

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



**Εκτίμηση επικινδυνότητας τοξικών μετάλλων
από απόβλητα ηλεκτρονικών υπολογιστών.
Σύγκριση με τα θεσμοθετημένα όρια
ευρωπαϊκής οδηγίας**



Διπλωματική Εργασία
Κωνσταντίνος-Βάλτερ Κόλιας

Τριμελής Επιτροπή: Ευάγγελος Γιδαράκος (Καθηγητής, επιβλέπων)
Ευάγγελος Διαμαντόπουλος (Καθηγητής)
Νικόλαος Ξεκουκουλωτάκης (Επικ. Καθηγητής)

XANIA 2013

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Εκτίμηση επικινδυνότητας τοξικών μετάλλων από απόβλητα ηλεκτρονικών υπολογιστών. Σύγκριση με τα θεσμοθετημένα όρια ευρωπαϊκής οδηγίας» εκπονήθηκε στο πλαίσιο της εκπαιδευτικής διαδικασίας του προπτυχιακού διπλώματος της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η ανάθεση του θέματος της παρούσας διατριβής έγινε από τον κ. Ευάγγελο Γιδαράκο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος και Διευθυντή του Εργαστηρίου Διαχείρισης Τοξικών & Επικινδύνων Αποβλήτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Οι απαραίτητες πειραματικές διαδικασίες που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της εργασίας έλαβαν χώρα στο προαναφερθέν Εργαστήριο. Από τη θέση αυτή, ευχαριστώ τον καθηγητή μου όχι μόνο για την επίβλεψη της διεξαγωγής της έρευνας, αλλά και διότι με το να μου εμπιστευθεί το συγκεκριμένο θέμα, άνοιξε ορίζοντες για την ανάπτυξη των ενδιαφερόντων μου προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση.

Ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε η καθοδήγηση εκ μέρους του κ. Ιωάννη Χαχλαδάκη, Χημικού Μηχανικού και υποψηφίου διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, η υποστήριξη του οποίου ήταν καθοριστική για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Για την παροχή του προς απόσυρση υλικού ηλεκτρονικών υπολογιστών οφείλω ευχαριστίες στον Υπεύθυνο του Εργαστηρίου Μικροεπεξεργαστών και Υλικού του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Μάρκο Κιμιωνή, στους υπεύθυνους του Δήμου Χανίων καθώς και στην εταιρεία Public, οι οποίοι ευχαρίστως ανταποκρίθηκαν στο σχετικό αίτημά μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	2
Ευρετήριο Πινάκων, Εικόνων & Διαγραμμάτων.....	4
ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ - ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	9
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	12
2.1 Γενικά για τα ΗΗΕ και ΑΗΗΕ	12
2.1.1 Ορισμοί.....	12
2.1.2 Κατηγοριοποίηση ΗΗΕ	16
2.1.3 Οδηγίες του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου.....	19
2.2 Απόβλητα Ηλεκτρονικών Υπολογιστών	20
2.2.1 Μέρη ενός Η/Υ.....	21
2.2.2 Σύσταση ενός Η/Υ	24
2.2.3 Τοξικά μέταλλα στους Η/Υ	30
2.2.4 Παραγωγή αποβλήτων Η/Υ.....	35
2.2.5 Διαχείριση αποβλήτων Η/Υ	40
2.2.5.1 Απόρριψη με ΑΣΑ.....	40
2.2.5.2 Επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση αποβλήτων Η/Υ	41
2.2.5.3 Εξαγωγή αποβλήτων από ανεπτυγμένες χώρες σε αναπτυσσόμενες	43
2.2.5.4 Διαχείριση αποβλήτων οθονών CRT	45
2.2.5.5 Αντιμετώπιση του προβλήματος διαχείρισης αποβλήτων Η/Υ	48
3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	51
3.1 Στόχοι της εργασίας	51
3.2 Δειγματοληψία.....	52
3.3 Προσδιορισμός των δειγμάτων	52
3.4 Προετοιμασία των δειγμάτων	53
3.4.1 Αποσυναρμολόγηση των συσκευών και μείωση μεγέθους	53
3.4.2 Μείωση μεγέθους με συσκευή ομογενοποίησης στερεών δειγμάτων	54
3.4.3 Χώνευση δειγμάτων	56
3.5 Ανάλυση δειγμάτων με το ICP-MS	58
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ	61

4.1	Αποτελέσματα ICP-MS.....	61
4.1.1	Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα πλαστικού περιβλήματος.....	61
4.1.2	Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα γυαλιού	63
4.1.3	Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων.....	66
4.2	Σύγκριση με τα όρια της Οδηγίας RoHS.....	69
4.3	Σύγκριση με τη βιβλιογραφία	70
4.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων με τα όρια TTLC και βιβλιογραφικά δεδομένα για τη μέθοδο TCLP.....	72
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	76
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80

Ευρετήριο Πινάκων, Εικόνων & Διαγραμμάτων

Πίνακας 1: Κατηγορίες ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού [1].	16
Πίνακας 2: Κατάλογος προϊόντων υπαγόμενων στις κατηγορίες ηλεκτρικού & ηλεκτρονικού εξοπλισμού [1, 2].	17
Πίνακας 3: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές συγκέντρωσης για ορισμένες επικίνδυνες ουσίες στον ΗΗΕ [4].	20
Πίνακας 4: Σύσταση Η/Υ τεχνολογίας του 1996 και βάρους περίπου 30 kg [12].	25
Πίνακας 5: Βασικά χαρακτηριστικά του κάθε είδους γυαλιού μιας οθόνης CRT [13].	27
Πίνακας 6: Παραγωγή αποβλήτων Η/Υ σε ένα έτος σε ορισμένες χώρες.	37
Πίνακας 7: Εξοικονόμηση ενέργειας με τη χρήση δευτερογενών υλικών αντί πρωτογενών [58].	42
Πίνακας 8: Στόχοι ανάκτησης και ανακύκλωσης για απόβλητα Η/Υ σύμφωνα με την Οδηγία 2012/19/ΕΕ [5].	49
Πίνακας 9: Βασικά στοιχεία των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα.	53
Πίνακας 10: Προγράμματα χώνευσης των δειγμάτων από απόβλητα Η/Υ.	58
Πίνακας 11: Συνθήκες λειτουργίας ICP-MS.	59
Πίνακας 12: Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα πλαστικού περιβλήματος (mg/kg).	62
Πίνακας 13: Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα γυαλιού (mg/kg).	64
Πίνακας 14: Αποτελέσματα ICP-MS για τις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (w.t.%).	67
Πίνακας 15: Τιμές τοξικών μετάλλων σε δείγματα πλαστικών περιβλημάτων, γυαλιού και πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών σε διαφορετικές έρευνες.	71
Πίνακας 16: Οριακές τιμές TTLC και TCLP για μέταλλα.	73
Πίνακας 17: Σύγκριση συγκεντρώσεων τοξικών μετάλλων σε δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων και γυαλιού με τα όρια TTLC.	74
Εικόνα 1: Μέρη του Η/Υ [9].	21
Εικόνα 2: Είδη γυαλιού σε μια οθόνη CRT.	27
Εικόνα 3: Εναπόθεση αποβλήτων Η/Υ σε χωματερή.	41
Εικόνα 4: Τεχνικές διαχείρισης ΑΗΗΕ σε αναπτυσσόμενες χώρες.	44
Εικόνα 5: Πλαστικό περίβλημα, εξωτερικό γυαλί οθόνης CRT, γυάλινη χοάνη οθόνης CRT, γυαλί οθόνης LCD και μητρική πλακέτα: (α) ως ξεχωριστό εξάρτημα, (β) μετά τη μείωση μεγέθους, (γ) μετά την ομογενοποίηση.	55
Εικόνα 6: Συσκευή ομογενοποίησης Pulverisette 19, Fritsch και κυκλώνας Nabertherm.	56
Εικόνα 7: Φούρνος μικροκυμάτων τύπου MARS 6 Microwave Reaction System της εταιρείας CEM Corporation.	57
Εικόνα 8: (α) Autosampler ASX-500, (β) ICP-MS 7500cx, Agilent Technologies.	58
Διάγραμμα 1: Σύνθεση των ΑΗΗΕ ανά κατηγορία αυτών στη Δυτική Ευρώπη το έτος 2000 [7].	21
Διάγραμμα 2: % κατά βάρος περιεκτικότητα κάθε υλικού σε ένα Η/Υ (CPU και οθόνη) [11].	24
Διάγραμμα 3: Μέση περιεκτικότητα (%) κάθε υλικού σε μια οθόνη CRT [14].	26
Διάγραμμα 4: Περιεκτικότητα PbO σε οθόνες CRT ανάλογα με το μέγεθός τους [16].	28
Διάγραμμα 5: Σύσταση τυπικής πλακέτας τυπωμένων κυκλωμάτων Η/Υ [23].	29
Διάγραμμα 6: Μέσος χρόνος ζωής Η/Υ στις ΗΠΑ [44].	36
Διάγραμμα 7: Παραγωγή Η/Υ και μετατροπή τους σε απόβλητα στις ΗΠΑ [11].	36
Διάγραμμα 8: Εκτίμηση του αριθμού Η/Υ που απορρίφθηκαν σε Η.Β., Ιταλία και Γερμανία κατά την περίοδο 2004-2010 [47].	37
Διάγραμμα 9: Αριθμός Η/Υ ανά χώρα σε συνάρτηση με το ΑΕΠ για 161 χώρες [18].	38
Διάγραμμα 10: Ετήσια παραγωγή οθονών CRT παγκοσμίως για τη περίοδο 1994-1998 [50].	39
Διάγραμμα 11: Παραγωγή οθονών CRT και μετατοπή τους σε απόβλητα στις ΗΠΑ [11].	39

<i>Διάγραμμα 12: Εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισης οθονών CRT [13].</i>	46
<i>Διάγραμμα 13: Διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας.</i>	51
<i>Διάγραμμα 14: Μέσες συγκεντρώσεις στα δείγματα πλαστικού περιβλήματος της περιόδου πριν το 2006, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα δείγματα της περιόδου μετά το 2006.</i>	63
<i>Διάγραμμα 15: Μέσες συγκεντρώσεις στα δείγματα γυαλιού της περιόδου πριν το 2006, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα δείγματα της περιόδου μετά το 2006.</i>	66
<i>Διάγραμμα 16: Μέσες συγκεντρώσεις στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων της περιόδου πριν το 2006, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα δείγματα της περιόδου μετά το 2006.</i>	68
<i>Διάγραμμα 17: Σύγκριση μέσων συγκεντρώσεων μολύβδου στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων πριν και μετά το 2006 με τα όρια της Οδηγίας RoHS.</i>	70

ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ - ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Ελληνικά

ΑΗΗΕ: Απόβλητα Ηλεκτρικού & Ηλεκτρονικού εξοπλισμού

ΑΣΑ: Αστικά Στερεά Απόβλητα

ΗΗΕ: Ηλεκτρικός & Ηλεκτρονικός Εξοπλισμός

Η/Υ: Ηλεκτρονικός Υπολογιστής

ΟΟΣΑ: Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης

ΧΥΤΑ: Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων

Ξενόγλωσσα

BFR: Brominated Flame Retardant (Βρωμιωμένο Επιβραδυντικό Φλόγας)

CE: Consumer Equipment (Καταναλωτικά Είδη)

CPU: Central Processing Unit (Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας)

CRT: Cathode Ray Tube (Καθοδικός Σωλήνας)

DBDE: DecabromoDiphenylether (Δεκαβρωμοδιφαινυλαιθέρες)

E&E Tools: Electrical & Electronic Tools (Ηλεκτρικά & Ηλεκτρονικά Εργαλεία)

EEE: Electrical & Electronic Equipment (Ηλεκτρικός & Ηλεκτρονικός Εξοπλισμός)

EPR: Extended Producer Responsibility (Εκτεταμένη Ευθύνη του Παραγωγού)

ICT: Information Technology & Telecommunications Equipment (Εξοπλισμός Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών)

ICP-MS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (Φασματομετρία Μάζας Επαγωγικά Συζευγμένου Πλάσματος)

Large HH: Large Household Appliances (Μεγάλες Οικιακές Συσκευές)

LCD: Liquid Crystals Display (Οθόνη Υγρών Κρυστάλλων)

Lighting: Lighting Equipment (Φωτιστικά Είδη)

M&C: Monitoring & Control Instruments (Όργανα Παρακολούθησης & Ελέγχου)

MSW: Municipal Solid Waste (Οικιακά Στερεά Απόβλητα)

OBDE: Octabromodiphenylether (Οκταβρωμοδιφαινυλαιθέρες)

OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development (Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης)

PBB: Polychlorinated Biphenyl (Πολυβρωμιωμένο Διφαινύλιο)

PBDE: Polybrominated Diphenylethers (Πολυβρωμιωμένος Διφαινυλαιθέρας)

PeBDE: Pentabromodiphenylether (Πενταβρωμοδιφαινυλαιθέρες)

RAM: Random Access Memory (Μνήμη Τυχαίας Προσπέλασης)

RoHS: Restriction on the Use of Certain Hazardous Substances (Περιορισμός της Χρήσης Ορισμένων Επικίνδυνων Ουσιών)

Small HH: Small Household Appliances (Μικρές Οικιακές Συσκευές)

sWEEE: Small Waste Electrical & Electronic Equipment (Μικρά Απόβλητα Ηλεκτρικού & Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού)

Toys: Toys, Leisure & Sports Equipment (Παιχνίδια, Εξοπλισμός Ψυχαγωγίας & Αθλητισμού)

WEEE: Waste Wlectrical & Electronic Equipment (Απόβλητα Ηλεκτρικού & Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει σκοπό τον προσδιορισμό της επικινδυνότητας αποβλήτων Η/Υ, όσον αφορά την περιεκτικότητά τους σε τοξικά μέταλλα, και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα ανώτατα επιτρεπτά όρια συγκεντρώσεων για ορισμένα μέταλλα, όπως αυτά ορίζονται από την Οδηγία 2002/95/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου (Οδηγία RoHS) και την αναδιατύπωσή της (Οδηγία 2011/65/EE).

Τα μέρη του Η/Υ που αποτέλεσαν αντικείμενο της μελέτης ήταν τα γυάλινα στοιχεία της οθόνης, το πλαστικό περίβλημα της οθόνης και οι μητρικές πλακέτες. Αρχικά, συλλέχθηκαν οθόνες και μητρικές πλακέτες από σημεία συλλογής αποβλήτων Η/Υ, οι οποίες διαχωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, σε αυτές που είχαν κατασκευαστεί πριν από το 2006 και εκείνες με έτος κατασκευής μετά το 2006, έτος κατά το οποίο τέθηκε σε ισχύ η Οδηγία RoHS. Η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε τον διαχωρισμό των γυάλινων στοιχείων και του πλαστικού περιβλήματος των οθονών, τη μείωση μεγέθους των υλικών ενδιαφέροντος με τεμαχισμό και ομογενοποίηση, τη χώνευση των δειγμάτων και, τέλος, τον προσδιορισμό των συγκεντρώσεων των τοξικών μετάλλων για τα οποία η Οδηγία RoHS επιβάλλει συγκεκριμένα όρια, δηλαδή τα Cd, Cr, Hg, Pb, καθώς και των Al, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Sn, των οποίων η τοξικολογική σημασία είναι αυξημένη, με τη χρήση της μεθόδου της φασματομετρίας μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS). Έπειτα, συγκρίνοντας τις προσδιορισθείσες συγκεντρώσεις της περιόδου πριν από το 2006 με εκείνες της περιόδου μετά το 2006, ήταν δυνατό να διαπιστωθεί αν οι κατασκευαστές συμμορφώθηκαν με τη νομοθεσία ή όχι.

Τέλος, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, έγινε ανάλυση των πρακτικών διαχείρισης των αποβλήτων Η/Υ σε συσχέτιση με την Οδηγία 2002/96/EK και την αναδιατύπωσή της, δηλαδή την Οδηγία 2012/19/EE. Με βάση τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την αποφυγή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που δύνανται να προκαλέσουν τα απόβλητα Η/Υ.

ABSTRACT

Considering the enormous production of waste personal computers nowadays, it is obvious that the study of their composition is necessary in order to regulate their management and prevent any environmental contamination. This study aimed at determining the toxic metal content of motherboards, monitor glass and monitor plastic housing using two cathode ray tube (CRT) monitors, three liquid crystal display (LCD) monitors, one LCD touch screen monitor and six motherboards, all of which were discarded. Concentrations measured were compared with the limits of the 2002/95/EC “Directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment” (RoHS Directive) and its recast (2011/65/EE directive) in order to find out if the products used comply with the aforementioned regulation. The toxic metals, which were determined in the framework of this study are the RoHS metals, namely Cd, Cr, Hg, Pb, as well as Al, Fe, Ni, Cu, Zn, As and Sn. The experiment included disassembly, pulverization and digestion of samples of the aforementioned devices. Consequently, the toxic metal content of the digested samples was determined using inductively coupled plasma – mass spectrometry (ICP-MS). Although, concentrations of Pb in motherboards and funnel glass in devices with release dates before 2006, when the RoHS Directive came into force, were measured above the permissible limit, the results of this work were encouraging, because all concentrations of devices released after 2006 were lower than the RoHS limits. This indicates that manufacturers have complied with the European Union’s Directive. Finally, the applied techniques of waste personal computers’ management were analyzed considering the 2002/96/EC, “Directive on Waste Electrical and Electronic equipment” and its recast (2012/19/EU).

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως συνέπεια της τεχνολογικής προόδου που σημειώνεται κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η παραγωγή ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (ΗΗΕ) αποτελεί έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς της παγκόσμιας βιομηχανίας. Το εύρος των εφαρμογών του ΗΗΕ αυξάνεται δραστικά και πλέον κάθε τομέας της καθημερινής ζωής είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με αυτόν. Επομένως, ανάλογη της αύξησης της παραγωγής του ΗΗΕ είναι και εκείνη των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ). Η σπουδαιότητα αυτού του ρεύματος αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) δεν περιορίζεται στην αυξανόμενη ποσότητά του, αλλά οφείλεται και στη σύστασή του, καθώς περιέχει έναν μεγάλο αριθμό επικίνδυνων ουσιών, με αποτέλεσμα να αποτελεί το πολυπλοκότερο ρεύμα στερεών αποβλήτων. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η επιστημονική κοινότητα έχει εστιάσει στη μελέτη του περιεχομένου των ΑΗΗΕ σε τοξικές ουσίες και της διαχείρισής τους και η πολιτεία, μέσω της νομοθεσίας, καταβάλλει προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, οι οποίες είναι δυνατό να προκληθούν σε περίπτωση ακατάλληλης διαχείρισης.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές διαχείρισης ΑΗΗΕ, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως. Ορισμένες από αυτές είναι ακατάλληλες, διότι θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και οδηγούν σε σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα. Ωστόσο, υπάρχουν και μέθοδοι, όπως η ανακύκλωση, οι οποίες έχουν σχετικά μικρό οικολογικό αποτύπωμα, με αποτέλεσμα η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) να έχει συντάξει Οδηγίες (2002/96/ΕΚ και 2012/19/ΕΕ) με σκοπό την προώθηση κατάλληλων τεχνικών διαχείρισης των ΑΗΗΕ, καθώς και τη μείωση της ποσότητας των αποβλήτων στην πηγή. Επιπλέον, η ΕΕ μέσω άλλων Οδηγιών (2002/95/ΕΚ, 2005/618/ΕΚ και 2011/65/ΕΕ), έχει στοχεύσει στη μείωση του περιεχομένου των ΑΗΗΕ σε τοξικές ουσίες, επιβάλλοντας ανώτερα επιτρεπτά όρια συγκέντρωσης ορισμένων στοιχείων.

Αναμφίβολα, ένα από τα πιο διαδεδομένα είδη ΗΗΕ είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές (Η/Υ), καθότι είναι πλέον άρρηκτα συνδεδεμένοι με την εργασία, τις επικοινωνίες και την ψυχαγωγία. Έτσι, η παραγωγή των αποβλήτων Η/Υ, οι οποίοι περιέχουν έναν μεγάλο αριθμό επικινδύνων ουσιών, κυρίως τοξικών μετάλλων, είναι τεράστια, γεγονός το οποίο καθιστά απαραίτητη τη μελέτη αυτού του είδους αποβλήτων ξεχωριστά από τα υπόλοιπα.

Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπόψη την ιδιαιτερότητα των αποβλήτων H/Y και το γεγονός ότι δεν υπάρχουν πολλά βιβλιογραφικά δεδομένα σχετικά με το αν οι κατασκευαστές H/Y έχουν συμμορφωθεί με τις Οδηγίες της ΕΕ σχετικά με τον περιορισμό της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών σε είδη ΗΗΕ, κρίθηκε χρήσιμη η διεξαγωγή σχετικής μελέτης. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των Οδηγιών αυτών και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα που θα βοηθήσουν σε περαιτέρω κινήσεις με σκοπό τη λύση του προβλήματος των ΑΗΗΕ.

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Γενικά για τα ΗΗΕ και ΑΗΗΕ

2.1.1 Ορισμοί

Οι ορισμοί του ΗΗΕ και των ΑΗΗΕ σύμφωνα με τις Οδηγίες 2002/95 και 2002/96 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 27ης Ιανουαρίου 2003, καθώς και με το Προεδρικό Διάταγμα 117/2004/Α-82 (ΦΕΚ 82/Α/5.3.04) είναι:

- **«Ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός» («ΗΗΕ»):** ο εξοπλισμός του οποίου η ορθή λειτουργία εξαρτάται από ηλεκτρικά ρεύματα ή ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ο εξοπλισμός για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη μέτρηση των ρευμάτων και πεδίων αυτών, ο οποίος υπάγεται στις κατηγορίες του Παραρτήματος ΙΑ και ο οποίος έχει σχεδιασθεί για να λειτουργεί υπό ονομαστική τάση έως 1000V εναλλασσομένου ρεύματος και έως 1500 V συνεχούς ρεύματος [1, 2].
- **«Απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού» («ΑΗΗΕ»):** ο ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός που θεωρείται απόβλητο κατά την έννοια του άρθρου 1 στοιχείο α) της Οδηγίας 75/442/ΕΟΚ, συμπεριλαμβανομένων όλων των κατασκευαστικών στοιχείων, των συναρμολογημένων μερών και των αναλωσίμων, που συνιστούν τμήμα του προϊόντος κατά το χρόνο απόρριψής του [1, 2].

Η Οδηγία 2002/96/ΕΚ και το Προεδρικό Διάταγμα 117/2004/Α-82 παραθέτουν ορισμούς για διάφορους όρους, οι οποίοι σχετίζονται με τα ΑΗΗΕ και τη διαχείρισή τους. Αυτοί είναι οι εξής:

- **Πρόληψη:** Τα μέτρα που αποσκοπούν στη μείωση της ποσότητας των ΑΗΗΕ, καθώς και των υλικών και των ουσιών που περιέχουν, και στον περιορισμό των κινδύνων που συνεπάγονται για το περιβάλλον.
- **Διαχείριση ΗΗΕ:**
- Η παραγωγή ή/και διάθεση υλικών από τα οποία κατασκευάζεται άμεσα ο ΗΗΕ ή/και τμήματα και ανταλλακτικά αυτού (προμήθεια πρωτογενών και δευτερογενών υλικών όπως ορίζονται στις παραγράφους 25 και 26 του άρθρου 2 του Ν.2939/2001) εφεξής «προμήθεια».

- 1) Η παραγωγή των ΗΗΕ συμπεριλαμβανομένων των κατασκευαστικών του στοιχείων / εξαρτημάτων και τμημάτων αυτού εφεξής «κατασκευή».
 - 2) Η διάθεση στην αγορά (εμπορία συμπεριλαμβανομένης και της εισαγωγής) ΗΗΕ προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ή να καταναλωθούν από το κοινό («διακίνηση»). Στη διακίνηση δεν περιλαμβάνονται οι εργασίες μεταφοράς καθαυτές.
- **Διαχείριση ΑΗΗΕ:** Η συλλογή, μεταφορά, μεταφόρτωση, προσωρινή αποθήκευση, αξιοποίηση και διάθεση των ΑΗΗΕ και των μεταχειρισμένων ανταλλακτικών αυτών, συμπεριλαμβανομένης της εποπτείας των εργασιών αυτών και της αποκατάστασης των χώρων αποθήκευσης, μεταφόρτωσης, αξιοποίησης και διάθεσης των ΑΗΗΕ και των μεταχειρισμένων ανταλλακτικών μετά την παύση λειτουργίας τους.
 - **Επαναχρησιμοποίηση:** Οιαδήποτε ενέργεια χάρη στην οποία τα ΑΗΗΕ ή τα κατασκευαστικά τους μέρη χρησιμοποιούνται για τους σκοπούς που σχεδιάστηκαν, συμπεριλαμβανομένης της συνέχισης της χρήσης του εξοπλισμού ή των κατασκευαστικών τους μερών που επιστρέφονται στα σημεία συλλογής ή στους διανομείς, τους ανακυκλωτές ή τους παραγωγούς.
 - **Ανακύκλωση:** Η επαναχρησιμοποίηση, στο πλαίσιο της παραγωγικής διαδικασίας, των αποβλήτων υλικών, για τους σκοπούς που αρχικά είχαν σχεδιασθεί ή για άλλους σκοπούς, εξαιρουμένης, εντούτοις, της ανάκτησης ενέργειας, η οποία συνίσταται στη χρήση καυσίμων αποβλήτων ως μέσων παραγωγής ενέργειας με άμεση καύση με ή χωρίς άλλα απόβλητα, αλλά με ανάκτηση θερμότητας.
 - **Αξιοποίηση:** Οιαδήποτε εφαρμόσιμη ενέργεια που αναφέρεται στο παράρτημα II Β της Οδηγίας 75/442/ΕΟΚ ή οιαδήποτε από τις εργασίες που περιγράφονται στο παράρτημα IV Β του άρθρου 17 της 50910/2727/2003 ΚΥΑ.
 - **Διάθεση:** Οιαδήποτε εφαρμόσιμη ενέργεια που αναφέρεται στο παράρτημα II Α της Οδηγίας 75/442/ΕΟΚ ή οιαδήποτε από τις εργασίες που περιγράφονται στο παράρτημα IV Α του άρθρου 17 της 50910/2727/2003 ΚΥΑ.

- **Επεξεργασία:** Οιαδήποτε δραστηριότητα μετά την παράδοση των ΑΗΗΕ σε μονάδα απορρύπανσης, αποσυναρμολόγησης, τεμαχισμού, αξιοποίησης ή προετοιμασίας για διάθεση, καθώς και οιαδήποτε άλλη ενέργεια εκτελείται για την αξιοποίηση ή/και τη διάθεση των ΗΗΕ.
- **Συλλογή:** Όπως ορίζεται στο άρθρο 2 (παρ. η) της 50910/2727/2003 ΚΥΑ. Οι εργασίες συλλογής ξεκινούν από το σημείο συλλογής όπως ορίζεται στην παρ. 12 του άρθρου αυτού.
- **Σημείο συλλογής:** Κάθε εγκεκριμένος χώρος, σύμφωνα με τις κείμενες διατάξεις στον οποίο γίνεται η παραλαβή ΑΗΗΕ από τον τελικό χρήστη.
- **Εναλλακτική διαχείριση:** Αποτελούν οι εργασίες συλλογής, παραλαβής, μεταφοράς, προσωρινής αποθήκευσης, επαναχρησιμοποίησης και αξιοποίησης των ΑΗΗΕ, ώστε μετά την επαναχρησιμοποίηση ή επεξεργασία τους αντίστοιχα να επιστρέφουν στο ρεύμα της αγοράς.
- **Σύστημα εναλλακτικής διαχείρισης:** Η οργάνωση σε ατομική ή συλλογική βάση με οποιαδήποτε νομική μορφή των εργασιών συλλογής, μεταφοράς, προσωρινής αποθήκευσης, επαναχρησιμοποίησης και αξιοποίησης των ΑΗΗΕ.
- **Παραγωγός:** Οιοδήποτε πρόσωπο, ανεξάρτητα από το ποια τεχνική πωλήσεων χρησιμοποιεί, συμπεριλαμβανομένης της εξ αποστάσεως επικοινωνίας σύμφωνα με την Οδηγία 97/7/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 20ης Μαΐου 1997, για την προστασία των καταναλωτών κατά τις εξ αποστάσεως συμβάσεις, η οποία ενσωματώθηκε στην εθνική νομοθεσία με την 21-496/2000 ΚΥΑ (Β' 1545) το οποίο:
 - 1) κατασκευάζει και πωλεί ΗΗΕ με τη μάρκα του,
 - 2) μεταπωλεί με τη μάρκα του εξοπλισμό παραγόμενο από άλλους προμηθευτές, όπου ο μεταπωλητής δεν θεωρείται «παραγωγός» εφόσον η μάρκα του παραγωγού αναγράφεται στον εξοπλισμό σύμφωνα με το σημείο i), ή
 - 3) εισάγει ή εξάγει κατ' επάγγελμα ΗΗΕ σε ένα κράτος μέλος.

Όποιος παρέχει αποκλειστικά χρηματοδότηση στο πλαίσιο ή βάσει συμφωνίας χρηματοδότησης δεν θεωρείται «παραγωγός», εκτός εάν ενεργεί επίσης ως παραγωγός με την έννοια των σημείων i) έως iii).

- **Διανομέας (Διακινητής):** Οιοσδήποτε παρέχει ΗΗΕ, επί εμπορικής βάσεως, σε εκείνον που πρόκειται να τον χρησιμοποιήσει, ή εμπορεύεται ΗΗΕ προκειμένου να χρησιμοποιηθεί από το κοινό.
- **ΑΗΗΕ οικιακής προέλευσης:** Τα ΑΗΗΕ που προέρχονται από νοικοκυριά, ιδρύματα, εμπορικές, βιομηχανικές και άλλες πηγές, η φύση και η ποσότητα των οποίων είναι παρόμοιες με των προερχόμενων από νοικοκυριά.
- **Επικίνδυνες ουσίες ή παρασκευάσματα:** Κάθε ουσία ή παρασκεύασμα που πρέπει να θεωρείται επικίνδυνο δυνάμει της Οδηγίας 67/548/ΕΟΚ του Συμβουλίου ή της Οδηγίας 1999/45/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου.
- **Οικονομικοί παράγοντες:** Όσοι ασκούν διαχείριση των ΗΗΕ, εφεξής *διαχειριστές*, καθώς και όσοι ασκούν συλλογή, ανακύκλωση, επεξεργασία και εν γένει αξιοποίηση των ΑΗΗΕ, οι χρήστες ΗΗΕ, οι ΟΤΑ και άλλοι δημόσιοι και ιδιωτικοί οργανισμοί [2].
- **Ιστορικά απόβλητα (historical waste) – Ορφανά προϊόντα (orphan products):** ΑΗΗΕ από προϊόντα που διατέθηκαν στην αγορά πριν από τις 13 Αυγούστου 2005, και προϊόντα τα οποία οι εταιρίες που τα παρήγαγαν έχουν κλείσει, αντίστοιχα.
- **Λευκά αγαθά (white goods):** Μεγάλες οικιακές συσκευές (ψυγεία, πλυντήρια κ.ά., 1η κατηγορία ΗΗΕ).
- **Καφέ αγαθά (brown goods):** Καταναλωτικά είδη (τηλεοράσεις, στερεοφωνικά κ.ά. 4η κατηγορία ΗΗΕ).
- **E-waste:** Ηλεκτρονικά απόβλητα, απόβλητος εξοπλισμός πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών και απόβλητα καταναλωτικά είδη, ήτοι η 3η (ICT) και 4η (CE) κατηγορία ΗΗΕ, αντίστοιχα. Πάντως, ως όρος ταυτίζεται συχνότατα με τα ΑΗΗΕ σε πληθώρα πηγών.

2.1.2 Κατηγοριοποίηση ΗΗΕ

Στα παραρτήματα ΙΑ του Προεδρικού Διατάγματος 117/2004/Α-82 και της Οδηγίας 2002/96 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, γίνεται κατηγοριοποίηση του ΗΗΕ, η οποία παρουσιάζεται στον **Πίνακα 1**.

Πίνακας 1: Κατηγορίες ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού [1].

<i>No.</i>	<i>Κατηγορία</i>	<i>Συντομογραφία</i>
1	Μεγάλες οικιακές συσκευές Large household appliances	Large HH
2	Μικρές οικιακές συσκευές Small household appliances	Small HH
3	Εξοπλισμός πληροφορικής & τηλεπικοινωνιών Information Technology (IT) & telecommunications equipment	ICT
4	Καταναλωτικά είδη Consumer equipment	CE
5	Φωτιστικά είδη Lighting equipment	Lighting
6	Ηλεκτρικά & ηλεκτρονικά εργαλεία (εξαιρουμένων των μεγάλης κλίμακας σταθερών βιομηχανικών εργαλείων) Electrical & electronic tools (with the exception of large-scale stationary industrial tools)	E & E Tools
7	Παιχνίδια, εξοπλισμός ψυχαγωγίας & αθλητισμού Toys, leisure & sports equipment	Toys
8	Ιατροτεχνολογικές συσκευές (εξαιρουμένων όλων των εμφυτεύσιμων & μολυσμένων προϊόντων) Medical devices (with the exception of all implanted & infected products)	Medical equipment
9	Όργανα παρακολούθησης & ελέγχου Monitoring & control instruments	M & C
10	Συσκευές αυτόματης διανομής Automatic dispensers	Dispensers

Στα παραρτήματα ΙΒ του Προεδρικού Διατάγματος 117/2004/Α-82 και της Οδηγίας 2002/96 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου γίνεται ταξινόμηση των προϊόντων ΗΗΕ στις κατηγορίες του **Πίνακα 1**, στις οποίες υπάγονται. Η ταξινόμηση αυτή παρουσιάζεται στον **Πίνακα 2**.

Πίνακας 2: Κατάλογος προϊόντων υπαγόμενων στις κατηγορίες ηλεκτρικού & ηλεκτρονικού εξοπλισμού [1, 2].

1. Large HH	2. Small HH	3. ICT	4. CE	5. Lighting
- Μεγάλες συσκευές ψύξης - Ψυγεία - Καταψύκτες - Λοιπές μεγάλες συσκευές που χρησιμοποιούνται για διατήρηση και αποθήκευση τροφίμων - Πλυντήρια ρούχων - Στεγνωτήρια ρούχων - Πλυντήρια πιάτων - Συσκευές μαγειρικής - Ηλεκτρικές κουζίνες - Ηλεκτρικά μάτια - Φούρνοι μικροκυμάτων - Άλλες μεγάλες συσκευές που χρησιμοποιούνται για μαγείρεμα & άλλες επεξεργασίες τροφίμων - Ηλεκτρικές θερμάστρες - Ηλεκτρικά θερμαντικά σώματα (ηλεκτρικά καλοριφέρ) - Άλλες μεγάλες συσκευές χρησιμοποιούμενες για τη θέρμανση χώρων, κρεβατιών, καθισμάτων - Ηλεκτρικοί ανεμιστήρες - Συσκευές κλιματισμού - Άλλα είδη εξοπλισμού	- Ηλεκτρικές σκούπες - Σκούπες χαλιών - Άλλες συσκευές καθαριότητας - Συσκευές χρησιμοποιούμενες για ράψιμο, πλέξιμο, ύφανση & άλλες κλωστοϋφαντουργικές εργασίες - Ηλεκτρικά σίδερα και άλλες συσκευές για το σιδέρωμα, το μαγγάνισμα και εν γένει τη φροντίδα των ρούχων - Φρυγανιέρες - Συσκευές τηγανίσματος (φριτέζες) - Μύλοι, καφετιέρες και συσκευές ανοίγματος ή σφραγίσματος περιεκτών ή συσκευασίων - Ηλεκτρικά μαχαίρια - Συσκευές κοπής και στεγνώματος μαλλιών, βουρτσίσματος δοντιών, ξυρίσματος, μασάζ και άλλες συσκευές περιποίησης του σώματος - Ρολόγια και εξοπλισμός μέτρησης, αναγραφής ή καταγραφής χρόνου - Ζυγαριές	Συγκεντρωτική επεξεργασία δεδομένων: - Μεγάλοι υπολογιστές (mainframes) - Μεσαίοι υπολογιστές (mini computers) - Μονάδες εκτύπωσης Συστήματα προσωπικών υπολογιστών: - Προσωπικοί υπολογιστές (συμπεριλαμβανομένων των κεντρικών μονάδων επεξεργασίας (CPU), των ποντικών, των οθονών & των πληκτρολογίων) - Φορητοί υπολογιστές (lap-top), συμπεριλαμβανομένων των CPU, ποντικών, οθονών & πληκτρολογίων) - Υπολογιστές τσέπης (notebook) - Υπολογιστές χειρός (notepad) - Εκτυπωτές - Φωτοαντιγραφικά μηχανήματα - Ηλεκτρικές & ηλεκτρονικές γραφομηχανές - Αριθμομηχανές τσέπης & επιτραπέζιες - Άλλα προϊόντα και είδη εξοπλισμού για τη συλλογή, αποθήκευση, επεξεργασία, παρουσίαση ή διαβίβαση πληροφοριών με ηλεκτρονικά μέσα - Τερματικά & συστήματα χρηστών - Συσκευές τηλεομοιοτυπίας (φαξ) - Τηλέτυπα	- Ραδιόφωνα - Τηλεοράσεις - Κάμερες μαγνητοσκόπησης (βιντεοκάμερες) - Μαγνητοσκόπια (συσκευές αναπαραγωγής εικόνας) - Συσκευές ηχογράφησης υψηλής πιστότητας - Ενισχυτές ήχου - Μουσικά όργανα - Άλλα προϊόντα και είδη εξοπλισμού για την εγγραφή ή αναπαραγωγή ήχου ή εικόνων, συμπεριλαμβανομένων των σημάτων ή άλλων τεχνολογιών διανομής ήχου και εικόνας με άλλα πλην των τηλεπικοινωνιακών μέσα	- Φωτιστικά για λαμπτήρες φθορισμού πλην των οικιακών φωτιστικών σωμάτων - Ευθείς λαμπτήρες φθορισμού - Λαμπτήρες φθορισμού μικρών διαστάσεων - Λαμπτήρες εκκενώσεως υψηλής έντασης, συμπεριλαμβανομένων των λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης και των λαμπτήρων αλογονούχων μετάλλων - Λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης - Άλλος φωτιστικός εξοπλισμός και εξοπλισμός προβολής ή ελέγχου του φωτός πλην των λαμπτήρων πυρακτώσεως

αερισμού, απαγωγής αερίων και κλιματισμού		16. Τηλέφωνα 17. Τηλεφωνικές συσκευές επί πληρωμή 18. Ασύρματα τηλέφωνα 19. Κινητά τηλέφωνα 20. Συστήματα τηλεφωνητών 21. Άλλα προϊόντα και είδη εξοπλισμού για τη μετάδοση ήχου, εικόνων ή άλλων πληροφοριών με τηλεπικοινωνιακά μέσα		
6. E & E Tools	7. Toys	8. Medical equipment	9. M & C	10. Dispensers
1. Τρυπάνια 2. Πριόνια 3. Ραπτομηχανές 4. Εξοπλισμός για την τόννευση, την λείανση, την επίστρωση, το τρόχισμα, το πριόνισμα, το κόψιμο, τον τεμαχισμό, τη διάτμηση, τη διάτρηση, τη διάνοιξη οπών, τη μορφοποίηση, την κύρτωση & άλλες παρόμοιες επεξεργασίες ξύλου, μετάλλου & άλλων υλικών 5. Εργαλεία για τη στερέωση με βίδες, καρφιά ή κοινωμάτια & την αφαίρεσή τους & για παρόμοιες χρήσεις 6. Εργαλεία για συγκολλήσεις εν γένει & παρόμοιες χρήσεις 7. Εξοπλισμός ψεκασμού, επάλειψης, διασποράς ή άλλης	1. Ηλεκτρικά τραίνα ή αυτοκινητοδρόμια 2. Φορητές κονσόλες βίντεο παιχνιδιών 3. Βιντεοπαιχνίδια 4. Υπολογιστές για ποδηλασία, καταδύσεις, τρέξιμο, κωπηλασία κ.λπ. 5. Αθλητικός εξοπλισμός με ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά κατασκευαστικά στοιχεία 6. Κερματοδέκτες τυχερών παιχνιδιών	1. Ακτινοθεραπευτικός εξοπλισμός 2. Καρδιολογικός εξοπλισμός 3. Συσκευές αιμοκάθαρσης 4. Συσκευές πνευμονικής οξυγόνωσης 5. Εξοπλισμός πυρηνικής ιατρικής 6. Ιατρικός εξοπλισμός για <i>in- vitro</i> διάγνωση 7. Συσκευές ανάλυσης 8. Καταψύκτες 9. Τεστ γονιμοποίησης 10. Άλλες συσκευές για την ανίχνευση, την πρόληψη, την παρακολούθηση, την αντιμετώπιση ή την ανακούφιση ασθενειών, σωματικών βλαβών & αναπηριών	1. Ανιχνευτές καπνού 2. Συσκευές θερμορύθμισης 3. Θερμοστάτες 4. Συσκευές μέτρησης, ζύγισης ή προσαρμογής για οικιακή ή εργαστηριακή χρήση 5. Άλλα όργανα παρακολούθησης & ελέγχου χρησιμοποιούμενα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις (π.χ. σε ταμπλό ελέγχου)	1. Συσκευές αυτόματης διανομής θερμών ποτών 2. Συσκευές αυτόματης διανομής θερμών ή ψυχρών φιαλών ή μεταλλικών δοχείων 3. Συσκευές αυτόματης διανομής στερεών προϊόντων 4. Συσκευές αυτόματης διανομής χρημάτων 5. Κάθε είδους συσκευές αυτόματης διανομής οποιοδήποτε προϊόντος

επεξεργασίας υγρών ή αέριων ουσιών με άλλα μέσα.				
8. Εργαλεία κοπής χόρτου ή άλλων εργασιών κηπουρικής				

2.1.3 Οδηγίες του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου

Με σκοπό τον έλεγχο της διαχείρισης των ΑΗΗΕ, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο δημοσίευσαν δύο Οδηγίες, την 2002/96/EK, «σχετικά με τα απόβλητα ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ)» και την 2002/95/EK, «σχετικά με τον περιορισμό της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών σε είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού» (“Directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment” ή “RoHS Directive”). Στόχος της Οδηγίας 2002/96/EK είναι, πρωτίστως, η πρόληψη της δημιουργίας ΑΗΗΕ, και επιπλέον η προώθηση της επαναχρησιμοποίησης, της ανακύκλωσης και άλλων μορφών αξιοποίησης των αποβλήτων αυτών ώστε να μειωθεί η ποσότητα των αποβλήτων προς διάθεση. Παράλληλα, η συγκεκριμένη Οδηγία επιδιώκει τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων όλων των φορέων που συμμετέχουν στον κύκλο ζωής του ΗΗΕ, παραδείγματος χάριν, των παραγωγών, διανομέων και καταναλωτών, και ιδίως των φορέων που σχετίζονται άμεσα με την επεξεργασία των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού [1]. Η Οδηγία 2002/95/EK στόχευε στην προσέγγιση των νομοθεσιών των κρατών μελών της ΕΕ σχετικά με τους περιορισμούς της χρήσης επικίνδυνων ουσιών στον ΗΗΕ, καθώς και στη συμβολή στην προστασία της ανθρώπινης υγείας και στην περιβαλλοντικώς ορθή αξιοποίηση και διάθεση των ΑΗΗΕ. Σύμφωνα με την Οδηγία RoHS, από την 1η Ιουλίου 2006, τα κράτη μέλη πρέπει να εξασφαλίζουν ότι ο νέος ΗΗΕ που διατίθεται στην αγορά δεν περιέχει μόλυβδο, υδράργυρο, κάδμιο, εξασθενές χρώμιο, πολυβρωμοδιφαινύλια (PBB) ή πολυβρωμοδιφαινυλαιθέρες (PBDE) [3]. Δεδομένης της δυσκολίας να αποφευχθούν πλήρως τα τοξικά μέταλλα και τα βρωμιωμένα επιβραδυντικά φλόγας (Brominated Flame Retardants - BFRs) σε ορισμένες περιστάσεις, θεωρήθηκε αναγκαίο να εκδοθεί τροποποίηση της Οδηγίας 2002/95/EK, η οποία θα ορίζει ανώτατα επιτρεπτά όρια συγκέντρωσης. Ως εκ τούτου, ορίστηκε η απόφαση της επιτροπής της ΕΕ, 2005/618/EK «για την τροποποίηση της Οδηγίας 2002/95/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με την καθιέρωση μέγιστων

τιμών συγκέντρωσης για ορισμένες επικίνδυνες ουσίες στα είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού» [4]. Συγκεκριμένα, τα όρια που ορίστηκαν παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3**.

Πίνακας 3: Μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές συγκέντρωσης για ορισμένες επικίνδυνες ουσίες στον ΗΗΕ [4].

<i>Ουσία</i>	<i>Ανώτατο επιτρεπτό όριο (% κατά βάρος)</i>
Εξασθενές χρώμιο	0,1%
Κάδμιο	0,01%
Μόλυβδος	0,1%
Υδράργυρος	0,1%
Πολυβρωμοδιφαινύλια (PBB)	0,1%
Πολυβρωμοδιφαινυλαιθέρες (PBDE)	0,1%

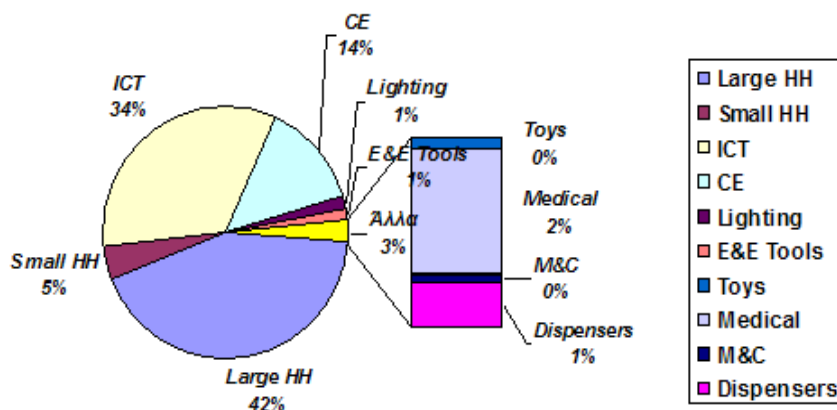
Εν συνεχεία, συντάχθηκαν αναδιατυπώσεις των Οδηγιών 2002/96/EK και 2002/95/EK. Η αναδιατύπωση της πρώτης, η Οδηγία 2012/19/EE, είχε σκοπό να οριστούν μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας με την πρόληψη ή μείωση των αρνητικών επιπτώσεων της παραγωγής και της διαχείρισης αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ), καθώς και με τον περιορισμό των συνολικών επιπτώσεων της χρήσης των πόρων και τη βελτίωση της αποδοτικότητάς της, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην αειφόρο ανάπτυξη [5]. Τα κράτη μέλη πρέπει να συμμορφωθούν με τη συγκεκριμένη Οδηγία έως τη 14η Φεβρουαρίου 2014, ημερομηνία κατά την οποία θα καταργηθεί η Οδηγία 2002/96/EK. Η αναδιατύπωση της Οδηγίας RoHS, δηλαδή η Οδηγία 2011/65/EE, δεν τροποποίησε τα όρια που ορίζονται στην απόφαση 2005/618/EK (**Πίνακας 3**), αλλά προσέθεσε ορισμένες επιπλέον κατηγορίες ΗΗΕ, οι οποίες πρέπει να εναρμονίζονται με τα θεσμοθετημένα όρια [6].

2.2 Απόβλητα Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Η σύσταση του μίγματος των ΑΗΗΕ έχουν απασχολήσει πολλές μελέτες παγκοσμίως. Σε μελέτη σχετική με τα ΑΗΗΕ αναφέρεται ότι σχεδόν το 95% της συνολικής παραγόμενης ποσότητας ΑΗΗΕ στη Δυτική Ευρώπη [7] και το Ηνωμένο Βασίλειο [8] αποτελείται από τις τέσσερις πρώτες κατηγορίες ΑΗΗΕ του **Πίνακα 1**. Η σύνθεση των ΑΗΗΕ ανά κατηγορία αυτών παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 1**. Όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 1** ένα μεγάλο μέρος των ΑΗΗΕ αποτελείται από τα απόβλητα εξοπλισμού πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών. Ένα από τα σπουδαιότερα συστατικά αυτού του

είδους των ΑΗΗΕ είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές κυρίως λόγω της ποσότητας αλλά και της πολυπλοκότητάς τους ως απόβλητα.

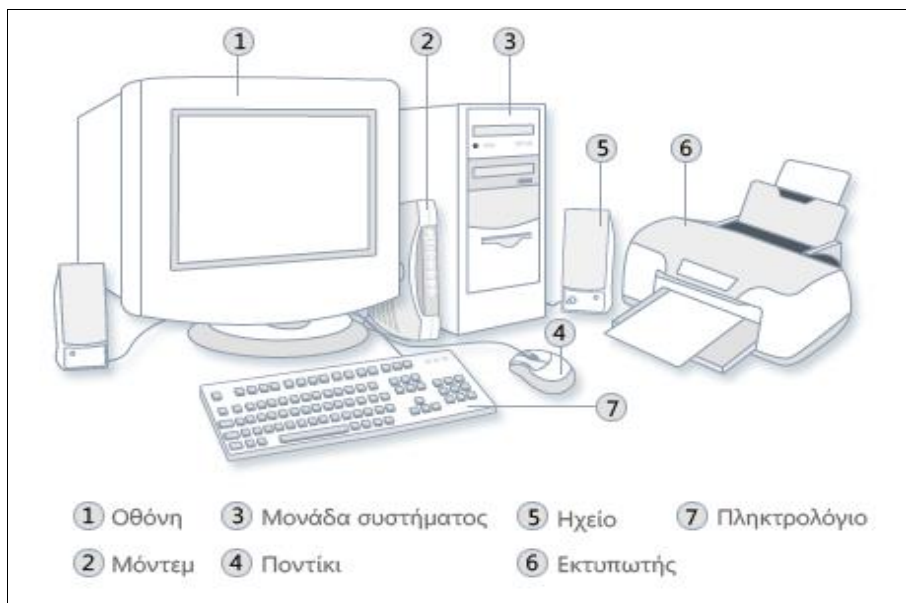
Διάγραμμα 1: Σύνθεση των ΑΗΗΕ ανά κατηγορία αυτών στη Δυτική Ευρώπη το έτος 2000 [7].



2.2.1 Μέρη ενός Η/Υ

Οι Η/Υ αποτελούνται από μια ποικιλία συσκευών οι οποίες παρουσιάζονται στην **Εικόνα 1** και αναλύονται παρακάτω.

Εικόνα 1: Μέρη του Η/Υ [9].



Οθόνη: Εμφανίζει οπτικοποιημένες πληροφορίες, σε μορφή κειμένου και γραφικών. Όπως η οθόνη μιας τηλεόρασης, η οθόνη του Η/Υ μπορεί να παρουσιάζει σταθερές ή κινούμενες εικόνες. Αποτελεί, λοιπόν, μια συσκευή εξόδου, η οποία δείχνει τα αποτελέσματα των λειτουργιών του Η/Υ. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι οθόνης: η

οθόνη καθοδικού σωλήνα (Cathode Ray Tube, CRT) και η οθόνη υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Displays, LCD) [9, 10].

- *Οθόνες CRT:* Στις οθόνες καθοδικού σωλήνα η πρόσοψη σαρώνεται εσωτερικά από δέσμες ηλεκτρονίων που παράγονται από έναν έως τρεις (ανάλογα με το αν είναι μονόχρωμη ή έγχρωμη οθόνη) ηλεκτρονικούς εκτοξευτήρες. Η οδήγηση των δεσμών των εκτοξευτήρων στα κατάλληλα εικονοστοιχεία επιτυγχάνεται με τη χρήση μαγνητικού πεδίου, το οποίο παράγεται από πηνία κάθετης και οριζόντιας απόκλισης που περιβάλλουν το λαιμό του καθοδικού σωλήνα.
- *Οθόνες LCD:* Μία οθόνη υγρών κρυστάλλων είναι ο συνδυασμός δύο φίλτρων πόλωσης και μίας διάταξης υγρών κρυστάλλων. Ένας υγρός κρύσταλλος είναι μία ελεγχόμενη από ηλεκτρικό πεδίο διάταξη, η οποία μπορεί να αλλάζει ή να μην αλλάζει την πόλωση του φωτός που περνά διαμέσου αυτού. Επειδή η διάταξη αυτή δεν παράγει μόνη της φως, χρησιμοποιείται ανάκλαση φωτισμού που παράγεται από λαμπτήρες φθορισμού και κατευθύνεται προς τους υγρούς κρυστάλλους.

Μόντεμ: Είναι απαραίτητο για να συνδεθεί ένας υπολογιστής στο διαδίκτυο (Internet). Το μόντεμ είναι μια συσκευή που στέλνει και λαμβάνει πληροφορίες του υπολογιστή μέσω μιας τηλεφωνικής γραμμής ή ενός καλωδίου υψηλής ταχύτητας και μπορεί να είναι είτε ενσωματωμένο στη μονάδα συστήματος είτε ανεξάρτητο στοιχείο αν είναι υψηλής ταχύτητας [9].

Μονάδα συστήματος: Αποτελεί τον πυρήνα ενός Η/Υ. Σχεδόν όλα τα υπόλοιπα μέρη του Η/Υ συνδέονται στη μονάδα συστήματος με τη βοήθεια καλωδίων. Τα καλώδια συνδέονται σε συγκεκριμένες θύρες, συνήθως στο πίσω μέρος της μονάδας συστήματος. Στο εσωτερικό υπάρχουν πολλά ηλεκτρονικά στοιχεία τα οποία επεξεργάζονται πληροφορίες [9]. Τα σημαντικότερα από αυτά τα στοιχεία είναι:

- η **μητρική πλακέτα**, η οποία αποτελεί το κύριο σύστημα κυκλωμάτων του υπολογιστή. Σε αυτή είναι συνδεδεμένοι ο επεξεργαστής, η κύρια μνήμη, η κρυφή μνήμη, οι κάρτες γραφικών, οι δίαυλοι και οι υποδοχές που συνδέουν τις περιφερειακές συσκευές [10].
- η **κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU)** ή **μικροεπεξεργαστής**, η οποία λειτουργεί ως ο «εγκέφαλος» του υπολογιστή και είναι ένα άκρως πολύπλοκο κομμάτι μικροσκοπικών ηλεκτρονικών [9, 10].

- η **μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM)**, η οποία αποθηκεύει προσωρινά πληροφορίες που χρησιμοποιεί η CPU, ενώ ο υπολογιστής είναι ενεργοποιημένος. Οι πληροφορίες που αποθηκεύονται στη μνήμη RAM διαγράφονται όταν απενεργοποιηθεί ο υπολογιστής [9].
- η **μονάδα σκληρού δίσκου**, η οποία αποθηκεύει πληροφορίες σε έναν σκληρό δίσκο, έναν άκαμπτο δίσκο ή στοίβα δίσκων με μαγνητική επιφάνεια. Οι σκληροί δίσκοι μπορούν να διατηρήσουν τεράστιο όγκο πληροφοριών, με αποτέλεσμα να αποτελούν συνήθως το βασικό αποθηκευτικό μέσο του υπολογιστή. Σπάνια η μονάδα σκληρού δίσκου δεν βρίσκεται στο εσωτερικό της μονάδας συστήματος [9].
- η **μονάδα CD (Compact Disk) ή/και DVD (Digital Versatile/Video Disc)**. Σχεδόν όλοι οι υπολογιστές σήμερα είναι εξοπλισμένοι με μονάδα CD ή/και DVD, η οποία βρίσκεται συνήθως στο μπροστινό μέρος της μονάδας συστήματος. Οι μονάδες CD χρησιμοποιούν λέιζερ για την ανάγνωση (ανάκτηση) δεδομένων από ένα CD ή DVD, ενώ ορισμένες μπορούν επίσης να εγγράφουν δεδομένα σε CD ή DVD [9].
- η **μονάδα δισκέτας** η οποία μπορεί να αποθηκεύει πληροφορίες σε δισκέτες. Οι δισκέτες ονομάζονται και εύκαμπτοι δίσκοι επειδή στο εσωτερικό τους είναι κατασκευασμένες από λεπτό ελαστικό βινύλιο. Σε σύγκριση με τα CD και τα DVD, οι δισκέτες έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύσουν μόνο έναν μικρό όγκο δεδομένων, η ανάκτηση πληροφοριών γίνεται με πιο αργό ρυθμό και είναι περισσότερο ευπαθείς. Για αυτούς τους λόγους, οι μονάδες δισκέτας είναι λιγότερο διαδεδομένες από ότι παλαιότερα και υπάρχει η τάση να καταργηθούν [9].
- η **κάρτα γραφικών**, η οποία εκτελεί τη λειτουργία των εικόνων στην οθόνη. Εσωτερικά, μία κάρτα γραφικών είναι μια ειδική μνήμη που ονομάζεται μνήμη γραφικών. Εκεί αποθηκεύεται πληροφορία, η οποία αναπαριστά ό,τι παρουσιάζεται στην οθόνη [10].

Το υλικό που δεν είναι μέρος τη μονάδας συστήματος ονομάζεται **περιφερειακή συσκευή ή συσκευή** [9].

Ποντίκι: Είναι η συσκευή που χρησιμοποιείται για την κατάδειξη και επιλογή στοιχείων στην οθόνη του υπολογιστή. Είτε συνδέεται με τη μονάδα συστήματος με καλώδιο είτε είναι ασύρματο [9].

Ηχεία: Χρησιμοποιούνται για την αναπαραγωγή ήχου. Είναι είτε ενσωματωμένα στη μονάδα συστήματος είτε συνδέονται σε αυτήν με καλώδια [9].

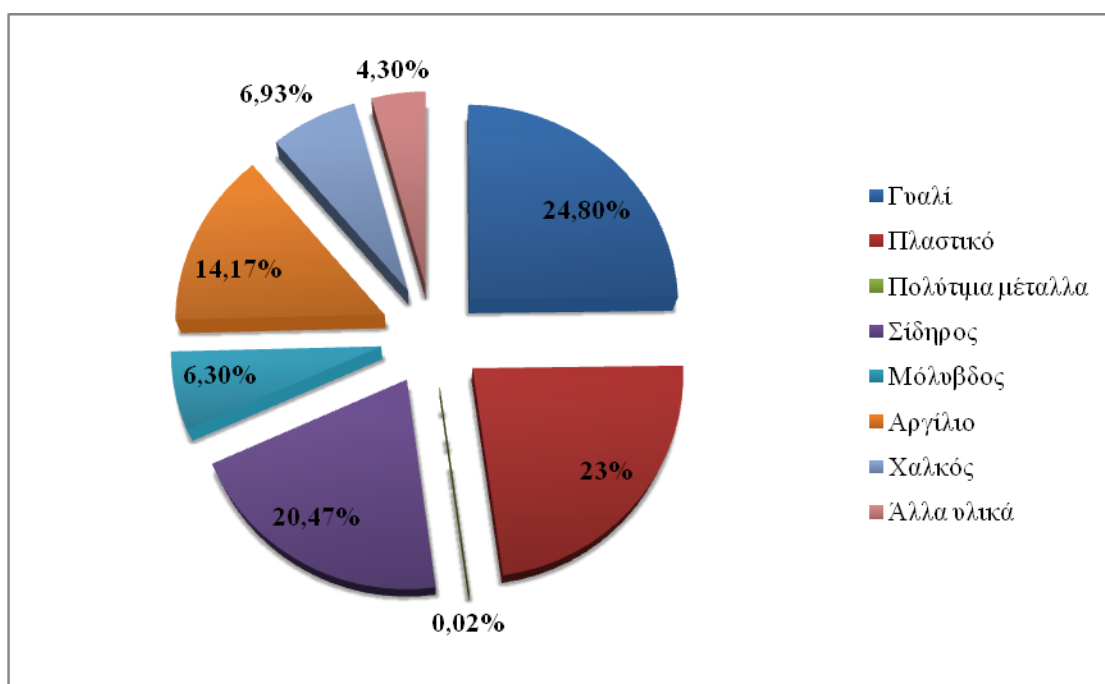
Εκτυπωτής: Είναι η συσκευή που μεταφέρει δεδομένα από τον υπολογιστή στο χαρτί. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι εκτυπωτών, οι εκτυπωτές ψεκασμού μελανιού και οι εκτυπωτές λέιζερ. Ο πρώτος τύπος είναι περισσότερο δημοφιλής για χρήση στο σπίτι, ενώ ο δεύτερος είναι γρηγορότερος και σε γενικές γραμμές καταλληλότερος για εντατική χρήση [9].

Πληκτρολόγιο: Αποτελεί την κύρια συσκευή εισόδου πληροφορίας στον υπολογιστή. Χρησιμοποιείται κυρίως για την εισαγωγή κειμένου στον υπολογιστή [9, 10].

2.2.2 Σύσταση ενός Η/Υ

Ένας Η/Υ χαρακτηρίζεται από την τεράστια ποικιλία συστατικών που απαιτούνται για τη κατασκευή του. Σε αυτά τα συστατικά περιλαμβάνονται τόσο χημικά στοιχεία που μπορούν να προκαλέσουν ρύπανση του αέρα, του εδάφους και των υπογείων υδάτων, σε περίπτωση λανθασμένης διαχείρισης, όσο και πολύτιμα υλικά τα οποία είναι δυνατόν να ανακτηθούν και να επιφέρουν σημαντικά οικονομικά οφέλη. Στο **Διάγραμμα 2** παρουσιάζεται η % κατά βάρος περιεκτικότητα κάθε υλικού σε ένα Η/Υ (CPU και οθόνη).

Διάγραμμα 2: % κατά βάρος περιεκτικότητα κάθε υλικού σε ένα Η/Υ (CPU και οθόνη) [11].



Να σημειωθεί ότι οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων δεν συμπεριλαμβάνονται στο διάγραμμα διότι τα επιμέρους συστατικά του έχουν προσμετρηθεί στα πλαστικά, τα μέταλλα και στα «άλλα υλικά».

Στον **Πίνακα 4** παρουσιάζονται τα κύρια συστατικά ενός H/Y τεχνολογίας του 1996, με βάρος περίπου 30 kg, καθώς και το ποσοστό τους εκφρασμένο σε % του ολικού βάρους, το ανακυκλώσιμο ποσοστό (με τεχνολογία ανακύκλωσης του 1996) και τη χρήση και τη θέση του υλικού.

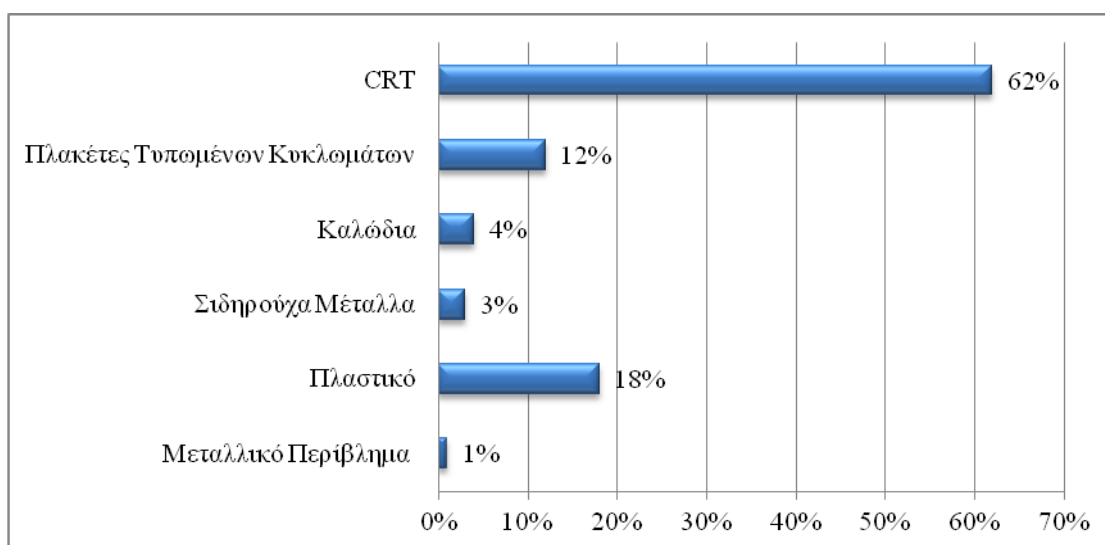
Πίνακας 4: Σύσταση H/Y τεχνολογίας του 1996 και βάρους περίπου 30 kg [12].

Υλικό	Ποσοστό (% του ολικού βάρους)	Ανακυκλώσιμο ποσοστό (%)	Χρήση /θέση
Πλαστικό	22.9907	20%	Περιέχουν οργανικά, οξείδια εκτός από το διοξείδιο του πυριτίου
Μόλυβδος	6.2988	5%	Μεταλλικές συνδέσεις, φίλτρα ακτινοβολίας/CRT, PCB
Αλουμίνιο	14.1723	80%	Δομικό,Αγωγιμότητα/περίβλημα, CRT, PCB, συνδέσεις
Γερμάνιο	0.0016	0%	Ημιαγωγοί/ PCB
Γάλλιο	0.0013	0%	Ημιαγωγοί/ PCB
Σίδηρος	20.4712	80%	Δομικό, μαγνητικά υλικά/περίβλημα,CRT, PCB
Κασσίτερος	1.0078	70%	Μεταλλικές συνδέσεις / PCB, CRT
Χαλκός	6.9287	90%	Αγωγιμότητα/CRT, PCB, κονέκτορες
Βάριο	0.0315	0%	CRT
Νικέλιο	0.8503	80%	Δομικό, Μαγνητικά υλικά/περίβλημα,CRT, PCB
Ψευδάργυρος	2.2046	60%	Μπαταρία, Φωσφορούχος πομπός/ PCB, CRT
Ταντάλιο	0.0157	0%	Πυκνωτής/PWB, Τροφοδοτικό
Ίνδιο	0.0016	60%	Τρανζίστορ, Ανορθωτές/ PCB
Βανάδιο	0.0002	0%	Κόκκινος φωσφορούχος πομπός /CRT
Τέρβιο	0	0%	Πράσινος φωσφορούχος καταλύτης, Προσμίξεις/CRT, PCB
Βηρύλλιο	0.0157	0%	Θερμική αγωγιμότητα/ PCB, κονέκτορες
Χρυσός	0.0016	99%	Συνδετικότητα, Αγωγιμότητα / PCB, κονέκτορες
Ευρώπιο	0.0002	0%	Φωσφορούχο καταλύτη/ PCB
Τιτάνιο	0.0157	0%	Χρωστικές ουσίες, Κράματα/Περίβλημα
Ρουθένιο	0.0016	80%	Αντιστάσεις/ PCB
Κοβάλτιο	0.0157	85%	Δομικά, μαγνητικά υλικά/Περίβλημα,CRT, PCB
Παλλάδιο	0.0003	95%	Συνδεσιμότητα, Αγωγιμότητα/ PCB, Κονέκτορες
Μαγγάνιο	0.0315	0%	Δομικά, μαγνητικά υλικά /Περίβλημα,CRT, PCB
Ασήμι	0.0189	98%	Αγωγιμότητα / PCB, κονέκτορες
Αντιμόνιο	0.0094	0%	Δίοδοι/ Περίβλημα,CRT, PCB
Βισμούθιο	0.0063	0%	Κατασκευή μεγάλου πάχους μεμβράνες/PCB
Χρόμιο	0.0063	0%	Διακόσμηση, Σκληρότητα/Περίβλημα
Κάδμιο	0.0094	0%	Μπαταρία, Πράσινος φθοριούχος πομπός/ Περίβλημα,CRT, PCB
Σελήνιο	0.0016	70%	Ανορθωτές/ PCB
Νιόβιο	0.0002	0%	Συγκολλήσεις/Περίβλημα
Ύτριο	0.0002	0%	Κόκκινος φωσφορούχος πομπός /CRT
Ρόδιο	0	50%	Αγώγιμες μεμβράνες/ PCB
Λευκόχρυσος	0	95%	Αγώγιμες μεμβράνες / PCB
Υδράργυρος	0.0022	0%	Μπαταρίες, Διακόπτες/ Περίβλημα, PCB
Αρσενικό	0.0013	0%	Τρανζίστορ/ PCB
Διοξείδιο του πυριτίου	24.8803	0%	Γυαλί, συμπαγή μέρη συσκευών/CRT, PCB

Η σύσταση των πιο σημαντικών υλικών ενός Η/Υ αναλύεται παρακάτω:

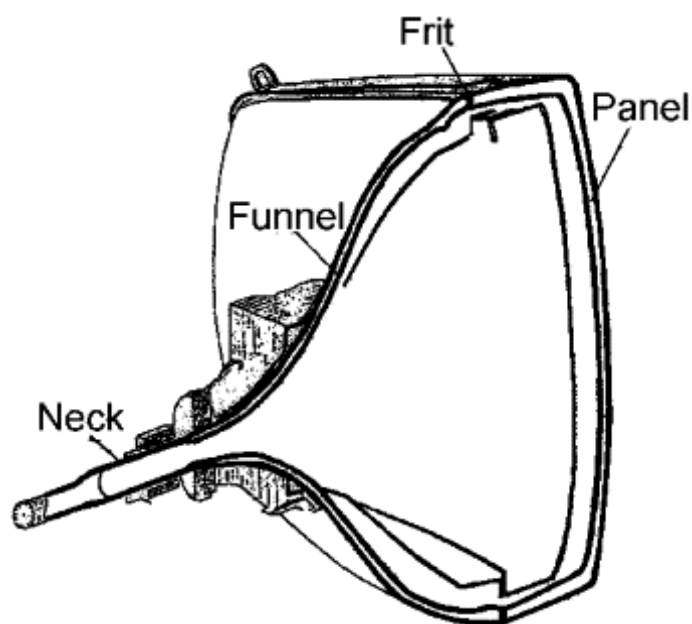
❖ **Οθόνες CRT:** Έχουν υπάρξει αντικείμενο πολλών ερευνών διότι η διαχείρισή τους προκαλεί μεγάλη ανησυχία στην επιστημονική κοινότητα εξαιτίας του μεγάλου όγκου τους, του υψηλού κόστους ανακύκλωσης, της ιδιαίτερα αυξημένης τοξικότητας και των περιορισμών εναπόθεσής τους [11, 13]. Στο **Διάγραμμα 3** παρουσιάζεται η μέση περιεκτικότητα κάθε υλικού σε μια οθόνη CRT.

Διάγραμμα 3: Μέση περιεκτικότητα (%) κάθε υλικού σε μια οθόνη CRT [14].



Γενικότερα, οι οθόνες CRT αποτελούνται από δύο μέρη: τα γυάλινα μέρη και τα μη γυάλινα μέρη. Τα γυάλινα μέρη, δηλαδή το εξωτερικό γυαλί (panel glass), η γυάλινη χοάνη (funnel glass), το γυαλί του «λαιμού» (neck glass) και το frit glass [15] (**Εικόνα 2**), περιέχουν SiO_2 , NaO , CaO και άλλα συστατικά ως οξειδωτικά, χρωστικά και για προστασία από τις ακτίνες X (K_2O , MgO , ZnO , BaO , PbO) [11]. Στον **Πίνακα 5** παρουσιάζονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε είδους γυαλιού.

Εικόνα 2: Είδη γυαλιού σε μια οθόνη CRT.

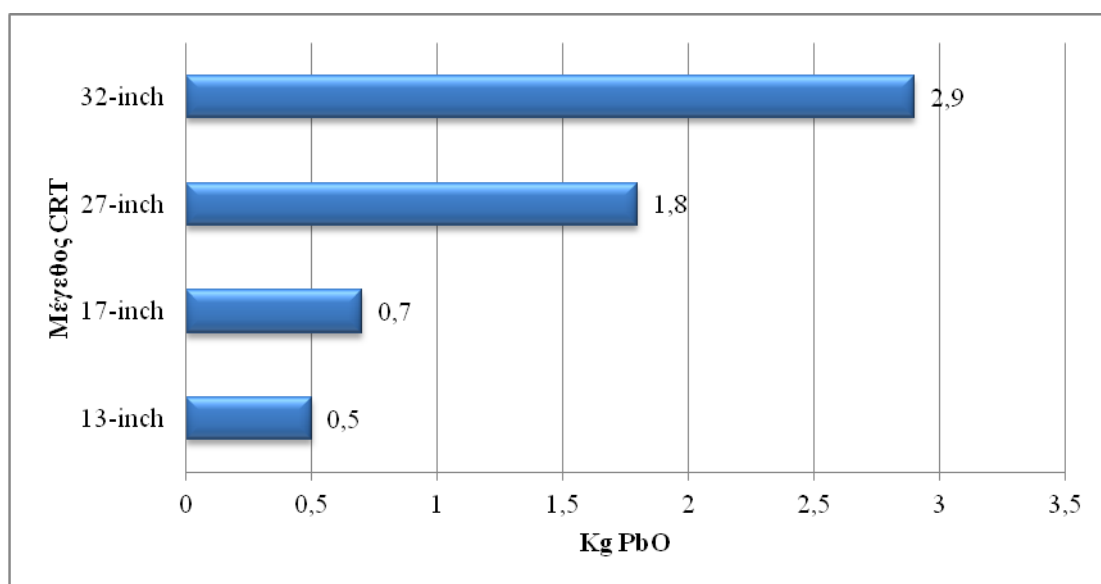


Πίνακας 5: Βασικά χαρακτηριστικά του κάθε είδους γυαλιού μιας οθόνης CRT [13].

Είδος γυαλιού	Χαρακτηριστικά
Panel glass	- Αποτελεί περίπου τα 2/3 του βάρους μιας οθόνης CRT (66wt%). - Περιέχει 0-4 wt% μόλυβδο (εκφρασμένο ως PbO wt%).
Funnel glass	- Αποτελεί το 1/3 του βάρους μιας οθόνης. - Περιέχει 22-25 wt% μόλυβδο (εκφρασμένο ως PbO wt%).
Frit glass	- Είναι το μικρό γυάλινο τμήμα που ενώνει το panel glass με το funnel glass. - Περιέχει περίπου 85 wt% μόλυβδο (εκφρασμένο ως PbO wt%).
Neck glass	- Περιβάλλει τον ηλεκτρονικό εκτοξευτήρα (electron gun). - Αποτελεί λιγότερο από το 1% του βάρους μιας οθόνης CRT. - Περιέχει 25-30 wt% μόλυβδο (εκφρασμένο ως PbO wt%).

Η πιο σημαντική ιδιαιτερότητα των οθονών καθοδικής λυχνίας είναι η πολύ μεγάλη περιεκτικότητα σε μόλυβδο, κυρίως στη γυάλινη χοάνη, η οποία τις καθιστά μια από τις κύριες πηγές Pb στο ρεύμα αστικών στερεών αποβλήτων. Στο **Διάγραμμα 4** φαίνεται η περιεκτικότητα μολύβδου ως PbO σε οθόνες CRT ανάλογα με το μέγεθός τους. Επιπλέον, το εσωτερικό τους είναι επικαλυμμένο με φθορίζουσες ουσίες από κάδμιο, ψευδάργυρο και σπάνιες γαίες. Ο καθοδικός σωλήνας περιέχει βάριο και ενώσεις του.

Διάγραμμα 4: Περιεκτικότητα PbO σε οθόνες CRT ανάλογα με το μέγεθός τους [16].

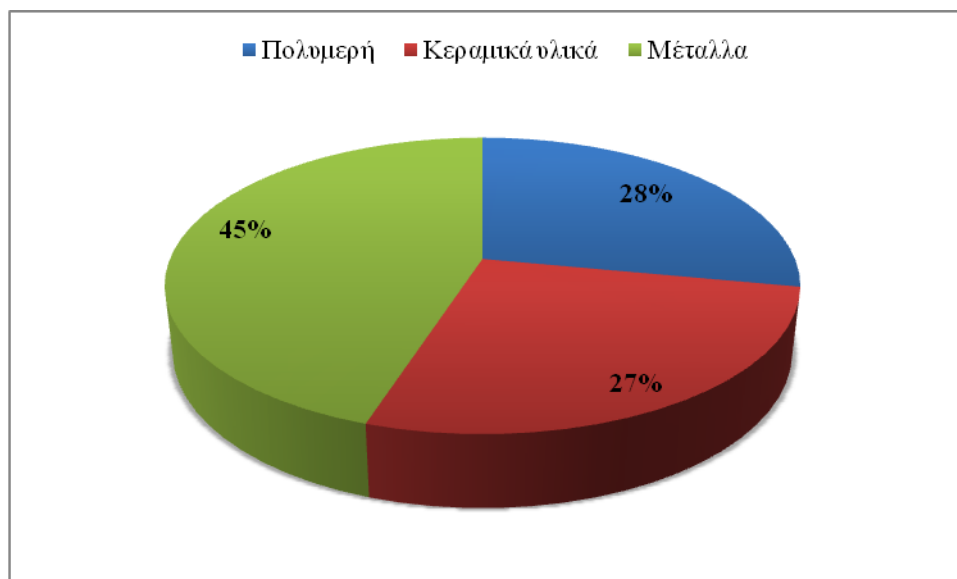


❖ **Οθόνες LCD:** Στα μέσα της δεκαετίας του 1990 εμφανίστηκε μια νέα τεχνολογία οθονών, οι LCD. Χάρη στην τεχνολογική πρόοδο και τη ραγδαία πτώση των τιμών, οι LCD αντικατέστησαν τις οθόνες CRT, γεγονός το οποίο είχε αρκετές θετικές συνέπειες, καθώς μειώθηκαν σημαντικά η παραγόμενη μάζα ΑΗΗΕ και η περιεκτικότητά τους σε μόλυβδο [17]. Ωστόσο, και οι LCD περιέχουν μια ποικιλία τοξικών ουσιών όπως Hg, In, Sn και Zn [18]. Περίπου 50.000 διαφορετικές χημικές ενώσεις είναι γνωστό ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστατικά των οθονών LCD από τις οποίες οι 500 χρησιμοποιούνται ευρύτερα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι ενώσεις που ανήκουν στις ομάδες των υποκατεστημένων αλκυλοβενζολίων, φαινυλοκυκλοεξανίων και κυκλοεξυλοβενζολίων, όπως οι MBBA (4-methoxybenzylidene-4-butylaniline) και 5CB (4-pentyl-4-cyanobiphenyl). Τα αποτελέσματα τοξικολογικών ερευνών για τα συστατικά των LCD δεν είναι

επαρκή, και για το λόγο αυτό ορίζεται η διερεύνηση της παραμέτρου αυτής ως ζήτημα προτεραιότητας στο παράρτημα II της 2002/96/EK [19].

- ❖ **Πλαστικά τμήματα:** Αποτελούν περισσότερο από το 20% κατά βάρος ενός Η/Υ [12] και περιλαμβάνουν τόσο τα ορατά υλικά, όπως το πλαστικό περίβλημα, όσο και εξαρτήματα στο εσωτερικό της συσκευής. Μπορεί να περιέχουν διάφορες τοξικές ουσίες, όπως τοξικά μέταλλα (Cd, Cr, Hg, Pb και Sb) και βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας [20, 21]. Στα πλαστικά τμήματα ενός Η/Υ χρησιμοποιούνται ευρέως οι πολυβρωμοδιφαινυλαιθέρες (polybrominated diphenyl ethers, PBDPEs ή PBDEs). Η ομάδα των PBDPEs περιλαμβάνει ενώσεις όπως οι οκτα-, δεκα- και πενταβρωμοδιφαινυλαιθέρες (octa-, deca- και pentabromodiphenylether ή oxide, OBDE, DBDE και PeBDE, αντίστοιχα), οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως σε πλαστικά περιβλήματα Η/Υ (περίπου 80% της συνολικής χρήσης τους [22]). Από τις προαναφερθείσες ενώσεις, η πλέον συχνά χρησιμοποιούμενη στη βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών είναι ο DBPE, εφαρμοζόμενος ως πρόσθετο κυρίως σε πλαίσια και περιβλήματα Η/Υ [19].
- ❖ **Πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων:** Το ποσοστό με το οποίο συνεισφέρει κάθε υλικό στην κατασκευή μιας τυπικής πλακέτας τυπωμένων κυκλωμάτων ενός Η/Υ φαίνεται στο **Διάγραμμα 5**.

Διάγραμμα 5: Σύσταση τυπικής πλακέτας τυπωμένων κυκλωμάτων Η/Υ [23].



Οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων έχουν πολύ υψηλό φορτίο τοξικών ουσιών (π.χ. τοξικά μέταλλα όπως Ag, Cr, Cu, Ga, Pb, Sb, Sn, Zn) και για αυτόν τον λόγο η διαχείρισή τους απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Επιπλέον, αποτελούνται από ένα φύλλο πλαστικού, το οποίο είναι ενισχυμένο με ίνες

γυαλιού και εποξειδική ρητίνη, και περιέχουν πιθανότατα επιβραδυντικά φλόγας σε ποσοστό έως 15%. Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο είδος επιβραδυντικού φλόγας για τέτοιες εφαρμογές είναι η τετραβρωμοδιφαινόλη-Α (tetrabromobisphenol-A, TBBPA), μέλος της ομάδας των φαινολικών BFRs, η οποία αναφέρεται ότι έχει μικρότερο δυναμικό σχηματισμού βρωμιωμένων διοξινών και φουρανίων σε σχέση με άλλα ευρέως χρησιμοποιούμενα είδη σε θερμικές διεργασίες. Ωστόσο, οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων, εκτός από τις τοξικές ουσίες, συνίσταται και από διάφορα πολύτιμα μέταλλα, όπως χρυσό, ασήμι και παλλάδιο, τα οποία μπορούν να ανακτηθούν [24, 25, 26].

2.2.3 Τοξικά μέταλλα στους H/Y

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, τα απόβλητα H/Y, και γενικά τα ΑΗΗΕ, περιέχουν σωρεία τοξικών στοιχείων τα οποία, σε περίπτωση αναποτελεσματικής διαχείρισης, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα τόσο στο περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη υγεία. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την επικινδυνότητα των τοξικών μετάλλων που περιέχονται σε H/Y, μερικά από τα οποία είναι: το αργίλιο (Al), το χρώμιο (Cr), ο σίδηρος (Fe), το νικέλιο (Ni), ο χαλκός (Cu), ο ψευδάργυρος (Zn), το αρσενικό (As), το κάδμιο (Cd), ο κασσίτερος (Sn), ο υδράργυρος (Hg) και ο μόλυβδος (Pb). Παρακάτω αναλύεται η επίδραση των προαναφερθέντων τοξικών μετάλλων στην ανθρώπινη υγεία.

- **Αργίλιο:** Το αργίλιο απορροφάται στο γαστρεντερικό σύστημα με ποσοστό περίπου 1% και στους πνεύμονες μέχρι και σε ποσοστό περίπου 10% [27] και συσσωρεύεται στα νεφρά, τα οστά, τους πνεύμονες, το ήπαρ, τους μύες του εγκεφάλου, το δέρμα, τα όργανα αναπαραγωγής και το στομάχι. Η τοξικότητα του αργιλίου μπορεί να παράγει διάφορα κλινικά σημεία και κοινά συμπτώματα όπως είναι η υπερβολική κατάθλιψη, η καρδιακή αρρυθμία, ο πονοκέφαλος, η απώλεια ομιλίας, η ανορεξία, το μούδιασμα των άνω και κάτω άκρων και η θολή όραση. Η τοξικότητα αργιλίου έχει αποδειχθεί ότι προάγει την εξασθένηση της μακροπρόθεσμης μνήμης, σε άτομα τα οποία έχουν εκτεθεί σε αυτό, όπως προκύπτει από διάφορους ελέγχους. Έχει συνδεθεί στις διαταραχές γήρανσης του εγκεφάλου. Η νόσος του Alzheimer και ο παρκινσονισμός αποτελούν τις επικρατέστερες νόσους. Ομοίως, ασθενείς με μακροχρόνια αιμοδιάλυση έχουν παρουσιάσει ένα προοδευτικό νευρολογικό σύνδρομο που περιλαμβάνει λεκτικές διαταραχές, κλωνικούς σπασμούς μυών

και εγκεφαλοπάθεια. Επιπλέον, το εισπνεόμενο αργίλιο μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη της πνευμονικής ίνωσης και μικρότερου βαθμού λεμφοκυτταρίωσης [28]. Όσον αφορά τους υδρόβιους οργανισμούς, έχει αποδειχθεί ότι τα ψάρια είναι πιο ευαίσθητα στο αργίλιο από τους ασπόνδυλους υδρόβιους οργανισμούς και μπορεί να τους προκαλέσει πνευμονικά προβλήματα και δυσλειτουργίες στην ανάπτυξή τους [29]. Για τα φυτά η εμφάνιση συμπτωμάτων τοξικότητας του Al είναι πιθανή σε όξινα εδάφη ($\text{pH} < 5,5$), όπου η διαλυτότητα του αργιλίου αυξάνει δραματικά, σε σημείο ώστε το εδαφικό σύμπλοκο να είναι κορεσμένο με αργίλιο σε ποσοστό $>50\%$. Από τα πρώτα συμπτώματα είναι η περιορισμένη ανάπτυξη των ριζών, τα άκρα των οποίων και οι πλάγιες διακλαδώσεις γίνονται χονδρές και αποκτούν χρώμα καφέ. Στα κύτταρα αδρανοποιεί το φώσφορο, σχηματίζοντας σταθερά αργιλιοφωσφορικά σύμπλοκα. Για το λόγο αυτό, η τοξικότητα του αργιλίου χαρακτηρίζεται πολλές φορές και από ταυτόχρονη έλλειψη φωσφόρου στους φυτικούς ιστούς.

- **Χρώμιο:** Ανάλογα με την ένωσή του, μπορεί να απορροφηθεί έως και σε ποσοστό 70% από τους πνεύμονες και έως και σε ποσοστό 2% από το γαστρεντερικό σύστημα και από το δέρμα. Η οξεία τοξικότητα του χρωμίου μπορεί να οδηγήσει, μέσω της εισπνοής, σε εξελκώσεις του ρινικού διαφράγματος, σε βρογχίτιδα, πνευμονοκονίωση και άσθμα. Μετά από κατάποση μπορεί να προκαλέσει νεκρώσεις στους νεφρούς. Όσον αφορά την χρόνια τοξικότητα, το χρώμιο μπορεί να είναι υπεύθυνο για την εμφάνιση επιπεφυκίτιδας, γαστρίτιδας, ελκών του στομάχου και εντερίτιδας [27]. Επιπλέον, είναι συνδεδεμένο με την αρτηριοσκλήρυνση, τον διαβήτη και πλήθος καρδιολογικών παθήσεων και η έκθεση σε χρώμιο μπορεί να προκαλέσει ισχυρή αλλεργική αντίδραση και ζημιά στο DNA των κυττάρων. Σημαντικές ποσότητες αυτού του στοιχείου μπορούν να απελευθερωθούν κατά την αποτέφρωση. Παρομοίως, το εξασθενές χρώμιο μπορεί να καταστρέψει το DNA και να προκαλέσει σημαντικές βλάβες στα μάτια. Η διαχείριση αποβλήτων που περιέχουν Cr^{6+} θέλει ιδιαίτερη προσοχή, διότι κατά την αποτέφρωσή τους παράγεται ιπτάμενη τέφρα από την οποία μπορεί να εξαχνωθεί το Cr^{6+} , και επειδή το εξασθενές χρώμιο μπορεί εύκολα να μεταφερθεί στα στραγγίσματα των ΧΥΤΑ. Εξασθενές χρώμιο περιέχεται στο πλαστικό περίβλημα H/Y, στα καλώδια και στον σκληρό δίσκο και χρησιμοποιείται και ως χρωστική ουσία [30, 31, 32].

- **Σίδηρος:** Παρ' όλο που ο σίδηρος αποτελεί απαραίτητο στοιχείο για ένα υγιή οργανισμό, η υπερβολική ποσότητά του μπορεί να καταστεί επιβλαβής. Ο άνθρωπος δεν διαθέτει μηχανισμούς με τους οποίους θα μπορούσε να απομακρύνει σίδηρο από τον οργανισμό του. Έχει αποδειχθεί ότι η υπερφόρτωση του οργανισμού με σίδηρο μπορεί να προκαλέσει βλάβες στο κυκλοφορικό σύστημα, την καρδιά, το ήπαρ, τους πνεύμονες, το μυελό των οστών και ενδοκρινή όργανα, με κίνδυνο εκδήλωσης θανάσιμων ασθενειών, όπως η κίρρωση ήπατος και η καρδιακή ανεπάρκεια, εξαιτίας της οξειδωτικής του δράσης.
- **Νικέλιο:** Περιέχεται σε μπαταρίες, στο περίβλημα στις οθόνες CRT και στις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων ενός Η/Υ. Η πρόσληψη του μπορεί να προκαλέσει дисπλασίες του ρινικού επιθηλίου, ασθματικά συμπτώματα, βρογχίτιδα, πνευμονοκονιώσεις και καρκίνο του πνεύμονα [27, 30]. Σε ένα μικρό ποσοστό του πληθυσμού (περίπου 10%, κυρίως γυναίκες) η τοξίκωση από νικέλιο χαρακτηρίζεται από εμφάνιση αλλεργικών συμπτωμάτων και σε κυτταρική υπερευαισθησία, με συνέπεια την εμφάνιση δερματίτιδας [27].
- **Χαλκός:** Ο χαλκός μπορεί να απορροφηθεί στο γαστρεντερικό σύστημα έως και σε 40% της δόσης, από το οποίο μέχρι και 15% απορροφάται στο στομάχι και το υπόλοιπο στο έντερο [27]. Οι επιδράσεις του στην ανθρώπινη υγεία σχετίζονται κυρίως με προβλήματα στο συκώτι, με γαστρεντερικές δυσλειτουργίες και με ερεθισμούς στο αναπνευστικό σύστημα. Ο χαλκός έχει αρνητικές επιπτώσεις και στα ζώα και κυρίως στα θαλάσσια είδη [33, 34]. Στους Η/Υ εντοπίζεται κυρίως στις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων.
- **Ψευδάργυρος:** Παρόλο που σε μικρές ποσότητες είναι απαραίτητο συστατικό της διατροφής του ανθρώπου, μεγάλες ποσότητες μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στην υγεία, ακόμα και θάνατο. Ο ψευδάργυρος, επίσης, συνδέεται με την ασθένεια του Alzheimer [28]. Επιπλέον, είναι τοξικός σε αυξημένες ποσότητες για υδρόβια οργανισμούς προκαλώντας προβλήματα στην ανάπτυξή τους, την επιβίωσή τους και την αναπαραγωγή τους. Είναι επικίνδυνος, επίσης, και για τα φυτά, τα πουλιά και τα θηλαστικά προκαλώντας σωρεία δυσλειτουργιών σε περίπτωση πρόσληψης σημαντικής δόσης [29].
- **Αρσενικό:** Είναι ένα ιδιαίτερα τοξικό στοιχείο, οι επιπτώσεις του οποίου στην υγεία είναι γνωστές και πολύμορφες. Η οξεία τοξικότητα του ανόργανου

αρσενικού χαρακτηρίζεται από γαστρεντερικές, καρδιαγγειακές και νευρολογικές επιδράσεις [27]. Η έκθεση στις ενώσεις αρσενικού μπορεί να προκαλέσει ανορεξία, ναυτία, εμετούς, διάρροια, μυϊκούς πόνους και κάψιμο του στόματος και του λαιμού. Μεγάλη στοματική δόση προκαλεί ταχυκαρδία, οξεία εγκεφαλοπάθεια, παράλυση, συμφορητικούς σπασμούς, κώμα, ακόμη και θάνατο. Επαναλαμβανόμενη έκθεση στις ενώσεις αρσενικού έχει αποδειχθεί ότι οδηγεί στην ανάπτυξη περιφερικών νευροπαθειών, εγκεφαλοπάθειας, δυσφορίας, σε σύνδρομο του Raynaud, καθώς και σε γάγγραινα των χαμηλότερων άκρων. Άλλα χρόνια αποτελέσματα της δηλητηρίασης από αρσενικό είναι οι ανωμαλίες του δέρματος, τα νευροτοξικά συμπτώματα, η χρόνια αναπνευστική νόσος, η άνοια, η απώλεια ακοής και οι καρδιαγγειακές παθήσεις [28].

- **Κάδμιο:** Το κάδμιο είναι ιδιαίτερα τοξικό στοιχείο, το οποίο μπορεί να προκαλέσει μη αναστρέψιμες βλάβες στην ανθρώπινη υγεία και κυρίως στα νεφρά. Εισέρχεται στον οργανισμό κυρίως μέσω της αναπνοής αλλά και μέσω της τροφής. Οι ενώσεις του Cd απορροφώνται στους πνεύμονες (σαν αεροζόλ) μέχρι 50% και στο γαστρεντερικό σύστημα, ανάλογα με την σύσταση της τροφής, μέχρι 5%. Εξαιτίας του μεγάλου χρόνου βιολογικής ημίσειας ζωής του (30 έτη), το κάδμιο συσσωρεύεται στον ανθρώπινο οργανισμό και υπάρχουν πολλές πιθανότητες δηλητηρίασης και καρκινογένεσης. Επιπλέον μπορεί να δημιουργήσει περιβαλλοντικά προβλήματα σε περίπτωση συσσώρευσης, εξαιτίας της οξείας και χρόνιας τοξικότητάς του. Στους H/Y εντοπίζεται κυρίως στις οθόνες CRT, στο μελάνι των εκτυπωτών, και στα ημιαγώγιμα υλικά [27, 30, 32].
- **Κασσίτερος:** Σε έναν H/Y μεγάλες ποσότητες κασσίτερου περιέχονται στις μεταλλικές συνδέσεις των πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων. Οι ανόργανες ενώσεις του κασσίτερου παρουσιάζουν χαμηλή τοξικότητα επειδή δεν απορροφούνται εύκολα και αποβάλλονται εύκολα από τον οργανισμό. Περίπου το 5% απορροφάται από το γαστρεντερικό σύστημα. Ορισμένες από τις οργανικές ενώσεις κασσίτερου είναι τοξικές, καθώς απορροφούνται πιο εύκολα. [35, 36]. Συμπτώματα που προκαλούνται είναι ο ερεθισμός του δέρματος και των ματιών, η χολαγγειίτιδα, καθώς και βλάβες λόγω ηπατοτοξικότητας και νευροτοξικότητας [35]. Επιπλέον, έχουν καταγραφεί περιστατικά δηλητηρίασης

που συνδέονται με υψηλές συγκεντρώσεις κασσίτερου σε φαγητά και ποτά που προκάλεσαν προβλήματα γαστρεντερικής φύσεως, όπως πόνους στο στομάχι, ναυτία, διάρροια και εμετούς [37]. Όσον αφορά τα υδάτινα οικοσυστήματα, οι οργανικές ενώσεις του κασσίτερου μπορεί να έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στους υδρόβιους οργανισμούς, με υψηλά επίπεδα βιοσυσσώρευσης, η οποία όμως δεν οδηγεί σε βιομεγέθυνση στην τροφική αλυσίδα λόγω της ταχείας αποδόμησης τους [38].

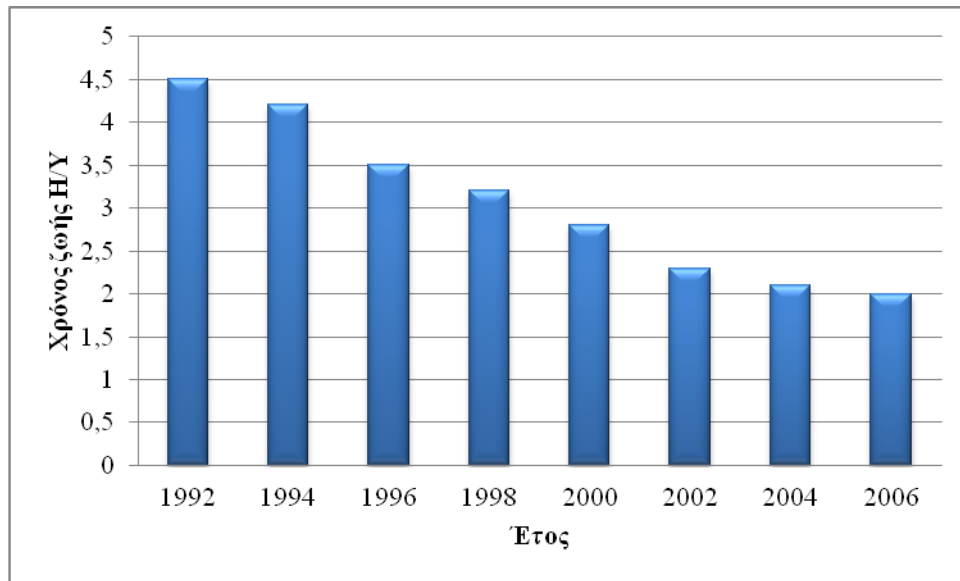
- **Υδράργυρος:** Σε απόβλητα H/Y ο υδράργυρος εντοπίζεται κυρίως στις μπαταρίες, στις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων, στα περιβλήματα και στις οθόνες LCD. Είναι ιδιαίτερος τοξικός για τον άνθρωπο, καθώς μπορεί να έχει αρνητικές επιδράσεις στα νεφρά και σε κυοφορούμενα έμβρυα, και μπορεί να προκαλέσει σοβαρές εγκεφαλικές βλάβες. Επιπλέον, ο υδράργυρος και οι ενώσεις του είναι πολύ επικίνδυνος για τα οικοσυστήματα και για τα άγρια ζώα και φυτά. Ο υδράργυρος θεωρείται ένας παγκοσμίου εμβέλειας έμμονος ρύπος, που κυκλοφορεί μεταξύ αέρα, νερού, ιζημάτων, εδάφους και ζώντων οργανισμών σε διάφορες μορφές. Είναι δυνατόν να μετατραπεί, στο περιβάλλον, σε μεθυλδράργυρο, την πλέον τοξική μορφή του. Ο μεθυλδράργυρος βιομεγεθύνεται, ειδικά στην τροφική αλυσίδα των υδάτινων οικοσυστημάτων, με αποτέλεσμα να καθιστά ιδιαίτερα ευπαθείς τους πληθυσμούς που τρέφονται σε μεγάλο ποσοστό με ψάρια και θαλασσινά [30, 32, 39].
- **Μόλυβδος:** Αποτελεί ένα ισχυρά τοξικό μέταλλο, το οποίο δύναται να προκαλέσει βλάβες στο κεντρικό και περιφερειακό νευρικό σύστημα, στα νεφρά, στον εγκέφαλο και στο αναπαραγωγικό σύστημα. Επιπλέον, έχει αρνητικές επιπτώσεις στην εμβρυϊκή ανάπτυξη καθώς δημιουργεί προβλήματα στην ανάπτυξη του εγκεφάλου. Οι ενώσεις του μολύβδου απορροφώνται κυρίως στους πνεύμονες (σαν αεροζόλ) μέχρι 70% και στο γαστρεντερικό σύστημα σε ποσοστό 8%. Τα παιδιά μπορούν να απορροφήσουν μέχρι 50% της δόσης στο γαστρεντερικό σύστημα. Επιπλέον, ο μόλυβδος έχει την τάση να συσσωρεύεται στο περιβάλλον και, εξαιτίας της έντονης και χρόνιας τοξικότητας που τον χαρακτηρίζει, είναι επικίνδυνος για τα φυτά, τα ζώα και τους μικροοργανισμούς. Στον H/Y συναντάται κατά κύριο λόγο στις συγκολλήσεις των πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων, σε μπαταρίες, στις καλωδιώσεις και κυρίως στις οθόνες CRT [27, 30, 32].

2.2.4 Παραγωγή αποβλήτων H/Y

Η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη που έχει σημειωθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών έχει ως αποτέλεσμα ο ΗΗΕ να αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της καθημερινής ζωής. Επιπλέον, η εξέλιξη των διαφόρων ειδών ΗΗΕ έχει δημιουργήσει νέες ανάγκες, αυξάνοντας σημαντικά την παραγωγή τους. Κατά συνέπεια υπάρχει η τάση να μειώνεται ο χρόνος ζωής των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών, με αποτέλεσμα τα ΑΗΗΕ να αποτελούν ένα από τα πιο ταχέως αυξανόμενα ρεύματα ΑΣΑ. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση οι ποσότητες ΑΗΗΕ αυξάνονται κατά 3-5% ανά έτος [40], ποσοστό τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό της αύξησης της ποσότητας των ΑΣΑ γενικά [41]. Υπολογίζεται ότι η παγκόσμια παραγωγή ΑΗΗΕ είναι 20-50 εκατομμύρια τόνους ανά χρόνο [42], αποτελώντας το 1-3 % των ΑΣΑ, η παραγωγή των οποίων είναι 1636 εκατομμύρια τόνοι ανά χρόνο [43].

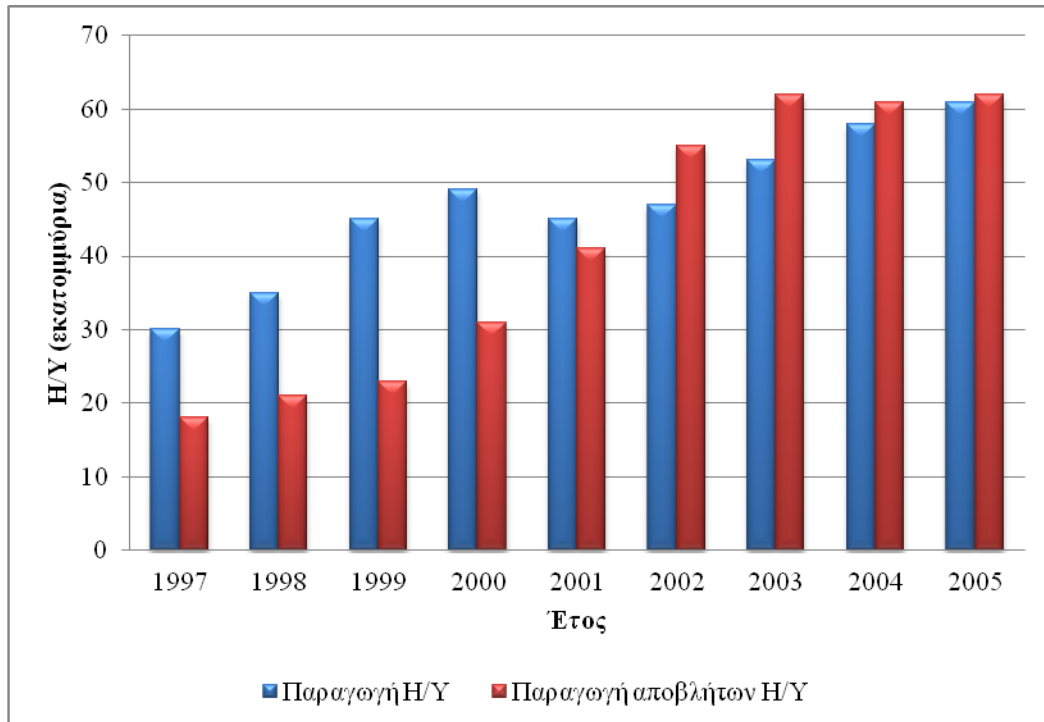
Οι H/Y είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα είδη ΗΗΕ καθώς έχουν εφαρμογή σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων. Η χρήση τους είναι πλέον άρρηκτα συνδεδεμένη με την εργασία, τις επικοινωνίες και τη ψυχαγωγία. Αυτός είναι ο λόγος που η τεχνολογία τους εξελίσσεται τόσο γρήγορα και κάνουν την εμφάνισή τους νέα είδη (laptop, netbook, tablets). Ως συνέπεια αυτού ο χρόνος ζωής τους να έχει μειωθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Εκτιμάται ότι ο μέσος χρόνος ζωής ενός H/Y είναι ίσος με 3 χρόνια, έχοντας έτσι τεράστια συνεισφορά στην ολική μάζα των ΑΗΗΕ. Στο Διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η εξέλιξη της διάρκειας κύκλου ζωής ενός H/Y στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής την περίοδο 1992-2006, όπως εκτιμήθηκε σε έρευνα το 1999 [44]. Όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 6** ο χρόνος ζωής των H/Y στις ΗΠΑ το 1992 ήταν 4,5 χρόνια και μέχρι το 2005 μειώθηκε στα 2 χρόνια.

Διάγραμμα 6: Μέσος χρόνος ζωής Η/Υ στις ΗΠΑ [44].



Στο **Διάγραμμα 7**, απεικονίζεται η ποσότητα Η/Υ (σε εκατομμύρια Η/Υ) που παράχθηκε ανά έτος στις ΗΠΑ κατά την περίοδο 1997-2005 (γαλάζιο χρώμα) , καθώς και η ποσότητα των Η/Υ που μετατράπηκαν σε απόβλητα για την ίδια περίοδο (κόκκινο χρώμα) [11]. Είναι εμφανές, ότι η παραγωγή αποβλήτων Η/Υ είναι τόσο μεγάλη, που μετά το έτος 2001 ξεπέρασε τη παραγωγή νέων Η/Υ.

Διάγραμμα 7: Παραγωγή Η/Υ και μετατροπή τους σε απόβλητα στις ΗΠΑ [11].



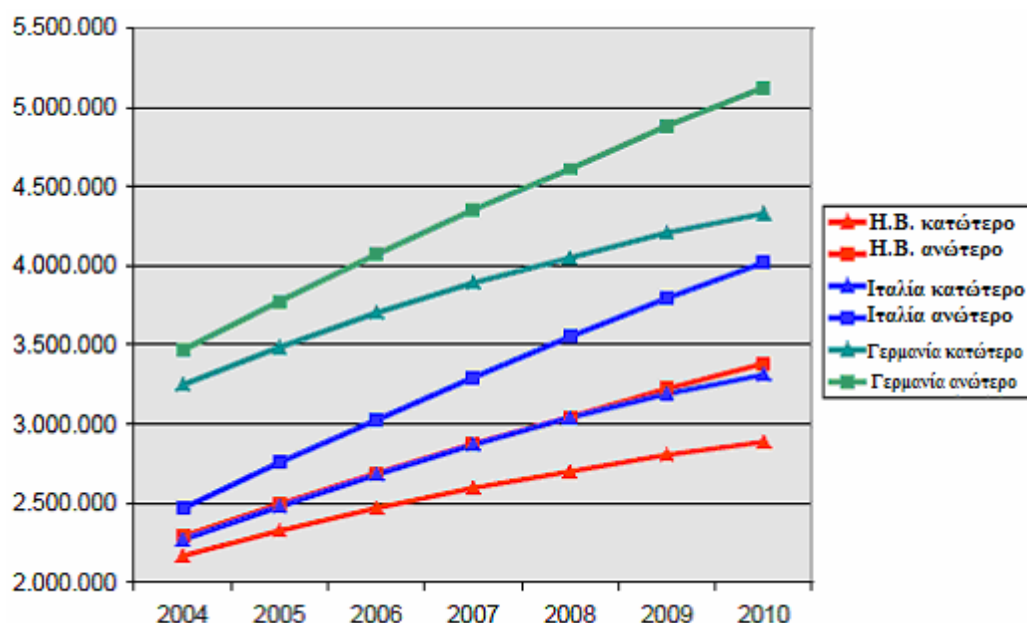
Στον **Πίνακα 6** παρουσιάζεται η παραγωγή αποβλήτων Η/Υ σε ορισμένες χώρες κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Πίνακας 6: Παραγωγή αποβλήτων Η/Υ σε ένα έτος σε ορισμένες χώρες.

Χώρα	Έτος	Ποσότητα	Βιβλιογραφία
Κίνα	-	4 εκατομμύρια ανά έτος	[45]
Κορέα	2003	1,2 εκατομμύρια	[45]
Βόρεια Αμερική	1996	79 εκατομμύρια	[45]
Ταϊβάν	1998	300.000	[45]
Η.Π.Α.	1998	20 εκατομμύρια	[45]
Ινδία	2009/2010	4,25 εκατομμύρια	[46]
Παγκοσμίως	2004	100 εκατομμύρια	[7]

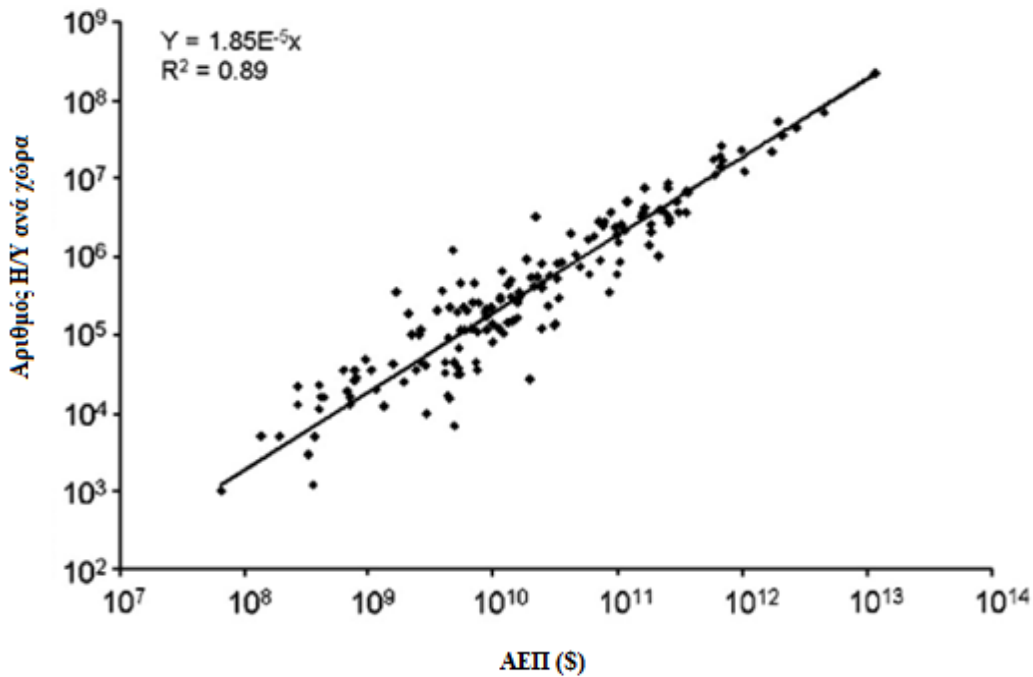
Στο **Διάγραμμα 8** παρουσιάζεται η εκτίμηση του αριθμού Η/Υ που απορρίφθηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Ιταλία και τη Γερμανία τα έτη 2004 έως 2010. Οι δύο καμπύλες αντιπροσωπεύουν το ανώτερο και κατώτερο όριο των εκτιμήσεων για κάθε χώρα.

Διάγραμμα 8: Εκτίμηση του αριθμού Η/Υ που απορρίφθηκαν σε Η.Β., Ιταλία και Γερμανία κατά την περίοδο 2004-2010 [47].



Η παραγωγή αποβλήτων Η/Υ μιας χώρας, και ΑΗΗΕ γενικότερα, εξαρτάται από το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ) (Gross Domestic Product, GDP). Στο **Διάγραμμα 9** απεικονίζεται ο αριθμός Η/Υ ανά χώρα ως συνάρτηση του ΑΕΠ της χώρας. Από το **Διάγραμμα 9** προκύπτει ότι στις πιο πλούσιες χώρες υπάρχουν περισσότεροι Η/Υ και ως εκ τούτου παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα αποβλήτων Η/Υ.

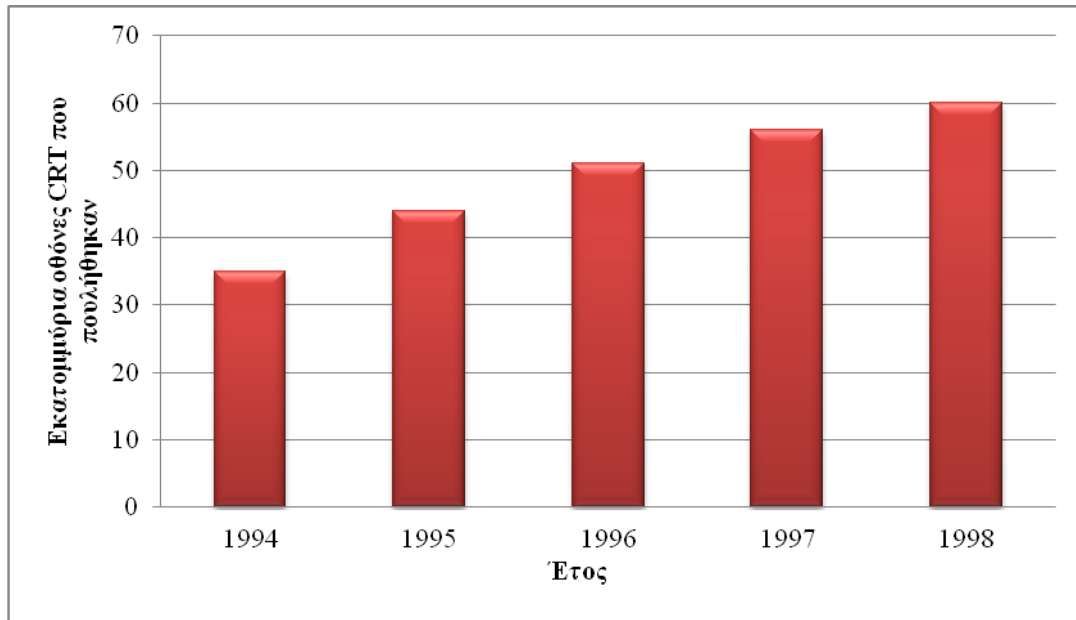
Διάγραμμα 9: Αριθμός Η/Υ ανά χώρα σε συνάρτηση με το ΑΕΠ για 161 χώρες [18].



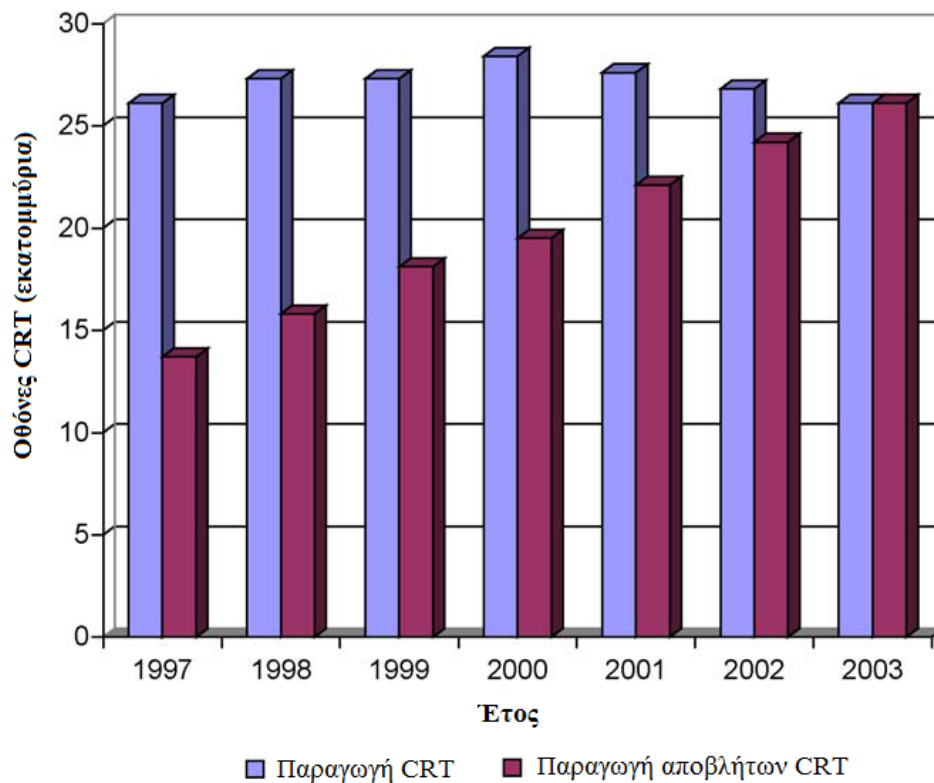
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη της παραγωγής αποβλήτων οθονών CRT, οι οποίες αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά ΑΗΗΕ λόγω της αυξημένης μάζας και τοξικότητάς τους. Συγκεκριμένα, στην έρευνα του E. Jefferies (2006) αναφέρεται ότι η παραγωγή αποβλήτων οθονών CRT (συμπεριλαμβανομένων και των τηλεοράσεων CRT) αντιπροσωπεύουν το 61,5 % της παραγωγής ΑΗΗΕ [48] και, σύμφωνα με την έρευνα των T. Townsend, S. Musson και άλλων (1999), περιέχουν περίπου το 80% των τοξικών μετάλλων των ΑΗΗΕ [49]. Στο **Διάγραμμα 10** παρουσιάζεται η ετήσια παραγωγή οθονών CRT παγκοσμίως για την περίοδο 1994-1998, κατά την οποία οι οθόνες Η/Υ ήταν αποκλειστικά τεχνολογίας CRT. Στο **Διάγραμμα 11** παρουσιάζεται η παραγωγή οθονών CRT καθώς και η παραγωγή αποβλήτων CRT στις ΗΠΑ για την περίοδο 1997-2003 κατά την οποία είχαν κυκλοφορήσει οι οθόνες LCD. Από το **Διάγραμμα 11** διαπιστώνεται ότι μετά το 2000 η παραγωγή αυτού του είδους οθονών αρχίζει να μειώνεται, ενώ παράλληλα σημειώνεται σημαντική αύξηση της παραγωγής αποβλήτων CRT. Αξίζει, λοιπόν, να σημειωθεί ότι μετά την εμφάνιση των οθονών LCD και την επικράτησή τους έναντι των CRT, η παραγωγή των οθονών καθοδικού σωλήνα μειώθηκε ραγδαία με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγής αποβλήτων CRT σε βάθος χρόνου. Ωστόσο, εξαιτίας της τάσης για αντικατάσταση των οθονών παλαιάς τεχνολογίας με οθόνες LCD, κατά τη διάρκεια της περασμένης δεκαετίας, καθώς και στο άμεσο μέλλον, σημειώνεται σημαντική αύξηση

στην παραγωγή αποβλήτων CRT, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλων φορτίων τοξικών ουσιών στα ΑΗΗΕ [13].

Διάγραμμα 10: Ετήσια παραγωγή οθονών CRT παγκοσμίως για τη περίοδο 1994-1998 [50].



Διάγραμμα 11: Παραγωγή οθονών CRT και μετατοπή τους σε απόβλητα στις ΗΠΑ [11].



2.2.5 Διαχείριση αποβλήτων H/Y

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διαχείριση των αποβλήτων H/Y, όπως και όλων των ΑΗΗΕ, χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής λόγω της μεγάλης τους περιεκτικότητας τόσο σε επικίνδυνες όσο και σε πολύτιμες ουσίες. Οι τρόποι διαχείρισής τους ποικίλλουν και μπορεί να είναι είτε βιώσιμοι, με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, είτε ακατάλληλοι, με σημαντικές επιβαρύνσεις για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία. Με σκοπό την ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων και την εύρεση της πιο βιώσιμης λύσης, πολλές επιστημονικές έρευνες έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη των υπάρχοντων τρόπων διαχείρισης των ΑΗΗΕ, αλλά και την ανάπτυξη νέων τεχνικών. Οι επικρατέστερες ροές των αποβλήτων H/Y αναλύονται παρακάτω.

2.2.5.1 Απόρριψη με ΑΣΑ

Η πλειοψηφία των ΑΗΗΕ οδηγείται σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) [51] (Εικόνα 3). Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στις αναπτυσσόμενες χώρες, οι οποίες σπανίως διαθέτουν εγκαταστάσεις ανακύκλωσης τέτοιου είδους αποβλήτων [45]. Σύμφωνα με έρευνες στις οποίες εφαρμόστηκε η δοκιμή Toxicity Characterization Leaching Procedure (TCLP), η οποία έχει αναπτυχθεί για το προσδιορισμό της συγκέντρωσης τοξικών ουσιών σε εκχυλίσματα αποβλήτων, σε μια προσπάθεια προσομοίωσης της παραγωγής στραγγισμάτων σε έναν ΧΥΤΑ, οι συγκεντρώσεις μολύβδου στα εκχυλίσματα δειγμάτων οθονών CRT και πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων H/Y ξεπερνούσαν τα επιτρεπόμενα όρια [52, 53, 54, 55]. Τα αποτελέσματα της δοκιμής TCLP από διάφορες έρευνες αναλύονται στην Ενότητα 4.4. Αυτά τα αποτελέσματα, σε συνδυασμό με την απελευθέρωση και άλλων τοξικών ουσιών, είναι ο λόγος που η υγειονομική ταφή χαρακτηρίζεται ευρέως ως μη κατάλληλη τεχνική διαχείρισης των αποβλήτων H/Y. Ακόμα και σε έναν κατάλληλα σχεδιασμένο ΧΥΤΑ, ο οποίος τηρεί όλες τις προδιαγραφές, μια ποσότητα χημικών και τοξικών μετάλλων θα διαρρεύσει στο έδαφος. Έτσι, είναι προφανές ότι σε ελαττωματικούς και παλαιούς ΧΥΤΑ ο κίνδυνος διαρροών σημαντικών ποσοτήτων τοξικών ουσιών είναι ακόμα περισσότερο αυξημένος. Εκτιμάται ότι περίπου το 70% των τοξικών μετάλλων που εντοπίζονται σε χώρους υγειονομικής ταφής προέρχονται από ΑΗΗΕ και είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν προβλήματα ρύπανσης των υπογείων υδάτων [31]. Ωστόσο, στην έρευνα των E. Williams, R. Kahhat και λοιπών (2008), η ακαταλληλότητα της υγειονομικής ταφής για αυτού του είδους τα απόβλητα τίθεται υπό αμφισβήτηση, διότι αναφέρεται ότι παρά την υπέρβαση των ορίων στα

δείγματα που προκύπτουν κατά τη δοκιμή TCLP, δεν ίσχυσε το ίδιο σε αποτελέσματα έρευνας σε δείγματα στραγγισμάτων από ΧΥΤΑ. Επιπλέον, στην εν λόγω μελέτη υποστηρίζεται ότι τα εκχυλίσματα τοξικών μετάλλων μπορούν να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία ώστε να αποφευχθεί η ρύπανση του περιβάλλοντος [56].

Εικόνα 3: Εναπόθεση αποβλήτων Η/Υ σε χωματερή.



Ένας άλλος τρόπος διαχείρισης των αποβλήτων Η/Υ, τα οποία καταλήγουν στο ίδιο ρεύμα με τα υπόλοιπα ΑΣΑ, είναι η αποτέφρωση. Κατά την αποτέφρωση παράγονται μεγάλες ποσότητες διοξινών και φουρανίων, τα οποία, σε περιπτώσεις καύσης αποβλήτων σε μη κατάλληλα σχεδιασμένους αποτεφρωτήρες, μπορούν να προκαλέσουν ρύπανση της ατμόσφαιρας. Ωστόσο, σε μονάδες αποτέφρωσης ΑΣΑ, οι οποίες είναι εξοπλισμένες με κατάλληλο σύστημα ελέγχου αερίων, είναι δυνατή η καύση χωρίς εκπομπές επικινδύνων ρύπων στην ατμόσφαιρα, κατά την οποία, μάλιστα, μπορεί να επιτευχθεί αποδοτική ανάκτηση ενέργειας [57].

2.2.5.2 Επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση αποβλήτων Η/Υ

«Ανάκτηση» από τα ΑΗΗΕ είναι δυνατή με τους εξής τρόπους: αποσυναρμολόγηση, επαναχρησιμοποίηση τμημάτων, ανακύκλωση υλικών και ανάκτηση ενέργειας (κυρίως από πλαστικά απόβλητα) [45]. Η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση των ΑΗΗΕ θεωρείται ότι έχει μικρότερο οικολογικό αποτύπωμα από αυτό της διάθεσής τους σε ΧΥΤΑ και της αποτέφρωσής τους [51]. Παρόλο που είναι αδύνατη η πλήρης αποφυγή

των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ακόμα και με την εφαρμογή της ανακύκλωσης, αυτές είναι σημαντικά μικρότερες όταν γίνεται χρήση των δευτερογενών πρώτων υλών [40]. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται τα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας με τη χρήση δευτερογενών υλικών αντί πρωτογενών.

Πίνακας 7: Εξοικονόμηση ενέργειας με τη χρήση δευτερογενών υλικών αντί πρωτογενών [58].

Υλικό	Εξοικονόμηση ενέργειας (%)
Αλουμίνιο	95
Χαλκός	85
Σίδηρος και χάλυβας	74
Μόλυβδος	65
Ψευδάργυρος	60
Χαρτί	64
Πλαστικό	>80

Η ανακύκλωση μειώνει τη ρύπανση της ατμόσφαιρας και των υδάτων, καθώς και την παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου. Η κατασκευή του προϊόντος, τα υλικά, η τοποθεσία της εγκατάστασης ανακύκλωσης, οι ισχύοντες κανονισμοί, η γεωγραφική θέση και το πολιτισμικό πλαίσιο είναι στοιχεία που επηρεάζουν τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από την ανάκτηση υλικών. Η διατήρηση των πόρων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των προϊόντων είναι καθοριστικός παράγοντας βιωσιμότητας [45].

Η επαναχρησιμοποίηση των Η/Υ μπορεί να περιλαμβάνει τη μεταπώλησή τους σε αναπτυσσόμενες χώρες, εάν δεν έχουν υποστεί βλάβες που επηρεάζουν τη λειτουργία τους. Έτσι, παρατείνεται ο χρόνος ζωής των Η/Υ, ενώ παράλληλα καλύπτονται ανάγκες σε λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες, στις οποίες οι απαιτήσεις για πιο εξελιγμένες συσκευές είναι μειωμένες συγκριτικά με τον ανεπτυγμένο κόσμο. Εναλλακτικός τρόπος επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων Η/Υ είναι η χρήση ορισμένων λειτουργικών μερών, τα οποία διαχωρίζονται κατά την αποσυναρμολόγηση.

Θέμα μείζονος σημασίας στη διαχείριση των αποβλήτων Η/Υ είναι η ανάκτηση πολύτιμων στοιχείων. Μέσω της ανακύκλωσης εκτιμάται ότι μπορεί να ανακτηθεί περίπου το 95% των χρήσιμων υλικών ενός Η/Υ και το 45% μιας οθόνης CRT [59]. Ένας Η/Υ περιέχει περίπου 0,0016% χρυσό, δηλαδή 1 τόνος αποβλήτων Η/Υ περιέχει περισσότερο χρυσό από 17 τόνους μεταλλεύματος χρυσού [45]. Εκτός από το χρυσό στα απόβλητα Η/Υ περιέχονται και άλλα πολύτιμα υλικά όπως το ασήμι και το

παλλάδιο. Η ανάκτηση αυτών των στοιχείων, λόγω της ύψιστης οικονομικής σημασίας τους, αποτελούν αντικείμενο μεγάλου αριθμού μελετών.

Όπως αναφέρθηκε, η ανακύκλωση υλικών μπορεί να ωφελήσει στην εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της αποφυγής χρήσης πρωτογενών υλικών. Ωστόσο, μπορεί να επιτευχθεί και ανάκτηση ενέργειας χρησιμοποιώντας τα πλαστικά μέρη των ΑΗΗΕ ως καύσιμα. Η ανάκτηση ενέργειας με αυτόν τον τρόπο, όχι μόνο συνεισφέρει στη μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων, αλλά δίνει και τη δυνατότητα βιώσιμης διαχείρισης του πλαστικού από τα e-waste, το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής τους ποσότητας [45].

2.2.5.3 Εξαγωγή αποβλήτων από ανεπτυγμένες χώρες σε αναπτυσσόμενες

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι παραγωγοί Η/Υ σε ανεπτυγμένες χώρες, εξάγουν τα απόβλητά τους σε αναπτυσσόμενες χώρες. Αυτό συμβαίνει διότι η εξαγωγή σε χώρες με χαμηλό κόστος εργασίας είναι περισσότερο συμφέρουσα συγκριτικά με το κόστος της ανακύκλωσης από τους ίδιους τους παραγωγούς. Το φαινόμενο αυτό παρόλο που μπορεί να επιφέρει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη στις χώρες που εξάγουν τα απόβλητά τους, αλλά και να προσφέρει πολλές θέσεις εργασίας στις αναπτυσσόμενες χώρες, έχει και πολλές αρνητικές συνέπειες. Στις λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες οι μέθοδοι που εφαρμόζονται για τη διαχείριση των αποβλήτων είναι ακατάλληλες, καθώς χρησιμοποιούνται τεχνικές οι οποίες θέτουν σε κίνδυνο το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία (**Εικόνα 4**). Αυτές οι τεχνικές ανακύκλωσης, οι λεγόμενες “backyard recycling processes”, περιλαμβάνουν αποτέφρωση πλαστικών για μείωση του όγκου των αποβλήτων, καύση καλωδίων για ανάκτηση χαλκού, έκπλυση πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων με ισχυρά οξέα για την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων και άλλες τεχνικές, οι οποίες πραγματοποιούνται χωρίς κανένα έλεγχο ρύπανσης του εδάφους, των υπογείων υδάτων και της ατμόσφαιρας και με έλλειψη προστασίας των εργατών οι οποίοι εκτίθενται σε μεγάλες ποσότητες τοξικών ουσιών [45, 60].

Δεδομένων των αρνητικών επιπτώσεων από την ακατάλληλη διαχείριση ΑΗΗΕ στις αναπτυσσόμενες χώρες και της ανήθικης επιβάρυνσης των πτωχότερων πληθυσμών το 1989 υπογράφηκε η διεθνής συμφωνία της Βασιλείας για τον έλεγχο των διασυνοριακών μεταφορών τοξικών αποβλήτων (Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal), η οποία αποσκοπούσε στη μείωση των εξαγωγών τοξικών αποβλήτων (όπως τα απόβλητα Η/Υ)

προς οικονομικά ασθενή κράτη και κατ' επέκταση στη μείωση της ποσότητας και τοξικότητας των αποβλήτων στην πηγή. Η συμφωνία αυτή απαγόρευε τις εξαγωγές τοξικών αποβλήτων με σκοπό την εναπόθεσή τους σε χώρες εκτός του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Ο.Ο.Σ.Α.) (Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD)¹, με εξαίρεση τις περιπτώσεις που στις εξαγούσες χώρες δεν υπάρχει η δυνατότητα εναπόθεσης ή όταν η εξαγωγή αποσκοπεί στην ανακύκλωση των αποβλήτων [61, 31, 32]. Ωστόσο, η ενέργεια αυτή δεν απέφερε τα επιθυμητά αποτελέσματα, καθώς το πρόβλημα εξακολούθησε να υφίσταται. Έτσι, το 1998 προτάθηκε μια τροποποίηση της συμφωνίας της Βασιλείας, η Basel Ban Amendment, σύμφωνα με την οποία απαγορεύεται οποιαδήποτε εξαγωγή τοξικών αποβλήτων από μέλη του Ο.Ο.Σ.Α. σε άλλη χώρα. Υπήρξαν, όμως, αντιδράσεις, με αποτέλεσμα κράτη, όπως οι ΗΠΑ, να μην υπογράψουν τη συμφωνία. Ως εκ τούτου, οι εξαγωγές των αποβλήτων δεν έχει εξαιρεθεί πλήρως [31]. Εκτιμάται ότι στις ΗΠΑ περίπου το 80% των e-waste που συλλέγονται προς ανακύκλωση, δεν τυχάνουν επεξεργασίας εγχώρια αλλά εξαγονται σε αναπτυσσόμενες χώρες [59].

Εικόνα 4: Τεχνικές διαχείρισης ΑΗΗΕ σε αναπτυσσόμενες χώρες.



¹ Ο Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Ο.Ο.Σ.Α.) είναι ένας διεθνής οργανισμός εκείνων των αναπτυσσόμενων χωρών που υποστηρίζουν τις αρχές της αντιπροσωπευτικής δημοκρατίας και της οικονομίας της ελεύθερης αγοράς. Σκοπός του οργανισμού είναι η προώθηση πολιτικών με στόχο την οικονομική και κοινωνική ευημερία των ανθρώπων παγκοσμίως. Αριθμεί 34 κράτη μέλη.

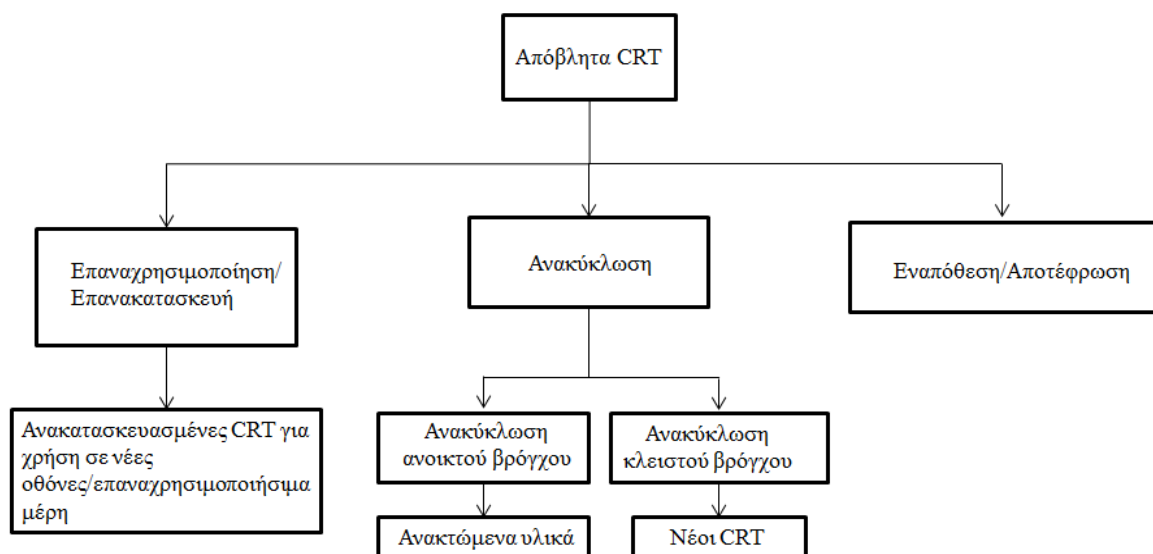
2.2.5.4 Διαχείριση αποβλήτων οθονών CRT

Ένα από τα πιο «επικίνδυνα» συστατικά του ρεύματος των ΑΗΗΕ, η διαχείριση του οποίου αξίζει να αναλυθεί ξεχωριστά, είναι οι οθόνες CRT. Οι παράγοντες που τα καθιστούν ως μια ιδιαίτερη κατηγορία που έχει προκαλέσει την ανησυχία της επιστημονικής κοινότητας ως προς τη διαχείρισή τους, είναι οι εξής [13, 15] :

- *Ποσότητα*: Η αντικατάσταση της τεχνολογίας CRT από νέες έχει προκαλέσει μια ραγδαία βραχυπρόθεσμη αύξηση της παραγωγής αποβλήτων CRT.
- *Τοξικότητα*: Περιέχουν μεγάλη ποικιλία τοξικών ουσιών, με σημαντικότερη το μόλυβδο.
- *Εξαγωγές*: Μεγάλες ποσότητες οθονών μεταφέρονται από ανεπτυγμένες χώρες σε αναπτυσσόμενες.
- *Τεχνολογική ανάπτυξη*: Η εμφάνιση των οθονών τύπου LCD και Plasma (Plasma Display Panel ή PDP) μείωσαν την παραγωγή των CRT και κατ' επέκταση την αξιοποίηση του ανακυκλούμενου γυαλιού CRT.
- *Ανακύκλωση*: Η υποδομή ανακύκλωσης για απόβλητα οθονών CRT είναι ανεπαρκής ακόμα και στις ανεπτυγμένες χώρες. Όπου είναι διαθέσιμη, η διεργασία είναι ιδιαιτέρως δαπανηρή και έχει παραπροϊόντα υψηλής τοξικότητας.
- *Επαναχρησιμοποίηση ανακυκλωμένου υλικού*: Δεν υπάρχουν πολλές επιλογές επαναχρησιμοποίησης για το ανακυκλωμένο υλικό. Το ανακυκλωμένο υλικό, εξαιτίας της μειωμένης ποιότητας, δεν προτιμάται πάντα από τους παραγωγούς CRT, και δύσκολα βρίσκονται εναλλακτικοί τρόποι αξιοποίησης λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε μόλυβδο.

Στο **Διάγραμμα 12** παρουσιάζονται σχηματικά οι εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισης των οθονών CRT.

Διάγραμμα 12: Εναλλακτικοί τρόποι διαχείρισης οθονών CRT [13].



Ένα μεγάλο μέρος των οθονών CRT οδηγείται σε ΧΥΤΑ. Εκτιμάται ότι το 2000 στις ΗΠΑ, 300.000 τόνοι e-waste κατέληξαν σε χώρους υγειονομικής ταφής, από τους οποίους το 1/3 αποτελείτο από οθόνες CRT. Για αυτόν τον λόγο και λαμβάνοντας υπ' όψιν την τοξικότητά τους, η νομοθεσία της ΕΕ αλλά και άλλων κρατών στοχεύουν τα τελευταία χρόνια την αποφυγή της εναπόθεσης τέτοιου είδους αποβλήτων σε χωματερές. Μάλιστα, σε ορισμένες πολιτείες των ΗΠΑ, όπως η Μασαχουσέτη, το Μέιν, η Καλιφόρνια, η Φλόριντα και η Μινεσότα, ισχύει απαγόρευση της εναπόθεσης CRT σε ΧΥΤΑ και της αποτέφρωσής τους. Ωστόσο, η στάση αυτή της πολιτείας, εκτός από τις θετικές επιπτώσεις, εξαιτίας του υψηλού κόστους εναλλακτικής διαχείρισης των CRT, οδήγησε στη συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων οθονών στις ανεπτυγμένες χώρες, οι οποίες εξάγονται παρανόμως σε αναπτυσσόμενες χώρες. Έτσι, αντί να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ρύπανσης και της απειλής της δημόσιας υγείας, αυτό απλά μεταφέρεται σε διαφορετικό έδαφος [13].

Όπως στα περισσότερα είδη ΑΗΗΕ, έτσι και στις οθόνες CRT μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος της επαναχρησιμοποίησης. Ολόκληρες οι συσκευές μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν έπειτα από καθαρισμό και αναβάθμιση λογισμικού. Εφικτή είναι και η αλλαγή πλαστικού περιβλήματος για τη βελτίωση ως προς τον τομέα της αισθητικής, καθώς και η αντικατάσταση άλλων τμημάτων τα οποία είναι ελαττωματικά. Για να είναι επιτυχής η επαναχρησιμοποίηση μιας συσκευής, είναι σημαντικό να

αναγράφονται όλα τα στοιχεία κατασκευής της, ώστε να είναι διαθέσιμες όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την αξιοποίηση ολόκληρης της οθόνης ή μερών της [13].

Όσον αφορά την ανακύκλωση των οθονών σωλήνα καθοδικών ακτίνων, οι δύο διαθέσιμες τεχνολογίες είναι η “glass-to-glass recycling” (γυαλί σε γυαλί) και η “glass-to-lead recycling” (γυαλί σε μόλυβδο). Προτιμότερη τεχνική θεωρείται αυτή από την οποία παράγεται νέο γυαλί CRT (glass-to-glass recycling) [11].

Μέθοδος glass-to-glass

Στη μέθοδο glass-to-glass recycling, η οποία θεωρείται διεργασία κλειστού βρόγχου, το ανακτημένο γυαλί χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την κατασκευή νέων οθονών. Τα βήματα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι [13, 15]:

Βήμα 1: Απομάκρυνση CRT από την οθόνη.

Βήμα 2: Απομάκρυνση όλων των μη γυάλινων υλικών από το εξωτερικό των CRT.

Βήμα 3: Κατάργηση του κενού αέρος στο CRT.

Βήμα 4: Θραύση CRT και διαχωρισμός υπολειπόμενων μετάλλων από το γυαλί.

Βήμα 5: Απομάκρυνση στρώσεων φωσφόρου και επεξεργασία υαλοθραυσμάτων.

Βήμα 6: Διαχωρισμός του μολυβδούχου από το μη μολυβδούχο γυαλί.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι τα εξής [11, 13]:

- ✓ Μειώνει τις ποσότητες μολύβδου που διατίθενται στους ΧΥΤΑ και παράγονται κατά τη αποτέφρωση.
- ✓ Το ανακυκλωμένο υλικό αντικαθιστά την πρώτη ύλη με το ίδιο ή χαμηλότερο κόστος.
- ✓ Μειώνει τις ανάγκες για νέο μόλυβδο στην παραγωγή CRT.
- ✓ Μειώνει την κατανάλωση ενέργειας των παραγωγών CRT.
- ✓ Ελαττώνει την παραγωγή ανεπιθύμητων ρύπων κατά την παραγωγή γυαλιού.

Μέθοδος glass-to-lead

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί το γυαλί που προέρχεται από τις οθόνες σε υλικά ή διαδικασίες εκτός της παραγωγής CRT. Αρχικά οι CRT τεμαχίζονται και στη συνέχεια διαχωρίζονται τα μεταλλικά και τα πλαστικά υλικά. Έπειτα, αφού διαχωριστούν ο μόλυβδος και ο χαλκός, ανακτώνται από το γυαλί μέσω μιας διαδικασίας τήξεως. Η

διαδικασία αυτή είναι πιο οικονομική από τη μέθοδο glass-to-glass και εξασφαλίζει ασφαλείς συνθήκες εργασίας. Ωστόσο, το προϊόν που προκύπτει είναι δεν είναι υψηλής ποιότητας [11, 13].

2.2.5.5 Αντιμετώπιση του προβλήματος διαχείρισης αποβλήτων Η/Υ

Δεδομένου του προβλήματος της διαχείρισης των ΑΗΗΕ, τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεών τους στο περιβάλλον, μέσω της βιώσιμης διαχείρισής τους και της αντιμετώπισης του προβλήματος στην πηγή. Η ΕΕ με τις Οδηγίες 2002/95/EK, 2002/96/EK και τις μεταγενέστερες τροποποιήσεις τους (2005/618/EK, 2011/65/ΕΕ, 2012/19/ΕΕ), βασιζόμενη σε τρεις άξονες, δηλαδή την πρόληψη, την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση, στοχεύει στη μείωση των ποσοτήτων των ΑΗΗΕ. Επιπλέον, επιδιώκεται η αποφυγή απόρριψης των e-waste σε χώρους ταφής, ενώ ενθαρρύνεται η αποδοτικότερη αξιοποίηση των πόρων μέσω της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης. Ακόμη, τίθενται μέτρα για τη συλλογή, διαχείριση, ανάκτηση και ανακύκλωση όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών προϊόντων και γίνεται ευρεία αναφορά στην Εκτεταμένη Ευθύνη του Παραγωγού (Extended Producer Responsibility, EPR). Τα κύρια σημεία της EPR είναι [1, 5]:

- Η μελέτη και η παραγωγή του ηλεκτρονικού εξοπλισμού πρέπει να διευκολύνει την αποσυναρμολόγηση και την ανάκτηση για μεταγενέστερη επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση των ηλεκτρονικών αποβλήτων.
- Τα ηλεκτρονικά απόβλητα πρέπει να συλλέγονται χωριστά από άλλες μορφές αποβλήτων.
- Οι παραγωγοί είναι υπεύθυνοι για τη χρηματοδότηση της συλλογής και βιώσιμης διαχείρισης των e-waste.
- Η επίτευξη συγκεκριμένων ποσοστών ανάκτησης και ανακύκλωσης για κάθε κατηγορία ΑΗΗΕ. Για τα απόβλητα Η/Υ οι στόχοι που έχουν τεθεί από την Οδηγία 2012/19/ΕΕ παρουσιάζονται στον **Πίνακα 8**. Η επίτευξη των στόχων αυτών υπολογίζεται διαιρώντας το βάρος των αποβλήτων Η/Υ που εισέρχονται στην εγκατάσταση ανάκτησης ή ανακύκλωσης/προετοιμασίας για επαναχρησιμοποίηση δια του βάρους όλων των χωριστά συλλεγόμενων αποβλήτων, εκφραζόμενη ως ποσοστό [5].

Πίνακας 8: Στόχοι ανάκτησης και ανακύκλωσης για απόβλητα Η/Υ σύμφωνα με την Οδηγία 2012/19/ΕΕ [5].

<i>Περίοδος</i>	<i>Ποσοστό ανάκτησης</i>	<i>Ποσοστό ανακύκλωσης</i>
13 Αυγούστου 2012 έως 14 Αυγούστου 2015	75%	65%
15 Αυγούστου 2015 έως 14 Αυγούστου 2018	80%	70% ²

Οι Οδηγίες που αναφέρθηκαν έχουν ήδη βοηθήσει στην οργάνωση ενός βιώσιμου συστήματος διαχείρισης των ΑΗΗΕ, και σε παρόμοια λογική θα πρέπει να πορευτεί τόσο η Ευρωπαϊκή Ένωση όσο και τα κράτη ξεχωριστά, ώστε να σημειωθεί περαιτέρω βελτίωση. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν νομοθετικές κινήσεις όσον αφορά το πρόβλημα της μεταφοράς ΑΗΗΕ στις αναπτυσσόμενες χώρες. Πρέπει να γίνεται αποτελεσματικός έλεγχος για τη νομιμότητα των εξαγωγών ώστε να προστατεύεται το περιβάλλον και η δημόσια υγεία των οικονομικά ασθενέστερων χωρών.

Από τη πλευρά των παραγωγών Η/Υ, και ΑΗΗΕ γενικότερα, είναι σημαντικό να υπάρξει εφαρμογή των απαιτήσεων της EPR. Οι επιχειρήσεις πρέπει να συνειδητοποιήσουν ότι, παρά το υψηλό κόστος της ανακύκλωσης συγκριτικά με την εναπόθεση σε χώρους ταφής, τα περιβαλλοντικά οφέλη σε συνδυασμό με την αξιοποίηση των αποβλήτων ως πρώτης ύλης, είναι πιο σημαντικά [62]. Με σκοπό τη διευκόλυνση της ανακύκλωσης των αποβλήτων, είναι ιδιαίτερα σημαντική η εδραίωση συστημάτων επιστροφής των ΑΗΗΕ στους παραγωγούς (take-back collection systems), καθώς και μιας αγοράς ανακτημένων συσκευών ή εξαρτημάτων, διότι η σταθερή ζήτηση για ανακυκλωμένα υλικά είναι προϋπόθεση για την επιτυχημένη λειτουργία ενός συστήματος ανακύκλωσης [11, 45]. Υποχρέωση των παραγωγών ΑΗΗΕ, αλλά και της πολιτείας, είναι επίσης η ενημέρωση των πολιτών-καταναλωτών σχετικά με την ανακύκλωση των ΑΗΗΕ και τα οφέλη της, καθώς η ευαισθητοποίησή τους είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη υψηλών ποσοστών αξιοποίησης των αποβλήτων.

Όσον αφορά το ρόλο της επιστημονικής κοινότητας στην αντιμετώπιση του προβλήματος των ΑΗΗΕ, είναι εξαιρετικής σημασίας η διεξαγωγή περαιτέρω ερευνών σχετικά με την επικινδυνότητα των αποβλήτων και τις μεθόδους επεξεργασίας τους.

² Ποσοστό προετοιμασίας για επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση.

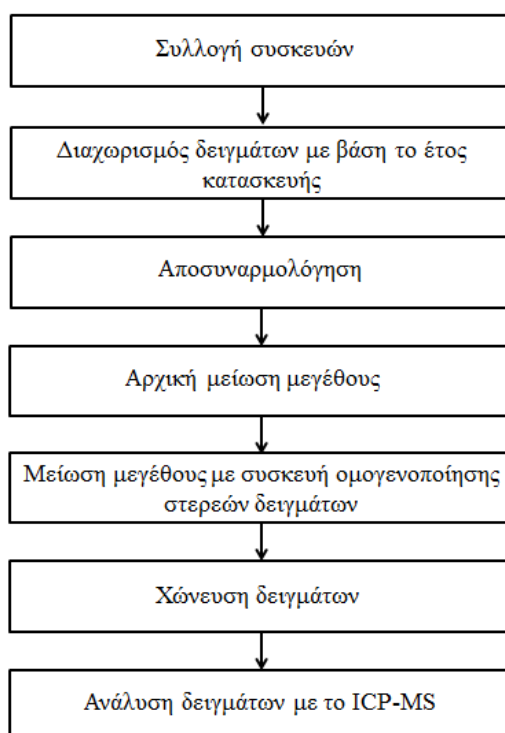
Κατάλληλες μελέτες μπορούν να εφεύρουν νέες τεχνικές ανακύκλωσης ή να βελτιστοποιήσουν τις ήδη υπάρχουσες, ώστε να αυξηθούν οι αποδόσεις ανάκτησης και να μειωθεί το κόστος των διεργασιών. Τέλος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ορισμένες εξελίξεις της τεχνολογίας στο παρελθόν είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση ορισμένων ρύπων στα ΑΗΗΕ. Ενδεικτικά αναφέρονται η μείωση του Pb με την αλλαγή των οθονών CRT με οθόνες LCD, η εξάλειψη του Cu με την εισαγωγή οπτικών ινών και η μείωση των Ni και Cd με την εμφάνιση των επαναφορτιζόμενων μπαταριών [51]. Μπορεί, λοιπόν, η έρευνα με στόχο την εφεύρεση νέων τεχνολογιών πιο «φιλικών» προς το περιβάλλον να αποβεί καθοριστική για τη μείωση των ολικών φορτίων ορισμένων τοξικών ουσιών στα ΑΗΗΕ.

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Στόχοι της εργασίας

Όπως αναπτύχθηκε παραπάνω, τα απόβλητα ηλεκτρονικών υπολογιστών περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό επικίνδυνων ουσιών, στις οποίες περιλαμβάνονται τα τοξικά μέταλλα, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα σε περίπτωση ακατάλληλης διαχείρισης των αποβλήτων. Επομένως, η μελέτη και ποσοτικοποίηση των μετάλλων αυτών κρίνεται απαραίτητη για την ανάπτυξη κατάλληλων τεχνικών διαχείρισης των αποβλήτων Η/Υ. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός του περιεχομένου ορισμένων μερών Η/Υ σε σημαντικά τοξικά μέταλλα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οθόνες και μητρικές πλακέτες ως προς τη συγκέντρωση τους στα Al, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sn, Hg, Pb, μέσω φασματομετρίας μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS). Επιπλέον, μέσω της χρήσης συσκευών με ημερομηνία παραγωγής τόσο πριν όσο και μετά το 2006, τη χρονιά μετά από την οποία τέθηκε σε ισχύ η οδηγία RoHS, έγινε σύγκριση των συγκεντρώσεων μεταξύ των συσκευών των δύο περιόδων ώστε να διαπιστωθεί εάν οι παραγωγοί Η/Υ συμμορφώθηκαν με τη νομοθεσία. Το διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 13**.

Διάγραμμα 13: Διάγραμμα ροής της πειραματικής διαδικασίας.



3.2 Δειγματοληψία

Ορισμένες από τις συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία συλλέχθηκαν από το Εργαστήριο Μικροεπεξεργαστών και Υλικού του Πολυτεχνείου Κρήτης, το οποίο αναλαμβάνει τη διαχείριση των ΑΗΗΕ του Ιδρύματος. Άλλες συσκευές εξασφαλίστηκαν από το Τμήμα Πληροφορικής και Νέων Τεχνολογιών του Δήμου Χανίων, ενώ οι υπόλοιπες συλλέχθηκαν από καταστήματα πώλησης και επισκευής ηλεκτρονικών ειδών στα Χανιά και την Αθήνα. Να σημειωθεί ότι όλα τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν είχαν χαρακτηριστεί ως ΑΗΗΕ, δηλαδή είτε είχαν υποστεί βλάβες, είτε δεν προορίζονταν για περαιτέρω χρήση.

3.3 Προσδιορισμός των δειγμάτων

Τα μέρη Η/Υ που έγιναν αντικείμενο της ανάλυσης είναι το εξωτερικό γυαλί οθονών, η γυάλινη χοάνη (για τις οθόνες CRT), το πλαστικό περίβλημα οθονών και η μητρική πλακέτα. Για να είναι εφικτή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη συμμόρφωση ή μη των παραγωγών με την οδηγία RoHS, χρησιμοποιήθηκαν οθόνες και μητρικές πλακέτες με ημερομηνία παραγωγής τόσο πριν όσο και μετά το 2006. Συγκεκριμένα, για τη μελέτη οθονών χρησιμοποιήθηκαν δύο οθόνες CRT, μια HITACHI και μια SONY, με ημερομηνίες παραγωγής το 2002 και το 2000 αντίστοιχα, τρεις οθόνες LCD, δύο LG και μια SAMSUNG, με ημερομηνίες παραγωγής το 2007, 2008 και το 2006 αντίστοιχα και μια LG οθόνη αφής, η οποία κυκλοφόρησε στην αγορά το 2008. Να σημειωθεί ότι η οθόνη αφής εξετάστηκε ξεχωριστά από τις συμβατικές οθόνες LCD, ώστε να διαπιστωθούν τυχόν διαφορές στη σύστασή τους. Για τη μελέτη των μητρικών πλακετών χρησιμοποιήθηκαν τρεις μητρικές πλακέτες με ημερομηνία κυκλοφορίας πριν από το 2006 (ECS, GIGABYTE, ASUS) και τρεις με ημερομηνία κυκλοφορίας μετά το 2006 (δύο GIGABYTE και μια ASROCK). Τα μοντέλα των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον **Πίνακα 9**.

Πίνακας 9: Βασικά στοιχεία των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα.

A/A	Είδος	Εταιρεία	Μοντέλο	Έτος Παραγωγής
1	Οθόνη CRT	SONY	TRINITRON CPD-G200	2000
2	Οθόνη CRT	HITACHI	CM621F	2002
3	Οθόνη LCD	SAMSUNG	SyncMaster 940N	2006
4	Οθόνη LCD	LG	FLATRON L1718S-SN	2007
5	Οθόνη LCD	LG	FLATRON W1934S-SN	2008
6	Οθόνη LCD αφής	LG	FLATRON L1730SF	2008
7	Μητρική Πλακέτα	GIGABYTE	GA-72XR	2001
8	Μητρική Πλακέτα	ASUS	A7V266-E REV: 1.07	2001
9	Μητρική Πλακέτα	ECS	P6BAT-A+ REV: 2.0	2003
10	Μητρική Πλακέτα	ASROCK	4coredual-VSTA	2007
11	Μητρική Πλακέτα	GIGABYTE	GA-G31M-ES2L	2008
12	Μητρική Πλακέτα	GIGABYTE	GA-EP45-DS3R	2008
13	Μητρική Πλακέτα	GIGABYTE	GA-EX58-UD3R	2008

Προέκυψαν τα εξής 24 δείγματα: Ομογενοποιημένα πλαστικά περιβλήματα πριν το 2006, HITACHI πλαστικό περίβλημα πριν το 2006, SONY πλαστικό περίβλημα πριν το 2006, ομογενοποιημένα πλαστικά περιβλήματα μετά το 2006, LG πλαστικό περίβλημα μετά το 2006, SAMSUNG πλαστικό περίβλημα μετά το 2006, LG οθόνη αφής πλαστικό περίβλημα μετά το 2006, ομογενοποιημένο εξωτερικό γυαλί πριν το 2006, HITACHI εξωτερικό γυαλί πριν το 2006, SONY εξωτερικό γυαλί πριν το 2006, ομογενοποιημένες γυάλινες χοάνες πριν το 2006, HITACHI γυάλινη χοάνη πριν το 2006, γυάλινη χοάνη πριν το 2006, ομογενοποιημένο εξωτερικό γυαλί μετά το 2006, LG εξωτερικό γυαλί μετά το 2006, SAMSUNG εξωτερικό γυαλί μετά το 2006, LG οθόνη αφής εξωτερικό γυαλί μετά το 2006, ομογενοποιημένες μητρικές πλακέτες πριν το 2006, GIGABYTE μητρική πλακέτα πριν το 2006, ECS μητρική πλακέτα πριν το 2006, ASUS μητρική πλακέτα πριν το 2006, ομογενοποιημένες μητρικές πλακέτες μετά το 2006, GIGABYTE μητρικές πλακέτες μετά το 2006, ASROCK μητρική πλακέτα μετά το 2006.

3.4 Προετοιμασία των δειγμάτων

3.4.1 Αποσυναρμολόγηση των συσκευών και μείωση μεγέθους

Όσον αφορά τις οθόνες H/Y, αρχικά, αφαιρέθηκε το πλαστικό περίβλημα με τη χρήση κατσαβιδιού από ανοξείδωτο χάλυβα. Στη συνέχεια αφαιρέθηκαν τα καλώδια, οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων και οποιοδήποτε άλλο εξάρτημα δεν αφορούσε τη παρούσα εργασία, με τη χρήση κατσαβιδιού και πένσας, ώστε να απομείνουν μόνο τα γυάλινα μέρη των οθονών. Έτσι, χρησιμοποιώντας σφυρί και πένσα συλλέχθηκαν

δείγματα μεγέθους περίπου 2 cm x 2 cm από το εξωτερικό γυαλί από όλες τις οθόνες και από τη γυάλινη χοάνη από τις οθόνες CRT. Παρομοίως, με τη χρήση πένσας ξεχωρίστηκαν δείγματα ιδίου μεγέθους από τα πλαστικά περιβλήματα.

Οι περισσότερες από τις μητρικές πλακέτες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν απομονωμένες. Ωστόσο, ορισμένες περιέχονταν στην κύρια μονάδα του Η/Υ (κουτί ή πύργος), οι οποίες και διαχωρίστηκαν με τη χρήση κατσαβιδιού από ανοξείδωτο χάλυβα. Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας πένσα συλλέχθηκαν δείγματα μεγέθους 2 cm x 2 cm από την κάθε πλακέτα.

Έτσι προέκυψαν όλα τα δείγματα μεγέθους 2 cm x 2 cm. Εικόνες από τα δείγματα στα στάδια που περιγράφηκαν παραπάνω παρουσιάζονται στην **Εικόνα 5** (α) και (β). Ωστόσο, ακολούθησε περαιτέρω μείωση του μεγέθους, με τη βοήθεια πένσας και ψαλιδιού, ώστε η συσκευή ομογενοποίησης στερεών δειγμάτων να μπορεί να επεξεργαστεί τα δείγματα. Πιο συγκεκριμένα, το μέγεθος των δειγμάτων μειώθηκε σε μικρότερο από 0,5 cm x 0,5 cm.

3.4.2 Μείωση μεγέθους με συσκευή ομογενοποίησης στερεών δειγμάτων

Τα δείγματα που προετοιμάστηκαν με την αναφερθείσα διαδικασία κονιορτοποιήθηκαν με τη χρήση συσκευής ομογενοποίησης στερεών δειγμάτων (Pulverisette 19, Fritsch), η οποία ήταν συνδεδεμένη με κυκλώνα (Nabertherm). (**Εικόνα 6**). Στη συσκευή ομογενοποίησης είχε τοποθετηθεί σχάρα με ανοίγματα 0,5 mm. Το κάθε δείγμα εισήχθη ξεχωριστά στη συσκευή. Προκειμένου να αποφευχθεί η μόλυνση των δειγμάτων μεταξύ τους, τα διάφορα αποσπώμενα εξαρτήματα πλένονταν με σαπουνόνερο και απιονισμένο νερό μετά την επεξεργασία κάθε δείγματος. Επιπλέον, πριν την κονιορτοποίηση κάθε δείγματος ετίθετο η συσκευή σε λειτουργία για λίγα δευτερόλεπτα χωρίς δείγμα, ώστε να καθαριστεί το εσωτερικό του. Στη συνέχεια εισαγόταν ένα μικρό μέρος του δείγματος, ώστε να «καθαρίσει» τη συσκευή από υπολείμματα του προηγούμενου δείγματος, χωρίς να συλλεχθεί το προϊόν της κονιορτοποίησης. Τα δείγματα μετά τη κοπή τους είχαν τη μορφή που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 5** (γ).

Εικόνα 5: Πλαστικό περίβλημα, εξωτερικό γυαλί οθόνης CRT, γυάλινη χοάνη οθόνης CRT, γυαλί οθόνης LCD και μητρική πλακέτα: (α) ως ξεχωριστό εξάρτημα, (β) μετά τη μείωση μεγέθους, (γ) μετά την ομογενοποίηση.



Πλαστικό περίβλημα



Εξωτερικό γυαλί οθόνης CRT



Γυάλινη χοάνη οθόνης CRT



Εξωτερικό γυαλί οθόνης LCD



Μητρική πλακέτα

(α)

(β)

(γ)

Εικόνα 6: Συσκευή ομογενοποίησης Pulverisette 19, Fritsch και κυκλώνας Nabertherm.



3.4.3 Χώνευση δειγμάτων

Το επόμενο βήμα του πειράματος ήταν η χώνευση των δειγμάτων με ισχυρά οξέα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε σε φούρνο μικροκυμάτων τύπου MARS 6 Microwave Reaction System της εταιρείας CEM Corporation (**Εικόνα 7**). Η συσκευή αυτή χρησιμοποιεί την τεχνολογία PowerMAX, η οποία βοηθάει στον αυτόματο έλεγχο της ισχύος, ώστε να επιτευχθεί πλήρης χώνευση, ανεξάρτητα από τον αριθμό των δειγμάτων και το μέγεθός τους, αλλά και να αποφευχθούν οι εξώθερμες αντιδράσεις. Επιπλέον, ο φούρνος μικροκυμάτων MARS 6 χρησιμοποιώντας το δείγμα με την μεγαλύτερη αντιδραστικότητα ως δείγμα αναφοράς, ελέγχει τη θερμοκρασία χώνευσης για την αύξηση της αποτελεσματικότητας της διεργασίας και την αποφυγή δυσλειτουργιών.

Εικόνα 7: Φούρνος μικροκυμάτων τύπου MARS 6 Microwave Reaction System της εταιρείας CEM Corporation.



Τα δείγματα χωνεύθηκαν με διαφορετική μέθοδο ανάλογα με τη φύση τους. Συγκεκριμένα, 0,1 g από κάθε δείγμα πλαστικού χωνεύτηκε σε 10 ml HNO_3 επί 15 λεπτά στους 210 °C, 0,1 g από κάθε δείγμα γυαλιού χωνεύτηκε σε 10 ml μίγματος 1:5 HNO_3 : HCl επί 10 λεπτά στους 180 °C, και 0,1 g από κάθε δείγμα πλακέτας τυπωμένων κυκλωμάτων χωνεύτηκε σε 10 ml μίγματος βασιλικού ύδατος (aqua regia, 1:3 HNO_3 : HCl) επί 30 λεπτά στους 180 °C. Στον **Πίνακα 10** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι παραπάνω πληροφορίες. Ο φούρνος μπορεί να δεχτεί μέχρι δώδεκα δείγματα ταυτόχρονα, οπότε δείγματα του ίδιου είδους χωνεύτηκαν μαζί. Μετά τη χώνευση, ακολούθησε διήθηση του κάθε δείγματος με φίλτρα Whatman 0,45 μm ώστε να απομακρυνθούν τα στερεά υπολείμματα που είχαν παραμείνει. Εν συνεχεία, τα δείγματα εισήχθησαν σε ειδικά δοχεία (vials) τύπου Orange, στα οποία συμπληρώθηκε απιονισμένο νερό ώστε το δείγμα να αραιωθεί μέχρι τα 45 ml (μέγιστος όγκος χωρητικότητας των vials).

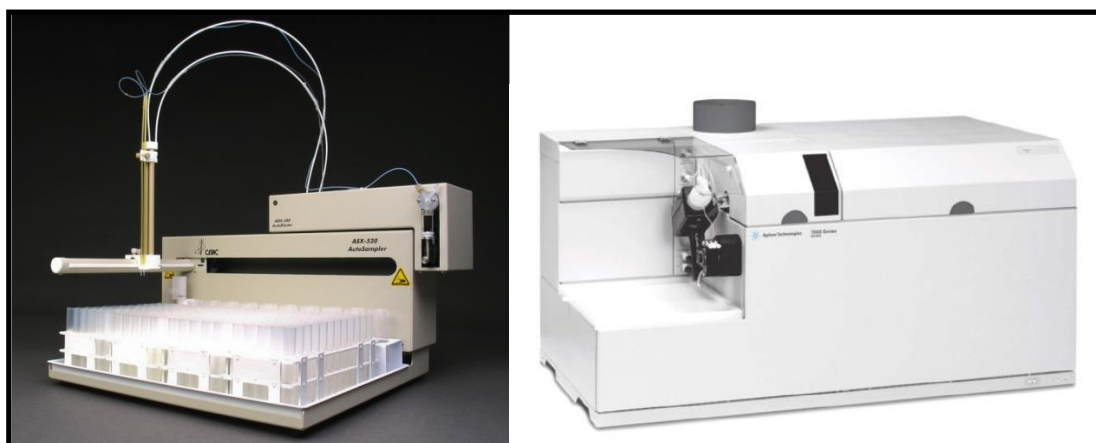
Πίνακας 10: Προγράμματα χώνευσης των δειγμάτων από απόβλητα H/Y.

Είδος δείγματος	Ποσότητα δείγματος	Οξύ	Χρόνος χώνευσης	Θερμοκρασία
Πλαστικό	0,1 g	10 ml HNO ₃	15 min	210 °C
Γυαλί	0,1 g	10 ml μίγματος 1:5 HNO ₃ :HCl	30 min	180 °C
Πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων	0,1 g	10 ml μίγματος 1:3 HNO ₃ :HCl	30 min	180 °C

3.5 Ανάλυση δειγμάτων με το ICP-MS

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των τοξικών μετάλλων έγινε με τη μέθοδο της φασματομετρίας μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (Inductively coupled plasma mass spectrometry ICP-MS) με τη χρήση ICP-MS 7500cx και Autosampler ASX-500 της εταιρείας Agilent Technologies (**Εικόνα 8**).

Εικόνα 8: (α) Autosampler ASX-500, (β) ICP-MS 7500cx, Agilent Technologies.



(α)

(β)

Η μέθοδος ICP-MS είναι πολύ αποτελεσματική χάρη στα πολύ χαμηλά όρια ανίχνευσης, στα αξιοσημείωτης απλότητας φάσματα, και στη δυνατότητα ταχείας πολυστοιχειακής ανάλυσης και μέτρησης ατομικών ισοτοπικών λόγων [63]. Κατά την ανάλυση των μετάλλων με το ICP-MS αξιοποιήθηκε η δυνατότητα του οργάνου να λειτουργεί σε collision (He) mode, με στόχο την παραγωγή ακόμα πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων λόγω του περιορισμού των ισοβαρών παρεμποδίσεων.

Οι συνθήκες λειτουργίας του οργάνου δίνονται στον **Πίνακα 11**.

Πίνακας 11: Συνθήκες λειτουργίας ICP-MS.

RF power (W)	1500
Plasma gas flow (L/min)	0,82
Auxiliary gas flow (L/min)	0,26
Sampling/Skimmer cone	Ni
Nebulizer type	MicroMist
S/C temperature	2° C
Replicates	3
Collision gas	He
Collision gas flow (mL/min)	4,5
Reaction gas	H ₂
Reaction gas flow (mL/min)	3,5
Solution uptake (uL/min)	160
Integration time (sec per mass)	0,30

Η έκφραση των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση εξωτερικής καμπύλης βαθμονόμησης (5 τουλάχιστον επίπεδα συγκέντρωσης, με συντελεστή συσχέτισης (r) της τάξης του 0,99) χρησιμοποιώντας πρότυπες ενώσεις κατάλληλης καθαρότητας (Merck). Τα όρια ανίχνευσης προέκυψαν από τις καμπύλες βαθμονόμησης με κατάλληλους μαθηματικούς υπολογισμούς (Chemstation Software by Agilent). Ο έλεγχος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον μεγάλο αριθμό δειγμάτων αλλά και το κόστος της ανάλυσης, βασίστηκε:

- ✓ στον έλεγχο της καμπύλης βαθμονόμησης σε ένα τουλάχιστον επίπεδο συγκέντρωσης (με πρότυπες ενώσεις αναφοράς (Merck),
- ✓ στην ανάλυση spiked δειγμάτων και
- ✓ στην ανάλυση διπλών δειγμάτων σε ποσοστό 10% των συνολικών, για κάθε ημέρα ανάλυσης.

Τα αποτελέσματα κρίνονταν ικανοποιητικά όταν η σχετική τυπική απόκλιση (RSD%) ήταν μικρότερη του 10%. Σε διαφορετική περίπτωση, γινόταν επανέλεγχος των κρίσιμων σημείων της ανάλυσης (προετοιμασία δείγματος, ανάλυση προτύπων και δειγμάτων), τυχόν διορθωτικές κινήσεις και εκ νέου ανάλυση της «προβληματικής» ομάδας δειγμάτων.

Τα κύρια τμήματα ενός οργάνου ICP-MS είναι [64]:

- **Το σύστημα εισαγωγής του δείγματος:** Το υγρό δείγμα εισάγεται με τη βοήθεια περισταλτικής αντλίας στον εκνεφωτή με σταθερή ροή, όπου μετατρέπεται σε αερόλυμα με πολύ μικρές σταγόνες (aerosol).

- **Το σύστημα ατομοποίησης του ICP:** Εξ' ορισμού το πλάσμα είναι ένα αέριο (αργό, Ar) σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, τα άτομα ή μόρια του οποίου είναι ιονισμένα. Με την εφαρμογή ραδιοσυχνότητας το αέριο αργό (Ar) θερμαίνεται επαγωγικά σε υψηλή θερμοκρασία (6000-10000 K). Επιπλέον, το αέριο εμπλουτίζεται με ηλεκτρόνια, με τη βοήθεια ενός σπινθήρα. Τα ηλεκτρόνια επιταχυνόμενα ιονίζουν τα άτομα του αργού, που με τη σειρά τους συγκρούονται και ιονίζουν άλλα άτομα αργού (συντηρώντας έτσι το πλάσμα). Τέλος, οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή του πλάσματος και αφορούν στο δείγμα είναι:
 - ✓ Απομάκρυνση του διαλύτη από το δείγμα
 - ✓ Διάσπαση των συστατικών του δείγματος
 - ✓ Ατομοποίηση των στοιχείων
 - ✓ Διέγερση και ιοντισμός (λόγω της σύγκρουσης με τα ιόντα του αργού)
- **Το σύστημα εισαγωγής των ιόντων:** Τα ιόντα που δημιουργούνται στην περιοχή του πλάσματος, οδηγούνται στον αναλυτή μάζας, ως δέσμη ιόντων μέσω δυο κώνων με πολύ μικρή οπή, με τη βοήθεια ηλεκτρικών πεδίων που λειτουργούν ως φακοί ιόντων (ion lenses) στην είσοδο του αναλυτή μάζας.
- **Ο αναλυτής μάζας:** Ο αναλυτής μάζας διαχωρίζει και ταξινομεί τα ιόντα με βάση το λόγο μάζας προς φορτίο m/z , και έτσι προκύπτει τελικά ένα φάσμα μάζας που ουσιαστικά είναι η καταγραφή του πλήθους των ιόντων που αντιστοιχούν σε κάθε τιμή m/z .
- **Ο ανιχνευτής ιόντων:** Πρόκειται για ένα πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων που ανιχνεύει εντάσεις ρεύματος μικρότερες από 10^{-15} A. Το σήμα αυτό με μια σειρά από διαδικασίες πολλαπλασιάζεται ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή του.
- **Το σύστημα καταγραφής και η έξοδος των αποτελεσμάτων σε H/Y**

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Αποτελέσματα ICP-MS

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η μέθοδος της φασματομετρίας μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS) χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των τοξικών μετάλλων για τα οποία η οδηγία RoHS επιβάλλει συγκεκριμένα όρια, δηλαδή τα Cd, Cr, Hg, Pb, καθώς και των Al, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Sn, των οποίων η τοξικολογική σημασία είναι αυξημένη.

4.1.1 Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα πλαστικού περιβλήματος

Στον **Πίνακα 12** παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις, με τις αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις, των τοξικών μετάλλων στα δείγματα πλαστικού περιβλήματος, όπως προσδιορίστηκαν με το ICP-MS.

Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 12**, οι συγκεντρώσεις για το Cd και τον Hg, καθώς και για το Fe και το Ni στα δείγματα με έτος κατασκευής μετά το 2006, ήταν κάτω από το όριο ανίχνευσης. Οι τιμές για το Ni, το Cu, το Zn, το As και το Sn είναι γενικώς χαμηλές με διακύμανση από 0,38 mg/kg (As στο πλαστικό περίβλημα SAMSUNG μετά το 2006) έως 90,32 mg/kg (Ni στο ομογενοποιημένο πλαστικό περίβλημα πριν το 2006). Αντίθετα, υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν για το αργίλιο σε όλα τα δείγματα, εκτός από το εξωτερικό γυαλί της LG οθόνης αφής, με τις τιμές να ποικίλλουν από 124,25 mg/kg, στην οθόνη SONY έως 1041,67 mg/kg, στο ομογενοποιημένο πλαστικό περίβλημα πριν από το 2006, καθώς και για το σίδηρο σε όλα τα δείγματα με έτος κατασκευής πριν από το 2006, με διακύμανση από 233,79 mg/kg, στο πλαστικό περίβλημα της SONY, έως 2877,68 mg/kg στο ομογενοποιημένο πλαστικό περίβλημα πριν από το 2006.

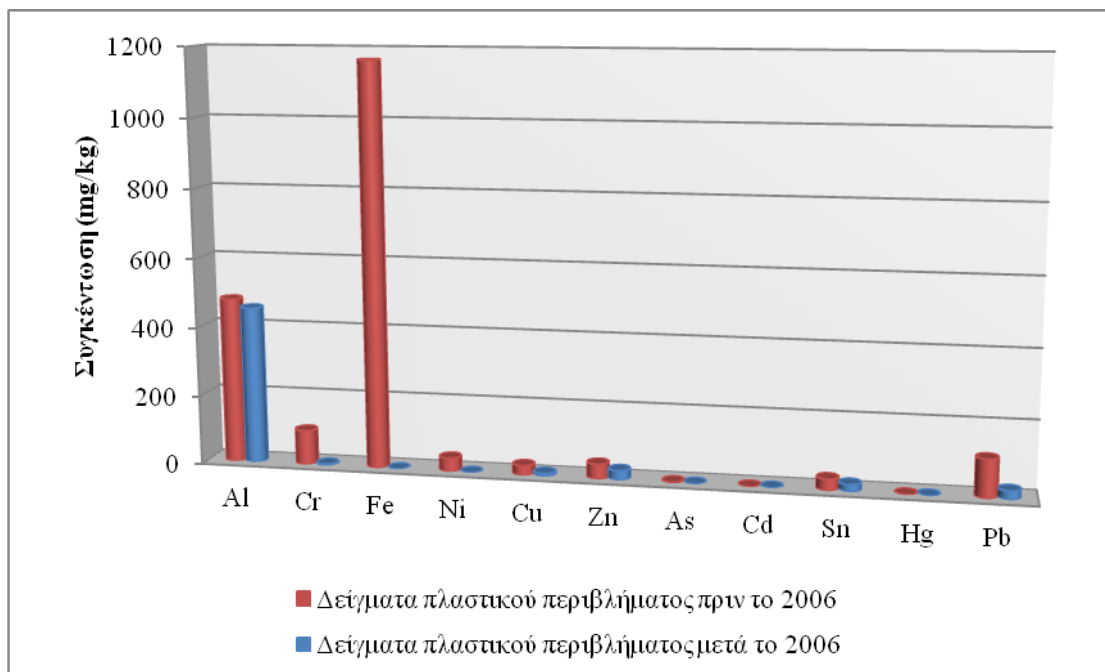
Πίνακας 12: Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα πλαστικού περιβλήματος (mg/kg).

Στοιχείο	Ομογενοποιημένο Πλαστικό Περιβλήμα πριν το 2006	HITACHI Πλαστικό Περιβλήμα πριν το 2006	SONY Πλαστικό Περιβλήμα πριν το 2006	Ομογενοποιημένο Πλαστικό Περιβλήμα μετά το 2006	LG Πλαστικό Περιβλήμα μετά το 2006	SAMSUNG Πλαστικό Περιβλήμα μετά το 2006	LG οθόνη αφής Πλαστικό Περιβλήμα μετά το 2006
Al	1041,67 ± 2,71	272,28 ± 5,31	124,25 ± 4,26	321,78 ± 15,86	721,39 ± 9,31	322,10 ± 14,40	<O.A. ³
Cr	197,79 ± 2,65	48,81 ± 1,27	54,56 ± 1,82	5,90 ± 0,16	3,46 ± 0,09	1,24 ± 0,02	<O.A.
Fe	2877,68 ± 140,14	388,11 ± 4,46	233,79 ± 1,40	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.
Ni	90,32 ± 1,28	27,86 ± 0,92	0,56 ± 0,03	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.
Cu	44,07 ± 0,54	23,55 ± 0,19	15,98 ± 0,11	12,24 ± 0,11	7,36 ± 0,11	6,63 ± 0,04	5,36 ± 0,15
Zn	82,86 ± 0,82	33,16 ± 0,26	11,84 ± 0,27	70,26 ± 1,77	19,82 ± 0,12	9,42 ± 0,02	8,52 ± 0,07
As	3,00 ± 0,24	1,92 ± 0,11	0,52 ± 0,11	0,51 ± 0,08	0,70 ± 0,12	0,38 ± 0,06	0,47 ± 0,08
Cd	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.
Sn	45,58 ± 2,52	29,05 ± 0,19	24,16 ± 0,14	22,32 ± 0,06	21,40 ± 0,15	19,27 ± 0,10	18,26 ± 0,24
Hg	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.
Pb	191,50 ± 1,23	112,56 ± 1,20	29,03 ± 0,46	35,40 ± 0,24	25,24 ± 0,49	21,00 ± 0,30	18,00 ± 0,28

³ <O.A.: κάτω από το όριο ανίχνευσης.

Στο **Διάγραμμα 14** παρουσιάζονται οι μέσες συγκεντρώσεις των στοιχείων που μελετήθηκαν στα δείγματα πριν από το 2006, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα δείγματα μετά το 2006.

Διάγραμμα 14: Μέσες συγκεντρώσεις στα δείγματα πλαστικού περιβλήματος της περιόδου πριν το 2006, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα δείγματα της περιόδου μετά το 2006.



Παρατηρείται ότι οι μέσες συγκεντρώσεις για όλα τα μέταλλα που εξετάστηκαν είναι υψηλότερες στα δείγματα από συσκευές που κατασκευάστηκαν πριν από το 2006. Επιπλέον, έχει ενδιαφέρον η σύγκριση μεταξύ των συγκεντρώσεων σε συσκευές διαφορετικών κατασκευαστών. Όσον αφορά την περίοδο πριν το 2006, όλα τα υπό μελέτη στοιχεία προσδιορίστηκαν σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις στο πλαστικό περίβλημα της οθόνης SONY από το αντίστοιχο της οθόνης HITACHI. Στην περίοδο μετά το 2006, όλες οι συγκεντρώσεις ήταν υψηλότερες στη συμβατική οθόνη της LG από εκείνη της εταιρείας SAMSUNG. Αναφορικά με την οθόνη αφής της LG, οι συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν ήταν χαμηλότερες από τις αντίστοιχες στα δείγματα των συμβατικών οθονών LCD, με μοναδική εξαίρεση τη συγκέντρωση του As.

4.1.2 Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα γυαλιού

Τα αποτελέσματα του ICP-MS για τα δείγματα γυαλιού παρουσιάζονται στον **Πίνακα 13**.

Πίνακας 13: Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα γυαλιού (mg/kg).

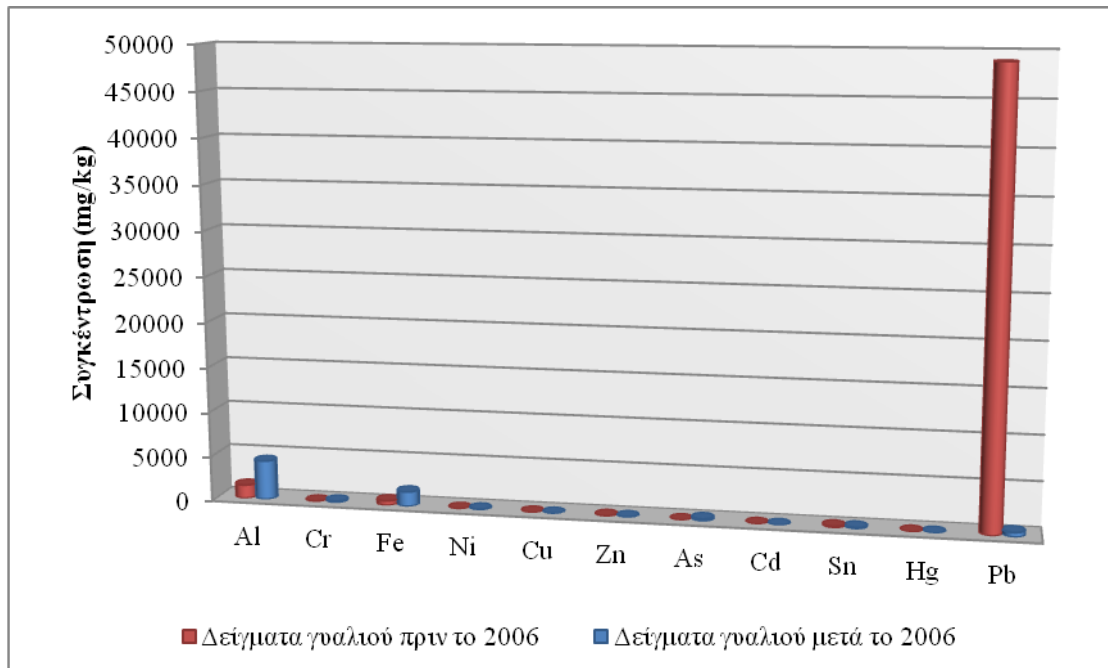
Στοιχείο	Ομογενοποιημέ νο εξωτερικό γυαλί πριν το 2006	HITACHI εξωτερικό γυαλί πριν το 2006	SONY εξωτερικό γυαλί πριν το 2006	Ομογενοποιημένη γυάλινη χοάνη πριν το 2006	HITACHI γυάλινη χοάνη πριν το 2006	SONY γυάλινη χοάνη πριν το 2006	Ομογενοποιημέν ο εξωτερικό γυαλί μετά το 2006	LG εξωτερικό γυαλί μετά το 2006	SAMSUNG εξωτερικό γυαλί μετά το 2006	LG οθόνη αφής εξωτερικό γυαλί μετά το 2006
Al	198,22 ± 22,52	222,99 ± 31,89	222,99 ± 14,83	2243,27 ± 40,15	2584,49 ± 18,61	3461,16 ± 107,99	3582,09 ± 22,57	4361,91 ± 29,22	3773,58 ± 52,45	5616,30 ± 12,92
Cr	65,81 ± 1,03	61,81 ± 0,77	72,86 ± 1,14	55,55 ± 1,41	42,79 ± 1,02	65,34 ± 1,39	160,23 ± 1,51	173,44 ± 1,47	211,10 ± 4,37	123,33 ± 2,69
Fe	233,09 ± 2,63	310,79 ± 3,95	1010,07 ± 8,38	312,65 ± 3,94	545,51 ± 8,67	546,59 ± 3,77	1638,15 ± 37,68	1875,91 ± 41,65	1712,75 ± 15,76	1246,87 ± 10,10
Ni	29,35 ± 0,09	24,67 ± 0,24	32,22 ± 0,66	24,28 ± 0,78	16,26 ± 0,19	31,69 ± 0,63	67,52 ± 0,80	87,02 ± 1,29	80,07 ± 2,02	61,22 ± 1,86
Cu	59,04 ± 3,36	26,01 ± 0,08	26,59 ± 1,02	18,67 ± 0,84	17,59 ± 0,75	16,43 ± 0,91	17,15 ± 0,07	15,10 ± 0,61	13,19 ± 0,50	8,37 ± 0,41
Zn	117,47 ± 3,41	57,96 ± 1,35	74,48 ± 1,50	46,52 ± 0,91	24,81 ± 0,33	40,60 ± 0,65	43,52 ± 0,21	32,39 ± 0,43	49,31 ± 0,76	32,98 ± 0,48
As	0,40 ± 0,10	0,31 ± 0,04	0,34 ± 0,08	0,43 ± 0,06	0,29 ± 0,03	0,56 ± 0,09	272,65 ± 5,43	221,92 ± 2,62	467,78 ± 6,78	7,06 ± 0,68
Cd	2,26 ± 0,27	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.
Sn	415,12 ± 6,73	187,54 ± 5,66	123,32 ± 0,80	66,76 ± 2,04	75,24 ± 2,07	61,45 ± 1,67	111,63 ± 2,75	143,03 ± 0,34	103,54 ± 2,22	255,42 ± 0,59
Hg	<O.A.	1,06 ± 0,58	0,67 ± 0,05	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	5,79 ± 0,02	0,84 ± 0,05	<O.A.
Pb	16,12 ± 1,41	7,57 ± 0,68	4,39 ± 0,42	113864,45 ± 398,53	75945,43 ± 258,21	103629,44 ± 2891,26	1389,29 ± 252,85	318,99 ± 14,39	258,30 ± 3,54	53,60 ± 2,11

Από τα δεδομένα του **Πίνακα 13** είναι εμφανές ότι το κάδμιο μετρήθηκε σε συγκεντρώσεις υψηλότερες από το όριο ανίχνευσης μόνο στο ομογενοποιημένο εξωτερικό γυαλί της περιόδου πριν το 2006. Για τα δείγματα με έτος κατασκευής πριν το 2006, το στοιχείο με τη χαμηλότερη συγκέντρωση είναι το As με τιμές που ποικίλλουν από 0,31 έως 0,4 mg/kg. Αντίθετα, το Al, το Fe και το Sn παρουσίασαν τις πιο αυξημένες τιμές με εύρος 198,22 έως 222,99 mg/kg, 233,09 έως 1010,07 mg/kg και 123,32 έως 415,12 mg/kg αντίστοιχα. Όσον αφορά τα δείγματα από τη γυάλινη χοάνη, οι συγκεντρώσεις που προσδιορίστηκαν για το κάδμιο και τον υδράργυρο ήταν χαμηλότερες από το ανιχνεύσιμο όριο. Οι μικρότερες τιμές παρατηρήθηκαν για το As στο δείγμα της οθόνης HITACHI. Αυξημένες συγκεντρώσεις παρουσίασαν όλα τα δείγματα για το αργίλιο με χαμηλότερη τιμή τα 2243,27 mg/kg και υψηλότερη τα 3461,16 mg/kg. Το στοιχείο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ήταν ο μόλυβδος, ο οποίος παρουσίασε μέση συγκέντρωση στα δείγματα ίση με 97813,11 mg/kg. Αυτό το συμπέρασμα ήταν αναμενόμενο καθώς οι οθόνες CRT αποτελούν την κύρια πηγή μολύβδου στο ρεύμα των αστικών στερεών αποβλήτων [52]. Μελετώντας τις τιμές των δειγμάτων γυαλιού της περιόδου μετά το 2006 (οθόνες LCD), παρατηρείται ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις αντιστοιχούν στα Al, Fe και Pb, ενώ οι χαμηλότερες στα Cd και Hg.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των διαφορετικών δειγμάτων μεταξύ τους εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- ❖ Οι μέσες συγκεντρώσεις για τα Cu, Zn, Cd, Pb και Sn στα δείγματα μετά το 2006 παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με τα αντίστοιχα δείγματα της περιόδου πριν το 2006. Αντίθετα, για τα υπόλοιπα στοιχεία οι συγκεντρώσεις ήταν αυξημένες σε σχέση με την περίοδο πριν το 2006. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο περιόδων παρουσιάζεται σχηματικά στο **Διάγραμμα 15**.

Διάγραμμα 15: Μέσες συγκεντρώσεις στα δείγματα γυαλιού της περιόδου πριν το 2006, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα δείγματα της περιόδου μετά το 2006.



- ❖ Οι συγκεντρώσεις των As, Hg και Pb είναι πολύ χαμηλότερες στο δείγμα της οθόνης αφής της LG συγκριτικά με τις αντίστοιχες στη συμβατική οθόνη της ίδιας εταιρείας, ενώ τα υπόλοιπα μέταλλα δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις στα δύο είδη δειγμάτων.
- ❖ Δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές στις συγκεντρώσεις τόσο μεταξύ των οθονών της LG και της SAMSUNG, όσο και μεταξύ των οθονών της HITACHI και της SONY.

4.1.3 Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων

Στον **Πίνακα 14** φαίνονται αναλυτικά οι συγκεντρώσεις, με τις αντίστοιχες τυπικές αποκλίσεις, των τοξικών μετάλλων στα δείγματα των πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων.

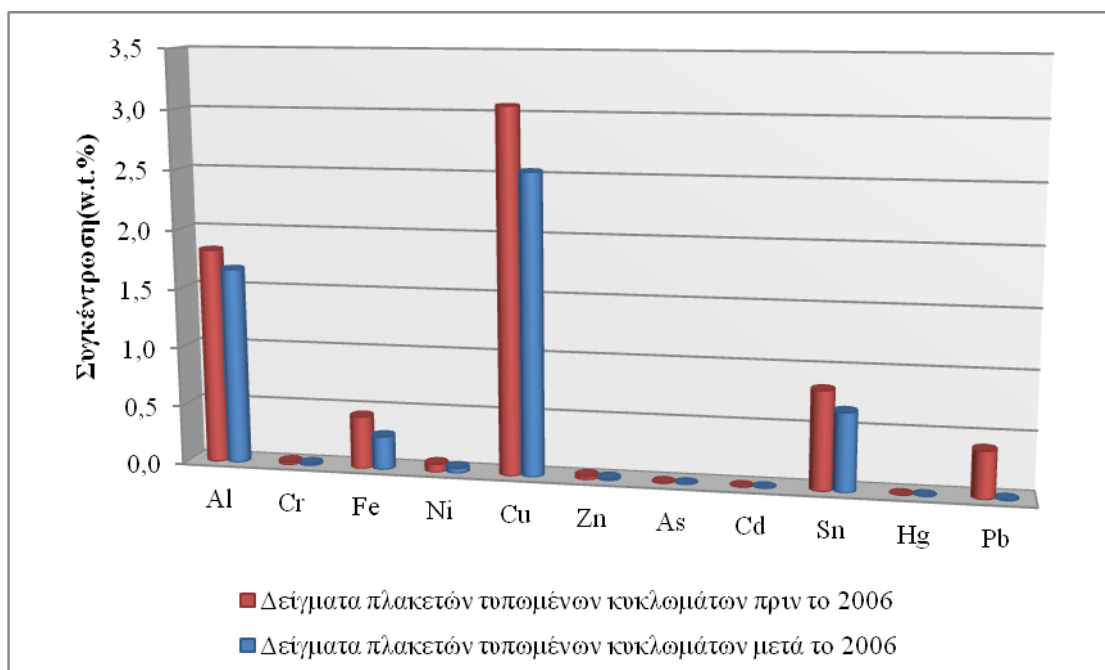
Πίνακας 14: Αποτελέσματα ICP-MS για τις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (w.t.%).

Στοιχείο	Ομογενοποιημένες πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων πριν το 2006	GIGABYTE πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων πριν το 2006	ECS PCB πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων πριν το 2006	ASUS PCB πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων πριν το 2006	Ομογενοποιημένες πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων μετά το 2006	GIGABYTE πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων μετά το 2006	ASROCK πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων μετά το 2006
Al	1,9641 ± 0,0273	1,8396 ± 0,0153	1,6833 ± 0,0157	1,8105 ± 0,0156	1,7985 ± 0,0241	1,6187 ± 0,0209	1,5796 ± 0,0092
Cr	0,0218 ± 0,0005	0,0248 ± 0,0006	0,0216 ± 0,0004	0,0270 ± 0,0003	0,0179 ± 0,0004	0,0159 ± 0,0002	0,0156 ± 0,0002
Fe	0,4924 ± 0,0129	0,4048 ± 0,0159	0,3358 ± 0,0066	0,5522 ± 0,0118	0,3120 ± 0,0050	0,2881 ± 0,0044	0,2496 ± 0,0053
Ni	0,0810 ± 0,0018	0,0702 ± 0,0014	0,0333 ± 0,0006	0,0947 ± 0,0016	0,0662 ± 0,0017	0,0415 ± 0,0005	0,0247 ± 0,0004
Cu	2,8026 ± 0,0661	2,7877 ± 0,0535	3,8462 ± 0,0973	2,8198 ± 0,0567	2,5014 ± 0,0688	2,5453 ± 0,0346	2,5675 ± 0,0619
Zn	0,0359 ± 0,0002	0,0221 ± 0,0001	0,0269 ± 0,0002	0,0312 ± 0,0001	0,0143 ± 0,0002	0,0111 ± 0,0004	0,0252 ± 0,0002
As	0,0020 ± 0,0001	0,0034 ± 0,0002	0,0020 ± 0,0000	0,0020 ± 0,0000	0,0012 ± 0,0000	0,0010 ± 0,0001	0,0014 ± 0,0001
Cd	0,0001 ± 0,0000	0,0011 ± 0,0001	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.
Sn	0,7874 ± 0,0052	1,1556 ± 0,0326	0,5585 ± 0,0075	0,8379 ± 0,0227	0,8888 ± 0,0203	0,7011 ± 0,0390	0,3991 ± 0,0081
Hg	<O.A.	0,0001 ± 0,0000	<O.A.	<O.A.	0,0002 ± 0,0000	0,0001 ± 0,0000	0,0006 ± 0,0000
Pb	0,3663 ± 0,0098	0,5453 ± 0,0065	0,2640 ± 0,0043	0,4278 ± 0,0040	0,0085 ± 0,0012	0,0027 ± 0,0001	0,0034 ± 0,0001

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν στα δείγματα των πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων είναι, σε γενικές γραμμές, υψηλότερες από τις αντίστοιχες στα δείγματα πλαστικού και γυαλιού που εξετάστηκαν. Αυτός είναι και ο λόγος που τα δεδομένα του **Πίνακα 14** είναι εκφρασμένα σε w.t.%. Οι συγκεντρώσεις των τοξικών μετάλλων που εξετάστηκαν ποικίλλουν από 0,0001 w.t.% (Cd στο ομογενοποιημένο δείγμα για την περίοδο πριν το 2006, Hg στο δείγμα GIGABYTE πριν το 2006, Hg στο δείγμα GIGABYTE μετά το 2006) έως 3,8462 w.t.% (Cu στο δείγμα της εταιρείας ECS για την περίοδο πριν το 2006). Επιπλέον, η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων για το κάδμιο και τρία από τα αποτελέσματα για τον υδράργυρο ήταν κάτω από το όριο ανίχνευσης.

Γενικώς, οι μετρήσεις για τα δείγματα προερχόμενα από πλακέτες με έτος κατασκευής μετά το 2006 δεν είχαν μεγάλες αποκλίσεις από αυτές για τα δείγματα που προέρχονταν από πλακέτες που παρασκευάστηκαν πριν το 2006, με μοναδική εξαίρεση το μόλυβδο, ο οποίος σημείωσε σημαντική μείωση στις συγκεντρώσεις του στα δείγματα μετά το 2006. Η σύγκριση μεταξύ των μέσων συγκεντρώσεων των δύο περιόδων παρουσιάζεται σχηματικά στο **Διάγραμμα 16**.

Διάγραμμα 16: Μέσες συγκεντρώσεις στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων της περιόδου πριν το 2006, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στα δείγματα της περιόδου μετά το 2006.



Τέλος, η διακύμανση μεταξύ των αποτελεσμάτων από διαφορετικούς κατασκευαστές δεν είναι σημαντική.

4.2 Σύγκριση με τα όρια της Οδηγίας RoHS

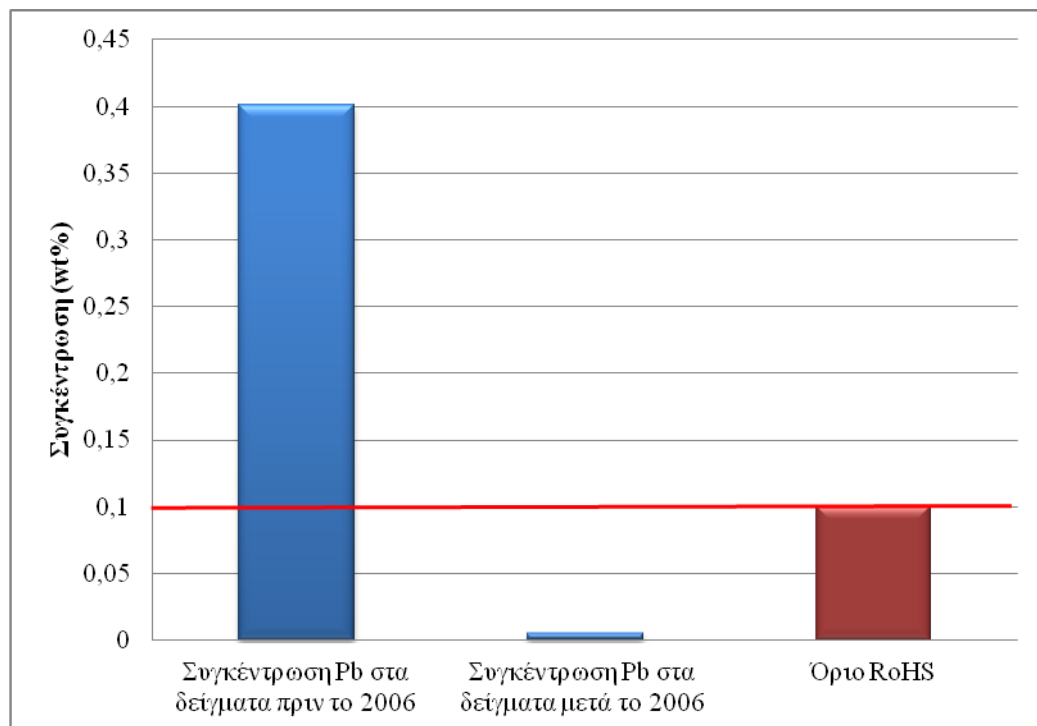
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δειγμάτων πλαστικού περιβλήματος με τα θεσμοθετημένα όρια, είναι εμφανές ότι οι συγκεντρώσεις για το κάδμιο, τον υδράργυρο και το μόλυβδο κυμαίνονται εντός των επιτρεπτών ορίων. Όσον αφορά το τέταρτο από τα στοιχεία στα οποία αναφέρεται η Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το Cr^{6+} , παρόλο που δεν έχουμε τιμές, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι δεν υπερβαίνει το όριο της νομοθεσίας, διότι ούτε η συγκέντρωση του ολικού χρωμίου το υπερβαίνει.

Όσον αφορά τα δείγματα γυαλιού, οι συγκεντρώσεις μολύβδου στις οθόνες CRT υπερβαίνουν το επιτρεπτό όριο στα δείγματα γυάλινης χοάνης. Πιο συγκεκριμένα, η μέση συγκέντρωση σε αυτού του είδους δείγματα είναι ίση με 97813,11 mg/kg, δηλαδή σχεδόν δέκα φορές μεγαλύτερη από το όριο που προβλέπει η Ευρωπαϊκή Οδηγία. Αντίθετα, με εξαίρεση το ομογενοποιημένο εξωτερικό γυαλί, του οποίου η συγκέντρωση ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη του ορίου, όλα τα μέταλλα από τα δείγματα της περιόδου μετά το 2006 μετρήθηκαν σε μικρότερες συγκεντρώσεις από το επιτρεπτό όριο (ολικό χρώμιο < 1000 mg/kg, επομένως Cr^{6+} < 1000 mg/kg). Στην περίπτωση του ομογενοποιημένου εξωτερικού γυαλιού μετά το 2006, η υπέρβαση του ορίου μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, πρώτον, διότι είναι σχεδόν ίση με την τυπική απόκλιση και, δεύτερον, γιατί πιθανόν να είναι αποτέλεσμα μόλυνσης της συσκευής ομογενοποίησης από άλλα δείγματα (η συγκέντρωση του ομογενοποιημένου δείγματος είναι σημαντικά υψηλότερη των συγκεντρώσεων των δειγμάτων της LG και της SAMSUNG ξεχωριστά).

Μελετώντας τα αποτελέσματα για τις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων, είναι αξιοσημείωτο ότι οι συγκεντρώσεις μολύβδου σε όλες τις πλακέτες με έτος κατασκευής πριν το 2006 υπερβαίνουν το επιτρεπτό όριο της Ευρωπαϊκής Οδηγίας. Ωστόσο, όλα τα αντίστοιχα δείγματα για την περίοδο μετά το 2006 παρουσίασαν συγκεντρώσεις χαμηλότερες του ορίου, γεγονός που υποδηλώνει τη συμμόρφωση των κατασκευαστών με τη νομοθεσία. Στο **Διάγραμμα 17** φαίνεται η μέση συγκέντρωση μολύβδου για τα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων πριν και μετά το 2006, σε σχέση με το όριο της Οδηγίας της ΕΕ. Τα αποτελέσματα για τα Hg και Cd υπολογίστηκαν σε τιμές χαμηλότερες των ορίων της Οδηγίας RoHS τόσο πριν όσο και μετά το 2006.

Παρομοίως, οι συγκεντρώσεις του Cr^{6+} είναι σύμφωνες με τη νομοθεσία, αφού καμία από τις μετρήσεις του ολικού Cr δεν υπερέβαινε το επιτρεπτό όριο για το εξασθενές χρώμιο.

Διάγραμμα 17: Σύγκριση μέσων συγκεντρώσεων μολύβδου στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων πριν και μετά το 2006 με τα όρια της Οδηγίας RoHS.



4.3 Σύγκριση με τη βιβλιογραφία

Στον **Πίνακα 15** παρουσιάζονται συγκεντρώσεις τοξικών μετάλλων σε δείγματα πλαστικών περιβλημάτων, γυαλιού και πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών, όπως έχουν προσδιοριστεί σε άλλες έρευνες.

Πίνακας 15: Τιμές τοξικών μετάλλων σε δείγματα πλαστικών περιβλημάτων, γυαλιού και πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων ηλεκτρονικών υπολογιστών σε διαφορετικές έρευνες.

	Πλαστικό περίβλημα			Πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων		Γυαλί			
	Πλαστικό περίβλημα CRT ⁴ (mg/kg)	Πλαστικό περίβλημα (mg/kg)	Πλαστικό περίβλημα (mg/kg)	Πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (wt.%)	Πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (wt.%)	Γυάλινη χοάνη CRT ⁴ (mg/kg)	Γυάλινη χοάνη CRT (mg/kg)	Neck glass(mg/kg)	LCD glass (mg/kg)
Στοιχείο	[13]	[52]	[65]	[66]	[23]	[13]	[66]	[52]	[67]
Al	- ⁵	-	44000 ± 19000	1,80	5,7	-	-	-	-
Cr	-	72,7 ± 25,5	150 ± 210	0,03	-	-	-	49,9 ± 26,8	5,56
Fe	-	-	1200 ± 1600	1,30	7,33	-	-	-	-
Ni	-	-	200 ± 86	-	0,43	-	-	-	4,69
Cu	2990	404 ± 389	380 ± 430	20,00	20,19	-	-	22,3 ± 9,06	9,14
Zn	574	-	280 ± 130	0,27	4,48	708	-	-	17,8
As	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd	-	-	78 ± 28	0,00	-	-	-	-	-
Sn	2020	-	750 ± 250	1,80	8,83	-	-	-	14,2
Hg	-	-	1,2 ± 0,51	-	-	-	-	-	6,057
Pb	2250	45,6 ± 44,2	230 ± 120	2,30	5,53	265000	215000	1271 ± 918	0,167

⁴ Συγκεντρώσεις σε τηλεοράσεις CRT.

⁵ Δεν προσδιορίζεται στη συγκεκριμένη έρευνα.

Υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας και εκείνων που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 15**. Αυτό οφείλεται στην ετερογενή φύση των αποβλήτων ηλεκτρονικών υπολογιστών, και των ΑΗΗΕ γενικότερα. Επιπλέον, σε μερικές από τις δημοσιεύσεις που ελήφθησαν υπ' όψιν κατά τη μελέτη του θέματός μας, δεν προσδιορίζεται η ημερομηνία κατασκευής των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, η οποία, όπως αποδεικνύεται και στην παρούσα εργασία, σχετίζεται με τη σύσταση τους. Η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων που προσδιορίστηκαν στην παρούσα εργασία είχαν χαμηλότερες τιμές από τα βιβλιογραφικά δεδομένα, ενώ ορισμένα, όπως τα Al και Cr στις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων, είχαν παρόμοιες τιμές. Οι συγκεντρώσεις που προσδιορίστηκαν για όλα τα μέταλλα, εκτός του υδραργύρου, στα γυάλινα δείγματα από οθόνες LCD ήταν μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν από τον Wang (2009) [67]. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι συγκεντρώσεις στην έρευνα των Nnorom et al. (2011) για τα πλαστικά περιβλήματα και τη γυάλινη χοάνη, αναφέρονται σε τηλεοράσεις CRT [13], ενώ στη μελέτη των Nnorom et al. (2010) οι τιμές αναφέρονται σε neck glass [52], το οποία έχει παρόμοιες συγκεντρώσεις με τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας για τα Cr και Cu, αλλά πολύ χαμηλότερα για τον Pb.

4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τα όρια TTLC και βιβλιογραφικά δεδομένα για τη μέθοδο TCLP

Σύμφωνα με το Τμήμα Ελέγχου Τοξικών Ουσιών (Department of Toxic Substances Control DTSC), το «Total threshold limit concentration» (TTLC) είναι η συγκέντρωση μιας τοξικής ουσίας, η οποία, αν προσδιοριστεί σε ένα απόβλητο, καθιστά το απόβλητο τοξικό [68]. Ο έλεγχος TTLC, λοιπόν, συμπεριλαμβάνει τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης μίας ουσίας σε ένα δείγμα αποβλήτου με διαδικασία χώνευσης και στη συνέχεια σύγκριση με τα όρια ώστε να χαρακτηριστεί το απόβλητο ως τοξικό ή μη τοξικό. Στον **Πίνακα 16** φαίνονται τα όρια TTLC για διάφορα μέταλλα.

Πίνακας 16: Οριακές τιμές TTLC και TCLP για μέταλλα.

Μέταλλα	Όρια TTLC (mg/kg)	Όριο TCLP (mg/L)
Αντιμόνιο (Sb) και/ή οι ενώσεις του	500	-
Αρσενικό (As) και/ή οι ενώσεις του	500	5
Ασήμι (Ag) και/ή οι ενώσεις του	500	5
Βανάδιο (V) και/ή οι ενώσεις του	2400	-
Βάριο (Ba) και/ή ενώσεις του	10000	100
Βυρήλλιο (Be) και/ή οι ενώσεις του	75	-
Εξασθενές χρώμιο (Cr III)	500	-
Θάλλιο (Tl) και/ή οι ενώσεις του	700	-
Κάδμιο (Cd) και/ή οι ενώσεις του	100	1
Κοβάλτιο (Co) και/ή ενώσεις του	8000	-
Μολυβδαίνιο (Mo) και/ή οι ενώσεις του	3500	-
Μόλυβδος (Pb) και/ή οι ενώσεις του	1000	5
Νικέλιο (Ni) και/ή οι ενώσεις του	2000	-
Σελήνιο (Se) και/ή οι ενώσεις του	100	1
Υδράργυρος (Hg) και/ή οι ενώσεις του	20	0,2
Χαλκός (Cu) και/ή οι ενώσεις του	2500	-
Χρώμιο (Cr) και/ή οι ενώσεις του	2500	5
Ψευδάργυρος (Zn) και/ή οι ενώσεις του	5000	-

Ο Πίνακας 17 παρουσιάζει τις συγκεντρώσεις των μετάλλων που προσδιορίστηκαν στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων, γυάλινης χοάνης και του ομογενοποιημένου εξωτερικού γυαλιού μετά το 2006, καθώς και τα όρια TTLC που έχει θέσει το DTSC για τα μέταλλα αυτά.. Τα αναφερθέντα δείγματα είναι αυτά στα οποία παρατηρήθηκε τουλάχιστον μία υπέρβαση για κάποιο από τα τοξικά μέταλλα που μετρήθηκαν, επομένως χαρακτηρίζονται ως τοξικά σύμφωνα με το DTSC. Με κόκκινα γράμματα παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις οι οποίες ξεπέρασαν τα όρια TTLC.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 17, τα τέσσερα δείγματα γυαλιού, όπως και τα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων με ημερομηνία κατασκευής πριν το 2006, υπερβαίνουν το όριο για το μόλυβδο. Επιπλέον, παρατηρείται ότι, σύμφωνα με τον έλεγχο TTLC, όλες οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία χαρακτηρίζονται ως τοξικές με βάση τις προσδιορισθείσες συγκεντρώσεις χαλκού. Σε μια παρόμοια εργασία των Nnorom et al. (2010) γίνεται αναφορά σε υπέρβαση των ορίων για το μόλυβδο σε δείγματα CRT neck glass [52], το οποίο έχει παρόμοια περιεκτικότητα Pb με το γυαλί της γυάλινης χοάνης σε έγχρωμες οθόνες CRT. Αντίθετα, στην ίδια έρευνα τα αποτελέσματα για τα Cr, Ni και Cu δεν ήταν ανώτερα των ορίων TTLC.

Πίνακας 17: Σύγκριση συγκεντρώσεων τοξικών μετάλλων σε δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων και γυαλιού με τα όρια TTLC.

Στοιχείο	Ομογενοποιημένη γυάλινη χοάνη πριν το 2006(mg/kg)	HITACHI γυάλινη χοάνη πριν το 2006(mg/kg)	SONY γυάλινη χοάνη πριν το 2006(mg/kg)	Ομογενοποιημένο εξωτερικό γυαλί μετά το 2006(mg/kg)	Ομογενοποιημένες πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων πριν το 2006(wt.%)	GIGABYTE πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων πριν το 2006(wt.%)	ECS πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων πριν το 2006(wt.%)	ASUS πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων πριν το 2006(wt.%)	Ομογενοποιημένες πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων μετά το 2006(wt.%)	GIGABYTE πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων μετά το 2006(wt.%)	ASROCK πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων μετά το 2006(wt.%)	Όριο TTLC (mg/kg) (DTSC 2005b)
As	0,43	0,29	0,56	272,65	0,0020	0,0034	0,0020	0,0020	0,0012	0,0010	0,0014	500
Cd	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	0,0001	0,0011	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	100
Cr	55,55	42,79	65,34	160,23	0,0218	0,0248	0,0216	0,0270	0,0179	0,0159	0,0156	2500
Cu	18,67	17,59	16,43	17,15	2,8026	2,7877	3,8462	2,8198	2,5014	2,5453	2,5675	2500
Pb	113864,45	75945,43	103629,44	1389,29	0,3663	0,5453	0,2640	0,4278	0,0085	0,0027	0,0034	1000
Hg	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	<O.A.	0,0001	<O.A.	<O.A.	0,0002	0,0001	0,0006	20
Ni	24,28	16,26	31,69	67,52	0,0810	0,0702	0,0333	0,0947	0,0662	0,0415	0,0247	2000
Zn	46,52	24,81	40,60	43,52	0,0359	0,0221	0,0269	0,0312	0,0143	0,0111	0,0252	5000

Εκτός από τον προσδιορισμό της επικινδυνότητας αποβλήτων με βάση το περιεχόμενό τους σε τοξικές ουσίες, είναι σημαντικός και ο έλεγχος των επιπτώσεων που μπορεί να προκαλέσουν τα εκχυλίσματα που δημιουργούνται και καταλήγουν στα υπόγεια νερά, όταν τα απόβλητα απορρίπτονται σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (XYTA). Με βάση αυτό το σκεπτικό, η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (United States Environmental Protection Agency, USEPA) σχεδίασε τη μέθοδο 1311, Toxicity Characterization Leaching Procedure (TCLP), για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης τοξικών ουσιών σε εκχυλίσματα αποβλήτων, και έθεσε όρια, τα οποία καθορίζουν αν το απόβλητο είναι επικίνδυνο για διάθεση σε XYTA [69]. Στον **Πίνακα 16** παρουσιάζονται τα όρια που αφορούν τα τοξικά μέταλλα. Στη μελέτη των Nnorom et al. (2010) τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι όλα τα δείγματα γυαλιού CRT που εξετάστηκαν είναι τοξικά με βάση τα όρια TCLP όσον αφορά το μόλυβδο (5 mg/l), ενώ οι συγκεντρώσεις Cu ήταν χαμηλότερες από το αντίστοιχο όριο [52]. Παρομοίως, στη έρευνα των Kim et al. (2009), προσδιορίστηκαν υψηλότερες συγκεντρώσεις Pb από τα όρια που έχει ορίσει η USEPA στα εκχυλίσματα δειγμάτων γυάλινης χοάνης, ενώ οι συγκεντρώσεις για όλα τα δείγματα εξωτερικού γυαλιού οθονών CRT, με μια μόνο εξαίρεση, κυμαίνονταν κάτω από το καθορισμένο όριο [53]. Ίδια αποτελέσματα εξάγει και η εργασία των S. Musson και άλλων (2000) με συγκεντρώσεις 8,6 και 75,3 mg/l στα εκχυλίσματα neck glass και γυάλινης χοάνης αντίστοιχα, ενώ παράλληλα οι μέσες συγκεντρώσεις για το εξωτερικό γυαλί δεν ήταν υψηλότερες των 5 mg/l [54]. Όσον αφορά τα απόβλητα από οθόνες LCD, το Τμήμα Ελέγχου Τοξικών Ουσιών (DTSC) αποδεικνύει ότι η συγκέντρωση Pb στα εκχυλίσματα γυαλιού οθονών LCD δεν ξεπέρασαν τα καθορισμένα όρια TCLP [70]. Τέλος, οι Y. Jang και T. G. Townsend (2003) σε έρευνά τους εξετάζουν με βάση τη μέθοδο TCLP την επικινδυνότητα των πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων H/Y και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι εκχυλίσσιμες συγκεντρώσεις μολύβδου υπερβαίνουν τα όρια της US EPA [55].

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν ο προσδιορισμός του περιεχομένου μερών H/Y σε τοξικά μέταλλα και η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με την επικινδυνότητά τους όταν αυτά χαρακτηριστούν ως απόβλητα. Επιπλέον, στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα θεσμοθετημένα από την Οδηγία 2002/95/EK όρια για ορισμένα από τα τοξικά μέταλλα που προσδιορίστηκαν, ώστε να γίνει αντιληπτό αν οι κατασκευαστές H/Y έχουν συμμορφωθεί με τη νομοθεσία. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μπορούν να φανούν χρήσιμα για περαιτέρω μελέτη των αποβλήτων ηλεκτρονικών υπολογιστών και να λειτουργήσουν ευεργετικά στο σχεδιασμό της διαχείρισής τους.

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την πραγματοποιηθείσα έρευνα είναι τα εξής:

- ❖ Τα αποτελέσματα από την ανάλυση ICP-MS για τον προσδιορισμό των τοξικών μετάλλων σε δείγματα από οθόνες, μητρικές πλακέτες και πλαστικό περίβλημα H/Y, απέδειξαν ότι στους H/Y περιέχεται ένα μεγάλο φορτίο τοξικών μετάλλων, η τοξικότητα των οποίων προκαλεί ανησυχία σχετικά με τη διαχείρισή τους μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους.
- ❖ Η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα δείγματα πλαστικού περιβλήματος με τα όρια της Οδηγίας RoHS, κατέδειξε ότι καμία από τις συγκεντρώσεις για τα μέταλλα τα οποία διέπονται των απαγορεύσεων της Οδηγίας δεν υπερβαίνουν τις ανώτατες επιτρεπόμενες τιμές.
- ❖ Παρατηρήθηκε ότι οι μέσες συγκεντρώσεις για όλα τα μέταλλα που εξετάστηκαν είναι υψηλότερες στα δείγματα πλαστικού περιβλήματος από συσκευές που κατασκευάστηκαν πριν από το 2006 συγκριτικά με αυτές που κατασκευάστηκαν μετά το 2006.
- ❖ Όσον αφορά την περίοδο πριν το 2006, όλα τα στοιχεία προσδιορίστηκαν σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις στο πλαστικό περίβλημα της οθόνης SONY από το αντίστοιχο της οθόνης HITACHI. Στην περίοδο μετά το 2006, όλες οι συγκεντρώσεις ήταν υψηλότερες στη συμβατική οθόνη της LG από εκείνη της εταιρείας SAMSUNG. Αναφορικά με την οθόνη αφής της LG, οι συγκεντρώσεις που μετρήθηκαν ήταν χαμηλότερες από τις αντίστοιχες στα δείγματα των συμβατικών οθονών LCD, με εξαίρεση τη συγκέντρωση του As.

- ❖ Οι συγκεντρώσεις των Cd, Hg και Cr που μετρήθηκαν για όλα τα δείγματα γυαλιού ήταν χαμηλότερες από τα όρια RoHS. Αντιθέτως, όσον αφορά τα αποτελέσματα για τον Pb, παρατηρήθηκε υπέρβαση των ορίων για τα δείγματα γυάλινης χοάνης από οθόνες CRT, οι οποίες είχαν παραχθεί πριν το 2006. Οι τιμές που μετρήθηκαν ήταν κατά μέσο όρο σχεδόν 10 φορές μεγαλύτερες του ορίου. Παράβαση της Οδηγίας ως προς τη συγκέντρωση του μολύβδου σημειώθηκε και στο δείγμα ομογενοποιημένου γυαλιού με έτος παραγωγής μετά το 2006, αλλά λόγω της μικρής υπέρβασης, είναι πιθανό να οφείλεται σε μόλυνση του οργάνου από προηγούμενα δείγματα. Σε όλα τα υπόλοιπα δείγματα γυαλιού από οθόνες LCD (περίοδος μετά το 2006) η συγκέντρωση μολύβδου ήταν χαμηλότερη της ανώτατης επιτρεπόμενης τιμής. Αυτό το συμπέρασμα δείχνει ότι η αλλαγή της τεχνολογίας των οθονών από CRT σε LCD είχε ως συνέπεια τη μείωση της συγκέντρωσης μολύβδου. Λαμβάνοντας, μάλιστα, υπόψιν ότι η κατασκευή οθονών CRT μετά το 2006 είχε σταματήσει, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι κατασκευαστές οθονών H/Y συμμορφώθηκαν με την Οδηγία 2002/95/EK.
- ❖ Γενικά, από τα αποτελέσματα τα σχετικά με τις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων συμπεραίνουμε ότι οι μέσες συγκεντρώσεις για τα Cu, Zn, Cd, Pb και Sn στα δείγματα μετά το 2006 παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με τα αντίστοιχα δείγματα της περιόδου πριν το 2006. Αντίθετα, για τα υπόλοιπα στοιχεία οι συγκεντρώσεις ήταν αυξημένες σε σχέση με την περίοδο πριν το 2006.
- ❖ Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για το γυαλί της οθόνης αφής LCD της LG με τα αντίστοιχα της συμβατικής οθόνης LCD της ίδιας εταιρείας, εξήχθη το συμπέρασμα ότι οι συγκεντρώσεις των As, Hg και Pb είναι πολύ χαμηλότερες στο δείγμα της οθόνης αφής συγκριτικά με τις αντίστοιχες της συμβατικής οθόνης, ενώ τα υπόλοιπα μέταλλα δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις στα δύο είδη δειγμάτων. Όσον αφορά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις συμβατικές οθόνες διαφορετικών κατασκευαστών παρατηρήθηκε ότι δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές στις συγκεντρώσεις τόσο μεταξύ των οθονών της LG και της SAMSUNG, όσο και μεταξύ των οθονών της HITACHI και της SONY.
- ❖ Στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων, όπως ήταν αναμενόμενο, σε γενικές γραμμές προσδιορίστηκαν οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τοξικών

μετάλλων συγκριτικά με τα δείγματα πλαστικού περιβλημάτων και πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων.

- ❖ Τα αποτελέσματα για τα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων ήταν εντός των ορίων της νομοθεσίας για τα Cd, Hg και Cr⁶⁺. Ωστόσο, οι συγκεντρώσεις του μολύβδου σε όλα τα δείγματα πριν το 2006 ήταν υψηλότερες του ορίου RoHS για το συγκεκριμένο μέταλλο. Αντίθετα, οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις για τα δείγματα μετά το 2006 δεν υπερέβαιναν το όριο, γεγονός που αποδεικνύει τη συμμόρφωση των κατασκευαστών μητρικών πλακετών με τη νομοθεσία.
- ❖ Οι μετρήσεις για τα δείγματα προερχόμενα από πλακέτες με έτος κατασκευής μετά το 2006 δεν είχαν μεγάλες αποκλίσεις από εκείνες για τα δείγματα που προέρχονταν από πλακέτες που παρασκευάστηκαν πριν το 2006, με μοναδική εξαίρεση το μολύβδο, ο οποίος σημείωσε σημαντική μείωση στις συγκεντρώσεις του στα δείγματα μετά το 2006. Επίσης η διακύμανση μεταξύ των αποτελεσμάτων από διαφορετικούς κατασκευαστές δεν είναι σημαντική.
- ❖ Γενικά, από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με τα όρια της Οδηγίας σχετικά με τον περιορισμό της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών σε είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, διαπιστώνεται ότι οι κατασκευαστές H/Y ανταποκρίθηκαν στις απαιτήσεις της Οδηγίας. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι περαιτέρω νομοθετικές κινήσεις μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση του προβλήματος της διαχείρισης των ΑΗΗΕ.
- ❖ Επιπλέον, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η κατάργηση μιας τεχνολογίας και η ανάδειξη μιας νέας, μπορεί να έχει πολλά οφέλη, καθώς μπορεί να μειώσει το τοξικό φορτίο που περιέχεται στον ΗΗΕ, όπως παρατηρήθηκε στην περίπτωση του μολύβδου στα δείγματα γυαλιού. Ωστόσο, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δειγμάτων γυαλιού των οθονών CRT με αυτά των οθονών LCD παρατηρείται αύξηση των συγκεντρώσεων κάποιων άλλων μετάλλων. Είναι, λοιπόν, σημαντικό να γίνει μια προσπάθεια για ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, ώστε οι συσκευές με μεγάλο φορτίο τοξικών ουσιών να αντικαθίστανται από πιο «καθαρές», λαμβάνοντας υπόψη όλες τις ουσίες και όχι εστιάζοντας μόνο σε ορισμένες από αυτές.
- ❖ Υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας και εκείνων από άλλες εργασίες με αντικείμενο τη σύσταση των

αποβλήτων H/Y. Αυτό οφείλεται στην ετερογενή φύση των αποβλήτων ηλεκτρονικών υπολογιστών, και των ΑΗΗΕ γενικότερα. Επιπλέον, σε μερικές από τις εργασίες που περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία δεν προσδιορίζεται η ημερομηνία κατασκευής των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, η οποία, όπως αποδεικνύεται και στην παρούσα εργασία, έχει άμεση σχέση με τη σύσταση τους.

- ❖ Στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων, γυάλινης χοάνης και στο δείγμα ομογενοποιημένου εξωτερικού γυαλιού μετά το 2006 παρατηρήθηκε τουλάχιστον μία υπέρβαση για κάποιο από τα τοξικά μέταλλα που μετρήθηκαν ως προς τα όρια TTLC, επομένως χαρακτηρίζονται ως τοξικά σύμφωνα με το DTSC. Τα τέσσερα δείγματα γυαλιού, όπως και τα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων με ημερομηνία κατασκευής πριν το 2006, υπερβαίνουν το όριο για το μόλυβδο. Επιπλέον, παρατηρείται ότι, σύμφωνα με τον έλεγχο TTLC, όλες οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία χαρακτηρίζονται ως τοξικές με βάση τις προσδιορισθείσες συγκεντρώσεις χαλκού.
- ❖ Τα αποτελέσματα διαφόρων ερευνών στις οποίες προσδιορίστηκαν οι εκχυλίσιμες συγκεντρώσεις μετάλλων από απόβλητα H/Y με τη δοκιμή TCLP, καταδεικνύουν υπέρβαση των ορίων της USEPA για το μόλυβδο σε δείγματα γυάλινης χοάνης οθονών CRT και πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων. Αντίθετα, κάτω από τα όρια ήταν οι συγκεντρώσεις μολύβδου στα εκχυλίσματα από εξωτερικό γυαλί οθονών CRT και LCD.
- ❖ Όσον αφορά τη διαχείριση των αποβλήτων H/Y, τόσο η πολιτεία όσο και οι παραγωγοί H/Y πρέπει να συμβάλλουν στην αποφυγή της εναπόθεσης των αποβλήτων σε χώρους ταφής, της αποτέφρωσής τους και της εξαγωγής τους σε αναπτυσσόμενες χώρες, ώστε να μειωθούν οι αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη υγεία. Αντιθέτως, θα πρέπει να προωθηθεί η ανακύκλωση, η οποία, λόγω της παραγωγής δευτερογενών υλικών, έχει μικρότερο οικολογικό αποτύπωμα.
- ❖ Κρίνεται απαραίτητο να συνεχιστεί η διεξαγωγή και άλλων μελετών σχετικά με τη σύσταση και τη διαχείριση των αποβλήτων H/Y, καθώς, εξαιτίας της ραγδαίας τεχνολογικής ανάπτυξης, τα δεδομένα σχετικά με την παραγωγή τους και το περιεχόμενό τους αναμένεται να μεταβάλλονται συνεχώς στο μέλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. «Οδηγία 2002/96/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 27ης Ιανουαρίου 2003 σχετικά με τα απόβλητα ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ)», *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, pp. L37/24-L37/38, 13.02.2003.
2. «Προεδρικό διάταγμα 117», *Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, Τεύχος Α, Αρ. Φύλλου 82*, pp. 4297-4312, 05.03.2004.
3. «Οδηγία 2002/95/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 27ης Ιανουαρίου 2003 σχετικά με τον περιορισμό της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών σε είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού», *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, pp. L37/19-L37/23, 13.02.2003.
4. «Απόφαση 2005/618/EK της Επιτροπής, της 18ης Αυγούστου 2005, για την τροποποίηση της οδηγίας 2002/95/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με την καθιέρωση μέγιστων τιμών συγκέντρωσης για ορισμένες επικίνδυνες ουσίες στα είδη ΗΗΕ», *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, p. L214/65, 19.08.2005.
5. «Οδηγία 2012/19/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 4ης Ιουλίου 2012 σχετικά με τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) (αναδιατύπωση)», *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, pp. L197/38-L 197/71, 24.7.2012.
6. «Οδηγία 2011/65/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 4ης Ιουλίου 2012 για τον περιορισμό της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών σε ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (αναδιατύπωση)», *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, pp. L174/88-L174/110, 1.7.2011.
7. R. Widmer, H. Oswald-Krampf, D. Sinha-Khettrival, M. Schnellmann και H. Böni, «Global perspectives on e-waste», *Environmental Impact Assessment Review* 25, pp. 436-458, 2005.
8. Η. Αβραμίκος, *Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Χημικών Μηχανικών & Πανεπιστήμιο Πειραιά, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας, Αθήνα, 2005.*
9. Microsoft Windows, <http://windows.microsoft.com/el-gr/windows-vista/parts-of-a-computer>.
10. «My Computer, Παρουσίαση του Υπολογιστή», Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Εργαστήριο Παράλληλης Κατανεμημένης Επεξεργασίας, Τμήμα Εφαρμοσμένης

Πληροφορικής.

11. H. Kang και J. M. Schoenung, «Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options», *Resources, Conservation and Recycling* 45, pp. 368-400, 2005.
12. Microelectronics and Computer Technology Corporation, «Electronics Industry Environmental Roadmap, MCC Technical Report», 1996.
13. I. C. Nnorom, O. Osibanjo και M. O. C. Ogwuegbu, «Global disposal strategies for waste cathode ray tubes», *Resources Conservation & Recycling* 55, pp. 275-290, 2011.
14. T. Townsend, K. Vann, S. Musson, S. Murtha, B. Pearson και Y. Jang, «RCRA toxicity characterization of computer CPUs and other discarded electronic devices Final Report submitted to US EPA Regions 4 and 5», Gainesville (FL, USA): University of Florida 2004.
15. E. Dimitrakakis και E. Gidakos, «Closed-Loop CRT Glass Recycling Alternatives», *Trackling E-Waste Towards Efficient Management Techniques*, The Energy and Resources Institute (TERI), 2007.
16. A. Karagiannidis, G. Perkoulidis, A. Papadopoulos, N. Moussiopoulos και T. Tsatsarelis, «Characteristics of wastes from electric and electronic equipment in Greece: results of a field survey», *Waste Management & Research* 23, pp. 381-388, 2005.
17. V. Ravi, «Evaluating overall quality of recycling of e-waste from end-of-life computers», *Journal of Cleaner Production* 20, pp. 145-151, 2012.
18. B. H. Robinson, «E-waste: An assessment of global production and environmental impacts», *Science of the Total Environment* 408, pp. 183-191, 2009.
19. AEA Technology, «WEEE & Hazardous Waste», A report produced for DEFRA, March 2004.
20. M. C. Santos, J. A. Nobrega, N. Baccan και S. Cadore, «Determination of toxic elements in plastics from waste electrical and electronic equipment by slurry sampling graphite furnace atomic absorption spectrometry», *Talanta* 81, p. 1781–1787, 2010.
21. E. Dimitrakakis, A. Janz, B. Bilitewski και E. Gidakos, «Determination of heavy metals and halogens in plastics from electric and electronic waste», *Waste Management* 29, p. 2700–2706, 2009.

22. D. Papameletiou, «Towards a European Solution for the Management of Waste from Electrical and Electronic Equipment», Institute for Prospective Technological Studies, Seville, June 2000.
23. H. L. Yamane, V. T. Moraes, D. C. R. Espinosa και J. A. S. Tenório, «Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers», *Waste Management* 31, pp. 2553-2558, 2011.
24. Y. J. Park και D. J. Fray, «Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards», *Journal of Hazardous Materials* 164, p. 1152–1158, 2009.
25. H. M. Veit, T. R. Diehl, A. P. Salami, J. S. Rodrigues, A. Bernardes. και J. A. S. Tenório, «Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap», *Waste Management* 25, pp. 67-74, 2005.
26. Q. Guo, X. Yue, M. Wang και Y. Liu, «Pyrolysis of scrap printed circuit board plastic particles in a fluidized bed», *Powder Technology* 198, pp. 422-428, 2010.
27. F. X. Reichl, «Γενική Τοξικολογία. Ουσίες, Δράσεις, Περιβάλλον», Ιατρικές Εκδόσεις Π.Χ. Πασχαλίδης, 2004.
28. Ε. Α. Δημητριάδης, «Τοξικά βαρέα μέταλλα και η ειδική επίδρασή τους στα διάφορα είδη της άνοιας», Α' Νευρολογική Κλινική ΑΧΕΠΑ, Α.Π.Θ..
29. USEPA, «Ecological Toxicity Information, Toxicity Profiles: a brief discussion of the general fate and transport processes associated with selected groups of COPECs», *USEPA, Region 5 Superfund*, <http://www.epa.gov/reg5sfun/ecology/toxprofiles.htm..>
30. P. Kiddee, R. Naidu και M. H. Wong, «Electronic waste management approaches: An overview», *Waste Management* 33, pp. 1237-1250, 2013.
31. Basel Action Network, Silicon Valley Toxics Coalition, «Exporting Harm: The High-Tech Trashing of Asia», 2002.
32. Silicon Valley Toxics Coalition, «Just Say No to E-Waste: Background Document on Hazards and Waste From Computers», 2005.
33. US Environmental Protection Agency-Office of Pesticide Programs, «Copper Facts», 2008.
34. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Department of Health and Human Services Public Health Service, «Toxicological profile for copper», 2004.
35. K. A. Winship, «Toxicity of tin and its compounds», *Adverse Drug Reactions and*

Acute Poison Reviews 7 (1), pp. 19-38, 1988.

36. WHO, «Inorganic Tin in Drinking-water», *World Health Organization, Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*, 2004.
37. Expert Group on Vitamins and Minerals, «Safe Upper Levels for Vitamins», 2003.
38. R. Eisler, «Tin hazards to fish, wildlife and invertebrates: a synoptic review», Fish and Wildlife Service. U.S. Department of the Interior, 1989.
39. «Κανονισμός (ΕΕ) αριθ. 847/2012 της επιτροπής της 19ης Σεπτεμβρίου 2012 για την τροποποίηση του παραρτήματος XVII του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 1907/2006 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την καταχώριση, την αξιολόγηση, την αδειοδότηση και τους περιορισμούς των χημικών προϊόντων (REACH), όσον αφορά τον υδράργυρο», *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης*, pp. L253/1-L253/4, 20.9.2012.
40. R. Hirschler, P. Wäger και J. Gauglhofer, «Does WEEE Recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE)», *Environmental Impact Assessment Review* 25, pp. 525-539, 2005.
41. E. Dimitrakakis, A. Janz, B. Bilitewski και E. Gidarakos, «Small WEEE: Determining recyclables and hazardous substances in plastics», *Journal of Hazardous Materials* 161, p. 913-919, 2009.
42. UNEP, «Call for Global Action on E-waste. United Nations Environment Programme», 2006.
43. OECD, «Organisation for Economic Cooperation and Development», OECD. OECD Environmental Outlook to 2030, 2008, <http://213.253.134.43/oecd/pdfs/browseit/9708011E.PDF>.
44. National Safety Council, «Electronic product recovery and recycling baseline report», May 1999.
45. I. C. Nnorom και O. Osibanjo, «Electronic waste (e-waste): Material flows and management practices in Nigeria», *Waste Management* 28, pp. 1472-1479, 2008.
46. S. Basu, «Status of e-waste management in the National Capital Region, India», *Tracking E-Waste Towards Efficient Management Techniques*, The Energy and Resources Institute (TERI), 2007.
47. Marletta P, Pasquini A, Stacey G, Vicario L (May 2004) D14: Book Manuscript, Chapter 3: The Environmental Impact of ISTs, The e-Living Consortium,

48. E. Jefferies, «E-wasted. ‘Toys and gadgets become toxic junk thanks to the circuitboard», *Worldwatch* 19(4), p. 21–5, Worldwatch Institute www.worldwatch.org; July/August 2006.
49. T. Townsend, S. Musson, Y. Jang και I. Chung, «Characterization of lead leachability from cathode ray tubes using the toxicity characterization leaching procedure Florida. Gainesville (FL, USA): Center for Solid and Hazardous», *WasteManagementReport* # 99-5, 1999.
50. N. Menad, «Cathode ray tube recycling», *Resources, Conservation and Recycling* 26, pp. 143-154, 1999.
51. G. Gaidajis, K. Angelakoglou και D. Aktsoglou, «E-waste: Environmental Problems and Current Management», *Journal of Engineering Science and Technology Review* 3, pp. 193-199, 2010.
52. I. C. Nnorom, O. Osibanjo, K. Okechukwu και O. Nkwachukwu, «Evaluation of Heavy Metal Release from the Disposal of Waste Computer Monitors at an Open Dump», *International Journal of Environmental Science and Development*, 2010.
53. D. Kim, M. Quinlan και T. Yen, «Encapsulation of lead from hazardous CRT glass wastes using biopolymer cross-linked concrete systems», *Waste Management* 29, pp. 321-328, 2009.
54. S. E. Musson, Y. Jang, T. Townsend και I. Chung, «Characterization of Lead Leachability from Cathode Ray Tubes Using the Toxicity Characteristic Leaching Procedure», *Environmental Science & Technology* 34, pp. 4376-4381, 2000.
55. Y. Jang και T. G. Townsend, «Leaching of Lead from Computer Printed Wire Boards and Cathode Ray Tubes by Municipal Solid Waste Landfill Leachates», *Environmental Science & Technology* 37, pp. 4778-4784, 2003.
56. E. Williams, R. Kahhat, B. Allenby, E. Kavazanjian, J. Kim και M. Xu, «Environmental, Social, and Economic Implications of global reuse and recycling of personal computers», *Environmental Science & Technology* 42, pp. 6446-6454, 2008.
57. Ε. Γιδαράκος, «Επικίνδυνα Απόβλητα. Διαχείριση, Επεξεργασία, Διάθεση», Εκδόσεις Ζυγός, 2006.
58. J. Cui και E. Forssberg, «Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review», *Journal of Hazardous Materials B99*, pp. 243-263, 2003.
59. J. Ladou και S. Lovegrove, «Export of Electronics Equipment Waste»,

International Journal of Occupational and Environmental Health 14, pp. 1-10, 2008.

60. E. Gidakos, S. Basu, K. V. Rajeshwari, E. Dimitrakakis και R. Johri, «E-waste recycling environmental contamination: Mandoli, India», *Waste and Resource Management* 165 (1), pp. 45-52, 2012.
61. United States Government Accountability Office, «Electronic Waste: EPA needs to better control harmful U.S. exports through stronger enforcement and more comprehensive regulation», Report to the Chairman, Committee on Foreign Affairs, House of Representatives, 2008.
62. K. Maragkos, J. Hahladakis και E. Gidakos, «Qualitative and quantitative determination of heavy metals in waste cellular phones», *Waste Management*, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.016>.
63. M. C. Santos, J. A. Nóbrega και S. Cadore, «Determination of Cd, Cr, Hg and Pb in plastics from waste electrical and electronic equipment by inductively coupled plasma mass spectrometry with collision-reaction interface technology», *Journal of Hazardous Materials* 19, pp. 833-839, 2011.
64. Ι. Στράτης, Γ. Ζαχαριάδης, Δ. Γ. Θεμελής, Α. Ν. Ανθεμίδης και Α. Σ. Οικονόμου, «Ενόργανη Χημική Ανάλυση ΙΙ», Κεφ. 3, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 2004.
65. L. Morf, J. Tremp, R. Gloor, F. Schuppisser, M. Stengele και R. Taverna, «Metals, non-metals and PCB in electrical and electronic waste – Actual levels in Switzerland», *Waste Management* 27, pp. 1306-1316, 2007.
66. M. Oguchi, H. Sakanakura και A. Terazono, «Toxic metals in WEEE: Characterization and substance flow analysis in waste treatment processes», *Science of the Total Environment*, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.078>.
67. H. Wang, «A study of the effects of LCD glass sand on the properties of concrete», *Waste Management* 29, pp. 335-341, 2009.
68. Department of Toxic Substances Control, «Environmental Health Standards for the Management of Hazardous Waste», Title 22 Social Security, Division 4.5, Article 2, 2005.
69. USEPA, «Method 1311, Toxicity Characteristic Leaching Procedure», 1992.
70. Department of Toxic Substances Control, Hazardous Material Laboratory «Determination of regulated elements in discarded laptop computers, LCD monitors, Plasma TVs and LCD TVs», California, 2004.

