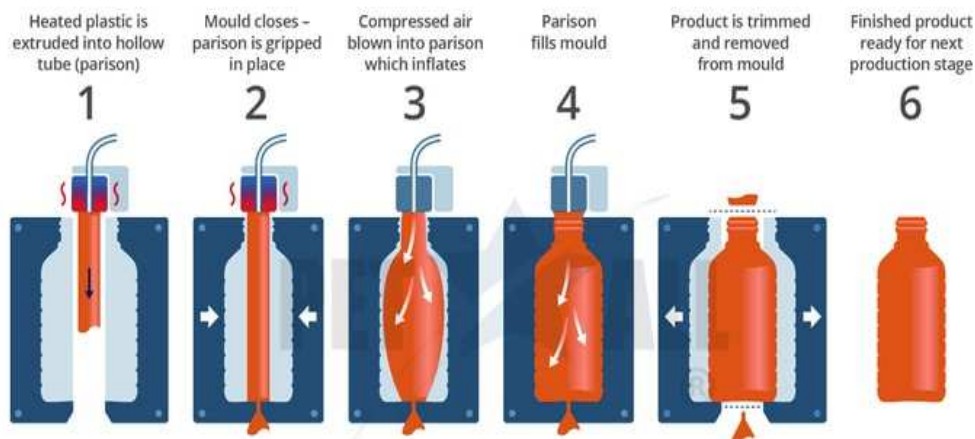
χαλαζία και στη συνέχεια εισέρχονται στο καλούπι. Εδώ, μια λεπτή χαλύβδινη ράβδος, που ονομάζεται μαντρέλα, γλιστράει στο λαιμό του παρισόν όπου το γεμίζει με αέρα υπό υψηλή πίεση και αρχίζει η χύτευση με διόγκωση: ως αποτέλεσμα του πεπιεσμένου αέρα, της θερμότητας και της πίεσης, το παρισόν διογκώνεται και τεντώνεται στο καλούπι αξονικά και ακτινικά, όπου παίρνει σχήμα μπουκαλιού. Αυτή η διαδικασία παράγει αυτό που ονομάζεται δι-αξονικά προσανατολισμένο μπουκάλι, το οποίο παρέχει ένα φράγμα CO₂ ιδανικό για ανθρακούχα ποτά.



Εικόνα 4.5: Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων διαμόρφωσης καλούπιού με έγχυση.

Διαμόρφωση με εμφύσηση

Άλλες διαδικασίες κατασκευής φιαλών συνδυάζουν το σχηματισμό των προμορφωμάτων και τη χύτευση με εμφύσηση σε μια ενιαία συνεχή διαδικασία. Ένα τέτοιο μηχάνημα είναι ένα μηχάνημα συνεχούς εξώθησης όπου ένας εξωθητής παράγει συνεχώς ένα παρισόν. Κατά τη διαδικασία χύτευσης με εξώθηση, το παρισόν σχηματίζεται κατακόρυφα και το πάχος του τοιχώματός του μεταβάλλεται αλλάζοντας το μέγεθος του στομίου μέσω του οποίου εξωθείται. Τα μισά του καλούπιού κλείνουν το παρισόν και έπειτα πραγματοποιείται η διαδικασία της διόγκωσης όπως περιγράφηκε παραπάνω.



Εικόνα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση των φάσεων διαμόρφωσης καλούπιού με εμφύσηση

3) Τελικές διεργασίες: Μετά τη διαμόρφωση της φιάλης, ακολουθούν οι διεργασίες του γεμίσματος της φιάλης και της συναρμολόγησής μαζί με τα υπόλοιπα απαραίτητα εξαρτήματα (πώμα, ετικέτα, δακτύλιος στεγανοποίησης κ.λπ).

4.1.5 Ανακύκλωση

Αφού η φιάλη PET χρησιμοποιηθεί, επακολουθεί η απόρριψή της. Παρόλο που επιλογές της υγειονομικής ταφής και της αποτέφρωσης εφαρμόζονται σε ευρεία κλίμακα, εντούτοις τα περιβαλλοντικά ζητήματα που συνεπάγεται η χρήση τους καθιστούν επιτακτική τη μεταστροφή σε περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον εναλλακτικές, ήτοι την επανένταξη των φιαλών PET σε νέο κύκλο ζωής (ανακύκλωση). Για τη διαδικασία αυτή προσφέρονται δύο τεχνολογικές εναλλακτικές: η **μηχανική** και η **χημική** ανακύκλωση.

A) Μηχανική Ανακύκλωση

Η μέθοδος της μηχανικής ανακύκλωσης αποτελεί αυτή την στιγμή τη κυρίαρχη τεχνική ανακύκλωσης των πλαστικών απορριμμάτων. Για τη μέθοδο αυτή ενδιαφέρον παρουσιάζουν μόνο τα θερμοπλαστικά υλικά, δηλαδή τα πολυμερή υλικά που μπορούν να λιώσουν και να υποστούν εκ νέου επεξεργασία, όπως είναι η χύτευση με έγχυση ή εξώθηση. Είναι μια καθιερωμένη τεχνολογία για την ανάκτηση πλαστικών όπως είναι το πολυπροπυλένιο (Polypropylene-PP), το πολυαιθυλένιο (Polyethylene-PE) ή το τереφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET).

Η διαδικασία της μηχανικής ανακύκλωσης ακολουθεί τυπικώς τα εξής στάδια [29]:

1) Συλλογή και Ταξινόμηση (Collection and Sorting): Όταν τα πλαστικά είδη μεταφέρονται σε μονάδα ανακύκλωσης πλαστικών, αρχικά ταξινομούνται πρώτα ανάλογα με τον τύπο πλαστικού. Αυτό είναι ζωτικής σημασίας, επειδή ενδεχόμενες αναμίξεις μπορεί να καταστήσουν μια παρτίδα υλικών ακατάλληλη για επανεπεξεργασία. Η ταξινόμηση γίνεται χειροκίνητα ή με μηχανές χρησιμοποιώντας τεχνολογία που αναγνωρίζει διαφορετικά είδη πλαστικών.

2) Μείωση του όγκου (Resizing-Packaging): Το επόμενο βήμα είναι η μείωση του μεγέθους των πλαστικών απορριμμάτων σε μικρότερα μεγέθη για περαιτέρω επεξεργασία και ευκολότερο χειρισμό. Η τυπική μείωση του μεγέθους των πλαστικών πραγματοποιείται με τεμαχιστές και κοκκοποιητές. Αυτά τα μηχανήματα διαθέτουν βιομηχανικές λεπίδες που εκτελούν περιστροφική κοπή για να κόψουν το πλαστικό.

3) Υγρός και ξηρός διαχωρισμός (Wet and Dry Separation): Ακολουθούν οι φάσεις χωρισμού. Μετά τη διαλογή και την κοπή, τα πλαστικά θρύμματα μπορούν να πλυθούν για να αφαιρεθούν διάφορες ακαθαρσίες, που ποικίλλουν από χαρτί και κόλλα, έως άμμο και χαλίκια. Αυτό γίνεται μέσω του ψεκασμού ζεστού νερού στο πλαστικό σε πλυντήρια και υδατόλουτρα ή δεξαμενές, στις οποίες πραγματοποιείται ο διαχωρισμός βάσει της πυκνότητας των πλαστικών (τα βαριά βυθίζονται, τα ελαφριά επιπλέουν). Χημικά, απορρυπαντικά, απολυμαντικά ή άλλα προϊόντα μπορούν να προστεθούν για να βελτιωθεί ο καθαρισμός και ο διαχωρισμός.

Έπειτα, ακολουθεί η φάση του στεγνώματος. Με διαδικασίες ξηρού διαχωρισμού, τα πλαστικά ξεχωρίζονται με βάση την ταξινόμηση του αέρα, πράγμα που σημαίνει ότι φιλτράρονται πιο λεπτά υλικά από παχιά. Επίσης, μπορεί να θερμανθεί το πλαστικό για να διαχωριστούν τα υλικά ανάλογα το σημείο τήξης, ενώ το φθορίζον ή το υπεριώδες φως βοηθά στο διαχωρισμό τους ανάλογα με το χρώμα ή την ικανότητά τους να απορροφούν το φως.

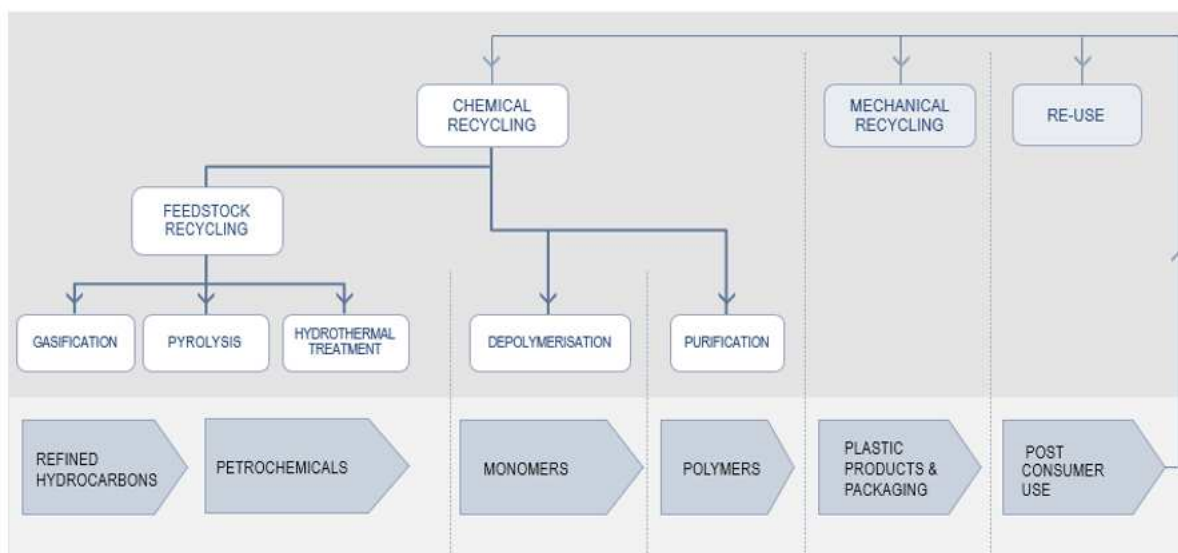
4) Σύνθεση (Compounding) Το τελευταίο βήμα στις περισσότερες διαδικασίες ανακύκλωσης πλαστικών είναι η σύνθεση, η οποία συνεπάγεται τη μετατροπή πλαστικών θρυμμάτων σε σφαιρίδια και συχνά την ενσωμάτωση στοιχείων για τη μετατροπή των ανακτημένων πλαστικών σε επαναχρησιμοποιήσιμα υλικά υψηλής ποιότητας.

Β) Χημική Ανακύκλωση

Η χημική ανακύκλωση αποτελεί έναν ευρύ όρο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια σειρά αναδυόμενων τεχνολογιών στη βιομηχανία διαχείρισης αποβλήτων που επιτρέπουν την ανακύκλωση πλαστικών στα οποία η εφαρμογή μεθόδων μηχανικής ανακύκλωσης καθίσταται δύσκολη ή μη συμφέρουσα. Στη χημική ανακύκλωση περιλαμβάνεται κάθε τεχνολογία που χρησιμοποιεί διαδικασίες ή χημικούς παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα τη χημεία των πολυμερών.

Η χημική ανακύκλωση επιτρέπει την περαιτέρω εξαγωγή αξίας από πολυμερή που έχουν εξαντλήσει το οικονομικό δυναμικό τους για μηχανική επεξεργασία. Η χημική ανακύκλωση χρησιμεύει ως εναλλακτική λύση της υγειονομικής ταφής και της αποτέφρωσης για πλαστικά προϊόντα όπως το φιλμ και πλαστικά πολλαπλών στρώσεων.

Οι τεχνολογίες εμπίπτουν σε τρεις διακριτές κατηγορίες με βάση τη θέση των εκροών τους στην αλυσίδα εφοδιασμού πλαστικών. Αυτές οι κατηγορίες είναι: αποδόμηση, αποπολυμερισμός, και ανακύκλωση σε πρώτες ύλες (θερμική μετατροπή) [30]



SOURCE: Accelerating Circular Supply Chains For Plastics – Closed Loop Partners 2018 (adaptation)

Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα ροής των διαφορετικών τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης.

1) Κάθαρση: Η καθαρισμός είναι μια διαδικασία κατά την οποία το πλαστικό διαλύεται με τη χρήση ενός κατάλληλου διαλύτη, μετά την οποία πραγματοποιείται μια σειρά σταδίων καθαρισμού για τον διαχωρισμό του πολυμερούς από πρόσθετα και μολυσματικούς παράγοντες. Μόλις τα πολυμερή διαλυθούν στον διαλύτη, μπορούν να κρυσταλλωθούν επιλεκτικά, παράγοντας καθαρά πολυμερή.

2) Αποδόμηση: Ο αποπολυμερισμός ή χημειόλυση είναι το αντίστροφο του πολυμερισμού και αποδίδει είτε μόρια μονομερών είτε μικρότερα τμήματα πολυμερών γνωστά ως ολιγομερή. Τα μονομερή είναι πανομοιότυπα με αυτά που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή πολυμερών και εξαιτίας αυτού, τα πλαστικά που παρασκευάζονται από την αποδόμηση είναι παρόμοια σε ποιότητα με τα παρθένα μονομερή. Το κύριο μειονέκτημα του χημικού αποπολυμερισμού είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε πολυμερή «συμπύκνωσης» όπως το PET και τα πολυαμίδια.

3) Ανακύκλωση σε πρώτες ύλες: Ως ανακύκλωση πρώτων υλών αναφέρεται κάθε θερμική διαδικασία που μετατρέπει τα πολυμερή σε απλούστερα μόρια, προκειμένου να σχηματιστεί η

πρώτη ύλη για πετροχημικές διαδικασίες. Οι δύο κύριες διαδικασίες εδώ είναι η πυρόλυση και η αεριοποίηση. Οι εκροές της ανακύκλωσης πρώτων υλών είναι βασικές χημικές ουσίες (π.χ. υδρογονάνθρακες ή σύνθετο αέριο), οι οποίες πρέπει να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία για να αποδώσουν ένα πολυμερές.

Εδώ ολοκληρώνεται μια σύντομη περιγραφή του κύκλου ζωής των φιαλών PET. Ξεκινώντας από τα βασικά χαρακτηριστικά του ως χημική ουσία, στη συνέχεια περιγράφηκαν τα βήματα μετουσίωσης των απαραίτητων πρώτων υλών σε τελικό προϊόν, ενώ τέλος έγινε αναφορά στις διαφορετικές μεθόδους επανεισαγωγής του σε νέο κύκλο ζωής. Όλα τα παραπάνω αποτελούν βασικές πληροφορίες για τη κατανόηση του PET ως υλικού στη διαχείριση του κύκλου ζωής του, και παρά τον συνοπτικό χαρακτήρα της περιγραφής των χαρακτηριστικών του, εκτιμάται πως αρκούν για τη προετοιμασία του αναγνώστη για την αξιολόγηση της βιβλιογραφίας που σχετίζεται με την εφαρμογή της LCA η οποία θα ακολουθήσει παρακάτω.

4.2 Συλλογή Βιβλιογραφίας

Κατά τη σύνταξη του παρόντος δημοσιεύματος θεωρήθηκε ως κρίσιμης σημασίας η συγγραφή μιας όσο το δυνατόν πληρέστερης βιβλιογραφικής ανασκόπησης πάνω στα μελετούμενα θέματα. Η διαδικασία αυτό εκπληρώνει τους εξής στόχους:

- Καθορίζεται το θεωρητικό πλαίσιο στο οποίο η μελέτη θα βασιστεί,
- Γνωστοποιείται και καθίσταται κατανοητό το state-of-the-art του αντικειμένου μελέτης, μέσω της σύνοψης και της αξιολόγησης της προηγηθείσας ερευνητικής προσπάθειας,
- Αναγνωρίζονται ελλείψεις και κενά στη βιβλιογραφία, τα οποία θα επιχειρήσουμε να πληρώσουμε με τη παρούσα μελέτη.

Η ανασκόπηση αυτή έχει δύο κύρια βήματα: τη συλλογή και την αξιολόγηση της βιβλιογραφίας. Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλυθεί η διαδικασία με την οποία πραγματοποιήθηκε το πρώτο βήμα, δηλαδή θα παρουσιαστούν οι κανόνες με τους οποίους θα ελεγχθούν οι παράγοντες συλλογής της βιβλιογραφίας, όπως είναι η χρησιμοποιούμενη βάση δεδομένων, οι επιλεγόμενες λέξεις-κλειδιά και το χρονικό εύρος αναζήτησης.

4.2.1 Μεθοδολογία συλλογής βιβλιογραφίας

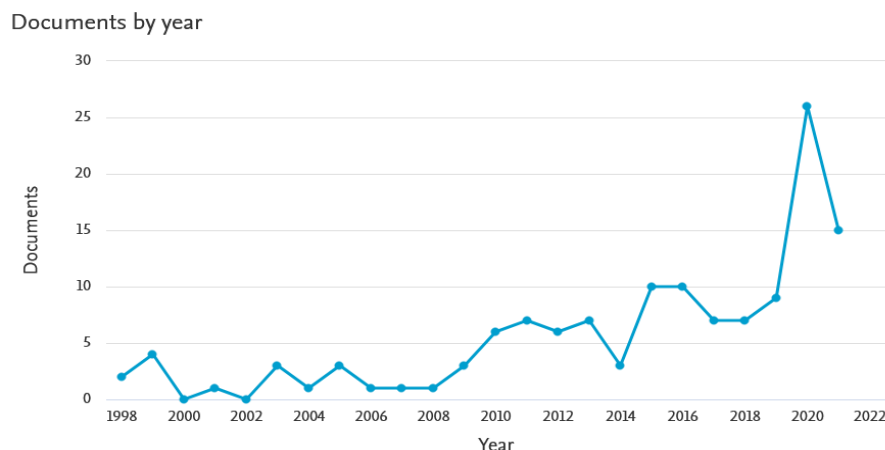
Στο πλαίσιο της μελέτης αυτής χρησιμοποιήθηκε η βιβλιογραφική βάση δεδομένων Scopus, η οποία παρέχει πρόσβαση σε περισσότερους από 25.100 τίτλους επιστημονικών περιοδικών και σειρών βιβλίων από περισσότερους από 5.000 διεθνείς εκδότες, προσφέροντας την πιο ολοκληρωμένη επισκόπηση της παγκόσμιας ερευνητικής παραγωγής στους τομείς της επιστήμης, της τεχνολογίας, της ιατρικής, της κοινωνικής επιστήμης και των τεχνών και των ανθρωπιστικών επιστημών.

Έχοντας υπόψη τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η μηχανή αναζήτησης της βάσης δεδομένων Scopus, και επιχειρώντας να εξάγουμε όσο το δυνατόν πιο σχετικές με το αντικείμενο μελέτης πηγές, αποφασίστηκε η εφαρμογή των παρακάτω λέξεων-κλειδιών:

("life cycle assessment") OR ("life cycle analysis") AND bottle* AND (plastic* OR pet)

ALL ((("life cycle assessment") OR ("life cycle analysis"))) AND bottle* AND (plastic* OR pet))

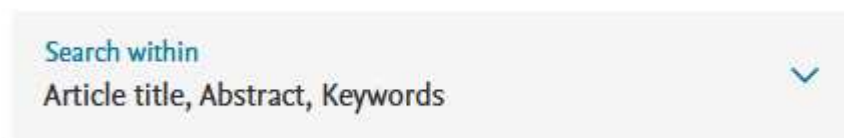
Για τη βιβλιογραφική ανασκόπηση της ανάλυσης του κύκλου ζωής των μπουκαλιών PET αποφασίστηκε το εύρος μελέτης να περιλαμβάνει τα έτη 2002-2021, καλύπτοντας μια εικοσαετία ερευνητικού έργου.



Διάγραμμα 4.3: Μεταβολή των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των μπουκαλιών PET ανά έτος.

Για τη λειτουργία της αναζήτησης βιβλιογραφικών πηγών επιλέχθηκαν τα εξής πεδία:

- Τίτλος Άρθρου (Article Title)
- Περίληψη (Abstract)
- Λέξεις-Κλειδιά (Keywords)



Εικόνα 4.7: Απεικόνιση των πεδίων αναζήτησης βιβλιογραφικών πηγών.

Μέσω αυτής της επιλογής επιχειρείται η μεγιστοποίηση του αριθμού των βιβλιογραφικών πηγών που σχετίζονται με το αντικείμενο μελέτης.

Τέλος, βήμα καίριας σημασίας για μια πλήρη βιβλιογραφική ανασκόπηση αποτελεί η μελέτη αξιολογημένων βιβλιογραφικών πηγών, οι οποίες παρουσιάζουν εμπεριστατωμένα ερευνητικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, κατά την επιλογή των κατηγοριών δημοσιεύσεων προς μελέτη επιλέχθηκε σε πρώτη φάση να αποκλειστούν οι δημοσιεύσεις και οι κριτικές από συνέδρια (Conference Papers & Conference Reviews)

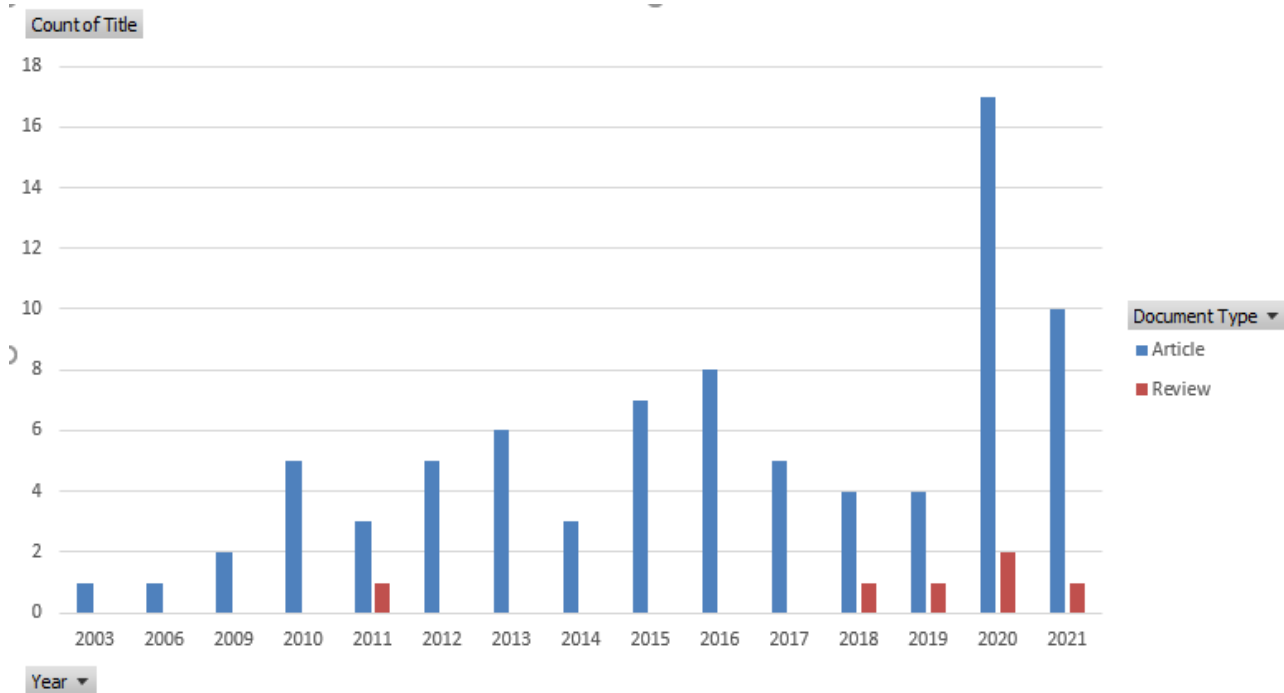
Έτσι, η αναζήτηση επικεντρώθηκε κυρίως στις εξής κατηγορίες δημοσιευμάτων:

- Επιστημονικά και ακαδημαϊκά άρθρα (Articles)
- Ανασκοπήσεις επιστημονικού πεδίου με σύστημα κριτών (Reviews)
- Κεφάλαια βιβλίων (Book Chapters)

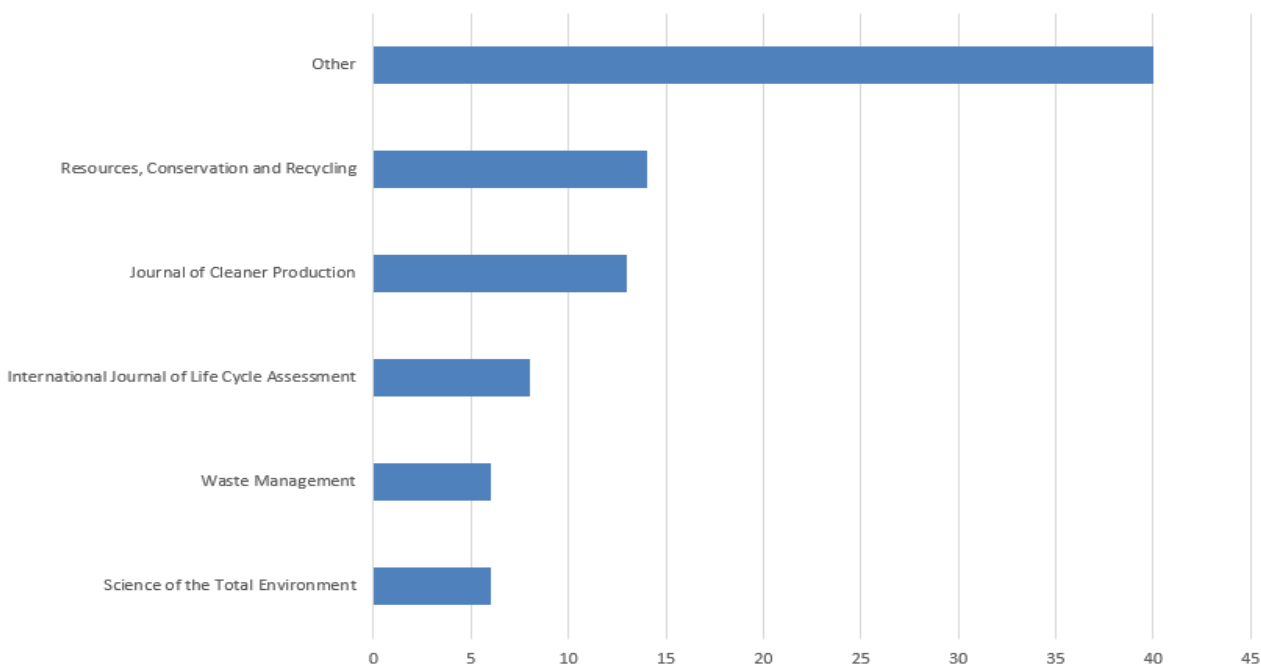
4.2.2 Αποτελέσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Στις 2/6/2021 πραγματοποιήθηκε αναζήτηση βιβλιογραφικών πηγών με τις παραπάνω επιλεγμένες λέξεις-κλειδιά και με τις αποφασισμένες μεταβλητές (χρονικό εύρος μελέτης, κατηγορίες δημοσιεύσεων, πεδία αναζήτησης). Έτσι, μετά από απόρριψη δημοσιεύσεων που δεν σχετίζονταν με το προς μελέτη θέμα, προέκυψαν 87 δημοσιεύσεις, εκ των οποίων 81 άρθρα και 6 ανασκοπήσεις.

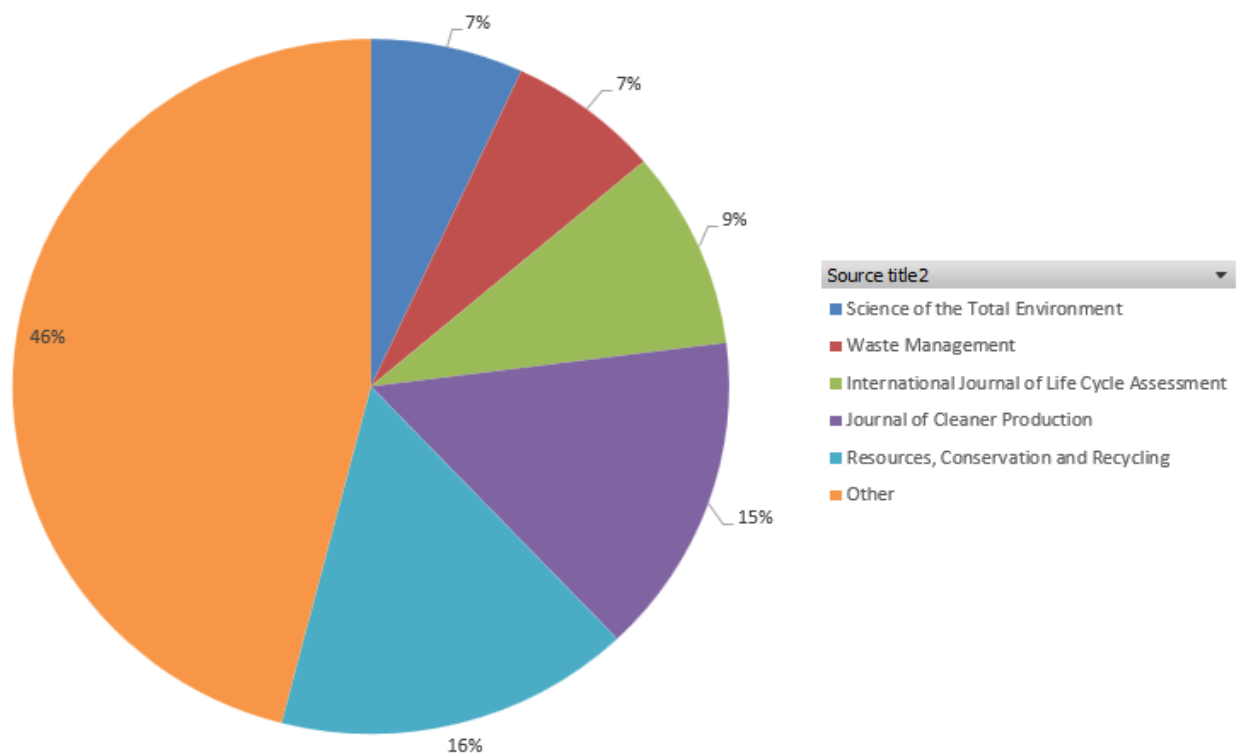
Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα στατιστικά δεδομένα που σχετίζονται με τις παραπάνω δημοσιεύσεις, καθώς και μια σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας.



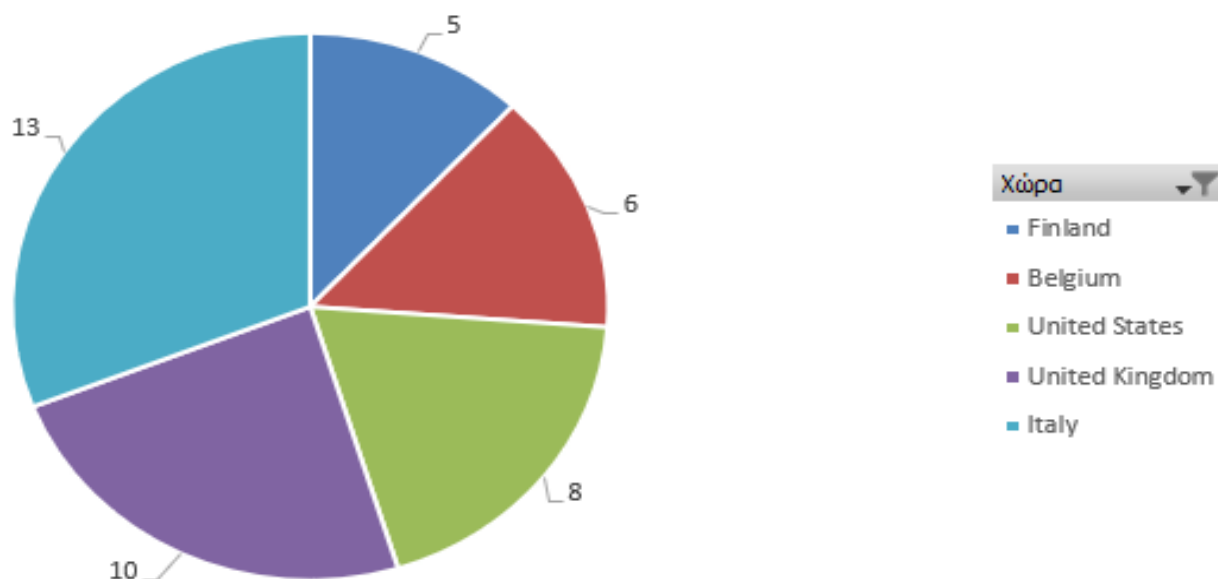
Διάγραμμα 4.4: Ταξινόμηση των δημοσιεύσεων που πραγματοποιούνται την ανάλυση κύκλου ζωής των PET ανά κατηγορία και έτος. Από αυτές, οι 45 (52%) δημοσιεύτηκαν τα τελευταία 5 έτη, στοιχείο ενδεικτικό του αυξημένου ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας για το αντικείμενο μελέτης. Ταυτόχρονα, το γεγονός πως οι 5 από τις 6 ανασκοπήσεις (reviews) έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία 4 χρόνια τα καθιστά αξιόπιστα ως προς τη σχετικότητά τους με τις τελευταίες εξελίξεις στο εκάστοτε αντικείμενο μελέτης.



Διάγραμμα 4.5: Ταξινόμηση των δημοσιεύσεων που πραγματοποιούνται την ανάλυση κύκλου ζωής των PET ανά περιοδικό δημοσίευσης, για περιοδικά με 5 ή περισσότερες δημοσιεύσεις. Στο περιοδικό “Resources, Conservation and Recycling” δημοσιεύτηκαν 14 άρθρα και reviews, τα περισσότερα από κάθε άλλο περιοδικό. Γενικά, παρατηρήθηκε μεγάλη διασπορά στις δημοσιεύσεις, με τις 40 (46%) να δημοσιεύονται σε 29 διαφορετικά περιοδικά.



Διάγραμμα 4.6: Σχηματική απεικόνιση της κατανομής των δημοσιεύσεων που πραγματοποιούνται την ανάλυση κύκλου ζωής των PET ανά περιοδικό δημοσίευσης.



Διάγραμμα 4.7: Σχηματική απεικόνιση του αριθμού των δημοσιεύσεων που πραγματοποιούνται την ανάλυση κύκλου ζωής των PET ανά χώρα του πρώτου συγγραφέα για χώρες με 5 ή περισσότερες δημοσιεύσεις. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, οι Η.Π.Α. και οι παραπάνω χώρες της Ευρώπης συνεισφέρουν τις περισσότερες δημοσιεύσεις στο παρόν αντικείμενο μελέτης.

Row Labels	Count of Index Keywords	Percentage of Publishings
Life cycle assessment	90	100,00%
Recycling	87	100,00%
Environmental impact	82	94,25%
Life cycle	70	80,46%
Polyethylene terephthalate	69	79,31%
waste management	56	64,37%
article	43	49,43%
Plastic bottles	42	48,28%
life cycle analysis	39	44,83%
incineration	28	32,18%
Bottles	26	29,89%
environmental impact assessment	25	28,74%
Environmental management	25	28,74%
Waste disposal	25	28,74%

Πίνακας 4.1: Πίνακας με τις λέξεις-κλειδιά που εμφανίζονται συχνότερα στις μελετώμενες δημοσιεύσεις, ως άθροισμα και ποσοστό του συνόλου αυτών. Εκτός των τυπικών λέξεων κλειδιών, όπως το “life-cycle-assessment”, μια ενδιαφέρουσα λέξη-κλειδί είναι το “incineration”, δηλαδή η αποτέφρωση των πλαστικών αποβλήτων, μια επιλογή EoL που εξετάζεται στη παρούσα ανασκόπηση.



Εικόνα 4.8: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας συλλογής βιβλιογραφικών πηγών που πραγματοποιούνται την ανάλυση κύκλου ζωής των PET, ξεκινώντας από τη χρήση των λέξεων-κλειδιών, συνεχίζοντας με την εφαρμογή των φίλτρων και την αξιολόγηση κατά περιεχόμενο, καταλήγοντας σε 87 σχετικές δημοσιεύσεις από 2083 που προέκυψαν από το πρώτο βήμα.

4.3 Βιβλιογραφική αξιολόγηση

Η αξιολόγηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας που σχετίζεται με την εφαρμογή της LCA σε προϊόντα PET θα πραγματοποιηθεί σε δύο μέρη: πρώτα θα εξεταστούν οι ανασκοπήσεις (reviews) και τα κεφάλαια βιβλίων και έπειτα θα εξεταστούν τα άρθρα.

4.3.1 Μελέτη των ανασκοπήσεων

Η κάθε ανασκόπηση αναμένεται να περιέχει μεγάλο όγκο πληροφοριών σχετικές με το εκάστοτε πραγματευόμενο αντικείμενο. Έτσι, ο στόχος της αξιολόγησης αποτελεί η συνοπτική παρουσίαση κάθε ανασκόπησης, εστιάζοντας στο κατά πόσο σχετίζεται με το ζήτημα που πραγματεύεται η παρούσα δημοσίευση και στα ενδεχόμενα κενά τα οποία μπορεί να περιέχει.

Γενικά, οι 6 ανασκοπήσεις που συλλέχθηκαν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σε αυτές που παρουσιάζουν το state-of-the-art της μεθόδου LCA στα πλαστικά και έχουν παγκόσμιο χαρακτήρα, και σε αυτές που πραγματεύονται ένα ειδικό ζήτημα, όπως είναι για παράδειγμα η διαδικασία αφαίρεσης των προσθέτων από τα πλαστικά (Ügdüler et al., 2020) και στις οποίες εφαρμόζεται τη μεθοδολογία LCA σε μελέτη περίπτωσης που περιέχουν. Στη πρώτη κατηγορία ανήκουν δύο ανασκοπήσεις (Gomes et al., 2019, Ramesh & Vinodt, 2020), ενώ στη δεύτερη εντάσσονται οι υπόλοιπες 4 (Ügdüler et al., 2020, Sharma et al., 2020, Cimini & Moresi, 2018, Coelho et al., 2010).

Αξιολογήσεις ερευνητικού έργου και σύγχρονες πρακτικές

Οι **Gomes et al. (2019)** εξηγούν πως οι μελέτες LCA για το υλικό PET μπορούν να χωριστούν σε δύο ομάδες. Η πρώτη περιλαμβάνει τις μελέτες στις οποίες αξιολογούνται τρόποι διαχείρισης του τέλους της ζωής των PET εναλλακτικές της υγειονομικής ταφής, ενώ στη δεύτερη εντάσσονται όσες μελέτες συγκρίνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μεταξύ διαφορετικών εναλλακτικών υλικών του PET, πλαστικών και μη-πλαστικών (στην ανασκόπηση τους εξετάζονται μόνο οι περιπτώσεις πλαστικών εναλλακτικών). Και, ενώ η ταξινόμηση αυτή έχει βάση, καθώς ένα μεγάλο μέρος της εξεταζόμενης βιβλιογραφίας συνίσταται από συγκριτικές μελέτες, δεν λαμβάνει υπόψη τις αποδοτικές (attributional) μελέτες περίπτωσης.

Από τις μελέτες της πρώτης ομάδας βγήκε πλήθος συμπερασμάτων, με κυριότερο να αποτελεί το ότι η ανακύκλωση των PET γενικά οδηγεί σε μείωση ποικίλων δεικτών κατηγοριών και ιδιαίτερα στο Δυναμικό Θέρμανσης του Πλανήτη. Αυτό την καθιστά την καλύτερη εναλλακτική, ενώ η υγειονομική ταφή είναι η χειρότερη δυνατή επιλογή. Ωστόσο, το εύρος των περιβαλλοντικών οφελών ποικίλει ανάλογα την επιλογή της μεθόδου ανακύκλωσης, με χαρακτηριστικό παράδειγμα να αποτελεί το γεγονός πως η χημική ανακύκλωση οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε σχέση με τη μηχανική.

Πίνακας 4.2: Αξιολογήσεις ερευνητικού έργου και σύγχρονες πρακτικές.

Συγγραφέας, Έτος	Τίτλος	Περιγραφή
Gomes et al., 2019	Life Cycle Assessment of Polyethylene Terephthalate Packaging: An Overview	Η δημοσίευση παρουσιάζει συνοπτικά το ερευνητικό έργο σχετιζόμενο με την εφαρμογή της μεθόδου LCA για το πλαστικό PET, εστιάζοντας στις εφαρμογές του για συσκευασίες.
Ramesh & Vinodh, 2020	State of art review on Life Cycle Assessment of polymers	Η αναφορά παραθέτει μια αξιολόγηση της βιβλιογραφίας που αφορά την LCA των πολυμερών για τα έτη 2008-2017, αξιολογώντας τη περιβαλλοντική επίπτωση διαφορετικών υλικών σε διαφορετικά σενάρια, εστιάζοντας στο όριο συστήματος cradle-to-gate.

Εξίσου αξιόλογα συμπεράσματα προκύπτουν από τις μελέτες της δεύτερης ομάδας, από την οποία προκύπτει πως το πιο συχνά συγκρινόμενο υλικό με το PET είναι το PLA, όμως σε όλες τις μελέτες σε προϊόντα συσκευασίας δεν απαιτούνταν οι μηχανικές ιδιότητες του PET, στις οποίες περιπτώσεις χρησιμοποιείται αλουμίνιο ή γυαλί. Από τις επιλογές αυτές, το PET παρουσίασε καλύτερες περιβαλλοντικές επιδόσεις σε δείκτες όπως η τοξικότητα στον άνθρωπο και η οξείδωση του εδάφους. Ωστόσο, στη σύγκριση του PET με άλλα πλαστικά σε περιπτώσεις φιαλών, και κυρίως με το PLA, τα συμπεράσματα των μελετών δεν έδειξαν καθαρή υπεροχή ενός από αυτά, με κάθε υλικό να αποδίδει καλύτερα σε διαφορετικούς δείκτες κατηγοριών (το PLA στη Κατανάλωση Ορυκτών Πόρων, το PET στην Ανθρώπινη Υγεία και Ποιότητα Οικοσυστήματος).

Με παρόμοια δομή οργανώνουν την ανασκόπησή τους και οι **Ramesh & Vinodh (2020)**, οι οποίοι ταξινόμησαν 43 μελέτες σχετικές με τη βιωσιμότητα των πολυμερών ανάλογα τη κατηγορία των εκάστοτε μελετώμενων υλικών: βιοπολυμερή, πολυμερή από ορυκτά καύσιμα, και σύνθετα. Παρατηρήθηκε πως η πλειοψηφία των ερευνητών χρησιμοποιούσαν το λογισμικό SimaPro σε συνδυασμό με τη βάση δεδομένων Ecoinvent για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών ροών, ενώ στη φάση της εκτίμησης των επιπτώσεων εφαρμόστηκαν ευρέως οι μέθοδοι Ecoindicator και οι ReCiPe (και οι δύο προσφέρουν δυνατότητες αξιολόγησης μεσαίου και τελικού σημείου).

Ταυτόχρονα, τα συμπεράσματα σχετικά με την ανακύκλωση των φιαλών PET δεν άλλαξαν στην ουσία τους, καθώς και σε αυτή τη δημοσίευση η μέθοδος αυτή προτιμάται σε σχέση με την υγειονομική ταφή ή την αποτέφρωση, αποδίδοντας καλύτερα αποτελέσματα στους δείκτες της Κλιματικής Αλλαγής, της Εξασθένησης του Όζοντος και της Θέρμανσης του Πλανήτη. Όσον αφορά τη φάση της κατασκευής των φιαλών προέκυψε πως η επιλογή του PLA οδηγεί σε μείωση της απαιτούμενης ενέργειας ανά κιλό παραγόμενου προϊόντος και σε αύξηση της απαιτούμενης γεωργικής γης.

Οι παραπάνω δύο ανασκοπήσεις λειτουργούν ως εισαγωγή στο παρόν αντικείμενο μελέτης, προσφέροντας σημαντικές γενικές πληροφορίες, οι οποίες εξοικειώνουν τον αναγνώστη με τις τωρινές προκλήσεις και εφαρμοζόμενες πρακτικές. Ωστόσο, καθώς συνήθως δεν παραθέτουν αριθμητικά δεδομένα κατά τη διατύπωση των συμπερασμάτων τους, δεν καθίσταται φανερή η επίδραση του εκάστοτε αναφερόμενου παράγοντα στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του μελετώμενου συστήματος.

Ταυτόχρονα, παρατηρήθηκε μια έλλειψη επιπλέον πληροφοριών σχετικά με τα λογισμικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, όπως τη συχνότητα εφαρμογής. Ωστόσο, μπορεί να ειπωθεί πως δόθηκε μεγάλη έμφαση στη παρουσίαση δεδομένων που αφορούν την επιλογή μεθόδου αξιολόγησης (Gomes et al., 2019, Πίνακας 2) ή, πιο συγκεκριμένα, την επιλογή δεικτών κατηγορίας (Ramesh & Vinodh, 2020, Πίνακας 1).

Ανασκοπήσεις με εφαρμογή της LCA σε ειδικά ζητήματα

Παράλληλα, η LCA εφαρμόστηκε από ερευνητές με σκοπό την αξιολόγηση μιας ή περισσότερων φάσεων κύκλου ζωής ή την εκτίμηση των επιπτώσεων σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της πρώτης περίπτωσης αποτελεί η ανασκόπηση των **Ügdüler et al. (2020)**, στην οποία παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας εξαγωγής προσθέτων από πλαστικά προς ανακύκλωση, ήτοι ουσίες οι οποίες χρησιμοποιούνται στη παραγωγή με σκοπό την απόδοση ιδιοτήτων σε αυτά, όπως είναι η αντοχή στην οξειδωση λόγω υπεριώδους ακτινοβολίας, η ενίσχυση της μηχανικής αντοχής κ.λπ. Σε αυτή τη μελέτη η LCA εφαρμόζεται ως μέρος της αξιολόγησης των διαφορετικών μεθόδων εξαγωγής, και συγκεκριμένα εφαρμόζουν μέθοδο τελικού σημείου χρησιμοποιώντας το λογισμικό OpenLCA.

Άλλο παράδειγμα, το οποίο εντάσσεται και στις δύο παραπάνω κατηγορίες, είναι η μελέτη των **Cimini & Moresi (2018)**, οι οποίοι εφαρμόζουν ένα μοντέλο LCA με σκοπό την εκτίμηση της επίδρασης διάφορων μέτρων μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα του συστήματος παραγωγής μπίρας σε ζυθοποιεία στην Ιταλία για φιάλες PET και γυαλιού. Τέλος, ως παράδειγμα της δεύτερης κατηγορίας χαρακτηρίζεται η δημοσίευση των **Coelho et al. (2010)**, η οποία έχει ως αντικείμενο μελέτης τις πρακτικές, τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες στο εφαρμοζόμενο μοντέλο διαχείρισης των φιαλών PET στη Βραζιλία.

Οι παραπάνω περιπτώσεις χρησιμεύουν ως πρακτικά παραδείγματα για τη κατανόηση του πως εφαρμόζεται μια LCA. Ταυτόχρονα, καθιστούν φανερά τα όρια και τους περιορισμούς κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης ενός συστήματος προϊόντων και τον βαθμό, στον οποίο το αντικατοπτρίζουν, προετοιμάζοντάς μας για τη μελέτη των άρθρων που επακολουθεί. Τέλος, με εξαίρεση τη μελέτη των Coelho et al. (2020), όλες οι ανασκοπήσεις έχουν δημοσιευθεί σε διάστημα το πολύ 3 ετών από την ημερομηνία συλλογής τους, γεγονός που αποτελεί ένδειξη της σχετικότητάς τους με τα σύγχρονα δεδομένα στο αντικείμενο μελέτης της παρούσας δημοσίευσης.

Πίνακας 4.3: Ανασκοπήσεις που περιλαμβάνουν εφαρμογή της LCA.

Συγγραφέας, Έτος	Τίτλος	Περιγραφή
Ügdüler et al., 2020	Challenges and opportunities of solvent-based additive extraction methods for plastic recycling	Στόχος τη δημοσίευσης αποτελεί η αξιολόγηση των τεχνικών αφαίρεσης πρόσθετων ουσιών από πλαστικά κατά τη διαδικασία ανακύκλωσής τους.
Sharma et al., 2020	Inherent roadmap of conversion of plastic waste into energy and its life cycle assessment: A frontrunner compendium	Η δημοσίευση παρουσιάζει τις σύγχρονες πρακτικές και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μετατροπής πλαστικών απορριμμάτων σε ενέργεια.
Cimini & Moresi, 2018	Mitigation measures to minimize the cradle-to-grave beer carbon footprint as related to the brewery size and primary packaging materials	Σε αυτή τη μελέτη υπολογίζεται το αποτύπωμα άνθρακα της διαδικασίας παραγωγής μπίρας σε ζυθοποιεία μικρής, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας και εκτιμάται το αποτέλεσμα εφαρμογής ενδεχόμενων μέτρων ελάττωσης αυτού.
Coelho et al., 2010	PET containers in Brazil: Opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling	Ο στόχος αυτής της δημοσίευσης αποτελεί η περιγραφή των ευκαιριών και των προκλήσεων του μοντέλου εφοδιαστικής για την ανακύκλωση φιαλών PET μετά τον καταναλωτή στη Βραζιλία, παρέχοντας παράλληλα γνώσεις για τις πρακτικές του κατά μήκος της αλυσίδας ανακύκλωσης.

4.3.2 Μελέτη των άρθρων

Από τη συλλογή της βιβλιογραφίας προέκυψαν 81 άρθρα, από το περιεχόμενο των οποίων θα προκύψουν παρατηρήσεις και συμπεράσματα για το state-of-the-art των LCA στις φιάλες PET. Η αξιολόγηση των άρθρων θα πραγματοποιηθεί μέσω της ταξινόμησής τους βάσει παραγόντων που αφορούν το περιεχόμενό τους. Αυτοί είναι: το αντικείμενο μελέτης, το όριο συστήματος, η μέθοδος LCIA και το χρησιμοποιούμενο λογισμικό.

Αντικείμενο μελέτης

Στο πρώτο στάδιο της ανασκόπησης θα εξεταστούν τα αντικείμενα μελέτης στα οποία οι ερευνητές έδειξαν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Από τα 81 άρθρα, τα 71 αποτελούν μελέτες περίπτωσης όπου η LCA εφαρμόζεται με βάση το ISO 14040 και 14044, ενώ στα υπόλοιπα 10 το αντικείμενο ποικίλει, με τις πληροφορίες και τα συμπεράσματα που προκύπτουν να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές εφαρμογές της, πάντα αναλόγως το τεχνικό και γεωγραφικό πλαίσιο του μελετούμενου συστήματος. Πιο συγκεκριμένα:

1) Οι **61 μελέτες** πραγματοποιήθηκαν τον κύκλο ζωής (ή μέρος αυτού) προϊόντων συσκευασίας PET, με τις 52 να αφορούν πλαστικές φιάλες μίας χρήσης, τις 6 να αφορούν πλαστικές συσκευασίες τροφίμων μίας χρήσης και τις 4 να αφορούν άλλες συσκευασίες, όπως είναι οι φιάλες απορρυπαντικών και οι επαναχρησιμοποιούμενες φιάλες τροφίμων (μερικές έρευνες περιείχαν περισσότερες της μίας ομάδας προϊόντων),

2) Οι **6 μελέτες** έχουν ως αντικείμενό τους τη διαχείριση άμορφου υλικού PET, είτε κατά τη φάση παραγωγής του πριν τη φάση σχηματισμού των προϊόντων (φάση πολυμερισμού) είτε κατά τη φάση ανακύκλωσής του (μηχανική ανακύκλωση σε ίνες),

3) Οι υπόλοιπες **4 μελέτες** είτε εστιάζουν σε άλλες εφαρμογές του PET, όπως αυτή των Välimäki et al. (2020), στην οποία ανακυκλωμένο PET χρησιμοποιείται στην κατασκευή οργανικών φωτοβολταϊκών, είτε πραγματοποιούν τη διαχείριση μίγματος απορριμμάτων με μέρος αυτών να αποτελούν προϊόντα PET.

Η εστίαση σε προϊόντα συσκευασιών δεν αποτελεί έκπληξη, λαμβάνοντας υπόψη την ποσότητα PET που χρησιμοποιείται σε αυτό το βιομηχανικό τομέα. Επίσης ήταν αναμενόμενη η εύρεση μελετών, οι οποίες περιελάμβαναν την LCA συσκευασιών PET μίας χρήσης και επαναχρησιμοποιούμενων. Ωστόσο, σύγκριση μεταξύ των δύο παρουσιάστηκε μόνο από τους Cottafava et al. (2020), από την οποία προέκυψε πως το επαναχρησιμοποιούμενο πλαστικό έχει καλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στους δείκτες Κλιματική Αλλαγή και Χρήση Μη Ανανεώσιμης Ενέργειας, αλλά χειρότερες όσον αφορά τον ευτροφισμό, την οξίνιση και τη χρήση νερού (βλ. Κεφ. 3.3), με τους δείκτες αυτούς να επηρεάζονται σημαντικά από την απόσταση μεταφοράς τους μετά τη χρήση για καθαρισμό τους από τους κατασκευαστές.

Ένας σημαντικός αριθμός μελετών (αφοσιώθηκαν στην εξέταση των επιπτώσεων της **χρήσης φιαλών PET ως εναλλακτική του νερού βρύσης** και το αντίστροφο (Aberilla et al., 2020, Nessi et al., 2012 & 2015, Garfí et al., 2016). Οι ερευνητές γενικά καταλήγουν σε παρόμοια συμπεράσματα, με το νερό βρύσης να συνεπάγεται τις μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ακόμα και λαμβάνοντας υπόψη τις διαδικασίες ραφινάρισμάς του (φιλτράρισμα, αφαλάτωση στη μελέτη των Aberilla et al, κ.λπ) και τις φιάλες PET μίας χρήσης να οδηγούν σε αυξημένους δείκτες επιπτώσεων, ειδικά στη μη καρκινογόνο τοξικότητα στον άνθρωπο, ενώ ενδιάμεση η λύση των επαναχρησιμοποιούμενων φιαλών, με την αύξηση του αριθμού των χρήσεων να οδηγεί σε αύξηση των σχετικών οφελών.

Η παρατήρηση των Gomes et al. (2019) επιβεβαιώνεται, καθώς η συντριπτική πλειοψηφία των μελετών περίπτωσης είχαν συγκριτικό χαρακτήρα, είτε όσον αφορά τη πρώτη ύλη είτε τη μέθοδο διαχείρισης της φάσης EoL. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του περιεχομένου βάσει του πρώτου παράγοντα παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα:

Κατηγορία υλικού	Πλαστικά					Μη πλαστικά			Άλλα
	Υλικό	PLA	HDPE	rPET	PP	BioPET	Γυαλί	Αλουμίνιο	
Αρ. Δημοσιεύσεων	12	3	5	2	6	11	5	5	6

Πίνακας 4.4: Κατανομή των παρουσιαζόμενων εναλλακτικών υλικών.

Από τον πίνακα φαίνεται το ενδιαφέρον που δείχνει η επιστημονική κοινότητα για τα βιοπολυμερή, και ειδικότερα για το πολυλακτικό οξύ (PLA), το οποίο, λόγω του ότι δεν απαιτεί ορυκτά καύσιμα ως πρώτη ύλη, αναμένεται να επιβαρύνει λιγότερο το περιβάλλον. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει για όλους τους δείκτες. Για παράδειγμα:

1) Οι Benavides et al. (2018) σε δημοσίευση με κεντρικό θέμα τη σύγκριση βιοπολυμερών και συμβατικών πολυμερών οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα πως η χρήση BioPET και rPET μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών GHG και της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων μέχρι και 82% και 56% αντίστοιχα σε μια βάση cradle-to-grave. Ωστόσο, το BioPET και rPET οδηγεί σε πολύ περισσότερη κατανάλωση νερού, λόγω των αναγκών κατά τη παραγωγή της πρώτης ύλης και τη μετατροπή της σε βιομάζα στη πρώτη περίπτωση και κατά τη φάση της ανακύκλωσης για την παραγωγή των ανακυκλωμένων φιαλών PET.

2) Οι Nikolić et al. (2015) σε μια cradle-to-gate μελέτη σύγκρισης PLA από καλαμπόκι και PET συμπέραναν πως η χρήση κόκκων PLA αντί PET είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της χρήσης μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά 9.7% και του GWP κατά 30.9%. Όμως, αναγνώρισαν ζητήματα αβεβαιότητας, όπως η αβεβαιότητα ορισμένων δεδομένων και παραδοχών που έλαβαν (π.χ υπολογισμός της πρόσληψης CO₂ από το καλαμπόκι), τα οποία ενδέχεται να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα της LCA.

Γενικά, δεν υπήρχαν πολλές μελέτες σύγκρισης του PET με άλλα μη βιοπολυμερή πλαστικά, με τις πιο συχνά εμφανιζόμενες επιλογές να αποτελούν το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) και το πολυπροπυλένιο (PP). Γενικά παρατηρήθηκε πως το PP είχε καλύτερες περιβαλλοντικές επιδόσεις σε σύγκριση με το PET και ορισμένες φορές και σε σύγκριση με το PLA (από 20 έως 60% σε τέσσερις από τους έξι περιβαλλοντικούς δείκτες στη μελέτη των Moretti et al., 2021) οι οποίες οφείλονταν στη μικρότερη πυκνότητά του (0.86 g/cm³ σε σύγκριση με το 1.3 g/cm³ του PET, Moretti et al., 2021), η οποία οδηγούσε σε μικρότερη μάζα ανά προϊόν. Όσον αφορά το HDPE, παρατηρήθηκε πως καμία από τις μελέτες στις οποίες εμφανίστηκε δεν πραγματεύονταν τον κύκλο ζωής φιαλών νερού, αλλά τη διαχείριση φιαλών άλλων τροφίμων (Agapovic et al., 2017, Bertolini et al., 2016) και απορρυπαντικών (Kim et al., 2020). Σε αυτές τις περιπτώσεις, το HDPE παρουσιάζει καλύτερες περιβαλλοντικές επιδόσεις σε σύγκριση με το PET (μέχρι και 77% χαμηλότερη βαθμολογία στον δείκτη του Δυναμικού Εξάντλησης του Όζοντος της Στρατόσφαιρας στη μελέτη των Bertolini et al., 2016).

Όσον αφορά τα μη-πλαστικά εναλλακτικά, το γυαλί ήταν η πιο δημοφιλής επιλογή σύγκρισης, με τις επιδόσεις του όμως να είναι πολύ χειρότερες αυτών του PET. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από

την υψηλή απαίτηση ενέργειας κατά την παραγωγή της φιάλης και το βάρος της στη φάση της μεταφοράς (Stefanini et al., 2020). Παράδειγμα αποτελεί η μελέτη των Garfi et al. (2015), όπου είχαμε σύγκριση διαφορετικών σεναρίων παροχής νερού, οι φιάλες νερού από γυαλί είχαν τις χειρότερες επιδόσεις σε 6 διαφορετικούς περιβαλλοντικούς δείκτες, χωρίς να έχει ληφθεί υπόψη η φάση της μεταφοράς.

Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί πως η επιλογή του υλικού της φιάλης δεν είναι ο μόνος παράγοντας που συμβάλλει στη συσκευασία τους. Για παράδειγμα, στη μελέτη των Accorsi et al. (2014), η επιλογή μεταξύ πλαστικής ή γυάλινης φιάλης συνοδευόταν με την επιλογή της δευτερεύουσας συσκευασίας, ήτοι των κουτιών εντός των οποίων μπαίνουν οι φιάλες για μεταφορά. Στη μελέτη περίπτωσης αυτή, ο συνδυασμός φιαλών rPET με χάρτινα κουτιά ήταν ο πιο περιβαλλοντικά ωφέλιμος, κυρίως λόγω της καλής συμπεριφοράς των υλικών αυτών στη φάση της ανακύκλωσης.

Όπως φάνηκε από τα παραπάνω, η επιλογή του υλικού αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στον σχεδιασμό μιας φιάλης PET, με τις διαφορετικές επιλογές να δημιουργούν πραγματικά διλήμματα όσον αφορά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπό της. Ωστόσο, ο υπολογισμός του εξαρτάται και από το επιλεγμένο συστημικό εύρος της μελέτης, δηλαδή το όριο συστήματος.

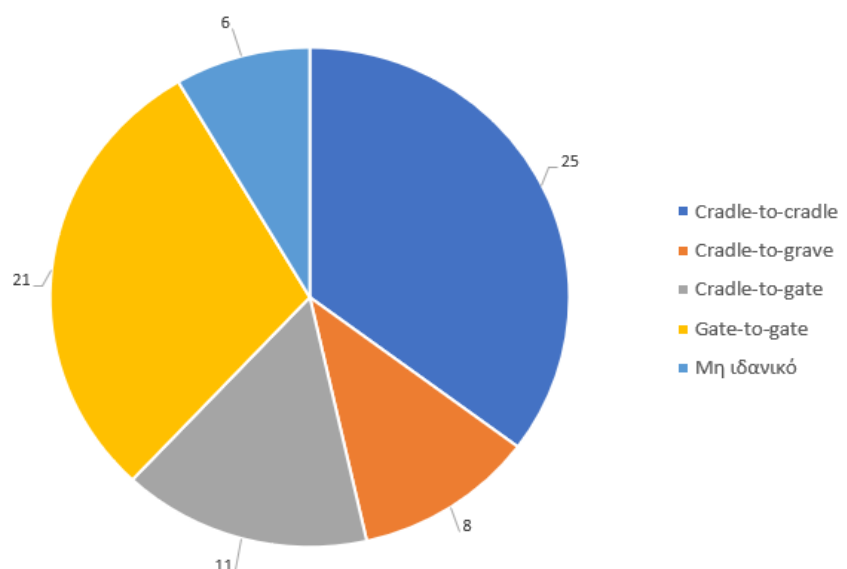
Όριο συστήματος

Το όριο συστήματος είναι η επόμενη παράμετρος που θα εξεταστεί. Γενικά η επιλογή του εξαρτάται από το γεωγραφικό εύρος της εκάστοτε μελέτης, καθώς και από τη πρόσβαση ή μη των ερευνητών σε πρωτογενή δεδομένα για τις φάσεις του κύκλου ζωής. Τα πιο κοινά όρια συστήματα ήταν το cradle-to-cradle και το gate-to-gate, με τις φάσεις της παραγωγής του εκάστοτε προϊόντος και της απόρριψής τους να εξετάζονται στη δεύτερη περίπτωση.

Συχνά οι ερευνητές οι οποίοι δήλωναν πως η LCA που διεξείγαν ήταν cradle-to-grave παραδέχονταν τη μη συμπερίληψη ορισμένων φάσεων ή διαδικασιών, με τυπικό παράδειγμα να αποτελεί η μελέτη των Shen et al. (2012), η οποία ήταν cradle-to-grave αλλά χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η φάση της χρήσης.

Συνήθως οι φάσεις της χρήσης και της μεταφοράς ήταν αυτές που δεν υπολογίζονταν στα μοντέλα LCA των μελετούμενων δημοσιεύσεων, με τα κύρια αίτια να αποτελούν η έλλειψη αξιόπιστων πρωτογενών δεδομένων και η μικρή συνεισφορά τους στις ροές εισόδου και εξόδου του συνολικού συστήματος προϊόντων. Μόνο η μελέτη των Kuczenski & Geyer (2012) εστιάζει στην επίδραση των διαδικασιών logistics στη διαχείριση φιαλών PET, με τα αποτελέσματα να δείχνουν πως απαιτείται περαιτέρω μελέτη στις επιλογές εξοικονόμησης ενέργειας και διαχείρισης υλικών στη φάση των μεταφορών.

Διάγραμμα 4.8: Γράφημα που απεικονίζει τη συχνότητα εμφάνισης των διαφορετικών ορίων συστήματος μιας LCA.



Πρέπει εδώ να αναφερθεί πως ένα μεγάλο μέρος των δημοσιεύσεων περιελάμβαναν περισσότερα από ένα όριο συστήματος, καθώς πραγματεύονταν διαφορετικά σενάρια διαχείρισης της φάσης EoL των φιαλών PET, με τον πιο κοινό συνδυασμό να αποτελούν τα όρια cradle-to-grave και cradle-to-cradle, όπου είτε συγκρίνονταν οι μέθοδοι της απόρριψης (υγειονομική ταφή ή αποτέφρωση) και της ανακύκλωσης, είτε συνδυάζονταν (Tonio et al., 2013, Ferrara et al., 2020, Foolmaun & Ramjeeawon, 2011, Shen et al., 2011 και άλλες).

Τέλος, πρέπει να γίνει αναφορά σε μια επιπλέον ταξινόμησή των δημοσιεύσεων ανάλογα τη μέθοδο ανακύκλωσης, δηλαδή διαχωρισμός τους σε **closed loop** και **open loop** μελέτες. Προέκυψε πως:

- Σε 13 μελέτες το όριο συστήματος περιελάμβανε ανακύκλωση κλειστού βρόχου,
- Σε 7 μελέτες το όριο συστήματος περιελάμβανε ανακύκλωση ανοικτού βρόχου, ενώ
- Σε 8 μελέτες μελετήθηκαν σενάρια και με τις δύο μεθόδους.

Στις υπόλοιπες μελέτες cradle-to-cradle και gate-to-gate (φάση EoL) δεν έγινε αναφορά στην επιλεγμένη μέθοδο ανακύκλωσης.

Συχνά η ανακύκλωση κλειστού βρόχου αναφερόταν ως μέθοδος αποφυγής “βαρών”, δηλαδή της ελάττωσης της παραγωγής πρωτογενών υλικών ή, στη περίπτωση της ανάκτησης ενέργειας, ελάττωση της χρήσης ηλεκτρισμού ή θερμότητας (Nessi et al., 2012, Kang et al., 2017, Cleary, 2013, Gironi et al., 2010 και άλλες), με τους Simon et al. (2016) να αναφέρουν τη διαδικασία αυτή ως “πίστωση”.

Παρατηρείται πως οι μέθοδοι ανακύκλωσης κλειστού και ανοικτού βρόχου χρησιμοποιήθηκαν αρκετές φορές σε συνδυασμό, όπως στη μελέτη των Aberilla et al., (2020), όπου μόλις το 12% του ανακυκλωμένου PET χρησιμοποιείται για την παραγωγή νέων φιαλών (δεύτερη ζωή), με το υπόλοιπο 88% να κατευθύνεται σε άλλες εφαρμογές.

Μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων

Η επόμενη παράμετρος που θα παρουσιαστεί αποτελεί η μέθοδος LCIA που εφαρμόστηκε. Γενικά, παρόλο που εφαρμόστηκαν 15 διαφορετικές μέθοδοι, οι πιο δημοφιλείς ήταν η ReCiPe (συνολικά 19 μελέτες), η Impact 2002+ και η Ecoindicator 99 (βλ. Πίνακα 4.2.2.2). Ωστόσο ίσως η πιο αξιοσημείωτη παρατήρηση αφορά την ελαστικότητα που επέδειξαν οι ερευνητές στη διαχείριση της μεθόδου. Αποτέλεσε συχνό φαινόμενο η χρήση ορισμένων από των κατηγοριών επιπτώσεων που προσέφερε κάθε μέθοδος ή η χρήση μίας ή δύο δεικτών κατηγορίας, με τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες να ήταν το **Δυναμικό Θέρμανσης του Πλανήτη** (παραδείγματα αποτελούν οι μελέτες των Häkkinen & Vares, 2010, των Nikolić et al., 2015, των Misopoulos et al., 2020 και άλλες) και η **Χρήση μη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας** (Shen et al., 2011 και άλλες).

Παράλληλα εμφανίστηκαν ορισμένες μελέτες, στις οποίες πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μεθόδων LCIA, όπως αυτή των Tonio et al. (2013), όπου οι μέθοδοι Impact 2002+ και ReCiPe (μεσαίου σημείου) συγκρίθηκαν σε μια LCA φάσης ανακύκλωσης (όριο συστήματος gate-to-gate). Ωστόσο, δεν παρουσιάστηκε μελέτη, η οποία να συγκρίνει παραπάνω από 2 μεθόδων πάνω σε ίδια δεδομένα LCI και ίδιο σύστημα προϊόντων.

Μέθοδος	Αρ. άρθρων
Επιλογή δεικτών	17
ReCiPe (Midpoint)	12
Impact 2002+	8
Ecoindicator 99	7
CML	7
ReCiPe (Endpoint)	7
TRACI	4
CML 2	4
Άλλες	12

Πίνακας 4.5: Συχνότητα εμφάνισης μεθόδων LCIA

Κατά τα άλλα, η επιλογή της μεθόδου ενδέχεται να συνδέεται και με το γεωγραφικό πεδίο εφαρμογής, όπως συμβαίνει με όλες τις μελέτες που χρησιμοποίησαν τη μέθοδο TRACI, όπου όλες πραγματοποιήθηκαν στις Η.Π.Α. (Kim et al., 2020, Winans et al., 2019, Kuczenski & Geyer, 2012, Kang et al., 2016)

Λογισμικό

Τέλος, όσον αφορά το χρησιμοποιούμενο λογισμικό, με διαφορά το πιο δημοφιλές ήταν το SimaPro, χρησιμοποιούμενο σε 35 μελέτες περίπτωσης, ακολουθούμενο από το GaBi και το OpenLCA, με 9 και 6 μελέτες αντίστοιχα. Η πιο σημαντική δημοσίευση όσον αφορά την επίδραση της επιλογής του λογισμικού στα αποτελέσματα μιας LCA αποτελεί η μελέτη των Spreck et al. (2015) στην οποία πραγματοποιείται σύγκριση των ποσοτικών αποτελεσμάτων της εφαρμογής τριών μεθόδων LCIA (Impact 2002+, ReCiPe, TRACI) μεταξύ των λογισμικών SimaPro και GaBi. Προέκυψε πως για το σύνολο υλικών και κατηγοριών επιπτώσεων υπήρχαν υπολογίσιμες διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων που εξετάστηκαν, ενώ βρέθηκε πως η πιο κοινή αιτία διαφορών μεταξύ των εφαρμογών μεθόδων LCIA σε SimaPro και GaBi ήταν η συμπερίληψη συντελεστών χαρακτηρισμού για ουσίες τις οποίες το ένα ή το άλλο λογισμικό δεν λάμβανε υπόψη.

Άλλες μελέτες και παρατηρήσεις

Παρόλο που ορισμένες δημοσιεύσεις δεν είχαν την εφαρμογή της LCA ως αντικείμενό τους, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές μπορούν να υποστηρίξουν τη μελλοντική ερευνητική προσπάθεια. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα εξής:

Οι **Iacovidou et al. (2020)** σε άρθρο τους παραθέτουν μια χρήσιμη τυπολογία για τον χαρακτηρισμό των ποιοτικών ιδιοτήτων των υλικών, συστατικών και προϊόντων (Materials, Components and Products-MCP) για την υποστήριξη αλλαγών στον τρόπο σχεδιασμού, χρήσης και διαχείρισής τους καθ'όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Αυτή η τυπολογία διακρίνει τα χαρακτηριστικά των MCP σε τρεις διαστάσεις:

1. Σύνθεσης - αναφέρεται στα εγγενή χαρακτηριστικά, φυσικά και τεχνητά (αυτά που παράγονται από τις χημικές, θερμικές και μηχανικές διεργασίες) που προσφέρουν έναν συγκεκριμένο συνδυασμό τεχνικών ιδιοτήτων σχετικών που αφορούν τη χρήση τους,

2. Συνάφειας - αναφέρεται στα χαρακτηριστικά που προκύπτουν από τις σχεδιαστικές αποφάσεις του προϊόντος που απαιτούνται για την ανάμειξη διαφορετικών υλικών για τη δημιουργία των ιδιοτήτων που σχετίζονται με μια συγκεκριμένη χρήση και για τη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των MCP, καθώς και σε πρόσθετα χαρακτηριστικά τα οποία τα καθιστούν ελκυστικά, αποδεκτά, εμπορεύσιμα κ.λπ,

3. Δυναμικού - αναφέρεται στα χαρακτηριστικά τα οποία αποκτά το προϊόν κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του με βάση τις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες και πρακτικές, πολιτιστικά πρότυπα, γεωπολιτική και οικονομική κατάσταση και εκπαίδευση.

Η παραπάνω τυπολογία εφαρμόστηκε από τους ερευνητές χρησιμοποιώντας τη φιάλη PET ως παράδειγμα. Προέκυψαν τα εξής (τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα):

Κατηγορία Χαρακτηριστικών	Χαρακτηριστικά
Σύνθεσης (εγγενείς ιδιότητες)	Ιδιότητες πολυμερούς δομής υψηλού βάρους (π.χ μηχανική αντοχή και ευελιξία)
Συνάφειας (σχεδιαστικές αποφάσεις)	Πάχος και σχήμα φιάλης, μηχανικές, οπτικές και προστατευτικές ιδιότητες που αποκτά το

	πλαστικό λόγω της διαδικασίας χύτευσής του
Δυναμικού (αποκτημένα χαρ/κά)	Επιδείνωση των ιδιοτήτων του πλαστικού της φιάλης λόγω έκθεσης σε περιβαλλοντικούς παράγοντες (θερμοκρασία, υγρασία, υπεριώδη ακτινοβολία)

Πίνακας 4.6: Παρουσίαση των χαρακτηριστικών των φιαλών PET ανά κατηγορία βάσει της τυπολογίας των Iacovidou et al. (2020).

Ως καίριας σημασίας μπορεί να χαρακτηριστεί η δημοσίευση των **Stone et al. (2020)** όπου ερευνάται η επίδραση της παραγωγής, ρήσης και απόρριψης των ινών PET στη ποιότητα των πηγών γλυκού νερού, υπογραμμίζοντας τη σημασία των μελετών LCA που εξετάζουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής προϊόντων, συμπεριλαμβανομένης της συχνά ξεχασμένης φάσης χρήσης και του τελικού προορισμού στο περιβάλλον.

Όσον αφορά ειδικούς τομείς της LCA, ενδιαφέρον παρουσιάζει η θεωρία fuson των **Collado-Ruiza και Ostad-Ahmad-Ghorabi (2009)**, η οποία, εστιάζοντας στην ανάγκη τυποποίησης της διαδικασίας ορισμού λειτουργικής μονάδας, εισάγει την ιδέα των fusons ως μια αφαίρεση ενός προϊόντος βάσει της λειτουργίας του και αντιπροσωπεύει ολόκληρο το σύνολο των προϊόντων που μοιράζονται τις παραμέτρους για τις ροές αυτής της λειτουργίας. Μέσω των fusons είναι δυνατή η ομαδοποίηση των προϊόντων των οποίων οι LCA παρουσιάζουν κοινές συμπεριφορές και τη σύγκριση νέων σε ανάπτυξη προϊόντων με τα προϊόντα της οικογένειας στην οποία ανήκει. Ωστόσο, καμία μελέτη περίπτωσης δεν εφάρμοσε τη μέθοδο αυτή, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα πως οι διαφορές στα συστήματα προϊόντων και στα γεωγραφικά εύρη εφαρμογής είναι ακόμη πολύ μεγάλα εμπόδια για την τυποποίηση φάσεων της LCA.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί πως η LCA δεν εφαρμόστηκε για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος, αλλά και για την εξέταση του κύκλου ζωής του από οικονομικής και κοινωνικής άποψης. Οι **Zhang et al. (2020)** πραγματοποίησαν μια LCA σε συνδυασμό με μια LCC (Life Cycle Costing) με στόχο την κανονικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κάθε διαδικασίας της φάσης της ανακύκλωσης φιαλών ως προς το κόστος της, ενώ οι **Foolmaun & Ramjeawon (2012)** πραγματοποίησαν μια Αξιολόγηση Βιωσιμότητας Κύκλου Ζωής (Life Cycle Sustainability Assessment-LCSA), εκτελώντας LCA, LCC και SLCA (Social LCA) και συνδυάζοντάς τες χρησιμοποιώντας ανάλυση πολλαπλών κριτηρίων.

Οι παραπάνω μελέτες εξετάζουν τον κύκλο ζωής προϊόντων ολιστικά, εξάγοντας συμπεράσματα, τα οποία έχουν τεχνοοικονομική και κοινωνική βάση και, παρά την επιπλέον πολυπλοκότητα που απαιτείται στη διαχείριση των διαφορετικών λειτουργικών μονάδων και ορίων συστήματος, εκτιμάται ότι η τυποποίηση της διαδικασίας ένωσης των τριών αξιολογήσεων είναι το επόμενο βήμα στην εξέλιξη της LCA.

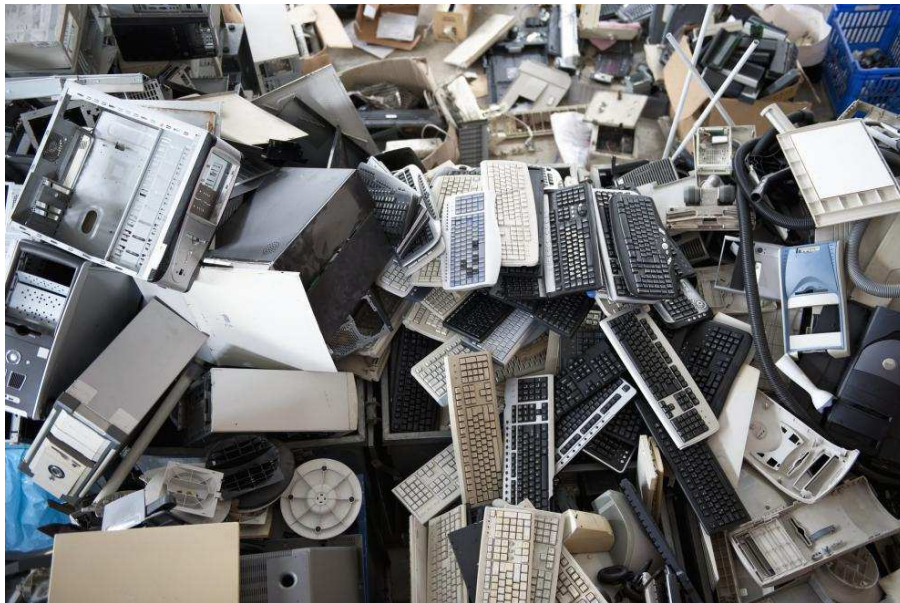
5. Μελέτη περίπτωσης: WEEE

5.1 Γενικές Γνώσεις

5.1.1 Γιατί WEEE:

Ως ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό (Electric and Electronic Equipment-EEE) ορίζουμε τον εξοπλισμό που εξαρτάται από ηλεκτρικά ρεύματα ή ηλεκτρομαγνητικά πεδία για να λειτουργήσει σωστά, καθώς και τον εξοπλισμό για την παραγωγή, μεταφορά και μέτρηση τέτοιων ρευμάτων και πεδίων (π.χ. οικιακές συσκευές, συσκευές πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών, φωτισμού, ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εργαλεία). Ο όρος “απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού” (Waste Electrical and Electronical Equipment-WEEE) αναφέρεται σε EEE των οποίων ο κύκλος ζωής έχει τελειώσει, και περιλαμβάνει το σύνολο όλων των εξαρτημάτων, υποσυστημάτων, και αναλώσιμων που είναι μέρη των προϊόντων κατά τη στιγμή απόρριψής τους (Zhang et al., 2019). Σύμφωνα με τους Teixeira et al. (2020), από τις 15 Αυγούστου 2018, τα EEE έχουν ομαδοποιηθεί σε 6 κατηγορίες, βάσει οδηγίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης:

- (i) συσκευές ελέγχου θερμοκρασίας,
- (ii) οθόνες και εξοπλισμός που περιέχει οθόνες με επιφάνεια μεγαλύτερη από 100 cm,
- (iii) λάμπες φωτός,
- (iv) μεγάλες συσκευές,
- (v) μικρές συσκευές (καμία εξωτ. διάσταση μεγαλύτερη των 50 cm) και
- (vi) μικροί υπολογιστές και συσκευές τηλεπικοινωνιών (καμία εξωτ. διάσταση μεγαλύτερη των 50 cm).



Εικόνα 5.1: Παράδειγμα WEEE από υπολογιστές και περιφερειακά εξαρτήματα [31].

Η αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών τα τελευταία έτη αποτελεί ένα κοινώς αποδεκτό φαινόμενο, έχοντας ως αναπόφευκτο αποτέλεσμα τη ραγδαία αύξηση των WEEE. Ενδεικτικά θα αναφερθεί ως παράδειγμα το γεγονός πως η αύξηση των φωτοβολταϊκών υποδομών σε όλο τον κόσμο σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη νέα χωρητικότητα εγκατάστασης έχει οδηγήσει σε τεράστιες ποσότητες φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Η συνολική ποσότητα φωτοβολταϊκών αποβλήτων που δημιουργήθηκαν παγκοσμίως, έφτασε τους 45.000 τόνους το 2016, και προβλέπεται να αυξηθεί σε 1,7 εκατομμύρια τόνους έως το 2030 (Argan et al., 2020)

5.1.2 Πρώτες ύλες

Τα ΕΕΕ αποτελούνται από διαφορετικά συστατικά, όπως σιδηρούχα και μη σιδηρούχα υλικά, γυαλί και πλαστικά, τα οποία μπορούν ενδεχομένως να ανακυκλωθούν. Πρέπει εδώ να αναφερθεί πως η σύνθεση των WEEE ποικίλλει σημαντικά ανάλογα τις λειτουργίες, τις δυνατότητες, τα εξαρτήματα και τα μοντέλα των ηλεκτρικών συσκευών. Ας δούμε ένα παράδειγμα:

Ένας τυπικός υπολογιστής αποτελείται από 50% αλουμίνιο και χάλυβα, 26% από πλαστικά, 12% από άλλα μέταλλα (χαλκός κ.λπ), ενώ το υπόλοιπο 12% συνίσταται από γυαλί LCD, εποξειδική ρητίνη και άλλα πλαστικά. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιούνται μικροποσότητες βαρέων και πολύτιμων μετάλλων, όπως ο άργυρος, ο χρυσός, το ταντάλιο και το ίνδιο.



Εικόνα 5.2: Σύσταση ενός τυπικού φορητού υπολογιστή [32].

Μεταξύ αυτών των υλικών, τα πλαστικά μέρη αντιπροσωπεύουν το 10 έως 30% των ΕΕΕ κατά βάρος, και χρησιμοποιούνται στα δομικά και λειτουργικά τους μέρη, καθώς και σε εσωτερικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα για μόνωση, μείωση θορύβου και στεγανοποίησή τους (Teixeira et al., 2020).

5.1.3 Κατασκευή

Ο όρος “ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός” περιλαμβάνει μια εκτενή ομάδα προϊόντων, το κάθε ένα από τα οποία κατασκευάζεται με διαφορετικές μεθόδους και απαιτεί διαφορετικά εξαρτήματα. Έτσι, καθίσταται αδύνατη η περιγραφή της φάσης της κατασκευής καθενός από αυτά

στη παρούσα δημοσίευση. Ωστόσο, θεωρείται σωστό εδώ να παρατεθούν ορισμένες αναφορές στη βιβλιογραφία, οι οποίες θα συμβάλλουν στην κατανόηση του παρόντος αντικειμένου.

Γενικά, τα προϊόντα ΕΕΕ κατασκευάζονται μέσω των διαδικασιών που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2.2 της παρούσας δημοσίευσης. Εδώ ως παράδειγμα θα γίνει αναφορά σε ένα εξαρτήμα απαραίτητο για τη λειτουργία των προϊόντων ηλεκτρονικού εξοπλισμού: **στις πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος.**

Οι πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Boards-PCBs) είναι πλατφόρμες πάνω στις οποίες τοποθετούνται εξαρτήματα όπως τσιπ ημιαγωγών και πυκνωτές και έχει ως λειτουργία τη παροχή ηλεκτρικής διασύνδεσης μεταξύ εξαρτημάτων. Τα PCBs μπορούν να έχουν πολλαπλό αριθμό επιφανειών με λειτουργικές συνδέσεις, με τις επιφάνειες αυτές να αναφέρονται ως στρώσεις.

Οι κύριες διεργασίες κατασκευής των PCBs είναι οι εξής: διάτρηση, μεταφορά εικόνας και ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση.



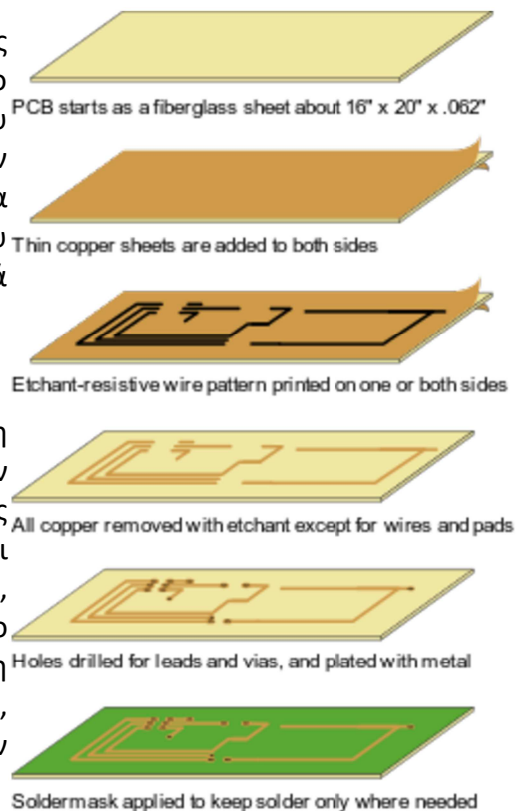
Εικόνα 5.3: Πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος.

1) Διάτρηση:

Ξεκινώντας από ένα φύλλο υαλοβάμβακα με στρώσεις χαλκού και στις δύο κάθετες επιφάνειές του, το πρώτο βήμα αποτελεί η διάνοιξη διαμπερών οπών που απαιτούνται για τη σύνδεση απαγωγών εξαρτημάτων μεταξύ τους. Έπειτα, προκειμένου οι διαμπερείς οπές να συνδεθούν ηλεκτρικά με διαφορετικά στρώματα του PCB, ένα λεπτό στρώμα χαλκού εναποτίθεται χημικά στις διαμπερείς οπές.

2) Μεταφορά εικόνας

Για να μεταφερθεί το ζητούμενο σχέδιο PCB στη πλακέτα, εφαρμόζεται φωτοευαίσθητο υλικό στον πίνακα, καλύπτοντας ολόκληρη την περιοχή της πλακέτας. Στη συνέχεια, ένα φιλμ χαλκού που περιέχει το ζητούμενο σχέδιο τοποθετείται πάνω από τον πίνακα, ενώ μια πηγή φωτός UV υψηλής έντασης εκθέτει το ακάλυπτο τμήμα του φωτοευαίσθητου φιλμ. Στη συνέχεια αφαιρείται χημικώς το μη εκτεθειμένο φιλμ, δημιουργώντας τα ίχνη χαλκού που θα σχηματίσουν τους συνδέσμους μεταξύ των οπών.



Εικόνα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση των βασικών διεργασιών κατασκευής PCBs.

3) Ηλεκτρολυτική επιμετάλλωση

Ακολουθεί μια ηλεκτροχημική διαδικασία που δημιουργεί ένα πάχος χαλκού στις οπές και στην επιφάνεια του PCB. Μόλις δημιουργηθεί το πάχος του χαλκού στο κύκλωμα και στις τρύπες,

απλώνεται και επιπλέον στρώμα κασσίτερου στην εκτεθειμένη επιφάνεια. Έπειτα, αφαιρείται το υπόλοιπο φωτοευαίσθητο φιλμ από τον πίνακα. Τέλος, ο χαλκός που μόλις εκτέθηκε αφαιρείται χημικά από το πάνελ. Ο κασσίτερος που εφαρμόστηκε προηγουμένως προστατεύει το επιθυμητό κύκλωμα χαλκού από την χάραξη. Σε αυτό το σημείο το βασικό κύκλωμα του PCB είναι έτοιμο [33].

Βήματα που μπορεί να ακολουθήσουν περιλαμβάνουν την **επικάλυψη της πλακέτας με μια υγρή στρώση μάσκας συγκόλλησης** για να προστατεύει το μεγαλύτερο μέρος του κυκλώματος χαλκού από οξείδωση, πιθανή καταστροφή και διάβρωση καθώς και να διατηρεί την απομόνωση των κυκλωμάτων κατά τη συναρμολόγηση, την **εκτύπωση των χαρακτηρισμών αναφοράς, των λογότυπων και άλλων πληροφοριών** που περιέχονται στα ηλεκτρονικά αρχεία στον πίνακα, Το τελικό φινίρισμα επιφάνειας εφαρμόζεται στη συνέχεια στα πάνελ καθώς και το φινίρισμα επιφάνειας (με κασσίτερο, μόλυβδο, ασήμι και χρυσό στις συγκολλησιμες επιφάνειες) μέσω του οποίου προστατεύεται ο χαλκός από την οξείδωση.

5.1.4 Ανακύκλωση

Όπως και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, η παρουσίαση των τεχνολογιών και των πρακτικών διαχείρισης των ηλεκτρονικών αποβλήτων αποτελούν ένα περίπλοκο και πολυεπίπεδο ζήτημα, του οποίου το εύρος καθίσταται αδύνατο να καλυφθεί στα πλαίσια της παρούσας δημοσίευσης. Παρόλα αυτά θεωρείται πρόβλημα εδώ να παρατεθούν ορισμένες αναφορές στη βιβλιογραφία, οι οποίες θα συμβάλλουν στη κατανόηση του παρόντος αντικειμένου:

Το εγχειρίδιο των Prasad et al. (2019) προσφέρει μια παρουσίαση των μεθόδων διαχείρισης ηλεκτρονικών αποβλήτων, περιλαμβάνοντας επίσης παραδείγματα και δεδομένα που αποκαλύπτουν τη γεωγραφία των ροών ηλεκτρονικών αποβλήτων σε παγκόσμιο, εθνικό και τοπικό επίπεδο. Ταυτόχρονα, το βιβλίο του Kaya (2018) και η ανασκόπηση των Ghosh et al. (2015) περιέχει πλήθος πληροφοριών σχετικά με τις τεχνολογίες και τις πρακτικές που εφαρμόζονται στη διαχείριση της φάσης EoL των PCBs.

Συνεχίζοντας το παραπάνω παράδειγμα των PCBs, τα κύρια βήματα διαχείρισης της φάσης EoL τους είναι τα εξής: **προπαρασκευαστικές διαδικασίες** που περιλαμβάνουν αποσυναρμολόγηση των PCBs και φυσικό διαχωρισμό μεταλλικών και μη μεταλλικών θραυσμάτων, **ανάκτηση μη μεταλλικών υλικών** (όπως πολυμερή) μέσω φυσικών και χημικών διεργασιών, καθώς **διαχωρισμός και ανάκτηση μετάλλων** με την εφαρμογή θερμικών, υδρομεταλλουργικών και ηλεκτροχημικών διαδικασιών (Ghosh et al., 2015).

Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών των ΕΕΕ. Ξεκινώντας από τα βασικά χαρακτηριστικά τους ως προϊόντα, στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα στάδια κατασκευής και ανακύκλωση των PCBs, χρησιμοποιώντας τα ως παράδειγμα για τη κατάδειξη της περιπλοκότητας και του εύρους του αντικειμένου της κατασκευής και διαχείρισης EoL των ΕΕΕ. Όλα τα παραπάνω αποτελούν βασικές πληροφορίες για τη κατανόηση της αξίας των WEEE ως προϊόν σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο και εκτιμάται πως αρκούν για τη προετοιμασία του αναγνώστη για την αξιολόγηση της βιβλιογραφίας που σχετίζεται με την εφαρμογή της LCA, η οποία θα ακολουθήσει παρακάτω.

5.2 Συλλογή της βιβλιογραφίας

Κατά τη σύνταξη του παρόντος δημοσιεύματος θεωρήθηκε ως κρίσιμης σημασίας η συγγραφή μιας όσο το δυνατόν πληρέστερης βιβλιογραφικής ανασκόπησης πάνω στα μελετούμενα θέματα. Η διαδικασία αυτή εκπληρώνει τους εξής στόχους:

- Καθορίζεται το θεωρητικό πλαίσιο στο οποίο η μελέτη θα βασιστεί.
- Γνωστοποιείται και καθίσταται κατανοητό το state-of-the-art του αντικειμένου μελέτης, μέσω της σύνοψης και της αξιολόγησης της προηγηθείσας ερευνητικής προσπάθειας.
- Αναγνωρίζονται ελλείψεις και κενά στη βιβλιογραφία, τα οποία θα επιχειρήσουμε να πληρώσουμε με την παρούσα μελέτη.

Η ανασκόπηση αυτή έχει δύο κύρια βήματα: τη συλλογή και την αξιολόγηση της βιβλιογραφίας. Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλυθεί η διαδικασία με την οποία πραγματοποιήθηκε το πρώτο βήμα, δηλαδή θα παρουσιαστούν οι κανόνες με τους οποίους θα ελεγχθούν οι παράγοντες συλλογής της βιβλιογραφίας, όπως είναι η χρησιμοποιούμενη βάση δεδομένων, οι επιλεγόμενες λέξεις-κλειδιά και το χρονικό εύρος αναζήτησης.

5.2.1 Μεθοδολογία συλλογής βιβλιογραφίας

Στο πλαίσιο της μελέτης αυτής χρησιμοποιήθηκε η βιβλιογραφική βάση δεδομένων Scopus, η οποία παρέχει πρόσβαση σε περισσότερους από 25.100 τίτλους επιστημονικών περιοδικών και σειρών βιβλίων από περισσότερους από 5.000 διεθνείς εκδότες, προσφέροντας την πιο ολοκληρωμένη επισκόπηση της παγκόσμιας ερευνητικής παραγωγής στους τομείς της επιστήμης, της τεχνολογίας, της ιατρικής, της κοινωνικής επιστήμης και των τεχνών και των ανθρωπιστικών επιστημών.

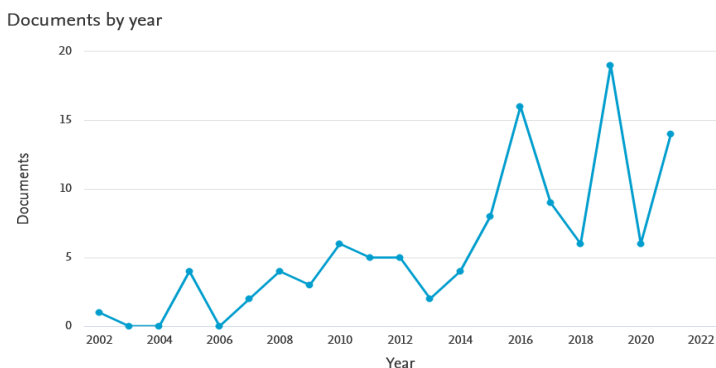
Έχοντας υπόψη τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η μηχανή αναζήτησης της βάσης δεδομένων Scopus, και επιχειρώντας να εξάγουμε όσο το δυνατόν πιο σχετικές με το αντικείμενο μελέτης πηγές, αποφασίστηκε η εφαρμογή των παρακάτω λέξεων-κλειδιών:

("life cycle assessment") OR ("life cycle analysis")) AND ("waste electrical and electronic equipment") OR WEEE OR ("waste electrical equipment") OR ("waste electronic equipment"))

ALL((("life cycle assessment") OR ("life cycle analysis"))) AND (("waste electrical and electronic equipment") OR weee OR ("waste electrical equipment") OR ("waste electronic equipment")))

Όσον αφορά την ανάλυση του κύκλου ζωής των WEEE, παρατηρήθηκε μια μεγάλη αύξηση στον αριθμό των δημοσιεύσεων μετά το 2015. Ωστόσο για λόγους πληρότητας βιβλιογραφίας κρίθηκε σωστό να περιληφθούν οι δημοσιεύσεις όλων των ετών, δηλαδή από το 2002 έως το 2021.

Διάγραμμα 5.1: Μεταβολή των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE ανά έτος.



Για τη λειτουργία της αναζήτησης βιβλιογραφικών πηγών επιλέχθηκαν τα εξής πεδία:

- Τίτλος Άρθρου (Article Title)
- Περίληψη (Abstract)
- Λέξεις-Κλειδιά (Keywords)

Search within ▼

Article title, Abstract, Keywords

Εικόνα 5.5: Παρουσίαση των πεδίων αναζήτησης βιβλιογραφικών πηγών.

Μέσω αυτής της επιλογής επιχειρείται η μεγιστοποίηση του αριθμού των βιβλιογραφικών πηγών που σχετίζονται με το αντικείμενο μελέτης.

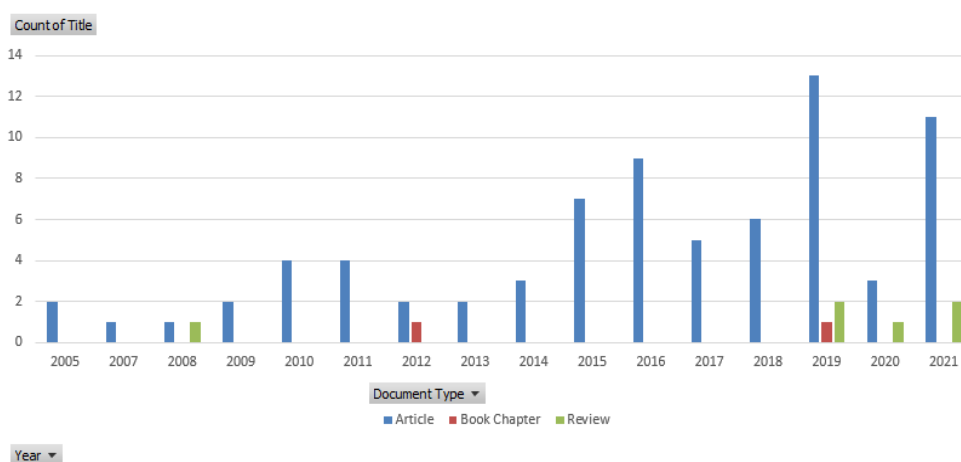
Βήμα καίριας σημασίας για μια πλήρη βιβλιογραφική ανασκόπηση αποτελεί η μελέτη αξιολογημένων βιβλιογραφικών πηγών, οι οποίες παρουσιάζουν εμπεριστατωμένα ερευνητικά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, κατά την επιλογή των κατηγοριών δημοσιεύσεων προς μελέτη επιλέχθηκε σε πρώτη φάση να αποκλειστούν οι δημοσιεύσεις και οι κριτικές από συνέδρια (Conference Papers & Conference Reviews). Έτσι, η αναζήτηση επικεντρώθηκε κυρίως στις εξής κατηγορίες δημοσιευμάτων:

- Επιστημονικά και ακαδημαϊκά άρθρα (Articles)
- Ανασκοπήσεις επιστημονικού πεδίου με σύστημα κριτών (Reviews)
- Κεφάλαια βιβλίων (Book Chapters)

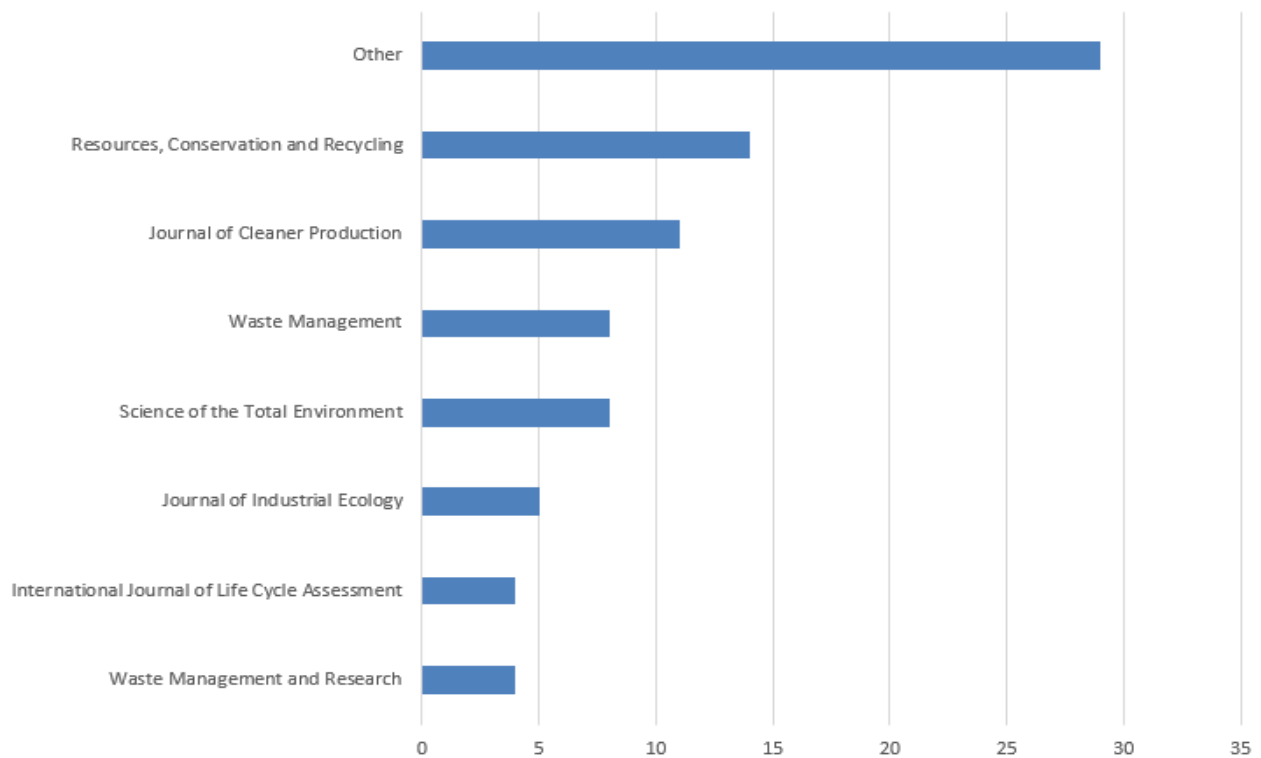
5.2.2 Αποτελέσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Στις 2/6/2021 πραγματοποιήθηκε αναζήτηση βιβλιογραφικών πηγών με τις παραπάνω επιλεγμένες λέξεις-κλειδιά και με τις αποφασισμένες μεταβλητές (χρονικό εύρος μελέτης, κατηγορίες δημοσιεύσεων, πεδία αναζήτησης). Έτσι, μετά από απόρριψη δημοσιεύσεων που δεν σχετίζονταν με το προς μελέτη θέμα, προέκυψαν 83 δημοσιεύσεις, εκ των οποίων 75 είναι άρθρα, 6 είναι ανασκοπήσεις και 2 είναι κεφάλαια βιβλίων.

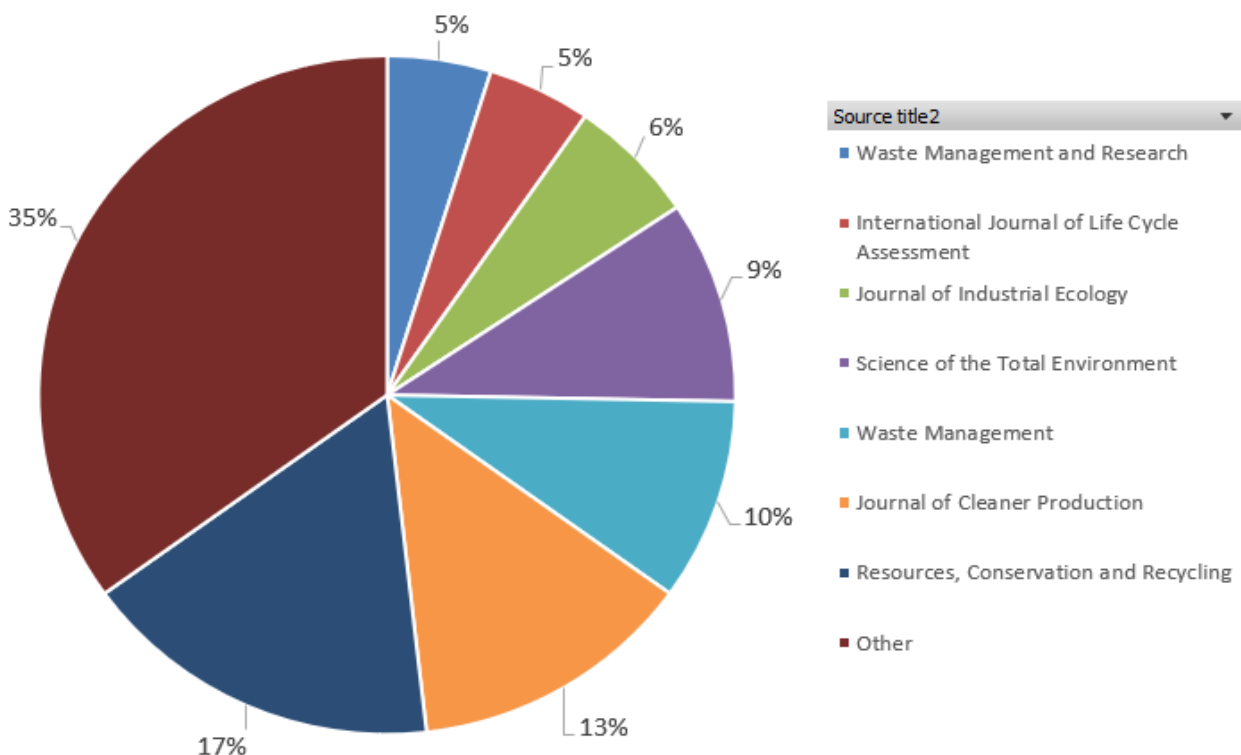
Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα στατιστικά δεδομένα που σχετίζονται με τις παραπάνω δημοσιεύσεις, καθώς και μια σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας:



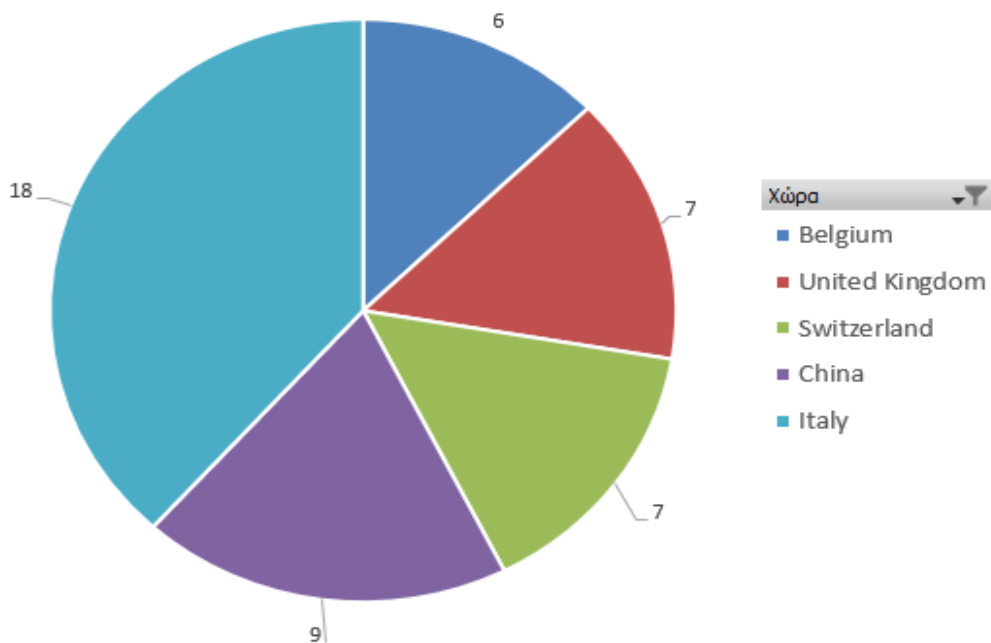
Διάγραμμα 5.2: Ταξινόμηση των δημοσιεύσεων που πραγματεύονται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE ανά κατηγορία και έτος. Από αυτές, οι 53 (64%) δημοσιεύτηκαν τα τελευταία 6 έτη, στοιχείο ενδεικτικό του αυξημένου ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας για το αντικείμενο μελέτης. Ταυτόχρονα, το γεγονός πως οι 5 από τις 6 ανασκοπήσεις (reviews) έχουν δημοσιευθεί τα τελευταία 3 χρόνια τα καθιστά αξιόπιστα ως προς τη σχετικότητά τους με τις τελευταίες εξελίξεις στο εκάστοτε αντικείμενο μελέτης.



Διάγραμμα 5.3: Ταξινόμηση των δημοσιεύσεων που πραγματοποιούνται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE ανά περιοδικό δημοσίευσης, για περιοδικά με 4 ή περισσότερες δημοσιεύσεις. Στο περιοδικό “Resources, Conservation and Recycling” δημοσιεύτηκαν 14 άρθρα και reviews, τα περισσότερα από κάθε άλλο περιοδικό. Γενικά, παρατηρήθηκε μεγάλη διασπορά στις δημοσιεύσεις, με τις 29 (35%) να δημοσιεύονται σε 25 διαφορετικά περιοδικά.



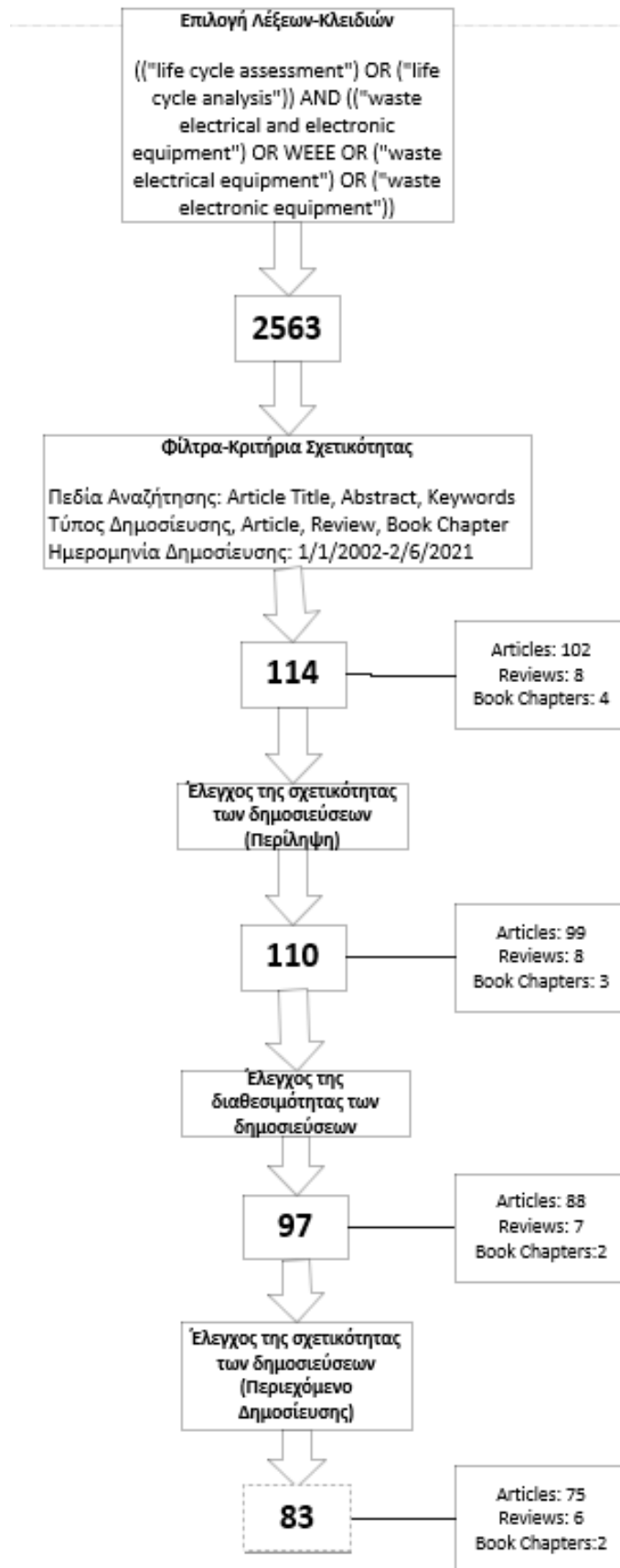
Διάγραμμα 5.4: Σχηματική απεικόνιση της κατανομής των δημοσιεύσεων που πραγματοποιούνται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE ανά περιοδικό δημοσίευσης.



Διάγραμμα 5.5: Σχηματική απεικόνιση του αριθμού των δημοσιεύσεων που πραγματοποιούνται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE ανά χώρα του πρώτου συγγραφέα για χώρες με 5 ή περισσότερες δημοσιεύσεις. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, η Κίνα και οι παραπάνω χώρες της Ευρώπης συνεισφέρουν τις περισσότερες δημοσιεύσεις στο παρόν αντικείμενο μελέτης.

Row Labels	Count of Index Keywords	Percentage of Publishings
environmental impact assessment	25	30,12%
Environmental management	27	32,53%
waste disposal	29	34,94%
life cycle assessment	39	46,99%
Article	40	48,19%
Oscillators (electronic)	41	49,40%
life cycle analysis	42	50,60%
Waste electrical and electronic equipment	42	50,60%
Life Cycle Assessment (LCA)	46	55,42%
Electronic equipment	51	61,45%
Life cycle	71	85,54%
Environmental impact	72	86,75%
Waste management	73	87,95%
Electronic Waste	88	100,00%
Recycling	103	100,00%

Πίνακας 5.1: Πίνακας με τις λέξεις-κλειδιά που εμφανίζονται συχνότερα στις μελετώμενες δημοσιεύσεις, ως άθροισμα και ποσοστό του συνόλου αυτών. Η πλειοψηφία αυτών αποτελούν όρους που απαντώνται στο λεξιλόγιο της μεθόδου LCA, με εξαίρεση τον όρο “ταλαντωτής” (oscillators), ένα εξάρτημα που απαντάται σε προϊόντα ηλεκτρονικού εξοπλισμού.



Εικόνα 5.6: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας συλλογής βιβλιογραφικών πηγών που πραγματοποιούνται την ανάλυση κύκλου ζωής των WEEE, ξεκινώντας από τη χρήση των λέξεων-κλειδίων, συνεχίζοντας με την εφαρμογή των φίλτρων και την αξιολόγηση κατά περιεχόμενο, καταλήγοντας σε 83 σχετικές δημοσιεύσεις από 2563 που προέκυψαν από το πρώτο βήμα.

5.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η αξιολόγηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας που σχετίζεται με την εφαρμογή της LCA σε WEEE θα πραγματοποιηθεί σε δύο μέρη: πρώτα θα εξεταστούν οι ανασκοπήσεις (reviews) και τα κεφάλαια βιβλίων και έπειτα θα εξεταστούν τα άρθρα.

5.3.1 Μελέτη των ανασκοπήσεων

Η κάθε ανασκόπηση αναμένεται να περιέχει μεγάλο όγκο πληροφοριών σχετικές με το εκάστοτε πραγματευόμενο αντικείμενο. Έτσι, ο στόχος της αξιολόγησης αποτελεί η συνοπτική παρουσίαση κάθε ανασκόπησης, εστιάζοντας στο κατά πόσο σχετίζεται με το ζήτημα που πραγματεύεται η παρούσα δημοσίευση και στα ενδεχόμενα κενά τα οποία μπορεί να περιέχει.

Γενικά, οι ανασκοπήσεις που συλλέχθηκαν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σε αυτές που παρουσιάζουν το state-of-the-art της μεθόδου LCA στα WEEE και έχουν γενικό χαρακτήρα, και σε αυτές που πραγματεύονται ένα ειδικό ζήτημα και στις οποίες εφαρμόζεται τη μεθοδολογία LCA σε μελέτη περίπτωσης που περιέχουν.

Εισαγωγικές-Τεχνικές γνώσεις

Προτού γίνει αξιολόγηση των ανασκοπήσεων θα πρέπει να γίνει αναφορά στα δύο κεφάλαια βιβλίων που προέκυψαν από τη συλλογή της βιβλιογραφίας, το κεφάλαιο 2 του βιβλίου των **Bazargan et al. (2012)**, το οποίο πραγματεύεται τις τεχνικές και τις προκλήσεις που αφορούν την ανακύκλωση ηλεκτρονικών αποβλήτων, καθώς και το κεφάλαιο 1 του βιβλίου των **Kaya et al. (2018)**, το οποίο αποτελεί μια εισαγωγή στον ορισμό, τα βασικά χαρακτηριστικά και τον ρόλο της LCA στην περιβαλλοντική αξιολόγηση των ηλεκτρονικών αποβλήτων.

Και τα δύο κεφάλαια λειτουργούν ως χρήσιμα εγχειρίδια κατά τη μελέτη της βιβλιογραφίας, στα οποία μπορεί ο εκάστοτε ερευνητής να απευθύνεται σε περίπτωση έλλειψης τεχνικών γνώσεων που αφορούν ορισμένες διεργασίες, όπως είναι η πυρόλυση. Έχοντας λοιπόν τα παραπάνω καθίσταται δυνατή η μελέτη των ανασκοπήσεων.

Αξιολογήσεις ερευνητικού έργου και σύγχρονες πρακτικές

Η πρώτη δημοσίευση που πρέπει να μελετηθεί είναι η ανασκόπηση των **Zhang et al. (2019)**, μια βιβλιομετρική ανάλυση, στην οποία εξετάζονται οι ερευνητικές τάσεις στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά απόβλητα βάσει παραγόντων, όπως ο αριθμός δημοσιεύσεων ανά έτος και περιοδικό, η συχνότητα εμφάνισης λέξεων-κλειδιών και άλλων. Όσον αφορά τη περιβαλλοντική

Πίνακας 5.2: Αξιολογήσεις ερευνητικού έργου και σύγχρονες πρακτικές.

Συγγραφέας, Έτος	Τίτλος	Περιγραφή
Zhang et al., 2019	A bibliometric analysis on waste electrical and electronic equipment research	Μια βιβλιομετρική ανάλυση με σκοπό την απεικόνιση των τάσεων και των κοινών σημείων των μελετών που σχετίζονται με τα WEEE.
Teixeira et al., 2020	A Review on the Applicability of Life Cycle Assessment to Evaluate the Technical and Environmental Properties of Waste Electrical and Electronic Equipment	Στόχος της ανασκόπησης αποτελεί η συζήτηση και παρουσίαση των τεχνικών ιδιοτήτων των ανακυκλωμένων πολυμερών WEEE μέσω της ανασκόπησης σχετικών μελετών LCA.
Ismail & Hanafiah, 2019	An overview of LCA application in WEEE management: Current practices, progress and challenges	Ο στόχος της βιβλιογραφικής μελέτης είναι η διερεύνηση των υπάρχουσων μελετών LCA στη διαχείριση WEEE προκειμένου να αποκτηθούν πληροφορίες σχετικά με τις τρέχουσες πρακτικές εφαρμογής LCA στη διαχείριση WEEE και τις μελλοντικές προκλήσεις της.

διάσταση των WEEE, λαμβάνουμε τη πληροφορία πως η LCA είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής τους, με άλλες εναλλακτικές να αποτελούν η Ανάλυση Ροών Υλικών (Material Flow Analysis-MFA), η Ανάλυση Πολλαπλών Κριτηρίων (Multi-Criteria Analysis-MCA) και η Μέτρηση και Ανάλυση Ενέργειας (Energy Measurement and Analysis-EMA). Ωστόσο, δεν παρουσιάζονται ποσοτικά δεδομένα για την υποστήριξη της δήλωσης αυτής.

Για τον σχηματισμό μιας στέρεας άποψης σχετικά με το ερευνητικό έργο στην εφαρμογή της LCA στη διαχείριση συστημάτων προϊόντων WEEE απαιτείται η μελέτη της ανασκόπησης των **Ismail & Hanafiah (2019)**, στην οποία οι συντάκτες σύλλεξαν, ταξινόμησαν και χαρακτήρισαν 61 δημοσιεύσεις που πραγματεύονται το ζήτημα αυτό, πραγματοποιώντας μια ανάλυση δεδομένων. Η ταξινόμηση έγινε με βάση τους ερευνητικούς στόχους και το εύρος της εκάστοτε μελέτης, καθώς και βάσει της οικονομικής κατάστασης της χώρας, στην οποία υλοποιήθηκε, χωρίζοντάς τις σε αυτές που ανήκουν στον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Organisation for Economic Co-operation and Development-OECD) και σε αυτές που δεν ανήκουν σε αυτόν (non-OECD).

Γενικά, παρατηρήθηκε μια σημαντική αύξηση στον αριθμό των δημοσιεύσεων από το 2011 και μετά, με τη Κίνα να συνεισφέρει περισσότερο συνολικά και την Ιταλία να συνεισφέρει τον μεγαλύτερο αριθμό δημοσιεύσεων μεταξύ των χωρών που ανήκουν στην OECD. Άλλη παρατήρηση αφορά το αντικείμενο μελέτης των δημοσιεύσεων. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι μελέτες πραγματεύονται προϊόντα WEEE, ακολουθούμενες από μελέτες συστατικών WEEE και μειγμάτων WEEE, με τη πιο δημοφιλή κατηγορία προϊόντων να είναι η κατηγορία προϊόντων απεικόνισης (οθόνες κ.λπ), ενώ η πιο δημοφιλής κατηγορία συστατικών αποτελούσαν οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων/πλακέτες τυπωμένης καλωδίωσης (Printed Circuit Boards/Printed Wiring Boards-PCB/PWB) και τα πλαστικά υπόλοιπα. Τέλος, παρουσιάζονται κενά και προκλήσεις που οι συντάκτες αναγνώρισαν στην έρευνα της LCA στα WEEE.

Παράλληλα, οι **Teixeira et al. (2020)**, έχοντας παρατηρήσει το φαινόμενο της φθοράς των ιδιοτήτων των πλαστικών μερών των WEEE μετά την ανακύκλωσή τους, υλοποίησαν μια βιβλιογραφική μελέτη με σκοπό τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανακυκλωμένων πολυμερών από WEEE που μπορούν να ληφθούν υπόψη σε μελέτες LCA. Ξεκινώντας από την ανάλυση της σύστασης των πολυμερών που απαντώνται στα WEEE, από την οποία προκύπτει πως τα ABS, PS, HIPS και μείγματα PC/ABS είναι τα πιο συχνά εμφανιζόμενα πολυμερή στα WEEE, συνεχίζουν με τη παρουσίαση μελετών που πραγματεύονται τα περιβαλλοντικά οφέλη και ζημιές της ανακύκλωσης των WEEE, ενώ στο τελευταίο μέρος της ανασκόπησης παρουσιάζουν τη βιβλιογραφία που πραγματεύεται τα τεχνικά ζητήματα που την αφορούν, όπως είναι οι μεταβολές στις ιδιότητες των πολυμερών λόγω της πολλαπλής επανένταξής τους στον κύκλο ζωής και οι ιδιότητες των μειγμάτων ABS/HIPS στα WEEE.

Εφαρμογή της LCA σε ειδικά ζητήματα

Παράλληλα, η LCA εφαρμόστηκε από ερευνητές με σκοπό την αξιολόγηση μιας ή περισσότερων φάσεων κύκλου ζωής ή την εκτίμηση των επιπτώσεων σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή ή τεχνολογική ομάδα προϊόντων. Έτσι, παρουσιάζονται συλλογές – ανασκοπήσεις ομοειδών δημοσκοπήσεων με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την εξέλιξη ή και τα κενά και προβλήματα που παρουσιάζονται στο σύνολο της επιστημονικής έρευνας που αφορά μία από τις προαναφερθείσες ομάδες. Η LCA μπορεί να αποτελεί το κεντρικό αντικείμενο ενδιαφέροντος των

μελετών αυτών ή να αναφέρεται η χρησιμότητά της στα πλαίσια παρουσίασης των εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης του κύκλου ζωής των εκάστοτε μελετούμενων προϊόντων.

Στη πρώτη ομάδα ανήκει η δημοσίευση των **Scharnhorst et al. (2007)**, στην οποία παρατίθεται και αξιολογείται η έρευνα LCA στο πλαίσιο των προϊόντων τηλεπικοινωνίας. Τα κύρια προβλήματα που εντοπίστηκαν σε αυτόν τον τομέα αποτέλεσαν η έλλειψη συμμετοχής των εταιρειών τηλεπικοινωνίας στον σχεδιασμό και προσαρμογή του στόχου και του πλαισίου δεξαγωγής των LCA και η ανισορροπία στη πρόσβαση σε δεδομένα LCI για υποπροϊόντα και φάσεις εντός του ορίου συστήματος, οι οποίες ενδέχεται να οδηγήσουν σε βεβιασμένα συμπεράσματα. Τα ζητήματα ενδέχεται να έχουν αντιμετωπιστεί και διορθωθεί μέχρι σήμερα, ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κανείς το έτος δημοσίευσης της ανασκόπησης αυτής.

Παράλληλα, οι υπόλοιπες ανασκοπήσεις έχουν ως αντικείμενο μελέτης τη διαχείριση των αποβλήτων WEEE ύπο συγκεκριμένες γεωγραφικές συνθήκες, με τους **Gollakota et al. (2020)** να επιχειρούν να αποσαφηνίσουν τις αποκλίσεις μεταξύ των ανεπτυγμένων και των αναπτυσσόμενων χωρών και να προτείνουν μελλοντικές πρωτοβουλίες για την υπέρβαση των ζητημάτων σχετικά με τα WEEE. Στο πλαίσιο αυτό η LCA χαρακτηρίζεται ως ένα εργαλείο μεσαίας κλίμακας για τον σχεδιασμό φιλικών προς το περιβάλλον ηλεκτρονικών συσκευών και την ελαχιστοποίηση της περιπλοκότητας της διαχείρισης των ηλεκτρονικών αποβλήτων, με το σκοπό της εφαρμογής του να διαφέρει από ήπειρο σε ήπειρο. Ταυτόχρονα, οι **Rathore & Lal Panwar (2021)** παρουσίασαν ποσοτικά δεδομένα από μελέτες LCA στο πλαίσιο της εξέτασης της τεχνολογικής και περιβαλλοντικής προόδου στην ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πάνελ στην Ινδία.

Το σύνολο των παραπάνω βιβλιογραφικών ανασκοπήσεων αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύνολο για την εισαγωγή του αναγνώστη σε θέματα διαχείρισης ηλεκτρονικών απορριμμάτων, προσφέροντας όχι μόνο γενικές γνώσεις, αλλά και εξειδικευμένα παραδείγματα, βοηθώντας τον αναγνώστη να εξοικειωθεί με το αντικείμενο μελέτης και να προετοιμαστεί για το περιεχόμενο των άρθρων, στο οποίο θα πρέπει να εστιάσει τη προσοχή του.

Πίνακας 5.3: Ανασκοπήσεις και κεφάλαια βιβλίων που αναφέρονται στην LCA.

Συγγραφέας, Έτος	Τίτλος	Περιγραφή
Gollakota et al., 2020	Inconsistencies of e-waste management in developing nations – Facts and plausible solutions	Η ανασκόπηση έχει ως στόχο τη αποσαφήνιση των αποκλίσεων της διαχείρισης των ηλεκτρονικών αποβλήτων μεταξύ των ανεπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών και τη πρόταση μελλοντικών πρωτοβουλιών για να ξεπεραστούν τα προβλήματα που σχετίζονται με τα απόβλητα.
Scharnhorst W., 2008	Life Cycle Assessment in the Telecommunication Industry: A Review	Η δημοσίευση αποσκοπεί στον προσδιορισμό των βασικών επιτευγμάτων, στην ανάλυση της τρέχουσας κατάστασης στην έρευνα και στη περιγραφή των βασικών προκλήσεων σχετικά με την εφαρμογή της LCA στη βιομηχανία ηλεκτρονικών τηλεπικοινωνιών
Rathore & Panwar, 2021	Strategic overview of management of future solar photovoltaic panel waste generation in the Indian context	Η ανασκόπηση πραγματεύεται τη διαχείριση και την ανακύκλωση ηλιακών αποβλήτων, εξετάζοντας πολλαπλές τεχνολογίες και εξετάζοντας τη πρόοδο που επιτεύχθηκε στη την ανακύκλωση φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Τέλος, συζητείται η εφαρμογή της LCA στις τεχνολογίες αυτές.

5.3.2 Μελέτη των άρθρων

Από τη συλλογή της βιβλιογραφίας προέκυψαν 76 άρθρα, από το περιεχόμενο των οποίων θα προκύψουν παρατηρήσεις και συμπεράσματα για το state-of-the-art των LCA στις φιάλες PET. Η αξιολόγηση των άρθρων θα πραγματοποιηθεί μέσω της ταξινόμησής τους βάσει παραγόντων που αφορούν το περιεχόμενό τους. Αυτοί είναι: το αντικείμενο μελέτης, το όριο συστήματος, η μέθοδος LCIA και το χρησιμοποιούμενο λογισμικό.

Αντικείμενο μελέτης

Στο πρώτο στάδιο της ανασκόπησης θα εξεταστούν τα αντικείμενα μελέτης, στα οποία οι ερευνητές έδειξαν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Από τα 76 άρθρα, τα 56 αποτελούν μελέτες περίπτωσης όπου η LCA εφαρμόζεται με βάση το ISO 14040 και 14044, ενώ στα υπόλοιπα 20 το αντικείμενο ποικίλλει, με τις πληροφορίες και τα συμπεράσματα που προκύπτουν να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές εφαρμογές της, πάντα αναλόγως το τεχνικό και γεωγραφικό πλαίσιο του μελετούμενου συστήματος. Ειδικότερα:

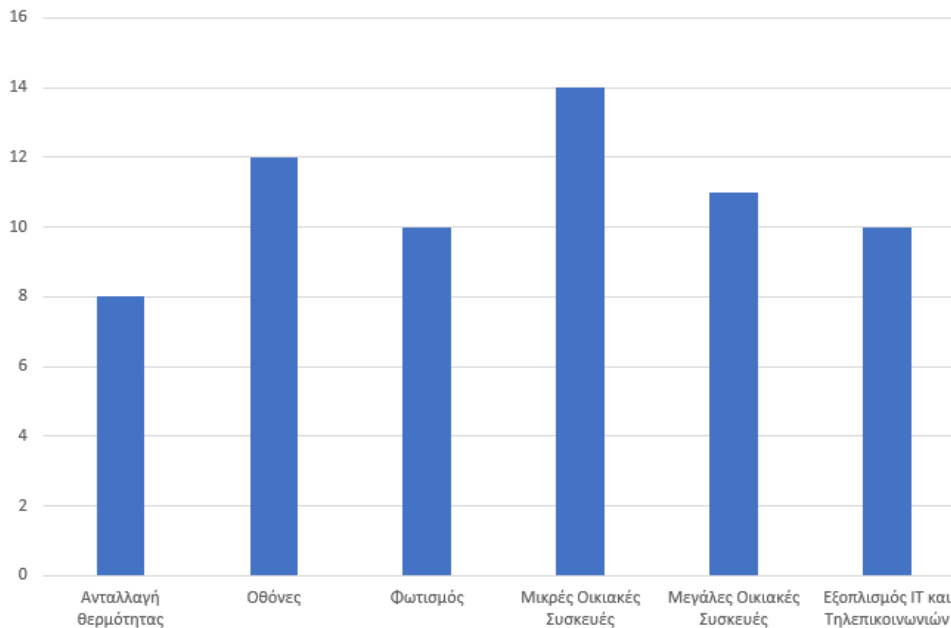
1) Οι **42 μελέτες** πραγματοποιήθηκαν τον κύκλο ζωής (ή μέρος του) ηλεκτρονικών προϊόντων που ανήκουν σε μια από τις κατηγορίες που καλύπτει η WEEE Directive 2018/849 (βλ. κεφάλαιο 5.1). Η συχνότητα εμφάνισης των προϊόντων ανά κατηγορία εμφανίζεται στον παρακάτω πίνακα. Πρέπει να σημειωθεί πως, ενώ από τα αριθμητικά δεδομένα φαίνεται πως οι ερευνητές εστίασαν στις μικρές οικιακές συσκευές και στις συσκευές με μεγάλες οθόνες, σχεδόν όλες οι δημοσιεύσεις περιελάμβαναν στο σύστημά τους παραπάνω από μία κατηγορία προϊόντων, εστιάζοντας στη μεταξύ τους σύγκριση, ενώ ο ίδιος ο αριθμός των δημοσιεύσεων δεν αρκεί για την εξαγωγή στέρεων συμπερασμάτων για τις τάσεις στην ερευνητική προσπάθεια των WEEE.

Ωστόσο, υπήρχαν δύο προϊόντα, τα οποία είχαν έναν σχετικά υψηλό αριθμό δημοσιεύσεων που αφορούσαν αποκλειστικά εκείνα και τις διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης των αποβλήτων αυτών. Αυτά ήταν **τα φωτοβολταϊκά πάνελ και οι τηλεοράσεις**.

Στη πρώτη περίπτωση η ερευνητική προσπάθεια εστιάστηκε στη σύγκριση της περιβαλλοντικής απόδοσης μεταξύ των μεθόδων της μηχανικής ανακύκλωσης και της πυρόλυσης (Argan et al., 2018), καθώς και της σύγκρισης των μεθόδων αυτών με ένα σύνολο μηχανικών, θερμικών και χημικών διεργασιών αναφερόμενο ως Πλήρης Ανάκτηση Αποβλήτων Φωτοβολταϊκών Πάνελ (Full Recovery End-of-Life Photovoltaic-FRELP) με τα αποτελέσματα να καταδεικνύουν τα περιβαλλοντικά οφέλη που συνεπάγεται η υιοθέτηση αυτής (Latunussa et al., 2016 & 2019, Faircloth et al., 2019).

Από την άλλη, το περιεχόμενο των μελετών τηλεοράσεων ποίκιλλε, με τους Dewulf et al. (2019) και τους Ruello et al. (2016) να εστιάζουν στην ανάκτηση και ανακύκλωση συγκεκριμένων εξαρτημάτων των τηλεοράσεων LCD (πλαστικά μέρη και ίνδιο αντίστοιχα), ενώ οι Amato et al. (2017) πραγματοποίησαν μια LCA συγκριτικού χαρακτήρα, αξιολογώντας τη περιβαλλοντική επίδοση της ανακύκλωσης τηλεοράσεων FED εν συγκρίσει με τις τηλεοράσεις LCD, PHP και PHP.

2) Οι **7 μελέτες** είχαν ως αντικείμενο τη διαχείριση τμημάτων από WEEE, χωρίς να γίνεται συγκεκριμένα αναφορά στα προϊόντα από τα οποία αποσυναρμολογήθηκαν, με την ερευνητική προσπάθεια να εστιάζει στα πλαστικά μέρη (Cardamone et al., 2021, Bientinesi & Petarca, 2008, Butturi et al., 2020, Alston et al., 2011, Ardolino et al., 2021, Wäger & Hischer, 2015), και



Διάγραμμα 5.6: Γράφημα που παρουσιάζει τη συχνότητα εμφάνισης προϊόντων ανά κατηγορία (WEEE Directive 2018/19/EU).

3) Οι υπόλοιπες **6 μελέτες** δεν αναφέρουν για ποια προϊόντα WEEE διεξάγουν τη μελέτη, αλλά αναφέρονται γενικά στη διαχείριση WEEE, ενώ η μελέτη των Šerešová et al. (2019) πραγματοποιείται τη περιβαλλοντική επίδοση των κουτιών που χρησιμοποιούνται στη συλλογή κινητών τηλεφώνων προς ανακύκλωση. Τέτοιου είδους μελέτες έχουν μεγάλη αξία, διότι τα αποτελέσματά τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δώσουν φως σε διαδικασίες εντός του κύκλου ζωής των WEEE, οι οποίες συνήθως αγνοούνται.

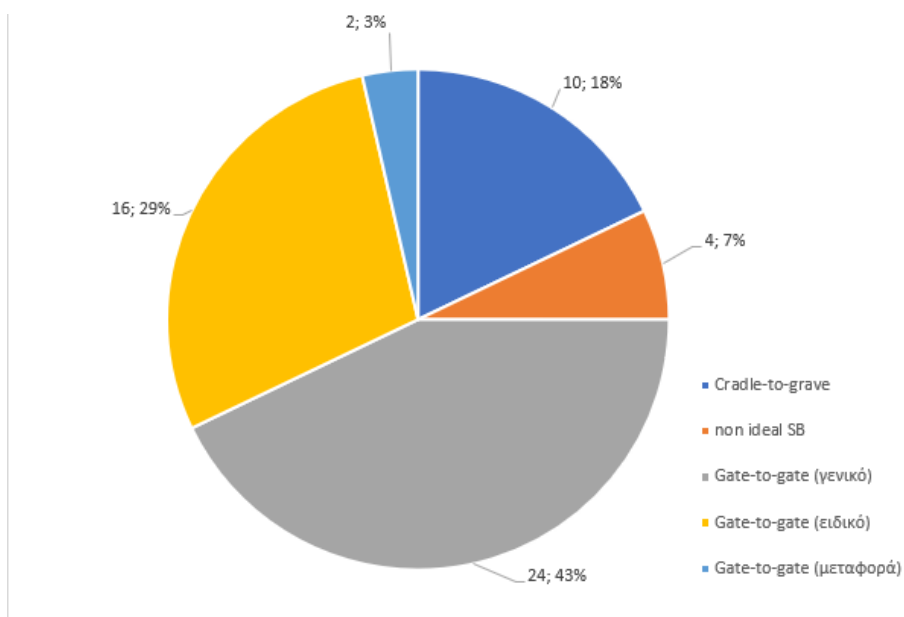
Ωστόσο, για τη πλήρη κατανόηση των στόχων των ερευνητών και των παραγόμενων συμπερασμάτων, καθίσταται κρίσιμης σημασίας η διασύνδεση του αντικείμενου μελέτης των παραπάνω δημοσιεύσεων με έναν άλλο παράγοντα: το όριο συστήματος.

Όριο συστήματος

Η έννοια του όριου συστήματος δεν είναι απόλυτη· εξαρτάται από το γεωγραφικό και διεργασιακό πεδίο, στο οποίο διεξάγεται μια έρευνα, και το εύρος του καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων που υπάρχει σε αυτή. Στην περίπτωση των WEEE, η φάση EoL μπορεί να θεωρηθεί από τους ερευνητές ως όλος ο κύκλος ζωής των ηλεκτρονικών αποβλήτων, αναφέροντας ως “cradle-to-grave” μια “gate-to-gate” μελέτη. Εδώ οι μελέτες αυτές θα αναφέρονται ως gate-to-gate, και η διαφοροποίησή τους θα πραγματοποιείται ανάλογα το εύρος των διεργασιών που πραγματοποιούνται.

Με αυτό ως δεδομένο, και ως αποτέλεσμα της διαφοροποίησης στο εύρος των μελετών που θεωρούνται gate-to-gate, αυτές θα διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Στις “γενικές” gate-to-gate, οι οποίες πραγματεύονται το σύνολο των διαδικασιών διαχείρισης της φάσης EoL των ηλεκτρονικών αποβλήτων (από τη συλλογή τους μέχρι τη τελική τους κατάληξη),
- Στις “ειδικές” gate-to-gate, στις οποίες οι ερευνητές έχουν εστιάσει σε συγκεκριμένες διαδικασίες, όπως είναι η ανάκτηση μετάλλων ή η διαδικασία συλλογής τους.



Διάγραμμα 5.7: Γράφημα που αναπαριστά την κατανομή των δημοσιεύσεων ανάλογα το όριο/α συστήματος που πραγματεύονται.

Η πλειοψηφία των “ειδικών” gate-to-gate άρθρων είχαν ως αντικείμενο μελέτης είτε την ανάκτηση και διαχείριση μετάλλων, πολύτιμων και μη, εστιάζοντας σε διαφορετικές διεργασίες όπως είναι οι υδρομεταλλουργικές (Rocchetti et al., 2013, Iannicelli-Zubiani et al., 2016, Karal et al., 2021, Ponghiran et al., 2021, Rubin et al., 2014) είτε τη διαχείριση των πλαστικών μερών αυτών (Dewulf et al., 2019, Alston et al., 2011, Ardolino et al., 2021).

Συνεχίζοντας την εξέταση των gate-to-gate μελετών, αξίζει να αναφερθεί πως οι διαδικασίες μεταφορών εξετάζονται λεπτομερώς σε δύο δημοσιεύσεις: στη μελέτη των Barba-Gutiérrez et al. (2007), στην οποία εξετάζεται η επίδραση της απόστασης μεταφοράς στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της φάσης απόρριψης, συγκρίνοντας τις μεθόδους της υγειονομικής ταφής και της ανακύκλωσης σε περιπτώσεις διαφορετικών προϊόντων, και στη μελέτη βελτιστοποίησης δικτύου συλλογής και μεταφορών WEEE των Gamberini et al. (2010). Κοινός παρονομαστής και των δύο μελετών αποτέλεσε το γεγονός πως οι μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις της φάσης των μεταφορών αφορούσαν τον δείκτη της Χρήσης Αβιοτικών Πόρων, ακολουθούμενος από τον δείκτη της Δημιουργίας Ανόργανων Σωματιδίων, επηρεάζοντας τους δείκτες τελικού σημείου της Χρήσης Πόρων και της Ανθρώπινης Υγείας πολύ περισσότερο σε σύγκριση με αυτόν της Ποιότητας Οικοσυστήματος.

Τέλος, παρουσιάστηκαν και δημοσιεύσεις, οι οποίες εξέτασαν όλο το κύκλο ζωής των ηλεκτρονικών προϊόντων, ακολούθησαν δηλαδή τη “cradle-to-grave” προοπτική. Τυπικά παραδείγματα αυτών αποτελούν οι μελέτες των Wu & Su (2021) και Gallego-Schmid et al. (2016 και 2018), όλες LCA διαφορετικών προϊόντων (λάμπες LED, φούρνοι μικροκυμάτων και ηλεκτρικές σκούπες αντίστοιχα). Κοινό συμπέρασμα των προαναφερθέντων “cradle-to-grave” εφαρμογών της LCA αποτέλεσε το γεγονός πως η φάση της χρήσης αποτέλεσε τη πιο επιβαρυντική φάση του εκάστοτε κύκλου ζωής, ιδιαίτερα στους δείκτες της Χρήσης Αβιοτικών Πόρων, κυρίως λόγω της χρήσης ορυκτών καυσίμων στη παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται σε αυτή.

Όπως θα παρατηρήθηκε από τα παραπάνω, η επιλογή του ορίου συστήματος επιδρά στα αποτελέσματα των δεικτών κατηγοριών που προκύπτουν από το στάδιο της LCIA. Έτσι, το επόμενο υποκεφάλαιο θα αφιερωθεί σε οτιδήποτε αξιοσημείωτο παρατηρήθηκε που το αφορά.

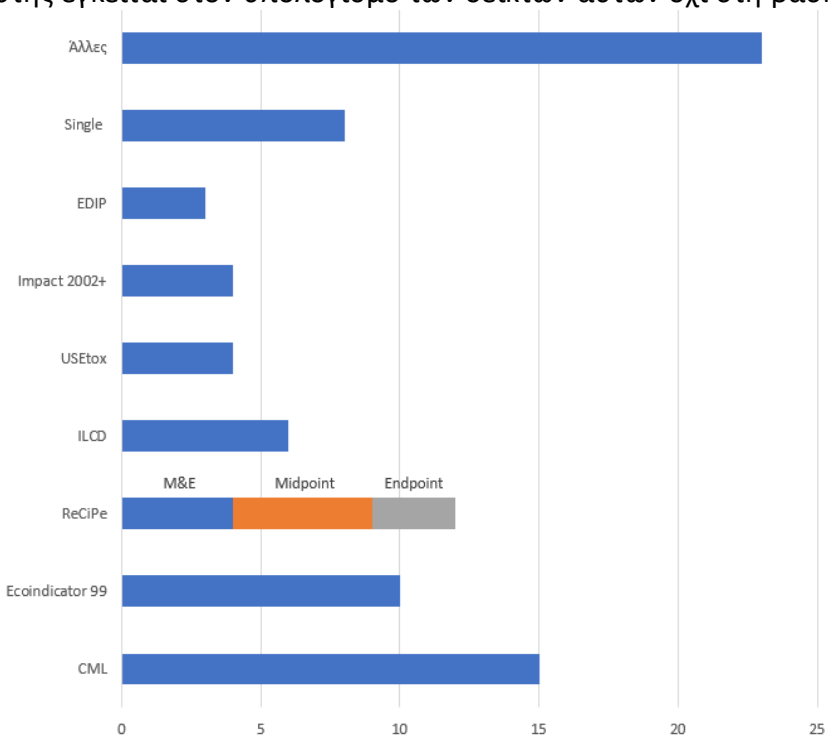
Μέθοδοι LCIA

Εξίσου σημαντική παράμετρος αποτελεί η μέθοδος της εκτίμησης των επιπτώσεων διότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα και τα ενδεχόμενα συμπεράσματα από τη διεξαγωγή μιας LCA. Γενικά παρατηρήθηκε μια ισορροπία μεταξύ της εφαρμογής μεθόδων μεσαίου σημείου (όπως η CML), τελικού σημείου (όπως η Ecoindicator 99) και υβριδικών μεθόδων (όπως η ReCiPe και η Impact 2002+).

Ωστόσο, η ίδια η συχνότητα εφαρμογής της κάθε μεθόδου δεν παρουσιάζει από μόνη της κάποιο ενδιαφέρον. Αυτό έγκειται στην ελαστικότητα κατά την εφαρμογή της LCIA, η οποία επιτρέπει στους ερευνητές να τη προσαρμόσουν στις ανάγκες της εκάστοτε μελέτης. Για παράδειγμα, ένας σημαντικός αριθμός μελετών συνδύασε δύο ή και περισσότερες διαφορετικές μεθόδους, με σκοπό την παρουσίαση αποτελεσμάτων για δείκτες και μεσαίου και τελικού σημείου, με τυπικούς συνδυασμούς να αποτελούν οι CML – Ecoindicator 99 (Alston et al., 2011, Wäger et al., 2011) και οι Ecoindicator 99 – Impact 2002+ (Bientinesi & Petarca, 2008).

Τέλος, εκτός των ευρέως γνωστών μεθόδων LCIA, η φύση των WEEE ως περίπλοκων και εν δυνάμει επικίνδυνων αποβλήτων οδήγησε στην εμφάνιση ορισμένων εξειδικευμένων μεθόδων, οι οποίες εστιάζουν στις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μέθοδος **USEtox** (Butturi et al., 2020, Chen et al., 2021, Hischer, 2014, Singh et al., 2020), η οποία χρησιμοποιεί τους εξής δείκτες: **Δυναμικό Καρκινογόνων Ασθενειών, Δυναμικό Μη Καρκινογόνων Ασθενειών και Οικοτοξικότητα**. Το ιδιαίτερο στοιχείο της μεθόδου αυτής έγκειται στον υπολογισμό των δεικτών αυτών όχι στη βάση των φάσεων του κύκλου ζωής, αλλά στη βάση των εμφανιζόμενων χημικών στοιχείων στο εκάστοτε απόβλητο (στοιχεία όπως το αρσενικό, το κάδμιο, το αντιμόνιο και άλλα).

Η εστίαση αυτή στη σύσταση του αποβλήτου και όχι στις διεργασίες διαχείρισής του επιτρέπει στους ερευνητές να εφαρμόσουν ξεχωριστά τη μέθοδο αυτή χωρίς τη διεξαγωγή ολόκληρης της LCA, σε περίπτωση που ο στόχος της μελέτης δεν την απαιτεί (Chen et al., 2021, Singh et al., 2020)



Διάγραμμα 5.8: Γράφημα που παρουσιάζει τη συχνότητα εμφάνισης μεθόδων LCIA.

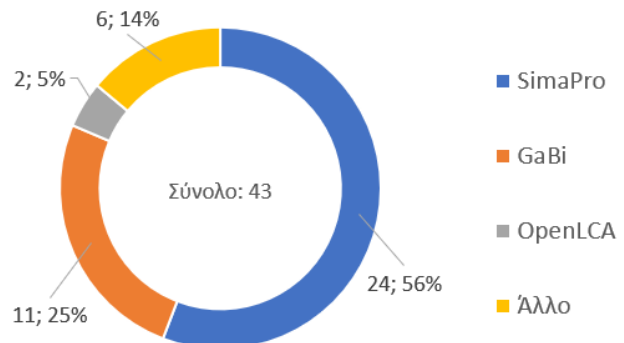
Χρήση λογισμικού

Από την άποψη του εφαρμοσμένου λογισμικού, οι δύο πιο δημοφιλείς επιλογές αποτέλεσαν το SimaPro και το GaBi, με το 82% των μελετών να περιλαμβάναν εφαρμογή μίας από τις δύο, ενώ μόνο δύο χρησιμοποίησαν το open-access λογισμικό OpenLCA (Wu & Su, 2021, Karal et al., 2021). Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι και οι δύο αυτές μελέτες πραγματοποιήθηκαν το τρέχον

έτος δείχνουν πως είτε ακόμη οι ερευνητές δεν θεωρούν ικανοποιητικές τις λειτουργίες ή τις βάσεις δεδομένων που προσφέρει για το συγκεκριμένο αντικείμενο είτε δεν είναι γνωστό στην επιστημονική κοινότητα.

Επίσης, αυτό που πρέπει να παρατηρηθεί είναι πως σε έναν αξιοσημείωτο αριθμό μελετών (εδώ: 13) δεν γινόταν ρητή αναφορά στη χρήση ή μη λογισμικού σε κάποιο από τα βήματα της LCA.

Γενικά παρατηρήθηκε πως η επιλογή του λογισμικού δεν αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα στη διενέργεια της LCA, καθώς η επιλογή του δεν συνεπάγονταν κάποια μεταβολή στη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε από τους ερευνητές.



Διάγραμμα 5.9: Γράφημα που παρουσιάζει τη συχνότητα χρήσης λογισμικών LCIA.

Άλλες μελέτες και παρατηρήσεις

Παρόλο που ορισμένες δημοσιεύσεις δεν είχαν την εφαρμογή της LCA ως αντικείμενό τους, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές μπορούν να υποστηρίξουν τη μελλοντική ερευνητική προσπάθεια.

Αρχικά πρέπει να γίνει αναφορά στη προσπάθεια που είχε ως αντικείμενο μελέτης τη φάση του σχεδιασμού των προϊόντων WEEE, προσφέροντας εναλλακτικές μεθόδους και εργαλεία στην πολύ κρίσιμη αυτή φάση της ζωής τους. Εδώ στην κατηγορία αυτή ανήκει το στοχαστικό μοντέλο βελτιστοποίησης της διαχείρισης της φάσης EoL των WEEE των **Ameli et al. (2016)**, οι δημοσιεύσεις των **Favi et al. (2018)** και **Reuter & van Schaik (2015)** που αποσκοπούν στην υλοποίηση μιας περιβαλλοντικά φιλικής μεθοδολογίας σχεδιασμού προϊόντων (Σχεδιασμός για Ανακύκλωση-Design for Recycling) μέσω της χρήσης εξειδικευμένων πακέτων λογισμικών, καθώς και το μοντέλο περιβαλλοντικής αξιολόγησης προϊόντων για τη φάση της χρήσης πρώτων υλών που προτείνουν οι **Wong et al. (2010)**, συνδυάζοντας τις μεθόδους υπολογισμού με πίνακες, τη μέθοδο παρουσίασης δεδομένων με διαγράμματα ιστού και παραμετρικές μεθόδους, όπως είναι η σωρευτική ζήτηση ενέργειας (Cumulative Energy Demand-CED). Το μοντέλο αυτό, παρά τις δυνατότητές του, περιορίζεται από το εύρος και την ακρίβεια των πληροφοριών των βάσεων δεδομένων που χρησιμοποιεί.

Παράλληλα, πρέπει να γίνει μνεία στις μελέτες που εστίασαν σε συγκεκριμένα εξαρτήματα των WEEE, συμβάλλοντας στην επέκταση της βιβλιογραφίας που θα χρησιμοποιείται σε μελλοντικές LCA που θα αφορούν το εκάστοτε γεωγραφικό και συστημικό πλαίσιο. Εδώ μπορούν να χωριστούν οι μελέτες αυτές σε δύο κατηγορίες:

1) Σε όσες πραγματοποιήθηκαν τις ιδιότητες των πλαστικών τμημάτων των WEEE. Οι κύριες μελέτες που θα αναφερθούν εδώ είναι αυτές των **Singh et al. (2020)**, **Beigbeder et al. (2013)** και **Lee et al. (2015)**, με τις πρώτες δύο ομάδες να εξετάζουν το σύνολο των τοξικών ουσιών που περιέχουν τα πλαστικά εξαρτήματα σε διαφορετικές εφαρμογές και εστιάζοντας σε συγκεκριμένες φάσεις του κύκλου ζωής, ενώ η τελευταία μελέτη περίπτωσης εστιάζει σε μια συγκεκριμένη ομάδα ουσιών,

τους πολυβρωμιούχους διφαινυλαιθέρες (polybrominated diphenyl ethers-PBDEs), πραγματοποιώντας ανάλυση ποσοτικών ροών σε εξαρτήματα που προορίζονται για ανακύκλωση.

2) Σε όσες πραγματεύτηκαν τα χαρακτηριστικά των διεργασιών ανάκτησης μετάλλων από WEEE.

Εδώ ανήκει η μελέτη των ροών ινδίου των **Ciacchi et al. (2018)**, στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος MFA με σκοπό την εκτίμηση των ποσοτήτων ινδίου που είναι διαθέσιμες για ανάκτηση σε ευρωπαϊκό πλαίσιο, και η δημοσίευση των **Chanceler et al. (2014)**, στην οποία εφαρμόζεται ανάλυση ροών ουσιών (Substance Flow Analysis-SFA) σε μια μονάδα προπαρασκευαστικών διεργασιών διαχείρισης WEEE για την αξιολόγηση των ροών πολύτιμων μετάλλων και τον βαθμό στον οποίο καθίσταται δυνατή η ανάκτησή τους.

Τέλος, εκτός από τα τεχνικά και επιστημονικά χαρακτηριστικά που συνεπάγεται μια περιβαλλοντική αξιολόγηση ενός προϊόντος, δεν πρέπει να λησμονείται η επίδραση κοινωνικών παραγόντων στα αποτελέσματά της, όπως η περιβαλλοντική ευαισθησία των καταναλωτών και οι υιοθετούμενες πολιτικές και κανονισμοί. Οι παράγοντες αυτοί εξετάζονται σε έναν ικανοποιητικό αριθμό μελετών που καλύπτουν ένα μεγάλο γεωγραφικό και προϊόντικό εύρος (**Chen et al., 2021, Ardente et al., 2015**), ενώ οι **Andersson et al. (2019)** επόπτευαν την επιστημονική προσπάθεια εξέτασής τους πραγματοποιώντας μια αναζήτηση δημοσιεύσεων βάσει λέξεων-κλειδιών μεθόδων εκτίμησης της βιωσιμότητας των ηλεκτρονικών αποβλήτων όπως είναι η LCA, η MFA και η LCC.

6. Τελική Αποτίμηση και Συμπεράσματα

Η δημοσίευση αυτή παρουσιάζει την ερευνητική πρόοδο στην εφαρμογή της αξιολόγησης κύκλου ζωής, μία μέθοδος που, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός προϊόντος ή μίας υπηρεσίας. Ξεκινώντας, αναφέρθηκαν οι κύριες φάσεις του κύκλου ζωής και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, παραθέτοντας ταυτόχρονα ορισμένα ποσοτικά δεδομένα που αφορούν τον αντίκτυπο τους στο περιβάλλον.

Για την κατανόηση της μελετώμενης μεθόδου, το επόμενο κεφάλαιο της παρούσας δημοσίευσης αφιερώθηκε στην ενδελεχή παρουσίαση των σταδίων της, ήτοι ο ορισμός στόχων και πεδίου έρευνας, η ανάλυση συλλογής δεδομένων, η εκτίμηση επιπτώσεων, και τέλος η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Από την εξέταση αυτή μπορεί να ληφθεί ως συμπέρασμα πως η επιλογή του ορίου συστήματος, η επιλογή των μεθόδων απόκτησης δεδομένων (απευθείας μετρήσεις, βάσεις δεδομένων κ.λπ) και η επιλογή της μεθόδου LCIA αποτελούν τις πιο σημαντικές αποφάσεις που πρέπει να λάβει η εκάστοτε ερευνητική ομάδα κατά τη διεξαγωγή LCA, καθώς αυτές καθορίζουν το κόστος της, αφού η αύξηση της ακρίβειας των δεδομένων και του βαθμού εστίασης στο εκάστοτε σύστημα συνεπάγεται αύξηση των αναγκών σε χρόνο, χρήματα και ανθρώπινο δυναμικό, και επηρεάζουν τα αποτελέσματα της μεθόδου, καθώς η χρήση διαφορετικής μεθόδου LCIA (μεσαίου ή τελικού σημείου) ενδέχεται να οδηγήσει σε διαφορετικά συμπεράσματα για τη περιβαλλοντική επίδοση του μελετώμενου συστήματος.

Ωστόσο, οι παραπάνω θεωρητικές γνώσεις που αφορούν την LCA δεν θα συνιστούσαν ένα πλήρες σύνολο αν δεν συνοδεύονταν με μια μελέτη της εφαρμογής της μεθόδου σε πραγματικά προβλήματα και δεδομένα. Έτσι, πραγματοποιήθηκε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση για δύο διαφορετικές ομάδες προϊόντων: τις φιάλες PET, και τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (WEEE) με βάση συγκεκριμένα κριτήρια αναζήτησης, αντλώντας συνολικά 87 και 83 δημοσιεύσεις από τη βάση Scopus αντίστοιχα. Οι ανασκοπήσεις που ανασύρθηκαν από τη βιβλιογραφία εξετάστηκαν ξεχωριστά από τα άρθρα, καθώς η πληθώρα πληροφοριών και τα συμπεράσματά που περιέχουν εκτιμήθηκε πως θα συμβάλλουν στη ταχύτερη και πληρέστερη κατανόηση του εκάστοτε μελετώμενου αντικειμένου μελέτης.

Και στις δύο περιπτώσεις οι υπάρχουσες ανασκοπήσεις εξέτασαν πληθος μελετών περίπτωσης, αξιολογώντας τα κοινά χαρακτηριστικά και τις διαφορές τους στη βάση των διαφορετικών φάσεων του κύκλου ζωής και των διαφορετικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Όσον αφορά τα άρθρα, εδώ θα παρατεθούν ξεχωριστά συμπεράσματα για τις φιάλες PET και για τα WEEE:

Από την εξέταση των διαφορετικών μελετών περίπτωσης μπορεί να ληφθεί πως οι φιάλες PET αποτελούν μια περιβαλλοντικά φιλική επιλογή συσκευασίας εν συγκρίσει με παλαιότερες εναλλακτικές και κυρίως το γυαλί, ωστόσο οι υψηλοί δείκτες εκπομπών θερμοκηπίου και η χρήση ορυκτών καυσίμων που συνεπάγεται η παραγωγή τους καταδεικνύουν την ανάγκη για την υιοθέτηση πρακτικών για λιγότερη χρήση πρωτογενών πλαστικών πρώτων υλών, είτε μέσω της αύξησης των αποβλήτων PET που ανακυκλώνονται είτε μέσω της αντικατάστασης των φιαλών μίας χρήσης με επαναχρησιμοποιούμενες. Ωστόσο τα αποτελέσματα των μέτρων αυτών εξαρτώνται άμεσα από διάφορους παράγοντες, όπως τη δομή του δικτύου συλλογής και διανομής των αποβλήτων και το ποσοστό ανακυκλωμένου πλαστικού στην παραγωγή νέων φιαλών.

Από την άλλη, η ερευνητική προσπάθεια που αφορούσε την περιβαλλοντική αξιολόγηση των WEEE είχε διαφορετικούς στόχους και σημεία ερευνητικού ενδιαφέροντος. Εδώ ο μεγάλος αριθμός διαφορετικών προϊόντων και εξαρτημάτων που περιλαμβάνει ο όρος “ηλεκτρονικά απόβλητα” επιβάλλει είτε την εξειδίκευση της εκάστοτε μελέτης περίπτωσης σε συγκεκριμένες ομάδες προϊόντων (όπως οι τηλεοράσεις και τα φωτοβολταϊκά πάνελ) είτε την αποστασιοποίησή της από τα μελετούμενα προϊόντα και την χρήση δεδομένων που αφορούν τη σύστασή τους σε υλικά στις φάσεις LCI και LCIA. Έτσι, το ερευνητικό έργο εστιάζει στη σύγκριση της περιβαλλοντικής επίδοσης μεταξύ διαφορετικών διεργασιών ανάκτησης υλικών (ιδιαίτερα πολύτιμων μετάλλων) και της ωφέλειας που προκύπτει από την επανένταξή τους στην παραγωγή νέων προϊόντων σε σχέση με τη χρήση πρωτογενών υλικών στη παραγωγή νέων προϊόντων.

Ταυτόχρονα έγιναν παρατηρήσεις όχι μόνο στο περιεχόμενο των δημοσιεύσεων αλλά και στα στοιχεία που συνιστούν την εκάστοτε LCA. Για παράδειγμα, παρατηρήθηκε πως υπήρχε μεγάλη ελαστικότητα ως προς τις διαδικασίες που περιέκλειαν τα όρια συστήματος των μελετών. Συνήθως οι φάσεις των μεταφορών (προϊόντων και αποβλήτων) και της χρήσης των προϊόντων δεν λαμβάνονταν υπόψη, ειδικά στη περίπτωση των φιαλών PET όπου είτε παρουσιάζονταν έλλειψη αξιόπιστων ποσοτικών δεδομένων είτε η επίπτωσή τους (ειδικά η φάση της χρήσης) θεωρούταν αμελητέα. Βέβαια αξίζει να αναφερθεί το γεγονός πως υπήρχαν ορισμένες μελέτες που είχαν ως αποκλειστικό αντικείμενο μελέτης τη περιβαλλοντική αξιολόγηση των δικτύων διανομών προϊόντων και συλλογής και μεταφοράς αποβλήτων, αλλά ο αριθμός τους δεν μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικός (3 σε σύνολο 170).

Παράλληλα, αντίστοιχη ελαστικότητα παρατηρήθηκε και στη φάση της LCIA, όπου συχνά στην εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων όπως η Ecoindicator 99 και η Impact 2002+ λαμβάνονταν υπόψη ορισμένοι δείκτες επιπτώσεων και συνδυάζονταν μεταξύ τους, ενώ υπήρξαν και περιπτώσεις μελετών όπου εφαρμόζονταν μόνο η φάση της LCIA (βλ. USEtox σελ. 82). Τα στοιχεία αυτά καταδεικνύουν πως τα διαθέσιμα εργαλεία αξιολόγησης έχουν ευρεία χρήση και δυνατότητα προσαρμογής ανάλογα το πλαίσιο εφαρμογής τους, ωστόσο καθιστούν δυσκολότερη τη διασταύρωση αποτελεσμάτων μεταξύ μελετών με ίδιο αντικείμενο μελέτης. Τέλος, όσον αφορά τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν από τους ερευνητές μπορεί να ειπωθεί πως ο συνδυασμός του λογισμικού SimaPro και της βάσης δεδομένων Ecoinvent ήταν ο πιο δημοφιλής ανάμεσα στη μελετηθείσα βιβλιογραφία και στις δύο ομάδες προϊόντων, επιβεβαιώνοντας αντίστοιχη παρατήρηση προηγούμενων ανασκοπήσεων..

Παρόλο που οι δύο μελετώμενες ομάδες προϊόντων διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό όσον αφορά τα τεχνολογικά τους χαρακτηριστικά, εν τούτοις η εξέταση της βιβλιογραφίας τους αποδίδει ορισμένα κοινά συμπεράσματα: Και στις δύο περιπτώσεις οι διαθέσιμες μελέτες περιπτώσεις καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών περιπτώσεων διαχείρισης του κύκλου ζωής των εκάστοτε προϊόντων, τόσο σε γεωγραφικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο πραγματευόμενων διεργασιών. Ωστόσο, η συντριπτική πλειοψηφία αυτών εντοπίζονται σε πλαίσια ανεπτυγμένων χωρών, όπου πραγματοποιείται μεγαλύτερη πρόοδος στην υιοθέτηση φιλικών προς το περιβάλλον πολιτικών, ενώ αντίθετα σε αναπτυσσόμενες χώρες εμφανίστηκαν ελάχιστες δημοσιεύσεις. Θεωρείται μέγιστης σημασίας η στροφή της προσοχής του ερευνητικού έργου LCA προς τις χώρες αυτές, ειδικά αν ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της ταχείας εκβιομηχάνισής τους, το οποίο θα εγείρει σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα στο μέλλον.

Επίσης, ελάχιστος ήταν ο αριθμός των μελετών περίπτωσης που, εκτός της περιβαλλοντικής LCA, ενσωμάτωσαν και οικονομική αξιολόγηση του κύκλου ζωής στα προϊόντα που πραγματεύονταν, ενώ ακόμα μικρότερος ήταν ο αριθμός που επιχείρησε την αξιολόγησή τους από κοινωνικής

άποψης, με μόνο τους Foolmaun & Ramjeawon (2013) να επιχειρούν την ενοποίηση των τριών αυτών μεθόδων σε μια αξιολόγηση βιωσιμότητας κύκλου ζωής. Το φαινόμενο αυτό ενδέχεται να εξηγείται από δύο παράγοντες: τη δυσκολία απόκτησης αξιόπιστων δεδομένων (ιδιαίτερα όσον αφορά τη κοινωνική LCA) καθώς και την έλλειψη τυποποιημένης μεθόδου συνδυασμού των αποτελεσμάτων από τις τρεις παραπάνω LCA και της εξαγωγής κανονικοποιημένων αποτελεσμάτων.

Τέλος, κατά την ανάγνωση των δημοσιεύσεων παρατηρήθηκε πως συχνά ορισμένες πληροφορίες δεν δηλώνονταν ρητά, με πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα να αποτελούν ο προορισμός των εκάστοτε ανακυκλωμένων υλικών και η χρήση ή μη λογισμικού για τη διεξαγωγή της LCA. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τον μικρό βαθμό ανάλυσης των διεργασιών του ορίου συστήματος που παρατηρήθηκε σε ορισμένες περιπτώσεις ανάμεσα στη βιβλιογραφία δημιουργούν ζητήματα αδιαφάνειας και αβεβαιότητας στις μεθόδους και τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται.

Με βάση όλα τα παραπάνω, μπορεί να ειπωθεί πως η LCA αποτελεί ίσως την καλύτερη μέθοδο για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός αγαθού, ιδιαίτερα χρήσιμο για προϊόντα μαζικής παραγωγής (φιάλες PET) και προϊόντα υψηλής περιπλοκότητας κατασκευής (ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός), ενώ η αυξητική τάση του ερευνητικού ενδιαφέροντος που περιβάλλει την εφαρμογή της σε βιομηχανικό επίπεδο προβλέπεται πως θα συνεχίσει με έντονο ρυθμό τα επόμενα έτη. Ωστόσο, οι απαιτήσεις σε δεδομένα σε συνδυασμό με την αβεβαιότητα που συνεπάγονται οι παραδοχές που λαμβάνουν οι ερευνητές κατά τη διενέργεια μιας LCA είναι μερικά από τα ζητήματα τα οποία η επιστημονική κοινότητα θα κληθεί να επιλύσει. Συνεπώς, θεωρείται θεμιτή η παράθεση ορισμένων προτάσεων/απόψεων για την εκπλήρωση του προαναφερθέντος σκοπού:

→ Θα πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή στην ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιείται κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου LCI. Συνεπώς, προτείνεται η πραγματοποίηση μετρήσεων στο εκάστοτε μελετώμενο σύστημα, ειδικά όταν πρόκειται για διεργασίες με πολλά στάδια.

→ Ταυτόχρονα απαιτείται η περαιτέρω μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της λειτουργίας της εφοδιαστικής αλυσίδας που διαχειρίζεται τα προϊόντα που εξετάστηκαν στη μελέτη αυτή. Καθώς τα αποτελέσματα της περιορισμένης βιβλιογραφίας που πραγματεύεται το ζήτημα αυτό έχει τοπικό χαρακτήρα είναι αδύνατη η εξαγωγή κάποιου στέρεου συμπεράσματος που αφορά το μέγεθος της επίδρασης των δικτύων διανομής των παραπάνω προϊόντων σε παγκόσμιο επίπεδο.

→ Τέλος θεωρείται ύψιστης σημασίας η εξέταση κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων σε συνδυασμό με τη περιβαλλοντική αξιολόγηση των προϊόντων, καθώς η συνολική εξέταση της βιωσιμότητάς τους θα επεκτείνει τη χρησιμότητα της LCA ως εργαλείο λήψης αποφάσεων σε βιομηχανικό αλλά και πολιτικό επίπεδο.

Οι παραπάνω προτάσεις αποσκοπούν στην αύξηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της LCA και της επέκτασης των εφαρμογών της σε κοινωνικό, οικονομικό και γεωγραφικό επίπεδο.

Βιβλιογραφία

[Aberilla et al., 2020] Aberilla, J. M., Gallego-Schmid, A., Stamford, L., and Azapagic, A. (2020). Environmental assessment of domestic water supply options for remote communities. *Water Research*, 175.

[Accorsi et al., 2015] Accorsi, R., Versari, L., and Manzini, R. (2015). Glass vs. plastic: Life cycle assessment of extra-virgin olive oil bottles across global supply chains. *Sustainability (Switzerland)*, 7:2818-2840.

[Aganovic et al., 2017] Aganovic, K., Smetana, S., Grauwet, T., Toep, S., Mathys, A., Loey, A. V., and Heinz, V. (2017). Pilot scale thermal and alternative pasteurization of tomato and watermelon juice: An energy comparison and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 141:514-525.

[Alston et al., 2011] Alston, S. M., Clark, A. D., Arnold, J. C., and Stein, B. K. (2011). Environmental impact of pyrolysis of mixed waste plastics part 1: Experimental pyrolysis data. *Environmental Science and Technology*, 45:9380-9385.

[Alston & Arnold, 2011] Alston, S. M. and Arnold, J. C. (2011). Environmental impact of pyrolysis of mixed waste plastics part 2: Experimental pyrolysis data. *Environmental Science and Technology*, (2011), 45:9386-9392

[Alves and Farina, 2018] Alves, D. S. and Farina, M. C. (2018). Disposal and reuse of the information technology waste: a case study in a Brazilian university. *European Business Review*, 30:720-734.

[Amato et al., 2017] Amato, A., Rocchetti, L., and Beolchini, F. (2017). Environmental impact assessment of different end-of-life LCD management strategies. *Waste Management*, 59:432-441.

[Ameli et al., 2016] Ameli, M., Mansour, S., and Ahmadi-Javid, A. (2016). A multi-objective model for selecting design alternatives and end-of-life options under uncertainty: A sustainable approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 109:123-136.

[Amienyo et al., 2013] Amienyo, D., Gujba, H., Stichnothe, H., and Azapagic, A. (2013). Life cycle environmental impacts of carbonated soft drinks. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18:77-92.

[Andersson et al., 2019] Andersson, M., Soderman, M. L., and Sanden, B. A. (2019). Adoption of systemic and socio-technical perspectives in waste management, waste and e-waste research. *Sustainability (Switzerland)*, 11.

[Andreola et al., 2007] Andreola, F., Barbieri, L., Corradi, A., Ferrari, A. M., Lancellotti, I., and Neri, P. (2007). Recycling of e-waste CRT glass into ceramic glaze formulations and its environmental impact by LCA approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12:448-454.

[Ardente et al., 2019] Ardente, F., Latunussa, C. E., and Blengini, G. A. (2019). Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. *Waste Management*, 91:156-167.

[Ardente et al., 2015] Ardente, F., Pastor, M. C., Mathieux, F., and Peiro, L. T. (2015). Analysis of end-of-life treatments of commercial refrigerating appliances: Bridging product and waste policies. *Resources, Conservation and Recycling*, 101:42-52.

[Ardolino et al., 2021] Ardolino, F., Cardamone, G. F., and Arena, U. (2021). How to enhance the environmental sustainability of weee plastics management: An lca study. *Waste Management*, 135:347-359.

[Aryan et al., 2018] Aryan, V., Font-Brucart, M., and Maga, D. (2018). A comparative life cycle assessment of end-of-life treatment pathways for photovoltaic backsheets. *Progress in Photo-voltaics: Research and Applications*, 26:443-459.

[Aryan et al., 2019] Aryan, Y., Yadav, P., and Samadder, S. R. (2019). Life cycle assessment of the existing and proposed plastic waste management options in india: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 211:1268-1283.

[Bałazińska et al., 2021] Bałazińska, M., Kruczek, M., Bondaruk, J. (2021). The environmental impact of various forms of waste PET bottle management. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, (2021), 28(5):473-480

[Balugani et al., 2021] Balugani, E., Lolli, F., Pini, M., Ferrari, A. M., Neri, P., Gamberini, R., and Rimini, B. (2021). Dimensionality reduced robust ordinal regression applied to life cycle assessment. *Expert Systems with Applications*, 178.

[Barba-Gutiérrez et al., 2008] Barba-Gutiérrez, Y., Adenso-Díaz, B., Hopp, M. (2008). An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. *Resources, Conservation and Recycling*, (2008), 52(3):481-495

[Baxter et al., 2016] Baxter, J., Lyng, K. A., Askham, C., and Hanssen, O. J. (2016). High-quality collection and disposal of weee: Environmental impacts and resultant issues. *Waste Management*, 57:17-26.

[Bazargan et al., 2012] Bazargan, A., Lam, K. F., McKay, G. (2012). Challenges and Opportunities of E-Waste Management. 39-66

[Beigbeder et al., 2013] Beigbeder, J., Perrin, D., Mascaro, J. F., and Lopez-Cuesta, J. M. (2013). Study of the physico-chemical properties of recycled polymers from waste electrical and electronic equipment (weee) sorted by high resolution near infrared devices. *Resources, Conservation and Recycling*, 78:105-114.

[Benavides et al., 2018] Benavides, P. T., Dunn, J. B., Han, J., Bidy, M., and Markham, J. (2018). Exploring comparative energy and environmental benefits of virgin, recycled, and bioderived pet bottles. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6:9725-9733.

[Bertolini et al., 2016] Bertolini, M., Bottani, E., Vignali, G., and Volpi, A. (2016). Comparative life cycle assessment of packaging systems for extended shelf life milk. *Packaging Technology and Science*, 29:525-546.

[Bientinesi and Petarca, 2009] Bientinesi, M. and Petarca, L. (2009). Comparative environmental analysis of waste brominated plastic thermal treatments. *Waste Management*, 29:1095-1102.

[Biganzoli et al., 2015] Biganzoli, L., Falbo, A., Forte, F., Grosso, M., and Rigamonti, L. (2015). Mass balance and life cycle assessment of the waste electrical and electronic equipment management system implemented in lombardia region (italy). *Science of the Total Environment*, 524-525:361-375.

[Bigum et al., 2012] Bigum, M., Brogaard, L., and Christensen, T. H. (2012). Metal recovery from high-grade weee: A life cycle assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 207-208:8-14.

[Bigum et al., 2017] Bigum, M., Damgaard, A., Scheutz, C., and Christensen, T. H. (2017). Environmental impacts and resource losses of incinerating misplaced household special wastes (weee, batteries, ink cartridges and cables). *Resources, Conservation and Recycling*, 122:251-260.

[Boldoczki et al., 2020] Boldoczki, S., Thorenz, A., and Tuma, A. (2020). The environmental impacts of preparation for reuse: A case study of weee reuse in germany. *Journal of Cleaner Production*, 252.

[Boldoczki et al., 2021] Boldoczki, S., Thorenz, A., and Tuma, A. (2021). Does increased circularity lead to environmental sustainability? The case of washing machine reuse in germany. *Journal of Industrial Ecology*, 25:864-876.

[Bracquené et al., 2021] Bracquené, E., Martinez, M., Wagner, E., Wagner, F., Boudewijn, A., Peeters, J., Duflou, J. (2021). Quantifying the environmental impact of clustering strategies in waste management: A case study for plastic recycling from large household appliances. *Waste Management*, (2021), 126: 497-507

[Brock and Williams, 2020] Brock, A. and Williams, I. (2020). Life cycle assessment of beverage packaging. *Detritus*, 13:47-61.

[Bulach et al., 2018] Bulach, W., Schuler, D., Sellin, G., Elwert, T., Schmid, D., Goldmann, D., Buchert, M., and Kammer, U. (2018). Electric vehicle recycling 2020: Key component power electronics. *Waste Management and Research*, 36:311-320.

[Bukurov et al., 2015] Bukurov, M., Nikolić, S., Kiss, F., Mladenović, V., Bukurov, M., Stanković, J. (2015). Corn-based Polylactide vs. PET Bottles - Cradle-to-gate LCA and Implications. *Materiale Plastice*, 52(4):517-521

[Butturi et al., 2020] Butturi, M. A., Marinelli, S., Gamberini, R., and Rimini, B. (2020). Ecotoxicity of plastics from informal waste electric and electronic treatment and recycling. *Toxics*, 8:1-19.

[Cardamone et al., 2021] Cardamone, G. F., Ardolino, F., and Arena, U. (2021). About the environmental sustainability of the european management of weee plastics. *Waste Management*, 126:119-132.

- [Chancerel et al., 2009] Chancerel, P., Meskers, C. E., Hagelucken, C., and Rotter, V. S. (2009). Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. *Journal of Industrial Ecology*, 13:791-810.
- [Chen et al., 2016] Chen, L., Pelton, R. E., and Smith, T. M. (2016). Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (pet) bottles. *Journal of Cleaner Production*, 137:667-676.
- [Chen et al., 2021] Chen, S., Wang, R., Wang, J., Shu, J., Chen, M., and Ogunseitan, O. A. (2021). Comparative effectiveness of technical and regulatory innovations to reduce the burden of electronic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 167.
- [Chen et al., 2019] Chen, W., Kucukyazici, B., and Saenz, M. J. (2019). On the joint dynamics of the economic and environmental performances for collective take-back systems. *International Journal of Production Economics*, 218:228-244.
- [Chilton et al., 2010] Chilton, T., Burnley, S., and Nesaratnam, S. (2010). A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of post-consumer pet. *Resources, Conservation and Recycling*, 54:1241-1249.
- [Ciacci et al., 2019] Ciacci, L., Werner, T. T., Vassura, I., and Passarini, F. (2019). Backlighting the European indium recycling potentials. *Journal of Industrial Ecology*, 23:426-437.
- [Cimini and Moresi, 2018] Cimini, A. and Moresi, M. (2018). Mitigation measures to minimize the cradle-to-grave beer carbon footprint as related to the brewery size and primary packaging materials.
- [Cleary, 2013] Cleary, J. (2013). Life cycle assessments of wine and spirit packaging at the product and the municipal scale: A Toronto, Canada case study. *Journal of Cleaner Production*, 44:143-151.
- [Coelho et al., 2011] Coelho, T. M., Castro, R., and Gobbo, J. A. (2011). Pet containers in Brazil: Opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling. [Compagno et al., 2014] Compagno, L., Ingrao, C., Latora, A. G., and Trapani, N. (2014). Life cycle assessment of CRT lead recovery process.
- [Collado-Ruiz & Ostad-Ahmad-Ghorabi, 2010] Collado-Ruiz, D., Ostad-Ahmad-Ghorabi, H. (2010). Fun theory: Standardizing functional units for product design. *Resources, Conservation and Recycling*, (2010), 54(10):683-691
- [Cottafava et al., 2021] Cottafava, D., Costamagna, M., Baricco, M., Corazza, L., Miceli, D., and Riccardo, L. E. (2021). Assessment of the environmental break-even point for deposit return systems through an LCA analysis of single-use and reusable cups. *Sustainable Production and Consumption*, 27:228-241.
- [Da Silva Müller Teixeira et al, 2021] da Silva Müller Teixeira, F., de Carvalho Peres, A., Gomes, T., Visconte, L., Pacheco, E (2021). A Review on the Applicability of Life Cycle Assessment to Evaluate the Technical and Environmental Properties of Waste Electrical and Electronic Equipment. *Journal of Polymers and the Environment*, (2021), 29(5):1333-1349

- [De Meester et al., 2019] De Meester, S., Nachtergaele, P., Debaveye, S., Vos, P., Dewulf, J. (2019). Using material flow analysis and life cycle assessment in decision support: A case study on WEEE valorization in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*, (2019), 142:1-9
- [De Souza et al., 2016] de Souza, R., Clímaco, J., Sant'Anna, A., Rocha, T., do Valle, R., Quelhas, O. (2016). Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. *Waste Management*, (2016), 57:46-56
- [Dewulf et al., 2019] Dewulf, W., Wagner, F., Bracquene, E., Peeters, J. R., and Duou, J. R. (2019). Diversified recycling strategies for high-end plastics: Technical feasibility and impact assessment. *CIRP Annals*, 68:29-32.
- [Faircloth et al., 2019] Faircloth, C. C., Wagner, K. H., Woodward, K. E., Rakkwamsuk, P., and Gheewala, S. H. (2019). The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in thailand. *Resources, Conservation and Recycling*, 143:260-272.
- [Favi et al., 2018] Favi, C., Germani, M., Mandolini, M., and Marconi, M. (2018). Implementation of a software platform to support an eco-design methodology within a manufacturing firm. *International Journal of Sustainable Engineering*, 11:79-96.
- [Ferrara and Feo, 2020] Ferrara, C. and Feo, G. D. (2020). Comparative life cycle assessment of alternative systems for wine packaging in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 259.
- [Fiore et al., 2019] Fiore, S., Ibanescu, D., Teodosiu, C., and Ronco, A. (2019). Improving waste electric and electronic equipment management at full-scale by using material flow analysis and life cycle assessment. *Science of the Total Environment*, 659:928-939.
- [Foolmaun and Ramjeeawon, 2012] Foolmaun, R. K. and Ramjeeawon, T. (2012). Comparative life cycle assessment and life cycle costing of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate bottles in Mauritius. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 33:2007-2018.
- [Foolmaun and Ramjeeawon, 2013] 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*, 18:155-171.
- [Foolmaun & Ramjeeawon, 2012] Foolmaun, R. K., Ramjeeawon, T. (2012). Disposal of post-consumer polyethylene terephthalate (PET) bottles: Comparison of five disposal alternatives in the small island state of Mauritius using a life cycle assessment tool. *Environmental Technology*, (2012), 33(5):563-572
- [Foolmaun & Ramjeeawon, 2013] Foolmaun, R. K., Ramjeeawon, T. (2013). Life cycle sustainability assessments (LCSA) of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. *Environment, Development and Sustainability*, (2013), 15(3):783-806
- [Gallego-Schmid et al., 2018] Gallego-Schmid, A., Mendoza, J., Azapagic, A. (2018). Environmental assessment of microwaves and the effect of European energy efficiency and waste management legislation. *Science of the Total Environment*, (2018), 618:487-499

[Gallego-Schmid et al., 2016] Gallego-Schmid, A., Mendoza, J., Jeswani, H., Azapagic, A. (2016). Life cycle environmental impacts of vacuum cleaners and the effects of European regulation. *Science of the Total Environment*, (2016), 559:192-203

[Gamberini et al., 2010] Gamberini, R., Gebennini, E., Manzini, R., and Ziveri, A. (2010). On the integration of planning and environmental impact assessment for a weee transportation network - a case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 54:937-951.

[Garfi et al., 2016] Garfí, M., Cadena, E., Sanchez-Ramos, D., Ferrer, I. (2016). Life cycle assessment of drinking water: Comparing conventional water treatment, reverse osmosis and mineral water in glass and plastic bottles. *Journal of Cleaner Production*, (2016), 137:997-1003

[Ghosh et al., 2015] Ghosh, B., Ghosh, M. K., Parhi, P., Mukherjee, P. S., and Mishra, B. K. (2015). Waste printed circuit boards recycling: An extensive assessment of current status.

[Gironi and Piemonte, 2011] Gironi, F. and Piemonte, V. (2011). Life cycle assessment of polylactic acid and polyethylene terephthalate bottles for drinking water. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 30:459-468.

[Gollakota et al., 2020] Gollakota, A. R., Gautam, S., and Shu, C. M. (2020). Inconsistencies of e-waste management in developing nations - facts and plausible solutions.

[Gomes et al., 2019] Gomes, T. S., Visconte, L. L., and Pacheco, E. B. (2019). Life cycle assessment of polyethylene terephthalate packaging: An overview.

[Gonda et al., 2019] Gonda, L., D'Ans, P., and Degrez, M. (2019). A comparative assessment of weee collection in an urban and rural context: Case study on desktop computers in belgium. *Resources, Conservation and Recycling*, 142:131-142.

[Gu et al., 2019] Gu, F., Zhang, W., Guo, J., and Hall, P. (2019). Exploring "internet+recycling": Mass balance and life cycle assessment of a waste management system associated with a mobile application. *Science of the Total Environment*, 649:172-185.

[Gu et al., 2020] Gu, Y., Zhou, G., Wu, Y., Xu, M., Chang, T., Gong, Y., and Zuo, T. (2020). Environmental performance analysis on resource multiple-life-cycle recycling system: Evidence from waste pet bottles in china. *Resources, Conservation and Recycling*, 158.

[Gutiérrez et al., 2010] Gutiérrez, E., Lozano, S., Adenso-Díaz, B. (2010). Dimensionality Reduction and Visualization of the Environmental Impacts of Domestic Appliances. *Journal of Industrial Ecology*, (2010), 14(6):878-889

[Gutierrez et al., 2017] Gutierrez, M. M., Meleddu, M., and Piga, A. (2017). Food losses, shelf life extension and environmental impact of a packaged cheesecake: A life cycle assessment. *Food Research International*, 91:124-132.

[Haupt et al., 2018] Haupt, M., Waser, E., Wurmlli, J. C., and Hellweg, S. (2018). Is there an

environmentally optimal separate collection rate? *Waste Management*, 77:220-224.

[Hayes et al., 2007] Hayes, K., Regan, H., Burgman, M. (2007). Introduction to the concepts and methods of uncertainty analysis. *Environmental Risk Assessment of Genetically Modified Organisms: Vol. 3 Methodologies for Transgenic Fish*, 188:208

[Heijungs & Kleijn, 2001] Heijungs, R., Kleijn, R. (2001). Numerical approaches towards life cycle interpretation five examples. *Int J LCA*, 6:141-148.

[Hischier, 2015] Hischier, R. (2015). Life cycle assessment study of a led emission display television device. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20:61-73.

[Hischier and Boni, 2021] Hischier, R. and Boni, H. W. (2021). Combining environmental and economic factors to evaluate the reuse of electrical and electronic equipment - a swiss case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 166.

[Hischier et al., 2005] Hischier, R., Wager, P., and Gauglhofer, J. (2005). Does weee recycling make sense from an environmental perspective? the environmental impacts of the swiss takeback and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (weee). *Environmental Impact Assessment Review*, 25:525-539.

[Horowitz et al., 2018] Horowitz, N., Frago, J., and Mu, D. (2018). Life cycle assessment of bottled water: A case study of green2o products. *Waste Management*, 76:734-743.

[Huysman et al., 2015] Huysman, S., Debaveye, S., Schaubroeck, T., Meester, S. D., Ardente, F., Mathieux, F., and Dewulf, J. (2015). The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in anders. *Resources, Conservation and Recycling*, 101:53-60.

[Hakkinen and Vares, 2010] Hakkinen, T. and Vares, S. (2010). Environmental impacts of disposable cups with special focus on the effect of material choices and end of life. *Journal of Cleaner Production*, 18:1458-1463.

[Iacovidou et al., 2019] Iacovidou, E., Velenturf, A. P., and Purnell, P. (2019). Quality of resources: A typology for supporting transitions towards resource efficiency using the single-use plastic bottle as an example. *Science of the Total Environment*, 647:441-448.

[Iannicelli-Zubiani et al., 2017] Iannicelli-Zubiani, E., Giani, M., Recanati, F., Dotelli, G., Puricelli, S., Cristiani, C. (2017). Environmental impacts of a hydrometallurgical process for electronic waste treatment: A life cycle assessment case study. *Journal of Cleaner Production*, (2017), 140:1204-1216

[Ingrao et al., 2014] Ingrao, C., Giudice, A. L., Tricase, C., Rana, R., Mbohwa, C., and Siracusa, V. (2014). Recycled-pet based panels for building thermal insulation: Environmental impact and improvement potential assessment for a greener production. *Science of the Total Environment*, 493:914-929.

[Ismail and Hanaah, 2019] Ismail, H. and Hanaah, M. M. (2019). An overview of lca application in weee management: Current practices, progress and challenges.

- [Johansson and Bjorklund, 2010] Johansson, J. G. and Bjorklund, A. E. (2010). Reducing life cycle environmental impacts of waste electrical and electronic equipment recycling. *Journal of Industrial Ecology*, 14:258-269.
- [Jonkers et al., 2016] Jonkers, N., Krop, H., van Ewijk, H., and Leonards, P. E. (2016). Life cycle assessment of flame retardants in an electronics application. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21:146-161.
- [Kang et al., 2017] Kang, D. H., Auras, R., and Singh, J. (2017). Life cycle assessment of nonalcoholic single-serve polyethylene terephthalate beverage bottles in the state of California. *Resources, Conservation and Recycling*, 116:45-52.
- [Karal et al., 2021] Karal, E., Kucuker, M. A., Demirel, B., Coptu, N. K., and Kuchta, K. (2021). Hydrometallurgical recovery of neodymium from spent hard disk magnets: A life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 288.
- [Kaya, 2018] Kaya, M. (2018). *Electronic Waste and Printed Circuit Board Recycling Technologies*. 31-62
- [Kerdlap et al., 2021] Kerdlap, P., Purnama, A. R., Low, J. S. C., Tan, D. Z. L., Barlow, C. Y., and Ramakrishna, S. (2021). Comparing the environmental performance of distributed versus centralized plastic recycling systems: Applying hybrid simulation modeling to life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*.
- [Kim and Park, 2020] Kim, S. and Park, J. (2020). Comparative life cycle assessment of multiple liquid laundry detergent packaging formats. *Sustainability (Switzerland)*, 12.
- [Komly et al., 2012] Komly, C. E., Azzaro-Pantel, C., Hubert, A., Pibouleau, L., and Archambault, V. (2012). Multiobjective waste management optimization strategy coupling life cycle assessment and genetic algorithms: Application to PET bottles. *Resources, Conservation and Recycling*, 69:66-81.
- [Kouloumpis et al., 2020] Kouloumpis, V., Pell, R. S., Correa-Cano, M. E., and Yan, X. (2020). Potential trade-offs between eliminating plastics and mitigating climate change: An LCA perspective on polyethylene terephthalate (PET) bottles in Cornwall. *Science of the Total Environment*, 727.
- [Kuczynski and Geyer, 2013] Kuczynski, B. and Geyer, R. (2013). PET bottle reverse logistics - environmental performance of California's CRV program. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18:456-471.
- [Latunussa et al., 2016] Latunussa, C. E., Ardente, F., Blengini, G. A., and Mancini, L. (2016). Life cycle assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156:101-111.
- [Lee et al., 2015] Lee, S., Jang, Y. C., Kim, J. G., Park, J. E., Kang, Y. Y., Kim, W. I., and Shin, S. K. (2015). Static and dynamic flow analysis of PBDEs in plastics from used and end-of-life TVs and computer monitors by life cycle in Korea. *Science of the Total Environment*, 506-507:76-85.

[Leejarkpai et al., 2016] Leejarkpai, T., Mungcharoen, T., and Suwanmanee, U. (2016). Comparative assessment of global warming impact and eco-eciency of ps (polystyrene), pet (polyethylene terephthalate) and pla (polylactic acid) boxes. *Journal of Cleaner Production*, 125:95-107.

[Leivas et al., 2020] Leivas, R., Laso, J., Abejon, R., Margallo, M., and Aldaco, R. (2020). Environmental assessment of food and beverage under a nexus water-energy-climate approach: Application to the spirit drinks. *Science of the Total Environment*, 720.

[Liu et al., 2017] Liu, Z., Tang, J., yi Li, B., and Wang, Z. (2017). Trade-o between remanufacturing and recycling of weee and the environmental implication under the chinese fund policy. *Journal of Cleaner Production*, 167:97-109.

[Lonca et al., 2020] Lonca, G., Lesage, P., Majeau-Bettez, G., Bernard, S., and Margni, M. (2020). Assessing scaling eects of circular economy strategies: A case study on plastic bottle closed-loop recycling in the usa pet market. *Resources, Conservation and Recycling*, 162.

[Lorite et al., 2017] Lorite, G. S., Rocha, J. M., Miilumaki, N., Saavalainen, P., Selkala, T., Morales-Cid, G., Goncalves, M. P., Pongracz, E., Rocha, C. M., and Toth, G. (2017). Evaluation of physicochemical/microbial properties and life cycle assessment (lca) of pla-based nanocomposite active packaging. *LWT - Food Science and Technology*, 75:305-315.

[Lu et al., 2015] Lu, B., Liu, J., Yang, J., and Li, B. (2015). The environmental impact of technology innovation on weee management by multi-life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 89:148-158.

[Lu et al., 2017] Lu, B., Song, X., Yang, J., and Yang, D. (2017). Comparison on end-of-life strategies of weee in china based on lca. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 11.

[Lukman et al., 2009] Lukman, R., Tiwary, A., and Azapagic, A. (2009). Towards greening a university campus: The case of the university of maribor, slovenia. *Resources, Conservation and Recycling*, 53:639-644.

[Mahmud and Farjana, 2021] Mahmud, M. A. and Farjana, S. H. (2021). Comparative eco-proles of polyethylene terephthalate (pet) and polymethyl methacrylate (pmma) using life cycle assessment. *Journal of Polymers and the Environment*, 29:418-428.

[Manfredi and Vignali, 2015] Manfredi, M. and Vignali, G. (2015). Comparative life cycle assessment of hot lling and aseptic packaging systems used for beverages. *Journal of Food Engineering*, 147:39-48.

[Martin et al., 2021] Martin, E. J., Oliveira, D. S., Oliveira, L. S., and Bezerra, B. S. (2021). Life cycle comparative assessment of pet bottle waste management options: A case study for the city of bauru, brazil. *Waste Management*, 119:226-234.

[Matasci et al., 2021] Matasci, C., Gauch, M., and Boni, H. (2021). How to increase circularity in

the swiss economy? *Detritus*, 14:25-31.

[Mayers et al., 2005] Mayers, C. K., France, C. M., and Cowell, S. J. (2005). Research and analysis extended producer responsibility for waste electronics an example of printer recycling in the united kingdom.

[Mehta et al., 2021] Mehta, N., Cunningham, E., Roy, D., Cathcart, A., Dempster, M., Berry, E., and Smyth, B. M. (2021). Exploring perceptions of environmental professionals, plastic processors, students and consumers of bio-based plastics: Informing the development of the sector. *Sustainable Production and Consumption*, 26:574-587.

[Menikpura et al., 2014] Menikpura, S. N., Santo, A., and Hotta, Y. (2014). Assessing the climate co-benefits from waste electrical and electronic equipment (weee) recycling in japan. *Journal of Cleaner Production*, 74:183-190.

[Misopoulos et al., 2020] Misopoulos, F., Argyropoulou, R., Manthou, V., Argyropoulou, M., and Kelmendi, I. (2020). Carbon emissions of bottled water sector supply chains: a multiple case study approach*. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 23:178-194.

[Moretti et al., 2021] Moretti, C., Hamelin, L., Jakobsen, L. G., Junginger, M. H., Steingrimsdottir, M. M., Hibble, L., and Shen, L. (2021). Cradle-to-grave life cycle assessment of single-use cups made from pla, pp and pet. *Resources, Conservation and Recycling*, 169.

[Nakatani et al., 2010] Nakatani, J., Fujii, M., Moriguchi, Y., and Hirao, M. (2010). Life-cycle assessment of domestic and transboundary recycling of post-consumer pet bottles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15:590-597.

[Nakatani and Hirao, 2011] Nakatani, J. and Hirao, M. (2011). Multicriteria design of plastic recycling based on quality information and environmental impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 15:228-244.

[Nessi et al., 2012] Nessi, S., Rigamonti, L., and Grosso, M. (2012). Lca of waste prevention activities: A case study for drinking water in italy. *Journal of Environmental Management*, 108:73-83.

[Nessi et al., 2015] Nessi, S., Rigamonti, L., and Grosso, M. (2015). Packaging waste prevention activities: A life cycle assessment of the effects on a regional waste management system. *Waste Management and Research*, 33:833-849.

[Papong et al., 2014] Papong, S., Malakul, P., Trungkavashirakun, R., Wenunun, P., Chom-In, T., Nithitanakul, M., and Sarobol, E. (2014). Comparative assessment of the environmental profile of pla and pet drinking water bottles from a life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 65:539-550.

[Park and Gupta, 2015] Park, J. Y. and Gupta, C. (2015). Evaluating localism in the management of post-consumer plastic bottles in honolulu, hawai'i: Perspectives from industrial ecology and political ecology. *Journal of Environmental Management*, 154:299-306.

- [Park et al., 2009] Park, K. S., Sato, W., Grause, G., Kameda, T., and Yoshioka, T. (2009). Recovery of indium from In_2O_3 and liquid crystal display powder via a chloride volatilization process using polyvinyl chloride. *Thermochimica Acta*, 493:105-108.
- [Pérez-Martínez et al., 2021] Pérez-Martínez, M., Carrillo, C., Rodeiro-Iglesias, J., Soto, B. (2021). Life cycle assessment of repurposed waste electric and electronic equipment in comparison with original. *Sustainable Production and Consumption*, (2021), 1637-1649, 27:1637-1649
- [Pini et al., 2019] Pini, M., Lolli, F., Balugani, E., Gamberini, R., Neri, P., Rimini, B., and Ferrari, A. M. (2019). Preparation for reuse activity of waste electrical and electronic equipment: Environmental performance, cost externality and job creation. *Journal of Cleaner Production*, 222:77-89.
- [Ponghiran et al., 2021] Ponghiran, W., Charoensaeng, A., and Khaodhiar, S. (2021). The environmental impact assessment of gold extraction processes for discarded computer ram: a comparative study of two leaching chemicals. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23:1412-1422.
- [Ponstein et al., 2019] Ponstein, H. J., Ghinoi, S., and Steiner, B. (2019). How to increase sustainability in the nnish wine supply chain? insights from a country of origin based greenhouse gas emissions analysis. *Journal of Cleaner Production*, 226:768-780.
- [Ramesh and Vinodh, 2020] Ramesh, P. and Vinodh, S. (2020). State of art review on life cycle assessment of polymers.
- [Rathore and Panwar, 2021] Rathore, N. and Panwar, N. L. (2021). Strategic overview of management of future solar photovoltaic panel waste generation in the indian context.
- [Ren et al., 2020] Ren, Y., Shi, L., Bardow, A., Geyer, R., and Suh, S. (2020). Life-cycle environmental implications of china's ban on post-consumer plastics import. *Resources, Conservation and Recycling*, 156.
- [Reuter and van Schaik, 2015] Reuter, M. A. and van Schaik, A. (2015). Product-centric simulation-based design for recycling: Case of led lamp recycling. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 1:4-28.
- [Rocchetti et al., 2013] Rocchetti, L., Veglio, F., Kopacek, B., and Beolchini, F. (2013). Environmental impact assessment of hydrometallurgical processes for metal recovery from weee residues using a portable prototype plant. *Environmental Science and Technology*, 47:1581-1588.
- [Romero-Hernández et al., 2009] Romero-Hernández, O., Romero Hernández, S., Muñoz, D., Detta-Silveira, E., Palacios-Brun, A., Laguna, A. (2009). Environmental implications and market analysis of soft drink packaging systems in Mexico. A waste management approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, (2009), 107-113, 14(2):107-113

[Rubin et al., 2014] Rubin, R. S., Castro, M. A. S. D., Brandão, D., Schalch, V., and Ometto, A. R. (2014). Utilization of life cycle assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. *Journal of Cleaner Production*, 64:297-305.

[Ruello et al., 2016] Ruello, M. L., Amato, A., Beolchini, F., and Monosi, S. (2016). Valorizing end-of-life lcd scraps after indium recovery. *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*, 13:1011-1016.

[Saleh, 2016] Saleh, Y. (2016). Comparative life cycle assessment of beverages packages in palestine. *Journal of Cleaner Production*, 131:28-42.

[Scharnhorst, 2008] Scharnhorst, W. (2008). Life cycle assessment in the telecommunication industry: A review.

[Schmidt et al., 2020] Schmidt, S., Laner, D., Eygen, E. V., and Stanisavljevic, N. (2020). Material efficiency to measure the environmental performance of waste management systems: A case study on pet bottle recycling in austria, germany and serbia. *Waste Management*, 110:74-86.

[Šerešová et al., 2019] Šerešová, M., Polák, M., Kočí, V. (2019). Environmental performance of collection boxes for end of life mobile phones. *Waste Management and Research*, (2019), 37(8):851-859

[Sharma et al., 2021] Sharma, B., Goswami, Y., Sharma, S., and Shekhar, S. (2021). Inherent roadmap of conversion of plastic waste into energy and its life cycle assessment: A frontrunner compendium.

[Shen et al., 2011] Shen, L., Nieuwlaar, E., Worrell, E., and Patel, M. K. (2011). Life cycle energy and ghg emissions of pet recycling: Change-oriented effects. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16:522-536.

[Shen et al., 2010] Shen, L., Worrell, E., and Patel, M. K. (2010). Open-loop recycling: A lca case study of pet bottle-to-bottle recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 55:34-52.

[Shen et al., 2012] Shen, L., Worrell, E., and Patel, M. K. (2012). Comparing life cycle energy and ghg emissions of bio-based pet, recycled pet, pla, and man-made cellulose. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6:625-639.

[Simon et al., 2016] Simon, B., Amor, M. B., and Foldenyi, R. (2016). Life cycle impact assessment of beverage packaging systems: Focus on the collection of post-consumer bottles. *Journal of Cleaner Production*, 112:238-248.

[Singh et al., 2020] Singh, N., Duan, H., and Tang, Y. (2020). Toxicity evaluation of e-waste plastics and potential repercussions for human health. *Environment International*, 137.

[Solé et al., 2012] Solé, M., Watson, J., Puig, R., Fullana-I-Palmer, P. (2012). Proposal of a new model to improve the collection of small WEEE: A pilot project for the recovery and recycling of toys. *Waste Management and Research*, (2012), 30(11):1208-1212

[Song et al., 2018] Song, X., Zhang, C., Yuan, W., and Yang, D. (2018). Life-cycle energy use and ghg emissions of waste television treatment system in china. *Resources, Conservation and Recycling*, 128:470-478.

[Speck et al., 2016] Speck, R., Selke, S., Auras, R., and Fitzsimmons, J. (2016). Life cycle assessment software: Selection can impact results. *Journal of Industrial Ecology*, 20:18-28.

[Stefanini et al., 2021] Stefanini, R., Borghesi, G., Ronzano, A., Vignali, G. (2021). Plastic or glass: a new environmental assessment with a marine litter indicator for the comparison of pasteurized milk bottles. *The International Journal of Life Cycle Assessment* (2021) 26:767–784

[Stone et al., 2020] Stone, C., Windsor, F. M., Munday, M., and Durance, I. (2020). Natural or synthetic - how global trends in textile usage threaten freshwater environments. *Science of the Total Environment*, 718.

[Strazza et al., 2016] Strazza, C., Borghi, A. D., Magrassi, F., and Gallo, M. (2016). Using environmental product declaration as source of data for life cycle assessment: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 112:333-342.

[Subramanian et al., 2020] Subramanian, K., Chopra, S. S., Cakin, E., Li, X., and Lin, C. S. K. (2020). Environmental life cycle assessment of textile bio-recycling - valorizing cotton-polyester textile waste to pet ber and glucose syrup. *Resources, Conservation and Recycling*, 161.

[Sugiyama et al., 2006] Sugiyama, H., Hirao, M., Mendivil, R., Fischer, U., and Hungerbuhler, K. (2006). A hierarchical activity model of chemical process design based on life cycle assessment. *Process Safety and Environmental Protection*, 84:63-74.

[Tamburini et al., 2021] Tamburini, E., Costa, S., Summa, D., Battistella, L., Fano, E. A., and Castaldelli, G. (2021). Plastic (pet) vs bioplastic (pla) or reliable aluminium bottles - what is the most sustainable choice for drinking water? a life-cycle (lca) analysis. *Environmental Research*, 196.

[Tian et al., 2021] Tian, S., Tang, H., Wang, Q., Yuan, X., Ma, Q., and Wang, M. (2021). Evaluation and optimization of blanket production from recycled polyethylene terephthalate based on the coordination of environment, economy, and society. *Science of the Total Environment*, 772.

[Toniolo et al., 2013] Toniolo, S., Mazzi, A., Niero, M., Zuliani, F., and Scipioni, A. (2013). Comparative lca to evaluate how much recycling is environmentally favourable for food packaging. *Resources, Conservation and Recycling*, 77:61-68.

[Tsiropoulos et al., 2015] Tsiropoulos, I., Faaij, A. P., Lundquist, L., Schenker, U., Briois, J. F., and Patel, M. K. (2015). Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol. *Journal of Cleaner Production*, 90:114-127.

[Ügdüler et al., 2020] Ügdüler, S., Van Geem, K., Denolf, R., Roosen, M., Mys, N., Ragaert, K. (2020). Towards closed-loop recycling of multilayer and coloured PET plastic waste by alkaline hydrolysis. *Green Chemistry*, (2020), 22(16):5376-5394

[Ügdüler et al., 2020] Ügdüler, S., Van Geem, K., Roosen, M., Delbeke, E., De Meester, S. (2020). Challenges and opportunities of solvent-based additive extraction methods for plastic recycling. *Waste Management*, (2020), 104:148-182

[Välimäki et al., 2020] Välimäki M., Sokka L., Peltola H., Ihme S., Rokkonen T., Kurkela T., Ollila J., Korhonen A., Hast J. (2020). Printed and hybrid integrated electronics using bio-based and recycled materials—increasing sustainability with greener materials and technologies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2020), 111(1-2):325-339

[Van Eygen et al., 2016] Van Eygen, E., De Meester, S., Tran, H., Dewulf, J. (2016). Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*, (2016), 107:53-64

[Van Uytvanck et al., 2014] Van Uytvanck, P., Hallmark, B., Haire, G., Marshall P., Dennis J. (2014). Impact of biomass on industry: Using ethylene derived from bioethanol within the polyester value chain. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, (2014), 2(5):1098-1105

[Van Uytvanck et al., 2017] Van Uytvanck, P., Haire, G., Marshall P., Dennis J. (2017). Impact on the Polyester Value Chain of Using p-Xylene Derived from Biomass. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, (2017), 5(5):4119-4126

[Wäger et al., 2011] Wäger, P., Hischier, R., Eugster, M. (2011). Environmental impacts of the Swiss collection and recovery systems for Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE): A follow-up. *Science of the Total Environment*, (2011), 409(10):1746-1756

[Wäger & Hischier, 2015] Wäger, P., Hischier, R. (2015). Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant. *Science of the Total Environment*, (2015), 529:158-167

[Welz et al., 2011] Welz, T., Hischier, R., and Hilty, L. M. (2011). Environmental impacts of lighting technologies - life cycle assessment and sensitivity analysis. *Environmental Impact Assessment Review*, 31:334-343.

[Werner, 2018] Werner, S. (2018). Marine plastic litter-a massive waste problem. *Detritus*, 1:128-133.

[Winans et al., 2020] Winans, K. S., Macadam-Somer, I., Kendall, A., Geyer, R., and Marvinney, E. (2020). Life cycle assessment of california unsweetened almond milk. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25:577-587.

[Wohner et al., 2019] Wohnner, B., Schwarzinger, N., Gurlich, U., Heinrich, V., and Tacker, M.

(2019). Technical emptiability of dairy product packaging and its environmental implications in austria. PeerJ, 2019.

[Wong et al., 2010] Wong, Y. L., Lee, K. M., and Yung, K. C. (2010). Model scenario for integrated environmental product assessment at the use of raw materials stage of a product. Resources, Conservation and Recycling, 54:841-850.

[Wu and Su, 2021] Wu, Y. and Su, D. (2021). Lca of an industrial luminaire using product environmental footprint method. Journal of Cleaner Production, 305.

[Zhang et al., 2019] Zhang, L., Geng, Y., Zhong, Y., Dong, H., Liu, Z. (2019). A bibliometric analysis on waste electrical and electronic equipment research. Environmental Science and Pollution Research, (2019), 26(21):21098-21108

[Zhang et al., 2019] Zhang, L., Zhong, Y., and Geng, Y. (2019). A bibliometric and visual study on urban mining. Journal of Cleaner Production, 239.

[Zhang et al., 2020] Zhang, R., Ma, X., Shen, X., Zhai, Y., Zhang, T., Ji, C., and Hong, J. (2020). Pet bottles recycling in china: An lca coupled with lcc case study of blanket production made of waste pet bottles. Journal of Environmental Management, 260.

Βιβλιογραφία (διαδικτυακοί σύνδεσμοι)

- [1] Ritchie, H., Roser, M. (2020) - "Energy". OurWorldInData. <https://ourworldindata.org/energy>
- [2] Ritchie, H., Roser, M. (2020) - "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions". OurWorldInData. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- [3] United Nations Climate Change. The Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- [4] European Parliament (2015). Circular economy: definition, importance and benefits. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>.
- [5] National Geographic Resource Library. Mining. <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/mining/>
- [6] European Commission. Large-scale physical and chemical land disturbance. <https://wad.jrc.ec.europa.eu/mining>
- [7] The Metal Casting. Environmental Issues. <http://www.themetalcasting.com/enviornmental-issues.html>
- [8] U.S Energy Information Administration, Monthly Energy Review (April 2021). <https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/>
- [9] International Transport Forum, The Carbon Footprint of Global Trade, 2015. <https://www.itf-oecd.org/carbon-footprint-global-trade>
- [10] Ritchie, H. (October 6, 2020). Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from? Our World in Data. <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>
- [11] International Chamber of Shipping. Environmental Performance: Comparison of CO₂ Emissions by Different Modes of Transport. <https://www.ics-shipping.org/shipping-fact/environmental-performance-environmental-performance/>
- [12] Enerdata. Electricity domestic consumption. <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>
- [13] BigRentz (19 Sep, 2019). How Do Landfills Work? (Animated Guide) https://www.bigrentz.com/blog/how-do-landfills-work?fbclid=IwAR3eshgo2_mRfhD_foFPY76k1RnCibxndDhmRGICSL4lIGiCjwf8uw1im0
- [14] S.C. Department of Health and Environmental Control. How Landfills Work <https://scdhec.gov/environment/land-and-waste-landfills/how-landfills-work>

- [15] Gemma Alexander (2019, Nov 5). How Waste Incineration Works. Earth911.
<https://earth911.com/business-policy/how-incineration-works/>
- [16] Team Stainless (2015). The Global Life Cycle of Stainless Steels.
https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Team_Stainless/The_Global_Life_Cycle_of_Stainless_Steels.pdf
- [17] Bellona Europa (2021, Jan 20). How can recycling in the cement and concrete sector contribute to climate change mitigation?
<https://bellona.org/news/ccs/2021-01-how-can-recycling-in-the-cement-and-concrete-sector-contribute-to-climate-change-mitigation>
- [18] U.S Energy Information Administration (2021, Jan 6). Energy and the environment explained- Recycling and energy.
<https://www.eia.gov/energyexplained/energy-and-the-environment/recycling-and-energy.php>
- [19] European Environmental Agency (2021, Nov 18). Waste recycling in Europe
<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/waste-recycling-2/assessment>
- [20] Melhart et al. (2016). Study on the Energy Saving Potential of Increasing Resource Efficiency - Final Report. European Commission.
https://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/studies/final_report.pdf
- [21] Netherlands' National Institute for Public Health and the Environment (2011, Jun 11). LCIA: the ReCiPe model. <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>
- [22] Mayne, J. (2008, May). Contribution analysis: An approach to exploring cause and effect. ILAC.
https://www.betterevaluation.org/sites/default/files/ILAC_Brief16_Contribution_Analysis.pdf
- [23] Hannah Ritchie and Max Roser (2018). Plastic Pollution. OurWorldInData.
<https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
- [24] Omnexus. What are the main applications of PET?
<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-terephthalate-pet-plastic>
- [25] Inchem (1988). Ethylene Glycol.
<https://inchem.org/documents/pims/chemical/pim227.htm#1.1%20Substance>
- [26] PubChem. Terephthalic acid (compound).
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Terephthalic-acid#section=Boiling-Point>
- [27] O.Berk. How are plastic bottles made? <https://www.oberk.com/packaging-crash-course/how-are-plastic-bottles-made-temp>
- [28] Thomasnet. Plastic Bottle Manufacturing Process - How Plastic Bottles are Made.
<https://www.thomasnet.com/articles/materials-handling/plastic-bottle-manufacturing/>
- [29] Plasgran. How is Plastic Recycled? <https://plasgranltd.co.uk/how-is-plastic-recycled/>

[30] British Plastic Foundation. Chemical Recycling 101.

<https://www.bpf.co.uk/plastipedia/chemical-recycling-101.aspx?fbclid=IwAR3s677QYrS1LMdnk6f2KSftGpFWvGFb0NwHKTsvg0FgPUyXI5PHL-dkeQ>

[31] European Commission (2012, Aug 13). Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE).

https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en

[32] Circular Computing (2019, Oct 16). Raw materials in a laptop

<https://circularcomputing.com/news/raw-materials-in-a-laptop/>

[33] Rayming PCB & Assembly. Printed Circuit Board (PCB) Manufacturing Process

<https://www.raypcb.com/pcb-board-manufacturing/>