

Διαχείριση Ηλεκτρικών και Ηλεκτρονικών Αποβλήτων: Μέθοδοι Ανακύκλωσης και Επανάκτησης Υλικών

Θεόδωρος Τσαγκούρος Α.Μ.:
2016010020

Επιβλέπων καθηγητής
Παπαευθυμίου Σπυρίδων

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

Κονσολάκης Μιχάλης

Ιψάκης Δημήτριος

Χανιά, 2022

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την διαχείριση των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (e-waste) μέσω διαδικασιών ανακύκλωσης. Η ραγδαία αύξηση του όγκου των e-waste αναδεικνύεται ως μείζον περιβαλλοντικό πρόβλημα, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια λόγω των συνεχών αλμάτων της τεχνολογίας. Η ανακύκλωση των αποβλήτων ΗΗΕ αναγνωρίζεται μία από τις καλύτερες μεθόδους αντιμετώπισης του αυξανόμενου όγκου αποβλήτων και επανάκτησης πολύτιμων υλικών. Αφορά επίσης ένα ευρύ φάσμα φυσικών, θερμικών και χημικών διαδικασιών διαχωρισμού των δομικών υλικών και ανακύκλωσης αυτών με σκοπό την επανάκτησή τους. Ιδιαίτερο κομμάτι του συνολικού προβλήματος εμφανίζεται η διαχείριση των αποβλήτων φωτοβολταϊκών πάνελ. Στην παγκόσμια προσπάθεια ενεργειακής μετάβασης η χρήση των PV πάνελ αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς. Καθώς όμως τα πάνελ έχουν πεπερασμένο χρόνο ζωής, εξίσου σημαντικοί είναι οι τρόποι διαχείρισης τους όταν φτάνουν στο End of Life (EoL) τους. Ομοίως με τη γενική έννοια των αποβλήτων ΗΗΕ, οι διαδικασίες ανακύκλωσης των πάνελ έχουν φυσικό, θερμικό ή χημικό χαρακτήρα και αποσκοπούν στην επανάκτηση πολύτιμων υλικών. Η αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων απαιτεί ολιστική προσέγγιση και διεθνή συνεργασία. Έτσι οι διακρατικές συμφωνίες και τα κανονιστικά πλαίσια παίζουν σημαντικό ρόλο σε όλα τα στάδια της ζωής των προϊόντων και στοχεύουν στην υιοθέτηση κυκλικών μοντέλων βασισμένα στην ανακύκλωση.

Abstract

The current thesis concerns electric and electrical waste (e-waste) management via recycling methods. The rapid increase of e-waste volumes poses a significant environmental threat, especially in recent years due to the constant leaps of technology. E-waste recycling stands out as one of the best methods tackling the rising heaps and reclaiming valuable materials. It concerns a wide spectrum of physical, thermal and chemical processes for the separation of materials and the recycling of them in order to be reclaimed. A special part of the overall problem is the management of photovoltaic panel waste. In the global energy transition effort, the use of PV panels is growing rapidly. But as panels have a finite lifespan, their management is just as important when they reach their End of Life (EoL). Similarly, to the general concept of EEE waste, panel recycling processes are physical, thermal or chemical in nature and are intended to recover valuable materials. Addressing the above problems requires a holistic approach and international cooperation. Thus, transnational agreements and regulatory frameworks play an important role in all stages of product life and aim at the adoption of cyclical models based on recycling.

Ευχαριστίες

Για την πολύτιμη καθοδήγηση και άψογη συνεργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Σπυρίδων Παπαευθυμίου. Για την υποστήριξη κατά την διάρκεια των σπουδών μου θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στην ανακύκλωση Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού

1.1 Ορισμός της έννοιας απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού.....	1
1.2 Ορισμός διαφόρων κατηγοριών Ανακυκλώσιμων Αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού.....	2
1.3 Συσσώρευση και Ανακύκλωση αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού.....	3
1.4 Επικίνδυνες ουσίες και οι επιπτώσεις τους στον άνθρωπο και στο περιβάλλον.....	4

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας της ανακύκλωσης Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού

2.1 Εισαγωγή.....	10
2.2 Συλλογή αποβλήτων ΗΗΕ.....	10
2.3 Επεξεργασία αποβλήτων ΗΗΕ μέσω τυπικών μεθόδων.....	13
2.4 Επανάκτηση μετάλλων μέσω μεταλλουργικών διαδικασιών.....	21
2.5 Επεξεργασία αποβλήτων ΗΗΕ μέσω άτυπων μεθόδων.....	23

Κεφάλαιο 3

Διαχείριση αποβλήτων ΗΗΕ σε παγκόσμια κλίμακα

3.1 Εισαγωγή.....	25
3.2 Παγκόσμια κατάσταση.....	26
3.3 Κατάσταση ανά ήπειρο.....	27
3.4 Η κατάσταση σε Κίνα, Ινδία και Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.....	28
3.5 Η κατάσταση σε επιλεγμένες χώρες της Ευρώπης.....	29

Κεφάλαιο 4

Ανακύκλωση φωτοβολταϊκών συστημάτων

4.1 Εισαγωγή.....	30
4.2 Δομή φωτοβολταϊκών πάνελ.....	31
4.3 Απόβλητα φωτοβολταϊκών πάνελ.....	33
4.4 Ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πάνελ.....	35
4.5 Μελέτη περίπτωσης διαχείρισης πάνελ από την First Solar.....	40
4.6 Μελέτη περίπτωσης διαχείρισης πάνελ από την Eco Recycling.....	42

Κεφάλαιο 5

Νομοθεσία και συμπεράσματα

5.1 Στρατηγικές και Νομοθετικά Πλαίσια για τη διαχείριση αποβλήτων ΗΗΕ.....	45
5.2 Νομοθετικά πλαίσια για τη διαχείριση φωτοβολταϊκών αποβλήτων.....	48

5.3 Συμπεράσματα.....	52
Βιβλιογραφία.....	54

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στην ανακύκλωση Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού

1.1 Ορισμός της έννοιας απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να μελετήσει την διαδικασία ανακύκλωσης αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΗΗΕ) είναι εμφανώς διαχωρίσιμα από τα υπόλοιπα οικιακά ή επαγγελματικά απόβλητα καθώς τα πρώτα πολλές φορές περιέχουν είτε επικίνδυνες ουσίες είτε πολύτιμες ύλες. Καθώς η χρήση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών αυξάνεται ραγδαία, συνεπάγεται πως ο όγκος των αποβλήτων ΗΗΕ αυξάνεται αναλόγως. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη τα απόβλητα ΗΗΕ να οριστούν επαρκώς από τους αρμόδιους φορείς ως ένα από τα πρώτα βήματα αντιμετώπισης του προβλήματος της διαχείρισής τους. Παρόλο που η αναλυτικότερη επεξήγηση των νομικών πλαισίων που διέπουν τα απόβλητα ΗΗΕ, της διαχείρισής τους και της ανακύκλωσής τους θα παρατεθούν σε παρακάτω κεφάλαιο, αξίζει για λόγους κατανόησης να δοθεί ο ορισμός του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω της οδηγίας WEEE και η Ελλάδα σε πλήρη συνεργασία μέσω του φύλλου υπ' αριθμόν 1184 της Εφημερίδας της Κυβερνήσεως ορίζουν πως «*ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός είναι εξοπλισμός του οποίου η ορθή λειτουργία εξαρτάται από ηλεκτρικά ρεύματα ή ηλεκτρομαγνητικά πεδία και εξοπλισμός για παραγωγή, μεταφορά και μέτρηση των ρευμάτων και πεδίων αυτών, ο οποίος έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί υπό ονομαστική τάση έως 1000 V εναλλασσόμενου ρεύματος ή έως 1500 V συνεχούς ρεύματος. Στην έννοια του ΗΗΕ συμπεριλαμβάνονται όλα τα κατασκευαστικά του στοιχεία, τα συναρμολογημένα μέρη και τα αναλώσιμα, τα οποία συνιστούν τμήμα του προϊόντος κατά τη διάθεσή του στην αγορά*» [1], [2].

Έτσι μπορεί κανείς να καταλάβει ότι τα απόβλητα ΗΗΕ συνίστανται από υπολογιστές και smartphones μέχρι παιχνιδομηχανές και τηλεοράσεις και από ηλεκτρικά κατσαβίδια και πιστολάκια μαλλιών μέχρι θερμοσίφωνες και ψυγεία. Συνεπώς όταν τα παραπάνω και πληθώρα άλλων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών φτάνουν στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους (End of Life – EoL) είτε λόγω βλάβης είτε λόγω μακροχρόνιας χρήσης, την στιγμή που θα απορριφθούν θεωρούνται απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού.

1.2 Ορισμός διαφόρων κατηγοριών Ανακυκλώσιμων Αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού

Καθώς οι συσκευές είτε ηλεκτρονικές είτε ηλεκτρικές διαχωρίζονται σε πάρα πολλά είδη ανάλογα με τη χρήση τους και σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθός τους, λογικό θεωρείται να διαχωρίζονται σε ανάλογες κατηγορίες όταν αφορά την ανακύκλωσή τους.

Σύμφωνα με την ετήσια έκθεση της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union – ITU), η οποία είναι η αρμόδια υπηρεσία των Ηνωμένων Εθνών για θέματα τεχνολογίας πληροφοριών και επικοινωνίας, τα απόβλητα ΗΗΕ προς ανακύκλωση κατηγοριοποιούνται σε 6 υποομάδες [3].

- Συσκευές εναλλαγής θερμότητας όπως ψυγεία και air-conditions
- Οθόνες όπως τηλεοράσεις και laptops
- Λυχνίες φωτισμού όπως λάμπες φθορίου ή λάμπες LED
- Ογκώδης εξοπλισμός όπως πλυντήρια, φωτοτυπικά και ηλιακά πάνελ
- Μικρός εξοπλισμός όπως τοστιέρες, ηλεκτρικά εργαλεία και φούρνοι μικροκυμάτων
- Μικρός εξοπλισμός τηλεπικοινωνιών και πληροφορικής όπως κινητά τηλέφωνα

Πρέπει να σημειωθεί πως η παραπάνω ομαδοποίηση αποτελεί μια σύμπτυξη που έκαναν οι συγγραφείς της έκθεσης, καθώς ο διαχωρισμός βάσει τύπου συσκευής απαιτεί 54 υποομάδες συσκευών ΗΗΕ.

Επίσης αξίζει να παρατεθεί για λόγους πληρότητας η κατηγοριοποίηση που παραθέτει στην ιστοσελίδα της η εταιρεία Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε., η οποία ασχολείται με ανακύκλωση ΗΕΕ και με την ενημέρωση του κοινού για παρόμοια θέματα [4].

- Μεγάλες Οικιακές Συσκευές
- Μικρές Οικιακές Συσκευές
- Εξοπλισμός Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
- Καταναλωτικά Είδη
- Φωτιστικά Είδη
- Ηλεκτρικά και Ηλεκτρονικά Εργαλεία
- Παιχνίδια και Εξοπλισμός Ψυχαγωγίας και Αθλητισμού
- Ιατροτεχνολογικά Προϊόντα
- Όργανα Παρακολούθησης και Ελέγχου
- Συσκευές Αυτόματης Διανομής

Από τις παραπάνω κατηγορίες και γενικότερα στη Ανακύκλωση Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού τα εξαρτήματα ηλεκτρικών αυτοκινήτων και οι συσσωρευτές δεν συμπεριλαμβάνονται.

1.3 Συσσώρευση και Ανακύκλωση αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού

Έχοντας ορίσει τι είναι ο ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός, μένει να γίνει η ανάλυση του προβλήματος που δημιουργείται λόγω της αύξησης των αποβλήτων του.

Καθώς η τεχνολογία και οι επιστήμες αναπτύσσονται, όλο και περισσότερες συσκευές εφευρίσκονται και παράγονται σε μεγάλες ποσότητες. Ο σύγχρονος οικιακός χώρος και ο σύγχρονος χώρος εργασίας βρίθουν από συσκευές ΗΗΕ. Μία μέση οικία στην Ε.Ε. και στη Βόρεια Αμερική χρησιμοποιεί ψυγείο, πλυντήριο, τηλεόραση, ηλεκτρονικό υπολογιστή, εναλλάκτες θερμότητας και air-condition μεταξύ άλλων. Πιο συγκεκριμένα, το έτος 2020 3.6 δισεκατομμύρια άνθρωποι χρησιμοποιούσαν smartphone και προβλέπεται πως αυτός ο αριθμός θα ανέβει στα 7.5 δις μέχρι το 2026 [5]. Με την αύξηση του πληθυσμού, την περαιτέρω διείσδυση της τεχνολογίας και την αύξηση της αυτοματοποίησης όλο και περισσότερες συσκευές αγοράζονται από το καταναλωτικό κοινό. Όμως στην συντριπτική του πλειοψηφία ο ΗΗΕ δεν είναι ικανός για αέναη χρήση. Πολλές συσκευές μπορεί να πάθουν ανεπανόρθωτη βλάβη, μπορεί να φτάσουν στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους λόγω παρατεταμένης χρήσης ή μπορεί να αντικατασταθούν με νέες συσκευές λόγω τεχνολογικών τάσεων ή προσωπικών προτιμήσεων. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, όταν οι χρήστες απορρίψουν τις συσκευές τους, αυτές θεωρούνται απόβλητα ΗΗΕ, ο όγκος των οποίων είναι δραματικά αυξανόμενος. Ειδικότερα το 2019 παράχθηκαν 53.6 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι (Mt) αποβλήτων ΗΗΕ ενώ προβλέπεται μέχρι το 2030 να έχουν παραχθεί 74.7 Mt αποβλήτων.

Έτσι συνεπάγεται, πως ένας τρόπος αντιμετώπισης είναι προφανώς η ανακύκλωση των αποβλήτων. Η ανακύκλωση συνίσταται από πολλά αλληλοεπηρεαζόμενα στάδια, από αυτό της συλλογής, της καταγραφής, της επεξεργασίας και της ανάκτησης. Είναι η μέθοδος με την οποία ο όγκος των αποβλήτων μπορεί να μειωθεί, να αποφευχθεί η μόλυνση του περιβάλλοντος από τις επικίνδυνες ουσίες που περιέχουν, να επανακτηθούν οι πολύτιμες ουσίες που τα συντελούν και μακροπρόθεσμα να μειωθεί πέραν του προβλήματος μόλυνσης και το πρόβλημα υπερεξόρυξης σπάνιων και μη υλικών. Παρόλο που θεωρητικά η Ανακύκλωση Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) είναι μια άρτια μέθοδος για την αντιμετώπιση του προβλήματος, σε πρακτικό επίπεδο ακόμη βρίσκεται σε μη ενθαρρυντικά επίπεδα.

Η Ανακύκλωση Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες: την επίσημη ανακύκλωση (formal recycling) και την ανεπίσημη ανακύκλωση (informal recycling). Η επίσημη ανακύκλωση συνιστά το σύνολο των διαδικασιών συλλογής και επεξεργασίας αποβλήτων σύμφωνα με διεθνή πρότυπα προστασίας του περιβάλλοντος και των εργαζομένων. Λαμβάνει χώρα σε κέντρα επεξεργασίας και ανακύκλωσης στην Ασία, στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη με στόχο την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση πλαστικού και μετάλλων. Από την άλλη η ανεπίσημη ανακύκλωση αφορά διαδρομές και επεξεργασία ανακυκλώσιμων αποβλήτων ΗΗΕ που δεν συνάδουν τις περισσότερες φορές με τα διεθνή πρότυπα και επιφέρουν σοβαρό κίνδυνο στους ανθρώπους και το περιβάλλον. Εκτιμάται πως το 82.6% των αποβλήτων ΗΗΕ που ανακυκλώνεται σε παγκόσμια κλίμακα, ανακυκλώνεται δια μέσω ανεπίσημων καναλιών από ανεκπαίδευτο προσωπικό [6]. Ένα από τα

κύρια προβλήματα είναι πως οι αναπτυσσόμενες χώρες που παράγουν και καταναλώνουν τον ΗΗΕ, μετά τον τέλος της ζωής του τον «εξάγουν» στις αναπτυσσόμενες. Όταν συμβαίνει αυτό τα απόβλητα συσσωρεύονται σε τεράστιες χωματερές σε φτωχά μέρη του πλανήτη, τα οποία δεν έχουν την κατάλληλη υποδομή να τα επεξεργαστούν σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα. Αυτό το φαινόμενο τροφοδοτεί την ανεπίσημη ανακύκλωση από ιδιώτες (informal recycling), οι οποίοι προσπαθούν να περισυλλέξουν πολύτιμα υλικά τις περισσότερες φορές με μη ενδεδειγμένες μεθόδους. Με αυτό τον τρόπο πολλές φορές θέτουν σε κίνδυνο τους εαυτούς τους, την κοινωνία τους και μακροπρόθεσμα το περιβάλλον. Σε περιοχές ανά τον κόσμο με χαμηλότατο εισόδημα, όπως είναι η περιοχή Agbogboshie στην Γκάνα, η πόλη Guiyu στην Κίνα, η πόλη Karachi στο Πακιστάν μεταξύ άλλων, η ανεπίσημη ανακύκλωση υιοθετείται ως τρόπος βιοπορισμού από πολλούς ιδιώτες καθώς τα απόβλητα ΗΗΕ είναι πλούσια σε πολύτιμες ύλες όπως αλουμίνιο, χαλκό και χρυσό [7].

1.4 Επικίνδυνες ουσίες και οι επιπτώσεις τους στον άνθρωπο και στο περιβάλλον

Μία από τις παραμέτρους που διέπει την ανακύκλωση ΗΗΕ και γενικότερα τα απόβλητα ΗΗΕ είναι η παρουσία επικίνδυνων ουσιών οι οποίες υπάρχουν στα προϊόντα είτε ήδη λόγω κατασκευής, είτε προκύπτουν από διεργασίες επεξεργασίας αποβλήτων. Είναι πολλαπλές και μπορεί να έχουν βραχυπρόθεσμες ή μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων αλλά και στο περιβάλλον τους. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες επικίνδυνες ουσίες που εμφανίζονται στα απόβλητα ΗΗΕ και οι επιπτώσεις τους.

Μόλυβδος

Ο μόλυβδος (Lead – Pb) είναι ένα χημικό στοιχείο αρκετά χρήσιμο στην σύνθεση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών καθώς παρουσιάζει χαμηλό σημείο τήξης, είναι ελατός και εύπλαστος. Επίσης χρησιμοποιείται ως συνθετικό υλικό κραμάτων όπως ο ορείχαλκος αλλά και ως κόλλα μετάλλων για πλακέτες κυκλωμάτων. Στη σημερινή εποχή ο μόλυβδος χρησιμοποιείται κυρίως στις μπαταρίες μόλυβδου οξέος. Τα προηγούμενα χρόνια χρησιμοποιούνταν ευρέως ως κόλλα μετάλλων για συγκόλληση εξαρτημάτων και είχε διαδεδομένη χρήση στις οθόνες CRT. Οι οθόνες CRT ή αλλιώς οθόνες καθοδικού σωλήνα δύνανται να περιέχουν μέχρι και 3 kg μόλυβδου. Λόγω της τοξικής συμπεριφοράς του μόλυβδου οι οδηγίες WEEE και RoHS της Ευρωπαϊκής Ένωσης απαγόρευαν την χρήση μόλυβδου ως συγκολλητικό υλικό από το 2006 [8]. Η χρήση των οθονών CRT έχει σχεδόν αντικατασταθεί με χρήση των επίπεδων LCD ή Plasma οθονών. Ενώ στη σύγχρονη βιομηχανία συσκευών η χρήση του μόλυβδου έχει εκλείψει, ο παγκόσμιος όγκος αποβλήτων ΗΗΕ ακόμη περιέχει τις παραπάνω συσκευές είτε αυτούσιες είτε ως εξαρτήματα σε χωματερές [9]. Ως αποτέλεσμα συσκευές με υψηλή περιεκτικότητα σε μόλυβδο που δεν έχουν επεξεργαστεί ή έχουν επεξεργαστεί με μη ορθό τρόπο δύνανται να μολύνουν το περιβάλλον και να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με έρευνα του 2016, 69 παιδιά στην Νότια Αμερική που είχαν εκτεθεί σε μόλυβδο λόγω καψίματος καλωδίων και χειρωνακτικής

εργασίας συγκέντρωσης μετάλλων παρουσίασαν υψηλά επίπεδα μόλυβδου στο αίμα τους [10]. Επίσης στην πόλη Guiyu της Κίνας, περιοχή που είναι αποδεδειγμένα μολυσμένη με βαρέα μέταλλα, βρέθηκαν επίσης υψηλά ποσοστά μόλυβδου στο αίμα παιδιών, τα οποία συνδέθηκαν με συμπτώματα βήχα, φλέματος και δύσπνοιας [11]. Γενικότερα η μόλυνση από μόλυβδο συνδέεται με καθυστερημένη ανάπτυξη, μαθησιακές δυσκολίες και απώλεια όρεξης στα παιδιά. Ενώ στους ενήλικες συνδέεται με υψηλή πίεση αίματος, πονοκεφάλους και πόνους σε μυς και αρθρώσεις [12]. Όσον αφορά την μόλυνση του περιβάλλοντος ο μόλυβδος από τις συσκευές μετά από κάποιο χρονικό διάστημα δύναται να διαρρεύσει στο έδαφος. Ως αποτέλεσμα του προηγούμενου εμφανίζεται η μόλυνση του εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα. Μολυσμένο έδαφος από μόλυβδο διακινδυνεύει την μόλυνση αγροτικών τομέων ενώ μολυσμένος υδροφόρος ορίζοντας διακινδυνεύει τη μόλυνση του πόσιμου νερού [13].

Κάδμιο

Το κάδμιο (Cadmium -Cd) είναι ένα χρήσιμο στοιχείο με παρόμοιες ιδιότητες με του μόλυβδου. Χρησιμοποιείται κυρίως στις μπαταρίες νικελίου – καδμίου (Ni-Cd), στις προστατευτικές επιστρώσεις και σαν συνθετικό υλικό κραμάτων. Οι μπαταρίες Ni-Cd **ΕΙΝΑΙ** επαναφορτιζόμενες και στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν σε εργαλεία, φωτογραφικό εξοπλισμό και ηλεκτρικά παιχνίδια. Το 2006 η χρήση τους στην Ε.Ε. περιορίστηκε από την οδηγία 2006/66/EC γνωστή και ως “Battery Directive” [14]. Τα τελευταία χρόνια το κάδμιο χρησιμοποιείται για παρασκευή του τελλουριούχου καδμίου (CdTe), μιας χημικής ένωσης που χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά πάνελ. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί το CdTe για κατασκευή λεπτών μεμβρανών των πάνελ. Κίνδυνος για την ανθρώπινη υγεία λόγω του καδμίου δημιουργείται όταν εισπνέεται, σε περίπτωση λανθασμένης επεξεργασίας, με αποτέλεσμα να γίνεται μεγάλη ζημιά στους πνεύμονες [15].

Αμερίκιο

Το αμερίκιο (Americium – Am) χρησιμοποιείται στους ανιχνευτές καπνού. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται στους ανιχνευτές ιονισμού καπνού υπό τη ραδιενεργή του μορφή, το Am241 [16]. Ενώ το Am241 κανονικά θεωρείται πυρηνικό απόβλητο, οι ανιχνευτές θεωρούνται απόβλητα ΗΗΕ. Ανιχνευτές καπνού σε χωματερές αποτελούν κίνδυνο διότι το Am241, σε περίπτωση που εισπνευστεί, μπορεί να παραμείνει έως και 50 χρόνια στα οστά, 20 χρόνια στο συκώτι, μόνιμα σε αναπαραγωγικούς αδένες προκαλώντας πολλές φορές καρκίνο.

Υδράργυρος

Ο υδράργυρος (Mercury – Hg) χρησιμοποιείται στους λαμπτήρες φθορισμού υπό μορφή ατμού, σε τηλεοράσεις και laptop με οθόνες LCD και στις μπαταρίες μεγέθους «κουμπί». Όταν οι λαμπτήρες φθορισμού δεν ανακυκλώνονται σωστά και καταλήγουν σε χωματερές, υπάρχει τεράστια πιθανότητα να σπάσουν. Όταν ο υδράργυρος ελευθερωθεί δύναται να αντιδράσει με βακτήρια του εδάφους και να παραχθεί μεθυλιδράργυρος (methylmercury), ουσία η οποία εύκολα διαλύεται στο νερό και μπορεί να περάσει σε υδρόβιους οργανισμούς. Σε αυτή την περίπτωση ενδέχεται να κινδυνέψουν κοινότητες που βασίζουν την διατροφή τους στα ψάρια και στα όστρακα [17]. Σε κάποιες μελέτες η ανθρώπινη μόλυνση από μεθυλιδράργυρο συνδέεται με καρδιολογικές και αναπαραγωγικές επιπλοκές [18], [19]. Το 2013 η Επιτροπή Περιβάλλοντος, Δημόσιας Υγείας και Ασφάλειας των Τροφίμων του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου ψήφισε να περιορίσει τις εισαγωγές και τις εξαγωγές μπαταριών «κουμπί» που περιέχουν υδράργυρο, απόφαση με ισχύ από το 2020 και μετά. Γενικότερα η Ε.Ε. με την οδηγία RoHS [20] απαγόρευσε τον υδράργυρο σε ορισμένες συσκευές και τον περιόρισε σε άλλες μέχρι 1000ppm.

Αρσενικό

Το αρσενικό (Arsenic – Ar) χρησιμοποιείται υπό την μορφή ένωσης του αρσενιδίου του γαλλίου (gallium arsenide), η οποία λειτουργεί ως ημιαγωγός. Βρίσκει εφαρμογές σε ηλεκτρονικές πλακέτες υπολογιστών και κινητών και σε οθόνες τεχνολογίας LED και LCD. Επίσης λειτουργεί ως ημιαγωγός και σε ηλιακές κυψέλες υψηλής απόδοσης τεχνολογίας λεπτής μεμβράνης, που βέβαια έχουν υψηλό κόστος και βρίσκουν αεροδιαστημικές χρήσεις [21]. Όταν οι παραπάνω συσκευές απορρίπτονται σε χωματερές χωρίς την κατάλληλη επεξεργασία, τότε υπάρχει ο κίνδυνος το αρσενικό να διαρρεύσει στο έδαφος και εν τέλει στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Επίσης σε περιπτώσεις τήξης συσκευών ΗΗΕ στα πλαίσια της ανεπίσημης ανακύκλωσης, το αρσενικό εξατμίζεται και αν εισπνευστεί ενδέχεται ο κίνδυνος να προκαλέσει καρκίνο και νευρολογικά προβλήματα [22].

Λίθιο

Το λίθιο (Lithium – Li) χρησιμοποιείται στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ιόντων λιθίου, οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή σε πάρα πολλές συσκευές όπως τα smartphones, τα laptops και ηλεκτρικά εργαλεία χειρός. Γενικά αυτές οι μπαταρίες δεν θεωρούνται ιδιαίτερα επικίνδυνες καθώς δεν περιέχουν μόλυβδο ή κάδμιο και μπορούν να βρίσκονται σε ΧΥΤΑ. Βέβαια υπό συνθήκες μεγάλης πίεσης ή μεγάλων θερμοκρασιών στις χωματερές υπάρχει ο κίνδυνος έκρηξης της μπαταρίας και ακολούθως ο τραυματισμός ανθρώπου [23].

Εξασθενές Χρώμιο

Το εξασθενές χρώμιο (Chromium VI) στο χώρο των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εφαρμογών βρίσκει χρήση κυρίως ως αντιδιαβρωτική βαφή. Χρησιμοποιείται για να προστατεύει κράματα αλουμινίου, ψευδαργύρου, καδμίου, ασημιού, τιτανίου, χαλκού, μαγνησίου και ατσαλιού, τα οποία είναι δομικά υλικά του ΗΗΕ και πολλές φορές κινδυνεύουν από σκουριά και διάβρωση. Επίσης επικαλύψεις εξασθενούς χρωμίου βοηθάνε στην καλύτερη επαφή μεταξύ εξαρτήματος και τελικής βαφής [24]. Όσον αφορά την επικινδυνότητα το εξασθενές χρώμιο είναι τοξικό και καρκινογόνο. Μάλιστα έχει παρατηρηθεί πως υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ εργασίας με έκθεση στο χρώμιο και καρκίνου σε πνεύμονες και ρινικές κοιλότητες [25]. Η οδηγία RoHS της Ε.Ε. έχει σχεδόν απαγορεύσει τη χρήση εξασθενούς χρωμίου στον ΗΗΕ.

Οξειδίο του Βηρυλλίου

Η ανόργανη ένωση του οξειδίου του βηρυλλίου (Beryllium Oxide – BeO) προορίζεται για κατασκευή ηλεκτροκεραμικών όπως οι πυκνωτές των ηλεκτρικών κυκλωμάτων [26], για κατασκευή συστημάτων ψύξης των εξαρτημάτων του υπολογιστή, για κατασκευή ηλεκτρικών μονωτών και για την κατασκευή κάποιων εξαρτημάτων των φούρνων μικροκυμάτων μεταξύ άλλων. Όσον αφορά την επικινδυνότητα του BeO, βραχυπρόθεσμα προκαλεί δερματικά συμπτώματα στα μάτια και στη μύτη σε περίπτωση επαφής. Μακροπρόθεσμα όμως η ένωση θεωρείται καρκινογόνα, καθώς ενδέχεται να προκαλέσει καρκίνο του πνεύμονα. Επίσης χρόνια εισπνοή οξειδίου του βηρυλλίου οδηγεί στη νόσο της βηρυλλίωσης. [27]

Χλωροφθοράνθρακες

Οι χλωροφθοράνθρακες αποτελούν μια ομάδα οργανικών χημικών ενώσεων που χρησιμοποιούνται ως ψυκτικά. Επί της ουσίας η ομάδα αποτελείται από τους χλωροφθοράνθρακες (CFCs), τους υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFCs) και τους υδροφθοράνθρακες (HFCs). Τα ψυκτικά λειτουργούν ως εργαζόμενα ρευστά σε ψυγεία, καταψύκτες, air-conditions και γενικότερα σε αντλίες θερμότητας. Το 1974 καθηγητές από το πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια δείχνουν πως οι CFCs καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος της στρατόσφαιρας του πλανήτη. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται *τρύπα του όζοντος* και έχει ως αποτέλεσμα να επιτρέπεται η είσοδος στα πιο επιβλαβή κύματα του υπεριώδους φωτός εντός της ατμόσφαιρας [28]. Το 1987 υπογράφεται το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, αρχικά από 27 χώρες, με στόχο την μείωση και εν τέλει την διακοπή παραγωγής και χρήσης των CFCs. Ως εναλλακτική λύση των CFCs εμφανίστηκαν λίγο αργότερα οι HCFCs καθώς είχαν μικρότερη διάρκεια ζωής και δεν περιείχαν χλώριο. Πάλι σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ η χρήση τους περιορίστηκε καθώς είναι επιβλαβή αέρια του θερμοκηπίου [29]. Ειδικότερα για τη μέτρηση βλαβερότητας των χλωροφθορανθράκων χρησιμοποιούνται οι κλίμακες ODP (Ozone Depletion Potential) και GWP (Global Warming Potential). Έτσι οι CFCs παρουσιάζουν

ODP από περίπου 0,57 έως 1 ενώ οι HCFCs από 0,03 έως 0,04 [30], [31]. Ενώ για τη δεύτερη κλίμακα οι CFCs κυμαίνονται από 4.660 έως 13.900 ενώ οι HCFCs από 79 έως 1980 [32]. Όσον αφορά το θέμα ανακύκλωσης συσκευών ΗΗΕ ενώ ως επί το πλείστον οι βλαβερότερες ουσίες έχουν απαγορευτεί, παραμένει το πρόβλημα πως τεράστιες ποσότητες παλιών συσκευών βρίσκονται συγκεντρωμένες σε χωματερές. Οι συσκευές αυτές λόγω παλαιότητας ή βλάβης διαρρέουν τις επικίνδυνες ουσίες που περιέχουν στην ατμόσφαιρα. Στόχος της ανακύκλωσης ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών είναι να βρει αυτούς τους όγκους αποβλήτων και να τους επεξεργαστεί με περιβαλλοντικά άρτιο τρόπο ώστε να αποφευχθούν επιπλέον διαρροές βλαβερών ουσιών [33].

Χλωριούχο Πολυβινύλιο

Το χλωριούχο πολυβινύλιο (Polyvinyl Chloride – PVC) είναι ένα πολυμερές πλαστικό με ευρέως διαδεδομένη χρήση στις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Το PVC χρησιμοποιείται για την μόνωση και την επένδυση των περισσότερων καλωδίων των συσκευών, καθώς είναι ανθεκτικό και εύκαμπτο. Επίσης σε περίπτωση φωτιάς το PVC αντιδρά δημιουργώντας υδροχλώριο το οποίο με τη σειρά του παρέχει αντιπυρική προστασία. Στην πληθώρα των περιπτώσεων που ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός καταλήγει σε κανάλια ανεπίσημης ανακύκλωσης, η κύρια μέθοδος επεξεργασίας των καλωδίων με PVC περίβλημα είναι το κάψιμό τους, με σκοπό να εξαχθεί ο χαλκός. Η καύση όμως του PVC παράγει ποσότητες υδροχλωρίου (HCl), το οποίο αντιδρά με το περιβάλλον και παράγονται πολυχλωριωμένες διβενζοδιοξίνες ή απλούστερα διοξίνες. Οι διοξίνες σύμφωνα με επιδημιολογικές έρευνες είναι καρκινογενείς, ενώ δύναται να δημιουργήσουν προβλήματα στο αναπνευστικό, στο πεπτικό και στο αναπαραγωγικό σύστημα των ανθρώπων [34]. Όσον αφορά το περιβάλλον οι διοξίνες και πλαστικοποιητές που περιέχει το PVC, οι φθαλικοί εστέρες (phthalates), θεωρούνται ισχυρές μολυσματικές ουσίες. Ουσίες οι οποίες μπορούν ταυτόχρονα να μολύνουν τον αέρα, να μολύνουν υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και εδάφη μέσω διαρροών (toxic leaching) και τέλος έμβια όντα που έρχονται σε επαφή με αυτές [35].

Επιβραδυντικά Φλόγας

Στον τομέα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών, χρησιμοποιούνται τα βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας (Brominated Flame Retardants – BFRs). Οι χρήσεις των BFRs είναι πολλαπλές αφού οι περισσότερες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές χρειάζονται κάποιο είδος αντιπυρικής προστασίας. Ποσοστιαία, το 56% της παγκόσμιας παραγωγής BFRs διοχετεύεται στον ΗΗΕ, επί του οποίου ποσοστού το 59% αφορά περιβλήματα υπολογιστών, κινητών και τηλεοράσεων, το 30% αφορά πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων και αθροιστικά ένα 11% αφορά στοιχεία συνδεσμολογίας [36]. Γενικότερα ο όρος BFRs αναφέρεται σε μια ομάδα διαφορετικών ενώσεων, με κυριότερες να είναι : η υποομάδα PBDEs (DecaBDE, OctaBDE, PentaBDE), η υποομάδα PBBs και η ένωση TBBPA. Από τις παραπάνω οι ενώσεις OctaBDE, PentaBDE και η υποομάδα PBBs έχουν περιοριστεί ως προς τη χρήση τους από την

ευρωπαϊκή οδηγία RoHS. Ομοίως με το PVC τα επιβραδυντικά φλόγας υπό μη ελεγχόμενες συνθήκες δύνανται να αντιδράσουν είτε με το περιβάλλον είτε να επηρεαστούν από μη εγκεκριμένες μεθόδους κατεργασίας αποβλήτων ΗΗΕ, με αποτέλεσμα να παραχθούν επικίνδυνα προϊόντα όπως υδροβρώμιο (HBr) και βρωμιωμένες διοξίνες. Τα BFRs και τα προϊόντα τους διαθέτουν την ιδιότητα της βιοσυσσώρευσης, δηλαδή την ικανότητα να παραμένουν στους έμβιους ιστούς χωρίς να μεταβολίζονται. Σε αυτές τις περιπτώσεις, όταν ξεπεραστούν ορισμένα όρια μέγιστης συγκέντρωσης των ουσιών αυτών, οι τελευταίες γίνονται τοξικές. Σε αυτές τις περιπτώσεις ενέχονται κίνδυνοι καθώς τοξικές συγκεντρώσεις των παραπάνω συνδέονται με νευρολογικά και ενδοκρινολογικά προβλήματα σε ανθρώπους και ζώα [37]. Τέλος η ικανότητα της βιοσυσσώρευσης των ουσιών αυτών, οδηγεί στην μόλυνση εδάφους, υδροφόρου ορίζοντα και ατμόσφαιρας.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση αντίστροφης εφοδιαστικής αλυσίδας της ανακύκλωσης Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού

2.1 Εισαγωγή

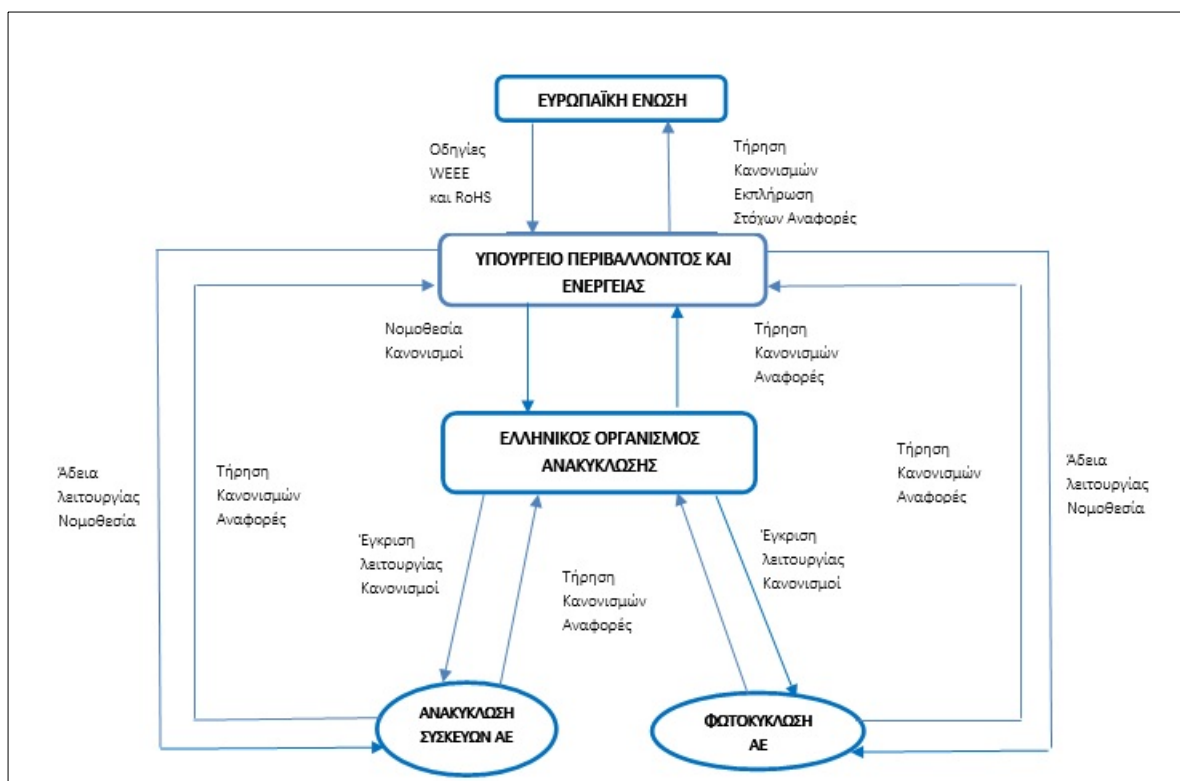
Στο παρόν κεφάλαιο, έχοντας ήδη ορίσει βασικές έννοιες που διέπουν την ανακύκλωση ΗΗΕ, περιγράφονται οι μηχανισμοί που έχουν τεθεί υπό λειτουργία και αφορούν την ανακύκλωση ΗΗΕ. Επί της ουσίας το e waste recycling αποτελεί εν μέρει μια αντίστροφη εφοδιαστική αλυσίδα καθώς τα προϊόντα ρέουν προς τα πίσω. Είτε αφορά επίσημη είτε ανεπίσημη ανακύκλωση, η μορφή της αλυσίδας μπορεί να παρατεθεί ως εξής : Συλλογή, Κατηγοριοποίηση, Επεξεργασία και Ανάκτηση[38]. Πολλές φορές το στάδιο της Κατηγοριοποίησης μπορεί να παραλειφθεί ως αυτούσιο, καθώς κατά περιπτώσεις λαμβάνει χώρα ακριβώς μετά την Συλλογή από τον ίδιο οργανισμό ή ακριβώς πριν την Επεξεργασία. Το στάδιο της Συλλογής αφορά τις διαδρομές των αποβλήτων από τους χρήστες προς τους χώρους συγκέντρωσης και διαλογής. Το στάδιο της Κατηγοριοποίησης αφορά το διαχωρισμό των αποβλήτων σε διάφορες υποομάδες με γνώμονα τα υλικά που τα δομούν. Η Επεξεργασία είναι το στάδιο στο οποίο τα απόβλητα επεξεργάζονται και διασπώνται σε πολύτιμα και μη υλικά. Το τελικό στάδιο είναι αυτό της Ανάκτησης, στο οποίο οι ανακυκλωμένες πολύτιμες ύλες μεταπωλούνται και οι μη πολύτιμες απορρίπτονται ή επεξεργάζονται περαιτέρω.

2.2 Συλλογή αποβλήτων ΗΗΕ

Στη διεθνή βιβλιογραφία και στις μελέτες που αφορούν την ανακύκλωση διακρίνονται τέσσερα σενάρια απόρριψης και συλλογής ΑΗΗΕ. Το πρώτο σενάριο αφορά την άρτια μέθοδο συλλογής, λεγόμενη και ως formal, που εξασφαλίζει την σωστή διαχείριση των ΑΗΗΕ. Σε αυτό το σενάριο κρατικοί φορείς και ιδιωτικές επιχειρήσεις δημιουργούν μηχανισμούς συλλογής απορριπτόμενων συσκευών. Οι μηχανισμοί αυτοί συνήθως είναι η δημιουργία σημείων εναπόθεσης συσκευών σε χώρους δημόσιου ενδιαφέροντος σύμφωνα με τα πληθυσμιακά χαρακτηριστικά, τοποθέτηση σημείων συλλογής σε συνεργαζόμενες επιχειρήσεις, παραλαβή από οικίες και χώρους εργασίας και πλαίσια πρόσδοσης οικονομικών κινήτρων για ανακύκλωση [3]. Στην περίπτωση της Ελλάδας, το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας εποπτεύει και ελέγχει τον Ελληνικό Οργανισμό Ανακύκλωσης ή αλλιώς ΕΟΑΝ. Ο ΕΟΑΝ ασχολείται με τον πλήρη έλεγχο των Συστημάτων Εναλλακτικής Διαχείρισης. Ένα από τα ρεύματα αυτών των συστημάτων είναι η ΑΗΗΕ. Έτσι για την διαχείρισή τους ο ΕΟΑΝ έχει εγκρίνει μέχρι στιγμής δύο εταιρίες ανακύκλωσης: την ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΥΣΚΕΥΩΝ Α.Ε. και την ΦΩΤΟΚΥΚΛΩΣΗ Α.Ε. [39]. Οι εταιρίες αυτές συνεργάζονται με την πολιτεία και τοποθετούν

κάδους συλλογής σε δημόσιους χώρους, όπως δημαρχεία και ΚΕΠ. Επίσης συνεργάζονται με επιχειρήσεις που είτε υποχρεωτικά είτε εθελοντικά συμμετέχουν στην διαδικασία συλλογής. Ομοίως με την πολιτεία, οι επιχειρήσεις τοποθετούν ειδικούς πράσινους κάδους συλλογής στους χώρους τους για μικρές και μεγάλες συσκευές. Οι εταιρίες που συμμετέχουν υποχρεωτικά ορίζονται από την νομοθεσία ως Υπόχρεοι Παραγωγοί ΑΗΗΕ και είναι γενικά οι εταιρίες που κατασκευάζουν ή/και εμπορεύονται ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, όπως αυτός ορίστηκε στο παραπάνω κεφάλαιο. Τα ενδεχομένως οικονομικά κίνητρα αφορούν τυχόν εκπτώσεις στις καινούριες συσκευές του αγοραστικού κοινού με την προϋπόθεση ότι θα επιστρέψει την συσκευή που αντικαθιστά. Το δεύτερο σενάριο κατά κύριο λόγο δεν αφορά σενάριο συλλογής ΑΗΗΕ αλλά μάλλον ένα από τα σενάρια που είναι υπεύθυνα για τη μειωμένη ανακύκλωση ΑΗΗΕ. Σε αυτό το σενάριο οι χρήστες απορρίπτουν τις συσκευές τους στους κοινούς κάδους απορριμμάτων μαζί με τα υπόλοιπα οικιακά τους απορρίμματα. Οι συσκευές δεν τυχαίνουν επεξεργασίας και έχουν την ίδια τύχη με τα κοινά σκουπίδια, αποτέφρωση ή ταφή [3]. Το πρόβλημα με αυτό το σενάριο είναι προφανές καθώς τα ΑΗΗΕ δεν επεξεργάζονται ώστε να αφαιρεθούν οι βλαβερές ουσίες που περιέχουν, ούτε ανακυκλώνονται. Το τρίτο σενάριο αφορά εκείνους τους χρήστες που απορρίπτουν τις συσκευές τους στους κοινούς κάδους ανακύκλωσης. Σε αυτό το σενάριο παρόλο που λαμβάνει χώρα ανακύκλωση μετάλλου, πλαστικού και γυαλιού, δεν γίνεται επεξεργασία αφαίρεσης βλαβερών ουσιών και επίσης υπάρχει το ενδεχόμενο εξαγωγής των υλών σε χώρες με ελάχιστη εποπτεία όπως αναφέρθηκε στο παραπάνω κεφάλαιο [3]. Το τέταρτο και τελευταίο σενάριο αφορά την μελανή κηλίδα του χώρου της ανακύκλωσης ΑΗΗΕ, τα ανεπίσημα κανάλια ανακύκλωσης (informal recycling). Στο στάδιο της συλλογής οι γυρολόγοι και οι πλανόδιοι έμποροι συλλέγουν συσκευές είτε από τους τελικούς χρήστες είτε από κάδους απορριμμάτων με σκοπό την μεταπώλησή τους, πολλές φορές παράνομα. Τα ανεπίσημα κανάλια υπολογίζεται πως διακινούν ένα τεράστιο ποσοστό των ΑΗΗΕ, πολλές φορές μεγαλύτερο από αυτό που επεξεργάζεται με ασφαλή τρόπο [3]. Κάποιες μελέτες υποστηρίζουν πως αυτό το ποσοστό κυμαίνεται από 70% έως 80% [40].

Στη συνέχεια θα εξεταστούν οι διαδικασίες επεξεργασίας και χρήσης μόνο για τα σενάρια 1 και 4 δηλαδή για τις περιπτώσεις formal και informal recycling, αφού υπό τα υπόλοιπα σενάρια τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού δεν ανακυκλώνονται. Παρακάτω φαίνεται σε διάγραμμα STAMP οι διμερείς σχέσεις των βασικότερων μηχανισμών που εμπλέκονται στην ανακύκλωση ΑΗΗΕ στον ελλαδικό χώρο σε επίπεδο κανονιστικής λειτουργίας. Επίσης φαίνεται σε πίνακα η σύνοψη των σεναρίων συλλογής που εξετάζει η έκθεση «The Global E-waste Monitor 2020» [3].



Εικόνα 1: Διάγραμμα Σχέσεων STAMP μεταξύ βασικότερων μηχανισμών ανακύκλωσης ΑΗΗΕ στην Ελλάδα.

Σενάρια	Τρόπος Απόρριψης και Συλλογής
Σενάριο 1ο	Άρτια ανακύκλωση ΑΗΗΕ
Σενάριο 2ο	Απόρριψη ΑΗΗΕ σε κοινούς κάδους απορριμμάτων
Σενάριο 3ο	Απόρριψη ΑΗΗΕ σε κοινούς κάδους ανακύκλωσης
Σενάριο 4ο	Informal ανακύκλωση ΑΗΗΕ

Πίνακας *SEQ Πίνακας*ARABIC 1:* Πιθανά Σενάρια Συλλογής ΑΗΗΕ [3]

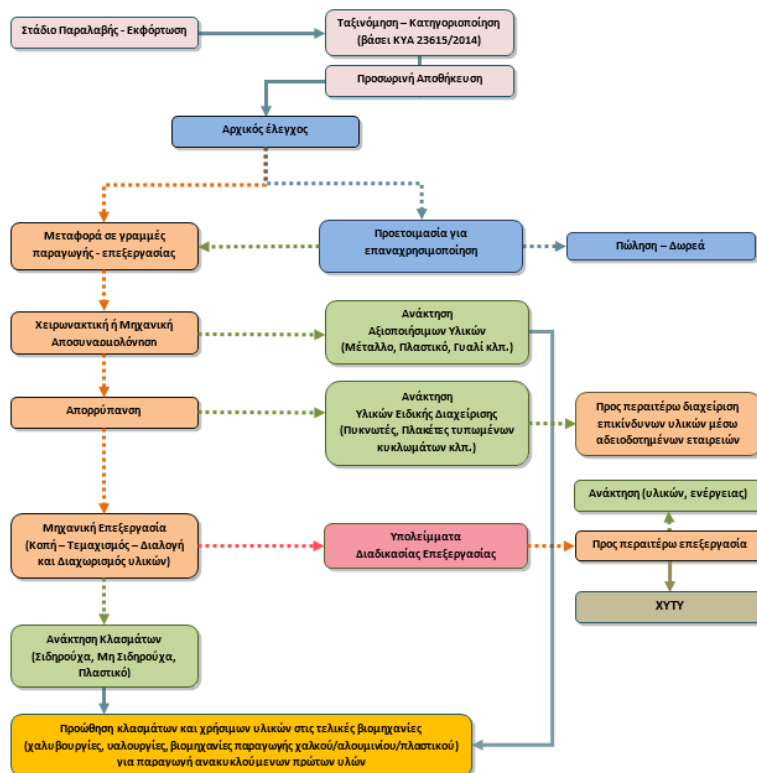
Μετά το στάδιο της Συλλογής και πριν το στάδιο της Επεξεργασίας, λαμβάνουν χώρα τα ενδιάμεσα υπό-στάδια της αποθήκευσης και της ταξινόμησης. Αφού τα ΑΗΗΕ συλλεχθούν δύναται να οδηγηθούν σε χώρους προσωρινής αποθήκευσης ή σε χώρους που θα χωριστούν σε διαφορές κατηγορίες μεγέθους ή/και είδους.

2.3 Επεξεργασία αποβλήτων ΗΗΕ μέσω τυπικών μεθόδων

Η επεξεργασία των ΑΗΗΕ αφορά όλες εκείνες τις διαδικασίες που αποσκοπούν στο να εξαγάουν τις μέγιστες δυνατές ποσότητες αξιοποιήσιμων υλικών αλλά επίσης και όλες αυτές που στοχεύουν στην απομάκρυνση των επικίνδυνων εμπεριεχόμενων ουσιών. Όλες αυτές οι διαδικασίες εκτελούνται σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους, εξοπλισμένους με κατάλληλο εξοπλισμό και από εξειδικευμένο προσωπικό. Όλα τα παραπάνω βέβαια αφορούν τη περίπτωση που η ανακύκλωση γίνεται με άρτιο τρόπο (formal e-waste recycling – σενάριο 1 ^ο). Όσον αφορά την ανεπίσημη ανακύκλωση ΗΗΕ (informal recycling), η επεξεργασία συνίσταται από διαδικασίες που στοχεύουν στην απομάκρυνση μόνο των αξιοποιήσιμων υλικών προς πώληση, ενώ όπως εξηγήθηκε δίνεται ελάχιστη σημασία στην απορρύπανση των αποβλήτων. Ένα σημαντικό σημείο εδώ είναι πως το στάδιο της επεξεργασίας δεν αφορά μόνο την απορρύπανση επικίνδυνων ουσιών και την ανακύκλωση των δομικών στοιχείων των ΑΗΗΕ, αλλά αφορά και την άμεση επαναχρησιμοποίηση ορισμένων προϊόντων ή εξαρτημάτων τους

[41]. Όπως προαναφέρθηκε τα ΑΗΗΕ πολλές φορές απορρίπτονται όχι διότι έφτασαν στο τέλος της «χρησιμοποιήσιμης» ζωής τους ούτε λόγω βλάβης (ανεπανόρθωτης ή μη) αλλά για προσωπικούς λόγους. Δηλαδή απορρίπτονται ενώ ακόμη έχουν την ικανότητα να λειτουργήσουν. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι προτιμότερο να προωθούνται πάλι στην αγορά, εφόσον, όταν είναι απαραίτητο, έχουν «καθαριστεί» (data scrubbing) από τα δεδομένα των προηγούμενων χρηστών τους. Ειδικότερα εξαρτήματα υπολογιστών, περιφερειακά, ακόμη και ολόκληροι πύργοι και laptops μπορούν να δοθούν σε δεύτερους χρήστες σε χαμηλότερες τιμές ή ακόμη και να δωριστούν σε χρήστες που δεν έχουν την οικονομική δυνατότητα απόκτησης υπολογιστών [42].

Γενικά το στάδιο της Επεξεργασίας ΑΗΗΕ μπορεί να φανεί στο παρακάτω διάγραμμα ροής [41].

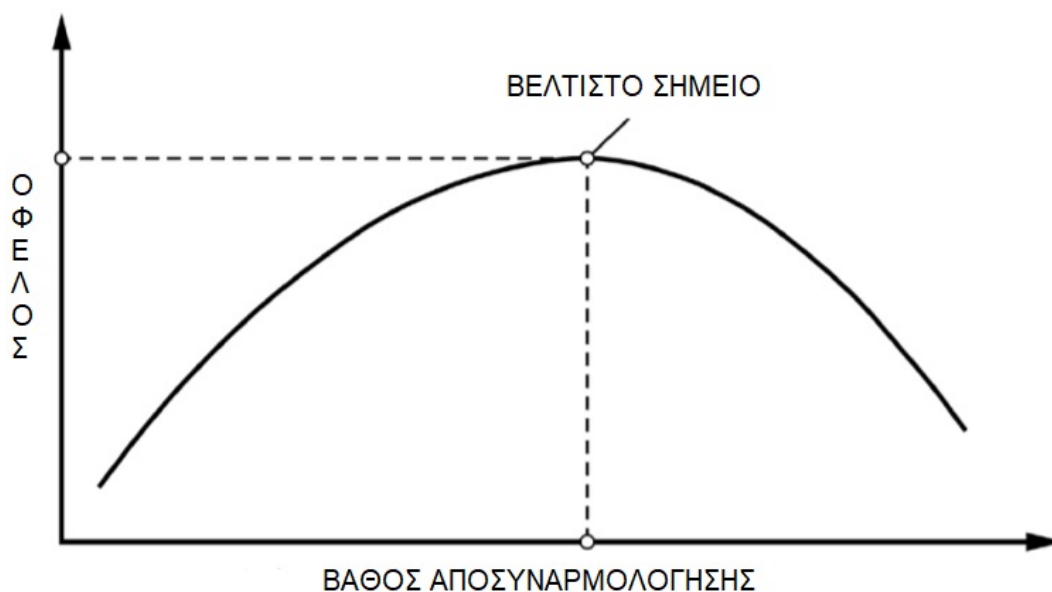


Εικόνα 2: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας ΑΗΗΕ. [41]

Το παραπάνω διάγραμμα ροής δείχνει την σειρά των τυπικών διαδικασιών που ακολουθεί μια εγκατάσταση επεξεργασίας ΑΗΗΕ. Καταρχάς γίνεται ένας αρχικός έλεγχος των εισερχομένων αποβλήτων και ο διαχωρισμός τους σε αυτά που δύναται να επαναχρησιμοποιηθούν ή όχι. Όπως αναφέρθηκε ο εξοπλισμός που μπορεί να προωθηθεί αυτούσιος προς δεύτερους χρήστες αποθηκεύεται ξεχωριστά. Το πρώτο κύριο στάδιο της επεξεργασίας, για τα απόβλητα που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, είναι αυτό της Αποσυναρμολόγησης.

Επί της ουσίας η Αποσυναρμολόγηση αφορά τον διαχωρισμό των διαφόρων υλικών που απαρτίζουν τα ΑΗΗΕ. Κατηγοριοποιείται ανάλογα με το βαθμό της αυτοματοποίησης που την διέπει από χειρωνακτική έως και πλήρως αυτοματοποιημένη. Η χειρωνακτική αποσυναρμολόγηση συνήθως προτιμάται της αυτοματοποιημένης διότι η τελευταία επηρεάζεται λόγω της απουσίας ομοιογένειας των εισερχομένων ΑΗΗΕ. Όλα τα είδη των ΑΗΗΕ λογίζονται ως ένα ρεύμα αποβλήτων, στην πράξη όμως οι διάφορες κατηγορίες διαφέρουν σημαντικά σε βάρος, όγκο, πολυπλοκότητα, περιεκτικότητα υλικών, τρόπο κατασκευής. Αυτές οι παράμετροι στέκονται εμπόδιο στην αυτοματοποίηση αφού οι μηχανές ρομπότ σχεδιάζονται για να εκτελούν πολύ συγκεκριμένες διεργασίες [43]. Στην χειρωνακτική αποσυναρμολόγηση έχουμε αρχικά την χρήση ιμάντων μεταφοράς ή χειρωνακτικής μεταφοράς των ΑΗΗΕ στους πάγκους εργασίας. Εκεί εξειδικευμένο προσωπικό έχει στη διάθεση του και χρησιμοποιεί πληθώρα εργαλείων: χειρός, ηλεκτρικά ή πνευματικά. Σκοπός εδώ είναι τα ΑΗΗΕ να διαχωριστούν στα βασικά δομικά συστατικά τους. Εδώ έχουμε τον διαχωρισμό του γυαλιού, του πλαστικού, του μετάλλου όταν υπάρχουν σε ευδιάκριτες ποσότητες και μπορούν να

απομακρυνθούν χειρωνακτικά. Όταν αυτά τα υλικά απομακρύνονται τοποθετούνται σε κάδους που βρίσκονται κοντά στους πάγκους εργασίας για να συγκεντρωθούν και προωθηθούν στους κατάλληλους ανακυκλωτές/παραγωγούς Α' ύλης. Το επόμενο στάδιο είναι αυτό της Απορρύπανσης όπου προτεραιότητα είναι ο εντοπισμός και η απομάκρυνση των επικίνδυνων εξαρτημάτων που μπορούν να επιφέρουν μόλυνση όπως μπαταρίες και πυκνωτές [43] αλλά και ο εντοπισμός των πολύτιμων εξαρτημάτων που τυχαίνουν ειδικής επεξεργασίας όπως οι πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Boards – PCBs) ή τα στοιχεία συνδεσμολογίας (Connectors). Εδώ πολύτιμα εξαρτήματα λογίζονται αυτά που είτε έχουν υψηλή αξία μεταπώλησης είτε περιέχουν ιδιαιτέρως πολύτιμα υλικά όπως χρυσό (Au), άργυρο (Ag), χαλκό (Cu), παλλάδιο (Pd), ταντάλιο (Ta) [44]. Το στάδιο της αποσυναρμολόγησης επειδή κυρίως εκτελείται από ανθρώπινο δυναμικό παρουσιάζει υψηλό εργατικό κόστος, έτσι είναι σημαντικό να ορίζεται το μέγιστο λεγόμενο βάθος της αποσυναρμολόγησης. Το βάθος της συναρμολόγησης είναι το κατά πόσο μια συσκευή θα αποσυναρμολογηθεί χειρωνακτικά, δηλαδή πόσο λεπτομερής θα είναι ο διαχωρισμός των κλασμάτων υλικών που την αποτελούν. Έτσι μετά από κάποιο σημείο (optimum point) η αποσυναρμολόγηση δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα καθώς οι αξία των εξαγόμενων υλικών είναι μικρότερη του εργατικού κόστους [43]. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η θεωρητική προσέγγιση της ανάλυσης κόστους-οφέλους που λαμβάνει χώρα ώστε να βρεθεί το βέλτιστο βάθος αποσυναρμολόγησης [43].



Εικόνα 3: Θεωρητική προσέγγιση ανάλυσης κόστους οφέλους για εύρεση βέλτιστου βάθους συναρμολόγησης. [43]

Βέβαια τα τελευταία χρόνια στη Ε.Ε. χρησιμοποιείται μια άλλη προσέγγιση, μια που χρησιμοποιεί πιο αυτοματοποιημένες διαδικασίες και αξιοποιεί το ανθρώπινο δυναμικό με διαφορετικό τρόπο. Σε αυτή τη προσέγγιση η εισερχόμενη μάζα ΑΗΗΕ διοχετεύεται σε έναν τεμαχιστή (shredder) όπου με εφαρμογή βίαιης μηχανικής δύναμης οι συσκευές σπάνε και μερικώς διαχωρίζονται σε επιμέρους εξαρτήματα. Επιπλέον η δύναμη δεν είναι απολύτως καταστρεπτική με αποτέλεσμα τα εξαρτήματα ειδικής διαχείρισης (PCBs, μπαταρίες ,κτλ.) να

«επιβιώνουν» της διαδικασίας [45]. Μετά τον τεμαχισμό γίνεται χρήση του ανθρώπινου δυναμικού για χειροδιαλογή εξαρτημάτων όπου απαιτείται. Τέτοια εξαρτήματα είναι πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος, μπαταρίες, πυκνωτές, καλώδια, μετασχηματιστές [44].



Εικόνα 4: Τεμαχιστής ADuro QZ. [45]

Αυτή όμως η μέθοδος εμφανίζει μειονεκτήματα σε περίπτωση που η εισερχόμενη μάζα ΑΗΗΕ προωθείται κατευθείαν στον τεμαχιστή χωρίς να έχει προηγηθεί διαλογή για συσκευές που μπορούν να επισκευαστούν και να επαναπροωθηθούν στην αγορά. Όπως προαναφέρθηκε η επαναχρησιμοποίηση είναι προτιμότερη της ανακύκλωσης όταν είναι εφικτή [46].

Το επόμενο στάδιο μετά την αποσυναρμολόγηση και την απορρύπανση είναι η Μηχανική Επεξεργασία. Το στάδιο αυτό είναι πλήρως αυτοματοποιημένο και χρησιμοποιεί μηχανές βιομηχανικού τύπου. Συγκεκριμένα τα απόβλητα ΗΗΕ αφού λάβουν την απαραίτητη προεπεξεργασία διοχετεύονται προς μείωση όγκου και διαχωρισμό υλικών. Ο διαχωρισμός είναι απαραίτητος διότι η επανάκτηση των διαφόρων μετάλλων που εμπεριέχονται στα απόβλητα είναι η οικονομικά κινητήρια δύναμη της ανακύκλωσης.

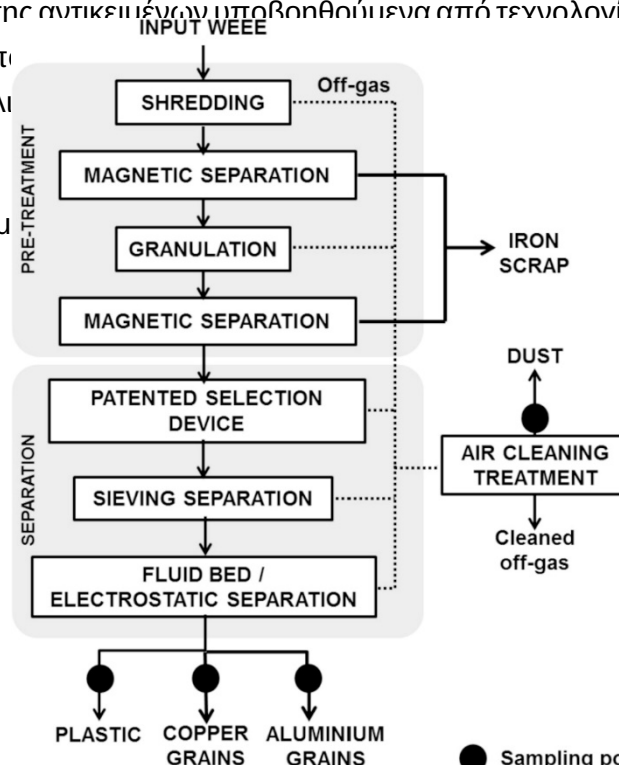
Οι κυριότερες μέθοδοι μείωσης όγκου είναι ο τεμαχισμός (shredding) και η κοκκοποίηση (granulation). Οι κυριότερες μέθοδοι διαχωρισμού υλικών είναι ο μαγνητικός διαχωρισμός, το κοσκίνισμα, ο ηλεκτροστατικός ή επαγωγικός διαχωρισμός και ο αεροδιαχωρισμός [46], [47].

Ο τεμαχισμός αφορά τη μείωση μεγέθους της εισερχόμενης μάζας αποβλήτων. Οι τεμαχιστές συνήθως θρυμματίζουν τα απόβλητα σε διαμέτρους έως και 20mm [47]. Η κοκκοποίηση

συνήθως στοχεύει στην περαιτέρω μείωση των μεγεθών των αποβλήτων αλλά και στην ομοιογένεια της ροής τους. Η ομοιογένεια της ροής των αποβλήτων καθώς αυτά κυλάνε στους ταινιόδρομους είναι πολύ σημαντική καθώς βελτιώνει τα ποσοστά διαχωρισμού των υλικών και επιτρέπει την ομαλή λειτουργία των μηχανημάτων. Ο μαγνητικός διαχωρισμός είναι η διαδικασία διαχωρισμού των σιδηρούχων μετάλλων (ferrous metals) από όλη την υπόλοιπη ροή μάζας. Το κοσκίνισμα αφορά την διαδικασία διαχωρισμού βάσει μεγέθους και συνήθως γίνεται σε κυλινδρικά περιστρεφόμενα κόσκινα (trommels). Ο ηλεκτροστατικός διαχωρισμός (corona electrostatic separation) και ο επαγωγικός διαχωρισμός (eddy current separation) βασίζονται στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των μη σιδηρούχων μετάλλων (non-ferrous metals) και ως αποτέλεσμα αυτού μπορούν να τα διαχωρίζουν από την υπόλοιπη ροή [48]. Ο αεροδιαχωρισμός ως μέθοδος διαχωρισμού βασίζεται στη διαφορετική συμπεριφορά που έχουν τα υλικά όταν έρχονται σε επαφή με ριπές αέρα. Η διαφορετική συμπεριφορά τους είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών πυκνοτήτων των υλικών. Πληθώρα συνδυασμών των παραπάνω μηχανικών διεργασιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία εγκατάσταση με στόχο το βασικό διαχωρισμό των υλικών σε σιδηρούχα μέταλλα, μη σιδηρούχα μέταλλα, πλαστικά και γυαλί. Μετά τον διαχωρισμό των υλικών, οι μεταλλικές μάζες υπόκεινται σε μεταλλουργικές διαδικασίες για περαιτέρω διαχωρισμό, το γυαλί προωθείται προς ανακύκλωση ενώ συνήθως τα πλαστικά στέλνονται για αποτέφρωση καθώς εμφανίζουν έντονη ανομοιογένεια για να ανακυκλωθούν αποτελεσματικά [47]. Ιδιαίτερη περίπτωση είναι η επεξεργασία των πλακετών τυπωμένου κυκλώματος (PCBs) καθώς τα συγκεκριμένα εξαρτήματα περιέχουν πληθώρα πολύτιμων μετάλλων και η ανακύκλωσή τους έχει υψηλό περιθώριο κέρδους. Τέτοιες επεξεργασίες είναι πυρομεταλλουργικού, υδρομεταλλουργικού και ηλεκτρομεταλλουργικού χαρακτήρα και μπορούν να επιστρέψουν πολύτιμα μέταλλα. Οι παραπάνω προσεγγίσεις παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά ανάκτησης (έως και 95%) αλλά επίσης απαιτούν ειδικό εξοπλισμό και τα προϊόντα των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα είναι πολλές φορές επικίνδυνες χημικές ουσίες.

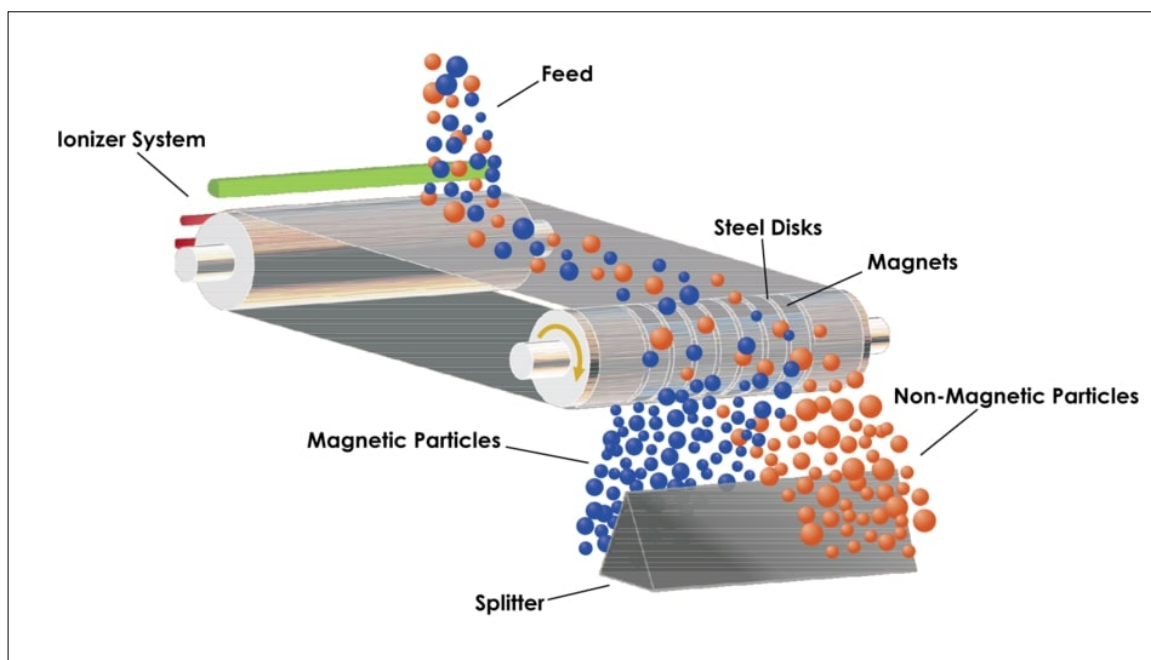
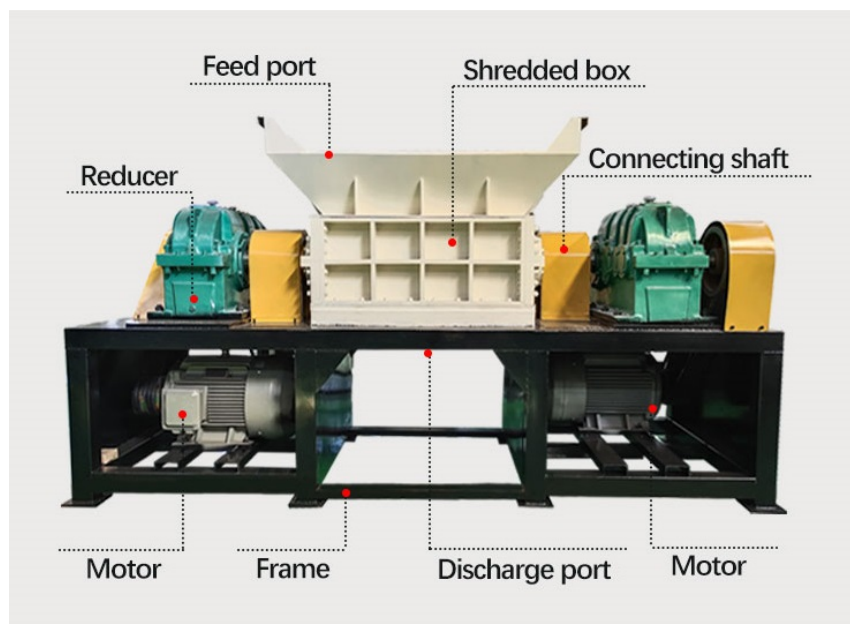
Μια άλλη επίσης μέθοδος διαχωρισμού είναι η οπτική. Σε αυτή ειδικά διαμορφωμένες μηχανές χρησιμοποιούν φασματομέτρα υπέρυθρων, κάμερες, μεταλλικούς αισθητήρες και ειδικά laser ανίχνευσης αντικειμένων υποβοηθούμενα από τεχνητά νευρωνικά δίκτυα τεχνητής νοημοσύνης με αποτέλεσμα να μη σιδηρούχα μεταλλικά υλικά σε σιδηρούχα, λήτων σε σιδηρούχα,

Παρακάτω φαίνεται με τη βοήθεια της εικόνας που προέρχεται από την εταιρεία Xerox στη νότια Ιταλία [47].



Εικόνα 5: Διάγραμμα ροής διεργασιών διαχωρισμού. [47]

Η εισερχόμενη μάζα (input waste) προφανώς έχει περάσει από τα στάδια αποσυναρμολόγησης και απορρύπανσης. Σε πρώτη φάση επέρχεται ο τεμαχισμός (shredding) και θρυμματισμός των αποβλήτων ώστε η ροή να γίνει ομογενής αποτελούμενη από σωματίδια μεγέθους περίπου 100mm έως 20mm. Παρακάτω ακολουθεί εικόνα ενός πραγματικού τεμαχιστή (εικόνα 6).



Εικόνα 7: Αρχή λειτουργίας μίας διάταξης μαγνητικού διαχωρισμού [51]

Όπως φαίνεται η ροή θρυμματισμένων αποβλήτων (feed) μέσω ιμάντα μεταφοράς μεταφέρεται προς το τέλος της διάταξης όπου στο τέλος του ιμάντα ο περιστρεφόμενος κύλινδρος εμπεριέχει μαγνητισμένους δίσκους. Λόγω της μαγνητικής έλξης που ασκείται μεταξύ των δίσκων και των σιδηρούχων (μαγνητιζόμενων) σωματιδίων της ροής, λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός. Έτσι με τη βοήθεια ενός εμποδίου (splitter) τα μαγνητιζόμενα διαχωρίζονται από τα μη μαγνητιζόμενα. Τα τελευταία συνεχίζουν προφανώς για περαιτέρω διεργασίες.

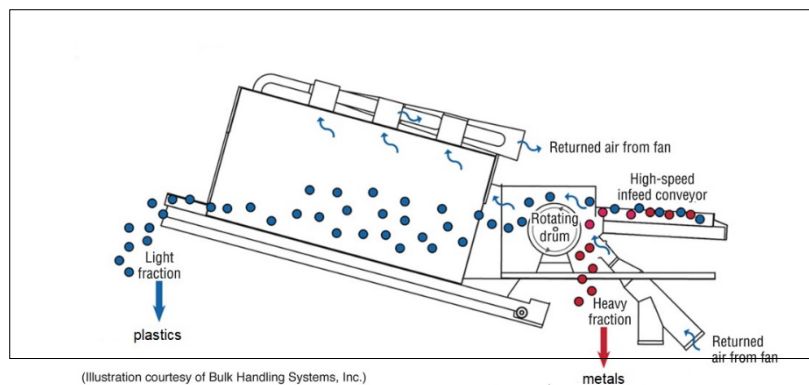
Μετά τον μαγνητικό διαχωρισμό σύμφωνα πάντα με τη σειρά των διεργασιών του διαγράμματος ροής της εικόνας 5, η ροή αποβλήτων επεξεργάζεται μετά από έναν κονιορτοποιητή (granulator). Η δουλειά του κονιορτοποιητή είναι να μειώσει περαιτέρω το μέγεθος των αποβλήτων, συνήθως οι διάμετροι εξόδου κυμαίνονται από 1mm έως 15mm. Στην ουσία η αρχή λειτουργίας του είναι η ίδια με αυτή του τεμαχιστή. Παρακάτω ακολουθεί η εικόνα ενός κονιορτοποιητή. Να σημειωθεί εδώ πως πολλές φορές στη διεθνή βιβλιογραφία και στη βιομηχανία ο διαχωρισμός δεν είναι τεμαχισμός και κοκκοποίηση (shredding-granulation) αλλά ο ίδιος ο τεμαχισμός διαχωρίζεται ανάλογα με το μέγεθος της εξερχόμενης ροής σε πρωτεύων, δευτερεύων και τελικός τεμαχισμός (primary, secondary, fine shredding) [52]. Παρακάτω φαίνεται η εικόνα ενός βιομηχανικού κονιορτοποιητή.



Εικόνα 8: Βιομηχανικός Granulator Aduro G [53]

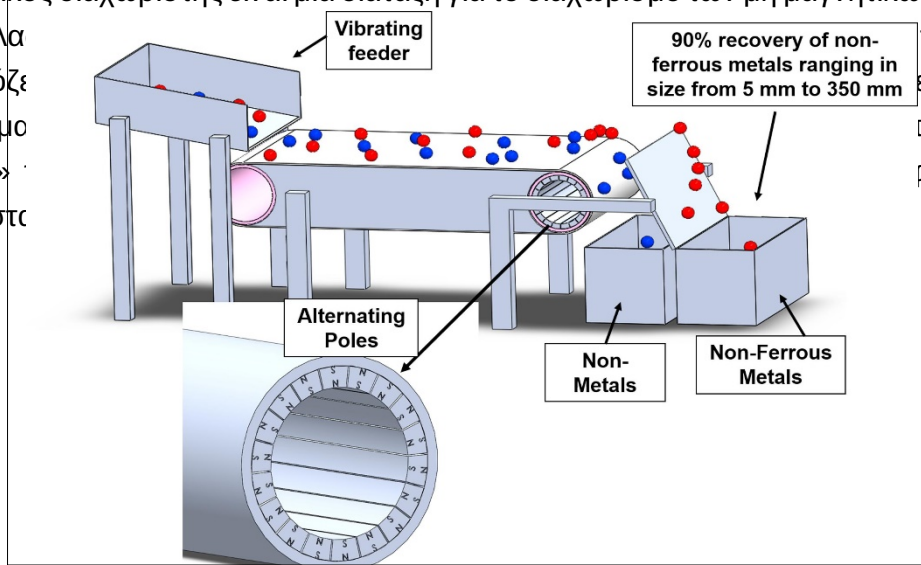
Μετά την κοκκοποίηση η ροή διέρχεται μέσω δεύτερης διάταξης μαγνητικού διαχωρισμού ώστε να αφαιρεθούν πλήρως τυχόν σιδηρούχα μαγνητιζόμενα μεταλλικά υπολείμματα που δεν διαχωρίστηκαν στην πρώτη διάταξη. Μετά, πάντα σύμφωνα με το διάγραμμα ροής της εικόνας 5, η εναπομένουσα ροή επεξεργάζεται από μία παντεταρισμένη συσκευή διαχωρισμού. Εδώ υπενθυμίζεται πως τα απόβλητα που έχουν απομείνει είναι ως επί το πλείστον πλαστικά και μη σιδηρούχα μέταλλα (κυρίως χαλκός και αλουμίνιο). Στην εν λόγω εγκατάσταση η συγγραφείς αποφεύγουν να ονομάσουν την συσκευή ονομαστικά, καθώς προστατεύεται από πατέντα [47] αλλά η αρχή λειτουργίας περιγράφεται συνοπτικά. Επί της ουσίας μέσω ιμάντων μεταφοράς τα τεμαχισμένα απόβλητα αποκτούν υψηλή ταχύτητα και προσκρούουν σε μια εκ των επιφανειών της μηχανής, λόγω αυτής της κρούσης τα πλαστικά διαχωρίζονται από τα μεταλλικά στοιχεία και τα τελευταία σχηματίζουν συμπυκνωμένους κόκκους μετάλλου. Μετά από αυτή την διαδικασία ακολουθεί επιπλέον διαχωρισμός μέσω κοσκινίσματος (sieving). Τα τελευταία στάδια διαχωρισμού είναι ο αεροδιαχωρισμός (fluid bed separation) και ο επαγωγικός διαχωρισμός (eddy current separation).

Η βασική αρχή λειτουργία του αεροδιαχωρισμού σχηματικά φαίνεται στην εικόνα 9.



Εικόνα 9: Αρχή λειτουργίας ενός αεροδιαχωριστή [54]

The diagram illustrates a magnetic separation process. A hopper at the top left is labeled "Vibrating feeder". It feeds a mixture of red and blue spheres onto a horizontal conveyor belt. The conveyor belt moves the material to the right, where it passes over a large, light blue cylindrical magnet. The magnet attracts the red spheres, pulling them upwards and to the right, where they fall into a collection bin. The blue spheres are not attracted and continue along the conveyor belt to the right, where they fall into another collection bin. A text box above the magnet area states: "90% recovery of non-ferrous metals ranging in size from 5 mm to 350 mm".



Εικόνα 10: Διάταξη λειτουργίας επαγωγικού διαχωρισμού [55]

Τέλος συνολικά σε όλη τη διάταξη των μηχανών λειτουργεί σύστημα απαγωγής της σκόνης και των αερίων με στόχο την μέγιστη καθαρότητα των εξερχόμενων προϊόντων αλλά και την προστασία εργαζομένων και μηχανών. Τα εξερχόμενα διαχωρισμένα πια υλικά προωθούνται προς το τελικό στάδιο όπως αυτό αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, αυτό της ανάκτησης. Τα σιδηρούχα κλάσματα μεταφέρονται στις χαλυβουργίες, τα μη σιδηρούχα σε εγκαταστάσεις ανακύκλωσης και τα πλαστικά ανάλογα την καθαρότητα προς ανακύκλωση ή εναπόθεση/καύση [41].

2.4 Επανάκτηση μετάλλων μέσω μεταλλουργικών διαδικασιών

Από τα παραπάνω κλάσματα τα μεταλλικά, σιδηρούχα και μη, αποτελούν την κινητήρια οικονομική δύναμη της ανακύκλωσης των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Η επανάκτηση των μετάλλων γίνεται μέσω μεταλλουργικών διαδικασιών, από τις οποίες η κάθε μία έχει διαφορετικό χαρακτήρα. Οι υδρομεταλλουργικές διαδικασίες έχουν χημικό χαρακτήρα, οι πυρομεταλλουργικές θερμικό και οι βιομεταλλουργικές βιολογικό [56]. Στις παραπάνω διαδικασίες έρχεται να προστεθεί και η πυρόλυση, η οποία βέβαια δεν έχει χαρακτήρα ανάκτησης υλικών αλλά κυρίως παραγωγής ενέργειας.

Πυρομεταλλουργικές διαδικασίες

Η πυρομεταλλουργία αφορά διαδικασίες ανάκτησης μη σιδηρούχων και πολύτιμων μετάλλων από τα απόβλητα ΗΗΕ. Οι κυριότερες διαδικασίες είναι η αποτέφρωση, η τήξη, η πυροσυσσωμάτωση και οι αντιδράσεις αέριας φάσης υπό υψηλές θερμοκρασίες. Η μέθοδος Kaldor είναι η συχνότερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος ενώ αποτελείται από τα εξής βήματα:

πλύσιμο με νερό, έκπλυση οξέος υπό πίεση, αναγωγική τήξη, οξειδωτικό εμφύσημα και εξευγενισμός και ηλεκτρολυτική διύλιση [56]. Τα πλεονεκτήματα των διαδικασιών αυτών είναι πως παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά ανάκτησης πολύτιμων μετάλλων, είναι εύκολες στη κλιμάκωση και χρήση τους ενώ διαθέτουν την ικανότητα να επεξεργάζονται σχετικά μεγάλες ποσότητες αποβλήτων [56]. Τα μειονεκτήματα της πυρομεταλλουργίας πως το αλουμίνιο και ο χρυσός δεν επανακτώνται, η παραγωγή μεταλλικής σκωρίας είναι σημαντική ενώ εκλύονται αναθυμιάσεις από την καύση πλαστικών και βαρέων μετάλλων (Pb, Hg, Cd) [57].

Υδρομεταλλουργικές διαδικασίες

Οι εν λόγω διαδικασίες αφορούν την εξαγωγή μετάλλων από στερεές μάζες με τη χρήση χημικών ουσιών. Γενικά η υδρομεταλλουργία αποτελείται από δύο στάδια, την έκπλυση και την ανάκτηση. Η έκπλυση λαμβάνει χώρα όταν οι μεταλλικές μάζες διαλύονται σε υδατικά χημικά διαλύματα με χαμηλό pH και μετά η ανάκτηση συνίσταται από την συλλογή του εκπλύματος από το διάλυμα [56]. Γενικότερα οι εν λόγω διαδικασίες βρίσκονται σε αναπτυσσόμενο στάδιο αλλά παρουσιάζονται ως υποσχόμενες καθώς σε εργαστηριακές συνθήκες κατάφεραν την εξαγωγή αρκετών μετάλλων όπως χαλκός, ψευδάργυρος, μαγνήσιο, χρυσός, άργυρος και πλατίνα [56]. Ως μειονεκτήματα εμφανίζονται οι υψηλές χρήσεις έντονα βλαβερών χημικών ουσιών και οι σχετικά μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις.

Βιομεταλλουργικές διαδικασίες

Η βιομεταλλουργία αποτελεί έναν αναπτυσσόμενο κλάδο της εξαγωγικής μεταλλουργίας ενώ επιτυγχάνει την επανάκτηση μετάλλων με τη χρήση μικροοργανισμών. Καθώς βρίσκεται σε ερευνητικά στάδια ως επί το πλείστο, χρησιμοποιείται για την εξαγωγή μετάλλων από τα δευτερεύοντα προϊόντα των μηχανικών διαδικασιών. Αποτελείται από δύο στάδια, τα οποία εξηγούνται στη συνέχεια. Το πρώτο στάδιο είναι αυτό της βιοαπόπλυσης, κατά το οποίο οι μεταλλικές μάζες «κινητοποιούνται» από τη στερεή τους φάση στην υγρή με τη βοήθεια μικροοργανισμών ενώ το δεύτερο στάδιο είναι αυτό της βιοανάκτησης, κατά το οποίο τα μεταλλικά στραγγίσματα ανακτώνται με βιοαπορρόφηση ή με καθίζηση [56]. Παρόλο που οι εν λόγω τεχνολογίες βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο οι ερευνητές δηλώνουν πως ως πλεονέκτημα εμφανίζεται η σχετικά οικονομική εφαρμογή τους ενώ ως μειονέκτημα εμφανίζονται οι αργοί χρόνοι ολοκλήρωσης των χημικών αντιδράσεων.

2.5 Επεξεργασία αποβλήτων ΗΗΕ μέσω άτυπων μεθόδων

Όλα τα παραπάνω αφορούσαν την συνολική διαδικασία ανακύκλωσης μέσω επίσημων καναλιών (formal waste recycling). Ξεκινώντας με το 1^ο σενάριο συλλογής των αποβλήτων ΗΗΕ μέσω αδειοδοτημένων φορέων, συνεχίζοντας με την διαλογή και την μηχανική επεξεργασία των αποβλήτων και τέλος με τη προώθηση στους τελικούς χρήστες μπορεί κανείς να

περιγράψει την συνολική επίσημη διαδικασία ανακύκλωσης των ΗΗΕ. Όπως έχει ειπωθεί μεγάλο πρόβλημα αποτελεί η επεξεργασία των αποβλήτων με μη εγκεκριμένες μεθόδους, επικίνδυνες για τον άνθρωπο και το περιβάλλον συνολικά. Η ανεπίσημη ανακύκλωση είναι φαινόμενο που μπορεί να παρατηρηθεί κυρίως σε χώρες της Ασίας, της Αφρικής και της Νότιας Αμερικής. Εδώ να σημειωθεί πως οι ποσότητες ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών που βρίσκονται σε αυτές τις περιοχές δεν είναι μόνο από εκεί, αλλά προέρχονται και από τις δυτικές χώρες. Έτσι μπορεί να καταλάβει κανείς πως το πρόβλημα της άτυπης ανακύκλωσης ΗΗΕ δεν αφορά μόνο τις μεθόδους επεξεργασίας αλλά και τις διεθνείς ελλείψεις σε νόμους που απαγορεύουν την διακίνηση τέτοιων αποβλήτων. Οι κυριότερες άτυποι μέθοδοι επεξεργασίας είναι η χειρωνακτική αποσυναρμολόγηση, η καύση (incineration) και τα λουτρά οξέος (acid baths)[58]. Η αποσυναρμολόγηση γίνεται με χρήση εργαλείων χειρός ή κοπτικών εργαλείων (π.χ. τροχός) χωρίς την ύπαρξη προστατευτικών μέσων προστασίας όπως γάντια, γυαλιά και μάσκες. Η εισερχόμενη μάζα αποβλήτων επεξεργάζεται μέσω της αποσυναρμολόγησης με σκοπό τον διαχωρισμό των δομικών υλικών. Συνήθως διαχωρίζονται τα καλώδια, οι πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος, τα σιδηρούχα και τα ανακυκλώσιμα όπως αλουμίνιο και πλαστικά [59]. Αυτές οι εργασίες είναι αρκετά επιβλαβείς καθώς οι εργαζόμενοι δουλεύουν σε περιβάλλον βρώμικο και γεμάτο σκόνη [7]. Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί αυτή η σκόνη στους ειδικούς καθώς είναι γεμάτη από σωματίδια προερχόμενα από τις κοπές που λαμβάνουν χώρα σε αυτούς τους χώρους αποσυναρμολόγησης και εισπνέεται από τους εργαζόμενους, που ορισμένες φορές είναι και μικρής ηλικίας. Στο στάδιο τώρα της επεξεργασίας των διαχωρισμένων υλικών, κύριος στόχος είναι η επανάκτηση των διάφορων μετάλλων καθώς αυτά έχουν και την μεγαλύτερη οικονομική αξία. Η επεξεργασία των καλωδίων συνίσταται στην συγκέντρωσή τους σε μεγάλους σωρούς σε εξωτερικούς χώρους σε πρώτο στάδιο και μετά στην καύση τους. Η καύση λιώνει τα πλαστικά περιβλήματα των καλωδίων και επιτρέπει την εξαγωγή του χαλκού που περιέχουν [40]. Τα λουτρά οξέος και γενικότερα οι χημικές επεξεργασίες αφορούν τις διαδικασίες εκείνες που αποσκοπούν την εξαγωγή των πολύτιμων μετάλλων που περιέχουν οι PCBs. Με τη χρήση όξινων ενώσεων όπως νιτρικό οξύ, υδροχλωρικό οξύ, θειικό οξύ και διαλυμάτων aqua regia (HCl-HNO_3 σε αναλογία 3 προς 1) το πλαστικό που περιέχεται στις πλακέτες διαλύεται και μένουν τα μέταλλα[58]. Επίσης διεργασίες καύσης είτε σε ανοικτούς χώρους (open burning) είτε σε φούρνους (baking) χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή πολύτιμων μετάλλων, όταν δεν είναι εφικτή η χημική επεξεργασία. Τα υπολείμματα των παραπάνω επεξεργασιών συνήθως απορρίπτονται ανεξέλεγκτα σε χώρους διάθεσης ή σε ποτάμια και λίμνες κοντά στους χώρους επεξεργασίας [60]. Όλες οι διαδικασίες που αναφέρονται παραπάνω είναι εξαιρετικά επιβλαβείς στους ανθρώπους που ασχολούνται με την άτυπη ανακύκλωση ή που μένουν κοντά στους χώρους επεξεργασίας, ενώ όπως προαναφέρθηκε είναι και καταστρεπτικές για όλες τις πτυχές του περιβάλλοντος (έδαφος, νερό, αέρας). Πέρα από αυτά όμως το πρόβλημα είναι πως αυτές οι διαδικασίες επεξεργασίας αποβλήτων ΗΗΕ πολλές φορές είναι ο μοναδικός τρόπος βιοπορισμού για αυτούς τους πληθυσμούς διότι, φτάνοντας και στο στάδιο της ανάκτησης, τα εξαγόμενα μέταλλα, πολύτιμα και μη, μεταπωλούνται μετά προς επαναχρησιμοποίηση από βιομηχανικές μονάδες κλείνοντας έτσι το κύκλο ζωής αυτών των υλικών.

Κεφάλαιο 3

Διαχείριση αποβλήτων ΗΗΕ σε παγκόσμια κλίμακα

3.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αφορά την παράθεση και την επεξήγηση σημαντικών στατιστικών δεδομένων και πληροφοριών όσον αφορά την συνολική κατάσταση της ανακύκλωσης ΗΗΕ σε παγκόσμια κλίμακα. Η ανάλυση τέτοιων δεδομένων σε μεγάλες κλίμακες είναι χρήσιμο εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων, την δημιουργία κανονιστικών πλαισίων και την παρακολούθηση της προσπάθειας εκπλήρωσης στόχων. Τα Ηνωμένα Έθνη τον Οκτώβριο του 2015 μέσω του άρθρου A/RES/70/1, το οποίο γενικότερα είναι γνωστό ως “Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development” θέτει 17 στόχους βιώσιμης ανάπτυξης (Sustainable Development Goals – SDGs) μέχρι το 2030, μεταξύ των οποίων οι στόχοι 3, 8, 11, 12, 14 επηρεάζονται άμεσα από τα απόβλητα ΗΗΕ[3]. Αναφορικά με τους SDGs ο 3^{ος} αφορά την παγκόσμια υγεία, ο 8^{ος} την αξιοπρεπή εργασία και οικονομική ανάπτυξη, ο 11^{ος} τις βιώσιμες πόλεις και κοινότητες, ο 12^{ος} την υπεύθυνη κατανάλωση και παραγωγή και ο 14^{ος} την προστασία της θαλάσσιας ζωής [61]. Ειδικότερα τα απόβλητα ΗΗΕ αναφέρονται ονομαστικά στους υπό-στόχους 11.6, 12.4 και 12.5 [3].

Για την ποσοτικοποίηση της κατάστασης οι αρμόδιες υπηρεσίες έχουν θέσει τέσσερις βασικούς δείκτες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται από παγκόσμια κλίμακα έως και κοινοτική. Ο πρώτος δείκτης μετράει την συνολική ποσότητα ΗΗΕ που διατέθηκε προς αγορά, ο δεύτερος δείκτης την συνολική ποσότητα αποβλήτων ΗΗΕ που παράχθηκε, ο τρίτος την συνολική ποσότητα αποβλήτων ΗΗΕ που συλλέχθηκε και επεξεργάστηκε μέσω επίσημων καναλιών και ο τέταρτος δείκτης δείχνει το ποσοστό συλλεχθέντων προς παραχθέντων αποβλήτων [62]. Οι διεθνείς ονομασίες και οι μονάδες μέτρησης των τεσσάρων δεικτών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

ΔΙΕΘΝΗΣ ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΔΕΙΚΤΗ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ
Total EEE placed on market	Kg per capita
Total e-waste generated	Kg per capita
Total e-waste formally collected	Kg per capita
e-waste collection rate	(e-waste collected/ e-waste generated) *100%

Πίνακας 2: Δείκτες αποτύπωσης κατάστασης [3]

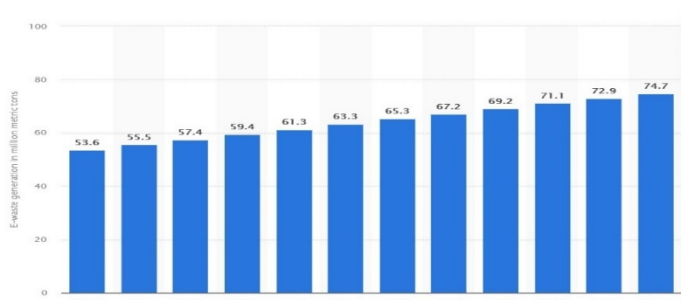
3.2 Παγκόσμια κατάσταση

Σε παγκόσμια κλίμακα οι μετρήσεις έχουν ως εξής. Το 2014 παράχθηκαν 44.4Mt αποβλήτων ΗΗΕ, ποσότητα που περίπου αντιστοιχεί σε 6.4kg ανά κάτοικο στον πλανήτη. Το 2019 η παραγωγή αποβλήτων φτάνει σε 53.6Mt ή 7.3kg ανά κάτοικο [3]. Δηλαδή η ποσοστιαία αύξηση συνολικής παραγωγής αποβλήτων ΗΗΕ αυτά τα πέντε χρόνια ανέρχεται στο 20%. Οι προβλέψεις δείχνουν πως μέχρι το 2030, η ετήσια παραγωγή θα αθροίζει σε 74.7Mt ή σε 9kg ανά κάτοικο. Επίσης το 2014 η ποσότητα που συλλέχθηκε επίσημα ανέρχεται σε 7.5Mt [3] άρα το ποσοστό συλλογής είναι:

Ενώ το 2019 η συνολική ποσότητα που συλλέχθηκε από επίσημους φορείς μετρήθηκε στους 9.3Mt [3] άρα το ποσοστό συλλογής υπολογίζεται:

Δηλαδή από την σκοπιά των απόλυτων μετρήσεων σε μεγατόνους (Mt) από το 2014 έως το 2019 υπήρξε αύξηση κατά 9.2Mt στην παραγωγή αποβλήτων ενώ στη επίσημη συλλογή τους το ίδιο χρονικό διάστημα η αύξηση ήταν μόνο κατά 1.8Mt. Από αυτό και μόνο φαίνεται πως οι προσπάθειες ανακύκλωσης πρέπει να ενταθούν σημαντικά.

Η ποσότητα αποβλήτων που απορρίφθηκαν και δεν επεξεργάστηκαν μέσω επίσημων καναλιών το 2016 υπολογίζεται περίπου 35.8Mt, ποσοστό περίπου 80% των συνολικών αποβλήτων [62]. Εκ των οποίων το 76% ή 34.1Mt αποτελούν τα απόβλητα που είτε επεξεργάστηκαν ανεπίσημα είτε απορρίφθηκαν σε χωματερές ενώ το υπόλοιπο 4% ή 1.7Mt απορρίφθηκε μαζί με τα κοινά αστικά απόβλητα των χωρών με υψηλό εισόδημα [62]. Για το έτος 2019 έχουμε πως το 82.6% ή 44.3Mt δεν συλλέχθηκαν από επίσημους φορείς και από αυτές τις ποσότητες αντιστοίχως 43.7Mt ανακυκλώθηκαν ανεπίσημα ή απορρίφθηκαν σε χωματερές και 0.6Mt απορρίφθηκαν σε κοινούς κάδους απορριμμάτων [3]. Οι ετήσιες μετρήσεις και προβλέψεις σε παγκόσμια από το 2019 έως και το 2030 μπορούν να φανούν στο παρακάτω διάγραμμα. [63]



Εικόνα 11: Πρόβλεψη παγκόσμιας παραγωγής αποβλήτων ΗΗΕ, χωρίς τον συνυπολογισμό του Covid-19 [60]

3.3 Κατάσταση ανά

Η εξέταση των στατιστικών στοιχείων ανά ήπειρο είναι ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία παρακολούθησης του προβλήματος των αποβλήτων ΗΗΕ. Ο λόγος είναι πως ανά ήπειρο οι καταναλωτικές συνήθειες, η αγοραστική δύναμη και οι ισχύουσες νομοθεσίες διαφέρουν.

Στον πίνακα 3 φαίνονται αναλυτικά οι μετρήσεις ανά ήπειρο για το 2016 ενώ στον πίνακα 4 οι μετρήσεις 3 χρόνια μετά, δηλαδή για το 2019.

2016	ΑΦΡΙ ΚΗ	ΑΣΙΑ	ΑΜΕΡΙ ΚΗ	ΕΥΡΩ ΠΗ	ΩΚΕΑ ΝΙΑ
Απόβλητα που παράχθηκαν (Mt)	2,2	18,2	11,3	12,3	0,7
Απόβλητα που παράχθηκαν (kg ανά κάτοικο)	1,9	4,2	11,6	16,6	17,3
Απόβλητα που συλλέχθηκαν και ανακυκλωθηκ αν επίσημα (Mt)	0,004	2,7	1,9	4,3	0,04
Ποσοστό συλλογής	0%	15%	17%	35%	6%

Excel.Sheet.12 "C:\Users\lvtheo\OneDrive\Υπολογιστής\Διπλωματική\Αντίγραφο του
γη(920).xlsx" Φύλλο1!R6C2:R10C7 \a \f 5 \h * MERGEFORMAT

Πίνακας 3: Βασικά στοιχεία παραγωγής και ανακύκλωσης ΗΗΕ ανά ήπειρο για το 2014 [62]

2019	ΑΦΡΙ ΚΗ	ΑΣΙΑ	ΑΜΕΡΙ ΚΗ	ΕΥΡΩ ΠΗ	ΩΚΕΑ ΝΙΑ
Απόβλητα που παράχθηκαν (Mt)	2,9	24,9	13,1	12	0,7
Απόβλητα που παράχθηκαν (kg ανά κάτοικο)	2,5	5,6	13,3	16,2	16,1
Απόβλητα που συλλέχθηκαν και ανακυκλωθη καν επίσημα (Mt)	0,03	2,9	1,2	5,1	0,06
Ποσοστό συλλογής	0,9%	11,7%	9,4%	42,5%	8,8%

Excel.Sheet.12 "C:\Users\lvtheo\OneDrive\Υπολογιστής\Διπλωματική\Αντίγραφο του
γη(920).xlsx" Φύλλο1!R6C9:R10C14\la\lf5\h *MERGEFORMAT

Πίνακας 4: Βασικά στοιχεία παραγωγής και ανακύκλωσης ΗΗΕ ανά ήπειρο για το 2019 [3]

Όπως φαίνεται ο μεγαλύτερος παραγωγός αποβλήτων τα τελευταία χρόνια είναι η Ασία με 18.2Mt το 2014 και 24.9Mt το 2019, κάτι το οποίο αντιστοιχεί σε αύξηση 37%. Το 2014 η ήπειρος της Ωκεανίας είχε τους πιο ρυπογόνους κατοίκους με τον καθένα να έχει

δημιουργήσει 17.3kg αποβλήτων ΗΗΕ. Όμως το 2019 οι κάτοικοι της Ευρώπης παίρνουν την πρώτη θέση με 16.2kg ανά κεφάλι. Η Ευρώπη ωστόσο σταθερά παρουσιάζει τις υψηλότερες ποσότητες επίσημης συλλογής και τα υψηλότερα ποσοστά συλλογής. Το 2014 συλλέγει 4.3Mt ενώ το 2019 συλλέγει 5.1Mt, παρουσιάζει δηλαδή αύξηση τάξεως 18.6%. Τα ποσοστά συλλογής αντίστοιχα από 35% ανέρχονται σε 42.5%.

3.4 Η κατάσταση σε Κίνα, Ινδία και Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν η Κίνα και η Ινδία, διότι πέρα από το ότι είναι οι πολυπληθέστερες χώρες παγκοσμίως, παρουσιάζουν υψηλά επίπεδα παραγωγής αποβλήτων ΗΗΕ και ανακύκλωσης ηλεκτρονικών αποβλήτων μέσω ανεπίσημων καναλιών.

Η Κίνα, τα τελευταία χρόνια, έχει αναγνωρίσει τις αυξανόμενες ποσότητες ηλεκτρικών αποβλήτων που συσσωρεύονται εντός των συνόρων της ένα μείζον πρόβλημα. Η ραγδαία αύξηση του καταναλωτικού της κοινού σε συνδυασμό με την τεράστια εγχώρια παραγωγή αποτελούν κύριους παράγοντες του προβλήματος. Πέρα από τα παραπάνω όμως η Κίνα είναι και ο μεγαλύτερος εισαγωγέας ηλεκτρονικών αποβλήτων παγκοσμίως. Κάτι το οποίο την οδήγησε στο να εφαρμόσει νομοθεσίες απαγόρευσης εισαγωγής αποβλήτων ΗΗΕ τα τελευταία χρόνια [64]. Η Κίνα είναι σταθερά ο μεγαλύτερος παραγωγός αποβλήτων ΗΗΕ στην Ασία αλλά και στο κόσμο. Το 2016 παρήγαγε 7.2Mt αποβλήτων, το 2019 η παραγωγή εκτοξεύτηκε στους 10.1Mt ενώ προβλέπεται πως θα φτάσει τους 27Mt μέχρι το 2030[3], [62]. Λόγω του μεγέθους της χώρας αλλά και του εγχώριου τομέα της ανεπίσημης ανακύκλωσης, δεν υπάρχουν ακριβή στατιστικά δεδομένα συλλογής και επεξεργασίας αποβλήτων ΗΗΕ από επίσημους φορείς, παρόλα αυτά υπολογίζεται πως το ποσοστό συλλογής από την εγχώρια παραγωγή και κατανάλωση ήταν περίπου 17% το 2016 [62]. Αντιστοίχως για το 2019 η ίδια τιμή υπολογίστηκε περίπου 15% ενώ η κινεζική κυβέρνηση έχει θέσει στόχο αυτή η τιμή να φτάσει το 50% μέχρι το 2025 [3].

Η Ινδία βρίσκεται σε παρόμοια, αν όχι σε χειρότερη, κατάσταση με την Κίνα. Ο πληθυσμός, η κατανάλωση και η παραγωγή αποβλήτων αυξάνονται ετησίως. Πέρα από αυτά, τα κυριότερα προβλήματα είναι πάλι η εισαγωγή αποβλήτων ΗΗΕ και το μέγεθος του ανεπίσημου τομέα ανακύκλωσης. Το 2016 παράχθηκαν 2Mt αποβλήτων ΗΗΕ ενώ το 2019 η παραγωγή έφτασε τους 3.23Mt [3], [62]. Οι ειδικοί προβλέπουν πως μέχρι το 2025 η παραγωγή αποβλήτων δύναται να φτάσει τους 8Mt [65]. Ο ανεπίσημος τομέας συλλογής και επεξεργασίας στην Ινδία κυριαρχεί πλήρως του επίσημου, αφού υπολογίζεται πως ο πρώτος απορροφά τα 95% των αποβλήτων [65]. Συνολικά και στις δύο χώρες το μέγεθος του ανεπίσημου τομέα και η αδυναμία εφαρμογής σχετικών νομοθεσιών προκαλούν τεράστια προβλήματα υγείας σε εργαζόμενους και επιδείνωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος.

Όσο αφορά τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) τα προβλήματα δεν εμφανίζονται στις εισαγωγές αποβλήτων ΗΗΕ αλλά μάλλον στις εξαγωγές και στην απουσία κεντρικής νομοθεσίας. Οι ΗΠΑ είναι δεύτερη μεγαλύτερη παραγωγός αποβλήτων παγκοσμίως πίσω

από την Κίνα. Το 2016 παρήγαγε 6.3Mt αποβλήτων ενώ το 2019 η ποσότητα αυτή υπολογίστηκε στους 6.9Mt. [3], [62]. Αυτές οι ποσότητες αντιστοιχούν σε περίπου 15kg e waste κατά κεφαλήν για το 2016 ενώ για το 2019 η μέση ετήσια απορριφθείσα ποσότητα ανά κάτοικο έφτασε τα 21kg. Οι επίσημοι φορείς συλλογής και επεξεργασίας στη χώρα συγκέντρωσαν 1.4Mt αποβλήτων το 2016, ποσότητα που αντιστοιχεί στο 22% της συνολικής παραγωγής [62]. Οι αντίστοιχες τιμές για το 2019 μειώνονται σε 1,09Mt και 15% [66].

3.5 Η κατάσταση σε επιλεγμένες χώρες της Ευρώπης

Η Ευρώπη όπως φάνηκε παραπάνω είναι σταθερά ο μεγαλύτερος παραγωγός αποβλήτων ανά κάτοικο αλλά και η ήπειρος με τα μεγαλύτερα ποσοστά συλλογής ηλεκτρονικών αποβλήτων. Συγκεκριμένα για το έτος 2016, η Γερμανία ήταν η μεγαλύτερη παραγωγός αποβλήτων ΗΗΕ με 1.9Mt, ενώ στη δεύτερη θέση ήταν Μεγάλη Βρετανία με 1.6Mt και στη τρίτη θέση η Ρωσία με 1.4Mt [62]. Τρία χρόνια αργότερα, το 2019, οι χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή αποβλήτων είναι οι ίδιες, απλώς με διαφορετική σειρά. Στην πρώτη θέση έρχεται η Ρωσία με 1.63Mt αποβλήτων, στη δεύτερη η Γερμανία με 1.6Mt και στην τρίτη θέση η Μ. Βρετανία με 1.59Mt [3]. Όσον αφορά την παραγωγή αποβλήτων ΗΗΕ ανά κάτοικο ισχύουν τα παρακάτω. Το 2016 η Νορβηγία απέρριψε 28.5kg ανά κάτοικο παίρνοντας την πρώτη θέση, ενώ η Μ. Βρετανία και η Δανία με 24.9kg ανά κάτοικο βρέθηκαν μαζί στην δεύτερη θέση [62]. Αντίστοιχα το 2019 στην πρώτη θέση βρέθηκε πάλι η Νορβηγία με 26.55kg ανά κάτοικο, στη δεύτερη θέση το Ηνωμένο Βασίλειο με 24.36kg ανά κάτοικο και στη τρίτη θέση η Σουηδία με 20.96kg ανά κάτοικο [3]. Αναφορικά με τα ποσοστά συλλογής το 2016 η Ελβετία και η Νορβηγία κατάφεραν να έχουν το υψηλότερο με 74%, ενώ στη δεύτερη θέση βρέθηκε η Σουηδία με 69% και στη τρίτη θέση ισοβάθμισαν η Φιλανδία και η Ιρλανδία με 55% [62]. Για το 2019 τα δεδομένα συγχέονται, βέβαια φαίνεται πως η περιοχή της Βόρειας Ευρώπης συνεχίζει να έχει τα ηνία με μέσο ποσοστό συλλογής 55% [3].

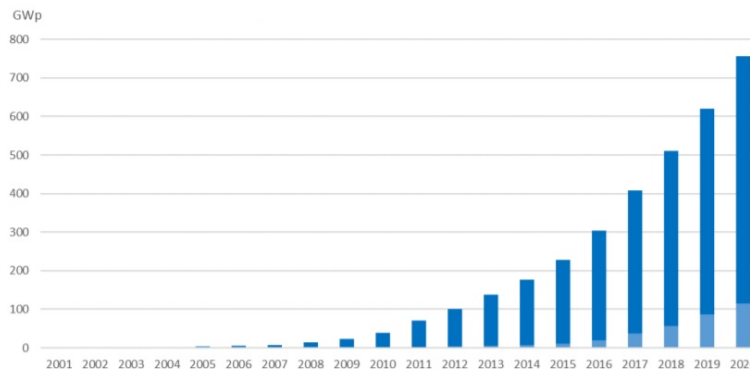
Τα δεδομένα για την περίπτωση της Ελλάδας συνοψίζονται τα εξής. Το 2016 η συνολική μάζα αποβλήτων ΗΗΕ ήταν 189kt ενώ το 2019 ανήλθε σε 181kt [3], [62]. Επίσης η ετήσια παραγωγή αποβλήτων ανά κάτοικο το 2016 ήταν 17.5kg ενώ το 2019 η ίδια ποσότητα μετρήθηκε στα 16.9kg [3], [62]. Τέλος τα ποσοστά συλλογής ήταν 30% για το 2016, ποσό που αντιστοιχεί με 56kt αποβλήτων, ενώ για το 2019 δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα [3].

Κεφάλαιο 4

Ανακύκλωση φωτοβολταϊκών συστημάτων

4.1 Εισαγωγή

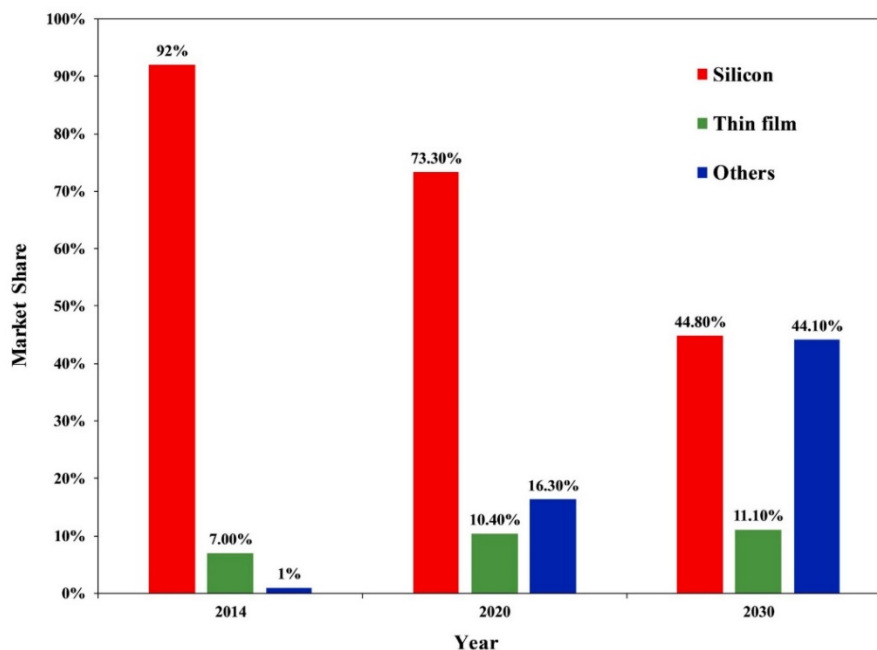
Φωτοβολταϊκό σύστημα (PV system) είναι ο συνδυασμός εξαρτημάτων και εξοπλισμού που μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα με χρήση της ηλιακής ενέργειας. Από το 1992 μέχρι και σήμερα η χρήση των PV πάνελ είναι εκθετική. Η χρήση αυτή, συνήθως, μετριέται μέσω της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς παγκοσμίως. Το 2019 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ήταν περίπου 634 GW ενώ μέχρι το τέλος του 2020 ήταν τουλάχιστον 758,9 GW[67]. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η εκθετική ανάπτυξη της χρήσης των PV πάνελ τα τελευταία χρόνια.



Εικόνα 4.1. Συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων παγκοσμίως [68]

Η χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας για παραγωγή ενέργειας αποτελεί μια από τις πιο υποσχόμενες μεθόδους παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Μέχρι στιγμής όμως στο συνολικό μείγμα της χρησιμοποιούμενης ενέργειας, η χρήση της ηλιακής βρίσκεται ακόμη σε χαμηλά επίπεδα της τάξεως του 3,7% [67]. Το μόνο σίγουρο όμως είναι πως αυτό το ποσοστό θα αυξηθεί κατά πολύ, η παραγωγή, εγκατάσταση και χρήση των πάνελ θα συνεχίσουν να αυξάνονται ραγδαία και το ενεργειακό μείγμα θα αλλάξει άρδην.

Γενικά τα είδη των φωτοβολταϊκών διακρίνονται σε τρεις: την πρώτη, την δεύτερη και τη τρίτη. Η κρυσταλλική είναι η κυριότερη, γαλλίου-αρσενικού κυρίως. Ποσοστιαία η πρώτη είναι 92% και η δεύτερη 7,33%. Η τρίτη είναι 44,8% και η δεύτερη 11,10%. Η κρυσταλλική είναι η κυριότερη, γαλλίου-αρσενικού κυρίως. Ποσοστιαία η πρώτη είναι 92% και η δεύτερη 7,33%. Η τρίτη είναι 44,8% και η δεύτερη 11,10%.

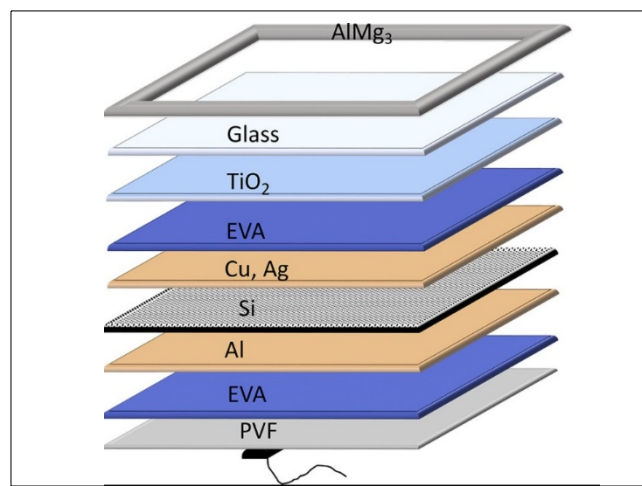


Εικόνα 13: Μερίδια αγοράς ανά γενιά φωτοβολταϊκών για τα έτη 2014, 2020, 2030 [69]

Όπως φαίνεται το 2020 την κυριαρχία στην αγορά διατηρούν τα PV από κρυσταλλικό πυρίτιο με ποσοστό 73.3%, ενώ οι τεχνολογίες λεπτού υμενίου (CdTe, CIGS) ανέρχονται στο 10.4%. Βέβαια την μεγαλύτερη ανάπτυξη παρουσιάζουν οι νεότερες τεχνολογίες, οι οποίες προβλέπεται μέχρι το 2030 να ανταγωνίζονται πλήρως τα PV πρώτης γενιάς, ενώ οι τεχνολογίες thin film θα παρουσιάζουν σταθεροποίηση στο μερίδιο αγοράς που κατέχουν.

4.2 Δομή φωτοβολταϊκών πάνελ

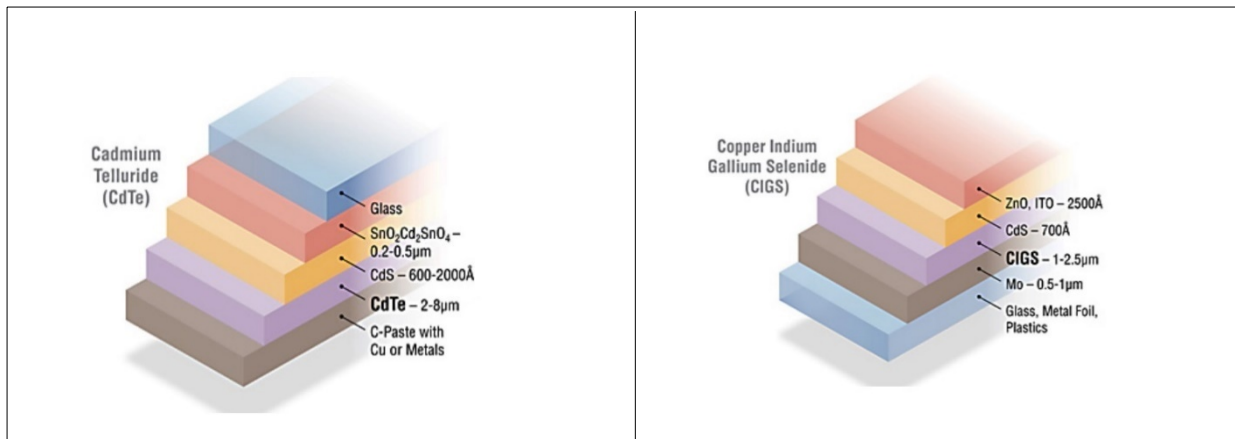
Η δομή των πάνελ και ο τρόπος κατασκευής τους σχετίζονται άμεσα με τους τρόπους διαχείρισής τους όταν αυτά φτάσουν στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους. Η πρώτη γενιά φωτοβολταϊκών χρησιμοποιεί κρυσταλλικό πυρίτιο για την κατασκευή των ηλιακών στοιχείων. Το πυρίτιο δύναται να είναι μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό. Τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά πάνελ έχουν υψηλότερη απόδοση από τα πολυκρυσταλλικά αλλά και υψηλότερα κόστη παραγωγής[70]. Τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία των πάνελ είναι το ενθυλακωτικό EVA, το οπισθόφυλλο, η εμπρόσθια γυάλινη επιφάνεια, το πλαίσιο και κουτί συνδέσεως. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η δόμηση των στοιχείων στο χώρο.



Εικόνα 14: Άποψη τύπου exploded view ενός πάνελ πρώτης γενιάς [71]

Τα ηλιακά στοιχεία (solar cells) επικαλύπτονται και προστατεύονται από το ενθυλακωτικό. Το υλικό από το οποίο το τελευταίο είναι κατασκευασμένο είναι το EVA (Ethylene Vinyl Acetate), το οποίο είναι ένα διαφανές πολυμερές. Η μορφή του είναι τύπου film και καλύπτει τα ηλιακά στοιχεία από την πάνω και από την κάτω όψη τους. Το οπισθόφυλλο (back sheet) είναι το τελευταίο στρώμα του πάνελ και του παρέχει μηχανική αντοχή και ηλεκτρική μόνωση[70]. Ως επί το πλείστον τα οπισθόφυλλα κατασκευάζονται από Tendlar®, ένα είδος πολυβινυλοφθορίδιου (PVF), που κατασκευάζει η αμερικανική εταιρεία χημικών DuPont. Η εμπρόσθια γυάλινη επιφάνεια (glass) είναι από σκληρυμένο γυαλί πάχους 3mm έως 4mm. Προσδίδει μηχανική αντοχή και προστασία από ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα χαλάζι. Το γυαλί είναι υψηλής καθαρότητας και φέρει αντιανακλαστική επίστρωση, συνήθως από διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2), στο πίσω μέρος του για μείωση απωλειών της ηλιακής ενέργειας. Το πλαίσιο (frame) είναι από εξωθημένο αλουμίνιο, δίνοντας στιβαρότητα στην κατασκευή. Ανάμεσα από το ενθυλακωτικό και τις κυψέλες πυριτίου διακρίνονται στρώσεις χαλκού (Cu), άργυρου (Ag) και αλουμινίου (Al). Επί της ουσίας αυτές οι στρώσεις είναι τα εσωτερικά στοιχεία συνδεσμολογίας του πάνελ. Ονομάζονται μπάρες διαύλου (busbars) και είναι υπεύθυνες για τη μεταφορά ρευμάτων.

Η δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών περιέχει διάφορες τεχνολογίες, με τις κυριότερες να είναι τα πάνελ τελλουριούχου καδμίου (CdTe) και τα πάνελ και χαλκού-ίνδιου-γάλλιου-σεληνίου (CIGS). Παρακάτω παρουσιάζονται σε σχηματική αναπαράσταση η διαστρωμάτωση των πάνελ και τα πάχη κάθε στρώματος. Αναφορικά με τα πάχη χρησιμοποιούνται ως μονάδες μέτρησης τα μm ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$) και τα όνγκστρεμ \AA ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$).



Εικόνα 15: Διαστρωμάτωση ενός CdTe πάνελ και ενός CIGS πάνελ [72], [73]

Όσον αφορά τα πάνελ τελλουριούχου καδμίου αποτελούνται από πέντε βασικά επίπεδα. Το πρώτο είναι η εμπρόσθια γυάλινη επιφάνεια. Το δεύτερο επίπεδο είναι το λεγόμενο διαφανές αγωγίμο στρώμα (Transparent Conductive Film – TCF). Το τρίτο επίπεδο είναι το στρώμα θειούχου καδμίου (CdS). Το CdS λειτουργεί ως ημιαγωγός τύπου n (δότης). Το τέταρτο επίπεδο είναι το στρώμα του τελλουριούχου καδμίου (CdTe). Το CdTe λειτουργεί ως ημιαγωγός τύπου p (αποδέκτης). Έτσι αυτά τα δύο επίπεδα σχηματίζουν μια επαφή p-n. Το τελευταίο επίπεδο είναι η μεταλλική επαφή, που είναι συνήθως από χαλκό.

Για τα CIGS πάνελ αντίστοιχα διακρίνονται πέντε βασικά στρώματα. Το πρώτο επίπεδο είναι το διαφανές αγωγίμο στρώμα, κατασκευασμένο από οξείδιο ψευδαργύρου (ZnO) και οξείδιο ίνδιου/κασσίτερου (Indium Tin Oxide – ITO). Το δεύτερο επίπεδο είναι το στρώμα θειούχου καδμίου (CdS). Το τρίτο επίπεδο είναι το στρώμα χαλκού-ίνδιου-γάλλιου-σεληνίου (CIGS). Το τέταρτο επίπεδο είναι το στρώμα μολυβδαίνιου (Mo). Το τελευταίο στρώμα είναι το γυάλινο υπόστρωμα.

4.3 Απόβλητα φωτοβολταϊκών πάνελ

Είναι προφανές πως παράλληλα με την αύξηση της χρήσης των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών θα αυξάνονται και τα απόβλητά τους. Η διάρκεια ζωής της συντριπτικής πλειοψηφίας των PV κυμαίνεται από 20 έως 30 χρόνια, ενώ για τη διενέργεια υπολογισμών διαχείρισης του τέλους ζωής τους (End of Life Management) η διάρκεια ορίζεται στα 25 χρόνια[69]. Αν συνυπολογίσει κανείς πως οι πρώτες εγκαταστάσεις PV πάνελ έλαβαν χώρα στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, τότε φαίνεται πως τα επόμενα χρόνια οι όγκοι αποβλήτων φωτοβολταϊκών θα αρχίσουν να συσσωρεύονται σε επικίνδυνα υψηλά επίπεδα. Οπότε είναι προς το συμφέρον μας οι διαδικασίες ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης και τα νομοθετικά πλαίσια διαχείρισης τέλους ζωής τους να τεθούν και να εφαρμοστούν από νωρίς.

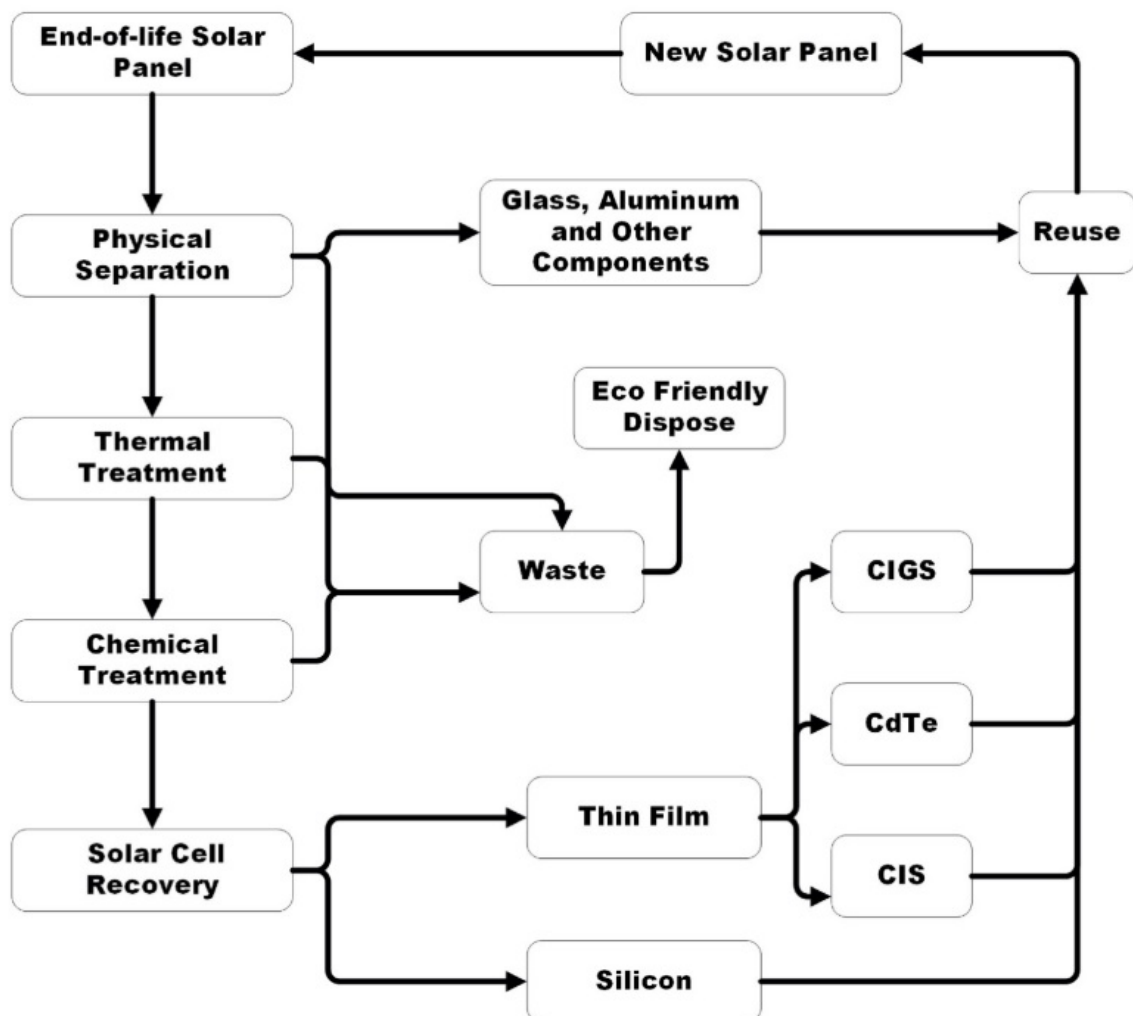
Ο Διεθνής Οργανισμός Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (International Renewable Energy Agency – IRENA) υπολόγισε πως στα τέλη του 2016 η συνολική μάζα PV αποβλήτων κυμαίνονταν από

43.500 τόνους έως 250.000 τόνους, ποσά που αντιστοιχούσαν στο 0.1%-0.6% της συνολικής μάζας εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών [69], [74]. Επίσης οι προβλέψεις του εν λόγω οργανισμού δίνουν μεσοπρόθεσμους υπολογισμούς για το 2030 όπου η συνολική μάζα PV αποβλήτων θα ανέρχεται σε 1.7 έως 8 εκατομμύρια τόνους και μακροπρόθεσμους υπολογισμούς για το 2050 όπου τα απόβλητα φωτοβολταϊκών θα κυμαίνονται από 60 έως και 78 εκατομμύρια τόνους [74]. Παρόμοιες προβλέψεις, αν και πιο ελπιδοφόρες, έχει κάνει και η GreenMatch, μια συμβουλευτική εταιρεία για θέματα φωτοβολταϊκών στο Ηνωμένο Βασίλειο. Παρακάτω φαίνεται αρχικά σε πίνακα οι συγκεντρωμένες προβλέψεις για επιλεγμένες χώρες [75]. Οι χώρες που μελετήθηκαν είναι αυτές με την μεγαλύτερη χρήση PV συστημάτων και οι προβλέψεις αφορούν τα έτη 2016, 2020, 2030, 2040 και 2050.

Πίνακας 5: Απόβλητα φωτοβολταϊκών [75]

4.4 Ανακύκλωση φωτοβολταϊκών πάνελ

Γενικά στη διαχείριση αποβλήτων χρησιμοποιείται ο όρος “3R” ως συντομογραφία του δόγματος “Reduce – Reuse – Recycle” όπου μεταφράζεται ως “Μείωση – Επαναχρησιμοποίηση – Ανακύκλωση”. Η μείωση αφορά εκείνες τις πρακτικές ώστε να παράγονται λιγότερα απόβλητα, όπου στην περίπτωση των PV εφαρμόζεται με τη βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας και την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων υλικών για την κατασκευή ενός πάνελ [74]. Η επαναχρησιμοποίηση συνίσταται στο κατά πόσο δυνατή είναι η επισκευή ενός προϊόντος ή ακόμη ο επαναπροσδιορισμός της χρήσης του ώστε να παραταθεί η διάρκεια ζωής του. Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών, όποια παρουσιάζουν μη καταστρεπτικές βλάβες περνάνε σε στάδιο ελέγχου για το αν η επισκευή είναι οικονομικά συμφέρουσα. Οι κυριότερες μέθοδοι ελέγχου είναι η δοκιμή υγρού ρεύματος διαρροής (wet leakage test) και ο έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής (flash test) [74]. Στην δοκιμή υγρού ρεύματος διαρροής ο εξοπλισμός βυθίζεται σε δεξαμενή υγρού, συνδέεται με ρεύμα τάσης ίσης της μέγιστης τάσης λειτουργίας και ελέγχεται για τυχόν διαρροές που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την λειτουργία του υπό αντίξοες συνθήκες όπως βροχή [76]. Στον έλεγχο διηλεκτρικής αντοχής εφαρμόζεται τάση στον εξοπλισμό που είναι πολύ υψηλότερη από τη ονομαστική τάση λειτουργίας και ελέγχεται αν αντέχουν τα μονωτικά τμήματα του δηλαδή αν έχουν επαρκή διηλεκτρική αντοχή [77]. Σε περίπτωση που η επισκευή είναι απαραίτητη, δυνατή και οικονομικά συμφέρουσα τότε συνήθως περιλαμβάνονται η αλλαγή του πλαισίου, των απολήξεων των καλωδίων και του κουτιού συνδέσεως [74]. Σύμφωνα με τον IRENA ο επισκευασμένος εξοπλισμός μεταπωλείται συνήθως στο 70% της αρχικής του αξίας. Η ανακύκλωση από την άλλη αφορά όλες εκείνες τις διαδικασίες διαχωρισμού των



σύ-
λο-
ου-
ός-
χύ-
ής-
γή-
ής-
με-
λό-
ται

Εικόνα 16: Γενικό διάγραμμα ροής ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ [69]

Όπως φαίνεται παραπάνω το πρώτο βήματα είναι ο φυσικός διαχωρισμός (physical separation). Σε αυτό το στάδιο τα πλαίσια αλουμινίου, οι γυάλινες επιφάνειες και τα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα αφαιρούνται είτε μηχανικά είτε χειρωνακτικά. Τα επόμενα στάδια είναι οι θερμικές και χημικές διεργασίες που απομονώνουν τις ηλιακές κυψέλες. Μετά ανάλογα με το είδος τους, λαμβάνουν χώρα οι ανάλογες διεργασίες για τον διαχωρισμό και την ανάκτηση των υλικών τους. Επειδή κατά βάσει τα πάνελ που χρησιμοποιούνται ευρέως και δύναται να καταλήξουν προς ανακύκλωση είναι πρώτης και δεύτερης γενιάς στο παρόν διάγραμμα δεν εξετάζονται οι περιπτώσεις ανάκτησης υλικών από νεότερες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών.

Ο μη κερδοσκοπικός οργανισμός PV Cycle αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους φορείς ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών στη Ευρώπη. Ασχολείται με τη συλλογή και την ανακύκλωση PV συστημάτων πρώτης και δεύτερης γενιάς. Όσον αφορά τα πάνελ πρώτης γενιάς, δηλαδή αυτά από κρυσταλλικό πυρίτιο, υπολογίζει πως κατά βάρος αποτελούνται από 76% γυαλί, 10% πλαστικό, 8% αλουμίνιο, 5% πυρίτιο και 1% λοιπά μέταλλα [75]. Η διαδικασία ανακύκλωσης που ακολουθείται είναι η εξής. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την αποσυναρμολόγηση του αλουμινένιου πλαισίου και της εμπρόσθιας γυάλινης επιφάνειας, δεδομένου πως τα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα έχουν αφαιρεθεί πλήρως πρωτύτερα. Σε αυτό το στάδιο τα ποσοστά ανάκτησης είναι 100% για το αλουμίνιο και 95% για το γυαλί. Το δεύτερο στάδιο είναι η θερμική επεξεργασία του υπολείμματος στους 500 °C. Εδώ το ενθυλακωτικό πλαστικό

(EVA) εξατμίζεται και μέρος της παραγόμενης ενέργειας επιστρέφεται για τις θερμικές ανάγκες της επεξεργασίας. Επίσης αυτή η διαδικασία επιφέρει τον φυσικό διαχωρισμό των ηλιακών κυψελών από το ενθυλακωτικό. Το 80% των ηλιακών στοιχείων μπορεί να επαχρησιμοποιηθεί άμεσα ενώ το υπόλοιπο 20% λαμβάνει χημική και θερμική επεξεργασία για να ανακτηθεί το περιεχόμενο πυρίτιο σε ποσοστό 85%. Όσον αφορά τα πάνελ δεύτερης γενιάς ο υπολογισμός της κατά βάρους σύστασης είναι ο εξής: 89% γυαλί, 4% πλαστικό, 6% αλουμίνιο και 1% λοιπά μέταλλα [75]. Οι διαδικασίες που ακολουθούνται εδώ είναι κυρίως μηχανικού και χημικού χαρακτήρα. Το πρώτο στάδιο εδώ είναι η μηχανική επεξεργασία των πάνελ με την μέθοδο του τεμαχισμού, όπου η εισερχόμενη μάζα αποβλήτων τεμαχίζεται σε μεγέθη 4-5mm και διαχωρίζονται τα διάφορα στρώματα της. Το επόμενο στάδιο είναι η χρήση ενός φυγοκεντρικού διαχωριστή με περιστρεφόμενο κοχλία, με στόχο των διαχωρισμό των στερεών και των ρευστών. Ο διαχωριστής είναι μια μηχανική διάταξη, στην οποία η εισερχόμενη μάζα (στερεά και υγρά) περιστρέφεται παράγοντας δυνάμεις έως και 4000 G και λόγω της διαφοράς πυκνότητας, τα στερεά συσσωρεύονται στα τοιχώματα ενώ τα υγρά μέσω του περιστρεφόμενου κοχλία διοχετεύονται στην απόληξη της μηχανής [78]. Έτσι το εισερχόμενο ρεύμα αποβλήτων διαχωρίζεται σε δύο διακριτά επιμέρους ρεύματα, τα στερεά και τα υγρά. Το ρεύμα των στερεών αποβλήτων, που είναι κυρίως γυαλί, περνάει από δονούμενα κόσκινα και ξεπλένεται με νερό, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ποσοστό ανάκτησης περίπου στο 90%. Τα υγρά, που είναι κυρίως μεταλλικού χαρακτήρα, αποστραγγίζονται και μετά επεξεργάζονται. Η επεξεργασία συνίσταται στον επιμέρους διαχωρισμό της ροής, η οποία περιέχει πολύτιμες ημιαγώγιμες ενώσεις. Το ποσοστό ανάκτησης από το ρεύμα των υγρών αποβλήτων κυμαίνεται περίπου στο 95%. Συνολικά έχουμε πως και για τους δύο τύπους πάνελ τα ποσοστά επανάκτησης είναι τουλάχιστον: 90% για το γυαλί, 80% για το πυρίτιο, 95% για τα μέταλλα.

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας (μηχανικές, θερμικές, χημικές) αλλά μόνο ορισμένες χρησιμοποιούνται εμπορικώς ενώ οι υπόλοιπες είναι ακόμα στο στάδιο εργαστηριακής μελέτης. Το κυριότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στις διεργασίες ανακύκλωσης η αποκόλληση του ενθυλακωτικού υλικού EVA [74] ενώ οι παράγοντες κόστους-οφέλους και η ποιότητα του εξερχόμενου υλικού εμφανίζονται ως βασικοί παράμετροι επιλογής της εκάστοτε διεργασίας. Στη συνέχεια συνοψίζονται όλες οι κατεργασίες ανακύκλωσης, τόσο για πάνελ πυριτίου όσο και για τεχνολογίες thin film που συγκέντρωσαν οι Lunardi, Alvarez-Gaitan, Corkish, Bilbao το 2018 σε μελέτη που έκαναν στο περιοδικό "Solar Panels and Photovoltaic Materials". [79]

Υπενθυμίζεται πως οι κατεργασίες γίνονται αφού έχουν αφαιρεθεί τα ηλεκτρολογικά εξαρτήματα, όπως καλωδιώσεις και κουτιά συνδέσεως (junction boxes) και τα πλαίσια αλουμινίου.

Για τα φωτοβολταϊκά από πυρίτιο εξετάστηκαν συνολικά δέκα διαδικασίες εκ των οποίων οι τέσσερις χρησιμοποιούνται εμπορικώς ενώ οι υπόλοιπες έξι βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο ακόμη. Η πρώτη μέθοδος, που χρησιμοποιείται εμπορικά, είναι ο φυσικός διαχωρισμός των διαφόρων υλικών με μηχανικές κατεργασίες (πχ τεμαχισμός). Το πλεονέκτημα αυτής της

μεθόδου είναι πως μπορεί να επεξεργαστεί μεγάλους όγκους αποβλήτων, ενώ τα μειονεκτήματα της είναι: απαιτούνται επιπλέον διεργασίες για την απομάκρυνση του EVA, οι ηλιακές κυψέλες ενδεχομένως να σπάσουν, παράγονται μεγάλες ποσότητες επιβλαβής σκόνης και επέρχεται επαυξημένη διάβρωση του εξοπλισμού [79]. Η δεύτερη εμπορική μέθοδος είναι η θερμική επεξεργασία δύο σταδίων, η οποία εμφανίζει τα εξής πλεονεκτήματα: το EVA απομακρύνεται πλήρως, οι ηλιακές κυψέλες δύνανται να ανακτηθούν άθικτες και η διαδικασία είναι οικονομικά βιώσιμη [79]. Ως μειονεκτήματα της διεργασίας παρατηρούνται οι επιβλαβείς εκλύσεις αερίων και οι υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις [79]. Επίσης οι ερευνητές αναφέρουν την πλήρη επανάκτηση του γυαλιού και την επανάκτηση του πυριτίου, καθαρότητας 8N μετά από χημική επεξεργασία, σε ποσοστό 62% [80]. Η τρίτη εμπορική μέθοδος είναι η χημική χάραξη (etching), κατά την οποία ένα μείγμα νιτρικού οξέος (HNO_3), υδροφθορίου (HF), αιθανικού οξέος (CH_3COOH) και βρωμίου (Br_2) χρησιμοποιείται για την απομόνωση των φωτοβολταϊκών δισκίων πυριτίου [81]. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η επανάκτηση ουσιών υψηλής καθαρότητας και η σχετικά απλή εφαρμογή της, ενώ ως μειονέκτημα εμφανίζεται η εκτενής χρήση χημικών ουσιών [79]. Η τέταρτη εμπορική μέθοδος είναι αυτή που εφαρμόζει ο οργανισμός PV Cycle και παρατέθηκε παραπάνω. Από τις διαδικασίες που βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό επίπεδο, η πρώτη είναι η χημική διάλυση με χρήση οργανικού διαλύτη και συγκεκριμένα τριχλωροαιθυλένιου (TCE) [82]. Πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου πως ο διαχωρισμός του ενθυλακωτικού EVA είναι σχετικά εύκολος και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν παθαίνουν εκτεταμένες βλάβες, ενώ ως μειονέκτημα εμφανίζεται η μεγάλη χρονική διάρκεια που απαιτείται για την αποπλαστικοποίηση, δηλαδή την απομάκρυνση του EVA [79]. Η δεύτερη πειραματική μέθοδος είναι παρόμοια με την πρώτη, αφορά τη χημική διάλυση με χρήση τριχλωροαιθυλένιου και τολουολίου όμως επιπρόσθετα το μείγμα ακτινοβολείται και με υπερήχους. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως ο χρόνος απομάκρυνσης του EVA μειώνεται δραστικά, από δέκα μέρες σε μία ώρα, ενώ το μειονέκτημα είναι πως απαιτείται αρκετά ακριβός εξοπλισμός [79], [82]. Η τρίτη πειραματική μέθοδος είναι η πυρόλυση είτε με χρήση κλιβάνου σε μεταφορικούς ιμάντες είτε με αντιδραστήρα ρευστοποιημένης κλίνης. Η εν λόγω μέθοδος βρίσκεται σε πιλοτικό στάδιο και τα αποτελέσματά της είναι ενθαρρυντικά. Τα στρώματα γυαλιού ανακτώνται σε ποσοστό 100% και τα δισκία πυριτίου σε ποσοστό 80% ενώ η μέθοδος παρουσιάζει θετικό πρόσημο στην ανάλυση κόστους οφέλους [79]. Η τέταρτη πειραματική μέθοδος είναι η χημική διάσπαση με χρήση νιτρικού οξέος (HNO_3), η οποία μάλιστα βρίσκεται σε πιλοτικό στάδιο. Τα πλεονεκτήματά της είναι πως το ενθυλακωτικό και οι μεταλλικές επικαλύψεις των φωτοβολταϊκών δισκίων απομακρύνονται πλήρως και οι κυψέλες ανακτώνται πλήρως ενώ το μειονέκτημά της είναι η έκλυση βλαβερών αερίων [79]. Η πέμπτη μέθοδος είναι ο μηχανικός διαχωρισμός μέσω κοπής θερμού σύρματος (hotwire cutting). Αυτό το είδος κοπής χρησιμοποιεί σύρμα μικρής διαμέτρου, το οποίο είναι τεντωμένο και θερμαίνεται μέσω ηλεκτρικής αντίστασης. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι πως η ανάκτηση του γυαλιού είναι πλήρης και τα ηλιακά στοιχεία παθαίνουν ως επί το πλείστον μικρές ζημιές ενώ το μειονέκτημά της είναι ότι απαιτείται επιπλέον επεξεργασία για την αφαίρεση του EVA [79]. Η έκτη και τελευταία πειραματική μέθοδος είναι η

ηλεκτροθερμική θέρμανση η οποία φαίνεται ικανή να αφαιρεί το γυαλί σχετικά εύκολα αλλά απαιτεί μεγάλα χρονικά διαστήματα.

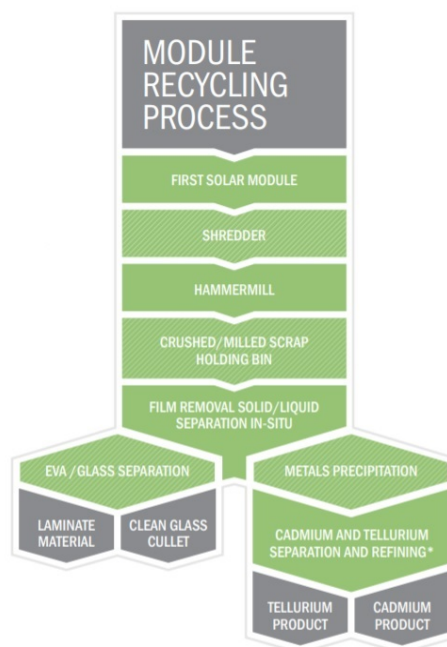
Αντίστοιχα για τα φωτοβολταϊκά thin film εξετάστηκαν συνολικά δώδεκα μέθοδοι ανακύκλωσης, εκ των οποίων οι έξι χρησιμοποιούνται εμπορικώς, οι τρεις είναι σε πιλοτικό στάδιο και οι υπόλοιπες τρεις βρίσκονται ακόμη υπό έρευνα. Από τις τρεις πειραματικές, οι δύο είναι η κοπή θερμού σύρματος και η χημική διάλυση με οργανικό διαλύτη, οι οποίες έχουν παρατεθεί παραπάνω. Η τρίτη μέθοδος που βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο είναι ακτινοβολία μέσω λέιζερ, η οποία παρόλο που απομακρύνει το ενθυλακωτικό σχετικά εύκολα, απαιτεί πολύ ακριβό εξοπλισμό και μεγάλα χρονικά διαστήματα για να πραγματοποιηθεί [79]. Από τις έξι εμπορικές μεθόδους οι τέσσερις (χημική χάραξη, μηχανικός διαχωρισμός, θερμική επεξεργασία, διαδικασίες της PV Cycle) έχουν αναφερθεί παραπάνω, ενώ οι εναπομένουσες είναι η ξηρή χάραξη (dry etching) και η έκπλυση (leaching). Η ξηρή χάραξη είναι μια παντεταρισμένη διαδικασία κατά την οποία τα ηλιακά στοιχεία λεπτού υμενίου (CdTe πάνελ) τεμαχίζονται μηχανικώς, εκτίθενται σε περιβάλλον οξυγόνου σε θερμοκρασία 300 °C ώστε το ενθυλακωτικό να λιώσει και τέλος εκτίθενται σε περιβάλλον αέριου χλωρίου θερμοκρασίας τουλάχιστον 400 °C [83]. Τα προϊόντα της εν λόγω διαδικασίας είναι το χλωριούχο κάδμιο (CdCl_2) και το τετραχλωριούχο τελλούριο (TeCl_4). Η διαδικασία είναι σχετικά απλή όμως έχει μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις. Η έκπλυση αφορά χημική διαδικασία κατά την οποία φωτοβολταϊκά στοιχεία, που έχουν διαχωριστεί από το EVA, διαλύονται σε οξέα (νιτρικό, φωσφορικό, υδροχλωρικό) με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η απομόνωση των σπάνιων μετάλλων [84]. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι πως είναι δυνατή η πλήρης επανάκτηση των μετάλλων ενώ τα μειονεκτήματα η αυξημένη χρήση και δυσκολία διαχείρισης των χημικών και η παραγωγή επιβλαβών όξινων αναθυμιάσεων [79]. Όσον αφορά τις διαδικασίες που βρίσκονται σε πιλοτικό στάδιο, αυτές είναι η μέθοδος Vacuum Blast, η επίπλευση και η τριβή. Η μέθοδος Vacuum Blast ή αλλιώς vacuum blasting είναι επί της ουσίας μια διαδικασία αμμοβολής κλειστού βρόγχου. Τα μηχανήματα που εκτελούν το vacuum blasting φέρουν πιστόλι αμμοβολής και σωλήνα συλλογής που δουλεύουν ταυτόχρονα ενώ τα διασπασμένα σωματίδια των πάνελ διαχωρίζονται από την ειδική άμμο με σύστημα φιλτραρίσματος. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η επανάκτηση τόσο του γυαλιού όσο και των στρωμάτων των ημιαγωγικών υλικών ενώ τα μειονεκτήματα της είναι πως είναι σχετικά αργή και εκλύονται μεταλλικές σκόνες κατά τη διάρκεια [79]. Η επίπλευση είναι μια μέθοδος διαχωρισμού υδρόφοβων – υδρόφιλων επιφανειών μέσω δημιουργίας κατάλληλων συνθηκών. Τα πλεονεκτήματά της είναι πως είναι σχετικά απλή και δεν υπάρχει εκτεταμένη χρήση χημικών ουσιών ενώ το κυριότερο μειονέκτημα είναι οι υψηλές απώλειες πολυτίμων ουσιών κατά τις διαδικασίες πλυσίματος και κοσκινίσματος που απαιτούνται μετά [79].

4.5 Μελέτη περίπτωσης διαχείρισης πάνελ από την First Solar

Η εταιρεία First Solar είναι κατά βάσει μια εταιρεία κατασκευής φωτοβολταϊκών πάνελ. Ιδρύθηκε το 1999 στη Αριζόνα των ΗΠΑ, ενώ σήμερα διαθέτει εγκαταστάσεις στις ΗΠΑ, στη Γερμανία και τη Μαλαισία. Επίσης είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός φωτοβολταϊκών τεχνολογίας thin film παγκοσμίως. Ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα της είναι πως το τέταρτο τρίμηνο του 2008 έσπασε το φράγμα κόστους παραγωγής φωτοβολταϊκών. Το κόστος παραγωγής μετριέται σε χρηματικές μονάδες ανά παραγόμενο watt ενώ το φράγμα ήταν 1\$/watt. Η First Solar το 2008 έσπασε το φράγμα με κόστος παραγωγής 0.93\$/watt. Το 2013 το κόστος παραγωγής ανά watt μειώνεται περαιτέρω με 0.59\$/watt και αποδοτικότητα φτάνει στο 14% για τα thin film πάνελ. Η εταιρεία βασιζόμενη στην διευρυμένη ευθύνη του παραγωγού από το 2005 κιόλας ξεκίνησε να ασχολείται με την διαχείριση πάνελ στο τέλος της χρήσιμης ζωής τους (EoL). Οι υπηρεσίες που προσφέρει είναι η συλλογή και επεξεργασία των πάνελ, ενώ το βασικό είδος με το οποίο ασχολείται τα CdTe φωτοβολταϊκά πάνελ δεύτερης γενιάς. Μάλιστα κατά τις αγορές των πάνελ, οι τελικοί χρήστες συμφωνούν πως όταν τα προϊόντα φτάσουν στο EoL τους, τότε την ανακύκλωση θα την αναλάβει είτε η εταιρεία είτε κάποιος φορέας αδειοδοτημένος από αυτή. Τα κόστη μεταφοράς καλύπτονται από την εταιρεία ενώ ο τελικός χρήστης είναι υπεύθυνος για τον παροπλισμό του εξοπλισμού, που γίνεται βάσει γραπτών οδηγιών της εταιρείας. Η επικοινωνία με τη First Solar για συλλογή παροπλισμένου φωτοβολταϊκού εξοπλισμού μπορεί να γίνει από οποιονδήποτε πελάτη της, είτε τηλεφωνικά είτε μέσω διαδικτύου [85].

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιεί η First Solar για την επεξεργασία των φωτοβολταϊκών έχουν περάσει από διάφορα στάδια. Το 2005 οι τεχνολογίες βασίζονταν σε διαδικασίες εξόρυξης και ως κύριο στόχο είχαν την επανάκτηση του γυαλιού, ενώ η ικανότητα επεξεργασίας (processing capacity) ανέρχονταν στους 10 μετρικούς τόνους ημερησίως. Το 2011 οι διαδικασίες άλλαξαν και ως βάση είχαν την χημική βιομηχανία, με την ικανότητα επεξεργασίας να ανέρχεται στους 30 μετρικούς τόνους ημερησίως. Τέλος το 2015 οι διαδικασίες έφτασαν στην τρίτη γενιά τους, χρησιμοποιώντας συνδυασμούς μηχανικών και χημικών διεργασιών υπό το μοντέλο διαδικασίας συνεχούς ροής. Η τρίτη γενιά διαδικασιών εμφανίζει υψηλά ποσοστά ανάκτησης γυαλιού και ημιαγωγίμων υλικών, σε ποσοστά περίπου 90%, μειωμένα κόστη επεξεργασίας (κόστη εξοπλισμού και εργασίας) και ικανότητα επεξεργασίας έως 150 μετρικούς τόνους ημερησίως. Πέρα από τις ήδη εφαρμοζόμενες τεχνολογίες και διαδικασίες (R&D) στοχεύοντας υψηλά στην έρευνα και την ανάπτυξη

Γενικά οι σειρά των διαδικασιών που μπορούν να φανούν στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 17: Διαδικασία επεξεργασίας της First Solar για CdTe πάνελ [87]

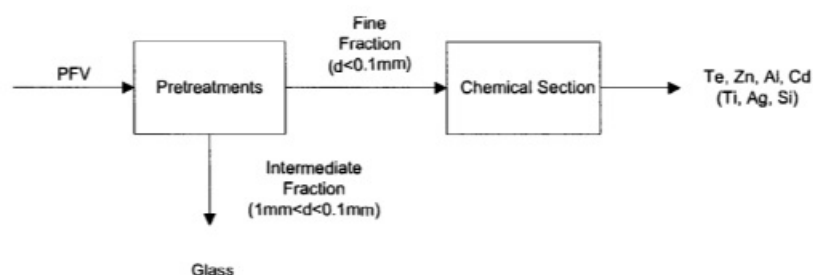
Παρατηρώντας κανείς τα προϊόντα των διαδικασιών μπορεί να διακρίνει τέσσερα είδη. Τα προϊόντα που περιέχουν τελλούριο (Te), αυτά που περιέχουν κάδμιο (Cd), οι ποσότητες γυαλιού και τα υλικά διαστρωμάτωσης αποτελούν αυτά τα τέσσερα είδη. Έτσι συμπεραίνεται πως τα πλαίσια αλουμινίου και τα στοιχεία ηλεκτρικής συνδεσμολογίας (κουτί συνδέσεως, καλωδιώσεις) αφαιρούνται σε κάποια φάση πριν ξεκινήσει η διαδικασία επεξεργασίας της εταιρείας.

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας είναι ο τεμαχισμός των εισερχόμενων ηλιακών στοιχείων με τη χρήση ενός τεμαχιστή (shredder). Σε αυτό το στάδιο τα ηλιακά στοιχεία φορτώνονται στον τεμαχιστή με κατάλληλα οχήματα και ο στόχος είναι να διασπαστούν σε μικρότερα κομμάτια. Το δεύτερο βήμα είναι ο περαιτέρω τεμαχισμός με χρήση ενός σφυρόμυλου (hammermill). Εδώ η ροή αποβλήτων διασπάται σε κομμάτια μεγέθους 4mm έως 5 mm, το κατάλληλο μέγεθος για να διασπαστεί η πλαστικοποιημένη επικάλυψη του ενθυλακωτικού. Έπειτα η ροή αποθηκεύεται σε κάδους (holding bin) μέχρι να ετοιμαστεί το επόμενο στάδιο ή μέχρι οι ποσότητες να φτάσουν σε βέλτιστο επίπεδο. Το τρίτο βήμα της διαδικασίας είναι η απομάκρυνση των μεμβρανών (film removal) που περιέχουν ημιαγώγιμα υλικά. Αυτή η διαδικασία έχει χημικό χαρακτήρα καθώς χρησιμοποιεί οξέα και υπεροξειδία, τα οποία μαζί με τη ροή των αποβλήτων, από τους κάδους, εισέρχονται σε περιστρεφόμενα τύμπανα ανοξειδωτού χάλυβα. Το τέταρτο βήμα λαμβάνει χώρα εν συνεχεία του τρίτου και είναι ο διαχωρισμός στερεών-υγρών (solid/liquid separation). Τα περιεχόμενα των τυμπάνων αδειάζονται αργά σε ένα διαχωριστή στερεών-υγρών, όπου ένας περιστρεφόμενος κοχλίας υπό κλίση μεταφέρει τα στερεά προς τα πάνω, αφήνοντας τα υγρά πίσω. Έτσι τώρα η ροή των αποβλήτων χωρίζεται σε δύο διακριτές ροές: τα στερεά αποτελούμενα κυρίως από γυαλί και ενθυλακωτικό και τα υγρά αποτελούμενα από ποσότητες υγρών μετάλλων (Cd, Te). Μελετώντας τις διαδικασίες επεξεργασίας της υγρής ροής, διακρίνονται δύο στάδια μέχρι να φτάσουμε στο τελικό προϊόν. Το πρώτο στάδιο είναι η καθίζηση (precipitation), όπου τα υγρά προωθούνται σε κατάλληλες διατάξεις. Οι μεταλλικές ενώσεις καταβυθίζονται σε τρία στάδια αύξησης του pH. Το δεύτερο στάδιο είναι η αφυδάτωση (dewatering), όπου οι ποσότητες

εναποθέτονται σε δοχεία με στόχο το στέγνωμά και την πύκνωσή τους. Το τελικό προϊόν είναι μία κρούστα πλούσια σε μέταλλα ημιαγώγιμου χαρακτήρα. Ο επιπλέον διαχωρισμός δεν αναλαμβάνεται από την μονάδα επεξεργασίας αλλά ανατίθεται σε εξωτερικούς συνεργάτες (outsourcing). Τα ποσοστά ανάκτησης κυμαίνονται από 90% έως 95%. Όσον αφορά τώρα τις διαδικασίες επεξεργασίας της στερεής ροής διακρίνονται πάλι δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η χρήση μιας διάτρητης δονούμενης επιφάνειας, ένα κόσκινο επί της ουσίας. Αυτή η διαδικασία χρησιμεύει στο να διαχωριστούν οι ποσότητες γυαλιού από τα ευμεγέθη κομμάτια του ενθυλακωτικού. Το δεύτερο στάδιο είναι το πλύσιμο του διαχωρισμένου γυαλιού και η προώθησή του προς ανακύκλωση. Τα ποσοστά ανάκτησης γυαλιού κυμαίνονται στο 90%. Τέλος σε όλη τη γραμμή επεξεργασίας έχουν τοποθετηθεί μηχανισμοί φιλτραρίσματος και συλλογής της παραγόμενης σκόνης. Οι συλλέκτες σκόνης τοποθετούνται κυρίως στις μηχανικές διαδικασίες τεμαχισμού και τα φίλτρα είναι τύπου HEPA με απόδοση 99.95% [85].

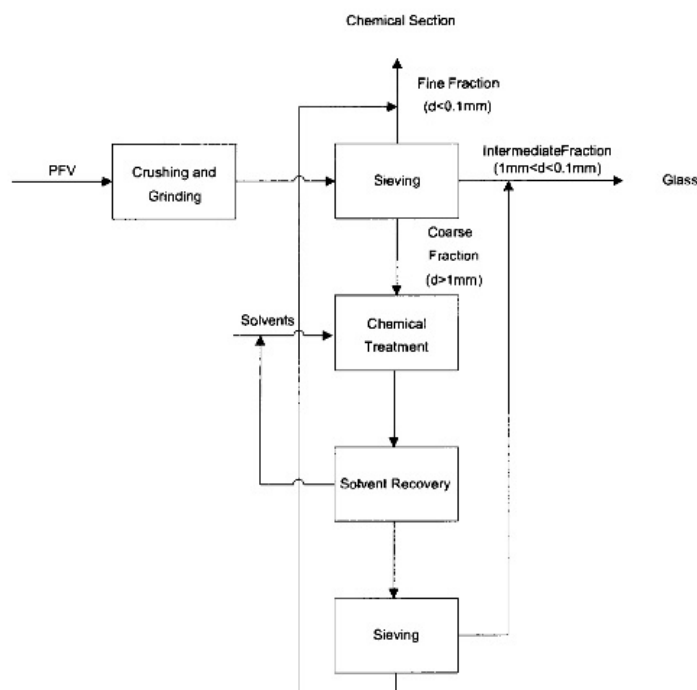
4.6 Μελέτη περίπτωσης διαχείρισης πάνελ από την Eco Recycling

Η Eco Recycling είναι μία εταιρεία ανακύκλωσης με βάση την Ρώμη στην Ιταλία. Η εν λόγω εταιρεία έχει αναπτύξει μία παντεταρισμένη μέθοδο η οποία είναι ικανή να επεξεργαστεί απόβλητα φωτοβολταϊκών πάνελ πρώτης και δεύτερης γενιάς. Η μέθοδος αυτή όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα αποτελείται από δύο στάδια, τις διεργασίες προεπεξεργασίας και τις διαδικασίες εξαγωγής και ανάκτησης. Η εν λόγω πατέντα υπ' αριθμόν EP2997169A1 περιγράφεται μαζί με τα συνοδευόμενα διαγράμματα παρακάτω.



Εικόνα 18: Γενική Διαδικασία Διαχωρισμού και επεξεργασίας απόβλητα PV πάνελ [88]

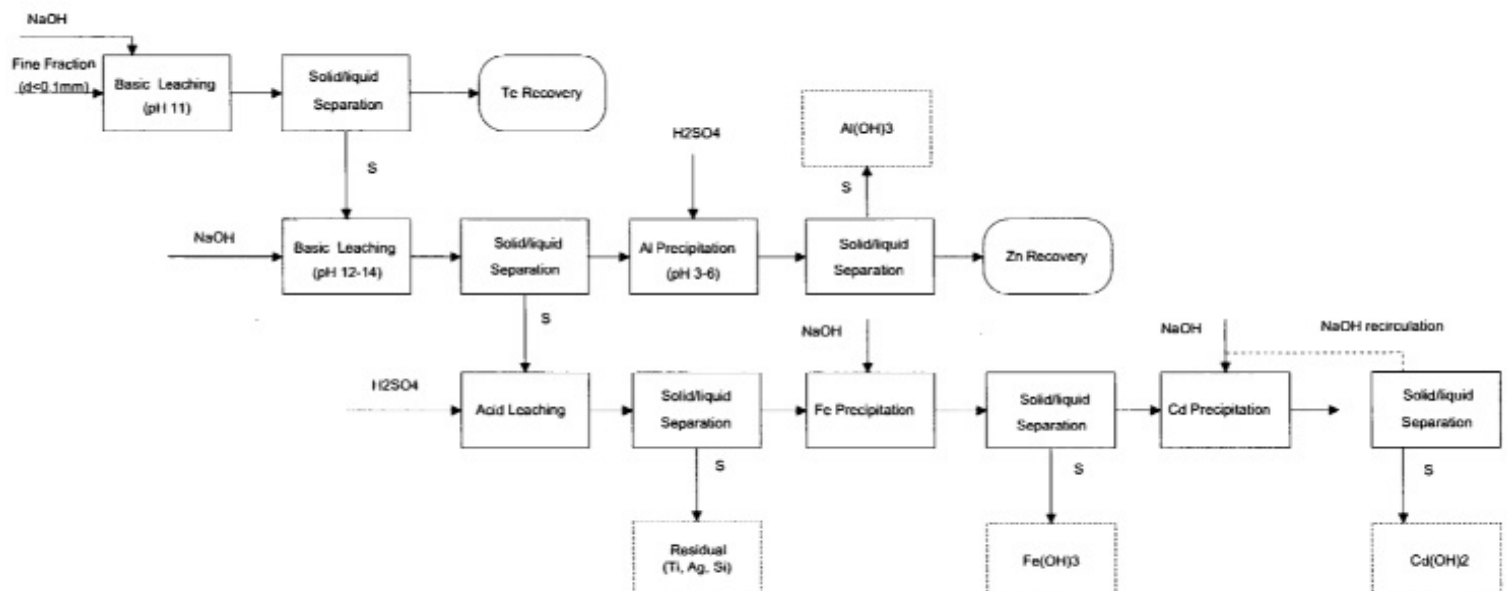
Στην παραπάνω πατέντας. Το πρώτο πάνελ (PFV), απεικονίζεται. Το πρώτο στάδιο εισέρχεται το οποίο μετά το τριτογενές ψευδάργυρος, αλ



ης συγκεκριμένης, τα φωτοβολταϊκά χωρίζονται σε δύο και από γυαλί. Στο 0.1mm κατά και είναι τελλούριο,

Εικόνα 19: Διάγραμμα διαδικασιών της προεπεξεργασίας [88]

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η σειρά των ενεργειών της προεπεξεργασίας. Το πρώτο βήμα είναι η σύνθλιψη και η άλεση των πάνελ (crushing and grinding). Η σύνθλιψη μειώνει το μέσο μέγεθος των κόκκων σε 2cm και η άλεση μετά από 0.1mm έως 1mm. Μετά την άλεση η ροή διαχωρίζεται μέσω κοσκινίσματος (sieving) σε τρία διακριτά μέρη. Η ροή με μέγεθος κόκκων από 0.1mm έως 1mm αποτελείται κυρίως από γυαλί, το οποίο μπορεί να ανακτηθεί άμεσα. Η ροή με μέγεθος κόκκων μικρότερης διαμέτρου από 0.1mm προωθείται στο στάδιο χημικής επεξεργασίας και ανάκτησης καθώς περιέχει μέταλλα και οξείδια μετάλλων. Η ροή με μέγεθος κόκκων μεγαλύτερο του 1mm λαμβάνει χημική επεξεργασία και επιπλέον κοσκίνισμα. Η τελευταία αποτελείται από γυαλί και το EVA και για το διαχωρισμό τους χρησιμοποιείται η πλύση της με μείγμα κυκλοεξανίου – ακετόνης σε αναλογία 70-30% (chemical treatment). Μετά την ανάκτηση του μείγματος των διαλυτικών (solvents) για κυκλική χρήση, η ροή περνά ξανά από διαδικασία κοσκινίσματος. Εκεί το γυαλί επανακτάται άμεσα ενώ οι υπόλοιπες ουσίες προωθούνται στο στάδιο χημικής επεξεργασίας (chemical section). Έτσι ολοκληρώνεται το στάδιο της προεπεξεργασίας όπου το μόνο υλικό που ανακτάται είναι το γυαλί ενώ όλες οι υπόλοιπες ουσίες θα πρέπει να επεξεργαστούν περαιτέρω μέσω χημικών



Εικόνα 20: Διάγραμμα διαδικασιών εξαγωγής και ανάκτησης [88]

Η διαδικασία εξαγωγής και ανάκτησης ξεκινά με την έκπλυση της ροής (basic leaching) με χρήση υδροξειδίου του νατρίου (NaOH) με βέλτιστο pH διαλύματος 11. Μετά το πέρας της έκπλυσης γίνεται διαχωρισμός στερεών/υγρών ($1^{\circ\text{C}}$). Μετά το διαχωρισμό το τελλούριο ανακτάται ενώ η εναπομένουσα στερεή ροή υπόκειται ξανά έκπλυση με χρήση NaOH υπό συνθήκες pH 12 έως 14. Έπειτα επέρχεται επιπλέον διαχωρισμός στερεών/υγρών ($2^{\circ\text{C}}$) και η ροή υλικών χωρίζεται σε στερεή (S) και υγρή. Όσον αφορά την υγρή ροή, με χρήση θειικού οξέος (H_2SO_4) το αλουμίνιο υφίσταται καθίζηση υπό συνθήκες pH 3 έως 6 και το μείγμα υπόκειται σε διαχωρισμό στερεών/υγρών ($3^{\circ\text{C}}$). Μετά το διαχωρισμό η στερεή ροή αποτελείται από υδροξείδιο του αλουμινίου ($\text{Al}(\text{OH})_3$) και η υγρή από ψευδάργυρο. Επιστρέφοντας στη στερεή ροή του $2^{\circ\text{C}}$ διαχωρισμού στερεών/υγρών με προσθήκη H_2SO_4 επέρχεται έκπλυση υπό όξινο περιβάλλον (acid leaching) και μετά ξανά διαχωρισμός ($4^{\circ\text{C}}$). Από τον τελευταίο διαχωρισμό η στερεή ροή είναι υπολειμματικές ποσότητες τιτανίου, άργυρου και πυριτίου. Ενώ η υγρή ροή με προσθήκη NaOH δίνει καθίζηση σιδήρου. Με έναν ακόμη διαχωρισμό ($5^{\circ\text{C}}$), ανακτάται ο σίδηρος σε στερεό υδροξείδιο του σιδήρου ($\text{Fe}(\text{OH})_3$). Ενώ στο υγρό μέρος του $5^{\circ\text{C}}$ διαχωρισμού με προσθήκη NaOH προκαλείται καθίζηση του καδμίου. Έπειτα από έναν τελευταίο διαχωρισμό στερεών/υγρών ($6^{\circ\text{C}}$) η στερεή ποσότητα ανακτάται ως υδροξείδιο του καδμίου ($\text{Cd}(\text{OH})_2$).

Συνολικά αυτή η μέθοδος παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Πρώτον παρέχει τη δυνατότητα να επεξεργαστούν ταυτόχρονα και με αυτό το αυτοματοποιημένο τρόπο τόσο πάνελ πυριτίου όσο και πάνελ CdTe . Δεύτερον είναι ικανή να πετύχει τους ελάχιστους στόχους ανάκτησης υλικών που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση [88]. Τρίτον αποφεύγει την θερμική επεξεργασία των πάνελ καθώς χρησιμοποιεί διαλυτικά όπως μείγμα κυκλοεξανίου ακετόνης. Βέβαια όπως φαίνεται είναι μία αρκετά απαιτητική μέθοδος από τεχνολογικής σκοπιάς και κάνει εκτεταμένη χρήση διαβρωτικών χημικών ουσιών.

Κεφάλαιο 5

Νομοθεσία και συμπεράσματα

5.1 Στρατηγικές και Νομοθετικά Πλαίσια για τη διαχείριση αποβλήτων ΗΗΕ

Στο παρόν κεφάλαιο θα καλυφθούν τα νομοθετικά πλαίσια και οι στρατηγικές που έχουν να κάνουν με τη διαχείριση των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Σε ηπειρωτικό επίπεδο η Ευρώπη φαίνεται πως είναι η πιο προχωρημένη σε θέματα νομοθεσίας. Οι οδηγίες WEEE και RoHS είναι τα κυριότερα νομοθετικά της πλαίσια. Η οδηγία WEEE αποτελεί ένα από τα πρώτα νομοθετικά πλαίσια παγκοσμίως καθώς τέθηκε σε ισχύ τον Φεβρουάριο του 2003. Επίσης είναι από τις πρώτες νομοθεσίες που αναγνώρισαν την πολυπλοκότητα των αποβλήτων ΗΗΕ, τις επιπτώσεις τους σε άνθρωπο και περιβάλλον και τις οικονομικές δυνατότητες τους. Η οδηγία καλύπτει όλα τα μέλη της Ε.Ε. και ως γενικούς στόχους θέτει:

- 1) την πρόληψη σε θέματα παραγωγής αποβλήτων,
- 2) την μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των διαθέσιμων πόρων που διατίθενται για διαδικασίες επισκευής ή ανακύκλωσης,
- 3) την βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης όλων των εμπλεκόμενων στον κύκλο ζωής του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού [89].

Για την εκπλήρωση αυτών των στόχων, η οδηγία WEEE δρα υπό τρεις βασικές κατευθυντήριες γραμμές:

- 1) απαιτείται η ξεχωριστή συλλογή και η πρόπουσα επεξεργασία αποβλήτων ΗΗΕ, ενώ θέτονται ποσοτικοί και ποιοτικοί στόχοι για τη συλλογή, την ανακύκλωση και την επανάκτηση υλικών,
- 2) παρέχεται βοήθεια στις ευρωπαϊκές χώρες να καταπολεμήσουν τις παράνομες εξαγωγές αποβλήτων ΗΗΕ,
- 3) παρέχεται βοήθεια στη μείωση του διοικητικού φορτίου και της γραφειοκρατίας καθώς γίνεται προσπάθεια εναρμόνισης των διεθνών βάσεων δεδομένων και τρόπου καταγραφής δεδομένων [89].

Ειδικότερα στη παράγραφο 1 του άρθρου 7 της πιο πρόσφατης έκδοσης της οδηγίας θέτονται οι στόχοι συλλογής αποβλήτων ΗΗΕ που τα κράτη μέλη πρέπει να πετυχαίνουν ετησίως. Οι στόχοι αυτοί για το 2019 και αργότερα ορίζονται ποσοτικά ως εξής: τα κράτη μέλη πρέπει να συλλέγουν ετησίως το 65% του συνολικού βάρους του ΗΗΕ που διοχετεύτηκε στην εγχώρια αγορά τα τελευταία τρία χρόνια ή να συλλέγουν ετησίως το 85% των συνολικών αποβλήτων ΗΗΕ που παράχθηκαν στη χώρα [20]. Τέλος, όπως ορίζεται ρητά και μέσα στο κείμενό της, η οδηγία WEEE βασίζεται στη διευρυμένη ευθύνη του παραγωγού (EPR). Σε πλήρη εναρμόνιση με την οδηγία WEEE είναι η ευρωπαϊκή οδηγία RoHS. Επί της ουσίας η οδηγία RoHS περιορίζει τη χρήση ορισμένων ουσιών σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα. Επί του

παρόντος οι ουσίες που απαγορεύονται είναι οι εξής:

- 1) Μόλυβδος,
- 2) Κάδμιο,
- 3) Υδράργυρος,
- 4) εξασθενές χρώμιο,
- 5) πολυβρωμιωμένα διφαινύλια (PBBs),
- 6) πολυβρωμιωμένοι διφαινυλαιθέρες (PBDEs),
- 7) δις (2-αιθυλεξυλ) φθαλικός εστέρας (DEHP),
- 8) φθαλικός βενζυλεστέρας (BBP),
- 9) φθαλικό διβουτύλιο (DBP),
- 10) φθαλικό διισοβουτύλιο (DIBP),

Η νομοθεσία επίσης ορίζει τις μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις των παραπάνω ουσιών, για το κάδμιο το όριο είναι 0.01% κατά βάρος ενώ για τις υπόλοιπες ουσίες το όριο ανέρχεται στο 0.1% κατά βάρος [20]. Επίσης η οδηγία ορίζει ρητά στο άρθρο 2, παράγραφος 4i, πως εξαιρούνται τα φωτοβολταϊκά πάνελ, διότι εκεί το κάδμιο έχει εκτεταμένη χρήση. Ο περιορισμός των παραπάνω ουσιών γίνεται με γνώμονα τις σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα προβλήματα ανθρώπινης υγείας που προκαλούνται, στα στάδια χρήσης, συλλογής, επεξεργασίας και απόρριψης των προϊόντων που τις περιέχουν.

Σε παγκόσμιο επίπεδο τα σημαντικότερα νομοθετικά πλαίσια που αφορούν τα ηλεκτρονικά απόβλητα είναι η Συνθήκη της Βασιλείας και η Απαγορευτική Τροπολογία της Βασιλείας. Η Συνθήκη της Βασιλείας (Basel Convention) είναι μια διεθνής συνθήκη που αφορά τον έλεγχο των διασυνοριακών μεταφορών επικίνδυνων αποβλήτων και τον έλεγχο της διάθεσης αυτών. Τέθηκε σε νομική ισχύ από τον Μάιο του 1992 και μέχρι στιγμής αριθμεί 187 συμμετέχουσες χώρες. Με την συμμετοχή τους τα μέλη αναλαμβάνουν τις εξής υποχρεώσεις: προσπάθεια μείωσης και ελαχιστοποίησης παραγωγής αποβλήτων στην πηγή, εγχώρια διαχείριση των αποβλήτων που παράγονται στα σύνορά τους, μείωση διασυνοριακών μεταφορών των επικίνδυνων αποβλήτων, διαχείριση αποβλήτων με περιβαλλοντικά υγιείς τρόπους και ισχυρό έλεγχο της εμπορίας αποβλήτων [90]. Όσον αφορά τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, αυτά αναγνωρίστηκαν ως μείζον πρόβλημα από την Συνθήκη της Βασιλείας τον Μάιο του 2002. Για τα συγκεκριμένα απόβλητα τέθηκαν επιπλέον στόχοι, τους οποίους οι συμμετέχουσες χώρες οφείλουν να κάνουν προσπάθεια να ικανοποιήσουν. Οι στόχοι αυτοί αφορούν κυρίως στην ανάπτυξη συστημάτων καταγραφής αποβλήτων και στην ανταλλαγή βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων μεταξύ χωρών [91]. Η Απαγορευτική Τροπολογία της Βασιλείας (Basel Ban Amendment) αφορά μια συμφωνία μεταξύ των μελών της αρχικής Συνθήκης της Βασιλείας, που απαγορεύει σε χώρες που είναι είτε μέλη του Οργανισμού Οικονομικής Ανάπτυξης και Συνεργασίας (Organisation for Economic Co-operation and Development – OECD) είτε μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και το Λιχτενστάιν να εξάγουν επικίνδυνα απόβλητα σε χώρες με αναπτυσσόμενη οικονομία ή με οικονομίες υπό μεταβατικό στάδιο [90]. Μεταξύ των επικίνδυνων αποβλήτων συμπεριλαμβάνονται και τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Ειδική μνεία αξίζει η Σύμβαση του Μπαμακό (Bamako Convention), μια συμφωνία μεταξύ χωρών της αφρικανικής ηπείρου. Μάλιστα στο άρθρο 11 της Σύμβασης της Βασιλείας ενθαρρύνεται η σύναψη επιπλέον υπό-συμφωνιών μεταξύ χωρών, προς την εκπλήρωση των στόχων της σύμβασης. Αφορμή στάθηκε ένα γεγονός το 1987, όπου δύο ιταλικές εταιρείες πλήρωσαν 100\$ ανά μήνα έναν αγρότη στη Νιγηρία για να αποθηκεύει 2.900 m³ επικίνδυνων αποβλήτων. Οι αιτίες βέβαια αφορούν την αδυναμία της Σύμβασης της Βασιλείας να απαγορεύει τις εξαγωγές των αποβλήτων από αναπτυγμένες χώρες προς χώρες με αναπτυσσόμενη οικονομία. Η Σύμβαση του Μπαμακό είναι πολύ αυστηρότερη από παρόμοια ρυθμιστικά πλαίσια ενώ ως στόχους ορίζει:

- 1) την απαγόρευση εισαγωγών παντός τύπου επικίνδυνων και ραδιενεργών αποβλήτων εντός της αφρικανικής ηπείρου για οποιοδήποτε λόγο,
- 2) την ελαχιστοποίηση και τον έλεγχο διασυνοριακών μεταφορών επικίνδυνων αποβλήτων εντός της ηπείρου,
- 3) την απαγόρευση απόρριψης αποβλήτων σε υδάτινες μάζες ή την αποτέφρωσή τους,
- 4) την παρότρυνση βιώσιμης παραγωγής ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών ρύπων,
- 5) την εδραίωση της προφυλακτικής αρχής σε θέματα προστασίας της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος [92].

Σε εθνικό επίπεδο οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχηματίζουν τις εθνικές τους νομοθεσίες σύμφωνα με τις οδηγίες WEEE και RoHS, ενώ οι αφρικανικές χώρες σύμφωνα με τη Σύμβαση του Μπαμακό. Έτσι μένει να εξεταστούν οι χώρες εκείνες που δεν ανήκουν σε τέτοιου είδους συνομοσπονδίες. Οι κυριότερες χώρες αυτές είναι η Κίνα και οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Τα νομοθετικά πλαίσια της Κίνας είναι σημαντικότερα διότι είναι παράλληλα ο μεγαλύτερος παραγωγός ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, ο μεγαλύτερος παραγωγός αποβλήτων και ο μεγαλύτερος αποδέκτης αυτών από άλλες χώρες. Τα νομοθετικά πλαίσια των ΗΠΑ είναι άξια αναφοράς καθώς είναι η χώρα με τη δεύτερη μεγαλύτερη παραγωγή αποβλήτων ΗΗΕ, δεν έχει επικυρώσει την Σύμβαση της Βασιλείας και δεν διαθέτει κεντρική νομοθεσία για αυτά τα απόβλητα. Στην Κίνα, οι βασικότερες νομοθεσίες είναι οι εξής:

- 1) Τεχνική Πολιτική για την Πρόληψη και την Καταπολέμηση της Ρύπανσης από απόβλητα ΗΗΕ, του 2006, βασισμένη στις αρχές «ο ρυπαίνων πληρώνει» και «μείωση-επαναχρησιμοποίηση-ανακύκλωση (3R)». Η νομοθεσία αυτή προωθεί τον οικολογικό σχεδιασμό των προϊόντων ενώ θέτει και προδιαγραφές για τα στάδια της συλλογής, μεταφοράς, επαναχρησιμοποίησης, διάθεσης και επεξεργασίας των αποβλήτων ΗΗΕ.
- 2) Διοικητικά Μέτρα για την Πρόληψη και τον Έλεγχο της Περιβαλλοντικής Ρύπανσης από απόβλητα ΗΗΕ, του 2008, με στόχο τον έλεγχο της μόλυνσης από τις διαδικασίες αποσυναρμολόγησης, ανακύκλωσης και απόρριψης μέσω σχετικών μελετών (environmental impact assessment – EIA).

- 3) Μέτρα για τον Έλεγχο της Ρύπανσης από Προϊόντα Ηλεκτρονικής Πληροφόρησης, του 2007. Η νομοθεσία είναι αντίστοιχη της ευρωπαϊκής οδηγίας RoHS. Περιορίζεται η χρήση έξι τοξικών και επικίνδυνων ουσιών και καθίσταται απαραίτητη η παράθεση πληροφοριών από τους παραγωγούς για τις χρήσεις επικίνδυνων υλικών.
- 4) Κανονισμοί για τις Κατεργασίες Ανάκτησης των αποβλήτων ΗΗΕ, του 2011. Σε αυτή τη νομοθεσία ενσωματώνεται η Αρχή της Διευρυμένης Ευθύνης του Παραγωγού, ενθαρρύνονται οι συνεργασίες μεταξύ σχετικών φορέων και ισχυροποιούνται οι πιστοποιήσεις επαναπώλησης μεταχειρισμένων προϊόντων [93].

5.2 Νομοθετικά πλαίσια για τη διαχείριση φωτοβολταϊκών αποβλήτων

Τα φωτοβολταϊκά απόβλητα, όπως έχει αποδειχθεί παραπάνω αποτελούν ένα ιδιαίτερο ρεύμα αποβλήτων. Διότι πέρα του όγκου της αποβληθείσας μονάδας και της πολυπλοκότητας της κατασκευής από την σκοπιά της ανακύκλωσης, τίθεται το θέμα της άρτιας ενεργειακής μετάβασης. Η ενεργειακή μετάβαση μπορεί να επιτευχθεί επιτυχώς δια μέσου της κυκλικής οικονομίας, καθώς δεν δύναται να γίνεται αύξουσα χρήση πάνελ με πεπερασμένο προσδόκιμο ζωής χωρίς παράλληλα ισχυρούς μηχανισμούς ανακύκλωσης και ανάκτησης υλικών. Από τα παραπάνω φαίνεται πως η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πρέπει να τύχει ειδικής νομοθετικής διαχείρισης.

Στην πραγματικότητα όμως τα υπάρχοντα νομοθετικά πλαίσια ανά τον κόσμο φαίνεται πως είναι περιορισμένα. Η αναθεωρημένη έκδοση της ευρωπαϊκής οδηγίας WEEE του 2012 ενσωμάτωσε ρητά την εκτεταμένη ευθύνη του παραγωγού (EPR) στους κατασκευαστές και πωλητές φωτοβολταϊκού εξοπλισμού, καθώς τους υποχρεώνει να πιστοποιούν τη συλλογή, μεταφορά και ανακύκλωση των PV και να εξασφαλίζουν την οικονομική επιβίωση των αντίστοιχων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων [94]. Ειδικότερα η οδηγία καλεί όλους τους εμπλεκόμενους να συμμορφωθούν με τρεις δυνατούς τρόπους:

- 1) Εγκαθίδρυση ιδιόκτητων εγκαταστάσεων ανακύκλωσης και μηχανισμών take-back, καθιέρωση συστημάτων καταγραφής και μηχανισμών χρηματοδότησης,
- 2) Συνεργασία με υπάρχοντα συστήματα συλλογής και επεξεργασίας φωτοβολταϊκών αποβλήτων,
- 3) Η ενσωμάτωση απορριπτόμενων φωτοβολταϊκών μονάδων σε άλλες υποδομές ΑΗΗΕ [95].

Βέβαια η κάθε χώρα μέλος προσδιορίζει με το δικό της τρόπο πως θα γίνεται η ανακύκλωση φωτοβολταϊκού εξοπλισμού.

Η περίπτωση της Γερμανίας

Τα κανονιστικά πλαίσια της Γερμανίας που αφορούν την διαχείριση φωτοβολταϊκών αποβλήτων είναι από τα πιο ανεπτυγμένα παγκοσμίως. Ο νόμος ElectroG που ασχολείται με τα απόβλητα ΗΗΕ, με την αναθεωρημένη έκδοσή του το 2015 θέτει νέες απαιτήσεις για τη συλλογή και ανακύκλωση των πάνελ. Ο οργανισμός Stiftung EAR, χρηματοδοτούμενος από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, είναι υπεύθυνος για:

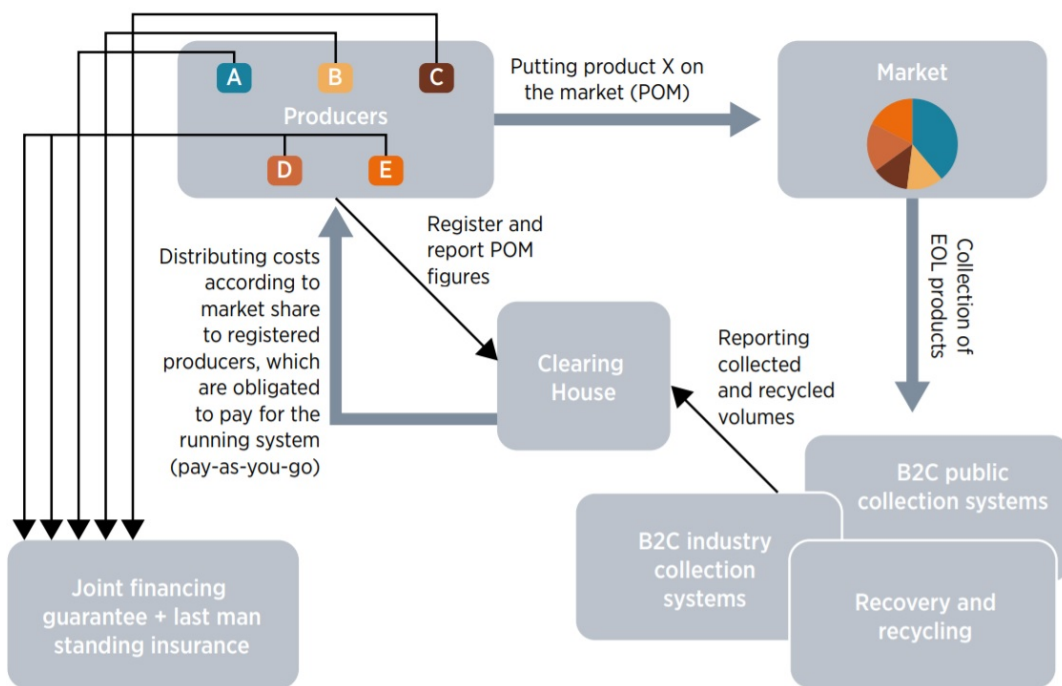
- 1) Την καταγραφή και τη διατήρηση μητρώων όλων των εμπλεκόμενων παραγωγών αποβλήτων ΗΗΕ στη Γερμανία,
- 2) Τη συλλογή δεδομένων που αφορούν τις ποσότητες αποβλήτων ΗΗΕ που διατέθηκαν στην εγχώρια αγορά ως προϊόντα,
- 3) Την ευθύνη προμήθειας container και υπηρεσιών παραλαβής αποβλήτων από δημοτικά σημεία απόρριψης,
- 4) Τη διασφάλιση πως όλοι οι εμπλεκόμενοι παραγωγοί αποβλήτων υπακούν στους κανονισμούς,
- 5) Την εξεύρεση εκείνων που παρανομούν και την αναφορά τους στο αρμόδιο υπουργείο [74].

Ο νόμος ElectroG αναγνωρίζει τη σημαντικότητα της διαρκούς χρηματοδότησης των εργασιών συλλογής και ανακύκλωσης PV αποβλήτων και θέτει κανονισμούς για τις B2C και B2B συναλλαγές. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο σχεδιασμός του ρυθμιστικού πλαισίου για τις συναλλαγές B2C, δηλαδή τις συναλλαγές μεταξύ παραγωγών-πωλητών και ιδιωτικών νοικοκυριών ή δομών με παρόμοια κατανάλωση. Οι παραγωγοί αποβλήτων καλούνται να καλύψουν κόστη σε δύο επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο αφορά τα κόστη συλλογής και ανακύκλωσης για πωληθέντα προϊόντα πριν την εφαρμογή της νομοθεσίας, κάτι σαν τέλη εγγραφής. Σε αυτό το επίπεδο τα κόστη υπολογίζονται από το μερίδιο αγοράς κάθε παραγωγού ή πωλητή. Το δεύτερο επίπεδο αφορά τα κόστη συλλογής και ανακύκλωσης για τα προϊόντα που θα πωληθούν μετά την εφαρμογή της νομοθεσίας. Σε αυτό το επίπεδο τα κόστη υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη μέση διάρκεια ζωής του εξοπλισμού, το ποσοστό συλλογής και τις απαιτήσεις της επεξεργασίας και των logistics και φυσικά την ποσότητα των πωληθέντων. Ο οργανισμός Stiftung EAR υπολογίζει πως αυτά τα κόστη, του δευτέρου επιπέδου, μπορούν να υπολογιστούν προσεγγιστικά με την παρακάτω αρχή:

Εξίσωση *SEQ Εξίσωση*ARABIC* **1:** υπολογισμός κόστους 2^{ου} επιπέδου (διασκευή) [74]

Ο όρος “PV panels put on market” αναφέρεται στη πωληθέντα ποσότητα φωτοβολταϊκού εξοπλισμού σε τόνους, ο όρος “return rate” στο ποσοστό συλλογής και ο όρος “disposal cost” στα έξοδα συλλογής, μεταφοράς και επεξεργασίας. Επίσης ο οργανισμός για το 2015 έθεσε αρχικές τιμές 30% στο ποσοστό συλλογής και 200 €/τόνο στα έξοδα συλλογής, μεταφοράς και επεξεργασίας [74]. Έτσι για παράδειγμα για πωληθείσα ποσότητα 500 τόνων το κόστος ανέρχεται άστις 30.000 €.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι ροές ευθυνών μεταξύ των εμπλεκόμενων για τις B2C αγοραπωλησίες φωτοβολταϊκού εξοπλισμού.



Εικόνα 21: Ροές ευθυνών για τη διαχείριση του τέλους ζωής των PV [74]

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνονται οι παραγωγοί αποβλήτων (producers), οι οποίοι προωθούν το προϊόν στην αγορά. Μετά το τέλος ζωής του εξοπλισμού (EoL), αυτό συλλέγεται δια μέσω συστημάτων συλλογής B2C ή B2B και έπειτα ανακυκλώνεται (Recovery and Recycling). Τόσο οι παραγωγοί όσο και τα συστήματα συλλογής και ανακύκλωσης φέρουν ευθύνη να δηλώνουν τις πωληθείσες, συλλεγμένες και ανακυκλωμένες ποσότητες στον υπεύθυνο οργανισμό, σε αυτή την περίπτωση τον Stiftung EAR. Μετά ο οργανισμός αναθέτει τα ανάλογα κόστη στους παραγωγούς (distributing costs...). Τέλος οι παραγωγοί δεσμεύονται για διαρκή οικονομική υποστήριξη του συστήματος και επίσης λειτουργούν βάση της λογικής last man standing insurance. Αυτή η λογική λειτουργίας επί της ουσίας προστατεύει το σύστημα ανακύκλωσης από τυχόν οικονομικές απώλειες. Δηλαδή αν ένας παραγωγός αποβλήτων για οποιοδήποτε λόγο αποχωρήσει από το σύστημα, οι υπόλοιποι παραγωγοί καλούνται να καλύψουν τις οικονομικές του ευθύνες.

Η περίπτωση του Ηνωμένου Βασιλείου

Καθώς το μερίδιο αγοράς που κατέχουν τα φωτοβολταϊκά στην εγχώρια αγορά είναι μικρό, τα κανονιστικά πλαίσια που αφορούν την ανακύκλωση υιοθετήθηκαν με την ενσωμάτωση της οδηγίας WEEE. Πριν την οδηγία βέβαια υπήρχαν ορισμένες ιδιωτικές πρωτοβουλίες συλλογής και ανακύκλωσης όπως ο οργανισμός PV Cycle. Η νομοθεσία του Ηνωμένου Βασιλείου που αφορά την ανακύκλωση των πάνελ κινείται σε τέσσερις άξονες. Πρώτον ορίζονται οι παραγωγοί φωτοβολταϊκών αποβλήτων. Βάσει της νομοθεσίας παραγωγοί δύναται να είναι:

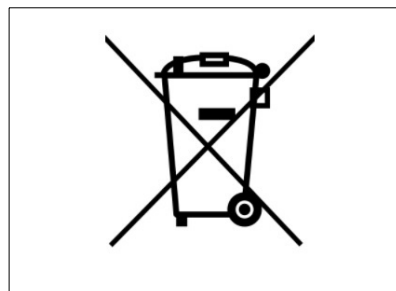
- 1) Παραγωγός PV εξοπλισμού με έδρα το Η. Β. που πουλάει τη δική του μάρκα εξοπλισμού,
- 2) Εισαγωγέας PV εξοπλισμού που εισάγει στην αγορά του Η. Β.,

- 3) Επιχείρηση που μεταπωλεί PV εξοπλισμό, παραγόμενο ή εισαγόμενο από τρίτο, με την δική της μάρκα.

Δεύτερον οι παραγωγοί αποβλήτων υποχρεούνται να συνάπτουν συμβάσεις συνεργασίας με μηχανισμούς συλλογής και ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών. Επιπλέον οφείλουν να διατηρούν στοιχεία πωλήσεων όπως για παράδειγμα ποσότητες και πελατολόγιο (B2B ή B2C). Τρίτον όσον αφορά τα θέματα οικονομικής υποστήριξης της συλλογής και ανακύκλωσης οι παραγωγοί έχουν τις εξής υποχρεώσεις:

- 1) Οι παραγωγοί οφείλουν να υποστηρίζουν οικονομικά τη συλλογή και επεξεργασία των οικιακών (B2C) πάνελ σύμφωνα με το μερίδιο της αγοράς που κατέχουν ανά χρόνο. Για παράδειγμα αν ένας παραγωγός μια συγκεκριμένη χρονιά κατέχει το 10% της εγχώριας αγοράς, καλείται να πληρώσει τα έξοδα συλλογής και ανακύκλωσης των 10% των πάνελ που θα συλλεχθούν την επόμενη, αγνοώντας τότε αυτά εισήχθησαν στην αγορά [74].
- 2) Οι παραγωγοί, όσον αφορά τα πάνελ επαγγελματικής χρήσης (B2B), οφείλουν να αναλαμβάνουν τη συλλογή και ανακύκλωση του εξοπλισμού που φέρει το σήμα του τροχήλατου κάδου (εικόνα 20) ή του εξοπλισμού που δεν το φέρει αλλά πρόκειται να αντικατασταθεί άμεσα με νέο εξοπλισμό [74].

Τέταρτον υποχρεώνει τις επιχειρήσεις που ασχολούνται με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκού εξοπλισμού να συμμετέχουν απεγκατάστασης και συλλογής. Όσον αφορά τις διαδικασίες επεξεργασίας και ανακύκλωσης, που είναι διαθέσιμες στο Ηνωμένο Βασίλειο, είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο και αφορούν μηχανικές κατεργασίες διαχωρισμού, όπως είδαμε στο 4.4. Οι πολυπλοκότερες διαδικασίες στη συντριπτική τους πλειοψηφία λαμβάνουν χώρα στο εξωτερικό, καθώς ακόμη δεν έχουν επιτευχθεί οικονομίες κλίμακας [74].



Εικόνα 22: Σύμβολο τροχήλατου κάδου [96]

Η περίπτωση των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής

Οι ΗΠΑ δεν έχουν κεντρική νομοθεσία για τα φωτοβολταϊκά απόβλητα, έτσι σε εθνικό επίπεδο ισχύει μόνο ο νόμος Διατήρησης και Ανάκτησης Πόρων (Resource Conservation and Recovery Act – RCRA) του 1976. Ο εν λόγω νόμος δεν περιλαμβάνει ειδικές διατάξεις για τα πάνελ, παρά μόνο τον χαρακτηρισμό ως επικίνδυνα απόβλητα. Ορισμένες πολιτείες καταβάλουν προσπάθεια για υιοθέτηση δική τους νομοθεσίας, αλλά ακόμα βρίσκονται σε πρώιμα στάδια. Η πολιτεία της Καλιφόρνια με το νόμο SB 489 του 2014 προσπαθεί να αλλάξει

τον χαρακτηρισμό των φωτοβολταϊκών αποβλήτων από επικίνδυνα σε γενικού ενδιαφέροντος και να επιτρέψει έτσι την επεξεργασία τους. Για να γίνει αυτό όμως πρέπει η νομοθεσία να επιτραπεί από την ΕΡΑ, τον ομοσπονδιακό οργανισμό προστασίας του περιβάλλοντος των ΗΠΑ, κάτι ακόμα που είναι υπό εξέλιξη[97]. Η πολιτεία της Ουάσιγκτον βρίσκεται σε πιο προχωρημένο στάδιο με το νόμο SB 5939. Η εν λόγω νομοθεσία απαιτεί από τους παραγωγούς φωτοβολταϊκού εξοπλισμού που εισάγουν στην πολιτεία προϊόντα να υποστηρίζουν οικονομικά προγράμματα συλλογής και επεξεργασίας. Από τις αρχές του 2021, οι παραγωγοί που δεν συμμορφώνονται θα αποτρέπονται από το να πουλάνε εντός της πολιτείας [97]. Μέχρι στιγμής η συλλογή και επεξεργασία PV πάνελ βασίζεται στην ιδιωτική και μόνο πρωτοβουλία. Παράδειγμα αυτού αποτελεί η εταιρεία First Solar, η οποία παρέχει υπηρεσίες ανακύκλωσης πάνελ τύπου CdTe για τους πελάτες της. Άλλο παράδειγμα ιδιωτικής πρωτοβουλίας αποτελούν οι ενέργειες του Σωματίου Βιομηχανιών Ηλιακής Ενέργειας (Solar Energy Industries Association – SEIA). Το SEIA από το Σεπτέμβριο του 2016 μέσω ενός προγράμματος παρέχει οδηγίες και βοήθεια στους κάτοχους πάνελ για ανεύρεση βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων. Επίσης επενδύει στην έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών και προωθεί την απαγόρευση απόρριψης τους σε χωματερές [97].

Η περίπτωση της Κίνας

Η Κίνα με το νόμο περί Ανακύκλωσης Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού του 2011 απαιτεί την ξεχωριστή συλλογή και επεξεργασία των αποβλήτων ΗΗΕ μέσω συγκεντρωτικού μηχανισμού. Παρόλα αυτά τα φωτοβολταϊκά απόβλητα δεν περιλαμβάνονται ακόμη στα απόβλητα ΗΗΕ. Λόγω του χαμηλού όγκου PV αποβλήτων έως τώρα, η χώρα δεν έχει ώριμη βιομηχανία ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών πάνελ [74]. Βέβαια η κυβέρνηση έχει επενδύσει στην έρευνα και ανάπτυξη ορισμένων τεχνολογιών κυρίως μηχανικού και θερμικού χαρακτήρα. Επίσης στην 13^η συνέλευση του Υπουργείου Περιβάλλοντος της χώρας τέθηκε πενταετές σχέδιο για την περίοδο 2016-2020, κατά το οποίο δόθηκαν οδηγίες για την επιτάχυνση της βελτιστοποίησης των μηχανισμών ανακύκλωσης φωτοβολταϊκών [97].

5.3 Συμπεράσματα

Στη σύγχρονη εποχή ο ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας. Όμως η ταχύτατη ανάπτυξη της τεχνολογίας και οι διαρκώς εξελισσόμενες καταναλωτικές προτιμήσεις συντρέχουν στις αυξανόμενες ποσότητες ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών αποβλήτων. Τα απόβλητα αυτά αποτελούν μείζον πρόβλημα για όλο τον κόσμο μέσω της περιβαλλοντικής μόλυνσης που προκαλούν, όταν αφήνονται ανεξέλεγκτα. Για την προάσπιση του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας αλλά και την εξοικονόμηση πόρων η ανακύκλωση φαίνεται πως είναι ένας ισχυρός σύμμαχος. Παρόλο που η έννοια της ανακύκλωσης των e-waste δεν είναι κάτι καινούριο, η παγκόσμια κοινότητα απέχει πολύ από την άρτια πραγμάτωσή της. Σημαντικά εμπόδια εμφανίζονται τόσο στη συλλογή όσο και στην επεξεργασία. Όσον αφορά τη συλλογή θα πρέπει να γίνουν ορισμένες

βελτιώσεις. Η ευαισθητοποίηση του καταναλωτικού κοινού και η παροχή επιπλέον διευκολύνσεων για την απόρριψη των αποβλήτων σε ειδικά σημεία είναι μερικά από αυτά. Η συνεργασία με τους άτυπους συλλέκτες και μεταφορείς, όπως οι γυρολόγοι, μπορεί να αποδειχθεί πολύτιμη. Για το στάδιο της επεξεργασίας χρειάζεται επιπλέον έρευνα για ανάπτυξη βέλτιστων τεχνολογιών, τόσο από περιβαλλοντικής άποψης όσο και από την σκοπιά ανάκτησης πολύτιμων υλικών. Ενώ οι υπάρχουσες μηχανικές μέθοδοι αρχικού διαχωρισμού (χειρωνακτική αποσυναρμολόγηση, τεμαχισμός, μαγνητικός και επαγωγικός διαχωρισμός κτλ.) είναι αξιόλογες, οι τεχνολογίες ανάκτησης υλικών απέχουν από τον χαρακτηρισμό περιβαλλοντικά βέλτιστες. Οι θερμικού χαρακτήρα (πυρομεταλλουργικές) είναι ενεργοβόρες και εκλύουν βλαβερούς αέριους ρύπους, οι χημικού χαρακτήρα (υδρομεταλλουργικές), παρόλο που παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά ανάκτησης, παράγουν μεγάλες ποσότητες τοξικών χημικών. Οι βιολογικού χαρακτήρα (βιομεταλλουργικές) διαδικασίες φαίνονται υποσχόμενες αλλά χρήζουν περαιτέρω έρευνας και βελτίωσης. Άλλο ένα θέμα είναι η ισχυροποίηση της νομοθεσίας. Χωρίς τα κατάλληλα ρυθμιστικά πλαίσια η σωστή διαχείριση των αποβλήτων δεν μπορεί να επιτευχθεί. Ο έλεγχος των εισαγωγών και των εξαγωγών από τα λιμάνια, ο νομικός διαχωρισμός των λειτουργικών μεταχειρισμένων προϊόντων από τα απόβλητα και η αυστηροποίηση των ποινών για τους παραβάτες αποτελούν σημαντικά βήματα. Επιπλέον αναγκαία είναι η καταγραφή δεδομένων για τις ροές των αποβλήτων και των υλικών. Χωρίς πλήρη δεδομένα η συνολική κατάσταση δεν αποτυπώνεται σωστά, κάτι το οποίο αποτελεί τροχοπέδη για την πραγματική αποτύπωση της κατάστασης σε οποιοδήποτε στάδιο. Η ενίσχυση των μηχανισμών συλλογής, η βελτίωση των τεχνολογιών ανακύκλωσης και η εκτενής καταγραφή σχετικών δεδομένων μπορούν να συμβάλλουν σημαντικότερα στην δημιουργία οικονομιών κλίμακας του τομέα της ανακύκλωσης αποβλήτων ΗΗΕ, κάτι το οποίο θα αποφέρει επιπλέον οικονομικό και περιβαλλοντικό όφελος. Για την ολιστική διαχείριση ενός προβλήματος η πρόληψη είναι εξίσου σημαντική με την αντιμετώπιση. Η πρόληψη αφορά στην ευθύνη του παραγωγού και υπάρχουν ορισμένες ενέργειες που σχετίζονται με αυτή. Κατά τα στάδια ανάπτυξης ενός προϊόντος είναι σημαντικό να γίνεται η εκτίμηση του κύκλου ζωής του, όπως επίσης είναι σημαντικό να μελετάται η ανακυκλωσιμότητά του. Τέλος προεξέχουσας σημασίας είναι η επέκταση της διάρκειας ζωής των προϊόντων είτε μέσω αλλαγών στην παραγωγή είτε μέσω βελτίωσης της παροχής υπηρεσιών επισκευής. Τα επόμενα χρονιά το δυσκολότερο πρόβλημα που θα κληθεί να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα είναι η περιβαλλοντική μόλυνση, η κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις τους. Η λύση χαρακτηρίζεται από τρομερή πολυπλοκότητα αλλά ένα πράγμα είναι σίγουρο: η ανακύκλωση ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της.

Βιβλιογραφία

- ADDIN Mendeley Bibliography CSL_BIBLIOGRAPHY [1] T. H. E. E. Parliament, T. H. E. Council, O. F. The, and E. Union, "Directive 2011/7/EU of the European Parliament and of the Council," *Fundam. Texts Eur. Priv. Law*, no. June, pp. 38–71, 2020, doi: 10.5040/9781782258674.0030.
- [2] E. K. K. T. E. ΕΥΡΩΠΑΙΚΟ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟ, "Οδηγία 2008/98/Εκ Του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου Και Του Συμβουλίου," 22.11.2008, p. 28, 2008, [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=EN>.
- [3] V. Forti, C. P. Baldé, R. Kuehr, and G. Bel, *The Global E-waste Monitor 2020*, no. July. 2020.
- [4] "Ποιες ηλεκτρικές συσκευές ανακυκλώνω | Electrocycle.gr." <https://www.electrocycle.gr/what> (accessed Mar. 24, 2021).
- [5] "• Smartphone users 2020 | Statista." <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/> (accessed Mar. 24, 2021).
- [6] R. Rautela, S. Arya, S. Vishwakarma, J. Lee, K.-H. Kim, and S. Kumar, "E-waste management and its effects on the environment and human health," *Sci. Total Environ.*, vol. 773, p. 145623, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145623.
- [7] K. Zhang, J. L. Schnoor, and E. Y. Zeng, "E-waste recycling: Where does it go from here?," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 20, pp. 10861–10867, 2012, doi: 10.1021/es303166s.
- [8] "Lead: Past, Present, and Future | Electronic Design." <https://www.electronicdesign.com/industrial-automation/article/21121514/lead-past-present-and-future> (accessed Apr. 07, 2021).
- [9] V. J. Brown, "Electronics, lead, and landfills," *Environmental Health Perspectives*, vol. 112, no. 13. National Institute of Environmental Health Sciences, p. A734, Sep. 2004, doi: 10.1289/ehp.112-a734.
- [10] A. Pascale *et al.*, "E-Waste Informal Recycling: An Emerging Source of Lead Exposure in South America," *Ann. Glob. Heal.*, vol. 82, no. 1, pp. 197–201, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.aogh.2016.01.016.
- [11] X. Zeng, X. Xu, X. Zheng, T. Reponen, A. Chen, and X. Huo, "Heavy metals in PM_{2.5} and in blood, and children's respiratory symptoms and asthma from an e-waste recycling area," *Environ. Pollut.*, vol. 210, pp. 346–353, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.envpol.2016.01.025.
- [12] "Lead poisoning - Symptoms and causes - Mayo Clinic." <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/lead-poisoning/symptoms-causes/syc-20354717> (accessed Apr. 07, 2021).
- [13] "5 Hard Facts About Lead in E-waste – ERI." <https://eridirect.com/blog/2016/02/5-hard-facts-about-lead-in-e-waste/> (accessed Apr. 07, 2021).

- [14] EUR-Lex, "Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC," *Off. J. Eur. Union*, vol. L 266, no. September 2006, pp. 1–14, 2006.
- [15] "Cadmium (Cd) - Chemical properties, Health and Environmental effects." <https://www.lenntech.com/periodic/elements/cd.htm#ixzz1MpuZHWfr> (accessed Apr. 08, 2021).
- [16] "Fire Security." <https://www.firesecurity.gr/bibliothiki/pyran12167.htm> (accessed Apr. 09, 2021).
- [17] A. M. Scheuhammer, M. W. Meyer, M. B. Sandheinrich, and M. W. Murray, "Effects of Environmental Methylmercury on the Health of Wild Birds, Mammals, and Fish," [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[12:EOEMOT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[12:EOEMOT]2.0.CO;2), vol. 36, no. 1, pp. 12–19, Feb. 2007, doi: 10.1579/0044-7447(2007)36[12:EOEMOT]2.0.CO;2.
- [18] Y. S. Hong, Y. M. Kim, and K. E. Lee, "Methylmercury exposure and health effects," *J. Prev. Med. Public Heal.*, vol. 45, no. 6, pp. 353–363, Nov. 2012, doi: 10.3961/jpmph.2012.45.6.353.
- [19] J. T. Salonen *et al.*, "Intake of mercury from fish, lipid peroxidation, and the risk of myocardial infarction and coronary, cardiovascular, and any death in Eastern Finnish men," *Circulation*, vol. 91, no. 3, pp. 645–655, Feb. 1995, doi: 10.1161/01.CIR.91.3.645.
- [20] T. H. E. E. Parliament, T. H. E. Council, O. F. The, and E. Union, "Directive 2011/83/EU of the European Parliament and of the Council," *Fundam. Texts Eur. Priv. Law*, pp. 88–110, 2020, doi: 10.5040/9781782258674.0031.
- [21] "Gallium arsenide solar cell | photovoltaic device | Britannica." <https://www.britannica.com/technology/gallium-arsenide-solar-cell> (accessed Apr. 10, 2021).
- [22] J. Yang *et al.*, "Arsenic burden in e-waste recycling workers – A cross-sectional study at the Agbogbloshie e-waste recycling site, Ghana," *Chemosphere*, vol. 261, p. 127712, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127712.
- [23] C. Hanisch, J. Diekmann, A. Stieger, W. Haselrieder, and A. Kwade, "Recycling of Lithium-Ion Batteries," in *Handbook of Clean Energy Systems*, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2015, pp. 1–24.
- [24] J. H. Osborne, "Observations on chromate conversion coatings from a sol-gel perspective," *Prog. Org. Coatings*, vol. 41, no. 4, pp. 280–286, May 2001, doi: 10.1016/S0300-9440(01)00143-6.
- [25] "1910.1026 - Chromium (VI) | Occupational Safety and Health Administration." <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1026> (accessed Apr. 12, 2021).
- [26] "Electroceraamics | Britannica." <https://www.britannica.com/technology/electroceraamics> (accessed Apr. 12, 2021).
- [27] "χρόνια βηρυλλίωση - Ασφάλεια και υγεία στην εργασία - EU-OSHA." <https://osha.europa.eu/el/tools-and-resources/eu-osha-thesaurus/term/70020i> (accessed Apr. 12, 2021).

- [28] N. G. M. L. US Department of Commerce, "NOAA Global Monitoring Laboratory - Halocarbons and other Atmospheric Trace Species."
- [29] "The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer | Ozone Secretariat." <https://ozone.unep.org/treaties/montreal-protocol> (accessed Apr. 17, 2021).
- [30] D. J. Wuebbles, "Ozone Depletion and Related Topics: Ozone Depletion Potentials," in *Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Second Edition*, Elsevier Inc., 2015, pp. 364–369.
- [31] M. M. Hurwitz *et al.*, "Ozone depletion by hydrofluorocarbons," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 42, no. 20, pp. 8686–8692, Oct. 2015, doi: 10.1002/2015GL065856.
- [32] "(No Title)." https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%28Feb%2016%29_1.pdf (accessed Apr. 18, 2021).
- [33] "Emissions of several ozone-depleting chemicals are larger than expected | MIT News | Massachusetts Institute of Technology." <https://news.mit.edu/2020/emissions-ozone-cfc-chemicals-0317> (accessed Apr. 20, 2021).
- [34] K. W. Bock and C. Köhle, "Ah receptor: Dioxin-mediated toxic responses as hints to deregulated physiologic functions," *Biochemical Pharmacology*, vol. 72, no. 4. Elsevier Inc., pp. 393–404, Aug. 14, 2006, doi: 10.1016/j.bcp.2006.01.017.
- [35] R. Proshad, T. Kormoker, M. S. Islam, M. A. Haque, M. M. Rahman, and M. M. R. Mithu, "Toxic effects of plastic on human health and environment : A consequences of health risk assessment in Bangladesh," *Int. J. Heal.*, vol. 6, no. 1, p. 1, 2017, doi: 10.14419/ijh.v6i1.8655.
- [36] S. Herat, "Environmental impacts and use of brominated flame retardants in electrical and electronic equipment," *Environmentalist*, vol. 28, no. 4. pp. 348–357, Dec. 2008, doi: 10.1007/s10669-007-9144-2.
- [37] K. Boswell, "Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) Action Plan Summary | Existing Chemicals | OPPT | US EPA."
- [38] "The Complete E-Waste Recycling Process | RTSThe complete e-waste recycling process - Recycle Track Systems." <https://www.rts.com/blog/the-complete-e-waste-recycling-process/> (accessed Oct. 07, 2021).
- [39] "Επικοινωνία με συστήματα – EOAN." <https://www.eoan.gr/εναλλακτική-διαχείριση/επικοινωνία-με-συστήματα/> (accessed Oct. 07, 2021).
- [40] B. Ádám *et al.*, "From inequitable to sustainable e-waste processing for reduction of impact on human health and the environment," *Environ. Res.*, vol. 194, p. 110728, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.envres.2021.110728.
- [41] "Περιγραφή επεξεργασίας ΑΗΗΕ | Electrocycle.gr." <https://www.electrocycle.gr/basic-page/5850/perigrifi-epexergasias-aiie> (accessed Oct. 08, 2021).
- [42] "Repurposing E-Waste: How to Be Sustainable, Make a Social Impact, and Save Money." <https://www.linkedin.com/pulse/repurposing-e-waste-how-sustainable-make-social-impact-adam-sharma> (accessed Oct. 08, 2021).
- [43] M. Opalić, M. Kljajin, and K. Vučković, "Disassembly layout in WEEE recycling process," *Strojarstvo*, vol. 52, no. 1, pp. 51–58, 2010.

- [44] S. Chatterjee and K. Kumar, "Effective electronic waste management and recycling process involving formal and non-formal sectors," *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 4, no. 13, pp. 893–905, 2009.
- [45] "ADuro QZ shredder." <https://www.andritz.com/products-en/group/recycling/aduro-qz-shredder> (accessed Oct. 12, 2021).
- [46] Σ. Τ. Εφαρμογών, "Πτυχιακή εργασία μεθοδοι διαχειριση και ανακυκλωση ηλεκτρικου και ηλεκτρονικου εξοπλισμου."
- [47] A. Marra, A. Cesaro, and V. Belgiorno, "Separation efficiency of valuable and critical metals in WEEE mechanical treatments," *J. Clean. Prod.*, vol. 186, pp. 490–498, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.112.
- [48] J. Cui and E. Forssberg, "Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review," *J. Hazard. Mater.*, vol. 99, no. 3, pp. 243–263, May 2003, doi: 10.1016/S0304-3894(03)00061-X.
- [49] "Electronic Waste (e-Scrap) Recycling Equipment - Precious Metal Recovery." <https://vdrs.com/electronics-recycling/> (accessed Oct. 14, 2021).
- [50] "Govani Shredder -Alibaba.com." https://gyws.en.alibaba.com/product/1600425223729-828571382/Double_shaft_scrap_copper_wire_chain_industrial_aluminum_cans_car_scrap_iron_metal_shredder_machine_for_sale.html?spm=a2700.shop_plgr.41413.9.77757b89UhwOmp (accessed Jan. 24, 2022).
- [51] "Magnetic Separators — IMSC Group." <https://www.imsc-group.com/blog/2019/1/5/the-attraction-of-rare-earth-magnetic-separators> (accessed Jan. 24, 2022).
- [52] "Recycling machines." <https://www.andritz.com/products-en/recycling/recycling/machines> (accessed Oct. 15, 2021).
- [53] "ADuro G shredder." <https://www.andritz.com/products-en/recycling/recycling/aduro-g> (accessed Jan. 24, 2022).
- [54] "Single Drum Separator - Bulk Handling Systems." <https://bulkhandlingsystems.com/wp/galleries/single-drum-separator/> (accessed Jan. 24, 2022).
- [55] Y. R. Smith, J. R. Nagel, and R. K. Rajamani, "Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review," *Miner. Eng.*, vol. 133, pp. 149–159, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.MINENG.2018.12.025.
- [56] E. R. Rene *et al.*, "Electronic waste generation, recycling and resource recovery: Technological perspectives and trends," *J. Hazard. Mater.*, vol. 416, p. 125664, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.125664.
- [57] S. Ramanayaka, S. Keerthanan, and M. Vithanage, "Urban mining of E-waste: treasure hunting for precious nanometals," *Handb. Electron. Waste Manag. Int. Best Pract. Case Stud.*, pp. 19–54, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-817030-4.00023-1.
- [58] R. Rautela, S. Arya, S. Vishwakarma, J. Lee, K. H. Kim, and S. Kumar, "E-waste management and its effects on the environment and human health," *Science of the Total Environment*, vol. 773. Elsevier BV, p. 145623, Jun. 15, 2021, doi:

10.1016/j.scitotenv.2021.145623.

- [59] C. D. Tran and S. P. Salhofer, "Processes in informal end-processing of e-waste generated from personal computers in Vietnam," *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2017 202 , vol. 20, no. 2, pp. 1154–1178, Nov. 2017, doi: 10.1007/S10163-017-0678-1.
- [60] R. Akram *et al.*, "Trends of electronic waste pollution and its impact on the global environment and ecosystem," *Environmental Science and Pollution Research* , vol. 26, no. 17. Springer Verlag, pp. 16923–16938, Jun. 01, 2019, doi: 10.1007/s11356-019-04998-2.
- [61] "THE 17 GOALS | Sustainable Development." <https://sdgs.un.org/goals> (accessed Oct. 18, 2021).
- [62] C. P. Balde, V. Forti, V. Gray, R. Kuehr, and P. Stegmann, *The global e-waste monitor 2017*. 2017.
- [63] "• Global e-waste generation outlook 2030 | Statista." <https://www.statista.com/statistics/1067081/generation-electronic-waste-globally-forecast/> (accessed Jan. 24, 2022).
- [64] Z. Wen, Y. Xie, M. Chen, and C. D. Dinga, "China's plastic import ban increases prospects of environmental impact mitigation of plastic waste trade flow worldwide," *Nat. Commun.* 2021 121 , vol. 12, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2021, doi: 10.1038/s41467-020-20741-9.
- [65] S. Arya and S. Kumar, "E-waste in India at a glance: Current trends, regulations, challenges and management strategies," *J. Clean. Prod.* , vol. 271, p. 122707, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.122707.
- [66] L. Andeobu, S. Wibowo, and S. Grandhi, "An assessment of e-waste generation and environmental management of selected countries in Africa, Europe and North America: A systematic review," *Sci. Total Environ.* , vol. 792, p. 148078, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.148078.
- [67] IEA, "Snapshot of Global PV Markets 2014," *Www.Iea-Pvps.Org*, pp. 1–16, 2015, [Online]. Available: http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/PVPS_report_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2014.pdf.
- [68] "• Global cumulative installed solar PV capacity 2020 | Statista." <https://www.statista.com/statistics/280220/global-cumulative-installed-solar-pv-capacity/> (accessed Jan. 25, 2022).
- [69] M. S. Chowdhury *et al.*, "An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling," *Energy Strategy Reviews* , vol. 27. Elsevier Ltd, p. 100431, Jan. 01, 2020, doi: 10.1016/j.esr.2019.100431.
- [70] "Solar Panel Construction — Clean Energy Reviews." <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction> (accessed Nov. 10, 2021).
- [71] T. Maani, I. Celik, M. J. Heben, R. J. Ellingson, and D. Apul, "Environmental impacts of recycling crystalline silicon (c-Si) and cadmium telluride (CDTE) solar panels," *Sci. Total Environ.* , vol. 735, p. 138827, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.138827.
- [72] "CIGS, CIS, CdTe - CleanEnergyWIKI." http://cleanenergywiki.org/index.php?title=CIGS,_CIS,_CdTe (accessed Jan. 25, 2022).

- [73] "Copper Indium Gallium Diselenide Solar Cells | Photovoltaic Research | NREL." <https://www.nrel.gov/pv/copper-indium-gallium-diselenide-solar-cells.html> (accessed Jan. 25, 2022).
- [74] S. Weckend, A. Wade, and G. Heath, *End of Life Management Solar PV Panels* . 2016.
- [75] A. Vekony, "Recycling: A Solar Panel's Life after Death | GreenMatch," *Greenmatch*, 2021. <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling> (accessed Oct. 26, 2021).
- [76] "Wet Leakage Current testing, solar specialized laboratory tests." <https://sinovoltaics.com/wet-leakage-current-testing/> (accessed Oct. 27, 2021).
- [77] "Flash Test - Flash Testing Electrical Safety Equipment." <https://www.flashtesting.co.uk/> (accessed Oct. 27, 2021).
- [78] "Decanter centrifuge - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Decanter_centrifuge (accessed Nov. 02, 2021).
- [79] M. M. Lunardi, J. P. Alvarez-Gaitan, and J. I. B. and R. Corkish, "A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules," *Sol. Panels Photovolt. Mater.*, Feb. 2018, doi: 10.5772/INTECHOPEN.74390.
- [80] T. Y. Wang, J. C. Hsiao, and C. H. Du, "Recycling of materials from silicon base solar cell module," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 2355–2358, 2012, doi: 10.1109/PVSC.2012.6318071.
- [81] E. Klugmann-Radziemska, P. Ostrowski, K. Drabczyk, P. Panek, and M. Szkodo, "Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 12, pp. 2275–2282, Dec. 2010, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2010.07.025.
- [82] Y. Xu, J. Li, Q. Tan, A. L. Peters, and C. Yang, "Global status of recycling waste solar panels: A review," *Waste Management*, vol. 75. Elsevier Ltd, pp. 450–458, May 01, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.01.036.
- [83] C. P. For *et al.*, "(12) United States Patent," vol. 2, no. 12, 2003.
- [84] M. Marwede, W. Berger, M. Schlummer, A. Mäurer, and A. Reller, "Recycling paths for thin-film chalcogenide photovoltaic waste - Current feasible processes," *Renew. Energy*, vol. 55, pp. 220–229, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.12.038.
- [85] L. Krueger, "Overview of First Solar's Module Collection and Recycling Program Vice President-Sustainable Development," *MW*, no. 1.
- [86] P. Sinha, S. Raju, K. Drozdak, and A. Wade, "Life cycle management and recycling of PV systems," *Photovoltaics Int.*, pp. 47–48, 2017, [Online]. Available: www.pv-tech.org.
- [87] T. H. E. Recycling, "The recycling advantage: cost effective, sustainable," *First Sol. Inc*, 2017, [Online]. Available: www.firstsolar.com/recycling.
- [88] "Espacenet — search results." <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/048793461/publication/EP2997169A1?q=pn%3DEP2997169A1%3F> (accessed Feb. 03, 2022).
- [89] "Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE)." <https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and->

electronic-equipment-wEEE_el (accessed Nov. 17, 2021).

- [90] IPEN and Basel Action Network, "The Entry Into Force of the Basel Ban Amendment: A Guide to Implications and Next Steps," no. January, p. 20, 2020, [Online]. Available: https://ipen.org/sites/default/files/documents/ban-basel-fact-sheet-v2_1-en.pdf.
- [91] "Overview."
<http://www.basel.int/Implementation/Ewaste/Overview/tabid/4063/Default.aspx>
(accessed Nov. 22, 2021).
- [92] "The Bamako convention | UNEP - UN Environment Programme."
<https://www.unep.org/explore-topics/environmental-rights-and-governance/what-we-do/meeting-international-environmental> (accessed Nov. 23, 2021).
- [93] L. Wei and Y. Liu, "Present Status of e-waste Disposal and Recycling in China," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 16, pp. 506–514, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.PROENV.2012.10.070.
- [94] "Major Changes For Solar PV Industry From Revised WEEE Directive - In Compliance Magazine." <https://incompliancemag.com/major-changes-for-solar-pv-industry-from-revised-weee-directive/> (accessed Feb. 04, 2022).
- [95] "SOLAR WASTE & WEEE DIRECTIVE EXPLAINING THE IMPACT OF THE REVISED EU WASTE LEGISLATION ON THE PHOTOVOLTAIC SECTOR IN EUROPE," Accessed: Feb. 04, 2022. [Online]. Available: www.solarwaste.eu.
- [96] "WEEE - what does the label mean, EU requirements - Your Europe."
https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/labels-markings/weee-label/index_en.htm (accessed Feb. 06, 2022).
- [97] A. Sharma, S. Pandey, and M. Kolhe, "International Journal of Smart Grid and Clean Energy Global review of policies & guidelines for recycling of solar PV modules," doi: 10.12720/sgce.8.5.597-610.