ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΞΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Ποιοτικός και ποσοτικός προσδιορισμός βαρέων μετάλλων και βρωμιούχων επιβραδυντικών φλόγας σε απόβλητα κινητά τηλέφωνα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Μαραγκός

<u>Επιβλέπων καθηγητής:</u>
Ευάγγελος Γιδαράκος

Ιούνιος 2013

Στην μνήμη του πατέρα μου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Ποιοτικός & Ποσοτικός Προσδιορισμός Βαρέων Μετάλλων και Βρωμιούχων Επιβραδυντικών Φλόγας σε Απόβλητα Κινητά Τηλέφωνα» εκπονήθηκε στα πλαίσια της εκπαιδευτικής διαδικασίας του προπτυχιακού διπλώματος του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας έλαβε χώρα στα εργαστήρια Διαχείρισης Τοξικών και Επικίνδυνων Αποβλήτων του Πολυτεχνείου Κρήτης καθώς και στα εργαστήρια του Ινστιτούτου Τεχνολογίας Περιβάλλοντος και Ενέργειας του Πολυτεχνείου του Αμβούργου (Technische Universität Hamburg-Harburg), στα πλαίσια υφιστάμενης διεργαστηριακής συνεργασίας, υπό την εποπτεία και καθοδήγηση του καθηγητή κ. Wolfgang Calmano.

Την ανάθεση του θέματος, τον συντονισμό, καθώς και την επίβλεψη της παρούσας διπλωματικής διατριβής είχε ο κ. Ευάγγελος Γιδαράκος, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος και διευθυντής του Εργαστηρίου Διαχείρισης Τοξικών & Επικίνδυνων Αποβλήτων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θα ήθελα στο σημείο αυτό να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου προς τον κ. Ε. Γιδαράκο για τις πολύτιμες συμβουλές του, την αγαστή συνεργασία που είχαμε, τις εμπειρίες που αποκόμισα συνεργαζόμενος μαζί του, όπως και για τη δυνατότητα που μου παρείχε να πραγματοποιηθεί ένα μέρος της πτυχιακής μου διατριβής στο εξωτερικό.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον κ. W. Calmano για την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε. Σημαντικότατη υπήρξε συνάμα η βοήθεια, ουσιαστική καθοδήγηση και υποστήριξη του κ. Ιωάννη Χαχλαδάκη, υποψηφίου διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και βοηθού του κ. Γιδαράκου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ **1**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ **2**

Ευρετήριο Πινάκων, Εικόνων & Διαγραμμάτων **4**

ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΑ **6**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **7**

ABSTRACT **8**

ΓΕΝΙΚΑ **10**

1.1. Ορισμοί **10**

1.1.1. Απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού 10

1.1.2. Κινητό τηλέφωνο 18

1.2. Σύσταση κινητών τηλεφώνων και εξαρτημάτων **19**

1.2.1. Πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων 21

1.2.2. Πλαστικό περίβλημα 22

1.2.3. Οθόνη υγρών κρυστάλλων 24

1.2.4. Μπαταρίες 25

1.2.5. Λοιπά εξαρτήματα 26

1.3. Απόβλητα κινητά τηλέφωνα **27**

1.3.1. Συνδρομητές κινητών τηλεφώνων 27

1.3.2. Διείσδυση κινητών τηλεφώνων 28

1.3.3. Παραγόμενες ποσότητες αποβλήτων κινητών τηλεφώνων 30

1.4. Τοξικότητα περιεχομένου κινητών τηλεφώνων **33**

1.4.1. Βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας 33

1.4.2. Υδράργυρος 38

1.4.3. Βηρύλλιο 40

1.4.4. Μόλυβδος 41

1.4.5. Εξασθενές χρώμιο 43

1.4.6. Κάδμιο 44

1.4.7. Υγροί κρύσταλλοι 47

1.5. Διαχείριση αποβλήτων κινητών τηλεφώνων **48**

1.5.1. Αποσυναρμολόγηση για επαναχρησιμοποίηση 49

1.5.2. Επαναχρησιμοποίηση και ανακατασκευή 50

1.5.3. Ανακύκλωση 51

1.5.4. Απόρριψη με ΑΣΑ (υγειονομική ταφή και αποτέφρωση) 53

1.5.5. Συνέπειες ακατάλληλης διαχείρισης αποβλήτων 54

2.0. Στόχοι της εργασίας **58**

2.1. Προσδιορισμός των δειγμάτων **59**

2.2. Δειγματοληψία **61**

2.3. Προετοιμασία των δειγμάτων **62**

2.3.1. Αποσυναρμολόγηση κινητών τηλεφώνων και μείωση μεγέθους 62

2.3.1.1. Βάρος κινητών τηλεφώνων 62

2.3.1.2 Χρόνος αποσυναρμολόγησης κινητών τηλεφώνων 63

2.3.2. Μείωση μεγέθους με συσκευή ομογενοποίησης στερεών δειγμάτων 64

2.3.3 Χώνευση δειγμάτων 67

2.3.4 Εκχύλιση δειγμάτων με μέθοδο Soxhlet 67

2.4. Ανάλυση δείγματων με το ICP-MS **68**

2.5. Ανάλυση δειγμάτων με EDXRF **70**

3.0. Αποτελέσματα και συζήτηση 71
3.1. Αποτελέσματα ICP-MS 71
3.1.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων με TTLC 79
3.1.2. Σύγκριση με την βιβλιογραφία 83
3.1.3. Συνολική συγκέντρωση RoHS στοιχείων στα κινητά τηλέφωνα 85
3.2. Αποτελέσματα EDXRF 87
4.0. Συμπεράσματα 90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 94

Ευρετήριο Πινάκων, Εικόνων & Διαγραμμάτων

Πίνακας 1: *Κατηγορίες ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού σύμφωνα με την οδηγία 2002/96/ΕΚ [1,2]*..... 11
Πίνακας 2: Κατάλογος προϊόντων υπαγόμενων στις προαναφερθείσες κατηγορίες ηλεκτρικού & ηλεκτρονικού εξοπλισμού [1,2]..... 16
Πίνακας 3: Σύσταση ενός κινητού τηλεφώνου [9]..... 21
Πίνακας 4: Παραδείγματα προσθέτων σε πλαστικά υλικά [18]..... 24
Πίνακας 5: Περιεχόμενο των τριών τεχνολογιών επαναφορτιζόμενων μπαταριών [23]..... 26
Πίνακας 6: Παραγωγή αποβλήτων κινητών τηλεφώνων, συλλογή και απόρριψη ανά επιλεγμένη χώρα [6, 36-43]..... 31
Πίνακας 7: Φράσεις R,ιδιότητες και συγκεντρώσεις κατωφλιού για τον υδράργυρο [19]..... 39
Πίνακας 8: Φράσεις R, ιδιότητες και συγκεντρώσεις κατωφλιού για τα Be και BeO [19]..... 41
Πίνακας 9: Φράσεις R, ιδιότητες και συγκεντρώσεις κατωφλιού για το Cr(VI) [19]..... 44
Πίνακας 10: Φράσεις R, ιδιότητες και συγκεντρώσεις κατωφλιού των Cd, CdO και CdS [19]..... 46
Πίνακας 11: Φράσεις R, ιδιότητες και συγκεντρώσεις κατωφλιού των υγρών κρυστάλλων [68]..... 47
Πίνακας 12: Κατάταξη προμηθευτών κινητών τηλεφώνων και αριθμός επιλεχθέντων συσκευών (2002-2006) [82]..... 59
Πίνακας 13: Κατάταξη προμηθευτών κινητών τηλεφώνων (2007-2011) [82]..... 60
Πίνακας 14: Πλήθος κινητών τηλεφώνων ανά προμηθευτή (2007-2011)..... 60
Πίνακας 15: Εταιρεία, μοντέλο και έτος κατασκευής κινητών τηλεφώνων [83]..... 61
Πίνακας 16: Βάρος κινητών τηλεφώνων και μέσες τιμές ανά χρονικό διάστημα..... 63
Πίνακας 17: Χρόνος αποσυναρμολόγησης κινητών τηλεφώνων και μέσες τιμές ανά χρονικό διάστημα..... 64
Πίνακας 18: Συνθήκες λειτουργίας ICP-MS..... 70
Πίνακας 19: Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων (w.t%)..... 75
Πίνακας 20: Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα πλαστικών περιβλημάτων (ppm)..... 75
Πίνακας 21: Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα οθονών υγρών κρυστάλλων (ppm)..... 75
Πίνακας 22: Οριακές τιμές TTLC [85]..... 80
Πίνακας 23: *Ολική συγκέντρωση επιλεγμένων μετάλλων σε κινητά τηλέφωνα [86]*..... 83
Πίνακας 24: *Σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής με τη βιβλιογραφία*..... 84

Εικόνα 1: Εξέλιξη κινητών τηλεφώνων..... 19
Εικόνα 2: Διάγραμμα ροής της ανακύκλωσης πολύτιμων μετάλλων από απόβλητα κινητά τηλέφωνα [73]..... 52
Εικόνα 3: Απόβλητα κινητά τηλέφωνα σε μονάδα ανακύκλωσης..... 53
Εικόνα 4: Ανοιχτή καύση ΑΗΗΕ..... 54
Εικόνα 5: Ανεξέλεγκτη διάθεση ΑΗΗΕ..... 55
Εικόνα 6: Ανάκτηση χρυσού από απόβλητες PCB χρησιμοποιώντας λουτρά οξέων..... 56
Εικόνα 7: Συσκευή ομογενοποίησης Pulverisette 19, Fritsch και κυκλώνας Nabertherm..... 66
Εικόνα 8: Πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων, πλαστικό περίβλημα και οθόνη υγρών κρυστάλλων (α) ως εξαρτήματα, (β) μετά από την πρώτη μείωση μεγέθους και (γ) μετά την ομογενοποίηση..... 66
Εικόνα 9: Συσκευή εκχύλισης Behrotest SMA 12 με TRS 200..... 68
Εικόνα 10: α) Autosampler ASX-500, β) ICP-MS 7500cx, Agilent Technologies..... 69
Εικόνα 11: EDXRF, Oxford X-supreme 8000..... 70
Εικόνα 12: Οργανολογία και φάσμα μάζας του ICP-MS [84]..... 73
Εικόνα 13: Οργανολογία ενός τυπικού φασματόμετρου EDXRF [91]..... 88

Διάγραμμα 1: *Σύνθεση των ΑΗΗΕ ανά κατηγορία αυτών στη Δυτική Ευρώπη το έτος 2000 [3]*..... 12
Διάγραμμα 2: Σύσταση ενός τυπικού κινητού τηλεφώνου [9]..... 20
Διάγραμμα 3: Ποσοστά χρήσεις πλαστικών ανά κατηγορία ΗΗΕ [14]..... 23

Διάγραμμα 4: Συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως το χρονικό διάστημα 2002-2011 [25].... 28
Διάγραμμα 5: Διείσδυση κινητών τηλεφώνων την περίοδο 2002-2011 [27]. 29
Διάγραμμα 6: Παγκόσμιες πωλήσεις κινητών τηλεφώνων σε τελικούς χρήστες [24]. 30
Διάγραμμα 7: Χρήσεις βρωμιούχων επιβραδυντικών φλόγας σε ΗΗΕ [55]. 35
Διάγραμμα 8: Βασικά στάδια της πειραματικής διαδικασίας. 58
Διάγραμμα 9: Εύρος συγκεντρώσεων των στοιχείων Al, Fe, Ni kai Cu στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων. 76
Διάγραμμα 10: Εύρος συγκεντρώσεων των στοιχείων Cr, Zn, As, Cd, Sn, Hg και Pb στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων. 77
Διάγραμμα 11: Εύρος συγκεντρώσεων των στοιχείων Cr, Ni, Zn, Cd, Hg και Pb στα δείγματα πλαστικών περιβλημάτων..... 78
Διάγραμμα 12: Εύρος συγκεντρώσεων των στοιχείων Cr, Ni, Zn, Cd, Hg και Pb στα δείγματα οθονών υγρών κρυστάλων. 79
Διάγραμμα 13: Συγκεντρώσεις στοιχείων στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων 2002-2006 και 2007-2011. 81
Διάγραμμα 14: Συγκεντρώσεις στοιχείων στα δείγματα πλαστικών περιβλημάτων 2002-2006 και 2007-2011. 81
Διάγραμμα 15: Συγκεντρώσεις στοιχείων στα δείγματα οθονών υγρών κρυστάλλων 2002-2006 και 2007-2011..... 82
Διάγραμμα 16: Συνολικές συγκεντρώσεις Cd στα δείγματα (ppm)..... 85
Διάγραμμα 17: Συνολικές συγκεντρώσεις Hg στα δείγματα (ppm). 86
Διάγραμμα 18: Συνολικές συγκεντρώσεις Cd στα δείγματα (ppm)..... 86
Διάγραμμα 19: Συνολικές συγκεντρώσεις Cd στα δείγματα (ppm)..... 87
Διάγραμμα 20: Συγκεντρώσεις PBB στα δείγματα. 89

ΑΡΤΙΚΟΛΕΞΑ

Ελληνικά
ΑΗΗΕ: απόβλητα ηλεκτρικού & ηλεκτρονικού εξοπλισμού
ΗΗΕ: ηλεκτρικός & ηλεκτρονικός εξοπλισμός

Ξενόγλωσσα
AAS: φασματομετρία ατομικής εκπομπής (atomic absorption spectrometry)

BFR: βρωμιωμένο επιβραδυντικό φλόγας (brominated flame retardant)

CE: καταναλωτικά είδη (consumer equipment)

EDXRF: φασματομετρία διασποράς ενέργειας φθορισμού ακτινών X (energy dispersive x-ray fluorescence)

E&E Tools: ηλεκτρικά & ηλεκτρονικά εργαλεία (electrical & electronic tools)

EEE: ηλεκτρικός & ηλεκτρονικός εξοπλισμός (electrical & electronic equipment)

BFR: βρωμιούχο επιβραδυντικό φλόγας (brominated flame retardant)

ICT: εξοπλισμός πληροφορικής & τηλεπικοινωνιών (information technology & telecommunications equipment)

ICP-MS: φασματομετρία μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (Inductively coupled plasma mass spectrometry)

IEC: χρωματογραφία ιοντοεναλλαγής (ion exchange chromatography)

Large HH: μεγάλες οικιακές συσκευές (large household appliances)

LCD: οθόνη υγρών κρυστάλλων (liquid crystals display)

Lighting: φωτιστικά είδη (lighting equipment)

M&C: όργανα παρακολούθησης & ελέγχου (monitoring & control instruments)

Medical equipment: ιατροτεχνολογικές συσκευές (medical devices)

MSW: οικιακά στερεά απόβλητα (municipal solid waste)

PBB: πολυβρωμιωμένο διφαινύλιο (polychlorinated biphenyl)

PBDE: πολυβρωμιωμένος διφαινυλαιθέρας (polybrominated diphenylethers)

PCB: πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων (printed circuit board)

PH: πλαστικό περίβλημα (plastic housing)

RoHS: περιορισμός της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών (restriction on the use of certain hazardous substances)

Small HH: μικρές οικιακές συσκευές (small household appliances)

sWEEE: μικρά απόβλητα ηλεκτρικού & ηλεκτρονικού εξοπλισμού (small waste electrical & electronic equipment)

Toys: παιχνίδια, εξοπλισμός ψυχαγωγίας & αθλητισμού (toys, leisure & sports equipment)

WEEE: απόβλητα ηλεκτρικού & ηλεκτρονικού εξοπλισμού (waste electrical & electronic equipment)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη του τομέα πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών και η διεύρυνση της αγοράς του οδήγησε στην παραγωγή μεγάλων και διαρκώς αυξανόμενων ποσοτήτων αποβλήτων κινητών τηλεφώνων. Το περιεχόμενό τους σε βαρέα και πολύτιμα μέταλλα καθώς και σε επικίνδυνες και τοξικές ουσίες δύναται να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία και να προκαλέσουν περιβαλλοντική ρύπανση, εάν στο τέλος του κύκλου ζωής τους δεν διαχειριστούν κατάλληλα και καταλήξουν σε χώρους υγειονομικής ταφής και αποτεφρωτήρες.

Στην παρούσα εργασία περιγράφονται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα μιας ενδελεχούς εξέτασης η οποία σαν αντικείμενό της είχε τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των σπουδαιότερων βαρέων μετάλλων και των βρωμιούχων επιβραδυντικών φλόγας σε απόβλητα κινητά τηλέφωνα, τα οποία κατασκευάστηκαν την τελευταία δεκαετία.

Αρχικά, οι συσκευές κινητών τηλεφώνων διαχωρίστηκαν σε αυτές που κατασκευάστηκαν πριν την εφαρμογή της οδηγίας RoHS και σε αυτά μετά την έναρξη της ισχύς της. Σαν πρώτο βήμα μετρήθηκαν φυσικές και λειτουργικές παράμετροι, οι οποίες δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια διαχωρισμού ανάλογων αυτοματοποιημένων διεργασιών αλλά και κατέχουν ιδιαίτερη σημασία κατά το στάδιο της ανακύκλωσής τους. Προσδιορίσθηκε επίσης το περιεχόμενο στα σπουδαιότερα βαρέα μέταλλα (Hg, Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Al, Cu, As, Sn, Cr) αλλά και στα βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας στα σημαντικότερα κατασκευαστικά στοιχεία των κινητών τηλεφώνων – πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων, πλαστικών περιβλημάτων και οθονών υγρών κρυστάλλων - ποιοτικά και ποσοτικά μέσω φασματομετρίας μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος και φασματοσκοπία ενεργούς διασποράς φθορισμού ακτίνων Χ, αντίστοιχα.

Εξήχθησαν επίσης συμπεράσματα που αφορούν στην ανάπτυξη υποδομής και την εφαρμογή στην πράξη της Οδηγίας 2002/96/ΕΚ, σε σχέση με τη διαχείριση και ανακύκλωση αποβλήτων κινητών τηλεφώνων.

Εν κατακλείδι, θεωρείται ότι η παρούσα διατριβή κατέχει εξέχουσα σημασία λόγω της κάλυψης μεγάλου μέρους του υφιστάμενου βιβλιογραφικού κενού αναφορικά με τα παραπάνω.

ABSTRACT

Twenty four waste cellular phones, manufactured between 2002 and 2011, were selected in order to determine the total heavy metal content in each of their parts (printed circuit boards (PCBs), plastic housing (PH) and liquid crystal display monitors (LCDs)) and compare the results with the permissible limits set by the RoHS Directive, 2003. All the selected samples were pulverized and digested with strong acids. Inductively coupled plasma-mass spectrometry was used to measure the heavy metal content in each sample. The results revealed that concentration levels of the examined heavy metals were higher in PCBs, followed by PH and LCD in that particular order (PCB>PH>LCD). With the exception of Pb and Cr present in PCBs of mobile phones released before the year 2006, all the other metal concentrations were according to the Directive. Concentration levels of Cd, Hg were lower than the permissible limits set by the EU, either before or after the validity of the Restriction of Hazardous Substances (RoHS) Directive. Considering their significant heavy metal content, coupled with their large quantities produced worldwide in an annual rate, waste cellular phones need to be treated under an environmentally sound management scheme, prioritizing recycling and at the same time eliminating the possibility of any harm.

ΕΝΟΤΗΤΑ 1Η

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΓΕΝΙΚΑ

1.1. Ορισμοί

1.1.1. Απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού

Ο όρος Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) ή Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) αναφέρεται σε ένα ευρύτατο φάσμα υλικών και περιλαμβάνει τις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες έχουν ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής τους και έχουν πάψει να έχουν οποιαδήποτε αξία για τον ιδιοκτήτη-χρήστη τους. Ουσιαστικά πρόκειται για το πιο πολύπλοκο ρεύμα στερεών αποβλήτων. Η πολυπλοκότητα του οφείλεται στην μεγάλη ποικιλία υλικών που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για την παραγωγή ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΗΗΕ) ή Electric and Electronic Equipment (EEE), στην παρουσία επικίνδυνων ουσιών που περιέχονται στα κατασκευαστικά τους στοιχεία καθώς και στο μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών προϊόντων. Είναι σημαντικό να δοθούν οι ορισμοί για τους δύο παραπάνω όρους, όπως αυτοί καθορίζονται από την Οδηγία 2002/96 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 27ης Ιανουαρίου 2003 σχετικά με τα απόβλητα ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) και του προεδρικού διατάγματος 117 (ΦΕΚ 82/Α/5.3.04).

- *«Ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός» ή «ΗΗΕ»*: ο εξοπλισμός η ορθή λειτουργία του οποίου εξαρτάται απο 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» ή «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].

Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι 10 κατηγορίες οι οποίες απαρτίζουν τον ΗΗΕ, όπως αυτές αναφέρονται στην Οδηγία 2002/96/ΕΚ, και στο Π.Δ. 117 (ΦΕΚ 82/Α/5.3.04), παράρτημα ΙΑ.

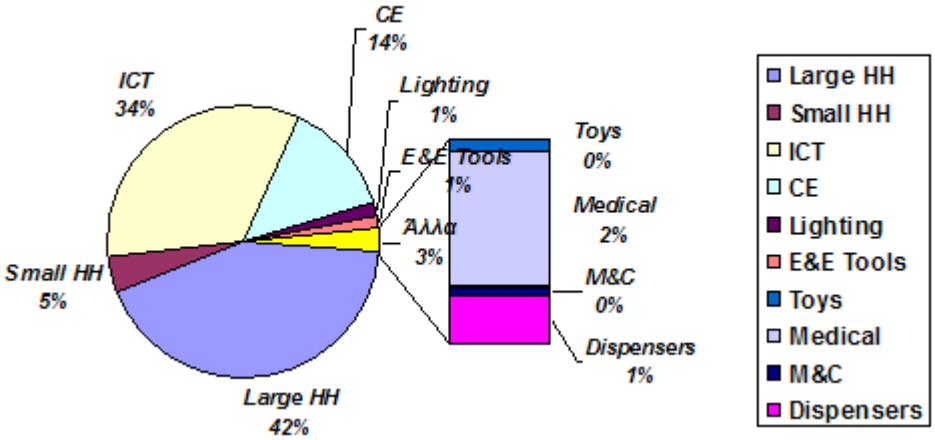
***Πίνακας 1*:** *Κατηγορίες ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού σύμφωνα με την οδηγία 2002/96/ΕΚ [1,2].*

No.	***Κατηγορία***	***Συντομογραφία***
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

Κάθε υποκατηγορία του ανωτέρω πίνακα περιλαμβάνει ποικίλα προϊόντα τα οποία στο τέλος του κύκλου ζωής των καθίστανται ΑΗΗΕ. Στον Πίνακα 2 που ακολουθεί καταγράφεται και παρουσιάζεται το σύνολο των προϊόντων αυτών που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, βάσει των παραρτημάτων ΙΒ, της Οδηγίας 2002/96/ΕΚ και του προεδρικού διατάγματος 117/2004/Α-82.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί με στόχο την ταυτοποίηση της σύστασης του μίγματος των ΑΗΗΕ, ειδικά σε σχέση με τις ανωτέρω προαναφερθείσες κατηγορίες προϊόντων από τις οποίες συνίσταται. Συνήθως τα ΑΗΗΕ αποτελούνται από

απορριπτόμενες μεγάλες ηλεκτρικές συσκευές (ψυγεία, πλυντήρια κ.α.) και εξοπλισμό πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών (Η/Υ, κινητά τηλέφωνα κ.α.). Από την άλλη, τα αποτελέσματα που προέρχονται από πιλοτικά προγράμματα που διεξήχθησαν σε διάφορα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα, καθότι συνήθως στόχευαν στη συλλογή και αξιοποίηση συγκεκριμένων ΑΗΗΕ. Πάντως, οι τέσσερις πρώτες κατηγορίες ΑΗΗΕ (και δη οι μεγάλες οικιακές συσκευές και ο εξοπλισμός πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών) αναφέρεται ότι συνιστούν σχεδόν το 95% της συνολικής παραγόμενης ποσότητας ΑΗΗΕ στη Δυτική Ευρώπη [3] (βλ. π.χ. Διάγραμμα 1) και το Ηνωμένο Βασίλειο [4]. Για επιπλέον στοιχεία τα οποία αφορούν τις χώρες Ελβετία, Γερμανία και Η.Π.Α., ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αναφορά [5], όπου σημειώνεται ότι η κατηγοριοποίηση του ΗΗΕ είναι διαφορετική σε σχέση με αυτήν που προτείνεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση.



Διάγραμμα 1: *Σύνθεση των ΑΗΗΕ ανά κατηγορία αυτών στη Δυτική Ευρώπη το έτος 2000 [3].*

Στο σημείο αυτό, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αποσαφηνιστούν ορισμένοι όροι που σχετίζονται με τη διαχείριση των ΑΗΗΕ. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα κυρίως με τα άρθρα 3 της οδηγίας 2002/96/ΕΚ και του προεδρικού διατάγματος 177/2004/Α-82, οι κάτωθι έννοιες ορίζονται ως εξής [1,2]:

- ✓ ***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 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***: οποιαδήποτε 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 επανεπεξεργασία, 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***: οποιαδήποτε εφαρμόσιμη ενέργεια που αναφέρεται στο παράρτημα ΙΙ 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***: οποιαδήποτε εφαρμόσιμη ενέργεια που αναφέρεται στο παράρτημα ΙΙ Α της Οδηγίας 75/442/ΕΟΚ ή οποιαδήποτε από τις εργασίες που περιγράφονται στο παράρτημα IV Α του άρθρου 17 της 50910/2727/2003 ΚΥΑ.

- ✓ ***Επεξεργασία***: οποιαδήποτε δραστηριότητα μετά την παράδοση των ΑΗΗΕ σε μονάδα απορρύπανσης, αποσυναρμολόγησης, τεμαχισμού, αξιοποίησης ή προετοιμασίας για διάθεση, καθώς και οποιαδήποτε 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***: οποιοδήποτε 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 20^{ης} 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:

  i. κατασκευάζει και πωλεί ΗΗΕ με τη μάρκα του,
  ii. 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
  iii. 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)*: οποιοσδήποτε 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.α., $1^{η}$ κατηγορία ΗΗΕ).

- ✓ ***Καφέ αγαθά*** *(brown goods):* καταναλωτικά είδη (τηλεοράσεις, στερεοφωνικά κ.α. $4^{η}$ κατηγορία ΗΗΕ).

- ✓ ***B2B*** *(Business to Business):* ΑΗΗΕ μη οικιακής προέλευσης

E*-waste** ή σπανιότερα και ***e-junk: ηλεκτρονικά απόβλητα, απόβλητος εξοπλισμός πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών και απόβλητα καταναλωτικά είδη, ήτοι η $3^{η}$ (ICT) και $4^{η}$ (CE) κατηγορία ΗΗΕ, αντίστοιχα. Πάντως, ως όρος ταυτίζεται συχνότατα με τα ΑΗΗΕ σε πληθώρα πηγών.

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

1. Large HH	***2. Small HH***	***3. ICT***	***4. CE***	***5. Lighting***
1. Μεγάλες συσκευές ψύξης *2.* Ψυγεία *3.* Καταψύκτες *4.* Λοιπές μεγάλες συσκευές που χρησιμοποιούνται για διατήρηση και αποθήκευση τροφίμων *5.* Πλυντήρια ρούχων *6.* Στεγνωτήρια ρούχων *7.* Πλυντήρια πιάτων *8.* Συσκευές μαγειρικής *9.* Ηλεκτρικές κουζίνες *10.* Ηλεκτρικά μάτια *11.* Φούρνοι μικροκυμάτων *12.* Άλλες μεγάλες συσκευές που χρησιμοποιούνται για μαγείρεμα & άλλες επεξεργασίες τροφίμων *13.* Ηλεκτρικές θερμάστρες *14.* Ηλεκτρικά θερμαντικά σώματα (ηλεκτρικά καλοριφέρ) *15.* Άλλες μεγάλες συσκευές χρησιμοποιούμενες για τη θέρμανση χώρων, κρεβατιών, καθισμάτων *16.* Ηλεκτρικοί ανεμιστήρες *17.* Συσκευές κλιματισμού *18.* Άλλα είδη εξοπλισμού αερισμού, απαγωγής αερίων και κλιματισμού	*1.* Ηλεκτρικές σκούπες *2.* Σκούπες χαλιών *3.* Άλλες συσκευές καθαριότητας *4.* Συσκευές χρησιμοποιούμενες για ράψιμο, πλέξιμο, ύφανση & άλλες κλωστοϋφαντουργικές εργασίες *5.* Ηλεκτρικά σίδερα και άλλες συσκευές για το σιδέρωμα, το μαγγάνισμα και εν γένει τη φροντίδα των ρούχων *6.* Φρυγανιέρες *7.* Συσκευές τηγανίσματος (φριτέζες) *8.* Μύλοι, καφετιέρες και συσκευές ανοίγματος ή σφραγίσματος περιεκτών ή συσκευασιών *9.* Ηλεκτρικά μαχαίρια *10.* Συσκευές κοπής και στεγνώματος μαλλιών, βουρτσίσματος δοντιών, ξυρίσματος, μασάζ και άλλες συσκευές περιποίησης του σώματος *11.* Ρολόγια και εξοπλισμός μέτρησης, αναγραφής ή καταγραφής χρόνου *12.* Ζυγαριές	Συγκεντρωτική επεξεργασία δεδομένων: *1.* Μεγάλοι υπολογιστές (mainframes) *2.* Μεσαίοι υπολογιστές (mini computers) *3.* Μονάδες εκτύπωσης Συστήματα προσωπικών υπολογιστών: *4.* Προσωπικοί υπολογιστές (συμπεριλαμβανομένων των κεντρικών μονάδων επεξεργασίας (CPU), των ποντικιών, των οθονών & των πληκτρολογίων) *5.* Φορητοί υπολογιστές (lap-top), συμπεριλαμβανομένων των CPU, ποντικιών, οθονών & πληκτρολογίων) *6.* Υπολογιστές τσέπης (notebook) *7.* Υπολογιστές χειρός (notepad) *8.* Εκτυπωτές *9.* Φωτοαντιγραφικά μηχανήματα *10.* Ηλεκτρικές & ηλεκτρονικές γραφομηχανές *11.* Αριθμομηχανές τσέπης & επιτραπέζιες *12.* Άλλα προϊόντα και είδη εξοπλισμού για τη συλλογή, αποθήκευση, επεξεργασία, παρουσίαση ή διαβίβαση πληροφοριών με ηλεκτρονικά μέσα *13.* Τερματικά & συστήματα χρηστών *14.* Συσκευές τηλεομοιοτυπίας (φαξ) *15.* Τηλέτυπα *16.* Τηλέφωνα *17.* Τηλεφωνικές συσκευές	*1.* Ραδιόφωνα *2.* Τηλεοράσεις *3.* Κάμερες μαγνητοσκόπησης (βιντεοκάμερες) *4.* Μαγνητοσκόπια (συσκευές αναπαραγωγής εικόνας) *5.* Συσκευές ηχογράφησης υψηλής πιστότητας *6.* Ενισχυτές ήχου *7.* Μουσικά όργανα *8.* 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	*1.* Φωτιστικά για λαμπτήρες φθορισμού πλην των οικιακών φωτιστικών σωμάτων *2.* Ευθείς λαμπτήρες φθορισμού *3.* Λαμπτήρες φθορισμού μικρών διαστάσεων *4.* Λαμπτήρες εκκενώσεως υψηλής ένταση, συμπεριλαμβανομένων των λαμπτήρων νατρίου υψηλής πίεσης και των λαμπτήρων αλογονούχων μετάλλων *5.* Λαμπτήρες νατρίου χαμηλής πίεσης *6.* Άλλος φωτιστικός εξοπλισμός και εξοπλισμός προβολής ή ελέγχου του φωτός πλην των λαμπτήρων πυρακτώσεως

		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 τόρνευση, τη 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 επεξεργασίας υγρών ή αέριων ουσιών με άλλα μέσα. 8. Εργαλεία κοπής χόρτου ή άλλων εργασιών κηπουρικής	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 *in- vitro* 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 οποιουδήποτε προϊόντος

Ειδικότερα, τα απόβλητα που προέρχονται από τον εξοπλισμό πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών έχουν ιδιαίτερη σημασία για το συνολικό ρέυμα ΑΗΗΕ. Εκτός από την υψηλή συνεισφορά τους σε αυτό, διαθέτουν χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν από τις υπόλοιπες κατηγορίες ΑΗΗΕ. Η ταχεία καινοτομία στον σχεδιασμό και στην λειτουργία, η μεγάλη διείσδυση της πληροφορικής και οι διαρκώς μεγαλύτερες ανάγκες μας για υπολογιστική ισχύ καθιστούν πολύ μικρό τον κύκλο ζωής αυτού του εξοπλισμού τους, με συνεχώς μεγαλύτερες τάσεις μείωσης. Παράλληλα, η μεγάλη εισροή ποσοτήτων εξοπλισμού πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών σε παγκόσμιο επίπεδο αλλά και οι υψηλοί ρυθμοί αύξησης της χρήσης του στις αναπτυσσόμενες χώρες, συνιστούν την παραγωγή ακόμη μεγαλύτερων ποσοτήτων ΑΗΗΕ προερχομένων από τον συγκεκριμένο τομέα. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα της 3^{ης} κατηγορίας ΑΗΗΕ, έτσι όπως ορίζεται από την Οδηγία 2002/96/ΕΚ, αποτελούν τα κινητά τηλέφωνα.

1.1.2. Κινητό τηλέφωνο

Ένα κινητό τηλέφωνο είναι μια συσκευή που μπορεί να πραγματοποιεί και να δέχεται τηλεφωνικές κλήσεις μέσω ραδιοζεύξης, χρησιμοποιώντας τεχνολογία κυψελών (cells) εκπέμποντας σε υψηλές συχνότητες, ενώ κινείται γύρω από μια ευρεία γεωγραφική περιοχή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη σύνδεση σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας που παρέχεται από έναν φορέα εκμετάλλευσης κινητών τηλεφώνων, επιτρέποντας την πρόσβαση στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο. Αντίθετα, ένα ασύρματο τηλέφωνο χρησιμοποιείται μόνο εντός του μικρού φάσματος ενός μόνο, ιδιωτικού σταθμού βάσης [6]. Εκτός από την τηλεφωνία, τα σύγχρονα κινητά τηλέφωνα υποστηρίζουν μια ποικιλία υπηρεσιών όπως η ανταλλαγή μηνυμάτων κειμένου (*SMS*), ανταλλαγή μηνυμάτων πολυμέσων (*MMS*), το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (email), πρόσβαση στο ίντερνετ, μικρής εμβέλειας ασύρματη επικοινωνία (υπέρυθρες, Bluetooth), επιχειρηματικές εφαρμογές, παιχνίδια και λήψη φωτογραφιών. Τα κινητά τηλέφωνα που προσφέρουν όλες τις παραπάνω και γενικότερα υπολογιστικές δυνατότητες, ονομάζονται και «έξυπνα» τηλέφωνα (smart phones). Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η εξέλιξη των κινητών τηλεφώνων από την δεκαετία του ‘80 μέχρι σήμερα.

Εικόνα 1: *Εξέλιξη κινητών τηλεφώνων.*

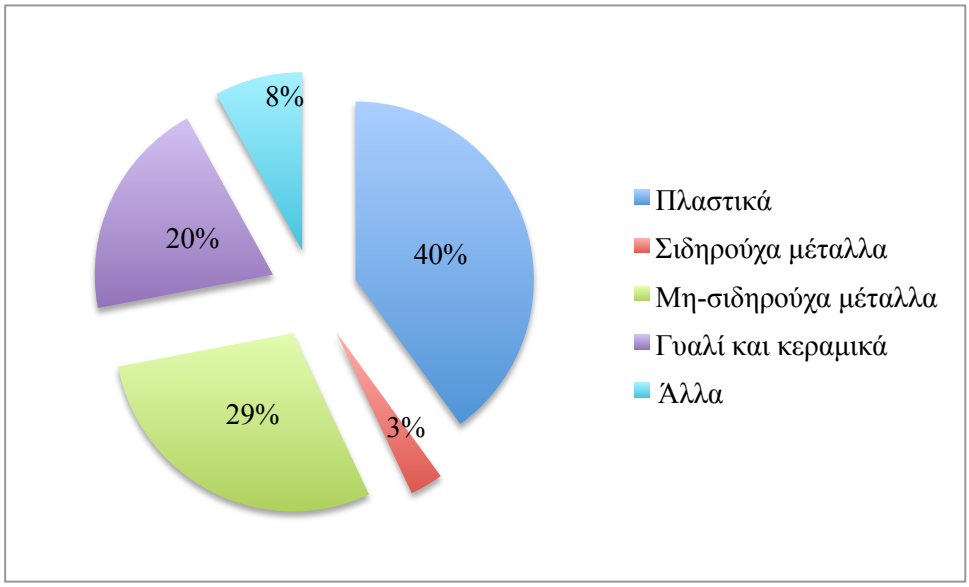
1.2. Σύσταση κινητών τηλεφώνων και εξαρτημάτων

Όπως σε όλα τα είδη ΗΗΕ, έτσι και στην περίπτωση των κινητών τηλεφώνων υπάρχουν πολλά διαφορετικά μοντέλα και καθένα από αυτά μπορεί να περιέχει διαφορετικά εξαρτήματα με συνέπεια να έχουν και διαφορετικές απαιτήσεις στην αποσυναρμολόγηση και την ανακύκλωσή τους. Μία τυπική συσκευή κινητού τηλεφώνου αποτελείται από 500-1000 εξαρτήματα, εκ των οποίων τα περισσότερα κατασκευάζονται από μια μεγάλη ποικιλία υλικών και ουσιών [7]. Παραδείγματος χάριν, το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων ή Europe Telecommunication Standards Institute έχει καταγράψει παραπάνω από 1800 διαφορετικά μοντέλα κινητών τηλεφώνων, συναρμολογημένα από περισσότερους από 50 κατασκευαστές [8]. Ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητά τους και το πλήθος των κατασκευαστών, συνήθως, ένα κινητό τηλέφωνο αποτελείται από τα παρακάτω:

1. Ηλεκτρονικό κύκλωμα-μία πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων (printed wiring board, PWB ή printed circuit board, PCB), η οποία αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή, έναν ψηφιακό επεξεργαστή σήματος, μία μόνο για ανάγνωση μικροπλακέτα μνήμης (read-only memory chip) και μία μικροπλακέτα μνήμης (flash memory chip), στα οποία βρίσκονται συνδεδεμένα, ένα μικρό μικρόφωνο και ένα μικρό ηχείο.
2. Μία κεραία, η οποία μερικές φορές βρίσκεται μέσα στο ηλεκτρονικό κύκλωμα.
3. Μία οθόνη-τεχνολογίας υγρών κρυστάλλων (liquid crystal display, LCD) και γυαλί.

4. Μία μπαταρία-τεχνολογίας είτε νικελίου-καδμίου, είτε νικελίου-υδριδίου μετάλλου ή τελευταίας τεχνολογίας μπαταρία ιόντων λιθίου/πολυμερών, σφραγισμένη μέσα στην δική της θήκη.
5. Μία θήκη-περίβλημα που συκρατεί όλα τα εξαρτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, από πλαστικό ενώ σε μερικές συσκευές συνυπάρχει με μεταλλική επίστρωση ή επένδυση.
6. Μια σύνδεση ή βάση για φορτιστή-ένας μικρός μετασχηματιστής χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος, καλώδια, πλαστικό, με χαλκό στα σημεία σύνδεσης χρησιμοποιούνται για την επαναφόρτιση της μπαταρίας.

Κανένα από τα παραπάνω εξαρτήματα δεν διαφέρουν από αυτά άλλων ηλεκτρονικών συσκευών, όπως υπολογιστές και φορητές καταναλωτικές συσκευές, είτε στον τρόπο κατασκευής είτε στα στοιχεία που περιέχουν, εκτός από το ότι έχουν μικρότερο μέγεθος. Τα συγκεκριμένα εξαρτήματα αποτελούνται από πολλά είδη πλαστικών, σιδηρούχα και μη-σιδηρούχα μέταλλα, κεραμικά και άλλες ουσίες, όπως οι υγροί κρύσταλλοι. Η σύνθεση ενός τυπικού κινητού τηλεφώνου παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.



Διάγραμμα 2: *Σύσταση ενός τυπικού κινητού τηλεφώνου [9].*

Όπως προαναφέρθηκε, τα κινητά τηλέφωνα διαφέρουν από κατασκευαστή σε κατασκευαστή και από μοντέλο σε μοντέλο, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τα υλικά και οι ουσίες που συναντώνται σε μία συσκευή να είναι διαφορετικά από αυτά που υπάρχουν σε μία άλλη. Ο Πίνακας που ακολουθεί αποτελεί μια πιο αναλυτική εκδοχή του Διαγράμματος 2 και παρουσιάζει τα κύρια, ήσσονος σημασίας και πολυ μικρά

συστατικά των κινητών τηλεφώνων (δεν περιέχονται όλες οι ουσίες που περιγράφονται σε όλα τα κινητά τηλέφωνα-για παράδειγμα, η μπαταρία ενδέχεται να είναι τεχνολογίας νικελίου-υδριδίου μετάλλου ή ιόντων λιθίου – έτσι το άθροισμα των ποσοστών δεν είναι 100%).

Πίνακας 3: *Σύσταση ενός κινητού τηλεφώνου [9].*

Συστατικά	**Ποσοστά**
Πλαστικά	40%
Γυαλί και κεραμικά	20%
Χαλκός και ενώσεις	10%
Νικέλιο και ενώσεις	10%
Υδροξείδιο καλίου	4%
Κοβάλτιο	5%
Άνθρακας	4%
Αλουμίνιο	3%
Ατσάλι, σιδηρούχα μέταλλα	3%
Κασσίτερος	1%
Ήσσονος σημασίας συστατικά (Br, Cd, Cr, Li, Pb, Mn, Ag, Ta, Ti, W, Zn)	<1%
Μικρο-συστατικά (Sb, As, Ba, Be, Bi, Ca, F, Ga, Au, Mg, Pd, Ru, Sr, S, Y, Zr)	<0.1%

Όμως, η σύσταση και το περιεχόμενο των κινητών τηλεφώνων επηρεάζεται και από τη συνεχή τεχνολογική βελτίωσή τους αλλά και την ανάγκη για υποστήριξη όλο και περισσότερων εφαρμογών και λειτουργιών. Ήδη τα χαρακτηριστικά μιας συσκευής έχουν υποστεί μεταβολές απαιτώντας μεγαλύτερες οθόνες ενώ το βάρος και το μέγεθος μια συσκευής έχει αυξηθεί και υπάρχουν ενδείξεις ότι στο μέλλον αναμένεται να αυξηθουν περισσότερο[10].

1.2.1. Πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων

Η πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων (Printed Circuit Board, PCB ή Printed Wiring Board, PWB) αποτελεί τον εγκέφαλο του κινητού τηλεφώνου, ελέγχοντας και συντονίζοντας όλες τις λειτουργίες του. Η μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και αντίστροφα, ο χειρισμός του πληκτρολογίου και της οθόνης, ο έλεγχος σηματοδότησης στο σταθμό βάσης αλλά και η παροχή μνήμης για το λειτουργικό σύστημα είναι μερικές από τις εφαρμογές της.

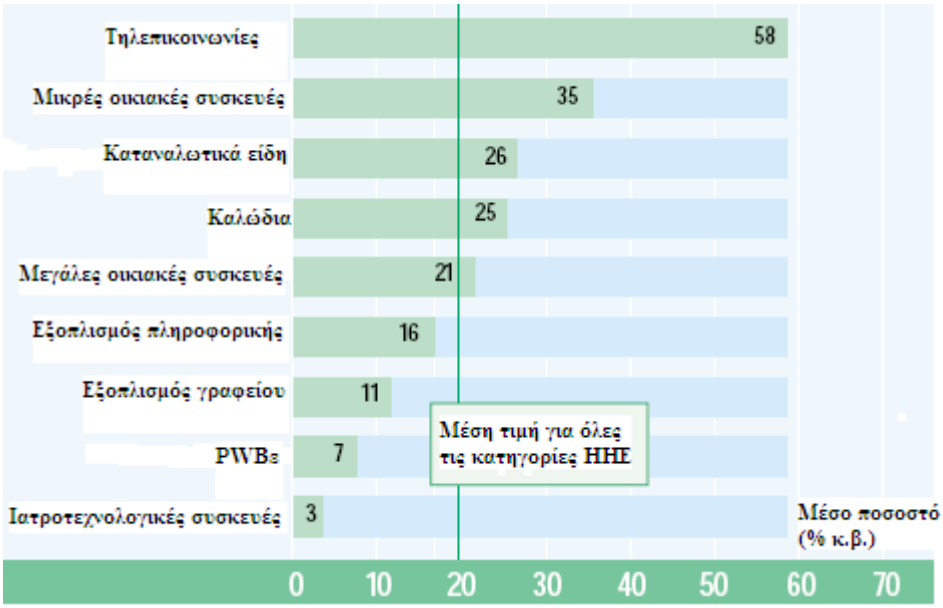
Μία πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων αντιπροσωπεύει το 20-35% του βάρους ενός κινητού τηλεφώνου [11] και αποτελείται από το μη-αγώγιμο υπόστρωμα ή έλασμα, από τους αγωγούς τυπωμένων κυκλωμάτων που βρίσκονται επάνω ή εντός του

υποστρώματος και τα εξαρτήματα που είναι τοποθετημένα πάνω σε αυτό (τσίπς ή κυκλώματα, πυκνωτές, σύνδεσμοι, επεξεργαστές κ.α.). Τα είδη των πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται σε είδη ΗΗΕ είναι οι πλακέτες μονής όψεος, διπλής όψεος και πολλαπλών στρωμάτων και η κατηγοριοποίησή τους εξαρτάται από τα υλικά και τον τρόπο κατασκευής των καρτών τυπωμένων κυκλωμάτων, δηλαδή του υποστρώματος και των αγωγών. Στη περίπτωση των κινητών τηλεφώνων οι κάρτες τυπωμένων κυκλωμάτων, είναι συνήθως πλακέτες πολλαπλών στρωμάτων και συγκεκριμένα τύπου FR-4 κατασκευασμένες από εποξειδωτική ρητίνη, ίνες γυαλιού και χαλκό υψηλής καθαρότητας [12.]. Μία PCB, μαζί με τα εξαρτήματα που έχουν συγκολληθεί σε αυτή, εκτός από μέταλλα με υψηλή οικονομική αξία (χαλκός, παλλάδιο, άργυρος, χρυσό) περιέχει και στοιχεία συμπεριλαμβανομένων μεταξύ άλλων του γαλλίου, βηρυλλίου, ινδίου, τιτανίου, πυριτίου, γερμανίου, αρσενικού, τα οποία εντοπίζονται στα τσίπς και τους ημιαγωγούς. Επίσης, το συγκολητικό υλικό που χρησιμοποιείται για τους αγώγιμες συνδέσεις των εξαρτημάτων με το υπόστρωμα, μπορεί να περιέχει μόλυβδο, κασσίτερο, κάδμιο και άργυρο. Πιθανή είναι και η ύπαρξη βρωμίου και ενώσεών του καθώς χρησιμοποιούνται ως επιβραδυντικά φλόγας (βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας ή Brominated Flame Retardants, BFRs).

Σε γενικές γραμμές, η μέση κατανομή αυτών των υλικών κατά βάρος είναι περίπου 30% πολυμερή (κυρίως εποξειδοτικά και πολυεστέρες), 30% πυρίμαχα οξείδια (κυρίως πυρίτιο, αλούμινα και οξείδια σπάνιων γαιών) και 40% μέταλλα (χαλκός, σίδηρος, κασσίτερος, νικέλιο, μόλυβδος, αλουμίνιο, χρυσός, ασήμι, κ.α.) [13].

1.2.2. Πλαστικό περίβλημα

Τα πλαστικό περίβλημα ενός κινητού τηλεφώνου συγκρατεί τα υπόλοιπα εξαρτήματα του και δημιουργεί ένα προστατευτικό κέλυφος. Κατέχει μεγάλο μέρος των κινητών τηλεφώνων, αντιπροσωπεύοντας το 15-55% του βάρους μιας συσκευής χωρίς την μπαταρία. Στη συνέχεια στο Διάγραμμα 3 παρατίθεται μια εκτίμηση του ποσοστού που καταλαμβάνουν τα πλαστικά επί της σύστασης των ΗΗΕ, ανά κατηγορία [14]. Όπως διαφαίνεται, η ευρύτερη χρήση λαμβάνει χώρα στην ICT κατηγορία και συγκεκριμένα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών.



Διάγραμμα 3: *Ποσοστά χρήσεις πλαστικών ανά κατηγορία ΗΗΕ [14].*

Συνεπεία επίσης των ποικίλων εφαρμογών, εμφανίζεται μια πληθώρα χρησιμοποιούμενων τύπων πλαστικών, όπου εκτιμάται ότι ανέρχονται σε περίπου 70 [14]. Όμως, τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κινητών τηλέφώνων είναι κυρίως το πολυανθρακικό (polycarbonate, PC), το στυρένιο ακρυλονιτριλίου βουταδιενίου (acrylonitrile butadiene styrene, ABS) ή συνδιασμός αυτών των δύο [6].

Ένα επιπλέον μείζονος σημασίας ζήτημα όσον αφορά τα πλαστικά περιβλήματα αποτελεί η μεγάλη πληθώρα προσθέτων που δύνανται να περιέχουν π.χ. επιβραδυντικά φλόγας, σταθεροποιητές, πιγμέντα, πλαστικοποιητές κτλ. στα οποία αναφέρονται αρκετές μελέτες [15, 16, 17]. Μέσω της προσθήκης των δύνανται να μεταβληθούν προς την επιθυμητή κατεύθυνση οι μηχανικές, φυσικοχημικές και οπτικές ιδιότητες των παραγόμενων πολυμερών. Μερικά εκ των κυριοτέρων αυτών προσθέτων παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα 4.

Πίνακας 4: *Παραδείγματα προσθέτων σε πλαστικά υλικά [18].*

Πιγμέντα	λευκό	TiO_2, ZnO, ZnS
	μαύρο	Fe_3O_4, $Cu(Cr,Fe)_2O_4$
	κόκκινο	Fe_2O_3, Cd(Se,S)
	κίτρινο	$(Ti,Ba,Sb)O_2$, $(Ti,Ni,Sb)O_2$, (Cd,Zn)S, $PbCrO_4$
	μπλε	(Co,Al,Cr)O
	πράσινο	Cr_2O_3, (Co,Al,Ti,Ni,Zn)O
Επιβραδυντικά φλόγας	οργανικά	Ενώσεις περιέχοντες P, Cl ή Br
	ανόργανα	$Al(OH)_3$, $NaAl(OH)_2CO_3$, $Zn(BO_2)_2*H_2O$
	συνεργιστικά	Sb_2O_3
Σταθεροποιητές		Οργανικές κασσιτερικές ενώσεις
	καρβοξυλικά άλατα ή λίπη	Ενώσεις περιέχοντες Ba, Cd, Zn ή Pb

1.2.3. Οθόνη υγρών κρυστάλλων

Οι οθόνες υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Display, LCD), είναι η πιο διαδεδομένη μορφή επίπεδης οθόνης, με χιλιάδες κυριολεκτικά εφαρμογές. Μπορούμε να τις βρούμε σε οποιαδήποτε σύγχρονη ηλεκτρονική συσκευή που πρέπει να απεικονίσει κάποιου είδους πληροφορία. Η τεχνολογία των οθονών υγρών κρυστάλλων αρχικά χρησιμοποιήθηκε στους φορητούς υπολογιστές (laptop), αλλά πλέον έχει διεισδύσει και στην αγορά των desktop υπολογιστών. Συν τοις άλλοις, οι LCDs απαντώνται σε πληθώρα άλλων συσκευών ΗΗΕ, όπως π.χ. τις καφετιέρες, τις οθόνες που χρησιμοποιούνται στα ταμπλό αυτοκινήτων και στα κινητά τηλέφωνα, όπου οι χρησιμοποιούμενοι υγροί κρύσταλλοι ενσωματώνονται ως ηλεκτρικά ενεργό (electroactive) στρώμα, ανάμεσα σε λεπτές στρώσεις γυαλιού και ηλεκτρικών στοιχείων ελέγχου (electrical control elements).

Στα κινητά τηλέφωνα υπάρχουν δύο παραλλαγές των LCDs που χρησιμοποιούνται: η TFT-LCD (Thin Film Transistor) και IPS-LCD (In-Plane Switching), η οποία συναντάται σε τελευταίας τεχνολογίας κινητά και φορητές συσκευές όπως το Iphone και το Ipad της Apple. Επίσης, η οθόνη ενός κινητού τηλεφώνου αναφέρεται ότι δύνανται να περιέχει έως 0,5 mg υγρών κρυστάλλων, ενώ η παγκόσμια παραγωγή υγρών κρυστάλλων το 1999 ανερχόταν σε περίπου 40 τόνους, με έντονα αυξητικές τάσεις [19]. Οι διατιθέμενοι στο εμπόριο υγροί κρύσταλλοι αποτελούν συνήθως μίγματα 10 έως 20 ενώσεων, οι οποίες ανήκουν στις ομάδες των υποκατεστημένων αλκυλοβενζολίων, φαινυλοκυκλοεξανίων και κυκλοεξυλοβενζολίων, όπως π.χ. οι MBBA (4-methoxybenzylidene-4-butylaniline) και 5CB (4-pentyl-4-cyanobiphenyl) [20]. Οι ενώσεις αυτές αποτελούνται από άτομα οξυγόνου, φθορίου, υδρογόνου και άνθρακα. Σήμερα, περίπου 50.000 διαφορετικές χημικές ενώσεις είναι γνωστό ότι

μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστατικά οθονών υγρών κρυστάλλων. Όμως, μονάχα 250 εξ' αυτών αποτελούν τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες, ως συστατικά των άνω των 1000 εμπορικά διαθέσιμων μιγμάτων υγρών κρυστάλλων [19]. Ακόμη μελέτες για το γυαλί που προέρχεται από οθόνες υγρών κρυστάλλων έχουν δείξει πως δύναται να περιέχουν βαρέα μέταλλα όπως ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, το χρώμιο και ο μόλυβδος [21].

1.2.4. Μπαταρίες

Όλες οι ασύρματες ηλεκτρονικές συσκευές για να λειτουργήσουν χρειάζονται μία φορητή πηγή ισχύος, η οποία παρέχεται από τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Από το σύνολο των επαναφορτιζόμενων μπαταριών που πωλούνται παγκοσμίως, το 60% αφορά τα κινητά τηλέφωνα [22]. Από την δημιουργία των κινητών τηλεφώνων μέχρι σήμερα έχουν εμφανιστεί διαφορετικές τεχνολογίες επαναφορτιζόμενων μπαταριών, έχοντας ως στόχο μεγαλύτερη ενεργειακή χωρητικότητα με λιγότερο βάρος και ταυτόχρονα να περιοριστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και επιδράσεις στην υγεία αποφεύγοντας τη χρήση ορισμένων στοιχείων. Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990, οι μπαταρίες τεχνολογίας νικελίου-καδμίου (Ni-Cd) παρείχαν την απαιτούμενη ενέργεια σε όλα σχεδόν τα κινητά τηλέφωνα και τις φορητές συσκευές. Τα τελευταία χρόνια, οι μπαταρίες αυτές έχουν αντικατασταθεί από μπαταρίες τεχνολογίας νικελίου-υδριδίου μετάλλων (Ni-MH) και ιόντων λιθίου (Li-ion). Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται και στους τρεις τύπους μπαταριών.

Πίνακας 5: *Περιεχόμενο των τριών τεχνολογιών επαναφορτιζόμενων μπαταριών [23].*

Στοιχεία	**Ni-Cd**	**Ni-MH**	**Li-ion**
	(% of battery weight)[1]		
Κάδμιο	6–26%	-	-
Υδράργυρος	-	-	-
Χρώμιο	-	-	-
Νικέλιο και ενώσεις	11–30%	30–50%	Ναι[2]
Ψευδάργυρος	-	5–20%	-
Χαλκός	-	-	2–15%
Κοβάλτιο και ενώσεις	0–2%	2.5–8%	<25%
Μαγγάνιο	-	0–2%	Μερικές[3]
Αλουμίνιο	-	0–1%	2–10%
Ενώσεις λιθίου	<3–10%	0–1%	<25%
Ατσάλι	15–25%	15–25%	15–30%
φθοριούχο πολυβινυλιδένιο	-	-	0–5%
Οργανικοί διαλύτες	-	-	10–20%
Άνθρακας, γραφίτης	-	-	3–30%

1.2.5. Λοιπά εξαρτήματα

Ο μετασχηματιστής, που χρησιμοποιείται για την φόρτιση των μπαταριών μπορεί να ζυγίζει περισσότερο και από το ίδιο το κινητό, συνεισφέρει σημαντικά στα απόβλητα που προέρχονται από τα κινητά τηλέφωνα. Οι πληροφορίες σχετικά με την σύσταση και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του εξαρτήματος αυτού δεν είναι πολλές, μιας και οι μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί είναι λίγες. Οι φορτιστές αποτελούνται κυρίως από σύρματα χαλκού που περιβάλλονται από πλαστικά, ενώ ενδέχεται να περιέχουν ουσίες όπως χρυσό, κάδμιο και βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας.

Τα περισσότερα από τα υπόλοιπα εξαρτήματα των κινητών τηλεφώνων είναι πολύ μικρά όπως το μικρόφωνο και το ηχείο, αλλά και αυτά περιέχουν βαρέα μέταλλα και τοξικές ουσίες [6].

---

[1] Ποσοστό σου συνολικού βάρους της μπαταρίας σύμφωνα με το φύλλο δεδομένων υλικού ασφαλείας (Material Safety Data Sheet, MSDS).
[2] Η μπαταρία περιέχει αυτό το στοιχείο αλλά δεν αναφέρεται στο MSDS
[3] Ορισμένες εκδόσεις της μπαταρίας περιέχουν αυτή τη χημική ουσία αλλά δεν αναφέρεται στο MSDS

1.3. Απόβλητα κινητά τηλέφωνα

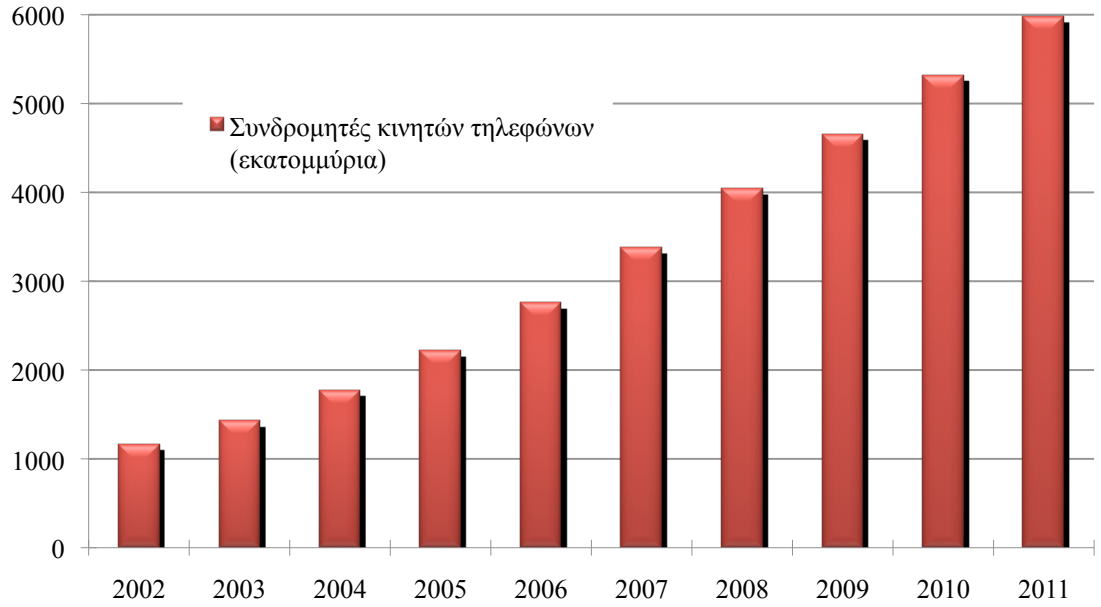
Τα τελευταία 25 χρόνια, τα κινητά τηλέφωνα αναπτύχθηκαν από ογκώδης, βάρους σχεδόν 5 κιλών συσκευές στα σύγχρονα χαρακτηριστικά μικροτηλέφωνα, τα οποία ζυγίζουν λιγότερο από 100 γραμμάρια [24]. Ωστόσο, η πιό πρόσφατη εξέλιξη στην τεχνολογία και στα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των κινητων τηλεφώνων όπως είναι τα «έξυπνα» τηλέφωνα (smart phones), οδήγησε σημαντικά στην αύξηση της μάζας των εν λόγω συσκευών. Ταυτόχρονα μεγάλες ποσότητες κινητών τηλεφώνων εισήχθησαν στην παγκόσμια αγορά. Για να δοθεί μια ιδέα της ποσότητας των αποβλήτων που παράγονται από τα κινητά τηλέφωνα, η ενότητα αυτή παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των συσκευών που χρησιμοποιούνται και τη διάρκεια ζωής τους, τις ετήσιες πωλήσεις και τα ποσοστά διείσδυσης. Ο στόχος δεν είναι να προβλεφθεί η παραγωγή αποβλήτων σε ένα συγκεκριμένο έτος, καθώς αυτό μπορεί να ποικίλει σημαντικά ανάλογα με τις οικονομικές συνθήκες και την τεχνολογική αλλαγή. Αντ 'αυτού, παρουσιάζονται εκτιμήσεις του μέσου όρου της ποσότητας των αποβλήτων που τα προϊόντα αυτά μπορεί να δημιουργήσουν, και το μέγεθος του αποθέματος των απορριφθέντων κινητών τηλεφώνων που αποθηκεύονται και θα ακολουθήσουν τη ροή των αποβλήτων. Λόγω της ασυνέπειας των δεδομένων και των παραλλαγών στον ορισμό των όρων που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν χρήση κινητού τηλεφώνου, είναι σημαντικό να διευκρινιστούν ορισμένοι επιπλέον όροι που αναφέρονται παρακάτω [6]:

- Συνδρομητές είναι ο συνολικός αριθμός των συνδρομών της υπηρεσίας κινητής τηλεφωνίας. Έτσι, ένα άτομο με μία συνδρομή για την εργασία και μια διαφορετική συνδρομή για προσωπική χρήση θα μετρήσει ως δύο συνδρομητές.
- Διείσδυση μετρά τους συνδρομητές ως ποσοστό του συνολικού πληθυσμού. Επειδή ένα άτομο μπορεί να έχει περισσότερες από μία συνδρομή, η διείσδυση μπορεί να υπερβαίνει το 100%. Η διείσδυση δεν μετρά το ποσοστό του πληθυσμού που χρησιμοποιεί κινητά τηλέφωνα, αλλά το συνολικό αριθμό των κινητών τηλεφώνων σε χρήση ως ένα ποσοστό του πληθυσμού.

1.3.1. Συνδρομητές κινητών τηλεφώνων

Την τελευταία δεκαετία, τα κινητά τηλέφωνα έχουν μετατραπεί από μία συσκευή που απευθυνόταν στους οικονομικά ευκατάστατους σε μία αναγκαιότητα για το σύνολο των καταναλωτών. Δεν χρησιμεύουν μόνο ως προσωπική πολυτέλεια, ή μια προσθήκη

στην σταθερή τηλεφωνία αλλά και ως πρωταρχικό μέσο επικοινωνίας με αποτέλεσμα την δραματική αύξηση της χρήσης τους. Το φαινόμενο αυτό αποτυπώνεται στην αύξηση των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4. Το 2002 οι συνδρομητές κινητών τηλεφώνων παγκοσμίως έφτασαν τα 1.2 δισεκατομμύρια και το 2006 είχαν αυξηθεί στους 2.7 δισεκατομμύρια, ενώ το 2011 είχαν πλησιάσει τα 6 δισεκατομμύρια, νούμερο το οποίο αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια.

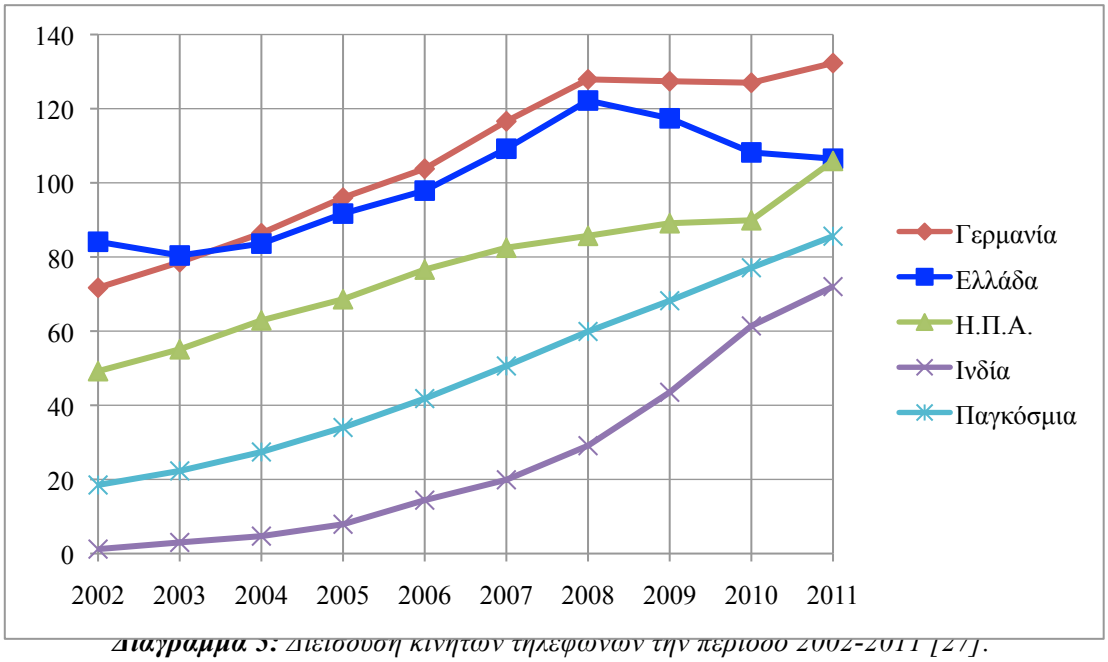


***Διάγραμμα 4**: Συνδρομητές κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως το χρονικό διάστημα 2002-2011 [25].*

Σύμφωνα με έρευνα της Portio Research, προβλέπεται ότι οι συνδρομητές σε όλο τον κόσμο θα έχουν πλησιάσει τα 6.5 δισεκατομμύρια μέχρι το τέλος του 2012, τα 6.9 δις μέχρι το τέλος του 2013 και τα 8 δις μέχρι το 2016 [26].

1.3.2. Διείσδυση κινητών τηλεφώνων

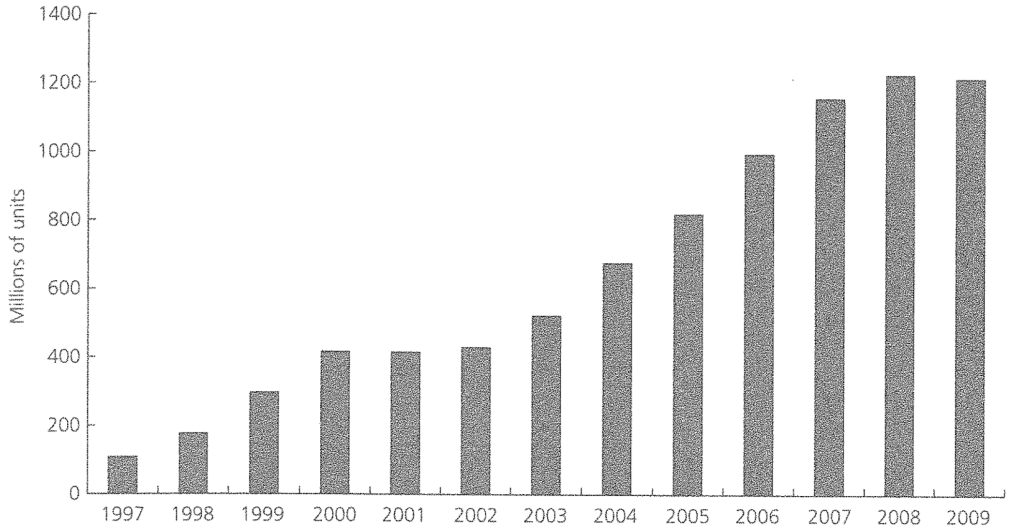
Η ανάπτυξη της αγοράς κινητών τηλεφώνων οδηγείται κυρίως από τη ζήτηση στον αναπτυσσόμενο κόσμο, αφού οι συνδρομές στον ανεπτυγμένο κόσμο έχουν φτάσει σε σημείο κορεσμού με τουλάχιστον μία συνδρομή κινητού ανά άτομο. Στο Διάγραμμα 5 παρουσιάζεται η διείσδυση της κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως και σε επιλεγμένες χώρες.



Διάγραμμα 5: *Διείσδυση κινητών τηλεφώνων την περίοδο 2002-2011 [27].*

Σε παγκόσμιο μέσο όρο, 86 κινητά τηλέφωνα χρησιμοποιούνται ανά 100 κατοίκους, με ευρεία όμως διακύμανση από 72 στην Ινδία σε υψηλά ποσοστά όπως 132 στην Γερμανία και 148 στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα μέχρι και πολύ υψηλά ποσοστά όπως 179 συσκευές ανά 100 κατοίκους στην Ρωσία, γεγονός που υποδεικνύει ότι κατά μέσο όρο κάθε κάτοικος κατέχει περισσότερα από δύο ενεργά κινητά τηλέφωνα. Με ετήσιο ρυθμό αύξησης 79% στον αναπτυσσόμενο κόσμο και ειδικότερα 59 και 19% στην Ινδία και την, Κίνα αντίστοιχα, στο μέλλον αναμένεται να υπάρχουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες των εξεταζόμενων συσκευών στην αγορά [24].

Σε αυτό το συμπέρασμα οδηγούν και τα στοιχεία σχετικά με τις ετήσιες πωλήσεις των κινητών τηλεφώνων παγκοσμίως. Από το 1997 έως το 2009, οι πωλήσεις των κινητών τηλεφώνων σχεδόν δεκαπλασιάστηκαν από 108 εκατομμύρια σε 1211 εκατομμύρια συσκευές όπως γίνεται αναφορά από τον Gartner [28-32]. Λεπτομερή στοιχεία παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6.



Διάγραμμα 6: *Παγκόσμιες πωλήσεις κινητών τηλεφώνων σε τελικούς χρήστες [24].*

Οι παγκόσμιες πωλήσεις κινητών τηλεφώνων από το 1996 έως και το 2000 παρουσίασαν μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης κοντά στο 60% , αλλά το 2001, για πρώτη φορά στην ιστορία της, η βιομηχανία κινητής τηλεφωνίας υπέστη μια πτώση των πωλήσεων ανά μονάδα [33]. Το έτος 2002 οι πωλήσεις ανήλθαν σε 423.4 εκατομμύρια, ήτοι 6% αύξηση από το 2001 ενώ το έτος 2006 ξεπέρασαν το φράγμα του ενός δισεκατομμυρίου. Τέλος, το έτος 2010 οι πωλήσεις ανήλθαν σε 1.6 δισεκατομμύρια, παρουσιάζοντας αύξηση 31.8% από το προηγούμενο έτος [34].

1.3.3. Παραγόμενες ποσότητες αποβλήτων κινητών τηλεφώνων

Το σύνολο των κινητών τηλεφώνων που χρησιμοποιούνται, αργά ή γρήγορα, θα πρέπει να απορριφθεί και θα αποτελέσει απόβλητο. Στην πραγματικότητα μία συσκευή αποσύρεται και αντικαθίσταται από μία άλλη πολύ πριν σταματήσει να λειτουργεί. Η πρόοδος στην λειτουργικότητα και στον αισθητικό σχεδιασμό προτρέπουν τους καταναλωτές να αγοράζουν κινητά τηλέφωνα τακτικά. Εκτός από βασικά εργαλεία των τηλεπικοινωνιών και της τεχνολογίας πληροφοριών, θεωρούνται ινδάλματα μόδας (*fashion icons*) που προσδιορίζουν και εκφράζουν τον προσωπικό χαρακτήρα του κατόχου. Ως εκ τούτου, ο άνθρωπος επιδιώκει συνεχώς την αγορά καινούργιων και μοντέρνων κινητών τηλεφώνων με καλύτερη λειτουργικότητα.

Η αγορά ενός κινητού τηλεφώνου ακολουθείται από την χρήση, η οποία στις βιομηχανικές χώρες έχει υπολογιστεί ότι διαρκεί κατά μέσο όρο 18-24 μήνες ενώ για τις αναπτυσσόμενες χώρες δεν υπάρχουν διαθέσιμα αξιόπιστα στατιστικά στοιχεία [35]. Σε αντίθεση, η δυνητική διάρκεια ζωής ενός κινητού τηλεφώνου είναι πάνω από

δέκα χρόνια (εξαιρούνται οι μπαταρίες) αλλά σε αυτό το χρονικό διάστημα οι χρήστες τα ανανεώνουν περίπου τέσσερις φορές [7]. Η στάση αυτή των καταναλωτών έχει μειώσει σημαντικά τον κύκλο ζωής της χρήσης ενός κινητού τηλεφώνου, γεγονός που οδηγεί στη παραγωγή εκατοντάδων εκατομμυρίων απόβλητων συσκευών κάθε χρόνο. Η παραγωγή αποβλήτων κινητών τηλεφώνων ορισμένων χωρών παρουσιάζεται στον Πινακα 6.

Πίνακας 6: *Παραγωγή αποβλήτων κινητών τηλεφώνων, συλλογή και απόρριψη ανά επιλεγμένη χώρα [6, 36-43].*

Χώρα	**Έτος**	**Ποσότητα**	**Βάρος**	**Πηγή**
Σουηδία	2003	234,000	36,500 kg	[36]
Βρετανία	Ανά έτος	15,000,000	1,500 t	[37]
Καναδάς	1999	520,000	129 t	[38]
Γερμανία	Ανά έτος	6,500,000[4]	-	[39]
Αυστραλία	1999-2003	-	220 t[5]	[40]
Η.Π.Α.	2005	130,000,000	-	[6]
Ιαπωνία	2003	45,000,000	-	[41]
Κίνα	Ανά έτος	70,000,000	-	[42]
Τσεχία	2008	1,300,000	-	[43]

Στις Η.Π.Α., είχε προβλεφθεί ότι το έτος 2005 τα κινητά τηλέφωνα που χρησιμοποιούνταν θα έφταναν περίπου τα 175 εκατομμύρια. Εν τω μεταξύ, εκτιμήσεις υπολόγιζαν ότι θα απορριφθούν 130 εκατομμύρια κινητά τηλέφωνα το έτος 2005, με αποτέλεσμα να παραχθούν 65,000 τόνοι αποβλήτων [10]. Μεταξύ του έτους 1999 και 2003, 2.5 εκατομμύρια κινητά τηλέφωνα συλλέχθηκαν για ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση αντιπροσωπεύοντας λιγότερο από 1% των εκατομμυρίων κινητών τηλεφώνων που αποσύρονται ή απορρίπτονται κάθε χρόνο [7]. Στην Βρετανία, αντικαθιστώνται περίπου 15 εκατομμύρια κινητά τηλέφωνα ετησίως [37]. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, ένα νέο σύστημα, ξεκίνησε το 2002, το οποίο υποστηρίχθηκε από όλους τους φορείς παροχής υπηρεσιών δικτύου, μεγάλες αλυσίδες καταστημάτων λιανικής πώλησης και της κυβέρνησης να χειριστεί την αυξανόμενη ποσότητα των απορριπτόμενων κινητών τηλεφώνων. Τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του συστήματος, πάνω από ένα εκατομμύριο κινητά τηλέφωνα επαναχρησιμοποιήθηκαν ενώ περισσότερο από 105 τόνοι συσκευών, μπαταριών και αξεσουάρ κινητών τηλεφώνων υποβλήθηκαν σε επεξεργασία για ανακύκλωση, που

[4] Απορριφθέντα μαζί με αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ).
[5] Συμπεριλαμβανομένων μπαταριών και αξεσουάρ που συλλέχθησαν για ανακύκλωση μεταξύ Νοεμβρίου 1999 και Δεκεμβρίου 2003.

ισοδυναμεί με εξοικονόμηση σε χώρους υγειονομικής ταφής πάνω από 250 τόνους [37]. Μελέτες σχετικά με τα απόβλητα που προέρχονται από τον εξοπλισμό πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών, όπως προσωπικοί και φορητοί υπολογιστές, οθόνες, κινητά τηλέφωνα και άλλος σχετικός εξοπλισμός προέβλεπαν ότι θα διπλασιαστούν από 36,900 τόνοι το 1999 σε 71,650 τόνους το 2005 [44]. Εθνικά ποσά συλλογής κινητών τηλεφώνων για την κατάλληλη διαχείριση κυμαίνονται από 150,000 μονάδες στη Γερμανία (2003) σε 1.5 εκατομμύρια συσκευές στις Η.Π.Α. (2002) [40]. Τα αποτελέσματα των μελετών για την Τσεχία, δείχνουν ότι ενώ κατά τα έτη 1990-2000 παρήχθησαν περίπου 45 χιλιάδες EoL κινητά τηλέφωνα, κατά τα έτη 2000-2010 το ποσό αυτό αυξήθηκε σε 6,5 εκατ. και εκτιμάται ότι το ποσό θα αυξηθεί περαιτέρω μέχρι και 26,3 εκατομμύρια από EoL κινητά τηλεφώνων κατά τα έτη 2010 έως 2020 [43]. Για τη Κίνα, εκτιμάται ότι περισσότερα από 77 εκατομμύρια αποβλήτων κινητά τηλέφωνα δημιουργήθηκαν το 2008, έναντι 4 εκατ. ευρώ το 2000 [45].

Εκτός από την ανακύκλωση και την διάθεση με τα οικιακά απορρίμματα, μεγάλες ποσότητες κινητών τηλεφώνων αποθηκεύονται. Παρόλο που δεν υπάρχουν διαθέσιμα αξιόπιστα δεδομένα για την μάζα των αποθηκευμένων κινητών τηλεφώνων, οι εκτιμήσεις για αυτές τις ποσότητες στις ΗΠΑ είναι περίπου 500 εκατομμύρια συσκευές, στην Αυστρία 8 εκατομμύρια ενώ στην Βρετανία 50-90 εκατομμύρια συσκευές βρίσκονται σε ντουλάπια και συρτάρια των σπιτιών [46]. Στην Αυστραλία, αντλώντας δεδομένα από τα αποτελέσματα διαδυκτιακής έρευνας, 14-16 εκατομμύρια συσκευές κινητών τηλεφώνων βρίσκονται αποθηκευμένες σε όλη τη χώρα. Επομένως, σε σχέση με τον αριθμό των κατοίκων, αποθηκεύονται κατά μέσο όρο 1.0, 1.6, 0.7 κινητά τηλέφωνα ανά κάτοικο σε Αυστρία, Η.Π.Α. και Αυστραλία, αντίστοιχα [24].

1.4. Τοξικότητα περιεχομένου κινητών τηλεφώνων

Τα κινητά τηλέφωνα και άλλες μικρές ηλεκτρονικές συσκευές περιέχουν ένα μεγάλο αριθμό επικίνδυνων ουσιών. Μία συσκευή κινητού τηλεφώνου περιέχει περισσότερα από 40 στοιχεία του περιοδικού συστήματος, περιλαμβάνοντας μέταλλα όπως σίδηρο (Fe), αλουμίνιο (Al), χαλκό (Cu), νικέλιο (Ni) και κασσίτερο (Sn), σπάνια μέταλλα όπως κοβάλτιο (Co), ίνδιο (In), αντιμόνιο (Sb), ευγενή μέταλλα όπως χρυσό (Au), ασήμι (Ag), παλλάδιο (Pd) και πλατίνα (Pt) καθώς και τοξικές και επικίνδυνες ουσίες όπως αρσενικό (As), μόλυβδο (Pb), κάδμιο (Cd), βρώμιο (Br), και άλλα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ουσίες αυτές δεν είναι γνωστό ότι αποτελούν απειλή για το περιβάλλον ή τη δημόσια υγεία, ενώ οι συσκευές χρησιμοποιούνται. Αντίθετα, επικίνδυνες επιπτώσεις τους εμφανίζονται ανάντη - κατά τη διάρκεια της εξαγωγής των υλικών και επεξεργασίας - και στο τέλος της ζωής τους, όταν τα κινητά τηλέφωνα και άλλα ασύρματα προϊόντα αποτεφρώνονται ή αποτίθενται σε χώρους υγειονομικής ταφής, καθώς και κατά τη διάρκεια των διαδικασιών ανακύκλωσης, όπως τεμαχισμό, τρόχισμα, τήξη, εξώθηση πλαστικών και επεξεργασία μετάλλων [47]. Αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθεί σε κινητά τηλέφωνα, αλλά τα τοξικά υλικά που συζητήθηκαν υπάρχουν σε γενικές γραμμές και στα επιμέρους τμήματα των ασύρματων συσκευών.

1.4.1. Βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας

Το βρώμιο αποτελεί τον βασικότερο υποκαταστάτη για κάποιες από τις πλέον δραστικές και πολυχρησιμοποιούμενες φλογοεπιβραδυντικές (Flame Retardants, *FRs*) ενώσεις στη σύγχρονη βιομηχανία πλαστικών – τα βρωμιωμένα επιβραδυντικά φλόγας (ΒΕΦ) ή Brominated Flame Retardants (BFRs). Όπως άλλωστε υποδηλώνει η ονομασία τους, αποσκοπούν στη μείωση του κινδύνου ανάφλεξης, μειώνοντας την αναφλεξιμότητα των πλαστικών και αυξάνοντας την αντοχή των στη φωτιά. Όσον αφορά ειδικότερα τα προϊόντα ΗΗΕ[6], σε αυτά απαντώνται διάφορες ομάδες οργανικών ενώσεων με φλογοεπιβραδυντικές ιδιότητες, με κύριους υποκαταστάτες τα χλώριο, βρώμιο, φώσφορο ή άζωτο, ενώ υφίστανται επίσης και ανόργανες ενώσεις με τις ιδιότητες αυτές. Στην παράγραφο αυτή, το ενδιαφέρον εστιάζεται αποκλειστικά στα BFRs και την επικινδυνότητα των, λόγω του ότι τα αλογονωμένα επιβραδυντικά φλόγας είναι λίαν διαδεδομένα (περίπου το 12,5% των πλαστικών ΗΗΕ περιέχουν

[6] Η χρήση ή όχι FRs σε κάποιο προϊόν ΗΗΕ εξαρτάται από τον τύπο της συσκευής [48].

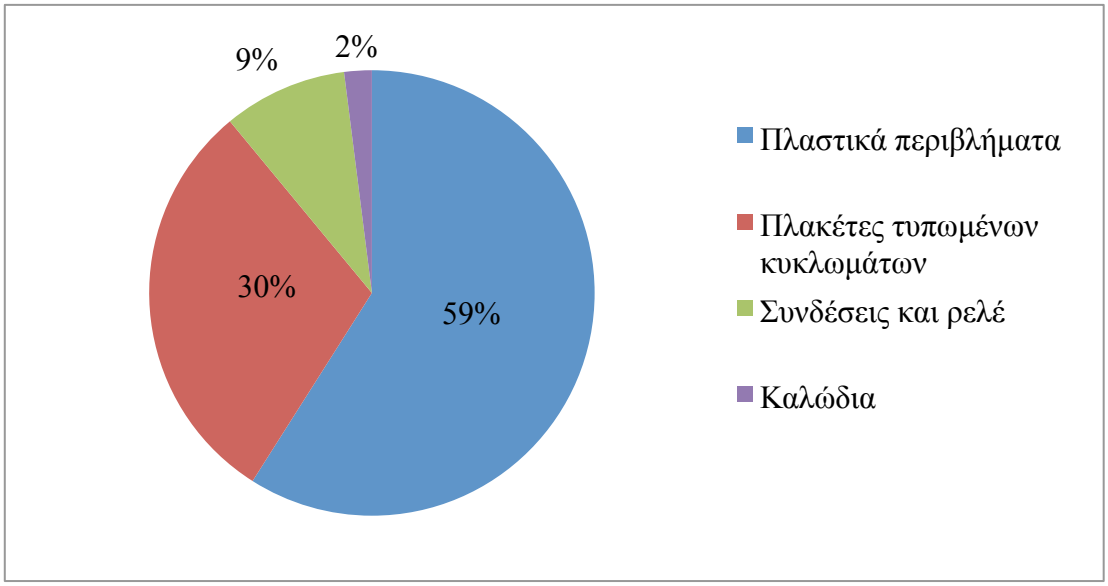
αλογονωμένους επιβραδυντές φλόγας[7]), και εξ' αυτών τα βρωμιωμένα έχουν καλύτερη απόδοση και επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό τις ιδιότητες του πολυμερούς σε σχέση με τα χλωριωμένα, ενώ έχουν και αρκούντως χαμηλό κόστος [49]. Τα βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά προϊόντα χρησιμοποιούνται κυρίως σε πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων και πλαστικά περιβλήματα (Διάγραμμα 7). Συν τοις άλλοις, στην Οδηγία 2002/96/ΕΚ ορίζεται σαφώς ότι τα περιέχοντα BFRs πλαστικά θα πρέπει να διαχωρίζονται από το υπόλοιπο ρεύμα των χωριστά συλλεγόμενων ΑΗΗΕ προς επιλεκτική επεξεργασία.

Το φύλλο πλαστικού των PCBs συνίσταται σε ενισχυμένη με ίνες γυαλιού εποξειδική ρητίνη, και περιέχει πιθανότατα βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας σε ποσοστό έως 15%. Το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο για τέτοιες εφαρμογές επιβραδυντικό 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 (polybrominated dibanzodioxins και -furans, *PBDDs* και *PBDFs,* αντίστοιχα) σε σχέση με άλλα ευρέως χρησιμοποιούμενα BFRs σε θερμικές διεργασίες. Επίσης, παράγεται και χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερες ποσότητες από οιοδήποτε άλλο μέλος της ομάδας των BFRs (το μερίδιό της στην αγορά των αντιστοιχεί περίπου στο 50%) [20].

Ακόμη, στα πλαστικά ΗΗΕ χρησιμοποιούνται δύο βασικές κατηγορίες βρωμιούχων επιβραδυντών φλόγας: η πρώτη περιλαμβάνει πολυβρωμοδιφαινυλαιθέρες (polybrominated diphenyl ethers, *PBDPEs* ή *PBDEs*) και η δεύτερη φαινόλες όπως η TBBPA, η οποία όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιείται κυρίως σε PCBs, ενώ σε μικρότερες ποσότητες χρησιμοποιούνται τα PBBs (περίπου 1%, σε σχέση με το 10 και 50% του ποσοστού χρήσης των BFRs που αντιστοιχεί στους PBDEs και την TBBPA, αντίστοιχα [50]) και το εξαβρωμοκυκλοδωδεκάνιο (hexabromocyclododecane, *HBCD*) [51]. 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 (περίπου 80% της συνολικής χρήσης των [52]), σε οικιακές συσκευές κουζίνας, καθώς και σε μικρό βαθμό στις PCBs. Στη βιομηχανία

[7] Σύμφωνα με άλλη πηγή, BFRs χρησιμοποιούνται περίπου στο 20% των πλαστικών ΗΗΕ. Στην ίδια πηγή αναφέρεται ότι τα πλαστικά με FRs οιουδήποτε τύπου αντιστοιχούν στο 5,5% κ.β. του ΗΗΕ (5-10% σύμφωνα με την ΕΕΑ [48]) και 25% των ολικών πλαστικών ΗΗΕ [53].

ηλεκτρονικών ειδών, τον πλέον συχνά χρησιμοποιούμενο εκ των PBDPEs αποτελεί ο DBPE, εφαρμοζόμενος ως πρόσθετο κυρίως σε πλαίσια και περιβλήματα [19]. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, από τις 75 συνολικά υπάρχουσες ενώσεις της κατηγορίας των BFRs, μονάχα οι PBDEs και τα PBBs υπόκεινται σε μέτρα εξάλειψης – δυνάμει της Οδηγίας 2002/95/ΕΚ, άρθρο 4, παράγραφος 1 – από 1η Ιουλίου 2006, αν και υπάρχει τροποποίηση της Οδηγίας αυτής, η οποία επιτρέπει τη χρήση των έως συγκέντρωσης 0,1% κ.β. για ομοιογενή υλικά [54].



Διάγραμμα 7: *Χρήσεις βρωμιούχων επιβραδυντικών φλόγας σε ΗΗΕ [55].*

Από την άλλη, δεν έχουν καθορισθεί ακόμη φράσεις R για την TBBPA, αν και έχει προταθεί για αυτήν η R50-53 (οικοτοξικό: πολύ τοξικό για τους υδρόβιους οργανισμούς, μπορεί να προκαλέσει μακροχρόνιες δυσμενείς επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον). Ενέχεται επίσης η υποψία ότι δύναται να προκαλέσει ορμονικές διαταραχές [19].

Η κύρια ανησυχία όσον αφορά τους PBDEs έγκειται στο γεγονός ότι δύνανται να σχηματισθούν βρωμιωμένες διοξίνες και φουράνια κατά την καύση-θερμική επεξεργασία αυτών. Επίσης, εάν στα προς αποτέφρωση απόβλητα περιέχεται χαλκός – όπως π.χ. στις PCBs – ο οποίος δρα ως καταλύτης για το σχηματισμό PBDDs και PBDFs κατά την αποτέφρωση, αυξάνονται άρδην οι πιθανότητες σχηματισμού των. Επιπλέον, εάν η αποτέφρωση λάβει χώρα σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπως πολύ συχνά συμβαίνει σε πολλές εγκαταστάσεις ανακύκλωσης σε αναπτυσσόμενα κράτη, η ατελής καύση επιφέρει το σχηματισμό ακόμη μεγαλύτερων ποσοτήτων PBDDs και PBDFs. Ακόμη, το παραγόμενο κατά την αποτέφρωση HBr διαβρώνει τα μέταλλα και το

μπετόν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αντικατάσταση ενός BFR στις εφαρμογές του από οποιαδήποτε άλλη βρωμιωμένη ένωση – λ.χ. προς συμμόρφωση με την οδηγία 2002/95/ΕΚ – θα έχει τις ίδιες ανωτέρω περιγραφείσες επιπτώσεις, χωρίς να έχει καταστεί ο παραγόμενος ΗΗΕ αρκούντως περιβαλλοντικά «φιλικός» [51]. Λίαν ανησυχητικό είναι συνάμα το γεγονός ότι PBDDs και PBDFs δύνανται να σχηματισθούν και κατά την έλαση (ή εξώθηση, extrusion) πλαστικών περιεχόντων PBDEs και PBBs, παρεμποδίζοντας την ανακύκλωσή των[8]. Συνεπεία αυτού, από το 1986 διεκόπη η παραγωγή PBDEs και PBBs από τη γερμανική χημική βιομηχανία [56, 57].

Συν τοις άλλοις, διάφορες έρευνες έχουν καταδείξει ότι τα BFRs βιοσυσσωρεύονται στους ιστούς ζώντων οργανισμών, ενώ δύνανται να εκχυλίσουν στα στραγγίσματα χωματερών, ρυπαίνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο υπόγειους υδροφορείς [51, 57]. Ακόμη, οι μεγαλύτερου βαθμού αλογόνωσης PBDEs (π.χ. οι DBDE, OBDE) δύνανται να υποστούν αφαλογόνωση προς τετρα- και PeBDEs, ενώσεις οι οποίες είναι τοξικές και ανευρίσκονται στην τροφική αλυσίδα υδρόβιων οργανισμών [19, 57]. Οι PBDEs αναφέρεται επίσης ότι συνδέονται με την ανάπτυξη καρκίνου, ηπατικών βλαβών, προβλημάτων στο νευρικό και το κυκλοφορικό σύστημα, δυσλειτουργία του θυρεοειδούς αδένα και ενδοκρινικές διαταραχές [51], ενώ συνάμα ο ODBE ταξινομείται ως τερατογόνο (H10), με φράση R63 (πιθανός κίνδυνος δυσμενών επιδράσεων στο έμβρυο κατά τη διάρκεια της κύησης) και συγκέντρωση κατωφλιού $\geq 5\%$ [19].

Επιπροσθέτως, έχουν ανιχνευθεί ποσότητες PBDEs σε ανθρώπινο μητρικό γάλα τόσο στη Βόρειο Αμερική, όσο και στη Σουηδία, ενώ θεωρείται ότι τα επίπεδα των σε αυτό διπλασιάζονται ανά πενταετία. Πολύ υψηλές συγκεντρώσεις PBDEs έχουν ευρεθεί και στο αίμα εργαζομένων σε εγκαταστάσεις ανακύκλωσης ΑΗΗΕ, λόγω του ότι εκπέμπεται στον αέρα σκόνη περιέχουσα BFRs κατά τη διάρκεια των διεργασιών ανακύκλωσης τηλεοράσεων, μηχανών φαξ ή άλλων προϊόντων ΗΗΕ. Επιπλέον,

---

[8] Η παρουσία BFRs καθιστά δυσχερέστερη την ανακύκλωση των πλαστικών, καθότι αποτελούν ανεπιθύμητες προσμείξεις για πολλές δυνατές μετέπειτα χρήσεις του ανακυκλωμένου υλικού. Πιο συγκεκριμένα, τα BFRs αποικοδομούνται προς ρίζες R* και X* (ο χημικός τύπος ενός BFR ή γενικότερα οποιουδήποτε αλογονωμένου FR παρίσταται ως R-X). Οι εξαιρετικά δραστικές ρίζες X* αντιδρούν με το υδρογόνο της αλυσίδας C-H του πολυμερούς σχηματίζοντας αλογονίδια HX. Οι προαναφερθείσες αντιδράσεις θεωρείται ότι δύνανται να λάβουν χώρα υπό τις συνήθεις συνθήκες επεξεργασίας και έχουν ως αποτέλεσμα τον αποχρωματισμό και την χειροτέρευση των ιδιοτήτων του πλαστικού, ιδίως εάν αυτό υποστεί πολλαπλή επεξεργασία. Συνεπεία αυτού, απαιτείται η εφαρμογή διεργασιών καθαρισμού και η προσθήκη επιπλέον σταθεροποιητών από το σύνηθες, προς βελτίωση των ιδιοτήτων του παραγόμενου πλαστικού σε ανεκτά επίπεδα [57].

ηλεκτρονικές συσκευές που περιέχουν BFRs, όπως οι δέκτες των τηλεοράσεων και οι υπολογιστές, μπορεί να αποτελέσουν πηγές εκπομπής BFRs και PBDDs/DFs στο περιβάλλον και ειδικά στον αέρα των εσωτερικών χώρων: έχει αναφερθεί ότι σε συλλεχθείσα από το εσωτερικό τηλεοράσεων που περιέχουν BFRs σκόνη, ανιχνεύθηκαν επίπεδα PBDEs και TBBPA της τάξεως μεγέθους των mg/g και PBDDs/DFs της τάξεως των ppm (μg/g). Τούτο καταδεικνύει ότι τα BFRs και οι παραγόμενες εξ αυτών PBDDs/DFs μπορούν να εξατμισθούν και τη συνέχεια να απελευθερωθούν-μεταναστεύσουν στον αέρα εσωτερικών χώρων προερχόμενα από προϊόντα που τα περιέχουν [56, 57]. Τέλος, όσον αφορά τα PBBs, ως ομάδα ενώσεων μελετώνται και αντιμετωπίζονται από κοινού με τα PCBs, αλλά και τα PCTs.

Βέβαια, υφίσταται και διαφορετική από την ανωτέρω άποψη, όσον αφορά στην επικινδυνότητα των PBDPEs για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Αναφέρεται συγκεκριμένα, ότι παραμένει ακόμη υπό διερεύνηση το ερώτημα του κατά πόσον οι εν λόγω ενώσεις εγκυμονούν σοβαρούς κινδύνους για το περιβάλλον, καθώς και για ποιες συγκεντρώσεις. Αναφέρονται έρευνες οι οποίες κατέδειξαν ότι δεν παρουσιάζουν χαρακτηριστικά βιοσυσσώρευσης ή εμμονής (persistence) στο περιβάλλον, ενώ μια πραγματοποιηθείσα από το βρετανικό Υπουργείο Περιβάλλοντος, Τροφίμων και Γεωργίας (DEFRA) ανάλυση επικινδυνότητας κατέληξε στο συμπέρασμα ότι δεν απαιτούνται πρόσθετα μέτρα για την μείωση της χρησιμοποίησης του DBDE σε ΗΗΕ. Επίσης, αναφέρεται ότι στο εγγύς μέλλον αναμένονται τα πορίσματα περαιτέρω νέων ερευνών για την επικινδυνότητα των OBDE και PBDE. Τέλος, στην ίδια πηγή αναφέρεται ότι τόσο τα PBBs, όσο και ο PeBDE δεν χρησιμοποιούνται καθόλου σε εφαρμογές ΗΗΕ, τουτέστιν η συμπερίληψή τους στην 2002/95/ΕΚ κρίνεται ως μη αναγκαία [19].

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί, ότι ως συνεργιστικό επιβραδυντικό φλόγας σε πλαστικά χρησιμοποιείται το τριοξείδιο του αντιμονίου (Sb_2O_3), το οποίο συμβάλλει στην αύξηση της αποτελεσματικότητας των χρησιμοποιούμενων BFRs, ελαχιστοποιώντας κατ' αυτόν τον τρόπο το απαιτούμενο επίπεδο προσθήκης των. Συνεπώς, η χρήση τριοξειδίου του αντιμονίου σε εφαρμογές BFRs επιφέρει μείωση του κόστους, καθώς και συχνότατα βελτίωση των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των πλαστικών όπου εφαρμόζεται [19]. Βέβαια, από την άλλη μεριά, το Sb_2O_3 αποσυντίθεται εάν θερμανθεί, παράγοντας τοξικούς ατμούς αντιμονίου, ενώ υπό συγκεκριμένες συνθήκες δύναται να αντιδράσει με το υδρογόνο σχηματίζοντας το λίαν τοξικό αέριο αντιμονίνη (stibine). Επίσης, το Sb_2O_3 εισέρχεται στον ανθρώπινο

οργανισμό μέσω της αναπνοής, προκαλεί ερεθισμό των ματιών, του δέρματος και της αναπνευστικής οδού, ενώ επαναλαμβανόμενη ή παρατεταμένη επαφή με αυτό δύναται να προκαλέσει δερματίτιδα και να επηρεάσει αρνητικά τους πνεύμονες. Επίσης, θεωρείται ότι δύναται να προκαλέσει καρκίνο, ενώ μελέτες σε πειραματόζωα καταδεικνύουν ότι μπορεί να έχει τοξικές επιδράσεις στο ανθρώπινο αναπαραγωγικό σύστημα [57]. Τέλος, το Sb_2O_3 ταξινομείται ως καρκινογόνο (H7), με φράση R40 (ύποπτο καρκινογένεσης) και συγκέντρωση κατωφλιού $\geq 1\%$ [19].

Επιπλέον, ως επιβραδυντικά φλόγας και σταθεροποιητές στο ελαστικό, τις βαφές και τις επικαλύψεις προϊόντων ΗΗΕ χρησιμοποιούνται χλωριωμένες παραφίνες μικρού μήκους αλυσίδας (Short Chain Chlorinated Paraffins, *SCCPs*). Η χρήση τους αναφέρεται μελλοντικά ότι αναμένεται να αυξηθεί λόγω της χρησιμοποίησης των σε μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών ΗΗΕ. Οι SCCPs παρουσιάζουν βιοσυγκέντρωση στους ιστούς ψαριών και μαλακίων, και ταξινομούνται ως οικοτοξικές (H14) με φράσεις R50 και R53 (πολύ τοξικές για τους υδρόβιους οργανισμούς, μπορούν να προκαλέσουν μακροχρόνιες δυσμενείς επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον) και συγκέντρωση κατωφλιού $\geq 25\%$ [19, 57].

Τέλος, δεδομένου ότι οι κατασκευαστές ΗΗΕ μελλοντικά θα στραφούν στη χρήση εναλλακτικών χημικών ενώσεων αντί των BFRs, οι μονάδες επεξεργασίας ΑΗΗΕ θα πρέπει να επικεντρώσουν τις προσπάθειές τους στον επιτυχή διαχωρισμό των πλαστικών που περιέχουν τις επίμαχες ουσίες από το υπόλοιπο ρεύμα των πλαστικών ΑΗΗΕ [19].

1.4.2. Υδράργυρος

Εκτιμάται ότι περίπου το 22% της ετήσιας παγκόσμιας κατανάλωσης υδραργύρου χρησιμοποιείται στην παραγωγή ΗΗΕ (π.χ. λαμπτήρων φθορισμού[9]). Ο υδράργυρος χρησιμοποιείτο κατά το παρελθόν σε πληθώρα εφαρμογών: θερμοστάτες, διακόπτες, όργανα μέτρησης, μπαταρίες, λαμπτήρες φθορισμού και εκκένωσης αερίων, καθώς και

[9] Αναφέρεται ότι οι σύγχρονοι λαμπτήρες φθορισμού περιέχουν 3-20 mg Hg, ενώ οι παλαιότερης τεχνολογίας 15-30 mg έκαστος. Οι ενεργειακά αποδοτικοί λαμπτήρες φθορισμού μικρών διαστάσεων περιέχουν περίπου 6 mg Hg ανά λαμπτήρα [48]. Για επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τα ανώτατα επιτρεπτά όρια του περιεχομένου σε Hg διαφόρων ειδών λαμπτήρων φθορισμού, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο παράρτημα της 2002/95/ΕΚ (παράγραφοι 1 έως 4). Επίσης, αναφέρεται ότι η εξέταση της εφαρμογής του υδραργύρου σε ευθείς λαμπτήρες φθορισμού ειδικών εφαρμογών χρίζει προτεραιότητας (παράγραφος 10).

σε κινητά τηλέφωνα, ιατροτεχνολογικές συσκευές, PCBs[10] και τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό. Πάντως, η χρήση του έχει μειωθεί τα τελευταία χρόνια, λόγω της απαγόρευση της χρήσης του από την 1ης Ιουλίου 2006, όπως ορίζεται από την Οδηγία 2002/95/ΕΚ, άρθρο 4, παράγραφος 1 [58], αν και υφιστάμενη τροποποίηση αυτής επιτρέπει τη χρήση υδραργύρου σε ΗΗΕ έως ποσοστού 0,1% κ.β. για ομοιογενή υλικά[11], λόγω του ότι θεωρείται αδύνατο να αποφευχθούν πλήρως τα βαρέα μέταλλα σε ορισμένες περιστάσεις [55].

Τέλος, οι φράσεις R για τον υδράργυρο, οι αντίστοιχοι χαρακτηρισμοί, καθώς και οι ανάλογες συγκεντρώσεις κατωφλιού παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 7. Οι επιδράσεις του υδραργύρου στον άνθρωπο αφορούν κυρίως στα νεφρά, το κεντρικό νευρικό σύστημα (χρόνιες βλάβες στον εγκέφαλο), και τα κυοφορούμενα έμβρυα. Επίσης, ο ανόργανος υδράργυρος μετατρέπεται στο νερό σε μεθυλοϋδράργυρο (methylated mercury) στα ιζήματα του πυθμένα. Ο μεθυλιωμένος υδράργυρος συσσωρεύεται εύκολα στους ιστούς ζώντων οργανισμών, ενώ παρατηρείται και βιοσυγκέντρωση (bioconcentration) αυτού μέσω της τροφικής αλυσίδας – κυρίως μέσω των ψαριών [50, 56].

Πίνακας 7: *Φράσεις R,ιδιότητες και συγκεντρώσεις κατωφλιού για τον υδράργυρο [19].*

Φράση R	***Ιδιότητα***	***Φύση του κινδύνου***	***Συγκέντρωση κατωφλιού***
R23	H6 (H5)	*Τοξικό (επιβλαβές)*: τοξικό όταν εισπνέεται	≥ 3%
R33	–	Κίνδυνος αθροιστικών επιδράσεων	–
R50-53	H14	*Οικοτοξικό*: πολύ τοξικό για τους υδρόβιους οργανισμούς, μπορεί να προκαλέσει μακροχρόνιες δυσμενείς επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον	≥ 0,25%

[10] Αν και οι χρησιμοποιούμενες ανά κατασκευαστικό στοιχείο-εξάρτημα ΗΗΕ ποσότητες Hg είναι μικρές, αναφέρεται ότι η σύμφωνα με εκτιμήσεις απόρριψη $315 \cdot 10^6$ υπολογιστών στις Η.Π.Α. το διάστημα 1997 με 2004, θα επιφέρει την απόρριψη σχεδόν 150 μετρικών τόνων υδραργύρου στο περιβάλλον (για συγκέντρωση Hg σε PCs 0,002% κ.β.) [19].

[11] Ως ομοιογενές νοείται το υλικό το οποίο δεν δύναται να διαχωριστεί μηχανικά σε άλλα συστατικά υλικά, ήτοι έχει την ίδια σύσταση σε όλη την έκταση του. Ως μηχανικός διαχωρισμός νοούνται διεργασίες όπως ξεβίδωμα, τεμαχισμός, κονιορτοποίηση, απόξεση κτλ. Συνεπώς, ένα πλαστικό πλαίσιο είναι ομοιογενές εάν αποτελείται από έναν μόνο τύπο πλαστικού (π.χ. ABS), άνευ επικαλύψεων και άλλων υλικών εντός του ή προσκολλημένα με αυτό. Από την άλλη, ένα καλώδιο αποτελούμενο από μεταλλικό σύρμα περιβαλλόμενο από μη μεταλλικά μονωτικά υλικά δεν είναι ομοιογενές, καθότι τα διάφορα υλικά δύναται να διαχωριστούν μέσω μηχανικών διεργασιών [59].

1.4.3. Βηρύλλιο

Το βηρύλλιο είναι ένα ελαφρύ, σκληρό, θερμικά και ηλεκτρικά αγώγιμο, μη μαγνητικό μέταλλο, κατάλληλο για πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών. Κράματα βηρυλλίου-χαλκού χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρονικές συνδέσεις, στις οποίες επιθυμείται η δυνατότητα συνεχούς σύνδεσης-αποσύνδεσης και ακριβώς για το λόγο αυτό δεν απαιτείται μόνιμη συγκόλληση. Οι συνδέσεις αυτές είναι συχνά καλυμμένες με χρυσό, ούτως ώστε να αποτρέπεται ο επιφανειακός σχηματισμός οξειδίου του χαλκού και η επακόλουθη διαμόρφωση ενός μη αγώγιμου ηλεκτρικά στρώματος. Οι εφαρμογές του μεταλλικού βηρυλλίου περιλαμβάνουν ακόμη πλαίσια (chassis), πλακέτες κυκλωμάτων για αεροδιαστημικές εφαρμογές, περιστρεφόμενους καθρέπτες εκτυπωτών λέιζερ, παράθυρα γεννητριών ακτινών Χ, και ανιχνευτές ερευνητικών και ιατρικών εφαρμογών (π.χ. μαστογραφία) [50, 19].

Όσον αφορά το μεταλλικό βηρύλλιο, αποτελεί ένα από τα τοξικότερα μέταλλα και κίνδυνος για την υγεία δύναται να προκληθεί εάν δημιουργηθεί σκόνη ή καπνός από υλικά που το περιέχουν, κυρίως σε εγκαταστάσεις παραγωγής ή ανακύκλωσης ΗΗΕ [60]. Για το λόγο αυτό προτείνεται τα κατασκευαστικά στοιχεία που περιέχουν βηρύλλιο να διαχωρίζονται από το υπόλοιπο ρεύμα των ΑΗΗΕ. Επίσης, κατασκευαστικά στοιχεία που περιέχουν BeO θα πρέπει και αυτά να διαχωρίζονται από το υπόλοιπο ρεύμα των ΑΗΗΕ, ενώ δεν συνιστάται να υφίστανται διεργασίες μείωσης μεγέθους για την ανακύκλωσή των, λόγω του κινδύνου δημιουργίας σκόνης. Πάντως, τα κράματα βηρυλλίου-χαλκού αναφέρεται ότι δύναται να ανακυκλωθούν σε διεργασίες ανακύκλωσης χαλκού, χωρίς να απαιτείται πρωτύτερος διαχωρισμός των [19]. Ακόμη, το μεταλλικό βηρύλλιο και η βηρυλλία θεωρούνται επικίνδυνα απόβλητα σύμφωνα με τη συνθήκη της Βασιλείας και την Οδηγία 91/689/ΕΚ.

Τέλος, οι φράσεις R για το βηρύλλιο, τη βηρυλλία και τα κράματα βηρυλλίου-χαλκού, οι αντίστοιχες ιδιότητες, καθώς και οι ανάλογες συγκεντρώσεις κατωφλιού παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 8. Το βηρύλλιο θεωρείται καρκινογόνο για τον άνθρωπο, λόγω της δυνατότητας ανάπτυξης καρκίνου του πνεύμονα, μέσω της εισπνοής σκόνης ή καπνού. Εργαζόμενοι εκτιθέμενοι σε βηρύλλιο δύνανται να αναπτύξουν μια θανατηφόρα ασθένεια (beryllicosis) η οποία επηρεάζει κυρίως τους πνεύμονες, ενώ η έκθεση σε βηρύλλιο δύναται να προκαλέσει επίσης δερματικές παθήσεις. Επιπλέον, ακόμη και χρόνια μετά την παύση της έκθεσης σε βηρύλλιο,

ενέχεται η δυνατότητα ανάπτυξης των προαναφερθέντων νόσων στον ανθρώπινο οργανισμό [50].

Πίνακας 8: *Φράσεις R, ιδιότητες και συγκεντρώσεις κατωφλιού για τα Be και BeO [19].*

Φράση R	***Ιδιότητα***	***Φύση του κινδύνου***	***Συγκέντρωση κατωφλιού***
		Be & BeO	
R26	H6 (H5)	*Τοξικό (επιβλαβές)*: πολύ τοξικό όταν εισπνέεται	≥ 0,1%
R49	H7	*Καρκινογόνο*: μπορεί να προκαλέσει καρκίνο όταν εισπνέεται	≥ 0,1%
		Κράματα Be-Cu	
R23	H6 (H5)	*Τοξικό (επιβλαβές)*: τοξικό όταν εισπνέεται	≥ 3,0%
R49	H7	*Καρκινογόνο*: μπορεί να προκαλέσει καρκίνο όταν εισπνέεται	≥ 0,1%

1.4.4. Μόλυβδος

Το καλάι συγκόλλησης[12] (solder) μολύβδου-κασσιτέρου μιας PCB αποτελεί περίπου το 4 με 6% κ.β. αυτής, συνεπώς ο μόλυβδος αντιπροσωπεύει περίπου το 2-3% του βάρους της. Κάθε χρόνο υπολογίζεται ότι παράγονται 100,000-125,000 τόνοι καλάι συγκόλλησης μολύβδου παγκοσμίως, τα οποία προορίζονται για την βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών [6, 19]. Στις Η.Π.Α. σύμφωνα με την παραδοχή ότι παράγονται 130 εκατομμύρια απόβλητα κινητά τηλέφωνα κάθε χρόνο, προκύπτει ότι η ποσότητα μολύβδου που αντιστοιχεί σε αυτά είναι 36,854 kg. Η κύρια ανησυχία-μέριμνα όσον αφορά το μόλυβδο έγκειται στην πιθανή διαφυγή του στο περιβάλλον μέσω των στραγγισμάτων λόγω της απόθεσης-ταφής του στο έδαφος – με συνέπεια τη ρύπανση υπόγειων υδροφορέων – καθώς και στο γεγονός ότι η επεξεργασία του μεταλλικού μολύβδου προκαλεί το σχηματισμό ενώσεών του, οι οποίες κατατάσσονται ως επικίνδυνες [19].

[12] Η χρήση μολύβδου αποτελεί την κύρια στη βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών χρησιμοποιούμενη μέθοδο συγκόλλησης διαφόρων συστατικών μερών επί των PCBs και άλλων εξαρτημάτων [51]. Αναφέρεται ότι το 2% της συνολικής κατανάλωσης Pb στη Γερμανία το 1997 χρησιμοποιήθηκε στις συγκολλήσεις αυτές [52]. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται εξαιρετική επιστημονική κινητικότητα σχετικά με την αντικατάσταση του μολύβδου σε αυτήν την εφαρμογή του, η οποία αντανακλάται μεταξύ άλλων στα άρθρα [61-64].

Οι επιδράσεις του μολύβδου στο περιβάλλον είναι γνωστές εδώ και χρόνια. Ο μόλυβδος προκαλεί στον άνθρωπο βλάβες στο κεντρικό και το περιφερειακό νευρικό σύστημα, τα νεφρά, καθώς και το ανοσοποιητικό, μυϊκό, κυκλοφορικό και αναπαραγωγικό σύστημα, ενώ ενέχεται και η δυνατότητα πρόκλησης καρκίνου. Έχουν επίσης αναφερθεί βλάβες στο ενδοκρινικό σύστημα, επηρεάζει την εγκεφαλική ανάπτυξη των παιδιών, ενώ προκαλεί εξασθένηση της ακοής των και παρεμπόδιση του μεταβολισμού της βιταμίνης D. Επιπλέον, ο μόλυβδος συσσωρεύεται στο περιβάλλον, δυνάμενος να προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις σε ολόκληρα οικοσυστήματα, και προκαλεί οξείες και χρόνιες επιδράσεις σε φυτά, ζώα και μικροοργανισμούς [50, 51, 56].

Επίσης, στις Η.Π.Α. και την Ευρώπη το 17 και το 40%, αντίστοιχα, του περιεχομένου σε μόλυβδο των MSW οφείλεται σε ΑΗΗΕ, ενώ επίσης αποτελούν και την κύρια πηγή μολύβδου σε αυτά [43]. Σημειώνεται ότι, όπως και για τον υδράργυρο, η χρήση μολύβδου στον ΗΗΕ απαγορεύθηκε από την 1^{η} Ιουλίου 2006, όπως ορίζεται από την 2002/95/ΕΚ [58] – αν και υφίσταται τροποποίηση αυτής, η οποία και επιτρέπει τη χρήση μολύβδου σε ΗΗΕ έως ποσοστού 0,1% κ.β. για ομοιογενή υλικά [55], ενώ συνάμα στο παράρτημα της οδηγίας παρατίθενται εξαιρέσεις επί της απαγόρευσης τούτης.

Παρότι μέχρις προσφάτως δεν υπήρχαν στην επιστημονική βιβλιογραφία μελέτες ικανές να παράσχουν επαρκή επιστημονικά δεδομένα σχετικά με την τοξικότητα των κινητών τηλεφώνων, το 2004 δημοσιεύτηκε μια έκθεση του ΜΚΟ Basel Action Network, η οποία στοχεύει στην πλήρωση του συγκεκριμένου κενού. Στην έκθεση αυτή παρατίθενται τα πορίσματα δύο διαφορετικών ερευνητικών εργασιών, οι οποίες είχαν μεταξύ άλλων ως στόχο τον καθορισμό της τοξικότητας αποβλήτων κινητών τηλεφώνων, μέσω του προσδιορισμού της συγκέντρωσης μολύβδου σε στραγγίσματα των αποβλήτων αυτών, υπό πρότυπες, καθορισμένες συνθήκες, βάσει της εξέτασης Toxicity Characteristic Leaching Procedure (*TCLP*), η οποία προσομοιάζει εν πολλοίς τις συνθήκες που επικρατούν σε πραγματικές χωματερές [51].

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εργασιών αυτών, η συγκέντρωση μολύβδου στα στραγγίσματα της πλειοψηφίας των υπό εξέταση τηλεφώνων (χωρίς τις μπαταρίες) ξεπερνούσε κατά πολύ το αντίστοιχο ανώτατο επιτρεπτό όριο – η πρώτη μελέτη κατέδειξε μέση συγκέντρωση 20 mg Pb ανά lt με ανώτατο όριο τα 5 mg/lt [65], με την

δεύτερη να αναφέρει ακόμη μεγαλύτερη υπέρβαση του ορίου. Συνεπώς, βάσει των προαναφερθέντων τα κινητά τηλέφωνα μπορούν-απαιτείται να κατηγοριοποιηθούν ως επικίνδυνα απόβλητα, καθότι κατέχουν την ιδιότητα Η13 του παραρτήματος ΙΙΙ της 91/689/ΕΟΚ (παρασκευάσματα ή ουσίες τα οποία, μετά από διάθεση, μπορούν να δημιουργήσουν, με οποιοδήποτε μέσο, μια άλλη ουσία, π.χ. ένα προϊόν έκπλυσης, το οποίο έχει ένα από τα χαρακτηριστικά Η1 έως 12) [51].

1.4.5. Εξασθενές χρώμιο

Το εξασθενές χρώμιο έχει χρησιμοποιηθεί από τη βιομηχανία ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών στην επιχρωμίωση μεταλλικών επιφανειών ως αναστολέας διάβρωσης (corrosion inhibitor) μη επεξεργασμένων και γαλβανισμένων πλακών χάλυβα, ως υλικό ηλεκτρικής θωράκισης (electrical shielding material) για φύλλα συγκεκριμένων μετάλλων, καθώς και ως «διακοσμητικό» ή σκληρυντής (hardener) χαλύβδινων περιβλημάτων. Βέβαια τα περισσότερα κινητά τηλέφωνα, πλέον, διαθέτουν πλαστικά περιβλήματα και δεν χρειάζονται προστασία από τη διάβρωση. Όμως, βρίσκει εφαρμογή στα πλαστικά σαν χρωστική ουσία σε πιγμέντα. Αν και οι χρησιμοποιούμενες ανά κατασκευαστικό στοιχείο-εξάρτημα ΗΗΕ ποσότητες Cr(VI) είναι μικρές, αναφέρεται ότι η σύμφωνα με εκτιμήσεις απόρριψη $315 \cdot 10^6$ υπολογιστών στις Η.Π.Α. το διάστημα 1997 με 2004, θα επιφέρει την απόρριψη σχεδόν 450 μετρικών τόνων εξασθενούς χρωμίου στο περιβάλλον [56][13]. Σημειώνεται ότι η χρήση Cr(VI) στον ΗΗΕ απαγορεύθηκε από την 1η Ιουλίου 2006, όπως ορίζεται στην 2002/95/ΕΚ [58] – αν και υφιστάμενη τροποποίηση επιτρέπει τη χρήση του σε ΗΗΕ έως ποσοστού 0,1% κ.β. για ομοιογενή υλικά [55], ενώ στο παράρτημα της οδηγίας αναφέρεται επίσης ότι εξαιρείται η χρήση του ως αντιδιαβρωτικό στο ψυκτικό σύστημα από ανθρακούχο χάλυβα ψυγείων απορρόφησης.

Το περιεχόμενο σε απόβλητα εξασθενές χρώμιο θεωρείται ότι μπορεί εύκολα να μεταφερθεί στα εκχυλίσματα χωματερών. Επίσης, η αποτέφρωση τέτοιων αποβλήτων οδηγεί την παραγωγή ιπτάμενης τέφρας, από την οποία δύναται να εκχυλισθεί ή να εξατμισθεί το Cr(VI), και συνεπώς συνιστάται να αποφεύγεται η αποτέφρωση αποβλήτων περιεχόντων Cr(VI) [56].

---

[13] Σύμφωνα με άλλη πηγή, η χρήση Cr(VI) σε ΗΗΕ αποτελεί μικρό μονάχα μερίδιο της συνολικής χρήσης του, ενώ συνάμα πολλοί παραγωγοί ΗΗΕ έχουν παύσει πλέον εξ ολοκλήρου τη χρησιμοποίηση του [53].

Συν τοις άλλοις, οι ενώσεις του Cr(VI) είναι τοξικές για το περιβάλλον. Το Cr(VI) διαπερνά εύκολα την κυτταρική μεμβράνη και απορροφάται από τα κύτταρα, προκαλώντας ποικίλες τοξικές επιδράσεις. Επίσης, προκαλεί σοβαρές αλλεργικές αντιδράσεις ακόμη και σε μικρές συγκεντρώσεις (μεταξύ άλλων αλλεργική βρογχίτιδα), καθώς και βλάβες στο DNA, ενώ όταν εισπνέεται, έχει καρκινογόνο επίδραση στους ανθρώπους [50, 56]. Οι φράσεις R για το εξασθενές χρώμιο, οι αντίστοιχες ιδιότητες, καθώς και οι ανάλογες συγκεντρώσεις κατωφλιού παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 9: *Φράσεις R, ιδιότητες και συγκεντρώσεις κατωφλιού για το Cr(VI) [19].*

Φράση R	***Ιδιότητα***	***Φύση του κινδύνου***	***Συγκέντρωση κατωφλιού***
R25	H6 (H5)	*Τοξικό (επιβλαβές)*: τοξικό σε περίπτωση καταπόσεως	≥ 0,1%
R26	H6 (H5)	Πολύ τοξικό όταν εισπνέεται	≥ 0,1%
R43	–	Μπορεί να προκαλέσει ευαισθητοποίηση σε επαφή με το δέρμα	–
R46	H11	*Μεταλλαξογόνο*: μπορεί να προκαλέσει κληρονομικές γενετικές βλάβες	≥ 0,1%
R49	H7	*Καρκινογόνο*: μπορεί να προκαλέσει καρκίνο όταν εισπνέεται	≥ 0,1%
R50-53	H14	*Οικοτοξικό*: πολύ τοξικό για τους υδρόβιους οργανισμούς, μπορεί να προκαλέσει μακροχρόνιες δυσμενείς επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον	≥ 0,25%

1.4.6. Κάδμιο

Το κάδμιο και κάποιες εκ των ενώσεών του, χρησιμοποιείται σε πληθώρα εφαρμογών στα κινητά τηλέφωνα:

- ✓ Το μεταλλικό κάδμιο χρησιμοποιείται ως τμήμα του υλικού του αρνητικού ηλεκτροδίου στις μπαταρίες νικελίου-καδμίου (Ni-Cd), για την επικάλυψη μεταλλικών επιφανειών σιδήρου, χάλυβα, κραμάτων τιτανίου και άλλων κραμάτων μη σιδηρούχων μετάλλων, καθώς και ως στοιχείο ανάμιξης σε κράματα ειδικών εφαρμογών π.χ. κράματα συγκόλλησης (soldering, brazing alloys).

- ✓ Το οξείδιο του καδμίου (CdO) χρησιμοποιείται συχνά ως τμήμα του υλικού του αρνητικού ηλεκτροδίου στις μπαταρίες νικελίου-καδμίου καθώς και στα ειδικά κράματα αργύρου-οξειδίου του καδμίου.
- ✓ Το θειούχο κάδμιο (CdS) χρησιμοποιείται σε κόκκινα, πορτοκαλί και κίτρινα πιγμέντα για πλαστικά, κεραμικά και υάλινα υλικά και υαλώματα (enamels).

Αν και οι χρησιμοποιούμενες ανά κατασκευαστικό στοιχείο ΗΗΕ ποσότητες καδμίου είναι μικρές, αναφέρεται ότι η σύμφωνα με εκτιμήσεις απόρριψη $315 \cdot 10^6$ PCs στις Η.Π.Α. το διάστημα 1997 με 2004, έχει επιφέρει την απόρριψη σχεδόν 747 τόνων καδμίου στο περιβάλλον [56]. Ακόμη, αναφέρεται ότι σε ΑΗΗΕ οφείλεται το 9% των ολικών ποσοτήτων καδμίου των αστικών στερεών αποβλήτων, όπου όμως το 95% αυτών των ποσοτήτων καδμίου οφείλεται σε απόβλητες μπαταρίες (κυρίως επαναφορτιζόμενες) και το 0,1% σε καθοδικές λυχνίες [53]. Σημειώνεται ότι η χρήση καδμίου στον ΗΗΕ έχει απαγορευτεί από 1^{ης} Ιουλίου 2006, όπως ορίζεται στην Οδηγία 2002/95/ΕΚ [58] – αν και υφίσταται τροποποίηση, η οποία επιτρέπει τη χρήση του έως ποσοστού 0,01% κ.β. για ομοιογενή υλικά [55], ενώ από την 2002/96/ΕΚ επιβάλλεται ρητώς η αφαίρεση των μπαταριών από το ρεύμα των υπολοίπων ΑΗΗΕ.

Μειονέκτημα του καδμίου και των ενώσεών του αποτελεί η τοξικότητά τους, η οποία οδηγεί σε καρκινογένεση και τερατογένεση, με ενδεχόμενο κίνδυνο πρόκλησης μη αναστρέψιμων επιδράσεων στην ανθρώπινη υγεία, όπου το κάδμιο απορροφάται μέσω της αναπνοής, αλλά και των τροφών. Επίσης, το κάδμιο και οι ενώσεις του συσσωρεύονται στο ανθρώπινο σώμα και κυρίως στα νεφρά, ενώ λόγω του μεγάλου χρόνου βιολογικής ημίσειας ζωής του (30 έτη), μπορεί εύκολα να συσσωρευτεί σε ποσότητες ικανές να προκαλέσουν συμπτώματα δηλητηρίασης. Επειδή μοιάζει με τον ψευδάργυρο, ο ανθρώπινος οργανισμός παραπλανάται και δεσμεύει ποσά καδμίου που περιέχουν σε ίχνη οι τροφές και σε μεγαλύτερες ποσότητες ο καπνός του τσιγάρου. Πέρα από κάποια όρια όμως, παρουσιάζονται προβλήματα στη νεφρική λειτουργία. Πάντως, οι οξείες δηλητηριάσεις είναι σπάνιες, επειδή οι ενώσεις του καδμίου έχουν εμετικές ιδιότητες. Επιπλέον, το κάδμιο παρουσιάζει τον κίνδυνο αθροιστικών επιδράσεων στο περιβάλλον, λόγω της οξείας και της χρόνιας τοξικότητάς του [50, 51, 66].

Τέλος, οι φράσεις R για το κάδμιο, το οξείδιο του καδμίου και το θειούχο κάδμιο, οι αντίστοιχες ιδιότητες, καθώς και οι συγκεντρώσεις κατωφλιού καταδεικνύονται στον ακόλουθο Πίνακα 10.

Πίνακας 10: *Φράσεις R, ιδιότητες και συγκεντρώσεις κατωφλιού των Cd, CdO και CdS [19].*

Φράση R	***Ιδιότητα***	***Φύση του κινδύνου***	***Συγκέντρωση κατωφλιού***
		Cd	
R26	H6 (H5)	*Τοξικό (επιβλαβές)*: πολύ τοξικό όταν εισπνέεται	≥ 0,1%
R45	H7	*Καρκινογόνο*: μπορεί να προκαλέσει καρκίνο	≥ 0,1%
R52	H14	*Οικοτοξικό*: επιβλαβές για τους υδρόβιους οργανισμούς	≥ 25%
		CdO	
R22	H6 (H5)	*Τοξικό (επιβλαβές)*: επιβλαβές σε περίπτωση καταπόσεως	≥ 25%
R23	H6 (H5)	Τοξικό όταν εισπνέεται	≥ 3%
R25	H6 (H5)	Τοξικό σε περίπτωση καταπόσεως	≥ 3%
R48	H6 (H5)	Κίνδυνος σοβαρής βλάβης της υγείας έπειτα από παρατεταμένη έκθεση	≥ 3%
R49	H7	*Καρκινογόνο*: Μπορεί να προκαλέσει καρκίνο όταν εισπνέεται	≥ 0,1%
		CdS	
R22	H6 (H5)	Επιβλαβές σε περίπτωση καταπόσεως	≥ 25%
R23	H6 (H5)	Τοξικό όταν εισπνέεται	≥ 3%
R25	H6 (H5)	Τοξικό σε περίπτωση καταπόσεως	≥ 3%
R40	H7	*Καρκινογόνο*: ύποπτο καρκινογένεσης	≥ 1%
R48	H6 (H5)	Κίνδυνος σοβαρής βλάβης της υγείας έπειτα από παρατεταμένη έκθεση	≥ 3%
R53	H14	*Οικοτοξικό*: μπορεί να προκαλέσει μακροχρόνιες δυσμενείς επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον	≥ 25%

1.4.7. Υγροί κρύσταλοι

Οι υγροί κρύσταλοι (liquid crystals) αποτελούν μία στερεά μορφή των πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) ενώ κατασκευάζονται από ένα μίγμα μεταξύ 10 και 30 ενώσεων. Η μελέτη [67] για την τοξικότητα των υγρών κρυστάλλων και της διάθεσης των LCDs έδειξαν ότι οι υγροί κρύσταλλοι δεν είναι έντονα τοξικοί. Μερικοί μπορεί προκαλέσουν ερεθισμό και διάβρωση, όμως οι συνέπειες αυτές μπορούν να αποφευχθούν από τον περιορισμό των συγκεντρώσεών τους στα μίγματα. Επίσης, αποδείχθηκε ότι δεν προκαλεί μεταλλάξεις σε βακτήρια (AMES test) και θυλαστικά κελύφη (MLA-Screening, Mouse Lymphoma Assay) ενώ δεν βλάπτει τους υδρόβιους οργανισμούς όπως βακτήρια, άλγη, ψάρια κ.α. Παράλληλα, δεν βιοδιασπώνται έυκολα και δεν προκαλούν καρκινογενέσεις. Παρόλη την χημική σταθερότητα που τους χαρακτηρίζει, γι' αυτό θεωρούνται κατάλληλοι για χρήση στις LCDs, οι υγροί κρύσταλλοι δεν πληρούν τα κριτήρια POPs (persistent organic pollutants) διότι δεν είναι έντονα τοξικοί ούτε βιοσυσσωρευτικοί. Οι φράσεις R, οι ιδιότητες και οι συγκεντρώσεις κατωφλιού για τους υγρούς κρυστάλλους παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 11.

Πίνακας 11: *Φράσεις R, ιδιότητες και συγκεντρώσεις κατωφλιού των υγρών κρυστάλλων [68].*

Φράση R	***Ιδιότητα***	***Φύση του κινδύνου***	***Συγκέντρωση κατωφλιού***
R53	H14	*Οικοτοξικό:* μπορεί να προκαλέσει μακροχρόνιες δυσμενείς επιπτώσεις στο υδάτινο περιβάλλον	$\geq 25\%$
R43	-	Μπορεί να προκαλέσει ευαισθητοποίηση σε επαφή με το δέρμα	
R36/38	H4	Μπορεί να προκαλέσει ερεθισμό στα μάτια, το δέρμα και το αναπνευστικό σύστημα	$\geq 20\%$

1.5. Διαχείριση αποβλήτων κινητών τηλεφώνων

Η διεύρυνση της παγκόσμιας αγοράς των κινητών τηλεφώνων καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, όπως το μικρό μέγεθος - γεγονός που καθιστά δυσκολότερη την ξεχωριστή συλλογή τους από το υπόλοιπο ρεύμα αστικών στερεών αποβλήτων - και το περιεχόμενο σε πολύτιμα, βαρέα μέταλλα και επικίνδυνες ουσίες, καθιστά τα απόβλητα κινητών τηλεφώνων ένα υψίστης σημασίας περιβαλλοντικό πρόβλημα. Όσον αφορά τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η Ευρωπαϊκή νομοθεσία θέσπισε την οδηγία σχετικά με τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (Οδηγία ΑΗΗΕ ή WEEE Directive), η οποία ρυθμίζει την μεταχείριση των end of life (EoL) κινητών τηλεφώνων και άλλων ΗΗΕ [1]. Επίσης, θέσπισε και την Οδηγία σχετικά με την απαγόρευση της χρήσης συγκεκριμένων επικίνδυνων ουσιών (Οδηγία RoHS ή RoHS Directive), η οποία αποτελεί την πιό άμεση κυβερνητική εντολή, προς το παρόν, που επηρεάζει τον σχεδιασμό και την κατασκευή των κινητών τηλεφώνων [58]. Η Οδηγία ΑΗΗΕ απαιτεί την πρόληψη, τη χωριστή συλλογή, την κατάλληλη διαχείριση του ΗΗΕ στο τέλος του κύκλου ζωής του, καθώς και το σχεδιασμό για την ανακύκλωση. Η Οδηγία επίσης εφαρμόζει την διευρυμένη ευθύνη του παραγωγού (Extended Producer Responsibility, EPR) επιτρέποντας στους καταναλωτές την επιστροφή των ΑΗΗΕ χωρίς χρέωση. Οι παραγωγοί είναι υποχρεωμένοι να χρηματοδοτούν, συλλογικά ή μεμονωμένα, την συλλογή, επεξεργασία, ανάκτηση και διάθεση των ΑΗΗΕ. Ακολουθώντας τις υλοποιήσεις της EPR, οι παραγωγοί ΗΗΕ έχουν τις παρακάτω υποχρεώσεις:

1. Χρηματοδότηση της συλλογής, επεξεργασίας και υγιούς περιβαλλοντικής αποκατάστασης των ΑΗΗΕ.
2. Δημιουργία συστημάτων για επεξεργασία και ανάκτηση των ΑΗΗΕ.
3. Επίτευξη των ποσοστών ανακύκλωσης για κάθε κατηγορία ΑΗΗΕ.
4. Παροχή πληροφοριών στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας και στις εταιρείες ανακύκλωσης αποβλήτων σχετικά με τη σύσταση και σύνθεση των προϊόντων τους.

Πριν από την εφαρμογή της Κοινοτικής Οδηγίας ΑΗΗΕ, η πλειοψηφία των αποβλήτων κινητών τηλεφώνων απορρίπτονταν και αποτεφρώνονταν μαζί με τα αστικά στερεά απόβλητα λόγω της έλλειψης συστημάτων συλλογής και επεξεργασίας. Σύμφωνα με την Οδηγία ΑΗΗΕ, 75% ανά βάρος ενός κινητού τηλεφώνου θα πρέπει να ανακτηθεί. Ο όρος ανάκτηση χαρακτηρίζει την ανακύκλωση των υλικών, την επαναχρησιμοποίηση των συστατικών μερών ή ολόκληρο το προϊόν, καθώς και την

ανάκτηση της ενέργειας. Τουλάχιστον, το 65% κατά βάρος, πρέπει να ανακυκλωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν, πράγμα που σημαίνει, ότι ένα μέγιστο ποσοστό του 10% ανά βάρος μπορεί να παρέχεται για την ανάκτηση της ενέργειας ή την απόρριψη [39]. Η Οδηγία προβλέπει ότι οι μπαταρίες, οι PCBs, τα κουμπιά στις PCBs, καθώς και η οθόνη LCD θα πρέπει να αφαιρούνται [69].

Για την επίτευξη των απαιτήσεων της Οδηγίας της ΕΕ για τα ΑΗΗΕ πραγματοποιήθηκαν μελέτες σχετικά με τον προσδιορισμό της πιο οικολογικά αποδοτικής επιλογής για την επεξεργασία των απορριπτόμενων κινητών τηλεφώνων. Στην μελέτη [36] μετρήθηκε η περιβαλλοντική απόδοση και ακέραιο κόστος που απαιτείται για την ανακύκλωση κινητών τηλεφώνων χρησιμοποιώντας την προσέγγιση QWERTY / EE (Quotes for Environmentally Weighted Recyclability and Eco-Efficiency). Η μελέτη συνέκρινε δύο σενάρια για τη θεραπεία των απορριπτόμενων κινητών τηλεφώνων: 1) την αποστολή των συσκευών αποκλειστικά σε ένα χυτήριο χαλκού και 2)την επιλεκτική μεταχείριση των PCBs σύμφωνα με την Οδηγία ΑΗΗΕ καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι, "η απευθείας διαδρομή στο μεταλλουργείο είναι σαφώς η πιο οικο-αποδοτική επιλογή για την επεξεργασία των απορριπτόμενων κινητών τηλεφώνων".

Η ανακατασκευή των προϊόντων, η επαναχρησιμοποίηση εξαρτημάτων και η ανακύκλωση των υλικών είναι αναγκαίες για την επίτευξη τόσο της διατήρησης των πόρων όσο και της μείωσης των αποβλήτων [70].

1.5.1. Αποσυναρμολόγηση για επαναχρησιμοποίηση

Μερικά από τα συστατικά του κινητού τηλεφώνου είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν, σύμφωνα με την Οδηγία της ΕΕ για τα ΑΗΗΕ, πριν από την επιλεγμένη επεξεργασία ανάκτησης των EoL κινητών τηλεφώνων. Οι μπαταρίες, οι PCBs, τα κουμπιά στις PCBs καθώς και οι LCDs θα πρέπει να αφαιρεθούν. Η αποσυναρμολόγηση είναι η διαδικασία της απομάκρυνσης των συστατικών στοιχειων από ένα εξοπλισμό ή ενός υποσυστήματός του και επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη ζήτηση για συγκεκριμένα εξαρτήματα και υλικά [70]. Σχεδόν όλες οι πιθανές προσεγγίσεις των συσκευών στο τέλος του κύκλου ζωής τους, όπως η αναβάθμιση, η επαναχρησιμοποίηση (ανακατασκευή), η ανακύκλωση των υλικών, απαιτούν κάποια μορφή αποσυναρμολόγησης. Επίσης, κατά την διαδικασία της αποσυναρμολόγησης

διαχωρίζονται τα διάφορα συστατικά του κινητού τηλεφώνου, τα οποία στη συνέχεια χειρίζονται ξεχωριστά. Αν ο στόχος είναι η ανάκτηση των υλικών, τότε εφαρμόζεται τεμαχισμός και μετέπειτα διαχωρισμός [70]. Τυπικές αλλαγές στο σχεδιασμό για τη διευκόλυνση της αποσυναρμολόγησης και ενίσχυση της ικανότητας ανακύκλωσης περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων, τη μείωση του αριθμού των στοιχείων, τον σχεδιασμό για την αποσυναρμολόγηση, τη χρήση του μετάλλου αντί των πλαστικών, την ενοποίηση της ποιότητας των πλαστικών και την αυξημένη χρήση των ανακυκλωμένων πλαστικών σε νέα προϊόντα. Όλα αυτά τα μέτρα θα συμβάλουν στη μείωση του χρόνου αποσυναρμολόγησης, καθώς και την αύξηση των δυνατοτήτων για επαναχρησιμοποίηση / πώληση εξαρτημάτων / ανακυκλωμένα υλικά, που οδηγεί σε μείωση του κόστους / αύξηση της κερδοφορίας η οποία συνδέεται με την διαχείριση του EoL εξοπλισμού [71].

1.5.2. Επαναχρησιμοποίηση και ανακατασκευή

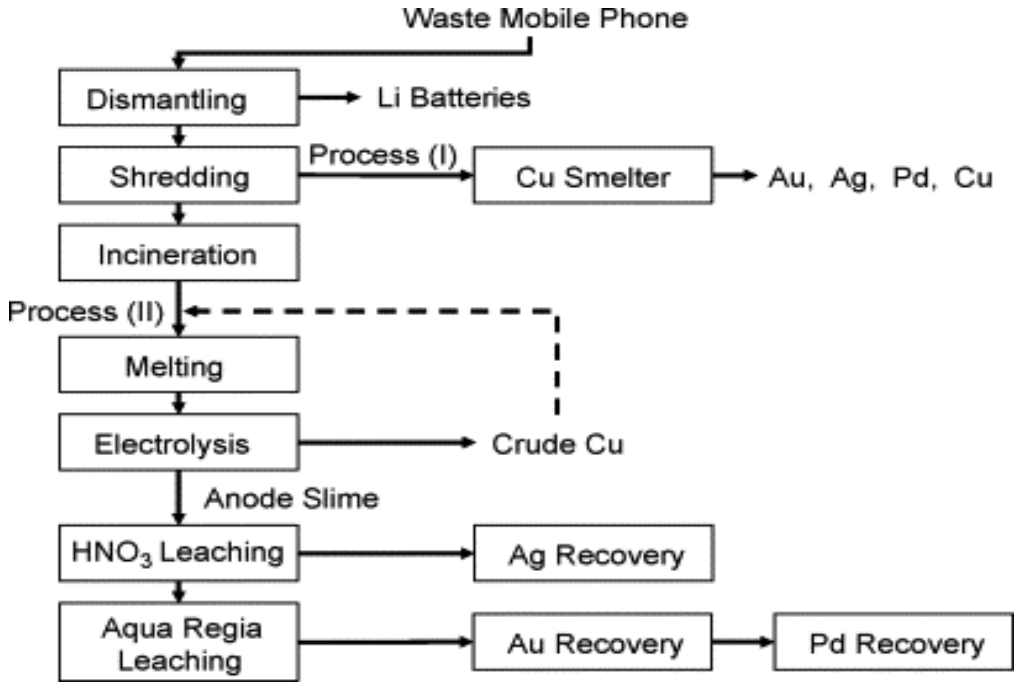
Η ανακατασκευή των κινητών τηλεφώνων αναδύεται ως μια λογική εναλλακτική λύση για την ανάκτηση υλικών / ανακύκλωση. Τα EoL κινητά τηλέφωνα που συλλέγονται στις ανεπτυγμένες οικονομίες, εξάγονται - ανακατασκευασμένα ή μη – και οδηγούνται προς πώληση στις αναπτυσσόμενες χώρες. Σε σύγκριση με άλλα προϊόντα ΗΗΕ, υπάρχει ένας εξαιρετικά μεγάλος αριθμός παραλλαγών των κινητών τηλεφώνων σε κυκλοφορία / στην αγορά [8]. Το γεγονός αυτό αποτελεί πρόκληση για την ανακατασκευή των κινητών τηλεφώνων ως προτιμώμενη επιλογή επαναχρησιμοποίησης. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι η πλήρης ανακατασκευή των κινητών τηλεφώνων δεν είναι κερδοφόρα λόγω των σχετικά χαμηλών τιμών πώλησης [39], εκτός αν τα εν λόγω προϊόντα εξάγονται σε αναπτυσσόμενες χώρες. Παρόλ' αυτά, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες και ιδιαίτερα η εφαρμογή της Κοινοτικής Οδηγίας για τα ΑΗΗΕ ενθαρρύνει την ανακατασκευή / ανακύκλωση των EoL κινητών τηλεφώνων στην Ευρώπη. Η επαναχρησιμοποίηση των απορριπτόμενων κινητών τηλεφώνων μέσω ανακαίνισης και ανακατασκευής έχει θετική επίδραση στο περιβάλλον, καθώς οδηγεί σε παράταση της διάρκειας ζωής του προϊόντος εμποδίζοντας έτσι και την νέα εξόρυξη υλικών.

Οι παραγωγοί στην Ευρώπη έχουν αρχίσει την ανακατασκευή EoL κινητών τηλεφώνων σε μια προσπάθεια να επιτευχθούν οι στόχοι αξιοποίησης που καθορίζονται από την Οδηγία της ΕΕ για τα ΑΗΗΕ. Αυτά τα ανακατασκευασμένα προϊόντα, πωλούνται στις αναδυόμενες αγορές τηλεπικοινωνιών στις αναπτυσσόμενες

χώρες. Με ετήσιο όγκο πωλήσεων πάνω από 3 εκατομμύρια ανακατασκευασμένα τηλέφωνα το 2003 στις ΗΠΑ οι ανακατασκευαστές έχουν αποδείξει ότι η ανακατασκευή των κινητών τηλεφώνων αποτελεί έναν ανταγωνιστικό επιχειρηματικό τομέα. Η εξαγωγή ανακαινισμένων κινητών τηλεφώνων είναι άμεσα συνδεδεμένη με μεταβίβαση των επικίνδυνων ουσιών που περιέχονται στο τηλέφωνο. Στην περίπτωση των εξαγωγών σε χώρες με παρόμοια περιβαλλοντικά πρότυπα, η αντίστοιχη διάθεση είναι εγγυημένη. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος των ανακαινισμένων κινητών τηλεφώνων εξάγεται στην Ασία, την Αφρική ή τη Νότια Αμερική, η διάθεση των συγκεκριμένων αποβλήτων κατά κανόνα δεν συμμορφώνεται με τα ευρωπαϊκά πρότυπα [36, 40].

1.5.3. Ανακύκλωση

Οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων του κινητού τηλεφώνου και άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα περιέχουν πολύτιμα υλικά, όπως χρυσό, άργυρο, παλλάδιο, και πλατίνα, τα οποία μπορούν να ανακτηθούν. Τα εμπόδια για την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων είναι ευρέως αναγνωρισμένα. Τα προϊόντα είναι ευρέως κατανεμημένα στους καταναλωτές, έτσι η εύρεση και η συλλογή προϊόντων για ανακύκλωση ή κατάλληλη διαχείριση EoL είναι δύσκολη. Ένα άλλο σημαντικό εμπόδιο για τη συλλογή και ανακύκλωση των EoL κινητών τηλεφώνων και των αξεσουάρ των είναι το σχετικά μικρό μέγεθός τους. Τα μικρά κατασκευαστικά στοιχεία των ΑΗΗΕ θέτουν μια σειρά από μοναδικά προβλήματα για την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση και είναι σημαντικό ότι οι μηχανισμοί που τίθενται σε εφαρμογή να διασφαλίσουν ότι αυτά δεν θα παραμεληθούν [72]. Επί του παρόντος, η ανακύκλωση των ΑΗΗΕ μπορεί σε γενικές γραμμές να χωριστεί σε τρεις φάσεις: την αποσυναρμολόγηση (διάλυση) την αναβάθμιση και τη διύλιση. Στη Εικόνα 2 διαφαίνονται δύο μέθοδοι ανάκτησης πολύτιμων μετάλλων από απόβλητα κινητά τηλέφωνα, η οποία εφαρμόζεται σε μονάδα ανακύκλωσης στην Κορέα [73].



Εικόνα 2: *Διάγραμμα ροής της ανακύκλωσης πολύτιμων μετάλλων από απόβλητα κινητά τηλέφωνα [73].*

Οι τρέχουσες πρακτικές ανακύκλωσης για τα κινητά τηλέφωνα περιλαμβάνουν τον τεμαχισμό και την τήξη ολόκληρης της συσκευής ή της PCB μετά την αφαίρεση της μπαταρίας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ανακτηθεί περίπου το 30% του κινητού τηλεφώνου, το οποίο περιλαμβάνει την ποσότητα του χαλκού και άλλα πολύτιμα μέταλλα. Εταιρείες ανάκτησης μετάλλων ενδιαφέρονται όλο και περισσότερο για τα κινητά τηλέφωνα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η Yokohama Metal στην Ιαπωνία, η οποία πληρώνει 2.89 € ανά κινητό τηλέφωνο ενώ η αξία του σύμφωνα με το περιεχόμενό του είναι περίπου 8.66 €. Στην Εικόνα 3 προβάλλεται ένα στάδιο της επεξεργασίας των απόβλητων κινητών τηλεφώνων σε μονάδα ανακύκλωσης. Το 2001, υποβλήθηκαν σε επεξεργασία 1,7 εκατ. κινητά τηλέφωνα, ή περίπου 4% της ιαπωνικής αγοράς. Σε όλη την Ασία, οι ανακυκλωτές συλλέγουν εκατομμύρια τόνους παλαιών ηλεκτρονικών συσκευών από τις ΗΠΑ και άλλες χώρες και ανακτούν από αυτά τα πολύτιμα μέταλλα. Ένα κινητό τηλέφωνο, για παράδειγμα, περιέχει χρυσό σε συγκεντρώσεις τριάντα φορές μεγαλύτερη από ό,τι κατά μέσο όρο ένα ορυχείο χρυσού [74]. Στην μελέτη [69] παρατηρήθηκε ότι «οι αλλαγές στον σχεδιασμό των κινητών τηλεφώνων είναι αναγκαία για την επίτευξη των απαιτούμενων, από την Οδηγία ΑΗΗΕ, ποσοστών ανακύκλωσης».

Εικόνα 3: *Απόβλητα κινητά τηλέφωνα σε μονάδα ανακύκλωσης.*

1.5.4. Απόρριψη με ΑΣΑ (υγειονομική ταφή και αποτέφρωση)

Η υγειονομική ταφή και αποτέφρωση φαίνεται να είναι τα χειρότερα σενάρια για τη διαχείριση των EoL κινητών τηλεφώνων και αξεσουάρ των. Γενικά, τα απόβλητα του τομέα πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών μπορούν επίσης να αποτεφρώνονται με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας από αυτά. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές δεν είναι διαθέσιμες στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η υγειονομική ταφή ή η αποτέφρωση των EoL κινητών τηλεφώνων δημιουργούν τη δυνατότητα για την απελευθέρωση βαρέων μετάλλων ή αλογονωμένων υδρογονανθράκων από μπαταρίες, PCBs, LCDs, πλαστικά περιβλήματα, καλωδιώσεις κλπ. [75]. Η αποτέφρωση μειώνει το τοξικό ή επικίνδυνο δυναμικό ορισμένων ουσιών ενώ αυξάνεται το τοξικό ή επικίνδυνο δυναμικό κάποιων άλλων. Σε γενικές γραμμές, υπάρχουν κίνδυνοι που σχετίζονται με την αποτέφρωση των αποβλήτων πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών, που προκύπτουν από τη μη κατανόηση των αλληλεπιδράσεων των ουσιών μεταξύ τους ή την επίδραση των χαμηλών δόσεων έκθεσης σε πολλές ουσίες με την πάροδο του χρόνου. Έτσι, υφίσταται αβεβαιότητα για τον υπολογισμό των κινδύνων που συνδέονται με ουσίες ευρείας διασποράς που βρίσκονται στα απόβλητα πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών, για το περιβάλλον. Η ποικιλία των ουσιών που χρησιμοποιούνται στον τομέα της πληροφορικής και τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού αλληλεπιδρούν για να ασκήσουν συνεργικά αποτελέσματα, δυνητικά αυξάνοντας την απελευθέρωσή τους και

μεγεθύνοντας τις αρνητικές επιπτώσεις τους [44]. Η χαμηλής ή μέτριας θερμοκρασίας επεξεργασία των αποβλήτων έχει τη δυνατότητα να σχηματίσει πιο τοξικά προϊόντα από ό,τι η αποτέφρωση [76]. Δυστυχώς, χαμηλής ή μέτριας θερμοκρασίας επεξεργασία ή ανοιχτή καύση φαίνεται να είναι ο κανόνας στη διαχείριση των αποβλήτων στις αναπτυσσόμενες χώρες (Εικόνα 4). Στις περισσότερες, απορρίπτονται κινητά τηλέφωνα, εξαρτήματα, αξεσουάρ τους και άλλα ΑΗΗΕ μαζί με τα ΑΣΑ. Αυτά τα απόβλητα συλλέγονται συνήθως μέσα σε κατοικημένες περιοχές και καίγονται για να μειωθεί ο όγκος των αποβλήτων πριν από την τελική διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής χωρίς επενδυτικό υλικό. Οι χώροι υγειονομικής ταφής συνήθως αποτεφρώνουν και καμία από αυτές τις εγκαταστάσεις διαθέτει επένδυση ή παρακολουθούνται ή κατέχουν σύστημα ανάκτησης στραγγισμάτων οποιουδήποτε είδους. Λόγω της χρήσης ακατάλληλης τεχνολογίας, στραγγίσματα από τους χώρους υγειονομικής ταφής καταλήγουν σε επιφανειακές υδάτινες μάζες που χρησιμοποιούνται για οικιακούς σκοπούς. Ακόμη και σε ελεγχόμενους χώρους υγειονομικής ταφής, η έκπλυση από μέταλλα και άλλες τοξικές ή επικίνδυνες ουσίες είναι αναμενόμενη [44].

Εικόνα 4: *Ανοιχτή καύση ΑΗΗΕ.*

1.5.5. Συνέπειες ακατάλληλης διαχείρισης αποβλήτων

Στις αναπτυσσόμενες χώρες, τα ηλεκτρονικά απόβλητα διαχειρίζονται μέσω διαφόρων κατώτερης βαθμίδας εναλλακτικών λύσεων διαχείρισης, όπως η επαναχρησιμοποίηση

των προϊόντων, η συμβατική διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής και ανοιχτή καύση [77]. Η ανεπίσημη ανακύκλωση των αποβλήτων ηλεκτρονικών προϊόντων στις αναπτυσσόμενες χώρες αναδύεται ως μια νέα περιβαλλοντική πρόκληση για τον 21ο αιώνα. Για την περιβαλλοντική ρύπανση που προκαλείται από την ακατάλληλη διαχείριση των ηλεκτρονικών αποβλήτων στις αναπτυσσόμενες χώρες μπορεί να λάβει κανείς υπόψη ότι περίπου το 40% του μολύβδου που βρέθηκε στο έδαφος προέρχεται από τα ηλεκτρονικά απόβλητα. Επιπλέον, το 70% των βαρέων μετάλλων που βρέθηκαν στο έδαφος είναι από απόβλητα ηλεκτρονικής προέλευσης [78]. Η διάθεση των κινητών τηλεφώνων και αξεσουάρ των σε αναπτυσσόμενες χώρες, επιδεινώνει το πρόβλημα της διαχείρισης των αποβλήτων, επειδή οι χώρες αυτές δεν είναι τόσο πιθανό να έχουν επαρκείς πόρους και τις υποδομές σωστής διαχείρισης των αποβλήτων έτσι ώστε να διασφαλίσουν την προστασία της ανθρώπινης υγείας και του περιβάλλοντος (Εικόνα 5). Η διάθεση των κινητών τηλεφώνων θα πρέπει ως εκ τούτου να τύχουν διαχείρισης με περιβαλλοντικά ορθό τρόπο, την ελαχιστοποίηση των εκπομπών στο περιβάλλον και τις απειλές για την ανθρώπινη υγεία [9]. Η σημερινή διασυνοριακή διακίνηση των e-waste για τις αναπτυσσόμενες χώρες και η επακόλουθη ακατάλληλη διαχείριση / διάθεση θα επιδεινώσει το σημερινό υψηλό επίπεδο της ρύπανσης του περιβάλλοντος σε αυτές τις χώρες.

Εικόνα 5: *Ανεξέλεγκτη διάθεση ΑΗΗΕ.*

Η υιοθέτηση της προοπτικής του κύκλου ζωής στην διαχείριση των ηλεκτρονικών αποβλήτων θα επιτρέψει σε αλλαγές στον σχεδιασμό του προϊόντος και την σύγκριση από κοινού των επιλογών διαχείρισης αποβλήτων (συμπεριλαμβανομένης της αποτέφρωσης και υγειονομικής ταφής), εξασφαλίζοντας τον εντοπισμό τις καλύτερης επιλογής. Η προοπτική του κύκλου ζωής από περιβαλλοντική άποψη περιλαμβάνει την ακολουθία των πρώτων υλών, την κατασκευή, τη διανομή, τη χρήση και τη διάθεση [79]. Για παράδειγμα, μελέτες του κύκλου ζωής έχουν διεξαχθεί σχετικά με την απόσυρση των κινητών τηλεφώνων ως μέρος ενός συστήματος στο Ηνωμένο Βασίλειο και τη Σουηδία, το οποίο καλύπτει τη χρήση ενέργειας. Ο κύκλος ζωής ενίσχυσε την ορθόδοξη άποψη στην ιεράρχηση της διαχείρισης των αποβλήτων, η οποία είναι κατά φθίνουσα σειρά: η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση και η αποτέφρωση με ανάκτηση ενέργειας είναι προτιμότερη από τη διάθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής [80]. Αν τα e-waste ανακυκλώνονται ανεπίσημα στον αναπτυσσόμενο κόσμο, φαίνεται ότι οι σχετικά μικρές ποσότητες μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται μία ακατάλληλη μέθοδος ανάκτησης χρυσού από απόβλητες PCB. Αν αυτά το e-waste τεθούν σε ορθή διαχείριση σε χώρους υγειονομικής ταφής στον ανεπτυγμένο κόσμο, οι επιπτώσεις είναι σχεδόν σίγουρα λιγότερες, αλλά δεν είναι ακόμη σαφές πόσο λιγότερες [81]. Ωστόσο, πιθανά προβλήματα υγείας και μόλυνση του περιβάλλοντος μπορούν να αποτραπούν, με προσεκτική ουσιαστική εφαρμογή προγραμμάτων διαχείρισης για τη διάθεση των αποβλήτων.

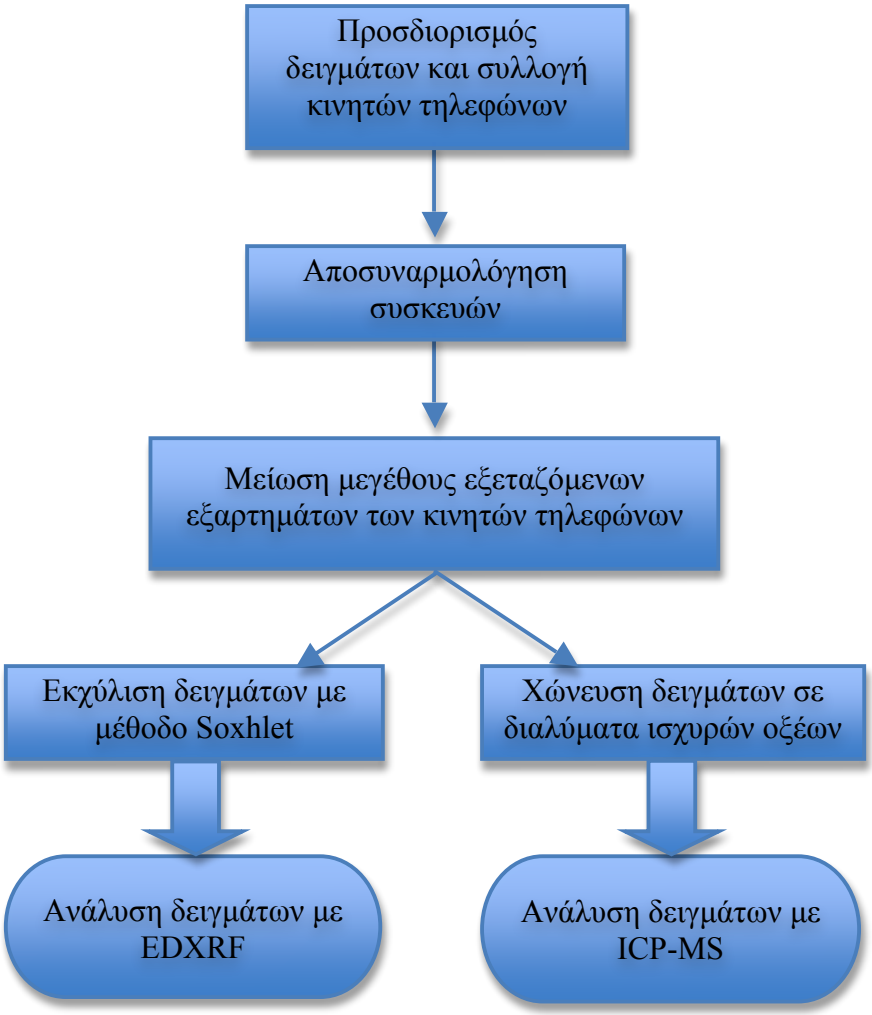
Εικόνα 6: *Ανάκτηση χρυσού από απόβλητες PCB χρησιμοποιώντας λουτρά οξέων.*

ΕΝΟΤΗΤΑ 2^{Η}

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.0. Στόχοι της εργασίας

Όπως έχει προαναφερθεί, τα κινητά τηλέφωνα περιέχουν πληθώρα πολύτιμων, βαρέων μετάλλων και τοξικών ουσιών, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερης περιβαλλοντικής σημασίας ηλεκτρονικές συσκευές όταν αυτές αποτελέσουν απόβλητα. Το περιεχόμενό τους, σε συνάρτηση με το μικρό τους μέγεθος και την μεγάλη συχνότητα απόρριψής τους, δύναται να προκαλέσει αέρια ρύπανση, μόλυνση του νερού και του εδάφους εάν η διαχείρισή τους στο τέλους του κύκλου ζωής τους δεν είναι η κατάλληλη, και καταλήξουν σε χώρους υγειονομικής ταφής ή αποτεφρωτήρες. Επομένως, κρίνεται σημαντικός ο προσδιορισμός του περιεχομένου των αποβλήτων κινητών τηλεφώνων σε σημαντικά βαρέα μέταλλα (Al, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sn, Hg, Pb) αλλά και σε βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας (BFRs) μέσω φασματομετρίας μάζας επάγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS) και φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων X (EDXRF), αντίστοιχα. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά στάδια της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την πραγματοποιήση των παραπάνω αναλύσεων.



Διάγραμμα 8: *Βασικά στάδια της πειραματικής διαδικασίας.*

2.1. Προσδιορισμός των δειγμάτων

Οι χημικές αναλύσεις για τον προσδιορισμό των βαρέων μετάλλων και των BFRs πραγματοποιήθηκαν στα κυριότερα εξαρτήματα ενός κινητού τηλεφώνου που είναι οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων, οι οθόνες υγρών κρυστάλλων και τα πλαστικά περιβλήματα που συγκρατούν το σύνολο των εξαρτημάτων των εν λόγω συσκευών. Η επιλογή έγινε με κριτήριο την υψηλή περιβαλλοντική επίδραση και το ρυπαντικό φορτίο των προαναφερθέντων εξαρτημάτων. Ακόμη, το πλήθος των κινητών τηλεφώνων που εξετάστηκαν περιορίστηκε σε αυτά που είχαν κατασκευαστεί την τελευταία δεκαετία και συγκεκριμένα την περίοδο 2002 έως 2011. Τα κινητά τηλέφωνα ταξινομήθηκαν σε δύο κατηγορίες, σύμφωνα με το έτος κατασκευής, σε αυτά που έχουν «κυκλοφορήσει» τα χρονικά διαστήματα 2002-2006 και 2007-2011. Η επιλογή του έτους 2006 ως όριο για τα υπό μελέτη χρονικά διαστήματα συνδυάζεται με την έκδοση της Οδηγίας 2002/95/ΕΚ (RoHS Directive) σχετικά με τον περιορισμό της χρήσης ορισμένων επικίνδυνων ουσιών σε είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Όσον αφορά τον αριθμό των κινητών τηλεφώνων που θα εξεταστούν, προσδιορίστηκε με βάση τα μεγαλύτερα ποσοστά συμμετοχής των κατασκευαστριών εταιριών στις συνολικές πωλήσεις του εξεταζόμενου τύπου ηλεκτρονικού εξοπλισμού για κάθε χρονικό διάστημα μελέτης, έτσι ώστε τα δείγματα που θα προκύψουν να είναι αντιπροσωπευτικά του ρεύματος αποβλήτων κινητών τηλεφώνων. Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται οι προμηθευτές κινητών τηλεφώνων που καταλαμβάνουν τις έξι πρώτες θέσεις στην παγκόσμια κατάταξη για το χρονικό διάστημα 2002-2006 και ο αριθμός των συσκευών που αναλύθηκαν. Συνεπώς, για την διεξαγωγή των αναλύσεων, που αφορούν το πρώτο χρονικό διάστημα, ο συνολικός αριθμός των κινητών τηλεφώνων ανέρχεται σε εννέα.

Πίνακας 12: *Κατάταξη προμηθευτών κινητών τηλεφώνων και αριθμός επιλεχθέντων συσκευών (2002-2006) [82].*

Εταιρείες	**Μερίδιο αγοράς (%)**	**Αριθμός συσκευών**
Nokia	33.6	3
Motorola	17.2	2
Samsung	11.5	1
Siemens	6.8	1
Sony Ericsson	6.1	1
LG	5.5	1

Ενώ κατά τη χρονική περίοδο 2002-2006 οι προμηθευτές κινητών τηλεφώνων με την μεγαλύτερη συμμετοχή στις πωλήσεις παγκοσμίως, είτε ανά έτος είτε κατά τη διάρκεια όλου του χρονικού διαστήματος, παραμένουν οι ίδιοι, κατά την δεύτερη υπό μελέτη χρονική περίοδο 2007-2011 δεν ισχύει το ίδιο. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως σε νεοεισερχόμενες εταιρίες κατασκευής κινητών τηλεφώνων αλλά και στην αποχώρηση παλαιότερων εταιριών απο την αγορά των ασύρματων τηλεπικοινωνιών. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητο να επιλεχθούν για δειγματοληψία οι συσκευές όλων των εταιριών που συμμετέχουν στην ετήσια παγκόσμια κατάταξη των πέντε μεγαλύτερων προμηθευτών σε συνάρτηση πάντα με τα ποσοστά των πωλήσεών τους. Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται τα ποσοστά σε παγκόσμιες πωλήσεις κινητών τηλεφώνων των πέντε δημοφιλέστερων εταιριών όπως αυτά έχουν διαμορφωθεί από το 2007 έως το 2011 και στον Πίνακα 14 ο αριθμός των συσκευών που επιλέχθηκαν ανά εταιρία, οι οποίες συνολικά είναι έντεκα. Εκτός από τα δείγματα που αποτελούνται από εξαρτήματα πολλών συσκευών, θεωρήθηκε αναγκαία και η δημιουργία δειγμάτων που θα αποτελούνται αποκλειστικά από εξαρτήματα μιας συσκευής με αποτέλεσμα να επιλεγούν τέσσερα ακόμη κινητά τηλέφωνα, δηλαδή δυο για κάθε εξεταζόμενο χρονικά διάστημα.

Πίνακας 13: *Κατάταξη προμηθευτών κινητών τηλεφώνων (2007-2011) [82].*

2007-2008		**2009**		**2010**		**2011**	
Εταιρείες	**Μερίδιο αγοράς (%)**	**Εταιρείες**	**Μερίδιο αγοράς (%)**	**Εταιρείες**	**Μερίδιο αγοράς (%)**	**Εταιρείες**	**Μερίδιο αγοράς (%)**
Nokia	38.2	Nokia	36.4	Nokia	32.6	Nokia	27
Samsung	15.2	Samsung	19.5	Samsung	20.2	Samsung	21.3
Motorola	11.3	LG	10.1	LG	8.4	Apple	6
Sony Ericsson	8.2	R.I.M.	2.9	ZTE	3.7	LG	5.7
LG	7.6	ZTE	2.3	R.I.M.	3.5	ZTE	4.3

Πίνακας 14: *Πλήθος κινητών τηλεφώνων ανά προμηθευτή (2007-2011).*

Εταιρείες	**Αριθμός συσκευών**
Nokia	3
Samsung	2
Motorola	1
Sony Ericsson	1
LG	1
Apple	1
ZTE	1
R.I.M.	1

2.2. Δειγματοληψία

Το μεγαλύτερο μέρος των απόβλητων κινητών τηλεφώνων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη συλλέχθησαν απο κάδους ανακύκλωσης του συγκεκριμένου ηλεκτρονικού εξοπλισμού, που ήταν τοποθετημένοι σε καταστήματα κινητής τηλεφωνίας στην πόλη των Χανίων. Κατά τη συλλογή των κινητών τηλεφώνων από τα σημεία ανακύκλωσης παρατηρήθηκε ότι οι συσκευές και τα αξεσουάρ τους (φορτιστές, ακουστικά κ.α.) καθώς και μεμονομένα εξαρτήματά τους βρίσκοταν σε επαφή μέσα στους κάδους. Επιπλέον, μικρός αριθμός συσκευών προήλθε απευθείας από άτομα που δεν χρησιμοποιούσαν τις εν λόγω συσκευές και παρέμεναν αποθηκευμένες για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να απορριφθούν. Ανεξάρτητα με την προέλευση, όλα τα κινητά τηλέφωνα ήταν άθικτα. Στοιχεία των κινητών τηλεφώνων όπως ο διεθνής δείκτης κινητού εξοπλισμού, ο σειριακός αριθμός, το μοντέλο και κατά συνέπεια το έτος κατασκευής αναγνωρίζονταν από την αυτοκόλλητη ετικέτα η οποία βρισκόταν στο πίσω μέρος της συκευής κάτω από την μπαταρία. Στον Πίνακα 15 παρουσιάζονται τα εικοσιτέσσερα (24) κινητά τηλέφωνα των οποίων τα εξαρτήματα αποτέλεσαν τα δείγματα για την πραγματοποίηση των αναλύσεων.

Πίνακας 15: *Εταιρεία, μοντέλο και έτος κατασκευής κινητών τηλεφώνων [83].*

Εταιρεία	Ονομασία μοντέλου	Έτος κατασκευής
Nokia	6610	2002
Nokia	6230i	2005
Nokia	6020	2004
Motorola	W220	2006 (Φεβρουάριος)
Motorola	V360	2005
Samsung	SGH-X200	2002
Siemens	M65	2004
Sony Ericsson	K700i	2004
LG	B2100	2005
Nokia	1600	2005
Samsung	SGH-V200	2003
Nokia	2330c	2008
Nokia	3500c	2007
Nokia	6500s	2007
Samsung	SGH-E250	2006 (Οκτώβριος)
Samsung	SGH-E250	2006 (Οκτώβριος)
Motorola	EM325	2008
Sony Ericsson	W760i	2008
LG	KU990	2007
Apple	Iphone 3G	2008
ZTE	R222	2011
R.I.M.	Blackberry 3G 9300	2010
Nokia	6500s	2007
ZTE	R222	2011

2.3. Προετοιμασία των δειγμάτων

2.3.1. Αποσυναρμολόγηση κινητών τηλεφώνων και μείωση μεγέθους

Αρχικά αφού κάθε κινητό τηλέφωνο ζυγίστηκε χωρίς να περιέχεται η μπαταρία, διαχωρίστηκε στα εξής τρία βασικά του εξαρτήματα: την πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων, την οθόνη υγρών κρυστάλλων και το πλαστικό περίβλημα. Στην συνέχεια, τα παραπάνω επιμέρους τμήματα διαχωρίστηκαν από υλικά και μικροεξαρτήματα που δεν αφορούσαν τα αντικείμενα μελέτης ή δεν μπορούσαν να υποστούν περαιτέρω μείωση μεγέθους με τα μέσα που ήταν διαθέσιμα. Ειδικότερα, από τις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων αφαιρέθηκαν εξαρτήματα που συνδέονταν με καλώδια, τα καλώδια καθώς και οι κάμερες. Στην περίπτωση των πλαστικών περιβλημάτων, αποβλήθηκαν το πληκτρολόγιο και μεταλλικά αντικείμενα όπως συνδέσεις (υποδοχές) και μεταλλικές επενδύσεις. Το γυάλινο μέρος της οθόνης υγρών κρυστάλλων ήταν αυτό που παρέμεινε ύστερα από την αφαίρεση εύκαμπτων καλωδίων αλλα και πλαστικών και μεταλλικών πλαισίων. Η αποσυναρμολόγηση των συσκευών και των επιμέρους εξαρτημάτων αυτών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση κατσαβιδιού ανοξείδωτου χάλυβα (σταυρός ή αστέρι πέντε σημείων) και πένσας. Τον διαχωρισμό των υπό μελέτη επιμέρους στοιχείων από τα υπόλοιπα μέρη των κινητών τηλεφώνων ακολούθησε μείωση μεγέθους. Σε πρώτο στάδιο τα ολόκληρα εξαρτήματα κόπηκαν σε μικρότερα κομμάτια, μεγέθους έως και 2 cm, χρησιμοποιώντας ψαλίδι ανοξείδωτου χάλυβα και πένσα. Τα εργαλεία που χρειάστηκαν μέχρι αυτό το σημείο της προετοιμασίας των δειγμάτων καθαρίζονταν και πλένονταν με απεσταγμένο νερό πριν από την χρήση τους σε κάθε δείγμα.

2.3.1.1. Βάρος κινητών τηλεφώνων

Το βάρος αποτελεί ένα βασικό χαρακτηριστικό των κινητών τηλεφώνων τόσο κατά την διάρκεια της χρήσης τους από τους καταναλωτές, όσο και ως απόβλητο. Για το λόγο αυτό προσδιορίστηκε το βάρος κάθε επιμέρους συσκευής, αφού είχε προηγηθεί η αφαίρεση της μπαταρίας. Στον παρακάτω Πίνακα 16 παρουσιάζεται το βάρος κάθε κινητού τηλεφώνου που συλλέχθηκε καθώς και οι μέσες τιμές ανά χρονικό διάστημα μελέτης. Όπως φαίνεται, για το διάστημα 2007-2011, η μέση τιμή του βάρους ανέρχεται στα 81.6 g ενώ για το διάστημα 2002-2006 ανέρχεται στα 71.2 g. Οι συσκευές που ανήκουν στο διάστημα 2002-2006 είναι ελαφρύτερες σε σχέση με τις υπόλοιπες, γεγονός σχετικά αναμενόμενο, αφού λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για υποστήριξη περισσότερων εφαρμογών το βάρος και το μέγεθος των κινητών

τηλεφώνων αυξήθηκε. Βέβαια, η διαφορά μεταξύ των μέσων τιμών των δύο κατηγοριών θα μπορούσε να ήταν μεγαλύτερη αν για το διάστημα 2007-2011 είχαν συμπεριληφθεί περισσότερα «έξυπνα» τηλέφωνα.

Πίνακας 16: *Βάρος κινητών τηλεφώνων και μέσες τιμές ανά χρονικό διάστημα.*

2007-2011		**2002-2006**	
Μοντέλο	**Βάρος (g)**	**Μοντέλο**	**Βάρος (g)**
Nokia 2330c	63.5	Nokia 6610	65.5
Nokia 3500c	68.1	Nokia 6230i	77.3
Nokia 6500s	110.8	Nokia 6020	71.4
Samsung SGH-E250	65.5	Motorola W220	71.1
Samsung SGH-E250	65.5	Motorola V360	86.2
Motorola EM325	74.5	Samsung SGH-X200	61.4
Sony Ericsson W760i	89.5	Siemens M65	85.7
LG KU990	95.9	Sony Ericsson K700i	75.3
Apple Iphone 3G	104.2	LG B2100	54.3
ZTE R222	60.9	Nokia 1600	60.5
R.I.M. Blackberry 3G 9300	91.1	Samsung SGH-V200	74.7
Nokia 6500s	110.8		
ZTE R222	60.9		
Μέση τιμή	**81.6**		**71.2**

2.3.1.2 Χρόνος αποσυναρμολόγησης κινητών τηλεφώνων

Καθότι τα κινητά τηλέφωνα και τα sWEEE γενικότερα θεωρούνται ένα ετερογενές, σύνθετο και δύσκολο να αποσυναρμολογηθεί ρεύμα αποβλήτων, η μέτρηση του απαιτούμενου για κάθε συσκευή χρόνου αποσυναρμολόγησης αποτελεί συνάμα παράμετρο χρήσιμη για αντίστοιχες μονάδες. Ο απαιτούμενος χρόνος αποτελεί συνάρτηση της πολυπλοκότητας μιας συσκευής και του επιδιωκόμενου βάθους αποσυναρμολόγησης.

Πάντως, όσον αφορά τις μονάδες αποσυναρμολόγησης, το πλήθος των κατηγοριών των υλικών που παράγονται εξαρτάται από τις απαιτήσεις της ακολουθούμενης μονάδας ανακύκλωσης, αλλά και από την αγορά. Επίσης, όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος αποσυναρμολόγησης, τόσο αυξάνεται το εργατικό κόστος. Από την άλλη βέβαια, όσο μεγαλύτερο είναι το μεν, τόσο καθαρότερα είναι τα τελικά ανακυκλώσιμα προϊόντα. Τέλος, η αποσυναρμολόγηση εξυπηρετεί στην απομάκρυνση και απορρύπανση των κινητών τηλεφώνων από κατασκευαστικά στοιχεία τα οποία περιέχουν επικίνδυνες ουσίες όπως μπαταρίες, συσσωρευτές, διακόπτες υδραργύρου.

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν αναφορικά με το χρόνο αποσυναρμολόγησης των κινητών τηλεφώνων ανά χρονικό διάστημα μελέτης. Η μέση τιμή του χρόνου αποσυναρμολόγησης των συσκευών που ανήκουν στο χρονικό διάστημα 2007-2011 είναι περίπου 450 s ενώ για αυτές στο χρονικό διάστημα 2002-2006 ανέρχεται στα 571 s. Γενικά, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σχετικά μικρές διακυμάνσεις, αλλά για κάποιες συσκευές, ο χρόνος που απαιτήθηκε ήταν κατά πολύ μεγαλύτερος από ότι για άλλες, γεγονός που αντικατοπτρίζει την πολυπλοκότητα των προϊόντων. Οι τιμές αυτές βέβαια απεικονίζουν μονάχα τη διακύμανση της δυσκολίας αποσυναρμολόγησης και πολυπλοκότητας των sWEEE, καθότι πιστεύεται ότι ειδικευμένο προσωπικό σχετικών εγκαταστάσεων επιτυγχάνει πολύ χαμηλότερους χρόνους.

Πίνακας 17: *Χρόνος αποσυναρμολόγησης κινητών τηλεφώνων και μέσες τιμές ανά χρονικό διάστημα.*

2007-2011		**2002-2006**	
Μοντέλο	**Χρόνος αποσυναρμολόγησης (s)**	**Μοντέλο**	**Χρόνος αποσυναρμολόγησης (s)**
Nokia 2330c	244	Nokia 6610	306
Nokia 3500c	413	Nokia 6230i	606
Nokia 6500s	641	Nokia 6020	329
Samsung SGH-E250	572	Motorola W220	800
Samsung SGH-E250	572	Motorola V360	585
Motorola EM325	397	Samsung SGH-X200	575
Sony Ericsson W760i	542	Siemens M65	370
LG KU990	617	Sony Ericsson K700i	546
Apple Iphone 3G	315	LG B2100	362
ZTE R222	224	Nokia 1600	294
R.I.M. Blackberry 3G 9300	453	Samsung SGH-V200	366
Nokia 6500s	641		
ZTE R222	224		
Μέση τιμή	**450.4**		**571**

2.3.2. Μείωση μεγέθους με συσκευή ομογενοποίησης στερεών δειγμάτων

Τα θραύσματα των 2cm x 2 cm, υποβλήθηκαν σε μεγαλύτερη μείωση μεγέθους με την χρήση συσκευής ομογενοποίησης στερεών δειγμάτων (Pulverisette 19, Fritsch), όπου είχε τοποθετηθεί σχάρα με ανοίγματα 0.5 mm, συνδεδεμένη με κυκλώνα (Nabertherm) (Εικόνα 7). Η χρήση της συσκευής ομογενοποίησης έγινε υπό συγκεκριμένες προϋπόθεσεις ενώ για την λειτουργία της ακολουθήθηκαν συγκεκριμένα βήματα πριν

την εισαγωγή, κατά την διάρκεια κοπής αλλά και ύστερα από την συλλογή του δείγματος. Πρώτον, τα δείγματα τοποθετήθηκαν στην συσκευή ξεκινώντας με αυτά που αναμένονταν να έχουν τις μικρότερες συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων βαρέων μετάλλων, λαμβάνοντας υπόψιν προηγούμενες μελέτες. Έτσι, αρχικά τοποθετήθηκαν οι οθόνες υγρών κρυστάλλων, ύστερα τα πλαστικά περιβλήματα και τέλος οι πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων ούτως ώστε η μόλυνση από τυχόν υπάρχοντα σωματίδια, στο εσωτερικό της μηχανής κοπής και του κυκλώνα, από προηγούμενα δείγματα να ήταν όσο το δυνατόν μικρότερη. Επίσης, για να διασφαλιστεί ακόμη περισσότερο η «καθαρότητα» των τελικών δειγμάτων και να αποφευχθεί η ρύπανση μεταξύ των, η λειτουργία της συσκευής ομογενοποίησης έγινε ως εξής:

1. Εκκίνηση συσκευής ομογενοποίησης και κυκλώνα χωρίς δείγμα.
2. Τοποθέτηση και κοπή μικρής ποσότητας από το εκάστοτε δείγμα, η οποία δεν συλλεγόταν.
3. Σταδιακή κοπή και συλλογή του δείγματος.
4. Καθαρισμός των συσκευών και πλύση των εξαρτημάτων τους (μαχαίρια, σχάρα, χοάνη) με σαπουνόνερο και απιονισμένο νερό.

Η ως άνω διαδικασία επαναλήφθηκε για κάθε δείγμα. Σημειώνεται επίσης, ότι για την μείωση μεγέθους των πλαστικών περιβλημάτων και πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων ενέκυψαν ποικίλα προβλήματα. Λόγω της σύστασης των εξαρτημάτων αυτών από πολυμερή και της θέρμανσης του ομογενοποιητή παρατηρήθηκε το φαινόμενο της συσσωμάτωσης των κόκκων πλαστικών μεταξύ τους, γεγονός που απαιτούσε την διακοπή της λειτουργίας της συσκευής. Παράλληλα, η υπερθέρμανση της συσκευής προκαλούσε την τήξη ορισμένων κόκκων με αποτέλεσμα να «κολλάνε» στα τοιχώματα και τα εξαρτήματα του ομογενοποιητή. Προς αποφυγή των παραπάνω φαινομένων, κρίθηκε αναγκαίο να μειωθεί ο χρόνος που λειτουργούσε ο ομογενοποιητής για κάθε ποσότητα δείγματος που εισαγόταν σε αυτόν. Έτσι, η συσκευή λειτουργούσε για περίπου 5 s ενώ μεσολαβούσε ένα μικρό χρονικό διάστημα για την εισαγωγή της επόμενης ποσότητας δείγματος όπου επέτρεπε την ψύξη του ομογενοποιητή. Τα δείγματα συλλέχθησαν από την έξοδο του κυκλώνα, τοποθετήθηκαν σε πλαστικά σακουλάκια και αυτά που προορίζονταν για τον προσδιορισμό βαρέων μετάλλων οδηγήθηκαν προς χώνευση, ενώ τα υπόλοιπα για εκχύλιση Soxhlet. Στην Εικόνα 8 απεικονίζονται το μέγεθος και η μορφή των εξαρτημάτων κατά στάδια προετοιμασίας των δειγμάτων.

Εικόνα 7: *Συσκευή ομογενοποίησης Pulverisette 19, Fritsch και κυκλώνας Nabertherm.*

(α) (β) (γ)

Εικόνα 8: *Πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων, πλαστικό περίβλημα και οθόνη υγρών κρυστάλλων (α) ως εξαρτήματα, (β) μετά από την πρώτη μείωση μεγέθους και (γ) μετά την ομογενοποίηση.*

2.3.3 Χώνευση δειγμάτων

Η χώνευση των δειγμάτων, πλέον σε μορφή κόκκων μικρότερων των 0.5 mm, έγινε με την βοήθεια διαλυμάτων ισχυρών οξέων. Ποσότητα βάρους 100 mg επιλέχθηκε από το κάθε δείγμα, τοποθετήθηκε σε γυάλινα δοχεία και διαλύθηκε από τα προπαρασκευασμένα μίγματα οξέων σε αναλογία 1:100 (δηλαδή για κάθε 0.1 g δείγματος, χρειάστηκαν 10 ml μίγμα οξέων). Ανάλογα με το είδος και την φύση του δείγματος χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά οξέα. Τα δείγματα που αφορούσαν τις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων χωνεύθηκαν με βασιλικό νερό, ένα μίγμα νιτρικού και υδροχλωρικού οξέος (HNO_3:HCl) σε αναλογία 1:3. Αυτά που περιείχαν τα πλαστικά περιβλήματα, διαλύθηκαν σε 1:1 μίγμα θειικού και νιτρικού οξέος (H_2SO_4:HNO_3) ενώ για οθόνες υγρών κρυστάλλων εφαρμόστηκε χώνευση με 1:5 μίγμα νιτρικού και υδροχλωρικού οξέος (HNO_3:HCl). Η χώνευση των δειγμάτων, αρχικά έλαβε χώρα σε θερμοκρασία δωματίου και συνεχίστηκε στους 100 °C με την βοήθεια θερμαντικής πλάκας, επιτυγχάνοντας την αργή εξάτμιση των διαλυτών μέχρι τα διαλύματα να πλησιάσουν την ξηρότητα. Ο συνολικός χρόνος επαφής μεταξύ των κλασμάτων των δειγμάτων και του εκάστοτε μίγματος οξέων ήταν 72 h, ούτος ώστε να προσεγγιστεί, όσο είναι εφικτό, η πλήρης διαλυτότητα του κλάσματος. Τα χωνευμένα διαλύματα διαλυτοποιήθηκαν με 20 ml απιονισμένου νερού, διηθήθηκαν με χαρτί διήθησης και αραιώθηκαν σε ογκομετρικές φιάλες των 100 ml με απιονισμένο νερό. Τέλος, τοποθετήθηκαν σε πλαστικά μπουκάλια και αφού προστέθηκε 0.196 μl νιτρικού οξέος (HNO_3) στο καθένα, οδηγήθηκαν για ανάλυση με ICP-MS.

2.3.4 Εκχύλιση δειγμάτων με μέθοδο Soxhlet

Τα δείγματα που προορίζονταν για ανάλυση σχετικά με τα BFRs, ύστερα από την ομογενοποίηση, οδηγήθηκαν για εκχύλιση με την μέθοδο Soxhlet. Στην εκχύλιση Soxhlet, τα οργανικά συστατικά που περιέχονται σε στερεά δείγματα εξάγονται από τη μήτρα με συνεχή πλύση του στερεού με ένα πτητικό διαλύτη σε μία ειδική γυάλινη συσκευή (συσκευή εκχύλισης Soxhlet). Αυτή είναι η πιο κοινή μέθοδος για την εκχύλιση των οργανικών ενώσεων από τα στερεά δείγματα, και χρησιμοποιείται ως ένα πρότυπο ρυθμού εκχύλισης για την πρόσφατα αναπτυχθείσα μέθοδο εκχύλισης γνωστή ως εκχύλιση υπερκρίσιμου ρευστού. Χρησιμοποιούνται μη-πολικοί διαλύτες όπως βενζόλιο ή διχλωρομεθάνιο, πολικοί διαλύτες όπως μεθανόλη, ή μίγματα των πολικών και μη-πολικών διαλυτών των οποίων τα σημεία ζέσεως είναι κοντινά με εκείνα της αιθανόλης / βενζόλιο, ή ακετόνης / εξάνιο. Ωστόσο, η εκχύλιση soxhlet

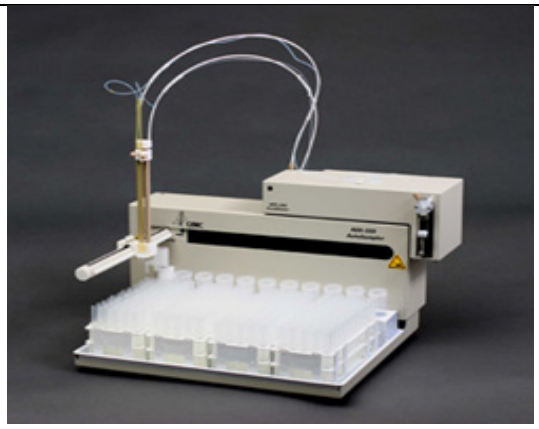
παίρνει πολύ χρόνο για να πάρει υψηλή απόδοση εκχύλισης, και δεν είναι κατάλληλη για οργανικές ενώσεις οι οποίες είναι θερμικά ασταθείς.

Στην περίπτωση των δειγμάτων της παρούσας μελέτης, για τη διαδικασία χρησιμοποιήθηκε η συσκευή εκχύλισης Behrotest SMA 12 (Behr Labortechnik, Düsseldorf, Γερμανία), εξοπλισμένη με TRS 200 ελεγκτή θερμοκρασίας και χρόνου (Εικόνα 9). Ποσότητα βάρους 1.5 g επιλέχθηκε από καθένα από τα τρία δείγματα και εκχυλίστηκαν με μεθανόλη στην συσκευή soxhlet για 6 h και σε θερμοκρασία 190° C. Στην συνέχεια, τα εκχυλίσματα ψύχθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου και ακολούθησε συμπύκνωση σε περιστροφικό εξατμιστήρα (RE2000E, Taikang) μέχρι τα 2 ml, απ' όπου και οδηγήθηκαν για ανάλυση με EDXRF.

Εικόνα 9: *Συσκευή εκχύλισης Behrotest SMA 12 με TRS 200.*

2.4. Ανάλυση δείγματων με το ICP-MS

Η ανάλυση για μέταλλα (Cr, Pb, Cd, As, Hg κλπ.) έγινε με τη χρήση του επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος με φασματομετρία μαζών (ICP-MS 7500cx coupled with Autosampler Series 3000, Agilent Technologies, Εικόνα 10).

α)	β)
	

Εικόνα 10: *α) Autosampler ASX-500, β) ICP-MS 7500cx, Agilent Technologies.*

Γενικά, 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: 1) στον έλεγχο της καμπύλης βαθμονόμησης σε ένα τουλάχιστον επίπεδο συγκέντρωσης (με πρότυπες ενώσεις αναφοράς (Merck), 2) στην ανάλυση spiked δειγμάτων και 3) στην ανάλυση διπλών δειγμάτων σε ποσοστό 10% των συνολικών, για κάθε ημέρα ανάλυσης. Τα αποτελέσματα κρίνονταν ικανοποιητικά όταν η σχετική τυπική απόκλιση (RSD%) ήταν σε αποδεκτά όρια (RSD%<10%). Σε διαφορετική περίπτωση, γινόταν επανέλεγχος των κρίσιμων σημείων της ανάλυσης (προετοιμασία δείγματος, ανάλυση προτύπων & δειγμάτων), τυχόν διορθωτικές κινήσεις και εκ νέου ανάλυση της «προβληματικής» ομάδας δειγμάτων. Οι συνθήκες λειτουργίας του οργάνου δίνονται στον Πίνακα 18.

Πίνακας 18: *Συνθήκες λειτουργίας ICP-MS.*

RF power (W)	1500	Collision gas	He
Plasma gas flow (L/min)	0,82	Collision gas flow (mL/min)	4,5
Auxiliary gas flow (L/min)	0,26	Reaction gas	H_2
Sampling/Skimmer cone	Ni	Reaction gas flow (mL/min)	3,5
Nebulizer type	MicroMist	Solution uptake (uL/min)	160
S/C temperature	2° C	Integration time (sec per mass)	0,30
Replicates	3		

2.5. Ανάλυση δειγμάτων με EDXRF

Η ανάλυση για βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας έγινε με την χρήση φασματόμετρου διασποράς ενέργειας φθορισμού ακτίνων X (EDXRF, Oxford X-supreme 8000), εξοπλισμένο με λυχνία Pd end-window των 50W για τη διέγερση των δειγμάτων και ανιχνευτή ολίσθησης (drift detector) πυριτίου με ενεργειακή διαχωριστική ικανότητα 160 eV (MnKα) (Εικόνα 11). Για τον προσδιορισμό των ενώσεων βρωμίου στα δείγματα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής στόχοι: δευτερεύων Compton μολυβδαινίου, σκεδαστής Barkla α-Al_2O_3 (κορούνδιο) και σκεδαστής Barkla HOPG (highly ordered pyrolityc graphite). Ο χρόνος μέτρησης ήταν ίσος με 300 s ενώ το σύστημα βαθμονομήθηκε μέσω της μεθόδου TurboQuant-screening.

Εικόνα 11: *EDXRF, Oxford X-supreme 8000.*

3.0. Αποτελέσματα και συζήτηση

Το υποκεφάλαιο αυτό της παρούσας εργασίας αποσκοπεί στο να απαντήσει ικανοποιητικώς σε μια σειρά ερωτημάτων μείζονος σημασίας όσον αφορά τα απόβλητα κινητά τηλέφωνα και το περιεχόμενο των κύριων εξαρτημάτων αυτού του ρεύματος αποβλήτων σε περιβαλλοντικούς ρύπους:

- ◊ πόσα δείγματα είναι ρυπασμένα, ιδιαίτερα σε σχέση με ουσίες που απαγορεύονται δυνάμει της Οδηγίας 2002/95/ΕΚ (RoHS Directive)
- ◊ ποιοι ρύποι απαντώνται σε αυτά
- ◊ ποια η συγκέντρωσή τους
- ◊ πως μεταβάλλεται η συχνότητα εμφάνισης και η συγκέντρωση των με την εξέλιξη της τεχνολογίας πληροφοριών και επικοινωνιών.

Παρότι διάφορες παλαιότερες μελέτες έχουν – σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό – ασχοληθεί με το ζήτημα αυτό, όσον αφορά το περιεχόμενο είτε ολόκληρων κινητών τηλεφώνων, είτε μεμονωμένων εξαρτημάτων αυτών σε επικίνδυνες ουσίες υφίσταται ακόμη περιορισμένο εύρος πληροφοριών. Συνεπώς, πιστεύεται ότι η παρούσα διατριβή κατέχει τουλάχιστον εξέχουσα σημασία λόγω της κάλυψης μεγάλου μέρους του υφιστάμενου βιβλιογραφικού κενού.

3.1. Αποτελέσματα ICP-MS

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. Η ανάλυση με το ICP-MS πλεονεκτεί των άλλων τεχνικών (ατομική απορρόφηση, φασματοφωτομετρία, σταθμικός προσδιορισμός κλπ.) ως προς τα χαμηλότερα όρια ανίχνευσης, το μεγαλύτερο εύρος γραμμικότητας, την ταυτόχρονη πολυστοιχειακή ανάλυση και την ανάλυση μεγάλου αριθμού δειγμάτων σε σειρά σε σύντομο χρόνο.

Η φασματομετρία μάζας (Mass Spectrometry) συνδυασμένη με το επαγωγικά συζευγμένο πλάσμα (Inductively Coupled Plasma), ως πηγή ατομοποίησης των στοιχείων (μετάλλων και κάποιων αμέταλλων), είναι η πλέον ευαίσθητη τεχνική πολυστοιχειακής ανάλυσης.

Τα κύρια τμήματα ενός οργάνου ICP-MS είναι [84]:

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

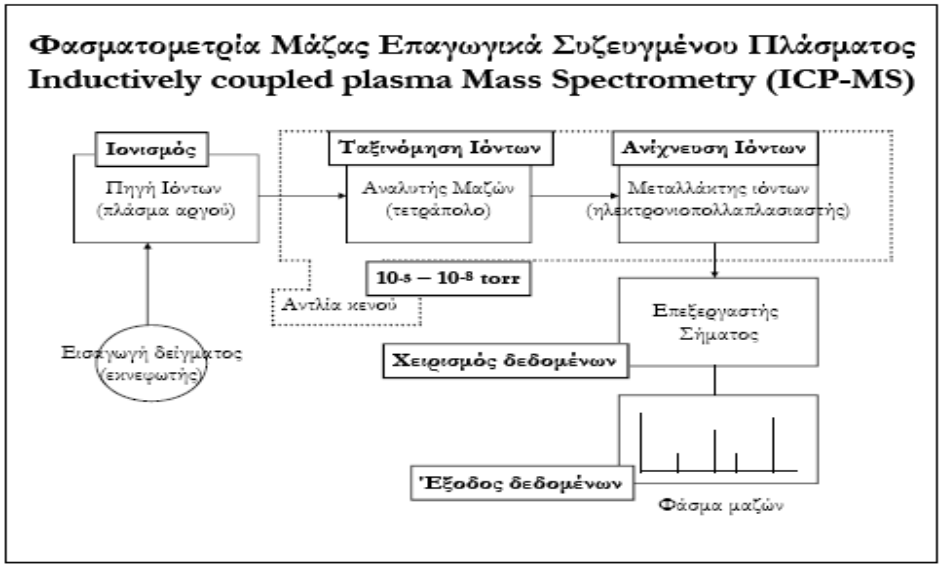
Ο αναλυτής μάζας διαχωρίζει και ταξινομεί τα ιόντα με βάση το λόγο μάζας προς φορτίο m/z, και έτσι προκύπτει τελικά ένα φάσμα μάζας που ουσιαστικά είναι η καταγραφή του πλήθους των ιόντων που αντιστοιχούν σε κάθε τιμή m/z.

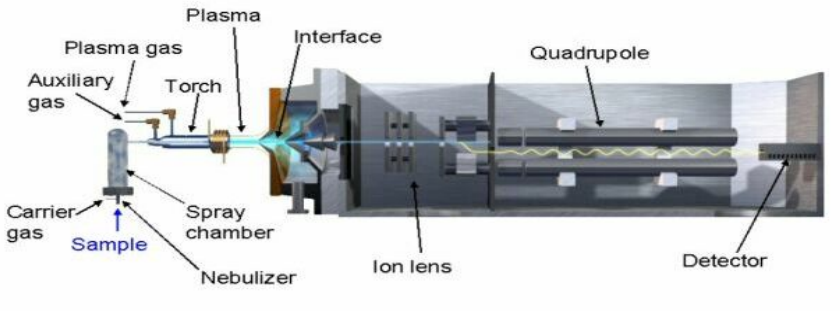
Ο ανιχνευτής ιόντων

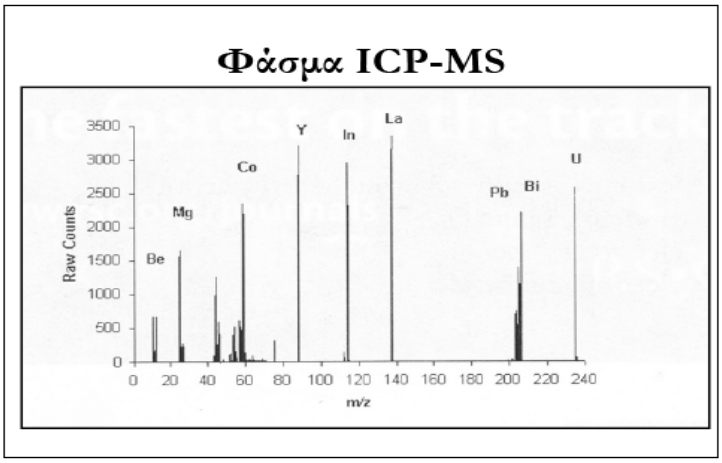
Πρόκειται για ένα πολλαπλασιαστή ηλεκτρονίων που ανιχνεύει εντάσεις ρεύματος μικρότερες από 10^{-15} A. Το σήμα αυτό με μια σειρά από διαδιακασίες πολλαπλασιάζεται ώστε να μπορεί να καταγραφεί.

Το σύστημα καταγραφής και η έξοδος των αποτελεσμάτων σε Η/Υ

Στην Εικόνα 12 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα τμήματα του ICP-MS περιγραφικά καθώς και ένα τυπικό φάσμα μάζας διαφόρων στοιχείων με τη συγκεκριμένη τεχνική.







Εικόνα 12: *Οργανολογία και φάσμα μάζας του ICP-MS [84].*

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνικής ICP-MS είναι:

Πλεονεκτήματα	**Μειονεκτήματα**
• Ταχεία πολυστοιχειακή ανάλυση • Χαμηλά όρια ανίχνευσης • Δυνατότητα ισοτοπικής ανάλυσης • Μεγάλη γραμμική περιοχή • Απλότητα φασμάτων	• Ισοβαρείς παρεμποδίσεις (που όμως αντιμετωπίζονται με επιλογή κατάλληλου ισοτόπου, ή/και collision/reaction mode του οργάνου) • Υψηλό κόστος λειτουργίας (εκτός αν εκτελούνται πολλοί προσδιορισμοί)

Οι αναλύσεις με το ICP-MS επικεντρώθηκαν στα στοιχεία τα οποία διέπονται των απαγορεύσεων της Οδηγίας RoHS, δηλαδή τα Cd, Pb, Hg, Cr. Ωστόσο, το ενδιαφέρον κατευθύνθηκε και προς άλλα στοιχεία με τοξικολογική σημασία ή στοιχεία που αναμένονταν σε μεγάλη συχνότητα στα δείγματα όπως τα Al, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Sn. Λόγω του ικανοποιητικού πλήθους δειγμάτων (20) που αναλύθηκαν, σε συνάρτηση με το γεγονός ότι αποτελούν προϊόντα των μεγαλύτερων προμηθευτών κινητών τηλεφώνων, πιστεύεται ότι τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής για τη συχνότητα στην οποία απαντώνται, αλλά και το εύρος συγκεντρώσεων των εν λόγω στοιχείων αποδίδουν μια αντιπροσωπευτική εικόνα της υφιστάμενης κατάστασης όσον αφορά τα κινητά τηλέφωνα και τα εξαρτήματά τους. Οι Πίνακες 19, 20 και 21 παρουσιάζουν τις συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων στοιχείων σε όλα τα δείγματα.

Πίνακας 19: *Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων (w.t%).*

Δείγματα	Αριθμός εξαρτημάτων	Στοιχεία										
		Al	**Cr**	**Fe**	**Ni**	**Cu**	**Zn**	**As**	**Cd**	**Sn**	**Hg**	**Pb**
2002-2006	9	1.03	0.85	5.89	3.02	1.77	0.1	0.0059	0.000083	0.084	0.00099	0.5
Nokia 2002-2006	1	1.11	0.069	0.53	1.47	1.56	0.22	0.0022	0.00057	0.084	0.0014	0.0
Samsung 2002-2006	1	0.64	0.054	0.71	1.68	1.27	0.11	0.0074	0.00037	0.14	0.0042	2.7
2007-2011	11	1.38	0.44	6.67	2.16	2.19	0.3	0.011	0.00045	0.12	0.0018	0.0
Nokia 2007-2011	1	1.58	0.29	1.96	1.85	1.65	0.21	0.0022	<Ο.Α.[14]	0.065	0.0041	0.02
ZTE 2007-2011	1	1.41	0.15	0.48	1.12	1.81	0.13	0.09	0.00013	0.071	0.0051	0.05

Πίνακας 20: *Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα πλαστικών περιβλημάτων (ppm).*

Δείγματα	Αριθμός εξαρτημάτων	Στοιχεία					
		Cr	**Ni**	**Zn**	**Cd**	**Hg**	**Pb**
2002-2006	9	83.75	452.91	222.17	29.72	4.86	26.6
Nokia 2002-2006	1	63.04	82.41	70.1	25.77	<Ο.Α.	22.49
Samsung 2002-2006	1	169.72	1605.43	209.3	53.7	<Ο.Α.	17.96
2007-2011	11	395.81	200.65	84.41	48.34	0.22	842.81
Nokia 2007-2011	1	125.69	233.12	153.98	53.06	<Ο.Α.	13.44
ZTE 2007-2011	1	65.27	117.21	81.31	47.83	<Ο.Α.	18.18

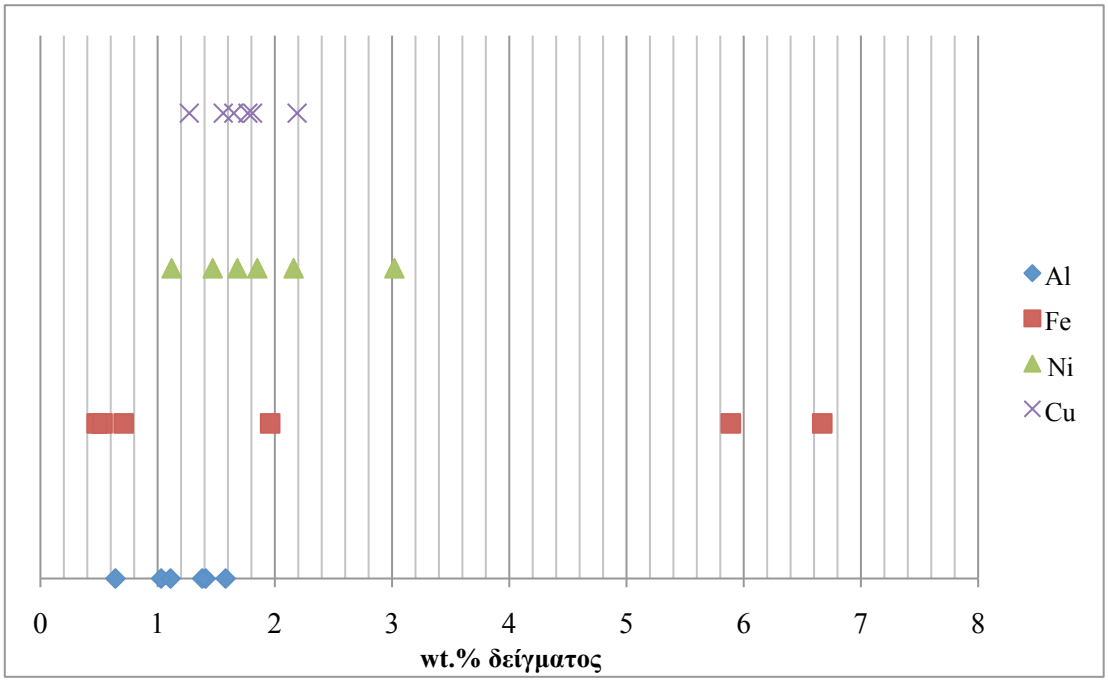
Πίνακας 21: *Αποτελέσματα ICP-MS για τα δείγματα οθονών υγρών κρυστάλλων (ppm).*

Δείγματα	Αριθμός εξαρτημάτων	Στοιχεία					
		Cr	**Ni**	**Zn**	**Cd**	**Hg**	**Pb**
2002-2006	9	18.2	82.12	73.15	<Ο.Α.	<Ο.Α.	4.18
Nokia 2002-2006	1	33.17	107.15	99.85	<Ο.Α.	<Ο.Α.	26.28
Samsung 2002-2006	1	62.14	277.74	191.85	<Ο.Α.	0.14	14.6
2007-2011	9	27.44	137.65	93.47	<Ο.Α.	<Ο.Α.	10.28
Nokia 2007-2011	1	29.15	195.39	107.43	<Ο.Α.	2.13	21.54
ZTE 2007-2011	1	47.15	174.37	95.05	<Ο.Α.	<Ο.Α.	8.49
Iphone	1	103.8	164.76	147.88	<Ο.Α.	<Ο.Α.	8.28
LG	1	102.29	43.40	53.32	3.27	<Ο.Α.	33.96

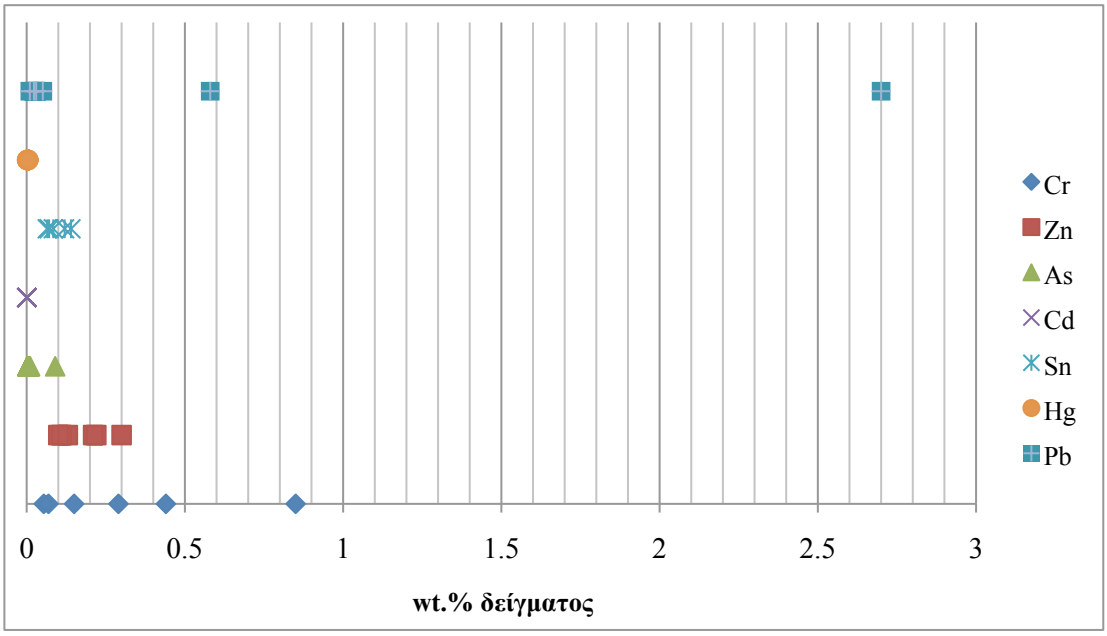
[14] < Ο.Α.: κάτω από το όριο ανίχνευσης.

Μελετώντας τους παραπάνω πίνακες, διαπιστώνεται κατ' αρχάς ότι στις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων, τα εξεταζόμενα στοιχεία που βρίσκονται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις είναι ο σίδηρος, το αλουμίνιο, ο χαλκός και το νικέλιο με διαφορετικά ποσοστά σε κάθε δείγμα. Σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις ανιχνεύθηκαν ο ψευδάργυρος και ο κασσίτερος ενώ τα βαρέα μέταλλα, τα οποία διέπονται των απαγορεύσεων της Οδηγίας RoHS, δηλ. το κάδμιο, το χρώμιο, ο μόλυβδος και ο υδράργυρος περιέχονται σε πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις έως και μη ανιχνεύσιμες όπως στην περίπτωση του καδμίου στο δείγμα Nokia 2007-2011. Για τα δείγματα των πλαστικών περιβλημάτων και των οθονών υγρών κρυστάλλων, τα εξεταζόμενα βαρέα μέταλλα που περιέχονται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις είναι το νικέλιο και ο ψευδάργυρος και ακολουθούν το χρώμιο, ο μόλυβδος , το κάδμιο και ο υδράργυρος. Ακόμη, παρατηρείται ότι στα τέσσερα από τα έξι δείγματα των πλαστικών περιβλημάτων δεν ανιχνεύθηκε υδράργυρος ενώ σε έξι και επτά από τα οκτώ δείγματα οθονών υγρών κρυστάλλων δεν ανιχνεύθηκε υδράργυρος και κάδμιο, αντίστοιχα.

Τα Διαγράμματα 9, 10, 11 και 12 απεικονίζουν το εύρος συγκεντρώσεων των προσδιορισθέντων στοιχείων των δειγμάτων, για τις πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων, τα πλαστικά περιβλήματα και τις οθόνες υγρών κρυστάλλων.

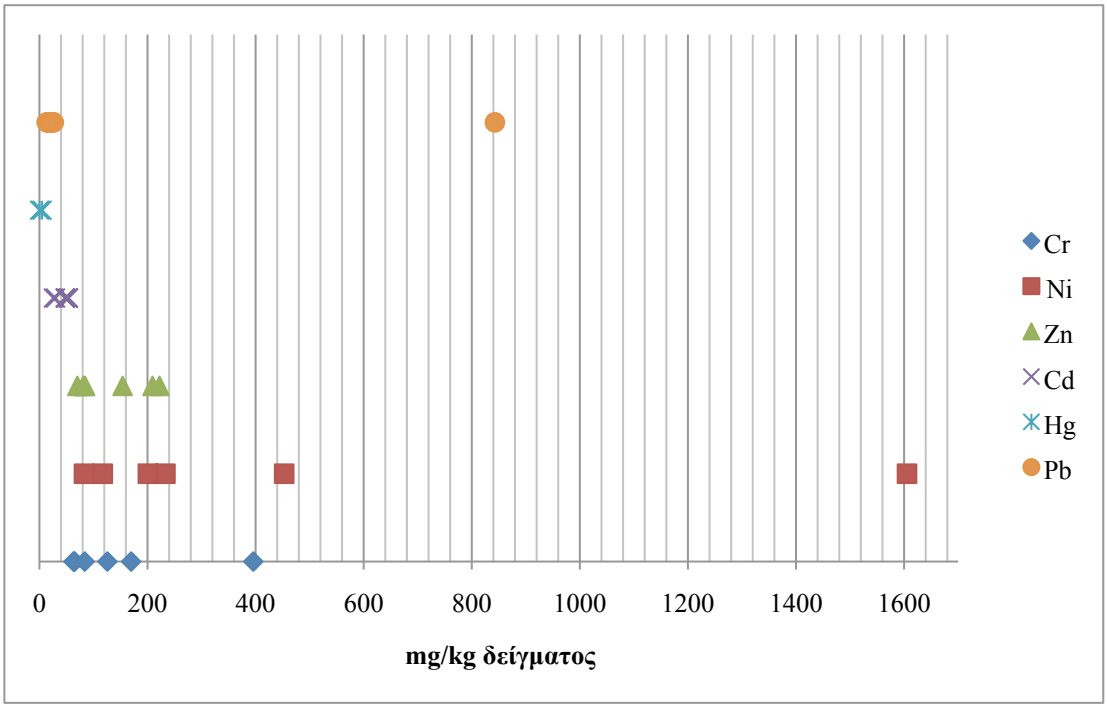


Διάγραμμα 9: *Εύρος συγκεντρώσεων των στοιχείων Al, Fe, Ni kai Cu στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων.*



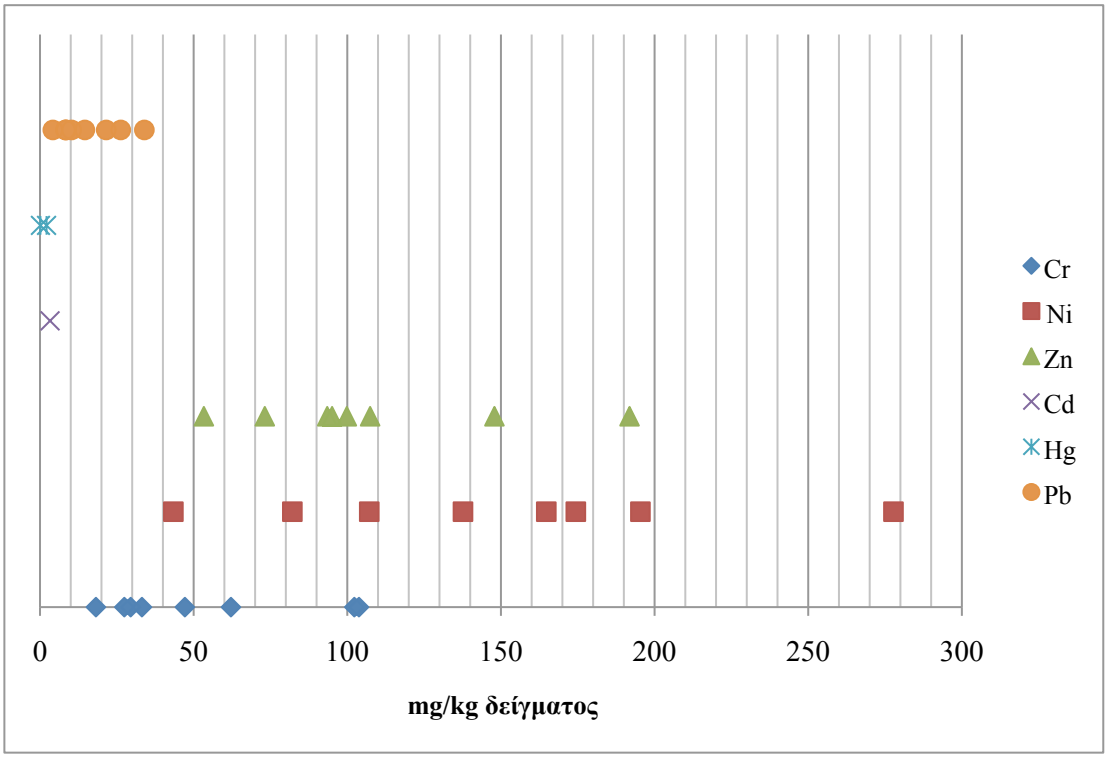
Διάγραμμα 10: *Εύρος συγκεντρώσεων των στοιχείων Cr, Zn, As, Cd, Sn, Hg και Pb στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων.*

Οι τιμές των συγκεντρώσεων ποικίλλουν από 0.64% κ.β. στο Samsung 2002-2006 σε 1.58% κ.β. στο Nokia 2007-2011 για αλουμίνιο; από 0.054% κ.β. στο Samsung 2002-2006 σε 0.85% κ.β. στο δείγμα 2002-2006 για το χρώμιο; από 0.48% κ.β. στο ZTE 2007-2011 σε 6.67% κ.β. στο δείγμα για την περίοδο 2007-2011 για το σίδηρο; από 1.12% κ.β. σε ZTE 2007-2011 στο 3.02% κ.β. στο δείγμα της περιόδου 2002-2006 για το νικέλιο; από 1.27% κ.β. στο Samsung 2002-2006 σε 2.19% κ.β. την περίοδο 2007-2011 για το χαλκό; από 0.10% κ.β. στο δείγμα 2002-2006 σε 0.30% κ.β. στο δείγμα 2007-2011 για τον ψευδάργυρο; από 0.0059% κ.β. στο δείγμα 2002-2006 έως 0.090% κ.β. στο ZTE 2007-2011 για το αρσενικό; από 0.000083% κ.β. στο 2002-2006 σε 0.00057% κ.β. στο Nokia 2002-2006 για το κάδμιο; από 0.065% κ.β. στο Nokia 2007-2011 σε 0.14% κ.β. στο Samsung 2007-2011 για τον κασσίτερο; από 0.00099% κ.β. στο ZTE 2007-2011 σε 0.0051% κ.β. στο Nokia 2007-2011 για τον υδράργυρο; από 0.010% κ.β. στο Nokia 2002-2006 σε 2.7% κ.β. στο Samsung 2002-2006 για το μόλυβδο.



Διάγραμμα 11: *Εύρος συγκεντρώσεων των στοιχείων Cr, Ni, Zn, Cd, Hg και Pb στα δείγματα πλαστικών περιβλημάτων.*

Για τα δείγματα πλαστικών περιβλημάτων, οι διακυμάνσεις των τιμών των βαρέων μετάλλων που εξετάστηκαν είναι οι εξής: από 63.04 mg/kg στο Nokia 2002-2006 σε 395.81 mg/kg στο δείγμα 2007-2011 για το χρώμιο; από 82.41 mg/kg στο Nokia 2002-2006 σε 1605.43 mg/kg στο Samsung 2002-2006 για το νικέλιο; από 70.10 mg/kg στο Nokia 2002-2006 σε 222.17 mg/kg στο δείγμα 2002-2006 για τον ψευδάργυρο; από 25.77 mg/kg στο Nokia 2002-2006 σε 53.70 mg/kg στο Samsung 2002-2006 για το κάδμιο; 0.22 mg/kg στο 2007-2011 mg/kg και 4.86 mg/kg στο 2002-2006 για τον υδράργυρο, ενώ δεν ανιχνεύθηκε σε κανένα άλλο δείγμα; από 13.44 mg/kg στο Nokia 2007-2011 έως 842.81 mg/kg στο δείγμα 2007-2011 για το μόλυβδο.



Διάγραμμα 12: *Εύρος συγκεντρώσεων των στοιχείων Cr, Ni, Zn, Cd, Hg και Pb στα δείγματα οθονών υγρών κρυστάλλων.*

Τέλος, στα δείγματα οθονών υγρών κρυστάλλων οι μέσες συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων είναι οι ακόλουθες: από 18.20 mg/kg στο 2002-2006 σε 103.80 mg/kg στο Iphone για το χρώμιο; από 43.40 mg/kg στο LG έως 277.74 mg/kg στο Samsung 2002-2006 για το νικέλιο; από 53.32 mg/kg στην LG μέχρι 191.85 mg/kg στο Samsung 2002-2006 για τον ψευδάργυρο; από 3.27 mg/kg στο LG για το κάδμιο έως και μη ανιχνέυσιμο; από 0.14 mg/kg στο Samsung 2002-2006 και 2.13 mg/kg στο Nokia 2007-2011 για τον υδράργυρο; και από 4,18 mg/kg στο δείγμα 2002-2006 σε 33.96 mg/kg στο LG για το μόλυβδο.

3.1.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων με TTLC

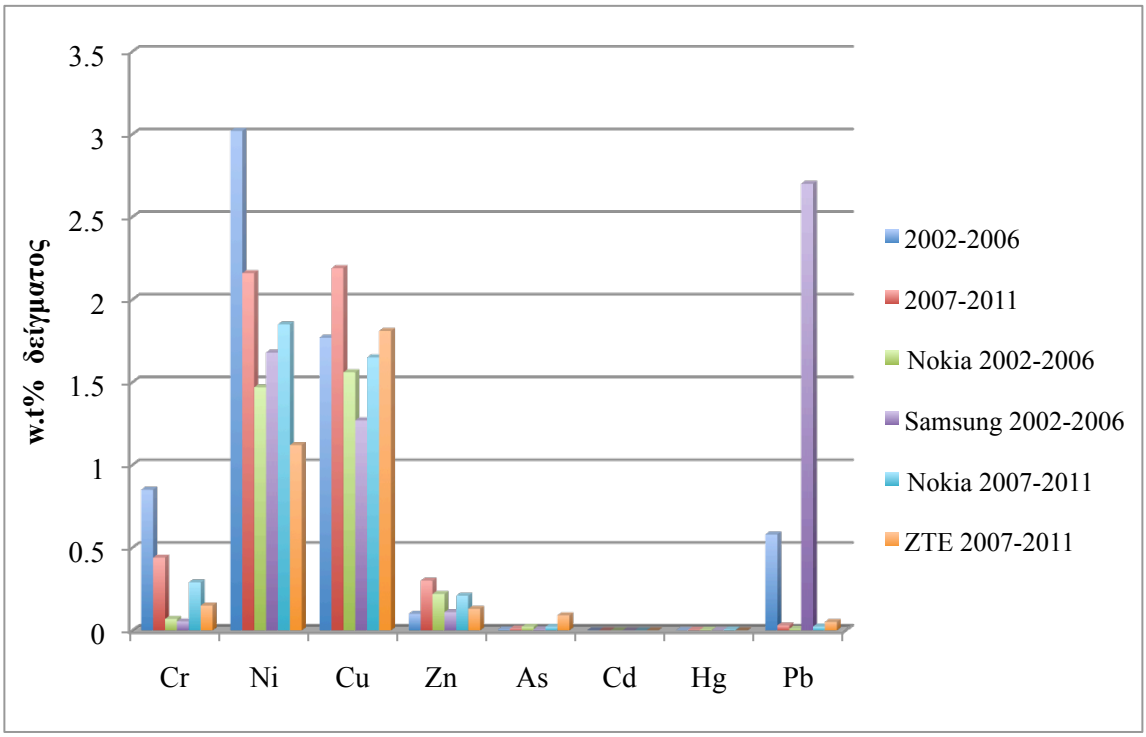
Το τέστ Total Threshold Limit Concentration (TTLC) είναι μια μέθοδος χημικής χώνευσης, η οποία αναπτύχθηκε από το Τμήμα Ελέγχου Τοξικών Ουσιών (Department of Toxic Substances Control (CA, United States) με σκοπό τον προσδιορισμό ολικής συγκέντρωσης ενός συγκεκριμένου συστατικού σε ένα δείγμα. Τα δείγματα αναλύονται με την μέθοδο EPA 7420 και EPA 6010 για τον μόλυβδο και τα άλλα μέταλλα αντίστοιχα. Ουσιαστικά πρόκειται για μεθόδους χώνευσης, έτσι ώστε να ληφθούν υπ' όψιν τα διαλυτά και αδιάλυτα κλάσματα του δείγματος. Τα

αποτελέσματα συγκρίνονται με τις TTLC τιμές κατωφλιού και στην περίπτωση που οποιαδήποτε ουσία υπερβαίνει τα όρια, τα απόβλητα ταξινομούνται ως επικίνδυνα και χαρακτηρίζονται από έναν κωδικό που καθορίζεται από τις ενώσεις που απέτυχαν το τέστ. Τα ρυθμιστικά όρια των που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των επικίνδυνων αποβλήτων στην Καλιφόρνια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα [79].

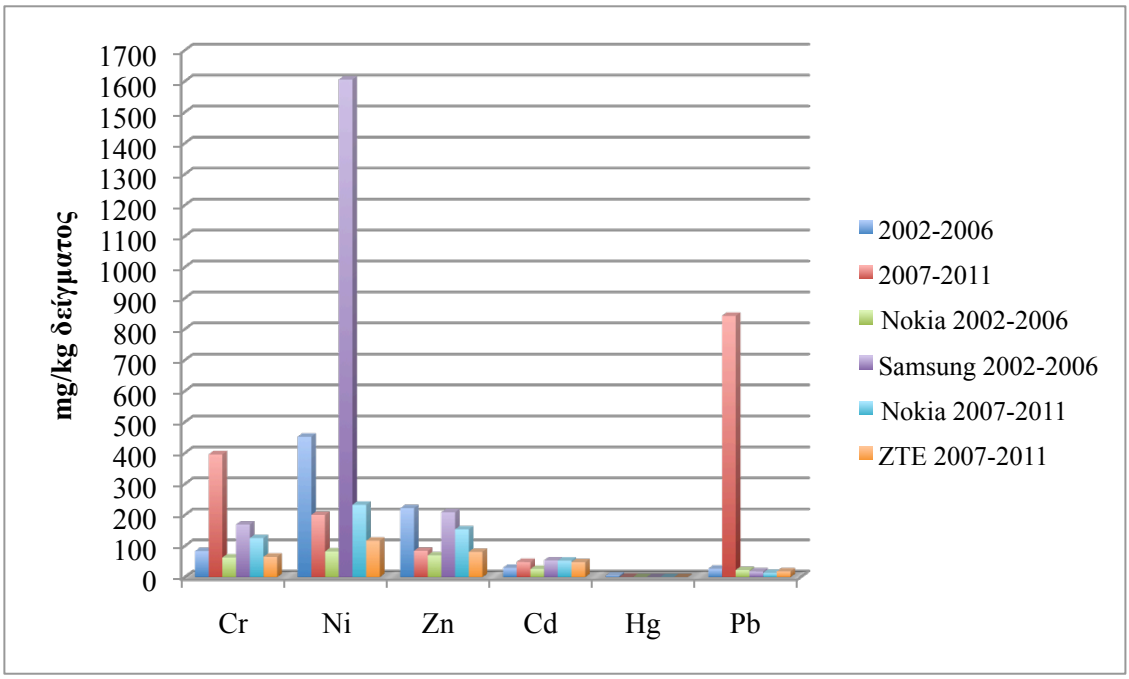
Πίνακας 22: *Οριακές τιμές TTLC [85].*

Ανόργανες ουσίες	**TTLC οριακές τιμές (mg/kg)**
Αρσενικό και/ή οι ενώσεις του	500
Κάδμιο και/ή οι ενώσεις του	100
Χρώμιο και/ή οι ενώσεις του	2,500
Εξασθενές χρώμιο	500
Χαλκός και/ή οι ενώσεις του	2,500
Μόλυβδος και/ή οι ενώσεις του	1,000
Νικέλιο και/ή οι ενώσεις του	2,000
Ψευδάργυρος και/ή οι ενώσεις του	5,000
Υδράργυρος και/ή οι ενώσεις του	20
Αντιμόνιο και/ή οι ενώσεις του	500
Αμίαντος	1%
Βυρήλλιο και/ή οι ενώσεις του	75
Βάριο και/ή ενώσεις του	10000
Κοβάλτιο και/ή ενώσεις του	8,000
Ασήμι και/ή οι ενώσεις του	500
Μολυβδαίνιο και/ή οι ενώσεις του	3,500
Σελήνιο και/ή οι ενώσεις του	100
Θάλλιο και/ή οι ενώσεις του	700
Βανάδιο και/ή οι ενώσεις του	2,400

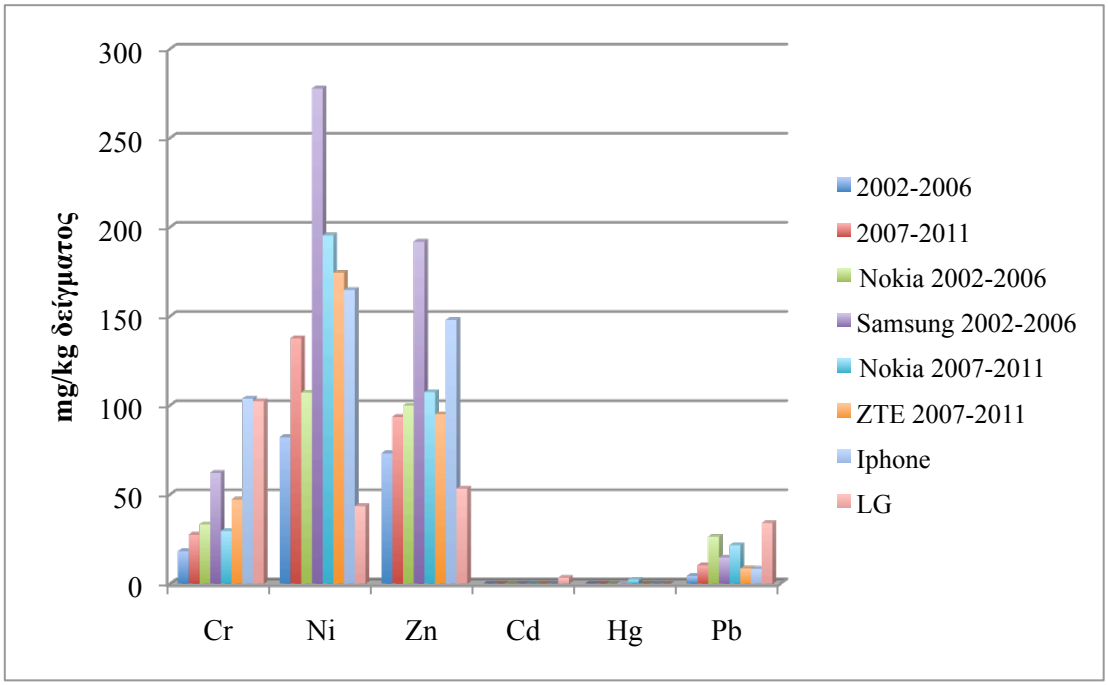
Στα ραβδογράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των εξεταζόμενων μετάλλων στο σύνολο των δειγμάτων.



Διάγραμμα 13: *Συγκεντρώσεις στοιχείων στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων 2002-2006 και 2007-2011.*



Διάγραμμα 14: *Συγκεντρώσεις στοιχείων στα δείγματα πλαστικών περιβλημάτων 2002-2006 και 2007-2011.*



Διάγραμμα 15: *Συγκεντρώσεις στοιχείων στα δείγματα οθονών υγρών κρυστάλλων 2002-2006 και 2007-2011.*

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται αντιληπτό ότι όλα τα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων αποτυγχάνουν στο τέστ TTLC για κάποιες από τις ουσίες που μετρούνται. Συγκεκριμένα για το νικέλιο, οι συγκεντρώσεις του σε όλα τα δείγματα ξεπέρασαν τις τιμές κατωφλιού με τα αποτελέσματα να κυμαίνονται από 5 έως 10 φορές υψηλότερα του ορίου ενώ στο δείγμα 2002-2006 ανέρχεται μέχρι και 15 φορές. Επίσης, στο τεστ TTLC όσον αφορά το χαλκό, απέτυχαν όλα τα δείγματα PCB με τα αποτελέσματα που σημειώνονται να υπερβαίνουν το όριο έως και 9 φορές. Για το χρώμιο και τον υδράργυρο τρία δείγματα από τα έξι ξεπέρασαν τις οριακές τιμές ενώ για το μόλυβδο, μόνο τα δείγματα 2002-2006 και Samsung 2002-2006 απέτυχαν το τέστ. Ένα δείγμα ξεπέρασε την τιμή κατωφλιού για το αρσενικό και συγκεκριμένα το ZTE 2007-2011. Για τα υπόλοιπα στοιχεία που μετρήθηκαν (κάδμιο και ψευδάργυρο), οι συγκεντρώσεις τους σε όλα τα δείγματα ήταν κατώτερες από τα ρυθμιστικά όρια. Για τα δείγματα πλαστικών περιβλημάτων και οθονών υγρών κρυστάλλων κανένα από τα στοιχεία που μετρήθηκαν δεν ξεπέρασαν τις τιμές κατωφλιού όπως αυτές ορίζονται από DTSC.

Το περιεχόμενο των κινητών τηλεφώνων σε τοξικές ουσίες κέντρισε το ενδιαφέρον για την πραγματοποίηση μελετών σχετικά με την περιβαλλοντική τους επίδραση. Μία ανάλυση κινητών τηλεφώνων (ολόκληρη συσκευή: πλαστικό περίβλημα, PCB κ.α.), χρησιμοποιώντας την μέθοδο EPA 3050B αποδεικνύει ότι περιεχόμενο των δειγμάτων

σε μόλυβδο ξεπερνά τα όρια TTLC, ενώ τα όρια του νικελίου ξεπερνώνται σε δύο από τα δείγματα [86]. Τα λεπτομερή αποτελέσματα της συγκεκριμένης μελέτης παρουσιάζονται στον πίνακα 23. Ο χαρακτηρισμός τοξικότητας των ίδιων δειγμάτων χρησιμοποιώντας την Toxicity Characterization Leaching Procedure (TCLP) απέδειξε ότι το εκχύλισμα μολύβδου ξεπέρασε την τιμή κατωφλιού TCLP για τον μόλυβδο (5mg/L) σε τρία από τα δείγματα με τα επίπεδα μέσου εκχυλίσιμου μολύβδου να φτάνουν τα 52 mg/L [86]. Ομοίως άλλες μελέτες απέδειξαν ότι οι ηλεκτρονικές συσκευές, συμπεριλαμβανομένων των κινητών τηλεφώνων δύνανται να εκλύσουν μόλυβδο σε συγκεντρώσεις υψηλότερες του ορίου των 5 mg/L όταν χρησιμοποιείται η εκχυλιστική διάλυση TCLP. Ειδικότερα η μελέτη [87] που πραγματοποιήθηκε σε 78 κινητά τηλέφωνα (όλα μοντέλα Motorola i600)| αναφέρει μια μέση εκχυλίσιμη συγκέντρωση μολύβδου της τάξης των 52.86 mg/L, ενώ σε μια αλλή [65] 20mg/L με τα 28 από τα 38 δείγματα κινητών τηλεφώνων να ξεπερνούν το το όριο του μολύβδου για τον χαρακτηρισμό τοξικότητας.

Πίνακας 23: *Ολική συγκέντρωση επιλεγμένων μετάλλων σε κινητά τηλέφωνα [86].*

Δείγμα	**Στοιχεία**			
	Cd	**Pb**	**Ni**	**Ag**
Motorola	Δ.Α.	5958	1862	186
Motorola i1000 plus	2	1514	2630	77
Motorola	3	4656	2059	160
Motorola i1000 plus	Δ.Α.	5049	954	398
Όρια TTLC	100	1000	2000	500

3.1.2. Σύγκριση με την βιβλιογραφία

Στον πίνακα 24 παρουσιάζεται μια σύγκριση των τιμών των διαφόρων βαρέων μετάλλων που προσδιορίσθηκαν στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων, πλαστικών περιβλημάτων και οθονών υγρών κρυστάλλων κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής με δημοσιευμένα δεδομένα προερχόμενα από μια ποικιλία ανάλογων εργασιών [13, 16, 88-91].

Πίνακας 24: *Σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας διατριβής με τη βιβλιογραφία.*

	PCBs			PHs	LCDs	
Στοιχεία	[88]	[13]	[89]	[16]	[90]	[91]
Al	0.26 wt%	0.61 wt%	-	-	-	-
Cr	-	-	-	-	11 mg/kg	1.07 mg/kg
Fe	10.57 wt%	4.85 wt%	-	-	-	-
Ni	2.63 wt%	2.54 wt%	-	432 ± 1905 mg/kg	-	-
Cu	34.49 wt%	37.81 wt%	250 ± 92.3 g/kg	-	-	-
Zn	5.92 wt%	1.82 wt%	-	-	77 mg/kg	0.5 mg/kg
As	-	-	-	-	-	-
Cd	-	-	2.1 ± 3.3 mg/kg	69.9 ± 145 mg/kg	N.D.	N.D.
Sn	3.39 wt%	2.55 wt%	-	-	-	-
Hg	-	-	-	-	-	-
Pb	1.87 wt%	1.23 wt%	20.1 ± 8.4 g/kg	58.3 ± 50.4 mg/kg	5 mg/kg	3.2 mg/kg

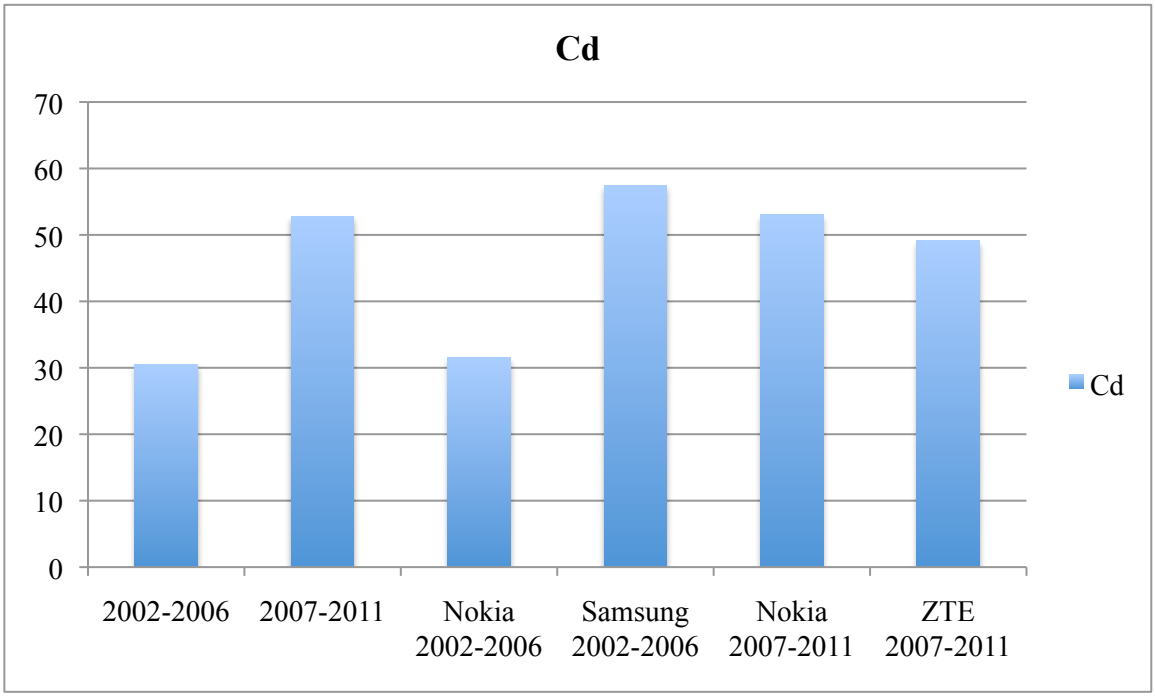
Από τον παραπάνω πίνακα καταδεικνύεται ότι είναι αρκετά δύσκολο να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά το ακριβές περιεχόμενο στα εξεταζόμενα εξαρτήματα κινητών τηλεφώνων, διότι η σύστασή τους ποικίλει πάρα πολύ λόγω της πληθώρας των μοντέλων και των κατασκευαστών. Γενικά, οι παρατηρούμενες αποκλίσεις στο σύνολο των δειγμάτων δεν είναι μεγάλες με εξαίρεση τις συγκεντρώσεις χαλκού στα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων. Από την άλλη, παρόλο που τα βιβλιογραφικά δεδομένα αφορούν σε αναλύσεις που διεξήχθησαν πρόσφατα, δεν γίνεται γνωστό αν τα εξαρτήματα προέρχονται από κινητά τηλέφωνα τις τελευταίας δεκαετίας, όπως της παρούσας εργασίας. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει για τα περισσότερα στοιχεία το συμπέρασμα ότι η σύστασή των εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ηλικία των, η οποία όπως αναφέρεται αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, αντικατοπτρίζοντας νέες τάσεις στον τομέα της παραγωγής και της επιλογής υλικών.

Αξίζει επίσης να επισημανθεί ότι ορισμένες από τις παραπάνω τιμές αναφέρονται σε δείγματα τα οποία ελήφθησαν υπό τελείως διαφορετικές συνθήκες και αναφέρονται σε ποικίλες μεθοδολογικές προσεγγίσεις. Θα ήταν λοιπόν συνετό η σύγκριση μεταξύ των να γίνεται με προσοχή. Η [16] εκθέτει τιμές για δείγματα προερχόμενα από επισκευαστές κινητών τηλεφώνων, τα οποία πριν την συλλογή τους ήταν εν μέρει αποσυναρμολογημένα και βρίσκονταν σε επαφή με τα εργαλεία αποσυναρμολόγησης των τεχνιτών ενώ η [89] αναφέρει πως από τα δείγματα τους, που προέρχονταν επίσης από μερικώς αποσυναρμολογημένα κινητά τηλέφωνα, ορισμένα εξαρτήματα είχαν αφαιρεθεί για να χρησιμοποιηθούν σε δραστηριότητες επισκευής και ανακαίνισης άλλων συσκευών. Επίσης, στη μελέτη [92] ακολουθήθηκε διαφορετική μέθοδος για

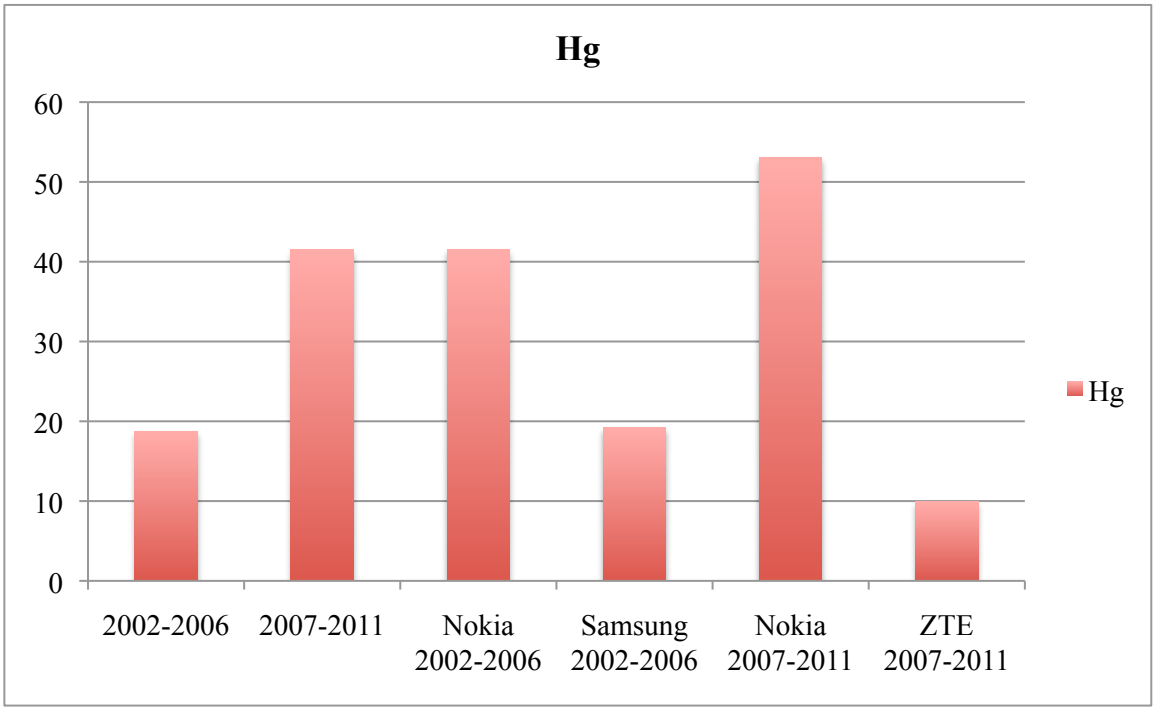
την προετοιμασία των δειγμάτων. Τα δείγματα χωνεύθηκαν με μικροκύματα (microwave digestion), μέθοδος πιο αποτελεσματική από την χώνευση με ισχυρά οξέα, αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό τη διαλυτότητα των κλασμάτων στα διαλύματα.

3.1.3. Συνολική συγκέντρωση RoHS στοιχείων στα κινητά τηλέφωνα

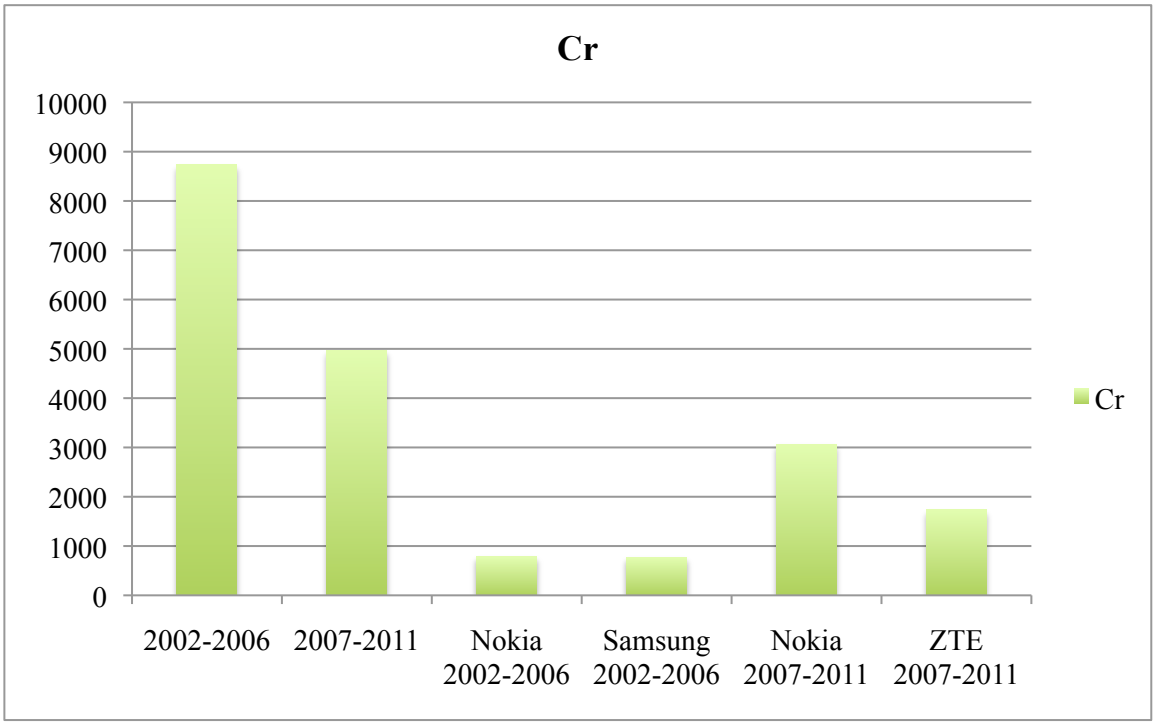
Σύμφωνα με την Οδηγία 2002/95/ΕΚ (RoHS Directive), τα κράτη μέλη θα πρέπει να εξασφαλίσουν ότι από την 1η Ιουλίου 2006 ο νέος ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός που διατίθεται στην αγορά δεν θα πρέπει να περιέχει μόλυβδο, υδράργυρο, κάδμιο, εξασθενές χρώμιο, πολυβρωμοδιφαινύλια ή πολυβρωμοδιφαινυλαιθέρες αν και υφίσταται τροποποίηση που επιτρέπει την ύπαρξη των παραπάνω στοιχείων σε ομοιογενή υλικά με μέγιστες συγκεντρώσεις 100 ppm (ή 0.01% κ.β.) για το κάδμιο και 1000 ppm (ή 0.1% κ.β.) για καθένα από τα υπόλοιπα στοιχεία. Προκειμένου να παρουσιαστεί μια συνολική εικόνα για τις συγκεντρώσεις των παραπάνω τοξικών ουσιών στα κινητά τηλέφωνα που μελετήθηκαν, προστέθηκαν οι συγκεντρώσεις των επιμέρους συστατικών τους. Στα διαγράμματα 16-19 παρουσιάζονται οι τιμές των συνολικών συγκεντρώσεων στα δείγματα για το κάδμιο, το χρώμιο, τον υδράργυρο και το μόλυβδο.



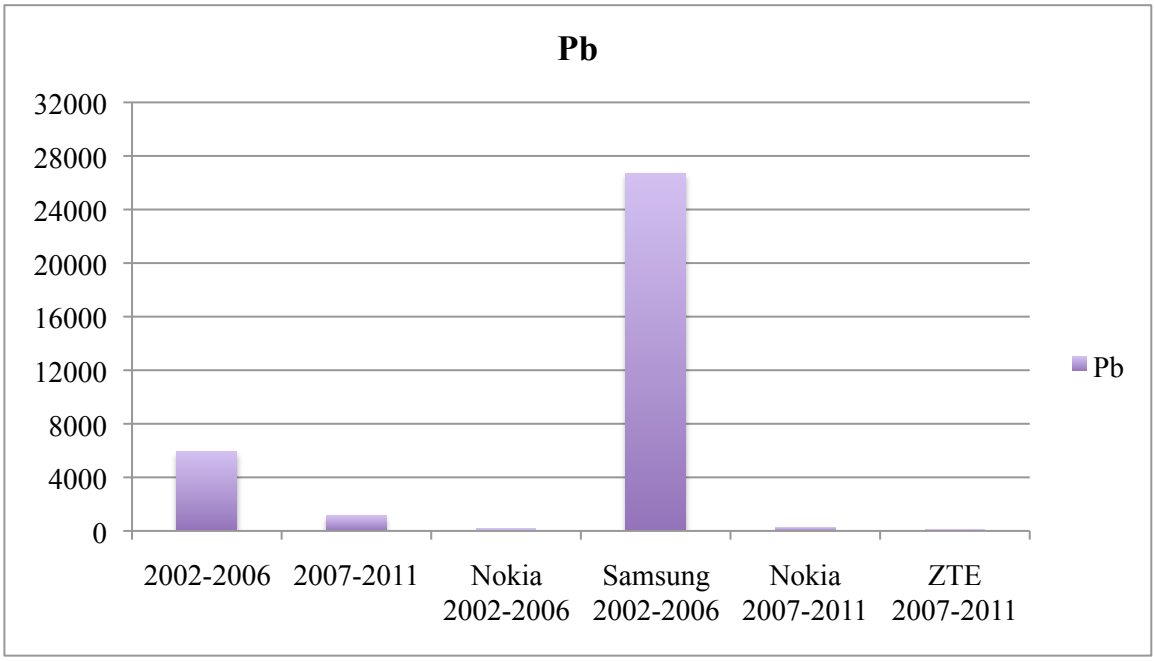
Διάγραμμα 16: *Συνολικές συγκεντρώσεις Cd στα δείγματα (ppm).*



Διάγραμμα 17: *Συνολικές συγκεντρώσεις Hg στα δείγματα (ppm).*



Διάγραμμα 18: *Συνολικές συγκεντρώσεις Cd στα δείγματα (ppm).*



Διάγραμμα 19: *Συνολικές συγκεντρώσεις Cd στα δείγματα (ppm).*

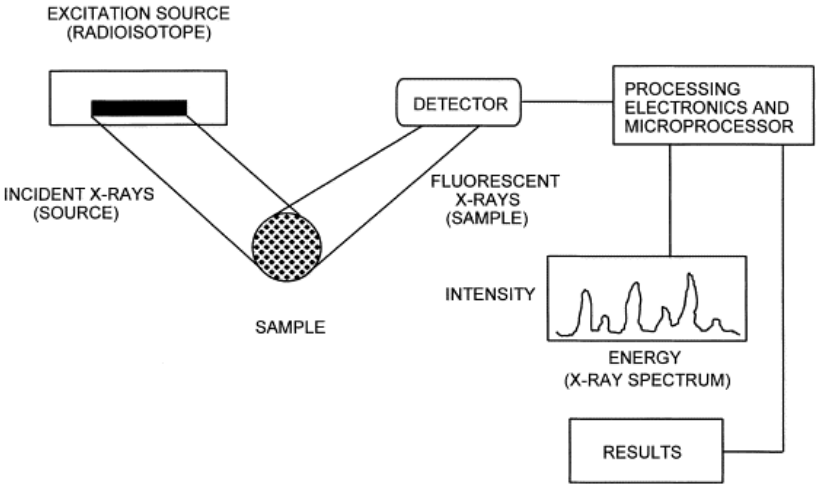
Μελετώντας τα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό ότι κανένα από τα δείγματα δεν ξεπερνά τις μέγιστες επιτρεπόμενες, από την Οδηγία RoHS, συγκεντρώσεις όσον αφορά το κάδμιο και τον υδράργυρο. Από την άλλη, η συγκέντρωση ολικού χρωμίου ξεπερνά το όριο των 1000 ppm σε τέσσερα από τα έξι δείγματα, αντίστοιχα. Όμως, τα εν λόγω αποτελέσματα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν με προσοχή, καθότι απεικονίζουν το ολικό χρώμιο στο δείγμα, δεν μπορούν συνεπώς να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων για επικίνδυνες ενώσεις όπως το Cr(VI). Παρέχουν ωστόσο ικανοποιητικές ενδείξεις για την τυχόν ύπαρξη της εν λόγω απαγορευμένης ουσίας σε ανώτερες του επιτρεπτού ορίου ποσότητες. Τέλος, για το μόλυβδο, σημειώθηκε η μεγαλύτερη τιμή με 26706 ppm στο δείγμα Samsung 2002-2006 ενώ γενικότερα τρία από τα έξι δείγματα ξεπερνούν το όριο των 1000 ppm.

3.2. Αποτελέσματα EDXRF

Η διασπορά ενέργειας φθορισμού ακτίνων X (EDXRF) είναι μια πολύ ισχυρή τεχνική για την μέτρηση της συγκέντρωσης στοιχείων σε ένα δείγμα. Η ανάλυση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα τύπων δείγματος περιλαμβανομένων στερεών, υγρών, σκόνης κλπ., από ppm έως υψηλά ποσοστά συγκεντρώσεων, καλύπτοντας στοιχεία από Na^{11} σε U^{92} στον περιοδικό πίνακα. Η τεχνική EDXRF έχει αναδειχθεί ως η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιείται από κατασκευαστές ΗΗΕ για τον έλεγχο των προϊόντων προς συμμόρφωση με την Οδηγία RoHS διότι παρουσιάζει μερικά βασικά

πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων όπως είναι η φασματομετρία ατομικής απορρόφησης (Atomic Absorption Spectroscopy, *AAS)* και η χρωματογραφία ιοντοεναλλαγής (Ion Exchange Chromatography, IEC). Πρώτον, είναι μη καταστροφική, αφού δεν προκαλεί ζημιά στο δοκιμασθέν δείγμα, γεγονός πολύ σημαντικό για τον έλεγχο ρουτίνας των κατασκευαστών σε προϊόντα που πρέπει να σταλούν, επιτρέποντας έως 100 % έλεγχο. Δεύτερον, σε ορισμένες περιπτώσεις δεν απαιτεί προετοιμασία του δείγματος. Τρίτον, χρειάζεται μόνο δέκατα του δευτερολέπτου για την πραγματοποίηση μετρήσεων ανά δείγμα. Τέλος, η αβεβαιότητα της μέτρησης των 10-50 ppm είναι επαρκής για να ελεγχθούν και να ταυτοποιηθούν οι κανόνες συμμόρφωσης με την Οδηγία RoHS. Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σε χημικά εργαστήρια να αναλύσουν στοιχειακή συγκέντρωση, κάποια με πολύ καλύτερη ακρίβεια, όμως είναι αργές, δαπανηρές και απαιτούν εκτενέστερη εργασία του μελετητή, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται για την επικύρωση των αποτελεσμάτων EDXRF [92].

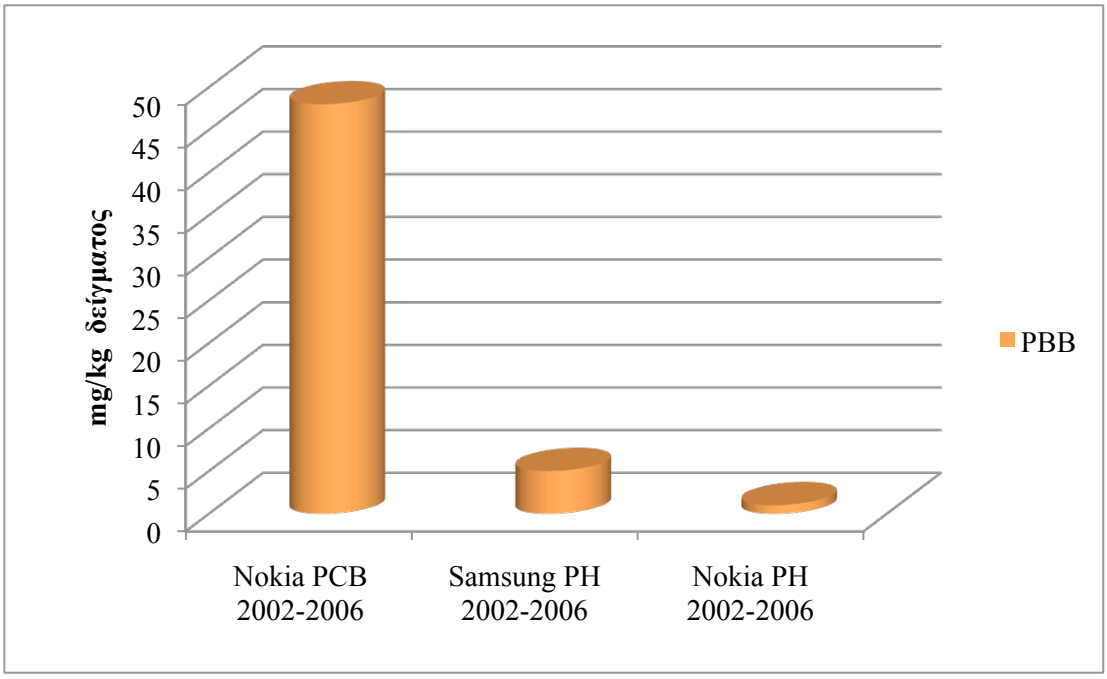
Μία τυπική συσκευή EDXRF αποτελείται από διάφορα βασικά λειτουργικά εξαρτήματα όπως φαίνεται στην Εικόνα 13: μια πηγή ακτίνων διέγερσης, έναν θάλαμο δείγματος, έναν Si(Li) ανιχνευτή, έναν προενισχυτή και έναν κύριο ενισχυτή καθώς και έναν αναλυτή ύψους παλμού.



Εικόνα 13: *Οργανολογία ενός τυπικού φασματόμετρου EDXRF [91].*

Οι αναλύσεις με το EDXRF επικεντρώθηκαν στις ενώσεις βρωμίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως επιβραδυντικά φλόγας και αφορούν το δείγμα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων 2002-2006 και τα δείγματα πλαστικών περιβλημάτων Nokia 2002-2006 και Samsung 2002-2006. Στα δείγματα αυτά ανιχνέυθηκαν συγκεντρώσεις μόνο πολυβρωμιωμένων διφαινυλίων (Polybrominated Biphenyls, PBB), ουσίες οι

οποίες διέπονται των απαγορεύσεων της Οδηγίας RoHS. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 20.



Διάγραμμα 20: *Συγκεντρώσεις PBB στα δείγματα.*

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, οι υψηλότερες συγκεντρώσεις PBB ανιχνεύθηκαν στο δείγμα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων (48 mg/kg) ενώ στα δείγματα πλαστικών περιβλημάτων οι τιμές των αποτελεσμάτων ήταν πολύ μικρότερες και συγκεκριμένα 5 mg/kg και 1 mg/kg για τα δείγματα Nokia 2002-2006 και Samsung 2002-2006, αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τις ανώτερες τιμές με τις μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις για τα PBBs, όπως αυτές ορίζονται από την Οδηγία RoHs, προκύπτει πως καμία από αυτές δεν τις ξεπερνούν ενώ ενδεικτικό είναι το γεγονός, πως η μέγιστη συγκέντρωση στα δείγματα είναι σχεδόν υποδιπλάσια από την μέγιστη επιτρεπόμενη συγκέντρωση (100 mg/kg).

4.0. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή περιγράφηκε η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα μιας ενδελεχούς εξέτασης που σαν αντικείμενό της είχε τον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των βαρέων μετάλλων και επικίνδυνων ουσιών σε απόβλητα κινητά τηλέφωνα, τα οποία υπάγονται στην κατηγορία αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Σαν πρώτο βήμα μετρήθηκαν κάποιες από τις φυσικές και λειτουργικές παράμετροι των κινητών τηλεφώνων. Στην συνέχεια, προσδιορίσθηκε επίσης το περιεχόμενο στα σπουδαιότερα βαρέα μέταλλα και βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας επιλεχθέντων κατασκευαστικών στοιχείων των κινητών τηλεφώνων, ποιοτικά και ποσοτικά μέσω φασματομετρίας μάζας επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (ICP-MS) και φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων X (EDXRF), αντίστοιχα. Οι πραγματοποιηθείσες μετρήσεις και τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν προσεγγίζοντας τις συσκευές κινητών τηλεφώνων ως δύο κατηγοριών, αυτών που κατασκευάστηκαν πριν και μετά την έκδοση της οδηγίας 2002/95/ΕΚ.

Από τα ευρήματα της παρούσας εργασίας διαπιστώθηκαν τα ακόλουθα:

- ☞ Το σύστημα επιστροφής και ξεχωριστής συλλογής αποβλήτων κινητών τηλεφώνων και αξεσουάρ των λειτουργεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Όπως διαπιστώθηκε από τα σημεία δειγματοληψίας, μεγάλες ποσότητες απόβλήτων του συγκεκριμένου εξοπλισμού απορρίπτονταν στους ειδικούς κάδους ανακύκλωσης πολύ συχνά. Όμως, παρατηρήθηκε σε πολλές περιπτώσεις και το φαινόμενο της αποθήκευσης των συσκευών, που δεν είχαν οποιαδήποτε αξία για τους κατόχους τους, τονίζοντας την έλλειψη κίνητρων από την πλευρά των καταναλωτών για απόρριψη των αποβλήτων κινητών τηλεφώνων και αποδεικνύοντας ανάλογα την ύπαρξη περιθωρίων βελτίωσης για το υπάρχον σύστημα συλλογής.
- ☞ Χαρακτηριστικά των κινητών τηλεφώνων όπως το βάρος και ο χρόνος αποσυναρμολόγησης παρουσιάζουν διακυμάνσεις μεταξύ των δυο διαστημάτων μελέτης. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι το μέσο βάρος των κινητών τηλεφώνων του διαστήματος 2007-2011 είναι μεγαλύτερο από αυτό του διαστήματος 2002-2006 κατά 10.4 g, γεγονός που δικαιολογείται από την ανάγκη για υποστήριξη όλο και περισσότερων εφαρμογών που συνεπάγεται την

αύξηση του βάρους τους με την πάροδο του χρόνου. Από την άλλη, το εύρος των τιμών του βάρους στο σύνολο των συσκευών δεν είναι μεγάλο, συνεπώς δύνανται να χρησιμοποιηθεί από αυτόματες διεργασίες ως μηχανικό κριτήριο διαχωρισμού προς απομάκρυνση των αποβλήτων κινητών τηλεφώνων από το ρεύμα των υπολειμματικών οικιακών στερεών αποβλήτων. Παράλληλα, ο χρόνος αποσυναρμολόγησης, είναι μικρότερος όσον αφορά τα κινητά τηλέφωνα του διαστήματος 2007-2011 σε σχέση με αυτά που κατασκευάστηκαν το διάστημα 2002-2006 κατά 120,6 s. Η διαφορά αυτή αποδεικνύει το γεγονός, ότι οι κατασκευάστριες εταιρείες έχουν πραγματοποιήσει αλλαγές στον σχεδιασμό των κινητών τηλεφώνων με κατεύθυνση τον σχεδιασμό για το περιβάλλον (Design for Environment, DfE) μιας και ο χρόνος αποσυναρμολόγισης αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ανακύκλωσης των ΑΗΗΕ γενικότερα.

- ☞ Πραγματοποιηθείσες με το ICP-MS αναλύσεις προσδιόρισαν το περιεχόμενο στα σπουδαιότερα βαρέα μέταλλα των πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων, των πλαστικών περιβλημάτων και των οθονών υγρών κρυστάλλων. Από τα αποτελέσματα διαφαίνεται ότι, στις PCBs των κινητών τηλεφώνων τα στοιχεία που περιέχονται σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις είναι Fe, Cu, Ni και Al ενώ τα υπόλοιπα Cr, Zn, As, Cd, Sn, Hg και Pb περιέχονται σε πολύ μικρότερες συγκεντρώσεις. Στα πλαστικά περιβλήματα και στις οθόνες υγρών κρυστάλλων οι συγκεντρώσεις των βαρέων μετάλλων, κατά φθίνουσα σειρά, είναι Ni, Cr, Zn, Cd, Hg και Pb.
- ☞ Τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το ICP-MS σε σύγκριση με τα όρια κατωφλιού TTLC, απέδειξαν ότι στις PCB, οι συγκεντρώσεις Ni σε όλα τα δείγματα ξεπέρασαν τις τιμές κατωφλιού με τα αποτελέσματα να κυμαίνονται από 5 έως 10 φορές υψηλότερα του ορίου ενώ στο δείγμα 2002-2006 φτάνει μέχρι και 15 φορές. Επίσης, στο τεστ TTLC όσον αφορά το Cu, απέτυχαν όλα τα δείγματα PCB με τα αποτελέσματα που σημειώνονται να ξεπερνούν το όριο έως και 9 φορές. Για το Cr και το Hg τρία δείγματα από τα έξι ξεπέρασαν τις οριακές τιμές ενώ για το μόλυβδο, μόνο τα δείγματα 2002-2006 και Samsung 2002-2006 απέτυχαν το τέστ. Ένα δείγμα ξεπέρασε την τιμή κατωφλιού για το As και συγκεκριμένα το ZTE 2007-2011. Για τα υπόλοιπα στοιχεία που μετρήθηκαν (Cd και Zn), οι συγκεντρώσεις τους σε όλα τα δείγματα ήταν κατώτερες από τα ρυθμιστικά όρια. Για τα δείγματα πλαστικών περιβλημάτων και οθονών υγρών κρυστάλλων κανένα από τα στοιχεία που μετρήθηκαν δεν ξεπέρασαν τις τιμές κατωφλιού. Παρόλο που ο χαρακτηρισμός τοξικότητας σύμφωνα με τα

ρυθμιστικά όρια TTLC προϋποθέτει διαφορετική προετοιμασία των δειγμάτων (EPA 7420 και EPA 6010 για το Pb και τα άλλα μέταλλα αντίστοιχα), η οποία δεν κατέστη δυνατή με τον υπάρχον εξοπλισμό, ωστόσο τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας παρέχουν ικανοποιητικές ενδείξεις για την τυχόν ύπαρξη των εν λόγω ουσιών σε ανώτερες του επιτρεπτού ορίου ποσότητες.

- ☞ Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση με το ICP-MS για καθένα από τα εξαρτήματα κινητών τηλεφώνων - πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων, πλαστικών περιβλημάτων και οθονών υγρών κρυστάλλων – είτε κυμαίνονται μέσα στα όρια των τιμών της βιβλιογραφίας είτε τις προσεγγίζουν κατά πολύ με εξαίρεση τις συγκεντρώσεις Cu στα δείγματα των PCBs, οι οποίες κυμαίνονται αρκετά χαμηλότερα από τις τιμές άλλων παρόμοιων μελετών στα συγκεκριμένα εξαρτήματα. Αξίζει επίσης να επισημανθεί ότι ορισμένες από τις τιμές παρόμοιων μελετών αναφέρονται σε δείγματα, τα οποία ελήφθησαν υπό τελείως διαφορετικές συνθήκες και σε ποικίλες μεθοδολογικές προσεγγίσεις.
- ☞ Επιπλέον, η σύγκριση του συνολικού περιεχομένου των κινητών τηλεφώνων σε Cd, Hg, Cr και Pb με τα όρια που ορίζονται από τη Οδηγία RoHS για τα ομοιογενή υλικά, καταδεικνύει ότι κανένα από τα δείγματα δεν ξεπερνά τις μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις όσον αφορά το Cd και το Hg. Από την άλλη, η συγκέντρωση ολικού Cr ξεπερνά το όριο των 1000 ppm σε τέσσερα από τα έξι δείγματα. Όμως, τα εν λόγω αποτελέσματα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν με προσοχή, καθότι απεικονίζουν το ολικό χρώμιο στο δείγμα, δεν μπορούν συνεπώς να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων για ενώσεις όπως το Cr(VI). Παρέχουν ωστόσο ικανοποιητικές ενδείξεις για την τυχόν ύπαρξη της εν λόγω απαγορευμένης ουσίας σε ανώτερες του επιτρεπτού ορίου ποσότητες. Τέλος, για το Pb, σημειώθηκε η μεγαλύτερη τιμή με 26706 ppm στο δείγμα Samsung 2002-2006 ενώ γενικότερα τρία από τα έξι δείγματα ξεπερνούν το όριο των 1000 ppm.
- ☞ Οι αναλύσεις με την EDXRF επικεντρώθηκαν στα βρωμιούχα επιβραδυντικά φλογας, στοιχεία τα οποία διέπονται των απαγορεύσεων της RoHS. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι τα δείγματα πλακετών τυπωμένων κυκλωμάτων και πλαστικών περιβλημάτων περιέχουν πολυβρωμιωμένα διφαινύλια (PBBs) ως επιβραδυντικά φλόγας. Όμως οι συγκεντρώσεις στις οποίες ανιχνεύθηκαν δεν ξεπερνούν τα όρια, όπως αυτά ορίζονται από τους περιορισμούς της Οδηγίας RoHS σχετικά με τα ομοιογενή υλικά (100 ppm).

- ☞ Πάντως, για όλα τα δείγματα των κινητών τηλεφώνων που αναλύθηκαν, σε κανένα δεν ανιχνεύθηκε κάποιο από τα εν λόγω στοιχεία σε συγκεντρώσεις οι οποίες να υπερβαίνουν τα όρια της RoHS για την παρουσία των σε ομοιογενή υλικά - με εξαίρεση το Pb για τρία από τα έξι δείγματα – είτε αυτά αφορούσαν κινητά τηλέφωνα που είχαν κατασκευαστεί το διάστημα 2002-2006 είτε το 2007-2011. Συνεπώς, προκύπτει ότι το γεγονός και μόνον της θεσμοθέτησης της RoHS οδήγησε τους OEMs στην εξάλειψη των διεπόμενων από αυτήν βαρέων μετάλλων στα προϊόντα τους. Οι OEMs φρόντισαν, όπως γίνεται προφανές, να προσαρμοσθούν στις απαιτήσεις της προτού αυτές καταστούν απολύτως υποχρεωτικές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Οδηγία 2002/96/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 27ης Ιανουαρίου 2003 σχετικά με τα απόβλητα ειδών ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ), (13.02.2003), Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L 37/24-L 37/38.
2. Προεδρικό διάταγμα 117 (05/03/2004) Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, Τεύχος Α, Αρ. Φύλλου 82, σελ. 4297-4312.
3. Widmer R, Oswald-Krampf H, Sinha-Khetrival D, Schnellmann M, Böni H (2005) Global perspectives on e-waste, Environmental Impact Assessment Review 25:436-458.
4. Αβραμίκος Η (2005) Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Χημικών Μηχανικών & Πανεπιστήμιο Πειραιά, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας, Αθήνα
5. Empa (2005) The e-Waste Guide, www.ewaste.ch/facts_and_figures/
6. Fishbein BK. Waste in the wireless world, the challenge of cell phones. New York: INFORM Inc; 2002.
7. Osibanjo O., Nnorom I. C., 2008. Material flows of mobile phone and accessories in Nigeria: environmental implications and sound end-of-life management options. Environmental Impact Assessment Review 28, 198-213.
8. Saar S, Stutz M, Thomas VM. Towards intelligent recycling, a proposal to link bar codes to recycling information. Resour Conserv Recycl 2004;41:15–22.
9. BASEL/MPPI. Mobile phone partnership initiative MPPI. Guidance: environmentally sound management of end-of-life mobile phone. The Basel Convention on the control of transboundary movements of hazardous waste and their disposal. Draft 4.1A Guidance. Basel Convention/UNEP; 2004. p. 21. April.
10. Most E. Calling all cell phones, Collection, reuse, and recycling programs in the US. New York: INFORM Inc; 2003. http://www. informic.org.
11. Tange L., Drohmann D., 2005. Waste electrical and electronic equipment plastics with brominated flame retardants – From legislation to separate treatment – Thermal processes. Polymer Degradation and Stability 88, 35–40.
12. Chenlong D., Xuefeng W., Changsheng S., Yuemin Z., Baofeng W., Yaqun H., 2009. Recovery of metals from waste printed circuit boards by a mechanical method using a water medium, Journal of Hazardous Materials 166, 478-482.
13. Kasper A.C., Berselli G.B.T., Freitas B.D., Tenorio J.S.A., Bernardes A.M., Veit H.M., 2001. Printed wiring boards for mobile phones: Characterisation and recycling of copper. Waste Management 31, 2536-2545.
14. Verband Kunststofferzeugende Industrie (May 2004) Plastics in Electrical and Electronic Equipment, VKE, Frankfurt a. M., Germany.

15. Dimitrakakis E., Janz E., Bilitewski B., Gidarakos E., 2009. Determination of heavy met- als and halogens in plastics from electric and electronic waste, Waste Management 29, 2700–2706.
16. Nnorom I.C., Osibanjo O., 2009. Toxicity characterization of waste mobile phone plastics. Journal of Hazardous Materials 161, 183-188.
17. Santos M.C., Nobrega J.A., Baccan N., Cadore S., 2010. Determination of toxics ele- ments in plastics from waste electrical and electronic equipment by slurry sampling graphite furnace atomic absorption spectrometry, Talanta 81, 1781–1787.
18. Wolf M (2001) Flammschutzmittel und Schwermetalle in Kunststoffen, Dokumentation der BayLfU Fachtagung Umweltrelevante Inhaltsstoffe in elektrischer und elektronischer Altgeräte (EAG) bzw. Bauteile und Hinweise zu deren fachgerechten Entsorgung, 25 September 2001, Augsburg, Germany, pp. 34-40.
19. AEA Technology (March 2004) WEEE & Hazardous Waste, A report produced for DEFRA
20. Δημητρακάκης Εμ., 2007 Ποιοτικός και Ποσοτικός Προσδιορισμός Ανακυκλώσιμων Υλικών και Επικίνδυνων Ουσιών σε Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού.
21. Lin K.L., Chang W.K., Chang T.C., Lee C.H., Lin C.H., 2009. Recycling thin film transistor liquid crystal diplay (TFT-LCD) waste glass produced as glass-ceramics. Journal of Cleaner Production 16, 1499-1503.
22. Elizabeth Mooney, "Battery Life Remains the Holy Grail for Industry," *Radio Communications Report,* Dec. 6, 1999.
23. INFORM, Inc.
24. Beigl P., Schneider F., Salhofer S., 2012. Takeback systems for mobile phones: review and recommendations. Waste and Resource Management, Themed issue on waste electrical and electronic equipment 165, 25-35.
25. itu (International Telecommunication Union) (2012) Mobile Cellular Subscriptions. See http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/
26. Portio Research Free Mobile Factbook 2012 http://www.portioresearch.com/en/free-mobile-factbook.aspx
27. The world bank World bank search Mobile cellular subscriptions per 100 people. http://data.worldbank.org/indicator/IT.CEL.SETS.P2
28. Gartner (2005) Gartner says mobile phone sales will exceed one billion in 2009. Press release from 20 July 2005. See http://www.garnter.com/press_releases/asset_132473_11.html για περισσότερες πληροφορίες.
29. Gartner (2006) Gartner says top six vendors drive worldwide mobile phone sales up to 21 percent growth in 2005. Press release from February 28, 2006. Βλ.

http://www.garnter.com/press_releases/asset_145891_11.html για περισσότερες πληροφορίες.

30. Gartner (2007) Garnter says worldwide mobile phone sales to end grew 21 percent in 2006. Press release from March 2, 2007. Βλ. http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=501734 για περισσότερες πληροφορίες.
31. Gartner (2008) Gartner says world mobile phone sales increased 16 percent in 2007. Press release from February 27, 2008. Βλ. http://gartner.com/page.jsp?id=612207 για περισσότερες πληροφορίες.
32. Gartner (2010) Gartner says worldwide mobile phone sales to end users grew 8 percent in fourth quarter 2009;market remained flat in 2009. Press release from February 23, 2010. Βλ. http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1306513 για περισσότερες πληροφορίες.
33. Gartner (2002) Gartner Dataquest Says Worldwide Mobile Phone Sales in 2001 Declined for First Time in Industry's History. Βλ. Gartner_Mobile_Phone_Sales-2001.pdf για περισσότερες πληροφορίες.
34. Gartner (2011) Gartner Says Worldwide Mobile Device Sales to End Users Reached 1.6 Billion Units in 2010; Smartphone Sales Grew 72 Percent in 2010. Press release from February 9, 2011. Βλ. http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1543014 για περισσότερες πληροφορίες.
35. Reller A, Bublies T, Staudinger T et al. (2009) The mobile phone: powerful communicator and potential metal dissipator. GAIA 17(2): 127-135.
36. Huisman J. QWERTY and eco-efficiency analysis on cellular phone treatment in Sweden: the eco-efficiency of the direct smelter route versus mandatory disassembly of printed circuit boards TU Delft; 2004. April 10, (Commissioned by Schultz J).
37. Fonebak. New scheme launches to conquer UK's growing mountain of 15 million discarded mobile phones each year. Shields Environ- mental; 2006. www.fonebak.com.
38. Enviroris. Information technology (IT) and telecommunication (Tele- com) waste in Canada. Enviroris. Prepared for Environment Canada National Office of Pollution Prevention, October, 2002.
39. Seliger G. Contribution to efficient cellular phone remanufacturing. CIRP Seminar on Life Cycle Engineering, Copenhagen, Denmark; 2003. May.
40. Beigl, P., Schneider, F., Salhoefer, S., Experiences with WEEE take back systems using the example of mobile phones http://wau.boku.ac.at/fileadmin/_/H813_abfall/KS_Files/Aktuelle_Vortr-ge/Beigl_Schneider_Salhofer_WEEE_TakeBack_MobilePhones.pdf
41. Oguchi, M., Kameya, T., Yagi, S., Urano, K., 2008. Product flow analysis of various consumer durables in Japan. Resour. Conserv. Recycling 3, 463–480.

42. Yongguang Z., Qingdong Y., Peng W., Guohong W., 2006. "A research into the recycling system of waste electrical and electronic equipment in China." 2006 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics.
43. Polak M., Drapalova L., 2012. Estimation of end of life mobile phones generation: The case study of Czech Republic. Waste Management 32, 1583-1591.
44. Five Winds. Toxic and hazardous materials in electronics, an environmental scan of toxic and hazardous materials in IT and Telecom products and waste. Final Report for Environment Canada National Office of Pollution Prevention and Industry Canada Computer for Schools Program Five Winds International; 2001. October.
45. Yu, J., Williams, E., Ju, M., 2010. Analysis of material and energy consumption of mobile phones in China. Energy Policy 38, 4135–4141.
46. Bains, N., Goosey, M., Holloway, L., Shayler, M., 2006. An Integrated Approach to Electronic Waste (WEEE) Recycling: Socio-economic Analysis Report. Rohm and Haas Electronic Materials Ltd., UK.
47. Environment Canada, "Toxic and Hazardous Materials in Electronics," prepared by Five Winds International, May 4, 2001, 62.
48. European Environment Agency (January 2003) Waste from electrical an Electronic Equipment, Quantities, Dangerous Substances and Treatment Methods, EEA, Copenhagen.
49. Association of Plastics Manufacturers in Europe (February 2002) Recycling of bromine from plastics containing brominated flame retardants in state-of-the-art combustion facilities, Technical Report.
50. Basel Action Network, Silicon Valley Toxics Coalition (February 2002) Exporting Harm, The High-Tech Trashing of Asia.
51. Basel Action Network (April 2004) Mobile Toxic Waste: Recent Findings on the Toxicity of End-of-Life Cell Phones.
52. Papameletiou D (June 2000) Towards a European Solution for the Management of Waste from Electrical and Electronic Equipment, Institute for Prospective Technological Studies, Seville.
53. Wilkinson S, Duffy N, Crowe M (May 2001) Waste form Electrical and Electronic Equipment in Ireland: a Status Report, Environmental Protection Agency, Ireland.
54. Απόφαση 2005/618/ΕΚ της Επιτροπής, της 18ης Αυγούστου 2005, για την τροποποίηση της οδηγίας 2002/95/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου σχετικά με την καθιέρωση μέγιστων τιμών συγκέντρωσης για ορισμένες επικίνδυνες ουσίες στα είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (19.08.2005) Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L214.
55. Bromine Science and Environmental Forum, "An Introduction to Brominated Flame Retardants," Brussels, Oct. 19, 2000, 3, http://www.ebfrip.org/download/weeeqa.pdf .

56. Silicon Valley Toxics Coalition (2005) Just Say No to E-Waste: Background Document on Hazards and Waste From Computers, www.svtc.org/cleancc/pubs/sayno.html
57. Lymberidi E. (March 2001) Towards Waste-Free Electrical and Electronic Equipment, European Environmental Bureau (EEB), Brussels, Belgium.
58. Οδηγία 2002/95/ΕΚ 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 (13.02.2003), Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L37/19-L 37/23.
59. European Commission, DG Environment (May 2005) Frequently Asked Questions on Directive 2002/95/EC on the Restriction of the Use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS) and Directive 2002/96/EC on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), europa.eu.int/comm/environment/waste/weee_index.htm
60. BAN. Mobile toxic waste: recent findings on the toxicity of end-of- life cell phones. A report by Basel Action Network (BAN), April 2004.
61. Turbini LJ, Munie GC, Bernier D, Gamalski J, Bergman DW (2001) Examining the Environmental Impact of Lead-Free Soldering Alternatives, IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing 24:4-9.
62. Brandstötter M, Knoth R, Kopacek B, Kopacek P (2004) Case Study of a Printed-Wire-Board Concerning (Re-)Design for Environment, IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing 27:26-32.
63. Pecht M, Fukuda Y, Rajagopal S (2004) The Impact of Lead-Free Legislation Exemptions on the Electronics Industry, IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing 27:221-232.
64. Eveloy V, Ganesan S, Fukuda Y, Wu J, Pecht MG (2005) Are You Ready for Lead-Free Electronics?, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 28:884-894.
65. Townsend TG, Vann K, Mutha S, Pearson B, Jang YC, Musson S, Jordan A (July 2004) RCRA Toxicity Characterization of Computer CPUs and Other Discarded Electronic Devices, Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida.
66. Βάρβογλης Α (2001) Πορτρέτα των Χημικών Στοιχείων, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο.
67. Merck (2003) Toxicological and Ecotoxicological Investigations of Liquid Crystals and Disposal of LCDs.
68. AEA Technology (June 2004) WEEE & Hazardous Waste Part 2, A report produced for DEFRA.

69. Stutz M, Burkhard C, Ertel J. Cost element of recycling and the design of mobile phones in the context of WEE. Proceeding of CARE INNOVATION; 2002. Vienna.http://aix.meng.auth.gr/helcare/CARE02/Ordnerstruktur/Paper%20Presentation/10.5pdf.
70. Lambert AJD. Determining optimum disassembly sequence in electronic equipment. Comput Ind Eng 2002;43:553–75.
71. Naoko T. Extended producer responsibility as a driver for design change- utopia or reality Doctoral Dissertation, September 2004 Lund University The International Institute for Industrial Environ- mental Economics, IIIEE Dissertation 2004, 2.
72. Darby L, Obara L. Household recycling behavior and attitude towards the disposal of small electrical and electronic equipment. Resour Conserv Recycl 2005;44:17–35.
73. Lee J.C., Song H.T., Yoo J.M., 2007. Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea. Resources, Conservation and Recycling 50, 380-397.
74. Prismark. Lead-free electronic assembly, how will this unfold? Prismark Partners. LLC; 2002. May, http://www.prismark.com.
75. Skerlos SJ, Morrow WR, Chan K-Y, Zhao F, Hula A, Seligar G, Basdere B, Prasitnarit A. Economic and environmental character- istics of global cellular telephone remanufacturing. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and Environ- ment, Boston USA; 2003. p. 99–104. http://myweb.ncku.edu.tw/~chanky/KueiYuan%20Chan/Publications_files/Skerlos_5.2_ ISEE_2003.pdf.
76. Cormier SA, Lomnicki S, Backes W, Dellinger B. Origin and health impacts or emissions of toxic by-products and fine particles from combustion and thermal treatment or hazardous waste and materials. Environ Health Perspect 2006;1146:8107.
77. Furter L. E-waste has dawned. Resource; 2004. p. 8–11. May.
78. Milojkovic J, Litovski V. Concepts of computer take-back for sustainable end-of-life FACTA UNIVERSITATIS. Working and Living Environ Prot 2005;2(5):363–72.
79. Cooper T. Slow consumption, Reflections on product life spans and the “throwaway society”. J Ind Ecol 2005;9(1-2):51–67.
80. Mayers K, France C. Meeting the producer responsibility challenge. Green Manag Int 1999;25:51–66.
81. Williams E. International activities on E-waste and guidelines for future work. Proceedings of the third workshop on materials cycles and waste management in Asia, National Institute of Environ- mental Sciences, Tsukuba Japan; 2005.
82. International Data Corporation, IDC.
83. http://www.gsmarena.com/
84. Στράτης Ι. Α., Ζαχαριάδης Γ. Α., Θεμελής Δ. Γ., Ανθεμίδης Α. Ν., Οικονόμου Α. Σ., Ενόργανη Χημική Ανάλυση ΙΙ, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2004, Κεφ. 3.

85. California Code of Regulations, Title 22, Chapter 11, Article 3.
86. Department of Toxic Substances Control. Determination of regulated elements in seven typew of discarded consumer electronic products. Hazardous Material Laboratory. California, January 2004.
87. Townsend T.G., Jang Y-C, Ko H.C., Pearson B., Spalvins E., Wadanambi L., Assesment of true impacts of e-waste disposal in Florida (annual report). State University system of Florida. Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management. Report #04-0232008, 2003.
88. Yamane H.L., Moraes V.T., Espinosa D.C.R., Tenorio J.A.S., 2011. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. Waste Management 31, 2553-2558.
89. Nnorom I.C., Osibanjo O. (2011). Determination of metals in printed wiring boards of waste mobile phones. Toxicological and Environmental Chemistry Vol. 93 N. 8 p. 1557-1571.
90. Lin K.L., Chang W.K., Chang T.C., Lee C.H., Lin C.H., 2009. Recycling thin film transistor liquid crystal diplay (TFT-LCD) waste glass produced as glass-ceramics. Journal of Cleaner Production 16, 1499-1503.
91. Lin K.L., 2007. Use of thin film transistorliquid crystal display (TFT-LCD) waste glass in the production of ceramic tiles. Journal of Hazardous Materials 148, 91-97.
92. EDXRF for RoHS/WEEE Compliance Testing of Plastics, Amteck inc.