



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

Διπλωματική Εργασία

“Ανίχνευση στοιχείων στη διαδικασία  
ανακύκλωσης πλακετών τυπωμένου κυκλώματος  
με χρήση ακτίνων Χ ”

Τζιάλλας Θεόδωρος

Επιβλέπων Καθηγητής:  
Μπιλάλης Νικόλαος

Χανιά Ιούνιος 2022



## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά όλους όσους συντέλεσαν στη παρούσα διπλωματική εργασία, ειδικά τον κ. Κουλουριδάκη Πάυλο ΕΔΙΠ του τμήματος ΜΠΔ και τον καθηγητή κ. Μπιλάλη Νικόλαο του τμήματος ΜΠΔ για την ευκαιρία που μου δώθηκε να ερευνήσω ένα θέμα στο οποίο έχω μεγάλο ενδιαφέρον και το οποίο θεωρώ μείζον για το μέλλον.

Η άμεση επικοινωνία, καθοδήγηση, υποστήριξη, καθώς και η βοήθεια που μου δώσανε τόσο στο εργαστήριο όσο και για την επικοινωνία με πλήθος εταιρειών διαχείρισης ΑΗΗΕ στην Ελλάδα ήταν όχι μόνο διαφωτιστική αλλά και καθοριστική για το αποτέλεσμα της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Καλλίθρακα-Κόντο Νικόλαο, καθηγητή και αντιπρύτανη ΜΗΧΟΠ για τη συνεργασία του ίδιου και του εργαστηριακού του προσωπικού στο πείραμα ακτινοβολήσης των PCB, καθώς και τη διδάκτωρ κα. Ρουμπίνη-Γεωργία Ιορδανίδου για τις υποδείξεις της που συντέλεσαν σημαντικά στην πορεία της εργασίας.

Θα ήθελα, τέλος να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου δείχνουν καθημερινά.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	8
Abstract.....	8
ΑΗΗΕ - Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού.....	11
1.1 Ορισμός ΑΗΗΕ.....	11
1.2 Κατηγορίες ΑΗΗΕ.....	12
1.3 Ποσοτικά Στοιχεία.....	14
1.4 Σύσταση ΑΗΗΕ.....	15
1.5 Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι.....	21
1.6 Νομοθετικό Πλαίσιο.....	23
1.7 Νομοθεσία και Διαχείριση ΑΗΗΕ στην Ελλάδα - Αναθεώρηση βάση ΕΟΑΝ.....	24
2.1 Συμβατικές Μέθοδοι Διαχείρισης Αποβλήτων.....	31
2.2 Ανακύκλωση.....	31
2.2.1 Ορισμός.....	31
2.2.2 Ανακυκλωσιμα Υλικά.....	32
2.3 Ανακύκλωση ΑΗΗΕ.....	32
2.4 Αποσυναρμολόγηση.....	35
2.5 Ανάκτηση.....	35
2.6 PCB (Printed Circuit Boards).....	36
2.7 Περιεχόμενο Πλακετών - Υλικά.....	37
2.7.1 PCB Συμβατά με την Οδηγία RoHS.....	37
2.7.2 Ελασματοποιημένα Φύλλα.....	37
2.7.3 Βασικές Παράμετροι Υποστρώματος .....	38
2.7.4 Κοινά Υποστρώματα.....	39
2.7.5 Πάχος Χαλκού.....	40
2.8 Ηλεκτρονικά Στοιχεία.....	41
Διαδικασία Ανακύκλωσης.....	42
3.1 Διαφορές στην Ανακύκλωση Ειδών ΑΗΗΕ.....	43
3.2 Προ-επεξεργασία.....	43
3.2.1 Τεχνολογία Διαχωρισμού και Ανάκτησης Υλικών.....	44
3.2.2 Ολοκληρωμένα Συστήματα Ανακύκλωσης ΑΗΗΕ με Μηχανικές Διεργασίες.....	44
3.2.3 Διαχωρισμός ΑΗΗΕ με βάση Αισθητήρες.....	48
3.2.4 Τεχνικές Διαχωρισμού Πυκνότητας.....	49
3.2.5 Πειράματα και Μέθοδοι.....	51
4.1 Φασματοσκοπία Φθορισμού (XRF) - Ακτίνες Χ.....	53
4.1.1 Ιστορικά Στοιχεία.....	53
4.1.2 Επεξήγηση Τεχνικής Φασματοσκοπίας Φθορισμού.....	53
4.1.3 Τμηματική Ανάλυση Φασματοφωτόμετρου.....	54
4.1.4 Πλεονεκτήματα Τεχνικής.....	55
4.2 Συστήματα Επιθεώρησης με Ακτίνες Χ.....	56
4.2.1 Εισαγωγή στα ΣΕΑΧ.....	56
4.2.2 Λειτουργία.....	56
4.3 Είδη ΣΕΑΧ.....	57
4.3.1 ΣΕΑΧ Αυτόματου Εφοδιασμού.....	57
4.3.2 ΣΕΑΧ Μεταλλικών και μη Δοχείων.....	58
4.3.3 ΣΕΑΧ Συσκευασμένων προϊόντων.....	58



4.3.4 ΣΕΑΧ Ασυσκεύαστων προϊόντων.....	59
4.3.5 ΣΕΑΧ Χύμα προϊόντων.....	59
4.3.6 ΣΕΑΧ Ασφάλειας Συσκευασιών Αποσκευών και Δεμάτων.....	60
4.3.7 ΣΕΑΧ Μεγάλων Φορτίων (Ασφάλεια).....	60
4.3.8 ΣΕΑΧ Μη-αυτόματου εφοδιασμού.....	61
4.3.9 ΣΕΑΧ Αυτοκινητοβιομηχανίας.....	61
4.3.10 ΣΕΑΧ Υλικών Χυτηρίου.....	61
4.3.11 ΣΕΑΧ Επιστήμης και Έρευνας.....	63
4.3.12 ΣΕΑΧ Μετρολογίας.....	63
4.3.13 ΣΕΑΧ Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού.....	64
4.3.14 ΣΕΑΧ Αεροναυπηγικής και Διαστημικής Βιομηχανίας.....	64
4.4 Φορητά και Κινητά ΣΕΑΧ.....	65
4.4.1 Φορητό ΣΕΑΧ Χημικών Στοιχείων (XRF).....	65
4.4.2 Φορητό ΣΕΑΧ Ηλεκτροκόλλησης.....	65
4.4.3 Κινητό ΣΕΑΧ αποσκευών και φορτίων.....	66
4.5 Πλεονεκτήματα και Ασφάλεια ΣΕΑΧ.....	67
4.6 Ασφάλεια ΣΕΑΧ ως προς Ακτινοβολία.....	67
4.7 Ορολογία Ακτινοβολίας.....	69
4.7.1 Έκθεση ακτινοβολίας.....	69
5.1 Στόχοι της μελέτης.....	70
5.2 Συγκέντρωση Πειραματικών Κλασμάτων.....	71
5.3 Προεπεξεργασία Κλασμάτων PCB.....	72
5.3.1 Αποσυναρμολόγηση.....	72
5.3.2 Θρυμματοποίηση.....	73
5.3.3 Πειραματική Επιθεώρηση με χρήση Ακτίνων Χ.....	74
5.4 Αποτελέσματα και Συζήτηση.....	75
5.5 Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	79
5.6 Μελλοντική Έρευνα.....	79

## Ευρετήριο Εικόνων και Πινάκων

Εικόνα 0: Διάγραμμα ΕΕΕ POM διαχωρισμένες σε έξι κατηγορίες με χρήση της κοινής μεθοδολογίας για την ΕΕ-28. (Magalini et al., 2016 ).....	10
Εικόνα 1: Πίνακας κατηγοριών ΑΗΗΕ σύμφωνα με το Π.Δ.117/2004.....	12
Εικόνα 2 : Ποσοστά συλλογής ΑΗΗΕ έτους 2017 (Hlosta et al. 2017).....	15
Εικόνα 3: Πίνακας πολύτιμων στοιχείων σε Α.Η.Η.Ε. υπολογιστών και σε ποια εξαρτήματα απαντώνται (Στοιχεία απο ewasteguide.info), όπου CRT: Καθοδικός Σωλήνας (Οθόνη), PWB: Πλακέτα.....	17
Εικόνα 4: Διάγραμμα σύγκριση του ποσοστιαίου βάρους των υλικών που συναντώνται στα ΑΗΗΕ (Στοιχεία ε.ο.α.ν. 2019).....	18
Εικόνα 5: Πίνακας επικίνδυνων στοιχείων σε Α.Η.Η.Ε. και που απαντώνται.....	20
Εικόνα 6: Πίνακας δεδομένων της Φινλανδικής αρχής επιτήρησης αγοράς Tukes σχετικά με εξαρτήματα ΑΗΗΕ από μικρές οικιακές συσκευές και εξοπλισμό φωτισμού. Η μέτρηση έγινε με ανάλυση XRF. Τα αποτελέσματα για τα στοιχεία υποδεικνύονται ως min/max ppm (Hazardous Substances Report 2008).....	21
Εικόνα 7: Προέλευση και ροές των επιμολυντών που σχετίζονται με τα ΑΗΗΕ (Robinson, 2009).....	22
Εικόνα 8: Συνολικό ποσοστό συλλογής ΑΗΗΕ, 2019 (% του μέσου βάρους ΗΗΕ που διατέθηκε στην αγορά τα τρία προηγούμενα έτη (2016-2018)).....	24
Εικόνα 9: Διάφορες επιλογές για τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος και όταν φτάσει στο τέλος της ζωής του (Tanskanen, 2013).....	30
Εικόνα 10: Κυκλική και γραμμική ροή των πρώτων υλών (Ongondo and Williams, 2011).....	34
Εικόνα 11: Πυραμίδα σύγκρισης τρόπων διαχείρισης ΑΗΗΕ (ΔΕΔΙΣΑ).....	34
Εικόνα 12: Εξοπλισμός διύλισης και εξόρυξης χρυσού (αριστερά) Αυτόματο μηχάνημα αποσυναρμολόγησης εξαρτημάτων (δεξιά) (Sunny Group, 2022).....	45
Εικόνα 13: Γραμμή ανακύκλωσης πλακέτας κυκλώματος PCB (αριστερά) Μηχανή εξευγενισμού πολύτιμων μετάλλων (δεξιά) (Sunny Group, 2022).....	46
Εικόνα 14: Μίνι τεμαχιστής διπλού άξονα (αριστερά) Οριζόντιος εξοπλισμός θραυστήρα (δεξιά) (Sunny Group, 2022).....	46
Εικόνα 15: Ολοκληρωμένο σύστημα ανακύκλωσης ΑΗΗΕ - “Εργοστάσιο ανακύκλωσης ηλεκτρονικών απορριμμάτων” (Sunny Group, 2022).....	46
Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας ανακύκλωσης ΑΗΗΕ PCB (Sunny Group, 2022).....	47
Εικόνα 17: Τελικά αποτελέσματα ανακύκλωσης ΑΗΗΕ PCB: Κλάσματα μεταλλικών υλών (αριστερά) και μη-μεταλλικής σκόνης - ρητίνης (δεξιά) (Sunny Group, 2022).....	47
Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση συστήματος ταξινόμησης βασισμένο σε ανίχνευση με αισθητήρες (Hlosta, Jakub, et al. 2017; Hlosta et al.2018).....	49
Εικόνα 19: Σχηματική απεικόνιση συστήματος πλάνης που λειτουργεί με νερό (Alljig) (αριστερά)	
Κινητικός διαχωριστής με χρήση βαρύτητας (δεξιά) (Hlosta, Jakub, et al. 2017; Hlosta et al.2018).....	50
Εικόνα 20: Σχέδιο πειραματικής διαδικασίας ανακύκλωσης αποβλήτων καλωδίων (Hlosta, Jakub, et al. 2017).....	52
Εικόνες 21: Αλληλεπίδραση ακτίνων Χ με την ύλη (αριστερά)	

Σχηματική αναπαράσταση των μεταπτώσεων λόγω φθορισμού ακτίνων Χ (δεξιά) (Κουή et al., 2015).....	54
Εικόνα 22: Βασική διάταξη ΣΕΑΧ.....	57
Εικόνα 23 : ΣΕΑΧ Μεταλλικών Δοχείων & Μπουκαλιών εταιρίας Thermofisher.....	58
Εικόνα 24: ΣΕΑΧ Συσκευασμένων προϊόντων εταιρίας Thermofisher.....	59
Εικόνα 25: ΣΕΑΧ Μη-συσκευασμένων προϊόντων εταιρίας Mettler Toledo.....	59
Εικόνα 26 : ΣΕΑΧ Χύμα προϊόντων εταιρίας Thermofisher.....	60
Εικόνα 27: ΣΕΑΧ Πακέτων και Αποσκευών της εταιρίας Smiths Detection.....	60
Εικόνα 28: ΣΕΑΧ Μεγάλων Φορτίων εταιρίας Smiths Detection.....	61
Εικόνα 29: ΣΕΑΧ Αυτοκινητοβιομηχανίας & Παραγωγών Χυτηρίου της εταιρίας YXLON.....	62
Εικόνα 30: Αποτύπωση Ελαστικού (αριστερά), αποτύπωση κινητήρα εσωτερικής καύσης (δεξιά) (Πηγή yxlon.com).....	62
Εικόνα 31: ΣΕΑΧ Επιστήμης, Έρευνας και Μετρολογίας εταιρείας YXLON (αριστερά) Μετρολογική επιθεώρηση αντικειμένου χύτευσης με έγχυση (δεξιά) (Πηγή: yxlon.com)....	63
Εικόνα 32: ΣΕΑΧ Ηλεκτρονικών εξαρτημάτων εταιρείας YXLON (αριστερά) Απεικόνιση Ηλεκτρονικής Πλακέτας (PCB) (δεξιά) (Πηγή: yxlon.com).....	64
Εικόνα 33: ΣΕΑΧ Αεροδιαστημικής & Αεροναυπηγικής Βιομηχανίας εταιρείας YXLON (αριστερά) Απεικόνιση Πτερυγίων στροβιλοκινητήρα (δεξιά) (Πηγή: yxlon.com).....	64
Εικόνα 34: ΣΕΑΧ Χημικών Στοιχείων (XRF) εταιρείας Thermofisher (αριστερά) Στοιχεία περιοδικού πίνακα που αναγνωρίζει το ΣΕΑΧ (δεξιά) (Πηγή: thermofisher.com).....	65
Εικόνα 35: ΣΕΑΧ Ηλεκτροκόλλησης εταιρείας YXLON (αριστερά) Αγωγοί επιθεώρησης ηλεκτροκόλλησης (δεξιά) (Πηγή: yxlon.com).....	66
Εικόνα 36: Κινητό ΣΕΑΧ αποσκευών και φορτίων εταιρείας Smiths Detection (smithsdetection.com).....	66
Εικόνα 37: Μέρος της “Μαύρης” πλακέτας προερχόμενη από απορριπτέα μητρική πλακέτα .....	71
Εικόνα 38: Αποσυναρμολόγηση εξαρτημάτων των “Πράσινης” πλακετών του πειράματος χειρωνακτικά, με χρήση κατά κύριο λόγο εργαλείου κασσιτεροκόλλησης καθώς και dremel. Για μαζική αφαίρεση εξαρτημάτων έγινε χρήση πιστολιού θερμού αέρα.....	72
Εικόνα 39: Μερικά από τα εξωτερικά εξαρτήματα και επεξεργαστές που αφαιρέθηκαν.....	73
Εικόνα 40: Λεπίδες εργαστηριακού τεμαχιστή μετάλλων. Η πλακέτα διοχετεύεται στην είσοδο και κατευθύνεται βαρυτικά και λόγω της δράσης των λεπίδων σε θάλαμο υπό της συσκευής.....	73
Εικόνα 41: Συσκευή Φασματογραφίας X-123 Amptek detector (αριστερά) Γράφημα Φάσματος Fe το οποίο επιθεωρήθηκε με ανιχνευτή Si-PIN 6 mm <sup>2</sup> /500 μm (μέση) Τρισδιάστατη αναπαράσταση άμεσα θερμαινόμενου σωλήνα θερμού καθόδου με βιδωτό σπείρωμα για ψύκτρα. Διαθέτει υποδοχή βύσματος δύο ακίδων για θέρμανση της καθόδου για συσκευές ακτίνων Χ (κάτω) (Πηγές amptek.com; leybold-shop).....	74
Εικόνα 42: Πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακού πειράματος επιθεώσης με ακτίνες Χ των περιεχομένων 4 πλακετών.....	75
Εικόνα 43: Πίνακας συγκέντρωσης μετάλλων από πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος προγενέστερων ερευνών - Συγκέντρωση υλικών % κατά βάρος.....	78

## Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας αφορά τη μελέτη της διαδικασίας ανακύκλωσης αποβλήτων ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών, συγκεκριμένα των ηλεκτρονικών πλακετών. Εξερευνάται η χρήση μεθόδων ανίχνευσης με ακτίνες X στη διαδικασία ανακύκλωσης PCB και κατα ποσο αυτή μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα ανάκτησης χρήσιμων και πολύτιμων υλών από το τελικό προϊόν. Πραγματοποιήθηκε πείραμα όπου συγκρίθηκαν δείγματα πλακετών δυο διαφορετικών εταιρειών πριν και μετά τη θραύση τους. Απο τα αποτελέσματα του πειράματος είναι δυνατό να κρίνουμε αν οι ακτίνες X μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση και τον διαχωρισμό των πλακετών προτού πραγματοποιηθεί θραύση τους και αρα αυτές να διαχωριστούν εκ των προτέρων ώστε στις μετεπείτα διεργασίες ο διαχωρισμός των υλικών που τα συνθέτουν να είναι ευκολότερος και πιο αποδοτικός. Αυτό είναι εφικτό από την εφαρμογή ειδικών διεργασιών ανάλογα το υλικό περιεχόμενο των πλακετών το οποίο γίνεται γνωστό κατά την ανίχνευση. Με έναν τέτοιο διαχωρισμό είναι δυνατή η αύξηση της καθαρότητας των πρώτων υλών, ειδικά των πολύτιμων όπως για παράδειγμα ο χρυσός, άργυρος και η πλατίνα, τα οποία προκύπτουν από τη διαδικασία της ανακύκλωσης και τελικώς η αύξηση των οικονομικών οφελών ολόκληρης της διαδικασίας.

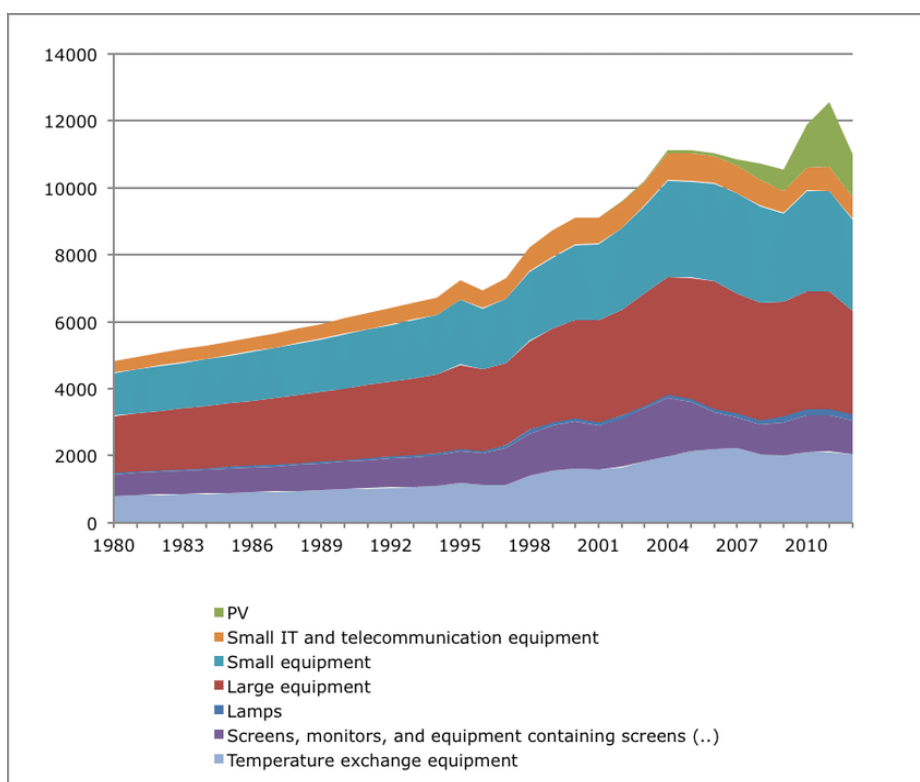
## Abstract

This study is concerned with the recycling process of the Waste of Electrical and Electronic devices, specifically Printed Electronic Boards. The use of X-ray detection methods in the PCB recycling process is explored, concerning the efficiency of retrieval of usable and valuable materials from the final product. An experiment was performed in which samples of boards from two different companies were compared before and after their shredding. The results of the experiment make it possible to ascertain whether X- rays can be used to detect and separate the boards before they are shredded and whether they should be separated in advance so that, in the subsequent processes, the separation of the composing materials is conducted with ease and increased efficiency. This is possible by applying specific extraction processes depending on the material of the boards which can be verified through X-ray detection. Pre-emptive separation makes it possible to increase the purity of the resulting raw materials, especially valuable ones such as gold, silver and platinum, and ultimately increase the economic benefits of the whole recycling process.



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΗΗΕ) αυξάνεται παγκοσμίως, παράλληλα με τη μείωση της διάρκειας ζωής προϊόντων όπως οι μικρές ηλεκτρονικές συσκευές (Li, J., Xu, T., Liu, J. et al. 2021). Κατά συνέπεια, η ποσότητα ηλεκτρονικών αποβλήτων (E-waste) ή αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) αυξάνεται παγκοσμίως, με ετήσια αύξηση περίπου 5% (Bakker et al., 2014; Ikhlayel, 2018). Το 2016, 44,7 εκατομμύρια κυβικοί τόνοι (Mt) ΑΗΗΕ παρήχθησαν παγκοσμίως (Ibanescu et al., 2018). Ωστόσο, παρόμοια με την παραγωγή ΗΗΕ, το ποσό αυτό αυξάνεται με διαφορετικούς ρυθμούς σε διαφορετικές περιοχές (Baldé et al., 2017a). Αυτή τη στιγμή δεν υπάρχουν διαθέσιμα εναρμονισμένα σύνολα δεδομένων παγκοσμίου επιπέδου που να καλύπτουν όλες τις χώρες του κόσμου για περισσότερο από μια δεκαετία. Το 2012, περίπου 60 Mt ΕΕΕ διατέθηκαν στην αγορά, μεταξύ των οποίων 12,4 Mt στην Κίνα, 9,1 Mt στην ΕΕ, 7,4 Mt στις ΗΠΑ, 3,0 Mt στην Ινδία και 3,7 Mt στη Νότια Αμερική (Tansel, 2017; Xavier et al. 2018; Eurostat report 2018).



Εικόνα 0: Διάγραμμα ΕΕΕ POM διαχωρισμένες σε έξι κατηγορίες με χρήση της κοινής μεθοδολογίας για την ΕΕ-28. (Magalini et al., 2016 )

Με βάση τη σύνθεση των ηλεκτρονικών αποβλήτων, η αντιμετώπισή του οφείλεται σε τρία κύρια οφέλη/λόγους: οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και τη δημόσια υγεία. Από οικονομική άποψη, τα ΑΗΗΕ περιέχουν μια ποικιλία υλικών, συμπεριλαμβανομένων πολύτιμων μετάλλων (π.χ. χρυσού, αργύρου και παλλαδίου) και άλλων μετάλλων αξίας (χαλκός, αλουμίνιο και σίδηρος) (Ibanescu et al., 2018.).

Από την άποψη των πόρων, η ανακύκλωση ηλεκτρονικών αποβλήτων, σε μια συγκεκριμένη κλίμακα, μειώνει την πίεση στο περιβάλλον λόγω της εξόρυξης πρώτων υλών από κοιτάσματα ορυκτών (Laurenti et al., 2015; Meshram et al., 2019). Η ανακύκλωση μπορεί επίσης να συμβάλει στην ασφάλεια του εφοδιασμού πρώτων υλών και να οδηγήσει σε μια πιο κυκλική οικονομία (Mathieux et al., 2017). Παρ'όλα αυτά, τα ΑΗΗΕ περιέχουν επίσης επικίνδυνες ουσίες που θέτουν σε κίνδυνο τόσο το περιβάλλον όσο και την ανθρώπινη υγεία (όπως βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας και τοξικά μέταλλα όπως ο υδράργυρος και ο μόλυβδος καθώς και CFC) που απαιτούν ειδική επεξεργασία (Zhang and Xu, 2016; Lixandru et al., 2017).

## **ΑΗΗΕ - Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού**

### **1.1 Ορισμός ΑΗΗΕ**

Ως Ηλεκτρικός και Ηλεκτρονικός Εξοπλισμός - ΗΗΕ (Electrical and Electronic Equipment - EEE) χαρακτηρίζεται ο εξοπλισμός του οποίου η ορθή λειτουργία εξαρτάται από ηλεκτρικά ρεύματα ή ηλεκτρομαγνητικά πεδία, καθώς και ο εξοπλισμός που απαιτείται για να παραχθούν, να μεταφερθούν και να μετρηθούν τα ρεύματα και τα πεδία αυτά, ο οποίος ανήκει στις κατηγορίες του παραρτήματος ΙΑ της Οδηγίας 2002/96/ΕΚ και ορίζεται στην Κ.Υ.Α. Η.Π. 23615/651/Ε.103/2014, σε συμμόρφωση με την 2012/19/ΕΕ. Ο εξοπλισμός αυτός λειτουργεί υπό ονομαστική τάση έως 1kV εναλλασσόμενου ρεύματος και έως 1,5 kV συνεχούς ρεύματος. (Zhang and Xu, 2016).

Με το πέρασ του κύκλου ζωής του Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού εξοπλισμού αυτός μετατρέπεται σε ρυπογόνο απόβλητο, μολύνοντας το περιβάλλον. Η διαχείρισή του είναι δύσκολη διαδικασία καθώς, ανάλογα την εφαρμογή του, διαθέτει περίπλοκη δομή, περιέχοντας πλήθος πρώτων υλών. Ως Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού – ΑΗΗΕ (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE) χαρακτηρίζεται ο ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός, τον οποίο ο κάτοχος του αποβάλλει ή υποχρεούται να αποβάλλει, στο πλαίσιο των εκάστοτε διατάξεων της εθνικής νομοθεσίας και δεν έχει πια για αυτόν καμία χρηστική αξία σύμφωνα με τον ορισμό του “απόβλητου” όπως αυτό ορίζεται στο άρθρο 1 στοιχείο α) της Οδηγίας 75/442/ΕΟΚ και στον Νόμο 4042/2012 σε εναρμόνιση με την οδηγία 2008/98/ΕΚ. Στα ΑΗΗΕ συμπεριλαμβάνονται όλα τα στοιχεία κατασκευής, συναρμολόγησης και τα αναλώσιμα, που αποτελούν μέρος του προϊόντος κατά την απόρριψη του (Zhang and Xu, 2016).

Ο ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός που έχει φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής του, δεν είναι λειτουργικός ή έχει χάσει τη χρηστική του αξία ονομάζεται e-waste. Στην ΕΕ του αποδίδεται η ονομασία Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού – ΑΗΗΕ (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE) (Ongondo and Williams, 2011).

Καθε ορισμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη το πότε το προϊόν γίνεται άχρηστο και την απόφαση του κατόχου να το μετατρέψει σε απόβλητο. Μετατρέπονται σε απόβλητα όταν η δομή και η κατάστασή τους δεν παρέχει την αναμενόμενη απόδοση σε σχέση με το στόχο που έθεσαν οι καταναλωτές (Tanskanen, 2013).

## 1.2 Κατηγορίες ΑΗΗΕ

Μεγάλο εύρος προϊόντων κατηγοριοποιείται ως ΗΗΕ, μεγάλες και μικρές συσκευές. Παραδείγματα αποτελούν ο τεχνολογικός εξοπλισμός που περιλαμβάνει τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές (Η/Υ), τις φορητές κονσόλες βίντεο παιχνιδιών, τα περιφερειακά του Η/Υ, κινητά τηλέφωνα και άλλο τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό, εξοπλισμός βίντεο και ήχου όπως τα mp3 players (Babu et al.,2007). Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει εκδώσει Οδηγίες για τα ΑΗΗΕ και συγκεκριμένα με Οδηγία 2002/96/ΕΚ (Directive 2002/96/EC) η οποίες έχουν ενσωματωθεί στην ελληνική νομοθεσία μέσω του Προεδρικού Διατάγματος 117/2004 και κατηγοριοποιούν τα ΑΗΗΕ σε 10 διαφορετικές κατηγορίες όπως φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

#	Κατηγορία
1	Μεγάλες οικιακές συσκευές
2	Μικρές οικιακές συσκευές
3	Εξοπλισμός πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών
4	Καταναλωτικά είδη
5	Φωτιστικά είδη
6	Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εργαλεία
7	Παιχνίδια, εξοπλισμός ψυχαγωγίας και αθλητισμού
8	Ιατροτεχνολογικές συσκευές
9	Όργανα παρακολούθησης και ελέγχου
10	Συσκευές αυτόματης διανομής

Εικόνα 1: Πίνακας κατηγοριών ΑΗΗΕ σύμφωνα με το Π.Δ. 117/2004.

Με βάση την προέλευσή τους, τα ΑΗΗΕ μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες. Τα ΑΗΗΕ οικιακής προέλευσης αποτελούν μια απο αυτές. Σε αυτά κατηγοριοποιούνται τα ΑΗΗΕ που προκύπτουν από οικιακή χρήση, οργανισμούς καθώς και βιομηχανικής ή εμπορικής χρήσης τα οποία συντίθενται κατα τον ίδιο τρόπο και σε αντίστοιχες ποσότητες με τα οικιακά. Στη δεύτερη κατηγορία εισάγονται ΑΗΗΕ διάφορων προελεύσεων από τα οικιακά. Εξοπλισμός που αποβάλλεται τόσο από επιχειρήσεις μεγάλου μεγέθους, ιδρυματικούς φορείς αλλά και κατασκευαστές ειδών Ηλεκτρικού και Ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (Original Equipment Manufacturers).

Πηγή των ΑΗΗΕ της πρώτης κατηγορίας είναι όλων των ειδών οι κατοικίες, μόνιμες ή μη, οι οποίες διαθέτουν, αναβαθμίζουν ή αντικαθιστούν προϊόντα τεχνολογίας, με αυτόν τον τρόπο δημιουργώντας απόβλητα ΗΗΕ. Μεγάλο όγκο αυτής της κατηγορίας ΑΗΗΕ συντελούν τα απορριμμένα τεχνολογικά προϊόντα πληροφορίας και τεχνολογιών και κυρίως Ηλεκτρονικοί Υπολογιστές. Αυτό είναι έως ένα βαθμό αναμενόμενο καθώς η ταχεία τεχνολογική εξέλιξη που παρατηρείται στο



συγκεκριμένο τομέα απαιτεί τη συχνή αντικατάσταση του εξοπλισμού παρότι αυτός μπορεί να είναι ακόμη λειτουργικός. Τα ΑΗΗΕ διαφόρων προελεύσεων προκύπτουν από υπηρεσίες του Δημοσίου αλλά και ιδιώτες και μεγάλου μεγέθους επιχειρήσεις από τη συχνή αντικατάσταση του εργοστασιακού ή γραφειακού εξοπλισμού είτε αυτός προκύπτει από την εκ νέου αγορά του είτε από εταιρική χρηματοδοτική μίσθωσή του για δεδομένο χρονικό διάστημα (leasing). Με τελικό σκοπό τη βελτίωση της παραγωγικότητάς τους, οι εταιρείες αναβαθμίζουν συχνά τον εξοπλισμό τους απορρίπτοντας τον παλαιό.

Κατά την περάτωση της παραγωγής του ηλεκτρολογικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, αυτός περνάει από ποιοτικό έλεγχο. Αν τα ποιοτικά στάνταρ δεν έχουν επιτευχθεί, ο εξοπλισμός αποχαρακτηρίζεται και πλέον θεωρείται ΑΗΗΕ. Διαχείριση των προϊόντων αυτών γίνεται από εξειδικευμένες εταιρείες των οποίων το αντικείμενο αποτελεί η εναλλακτική διαχείριση αποβλήτων (ΑΗΗΕ και άλλων ειδών), αλλά ορισμένες εταιρείες αναλαμβάνουν οι ίδιες την εναλλακτική διαχείριση τους. Παραδείγματα εταιρειών που διαχειρίζονται οι ίδιες τα προκύπτοντα ΑΗΗΕ είναι η Hewlett-Packard και η IBM.

Δύο ακόμη υποκατηγορίες ΑΗΗΕ αποτελούν τα νεότερα καθώς και τα ιστορικά. Στην πρώτη αυτών των κατηγοριών ανήκουν τα ΑΗΗΕ που παρήχθησαν μετά τις 13 Αυγούστου του 2005. Αντίστοιχα, ιστορικά θεωρούνται τα ΑΗΗΕ που διοχευτήθηκαν προ της ημερομηνίας αυτής. Η ορθή διαχείριση των ΑΗΗΕ αποτελεί πρόβλημα καθώς και ευθύνη τόσο του μέσου χρήστη όσο και του κατασκευαστή του εξοπλισμού. Ο διαχωρισμός των κατηγοριών συμβαίνει διότι για τα νεότερα προϊόντα, ο κατασκευαστής αναλαμβάνει ευθυνότητα για το προϊόν βάσει της αρχής “ο ρυπαίνων πληρώνει”. Αντίθετα, για τα απόβλητα που χαρακτηρίζονται ιστορικά, ολόκληρη η αγορά, τόσο κατασκευαστές όσο και αγοραστές αναλαμβάνουν ευθύνη για την διαχείριση των ΑΗΗΕ, ανάλογα με το ποσοστιαίο μερίδιο της αγοράς που διαθέτουν στην κατηγορία του αποβαλλόμενου εξοπλισμού. Στην περίπτωση που ο εξοπλισμός έχει ανανεωθεί από αντίστοιχο προϊόν παρόμοιων δυνατοτήτων, τότε το κόστος της διαχείρισης μετακυλιέται στον κατασκευαστή και προμηθευτή, ενώ σε διαφορετική περίπτωση η διαχείριση γίνεται από τον αγοραστή. (Ibanescu et al., 2018).

### **1.3 Ποσοτικά Στοιχεία**

Ο ρυθμός του απορριπτόμενου ΗΗΕ αυξάνεται ειδικά στις αναπτυγμένες χώρες που ανήκουν στον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD). Οι αγορές κατακλύζονται με μεγάλες ποσότητες νέων ηλεκτρονικών προϊόντων ενώ οι ποσότητες των απορριπτόμενων ΑΗΗΕ αυξάνονται συνεχώς με συνέπεια να αποτελούν μια από τις ταχύτερα αυξανόμενες ροές αποβλήτων παγκοσμίως προσελκύοντας την προσοχή κυβερνήσεων, περιβαλλοντικών οργανώσεων καθώς και της επιστημονικής κοινότητας. Γενικές εκτιμήσεις ερευνών που πραγματοποιήθηκαν τοποθετούν τη ποσότητα των παραγόμενων ΑΗΗΕ παγκοσμίως περίπου στους 20-50 εκατομμύρια τόνους ετησίως. Το 2006 η παγκόσμια παραγωγή ΑΗΗΕ εκτιμήθηκε σε 20-50 εκ. τόνους ετησίως αντιπροσωπεύοντας το 1-3% της παγκόσμιας παραγωγής οικιακών αποβλήτων. Στις αναπτυγμένες χώρες τα ΑΗΗΕ αποτελούν το 8% του όγκου των οικιακών αποβλήτων (Robinson, 2009). Αυτές οι ποσότητες ΑΗΗΕ

επιδεικνύουν την ανάγκη επίλυσης του προβλήματος διαχείρισής τους καθώς και της αναζήτησης τρόπων μείωσης της παραγωγής τους. Η ποσότητα των ΑΗΗΕ που παράγεται στις ΗΠΑ και στην ΕΕ όπως επίσης και στις αναπτυσσόμενες χώρες έχει αυξηθεί τα τελευταία δέκα χρόνια. Σύμφωνα με την υπηρεσία προστασίας περιβάλλοντος των ΗΠΑ (US Environmental Protection Agency) κατά μέσο όρο κάθε νοικοκυριό στις ΗΠΑ χρησιμοποιεί 34 ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές καταλήγοντας σε περισσότερο από 5 εκ. τόνους ΑΗΗΕ ετησίως (Tanskanen, 2013).

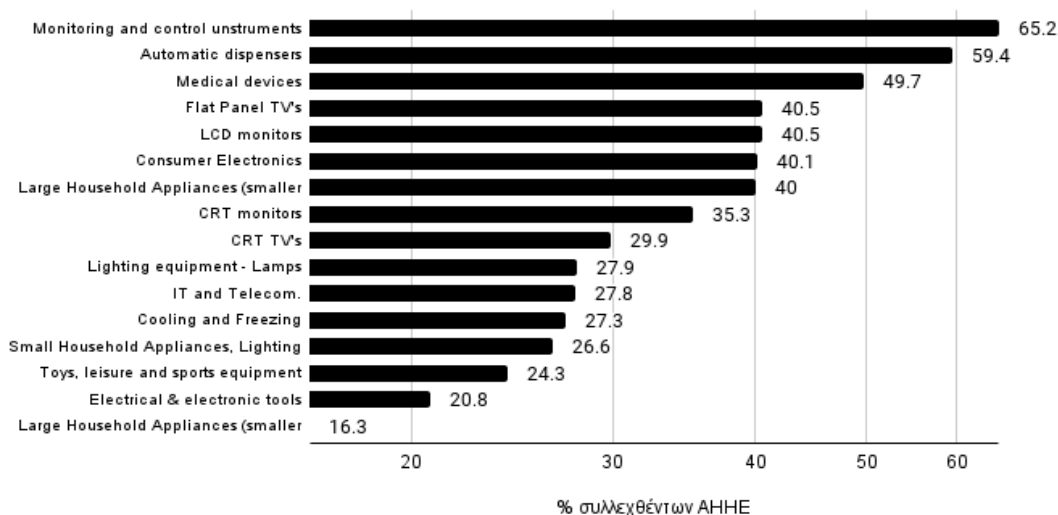
Το ποσό των ΑΗΗΕ στις νέες βιομηχανοποιημένες και αναπτυσσόμενες χώρες αυξάνεται επίσης εξαιτίας της εισαγωγής ΑΗΗΕ από τις ανεπτυγμένες χώρες. Μερικές έρευνες δείχνουν ότι το 50-80% των ΑΗΗΕ που παράγονται στις ανεπτυγμένες αγορές στέλνεται στις αναπτυσσόμενες χώρες για επαναχρησιμοποίηση και διαχείριση, συχνά με την παραβίαση των διεθνών νομοθεσιών (Tanskanen, 2013). Η Κίνα δέχεται περίπου το 70% των εξαγόμενων ΑΗΗΕ ενώ σημαντικές ποσότητες εξάγονται επίσης στην Ινδία, Πακιστάν, Βιετνάμ, Φιλιππίνες, Μαλαισία, Νιγηρία, Γκάνα, Βραζιλία και Μεξικό. Εξαιτίας της ημι-παράνομης φύσης αυτών των εξαγωγών, ο πραγματικός όγκος των ΑΗΗΕ που εξάγονται είναι αδύνατον να ποσοτικοποιηθεί (Robinson, 2009).

Ο Παγκόσμιος Έλεγχος Ηλεκτρονικών Αποβλήτων 2017 (Global E-waste Monitor 2017) δείχνει πως τα ηλεκτρονικά απόβλητα έχουν αυξηθεί σε 44.7 εκ. μετρικούς τόνους ετησίως ενώ εκτιμάται πως αυτά θα αυξηθούν περαιτέρω σε 52.2 εκ. μετρικούς τόνους ετησίως έως το 2023. Απο αυτά, μόνο το 20% των παραγόμενων ηλεκτρονικών αποβλήτων τεκμηριώνεται ότι συλλέγεται και ανακυκλώνεται. Η τύχη του υπόλοιπου 76% (34.1 εκ. Μετρικοί τόνοι) είναι άγνωστη, αλλά ενδέχεται να αποτελεί αντικείμενο απόρριψης, ανταλλαγής ή ανακύκλωσης κάτω από υποδεέστερες συνθήκες. Πολλά ηλεκτρονικά απόβλητα παραμένουν επίσης στα υπόστεγα, στις σοφίτες και στους χώρους αποθήκευσης των ιδιοκτητών τους ή απορρίπτονται σε κανονικούς κάδους οικιακής χρήσης. Τα ηλεκτρονικά απόβλητα αυξάνονται εκθετικά λόγω της συνεχούς αύξησης της παγκόσμιας καταναλωτικής ζήτησης. Στην ΕΕ ο ρυθμός παραγωγής των ΑΗΗΕ φτάνει στα 16.6 κιλά ανά άτομο ετησίως, δημιουργώντας έτσι ένα συνολικό ετήσιο ποσό παραγωγής ΑΗΗΕ των 12.3 εκ. τόνους ετησίως για τα 27 κράτη μέλη (ΕU-27). Με ποσοστό συλλογής γύρω στο 35%, οι χώρες της ΕΕ απορρίπτουν περίπου 8 εκ. τόνους ΑΗΗΕ ετησίως (περίπου το 8% των αστικών αποβλήτων) με μια εκτιμώμενη αύξηση της τάξης του 20% ανα πέντε χρόνια. Το 2021 το ποσό εκτιμάται ότι θα φτάσει τους 10 εκ. τόνους ετησίως. Παρότι οι μετρήσεις πραγματοποιούνται παγκοσμίως, μόνο 41 χώρες έχουν επίσημες στατιστικές για τα ηλεκτρονικά απόβλητα. Για 16 άλλες χώρες, ποσότητες ηλεκτρονικών αποβλήτων συλλέχθηκαν από τον Παγκόσμιο Έλεγχο Ηλεκτρονικών Αποβλήτων 2017 και εκτιμήθηκαν. Η τύχη της μεγάλης πλειοψηφίας των ηλεκτρονικών αποβλήτων (34,1 Mt) είναι απλά άγνωστη. Σε χώρες όπου δεν υπάρχει εθνική νομοθεσία για τα ηλεκτρονικά απόβλητα, είναι πιθανό τα ηλεκτρονικά απόβλητα να αντιμετωπίζονται ως γενικά απόβλητα. Θάβονται με υγειονομική ταφή είτε ανακυκλώνονται μαζί με άλλα μέταλλα ή πλαστικά απόβλητα. Υπάρχει υψηλός κίνδυνος εισαγωγής των αποβλήτων σε παρα-οικονομικές δραστηριότητες, λανθασμένου χειρισμού των ρύπων και ανακύκλωσής τους χωρίς να προστατεύονται σωστά οι εργαζόμενοι καθώς ενδέχεται να υπάρξουν εκπέμπομπες τοξινών που περιέχονται στα ηλεκτρονικά απόβλητα. Παρόλο που η δυσκολία αντιμετώπισης του φόρτου ηλεκτρονικών αποβλήτων διαρκώς αυξάνεται, όλο και μεγαλύτερος αριθμός χωρών υιοθετεί νομοθεσία διαχείρισης των ΑΗΗΕ. Αυτή τη στιγμή το 66% του παγκόσμιου πληθυσμού καλύπτεται από παγκόσμιους νόμους διαχείρισης ΑΗΗΕ, σημαντική αύξηση από το 44% που είχε καλυφθεί το 2014. Στην Ελλάδα η μέση ετήσια παραγωγή ΑΗΗΕ για την περίοδο 2016 έφτασε περίπου 189 kt ή 17.5 kg ανα

κάτοικο αντιπροσωπεύοντας το 4% των αστικών αποβλήτων (Στοιχεία e-waste monitor 2017, ε.ο.αν. 2019).

#### 1.4 Σύσταση ΑΗΗΕ

Η χημική σύσταση των ΑΗΗΕ διαφέρει ανάλογα τον τύπο του απορριπτόμενου αντικειμένου και της ηλικίας του. Ένα μεγάλο μέρος των ΑΗΗΕ αποτελούνται απο μείγμα μετάλλων, κυρίως χαλκού αλουμινίου και σιδήρου, που είναι προσκολλημένα ή επικαλύπτονται από διάφορους τύπους πλαστικών με ή χωρίς επιβραδυντές φλόγας (Flame Retardants, FRs) και κεραμικών. Απο το μείγμα αυτών των μετάλλων μπορούν να ανακτηθούν και διάφορα πολύτιμα μέταλλα όπως για παράδειγμα χρυσός ή άργυρος. Η πολύπλοκη χημική σύσταση των ΑΗΗΕ οδηγεί σε δυσκολίες προσδιορισμού του όγκου τους στη ροή αποβλήτων τόσο τοπικά αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο, ωστόσο ορισμένες μελέτες ταξινομούν τη σύσταση των ΑΗΗΕ σε 5 κύριες κατηγορίες υλικών: σιδηρούχα μέταλλα (ferrous metals), μη-σιδηρούχα μέταλλα, γυαλί, πλαστικά και άλλα υλικά.



Εικόνα 2 : Ποσοστά συλλογής ΑΗΗΕ έτους 2017 (Hlosta et al. 2017)

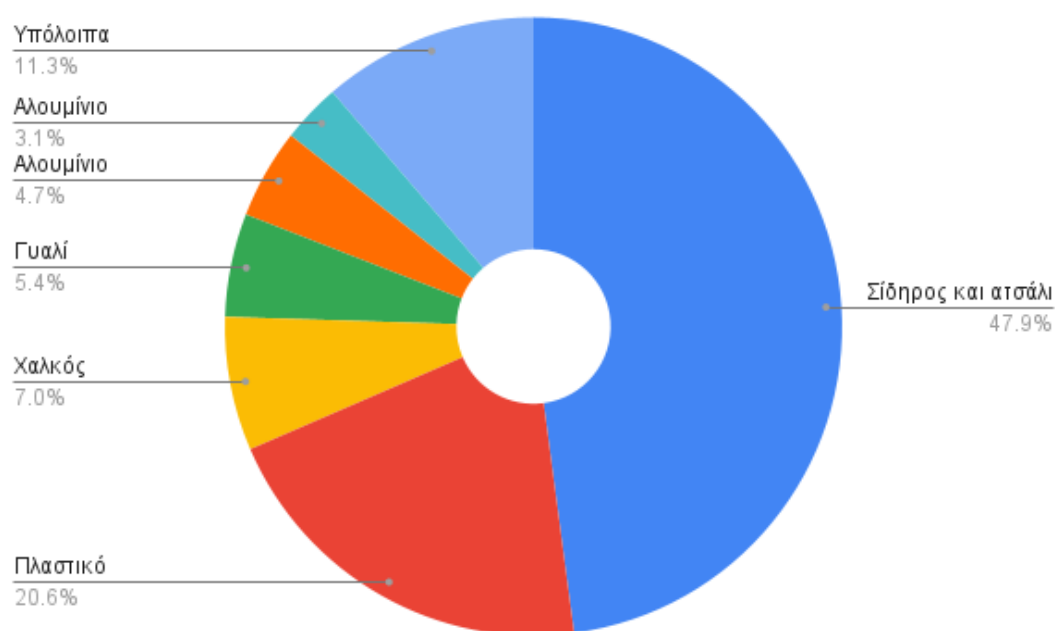
Ο σίδηρος και το ατσάλι αποτελούν τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό και συνολικά αποτελούν το ήμισυ του συνολικού βάρους των ΑΗΗΕ. Τα πλαστικά είναι η δεύτερη κατηγορία με ποσοστό 21.6% των ΑΗΗΕ. Σε τρίτη κατηγορία ανέρχονται τα μη-σιδηρούχα μέταλλα (non-ferrous) όπου είναι δυνατό να εμπεριέχονται πολύτιμα μέταλλα, και αποτελούν το 13% του συνολικού βάρους των ΑΗΗΕ. Τα ΑΗΗΕ διαθέτουν πληθώρα πολύτιμων μετάλλων σε μικρές ποσότητες, μερικά εκ των οποίων είναι το παλλάδιο, ο χρυσός, ο άργυρος αλλά και ο χαλκός σε μεγαλύτερες ποσότητες. Τα μέταλλα αυτά διαθέτουν μεγάλη αξία καθιστώντας τη διαχείριση των ΑΗΗΕ επικερδή όταν μπορεί να επιτευχθεί ανάκτησή τους.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα ΑΗΗΕ αποτελούν τα κινητά τηλέφωνα. Αυτά αποτελούνται από πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος (PCB), οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD), μπαταρία καθώς και συνδετικά πολυμερή (Kasper, Berselli, Freitas, Tenorio, Bemardes, & Veit, 2011). Τα PCB περιέχουν τόσο κεραμικά όσο πολυμερή αλλά περιέχουν και μέταλλα όπως ο χαλκός, ο ψευδάργυρος, ο κασσίτερος, το νικέλιο, αλλά και πολύτιμα μέταλλα όπως το παλλάδιο, ο άργυρος και ο χρυσός. Μετα την εφαρμογή της οδηγίας RoHS, στις συγκολλήσεις των ηλεκτρονικών συσκευών ο μόλυβδος αντικαταστάθηκε από άργυρο, αυξάνοντας σημαντικά την περιεκτικότητά του στις κινητές συσκευές. Η ανακύκλωση των κινητών τηλεφώνων μπορεί να είναι ιδιαίτερα επικερδής καθώς ένας τόνος περιέχει 130 κιλά χαλκού, 0.35 κιλά αργύρου, 0.34 κιλά χρυσού και 0.14 κιλά παλλαδίου κατά μέσο όρο (Ibanescu et al., 2018).

Όνομα Στοιχείου / Υλικού	Περιεκτικότητα (% συνολικού βάρους)	Παρουσία σε Η/Υ
Πλαστικό	22.9907	Καλώδιο, Κουτί
Μόλυβδος	6.2988	Γυαλί διοχέτευσης σε CRT, PWB
Αλουμίνιο	14.1723	Κουτί Η/Υ, CRT, PWB, συνδετήρες
Γερμάνιο	0.0016	PWBs
Γάλλιο	0.0013	PWBs
Σίδηρος	20.4712	Κουτί Η/Υ, CRT, PWB
Κασσίτερος	1.0078	PWBs, CRTs
Χαλκός	6.9287	CRT, PWB, συνδετήρες
Βάριο	0.0315	Γυαλί πλαισίου σε CRT
Νικέλιο	0.8503	Κουτί Η/Υ, CRT, PWB
Ψευδάργυρος	2.2046	CRT, PWB
Ταντάλιο	0.0157	Πυκνωτές / PWB, τροφοδοτικό
Ινδίο	0.0016	PWB
Βανάδιο	0.0002	CRT
Τέρβιο	0	CRT, PWB
Βηρύλλιο	0.0157	PWB, συνδετήρες
Χρυσός	0.0016	Συνδεσιμότητα, αγωγιμότητα / PWB, συνδετήρες
Ευρώπιο	0.0002	PWB
Τιτάνιο	0.0157	Κουτί Η/Υ
Ρουθένιο	0.0016	PWB
Κοβάλτιο	0.0157	Κουτί Η/Υ, CRT, PWB
Παλλάδιο	0.0003	PWB, συνδετήρες
Μαγγάνιο	0.0315	Κουτί Η/Υ, CRT, PWB
Άργυρος	0.0189	Αγωγιμότητα / PWB, συνδετήρες
Αντιμόνιο	0.0094	Κουτί Η/Υ, CRT, PWB
Βισμούθιο	0.0063	PWB
Χρώμιο	0.0063	Κουτί Η/Υ
Κάδμιο	0.0094	Κουτί Η/Υ, CRT, PWB
Σελήνιο	0.0016	Ανορθωτές / PWB
Νιόβιο	0.0002	Κουτί Η/Υ
Ύτριο	0.0002	CRT
Ρόδιο	0	PWB
Πλατίνα	0	PWB
Υδράργυρος	0.0022	Κουτί Η/Υ, PWB
Αρσενικό	0.0013	PWB
Silica	24.8803	CRT, PWB

Εικόνα 3: Πίνακας πολύτιμων στοιχείων σε Α.Η.Η.Ε. υπολογιστών και σε ποια εξαρτήματα απαντώνται (Στοιχεία απο ewasteguide.info), όπου CRT: Καθοδικός Σωλήνας (Οθόνη), PWB: Πλακέτα

Με κατάλληλη διαχείριση είναι δυνατή η ελαχιστοποίηση των διαρροών επικίνδυνων ουσιών στο περιβάλλον καθώς και η ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων και υλικών απο αυτά. Με βάση τα στοιχεία της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος, τα υλικά αυτά εμφανίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Εικόνα 4: Διάγραμμα σύγκριση του ποσοστιαίου βάρους των υλικών που συναντώνται στα ΑΗΗΕ (Στοιχεία ε.ο.α.ν. 2019)

Στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται διάφορες εκτιμήσεις σχετικά με την ποσοστιαία σύσταση των επιμέρους συστατικών των ΑΗΗΕ. Σε αυτό συμβάλλει η μεγάλη ποικιλομορφία των ΑΗΗΕ, λόγω του μεγάλου αριθμού δυνατών εφαρμογών τους. Κατ'αυτον τον τροπο και εφόσον η προέλευσή τους ποικίλει, το εύρος των δειγμάτων που λαμβάνουν οι ερευνητικές ομάδες καθώς και οι υποθέσεις και οι παραδοχές τους μπορεί επίσης να ποικίλλουν σημαντικά. Η ευελιξία καθώς και το μειωμένο κόστος αλλά και το χαμηλό βάρος που παρουσιάζουν τα πλαστικά έχει οδηγήσει σε σχεδιαστικές αλλαγές του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Έτσι παρατηρείται μείωση στη χρήση μετάλλων σχετικά με τις υλοποιήσεις προηγούμενων γενεών. Η πολυπλοκότητα που παρουσιάζουν τα ΑΗΗΕ καθιστά δύσκολη τη διαχείρισή τους. Ειδικές διεργασίες είναι απαραίτητες για την αποφυγή μόλυνσης του περιβάλλοντος και επιβάρυνσης της ανθρώπινης υγείας. Η διαχείρισή τους ως συμβατικά απόβλητα, με καύση ή υγειονομική ταφή είναι συχνά απαγορευτική καθώς στην πρώτη περίπτωση απελευθερώνονται φουράνια και

διοξίνες, ενώ κατα τη δεύτερη επιβαρύνουν τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα με διάφορες περιεχόμενες τοξικές ουσίες που περιέχουν. Στις πιο σημαντικές αυτών των τοξικών ουσιών ανήκει ο μόλυβδος, ο οποίος βρίσκεται σε σημαντικές ποσότητες σε ΑΗΗΕ προ της οδηγίας RoHS, σε εξοπλισμό όπως οι PCB. Άλλες αντίστοιχα τοξικές ουσίες αποτελούν το κάδμιο, ο υδράργυρος το χρώμιο, βάριο και το αντιμόνιο, που περιέχονται σε μπαταρίες, οθόνες LCD, διακόπτες και λάμπες αντίστοιχα. Τέλος, απαντώνται και ουσίες όπως πλαστικά, PVC, CFC, σελήνιο, αμίαντος και πολύ τοξικές ουσίες όπως το αρσενικό καθώς και αλλες. Με σκοπό την ανάκτηση μετάλλων, πολύτιμων ή μη, τα οποία απαρτίζουν τα ΑΗΗΕ γίνεται χρήση πληθώρας τεχνικών. Στις διεργασίες αυτές περιέχονται η καύση και τήξη ενώ η εμβύθιση σε όξινο διάλυμα χρησιμοποιείται με πολύ συγκεκριμένες συνθήκες διότι εγκυμονεί κινδύνους λόγω του πιθανώς τοξικού περιεχομένου των ΑΗΗΕ.

Στο επικίνδυνο περιεχόμενο των ΑΗΗΕ ανήκουν και τα βαρέα μέταλλα. Η μόλυνση που προκαλούν τα βαρέα μέταλλα είναι εκτενής αλλά και μη αναστρέψιμη, καθώς μέσω της τροφικής αλυσίδας αλλά και της βιοσυσσώρευσης διοχετεύονται στην πανίδα και τη χλωρίδα χωρίς δυνατότητα άμεσης απομάκρυνσής τους αυτές. Τα προβλήματα που προκαλούν μετακυλύουν και στον άνθρωπο καθώς είναι αποδεδειγμένο ότι προκαλούν νεφρικές και ηπατικές φθορές, έχουν αντίκτυπο σε ψυχολογία και μαθησιακές ικανότητες και μελέτες έχουν συνδέσει τη χρόνια έκθεση σε κάδμιο με αύξηση της πιθανότητας πρόκλησης καρκίνου του πνεύμονα. Η εναπόθεση των βαρέων μετάλλων γίνεται τόσο στη γη, τον υδροφόρο ορίζοντα αλλά και στον αέρα, ειδικά κατά την καύση των ΑΗΗΕ. Συμπερασματικά, για την αποφυγή περαιτέρω μόλυνσης του περιβάλλοντος είναι κρίσιμη η εφαρμογή συγκεκριμένης μεθοδολογίας κατά την ανακύκλωση των ΑΗΗΕ. Στις διαδικασίες προετοιμασίας τους ανήκει η προεπεξεργασία κατά την οποία γίνεται αφαίρεση των δυνητικά επικίνδυνων ουσιών που αυτά περιέχουν προτού την ανακύκλωσή τους (Ibanescu et al., 2018).

Στοιχεία	Παρουσία σε ΑΗΗΕ
<b>Αλογονωμένες ενώσεις</b>	
PCB (Πολυχλωριωμένα διφαινύλια)	Συμπυκνωτές, Μετασχηματιστές
TBBA (Τετραβρωμο-δισφαινόλη-Α) PBB (Πολυβρωμιωμένα διφαινύλια) PBDE (Πολυβρωμοδιφαινυλαιθέρες)	Θερμοπλαστικά συστατικά, μόνωση καλωδίων Το TBBA είναι σήμερα το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο επιβραδυντικό φλόγας
Χλωροφθοράνθρακας (CFC)	Μονάδα ψύξης, αφρός μόνωσης
PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο)	Μόνωση καλωδίων
<b>Βαρέα και άλλα Μέταλλα:</b>	
Αρσενικό	Μικρές ποσότητες με τη μορφή αρσενικούχου γαλλίου σε διόδους εκπομπής φωτός
Βάριο	Getters στο CRT
Βηρύλλιο	Κουτιά τροφοδοσίας που περιέχουν ανορθωτές ελεγχόμενους με πυρίτιο και φακούς ακτίνων Χ
Κάδμιο	Επαναφορτιζόμενες μπαταρίες NiCd, φθορίζον στρώμα (οθόνες CRT), μελάνια και τόνερ εκτυπωτών, φωτοτυπικά μηχανήματα (τύμπανα εκτυπωτών)
Χρώμιο VI	Ταινίες δεδομένων, δισκέτες
Μόλυβδος	Οθόνες CRT, μπαταρίες, τυπωμένες κάρτες καλωδίωσης
Λίθιο	Μπαταρίες Λιθίου
Υδράργυρος	Οι λαμπτήρες φθορισμού που παρέχουν οπίσθιο φωτισμό σε οθόνες LCD, σε μερικές αλκαλικές μπαταρίες και σε υδραργυρεμένους διακόπτες
Νικέλιο	Επαναφορτιζόμενες μπαταρίες NiCd ή μπαταρίες NiMH
Σπάνιες γαίες (Υπριο, Ευρώπιο)	Φθορίζον στρώμα (οθόνη CRT)
Σελένιο	Παλαιότερα φωτοτυπικά μηχανήματα (τύμπανα φωτογραφιών)
Θειούχος ψευδάργυρος	Εσωτερικό των οθονών CRT, αναμειγμένο με μέταλλα σπάνιων γαιών
<b>Άλλα</b>	
Σκόνη τόνερ	Κασέτες γραφίτη για εκτυπωτές / φωτοαντιγραφικά λέιζερ
<b>Ραδιενεργές Ουσίες:</b> Αμερίκιο	Ιατρικός εξοπλισμός, ανιχνευτές πυρκαγιάς, ενεργό αισθητήριο στοιχείο σε ανιχνευτές καπνού

Εικόνα 5: Πίνακας επικίνδυνων στοιχείων σε Α.Η.Η.Ε. και που απαντώνται.



Ο πίνακας που ακολουθεί συνοψίζει τα δεδομένα για ορισμένα εξαρτήματα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Τα δεδομένα υποδεικνύουν ότι το περιεχόμενο των στοιχείων σε ένα συστατικό ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με συγκεκριμένους τύπους του εξαρτήματος και πιθανότατα και από τους κατασκευαστές.

Components	Ni	V	Co	As	Cl	Br	Be	Bi	Se	Sb	Sr	Pb
Wire insulators	-	-	-	0 / 25	55 800 / 281 766	-	-	0 / 306	-	0 / 21 700	55 / 140	0 / 59
Circuit board (plastic)	-	-	-	-	-	20 016 / 39 052	-	13 / 67	-	154 / 1 090	-	33 / 49
Circuit board (metal)	0 / 2 642	-	0 / 158	-	-	-	-	-	-	-	491 / 1 380	0 / 432
Solder from circuit boards	0 / 63 327	-	190 / 577	-	-	678 / 91 804	-	0 / 21	0 / 1 298	560 / 37 491	0 / 1 107	0 / 495 312
Lamp holder	-	-	-	-	0 / 390 743	0 / 62 551	-	0 / 98	0 / 69	0 / 3 887	0 / 122	0 / 54
Orange plastic	-	-	-	0 / 169	-	21 319 / 32 241	-	26 / 54	17 / 106	0 / 14 713	0 / 50	49 / 261
Frameplastic	0 / 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 / 10	-
Cover of relays	-	-	-	-	0 / 52 941	0 / 65 463	-	0 / 71	0 / 22	0 / 21 451	0 / 18	0 / 85
Cage plastic	-	-	-	-	-	0 / 681	-	4 / 5	-	156 / 233	0 / 7	-
Red glass	-	-	-	711 / 183 499	0 / 270 760	0 / 3 682	-	-	-	1,037 / 317 247	39 / 11 916	912 / 358 883
Yellow glass	-	-	-	883 / 1 037	-	1 / 2	-	-	-	1 285 / 1 837	21 / 27	61 / 75
Capacitor/condenser (plastic)	-	-	-	-	166 982 / 297 574	-	-	-	-	-	7 / 10	-
Core of the transformer	20 059 / 31 650	3 131 / 3 894	17 643 / 35 178	-	-	-	-	-	-	853 / 1 061	0 / 112	-

Εικόνα 6: Πίνακας δεδομένων της Φινλανδικής αρχής επιτήρησης αγοράς Tukes σχετικά με εξαρτήματα ΑΗΗΕ από μικρές οικιακές συσκευές και εξοπλισμό φωτισμού. Η μέτρηση έγινε με ανάλυση XRF. Τα αποτελέσματα για τα στοιχεία υποδεικνύονται ως min/maxx ppm (Hazardous Substances Report 2008)

## 1.5 Περιβαλλοντικοί Κίνδυνοι

Για την αποφυγή περιβαλλοντικών μολύνσεων καθώς και αρνητικών επιδράσεων στην ανθρώπινη υγεία απαιτείται ιδιαίτερη μεταχείριση και ειδικός τρόπος ανακύκλωσης των ΑΗΗΕ. Η πολυπλοκότητα, τα υψηλά κόστη εργασίας καθώς και οι αυστηροί περιβαλλοντικοί κανονισμοί οδηγούν σε απόρριψη των ΑΗΗΕ με υγειονομική ταφή και χωρίς ανακύκλωση ή εξαγωγή τους σε αναπτυσσόμενες χώρες όπου η διαχείριση τους γίνεται σε υποδεέστερες συνθήκες των προβλεπόμενων. Η απόρριψη ή ανακύκλωση χωρίς έλεγχο των ΑΗΗΕ έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που επιστούν την προσοχή των πολιτών, κυβερνήσεων, περιβαλλοντικών οργανώσεων όπως η Greenpeace, το δίκτυο Basel Action, της Silicon Valley Toxics Coalition καθώς και της επιστημονικής κοινότητας. Αιτίες εμφάνισης μολύνσεων είναι η καύση πλαστικών σε ανοιχτό χώρο, η ανεξέλεγκτη ταφή καθώς και η έκθεση σε τοξικές ουσίες των αποσυναρμολογημένων μετάλλων.



επίδρασης στο περιβάλλον του ΗΗΕ όταν αυτο φτάνει στο τέλος της χρήσιμης ζωής του, ωθώντας τους κατασκευαστές σε αντικατάσταση των ουσιών αυτών από ουσίες που δεν προκαλούν περιβαλλοντικά προβλήματα κατά τη διάρκεια της διάθεσης και ανακύκλωσης των ΑΗΗΕ.

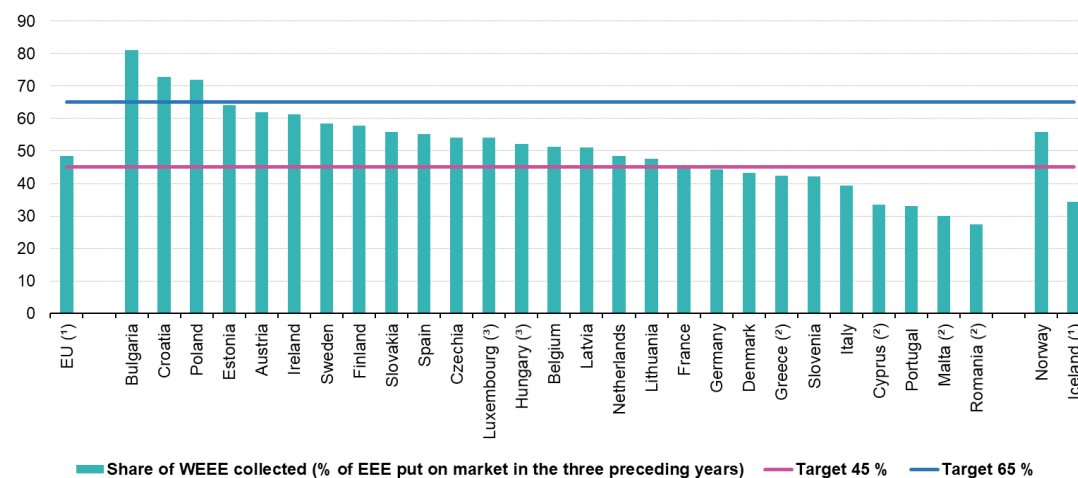
## **1.6 Νομοθετικό Πλαίσιο**

Με στόχο τον περιορισμό του όγκου των ΑΗΗΕ καθώς και τη διαχείριση και τον έλεγχο του έχει θεσπιστεί ένας αριθμός Οδηγιών στην ΕΕ αλλά και παγκοσμίως. Για τα κράτη μέλη είναι απαραίτητη η προσαρμογή της εκάστοτε νομοθεσίας ώστε να εφαρμόζεται η Οδηγία 2011/65/ΕΕ. η οποία αναφέρεται στα ΑΗΗΕ. Η ευθύνη του παραγωγού (Extended Producer Responsibility- EPR) που βασίζεται στην Οδηγία υποχρεώνει τους κατασκευαστές να χρηματοδοτήσουν την επιστροφή των ΑΗΗΕ (ταξινομημένα σε 10 κατηγορίες) από τους καταναλωτές για τη διασφάλιση της ασφαλούς απόρριψής τους. Μεσω της νομοθεσίας προωθείται η επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση και εναλλακτικές μορφές ανάκτησης υλικών καθώς και η ευθύνη του ανεξάρτητου παραγωγού (Independent Producer Responsibility- IPR). Στόχο αποτελεί η βελτίωση του δείκτη περιβαλλοντικής απόδοσης (Environmental Performance Index-EPI) των διαχειριστών που εμπλέκονται στον κύκλο ζωής του ΗΗΕ, όπως παραγωγοί, διανομείς και καταναλωτές εστιάζοντας κυρίως στη διαχείριση των ΑΗΗΕ. Η Οδηγία κατατάσσει τα προϊόντα σε 10 κατηγορίες καλύπτοντας εύρος 100 προϊόντων.

Η Οδηγία θεσπίζει κανόνες βάσει της αρχής «ο ρυπαίνων πληρώνει» (EPR). Αυτό σημαίνει ότι μια εταιρεία που προκαλεί περιβαλλοντική ζημία ευθύνεται για αυτή και πρέπει να λάβει τα αναγκαία μέτρα πρόληψης ή αποκατάστασης και να επωμιστεί όλες τις σχετικές δαπάνες. Οι κανόνες αυτοί δίνουν κίνητρο στις εταιρείες για το σχεδιασμό προϊόντων που ελαχιστοποιούν το κόστος καταπολεμώντας ταυτόχρονα τη ρύπανση που προκαλείται από την εναπόθεση ΑΗΗΕ στο περιβάλλον. Σε κάθε κράτος-μέλος της ΕΕ υπάρχει ετήσιος στόχος συλλογής 4 kg οικιακών ΑΗΗΕ ανα άτομο όμως σύμφωνα με μετρήσεις μόνο το  $\frac{1}{3}$  των παραγόμενων ΑΗΗΕ συλλέγεται και μπορεί να διαχειριστεί επαρκώς ενώ το συντριπτικό ποσοστό εξάγεται σε αναπτυσσόμενες χώρες όπου δε γίνεται επαρκής διαχείρισή του. Το υπόλοιπο ποσοστό συχνά εξάγεται παράνομα και εκτιμάται πως επεξεργασία του ή/και υγειονομική ταφή του πραγματοποιείται εκτός ΕΕ.

### Total collection rate for waste electrical and electronic equipment (EEE), 2019

(% of the average weight of EEE put on the market in the three preceding years (2016-2018))



(\*) Eurostat estimate.

(2) Data on collection 2018 instead of 2019; % of average weight of EEE put on the market in years 2015-2017.

(2) 65 % target not applicable, since Luxembourg and Hungary have chosen the calculation methodology based on share of WEEE generated. See Figure 2b.

Source: Eurostat (online data code: env\_waseleeeos and env\_waselee)

eurostat

Εικόνα 8: Συνολικό ποσοστό συλλογής ΑΗΗΕ, 2019 (% του μέσου βάρους ΗΗΕ που διατέθηκε στην αγορά τα τρία προηγούμενα έτη (2016-2018))

Η αναθεώρηση της Οδηγίας 2002/95/ΕΚ, πλέον Οδηγία 2011/65/ΕΕ τροποποιημένη κατ' εξουσιοδότηση (ΕΕ) 2021/1980, αποτελεί αντικείμενο συζήτησης για την Ευρωπαϊκή Επιτροπή ως προς την αλλαγή του στόχου συλλογής ώστε να προσαρμόζεται στις οικονομικές δυνατότητες των κρατών μελών. Ως νέος στόχος τίθεται η συλλογή ΑΗΗΕ τα οποία αποτελούν το 65% του βάρους του ΗΗΕ που εισήχθη στην αγορά τα δύο προηγούμενα έτη. Η παλαιότερη Οδηγία 2002/95/ΕΚ που βρισκόταν σε εφαρμογή από το Φεβρουάριο του 2003 αφορά τον περιορισμό της χρήσης επικίνδυνων ουσιών στον ΗΗΕ και συγκεκριμένα την προώθηση, συλλογή και ανακύκλωση ΑΗΗΕ. Εν έτη 2022 η τροποποίηση (ΕΕ) 2021/1980 δεν έχει μεταβάλλει σημαντικά το περιεχόμενο της Οδηγίας από την αρχική της μορφή. Αντίστοιχες νομοθεσίες βρίσκονται σε εφαρμογή παγκοσμίως ενώ θεσπίζονται σε χώρες οι οποίες δεν τις διαθέτουν. Με στόχο την αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης του ΗΗΕ, με αρχή την ΕΕ θεσπίστηκε ένα σύστημα συλλογής “στην πηγή”, κατα το οποίο οι καταναλωτές μπορούν να επιστρέψουν δωρεάν συσκευές που έχουν χρησιμοποιηθεί. Η Οδηγία RoHS (Οδηγία 2002/95/ΕΚ) απαιτεί τα βαρέα μέταλλα που χρησιμοποιούνται ακόμη στη βιομηχανία όπως μόλυβδος, υδράργυρος, κάδμιο, εξασθενές χρώμιο και επιβραδυντές φλόγας όπως PBBs ή PBDEs να αντικατασταθούν από λιγότερες επιβλαβείς εναλλακτικές στον ΗΗΕ.

Στη Οδηγία 2012/19/ΕΥ για τα ΑΗΗΕ που έχει θεσπιστεί έχουν οριστεί νέοι στόχοι για τη συλλογή ΑΗΗΕ. Μετα το 2019 στόχος είναι το 85% των ΑΗΗΕ που παράγονται να συλλέγεται ξεχωριστά, με υπολογισμούς της τάξης των 10 εκ. τόνων ή 20kg ανα άτομο. Μέχρι το 2023 εκτιμάται ότι ο όγκος των ΑΗΗΕ θα αυξηθεί στους 12 εκ. τόνους. Η νέα Οδηγία θα δώσει στα κράτη μέλη της ΕΕ τα εργαλεία για την

αποτελεσματικότερη καταπολέμηση της παράνομης εξαγωγής των ΑΗΗΕ που μέχρι σήμερα συγκαλύπτονται ως νόμιμες μεταφορές χρησιμοποιημένου εξοπλισμού. Η νέα Οδηγία επίσης θα εξαναγκάσει τους εξαγωγείς να καταθέτουν πιστοποιημένα έγγραφα για το είδος των μεταφορών που κάνουν (European Commission, 2012).

## **1.7 Νομοθεσία και Διαχείριση ΑΗΗΕ στην Ελλάδα - Αναθεώρηση βάση ΕΟΑΝ**

Το ζήτημα διαχείρισης των ΑΗΗΕ στην Ελλάδα καλύπτεται μέσω συνδιασμού συγκεκριμένων νομοθεσιών που αναφέρονται σε διαχείριση ΑΗΗΕ και Οδηγιών επιτρεπόμενων ορίων χρήσης υλικών. Συγκεκριμένα ενώ οι Οδηγίες RoHS & REACH θέτουν όρια, δεν αναφέρονται σε διαχείριση ΑΗΗΕ. Ταυτόχρονα με την Ελληνική νομοθεσία ακολουθούνται Ευρωπαϊκοί κανονισμοί και Οδηγίες καθώς και Οδηγίες της WEEELABEX η οποία αποτελεί Ευρωπαϊκό φορέα ο οποίος εκδίδει Οδηγίες διαχείρισης ΑΗΗΕ. Ο Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης είναι ο αρμόδιος φορέας του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (πρώην Υ.Π.Ε.Κ.Α.) για το σχεδιασμό και την εφαρμογή της πολιτικής για την ανακύκλωση στην Ελλάδα. Είναι υπεύθυνος για την έγκριση των εθνικών συστημάτων εναλλακτικής διαχείρισης ανά προϊόν, καθώς και για τον έλεγχο της προόδου της Ελλάδας στον τομέα της ανακύκλωσης. Μια από τις σημαντικότερες νομοθεσίες που αναλαμβάνει τον καθορισμό κανόνων, όρων και προϋποθέσεων για την εναλλακτική διαχείριση ΑΗΗΕ είναι η Αριθ. Η.Π. 23615/651/Ε.103 με ημερομηνία έκδοσης τις 9 Μαΐου 2014, η οποία αντικατέστησε το παλαιότερο ΠΔ 117.

Η ετήσια παραγωγή ΑΗΗΕ στην Ελλάδα εκτιμάται στους 189 kt ετησίως (Global E-waste Monitor 2017). Τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού έχουν προσδιοριστεί από την ελληνική νομοθεσία ως ρεύμα αποβλήτων προτεραιότητας, λόγω της επικινδυνότητάς τους, της ταχείας αύξησης του όγκου τους και των σημαντικών επιπτώσεων που προκαλεί η παραγωγή του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού στο περιβάλλον (Ελληνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης, 2019).

Η ευρωπαϊκή οδηγία, που ενσωματώθηκε στο ελληνικό δίκαιο από το Μάιο του 2014, ορίζει ότι από το 2016 η ποσότητα που οφείλει να συγκεντρώνει και να ανακυκλώνει κάθε κράτος-μέλος ανέρχεται στο 45% του μέσου όρου του βάρους των συσκευών που αγοράστηκαν την αμέσως προηγούμενη τριετία. Το 2019 το ποσοστό αυτό θα πρέπει να έχει φτάσει στο 65%, ενώ αυξάνονται αντίστοιχα και κατά 5% οι ποιοτικοί στόχοι. Μέχρι και το 2015 οι εθνικοί στόχοι περιελάμβαναν τη χωριστή συλλογή τουλάχιστον 4 kg ΑΗΗΕ οικιακής προέλευσης κατά μέσο όρο ανά κάτοικο και ανά έτος. (Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε. 2019) Οι ποσοτικοί στόχοι για την ανακύκλωση και προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση ΑΗΗΕ κυμαίνονται μεταξύ 50-80%, ανάλογα με την κατηγορία του εξοπλισμού, ενώ για την ανάκτησή τους τα ποσοστά κυμαίνονται μεταξύ 70-80% (ε.ο.αν. 2022).

Η ευθύνη για την οργάνωση της χωριστής συλλογής και αξιοποίησης των ΑΗΗΕ επιβάλλεται στους παραγωγούς ΗΗΕ , δηλαδή σε κάθε φυσικό ή νομικό πρόσωπο που διαθέτει στην ελληνική αγορά προϊόντα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, ανεξάρτητα από τη χώρα προέλευσης τους, είτε αυτά προορίζονται για οικιακή (Business to Consumer- B2C) είτε για επαγγελματική χρήση (Business to Business- B2B). Υποχρεωμένοι να συμμετέχουν στο σύστημα είναι δύο επαγγελματικές κατηγορίες, οι παραγωγοί και οι διακινητές (διανομείς) ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. (ΥΠΕΚΑ) Παράδειγμα αποτελεί η εταιρεία Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε. η οποία είναι εγκεκριμένος φορέας από τον ΕΟΑΝ, για την οργάνωση, τη λειτουργία και τον έλεγχο του Συλλογικού Συστήματος Εναλλακτικής Διαχείρισης των Αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) στην Ελλάδα. Εγκρίθηκε ως Συλλογικό Σύστημα Εναλλακτικής Διαχείρισης Αποβλήτων Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) τον Ιούνιο του 2004 και έλαβε ανανέωση της έγκρισης με απόφαση του ΕΟΑΝ. Αντικείμενο της εταιρείας είναι η εναλλακτική διαχείριση ΑΗΗΕ, δηλαδή η συλλογή, η μεταφορά, η προσωρινή αποθήκευση, ο διαχωρισμός και η επεξεργασία των ΑΗΗΕ και των κατασκευαστικών τους στοιχείων, με τελικό στόχο την απομάκρυνση των επιβλαβών για το περιβάλλον ουσιών και την επανένταξη των αξιοποιήσιμων υλικών ως πρώτη ύλη στην παραγωγή νέων προϊόντων. Σήμερα το δίκτυο συλλογής της Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε καλύπτει περισσότερο από το 90% του πληθυσμού της χώρας και εξυπηρετεί όλες τις αστικές και ημιαστικές περιοχές της χώρας μας, συμπεριλαμβανομένων των περισσότερων νησιών. Σημαντικό μέρος της συλλογής ΑΗΗΕ προέρχεται από εμπόρους παλαιών μεταλλικών απορριμμάτων, οι οποίοι έχουν συνάψει σύμβαση με το σύστημα. Με την Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε συνεργάζονται επίσης πολλές ιδιωτικές επιχειρήσεις και δημόσιοι οργανισμοί. Οι συσκευές που συγκεντρώνονται προέρχονται από την απόσυρση πάγιου ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, επαγγελματικών μηχανημάτων, καθώς και οικιακών συσκευών υπαλλήλων. Το δίκτυο της Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε περιλαμβάνει σήμερα συνολικά περισσότερα από 13,000 σημεία συλλογής. (Ανακύκλωση Συσκευών ΑΕ, 2019).

Για το νομοθετικό εναρμονισμό της Ελλάδας με τις ανωτέρω Ευρωπαϊκές Οδηγίες θεσπίστηκαν ειδικές νομοθετικές διατάξεις:

- Νόμος 2939/6-8-2001 για τις «συσκευασίες και εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων - Ίδρυση Εθνικού Οργανισμού Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και Άλλων Προϊόντων (ΕΟΕΔΣΑΠ) και άλλες διατάξεις» με τρέχουσα ενοποιημένη έκδοση το 22.10.2021. Αυτός ο νόμος χαρακτηρίζεται ως βασικό νομοθετικό πλαίσιο, που ρυθμίζει την εναλλακτική διαχείριση των ΑΗΗΕ σε εθνικό επίπεδο.
- ΠΔ 117/2004 (ΦΕΚ 82 Α) «Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις των Οδηγιών 2002/95 & 2002/96»
- ΠΔ 15/2006 (ΦΕΚ 12 Α), Τροποποίηση ΠΔ 117/2004
- ΥΑ αρ.οικ. 133480, Τροποποίηση ΠΔ 117/2004

Σκοπός του Προεδρικού Διατάγματος είναι η εκτέλεση των άρθρων 15 έως 18 καθώς και το άρθρο 24 του Ν. 2939/01. Όπως ορθά έχει προβλεφθεί, η πρόληψη εξολοκλήρου είναι κρισιμότερη της ανακύκλωσης. Σύμφωνα με το Διάταγμα προβλέπονται επίσης τρόποι εναλλακτικής διαχείρισης των ΑΗΗΕ όπως η εκμετάλλευσή τους σε διαφορετικές εφαρμογές της αρχικής τους χρήσης αλλά και οι κανονισμοί στους οποίους οι εφαρμογές θα υπάγονται. Κατ'αυτόν τον τρόπο κρίνεται ότι θα μειωθεί η διατιθέμενη ροή ΑΗΗΕ. Το Διάταγμα επιπλέον διευθετεί τις υποχρεώσεις του συνόλου των φορέων που λαμβάνουν μέρος σε όλες τις διαδικασίες που συντελούν στην παραγωγή ΑΗΗΕ όπως τους κατασκευαστές τεχνολογικού εξοπλισμού, την εφοδιαστική αλυσίδα, τις πωλήσεις, τον καταναλωτή και τους φορείς διαχείρισης των ΑΗΗΕ. Το Προεδρικό Διάταγμα 117/2004, εναρμονισμένο με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες καθορίζει τις ακόλουθες αρχές της εναλλακτικής διαχείρισης των ΑΗΗΕ:

- Εκ των προτέρων πρόληψη της παραγωγής ΑΗΗΕ. Μικρότερες ροές αποβλήτων εξ αρχής αντιστοιχούν σε χαμηλότερη ποσότητα ρυπογόνων ουσιών, των οποίων η ασφαλής διαχείριση μπορεί να πραγματοποιηθεί με μεγαλύτερη ευκολία. Για την αποφυγή ρύπανσης του περιβάλλοντος προβλέπεται η ανάκτηση των χρήσιμων πρώτων υλών που τα ΑΗΗΕ διαθέτουν, προσθέτοντας αξία στη διαδικασία της ανακύκλωσης.
- Η αρχή “ο ρυπαίνων πληρώνει”
- Η ενημέρωση του κοινού για τα μέτρα εναλλακτικής διαχείρισης των ΑΗΗΕ καθώς και η συμπερίληψή τους στην παιδεία, ώστε τόσο οι νεότερες γενιές όσο και ο σύγχρονος καταναλωτής να έχει τη γνώση για να συμβάλει και αυτός στην πρόληψη αλλά και την ανακύκλωση.
- Η δέσμευση του συνόλου των φορέων που συντελούν στην παραγωγή αλλά και τη διαχείριση των ΑΗΗΕ ως υπεύθυνοι για τη διαδικασία.

Η Οδηγία RoHS συντελεί στην πρόληψη της παραγωγής ΑΗΗΕ που εμπεριέχουν ρυπογόνα υλικά καθώς απαγορεύει τη χρήση αυτών. Οι παραγωγοί οφείλουν να μειώσουν τη χρήση επικίνδυνων και ρυπογόνων ουσιών αντικαθιστώντας τα με εναλλακτικές με μικρότερο ή μηδενικό αντίκτυπο στο περιβάλλον αλλά και την υγεία. Ο σχεδιασμός των ΗΗΕ οφείλει να πραγματοποιείται και με γνώμονα την τελική της απόρριψη. Η διευκόλυνση της αποσυναρμολόγησής τους θα βελτιώσει τη διαδικασία ανακύκλωσης. Η αύξηση του χρόνου ζωής του εξοπλισμού θα μειώσει επίσης την ποσότητα των ροών ΑΗΗΕ. Σχεδιασμός με γνώμονα την επισκευή ή και βελτίωση των δυνατοτήτων τους αντι της πλήρους αντικατάστασής τους θα εξυπηρετούσε περαιτέρω αυτόν το σκοπό. Σε περίπτωση που αυτο δεν είναι εφικτό, εξαρτήματα ή οι πρώτες ύλες που προκύπτουν από την ανακύκλωσή τους μπορούν να αξιοποιηθούν κατά την παραγωγή νεότερου εξοπλισμού.

Το τελικό κόστος της ανακύκλωσης των ροών ΑΗΗΕ αναλαμβάνουν οι κατασκευαστές, όπως αυτό ορίζεται από την αρχή “ο ρυπαίνων πληρώνει” του Προεδρικού Διατάγματος 117/2004. Αυτό είναι φυσικό επακόλουθο της διαδικασίας παραγωγής αλλά και της τελικής κατάληξης του εξοπλισμού ως απόβλητο καθώς κάθε παραγωγός οφείλει να επωμίζεται τις συνέπειες της τελικής απόληξης των προϊόντων που παράγει εφόσον επωφελείται αυτών. Έτσι το σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης ΑΗΗΕ, σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Οδηγίες θα έχει την ικανότητα διαχείρισης των ευθυνών των κατασκευών για την διαχείριση των ΑΗΗΕ. Το σύστημα συμπεριλαμβάνει και την εφοδιαστική αλυσίδα του εξοπλισμού και επεκτείνεται στη διαχείριση των ΑΗΗΕ του ελληνικού δημοσίου. Συμμετοχή στη διαχείριση είναι υποχρεωμένος να έχει και ο μέσος καταναλωτής. Με τη γνωστοποίηση των μέτρων ανακύκλωσης κάθε πολίτης θα γνωρίζει για τη σωστή διευθέτηση των ΑΗΗΕ. Υπ ευθύνη των δήμων βρίσκεται η δωρεάν διάθεση ειδικών κάδων απόρριψης ΑΗΗΕ, οι οποίοι τοποθετούνται σε προκαθορισμένα σημεία, όπως καταστήματα πώλησης Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού. Βάση των Οδηγιών, η περισυλλογή, προσωρινή αποθήκευση καθώς και η μεταφορά τους οφείλει να πραγματοποιείται ξέχωρα των λοιπών αποβλήτων.

Σύμφωνα με την προαναφερόμενη Οδηγία RoHS (2002/95/EK), τα ΗΗΕ απαγορεύεται να περιέχουν PBDE, PBB, Χρώμιο VI, Υδράργυρο, Κάδμιο ή Μόλυβδο. Σε αυτόν τον κανονισμό περιέχεται οι λάμπες καθώς και σύσσωμος ο εξοπλισμός, πέραν των κατηγοριών 8 και 9. Κατα τη διαχείριση των ΑΗΗΕ είναι υποχρεωτική η απομάκρυνση ρευστών, ρυπογόνων εξαρτημάτων και υλών ώστε να είναι εφικτή ειδική επεξεργασία τους. Κατα την ανάκτηση των χρήσιμων και πολύτιμων υλών καθώς και όλων των διαδικασιών της ανακύκλωσης υποχρεωτικά πρέπει εφαρμόζεται το νομοθετικό πλαίσιο για την προστασία του περιβάλλοντος καθώς και της ανθρώπινης υγείας (ε.ο.α.ν. 2022; Electrocycle 2022; e-nomothesia).

#### **ΚΥΑ/ΥΠΕΝ/ΔΔΑ/81492/1650**

Ενσωμάτωση της Οδηγίας (ΕΕ) 2018/849 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 30ής Μαΐου 2018, για την τροποποίηση των οδηγιών 2000/53/EK για τα οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους, 2006/66/EK σχετικά με τις ηλεκτρικές στήλες και τους συσσωρευτές και τα απόβλητα ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών, και 2012/19/ΕΕ σχετικά με τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

#### **ΚΥΑ ΥΠΕΝ/ΔΔΑ/81492/1651**

Ενσωμάτωση της Οδηγίας (ΕΕ) 2018/849 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 30ής Μαΐου 2018, για την τροποποίηση των οδηγιών 2000/53/EK για τα οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους, 2006/66/EK σχετικά με τις ηλεκτρικές στήλες και τους συσσωρευτές και τα απόβλητα ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών, και 2012/19/ΕΕ σχετικά με τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού.



## **KYA ΥΠΕΝ/ΔΔΑ/81490/1650**

Ενσωμάτωση της Οδηγίας (ΕΕ) 2018/849 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 30ής Μαΐου 2018, για την τροποποίηση των οδηγιών 2000/53/ΕΚ για τα οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους, 2006/66/ΕΚ σχετικά με τις ηλεκτρικές στήλες και τους συσσωρευτές και τα απόβλητα ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών, και 2012/19/ΕΕ σχετικά με τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

## **KYA Η.Π.23615/651/Ε.103 (ΦΕΚ 1184/Β/9-5-2014)**

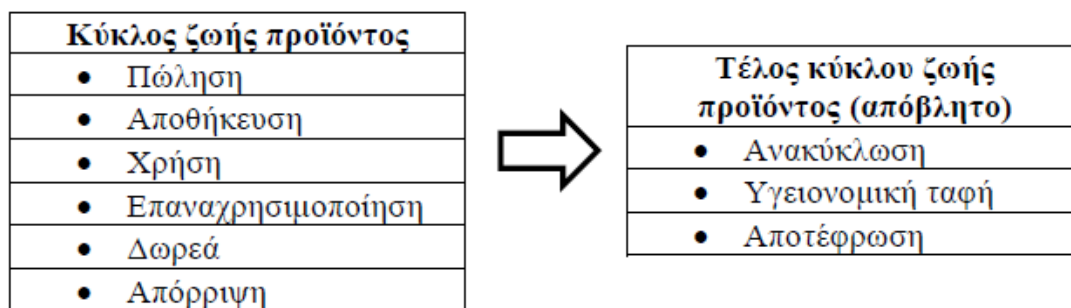
Καθορισμός κανόνων, όρων και προϋποθέσεων για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ), σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της Οδηγίας 2012/19/ΕΚ «Σχετικά με τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ)», του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 4ης Ιουλίου 2012 και άλλες διατάξεις.

Σχετικές νομοθετικές διατάξεις διαχείρισης και ανακύκλωσης ΑΗΗΕ:

- Ν. 4257 (ΦΕΚ 93/Α/14-4-2014)  
Επείγουσες ρυθμίσεις αρμοδιότητας Υπουργείου Εσωτερικών - Ειδικότερα το άρθρο 64
- Εγκύκλιος ΥΠΕΝ οικ. 11560/22-2-2013  
Διαχείριση υπολείμματος που προκύπτει από τον τεμαχισμό SHREDDER (ΟΤΚΖ, ΑΗΗΕ)
- ΥΑ αρ.οικ. 133480 (ΦΕΚ 2711/Β/15-11-2011)  
Τροποποίηση του Παραρτήματος ΙΒ του ΠΔ 117/2004
- ΠΔ 15/2006 (ΦΕΚ 12/Α/3-2-2006)  
Τροποποίηση του Προεδρικού Διατάγματος 117/2004 (Α' 82), σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 2003/108 «για την τροποποίηση της οδηγίας 2002/96 σχετικά με τα απόβλητα ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ)» του Συμβουλίου της 8ης Δεκεμβρίου 2003
- ΠΔ 117/2004 (ΦΕΚ 82/Α/5-3-2004)  
Μέτρα, όροι και πρόγραμμα για την εναλλακτική διαχείριση των αποβλήτων ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, σε συμμόρφωση με τις διατάξεις των Οδηγιών 2002/95 & 2002/96

## ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΗΗΕ

Μεγάλο μέρος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αντιμετωπίζονται προκαλούνται από ακατάλληλη διαχείριση των ΑΗΗΕ, όπως αυτή εφαρμόζεται από ανεπίσημους φορείς κατά την ανακύκλωση και ανάκτηση των πολύτιμων συστατικών τους. Πριν ένα προϊόν φτάσει στο τέλος της ζωής του είναι δυνατό να επαναχρησιμοποιηθεί, μειώνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο το ρυθμό παραγωγής ΑΗΗΕ. Με στόχο τη μείωση του αυξανόμενου ρυθμού παραγωγής ΑΗΗΕ μια προτεινόμενη ακολουθία για τον ΗΗΕ είναι: Μείωση παραγωγής ΗΗΕ (συγκέντρωση, λιγότερα προϊόντα, συντήρηση), επαναχρησιμοποίηση (δωρίζοντας ή πουλώντας για περαιτέρω χρήση, επισκευή) και τέλος ανακύκλωση (μη λειτουργικά προϊόντα). Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει τις διάφορες επιλογές για τον κύκλο ζωής του τυπικού ΗΗΕ όπως Η/Υ και κινητά τηλέφωνα όταν φτάσουν στο τέλος ζωής τους (Tanskanen, 2013).



Εικόνα 9: Διάφορες επιλογές για τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος και όταν φτάσει στο τέλος της ζωής του (Tanskanen, 2013)

Ένα προϊόν μπορεί κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του να ανήκει σε έναν ή περισσότερους χρήστες καθώς πωλείται, μεταπωλείται ή δωρίζεται. Ο λειτουργικός ΗΗΕ που δεν είναι ωφέλιμος για ένα χρήστη μπορεί να διαθέτει αξία για άλλους χρήστες και να επαναχρησιμοποιηθεί. Κατά αυτόν τον τρόπο η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού παρατείνεται με την χρήση του σε δευτερεύουσες αγορές έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου της ροής των αποβλήτων. Η επαναχρησιμοποίηση είναι μια προτιμητέα εναλλακτική διαφόρων μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων καθώς εξοικονομείται ενέργεια και πρώτες ύλες που θα χρησιμοποιούνταν κατά την παραγωγή συσκευών που θα τις αντικαθιστούσαν. Ο χρησιμοποιημένος εξοπλισμός μπορεί να ανακατασκευαστεί μέσω μιας διαδικασίας αποσυναρμολόγησης, καθαρισμού, επισκευής και επανασυναρμολόγησης. Με τη ελάττωση τόσο της ανάγκης παραγωγής ΗΗΕ καθώς και του παραγόμενου ΑΗΗΕ υπάρχει μείωση των περιβαλλοντικών δαπανών όσων αφορά τη διάθεση των αποβλήτων.

## 2.1 Συμβατικές Μέθοδοι Διαχείρισης Αποβλήτων

Η διαχείριση των ΑΗΗΕ πραγματοποιείται σε σημαντικό ποσοστό με το συμβατικό τρόπο καύσης των αστικών αποβλήτων. Αυτή η μέθοδος δεν είναι ιδανική για τη διαχείριση των ΑΗΗΕ καθώς απελευθερώνονται επικίνδυνες ουσίες στο περιβάλλον. Η καύση των ΑΗΗΕ πραγματοποιείται σε ειδικές εγκαταστάσεις όπου με υψηλές θερμοκρασίες λαμβάνεται ως αποτέλεσμα η ελάττωση του όγκου τους (εως 90%) καθώς και η ελάττωση του βάρους τους (κατά 70%) ενώ επιτυγχάνεται και κάποια ανάκτηση ενέργειας. Παρολαυτα η μέθοδος διαθέτει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, καθώς συμβάλλει στην απελευθέρωση τοξικών ρύπων στην ατμόσφαιρα (υδράργυρος, κάδμιο, διοξίνες, φουράνια) και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (με την αύξηση του CO<sub>2</sub>) (Cui and Zhang, 2008).

Μια ακόμη διαδεδομένη μέθοδος διαχείρισης αποβλήτων αποτελεί η ταφή των ΑΗΗΕ σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ), λόγω της προσβάσιμης τεχνολογίας που απαιτείται καθώς και της μικρής δαπάνης για υποδομές και λειτουργίες. Πρόκειται για χώρους υπεδάφιους ή επιεδάφιους, κατάλληλα διαμορφωμένους για την εναπόθεση στερεών αποβλήτων και των προϊόντων αποσύνθεσής τους με ελέγχους έως ότου να κατασταθούν μη επικίνδυνα για το περιβάλλον και την δημόσια υγεία. Πρόβλημα σε αυτή τη μέθοδο υφίστανται όταν η ταφή των αποβλήτων γίνεται ανεξέλεγκτα, χωρίς προεργασία, διαδικασία που οδηγεί σε Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ).

## 2.2 Ανακύκλωση

### 2.2.1 Ορισμός

Ανακύκλωση είναι η διαδικασία συλλογής, επεξεργασίας και επαναφοράς υλικών που αποτελούν απόβλητα στην παραγωγική διαδικασία. Κατά την ανακύκλωση είναι δυνατή η διάσωση ενός υλικού το οποίο διατηρεί την αξία που διέθετε παρότι έχει φαινομενικά χάσει τις αρχικές του ιδιότητες, καθώς μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Επομένως αντί της απόρριψής του στο περιβάλλον, αυτό μπορεί με τις κατάλληλες διεργασίες να μετατραπεί στα ακατέργαστα υλικά που το συντήθουν και να εισαχθεί εκ νέου στην παραγωγική διαδικασία της αγοράς χωρίς την περαιτέρω επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Τα απόβλητα ΗΗΕ αποτελεί μια δύσκολα διαχειρίσιμη ροή και συντελεί σε πλήθος προβλημάτων τόσο περιβαλλοντικών όσο και άμεσης επιρροής στην ανθρώπινη υγεία. Η διαχείριση της ροής αυτής είναι το μείζον θέμα το οποίο συμπεριλαμβάνει τη συλλογή καθώς και την προσωρινή αποθήκευση των ΑΗΗΕ σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Η χρήση εκ νέου των αξιοποιήσιμων αλλά και πολύτιμων υλών που περιέχονται στα ΑΗΗΕ συμβάλλει και στην ελάττωση του τελικού όγκου της ροής. (Lixandru et al., 2017). Στις μεθόδους επεξεργασίας απορριμμάτων ανήκουν οι ακόλουθοι:

- Κομποστοποίηση (λιπασματοποίηση)
- Υγειονομική ταφή (απόθεση)
- Ανακύκλωση
- Ανάκτηση ενέργειας από ακατέργαστα υλικά
- Καύση

### 2.2.2 Ανακύκλωση Υλικά

Τα υλικά των οποίων η ανακύκλωση είναι δυνατή:

- Όλες οι κατηγορίες χαρτιού
- Οργανικά απορρίμματα (Υπολείμματα τροφών, γενικά οικιακά απορρίμματα, υπολείμματα κηποτεχνίας κ.α.)
- Ανόργανα απορρίμματα (μεταλλικά, γυάλινα, πλαστικά κ.α.)
- Απορρίμματα στερεάς μορφής
- Απορρίμματα υγρής μορφής
- Οργανικά μη υδατοδιαλυτά απόβλητα (καύσιμα όπως η βενζίνη, το πετρέλαιο και κηροζίνη, λιπαντικά μηχανημάτων, ελαιοχρώματα κ.α.)
- Ρυπογόνα απόβλητα (προκύπτοντα απόβλητα κατά τη διαδικασία διύλισης και μεταφοράς πετρελαίου κ.α.)
- Συσκευαστικά Προϊόντα, Υλικά περιτυλίγματος
- Ηλεκτρονικός και ηλεκτρικός εξοπλισμός (Εξοπλισμός ηλεκτροδότησης όπως πυλόνες και ηλεκτρικοί συσσωρευτές, εξοπλισμός φωτισμού, οικιακός εξοπλισμός παντός μεγέθους, τηλεπικοινωνιακός και πληροφοριακός εξοπλισμός)
- Κατασκευαστικά απορρίμματα (ανοικοδομήσεων, κατεδαφίσεων, χωματοουργικών εργασιών)

Στα πλεονεκτήματα ανακύκλωσης ανήκουν:

- Συμβολή στην πρόοδο της ελληνικής Οικονομίας
- Μείωση των τιμών της αγοράς
- Συρρίκνωση της ποσότητας των αποβλήτων
- Προστασία του περιβάλλοντος
- Δημιουργία νέων ευκαιριών για εργαζόμενους
- Επαναξιοποίηση των χρήσιμων και πολύτιμων υλικών στην αγορά
- Εξοικονόμηση ενέργειας

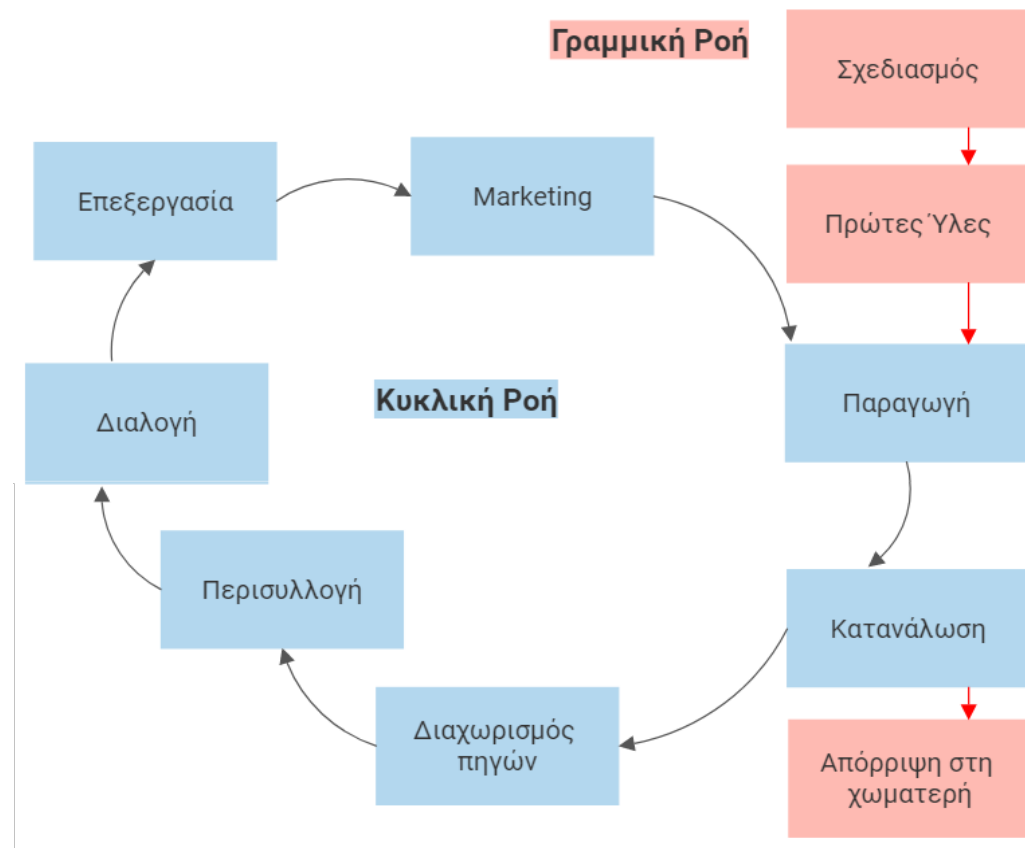
### 2.3 Ανακύκλωση ΑΗΗΕ

Η καύση και η υγειονομική ταφή αποτελούν έσχατη λύση συγκριτικά με την επαναχρησιμοποίηση και την ανάκτηση μέσω ανακύκλωσης. Κατά τη διαδικασία της ανακύκλωσης τα απόβλητα μέσω επεξεργασίας επιστρέφονται στον αξιοποιήσιμο κύκλο των υλικών. Επιτυχημένη ανακύκλωση επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων υλικών που περιέχονται στα ΑΗΗΕ και τη μετατροπή τους σε δευτερογενή πρώτη ύλη για χρήση τους εκ νέου σε προϊόντα. Οικονομική εφαρμογή αυτής της διαδικασίας οδηγεί σε εξοικονόμηση υλικών αλλά και ενέργειας, μείωση τόσο ρύπανσης που προκαλούν τα ίδια τα ΑΗΗΕ αλλά και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία της καύσης τους. Η ανακύκλωση μπορεί να είναι οικονομικά συμφέρουσα όταν τα προϊόντα περιέχουν σημαντικά ποσά πολύτιμων υλικών, η ανάκτηση των οποίων αντισταθμίζει σημαντικά το κόστος της διεργασίας.

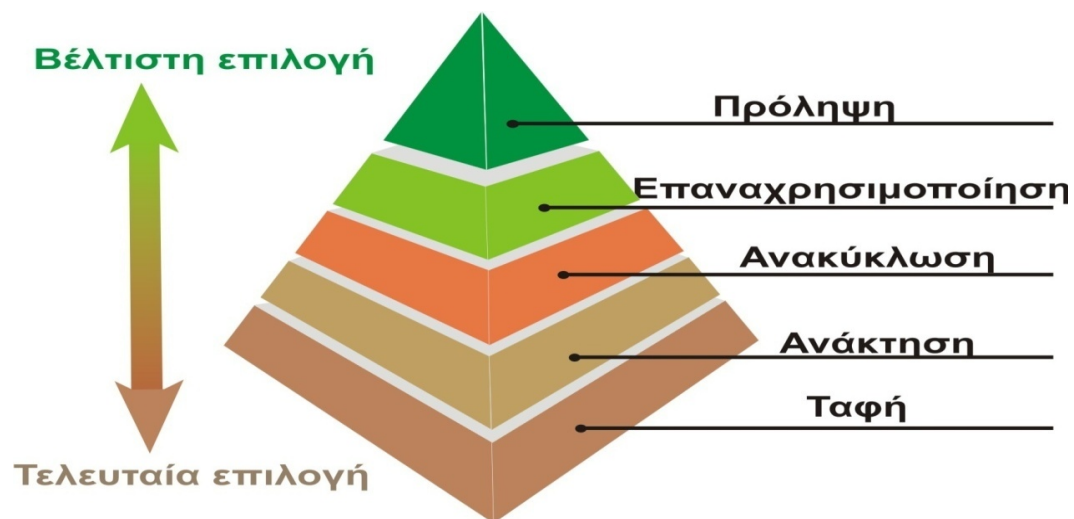
Το περιεχόμενο των συσκευών δε διαθέτει πάντα σημαντική αξία μεταπώλησης με συνέπεια η οικονομική αξία του αποβλήτου εξαρτάται απ' τον εξοπλισμό που ανακυκλώνεται. Παράδειγμα αποτελεί η ανακύκλωση ενός κινητού τηλεφώνου η οποία συμφέρει έναντι της ανακύκλωσης μιας καφετιέρας λόγω των πολύτιμων μετάλλων που περιέχονται (Tanskanen, 2013). Λόγω του ότι τα ηλεκτρονικά προϊόντα διαθέτουν ποικίλες δομές και συστάσεις καθίσταται δύσκολη η ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών ανακύκλωσης οι οποίες να είναι κατάλληλες για τους διαφορετικούς τύπους προϊόντων. Ένας κύριος παράγοντας που δυσχεραίνει την ανάπτυξη τέτοιας τεχνολογίας είναι οι μικρές ποσότητες των ΑΗΗΕ που συλλέγονται τόσο αυτούσια ποσοτικά, καθώς και σε σχέση με άλλα είδη αποβλήτων με τα ΑΗΗΕ να αποτελούν μόλις το 0.063% του συνολικού όγκου αποβλήτων (60 τόνους) ετησίως (στοιχεία ΔΕΔΙΣΑ Χανιά 2019). Η ανακύκλωση των ΑΗΗΕ μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρία κύρια επίπεδα:

- **Αποσυναρμολόγηση:** επιλεκτική αποσυναρμολόγηση με στόχο την αφαίρεση επικίνδυνων ή πολύτιμων υλικών για ειδική επεξεργασία.
- **Ανάκτηση:** με χρήση μηχανικής επεξεργασίας ή/και μεταλλουργικής επεξεργασίας για τη βελτίωση των επιθυμητών υλικών π.χ. προετοιμάζοντας τα υλικά για διαδικασία ραφινάρισματος.
- **Ραφινάρισμα / Εξευγενισμός:** το τελικό στάδιο όπου τα ανακτώμενα υλικά επαναεπεξεργάζονται ή καθαρίζονται μέσω χημικών διαδικασιών. (Cui and Zhang, 2008).

Οι ροές και οι αλληλεπιδράσεις στην ανακύκλωση ΑΗΗΕ σε ένα σύστημα κλειστού τύπου για τις πηγές (πρώτες ύλες) σε αντίθεση με τη γραμμική ροή των υλικών φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 10: Γραμμική και Κυκλική ροή της πρώτης ύλης (Onigondo and Williams, 2011)



Εικόνα 11: Πυραμίδα σύγκρισης τρόπων διαχείρισης ΑΗΗΕ (ΔΕΔΙΣΑ)

## 2.4 Αποσυναρμολόγηση

Κατα το στάδιο της αποσυναρμολόγησης τα ΑΗΗΕ υφίστανται προεπεξεργασία, κατα την οποία γίνεται μια προκαταρκτική ταξινόμηση και διαχωρισμός των συστατικών και υλικών που περιέχουν, με χρήση ποικίλων κατεργασιών για την διευθέτησή τους σε άλλες μεθόδους επεξεργασίας. Καθώς ο εξοπλισμός διαθέτει μεγάλη ποικιλία υλικών και αντίστοιχη δυσκολία διαχωρισμού τους, η αποσυναρμολόγηση λαμβάνει χώρα όταν περιέχονται πολύτιμα στοιχεία σε συγκεκριμένα τμήματα του εξοπλισμού των οποίων η αναμειξη δεν είναι συμφέρουσα. Παραδείγματα αποτελούν οι πλακέτες κυκλωμάτων λόγω του κέρδους που αποφέρει η ξεχωριστή ανακύκλωσή τους ή σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπως οι λάμπες υδραργύρου και οι καθοδικοί σωλήνες οθονών όπου περιέχονται επικίνδυνα υλικά που πρέπει να διαχωριστούν για εξειδικευμένη επεξεργασία. Στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων η αποσυναρμολόγηση γίνεται χειρωνακτικά, διαδικασία χρονοβόρα κατα την οποία απαιτείται αριθμός εργαζομένων και χαμηλής αποτελεσματικότητας στην επεξεργασία μεγάλων όγκων ΑΗΗΕ. Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για την απομάκρυνση επικίνδυνων υλικών από τη φάση παραγωγής των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών προϊόντων (Tanskanen, 2013).

Μετα τη διαδικασία της προ-επεξεργασίας συνηθίζεται η μείωση του μεγέθους των ΑΗΗΕ με τη χρήση τεμαχιστών (shredders). Τα επόμενα στάδια στοχεύουν στο διαχωρισμό των σιδηρούχων και μη μετάλλων και πλαστικών από τον τεμαχισμένο εξοπλισμό με χρήση μαγνητικού διαχωρισμού, στροβιλισμού και διαχωρισμού πυκνότητας. Η μέθοδος που υιοθετείται εξαρτάται από το είδος του υποεπεξεργασίας μείγματος με διαχωρισμό όπου αυτός κρίνεται απαραίτητος. Η ανακύκλωση μπορεί να ανακτήσει έως και το 95% των χρήσιμων υλικών από έναν τυπικό Η/Υ και έως 45% των υλικών από τις οθόνες καθοδικού σωλήνα. Τα προκύπτοντα μη ανακυκλώσιμα υλικά όπως και τα υλικά που δεν μπορούν να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία μπορούν να ταφούν υγειονομικά είτε να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ενέργειας μέσω καύσης.

## 2.5 Ανάκτηση

Απο τη περίπλοκη σύσταση των ΑΗΗΕ μπορούν να ανακτηθούν πολύτιμα μέταλλα όπως ο χαλκός, το αλουμίνιο, ο χρυσός καθώς και αμέταλλα υλικά. Η ανάκτηση αυτών των υλικών γίνεται μέσω της σύνθλιψης και του διαχωρισμού τους μηχανικά, μεταλλουργικά με καύση και ραφινάρισμα. Τα μέταλλα ανακτώνται μετα απο καύση των εύφλεκτων υλικών και της χημικής ανακύκλωσης όπου γίνεται χρήση χημικών διεργασιών για την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων από πλακέτες κυκλωμάτων καθώς και πυρο-, υδρο- και βιο-μεταλλουργικές διεργασίες. Παρα την ποικιλία διεργασιών που είναι διαθέσιμες η αποτελεσματικότητα δεν είναι πάντα υψηλή λόγω προβλημάτων που εμφανίζονται. Κατα τη μηχανική ανακύκλωση είναι αδύνατη η ανάκτηση χρήσιμων υλικών καθώς αυτά λιώνουν ή διαλύονται μαζί με τα άλλα υλικά κατα το ραφινάρισμα με τη χρήση μεταλλουργικών τεχνικών. Η αναμειξη τους οδηγεί σε ένα μείγμα υλικών που δύσκολα διαχωρίζεται εφόσον η προέλευση των υλικών που αναμειγνύονται δε μπορεί να αναγνωριστεί. Τα κύρια έξοδα της διαδικασίας περιλαμβάνονται στις διαδικασίες συλλογής προεπεξεργασίας και

μεταφοράς του ΑΗΗΕ. Επιπλέον κόστη διαχωρισμού προκύπτουν κατα τη συλλογή εξοπλισμού που δεν έχει κατηγοριοποιηθεί σε μια από τις 10 κατηγορίες ΑΗΗΕ, κάτι που καθιστά σημαντική τη διαχείριση του εξοπλισμού πριν την εισαγωγή του στον κύκλο της ανακύκλωσης. Η αποτελεσματική διαχείριση των ΑΗΗΕ απαιτεί υποδομές ανάλογες των λοιπών αποβλήτων, και πιο συγκεκριμένα: υποδομές για συλλογή, βιομηχανία ανακύκλωσης, συστήματα ελέγχων και καταγραφής καθώς και δραστηριότητες ενημέρωσης των πολιτών για τη σημασία της ανακύκλωσης, του διαχωρισμού των αποβλήτων και την αύξηση της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών. Η συμβολή του καταναλωτικού κοινού στη συλλογή και σωστή ταξινόμηση των ΑΗΗΕ πριν τη διαδικασία ανακύκλωσης θα οδηγήσει σε σημαντική βελτιστοποίηση της διαδικασίας καθώς θα μπορούν να εφαρμοστούν στοχευμένες μεθοδολογίες ανάκτησης και ανακύκλωσης υλικών για κάθε διαφορετικό εξοπλισμό.

## **2.6 PCB (Printed Circuit Boards)**

Μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Board) υποστηρίζει και διασυνδέει ηλεκτρονικά στοιχεία μέσω αγωγίων μονοπατιών τα οποία τυπώνονται πάνω στην πλακέτα. Μια τέτοια πλακέτα μπορεί να είναι μονής όψης, διπλής όψης είτε να αποτελείται από πολλαπλά επίπεδα. Οι πλακέτες πολλαπλών στρώσεων επιτρέπουν την τοποθέτηση περισσότερων στοιχείων στην ίδια επιφάνεια. Οι πιο εξελιγμένες πλακέτες ενσωματώνουν ηλεκτρονικά στοιχεία μέσα σε μια στρώση. (Ghosh et al., 2015) Οι πίνακες τυπωμένων κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται σε όλα τα ηλεκτρονικά προϊόντα με εξαίρεση τα στοιχειώδη. Ενώ ο σχεδιασμός τους διαθέτει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από άλλες εναλλακτικές, η διαδικασία κατασκευής τους μπορεί να αυτοματοποιηθεί καθιστώντας τα ως τις πλέον διαδεδομένες διατάξεις ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (Sohaili et al., 2012).

Ένα βασικό PCB αποτελείται από ένα επίπεδο φύλλο μονωτικού υλικού και ένα στρώμα φύλλου χαλκού, επικολλημένο στο υπόστρωμα. Η χημική χάραξη διαιρεί τον χαλκό σε ξεχωριστές αγωγικές γραμμές που ονομάζονται ίχνη ή ίχνη κυκλώματος, επιθέματα για συνδέσεις, βίδες για τη διέλευση συνδέσεων μεταξύ στρώσεων χαλκού και χαρακτηριστικά όπως στερεές αγωγίμες περιοχές για θωράκιση EM ή για άλλους σκοπούς. Οι τροχιές λειτουργούν ως σύρματα στερεωμένα στη θέση τους και είναι μονωμένα το ένα από το άλλο με αέρα και με το υλικό υποστρώματος της σανίδας. Η επιφάνεια ενός PCB μπορεί να έχει μια επικάλυψη που προστατεύει τον χαλκό από τη διάβρωση και μειώνει τις πιθανότητες βραχυκυκλώματος μεταξύ ιχνών ή ανεπιθύμητης ηλεκτρικής επαφής με αδέσποτα γυμνά σύρματα. Για τη λειτουργία του βοηθώντας στην αποφυγή των short κολλήσεων, η επίστρωση ονομάζεται αντίσταση συγκόλλησης. Ένας πίνακας τυπωμένου κυκλώματος μπορεί να έχει πολλές στρώσεις χαλκού. Μια σανίδα δύο επιπέδων έχει χαλκό και στις δύο πλευρές. πολυστρωματικές σανίδες σάντουιτς επιπρόσθετες στρώσεις χαλκού μεταξύ στρώσεων μονωτικού υλικού. Οι αγωγοί σε διαφορετικά στρώματα συνδέονται με βίδες, που είναι χάλκινες τρύπες οι οποίες λειτουργούν ως ηλεκτρικές σήραγγες μέσω του μονωτικού υποστρώματος. Τα τμήματα διαμέσου τρύπας μερικές φορές επίσης λειτουργούν αποτελεσματικά ως vias. Μετά τα δύο στρώματα των PCB, το επόμενο βήμα είναι συνήθως τέσσερα στρώματα. Συχνά, δύο στρώματα είναι αφιερωμένα ως τροφοδοτικό και γείωση και



τα άλλα δύο χρησιμοποιούνται για την καλωδίωση σήματος μεταξύ των εξαρτημάτων.

## **2.7 Περιεχόμενο Πλακετών - Υλικά**

### **2.7.1 PCB Συμβατά με την Οδηγία RoHS**

Μεσω της Οδηγίας RoHS στην Ευρωπαϊκή Ένωση απαγορεύεται η χρήση μολύβδου, καθώς και άλλων βαρέων μετάλλων σε καταναλωτικά είδη, για τον περιορισμό των επικίνδυνων ουσιών. Τα PCB που πωλούνται στην ΕΕ πρέπει να συμμορφώνονται με την οδηγία RoHS, με αποτέλεσμα η χρήση μολύβδου, καδμίου και άλλων βαρέων μετάλλων να αποφεύγονται σε όλες τις μεθόδους κατασκευής, των συγκολλητικών υλών που χρησιμοποιούνται και όλων των εξαρτημάτων που είναι τοποθετούνται στον πίνακα.

### **2.7.2 Ελασματοποιημένα Φύλλα**

Τα ελασματοποιημένα φύλλα κατασκευάζονται με σκλήρυνση υπό πίεση και θερμοκρασία σε στρώματα υφάσματος ή χαρτιού με θερμοσκληρική ρητίνη για να σχηματίσουν τελικό τεμάχιο ομοιόμορφου πάχους. Το μέγεθος μπορεί να έχει πλάτος και μήκος 1,2 επί 2,4 τετραγωνικά μέτρα. Διαφορετικά νήματα υφάσματος (κλωστές ανά ίντσα ή cm), πάχος υφάσματος και ποσοστό ρητίνης χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί το επιθυμητό τελικό πάχος και τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Το χρησιμοποιούμενο ύφασμα ή ινώδες υλικό, το υλικό ρητίνης και ο λόγος υφάσματος προς ρητίνη καθορίζουν την ονομασία τύπου πολυστρωματικού υλικού (FR-4, CEM-1, G-10 και άλλα) και συνεπώς τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου φύλλου. Υπάρχουν διάφορα διηλεκτρικά που μπορούν να επιλεγούν για να παρέχουν διαφορετικές τιμές μόνωσης ανάλογα με τις απαιτήσεις του κυκλώματος. Μερικά από αυτά τα διηλεκτρικά είναι το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (Teflon), FR-4, FR-1, CEM-1 ή CEM-3. Πολύ γνωστά υλικά προ-προετοιμασίας που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία PCB είναι το FR-2 (χαρτί φαινολικού βαμβακιού), FR-3 (βαμβακερό χαρτί και εποξείδιο), FR-4 (υφαντό γυαλί και εποξείδιο), FR-5, CEM-3 (γυαλί ματ και πολυεστέρα), G-10 (υφαντό γυαλί και εποξείδιο), CEM-1 (βαμβακερό χαρτί και εποξείδιο), CEM-2 (επόξυ), CEM-4 (υφαντό γυαλί και επόξυ), CEM-5 (υφαντό γυαλί και πολυεστέρας). Η θερμική επέκταση αποτελεί σημαντικό παράγοντα, ιδίως με τις τεχνολογίες μπλέντρου (BGA) και τις γυμνές πλάκες (naked die technology), ενώ η γυάλινη ίνα προσφέρει την καλύτερη διαστασιακή σταθερότητα. Το FR-4 αποτελεί το πιο κοινό υλικό που χρησιμοποιείται σήμερα. Με τη μείωση του μεγέθους των στοιχείων του πίνακα και των αυξανόμενων συχνοτήτων, αποκτούν σημασία οι μικρές μη ομοιογενείς ιδιότητες όπως η ανισοκατανομή των υαλοβάμβακα ή άλλων υλικών πληρώσεως, οι μεταβολές πάχους και οι φυσαλίδες στη μήτρα ρητίνης και οι σχετικές τοπικές παραλλαγές στη διηλεκτρική σταθερά.

### 2.7.3 Βασικές Παράμετροι Υποστρώματος

Τα υποστρώματα κυκλωμάτων είναι συνήθως διηλεκτρικά σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα υλικά περιέχουν μια μήτρα (συνήθως μια εποξική ρητίνη) και μια ενίσχυση (συνήθως υφαντές, μερικές φορές μη υφασμένες, γυάλινες ίνες, ή ακόμη και χαρτί) και σε μερικές περιπτώσεις προστίθεται ένα υλικό πληρώσεως στη ρητίνη (κεραμικά, για την αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς). Ο τύπος οπλισμού ορίζει δύο κύριες κατηγορίες υλικών: υφασμένα και μη υφασμένα. Οι υφασμένες ενισχύσεις είναι φθηνότερες, αλλά η υψηλή διηλεκτρική σταθερά γυαλιού μπορεί να μην είναι ευνοϊκή για πολλές εφαρμογές υψηλότερης συχνότητας. Οι μη υφασμένες ενισχύσεις, ή τα υλικά με χαμηλή ή καθόλου ενίσχυση, είναι ακριβότερα αλλά πιο κατάλληλα για ορισμένες RF / αναλογικές εφαρμογές. Τα υποστρώματα χαρακτηρίζονται από διάφορες βασικές παραμέτρους, κυρίως θερμομηχανικές (θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου, αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή διατμήσεως, θερμική διαστολή), ηλεκτρική (διηλεκτρική σταθερά, εφαπτομένη απώλειας, τάση διάρρηξης διηλεκτρικού, ρεύμα διαρροής, αντοχή ιχνηλάτησης). Απορρόφηση υγρασίας εμφανίζεται όταν το υλικό εκτίθεται σε υψηλή υγρασία ή νερό. Τόσο η ρητίνη όσο και η ενίσχυση μπορούν να απορροφήσουν νερό το οποίο μπορεί επίσης να εμποτιστεί μέσω τριχοειδών δυνάμεων διαμέσου κενών στα υλικά και κατά μήκος της ενίσχυσης. Τα εποξικά των υλικών FR-4 δεν είναι πολύ ευαίσθητα, με απορρόφηση μόνο 0,15%. Το Teflon έχει πολύ χαμηλή απορρόφηση 0,01%. Τα πολυϊμίδια και οι κυανικοί εστέρες, από την άλλη πλευρά, υποφέρουν από υψηλή απορρόφηση νερού. Το απορροφημένο νερό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποβάθμιση των βασικών παραμέτρων, επηρεάζει την αντίσταση εντοπισμού, την τάση διάσπασης και τις διηλεκτρικές παραμέτρους. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά νερού είναι περίπου 73, σε σύγκριση με περίπου 4 για κοινά υλικά πλακέτας κυκλώματος. Η απορροφημένη υγρασία μπορεί επίσης να εξατμίζεται κατά τη θέρμανση, όπως κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και να προκαλέσει ρωγμές και αποκόλληση το ίδιο αποτέλεσμα που είναι υπεύθυνο για είδος βλάβης που ονομάζεται "popcorning" σε υγρή συσκευασία ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Το προσεκτικό ψήσιμο των υποστρωμάτων μπορεί να απαιτηθεί για να τα στεγνώσει πριν από την συγκόλληση.

#### 2.7.4 Κοινά Υποστρώματα

Κοινά χρησιμοποιούμενα υλικά αποτελούν τα:

- FR-2 , φαινολικό χαρτί ή φαινολικό βαμβακερό χαρτί, χαρτί εμποτισμένο με ρητίνη φαινόλης φορμαλδεΐδης . Κοινή στις καταναλωτικές ηλεκτρονικές συσκευές με μονόπλευρες σανίδες. Ηλεκτρικές ιδιότητες κατώτερες από το FR-4. Κακή αντίσταση τόξου. Γενικά βαθμολογείται (rated) στους 105 ° C.
- FR-4 , ένα υφασμένο ύφασμα υαλοβάμβακα εμποτισμένο με εποξική ρητίνη . Χαμηλή απορρόφηση νερού (μέχρι περίπου 0,15%), καλές ιδιότητες μόνωσης, καλή αντίσταση τόξου. Πολύ κοινό. Διάφορες ποιότητες με κάπως διαφορετικές ιδιότητες είναι διαθέσιμες. Συνήθως βαθμολογείται στους 130 ° C.
- Αλουμινίου ή μεταλλικού πυρήνα ή μονωμένου μεταλλικού υποστρώματος (IMS), επενδυμένο με θερμικά αγωγίμο λεπτό διηλεκτρικό - χρησιμοποιείται για εξαρτήματα που απαιτούν σημαντικούς διακόπτες ισχύος, LED. Αποτελείται συνήθως από απλή, μερικές φορές διπλής στρώσης, λεπτή πλακέτα με βάση π.χ. FR-4, ελασματοποιημένη σε φύλλο αλουμινίου, συνήθως πάχους 0,8, 1, 1,5, 2 ή 3 mm. Τα παχύτερα ελάσματα μερικές φορές έρχονται επίσης με παχύτερη μεταλλοποίηση χαλκού.
- Ευέλικτα υποστρώματα - μπορεί να είναι ένα αυτόνομο φύλλο χαλκού επιστρωμένο ή μπορεί να ελασματοποιηθεί σε ένα λεπτό ενισχυτικό ενισχυτικό, π.χ. 50-130  $\mu\text{m}$
- Kapton ή UPILEX, ένα φύλλο πολυϊμιδίου . Χρησιμοποιείται για εύκαμπτα τυπωμένα κυκλώματα , σε αυτή τη μορφή είναι κοινή σε καταναλωτικά ηλεκτρονικά μικρού μεγέθους ή για εύκαμπτες διασυνδέσεις. Ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες.
- Pyralux , σύνθετο φύλλο πολυϊμιδίου-φθοροπολυμερούς. Το στρώμα χαλκού μπορεί να αποκολληθεί κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης.

Λιγότερο συχνά υλικά:

- Το FR-1, όπως και το FR-2, τυπικά καθορίζεται στους 105 ° C, ορισμένες ποιότητες βαθμολογούνται στους 130 ° C. Θερμοκρασία δωματίου με δυνατότητα διάτρησης. Παρόμοιο με το χαρτόνι. Κακή αντίσταση στην υγρασία. Χαμηλή αντίσταση τόξου.
- FR-3, βαμβάκι εμποτισμένο με εποξικό. Συνήθως βαθμολογείται στους 105 ° C.
- FR-5, υαλοβάμβακα και εποξικές ρητίνες, υψηλής αντοχής σε υψηλότερες θερμοκρασίες, τυπικά καθορισμένες στους 170 ° C.
- FR-6, ματ γυαλί και πολυεστέρα
- G-10, υαλοβάμβακα και εποξική - υψηλή αντίσταση μόνωσης, χαμηλή απορρόφηση υγρασίας, πολύ υψηλή αντοχή συγκόλλησης. Συνήθως βαθμολογείται στους 130 ° C.

- G-11, υαλοβάμβακα και εποξικές ρητίνες - υψηλή αντοχή στους διαλύτες, υψηλή κατακράτηση αντοχής κάμψης σε υψηλές θερμοκρασίες. Συνήθως βαθμολογείται στους 170 ° C.
- CEM-1, χαρτί βαμβακιού και εποξική ρητίνη
- CEM-2, βαμβακερό χαρτί και εποξικό
- CEM-3, μη υφασμένο γυαλί και εποξικό
- CEM-4, υαλοβάμβακα και εποξικό
- CEM-5, υφαντό γυαλί και πολυεστέρα
- PTFE ("Teflon") - δαπανηρή, χαμηλή διηλεκτρική απώλεια, για εφαρμογές υψηλής συχνότητας, πολύ χαμηλή απορρόφηση υγρασίας (0,01%), μηχανικά μαλακή. Δύσκολο να στρωματοποιηθεί, σπάνια χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πολλαπλών στρώσεων.
- PTFE, γεμάτο κεραμικά - ακριβή, χαμηλή διηλεκτρική απώλεια, για εφαρμογές υψηλής συχνότητας. Η αναλογία κεραμικών / PTFE επιτρέπει τη ρύθμιση της διηλεκτρικής σταθεράς και της θερμικής διαστολής.
- RF-35, ενισχυμένο με υαλοπίνακα κεραμικό γεμάτο PTFE. Σχετικά λιγότερο δαπανηρές, καλές μηχανικές ιδιότητες, καλές ιδιότητες υψηλής συχνότητας.
- Αλουμίνα , κεραμικό. Σκληρό, εύθραυστο, πολύ ακριβό, πολύ υψηλές επιδόσεις, καλή θερμική αγωγιμότητα.
- Πολυϊμίδιο , πολυμερές υψηλής θερμοκρασίας. Ακριβά, υψηλής απόδοσης. Υψηλότερη απορρόφηση νερού (0,4%). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κρυογονικές θερμοκρασίες έως πάνω από 260 ° C.

### 2.7.5 Πάχος Χαλκού

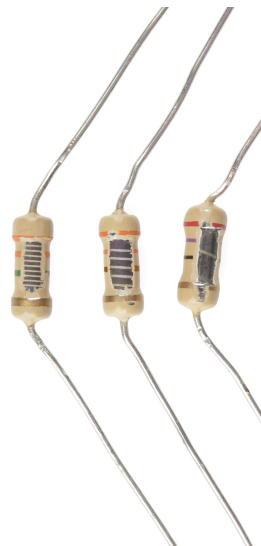
Το πάχος χαλκού των PCB μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα ή ως το βάρος του χαλκού ανά περιοχή (σε ουγγιά ανά τετραγωνικό πόδι), το οποίο είναι ευκολότερο να μετρηθεί. Μια ουγγιά ανά τετραγωνικό πόδι είναι 1.344 mils ή πάχος 34 μικρόμετρα. Ο βαρύς χαλκός είναι ένα στρώμα που υπερβαίνει τις τρεις ουγγιές χαλκού ανά ft<sup>2</sup> ή περίπου 0,0042 ίντσες (4,2 mils, 105 μm). Τα βαριά στρώματα χαλκού χρησιμοποιούνται για υψηλές τιμές ρεύματος ή για να συμβάλουν στη διάχυση της θερμότητας. Στα κοινά υποστρώματα FR-4, το πιο κοινό πάχος είναι 1 oz χαλκός ανά ft<sup>2</sup> (35 μm). Το πάχος 2 oz (70 μm) και 0.5 oz (18 μm) είναι συχνά μια επιλογή. Λιγότερο συνηθισμένα είναι τα 12 και τα 105 μm, μερικές φορές είναι διαθέσιμα και 9 μm σε μερικά υποστρώματα. Τα εύκαμπτα υποστρώματα συνήθως έχουν λεπτότερη μεταλλοποίηση. Οι πίνακες μεταλλικού πυρήνα για συσκευές υψηλής ισχύος χρησιμοποιούν συνήθως παχύτερο χαλκό. 35 μm είναι συνηθισμένο, αλλά μπορεί επίσης να παρατηρηθεί και 140 και 400 μm.

## 2.8 Ηλεκτρονικά Στοιχεία

Ένα ηλεκτρονικό στοιχείο είναι κάθε βασική διακριτή συσκευή ή φυσική οντότητα σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα που χρησιμοποιείται για να επηρεάσει τα ηλεκτρόνια ή τα σχετικά πεδία τους. Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι ως επί το πλείστον βιομηχανικά προϊόντα, διαθέσιμα σε μοναδική μορφή. Ορισμένα κοινά στοιχεία PCB περιλαμβάνουν:

**Αντιστάσεις:** ελέγχουν το ηλεκτρικό ρεύμα καθώς περνά μέσα από αυτές.

Διαθέτουν χρωματικούς κωδικούς για να καθορίσουν την αξία τους. Τα υλικά κατασκευής των αντιστάσεων είναι ποικίλα. Η κατασκευή των επικαιροποιημένων αντιστάσεων γίνεται από μεμβράνη μεταλλική, οξειδίου μετάλλου ή με χρήση άνθρακα. Κατα την υλοποίηση, ημι-αγώγιμο υλικό μορφοποιημένο ως λεπτή μεμβράνη τυλίγεται σε μορφή έλικας, όπου στη συνέχεια προστατεύεται με μονωτική επικάλυψη. Η πλειοψηφία των αντιστάσεων μέσω-οπών (through-hole) ανήκουν σε συνθέσεις μια μεμβράνης-άνθρακα ή μεμβράνης-μετάλλου. Ένα ακόμη είδος αντιστάσεων μέσω-οπών ενδέχεται να έχουν κατασκευή συρματοπλέγματος (wire wound) ή κατασκευασμένες από υπερβολικά λεπτό μεταλλικό φύλλο.



**Δίοδος:** επιτρέπει στο ρεύμα να περάσει μόνο σε μία κατεύθυνση, εμποδίζοντας τη διέλευση στην αντίθετη διεύθυνση. Οι περισσότερες σύγχρονοι δίοδοι είναι κατασκευασμένες από πυρίτιο, αλλά χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά όπως αρσενικό, γάλλιο και γερμάνιο.

**LED:** Δίοδος εκπομπής φωτός. Ανάβει όταν ρέει ρεύμα διαμέσου αυτού και επιτρέπει μόνο ρεύμα να ρέει προς μία κατεύθυνση. Οι σύγχρονες λυχνίες LED συσκευάζονται σε διαφανή χυτά πλαστικά θήκες, σε σχήμα σωλήνα ή ορθογώνια.

**Τρανζίστορ:** ενισχύει τη φόρτιση. Τα περισσότερα τρανζίστορ κατασκευάζονται από πολύ καθαρό πυρίτιο ή γερμάνιο, αλλά ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν και ορισμένα άλλα ημιαγώγιμα υλικά.

**Πυκνωτές:** στοιχεία που μπορούν να φιλοξενήσουν ηλεκτρικό φορτίο. Οι περισσότεροι πυκνωτές περιέχουν τουλάχιστον δύο ηλεκτρικούς αγωγούς, συχνά σε μορφή μεταλλικών πλακών ή επιφανειών που διαχωρίζονται από ένα διηλεκτρικό μέσο. Ως αγωγός μπορεί να χρησιμοποιείται ένα λεπτό φύλλο μετάλλου, λεπτό φιλμ, συσσωματωμένο σφαιρίδιο από μέταλλο ή ένας ηλεκτρολύτης. Το μη-αγώγιμο διηλεκτρικό αυξάνει την ικανότητα φόρτισης του πυκνωτή. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως ως διηλεκτρικά περιλαμβάνουν στρώματα από γυαλί, κεραμικό, πλαστικό, χαρτί, μαρμαρυγία και οξείδια. Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται ευρέως ως μέρη ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε πολλές κοινές ηλεκτρικές συσκευές. Σε αντίθεση με μια αντίσταση, ένας ιδανικός πυκνωτής δεν διαλύει ενέργεια.

**Επαγωγέας:** αποθηκεύει τη φόρτιση και σταματά και αλλάζει το ρεύμα. Συνήθως αποτελούνται από ένα πηνίο από αγωγίμο υλικό, συνήθως μονωμένο χάλκινο σύρμα, τυλιγμένο γύρω από έναν πυρήνα είτε από πλαστικό (για να δημιουργήσει έναν επαγωγέα πυρήνα αέρα) είτε από ένα σιδηρομαγνητικό υλικό. Αυτή η κατασκευή ονομάζεται επαγωγέας "πυρήνα σιδήρου" (iron core inductor).

**Διακόπτες:** μπορούν να επιτρέψουν ή να εμποδίσουν τη διέλευση ρεύματος ανάλογα εάν είναι κλειστοί ή ανοιχτοί. Οι ηλεκτρονικοί διακόπτες συνήθως χρησιμοποιούν συσκευές στερεάς κατάστασης όπως τρανζίστορ. Σε εφαρμογές υψηλής τάσης μπορεί να γίνει χρήση οι σωλήνων κενού.

Κατά τη συναρμολόγηση, σε άδειο πίνακα τοποθετούνται ηλεκτρονικά εξαρτήματα για το σχηματισμό ενός λειτουργικού συγκροτήματος τυπωμένου κυκλώματος (PCA), που ονομάζεται και "συγκρότημα πλακέτας τυπωμένου κυκλώματος" (PCBA). Με την τεχνολογία διαμπερών οπών (through-hole technology), τα καλώδια συνιστώνται σε οπές που περιβάλλονται από αγωγίμες επιφάνειες (conductive pads). Οι οπές κρατούν τα εξαρτήματα στη θέση τους. Κατά την τεχνική επιφανειακής τοποθέτησης (Surface Mount Technology - SMT), το εξάρτημα τοποθετείται στο PCB έτσι ώστε οι ακίδες να ευθυγραμμίζονται με τα αγωγίμα μαξιλάρια ή τα εδάφη στις επιφάνειες του PCB. Η συγκολλητική πάστα, η οποία είχε προηγουμένως εφαρμοστεί στα pad, συγκρατεί προσωρινά τα εξαρτήματα. Εάν τα εξαρτήματα επιφανειακής στήριξης εφαρμόζονται και στις δύο πλευρές του πίνακα, τα εξαρτήματα της βάσης συγκολλούνται στην σανίδα. Και στις δύο τεχνικές τα εξαρτήματα στη συνέχεια συγκολλούνται. Μόλις ψυχθεί και στερεοποιηθεί, το συγκολλητικό υλικό συγκρατεί τα εξαρτήματα στη θέση τους μόνιμα και τα συνδέει ηλεκτρικά με την πλακέτα. Το συγκολλητικό υλικό αποτελείται από Sn και Pb.

Συνολικό περιεχόμενο ηλεκτρονικών στοιχείων και CBP:

- Ημιαγωγοί που αποτελούνται από B, Ga, In, As
- Επιβραδυντικά καύσης από 5 έως 10% του συνολικού βάρους
- Μπαταρίες και διακόπτες που περιέχουν Hg
- Συγκολλητικό υλικό το οποίο αποτελείται από Sn και Pb.
- Πλαστικά τα οποία αναλύονται σε:
  - Πλαστικό που περιέχει χρωστικές ουσίες και σταθεροποιητές (Cd, Pb, Ni, Cr, Sb, Sn, Ba)
  - Διαφορετικές ποσότητες πλαστικών με επιβραδυντές καύσης (FR) ανάλογα την κατηγορία της συσκευής. Τόσο τα CPB όσο και τα θερμοπλαστικά υφίστανται κατεργασία με επιβραδυντές καύσης. Οι FR περιέχουν αλογονωμένες οργανικές ενώσεις, ειδικά οι βρωμιούχοι FR (BFR) και οι 10-διφαινυλαιθέριοι FR (10-BDE) και άλλες ενώσεις όπως οξείδιο του αντιμονίου, φωσφορικές οργανικές ενώσεις και άλλα υλικά. Λόγω της μόλυνσης που προκαλείται κυρίως εξαιτίας των 10-BDE λαμβάνονται μέτρα ελαχιστοποίησης των περιεχόμενων FR και της αντικατάστασης των 10-BDE με τετραβρωμο-δισφαινόλη A η οποία παράγει πολύ χαμηλότερες ποσότητες διοξινών. Παρα τις προσπάθειες μείωσής τους, ο HHE περιέχει σημαντικές ποσότητες BFR.

## ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ

Ακολουθείται μια τυποποιημένη διαδικασία κατα την ανακύκλωση ΑΗΗΕ, ανάλογα το διαθέσιμο εξοπλισμό και το προς ανακύκλωση αντικείμενο (Πηγή: Ε.Κ.ΑΝ. 2019):

- Ταξινόμηση των συσκευών σε κατηγορίες και υποκατηγορίες, σύμφωνα με το ισχύον Προεδρικό Διάταγμα.
- Ζύγιση και την προσωρινή αποθήκευση των συσκευών σε κατάλληλους χώρους.
- Απορρύπανση των συσκευών, δηλαδή την απομάκρυνση των υλικών ή των στοιχείων που θεωρούνται επικίνδυνα για το περιβάλλον όπως CFCs, πυκνωτές, μπαταρίες, μελάνια κλπ.
- Συσκευασία και προσωρινή αποθήκευση σε κατάλληλα διαμορφωμένους χώρους.
- Τελική αποσυναρμολόγηση των συσκευών και την ανάκτηση όλων των προς αξιοποίηση υλικών.
- Επεξεργασία των συσκευών που έχουν απορρυπανθεί ή στοιχείων συσκευών σε σύγχρονη γραμμή ανάκτησης υλικών, που περιλαμβάνει:
  - Τεμαχιστή (shredder) ή Αποσυναρμολογητή (ripper)
  - Σταθμούς Διαλογής
  - Ενδιάμεσους διαχωριστές τύπου ταινίας ηλεκτρομαγνήτη, δονητικής τράπεζας και ΖΖ αεροδιαχωριστές
  - Κοκκοποιητή (granulator) - Τελικούς διαχωριστές τύπου μαγνητικού τυμπάνου, eddy current, induction system και optical system.
  - Συσκευασία, ζύγιση και αποθήκευση των αξιοποιήσιμων υλικών (σιδηρούχα μέταλλα, αλουμίνιο, μέταλλα όλων των τύπων, κινητήρες, πλαστικά, γυαλιά).

### 3.1 Διαφορές στην Ανακύκλωση Ειδών ΑΗΗΕ

Κατα τη διαδικασία ανακύκλωσης οι διάφορες συσκευές διαχωρίζονται και κατηγοριοποιούνται για ξεχωριστή ανακύκλωση ανα είδος. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως, λόγω του αμελητέου όγκου ΑΗΗΕ σε σχέση με τον υπόλοιπο όγκο απορριπτόμενης ύλης, τα ΑΗΗΕ είτε ανακυκλώνονται στο σύνολό τους χωρίς διαδικασία διαχωρισμού είτε θάβονται υγειονομικά χωρίς ανακύκλωση. Ο διαχωρισμός των ΑΗΗΕ απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό του οποίου η αγορά, λειτουργία και συντήρηση διαθέτει υψηλό κόστος. Μικρές γραμμές επεξεργασίας και ανακύκλωσης σπάνια διαθέτουν τέτοιον εξοπλισμό και συχνά αναθέτουν τις διεργασίες ανακύκλωσης σε εξωτερικές επιχειρήσεις που εξειδικεύονται σε ανακύκλωση ΑΗΗΕ προσθέτοντας επιπλέον κόστος στη διαδικασία. Ο διαχωρισμός τόσο μικρών ποσοτήτων ΑΗΗΕ συχνά δεν επιφέρει κέρδος για μικρές επιχειρήσεις διαχείρισης αποβλήτων.

## **3.2 Προ-επεξεργασία**

### **3.2.1 Τεχνολογία Διαχωρισμού και Ανάκτησης Υλικών**

Μεγάλος αριθμός συσκευών περιέχουν ποικιλία υλικών που ανακυκλώνονται με ευκολία όπως μέταλλα, γυαλί και πλαστικά, αλλά υπάρχουν και ορισμένες επικίνδυνες ουσίες, οι οποίες προκαλούν σημαντικά περιβαλλοντικά και υγειονομικά προβλήματα. Γενικά, τα ΑΗΗΕ αποτελούνται από μέταλλο (40%), πλαστικό (30%) και πυρίμαχα οξείδια (30%). Η ποσότητα του μετάλλου περιέχει 20% χαλκό και 1% ψευδάργυρο. Ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και ο ορείχαλκος χρησιμοποιούνται ευρέως στην παραγωγή ηλεκτρικών καλωδίων και καλωδίων, ηλεκτρικής επαφής και διάφορα άλλα μέρη. Τα καλώδια και τα συρμάτινα υλικά χάθηκαν συχνά στις διαδικασίες διαλογής, πράγμα που σήμαινε οικονομικές απώλειες λόγω της υψηλής αναλογίας χαλκού που περιέχουν. Η ανάκτηση και η ανακύκλωση τέτοιων ηλεκτρικών αποβλήτων είναι πολύ σημαντική. Τα σύρματα χαλκού και τα ελεύθερα σωματίδια χαλκού είναι πολύτιμα συστατικά που περιέχονται σε πολλά κλάσματα αποβλήτων, όπως τα βαρέα κλάσματα από τεμαχιστές αυτοκινήτων (SSF), ελαφρά κλάσματα από μηχανές τεμαχισμού αυτοκινήτων (SLF), απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) και υπολείμματα υλικών και μετάλλων από πυκνά συστήματα μεσαίου διαχωρισμού (DMS). Οι επεξεργαστές καλωδίων και τα δευτερογενή χαλυβουργία απαιτούν μονο-κλάσματα υψηλής καθαρότητας από συμπτυκνωμένο χαλκό και καλώδια. Αρκετές μέθοδοι έχουν διερευνηθεί και εφαρμόζεται για ανάκτηση μετάλλων από ΑΗΗΕ, με βάση μηχανικές / φυσικές, πυρομεταλλουργικές και υδρομεταλλουργικές διεργασίες. Οι μηχανικές / φυσικές διεργασίες βασίζονται στα διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών που απαντώνται στη σύνθεση των αποβλήτων.

### **3.2.2 Ολοκληρωμένα Συστήματα Ανακύκλωσης ΑΗΗΕ με Μηχανικές Διεργασίες**

Ανάλογα τις ανάγκες των εφαρμογών, πολλές διαφορετικές μεθοδολογίες ολοκληρωμένης ανακύκλωσης χρησιμοποιούνται στο εμπόριο. Υπάρχουν επίσης εταιρείες που αναλαμβάνουν το σχεδιασμό, συναρμολόγηση και τοποθέτηση ολοκληρωμένων συστημάτων ανακύκλωσης ΑΗΗΕ. Μερικές από τις πιο συνήθεις εφαρμογές αποτελούν:

- Σύστημα που διαθέτει:

Feed - Triple Crush -Double Shaft Shredder - Conveyor -Hammer Crusher - PLC Control System - Grinding System - Air Separator - Electrostatic Separator - Pulse Dust Collection System (Suny Group, 2017). Στο συγκεκριμένο σύστημα τροφοδοτείται ροή PCB σε θρυμματιστή τριών λεπίδων και στη συνέχεια καταστροφέα διπλού άξονα. Τα τεμάχια οδηγούνται στη συνέχεια σε σφυροκόπτη για τη μείωση του συνολικού μεγέθους τους ώστε να μπορούν να εισαχθούν σε Σύστημα ελέγχου PLC (Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής). Με το σύστημα αυτό ελέγχεται σύστημα λείανσης (με χρήση αρνητικής πίεσης ώστε το σύστημα τροφοδοσίας να αποτρέπει την εξάντληση του ρεύματος PCB το οποίο βρίσκεται πλέον σε μορφή σκόνης). Διαχωριστής με ριπές αέρα διαχωρίζει τα



υλικά σε μεταλλικά και σκόνη ρητίνης (το οποίο περιέχει μικρές ποσότητες σκόνης μετάλλων). Τέλος γίνεται απομάκρυνση της παλμικής σκόνης με αποτελεσματικότητα έως και 99% με σύστημα συλλογής παλμικής σκόνης.

- Σύστημα που διαθέτει:

PCB dismantling machine - Smoke Removal Unit - Electronic components Screening machine. Air Separation System - Electrostatic Separation System  
Στο συγκεκριμένο σύστημα PCB εισάγονται σε φούρνο ή συσκευή που θερμαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες τα υλικά. Ανιχνευτής ελέγχει και αφαιρεί επικίνδυνα προϊόντα καύσης στον καπνό για τον έλεγχο και μείωσης της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Μετά τη θέρμανση τα PCB οδηγούνται σε μηχανήμα διαλογής ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και οι προκύπτουσες “γυμνές” πλακέτες οδηγούνται σε καταστροφέα και θρυμματιστή εκ νέου για τη μετατροπή τους σε σκόνη. Διαχωριστής με ριπές αέρα διαχωρίζουν τη σκόνη σε μεταλλική και σκόνη ρητίνης (με μικροποσότητες μετάλλων) από τις οποίες αφαιρείται το μεταλλικό κλάσμα με χρήση συστήματος ηλεκτροστατικού διαχωρισμού. (Sunny Group, 2022)

- Σύστημα που διαθέτει:

Single Shaft Shredder - Compact Plan - Metal Separation - Electrostatic Separation

Στο σύστημα αυτοούσια τα PCB εισάγονται καταστροφέας ενός άξονα για μείωση του μεγέθους του. Συμπαγής πλάνη χρησιμοποιείται για τον εξευγενισμό του μετάλλου και διαχωρισμός μετάλλων γίνεται επίσης μέσω της πλάνης διαχωρίζοντας τα υλικά σε αδρανή κλάσμα, κλάσμα καθαρού μετάλλου και κλάσμα σκόνης των λοιπών υλικών. Συσκευή ηλεκτροστατικού διαχωρισμού διαχωρίζει περεταίρω τα υλικά ανακτώντας κλάσμα μετάλλου υψηλότερης καθαρότητας. (Stokkermill, 2015)



Εικόνα 12: Εξοπλισμός διύλισης και εξόρυξης χρυσού (αριστερά)

Αυτόματο μηχανήμα αποσυναρμολόγησης εξαρτημάτων (δεξιά) (Sunny Group, 2022)



Εικόνα 13: Γραμμή ανακύκλωσης πλακέτας κυκλώματος PCB (αριστερά)  
Μηχανή εξευγενισμού πολύτιμων μετάλλων (δεξιά) (Sunny Group, 2022)



Εικόνα 14: Μίνι τεμαχιστής διπλού άξονα (αριστερά)  
Οριζόντιος εξοπλισμός θραυστήρα (δεξιά) (Sunny Group, 2022)



Εικόνα 15: Ολοκληρωμένο σύστημα ανακύκλωσης ΑΗΗΕ - “Εργοστάσιο ανακύκλωσης ηλεκτρονικών απορριμμάτων” (Sunny Group, 2022)



Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση διαδικασίας ανακύκλωσης ΑΗΗΕ PCB (Suny Group, 2022)

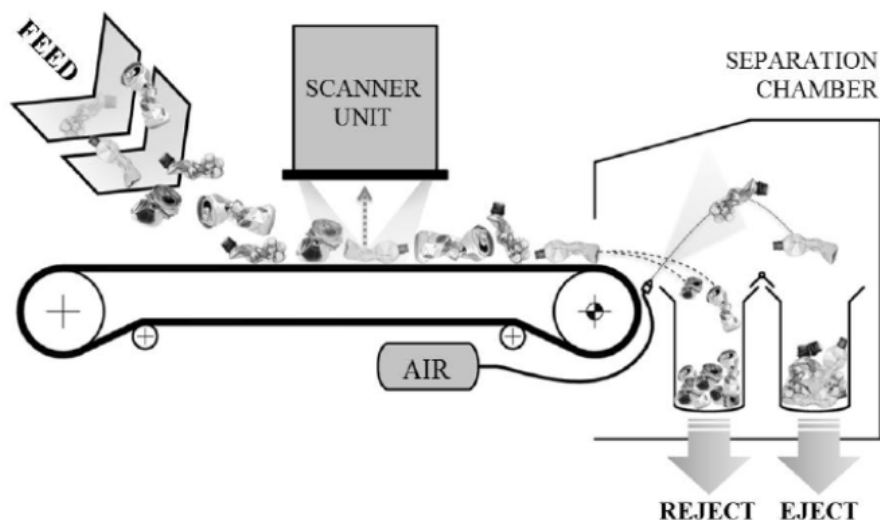


Εικόνα 17: Τελικά αποτελέσματα ανακύκλωσης ΑΗΗΕ PCB: Κλάσματα μεταλλικών υλών (αριστερά) και μη-μεταλλικής σκόνης - ρητίνης (δεξιά) (Suny Group, 2022)



### 3.2.3 Διαχωρισμός ΑΗΗΕ με βάση Αισθητήρες

Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαφορετικές δυνατότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον διαχωρισμό του χαλκού από τα μικτά απόβλητα ΗΗΕ. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με βάση διάφορες μεθόδους, π.χ. το σχήμα και η πυκνότητα των σωματιδίων, η κατανομή μεγέθους σωματιδίων ή οι διαχωριστές με βάση αισθητήρες. Οι διαχωριστές που βασίζονται σε αισθητήρες χρησιμοποιούν πίδακες αέρα για την εξαγωγή ενός συγκεκριμένου τύπου υλικού από το ρεύμα του μείγματος. Η ενότητα τροφοδοσίας διανέμει τα ΑΗΗΕ από ένα μόνο στρώμα σε μια μεταφορική ταινία τροφοδοσίας (Belt Feeder). Το υλικό στη συνέχεια μεταφέρεται έτσι ώστε να κινείται κάτω ή μπροστά από πηγή φωτός. Οι τεχνολογίες NIR ανιχνεύουν ένα χαρακτηριστικό υπέρυθρο φάσμα το οποίο είναι μοναδικό για κάθε τύπο υλικού. Τα συστήματα λέιζερ λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο επειδή διαφορετικά αντικείμενα αντανακλούν διαφορετικά σήματα από το λέιζερ. Το ανακλώμενο φως ή το σήμα λέιζερ που εισέρχονται σε έναν αισθητήρα ο οποίος βοηθά τον υπολογιστή και το λογισμικό να βρουν τσιμεντένια κομμάτια στον διαχωρισμό. Αν το σύστημα ανιχνεύσει το σωματίδιο / αντικείμενο που πρέπει να απομακρυνθεί από το μείγμα, ο υπολογιστής ενεργοποιεί τους πίδακες αέρα και το επιλεγμένο αντικείμενο εκτοξεύεται από το κύριο ρεύμα στο τέλος του μεταφορέα ταινίας. Το υλικό που δεν εκτοξεύεται εμπίπτει στο απορριπτέο κλάσμα. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η αρχή των συστημάτων διαλογής που βασίζονται σε αισθητήρες.



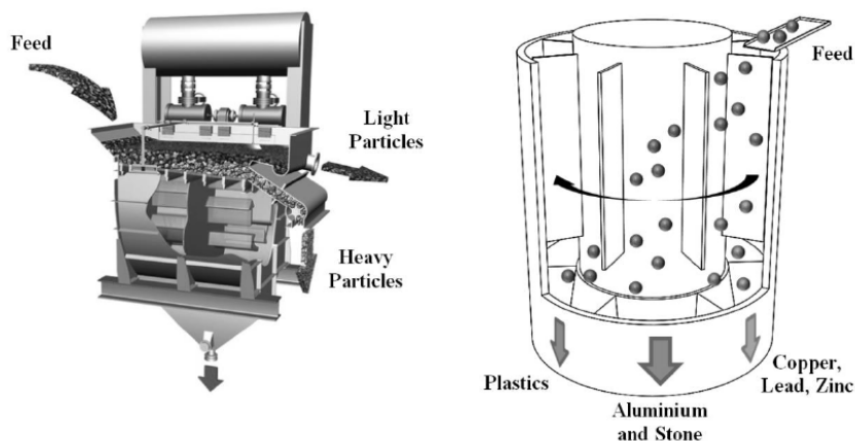
Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση συστήματος ταξινόμησης βασισμένο σε ανίχνευση με αισθητήρες (Hlosta, Jakub, et al. 2017; Hlosta et al.2018)

Η ταξινόμηση με αισθητήρα βρίσκει αποτελεσματική λειτουργία σε πολλές εφαρμογές, όπως τις πλαστικές συσκευασίες, στην επεξεργασία τροφίμων καθώς και στο διαχωρισμό μετάλλων. Η κύρια πρόκληση για τη διαλογή με βάση αισθητήρες στον διαχωρισμό των ΑΗΗΕ είναι ότι τα σωματίδια που πρέπει να διαχωριστούν είναι πολύ μικρότερα από αυτά που υπάρχουν στις εφαρμογές ανακύκλωσης πλαστικών συσκευασιών, τυπικά 8-12mm. Ο σχεδιασμός της πλάκας διαχωρισμού είναι πολύ σημαντικός για την σωστή λειτουργία των συστημάτων διαλογής διότι τα σωματίδια δεν πρέπει να αναπηδούν σε λάθος κλάσμα. Αυτά τα συστήματα είναι πολύ αποδοτικά στη χρήση για τα απόβλητα που σχηματίζονται από μεγαλύτερα τεμάχια ΑΗΗΕ, για παράδειγμα από τις μεγάλες οικιακές συσκευές, αλλά δεν είναι κατάλληλα για μικρά κομμάτια χαλκού από συρμάτινα απόβλητα. Το περιοριστικό μέγεθος των σωματιδίων είναι περίπου 6 mm. Ορισμένα συστήματα δεν μπορούν να διακρίνουν διαφορετικούς τύπους πλαστικών, κάτι που μπορεί να είναι σημαντικό για ορισμένες εφαρμογές. Οι διαχωριστές που βασίζονται σε αισθητήρες είναι επίσης αρκετά δαπανηροί και πολύπλοκοι από δομικής και ηλεκτρονικής άποψης. Οι μαγνητικοί διαχωριστές διαθέτουν παρόμοια κατασκευή με τον μεταφορέα ταινιών, με τους πίδακες αέρα να αντικαθίστανται από μαγνήτες. Ο μαγνητικός διαχωρισμός είναι μια διαδικασία στην οποία το μαγνητικά ευαίσθητο υλικό εξάγεται από ένα μείγμα χρησιμοποιώντας μαγνητικές δυνάμεις. Οι μαγνήτες ρίχνουν μεταλλικά μέρη από τη ζώνη ή τα “κολλούν” στη ζώνη πριν την εναποθέσουν στο σωστό κλάσμα.

### 3.2.4 Τεχνικές Διαχωρισμού Πυκνότητας

Πολλές από τις μεθόδους διαχωρισμού βασίζονται στο σχήμα ή στις πυκνότητες των σωματιδίων χρησιμοποιώντας τεχνική υγρού (wet techniques). Οι υγρές μέθοδοι εκμεταλλεύονται τις διαφορετικές ταχύτητες βύθισης. Τα μέρη με μεγαλύτερη πυκνότητα βυθίζονται ταχύτερα στο υγρό από τα ελαφρύτερα. Σωματίδια με χαμηλότερη πυκνότητα από το υγρό επιπλέουν στην επιφάνεια του υγρού.

Οι διαχωριστές σωματιδίων wet jig (ή baum jig) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαχωρίσουν ένα ευρύ φάσμα σωματιδιακών μεγεθών από 1 mm έως 150 mm. Το μέγεθος των σωματιδίων που μπορούν να διαχωριστούν με wet jig εξαρτάται τόσο από τις απόλυτες πυκνότητες των σωματιδίων στο μείγμα όσο και από τις πυκνότητες των διαφορετικών τύπων υλικού στο μείγμα σε σχέση με το άλλο. Το ακόλουθο σχήμα δείχνει δύο τύπους διαχωριστών με βάση την πυκνότητα.



Εικόνα 19: Σχηματική απεικόνιση συστήματος πλάνης που λειτουργεί με νερό (Alljig) (αριστερά)

Κινητικός διαχωριστής με χρήση βαρύτητας (δεξιά) (Hlosta, Jakub, et al. 2017; Hlosta et al. 2018)

Στο πρώτο είδος των υγρών μεθόδων τα υλικά προς διαχωρισμό εναποτίθεται σε υγρό με ροή προς μια διάτρητη επιφάνεια (ψευδοπάτωμα). Η ροή του νερού με παλμούς βοηθά τα σωματίδια να εναποτεθούν το ένα δίπλα στο άλλο και να δημιουργήσουν στρώματα παρόμοιας πυκνότητας. Το ελαφρύτερο υλικά ρέουν από το άκρο της επιφάνειας, μέσω υπερχειλίσσης και το βαρύτερα κλάσματα συλλαμβάνονται από πλάκες διαχωρισμού για να παράγουν είτε ένα βαρύ και ένα μεσαίο κλάσμα είτε μόνο ένα βαρύ κλάσμα, ανάλογα με την εφαρμογή (Zeng et al. 2012). Στο σχήμα παρουσιάζεται το κύριο δοχείο του διαχωριστή κινητικής βαρύτητας. Το υλικό τροφοδοτείται από τη χοάνη τροφοδοσίας στον ίδιο τον διαχωριστή κινητικής βαρύτητας από έναν δονητικό τροφοδοτή. Η συσκευή εκμεταλλεύεται διαφορές στις τελικές ταχύτητες πτώσης των σωματιδίων στο νερό για το διαχωρισμός των σωματιδίων. Μπορεί να διαχωρίσει το υλικό τροφοδοσίας σε περισσότερα από δύο κλάσματα και έχει χρησιμοποιηθεί από Πανεπιστήμιο Delft για να διαχωρίσει τα ελαφριά και βαριά μη σιδηρούχα κράματα σε εύρος μεγέθους 2-10 mm μαζί με διάφορα είδη πλαστικών. Το υλικό που επιπλέει στο διαχωριστικό συλλέγεται ξεχωριστά (Bakker et al., 2014; Ikhlayel, 2018).

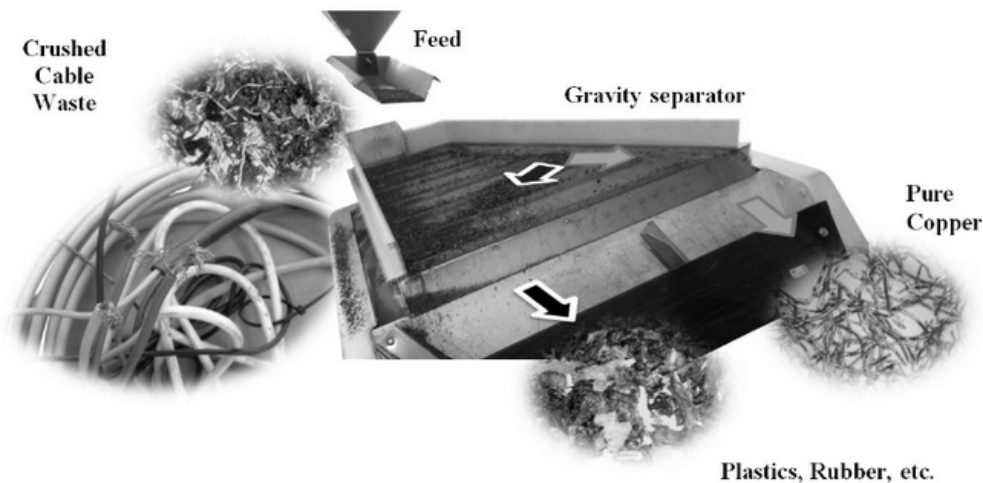
Μεγάλος αριθμός ξηρών μεθόδων (dry methods) εφαρμόζονται στην πράξη. Η αρχή λειτουργίας των τεχνικές αυτών είναι παρόμοια με αυτή των υγρών μεθόδων στις περιπτώσεις όπου τα ελαφρύτερα σωματίδια ανυψώνονται ή διαχωρίζονται από ριπές αέρα. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές και δυνατότητες σχεδιασμού. Ορισμένοι τύποι διαχωριστών αέρα λειτουργούν με κυκλώνα και συστήματα σωληνώσεων ενώ άλλοι βασίζονται σε δονητικούς μίαντες μεταφοράς και λειτουργούν με βαρύτητα.

### 3.2.5 Πειράματα και Μέθοδοι

Σε όλες τις διαδικασίες διαχωρισμού ΑΗΗΕ είναι απαραίτητη η απομάκρυνση των ανεπιθύμητων μεταλλικών προσμίξεων - μόλυνσεων από τα μικτά πλαστικά απόβλητα. Οι μεταλλικές προσμίξεις είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν για την προστασία του εξοπλισμού μείωσης μεγέθους των πολυμερών από πιθανές ζημιές καθώς και την πλήρη αφαίρεση των μετάλλων από το τελικό προϊόν. Ο δεύτερος λόγος για τον οποίο γίνεται διαχωρισμός μετάλλων είναι η ανακύκλωση πολύτιμων μετάλλων, π.χ. χαλκού από τα απόβλητα καλωδίων ή ΑΗΗΕ. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα εξοπλισμού για την αφαίρεση μετάλλων, μερικά από τα οποία παρατίθενται παρακάτω (Ibanescu et al., 2018):

- Μόνιμοι ή υπερ-ζώνες (over band) μαγνήτες - για μεγάλη αφαίρεση σιδήρου
- Μαγνητικοί κύλινδροι κεφαλής - σιδηρούχα και μερική αφαίρεση ανοξείδωτων
- Διαχωριστές Eddy-Current - για αφαίρεση μη-σιδηρούχων μετάλλων
- Επαγωγικές μέθοδοι αφαίρεσης μετάλλων - για όλους τους τύπους μετάλλων
- Διαχωριστές βαρύτητας - για λεπτά σωματίδια

Οι διαχωριστές βαρύτητας είναι χρήσιμοι για την απομάκρυνση λεπτών σωματιδίων μετάλλου από τη ροή (ρεύμα) πλαστικών απορριμμάτων. Αυτός ο τύπος διαχωριστών βρίσκει εφαρμογές κατα κύριο λόγο στη γεωργία όμως έχει μεγάλη αποτελεσματικότητα και στην ανακύκλωση ΑΗΗΕ. Ο διαχωριστής βαρύτητας έχει σχεδιαστεί για να διαχωρίζει βάση της μαζικής πυκνότητας. Η αρχή του διαχωρισμού βαρύτητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε ρεύμα ξηρών σωματιδίων (dry particle stream). Σωματίδια οδηγούνται στο άνω άκρο του μηχανισμού όπου ακολουθούν τη ροή ριπών αέρα που παράγονται. Ο διαχωριστής βαρύτητας είναι ουσιαστικά μια επιφάνεια που ανακινείται με αέρα και αποτελεί μια ευπροσάρμοστη μέθοδο ταξινόμησης μιγμάτων σωματιδίων που μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε να απομακρύνονται τόσο τα βαριά όσο και τα ελαφρά σωματίδια από το κύριο ρεύμα προϊόντων. Οι διαχωριστές βαρύτητας αποτελούνται από ένα δονούμενο πλέγμα μέσω του οποίου περνάει ρεύμα αέρα από έναν ενσωματωμένο ανεμιστήρα. Η επιφάνεια του πλέγματος μπορεί να περιστραφεί γύρω από δύο οριζόντιους άξονες για τη σωστή και αποτελεσματική μετακίνηση υλικού στην επιφάνεια του τραπεζιού. Μεταβλητές που επηρεάζουν την ποιότητα του διαχωρισμού αποτελούν ο ρυθμός ροής του αέρα, η έκκεντρη κίνηση και η κλίση της επιφάνειας του πλέγματος. Η χωρητικότητα επηρεάζεται από το ρυθμό τροφοδοσίας και την τελική ανύψωση. Τα κύρια πλεονεκτήματα του βαρυτικού διαχωριστή είναι ο ομοιογενής διαχωρισμός βάρους και τελικού μεγέθους προϊόντος, η εξαγωγή σκόνης, η ελεγχόμενη απόρριψη προϊόντος, η εύκολη και γρήγορη ρύθμιση για πλήθος ειδών υλικών, η ικανότητα συνεχούς λειτουργίας χωρίς διακοπές και ο αυτοματισμός της διαδικασίας.



Εικόνα 20: Σχέδιο πειραματικής διαδικασίας ανακύκλωσης αποβλήτων καλωδίων (Hlosta, Jakub, et al. 2017)

Στο σχήμα εμφανίζεται το σχέδιο πειραματικής διαδικασίας ανακύκλωσης αποβλήτων καλωδίων. Αρχικά τα καλώδια θρυμματίζονται σε μέγεθος περίπου 3 χιλιοστών. Το μείγμα καλωδίων χαλκού και μονωτικού πλαστικού ή καουτσούκ τροφοδοτείται στην επιφάνεια της συσκευής βαρυτικού διαχωρισμού από τον τροφοδότη με τη βοήθεια δονήσεων μετά που υποστεί σύνθλιψη. Τα ελαφρύτερα πλαστικά σωματίδια αποκτούν μορφή που τείνει σε ρευστό από τον αέρα και ρέει προς την κατώτερη επιφάνεια (τράπεζα), ενώ τα πολύ βαρύτερα υλικά οδηγούνται στο άνω άκρο της επιφάνειας όπου διαχωρίζονται. Τα αποτελέσματα πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί στον τομέα ανακύκλωσης συρμάτων χαλκού έδειξαν ότι ο διαχωριστής βαρύτητας είναι πολύ αποτελεσματικός στο διαχωρισμό των υλικών που περιέχονται στα ΑΗΗΕ. Τα επαναχρησιμοποιημένα ηλεκτρικά καλώδια αποτελούν το 48% της ανακύκλωσης χαλκού στην Ευρώπη. Συγκεκριμένα ο χαλκός είναι ένα από τα λίγα υλικά που μπορεί να ανακυκλωθεί επανειλημμένα χωρίς την υποβάθμιση των ιδιοτήτων του. Δεν υπάρχει διαφορά στην ποιότητα του χαλκού από εξόρυξη και του ανακυκλωμένου χαλκού. Η διαδικασία ανακύκλωσης του χαλκού απαιτεί έως 85% λιγότερη ενέργεια από την πρωτογενή παραγωγή του. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η μείωση κατά 40 εκατομμύρια τόνους CO<sub>2</sub> ετησίως και αντίστοιχα 100 εκατομμύρια MWh ηλεκτρικής ενέργειας (Hlosta, Jakub, et al. 2017).



## ΣΕΑΧ - ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ Χ

### 4.1 Φασματοσκοπία Φθορισμού (XRF) - Ακτίνες Χ

#### 4.1.1 Ιστορικά Στοιχεία

Η ανακάλυψη καθώς και σημαντικό ερευνητικό έργο στον τομέα των ακτίνων Χ πραγματοποιήθηκε από τον φυσικό Wilhelm K. Rontgen (1898). Το 1909 Charles G. Barkla έκανε γνωστή την τεχνική φασματοφωτομετρίας των ακτίνων Χ μελετώντας δείγματα ως προς την δομή των ατόμων τους, αλλά δεν έγινε χρήση της για ανάλυση σε στοιχεία μέχρι και το 1950. Η συσχέτιση του ατομικού αριθμού των στοιχείων με τη χαρακτηριστική ενέργειά τους αντί του ατομικού του βάρους πραγματοποιήθηκε από το φυσικό Henry G.J. Moseley. Η φασματοσκοπία ακτίνων Χ στηρίχτηκε μετέπειτα στο νόμο του Moseley ο οποίος αφορά τις χαρακτηριστικές ακτίνες που εκπέμπονται από τα άτομα. Η αναγνώριση της ανάπτυξης και εφαρμογών των ακτίνων Χ ως σημαντικό τεχνολογικό επίτευγμα δεν καθυστέρησε, με την μεγάλο αριθμό Noble Φυσικής να απονέμονται σε επιστήμονες που ασχολήθηκαν με αυτές στο χρονικό διάστημα 1914 έως και 1924. Το 1947 έγινε εφαρμογή για πρώτη φορά διάταξη από τους Birks, L.S. και Friedman, H.

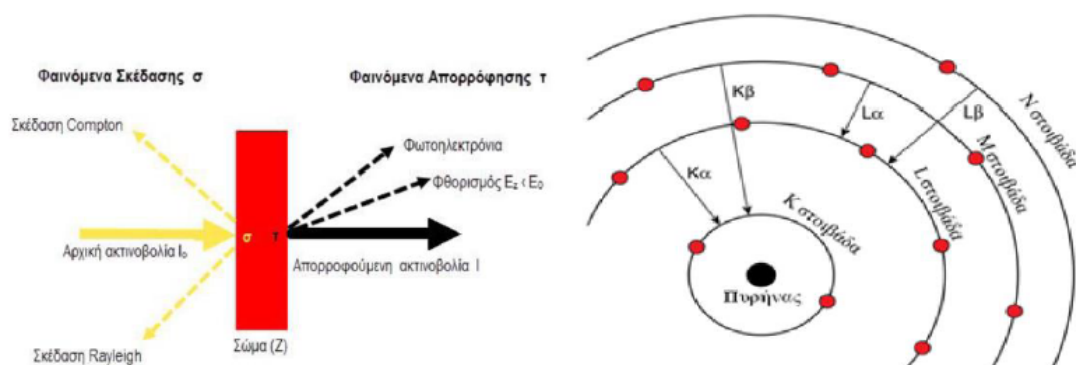
Για την φασματοσκοπία ακτίνων Χ στις πρώτες διατάξεις έγινε χρήση ηλεκτρονίων ως πηγή διέγερσης. Δυσκολίες των εφαρμογών αποτέλεσε η εξέταση δειγμάτων που αποτελούνταν από ηλεκτρικά αγωγά υλικά, το απόλυτο κενό που ήταν προαπαιτούμενο της διαδικασίας καθώς και τα όρια εξάτμισης των υλικών. Για την αντιμετώπιση των δυσκολιών έγινε τοποθέτηση του δείγματος σε συνθήκες κενού και με μηχανισμό ψύξης, εκτός της πηγής παραγωγής ακτίνων Χ (τότε λυχνίας). Καταυτόν τον τρόπο προέκυψε το φαινόμενο του φθορισμού, η παραγωγή δηλαδή δευτερογενών ακτίνων Χ κατά τη διέγερση του δείγματος. Η πρώτη εμπορική εφαρμογή των φασματοφωτόμετρων έγινε με τεχνολογία WD - χρήση διασποράς του μήκους κύματος της ακτίνας. Η κατασκευαστική τους διάταξη διέθετε ως πηγή ακτίνων Χ λυχνία με κάθοδο βολφραμίου και ως δέκτη μετρητή ακτινοβολίας Geiger. Για την απομόνωση των κυμάτων φθορισμού από το εξεταζόμενο υλικό γινόταν χρήση περίθλασης μέσω κρυστάλλου. Η μεγαλύτερη ευελιξία των σύγχρονων τεχνικών φασματοσκοπίας φθορισμού XRF με εφαρμογή ανιχνευτικών ημιαγωγών και η διευκόλυνση της χρήσης Η/Υ σε σχέση με τα φασματοφωτόμετρα διασποράς ενέργειας οδήγησε σε αύξηση της χρήσης των πρώτων (Κουή et al., 2015).

#### 4.1.2 Επεξήγηση Τεχνικής Φασματοσκοπίας Φθορισμού

Δέσμη αποτελούμενη από μικρά μήκη κύματος μεγέθους ατομικής απόστασης εκπέμπεται από τη λυχνία, η οποία δίνει πληθώρα εφαρμογών και αναλύσεων καθώς διαθέτει υψηλή δυνατότητα διείσδυσης σε υλικά. Αυτό το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βρίσκεται μεταξύ των τμημάτων της υπεριώδους ακτινοβολίας και των ακτίνων γ. Οι διαφορετικές αλληλεπιδράσεις των ακτίνων Χ με την ύλη απεικονίζονται στην Εικόνα 21 που ακολουθεί.

Από την διάδραση της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας με την ύλη προκύπτει η

εξέταση των πρωτεύων και δευτερευόντων στοιχείων. Κατα τη επίδραση της ακτινοβολίας, προσφέρεται ενέργεια και ηλεκτρόνια απομακρύνονται από το άτομο (ιονισμός). Κατα την απομάκρυνση, για παράδειγμα, ηλεκτρονίου από εσωτερική στιβάδα ενός ατόμου, ηλεκτρόνιο εξωτερικής στιβάδας μεταπίπτει σε εσωτερική για την κάλυψη της κενής πλέον θέσης (Εικόνα 21 δεξιά). Για τις στιβάδες έχουν καθιερωθεί οι ονομασίες K έως O εσωτερικά προς εξωτερικά του ατόμου. Η μέτρηση των στιβάδων γίνεται κατά κύριο λόγο με τεχνική μη καταστροφικής φασματοσκοπίας φθορισμού καθώς διαθέτουν υψηλότερη ποσότητα ενέργειας. Οι ακτίνες X που διαθέτουν την υψηλότερη ποσότητα ενέργειας είναι οι μεταπτώσεις άλφα (K-alpha και L-alpha x-rays). Κατα τη μετάπτωση ηλεκτρονίου της L στιβάδας συμπληρώνεται η κενή θέση της στιβάδας K και προκύπτει εκπομπή ακτινοβολίας  $K\alpha_1/K\alpha_2$ . Ο υπολογισμός των La στιβάδων είναι δυνατός κατα τη μετάπτωση ηλεκτρονίου προερχόμενο από τη στιβάδα M σε στοιχεία που διαθέτουν μεγάλο ατομικό αριθμό. Η ανάλυση της υλική σύσταση των εξεταζόμενων δειγμάτων είναι δυνατή με τεχνικές XRF. Για την ανάλυση τετοιων στοιχείων με άνοδο Re ή Rh γίνεται χρήση έντασης ρεύματος 1-4mA καθώς και τάσης 35-40 kV. Η μελέτη στοιχείων χαμηλότερου ατομικού αριθμού απαιτεί τάσεις της τάξης των 15 kV καθώς και αφαίρεση των φίλτρων. (Κουή et al., 2015)



Εικόνα 21: Αλληλεπίδραση ακτίνων X με την ύλη (αριστερά) Σχηματική αναπαράσταση των μεταπτώσεων λόγω φθορισμού ακτίνων X (δεξιά) (Κουή et al., 2015)

#### 4.1.3 Τμηματική Ανάλυση Φασματοφωτόμετρου

##### ● Πηγή παραγωγής ακτίνων X

Η παραγωγή ακτίνων X μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ραδιενεργών ισοτόπων διατάξεων σύγχροτρου και λυχνίας παραγωγής. Στα φορητά συστήματα χρησιμοποιείται κυρίως λυχνία παραγωγής ακτίνων X για λόγους ασφαλείας. Η λυχνία παραγωγής ακτίνων X περιλαμβάνει την επιτάχυνση μιας δέσμης ηλεκτρονίων και την πρόσπτωση σε ένα συγκεκριμένο μέταλλο.

##### ● Ανιχνευτής – Δέκτης

Ο ανιχνευτής μετατρέπει τις ακτίνες X που εκπέμπονται από το δείγμα σε ηλεκτρονικά σήματα, από τα οποία προσδιορίζεται η ενέργεια και η ένταση (αριθμός ακτίνων X). Η βασική κατηγορία ανιχνευτών είναι οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης (Solid State Detectors, SSD) (Κουή et al., 2015).

#### 4.1.4 Πλεονεκτήματα Τεχνικής

Η οπτική των ακτίνων X είναι ο ακρογωνιαίος λίθος της τεχνικής καθώς παρέχει τη δυνατότητα διέγερσης ενός δείγματος τμηματικά και σε μικρή ένταση, επιτυγχάνοντας την επιθυμητή ένταση φθορισμού. Στη συνέχεια αναλύονται ορισμένες από τις δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα της τεχνικής:

- Διατήρηση δείγματος. Δεν πραγματοποιείται καταστροφή των δειγμάτων ούτε αυτά αλλοιώνονται κατά την αλληλεπίδρασή τους με τις ακτίνες X. Η επαναχρησιμοποίησή τους στο μέλλον ως πρότυπα είναι δυνατή καθώς και η χρήση τους σε άλλες μεθόδους.
- Χαμηλή ανάγκη προεργασιών. Η ανάλυση του μεγαλύτερου μέρους των υλικών πραγματοποιείται με λίγη ή και καθόλου προετοιμασία. Άλλες μέθοδοι απαιτούν διαδικασίες διαλυτοποίησης οι οποίες είναι χρονοβόρες και ακριβές εξαιτίας των αντιδραστηρίων. Σε αρχαιολογικά αντικείμενα δεν απαιτείται εκτενής καθαρισμός, αφού η διείσδυση των ακτίνων X δεν εξαρτάται από τα υπολείμματα χρώματος της επιφάνειας. Ο όγκος που αναλύεται είναι μεγαλύτερος από οποιοδήποτε επιφανειακό ρύπο, εκτός από την πατίνα των περισσότερων μετάλλων που μπορεί να αλλάξει τη σύσταση της επιφάνειας και να έχει εσφαλμένα αποτελέσματα.
- Ταχύτητα μεθόδου. Η ανάλυση των περιεχόμενων υλικών πραγματοποιείται με ταχύτατους ρυθμούς της τάξης δευτερολέπτων.
- Απλότητα χρήσης. Σύγχρονες εφαρμογές H/Y κάνουν δυνατή την άμεση λήψη και καταγραφή των περιεχόμενων υλικών με τη γρήγορη ολοκλήρωση των υπολογισμών από τις μετρήσεις που λήφθηκαν μέσω των οργάνων της μεθόδου.
- Κόστος. Οι αναλύσεις φασματογραφίας ακτίνων X κοστίζουν ελάχιστα.
- Υπάρχει πλήθος εφαρμογών των αναλύσεων XRF με μεγάλη χρηστικότητα στην ανάλυση πολλών υλικών όπως πλαστικών, περιβαλλοντικών δειγμάτων, τροφίμων, φαρμάκων, ορυκτών, μετάλλων, κεραμικών, χρωστικών, γυαλιού κ.ά. Πιο συγκεκριμένα τεχνική XRF χρησιμοποιείται ευρέως στις παρακάτω εφαρμογές:
- Εδαφική ανάλυση, με κύριες εφαρμογές σε καλλιεργήσιμα αλλά και βεβαρημένα από ρύπους εδάφη.
- Περιβαλλοντική ανάλυση της ατμόσφαιρας με λήψη τιμών σε βάθος χρόνου.
- Ποιοτικός Έλεγχος σε γραμμές παραγωγής.
- Ανάλυση δειγμάτων γεωτρήσεων με σκοπό κοιτασμάτων ορυκτών πόρων.
- Αναγνώριση των περιεχομένων των αποβλήτων κατά τη διαδικασία της ανακύκλωσης για την ανάκτηση του μεταλλικού κλάσματος το οποίο δύναται να περιέχει πολύτιμα και αξιοποιήσιμα υλικά (Κουή et al., 2015)

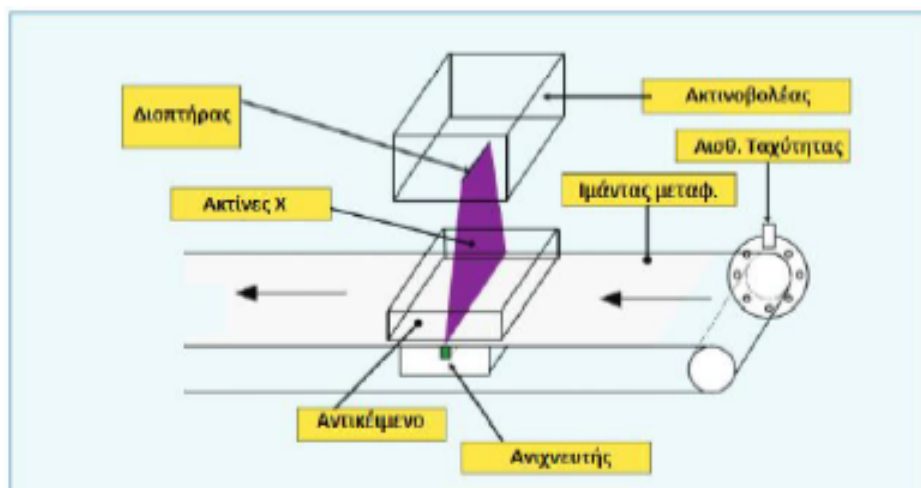
## 4.2 Συστήματα Επιθεώρησης με Ακτίνες Χ

### 4.2.1 Εισαγωγή στα ΣΕΑΧ

Η κατασκευή των Συστημάτων Επιθεώρησης με ακτίνες Χ προέκυψε από την ανάγκη βελτίωσης του ελέγχου ποιότητας των προϊόντων και ασφάλειας στις γραμμές παραγωγή, ανάγκες της σημερινής, σύγχρονης, τεχνολογικά εξαρτώμενης κοινωνίας. Λόγοι ασφαλείας ώθησαν ερευνητές στην εφαρμογή ΣΕΑΧ σε αεροδρόμια κατα το 1970, από όπου έγινε εφαρμογή τους και σε άλλους τομείς της καθημερινότητας. Ο εξοπλισμός έχει την ικανότητα αναγνώρισης σφαλμάτων των υλικών και της αναζήτησης συγκεκριμένων υλικών σε δείγματα. Παράδειγμα αποτελεί η αναγνώριση σφαλμάτων σε συσκευασμένα προϊόντα ή συνεχόμενη ροή αυτών. Διαθέτει τη δυνατότητα ανίχνευσης αντικειμένων όπως γυαλί, πέτρες, κόκαλα, πληθώρα μετάλλων αλλά και πλήθους πλαστικών. Η ευαισθησία της διαδικασίας ανίχνευσης εξαρτάται από το εξεταζόμενο υλικό αλλά και την ίδια την εφαρμογή του εξοπλισμού. Εκτός αγνώστων αντικειμένων είναι δυνατή η ανεύρεση άδειων συσκευασιών, θραυσμάτων ή ελαττωματικών αγαθών. Η απεικόνιση των εξεταζόμενων υλικών γίνεται ευκρινώς συμβάλλοντας σημαντικά στις προαναφερόμενες κατηγορίες αναφορών. Τέλος, παρέχεται η ικανότητα βαρυτικού υπολογισμού των υλικών μέσω της πυκνότητάς του και συνάρτηση της μάζας του. ( Πηγή: heatandcontrol.com)

### 4.2.2 Λειτουργία

Τα ΣΕΑΧ αποτελούνται από τρία κύρια τμήματα: την πηγή ακτίνων Χ (ακτινοβολέα), τον ανιχνευτή προσδιορισμού της ενέργειας και έντασης της ακτινοβολίας (ανιχνευτή) και ισχυρό υπολογιστή υψηλών ταχυτήτων που μπορεί να διαχειριστεί τη ροή πληροφοριών της εφαρμογής. Μετα την εισαγωγή ενός εξεταζόμενου υλικού στο ΣΕΑΧ αυτό μεταφέρεται με ιμάντα στο θάλαμο ακτινοβολήσης. Ειδικός σωλήνας από γυαλί ο οποίος διατηρείται σε χαμηλή θερμοκρασία συντελεί στην παραγωγή ακτίνων Χ. Κατα την εφαρμογή υψηλής τάσης στο σωλήνα, προκύπτει συσσώρευση ηλεκτρονίων. Στο προς επιθεώρηση αντικείμενο προσπίπτουν τα ηλεκτρόνια και ανάλογα το πάχος του υλικό του καθώς και το ίδιο το υλικό, το διαπερνά διαφορετική ποσότητα ηλεκτρονίων καθώς η απορροφητικότητα μεταβάλλεται. Στη συνέχεια ο ανιχνευτής μετατρέπει τη δέσμη σε ηλεκτρονική μορφή και υπολογιστής συντελεί στις κατάλληλες διεργασίες για την αξιοποίηση του αποτελέσματος της ακτινοβολήσης. Στο επόμενο βήμα της διαδικασίας ιμάντας εξάγει το δείγμα από τη συσκευή. Για τη βελτίωση των δεδομένων ακτινοβολήσης, αποκρύπτονται άλλες πηγές ακτινοβολίας και ο θάλαμος προετοιμάζεται για τη διάχυση. Σε διαφορετικά ΣΕΑΧ εκτός της επιθεώρησης είναι δυνατή και η απομάκρυνση ελαττωματικών αγαθών από εργοστασιακή ροή καθώς και η εξέταση των υλικών περιεχομένων αγαθών όπως και η διευκόλυνση της κατηγοριοποίησης κατά τον διαχωρισμό ΑΗΗΕ η οποία αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας (Jianga et al. 2007).



Εικόνα 22: Βασική διάταξη ΣΕΑΧ

### 4.3 Είδη ΣΕΑΧ

Η χρήση του ίδιου εξοπλισμού δεν είναι πάντα δυνατή για εξειδικευμένες εφαρμογές. Το επιθεωρούμενο αγαθό είναι καθοριστικό στη διαδικασία λόγω των απαιτήσεων απεικόνισης και ακρίβειας ελέγχου ποιότητας. Τα διαθέσιμα συστήματα επιθεώρησης γίνεται να διαχωριστούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες:

- Συστήματα ΕΑΧ Αυτόματου εφοδιασμού
- Συστήματα ΕΑΧ Μη αυτόματου εφοδιασμού
- Φορητά & Κινητά Συστήματα ΕΑΧ

#### 4.3.1 ΣΕΑΧ Αυτόματου Εφοδιασμού

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, εκτός των κύριων τμημάτων των ΣΕΑΧ που αποτελούνται από τον ακτινοβολέα, ανιχνευτή και ηλεκτρονικό υπολογιστή για την επεξεργασία των δεδομένων, περιέχεται και ιμάντας για τη διευκόλυνση μετακίνησης του δείγματος εντός ή εκτός του εξοπλισμού. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τέτοιες εφαρμογές ΣΕΑΧ:

#### 4.3.2 ΣΕΑΧ Μεταλλικών και μη Δοχείων

Με τη χρήση οριζόντιας δέσμης ακτίνων Χ διαθέτει την ικανότητα τεμαχίων σε κάθετη διάταξη όπως φιάλες και βάζα. Οι λειτουργίες του περιλαμβάνουν τον ταχύτατο έλεγχο ποιότητας των εξεταζόμενων υλικών καθώς και την αφαίρεση των ελαττωματικών από τη γραμμή παραγωγής. (Πηγή: thermofisher.com)



Εικόνα 23 : ΣΕΑΧ Μεταλλικών και μη Δοχείων εταιρίας Thermofisher

#### 4.3.3 ΣΕΑΧ Συσκευασμένων προϊόντων

Το σύστημα προορίζεται για την επιθεώρηση μεγάλων συσκευασιών προϊόντων σε γραμμές παραγωγής όπως σακίδια ζωοτροφών, τσάντες και δίσκους. Για αυτό το σκοπό έχει σχεδιαστεί ειδικά ώστε να διαθέτει μεγάλο άνοιγμα εισόδου και ευρύχωρο εσωτερικό. Ο σχεδιασμός του προσφέρεται για την τοποθέτησή του στο τελικό στάδιο γραμμών παρασκευής προϊόντων και διαθέτει επίσης την δυνατότητα εκτίμησης του βάρους μέσω του υπολογισμού πυκνότητας από την ακτινοβολήση, τη διασταύρωση με ογκομετρικά δεδομένα της απεικόνισης που διαθέτει καθώς και το γέμισμα ελλিপών τεμαχίων. Μπορεί τέλος να ανιχνεύσει το περιεχόμενο της συσκευασίας για τυχόν ελέγχους και διορθώσεις. Οι έλεγχοι μπορούν να πραγματοποιηθούν με ευαισθησία της τάξεως 0.4 έως 0.8 χιλιοστών και σε θερμοκρασιακό εύρος 5-40 C. (Πηγή: thermofisher.com)



Εικόνες 24: ΣΕΑΧ Συσκευασμένων προϊόντων εταιρίας Thermofisher

#### 4.3.4 ΣΕΑΧ Ασυσκεύαστων προϊόντων

Η μελέτη αυτής της εφαρμογής ΣΕΑΧ έχει γίνει για την ανάλυση κυρίως τροφίμων προ της συσκευασίας τους απο ανεπιθύμητα υλικά που πιθανώς ρυπαίνουν το προϊόν. Διαθέτουν τη δυνατότητα ακτινοβολήσης και ανίχνευσης μορφολογικών διαφορών από τις προβλεπόμενες καθώς και αντίστοιχων διαφορών στα περιεχόμενα. Σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες μεθόδους είναι η αύξηση της αποδοτικότητας της διαδικασίας με την ταυτόχρονη συρρίκνωση των απορριπτόμενων υλών (Πηγή: mt.com).



Εικόνες 25: ΣΕΑΧ Ασυσκεύαστων προϊόντων εταιρίας Mettler Toledo

#### 4.3.5 ΣΕΑΧ Χύμα προϊόντων

Για εφαρμογές που το προϊόν δεν είναι συσκευασμένο είναι δυνατή η εφαρμογή συστήματος διαχωρισμού υλικών. Τόσο προϊόντα καθώς πρώτες ύλες όπως σπόροι, ξηροί καρποί, φρούτα και λαχανικά είναι δυνατό να επιθεωρηθούν με τέτοιου είδους εφαρμογές ΣΕΑΧ. Διαθέτει τη δυνατότητα απομάκρυνσης ξένων υλικών αυξάνοντας την αποδοτικότητα της γραμμής παραγωγής. Τετοια συστήματα έχουν υψηλή ευελιξία καθώς έχουν τη δυνατότητα να αναγνωρίσουν και διαχωρίσουν



οποιοδήποτε βρώσιμο προϊόν μέσω των εφαρμογών λογισμικού που αυτά διαθέτουν. (Πηγή: thermofisher.com)



Εικόνες 26 : ΣΕΑΧ Χύμα προϊόντων εταιρίας Thermofisher

#### 4.3.6 ΣΕΑΧ Ασφάλειας Συσκευασιών Αποσκευών και Δεμάτων

Αυτο το προηγμένο ΣΕΑΧ διαθέτει ακτίνες X διπλής δέσμης για την ανίχνευση επικίνδυνων αντικειμένων σε αποσκευές ιδιωτών και χρησιμοποιείται ευρέως στην ασφάλεια. Εφαρμογή του μπορεί να γίνει και σε φυλασσόμενους χώρους πέραν των αεροδρομίων. (Πηγή smithsdetection.com)



Εικόνα 27: ΣΕΑΧ Αποσκευών και Δεμάτων εταιρίας Smiths Detection

#### 4.3.7 ΣΕΑΧ Μεγάλων Φορτίων (Ασφάλεια)

Ο σχεδιασμός του σύστημα πραγματοποιήθηκε συγκεκριμένα για εφαρμογή σε αποθήκες, χώρους μεταφορών και ταχυμεταφορών καθώς και αεροδρόμια. Είναι ειδικά σχεδιασμένο για φορτία που έχουν ασφαλιστεί σε παλέτες. Για την ταχύτατη ανίχνευση των περιεχομένων υλικών γίνεται χρήση διπλής δέσμης ακτίνων X. Χαρακτηρίζεται από την δυνατότητα αναγνώρισης υλικών ευρισκόμενων πίσω από χαλύβδινες πλάκες πάχους μέχρι και 37mm καθώς και της ευκρίνειας που διαθέτει κατά την αναγνώριση των περιεχομένων των φορτίων. (Πηγή: smithsdetection.com)





Εικόνα 28: ΣΕΑΧ Μεγάλων Φορτίων εταιρίας Smiths Detection

#### 4.3.8 ΣΕΑΧ Μη-αυτόματου εφοδιασμού

Ο σχεδιασμός αυτών των συστημάτων έχει πραγματοποιηθεί για το μεμονωμένο έλεγχο αντικειμένων όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια διαστάσεων και μορφολογίας. Τα προς εξέταση αντικείμενα μπορούν να ελεγχθούν για μορφολογικές αστοχίες σε σύνθεση και την κατασκευή τους. Το αντικείμενο τοποθετείται αυτούσιο και μεμονωμένο στο χώρο ελέγχου χωρίς χρήση μάντα λόγω της ακρίβειας που απαιτείται.

#### 4.3.9 ΣΕΑΧ Αυτοκινητοβιομηχανίας

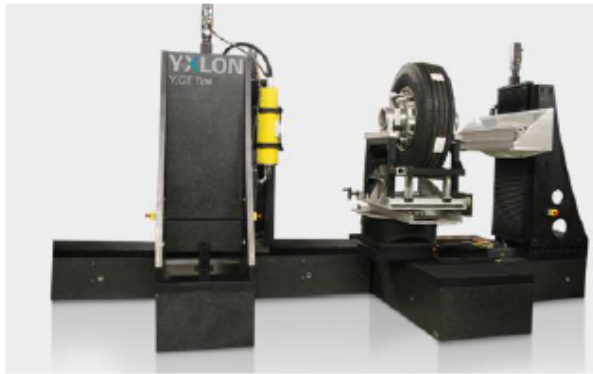
Οι ανάγκες της αυτοκινητοβιομηχανία για ακριβή έλεγχο ποιότητας του παραγόμενου εξοπλισμού είναι υψηλές και μπορούν να καλυφθούν από Συστήματα επιθεώρησης Ακτίνων Χ. Τα συστήματα επιθεώρησης χρησιμοποιούνται επίσης ευρέως σε διαδικασίες ανάπτυξης νέου εξοπλισμού. Πραγματοποιείται ποιοτικός έλεγχος των προϊόντων ώστε να ανταποκρίνονται στα αυστηρά παραγωγικά στάνταρ ασφαλείας αυτοχών και επιδόσεων της αυτοκινητοβιομηχανίας. Χρήση αυτής της κατηγορίας ΣΕΑΧ πραγματοποιείται στους τομείς:

- Ελαστικών
- Ζαντών
- Ηλεκτρομηχανικών Εξαρτημάτων
- Εξαρτημάτων Αμαξώματος

#### 4.3.10 ΣΕΑΧ Υλικών Χυτηρίου

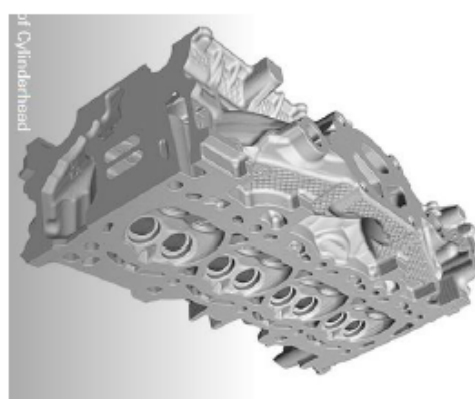
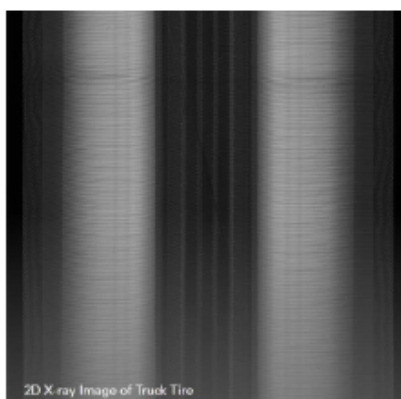
ΣΕΑΧ γίνεται να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο των παραγώγων υλικών χυτηρίων. Οι αστοχίες που προκύπτουν κατά τη χύτευση όπως κυψέλες, εγκλείσματα ή πόροι καθώς και η ακρίβεια που απαιτείται τόσο διαστασιολογικά αλλά και στην εσωτερική δομή των προκυπτόμενων δοκιμίων ανιχνεύονται επιτυχώς και σε πλήθος εργοστασιακών εφαρμογών. Η ακριβής ανίχνευση που παρέχουν τα ΣΕΑΧ είναι χρήσιμη σε εφαρμογές όπως:

- Έμβολα Μηχανών
- Δισκόπλακες οχημάτων
- Μηχανισμούς ανάρτησης
- Κινητήρες εσωτερικής καύσης



Εικόνες 29: ΣΕΑΧ Αυτοκινητοβιομηχανίας (αριστερά) και Υλικών Χυτηρίου (δεξιά) εταιρείας YXLON

Χρήση ΣΕΑΧ μπορεί να πραγματοποιηθεί και κατα τον ποιοτικό έλεγχο για την ανίχνευση ελαττωμάτων στη δομή και το περιεχόμενο προϊόντων. Τα αποτελέσματα της ακτινοβολήσης μπορούν να αναλυθούν με Η/Υ και να απεικονιστούν ηλεκτρονικά. Παραδείγματα της αποτύπωσης προϊόντων εμφανίζονται στις εικόνες που ακολουθούν (Πηγή yxlon.com)



Εικόνες 30: Αποτύπωση Ελαστικού (αριστερά), αποτύπωση κινητήρα εσωτερικής καύσης (δεξιά) (Πηγή yxlon.com)

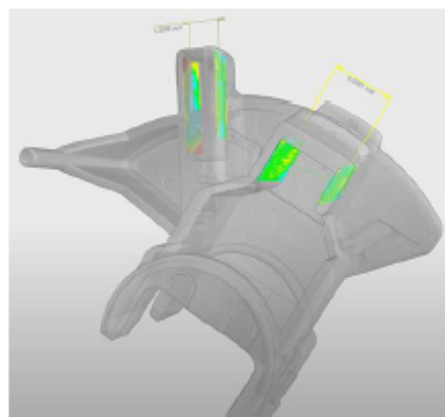
#### 4.3.11 ΣΕΑΧ Επιστήμης και Έρευνας

Ο κλάδος αυτός έχει εξαιρετικές απαιτήσεις στον εξοπλισμό με αποτέλεσμα τα συστήματα επιθεώρησης να έχουν σχεδιαστεί συγκεκριμένα για εξειδίκευση και προσαρμογή σε εφαρμογές. Η χρησιμότητά τους σε πολυάριθμες εφαρμογές οφείλεται στο ότι τα εξεταζόμενα υλικά διαθέτουν ιδιαίτερες μορφολογικές και διαστασιολογικές διαφορές. Τα Πεδία χρήσης τέτοιων ΣΕΑΧ μπορεί να είναι:

- Πολιτιστικά & Αρχαιολογικά (π.χ. Αναπαλαίωση)
- Εξέταση Υλικών
- Βιολογία
- Γεωλογία

#### 4.3.12 ΣΕΑΧ Μετρολογίας

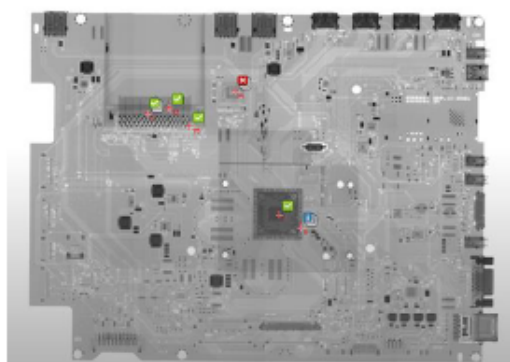
Η Μετρολογία είναι η επιστήμη που ασχολείται με τις μετρήσεις, τα όργανα μέτρησης, την αξιοπιστία των οργάνων και των μετρήσεων, τις μονάδες μέτρησης και γενικότερα με ότι αφορά στην ακριβή και αποδεκτό προσδιορισμό των τιμών των μεγεθών που προσδιορίζουν τις ιδιότητες των σωμάτων ή των συστημάτων. Τα συστήματα επιθεώρησης επιτυγχάνουν μέτρηση διαστάσεων, παρέχουν ακριβή δεδομένα για τη χαρτογράφηση της επιφάνειας και την απεικόνιση της σε τρισδιάστατη μορφή. Χαρακτηρίζονται για τα έγκυρα αποτελέσματα και την αύξηση της παραγωγικότητας για την εξασφάλιση της μελλοντικής ποιότητας των προϊόντων της βιομηχανίας (Πηγή: <https://www.scienter.gr/web/el/metrology.php>).



Εικόνες 31: ΣΕΑΧ Επιστήμης, Έρευνας και Μετρολογίας εταιρείας YXLON (αριστερά) Μετρολογική επιθεώρηση αντικειμένου χύτευσης με έγχυση (δεξιά) (Πηγή: [yxlon.com](http://yxlon.com))

#### 4.3.13 ΣΕΑΧ Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού

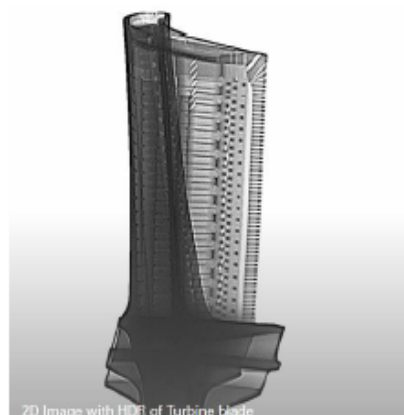
Με την πάροδο των χρόνων και πληθώρα τεχνολογικών επιτευγμάτων υπάρχει η τάση σύμκρυνσης του ηλεκτρονικού εξοπλισμού καθώς αυτός εξελίσσεται. Οι χειρωνακτικές διαδικασίες κατά την παραγωγή τους έχουν αντικατασταθεί με την αυτόματη τοποθέτηση των εξαρτημάτων με ρομποτικά συστήματα. Η εφαρμογή των ΣΕΑΧ αυτού του τομέα έχει γίνει με γνώμονα τον έλεγχο ποιότητας των προϊόντων χωρίς την πρόκληση ζημιών σε αυτά καθώς και την διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του.



Εικόνες 32: ΣΕΑΧ Ηλεκτρονικών εξαρτημάτων εταιρείας YXLON (αριστερά) Απεικόνιση Ηλεκτρονικής Πλακέτας (PCB) (δεξιά) (Πηγή: yxlon.com)

#### 4.3.14 ΣΕΑΧ Αεροναυπηγικής και Διαστημικής Βιομηχανίας

ΣΕΑΧ για υλικά στα οποία εφαρμόζονται τα πιο αυστηρά μέτρα ασφάλειας και ελέγχου ποιότητας. Σε Αεροναυπηγικές καθώς και Διαστημικές εφαρμογές είναι άκρως απαραίτητη η απόλυτα σωστή λειτουργία όλων των επιθεωρούμενων εξαρτημάτων.



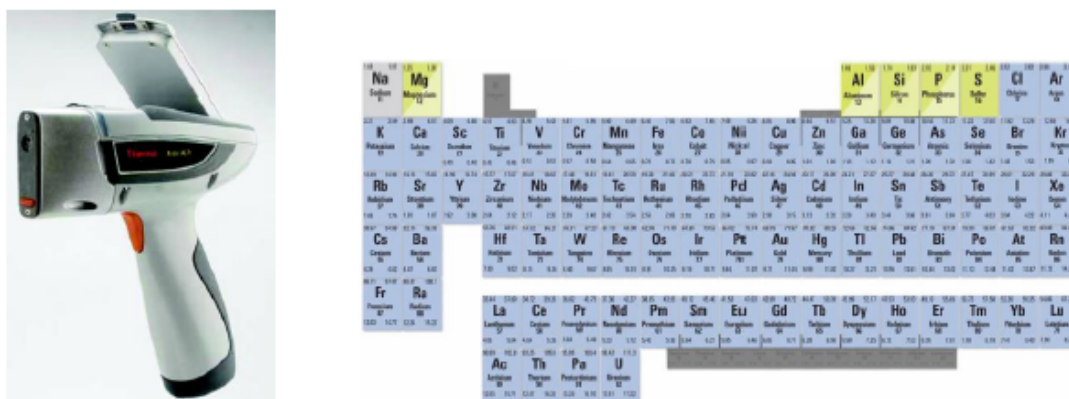
Εικόνες 33: ΣΕΑΧ Αεροναυπηγικής & Διαστημικής Βιομηχανίας εταιρείας YXLON (αριστερά) Απεικόνιση Πτερυγίων στροβιλοκινητήρα (δεξιά) (Πηγή: yxlon.com)

## 4.4 Φορητά και Κινητά ΣΕΑΧ

Σε ορισμένες εφαρμογές η δυσκολία μεταφοράς αντικειμένων μεγάλου όγκου αντικειμένου ή μεμονωμένων δύσκολων στη μετακίνηση αντικειμένων οδήγησαν τις εταιρείες στην κατασκευή ΣΕΑΧ που μπορούν να μετακινηθούν εύκολα με επιτόπου εφαρμογή.

### 4.4.1 Φορητό ΣΕΑΧ Χημικών Στοιχείων (XRF)

Τα ΣΕΑΧ Χημικών Στοιχείων XRF είναι ελαφριά, διαθέτουν υψηλή αντοχή και έχουν απλή εφαρμογή. Τα αποτελέσματα των ελέγχων που παρέχουν γίνονται επιτόπου και είναι ταχύτατα. Διαθέτουν πλήθος εφαρμογών καθώς είναι φορητά και έχουν μεγάλο εύρος αναγνώρισης στοιχείων όπως φαίνεται στην εικόνα 34. Βρίσκουν εφαρμογή στον έλεγχο ποιότητας, σε ερευνητικούς οργανισμούς αλλά και στην αξιοποίηση ανακυκλωμένων υλικών, όπως για παράδειγμα για τον έλεγχο καθαρότητας δοκών αλουμινίου (Πηγές: thermofisher.com ; mistrasgroup.gr).



Εικόνες 34: ΣΕΑΧ Χημικών Στοιχείων (XRF) εταιρείας Thermofisher (αριστερά) Στοιχεία περιοδικού πίνακα που αναγνωρίζει το ΣΕΑΧ (δεξιά) (Πηγή: thermofisher.com)

### 4.4.2 Φορητό ΣΕΑΧ Ηλεκτροκόλλησης

Λόγω των υψηλών διεθνών προτύπων ασφαλείας, η κατασκευή αυτού του τύπου ΣΕΑΧ απαιτεί υψηλή ακρίβεια. Ο έλεγχος αυτών των ΣΕΑΧ για την τήρηση των απαραίτητων προδιαγραφών γίνεται ατομικά ανα τεμάχιο. Η ευκρίνεια και η δυνατότητα διείσδυσης που διαθέτει λόγω της πανοραμικής δέσμης ακτίνων που χρησιμοποιεί το καθιστά ισχυρό εργαλείο που βελτιώνει την αποδοτικότητα των κολλήσεων υψηλής ακρίβειας. (Πηγή: yxlon.com)



Εικόνες 35: ΣΕΑΧ Ηλεκτροκόλλησης εταιρείας YXLON (αριστερά) Αγωγοί επιθεώρησης ηλεκτροκόλλησης (δεξιά) (Πηγή: yxlon.com)

#### 4.4.3 Κινητό ΣΕΑΧ αποσκευών και φορτίων

Για την παραγωγή ενός κινητού ΣΕΑΧ αποσκευών και φορτίων είναι δυνατή η προσαρμογή στο αμάξωμα αυτοκινήτου ή άλλου οχήματος ενός συστήματος επιθεώρησης. Τέτοιος σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε ειδικά για τον έλεγχο ασφάλειας τεμαχίων. Διαθέτει μάντα όπου τοποθετούνται οι αποσκευές για τη διακίνησή τους. Ο έλεγχος επί του οχήματος γίνεται για εφαρμογές όπου ο αντίστοιχος έλεγχος αποσκευών είναι αδύνατος. (smithsdetection.com).



Εικόνα 36: Κινητό ΣΕΑΧ αποσκευών και φορτίων εταιρείας Smiths Detection (smithsdetection.com)

#### 4.5 Πλεονεκτήματα και Ασφάλεια ΣΕΑΧ

Τα Συστήματα Επιθεώρησης διαθέτουν ευρεία χρήση σήμερα λόγω του πλήθους εφαρμογών στα οποία κρίνονται αναγκαία καθώς και των πολυάριθμων θετικών χαρακτηριστικών που διαθέτουν όπως:

- Η ευκολία χρήσης και οι προσιτές τιμές στις οποίες αυτά είναι διαθέσιμα. Συγκριτικά οι ακτινοβολίες παλαιότερης τεχνολογίας ήταν δαπανηροί και πολύπλοκοι στη λειτουργία. Η βελτίωση των ικανοτήτων των ανιχνευτών καθώς και ο περιορισμός της ισχύος της πηγής έκανε δυνατό αυτό το αποτέλεσμα.
- Μεγαλύτερη ασφάλεια στη χρήση. Η θερμοκρασία στον ακτινοβολέα είναι χαμηλότερη και οι απαιτήσεις θωράκισης του συστήματος είναι σημαντικά λιγότερες. Αυτό προκύπτει ως άμεσο αποτέλεσμα της μείωσης ισχύος της πηγής.
- Η ικανότητα υπολογισμού του αριθμού των ελεγχόμενων αντικειμένων, η ακρίβεια στην καταμέτρηση της μάζας, οι επιδόσεις σε χρονικά απαιτητικές διαδικασίες καθώς και ικανότητα άντλησης πληροφοριών από βάση δεδομένων για αυτόματη εξειδίκευση της λειτουργίας του μηχανήματος είναι σημαντικές βελτιώσεις από παλαιότερα συστήματα.
- Η δυνατότητα παραγωγής εικόνων όπου η απεικόνιση εξαρτάται από την πυκνότητα των ελεγχόμενων υλικών. Με σύγχρονα προγράμματα είναι δυνατή η γρήγορη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων των απεικονίσεων.
- Η δυνατότητα ελέγχου ελαττωματικών συσκευασιών και της ακεραιότητας των προϊόντων για τα συστήματα γραμμών παραγωγής. Κατά αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή και η αναγνώριση καθώς και η απόρριψη των προϊόντων που έχουν μη-επιθυμητά χαρακτηριστικά και ελαττώματα.
- Η πολύ υψηλή ακρίβεια εντοπισμού ανεπιθύμητων υλικών εντός προϊόντων, ειδικά σε σύγκριση με παλαιότερες τεχνικές όπως για παράδειγμα κόσκινα, μαγνήτες και ανιχνευτές μετάλλων. Η ακρίβεια είναι απαραίτητη σε γραμμές παραγωγής χύμα προϊόντων που απαιτούν επιθεώρηση.
- Τα ΣΕΑΧ ελέγχου μεμονωμένων αντικειμένων έχουν τη δυνατότητα τρισδιάστατης αναπαράστασης του εξεταζόμενου αντικειμένου για τυχόν αστοχίες στο εσωτερικό τους. Η ευκολία αναγνώρισης ελαττωμάτων είναι σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες τεχνικές που απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό για συγκεκριμένες εφαρμογές..
- Τα ΧRF ΣΕΑΧ συνεισφέρουν στη μείωση της ποσότητας και του πλήθους των δειγμάτων που αποστέλλονται για επεξεργασία σε εργαστήριο αφού έχουν τη δυνατότητα ταχύτατης ανάλυσης μεγάλου εύρους χημικών στοιχείων. (Πηγές: thermofisher.com; yxlon.com; mt.com; mistrasgroup.gr; loma.com)

#### 4.6 Ασφάλεια ΣΕΑΧ ως προς Ακτινοβολία

Στα συστήματα επιθεώρησης δε γίνεται χρήση ραδιενεργών υλικών για τη δημιουργία δέσμης ακτίνων Χ τα οποία προφανώς θα ήταν μη-ασφαλή και θα χρειαζόντουσαν πολύ εξειδικευμένο εξοπλισμό διαχείρισης και εκπαίδευση. Αντίθετα, βασίζονται σε σωλήνες που παράγουν ηλεκτρικά την ακτινοβολία. Το επιθεωρούμενο αντικείμενο δέχεται την δέσμη η οποία κατευθύνεται στο εσωτερικό του ενώ για την καταγραφή και τελική ψηφιοποίηση των πληροφοριών γίνεται χρήση



δέκτη, με θέση έναντι του εξεταζόμενου υλικού. Στα πλεονεκτήματα της μεθοδολογίας αυτού το συστήματος συμπεριλαμβάνεται η στιγμιαία ακτινοβολήση η οποία διακόπτεται με την παύση λειτουργίας της πηγής ακτίνων Χ. Σε αντίθεση με τεχνολογικά ξεπερασμένα συστήματα ο σύγχρονος εξοπλισμός δεν κάνει χρήση ραδιενεργών υλικών πηγής. Υπο κανονικές συνθήκες και δεδομένου σωστής λειτουργίας του εξοπλισμού ο χειριστής του εξοπλισμού προστατεύεται κατα την ακτινοβολήση λόγω της προστατευτικής θωράκισης που διαθέτει το σύστημα. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το σύστημα έχει μετρηθεί σε  $<0.1$  milirem/hour, με τις υψηλότερες μετρήσεις μόνο κατα την εισαγωγή ή παραλαβή του εξεταζόμενου υλικού, μακριά δηλαδή από το χειριστή της συσκευής. Αν αναλογιστούμε το μέγιστο χρόνο χειρισμού της συσκευής αναλογικά με τις ώρες χρήσης του σε βάθος ενός χρόνου μπορεί να υπολογιστεί η χείριστη πιθανότητα του ποσού των 200 milirem ανα έτος, με την υπόθεση πλήρης ενασχόλησης του εργαζομένου με τον εξοπλισμό. Βάση των Οδηγιών της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής ενέργειας το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσό είναι 5 rem ετησίως.

Για την επίτευξη των επιθυμητών υψηλών προτύπων ασφαλείας στα ΣΕΑΧ ακολουθούνται αυστηρές οδηγίες κατα τη σχεδιάσή τους. (Πηγή: thermofisher.com)

- Δεν επιτρέπεται η διαφυγή ακτινοβολίας άνω του 1 microSv απο τα ΣΕΑΧ. Σε αυτόν τον περιορισμό οι μετρήσεις λαμβάνονται σε εύρος εως 5 cm. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Τροφίμων και Φαρμάκων της Αμερικής τα μέγιστα επιτρεπόμενα ποσά είναι της τάξης των 5 microSv για το ίδιο εξεταζόμενο εύρος ενώ το αντίστοιχο Βρετανικό είναι 1 microSV με διπλάσιο εύρος εξέτασης.
- Εξωτερική μόνωση του ΣΕΑΧ με κατάλληλη επίστρωση μετάλλου καθώς και εσωτερική επίστρωση με Pb ή inox.
- Προστασία των διόδων εισαγωγής και παραλαβής του εξεταζόμενου υλικού απο το ΣΕΑΧ με ειδικής κατασκευής καλύμματα τα οποία προλαμβάνουν την εκπομπή Sv στο περιβάλλον.
- Η χρήση του εξοπλισμού είναι αδύνατη χωρίς ασφαλιστικό κλειδί. Κατα το σέρβις του εξοπλισμού ή σε περίπτωση αφαίρεσης οποιουδήποτε ασφαλιστικού πχ μονώσεων, το ΣΕΑΧ ασφαλίζει αυτόματα διακόπτοντας τη λειτουργία του. Ομοίως σε περίπτωση εντοπισμού προβλήματος το σύστημα απενεργοποιείται και καθιστά αδύνατη την απενεργοποίηση του χωρίς αποκατάσταση της βλάβης.
- Υπάρχουν ειδικά διακριτικά στις οπές εισαγωγής και παραλαβής υλικών του ΣΕΑΧ για την προστασία των εργαζομένων.
- Κατα την κατασκευή του εξοπλισμού ΣΕΑΧ και πριν από την αποστολή στον αγοραστή, γίνονται εξονυχιστικές λειτουργικές δοκιμές καθώς και ελέγχοι των επιπέδων διαφύγουσας ακτινοβολίας.



## **4.7 Ορολογία Ακτινοβολίας**

### **4.7.1 Έκθεση ακτινοβολίας**

Ως έκθεση σε ακτινοβολία ορίζεται η ποσότητα ιονίζουσας ακτινοβολίας που εκπίπτει σε ένα υλικό. Ο ορισμός αυτός εξειδικεύεται περεταίρω για διαφορετικούς τομείς όπως για παράδειγμα τον Ιατρικό όπου η έκθεση εξετάζεται ειδικά για τον ιοντισμό του αέρα από την ακτινοβολία  $\gamma$  ή X.

#### **Δόση**

Ως δόση ορίζεται η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται από την ακτινοβολία σε ύλη. (Πηγή: eea.gr) Αυτή χωρίζεται σε περεταίρω τύπους δόσεων δύο εκ των οποίων είναι η απορροφούμενη δόση η οποία αφορά την απορρόφηση ακτινοβολίας ανα χιλιόγραμμο μάζας και την ισοδύναμη δόση η οποία υπολογίζεται για της ανάγκες μελέτης συγκεκριμένων βιολογικών αποκρίσεων.

#### **Roentgen**

Το Roentgen (R) αποτελεί μονάδα μέτρησης της ακτινοβολίας  $\gamma$  ή X. Υπολογίζεται ως η ποσότητα θετικού ή αρνητικού ιονισμού που θα παραχθεί σε κανονικές συνθήκες πίεσης θερμοκρασίας και υγρασίας σε 1 κιλό αέρα από ενέργεια 2.58 dm Coulomb.

#### **Απορροφούμενη δόση Roentgen (rad)**

Η μονάδα μέτρησης απορροφούμενης ακτινοβολίας ονομάζεται απορροφούμενη δόση Roentgen και υπολογίζεται σε rad. Αυτή αντιστοιχεί σε 10  $\mu$ J ανα γραμμάριο ύλης.

#### **Roentgen Equivalent Man (rem)**

Roentgen Equivalent Man (rem) αποτελεί τη μονάδα μέτρησης της ισοδύναμης, αποτελεσματικής καθώς και δεσμευμένης δόσης ακτινοβολίας η οποία χρησιμοποιείται ως μέτρο για την εκτίμηση των επιπτώσεων χαμηλών επιπέδων ιονίζουσας ακτινοβολίας στο ανθρώπινο σώμα. (Πηγή Epa.gov)

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

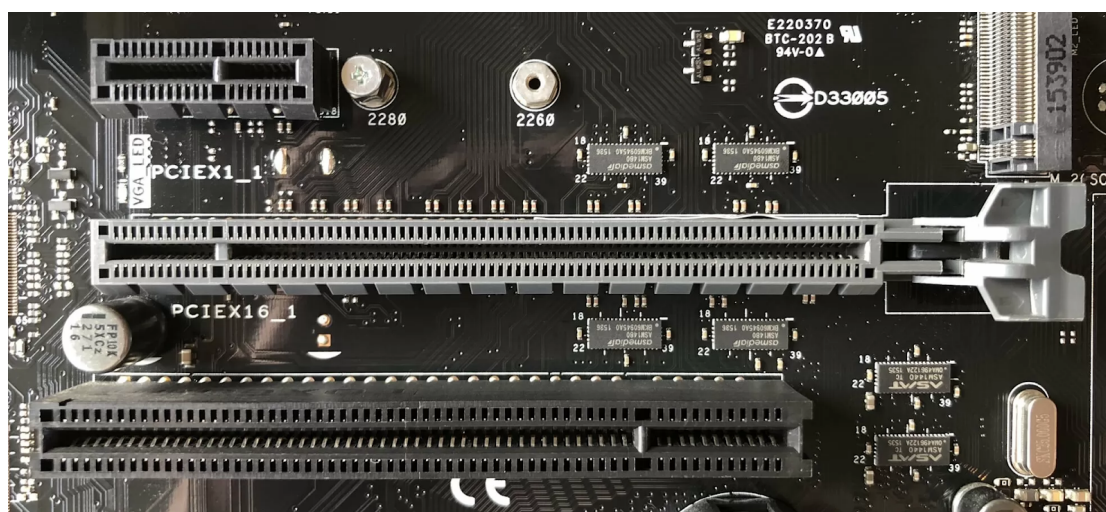
### 5.1 Στόχοι της μελέτης

Η αφαίρεση ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων από τα PCB είναι κρίσιμο προαπαιτούμενο τόσο για τη σύνθλιψή τους όσο και την ανάκτηση μετάλλων από αυτές. Ωστόσο οι τεχνικές που θα εφαρμοστούν για την αφαίρεση των υλικών θα πρέπει να είναι φιλικές προς το περιβάλλον και να έχουν υψηλή απόδοση. Το μεταλλικό μείγμα που ανακτάται από PCBs είναι πλούσιο σε Cu, Al, Au, Pb και Sn, υλικά των οποίων η οικονομική αξία αυξάνεται δραματικά από την καθαρότητά τους. Το χαμηλής προστιθέμενης αξίας μη-μεταλλικό κλάσμα των αποβλήτων τυπωμένων πλακετών κυκλωμάτων αντιπροσωπεύει περίπου το 60% του βάρους των PCB. Από την άποψη της περιβαλλοντικής διαχείρισης, θα πρέπει να αναπτυχθεί μια προσέγγιση μηδενικών αποβλήτων για την ανακύκλωσή τους ώστε η συνολική διαδικασία της ανακύκλωσης να είναι επικερδής. Η παρασκευή πολυμερών σύνθετων υλικών και γεωπολυμερών προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα και έχει πιθανές εφαρμογές σε διάφορους τομείς, ιδιαίτερα ως κατασκευαστικά και δομικά υλικά. Ωστόσο, οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών NMF-WPCBs θα πρέπει να βελτιωθούν περαιτέρω για την παρασκευή σύνθετων πολυμερών (Zhang et al. 2020). Η μηχανική ή χειρωνακτική μέθοδος προεπεξεργασίας και επεξεργασίας των PCB κατά την ανακύκλωσή τους έχει μελετηθεί εκτενώς και έχει αποδειχθεί η πιο οικονομικά και τεχνολογικά εφαρμόσιμη και εφικτή μέθοδος ανακύκλωσής τους.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα αύξησης της αποτελεσματικότητας της ανάκτησης βασικών και πολύτιμων μετάλλων από τα απόβλητα PCB. Αρχική υπόθεση αποτελεί το γεγονός ότι η ανάκτηση των υλικών αυτών στις γραμμές ανακύκλωσης δυσχεραίνεται σημαντικά όσο αυξάνεται το εύρος των υλικών, ανεξαρτήτως της διαδικασίας διαχωρισμού τους. Αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας αποτελεί ο περιορισμός της πολυπλοκότητας του μίγματος υλικών των αποβλήτων PCB προ της εισαγωγής του σε μηχανική ή χημική διαδικασία ανακύκλωσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εισάγοντας τις πλακέτες σε φασματογράφο ο οποίος με τη χρήση ακτίνων X θα μπορεί να κατηγοριοποιεί τις πλακέτες ώστε αυτές να διαχωριστούν με βάση τα περιέχοντα υλικά σε κλάσματα πλακετών με αντίστοιχα υλικά καθιστώντας ευκολότερο το διαχωρισμό αυτών σε ανακυκλωμένες πρώτες ύλες. Για την πραγματοποίηση των πειραματικών ανιχνεύσεων της εργασίας έγινε επιλογή απορριφθέντων πλακετών τυπωμένου κυκλώματος (PCB) από σταθερούς υπολογιστές εργαστηριακού εξοπλισμού της τελευταίας δεκαετίας. Από τις PCB αφαιρέθηκαν τα στοιχεία με χειρωνακτικές μεθόδους, (καλύμματα, αντιστάσεις, επεξεργαστές, κεραμικά κ.α.) και οι πλακέτες χωρίστηκαν σε ομοιόμορφα κλάσματα τόσο αυτούσιων πλακετών, τμημάτων της πλακέτας όσο και θραυσμάτων που προέκυψαν από την εισαγωγή τους σε καταστροφέα. Τα κλάσματα αυτά στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε φασματογράφο ακτίνων X, όπου με τη προσδιορίστηκε τόσο η αποτελεσματικότητα αναγνώρισης των περιεχόντων υλικών είτε ολόκληρων είτε θραυσμάτων τους, όσο και η δυνατότητα διαχωρισμού τους σε κλάσματα ομοιογενών υλικών.

## 5.2 Συγκέντρωση Πειραματικών Κλασμάτων

Τα κλάσματα PCB στα οποία πραγματοποιήθηκε ανίχνευση υλικών αποτελούνται από μητρικές πλακέτες καθώς και κάρτες δικτύου οι οποίες προέρχονται από παλαιότερους Η/Υ εργαστηριακού εξοπλισμού οι οποίοι δε βρίσκονταν σε χρήση και προορίζονταν για καταστροφή. Έγινε χρήση δυο μητρικών πλακετών και δυο πλακετών δικτύου, ανα δύο διαφορετικής προέλευσης και από διαφορετικές εταιρείες παρασκευής με αποτέλεσμα ιδιαίτερη ποικιλομορφία των περιεχόντων υλικών τους. Για ευκολία θα γίνεται αναφορά τους ως “Μαύρη” και “Πράσινη” πλακέτα στη συνέχεια.



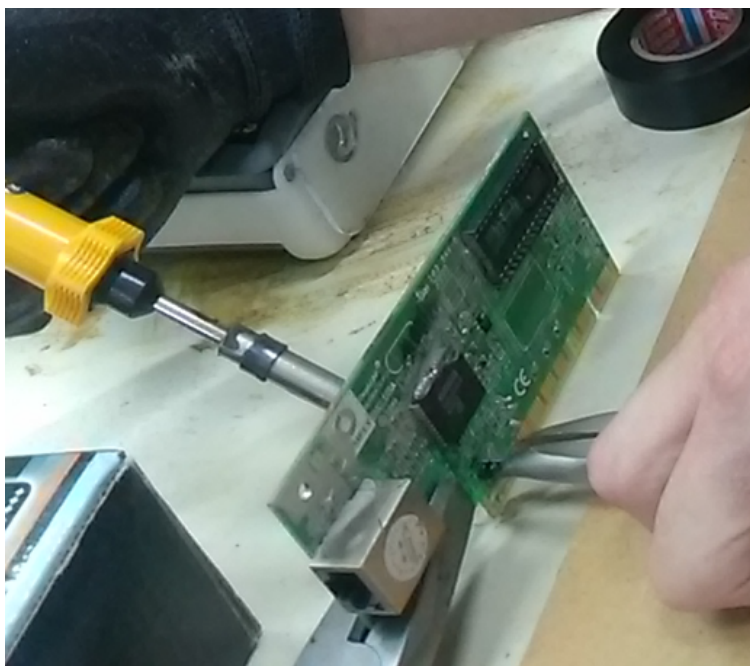
Εικόνα 37: Μέρος της “Μαύρης” πλακέτας προερχόμενη από απορριπτέα μητρική πλακέτα.

Τα δομικά στοιχεία των πλακετών καθώς και η ακριβής λίστα των υλικών που αυτές περιέχουν δεν δημοσιοποιείται από της εταιρείες παρασκευής τους καθιστώντας δύσκολη την πλήρη χαρτογράφηση των υλών που απαρτίζουν τις PCB χωρίς την εισαγωγή τους σε φασματογράφο ακτίνων Χ. Τυπικά μια πλακέτα PCB αποτελείται 40% από μείγμα μετάλλων, 30% πλαστικών και 30% κεραμικών στοιχείων. Οι πλακέτες των οποίων τόσο τα στοιχεία όσο και τα πλαστικά έχουν αφαιρεθεί αντιπροσωπεύει χονδρικά το 23% του βάρους ολόκληρης της πλακέτας (Duan et al.,2011). Το πείραμα διεξήχθη σε πλακέτες των οποίων το οριακό βάρος ήταν περίπου 600 γραμμάρια έκαστη. Μετά την αφαίρεση των εξαρτημάτων από τις PCB, το κλάσμα το οποίο τελικά χρησιμοποιήθηκε ανήλθε περί τα 160 γραμμάρια.

## 5.3 Προεπεξεργασία Κλασμάτων PCB

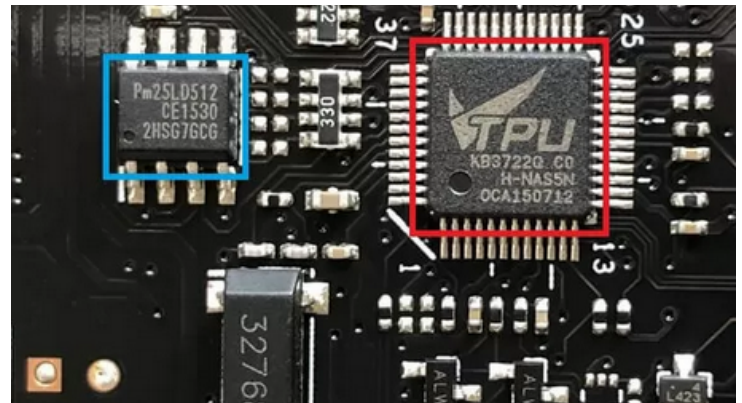
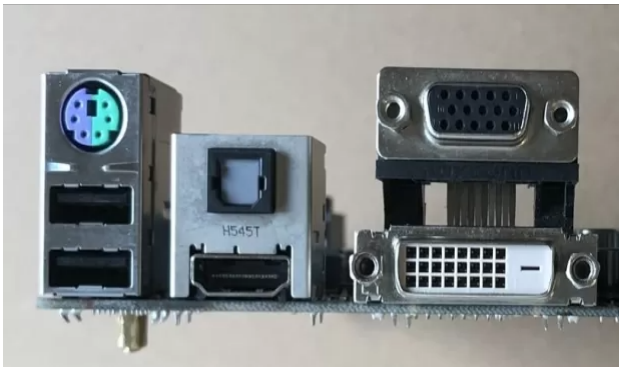
### 5.3.1 Αποσυναρμολόγηση

Λόγω των μορφολογικών διαφορών μεταξύ των PCB και του μικρού αριθμού των τελικών κλασμάτων, η αποσυναρμολόγηση των PCB έγινε κατα κύριο λόγο χειρωνακτικά. Λόγω της πρόχειρης αποθήκευσης των πλακετών, αυτές ήταν σκονισμένες και αναμειγμένες με θραύσματα ΑΗΗΕ, τα οποία απομακρύνθηκαν. Τα PCB θερμάνθηκαν με πιστόλι θερμού αέρα το οποίο αποδυνάμωσε τις κολλήσεις για την εύκολη αφαίρεσή τους με τσιμπίδα και τανάλια. Έγινε επίσης χρήση εργαλείου κασσιτεροκόλλησης τοπικά σε κολλήσεις, καθώς και πένσας και dremel για την αφαίρεση των πιο απαιτητικών κολλήσεων και χοντρών πλαστικών. Η αφαίρεση των πυκνωτών έγινε μη-καταστροφικά καθώς όπως προαναφέρθηκε περιέχουν επικίνδυνες και ρυπογόνες ουσίες. Για την εφαρμογή των ανωτέρω λήφθηκαν όλα τα απαραίτητα μέτρα ατομικής και περιβαλλοντικής προστασίας.



Εικόνα 38: Αποσυναρμολόγηση εξαρτημάτων των “Πράσινης” πλακετών του πειράματος χειρωνακτικά, με χρήση κατα κύριο λόγο εργαλείου κασσιτεροκόλλησης καθώς και dremel. Για μαζική αφαίρεση εξαρτημάτων έγινε χρήση πιστολιού θερμού αέρα.





Εικόνα 39: Μερικά από τα εξωτερικά εξαρτήματα και επεξεργαστές που αφαιρέθηκαν.

### 5.3.2 Θρυμματοποίηση

Ο κατακερματισμός των πλακετών έγινε ατομικά με τα προαναφερθέντα μηχανικά εργαλεία για την παραγωγή του πρώτου πειραματικού κλάσματος. Για την παραγωγή θραυσμάτων έγινε χρήση του διαθέσιμου τεμαχιστή μετάλλων - καταστροφέα (shredder) στο εργαστηριακό περιβάλλον. Η πλήρης θρυμματοποίηση των υλικών έγινε με την απόλυτη τήρηση των ατομικών μέτρων προστασίας.



Τα κλάσματα κατακερματιστηκαν σε τμήματα κατάλληλα για την εξυπηρέτηση των μετέπειτα εργαστηριακών μετρήσεων, της ανάλυσης και τις δυνατότητες της διαθέσιμης εργαστηριακής συσκευής ακτίνων Χ.

Εικόνα 40: Λεπίδες εργαστηριακού τεμαχιστή μετάλλων. Η πλακέτα διοχετεύεται στην είσοδο και κατευθύνεται βαρυντικά και λόγω της δράσης των λεπίδων σε θάλαμο υπό της συσκευής.

### 5.3.3 Πειραματική Επιθεώρηση με χρήση Ακτίνων X

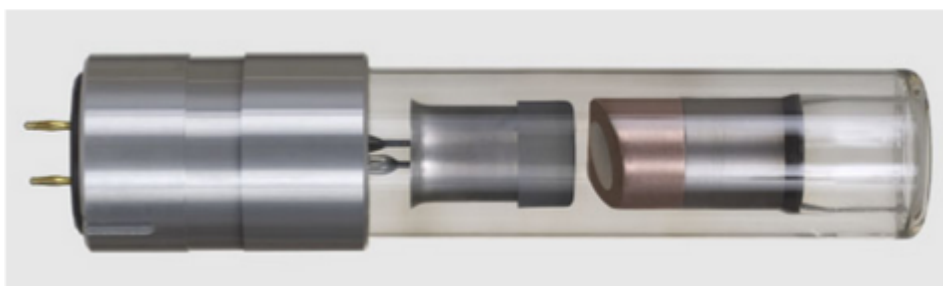
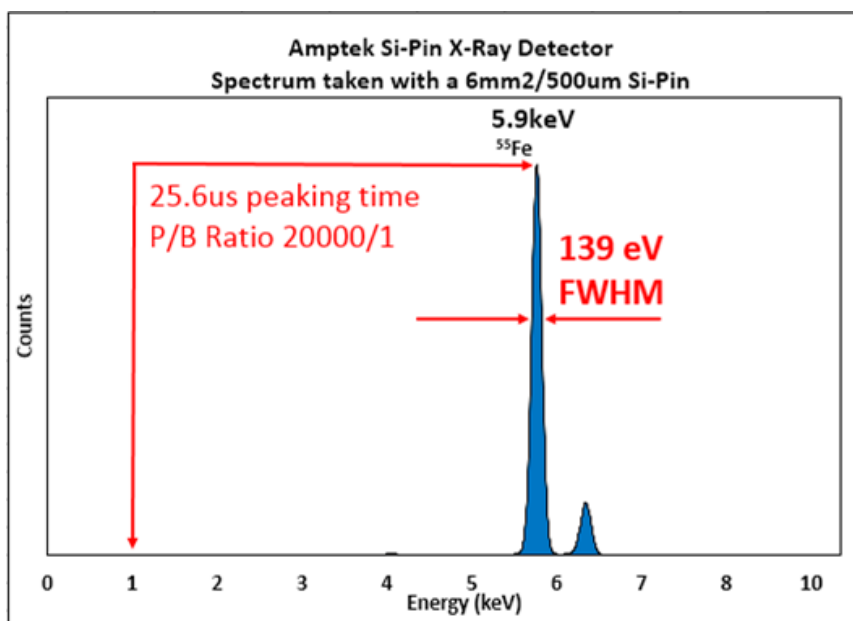
Τα κλάσματα των πλακετών τοποθετήθηκαν διαδοχικά σε εργαστηριακό εξοπλισμό. Η ακτινολόγηση πραγματοποιήθηκε από το εξειδικευμένο προσωπικό του εργαστηρίου Φυσικοχημείας και Χημικών Διεργασιών του Πολυτεχνείου Κρήτης τηρώντας όλα τα απαραίτητα μέτρα προστασίας. Έγινε χρήση εξοπλισμού του εργαστηρίου και συγκεκριμένα των συσκευών X-Ray tube Ag (Amptek) and X-123 Amptek detector – electronics χαμηλής ενέργειας (2.5 Watt) που παρέχει δυνατότητα σύνδεσης με Ηλεκτρονικό Υπολογιστή.



Εικόνες 41: Συσκευή Φασματογραφίας X-123 Amptek detector (αριστερά)

Γράφημα Φάσματος Fe το οποίο επιθεωρήθηκε με ανιχνευτή Si-PIN 6 mm<sup>2</sup>/500 μm (στη μέση)

Τρισδιάστατη αναπαράσταση άμεσα θερμαινόμενου σωλήνα θερμού καθόδου με βιδωτό σπείρωμα για ψύκτρα. Διαθέτει υποδοχή βύσματος δύο ακίδων για θέρμανση της καθόδου για συσκευές ακτίνων X (κάτω) (Πηγές [amptek.com](http://amptek.com); [leybold-shop](http://leybold-shop))



## 5.4 Αποτελέσματα και Συζήτηση

Τα αποτελέσματα του πειράματος φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί ως κατα προσέγγιση ποσοστά της συνολικής μάζας των πλακετών που επιθεωρήθηκαν.

	Μαύρη Πλακέτα	Μαύρη πλακέτα θρυμματισμένη	Πράσινη πλακέτα	Πράσινη πλακέτα θρυμματισμένη
<i>Ag</i>	++	+++	+	
<i>Sn</i>	+	+		
<i>Cr</i>	+		+	++
<i>Si</i>	+++	++		
<i>Ti</i> <i>/Ba</i>	+			
<i>Fe</i>	++	++	+	+
<i>Ni</i>	++	++	+	+
<i>Cu</i>	+++	+++	++++	++++
<i>Pb</i>	++	++		
<i>Br</i>	+++	+++	+++	+++
<i>Rb</i>	+	+		
<i>Rh</i>			+	++
<i>Au</i>				

Εικόνα 42: Πίνακας αποτελεσμάτων εργαστηριακού πειράματος επιθεώρησης με ακτίνες Χ των περιεχομένων τεσσάρων πλακετών. Ως + παρουσιάζονται οι περιεκτικότητες των υλικών που ανιχνεύθηκαν κατα προσέγγιση.

Κατα την προεπεξεργασία αφαιρέθηκαν από την πλακέτα πλαστικά, στοιχεία και εξαρτήματα (επεξεργαστές, πυκνωτές, μπαταρίες κ.α.), αιτιολογώντας τη χαμηλή περιεκτικότητα των πλακετών σε πλήθος πολύτιμων μετάλλων με εξαίρεση τον άργυρο.

### Χαλκός

Ο χαλκός (Cu) αποτελεί τον κύριο όγκο των μετάλλων των πλακετών που εξετάστηκαν, όπως προκύπτει και από τα πειραματικά δεδομένα. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του μετάλλου καθώς και άλλων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του. Οι διαφορές που παρουσιάζονται στις ποσότητες χαλκού των εξεταζόμενων πλακετών έχουν να κάνουν με τον αριθμό στρώσεων των PCB (μονής ή πολυστρωματικής), τον τύπο της πλακέτας καθώς και το έτος κατασκευής αυτής. Η αύξηση του αριθμού των στρωμάτων προκαλεί βελτίωση των δομικών της ιδιοτήτων αλλά συνεπάγεται και μεγαλύτερα ποσά χαλκού σε αυτές. (Ghosh et al., 2015; Yamane et al., 2011). Τυπικά, το περιεχόμενο μιας PCV σε χαλκό μπορεί να ανέλθει από 1/4 του βάρους της έως και 1/3 αυτού (Isildar et al., 2016). Μετα την εφαρμογή της πειραματικής μεθόδου τα αποτελέσματα έδειξαν περιεχόμενο χαλκού της τάξης του 16-18% του βάρους των δειγμάτων, συγκλίνοντας στις χαμηλότερες κατηγορίες περιεχομένου χαλκού καθώς το δείγμα προέρχεται από πλακέτα που έχει υποστεί προεπεξεργασία και τα εξαρτήματα της οποίας έχουν αφαιρεθεί.

## Μέταλλα συνδέσεων

Απαραίτητη ιδιότητα των συνδετικών υλικών σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η χημική σταθερότητα, ιδιότητες που διαθέτουν κατα κύριο λόγο πολύτιμα μέταλλα. Κατα αυτόν τον τρόπο διακόπτες, αισθητήρες και επεξεργαστές συχνά περιέχουν μικρές ποσότητες των υλικών αυτών οι οποίες όμως έχουν περιοριστεί από τις κατασκευάστριες εταιρείες με την εκσυγχρόνιση των τεχνικών, την τεχνολογική ανάπτυξη των διαδικασιών και τους στόχους μείωσης του κόστους παραγωγής. Ο χρυσός (Au) χρησιμοποιείται στην παρασκευή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων με φειδώ ως επικάλυψη σε επαφές, σε ενώσεις συγκόλλησης, καλώδια και διάφορα ηλεκτρονικά εξαρτήματα (Cui and Zhang, 2008). Παράδειγμα αποτελούν οι μικροεπεξεργαστές (CPU) στους οποίους μπορεί να ανιχνευθούν και ανακτηθούν μικρές ποσότητες χρυσού. Σε αυτά τα εξαρτήματα μπορεί να περιέχονται και σημαντικότερες ποσότητες του μετάλλου, έως 1900 εκατομμυριοστά (Birloaga et al., 2016). Ο χρυσός απαντάται επίσης συχνά σε μορφή κράματος σε αγώγιμες ενώσεις και συνοδεύεται από μικρές ποσότητες νικελίου (Ni) ή κοβαλτίου (Co) για τη διατήρηση των ιδιοτήτων της ενώσεως στο χρόνο (Luda et al., 2011).

Απο τα πειραματικά αποτελέσματα δεν γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη χρυσού παρά τις ατέλειες της διαδικασίας μηχανική αποσυναρμολόγησης που θα μπορούσε να αφήσει υπολείμματα του υλικού στις ενώσεις που αποκόπηκαν. Ο σίδηρος (Fe) που απαντάται σε εξίσου σημαντικές ποσότητες με το χαλκό στις πλακέτες που εξετάστηκαν καθώς και άλλα μέταλλα όπως το νικέλιο (Ni) και το Χρώμιο (Cr) χρησιμοποιούνται στα PCB ως δομικά στοιχεία για τις επαφές στην πλακέτα ή ως μαγνητικοί πυρήνες μετασχηματιστών και τσοκ. Το νικέλιο όπως προαναφέρθηκε μπορεί να εμπεριέχεται ως πρόσθετο στις ενώσεις αλλά χρησιμοποιείται και στην καθαρή του μορφή. Ο μόλυβδος (Pb) έχει απαγορευτεί στα συγκολλητικά υλικά λόγω της Οδηγίας RoHS, με την χρήση του να καλύπτουν εναλλακτικές όπως ο άργυρος (Ag). Παρόλα αυτά απαντάται σε σημαντική ποσότητα σε μία πλακέτα εκ των δύο κατασκευαστικών ειδών που εξετάστηκαν οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι ένα εκ των δυο PCB που εξεταστηκαν κατα την πειραματική μέθοδο κατασκευάστηκε πριν την έκδοση αυτού του κανονισμού. Ο μόλυβδος περιέχεται και στο καλάνι, κράματα συγκολλητικών υλικών. Ο κασσίτερος (Sn) βρίσκεται στην επιφάνεια των PCBs (Marques et al., 2013) συνήθως σε μορφή κράματος ως συγκολλητικό μέσο μαζί με μόλυβδο (Pb). Οι ποσότητες και των δύο στοιχείων που διαπιστώθηκαν κατα την ανάλυση είναι αναμενόμενες καθώς αυτά τα κράματα επικαλύπτουν συχνά διατάξεις των PCB.

Το ασήμι το οποίο βρίσκεται στις PCB είναι ασήμι εμβάπτισης και αποτελεί επικάλυψη επιτρεπόμενη από την οδηγία RoHS και ενώ ταυτόχρονα μπορεί να γίνει οικονομική χρήση του σε πλήθος μορφοποιήσεων πλακετών. Είναι επίσης κατάλληλο για τεχνικές συναρμολόγησης χωρίς μόλυβδο. Ο χειρισμός του υλικού είναι κρίσιμος και χρήζει ειδικής διαχείρισης καθώς οι διακυμάνσεις θερμοκρασίας επηρεάζουν τις ιδιότητές του και πρέπει να παραμένει στεγνό στις εφαρμογές. Εάν αφεθεί εκτεθειμένο στο περιβάλλον, το ασήμι εμβάπτισης αντιδρά με το θείο από το περιβάλλον, δημιουργώντας θειούχο άργυρο στην επιφάνεια της πλακέτας. Αν και το



ασήμι απαιτεί περισσότερη προσοχή στην αποθήκευση και το χειρισμό από το κασσίτερο εμβάπτισης, το ασήμι εμβάπτισης είναι ένα αναδύόμενο στάνταρ ως καλό, προβλέψιμο φινίρισμα γενικής χρήσης χωρίς μόλυβδο. Οι ενώσεις τιτανίου (Ti) εκτελούν μια ολοένα ευρύτερη ποικιλία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών λειτουργιών, πολύ ευρύτερες, για παράδειγμα από τις ενώσεις πυριτίου (Pi). Στην πράσινη πλακέτα ανιχνεύθηκε σημαντική ποσότητα ροδίου (Rh). Τα κύρια οφέλη του ροδίου περιλαμβάνουν αντοχή στη θερμότητα, μηχανική φθορά και χημική προστασία, ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το βιομηχανικό ρόδιο είναι ιδιαίτερα πολύτιμο αφού τυπικά αποκτάται ως υποπροϊόν της διύλισης άλλων μετάλλων, όπως ο χαλκός και το νικέλιο. Αυτά τα χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τη χαμηλή ηλεκτρική του αντίσταση κάνει το ρόδιο να χρησιμοποιείται συνήθως ως συνδετικό υλικό σε ηλεκτρικές επαφές, ημιαγωγούς, πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB) καθώς και άλλες εφαρμογές. Οι ενώσεις τιτανίου μπορούν να είναι πιεζοηλεκτρικές, ακόμη και να εκτυπωθούν για να γίνουν πιεζοηλεκτρικοί συλλέκτες και αισθητήρες ενέργειας αλλά σπανιότερα απαντώνται σε PCB όπως την εξεταζόμενη. Στη μαύρη πλακέτα εντοπίστηκε ποσότητα σιλικόνης (Si). Οι ομοιόμορφες επικαλύψεις σιλικόνης έχουν την ίδια λειτουργία με άλλους τύποι ομοιόμορφων επιστρώσεων, προστατεύοντας την πλακέτα καθώς και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματά της από φθορές. Οι ομοιόμορφες επικαλύψεις σιλικόνης είναι μοναδικές επειδή είναι χρήσιμες σε εύκαμπτα PCB και εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών όπου οι περισσότεροι άλλοι τύποι επικαλύψεων δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν.

Κατά την φασματογραφική ανάλυση των απορριφθέντων PCB βρέθηκε πλήθος υλικών. Ανιχνεύτηκαν μέταλλα χρήσιμα αλλά και πολύτιμα, ωστόσο οι συγκεντρώσεις των πολύτιμων μετάλλων ήταν χαμηλές. Οι αναλύσεις προηγούμενων μελετών συμπίπτουν με ποσά μετάλλων που βρέθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Οι ποσότητες αυτές εμφανίζονται στην εικόνα 43 που ακολουθεί, σε σύγκριση με τα δεδομένα προγενέστερων μελετών. Διαφορές στις ευρισκόμενες τιμές μπορούν να αιτιολογηθούν από την επιλογή υλικών των εταιρειών που παρήγαγαν τα PCB.

Βιβλιογραφία	Masavetas et al., 2018	Yamane et al., 2011	Wang and Gaustad, 2012	Ogunniyi et al., 2009	Flandinet et al., 2012	Islidar et al., 2016	Zhang et al., 2016	Xiu et al., 2012	Εύρος τιμών βιβλιογραφίας
Cd	-	-	0.02	0.00	-	-	0.0002	0.18	0-0.18
Au	-	0.14	0.04	0.02	0.06	0.0002	0.0038	-	0.0002-0.14
Sb	-	-	0.34	0.26	-	-	-	-	0.26-0.34
As	-	-	0.01	0.00	-	-	-	-	0-0.01
Cr	75ppm	-	0.04	0.02	-	0.02	-	0.29	0.0075-0.29
Sn	1.97	8.83	2.92	2.91	-	-	-	5.10	1.97-8.83
Al	2.45	5.70	4.13	3.29	-	1.94	-	-	1.94-5.70
Fe	2.70	7.33	3.81	2.68	0.26	2.33	4.07	-	0.26-7.33
Pb	2.10	5.53	2.04	0.02	-	0.9	2.09	2.03	0.02-5.53
Zn	1.78	4.48	1.22	0.49	-	0.29	0.39	3.2	0.29-4.48
Ni	1.99	0.76	1.26	0.19	0.22	0.26	0.38	-	0.19-1.99
Cu	24.50	20.19	18.67	4.27	25.5	16.3	30.8	18.19	4.27-30.8
Συγκέντρωση (wt%)									

Εικόνα 43: Πίνακας συγκέντρωσης μετάλλων σε PCB προγενέστερων ερευνών - Συγκέντρωση υλικών % κατά βάρος

## 5.5 Συμπεράσματα και Προτάσεις

Είναι βέβαιο ότι συμπληρωματική, εκτενής έρευνα χρειάζεται να πραγματοποιηθεί για την αύξηση της αποτελεσματικότητας ανάκτησης βασικών και πολύτιμων μετάλλων από τα απόβλητα PCB. Εφόσον η δημιουργία μητρώων προσδιορισμού των ποσοτήτων περιεχομένων στοιχείων στις πλακέτες και τα εξαρτημάτων υπολογιστών καθίσταται δύσκολη ή και αδύνατη, κρίνεται αναγκαία η βελτιστοποίηση του διαχωρισμού τους προ της περαιτέρω επεξεργασίας τους. Με βάση την πειραματική διαδικασία που αναπτύχθηκε παρατηρήθηκε πως η ανίχνευση των υλικών των πλακετών απο το φασματογράφο ακτίνων Χ μπορεί να πραγματοποιηθεί εξίσου αξιόπιστα είτε αυτές έχουν εισαχθεί σε καταστροφέα (shredder) είτε είναι αυτούσιες. Συμπερασματικά κατα την ανακύκλωση μεγάλου όγκου PCB, οι πλακέτες μπορούν να διαχωριστούν προτού επεξεργαστούν μηχανικά ή χημικά με αποτέλεσμα τον εξ αρχής καλύτερο διαχωρισμό των πρώτων υλών τους, εφόσον διαχωρίζονται σε κλάσματα όσο το δυνατόν ομοιότερων υλικών. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της καθαρότητας των πρώτων υλών που προκύπτουν κατα την ανακύκλωσή τους καθώς και της αξίας αυτών.

Η χρήση ακτίνων Χ για την ανίχνευση των περιεχομένων και της ποιότητας των υλικών σε γραμμές ανακύκλωσης υλικών είναι διαδεδομένη κυρίως σε εργοστάσια ομοιογενής ανακύκλωσης υλικών για τον προσδιορισμό της τελικής τους ποιότητας, όπως για παράδειγμα κατα την ανακύκλωση αλουμινίου. Στις PCB και τα ΑΗΗΕ γενικότερα όπου κρίνεται αναγκαίος ο προσδιορισμός, η συγκέντρωση και ο διαχωρισμός των περιεχομένων μετάλλων των πλακετών η τεχνολογία αυτή δεν έχει εφαρμοστεί ακόμη.

## 5.6 Μελλοντική Έρευνα

Απο τα συμπεράσματα των πειραματικών δεδομένων είναι δυνατό να παρατεθούν ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα, παραδείγματα των οποίων αποτελούν:

- Συμπληρωματική μελέτη μεγαλύτερης κλίμακας για την εφαρμογή των ακτίνων Χ κατα τη διαδικασία διαχωρισμού όγκου PCB.
- Εφαρμογή φασματογράφου ακτίνων Χ σε αυτοματοποιημένο διαχωριστή PCB σε κλάσματα.
- Βελτιστοποίηση της μεθόδου προεπεξεργασίας και αποσυναρμολόγησης των PCBs μετα του κλασματικού διαχωρισμού τους. Παρότι η μηχανική επεξεργασία των δειγμάτων θεωρείται ευρέως η οικονομικότερη λύση για τις γραμμές ανακύκλωσης ΑΗΗΕ, κατά την προεπεξεργασία των δειγμάτων παρατηρήθηκε ότι ο χειρωνακτικός διαχωρισμός και τεμαχισμός αποτελεί χρονοβόρα και ενεργειακά ασύμφορη διαδικασία. Διαφορετικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την βελτιστοποίηση αυτής της διαδικασίας, όπως ο διαχωριστήρας EDDY που τεμαχίζει και διαχωρίζει τα κλάσματα των PCB ή η μαζική αποσυναρμολόγηση των στοιχείων που βρίσκονται πάνω στις πλακέτες με τη χρήση φούρνων ή τραπεζών με θερμαινόμενη άμμο.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Hlosta, Jakub, Žurovec, David, Kratochvil, M., Botula, Jiri, Zegzulka, J., WEEE sorting processes and separation of copper wires with support of DEM modeling, 2017, Inzynieria Mineralna. [https://www.researchgate.net/publication/319077774\\_WEEE\\_sorting\\_processes\\_and\\_separation\\_of\\_copper\\_wires\\_with\\_support\\_of\\_DEM\\_modeling](https://www.researchgate.net/publication/319077774_WEEE_sorting_processes_and_separation_of_copper_wires_with_support_of_DEM_modeling)
- [2] Balde, C.P., Wang, F., Kuehr, R., Huisman, J., 2015. The Global E-waste Monitor 2014: Quantities, flows and resources. United Nations University.
- [3] Zeng, X., Li, J., 2016. Measuring the recyclability of e-waste: an innovative method and its implications. Journal of Cleaner Production 131, 156–162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.055>
- [4] Zeng, X., Wang, F., Li, J., Gong, R., 2017. A simplified method to evaluate the recycling potential of e-waste. Journal of Cleaner Production 168, 1518–1524. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.232>
- [5] Zeng, X., Zheng, L., Xie, H., Lu, B., Xia, K., Chao, K., Li, W., Yang, J., Lin, S., Li, J., 2012. Current Status and Future Perspective of Waste Printed Circuit Boards Recycling. Procedia Environmental Sciences 16, 590–597. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.081>
- [6] Zhang, H.-C., Ouyang, X., Abadi, A., 2006. An Environmentally Benign Process Model Development for Printed Circuit Board Recycling, in: Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2006. Presented at the Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2006., pp. 212–217. <https://doi.org/10.1109/ISEE.2006.1650063>
- [7] Waste-Printed Circuit Board Recycling: Focusing on Preparing Polymer Composites and Geopolymers  
Qin Wang, Baogui Zhang, Shaoqi Yu, Jingjing Xiong, Zhitong Yao, Baoan Hu, and Jianhua Yan  
ACS Omega 2020 5 (29), 17850-17856  
DOI: 10.1021/acsomega.0c01884
- [8] Conny Bakker, Feng Wang, Jaco Huisman, Marcel den Hollander, Products that go round: exploring product life extension through design, Journal of Cleaner Production, Volume 69, 2014
- [9] Mahdi Ikhlayel, An integrated approach to establish e-waste management systems for developing countries, Journal of Cleaner Production, Volume 170, 2018
- [10] Dumitrita Ibanescu, Daniela Cailean (Gavrilescu), Carmen Teodosiu, Silvia Fiore, Assessment of the waste electrical and electronic equipment management systems profile and sustainability in developed and developing European Union countries, Waste Management, Volume 73, 2018
- [11] Baldé, Cornelis P., et al. The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources. United Nations University, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association, 2017.
- [12] Magalini, Federico & Wang, Feng & Huisman, Jaco & Kuehr, Ruediger &

- Baldé, Kees & Straalen, Vincent & Hestin, Mathieu & Lecerf, Louise & Sayman, Unal & Akpulat, Onur. (2016). Study on Collection Rates of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), possible measures to be initiated by the Commission as required by Article 7(4), 7(5), 7(6) and 7(7) of Directive 2012/19/EU on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE).
- [13] Tansel, B. (2017) From Electronic Consumer Products to E-Wastes: Global Outlook, Waste Quantities, Recycling Challenges. *Environment International*, 98, 35-45.
- [14] Xavier, Lúcia Helena, Ellen Cristine Giese, and F. A. Freitas Lins. "Urban mining and e-waste management in South America." *Proceedings SUM2018, Fourth Symposium on Urban Mining*. 2018.
- [15] Meshram, Pratima, and B. D. Pandey. "Perspective of availability and sustainable recycling prospects of metals in rechargeable batteries—a resource overview." *Resources Policy* 60 (2019): 9-22.
- [16] Laurenti, Rafael, et al. "Some pervasive challenges to sustainability by design of electronic products—a conceptual discussion." *Journal of Cleaner Production* 108 (2015): 281-288.
- [17] Talens Peiró, Laura, Fulvio Ardente, and Fabrice Mathieux. "Design for disassembly criteria in EU product policies for a more circular economy: A method for analyzing battery packs in PC-tablets and subnotebooks." *Journal of Industrial Ecology* 21.3 (2017): 731-741.
- [18] Lixandru, Alexandru, et al. "Identification and recovery of rare-earth permanent magnets from waste electrical and electronic equipment." *Waste Management* 68 (2017): 482-489.
- [19] Zhang, Lingen, and Zhenming Xu. "A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment." *Journal of Cleaner Production* 127 (2016): 19-36.
- [20] Eoan.gr. (2019). Απόβλητα ειδών Ηλεκτρικού & Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (AHHE). Available at: <https://www.eoan.gr/el/content/13/apovlita-eidon-ilektrikou-ilektronikouexoplismou-ahhe>
- [21] Ongondo, Francis O., Ian D. Williams, and Tom J. Cherrett. "How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes." *Waste management* 31.4 (2011): 714-730.
- [22] Tanskanen, Pia. "Management and recycling of electronic waste." *Acta materialia* 61.3 (2013): 1001-1011.
- [23] Babu, Balakrishnan Ramesh, Anand Kuber Parande, and Chiya Ahmed Basha. "Electrical and electronic waste: a global environmental problem." *Waste Management & Research* 25.4 (2007): 307-318.
- [24] Robinson, Brett H. "E-waste: an assessment of global production and environmental impacts." *Science of the total environment* 408.2 (2009): 183-191.
- [25] [Global E-waste Monitor 2017](#)  
Available at: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Pages/Spotlight/Global-Ewaste-Monitor-2020.aspx>

- [26] Study on Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, Not Regulated by the RoHS Directive  
Freiburg, 17 October 2008
- [27] Eurostat - Waste electrical and electronic equipment collected in 2019-22  
Available at:  
[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics\\_-\\_electrical\\_and\\_electronic\\_equipment&oldid=556612](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_electrical_and_electronic_equipment&oldid=556612)  
<https://ec.europa.eu/eurostat/web>  
[http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env\\_waselee&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_waselee&lang=en)  
<https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220525-1>  
<https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/edn-20220511-1>  
<https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220302-2>
- [28] Cui, Jirang, and Lifeng Zhang. "Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review." *Journal of hazardous materials* 158.2-3 (2008): 228-256.
- [29] Hlosta, Jakub, et al. "Experimental determination of particle-particle restitution coefficient via double pendulum method." *Chemical Engineering Research and Design* 135 (2018): 222-233.
- [30] Οδηγία 2011/65/EE  
Available at:  
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2011/65/oj?locale=el>
- [31] Κουή Μαρία, Αβδελίδης Νικόλαος, Θεοδωρακέας Παναγιώτης, Χειλάκου Ελένη, Φασματοσκοπία Φθορισμού Ακτίνων Χ, Κεφάλαιο 6, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2015
- [32] Joe-Air Jianga, Hsiang-Yun Changa, Ke-Han Wua, Cheng-Shiou Ouyanga, Man-Miao Yangb, En-Cheng Yangb, Tse-Wei Chenc, Ta-Te Lina, An adaptive image segmentation algorithm for X-ray quarantine inspection of selected fruits, Elsevier journal, 2007
- [33] mt.com
- [34] thermofisher.com
- [35] smithsdetection.com
- [36] yxlon.com
- [37] mistrasgroup.gr
- [38] loma.com
- [39] amptek.com
- [40] leybold-shop,  
<https://www.leybold-shop.com/x-ray-tube-ag-554865.html>
- [41] sunygroup.cn
- [42] eeae.gr
- [43] RADInfo Glossary of Radiation Terms 2016 EPA.gov
- [44] [scienter.gr/web/el/metrology.php](http://scienter.gr/web/el/metrology.php)