



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΟΙΚΙΑΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΛΟΓΙΑΣ
ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Περιβαλλοντική και οικονομική αποτίμηση της ανακύκλωσης αποβλήτων
ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (WEEE) και έμφαση στις σπάνιες
γαίες

Ποτουρίδης Αντώνιος



Αθήνα, 2017



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΟΙΚΙΑΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΛΟΓΙΑΣ

ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Αμπελιώτης Κωνσταντίνος (Επιβλέπων)

Αναπληρωτής Καθηγητής, Οικιακής Οικονομίας και Οικολογίας, Χαροκόπειο

Λαζαρίδη Κάτια

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Γεωγραφίας, Χαροκόπειο

Δέτσης Βασίλειος

Επίκουρος Καθηγητής, Οικιακής Οικονομίας και Οικολογίας, Χαροκόπειο

Ο Ποτουρίδης Αντώνιος

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

- 1)** Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2)** Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου, κ Κωνσταντίνο Αμπελιώτη, Αναπληρωτή Καθηγητή, του τμήματος Οικιακής Οικονομίας και Οικολογίας, του Χαροκόπειου Πανεπιστημίου, για την πολύτιμη βοήθεια και κατανόηση που έδειξε καθόλη τη διάρκεια της συγγραφής της εργασίας μου. Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά την κ Χαρά Χατζηζήση και την εταιρία Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε. για την ευγένεια με την οποία με αντιμετώπισαν και βεβαίως τα πολύτιμα στοιχεία που μου παρέδωσαν για την υπάρχουσα κατάσταση της ανακύκλωσης WEEE στην Ελλάδα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη στα Ελληνικά.....	σ.7
Περίληψη στα Αγγλικά.....	σ.8
Κατάλογος Εικόνων.....	σ.9
Κατάλογος Πινάκων.....	σ.10
Κατάλογος Σχημάτων.....	σ.12
Συντομογραφίες.....	σ.16
Εισαγωγή.....	σ.17
Κεφ. 1. Ανακύκλωση WEEE.....	σ.18
1.1 Νομικό πλαίσιο.....	σ.19
1.2 Υπάρχουσα κατάσταση.....	σ.20
1.3 Πολιτικές και κίνητρα για ανακύκλωση.....	σ.23
Κεφ. 2. ΑΚΖ ανακύκλωσης WEEE.....	σ.25
2.1 Κατηγορίες WEEE.....	σ.26
2.1.1 Χαρακτηριστικά ανεξάρτητων WEEE.....	σ.27
2.1.1.1 PCBs.....	σ.27
2.1.1.2 PWBs.....	σ.28
2.1.1.3 Εξοπλισμός Πληροφορικής.....	σ.28
2.1.1.4 Τηλεοράσεις.....	σ.29
2.1.1.5 Κινητά τηλέφωνα.....	σ.29
2.1.1.6 Ψυγεία.....	σ.30
2.1.1.7 Μπαταρίες.....	σ.30
2.1.1.8 Πλυντήρια πιάτων.....	σ.31
2.1.1.9 Εκτυπωτές.....	σ.31
2.1.1.10 Λαμπτήρες.....	σ.31
2.2 Στάδια.....	σ.32
2.2.1 Συλλογή, Μεταφορά, Διαλογή.....	σ.33
2.2.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία.....	σ.35
2.2.3 Τελική επεξεργασία.....	σ.41
2.2.3.1 Κύριες μέθοδοι τελικής επεξεργασίας.....	σ.43
Κεφ. 3. Περιβαλλοντική και οικονομική αποτίμηση.....	σ.44
3.1 Περιβαλλοντική ανασκόπηση βιβλιογραφίας για περιπτώσεις περιοχών ή χωρών.....	σ.44
3.2 Περιβαλλοντική ανασκόπηση βιβλιογραφίας για συγκεκριμένα WEEE.....	σ.59
3.3 Ιδιαίτερες περιπτώσεις.....	σ.67
3.4 Περιβαλλοντική ανασκόπηση βιβλιογραφίας με βάση οικονομικά στοιχεία.....	σ.75
Κεφ. 4. REE.....	σ.82

4.1 Περιγραφή κάθε REE ξεχωριστά.....	σ.95
4.1.1 Λανθάνιο.....	σ.95
4.1.2 Δημήτριο.....	σ.97
4.1.3 Πρασεοδύμιο.....	σ.99
4.1.4 Νεοδύμιο.....	σ.100
4.1.5 Σαμάριο.....	σ.102
4.1.6 Ευρώπιο.....	σ.104
4.1.7 Γαδολίνιο.....	σ.105
4.1.8 Τέρβιο.....	σ.107
4.1.9 Δυσπρόσιο.....	σ.109
4.1.10 Έρβιο.....	σ.110
4.1.11 Ύτριο.....	σ.112
4.1.12 Όλμιο, Θούλιο, Υτέρβιο, Λουτήτιο.....	σ.113
4.2 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας.....	σ.115
Κεφ. 5. Αναφορά δύο συστημάτων ανακύκλωσης και εξέταση μιας ειδικής περίπτωσης.....	σ.130
5.1 Σύστημα ανακύκλωσης Γερμανίας.....	σ.130
5.2 Σύστημα ανακύκλωσης Ελλάδας.....	σ.138
5.3 Περίπτωση PCBs στην Ελλάδα για το 2016.....	σ.141
5.3.1 Θεωρία κόστους/οφέλους.....	σ.147
Κεφ. 6. Συμπεράσματα.....	σ.149
Βιβλιογραφία.....	σ.151

Περίληψη στα Ελληνικά

Σκοπός της διπλωματικής αυτής είναι η μελέτη της ανακύκλωσης αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Αρχικά τονίστηκε η σπουδαιότητα της διαδικασίας, αναφέρθηκε η υπάρχουσα κατάσταση και επισημάνθηκε το νομοθετικό πλαίσιο. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε η ταξινόμηση των αποβλήτων σε κατηγορίες και μετά προσδιορίστηκαν και αναλύθηκαν τα στάδια της διαδικασίας. Έπειτα παρουσιάστηκαν μελέτες από την υπάρχουσα βιβλιογραφία για τις περιβαλλοντικές κυρίως αλλά οικονομικές συνθήκες της ανακύκλωσης αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού.

Ύστερα πραγματοποιήθηκε αναλυτική περιγραφή των σπάνιων γαιών ως ομάδα μετάλλων και στη συνέχεια παρουσιάστηκε το προφίλ κάθε σπάνιας γαίας ξεχωριστά. Ακολούθως παρουσιάστηκαν στοιχεία από τη βιβλιογραφία για τις σπάνιες γαίες. Για τους σκοπούς της εργασίας υπήρξε επίσκεψη στη Γερμανία και πιο συγκεκριμένα στην πόλη του Αμβούργου, του οποίου προβάλλεται το σύστημα ανακύκλωσης αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού και έπειτα αντιπαραβάλλεται με το αντίστοιχο σύστημα ανακύκλωσης της Ελλάδας.

Με βάση δεδομένα που προσφέρθηκαν από την Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε. και στοιχεία από τη βιβλιογραφία, μοντελοποιήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης πλακετών τυπωμένου κυκλώματος στην Ελλάδα για το έτος 2016 με χρήση του λογισμικού SimaPro. Θεωρήθηκε ότι διαθέτεται η κατάλληλη τεχνολογία ώστε να είναι εφικτή η ανάκτηση του 99% του περιεχομένου σε μέταλλα των πλακετών τυπωμένου κυκλώματος. Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις, συγκεκριμένα τα περιβαλλοντικά οφέλη από την αποφυγή κατασκευής τυπωμένων πλακετών και τα αντίστοιχα περιβαλλοντικά οφέλη από την αποφυγή της εξόρυξης των ποσοτήτων των μετάλλων που ανακτήθηκαν.

Ωστόσο λόγω της παλαιότητας της έκδοσης του λογισμικού, που είχε ως αποτέλεσμα να μην μπορούν να συμπεριληφθούν όλα τα δεδομένα, τα αποτελέσματα δε θεωρήθηκαν αρκετά αξιόπιστα. Κλείνοντας με βάση τις ποσότητες των ανακτώμενων μετάλλων και τις τιμές τους στην αγορά, υπολογίστηκαν τα μέγιστα πιθανά έσοδα από την ανακύκλωση των πλακετών τυπωμένου κυκλώματος στην Ελλάδα το 2016.

Λέξεις κλειδιά: [ανακύκλωση, ανάκτηση, ηλεκτρονικός εξοπλισμός, σπάνιες γαίες, AKZ]

Abstract ή Περίληψη στα Αγγλικά

The main purpose of this research is to investigate the Waste of Electric and Electronic Equipment (WEEE) recycling. Initially, it is pointed out three main issues, which are the WEEE importance, the recent situation and the legislative framework. The waste categories classification is presented and the stages of the process are also identified and analyzed. In addition, there are many references to other similar researches obtained by bibliography, analyzing both environmental and financial conditions of WEEE.

Moreover, it is presented an analytical description of Rare Earth Elements (REE) group of metals which is separately being explained for each Rare Earth Element supported by theoretical review. For research purposes, it was made a visit in Germany in order to select information about WEEE recycling system of Hamburg city which is compared to the relative Greek system.

According to data obtained by both Appliances Recycling S.A. and theoretical review, it was calculated environmental impacts of printed circuit boards recycling in Greece for year 2016, using the SimaPro software. Considering that the level of technology could make possible 99% recovery of metal contents of printed circuit boards, there were examined two study cases. The first case was referred to environmental benefits which are gained by avoiding printed circuit boards from manufacturing stage. Relatively, the second case was referred to environmental impacts which are gained by avoiding the stage of mining process of metal quantities that already had been recovered.

However, due to old SimaPro software version, the results were not considered to be sufficient because of model data exclusion. Finally, relying on retrieved metal quantities and their market prices, it is calculated the potential maximum economic profit of printed circuit boards recycling in Greece for the year 2016.

Keywords: [WEEE, REE, recycling, recovery, LCA]

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 : Πάγκοι ελέγχου WEEE στην αυλή ανακύκλωσης.....	σ.131
Εικόνα 2 : Κοντέινερ όπου στοιβάζονται τα WEEE και μεταφέρονται στο κέντρο επισκευής.....	σ.132
Εικόνα 3 : Κοντέινερ όπου στοιβάζονται τα WEEE και μεταφέρονται στο κέντρο επισκευής(2).....	σ.132
Εικόνα 4 : Εσωτερικός χώρος κέντρου επισκευής.....	σ.133
Εικόνα 5 : WEEE πριν το έλεγχο.....	σ.133
Εικόνα 6 : Ταξινόμηση σε κατηγορίες εξαρτημάτων.....	σ.134
Εικόνα 7 : Χώρος πώλησης επισκευασμένων WEEE.....	σ.134
Εικόνα 8 : Τροφοδοσία μονάδας επεξεργασίας.....	σ.136
Εικόνα 9 : Χώρος αποθήκευσης ξεχωριστών κλασμάτων.....	σ.136
Εικόνα 10 : Κλάσμα αλουμινίου.....	σ.137

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Ταξινόμηση ΕΕΕ σε κατηγορίες WEEE στην ΕΕ (Bigum et al., 2012).....	σ.27
Πίνακας 2 : Μέση σύσταση ενός αποβλήτου LCD και μοίρα διαφόρων κλασμάτων (Baxter et al., 2016).....	σ.29
Πίνακας 3 : Μέση σύσταση ενός αποβλήτου κινητού τηλεφώνου και μοίρα διαφόρων κλασμάτων (Baxter et al., 2016).....	σ.30
Πίνακας 4 : Μέση σύσταση ενός αποβλήτου ψύξης και μοίρα διαφόρων κλασμάτων (Baxter et al., 2016).....	σ.30
Πίνακας 5 : Το περιεχόμενο σε μέταλλα των WEEE υψηλής ποιότητας και τα ποσοστά ανακτησί- σ τους (Bigum et al., 2012).....	σ.36
Πίνακας 6 : Ποσότητα και σύσταση των ανακτώμενων υλικών από την αποσυναρμολόγηση WEEE (Menikpura et al., 2014).....	σ.37
Πίνακας 7 : Ποσότητες αποτελεσματικής ανακύκλωσης για 1000kg σταθερών και φορητών υπολογιστών, και ο δείκτης ανακύκλωσης μάζας υλικού (MWR) (Van Eygen et al., 2015).....	σ.39
Πίνακας 8 : Αναλογίες υποκατάστασης των δευτερογενών υλικών στα πρωτογενή (Biganzoli et al., 2015).....	σ.41
Πίνακας 9 : Ποσότητες εξοικονόμησης πρωτογενών υλικών και ενέργειας από την επεξεργασία 1 τόνου R1, R2, CRTς, FPDς, R4 και R5 (Biganzoli et al., 2015).....	σ.41
Πίνακας 10 : Συνολική επίδραση στο GWP της αλυσίδας αξίας της επεξεργασίας, ανά συσκευή (Baxter et al., 2016).....	σ.47
Πίνακας 11 : Εκπομπές GHG από την τήξη/ανακύκλωση των αποσυναρμολογημένων μετάλλων/υλικών από ένα πλυντήριο (Menikpura et al., 2014).....	σ.49
Πίνακας 12 : Αποφευχθέντες εκπομπές GHG σε σύγκριση με την πρωτογενή παραγωγή με αναφορά τα ανακτώμενα υλικά από ένα πλυντήριο (Menikpura et al., 2014).....	σ.50
Πίνακας 13 : Δείκτες επιπτώσεων για την ανακύκλωση 1 τόνου από R1,R2,R3,R4 και R5 (Biganzoli et al., 2015).....	σ.51
Πίνακας 14 : Περιβαλλοντική απόδοση του συνολικού συστήματος διαχείρισης WEEE στη Λομβαρδία το έτος 2011 και ποσοστιαία συνεισφορά κάθε κατηγορίας WEEE στα συνολικά αποτελέσματα (Biganzoli et al., 2015).....	σ.52
Πίνακας 15 : Ποσότητες WEEE ανά κατηγορία που ανακυκλώθηκαν από το Δεκέμβριο του 2010 μέχρι τον Ιανουάριο του 2011 στην Κίνα (Song et al., 2013).....	σ.53
Πίνακας 16 : Κύριες συνεισφορές στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαδικασίας διαχείρισης των WEEE (mPt) (Song et al., 2013).....	σ.53
Πίνακας 17 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις εκφρασμένες με τη μέθοδο CML (Song et al., 2013).....	σ.54
Πίνακας 18 : Τα κλάσματα που προκύπτουν από την ανάλυση ροής υλικών των δύο Ελβετικών συστημάτων συλλογής και ανακύκλωσης για το έτος 2004 (Hischier et al., 2005).....	σ.55
Πίνακας 19 : Περιβαλλοντική αξιολόγηση πρώτης προτεινόμενης διαδικασίας(Fogarasi et al., 2013).σ.63	
Πίνακας 20 : Περιβαλλοντική αξιολόγηση δεύτερης προτεινόμενης διαδικασίας (Fogarasi et al., 2013).....	σ.64
Πίνακας 21 : Επιπτώσεις από την παραγωγή του μαγνητικού και ηλεκτρονικού σκυροστρώματος (Syafa Bakri et al., 2008).....	σ.66
Πίνακας 22 : Επιπτώσεις από τη χρήση του μαγνητικού και ηλεκτρονικού σκυροστρώματος (Syafa Bakri et al., 2008)	σ.66
Πίνακας 23 : Εκπομπές από τη διαχείριση 100 τόνων υπολειμμάτων WEEE (Rocchetti et al., 2013)....	σ.69
Πίνακας 24 : Εκπομπές CO ₂ από τη διαδικασία HydroWEEE και την πρωτογενή παραγωγή (Rocchetti et al., 2013).....	σ.71
Πίνακας 25 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης μετάλλων από τις σκωρίες του MSWI (Boesch et al., 2014).....	σ.72
Πίνακας 26 : Αποτελεσματικότητες εξαγωγής μετάλλων από σκωρίες και ιπτάμενη τέφρα (Boesch et al., 2014).....	σ.73

Πίνακας 27 : Συνεισφορά στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αποτέφρωσης αστικών στερεών αποβλήτων και οι επιπτώσεις που αποφεύγονται από την ανάκτηση ενέργειας και μετάλλων (Boesch et al., 2014).....	σ.74
Πίνακας 28 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης μετάλλων από σκωρίες MSWI (Boesch et al., 2014).....	σ.74
Πίνακας 29 : Παράγοντες κανονικοποίησης EASEWASTE για τις κατηγορίες επιπτώσεων σε EDIP97 (Bigum et al., 2012).....	σ.77
Πίνακας 30 : Κατανομή των επιβαρύνσεων ανά στάδιο διαχείρισης και οικονομική κατανομή με βάση τις τιμές (τιμές Ιανουαρίου 2009) (Bigum et al., 2012).....	σ.78
Πίνακας 31 : Περιβαλλοντική αξιολόγηση της ανάκτησης αλουμινίου, χαλκού, χρυσού, σιδήρου, νικελίου, παλλαδίου και ασημιού για κάθε τόνο υψηλής ποιότητας WEEE (Bigum et al., 2012).....	σ.79
Πίνακας 32 : Σενάρια διαχείρισης αποβλήτων και ανακύκλωσης υπό μελέτη (Mayers et al., 2005)....	σ.80
Πίνακας 33 : Κατηγοριοποίηση των REE στη μελέτη κρίσιμων υλικών της ΕΕ (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.82
Πίνακας 34 : Μέση κατανομή των ανεξάρτητων REE στα 51 κοιτάσματα (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.83
Πίνακας 35 : Παγκόσμια αποθέματα REE (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.84
Πίνακας 36 : Εκτιμώμενη παγκόσμια παραγωγή οξειδίων REE σε τόνους, 2012, $\pm 15\%$ (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.85
Πίνακας 37 : Παγκόσμια χρήση ανεξάρτητων REE, σε τόνους οξειδίων REE, 2012, $\pm 15\%$ (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.92
Πίνακας 38 : Χρήση των REE ανά εφαρμογή (%) από Curtis, 2010, (Binnemans et al., 2013).....	σ.117
Πίνακας 39: Διαθέσιμα τωρινά και μελλοντικά ρεύματα, που περιέχουν REE, για ανακύκλωση (Binnemans et al., 2013).....	σ.118
Πίνακας 40 : Δυναμικό ανακύκλωσης για REE από μαγνήτες, μπαταρίες NiMY και φωσφορίζουσες ουσίες (Binnemans et al., 2013).....	σ.119
Πίνακας 41 : Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου ζωής για 1 kg του REO (Sprecher et al., 2014).....	σ.122
Πίνακας 42 : Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου ζωής για την παραγωγή μαγνήτη NdFeB (Sprecher et al., 2014).....	σ.122
Πίνακας 43 : Επισκόπηση όλων των καθοριστικών στοιχείων στους NdFeB μαγνήτες (Ueberschaar and Rotter, 2015).....	σ.125
Πίνακας 44 : Χημική σύνθεση των εφαρμοσμένων μετάλλων σε πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων από σκληρούς δίσκους (Ueberschaar and Rotter, 2015).....	σ.125
Πίνακας 45 : Περιεχόμενο και συγκέντρωση του Nd, Dy και Pr σε σταθερούς και φορητούς υπολογιστές (Ueberschaar and Rotter, 2015).....	σ.126
Πίνακας 46 : Επωνυμία-Δραστηριότητες-Περιοχή μονάδων επεξεργασίας (http://www.electrocycle.gr/).....	σ.139
Πίνακας 47 : Ανακτήσιμα κλάσματα για την Ελλάδα το 2016 (http://www.electrocycle.gr/).....	σ.141
Πίνακας 48 : Ποσότητες και τιμές για ανάκτηση 99% των μετάλλων από τις PCBs για την Ελλάδα το 2016.....	σ.142
Πίνακας 49 : Μέταλλα που μοντελοποιήθηκαν και μέταλλα που δεν υπήρχαν στο SimaPro.....	σ.143
Πίνακας 50 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής 1kg τυπωμένων πλακετών στην πρώτη περίπτωση.....	σ.144
Πίνακας 51 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής 1kg PCBs στη δεύτερη περίπτωση.....	σ.146
Πίνακας 52 : Συνέχεια 51.....	σ.147

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 : Οι ποσότητες ΕΕΕ που εισέρχονται στην αγορά καθώς και τα WEEE που συλλέγονται και διαχειρίζονται στην ΕΕ για το διάστημα 2007-2013 (http://ec.europa.eu/eurostat).....	σ.21
Σχήμα 2 : kg/κάτοικο WEEE που συλλέγονται σε κάθε χώρα της ΕΕ για τα έτη 2007 και 2013 (http://ec.europa.eu/eurostat).....	σ.21
Σχήμα 3 : Συνολικό ποσοστό συλλογής WEEE το 2013 ως συνάρτηση του μέσου βάρους ΕΕΕ που εισήλθαν στην αγορά το διάστημα 2010-2012, στην ΕΕ (σύμφωνα με την οδηγία WEEE 2012) (http://ec.europa.eu/eurostat).....	σ.22
Σχήμα 4 : Ποσότητες συλλογής και ποσότητες και ποσοστά ανακύκλωσης WEEE στην Ιαπωνία το διάστημα 2001-2011 (Menikpura et al., 2014).....	σ.22
Σχήμα 5 : Οικολογικό σήμα μιας λάμπας LED (Wäger and Hischier, 2015).....	σ.24
Σχήμα 6 : Σύνδεση ανακύκλωσης WEEE με τη βιομηχανία και την εξόρυξη (Reuter et al, 2015).....	σ.25
Σχήμα 7 : Σύσταση εκτυπωτών που συλλέχθηκαν (Mayers et al., 2005).....	σ.31
Σχήμα 8 : Στάδια ανακύκλωσης WEEE και σημαντικότερα χαρακτηριστικά.....	σ.32
Σχήμα 9 : Αναπαράσταση της αλυσίδας αξίας της επεξεργασίας WEEE (Baxter et al., 2016).....	σ.32
Σχήμα 10 : Στάδια ανακύκλωσης WEEE και όρια συστήματος (Van Eygen et al., 2015).....	σ.33
Σχήμα 11 : Αποτελέσματα CEENE ανάλυσης για τις επιπτώσεις κάθε σταδίου ανακύκλωσης σταθερών και φορητών υπολογιστών (Van Eygen et al., 2015).....	σ.33
Σχήμα 12 : Τα αποτελέσματα της AKZ για την μεταφορά WEEE ανά κατηγορία επιπτώσεων (Gamberini et al., 2010).....	σ.35
Σχήμα 13 : Τα αποτελέσματα της AKZ για την μεταφορά WEEE ανά υποομάδες κατηγοριών επιπτώσεων (Gamberini et al., 2010).....	σ.35
Σχήμα 14 : Ανακτώμενα υλικά από την πρωτοβάθμια επεξεργασία σε σταθερούς και φορητούς υπολογιστές (Van Eygen et al., 2015).....	σ.38
Σχήμα 15 : Διάγραμμα ροής της επεξεργασίας πλυντηρίων πιάτων χωρίς στάδιο πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (Johansson and Bjorklund, 2010).....	σ.40
Σχήμα 16 : Διάγραμμα ροής της επεξεργασίας πλυντηρίων πιάτων με στάδιο πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (Johansson and Bjorklund, 2010).....	σ.40
Σχήμα 17 : Τεχνολογίες τήξης για ηλεκτρονικά απόβλητα αλλά και άλλα υπολείμματα (Reuter et al, 2015).....	σ.42
Σχήμα 18 : Δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης για τα σενάρια επεξεργασίας αποβλήτων (Baxter et al., 2016).....	σ.45
Σχήμα 19 : GWP οφέλη και επιβαρύνσεις των διαφορετικών σταδίων για τα ψυγεία (Baxter et al., 2016).....	σ.45
Σχήμα 20 : GWP οφέλη και επιβαρύνσεις των διαφορετικών σταδίων για τις τηλεοράσεις LCD (Baxter et al., 2016).....	σ.46
Σχήμα 21 : GWP οφέλη και επιβαρύνσεις των διαφορετικών σταδίων για τα κινητά τηλέφωνα (Baxter et al., 2016).....	σ.47
Σχήμα 22 : Σύγκριση με την ανάλυση CEENE των σεναρίων ανακύκλωσης και υγειονομικής ταφής (Van Eygen et al., 2015).....	σ.48
Σχήμα 23 : Συνολικές εκπομπές GHG από την ανακύκλωση WEEE (Menikpura et al., 2014).....	σ.49
Σχήμα 24 : Συνεισφορά των διαφορετικών σταδίων στις συνολικές εκπομπές GHG (Menikpura et al., 2014).....	σ.49
Σχήμα 25 : Εκπομπές GHG από την ανακύκλωση WEEE, την πρωτογενή παραγωγή και οι καθαρές εκπομπές GHG (Menikpura et al., 2014).....	σ.50
Σχήμα 26 : Περιβαλλοντικές επιδράσεις της διαχείρισης των WEEE (Song et al., 2013).....	σ.53
Σχήμα 27 : Σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων εκφρασμένων από διαφορετικές μεθόδους (Song et al., 2013).....	σ.54
Σχήμα 28 : Σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του ολοκληρωμένου συστήματος συλλογής και ανακύκλωσης (Hischier et al., 2005).....	σ.56

Σχήμα 29 : Σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της περαιτέρω διαχείρισης του μεταλλικού κλάσματος (Hischier et al., 2005).....	σ.57
Σχήμα 30 : Σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις για κιλό διαχειριζόμενου κλάσματος των διαφόρων δευτερογενών επιλογών παραγωγής (Hischier et al., 2005).....	σ.57
Σχήμα 31 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος ανακύκλωσης WEEE, σε σύγκριση με περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αποφεύγονται από την καύση των WEEE και την πρωτογενή παραγωγή υλικών (Hischier et al., 2005).....	σ.58
Σχήμα 32 : Δυναμικά τοξικότητας της δευτερογενούς παραγωγής, σε σύγκριση με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την καύση των WEEE και την πρωτογενή παραγωγή υλικών (Hischier et al., 2005)....	σ.59
Σχήμα 33: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις μιας τηλεόρασης FED 36 ιντσών σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής της (Hischier, 2014).....	σ.60
Σχήμα 34 : Επιπτώσεις για 1 ώρα παρακολούθησης τηλεόρασης από διαφορετικές τεχνολογίες τηλεόρασης. Η κύρια εικόνα βάση του μείγματος ηλεκτρικής ενέργειας της Ελβετίας και η μικρή εικόνα βάση του μείγματος ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρώπης (Hischier, 2014).....	σ.61
Σχήμα 35 : Σχετική επίπτωση των διαφόρων τεχνολογιών τηλεόρασης για 4 διαφορετικούς παράγοντες και συσχέτιση με τα αποτελέσματα της έρευνας των Bauer et al. (2008) (Hischier, 2014).....	σ.61
Σχήμα 36 : Σύγκριση των κατηγοριών επιπτώσεων (Rubin et al., 2014).....	σ.62
Σχήμα 37 : Κατανάλωση ανανεώσιμων πόρων και ενέργειας (Rubin et al., 2014).....	σ.62
Σχήμα 38 : Κατανάλωση μη ανανεώσιμων πόρων (Rubin et al., 2014).....	σ.63
Σχήμα 39 : Εξάντληση αβιοτικών πόρων της επεξεργασίας ενός πλυντηρίου πιάτων στις περιπτώσεις 1 και 2 (Ravi, 2012).....	σ.65
Σχήμα 40 : Δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης της επεξεργασίας ενός πλυντηρίου πιάτων στις περιπτώσεις 1 και 2 (Ravi, 2012).....	σ.65
Σχήμα 41 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις σχετιζόμενες με τις δύο επιλογές διαχείρισης για 1 τόνο πλούσιων σε πλαστικό υπολειμμάτων (Wäger and Hischier, 2015).....	σ.68
Σχήμα 42 : Αποτελέσματα μετά από κανονικοποίηση, για παράγοντες επιπτώσεων σε σχέση με τα στάδια έκπλυσης, ανάκτησης υτρίου και επεξεργασίας λυμάτων (Rocchetti et al., 2013).....	σ.70
Σχήμα 43 : Διάγραμμα διαδικασιών και ροές μάζας από τις επιλογές διαχείρισης υπτάμενης τέφρας (Boesch et al., 2014).....	σ.73
Σχήμα 44 : Αποτελέσματα για το GWP, κανονικοποιημένα για τις επιπτώσεις του χαλκού, με βάση τη μάζα αλλά και τις τιμές του 2000, του 2010 και τη μέση τιμή (Stamp et al., 2013).....	σ.76
Σχήμα 45 : Συνολική σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σχέση με το σενάριο 100% υγειονομικής ταφής (Mayers et al., 2005).....	σ.80
Σχήμα 46 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά κόστος (Mayers et al., 2005).....	σ.81
Σχήμα 47 : Συναλλαγές REE της ΕΕ σε τόνους (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)...	σ.87
Σχήμα 48 : Οι κύριοι συναλλασσόμενοι για REE με την ΕΕ, 2012 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.87
Σχήμα 49 : Εκτιμώμενη ζήτηση για REE ανά γεωγραφική περιοχή, 2010 (%) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.88
Σχήμα 50 : Ιστορικές τιμές REE, αξία μονάδας (98 US\$/t) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.89
Σχήμα 51 : Χρήση REE ανά εφαρμογή, 2012 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.90
Σχήμα 52 : Προβλέψεις μέχρι το 2020 της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης REE (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.93
Σχήμα 53 : Προβλέψεις μέχρι το 2020 της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης ελαφρών REE (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.93
Σχήμα 54 : Προβλέψεις μέχρι το 2020 της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης βαρέων REE (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.94
Σχήμα 55 : Προσφορά λανθάνιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.96
Σχήμα 56 : Τελική χρήση λανθάνιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.96

Σχήμα 57 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης λανθάνιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.97
Σχήμα 58 : Προσφορά δημήτριου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.97
Σχήμα 59 : Τελική χρήση δημήτριου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.98
Σχήμα 60 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης δημήτριου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.98
Σχήμα 61 : Προσφορά πρασεοδύμιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.99
Σχήμα 62 : Τελική χρήση πρασεοδύμιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.99
Σχήμα 63 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης πρασεοδύμιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.100
Σχήμα 64 : Προσφορά νεοδύμιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.101
Σχήμα 65 : Τελική χρήση νεοδύμιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.101
Σχήμα 66 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης νεοδύμιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.102
Σχήμα 67 : Προσφορά σαμάρου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.102
Σχήμα 68 : Τελική χρήση σαμάρου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.103
Σχήμα 69 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης σαμάρου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.103
Σχήμα 70 : Προσφορά ευρώπιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.104
Σχήμα 71 : Τελική χρήση ευρώπιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.105
Σχήμα 72 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης ευρώπιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.105
Σχήμα 73 : Προσφορά γαδολίνιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.106
Σχήμα 74 : Τελική χρήση γαδολίνιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.106
Σχήμα 75 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης γαδολίνιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.107
Σχήμα 76 : Προσφορά τέρβιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.107
Σχήμα 77 : Τελική χρήση τέρβιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.108
Σχήμα 78 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης τέρβιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.108
Σχήμα 79 : Προσφορά δυσπρόσιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.109
Σχήμα 80 : Τελική χρήση δυσπρόσιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.109
Σχήμα 81 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης δυσπρόσιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.110
Σχήμα 82 : Προσφορά έρβιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.110
Σχήμα 83 : Τελική χρήση έρβιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.111
Σχήμα 84 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης έρβιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.111
Σχήμα 85 : Προσφορά ύττριου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.112
Σχήμα 86 : Τελική χρήση ύττριου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.112
Σχήμα 87 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης ύττριου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.113

Σχήμα 88 : Προσφορά όλμιου, θούλιου, υπτέρβιου και λουτήτιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.113
Σχήμα 89 : Τελική χρήση όλμιου, θούλιου, υπτέρβιου και λουτήτιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.114
Σχήμα 90 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης όλμιου, θούλιου, υπτέρβιου και λουτήτιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU).....	σ.115
Σχήμα 91: Κρισιμότητα σύμφωνα με DOE για το διάστημα 2015-2025, το οποίο δείχνει τις πέντε πιο κρίσιμες σπάνιες γαίες (Y, Nd, Eu, Tb, Dy) (Binnemans et al., 2013).....	σ.118
Σχήμα 92 : Rees/Cu 1 kg περιβαλλοντικές επιπτώσεις βασισμένες σε προτεινόμενα ILCD για το πλαίσιο της Ε.Ε. : (1) Οξύνιση (Μόρια του N ή S-ισοδύναμα), (2) Εξάντληση πόρων CML2002, βασισμένη στα αποθέματα (kg CO ₂ ισοδύναμα), (3) Φαινόμενο του θερμοκηπίου (IPCC), συμπεριλαμβανομένου βιογενή άνθρακα (kg CO ₂ ισοδύναμα), (4) σωματίδια / αναπνευστικές ανόργανες ουσίες (kg PM _{2,5} ισοδύναμα), (5) ιονίζουσα ακτινοβολία (kg U235 ισοδύναμα), (6) θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N-ισοδύναμα), (7) σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών (kg NMVOC), (8) επίγειος ευτροφισμός (μόρια N ή S-ισοδύναμα), (9) Κατανάλωση φρέσκου νερού (kg), (10) εξάντληση του αέριου όζοντος (kg CFC 111- ισοδύναμα), (11) USEtox, τοξικότητα στον άνθρωπο, καρκίνος (CTUh), (12) USEtox, τοξικότητα στον άνθρωπο,μη-καρκινικά (CTUh) (Adibi et al., 2014).....	σ.121
Σχήμα 93 : Απώλειες νεοδύμιου ανάμεσα στην βασική παραγωγική αλυσίδα, σε kg (Sprecher et al., 2014).....	σ.123
Σχήμα 94 : Απώλειες νεοδύμιου ανάμεσα στη αλυσίδα τεμαχισμένης ανακύκλωσης, σε kg (Sprecher et al., 2014).....	σ.123
Σχήμα 95 : Θέση PCB (αριστερά) και μαγνητών (δεξιά) σε γραμμικό και σε ατράκτου κινητήρα (Ueberschaar and Rotter, 2015).....	σ.125
Σχήμα 96 : Υπολογισμένη ετήσια ποσότητα των REE που εισέρχονται στην αγορά των σταθερών υπολογιστών της Γερμανίας εν αντιθέσει με τα Notebooks για Nd, Pr και Dy από το 2004 μέχρι το 2013 (Ueberschaar and Rotter, 2015).....	σ.126
Σχήμα 97 : Σύγκριση των δύο επιλογών διαχείρισης αποβλήτων φωσφογύψου σε κατηγορίες επιπτώσεων (Kulczycka et al., 2015).....	σ.128
Σχήμα 98 : Ιστόγραμμα χαρακτηρισμού - σύγκριση μεταξύ των δυο επιλογών διαχείρισης αποβλήτων φωσφογύψου – ΕΙ'(99%) (Kulczycka et al., 2015).....	σ.128
Σχήμα 99 : Ιστόγραμμα στάθμισης - σύγκριση των δυο επιλογών διαχείρισης αποβλήτων φωσφογύψου σε 11 κατηγοριών επιπτώσεων (Pt) - ΕΙ'(99%) (Kulczycka et al., 2015).....	σ.129
Σχήμα 100 : Σύστημα ανακύκλωσης Αμβούργου, Γερμανία.....	σ.130
Σχήμα 101 : Μονάδα ανακύκλωσης με πρωτοβάθμια επεξεργασία (Batinić, 2017).....	σ.135
Σχήμα 102 : Γεωγραφική κατανομή μονάδων επεξεργασίας (http://www.electrocycle.gr/).....	σ.139
Σχήμα 103 : Σύστημα ανακύκλωσης Ελλάδας (http://www.electrocycle.gr/).....	σ.140
Σχήμα 104 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής 1kg τυπωμένων πλακετών στην πρώτη περίπτωση.....	σ.144
Σχήμα 105 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής 1kg PCBs στη δεύτερη περίπτωση.....	σ.145
Σχήμα 106 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής 1kg PCBs στη δεύτερη περίπτωση μετά από κανονικοποίηση.....	σ.146

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

EEE	Ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός
WEEE	Απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού
REE	Σπάνιες γαίες
EE	Ευρωπαϊκή Ένωση
EPR	Διευρυμένη ευθύνη του παραγωγού
AKZ	Ανάλυση κύκλου ζωής
PCB	Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος
PWB	Πλακέτα τυπωμένης καλωδίωσης
CRT	Σωλήνας καθοδικών ακτίνων
GWP	Δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης

Εισαγωγή

Τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (WEEE) αποτελούν ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα για τη σημερινή εποχή. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας σε συνδυασμό με τον υπερκαταναλωτισμό δίνει τη δυνατότητα στους καταναλωτές, να καλύπτουν τις ανάγκες του για οικιακό εξοπλισμό με ολοένα πιο καινούριες και πιο εξελιγμένες συσκευές, χωρίς αυτό να συνεπάγεται ότι ήταν απαραίτητη η αντικατάσταση των παλιότερών τους. Αυτή η τάση συντελεί σε έναν αυξανόμενο όγκο WEEE του οποίου η υγειονομική ταφή θα επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, καθώς σε αρκετά από τα WEEE περιέχονται τοξικές ουσίες.

Η λύση σε αυτό πρόβλημα είναι η ανακύκλωση των WEEE ή η επαναχρησιμοποίηση τους, που θα συντελέσει σε θετικές επιπτώσεις τόσο για το περιβάλλον όσο και για την οικονομία. Όσον αφορά το περιβάλλον τα οφέλη θα είναι πολλαπλά και αφορούν κυρίως τη μείωση του όγκου των WEEE προς υγειονομική ταφή, την απομάκρυνση των επικίνδυνων και τοξικών ουσιών και τις επιπτώσεις που θα αποφευχθούν λόγω της μειωμένης ανάγκης για εξόρυξη πρώτων υλών, χάρη στην ανάκτηση δευτερογενών υλικών από την ανακύκλωση. Σχετικά με την οικονομία οι θετικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης WEEE προκύπτουν από την ανάκτηση ενέργειας και δευτερογενών υλικών που θα διατεθούν στην αγορά. Σε επόμενο κεφάλαιο θα μελετηθούν διεξοδικά οι επιπτώσεις θετικές αλλά και αρνητικές της ανακύκλωσης WEEE.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι αρχικά να μελετηθεί η σπουδαιότερη βιβλιογραφία, να αναλυθεί η διαδικασία της ανακύκλωσης WEEE και να πραγματοποιηθεί περιβαλλοντική και οικονομική αποτίμηση της ανακύκλωσης WEEE. Στη συνέχεια θα γίνει ειδική αναφορά στις σπάνιες γαίες, όπου αφού περιγραφούν λεπτομερώς, θα εξεταστεί η σημασία κατεύθυνσης της ανακύκλωσης και ανάκτησης με γνώμονα αυτές. Τέλος θα παρουσιαστούν στοιχεία για την κατάσταση στην Ελλάδα και θα κατασκευαστεί μοντέλο με το λογισμικό SimaPro για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης WEEE στη χώρα μας.

1. Ανακύκλωση WEEE

Τα WEEE όπως ειπώθηκε στην εισαγωγή, αυξάνονται με αξιοσημείωτο ρυθμό. Σύμφωνα με τους Menikpura et al. (2014), τα WEEE έχουν ρυθμό αύξησης 3-5% κάθε χρόνο και πιθανώς αποτελούν τη μεγαλύτερη πρόκληση για τη βιωσιμότητα στις μέρες μας (Afroz et al., 2013). Παγκοσμίως, εκτιμάται ότι περίπου 30-50 εκ. τόνοι WEEE προκύπτουν κάθε χρόνο. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι, σύμφωνα με τους Song et al. (2013), η παρουσία στοιχείων όπως ο μόλυβδος, ο υδράργυρος, το αρσενικό, το κάδμιο, το σελήνιο, το εξασθενές χρώμιο και τα επιβραδυντικά φλόγας σε ποσότητες πάνω από τα όρια ταξινομεί τα WEEE στα επικίνδυνα απόβλητα (Leung et al., 2006 · Robinson, 2009).

Τα WEEE αποτελούνται από ένα πλήθος πρώτων υλών και μάλιστα σε πολύ διαφορετικές περιεκτικότητες. Οι κύριες πρώτες ύλες σε κατηγορίες είναι τα μέταλλα, το πλαστικό και το γυαλί. Τα μέταλλα αποτελούν την σπουδαιότερη καθώς σε αυτά περιλαμβάνονται τα σιδηρούχα, τα μη σιδηρούχα, καθώς και τα πολύτιμα μέταλλα και οι σπάνιες γαίες. Οι σπάνιες γαίες, των οποίων η εξόρυξη είναι τεχνικά δύσκολη, αποφέρουν σημαντικές επιπτώσεις τόσο στο περιβάλλον όσο και στην υγεία των εργατών (Baxter et al., 2016). Σε σχέση με τα ποσοστά με τα οποία περιέχονται στα WEEE, ο σίδηρος και το ατσάλι αποτελούν περίπου το 50% των WEEE, με το πλαστικό να ακολουθεί (21%), τα μη σιδηρούχα μέταλλα (13%) και άλλα συστατικά (Song et al., 2013). Τα μη σιδηρούχα μέταλλα αποτελούνται από μέταλλα όπως ο χαλκός, το αλουμίνιο και πολύτιμα μέταλλα, όπως ασήμι, χρυσός, πλατίνα, παλλάδιο και άλλα. Σύμφωνα με (Wäger and Hirsch, 2015) το μέσο μερίδιο μάζας των πλαστικών στα WEEE έχει εκτιμηθεί στο περίπου στο 21% κατά βάρος (Huisman et al., 2008 · Ongondo et al., 2011), με μεγάλες διακυμάνσεις ανάμεσα στις κατηγορίες, ειδικότερα, σύμφωνα με τους Wäger et al. (2010), το μερίδιο της μάζας των πλαστικών κυμαίνεται μεταξύ 3% στον εξοπλισμό φωτισμού και 73% σε παιχνίδια και σε εξοπλισμό ψυχαγωγίας και άθλησης. Οι μεγάλες οικιακές συσκευές έχουν μερίδιο περίπου 19%.

Υψηλής ποιότητας ανακύκλωση εξασφαλίζει ότι υλικά και ενέργεια ανακτώνται αποτελεσματικά από WEEE. Αυτή η ανάκτηση σημαίνει ότι η υπεύθυνη διαχείριση αποβλήτων απονέμει καθαρά περιβαλλοντικά οφέλη σε όρους δυναμικού θέρμανσης του πλανήτη (GWP) για όλους τους τύπους WEEE που αναλύθηκαν. Για τον εξοπλισμό ψύξης, το δυναμικό μείωσης του GWP με υψηλής ποιότητας ανακύκλωση είναι τόσο μεγάλο ώστε να είναι εθνικής σημασίας. Για όλους τους τύπους αποβλήτων, η σημασία του καθαρού οφέλους από την ανάκτηση υλικών και ενέργειας υπερβαίνει τις αρνητικές συνέπειες της ανεύθυνης διάθεσης

αποβλήτων. Ωστόσο οι συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης των WEEE μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε ένα μόνο θέμα. Για τα ψυγεία, η αποτυχία ανάκτησης μερικών μόνο γραμμαρίων ψυκτικού αναιρεί το συνολικό όφελος σε δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης από την ανάκτηση κιλών μετάλλων και πλαστικών. Οι επιπτώσεις που σχετίζονται με τα κινητά τηλέφωνα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην ανάκτηση μικροσκοπικών ποσοτήτων πολύτιμων μετάλλων (Baxter et al., 2016).

1.1 Νομικό πλαίσιο

Η αναγνώριση του προβλήματος και η ανάγκη αντιμετώπισής του οδήγησαν την ΕΕ να υιοθετήσει κάποιες οδηγίες. Σύμφωνα με τους Van Eygen et al. (2015), η οδηγία για WEEE το 2002 ώθησε στη βελτίωση της συλλογής και συνεπώς την αποδοτικότητα της ανακύκλωσης WEEE. Η οδηγία για τα WEEE αναμορφώθηκε το 2012. Σε αυτήν καθορίστηκαν στόχοι συλλογής, και με αρχή το 2016, δε θα ορίζεται ως μια καθορισμένη ποσότητα ανά κάτοικο (προσφάτως 4kg/κάτοικο), αλλά τουλάχιστον το 45% της μέσης ποσότητας των ΕΕΕ που εισέρχονται στην αγορά τα τρία προηγούμενα χρόνια. Από το 2019 και έπειτα, αυτό θα αυξηθεί τουλάχιστον μέχρι το 65% των ΕΕΕ, ή εναλλακτικά το 85% των παραγόμενων WEEE. Η οδηγία επίσης διαχωρίζει τα WEEE σε διαφορετικές κατηγορίες και καθορίζει στόχους ανακύκλωσης και ανάκτησης για κάθε κατηγορία των WEEE που συλλέγεται, με βάση τη μάζα (European Parliament and Council, 2012).

Υπάρχει επίσης η οδηγία του περιορισμού των επικίνδυνων ουσιών (RoHS), που ήρθε σε ισχύ την 1η Ιουλίου 2006, και έθεσε περιορισμό στη χρήση σε ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές των ουσιών : μόλυβδος, υδράργυρος, κάδμιο, εξασθενές χρώμιο και πολυβρωμιωμένα διφαινύλια (Ravi, 2012).

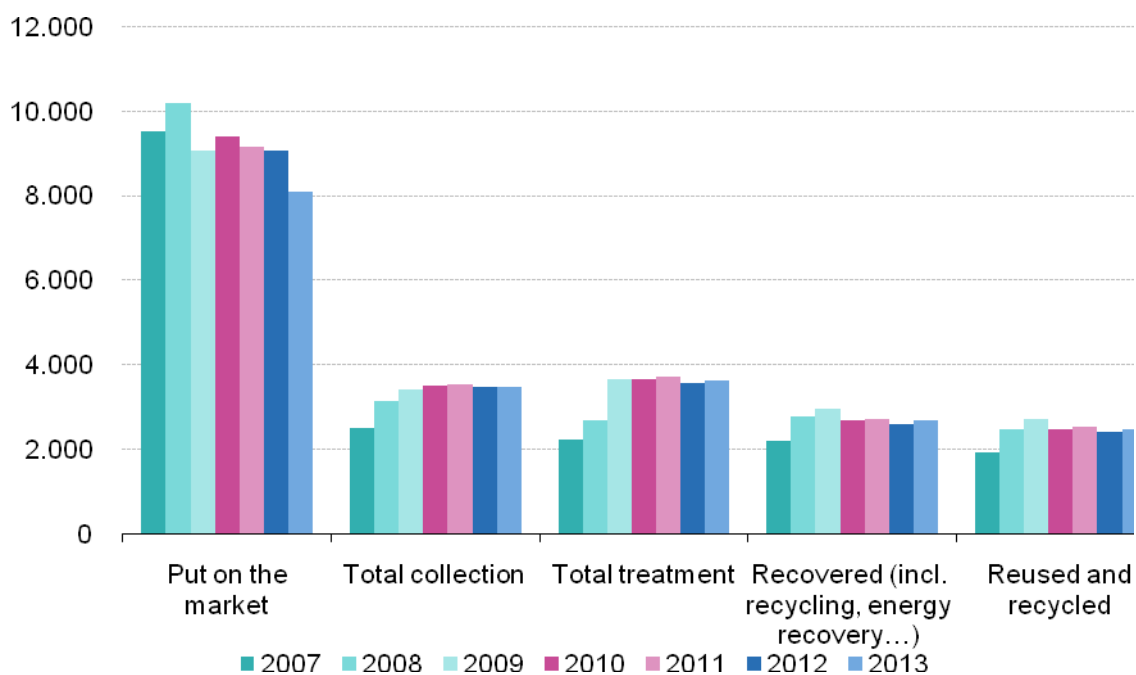
Αν ληφθεί υπόψη η σύσταση των WEEE, τότε συμπεραίνεται ότι τα πλαστικά διαδραματίζουν έναν αυξανόμενο σημαντικό ρόλο για την επίτευξη των ποσοστών ανάκτησης και ανακύκλωσης που προσδιορίζει η Ευρωπαϊκή Οδηγία για WEEE (Wäger and Hischer, 2015). Ωστόσο μπορεί να σχολιαστεί ότι η οδηγία με τους στόχους βάση της μάζας θα μπορούσε να προκαλέσει ανεπιθύμητες και απρόβλεπτες εξελίξεις, καθώς δεν προωθείται η ανάκτηση μετάλλων που βρίσκονται σε μικρές ποσότητες, παρά την περιβαλλοντική και οικονομική τους σημασία (Van Eygen et al., 2015), για αυτό προτείνεται η αντικατάσταση με κριτήρια ειδικότερης περιβαλλοντικής διαχείρισης (Mayers et al., 2005). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανακύκλωση των κινητών τηλεφώνων, η οποία είναι ευαίσθητη στην ανάκτηση

πολύτιμων μετάλλων. Συνεπώς, θα έπρεπε η ανακύκλωσή τους να καθοδηγείται από οικονομικούς παράγοντες, αλλά αυτοί είναι σαφώς ανεπαρκής επί του παρόντος, δεδομένου ότι τα ποσοστά ανακύκλωσης είναι πολύ χαμηλά. Η βελτίωση του ποσοστού ανακύκλωσης θα εξαρτηθεί από την υπεύθυνη στάση των καταναλωτών (Baxter et al., 2016).

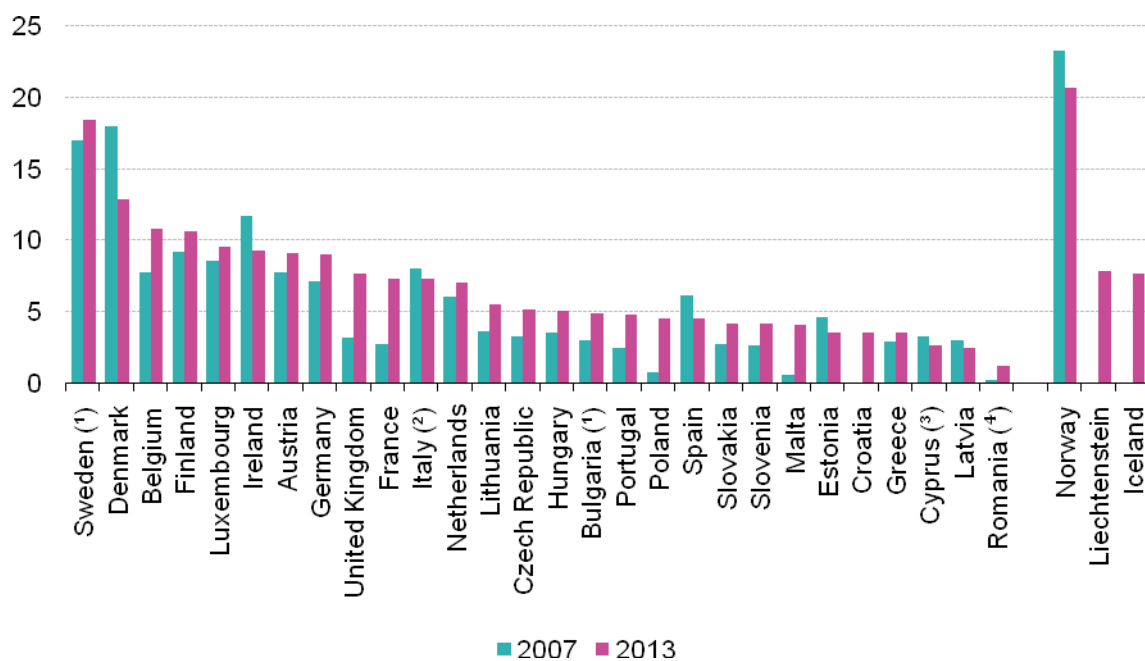
1.2 Υπάρχουσα κατάσταση

Ανακύκλωση WEEE πραγματοποιείται κυρίως στις ανεπτυγμένες χώρες, ωστόσο το επίπεδο της διαφέρει από χώρα σε χώρα, και θα μπορούσε να υποστηριχτεί ότι υπάρχουν προοπτικές βελτίωσής της. Σύμφωνα με την ιστοσελίδα (http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics_-_electrical_and_electronic_equipment), θα παρουσιαστούν στοιχεία για την ανακύκλωση WEEE στην ΕΕ. Στο σχήμα 1 φαίνονται οι ποσότητες WEEE που εισέρχονται στην αγορά της ΕΕ για το διάστημα 2007-2013, καθώς και οι ποσότητες που συλλέγονται και διαχειρίζονται, και με ποιον τρόπο. Συνεπώς, υπάρχουν μεγάλα περιθώρια βελτίωσης της ανακύκλωσης WEEE. Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι ποσότητες σε kg/κάτοικο που συλλέγονται σε κάθε χώρα της ΕΕ κατά τα έτη 2007 και 2013, και γίνεται εμφανής η τάση αύξησης της ποσότητας συλλογής, με λίγες εξαιρέσεις. Στο σχήμα 3, με βάση την οδηγία WEEE 2012, φαίνεται η κατάσταση σε κάθε χώρα της ΕΕ σε σχέση με τους στόχους που έχουν οριστεί. Συμπεραίνεται ότι οι περισσότερες χώρες θα πρέπει να καταβάλλουν προσπάθεια για να επιτύχουν τους στόχους που έχουν οριστεί.

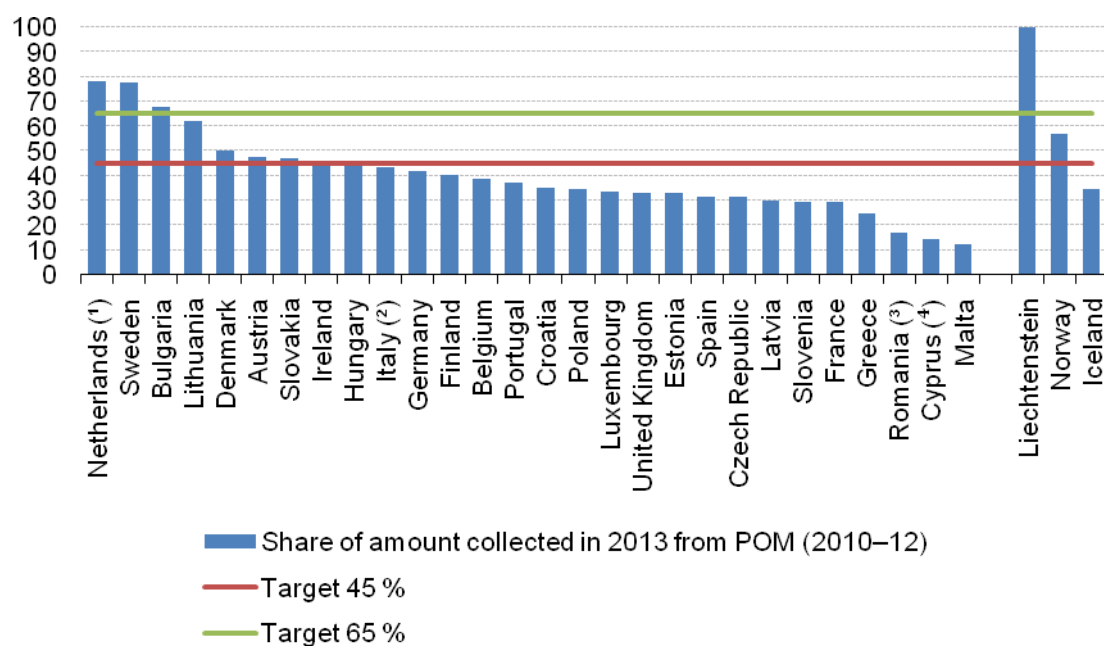
Στη βιβλιογραφία εντοπίστηκαν στοιχεία για κάποιες χώρες και στη συνέχεια ακολουθεί η παράθεσή τους. Σύμφωνα με τους Baxter et al. (2016), οι Σκανδιναβικές χώρες βρίσκονται στην πρώτη γραμμή των εξελίξεων, με υψηλά ποσοστά συλλογής και καλά αναπτυγμένα συστήματα διαχείρισης και επεξεργασίας των WEEE (Ylä-Mella et al., 2014). Στην Ελβετία η ανακύκλωση WEEE είναι ξεκάθαρα επωφελής ακόμη και μόνο σε σύγκριση με την πρωτογενή παραγωγή των υλικών, χωρίς να ληφθεί υπόψη η απόρριψη. Η Ευρωπαϊκή οδηγία για WEEE του 2002 είχε θέσει ως στόχο τα 4kg ανακυκλωμένων WEEE ανά κάτοικο, ωστόσο αυτή η ποσότητα δεν είναι επαρκής για βιώσιμη ανάπτυξη στον τομέα των WEEE. Αντίθετα θα ήταν προτιμότερη η στόχευση σε όσο το δυνατόν υψηλότερη ποσότητα. Στην Ελβετία κατάφεραν να ανακυκλώσουν 11kg ανά κάτοικο (Hischier et al., 2005). Στην Ιαπωνία, οι ποσότητες και τα ποσοστά ανακύκλωσης WEEE από το 2001 μέχρι και το 2011, παρουσιάζονται το σχήμα 4. Συγκεκριμένα, το 2011, στην Ιαπωνία τα ποσοστά ανακύκλωσης για κλιματιστικά, ψυγεία, πλυντήρια και τηλεοράσεις ήταν αντίστοιχα 89%, 87%, 87% και 87% (Menikpura et al., 2014).



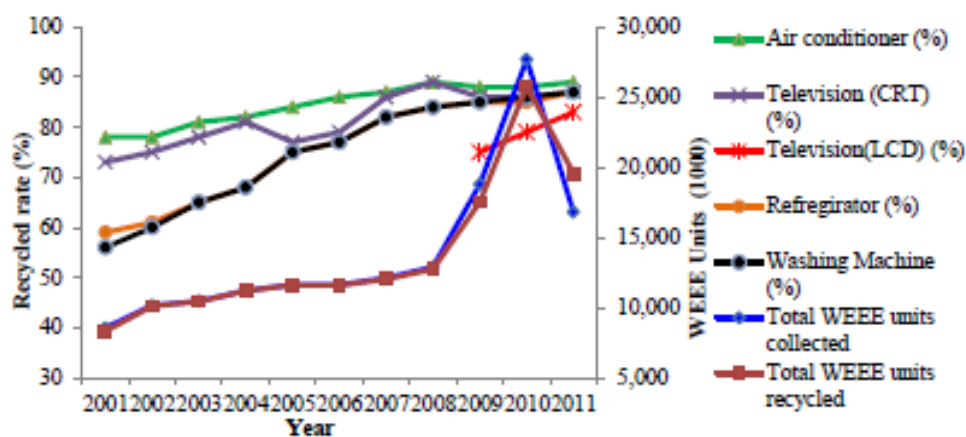
Σχήμα 1 : Οι ποσότητες ΕΕΕ που εισέρχονται στην αγορά καθώς και τα WEEE που συλλέγονται και διαχειρίζονται στην ΕΕ για το διάστημα 2007-2013 (<http://ec.europa.eu/eurostat>)



Σχήμα 2 : kg/κάτοικο WEEE που συλλέγονται σε κάθε χώρα της ΕΕ για τα έτη 2007 και 2013 (<http://ec.europa.eu/eurostat>)



Σχήμα 3 : Συνολικό ποσοστό συλλογής WEEE το 2013 ως συνάρτηση του μέσου βάρους ΕΕΕ που εισήλθαν στην αγορά το διάστημα 2010-2012, στην ΕΕ (σύμφωνα με την οδηγία WEEE 2012) (<http://ec.europa.eu/eurostat>)



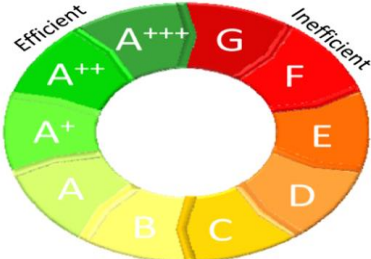
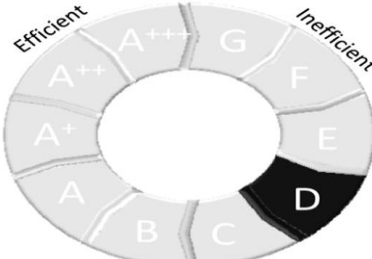
Σχήμα 4 : Ποσότητες συλλογής και ποσότητες και ποσοστά ανακύκλωσης WEEE στην Ιαπωνία το διάστημα 2001-2011 (Menikpura et al., 2014)

1.3 Πολιτικές και κίνητρα για ανακύκλωση

Στην ΕΕ στις περισσότερες χώρες, σύμφωνα με τους Van Eygen et al. (2015), η συλλογή και ανακύκλωση των WEEE σχεδόν αποκλειστικά καθοδηγείται από την έννοια της διευρυμένης ευθύνης του παραγωγού (EPR), η οποία απαιτεί ότι αυτοί που εισάγουν αντικείμενα στην αγορά είναι οι τελικοί υπεύθυνοι για την επεξεργασία τους μετά το τέλος χρήσης τους (Sander et al., 2007). Να επισημανθεί ότι, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1.1, η ισχύουσα νομοθεσία της ΕΕ, δηλαδή η αναθεωρημένη οδηγία WEEE (2012) και η οδηγία περιορισμού της χρήσης των επικίνδυνων ουσιών σε είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, είναι πλαισιωμένες με βάση την αποφυγή αρνητικών συνεπειών προς το περιβάλλον (Van Eygen et al., 2015). Η στόχευση αυτή είναι σημαντική, ωστόσο θα πρέπει επίσης να προωθούνται οι θετικές συνέπειες. Η αυξημένη έμφαση στα θετικά της υπεύθυνης συμπεριφοράς για την ανακύκλωση, θα μπορούσε θεωρητικά να επηρεάσει τις πρακτικές των ανακυκλωτών και των παραγωγών, οδηγώντας σε μια πιο ολοκληρωμένη εφαρμογή των αρχών της EPR (Van Eygen et al., 2015).

Σημαντικό ζήτημα είναι και η παράνομη ανακύκλωση των WEEE με μοναδικό σκοπό το οικονομικό όφελος. Σύμφωνα με τους Biganzoli et al. (2015), κάθε χρόνο στην Ιταλία περίπου 700.000 τόνοι WEEE διαχειρίζονται παράνομα (Ecodom, 2013). Ένα κλάσμα από αυτά τα απόβλητα επεξεργάζεται με μοναδικό σκοπό την ανάκτηση των πιο πολύτιμων συστατικών, όπως τα μέταλλα, χωρίς καμία προσοχή στις επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Άλλο κλάσμα εξάγεται στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου ακόμα χειρότερες και πιο επικίνδυνες πρακτικές επεξεργασίας πραγματοποιούνται, συντελώντας σε σημαντική περιβαλλοντική ρύπανση (Perez-Belis et al., 2015). Συνεπώς θα πρέπει να θεσπιστούν αυστηρότεροι έλεγχοι για τον περιορισμό ή αν είναι εφικτό, την εξάλειψη της παράνομης ανακύκλωσης WEEE.

Η ενημέρωση των καταναλωτών για τα οφέλη της ανακύκλωσης WEEE σε συνδυασμό με τη θέσπιση πολιτικών, ώστε να αναγράφονται στα προϊόντα οι δυνατότητες ανακύκλωσης και ανάκτησης, θα μπορούσε να αποτελέσει ένα ισχυρό κίνητρο επιλογής των πιο οικολογικών προϊόντων. Στο σχήμα 5 φαίνεται το οικολογικό σήμα για μια λάμπα LED, όπου αναγράφονται το ποσοστό ανακύκλωσης/ανάκτησης και οι τιμές των σημαντικότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Wäger and Hischer, 2015).

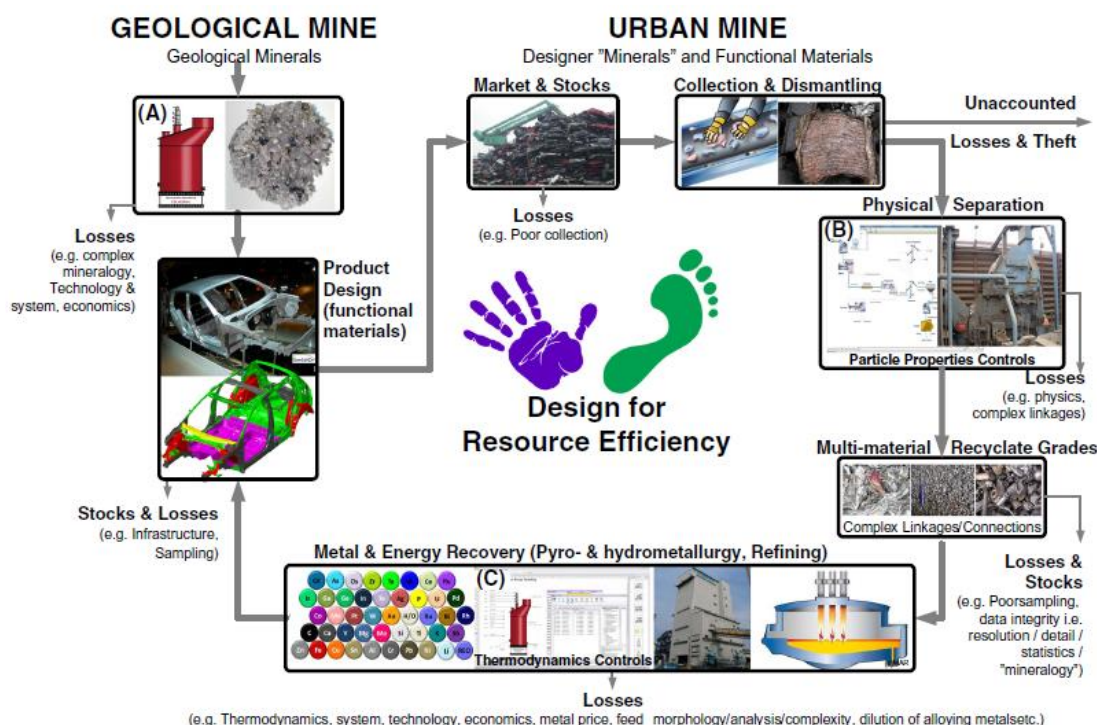
Recycling/Resources	LED lamp
Producer Model	ABC LED Design A
 © MARAS B.V.	 © MARAS B.V.
Recycling/recovery rate Total weight based recycling/recovery rate of all materials/elements/compounds in the product after physical sorting and final treatment processing	30-40 %
Environmental impact score of recycling – Recipe end-point indicator (type E - egalitarian weighting) – GWP (Global warming potential) – AP (Acidification potential) – EP (Eutrophication potential) – ODP (Ozone Layer Depletion Potential)	0.082 0.66 3.13 e-3 1.76 e-4 4.55 e-10

© MARAS B.V.

Σχήμα 5 : Οικολογικό σήμα μιας λάμπας LED (Wäger and Hischier, 2015)

2. AKZ ανακύκλωσης WEEE

Η ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ) είναι ένα εργαλείο που μας δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για ένα προϊόν, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα στάδια ζωής του. Η AKZ βρίσκει εφαρμογή και στην ανακύκλωση των WEEE, όπου τα στάδια είναι η συλλογή-μεταφορά-διαλογή, η πρωτοβάθμια επεξεργασία και η τελική επεξεργασία. Η σύνδεση της ανακύκλωσης WEEE με τη βιομηχανία και την εξόρυξη πρώτων υλών περιγράφεται ικανοποιητικά στο σχήμα 6. Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται η αληθινή έννοια της βιώσιμης μεταλλουργίας, καθώς ο κύκλος των μετάλλων κλείνει στους μεταλλουργικούς αντιδραστήρες (Reuter et al, 2015).



Σχήμα 6 : Σύνδεση ανακύκλωσης WEEE με τη βιομηχανία και την εξόρυξη (Reuter et al, 2015)

Κάποιες μελέτες AKZ που έχουν πραγματοποιηθεί περιλαμβάνουν συνολική εξέταση των αλυσίδων αξίας της ανακύκλωσης WEEE σε συγκεκριμένες χώρες ή περιοχές, όπως την Ιαπωνία (Menikpura et al., 2014), την Ελβετία (Hischier et al., 2005) και (Wäger et al., 2011) και την Λομβαρδία στην Ιταλία (Biganzoli et al., 2015). Άλλες εξετάζουν συγκεκριμένων ομάδων προϊόντων αναλυτικά, όπως ψυγεία (Xiao et al., 2015) και λαμπτήρες φθορισμού (Tan et al., 2015). Συμπεραίνεται ότι οι μελέτες AKZ διαφέρουν σημαντικά σε εύρος και πεδίο εφαρμογής, στο μέρος της αλυσίδας αξίας που μελετάται λεπτομερώς, στο φάσμα των περιβαλλοντικών δεικτών που λαμβάνονται υπόψη, στο επίπεδο λεπτομέρειας της περιγραφή της

επεξεργασίας, το επίπεδο των δεδομένων σε δεδομένα απογραφής, και ούτω καθεξής (Baxter et al., 2016).

2.1 Κατηγορίες διαχείρισης WEEE

Ο ηλεκτρικός και ηλεκτρονικός εξοπλισμός διαχωρίζεται σε δέκα κατηγορίες που είναι οι ακόλουθες, σύμφωνα με την ιστοσελίδα (http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics_-_electrical_and_electronic_equipment) , :

- 1) Μεγάλες οικιακές συσκευές
- 2) Μικρές οικιακές συσκευές
- 3) Εξοπλισμός πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών
- 4) Καταναλωτικός εξοπλισμός και φωτοβολταϊκά πάνελ
- 5) Εξοπλισμός φωτισμού
- 6) Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εργαλεία (με την εξαίρεση των μεγάλης κλίμακας σταθερών βιομηχανικών εργαλείων)
- 7) Παιχνίδια, εξοπλισμός ελεύθερου χρόνου και άθλησης
- 8) Ιατρικά μηχανήματα (με την εξαίρεση όλων των μεταμοσχευμένων και μολυσμένων προϊόντων)
- 9) Όργανα παρακολούθησης και ελέγχου
- 10) Αυτόματοι πωλητές

Ωστόσο, όσον αφορά τη διαχείριση των WEEE, οι παραπάνω δέκα κατηγορίες, συνήθως στην Ευρώπη, κατηγοριοποιούνται σε έξι κατηγορίες όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 1 . Υψηλής ποιότητας WEEE είναι τα πλούσια σε πολύτιμα μέταλλα κλάσματα και ανήκουν στις κατηγορίες 3 και 4 των EEE (Bigum et al., 2012). Να αναφερθεί ότι δεν είναι αποδεκτές αυτές οι κατηγορίες από όλες τις χώρες, Σύμφωνα με την Ιταλική νομοθεσία τα WEEE ταξινομούνται σε πέντε κατηγορίες (Biganzoli et al., 2015):

- Θερμαντικά σώματα και ψυγεία – R1,
- μεγάλες οικιακές συσκευές – R2,

- τηλεοράσεις και οθόνες – R3,
- μικρές οικιακές συσκευές – R4 και
- εξοπλισμός φωτισμού – R5

Πληροφοριακά, σύμφωνα με (Biganzoli et al., 2015), το 2011, κατά μέσο όρο 4.7kg WEEE ανά κάτοικο συλλέχθηκαν στην περιοχή της Λομβαρδίας που αντιστοιχεί σε ένα σύνολο 46.070 τόνων, εκ των οποίων : 21.4% R1, 21.1% R2, 36.5% R3, 20.4% R4 και 0.6% R5 (Centro di Coordinamento RAEE, 2011).

Treatment categories	Categories of EEE
Large equipment	1, 10
Cooling white goods	1
Small WEEE: low-grade fraction	2, 5a, 6, 7, 8, 9
Small WEEE: high-grade fraction	3, 4
TV and monitors	3, 4
Lighting equipment	5b

Πίνακας 1 : Ταξινόμηση EEE σε κατηγορίες WEEE στην ΕΕ (Bigum et al., 2012)

2.1.1 Χαρακτηριστικά ανεξάρτητων WEEE

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν στοιχεία για τα σημαντικότερα είδη ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού που καταλήγουν στα WEEE. Τα στοιχεία αυτά εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία και κρίθηκε χρήσιμη η συγκέντρωση και παρουσίασή τους.

2.1.1.1 PCBs

Οι πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος (PCBs) φαίνεται να θεωρούνται ως το πιο πολύτιμο WEEE. Σύμφωνα με τους Fogarasi et al. (2013), η ετήσια συσσώρευση PCBs φτάνει τα 1.5 – 2 εκ. τόνους, το οποίο αντιπροσωπεύει το 3 wt% των συνολικών WEEE (Long et al., 2010). Λόγω του υψηλού περιεχομένου σε μέταλλα (περίπου 40 wt%), οι PCBs θεωρούνται όχι μόνο μια ελκυστική δευτερογενής πηγή μετάλλων, η οποία συνεισφέρει στη διατήρηση των φυσικών πόρων, αλλά και μια απειλή για το περιβάλλον λόγω της παρουσίας επικίνδυνων ουσιών όπως το κάδμιο, ο υδράργυρος, ο μόλυβδος και τα βρωμιούχα επιβραδυντικά φλόγας (Cui and Zhang, 2008 · Sepúlveda et al., 2010). Σύμφωνα με τους Van Eygen et al. (2015), οι PCBs μπορεί να περιέχουν περισσότερο από 10 φορές τη συγκέντρωση σε πολύτιμα μέταλλα, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα κοιτάσματα των μετάλλων (Betts, 2008). Η βιώσιμη διαχείριση αυτού του

ρεύματος αποβλήτων είναι έτσι σημαντική για την αποτροπή της απώλειας αυτών των υλικών και τον μετριασμό της αυξανόμενης έλλειψης πόρων (Hagelüken and Meskers, 2008).

Σύμφωνα με τους Rubin et al. (2014), αρκετές τεχνολογίες και μέθοδοι που συνδυάζουν τεμαχισμό ή σύνθλιψη με πυρομεταλλουργικές ή υδρομεταλλουργικές διαδικασίες έχουν αναπτυχθεί για την ανακύκλωση των PCBs, αρχικά για καθαρά οικονομικούς λόγους, αν και περιβαλλοντικά ζητήματα έχουν ολοένα επηρεάσει την τελική επεξεργασία των ηλεκτρονικών (Yu et al., 2009). Σύμφωνα με τους Rocchetti et al. (2013), μια φορητή πρωτότυπη μονάδα επίδειξης εγκαταστάθηκε στην καρότσα ενός φορτηγού, όπου χρησιμοποιήθηκαν υπολείμματα WEEE από PCBs για την ανάκτηση χαλκού, άργυρου και χρυσού. Στα PCBs υπάρχει 25-28% χαλκού, 400-800 g/tonne χρυσού και 1400-1900 g/tonne άργυρου.

2.1.1.2 PWBs

Οι πλακέτες τυπωμένης καλωδίωσης (PWBs) είναι μια συσκευή παρόμοια με τις PCBs. Σύμφωνα με τους Biganzoli et al. (2015), οι PWBs περιέχουν συγκεντρώσεις πολύτιμων μετάλλων, όπως χρυσός και παλλάδιο, δεκαπλάσιες σε σχέση με τις αντίστοιχες των εξορυσσόμενων εμπορικών ορυκτών (Betts, 2008). Εξετάστηκε η δυνατότητα ανάκτησης από τις PWBs, μέσω μηχανικής διαχείρισης, περιλαμβανομένου ενός σταδίου τεμαχισμού και διαχωρισμού του μεταλλικού κλάσματος, μέσω μιας διαδικασίας διαχωρισμού ηλεκτροστατικής κορώνας (Li et al., 2007).

2.1.1.3 Εξοπλισμός Πληροφορικής

Σύμφωνα με τους Van Eygen et al. (2015), ο εξοπλισμός πληροφορικής είναι ιδιαίτερα πλούσιος σε πολύτιμα και κρίσιμα υλικά (όπως τα μέταλλα της ομάδας της πλατίνας) (Cui and Zhang, 2008) και σε σπάνιες γαίες (Binnemans et al., 2013). Στη μελέτη των (Van Eygen et al., 2015), μέσα βάρη για τις συσκευές υπό εξέταση χρησιμοποιήθηκαν : 12,33 kg για τον πύργο του σταθερού υπολογιστή και 2,84 kg για το φορητό (Chancerel and Rotter, 2009), 14,65 kg για τις οθόνες CRT και 5,28 kg για τις οθόνες FPD (Huisman et al., 2008), 1,18 kg για το πληκτρολόγιο και 0,12 kg για το οπτικό ποντίκι (Hischier et al., 2007) και 0,13 kg για το ποντίκι με τη μπίλια (Hikwama, 2005).

Σύμφωνα με (Rubin et al., 2014), στους προσωπικούς υπολογιστές συνήθως περιέχονται αλουμίνιο, αντιμόνιο, αρσενικό, βάριο, βηρύλιο, κάδμιο, χρώμιο, κοβάλτιο, χαλκός, γάλλιο, χρυσός, σίδηρος, μόλυβδος, μαγγάνιο, υδράργυρος, παλλάδιο, πλατίνα, σελήνιο, ασήμι και

ψευδάργυρος (Bleiwass and Kelly, 2001). Σύμφωνα με (Ravi, 2012), η κατά προσέγγιση κατανομή της περιεκτικότητας των υπολογιστών είναι : γυαλί (24.8 wt%), πλαστικά (23 wt%), πολύτιμα μέταλλα (0.02 wt%), σίδηρος (20.47 wt%), μόλυβδος (6.3 wt%), αλουμίνιο (14.17 wt%), χάλκος (6.93 wt%), άλλα (4.3 wt%) (Kang and Schoenung, 2005).

2.1.1.4 Τηλεοράσεις

Σύμφωνα με τους Baxter et al. (2016), από τη βάση δεδομένων του Elretur, χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη το βάρος 20 kg για τις τηλεοράσεις LCD. Στον πίνακα 2 παρουσιάζεται η σύσταση της τηλεόρασης μελέτης. Σύμφωνα με (Hischier, 2014), η σύγκριση με τις υπάρχουσες τεχνολογίες τηλεόρασης (CRT, LCD, πλάσμα) δείχνει ότι η συσκευή FED έχει ένα περιβαλλοντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις άλλες τρεις τεχνολογίες με βάση τη λειτουργική μονάδα της "μιας τετραγωνικής ίντσας προβολής για 1 ώρα ενεργής χρήσης". Σε άλλη μελέτη, (Ravi, 2012), η αντικατάσταση των οθονών CRT από οθόνες LCD θα επιφέρει σημαντική μείωση της συγκέντρωσης μολύβδου στα ηλεκτρονικά απόβλητα (Puckett et al., 2005). Σύμφωνα με τους Rocchetti et al. (2013), όπου εξετάζεται μια φορητή πρωτότυπη μονάδα επίδειξης εγκατεστημένη στην καρότσα ενός φορτηγού, χρησιμοποιήθηκαν υπολείμματα WEEE από CRTs για την ανάκτηση ύττριου και ψευδάργυρου. Στα CRTs υπάρχει 1-20% ύτριο και 30-35% ψευδάργυρος, τα οποία συναντώνται ως οξειδία και θειικές ενώσεις.

Waste fraction	Mass (kg)	Mass (%)	Fate
Steel	6.0	30	Recycling/landfill/incineration
Aluminium	1.4	7	Recycling/landfill/incineration
Copper	0.3	1.5	Recycling/landfill/incineration
Plastics	7.7	38.5	Recycling/landfill/incineration
Residual waste	2.7	13.5	Landfill or incineration
Glass	1.0	5	Incineration
Other waste	0.9	4.5	Incineration

Πίνακας 2 : Μέση σύσταση ενός αποβλήτου LCD και μοίρα διάφορων κλασμάτων (Baxter et al., 2016)

2.1.1.5 Κινητά τηλέφωνα

Για τη μελέτη των Baxter et al. (2016), από τη βάση δεδομένων του Elretur, χρησιμοποιήθηκε βάρος 140 g για τα κινητά τηλέφωνα, με το τελευταίο να αποτελείται από 115 g συσκευής συν 25 g μπαταρίας. Εκτιμήθηκε η σύσταση όπως φαίνεται στον πίνακα 3, με τα άλλα μέταλλα να αποτελούνται από ένα μίγμα μολύβδου, κασσίτερου, ψευδάργυρου και πολύτιμων/σπάνιων μετάλλων.

Waste fraction	Mass (g)	Mass (%)	Fate
Plastic	68	59	Recycling/incineration
Ceramics	18	16	Recycling/incineration
Copper	17	15	Recycling/incineration
Steel	3	3	Recycling/incineration
Aluminium	2	2	Recycling/incineration
Other metals	7	5	Recycling/incineration

Πίνακας 3 : Μέση σύσταση ενός αποβλήτου κινητού τηλεφώνου και μοίρα διαφόρων κλασμάτων (Baxter et al., 2016)

2.1.1.6 Ψυγεία

Σύμφωνα με τη μελέτη των Baxter et al. (2016), από τη βάση δεδομένων του Elretur, ένα μέσο ψυγείο έχει βάρος 51kg και η σύσταση των αποβλήτων ψύξης προέκυψε όπως φαίνεται στον πίνακα 4. Από την έρευνα προέκυψε μια μέση τιμή γύρω στα 400 – 450 g ψυκτικού σε ένα μέσο ψυγείο. Το ψυκτικό υποτέθηκε ότι είναι το R134a και θεωρήθηκε ότι εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα όταν είτε τα περιεχόμενα του κυκλώματος ψύξης δεν απομονώθηκαν και ανακτήθηκαν ειδικά, ή όταν η μόνωση δεν επεξεργάστηκε ειδικά.

Waste fraction	Mass (kg)	Mass (%)	Fate
Steel	36.06	70.7	Recycling or landfill
Other plastics	5.92	11.6	Recycling or landfill
Polyurethane	6.12	12.0	Incineration (energy recovery) or landfill
Residual waste	1.84	3.6	Landfill
Refrigerant (taken as R134a)	0.41	0.8	Thermal destruction or emission to atmosphere
Aluminium	0.36	0.7	Recycling or landfill
Copper	0.31	0.6	Recycling or landfill

Πίνακας 4 : Μέση σύσταση ενός αποβλήτου ψύξης και μοίρα διαφόρων κλασμάτων (Baxter et al., 2016)

2.1.1.7 Μπαταρίες

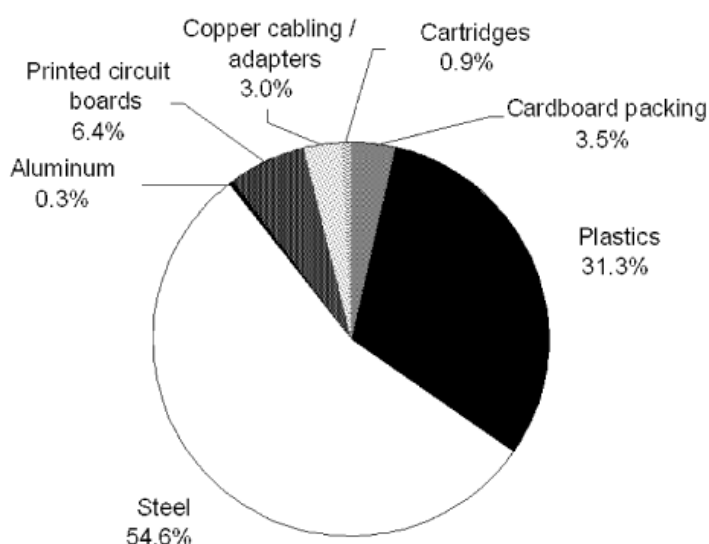
Σύμφωνα με τους Van Eygen et al. (2015), οι μπαταρίες των φορητών υπολογιστών ανακυκλώνονται και ανακτώνται ως δευτερογενείς πρώτες ύλες, χάλυβας, κοβάλτιο, μη σιδηρούχα μέταλλα και οξείδια του μαγγανίου (Hischier et al., 2007). Στη μελέτη των (Rocchetti et al., 2013), σε μια φορητή πρωτότυπη μονάδα επίδειξης που εγκαταστάθηκε στην καρότσα ενός φορτηγού, χρησιμοποιήθηκαν υπολείμματα WEEE από μπαταρίες Li-ion για την ανάκτηση λίθιου και κοβάλτιου. Στις μπαταρίες Li-ion περιέχεται 23-25% λίθιο και 2-3% κοβάλτιο.

2.1.1.8 Πλυντήρια πιάτων

Σύμφωνα με τους Johansson and Bjorklund, (2010), τα πλυντήρια πιάτων, ασχέτως φίρμας, έχουν επί το πλείστον τους ίδιους τύπους και τον ίδιο αριθμό μερών. Η διαφορά έγκειται στον τρόπο με τον οποίο τα μέρη συναρμολογούνται.

2.1.1.9 Εκτυπωτές

Σύμφωνα με τη μελέτη των Mayers et al. (2005), η σύσταση των εκτυπωτών που συλλέχθηκαν παρουσιάζεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7 : Σύσταση εκτυπωτών που συλλέχθηκαν (Mayers et al., 2005)

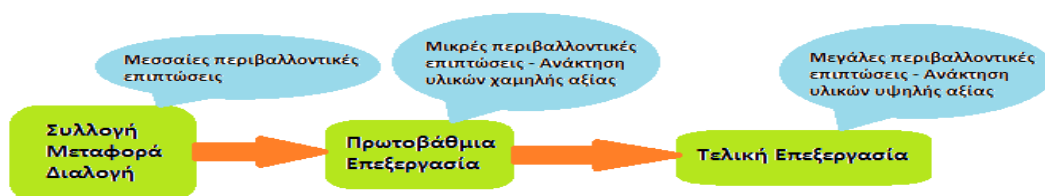
2.1.1.10 Λαμπτήρες

Στη μελέτη των Rocchetti et al. (2013), μια φορητή πρωτότυπη μονάδα επίδειξης εγκαταστάθηκε στην καρότσα ενός φορτηγού και χρησιμοποιήθηκαν υπολείμματα WEEE από λαμπτήρες φθορισμού, για την ανάκτηση ύττριου. Στους λαμπτήρες φθορισμού περιέχεται 5-7% ύττριο, ως οξείδια. Υπάρχουν και σπάνιες γαίες όπως το Ευρώπιο.

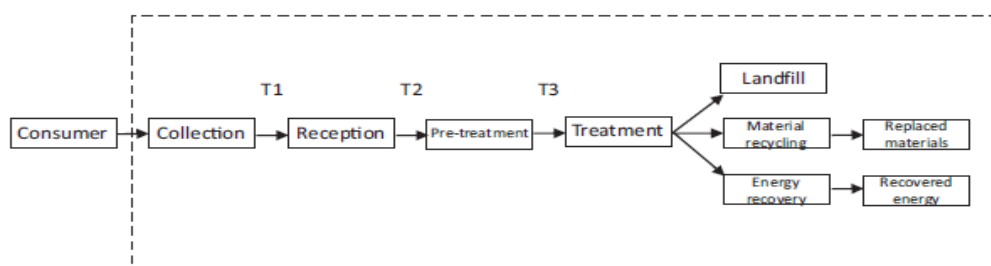
2.2 Στάδια

Με βάση τη βιβλιογραφία, αν και δεν υπάρχει απόλυτη ταύτιση, στη μελέτη μας η ανακύκλωση των WEEE θα διακριθεί σε τρία στάδια, όπως φαίνεται στο σχήμα 8. Πρώτο στάδιο είναι η συλλογή, μεταφορά και διαλογή των WEEE, στη συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, όπου πραγματοποιείται αποσυναρμολόγηση και μηχανικός διαχωρισμός και το τρίτο στάδιο είναι η τελική επεξεργασία. Στη μελέτη των Baxter et al. (2016), τα στάδια της ανακύκλωσης WEEE παρουσιάζονται στο σχήμα 9. Σύμφωνα με τους Van Eygen et al. (2015), στο σχήμα 10 φαίνονται τα στάδια της αλυσίδας ανακύκλωσης και τα όρια του συστήματος. Οι παραπάνω προσεγγίσεις περιέχουν πολλές λεπτομέρειες και περιγράφουν καταστάσεις που σχετίζονται με την ανακύκλωση WEEE, ως εκ τούτου κρίθηκε προτιμότερη η γενική διάκριση με βάση το σχήμα 8, με σκοπό την ευκολότερη κατανόηση.

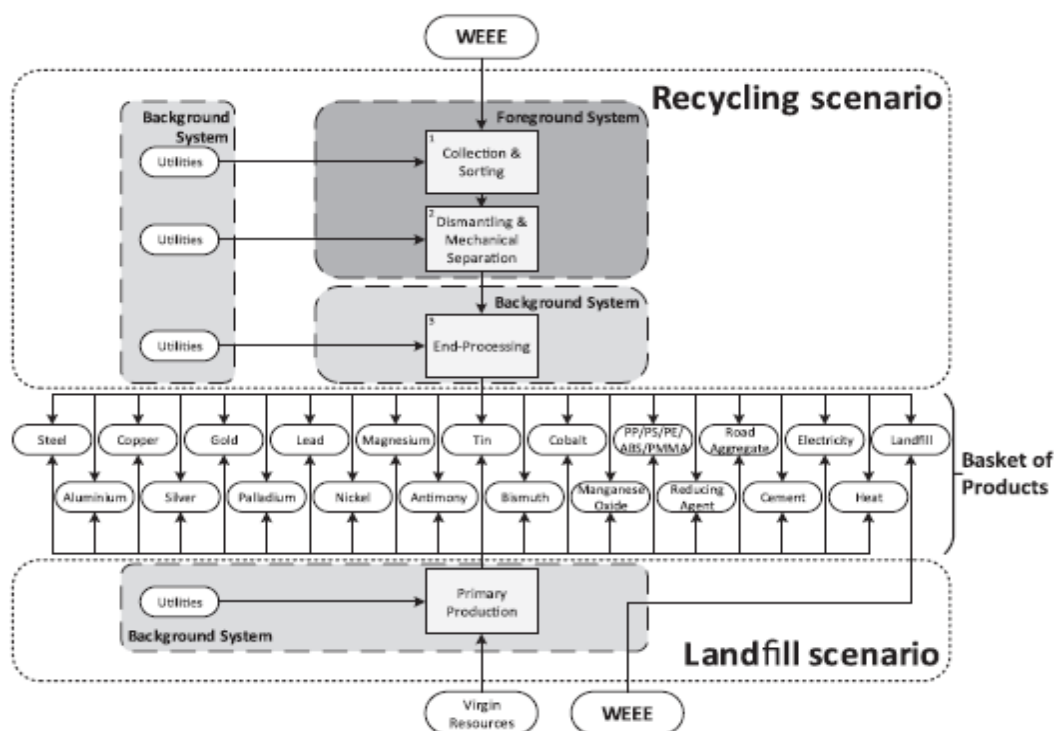
Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα αναλυθούν τα τρία στάδια, ωστόσο αρχικά θα επισημανθεί η σπουδαιότητα του σταδίου της τελικής επεξεργασίας, όσον αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στη μελέτη των Van Eygen et al. (2015), όπου εξετάζεται η κατανάλωση φυσικών πόρων της ανακύκλωσης των σταθερών και φορητών υπολογιστών, με βάση τη μέθοδο CEENE, φαίνεται στο σχήμα 11 η υπεροχή του σταδίου της τελικής επεξεργασίας. Επίσης, οι Hirschier et al. (2005), έδειξαν ότι οι δραστηριότητες διαλογής και αποσυναρμολόγησης των εταιριών είναι μικρού ενδιαφέροντος. Αντίθετα οι κύριες περιβαλλοντικές επιπτώσεις συμβαίνουν κατά την τελική επεξεργασία. Η συλλογή των WEEE φαίνεται αρκετά πιο σημαντική σε σχέση με τη διαλογή και την αποσυναρμολόγηση.



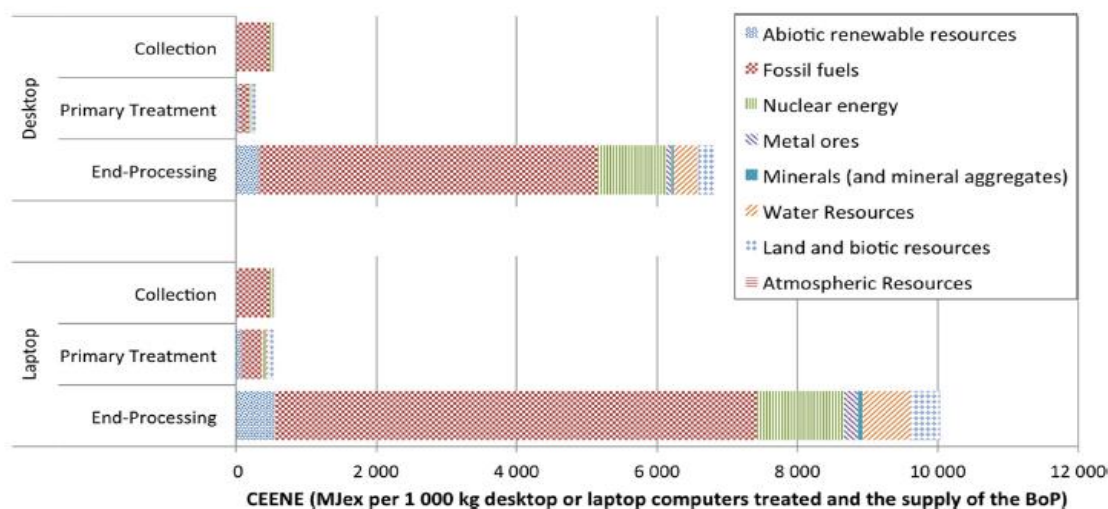
Σχήμα 8 : Στάδια ανακύκλωσης WEEE και σημαντικότερα χαρακτηριστικά



Σχήμα 9 : Αναπαράσταση της αλυσίδας αξίας της επεξεργασίας WEEE (Baxter et al., 2016)



Σχήμα 10 : Στάδια ανακύκλωσης WEEE και όρια συστήματος (Van Eygen et al., 2015)



Σχήμα 11 : Αποτελέσματα CEENE ανάλυσης για τις επιπτώσεις κάθε σταδίου ανακύκλωσης σταθερών και φορητών υπολογιστών (Van Eygen et al., 2015)

2.2.1 Συλλογή, Μεταφορά, Διαλογή

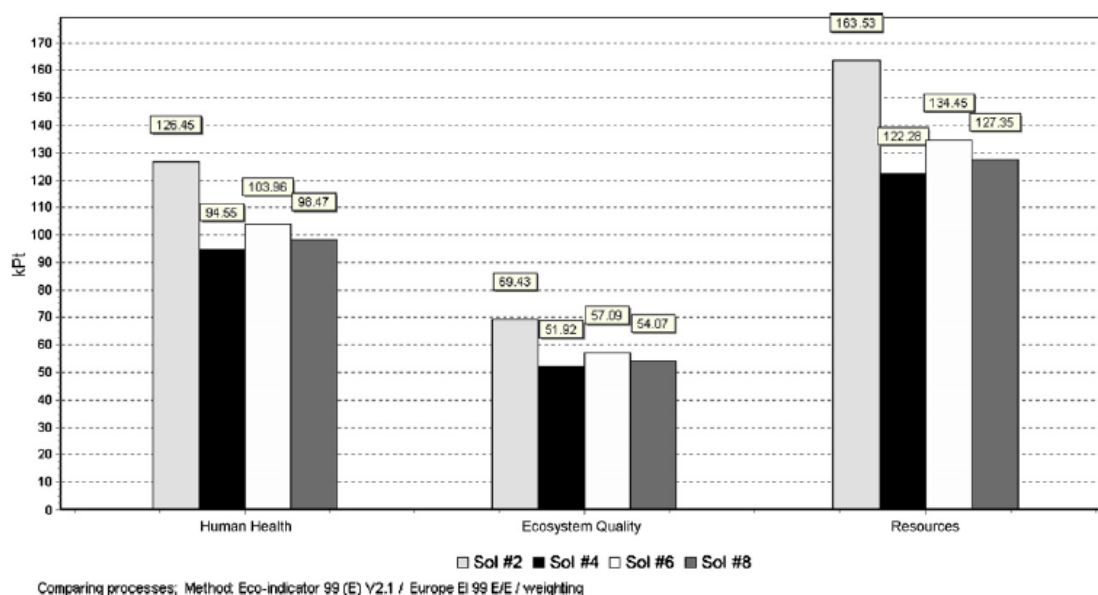
Στο πρώτο στάδιο της ανακύκλωσης των WEEE πραγματοποιείται η συλλογή των WEEE, η μεταφορά τους στις μονάδες πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, και η διαλογή τους στις αντίστοιχες κατηγορίες με βάση τη νομοθεσία. Να αναφερθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα επισκευής και επαναχρησιμοποίησης των WEEE, που βρίσκονται σε σχετικά καλή κατάσταση.

Όσον αφορά τη συλλογή, σύμφωνα με τους (Baxter et al., 2016), οι εθνικοί κανονισμοί για WEEE, στην Νορβηγία (Milkødirektoratet, 2013), περιλαμβάνουν την ευθύνη εγκεκριμένων

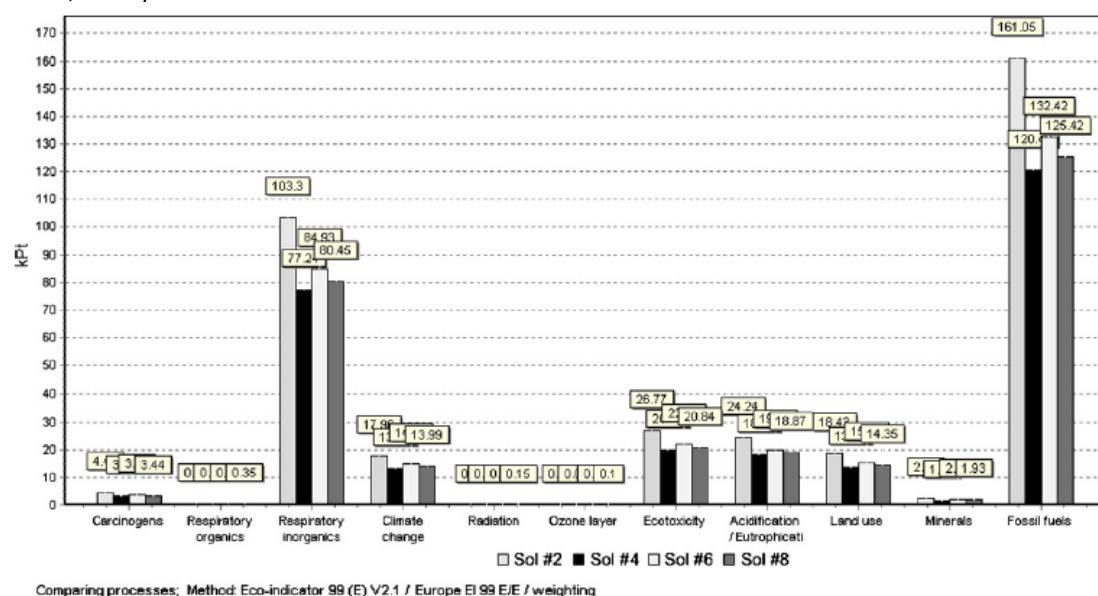
επιχειρήσεων για τη συλλογή από όλα τα μέρη της χώρας. Αυτό δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά το κόστος, την υλικοτεχνική απόδοση και τις επακόλουθες εκπομπές. Στην περίπτωση του Βελγίου, σύμφωνα με τους Van Eygen et al. (2015), τα απορριπτόμενα WEEE συλλέγονται και ταξινομούνται από τον οργανισμό Recupel. Τα συλλεγόμενα WEEE πρώτα ελέγχονται, και ο εξοπλισμός που μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί επισκευάζεται, φρεσκάρεται και καθαρίζεται. Στο άρθρο των Van Eygen et al. (2015), γίνεται αναφορά στη μελέτη αποδοτικότητας της συλλογής εξοπλισμού πληροφορικής από τη Recupel για το έτος 2011 των (Huisman and Baldé, 2013). Από τη συγκεκριμένη μελέτη προέκυψε ότι το 41% του εξοπλισμού πληροφορικής συλλέχθηκε από τη Recupel, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τους φορητούς υπολογιστές ήταν μόλις 11%. Η παρατήρηση αυτή, εξηγήθηκε από το γεγονός ότι τα απόβλητα φορητών υπολογιστών διατηρούν μια υψηλή αξία, το οποίο καθιστά οικονομικά ελκυστική την εμπόρευση τους έξω από το επίσημο σύστημα συλλογής. Αυτό μπορεί να σημαίνει εξαγωγές σε αναπτυσσόμενες χώρες, για τις οποίες ο εξοπλισμός πληροφορικής είναι ιδιαίτερος ελκυστικός. Αυτές οι εξαγωγές συνήθως πραγματοποιούνται παράνομα, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να προσδιοριστεί το μέγεθός τους.

Σε σχέση με την μεταφορά των WEEE, πρέπει να αναφερθεί ότι ενώ είναι πολύ σημαντική από άποψη κόστους, από την αυστηρή άποψη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων η επίδρασή της είναι σχετικά ασήμαντη. Αυτό εξαρτάται ωστόσο, και από τη γεωγραφία της χώρας, με το αν οι σταθμοί συλλογής είναι σχετικά διασκορπισμένοι με αποτέλεσμα οι αποστάσεις μεταφοράς να είναι μεγάλες. Η μεταφορά ευθύνεται για το 10% ή λιγότερο της συνολικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης (Baxter et al., 2016). Στη μελέτη των Gamberini et al. (2010), εξετάζεται ένα δίκτυο μεταφοράς WEEE στη βόρεια Ιταλία, στην περιοχή Emilia, μέσω μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης επίλυσης. Στη μελέτη εξετάστηκε, αποκλειστικά η μεταφορά από τα σημεία συλλογής στη μονάδα επεξεργασίας. Στο σχήμα 12 φαίνεται η συνολική επιβάρυνση, για κάποια σενάρια που εξετάστηκαν, για την ανθρώπινη υγεία, την ποιότητα του οικοσυστήματος και τους πόρους. Στο σχήμα 13 φαίνεται η σύγκριση των σεναρίων για κάθε κατηγορία επιπτώσεων. Πιο σημαντικές είναι τα ορυκτά καύσιμα, 48.8%, και εισπνεύσιμες ανόργανες ουσίες, 28.7%.

Η διαλογή των WEEE δεν επιφέρει αξιοσημείωτες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ως εκ τούτου, δε βρέθηκε κάποια βιβλιογραφική έρευνα. Ωστόσο, άξιο αναφοράς είναι ότι η καλή διαλογή θα συντελέσει σε υψηλότερες αποδοτικότητες ανάκτησης, καθώς κάθε κατηγορία WEEE απαιτεί ειδικές μεθόδους για να επιτύχει τη μέγιστη ανάκτηση.



Σχήμα 12 : Τα αποτελέσματα της AKZ για την μεταφορά WEEE ανά κατηγορία επιπτώσεων (Gamberini et al., 2010)



Σχήμα 13 : Τα αποτελέσματα της AKZ για την μεταφορά WEEE ανά υποομάδες κατηγοριών επιπτώσεων (Gamberini et al., 2010)

2.2.2 Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία, αποσυναρμολόγηση και τεμαχισμός, είναι ένα αρκετά χρήσιμο και σημαντικό στάδιο της ανακύκλωσης WEEE. Το στάδιο αυτό επιβαρύνει με μικρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ευνοεί την ανάκτηση μεγάλων ποσοτήτων υλικών χαμηλότερης αξίας. Ωστόσο, η σημασία αυτού του σταδίου δεν είναι ίδια για όλες τις κατηγορίες των WEEE, με τη μικρότερη αξία στις κατηγορίες R3 και R4 (ταξινόμηση σύμφωνα με τους Biganzoli et al. (2015)). Οι συγκεκριμένες κατηγορίες αντιπροσωπεύουν τις τηλεοράσεις – οθόνες και τις μικρές οικιακές συσκευές αντίστοιχα, οι οποίες περιέχουν σημαντικές

ποσότητες από πολύτιμα μέταλλα και σπάνιες γαίες, των οποίων η ανάκτηση δεν ευνοείται κατά το στάδιο της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας. Συνεπώς, στις κατηγορίες R3 και R4, το στάδιο της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας θα πρέπει να περιορίζεται στην αποσυναρμολόγηση των WEEE, τη διαλογή των <<πολύτιμων εξαρτημάτων>> και την αποστολή τους στις μονάδες τελικής επεξεργασίας.

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία περιλαμβάνει τη χειρωνακτική διαλογή, τον τεμαχισμό, τη μαγνητική διαλογή, το ρεύμα διαλογής Eddy, την ταξινόμηση αέρα και την οπτική διαλογή (Bigum et al., 2012). Σύμφωνα με τους Bigum et al. (2012), εκτιμήθηκε ότι με αυτές τις διαδικασίες, δεδομένου ότι δεν υπάρχει διαχωρισμός των <<πολύτιμων εξαρτημάτων>>, μονάχα το 12-26% του ασημιού, χρυσού και παλλαδίου ανακτώνται. Το υπόλοιπο ποσοστό αποτελεί απώλεια ενός πολύτιμου οικονομικά και περιβαλλοντικά κλάσματος των WEEE. Με σκοπό τη βελτίωση της ανάκτησης αυτών των μετάλλων, προτάθηκε η αυξημένη εστίαση στην χειρωνακτική απομάκρυνση κατά τα αρχικά στάδια των πλούσιων σε πολύτιμα μέταλλα εξαρτημάτων και όχι τον τεμαχισμό τους Chancerel et al. (2008). Στον πίνακα 5 παρουσιάζονται τα ποσοστά ανάκτησης και οι αρχικές περιεκτικότητες σε μέταλλα των WEEE (Bigum et al., 2012). Για το νικέλιο θεωρείται ότι δεν υπάρχει καθόλου απώλεια κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία. Σύμφωνα με τους Johansson and Bjorklund, (2009), η στοχευμένη αποσυναρμολόγηση πριν τον τεμαχισμό των WEEE ίσως έχει επίδραση στη συνολική κατανάλωση πόρων και στο δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης (Bigum et al., 2012). Να αναφερθεί ότι, όπως παρουσιάστηκε από τους Biganzoli et al. (2015), για να επιτευχθεί η μέγιστη ανάκτηση των υλικών, τα WEEE θα πρέπει να τεμαχιστούν σε μικρά κομμάτια, γενικά κάτω από 5mm ή 10mm (Cui and Forssberg, 2003).

	Metal content high-grade WEEE		Recovered [%]		
	Value	Unit	Pre-treatment ^a	Recovery process	Overall
Palladium	7 ^a	g/tonne	26	98 ^d	25
Gold	22 ^a	g/tonne	26	98 ^d	25
Silver	313 ^a	g/tonne	12	97 ^d	12
Nickel	3 ^b	kg/tonne	100	90 ^d	90
Aluminium	33 ^c	kg/tonne	86 ^c	79 ^e	68
Copper	44 ^a	kg/tonne	60	95 ^d	57
Iron	402 ^a	kg/tonne	96	100 ^e	96

^a Chancerel et al. [21].

^b Legarth et al. [22].

^c Chancerel [23].

^d Huisman [12].

^e EASEWASTE [24].

Πίνακας 5 : Το περιεχόμενο σε μέταλλα των WEEE υψηλής ποιότητας και τα ποσοστά ανακτησής τους (Bigum et al., 2012)

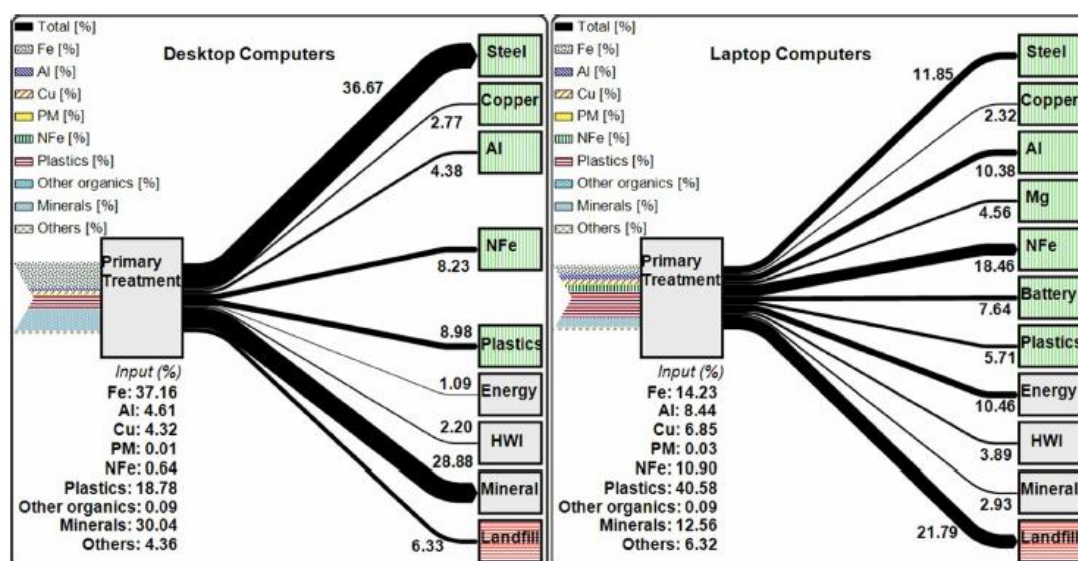
Στη μελέτη των Menikpura et al. (2014), εκτιμήθηκε η ποσότητα και η σύσταση των ανακτώμενων μετάλλων και υλικών, από τη διαδικασία της αποσυναρμολόγησης, και παρουσιάζεται στον πίνακα 6. Να αναφερθεί ότι η ποσότητα των υλικών που ανακτώνται εξαρτάται από την ανακυκλωσιμότητα κάθε τύπου μετάλλου/υλικού. Σε αυτή την μελέτη θεωρήθηκε ότι η ανακυκλωσιμότητα όλων των μετάλλων είναι 95% και των πλαστικών 90% λόγω προσμείξεων (Menikpura et al., 2012).

	Unit	Washing machine	Refrigerator	Air conditioner	Television
Average unit weight	kg/unit	32	58	43	28
Average material recovery percentage	%	75	67	84	77
Amount of recovered materials from dismantling	kg/unit	23.61	38.58	36.47	21.68
<i>Composition of recovered materials (%)</i>					
Fe		74.35	82.82	63.58	11.03
Cu		2.72	2.27	19.82	5.08
Al		1.08	0.71	8.49	0.33
Glass		0.00	0.00	0.00	64.32
Plastics		21.80	13.85	6.53	18.95
Pb and Zn		0.04	0.35	1.58	0.29
Total		100.00	100.00	100.00	100.00

Πίνακας 6 : Ποσότητα και σύσταση των ανακτώμενων υλικών από την αποσυναρμολόγηση WEEE (Menikpura et al., 2014)

Στην παράγραφο αυτή θα περιγραφεί το στάδιο πρωτοβάθμιας επεξεργασίας των σταθερών και φορητών υπολογιστών στο Βέλγιο, σύμφωνα με τους Van Eygen et al. (2015). Η διαδικασία διαχείρισης στο Galloo (στο Menen στο Βέλγιο) ξεκινά με χειρωνακτική αποσυναρμολόγηση των πύργων των σταθερών υπολογιστών, των φορητών υπολογιστών και των οθονών καθοδικού σωλήνα, για τη λήψη των διαφορετικών συστατικών που υποβάλλονται σε διαφορετική διαχείριση. Κάποια κομμάτια στέλνονται απευθείας σε μια εγκατάσταση τελικής επεξεργασίας, όπως οι μπαταρίες και οι PCBs. Τα άλλα αποσυντιθέμενα συστατικά επεξεργάζονται περαιτέρω εσωτερικά, όπως οι επίπεδες οθόνες (FPD), τα ποντίκια και τα πληκτρολόγια, για επιπρόσθετο διαχωρισμό των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένα, πριν αποσταλούν στο στάδιο τελικής επεξεργασίας. Αυτές οι περαιτέρω λειτουργίες επεξεργασίας περιλαμβάνουν τεμαχισμό, και χρήση άλλων μαγνητικών και δινορευματικών (eddy current) διαχωριστών. Για την πρωτοβάθμια επεξεργασία απαιτείται ηλεκτρικό ρεύμα, που παρέχεται από ένα εργοστάσιο αναερόβιας χώνευσης, χημικά για τη διευκόλυνση του

διαχωρισμού με βάση την πυκνότητα και τη δέσμευση επικίνδυνων ουσιών, όπως βενζίνης, και εσωτερικές μεταφορές. Τα συνολικά αποτελέσματα της ανάλυσης ροής υλικών του εργοστασίου πρωτοβάθμιας επεξεργασίας παρουσιάζονται στο σχήμα 14. Το σχήμα αυτό δείχνει τη σύσταση των υλικών εισαγωγής, καθώς και τη συνολική ροή υλικών στο στάδιο τελικής επεξεργασίας. Τα ποσοτικά αποτελέσματα της μελέτης υποδηλώνουν ότι, για τους σταθερούς υπολογιστές, 49% όλων των υλικών και 87% των μετάλλων ανακυκλώνονται αποτελεσματικά, ενώ για τους φορητούς, αυτές οι τιμές είναι 39% και 85% αντίστοιχα. Η κρίσιμότητα είναι το αποτέλεσμα τόσο της οικονομικής σημασίας όσο και της διαθεσιμότητας προσφοράς ενός υλικού. Για τους σταθερούς υπολογιστές, 87% της κρίσιμης μάζας ανακτάται, ενώ για τους φορητούς είναι 89%, για όλα τα υλικά. Ενώ για τα κρίσιμα υλικά οι τιμές αυτές διαμορφώνονται σε 43% και 95% αντίστοιχα. Ωστόσο απαιτείται μεγαλύτερη προσοχή για τα κρίσιμα υλικά καθώς είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομία αλλά το ποσοστό ανακύκλωσής τους είναι κάτω από 1%. Οι αποτελεσματικότητες της ανάκτησης κάποιων μετάλλων όταν υποβάλλονται σε τεμαχισμό και μηχανική διαλογή εκτιμήθηκαν ως : Ag : 12%, Au : 26%, Pd : 26%, Ni : 100%, Fe : 96%, Cu : 60%, Al : 86% (Bigum et al., 2012). Οι ποσότητες των υλικών που ανακυκλώνονται αποτελεσματικά από τους σταθερούς και φορητούς υπολογιστές παρουσιάζονται στον πίνακα 7. Τελικά, να αναφερθεί ότι, η ανακύκλωση των φορητών υπολογιστών στο Βέλγιο το 2013 πέτυχε παραγωγή δευτερογενών πόρων της τάξης των 32 τόνων ατσάλι, 17 τόνων αλουμίνιο, 15 τόνων χαλκού, 14 τόνων πλαστικών και 48 kg πολύτιμων μετάλλων.

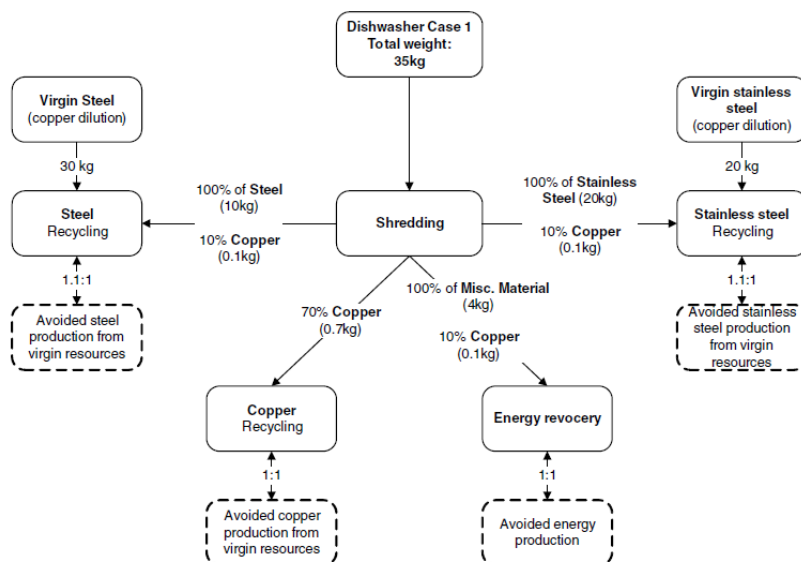


Σχήμα 14 : Ανακτώμενα υλικά από την πρωτοβάθμια επεξεργασία σε σταθερούς και φορητούς υπολογιστές (Van Eygen et al., 2015)

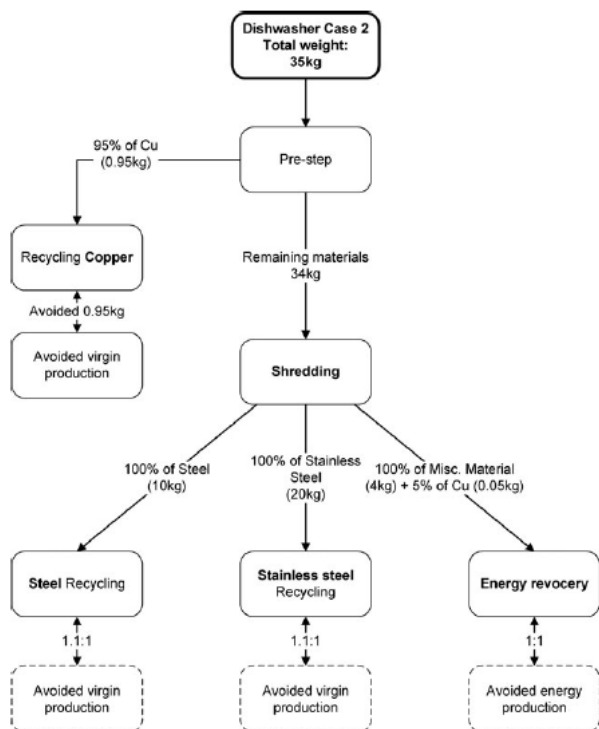
	Desktop				Laptop		
	Input, kg	Recycled, kg	MWR, %		Input, kg	Recycled, kg	MWR, %
Ferrous	3.72×10^2	3.32×10^2	89		1.42×10^2	1.22×10^2	86
Aluminium	4.61×10^1	3.80×10^1	83		8.44×10^1	6.37×10^1	75
Copper	4.32×10^1	3.37×10^1	78		6.85×10^1	5.84×10^1	85
Precious metals	1.13×10^{-1}	5.52×10^{-2}	49		2.90×10^{-1}	1.84×10^{-1}	63
Other non-ferrous metals	6.39×10^0	1.87×10^0	29		1.09×10^2	9.82×10^1	90
Plastics	1.88×10^2	8.09×10^1	43		4.06×10^2	5.14×10^1	13
Other organics	9.14×10^{-1}	0	0		8.74×10^{-1}	0	0
Minerals	3.00×10^2	0	0		1.26×10^2	0	0
Others	4.36×10^1	0	0		6.32×10^1	0	0
Total	1.00×10^3	4.86×10^2	49		1.00×10^3	3.94×10^2	39

Πίνακας 7 : Ποσότητες αποτελεσματικής ανακύκλωσης για 1000kg σταθερών και φορητών υπολογιστών, και ο δείκτης ανακύκλωσης μάζας υλικού (MWR) (Van Eygen et al., 2015)

Οι Johansson and Bjorklund (2010), μελέτησαν τις συνέπειες στην ανακύκλωση πλυντηρίων πιάτων, ενός σταδίου πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, όπου απομακρύνεται χειρωνακτικά ο χαλκός πριν τον τεμαχισμό. Μια περιορισμένη ΑΚΖ έγινε για να καθοριστεί αν το προτεινόμενο αρχικό στάδιο μπορεί να επωφελές περιβαλλοντικά. Δύο εναλλακτικές αναλύθηκαν : η τρέχουσα διαδικασία τεμαχισμού και το αρχικό στάδιο απομάκρυνσης του χαλκού πριν το τεμαχισμό. Το σχήμα 15 απεικονίζει τις ροές υλικών σε μια λειτουργία τεμαχισμού σύμφωνα με την τρέχουσα πρακτική στη Σουηδία, χωρίς αρχικό στάδιο. Το τεμαχισμένο πλυντήριο πιάτων διαχωρίζεται σε τέσσερα ξεχωριστά ρεύματα. 0.25% είναι το μέγιστο αποδεκτό επίπεδο περιεκτικότητας χαλκού σε κατακερματισμένα θραύσματα από οικιακές συσκευές σύμφωνα με μια συμφωνία των ανακυκλωτών και των εργοστασίων ατσαλιού στη Σουηδία (Erasteel et al. 2005). Για να επιτευχθεί αυτό το ποσοστό απαιτείται η πρόσμειξη με πρωτογενές υλικό. Στη συνέχεια, στο σχήμα 16 φαίνονται οι ροές υλικών για την περίπτωση ύπαρξης αρχικού σταδίου. Το αρχικό στάδιο απομακρύνει 95% του χαλκού και εξασφαλίζει μεγαλύτερη καθαρότητα των κλασμάτων που θα προκύψουν έπειτα. Οι Johansson and Luttrupp (2009) βρήκαν το 95% ως το μέγιστο ποσοστό πρακτικής απομάκρυνσης χαλκού. Συνεπώς, το αρχικό στάδιο συντελεί σε αυξημένη ανάκτηση χαλκού, αλλά το σημαντικότερο είναι ότι η σύσταση σε χαλκό των ανακτώμενων κλασμάτων ατσαλιού μειώνεται, άρα αυξάνεται η καθαρότητα των κλασμάτων των ανακτώμενων υλικών.



Σχήμα 15 : Διάγραμμα ροής της επεξεργασίας πλυντηρίων πιάτων χωρίς στάδιο πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (Johansson and Bjorklund, 2010)



Σχήμα 16 : Διάγραμμα ροής της επεξεργασίας πλυντηρίων πιάτων με στάδιο πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (Johansson and Bjorklund, 2010)

Στη μελέτη των Biganzoli et al. (2015), για την Λομβαρδία της Ιταλίας, χρησιμοποιήθηκαν οι αναλογίες υποκατάστασης του πίνακα 8, και κατασκευάστηκε ο πίνακας 9 όπου φαίνονται η ποσότητα εξοικονόμησης πρωτογενών υλικών και ενέργειας που προκύπτει από την ανάκτηση 1 τόνου R1, R2 CRTs, FDPs, R4 και R5. Στην εξοικονόμηση κυριαρχεί το ατσάλι και το εμπορικό τήγμα γυαλιού, με το πρώτο να προέρχεται κυρίως από την ανάκτηση των κατηγοριών R1, R2 και R4 και των FDPs, και το δεύτερο από την ανάκτηση των CRTs και της κατηγορίας R5. Η

εξοικονόμηση ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας οφείλεται κυρίως στην ανάκτηση της κατηγορίας R4.

Secondary product	Avoided primary product	Substitution ratio
Liquid secondary steel from iron scraps	Liquid primary steel from pig iron	1:1
Liquid secondary steel from chromium steel scraps	Liquid primary chromium steel	1:1
Secondary aluminium ingots from aluminium scraps	Primary aluminium ingots from bauxite	1:1
Secondary copper	Cathodes of primary copper	1:1
Secondary palladium	Primary palladium	1:1
Secondary silver	Primary silver from combined mining and refining of gold and silver	1:1
Secondary nickel	Primary nickel	1:1
Secondary gold	Primary gold from combined mining and refining of gold and silver	1:1
Secondary lead	Primary lead	1:1
Particle board from recovered wood	Plywood from virgin wood	1:0.6
Granules of recycled ABS	Granules of virgin ABS	1:0.81
Granules of recycled PS	Granules of virgin PS	1:0.81
Concrete granulate	Gravel for road construction	1:1
Manganese powder	Manganese dioxide from ore and ferromanganese	1:1
Cobalt powder	Primary cobalt	1:1
Recycled MMA monomer	Virgin MMA monomer	1:1
Plasmix	Petcoke in cement kiln	1:0.62
Glass granulate	Commercial frit for the ceramic glaze industry	1:1

Πίνακας 8 : Αναλογίες υποκατάστασης των δευτερογενών υλικών στα πρωτογενή (Biganzoli et al., 2015)

Avoided primary materials and energy	UM	Heaters and refrigerators (R1)	Large household appliances (R2)	TV and monitors (R3)		Small household appliances (R4)	Lighting equipment (R5)
				CRTs	FPDs		
ABS plastic	kg	–	–	91	127	–	–
Aluminium	kg	45.8	6.86	4	102	15.2	33.4
Chromium steel	kg	–	54.0 ^a	–	–	–	–
Cobalt	kg	–	–	–	–	0.1	–
Commercial frit	kg	–	–	355	37.2	–	800
Copper	kg	11.5	8.56	28.9	27.2	29.1	–
Gold	kg	–	0.00011	0.02	0.02	0.005	–
Gravel	kg	–	96.0	–	–	–	–
Lead	kg	–	0.011	1.48	1.33	1.70	–
Manganese dioxide	kg	–	–	–	–	0.005	–
MMA plastic	kg	–	–	–	32.9	–	–
Nickel	kg	–	0.022	3.11	2.77	1.04	–
Palladium	kg	–	0.00022	0.03	0.03	0.01	–
Petcoke	kg	31.6	17.1	–	–	–	–
Plywood from virgin wood	m ³	0.0096	0.0005	0.009	–	0.0005	–
PS plastic	kg	73.2	39.5	–	–	–	–
Silver	kg	–	0.004	0.53	0.48	0.18	–
Steel	kg	471	665	97	384	490	44.1
Electricity	kWh	2.08	14.6	11.4	21.5	675	–
Thermal energy	MJ	4.67	15.9	16.4	20.2	1504	–

^a 1 kg of secondary chromium steel is produced by 0.52 kg of chromium steel scraps, 0.26 kg of primary ferrochromium steel and 0.32 kg of primary ferronickel steel. Thus, 54 kg of secondary chromium steel are produced from 28.1 kg of chromium steel scraps recovered from 1 tonne of R2 and substitute 54 kg of virgin chromium steel.

Πίνακας 9 : Ποσότητες εξοικονόμησης πρωτογενών υλικών και ενέργειας από την επεξεργασία 1 τόνου R1, R2, CRTs, FPDs, R4 και R5 (Biganzoli et al., 2015)

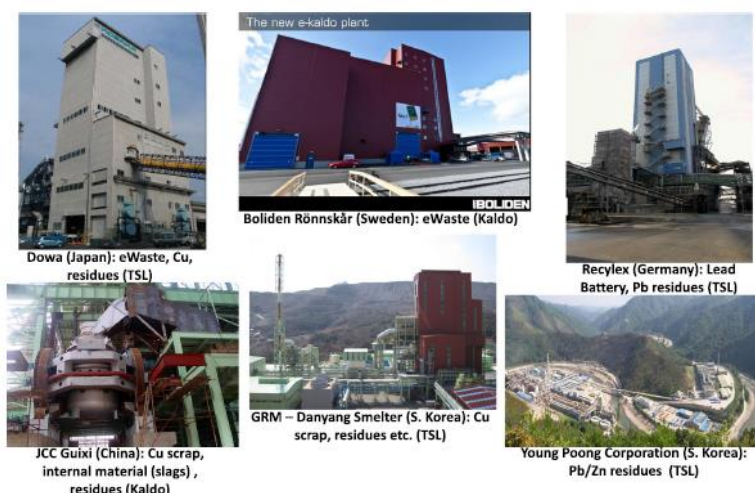
2.2.3 Τελική επεξεργασία

Το στάδιο τελικής επεξεργασίας προκαλεί μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω των μεθόδων που πραγματοποιούνται, θα παρουσιαστούν στο τμήμα 2.2.3.1, αλλά σε αυτό υπάρχει η δυνατότητα ανάκτησης υλικών υψηλής αξίας. Στην ευνοϊκή περίπτωση, κατά την οποία στο στάδιο της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας έχουν ανακτηθεί οι μεγάλες ποσότητες υλικών χαμηλής αξίας, τότε στο στάδιο της τελικής επεξεργασίας θα υπάρξει ανάκτηση μικρών ποσοτήτων υλικών υψηλής αξίας και υψηλής καθαρότητας. Αν και από άποψη ποσοτήτων, στο στάδιο της τελικής επεξεργασίας θα έχουν ανακτηθεί μικρές ποσότητες υλικών, εντούτοις αυτά τα υλικά αποφέρουν υψηλό περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος. Αυτό εξηγείται από

τις υψηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχει η εξόρυξή τους, η ανάγκη της οποίας θα μειωθεί σημαντικά, και επίσης τις πολύ υψηλές τιμές των υλικών αυτών στην αγορά.

Με βάση τη βιβλιογραφία υποστηρίχτηκε ότι, η λειτουργία έκπλυσης με θειικό οξύ ήταν μια κοινή λειτουργία για την εξαγωγή μετάλλων (Y, Zn, Cu, Li, Co) από υπολείμματα WEEE. Ειδικότερα, τα προϊόντα ανακτήθηκαν με αποτελεσματικότητες εξαγωγής γύρω στο 90% για το ύτριο, το χαλκό, το χρυσό και τον άργυρο, 93% για το λίθιο και 97% για το κοβάλτιο με αντίστοιχες καθαρότητες 95%, 99.5%, 80% (Au + Ag), 18% και 43% (Rocchetti et al., 2013). Μερικοί συγγραφείς, σύμφωνα με (Fogarasi et al., 2013), ανέφεραν την πιθανότητα ανάκτησης 93% χρυσού και 97% χαλκού από απόβλητα κινητών τηλεφώνων με τη χρήση επί τόπου ηλεκτροδημιουργίας χλωρίου, ενώ άλλοι εφαρμόζοντας την ίδια μέθοδο πέτυχαν την ολική ανάκτηση χαλκού από PCBs (Kim et al., 2011).

Στη μελέτη των Bigum et al. (2012), η εγκατάσταση μεταλλουργικής επεξεργασίας περιελάμβανε μια μονάδα Kaldor, έναν μετατροπέα διάδρομο, ένα ανοδικό διυλιστήριο και ένα διυλιστήριο πολύτιμων μετάλλων. Η ανάκτηση πόρων για κάθε τόνο υψηλής ποιότητας WEEE κυμάνθηκε από 2g παλλαδίου μέχρι 386kg σιδήρου. Στο σχήμα 17 φαίνονται διάφορες τεχνολογίες τήξης που εφαρμόζονται για την επεξεργασία των ηλεκτρονικών αποβλήτων και όχι μόνο (Reuter et al., 2015) .



Σχήμα 17 : Τεχνολογίες τήξης για ηλεκτρονικά απόβλητα αλλά και άλλα υπολείμματα (Reuter et al, 2015)

2.2.3.1 Κύριες μέθοδοι τελικής επεξεργασίας

Οι κύριες μέθοδοι τελικής επεξεργασίας είναι η πυρομεταλλουργική και η υδρομεταλλουργική επεξεργασία. Συνήθως ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων αποτελεί τον πιο αποτελεσματικό τρόπο ανάκτησης μετάλλων.

Η πυρομεταλλουργική επεξεργασία, σύμφωνα με τους Rubin et al. (2014), είναι η παραδοσιακή μέθοδος ανακύκλωσης PCB. Η πυρομεταλλουργία απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας και μπορεί να δημιουργήσει ανεξέλεγκτα επιβλαβή προϊόντα (Youssef et al., 2012), επιτυγχάνοντας μονάχα μερικό διαχωρισμό των μετάλλων. Για παράδειγμα, τα χυτήρια ανακτούν πολύτιμα μέταλλα, χαλκό και άλλα μέταλλα, αλλά όχι αλουμίνιο ή σίδηρο, έτσι συνδυασμός με υδρομεταλλουργικές τεχνικές ή / και ηλεκτροχημική επεξεργασία είναι συνεπώς απαραίτητος (Yu et al., 2009). Σύμφωνα με τους Rocchetti et al. (2013), οι πυρομεταλλουργικές διαδικασίες οδηγούν στην παραγωγή επικίνδυνων αερίων που θα πρέπει να απομακρυνθούν σωστά από τον αέρα με συστήματα καθαρισμού των καυσαερίων (flue gas).

Η υδρομεταλλουργική επεξεργασία, σύμφωνα με τους Rocchetti et al. (2013), είναι βασισμένες στη χρήση παραγόντων έκπλυσης σε υδατικά διαλύματα, όπως ισχυρά οξέα και βάσεις. Αυτά συνήθως εφαρμόζονται μαζί με άλλα μέσα συμπλοκοποίησης, όπως το οξαλικό οξύ, το οξικό οξύ, το κυανίδιο, το αλογονίδιο, η θειουρία και το θειοθειικό. Οι υδρομεταλλουργικές διαδικασίες απαιτούν λιγότερη ενέργεια και κεφάλαιο από τις πυρομεταλλουργικές, και είναι εφαρμόσιμες σε μονάδες με σχετικά μικρές δυνατότητες. Σύμφωνα με τους Rubin et al. (2014), τέτοιες διαδικασίες είναι ευκολότερο να λειτουργήσουν, όταν συνδυάζονται με πυρομεταλλουργικές διαδικασίες. Ωστόσο, μπορούν να έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο λόγω της τοξικότητας των αντιδραστηρίων που χρησιμοποιούνται και της μεγάλης ποσότητας των υποπροϊόντων που παράγονται, η οποία απαιτεί πρόσθετες επενδύσεις για την επεξεργασία των αποβλήτων και του νερού (Yu et al., 2009). Από την άλλη πλευρά, τέτοιες διαδικασίες μπορούν να παράσχουν ελεγχόμενο περιβάλλον, καλή ανάκτηση, υψηλή επιλεκτικότητα, υψηλή καθαρότητα, το οποίο επιτρέπει τα ανακτώμενα μέταλλα να πωληθούν χωρίς περαιτέρω επεξεργασία (Li et al., 2004 · Youssef et al., 2012).

3. Περιβαλλοντική και οικονομική αποτίμηση

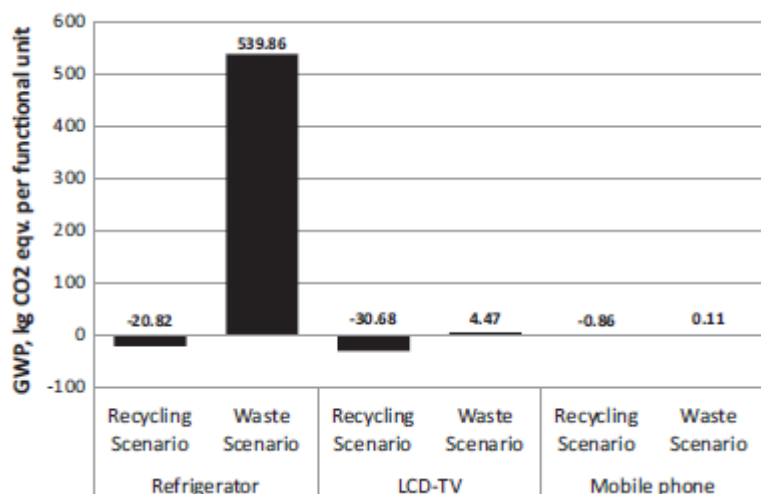
Η βιβλιογραφία που μελετήθηκε, εξετάζει κυρίως τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης WEEE. Οικονομικά στοιχεία βρέθηκαν μονάχα σε τρία άρθρα. Μπορεί να υποστηριχτεί ότι το περιβαλλοντικό όφελος αποτελεί τον πρωταρχικό στόχο της ανακύκλωσης WEEE, ενώ το οικονομικό περνά σε δεύτερη μοίρα.

Στις περισσότερες μελέτες, η AKZ ήταν το εργαλείο για να εξαχθούν συμπεράσματα για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ωστόσο, χρησιμοποιήθηκαν και η μέθοδος Biwer-Heinzle, η τεχνική MAGIQ και η ανάλυση CEENE. Το πεδίο μελέτης κάθε έρευνας καθώς και οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη, ποικίλουν σημαντικά. Παρόλα αυτά, το γενικό συμπέρασμα όλων των μελετών υπέδειξε ένα καθαρό περιβαλλοντικό όφελος, το οποίο προκύπτει κυρίως από την ανάκτηση υλικών και ενέργειας, με αποτέλεσμα την ανάγκη για λιγότερη εξόρυξη και πρωτογενή παραγωγή υλικών, αλλά και παραγωγή ενέργειας.

3.1 Περιβαλλοντική ανασκόπηση βιβλιογραφίας για περιπτώσεις περιοχών ή χωρών

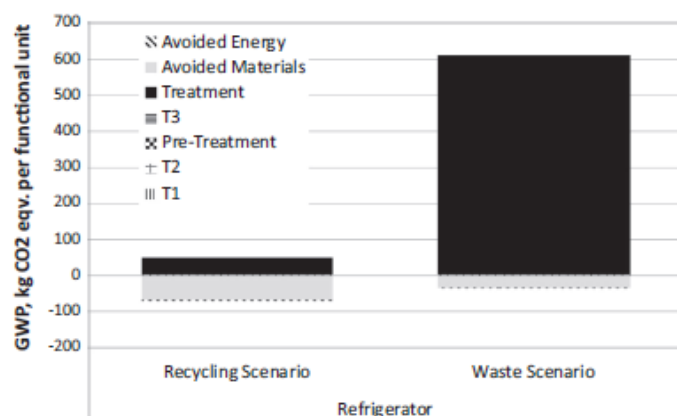
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν μελέτες για την ανακύκλωση WEEE στη Νορβηγία, στο Βέλγιο, στη νομαρχία Φουκουόκα της Ιαπωνίας, στην περιοχή Λομβαρδία της Ιταλίας, στην Κίνα και στην Ελβετία.

Οι Baxter et al. (2016) μελέτησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ως προς το δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης (GWP), για τα ψυγεία, τις τηλεοράσεις LCD και τα κινητά τηλέφωνα, στη Νορβηγία. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης WEEE συγκρίθηκαν με αυτές της απόρριψής τους. Θα ήταν ορθότερο να χρησιμοποιηθεί ένα ευρύ φάσμα δεικτών, παρ'όλα αυτά, η ανάλυση δείχνει ότι οι τάσεις γενικά διατηρούνται σε όλο το φάσμα των δεικτών, με την αξιοσημείωτη εξαίρεση της τεράστιας επιβάρυνσης του GWP από τα ψυκτικά υλικά. Στο σχήμα 18 παρουσιάζονται τα GWP για κάθε τύπο αποβλήτου και κάθε σενάριο. Καθαρά δυναμικά, σε κιλά ισοδυνάμων του CO₂ ανά λειτουργική μονάδα, δίνονται από τους αριθμούς. Υπάρχει ένα συνολικό όφελος σε όρους GWP που συνδέεται με το σενάριο ανακύκλωσης και για τις τρεις κατηγορίες WEEE που μελετήθηκαν. Τα καθαρά δυναμικά είναι αρνητικά και συνεπώς καλύτερα από τη μηδενική, δεν κάνω τίποτα επιλογή. Αυτό σημαίνει ότι το όφελος που προέρχεται από την αποφυγή παραγωγής υλικών και ενέργειας υπερβαίνει το περιβαλλοντικό κόστος της επεξεργασίας.



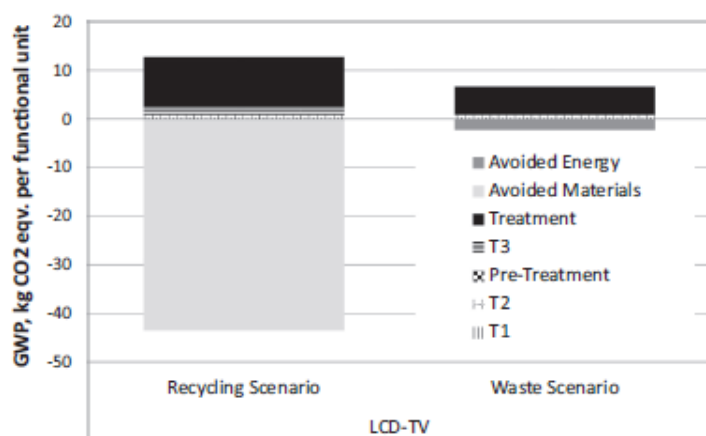
Σχήμα 18 : Δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης για τα σενάρια επεξεργασίας αποβλήτων (Baxter et al., 2016)

Το σχήμα 19 δείχνει την ανάλυση για τα ψυγεία. Είναι προφανές ότι ορισμένα στάδια είναι πολύ πιο σημαντικά από άλλα. Οι περισσότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις προκύπτουν από τις διάφορες πτυχές της επεξεργασίας, και τα περισσότερα οφέλη προκύπτουν από την ανάκτηση υλικών. Η πρωτοβάθμια επεξεργασία, η μεταφορά και η ανακτώμενη ενέργεια φαίνονται σχετικά ασήμαντες. Στο σενάριο διάθεσης των αποβλήτων οι εκπομπές των ψυκτικών αερίων, που μοντελοποιήθηκαν ως HFCs, συντελούν σε ένα πολύ μεγάλο GWP – μόλις 400 g αερίου έχουν ως αποτέλεσμα κοντά στα 600 kg ισοδυνάμων του CO₂. Αυτό εκτιμάται ως το 96% της συνολικής GWP επιβάρυνσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν, ότι η κατάλληλη διαχείριση των αποβλήτων ψύξης ώστε να προληφθεί η διαρροή των ψυκτικών, και η αποτελεσματική ανάκτηση/ καταστροφή των ψυγείων κατά την επεξεργασία, είναι μακράν ο πιο σημαντικός παράγοντας για το GWP της αλυσίδας αξίας. Στο σενάριο της ανακύκλωσης, πάνω από 30 kg σιδήρου και πλαστικών ανακτώνται. Το συνολικό GWP όφελος της ανάκτησης υλικών αναιρείται αν μονάχα 50 g ψυκτικών επιτραπούν να διαρρεύσουν στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 19 : GWP οφέλη και επιβαρύνσεις των διαφορετικών σταδίων για τα ψυγεία (Baxter et al., 2016)

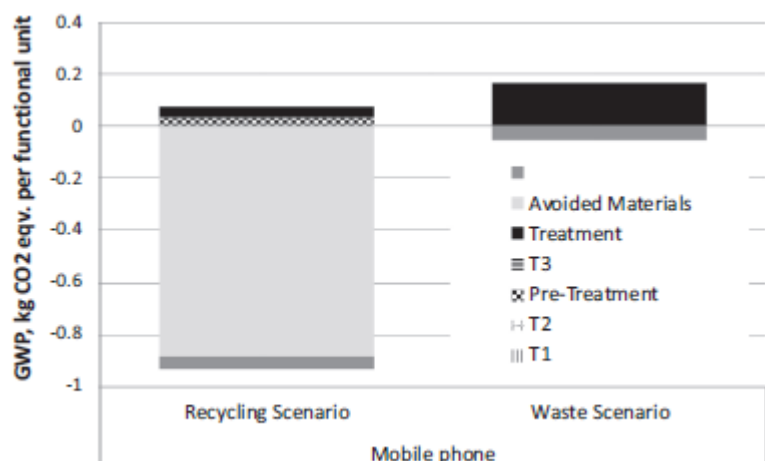
Η ανάλυση της αλυσίδας αξίας για GWP στην επεξεργασία των τηλεοράσεων LCD παρουσιάζεται στο σχήμα 20. Σε αντίθεση με τα ψυγεία, μερικά από τα στάδια μεταφοράς έχουν ένα μικρό αλλά αισθητό αποτέλεσμα. Στο σενάριο ανακύκλωσης, τα περισσότερα οφέλη προκύπτουν από τα ανακτώμενα πλαστικά με κάποιες ποσότητες σιδήρου, χαλκού και αλουμινίου να ανακτώνται επίσης. Η επεξεργασία και η μεταφορά στο σενάριο ανακύκλωσης είναι λίγο πιο επιβαρυνμένη συνολικά σε σχέση με το σενάριο διάθεσης αποβλήτων – αναμενόμενο καθώς τα απόβλητα μεταφέρονται πιο μακριά και μετά επεξεργάζονται πιο προσεκτικά.



Σχήμα 20 : GWP οφέλη και επιβαρύνσεις των διαφορετικών σταδίων για τις τηλεοράσεις LCD (Baxter et al., 2016)

Για τα κινητά τηλέφωνα, η συνολική ανάλυση του GWP φαίνεται στο σχήμα 21. Αυτό δείχνει μικρή αλλά αισθητή συνεισφορά της μεταφοράς και πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (αφαίρεση, ξεχωριστή μεταφορά και επεξεργασία των μπαταριών). Πάλι τα ανακτώμενα υλικά στο σενάριο ανακύκλωσης έχουν την πιο σημαντική συμβολή, δεσπόζοντας τόσο στο συνολικό όφελος όσο και στη συνολική επίδραση. Το σενάριο διάθεσης αποβλήτων δείχνει μια σχετικά μεγάλη επιβάρυνση, με λίγο GWP να εξοικονομείται από την ανάκτηση ενέργειας από τα πλαστικά. Πολύ σημαντική η ανάκτηση ειδικά του χρυσού και σε κάποιο βαθμό του ασημιού, αν και υπάρχουν σε επίπεδα ιχνών. Τα πολύτιμα μέταλλα είναι ακριβό να εξορυχτούν τόσο από περιβαλλοντικούς όσο και από οικονομικούς όρους. Ο προσδιορισμός της ακριβούς σύνθεσης των αποβλήτων κινητών τηλεφώνων σε σχέση με τα πολύτιμα υλικά είναι μια δύσκολη εργασία Chancerel and Rotter (2009) · Chancerel et al. (2015). Το βασικό σημείο είναι ότι τα ίχνη υλικών κυμαίνονται σε mg και μπορούν να έχουν πολύ σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, και ότι η ανάκτηση αυτών των υλικών είναι υψίστης σημασίας στην ανάπτυξη ενός καλού συνολικού περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Η ανάλυση δείχνει ότι περίπου 1 kg

ισοδυνάμων CO₂ εξοικονομείται από την υπεύθυνη ανακύκλωση μιας μονάχα συσκευής κινητού.



Σχήμα 21 : GWP οφέλη και επιβαρύνσεις των διαφορετικών σταδίων για τα κινητά τηλέφωνα (Baxter et al., 2016)

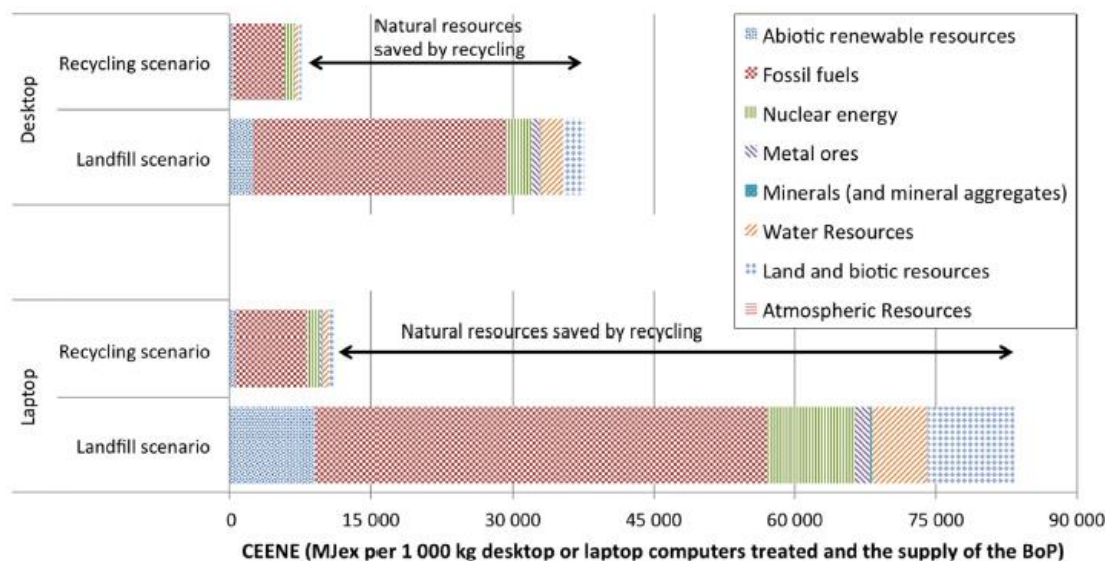
Στον πίνακα 10 βλέπουμε το όφελος ως απλή διαφορά ανάμεσα στα δύο σενάρια διάθεσης.

Waste fraction	GWP, kilograms of CO2 equivalent per functional unit		
	Impact of waste scenario	Impact of recycling scenario	Net effect of value chain
Refrigerators	539.90	-20.82	560.72
LCD-TVs	4.47	-30.67	35.14
Mobile phones	0.11	-0.86	0.97

Πίνακας 10 : Συνολική επίδραση στο GWP της αλυσίδας αξίας της επεξεργασίας, ανά συσκευή (Baxter et al., 2016)

Στη μελέτη των Van Eygen et al. (2015), γίνεται σύγκριση της ανακύκλωσης σταθερών και φορητών υπολογιστών με την υγειονομική ταφή τους, ως προς την κατανάλωση πόρων, με βάση την ανάλυση CEENE, στο Βέλγιο. Η σύγκριση των δύο σεναρίων για τους σταθερούς και φορητούς υπολογιστές φαίνεται στο σχήμα 22. Είναι σαφές, για τους σταθερούς καθώς και τους φορητούς υπολογιστές, ότι η ανακύκλωση αυτών των συσκευών είναι πολύ ωφέλιμη σε σχέση με την υγειονομική ταφή αυτού του ρεύματος αποβλήτων, από άποψη κατανάλωσης πόρων. Η διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων είναι ιδιαίτερα μεγάλη για τους φορητούς υπολογιστές. Αυτό συμβαίνει επειδή αυτές οι συσκευές είναι μικρότερες και πιο συμπαγείς λόγω της σμίκρυνσης των συσκευών, συντελώντας σε υψηλότερη συγκέντρωση πολύτιμων πόρων. Η ανακύκλωση αυτών των συσκευών επομένως έχει μεγαλύτερη επίπτωση, σε σχέση με τους σταθερούς. Έτσι αν και στην περίπτωση των φορητών, μικρότερο ποσοστό υλικών ανακυκλώνονται, ωστόσο η αποφυγή επιπτώσεων που επιτυγχάνεται μέσω της ανακύκλωσης είναι υψηλότερη. Τελικά, η κατανάλωση φυσικών πόρων στο σενάριο της ανακύκλωσης είναι

αρκετά χαμηλότερη από ότι στην περίπτωση της ταφής των WEEE : 80 και 87% λιγότερη κατανάλωση πόρων επιτυγχάνεται για τους σταθερούς υπολογιστές και τους φορητούς αντίστοιχα, ως εκ τούτου εξοικονομούνται σημαντικές ποσότητες πρωτογενών υλικών.



Σχήμα 22 : Σύγκριση με την ανάλυση CEENE των σεναρίων ανακύκλωσης και υγειονομικής ταφής (Van Eygen et al., 2015)

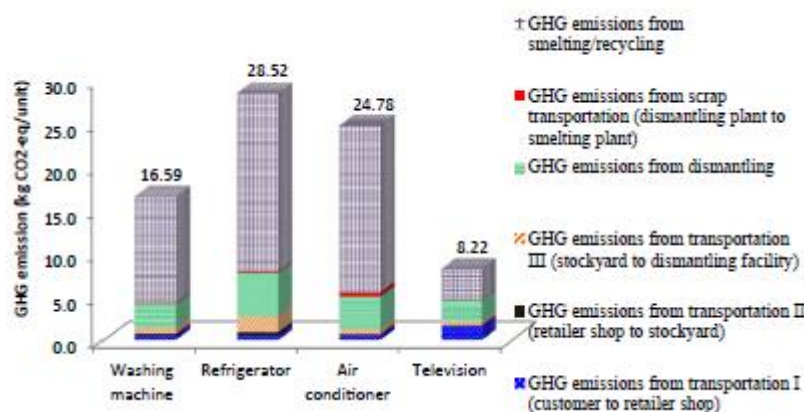
Οι Menikpura et al. (2014), πραγματοποίησαν AKZ για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) στη Νομαρχία της Φουκουόκα, στην Ιαπωνία, για την ανακύκλωση πλυντηρίων, ψυγείων, κλιματιστικών και τηλεοράσεων. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση των εκπομπών GHG με αυτές που προκύπτουν από την εξόρυξη ίδιων ποσοτήτων υλικών με αυτά που ανακτώνται.

Η διαδικασία ανακύκλωσης WEEE καταναλώνει μια σημαντική ποσότητα ενέργειας και προκαλεί εκπομπές GHG. Οι υψηλότερες εκπομπές GHG προήλθαν από τη διαδικασία τήξης των WEEE (74%, 72%, 78% και 43% από τα πλυντήρια, τα ψυγεία, τα κλιματιστικά και τις τηλεοράσεις αντίστοιχα), ακολουθούμενη από την αποσυναρμολόγηση των WEEE και τη μεταφορά. Για το παράδειγμα ενός πλυντηρίου, η λεπτομερής αξιολόγηση των εκπομπών GHG παρουσιάζεται στον πίνακα 11. Οι συνολικές εκπομπές GHG από την ανακύκλωση των WEEE, προέκυψαν από την πρόσθεση των επιμέρους εκτιμώμενων εκπομπών για κάθε στάδιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 23. Οι υψηλότερες συνολικές εκπομπές GHG εντοπίστηκαν για την ανακύκλωση των ψυγείων και στη συνέχεια για τα κλιματιστικά, τα πλυντήρια και τις τηλεοράσεις. Επιπλέον η συνεισφορά στις συνολικές εκπομπές GHG για τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής εκτιμήθηκαν, όπως φαίνεται στο σχήμα 24.

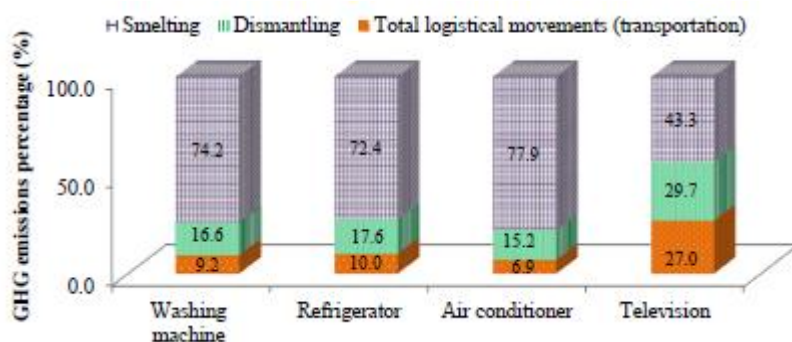
Recovered materials	Composition of dismantled materials (%)	Amount to be recycled (kg)/unit	Recyclability of materials ¹ (%)	Recycled materials (kg/unit)	CO ₂ emissions from recycling (kg CO ₂ -eq/kg of material) ¹	CO ₂ emissions (kg CO ₂ -eq/unit)
Fe	74.35	17.56	95.00	16.68	0.59	9.91
Cu	2.72	0.64	95.00	0.61	0.59	0.36
Al	1.08	0.26	95.00	0.24	0.31	0.08
Pb and Zn ²	0.04	0.01	95.00	0.01	0.59	0.01
Plastic	21.80	5.15	90.00	4.63	0.42	1.97
Total	100.00	23.61		22.18		12.31

Source: ¹JLCA, 2013; ²Estimation has been done assuming this is a mixture of 50% of Pb and 50% Zn.

Πίνακας 11 : Εκπομπές GHG από την τήξη/ανακύκλωση των αποσυναρμολογημένων μετάλλων/υλικών από ένα πλυντήριο (Menikpura et al., 2014)



Σχήμα 23 : Συνολικές εκπομπές GHG από την ανακύκλωση WEEE (Menikpura et al., 2014)



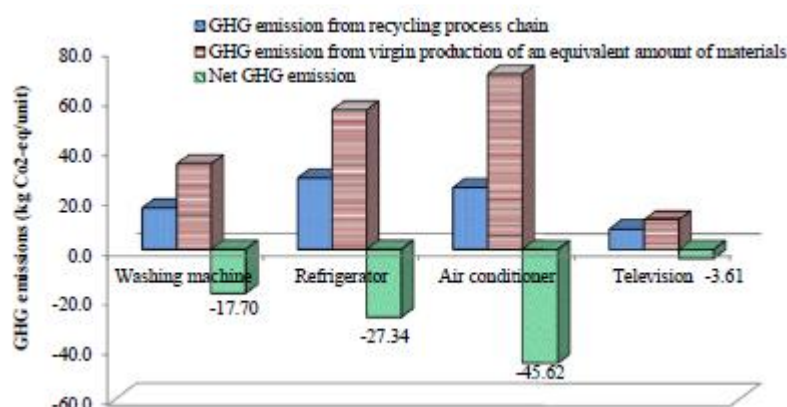
Σχήμα 24 : Συνεισφορά των διαφορετικών σταδίων στις συνολικές εκπομπές GHG (Menikpura et al., 2014)

Η μελέτη κατέληξε ότι μια σημαντική ποσότητα εκπομπών GHG θα μπορούσε να αποφευχθεί, η οποία σε αντίθετη περίπτωση θα προέκυπτε μέσω της παραγωγής νέων υλικών. Για παράδειγμα, η ανακύκλωση ενός πλυντηρίου, ενός ψυγείου, ενός κλιματιστικού και μιας τηλεόρασης θα συνέβαλε σε μείωση των εκπομπών GHG κατά 17.70, 27.34, 45.62 και 3.61 kg ισοδυνάμων του CO₂ αντίστοιχα. Για το παράδειγμα του πλυντηρίου, εκτιμώνται αρχικά τα πιθανά υλικά που μπορούν να ανακτηθούν, πίνακας 12, και στη συνέχεια οι εκτιμώμενες εκπομπές GHG που μπορούν πιθανώς να αποφευχθούν από την ίση ποσότητα παραγωγής πρωτογενών υλικών/μετάλλων. Σύμφωνα με αυτή την ανάλυση, οι συνολικές εκπομπές GHG από ίση ποσότητα παραγωγής πρωτογενών υλικών (22.18kg υλικών/μονάδα) θα είναι 34.29 kg ισοδυνάμων CO₂/ βάρος μονάδας για το πλυντήριο. Παρομοίως, οι

εκτιμώμενες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την πρωτογενή παραγωγή ίσης ποσότητας υλικών θα είναι 55.94 kg ισοδυνάμων CO₂/ βάρος μονάδας για ψυγείο, 70.40 kg ισοδυνάμων CO₂/ βάρος μονάδας για κλιματιστικό και 11.87 kg ισοδυνάμων CO₂/ βάρος μονάδας για τηλεόραση. Η εκτίμηση των καθαρών εκπομπών GHG από την ανακύκλωση του βάρους μονάδας ενός πλυντηρίου, ενός ψυγείου, ενός κλιματιστικού και μιας τηλεόρασης μετρήθηκε ίση με -17.70, -27.34, -4562 και -3.61 kg ισοδυνάμων CO₂ αντίστοιχα, σχήμα 25.

Recovered materials	Recycled amount (kg/unit)	CO ₂ emission from virgin production process (kg CO ₂ -eq/kg of material)	Avoided CO ₂ emission via virgin production (kg CO ₂ -eq/unit)
Fe	16.68	1.47	24.47
Cu	0.61	1.13	0.69
Al	0.24	9.22	2.24
Pb and Zn	0.01	1.68	0.02
Plastics	4.63	1.48	6.87
Total	22.18		34.29

Πίνακας 12 : Αποφευχθέντες εκπομπές GHG σε σύγκριση με την πρωτογενή παραγωγή με αναφορά τα ανακτώμενα υλικά από ένα πλυντήριο (Menikpura et al., 2014)



Σχήμα 25 : Εκπομπές GHG από την ανακύκλωση WEEE, την πρωτογενή παραγωγή και οι καθαρές εκπομπές GHG (Menikpura et al., 2014)

Αξίζει να αναφερθεί ότι στη μελέτη αυτή θεωρήθηκε ότι η ανάκτηση των υλικών συμβαίνει μόνο μια φορά με την ανακύκλωση. Ωστόσο κάποια υλικά μπορούν να ανακυκλωθούν άπειρες φορές. Για παράδειγμα, μέταλλα όπως το ατσάλι, το αλουμίνιο και ο χαλκός σταθερά διατηρούν τις ιδιότητές τους ανεξάρτητα από το πόσες φορές θα υποστούν τήξη κατά τη διάρκεια ανακύκλωσης. Ως εκ τούτου, οι πραγματικές επιπτώσεις ενός κατάλληλου σχεδίου ανακύκλωσης στο κλίμα θα είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις εκτιμήσεις σε αυτή τη μελέτη.

Η μελέτη των Biganzoli et al. (2015), επικεντρώνεται στο σύστημα ανακύκλωσης WEEE της περιοχής της Λομβαρδίας, στην Ιταλία, για το έτος 2011. Η AKZ του τοπικού συστήματος διαχείρισης WEEE έδειξε ότι τα οφέλη που προκύπτουν από την ανάκτηση υλικών και ενέργειας, εξισορροπούν τις επιβαρύνσεις των διαδικασιών διαχείρισης με μόνες εξαιρέσεις

δύο κατηγορίες επιπτώσεων (ανθρώπινη τοξικότητα - επιδράσεις καρκίνου και τοξικότητα φρέσκου νερού). Οι κατηγορίες WEEE των οποίων η διαχείριση και ανάκτηση ήταν πιο επωφελής για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία είναι οι R3 και R5 (κατηγορίες όπως περιγράφονται στο 2.1). Η ανακύκλωση των WEEE το 2011 πέτυχε την αποφυγή εκπομπών 65,651 τόνων ισοδυνάμων CO₂ και κατανάλωσης ενέργειας 1315 Tj.

Βάση στη συνολική ισορροπία μάζας, οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση ενός τόνου από κάθε κατηγορία WEEE εκτιμήθηκαν. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 13, ο οποίος διαχωρίζει τη συνεισφορά της συλλογής και μεταφοράς αποβλήτων στο πρώτο εργοστάσιο επεξεργασίας και της πραγματικής διαδικασίας επεξεργασίας, περιλαμβανομένου της ανάκτησης μεμονομένων συστατικών, και των οφελών που προκύπτουν από τα αποφευχθέντα προϊόντα. Για την κατηγορία R3, η συνεισφορά του εργοστασίου επεξεργασίας αναφέρεται ξεχωριστά για τις CRTs και FPDs, θεωρώντας ότι αντιπροσωπεύουν το 97.6% και 2.4% των συνολικών R3 αποβλήτων, αντίστοιχα. Συνολικά, τα οφέλη που προκύπτουν από την ανάκτηση υλικών και ενέργειας από WEEE αντισταθμίζουν τις επιβαρύνσεις λόγω της επεξεργασίας των αποβλήτων, με τις ακόλουθες εξαιρέσεις :

- R1 : εξάντληση όζον, ανθρώπινη τοξικότητα, θαλάσσιος ευτροφισμός και τοξικότητα φρέσκου νερού
- R2 : εξάντληση όζον, ανθρώπινη τοξικότητα, τοξικότητα φρέσκου νερού και εξάντληση υδατικών πόρων
- R4 : ανθρώπινη τοξικότητα και τοξικότητα φρέσκου νερού
- R5 : ανθρώπινη τοξικότητα

Impact category	UM	Heaters and refrigerators (R1)			Large household appliances (R2)			TV and monitors (R3) ^a				Small household appliances (R4)			Lighting equipment (R5)		
		Collection and transport	Treatment process	Total	Collection and transport	Treatment process	Total	Collection and transport	FPD treatment	CRT treatment	Total	Collection and transport	Treatment process	Total	Collection and transport	Treatment process	Total
Climate change	kg CO ₂ eq.	58.96	-1,022	-963	50.36	-836	-786	38	-75	-21.49	-2,187	50	-788	-737	3,695	-863	-826
Ozone depletion	kg CFC-11 eq.	8.83E-06	8.12E-05	9.00E-05	7.53E-06	3.52E-05	4.27E-05	5.62E-06	-2.76E-06	-1.33E-04	-1.33E-04	7.53E-06	-5.39E-05	-4.64E-05	5.53E-06	-9.40E-05	-8.85E-05
Human toxicity (cancer effects)	CTUh	3.63E-06	1.68E-05	1.69E-03	3.09E-06	2.72E-03	2.72E-03	2.31E-06	1.51E-05	-1.074E-04	-8.70E-05	3.09E-06	1.70E-03	1.71E-03	2.27E-06	4.64E-05	4.86E-05
Human toxicity (non-cancer effects)	CTUh	4.99E-06	1.71E-04	1.76E-04	4.24E-06	1.91E-04	1.95E-04	3.12E-06	-3.17E-05	-1.86E-03	-1.89E-03	4.24E-06	-4.49E-04	-4.44E-04	3.12E-06	-4.71E-04	-4.68E-04
Particulate matter	kg PM2.5 eq.	0.03	-0.81	-0.78	0.02	-0.91	-0.89	0.02	-0.42	-18.37	-18.77	0.02	-6.94	-6.91	0.02	-0.77	-0.75
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq.	0.38	-4.68	-4.30	0.33	-3.41	-3.09	0.24	-0.95	-36.95	-37.66	0.33	-15.64	-15.32	0.24	-3.22	-2.98
Acidification	mol H ⁺ eq.	0.32	-5.89	-5.58	0.27	-6.63	-6.36	0.20	-8.24	-368.71	-376.76	0.27	-131.86	-131.59	0.20	-6.54	-6.34
Terrestrial eutrophication	mol N eq.	1.29	-10.17	-8.87	1.10	-9.33	-8.23	0.81	-1.63	-63.06	-63.88	1.10	-30.66	-29.56	0.81	-6.75	-5.94
Freshwater eutrophication	kg P eq.	0.01	-1.21	-1.20	0.01	-1.39	-1.38	0.01	-0.19	-7.78	-7.96	0.01	-4.01	-4.00	0.01	-0.44	-0.43
Marine eutrophication	kg N eq.	0.12	9.66	9.78	0.10	-0.85	-0.75	0.07	-0.15	-5.60	-5.68	0.10	-2.71	-2.61	0.07	-0.65	-0.58
Freshwater ecotoxicity	CTUe	57.21	16,198	16,255	49	26,323	26,371	36	-168	-15,278	-15,410	49	13,757	13,806	36	-258	-222
Water resource depletion	m ³ water eq.	0.08	-1.31	-1.23	0.07	0.73	0.80	0.05	-0.29	-11.16	-11.40	0.07	-3.75	-3.68	0.05	-4.31	-4.26
Mineral and fossil resource depletion	kg Sb eq.	0.17	-4.23	-4.06	0.14	-3.67	-3.53	0.11	-0.28	-8.89	-9.06	0.14	-5.59	-5.44	0.10	-3.43	-3.33
Cumulative Energy Demand (CED)	MJ eq.	1,010	-21,683	-20,673	863	-14,371	-13,508	649	-1,360	-39,103	-39,812	863	-24,102	-23,239	633	-20,506	-19,873

^a Separated results for 1 tonne of CRTs and 1 tonne of FPDs are reported in the Additional materials (Table E).

Πίνακας 13 : Δείκτες επιπτώσεων για την ανακύκλωση 1 τόνου από R1,R2,R3,R4 και R5 (Biganzoli et al., 2015)

Η ανάκτηση των τηλεοράσεων και των οθονών (R3) είναι αυτή με τα υψηλότερα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, με οφέλη σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων. Για όλες τις κατηγορίες WEEE οι επιβαρύνσεις της συλλογής και μεταφοράς αποβλήτων στις μονάδες επεξεργασίας είναι αμελητέες σε σχέση με εκείνες της συνολικής διαδικασίας διαχείρισης. Η περιβαλλοντική απόδοση του συνολικού συστήματος διαχείρισης WEEE, στην Λομβαρδία, το 2011, εκτιμήθηκε στον πίνακα 14.

Impact category	UM	TOTAL	Heaters and refrigerators (R1)	Large household appliances (R2)	TV and monitors (R3)	Small household appliances (R4)	Lighting equipment (R5)
Percentage contribution ^a							
Climate change	kg CO ₂ eq.	-65,651,553	-12.96%	-8.72%	-66.84%	-11.06%	-0.42%
Ozone depletion	kg CFC-11 eq.	-2	38.75%	15.17%	-130.23%	-22.25%	-1.44%
Human toxicity (cancer effects)	CTUh	50	29.94%	39.79%	-3.50%	33.74%	0.03%
Human toxicity (non-cancer effects)	CTUh	-39	3.95%	3.61%	-96.07%	-11.09%	-0.40%
Particulate matter	kg PM _{2.5} eq.	-458,352	-1.52%	-1.41%	-82.16%	-14.85%	-0.06%
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq.	-968,157	-3.93%	-2.32%	-78.07%	-15.58%	-0.10%
Acidification	mol H ⁺ eq.	-8,954,763	-0.55%	-0.52%	-84.44%	-14.47%	-0.02%
Terrestrial eutrophication	mol N eq.	-1,713,556	-4.58%	-3.50%	-74.82%	-16.99%	-0.12%
Freshwater eutrophication	kg P eq.	-219,984	-4.82%	-4.57%	-72.63%	-17.91%	-0.07%
Marine eutrophication	kg N eq.	-58,876	146.76%	-9.24%	-193.46%	-43.73%	-0.33%
Freshwater ecotoxicity	CTUe	162,335,984	88.49%	118.30%	-190.50%	83.76%	-0.05%
Water resource depletion	m ³ water eq.	-271,366	-4.00%	2.16%	-84.27%	-13.36%	-0.52%
Mineral and fossil resource depletion	kg Sb eq.	-298,088	-12.03%	-8.61%	-60.99%	-17.99%	-0.37%
Cumulative Energy Demand (CED)	MJ	-1,315,560,618	-13.89%	-7.48%	-60.73%	-17.40%	-0.50%

^a For each impact category, the percentage contribution of each WEEE category was calculated as "impact of the WEEE category / total impact × 100" and the sum of the five percentage contributions is -100% if the "total" is negative in sign, whereas +100% if the "total" is positive in sign.

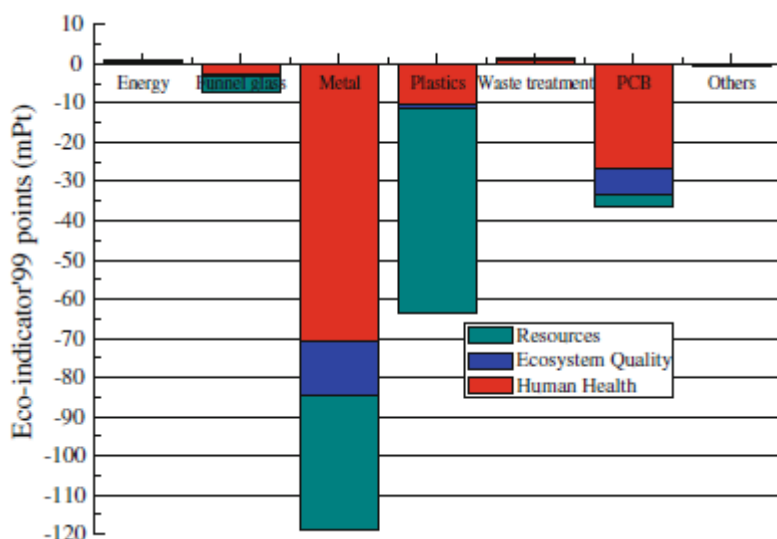
Πίνακας 14 : Περιβαλλοντική απόδοση του συνολικού συστήματος διαχείρισης WEEE στη Λομβαρδία το έτος 2011 και ποσοστιαία συνεισφορά κάθε κατηγορίας WEEE στα συνολικά αποτελέσματα (Biganzoli et al., 2015)

Οι Song et al. (2013), μελέτησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης WEEE στην Κίνα, για το διάστημα από το Δεκέμβριο του 2010 μέχρι τον Ιανουάριο του 2011. Στον πίνακα 15 φαίνονται τα WEEE ανά κατηγορία που ανακυκλώθηκαν στο διάστημα των 13 μηνών στην Κίνα. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης επιπτώσεων της διαχείρισης WEEE στην Κίνα, φαίνονται στο σχήμα 26. Η ανακύκλωση των μετάλλων αποφέρει τα πιο σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, 52.42% των συνολικών οφελών, ακολουθούμενη από την ανακύκλωση πλαστικών, τη διαχείριση PCB, και την επαναχρησιμοποίηση του γυαλιού. Μεταξύ των μετάλλων, ο χαλκός ήταν ο πιο σημαντικός, και συνείσφερε στο 72.49% των περιβαλλοντικών οφελών. Τα κύρια περιβαλλοντικά οφέλη ήταν από την κατανάλωση ενέργειας και τη διαχείριση των αποβλήτων. Από το σχήμα 26 επίσης φαίνεται ότι τα περιβαλλοντικά οφέλη ήταν πρώτα για την ανθρώπινη υγεία 48.52% και μετά για τους πόρους 41.61 % και για την ποιότητα του οικοσυστήματος 9.87%. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις φαίνονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στον πίνακα 16. Τα υψηλότερα οφέλη προήλθαν από την αποφυγή εκπομπών αρσενικού και καδμίου στο νερό, περίπου 49%. Τα δέκα είδη περιβαλλοντικών επιπτώσεων εκφρασμένα με τη μέθοδο CML δίνονται στον πίνακα 17. Στο σχήμα 27 φαίνεται σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, με την ανακύκλωση μετάλλων και πλαστικών, και τη διαχείριση PCB να δημιουργούν τα περισσότερα περιβαλλοντικά οφέλη. Υπάρχουν μεγάλες

διαφορές ανάμεσα στους διαφορετικούς παράγοντες επιπτώσεων, πχ η ανακύκλωση μετάλλων κυμαίνεται από -24.93% για ADP μέχρι -83.71% για το FAETP.

Types	TV sets	PCs	Air conditioners	Refrigerators	Washing machines	Total
Number (units)	1,390,684	4,747	9,557	63,530	106,220	1,574,738
Percentage	88.31	0.30	0.61	4.03	6.75	100.00
Quantity (tons)	16,118	35	272	2,236	2,112	20,773
Percentage	77.59	0.17	1.31	10.76	10.17	100.00

Πίνακας 15 : Ποσότητες WEEE ανά κατηγορία που ανακυκλώθηκαν από το Δεκέμβριο του 2010 μέχρι τον Ιανουάριο του 2011 στην Κίνα (Song et al., 2013)



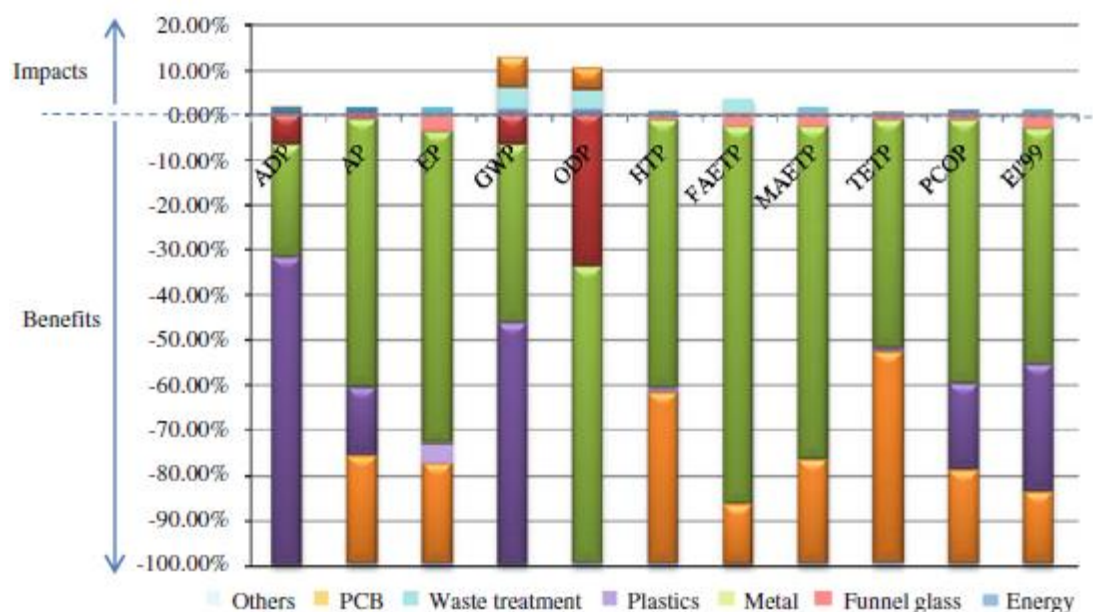
Σχήμα 26 : Περιβαλλοντικές επιδράσεις της διαχείρισης των WEEE (Song et al., 2013)

Category	Energy	Funnel glass	Metal	Plastics	Waste treatment	PCB	Others	Total	Ratio (%)
Fossil resources									
Natural gas	0.01	-3.75	-3.67	-22.50	0.07	-0.37	-0.01	-30.23	13.46
Crude oil	0.10	-0.29	-4.57	-29.50	0.26	0.55	-0.01	-33.47	14.90
Metal resources									
Nickel	0.00	-0.01	-2.54	0.00	0.00	-0.22	0.00	-2.77	1.23
Copper	0.00	0.00	-22.30	0.00	0.00	-2.67	-0.01	-24.99	11.13
Emissions to air									
Carbon dioxide	0.00	0.00	-0.92	-2.96	0.00	0.15	0.00	-3.73	1.66
Nitrogen oxides	0.01	-0.18	-3.68	-3.04	0.07	-0.28	0.00	-7.11	3.17
Cadmium	0.00	-0.03	-0.07	0.00	0.00	-3.78	-0.02	-3.89	1.73
Nickel	0.00	-0.01	-3.16	0.00	0.00	-2.75	-0.02	-5.93	2.64
Particulates, <2.5 µm	0.00	-0.12	-6.53	0.00	0.01	-1.08	-0.01	-7.73	3.44
Particulates, >2.5 µm, and <10 µm	0.00	-0.05	-7.01	0.00	0.01	-0.60	-0.01	-7.66	3.41
Sulfur dioxide	0.03	-0.12	-10.30	-2.31	0.01	-4.93	-0.03	-17.66	7.86
Emissions to water									
Arsenic, ion	0.02	-0.88	-22.10	0.00	0.14	-9.55	-0.11	-32.49	14.47
Cadmium, ion	0.00	-0.59	-15.30	0.00	0.16	-6.76	-0.07	-22.56	10.05
Others	0.66	-1.27	-16.80	-3.36	0.76	-4.32	-0.05	-24.39	10.85
Total	0.81	-7.30	-119.00	-63.60	1.47	-36.60	-0.36	-224.58	100

Πίνακας 16 : Κύριες συνεισφορές στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαδικασίας διαχείρισης των WEEE (mPt) (Song et al., 2013)

Category	Unit	Energy	Funnel glass	Metal	Plastics	Waste treatment	PCB	Others	Total
Abiotic depletion (ADP)	kg Sb eq	1.04E-04	-8.13E-04	-2.93E-03	-8.00E-03	5.11E-05	3.03E-05	-9.40E-06	-1.16E-02
Acidification (AP)	kg SO ₂ eq	1.57E-04	-2.04E-04	-9.54E-03	-2.40E-03	5.01E-05	-3.87E-03	-2.83E-05	-1.58E-02
Eutrophication (EP)	Kg PO ₄ eq	1.30E-05	-1.38E-04	-2.44E-03	-1.51E-04	3.37E-05	-7.81E-04	-1.16E-05	-3.47E-03
Global warming (GWP100)	kg CO ₂ eq	1.54E-02	-8.73E-02	-4.94E-01	-6.70E-01	5.74E-02	8.52E-02	-1.10E-03	-1.09E+00
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	3.43E-10	-9.45E-09	-1.83E-08	0.00E+00	1.12E-09	1.38E-09	-9.81E-11	-2.50E-08
Human toxicity (HTP)	kg 1,4-DB eq	3.54E-03	-5.00E-02	-1.98E+00	-3.65E-02	1.85E-02	-1.25E+00	-1.04E-02	-3.30E+00
Fresh water aquatic ecotox.(FAETP)	kg 1,4-DB eq	2.40E-03	-2.86E-02	-8.48E-01	-5.55E-04	3.31E-02	-1.35E-01	-5.94E-04	-9.77E-01
Marine aquatic ecotoxicity (MAETP)	kg 1,4-DB eq	5.20E+00	-6.98E+01	-1.73E+03	-3.13E+00	2.74E+01	-5.46E+02	-6.82E+00	-2.32E+03
Terrestrial ecotoxicity (TETP)	kg 1,4-DB eq	1.93E-05	-1.65E-04	5.83E-03	-1.03E-04	2.86E-05	-5.37E-03	-4.11E-05	-1.15E-02
Photochemical oxidation (PCOP)	kg C ₂ H ₄ eq	5.99E-06	-1.01E-05	-4.39E-04	-1.43E-04	1.15E-06	-1.56E-04	-1.29E-06	-7.42E-04

Πίνακας 17 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις εκφρασμένες με τη μέθοδο CML (Song et al., 2013)



Σχήμα 27 : Σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων εκφρασμένων από διαφορετικές μεθόδους (Song et al., 2013)

Οι Hischier et al. (2005), μελέτησαν το σύστημα ανακύκλωσης στην Ελβετία για το έτος 2004. Στον πίνακα 18 αθροίζονται οι ροές υλικών για το έτος 2004. Αυτά τα κλάσματα προέρχονται από ένα σύνολο σχεδόν 75,000 τόνων συσκευών – περίπου 29% των οποίων είναι εξοπλισμός γραφείου, 24% μεγάλες οικιακές συσκευές, 18% συσκευές ψύξης, 15% καταναλωτικά ηλεκτρονικά και περίπου 10% μικρές οικιακές συσκευές. Κάποια μέταλλα όπως το αλουμίνιο δε λαμβάνονται υπόψη. Το αλουμίνιο προσφέρει σημαντικότερη οικολογική εξοικονόμηση για δευτερογενή παραγωγή σε σχέση με το ασάλι (περιλαμβάνεται στο μοντέλο), με συνέπεια να

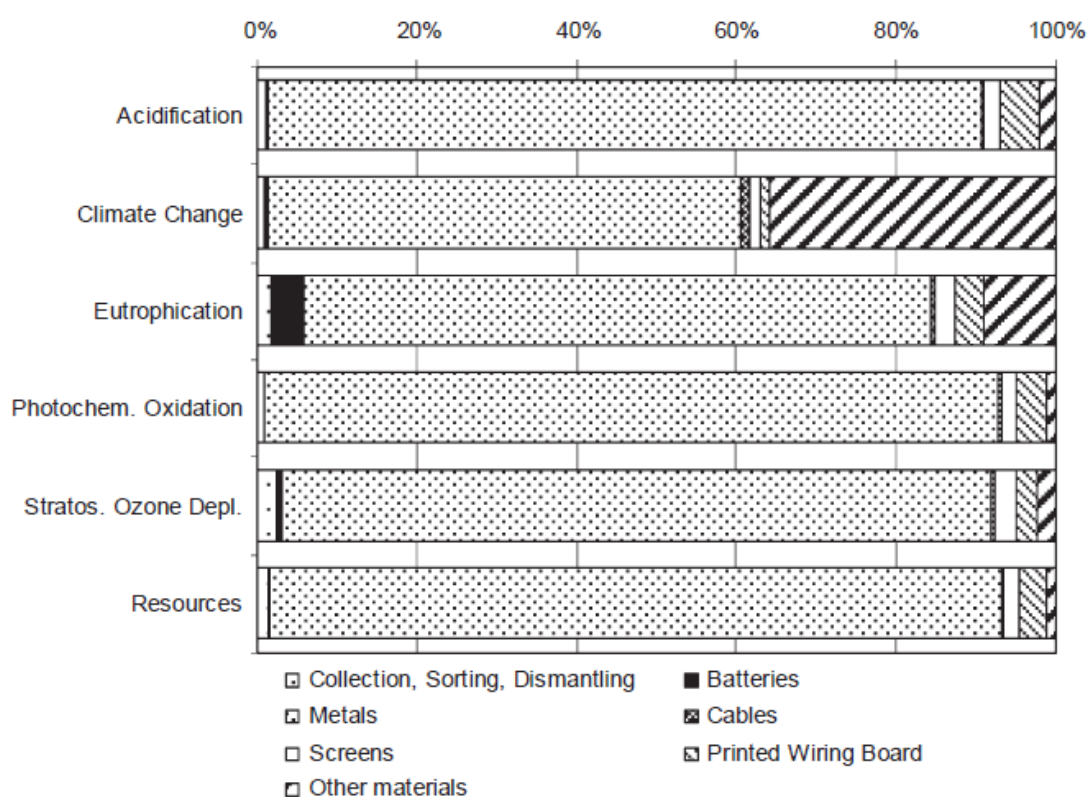
τα αποτελέσματα να είναι αμφισβητήσιμα . Λόγω έλλειψης δεδομένων, η πρωτογενής παραγωγή των πολύτιμων μετάλλων αντιπροσωπεύεται από την πρωτογενή παραγωγή πλατίνας. Σύμφωνα με τους Meadows et al. (2004), η πλατίνα και ο χρυσός, τα πιο σχετικά πολύτιμα μέταλλα μέσα στα κλάσματα WEEE, έχουν έναν παράγοντα έντασης ισοδύναμου υλικού περίπου 350,000kg/kg μετάλλου.

Fraction	Amount in t	In %
Batteries	204	0.3
Capacitors	120	0.2
Other hazardous materials	233	0.3
Metals	45,869	61.2
Metal-plastic mixtures	8776	11.7
Plastics	9133	12.2
Cables	1105	1.5
Screens (CRT & LCD)	6862	9.2
Printed wiring boards	1204	1.6
Other materials	1450	1.9
Total	74,957	100.0

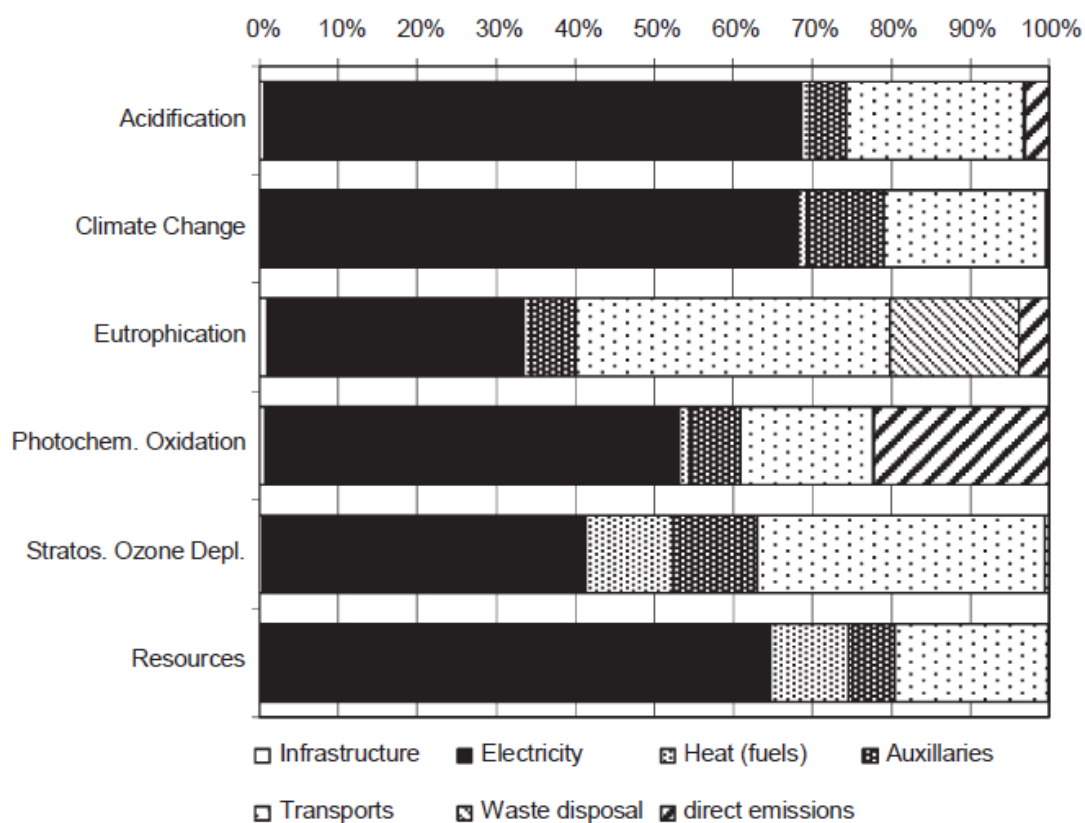
Πίνακας 18 : Τα κλάσματα που προκύπτουν από την ανάλυση ροής υλικών των δύο Ελβετικών συστημάτων συλλογής και ανακύκλωσης για το έτος 2004 (Hischier et al., 2005)

Το σχήμα 28 δείχνει τη σχετική συνεισφορά του ολοκληρωμένου συστήματος δευτερογενούς παραγωγής στις μη τοξικές κατηγορίες επιπτώσεων που δίνονται στην ολλανδική μεθοδολογία CML. Η συλλογή, διαλογή και αποσυναρμολόγηση έχουν το μεγαλύτερο μερίδιο, με τη συλλογή να κυριαρχεί. Οι δραστηριότητες διαλογής και αποσυναρμολόγησης συνεισφέρουν 10% στον ευτροφισμό και 40% στους αβιοτικούς πόρους και την κλιματική αλλαγή, ενώ η μηχανική επεξεργασία είναι υπεύθυνη για παραπάνω από το 75%. Το στάδιο της δευτερογενούς παραγωγής είναι υπεύθυνο για παραπάνω από το 90%. Το σχήμα 29 δείχνει μια λεπτομερή ανάλυση των επιπτώσεων από διάφορες δραστηριότητες μέσα στο στάδιο ανακύκλωσης μετάλλων. Το σημαντικότερο μερίδιο έχει η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται, καθώς και τα κόστη μεταφοράς των διάφορων υλικών. Αυτές οι επιπτώσεις είναι υπεύθυνες για το 70% του ευτροφισμού και παραπάνω από το 90% της οξύνισης. Στο σχήμα 30 φαίνεται η επιρροή των διαφόρων περαιτέρω σταδίων επεξεργασίας, για kg του αντίστοιχου κλάσματος. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι η επεξεργασία μπαταριών και πλακετών τυπωμένου κυκλώματος είναι αρκετά πιο σχετική από τη δευτερογενή παραγωγή ατσαλιού. Η επεξεργασία των μπαταριών είναι πολύ σημαντική για τον ευτροφισμό και την εξάντληση του στρατοσφαιρικού όζοντος ενώ η επεξεργασία των πλακετών τυπωμένου κυκλώματος είναι η πιο σημαντική για την οξίνιση, την φωτοχημική οξείδωση και την κατανάλωση αβιοτικών πόρων. Η δευτερογενής παραγωγή ατσαλιού είναι σημαντική ιδιαίτερα για τη φωτοχημική οξείδωση και την κατανάλωση αβιοτικών πόρων. Στα σχήματα 31 και 32 γίνεται σύγκριση των

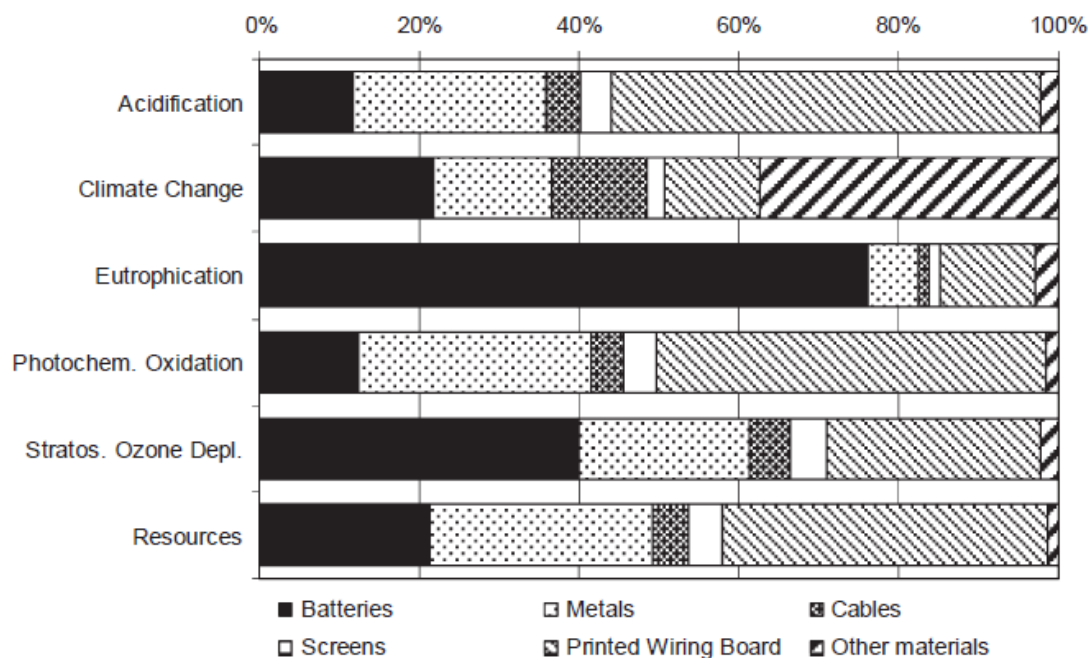
επιπτώσεων του μελετώμενου συστήματος της Ελβετίας με το σενάριο αναφοράς. Οι επιπτώσεις του συστήματος ανακύκλωσης WEEE παρουσιάζονται με μαύρες μπάρες στη θετική πλευρά, ενώ οι η αποφυγή της πρωτογενούς παραγωγής παρουσιάζεται με λευκές μπάρες στην αρνητική πλευρά του άξονα χ. Το άθροισμα των παραγόμενων επιβαρύνσεων (μαύρες μπάρες) είναι αρκετά χαμηλότερο από τις επιβαρύνσεις που αποφεύχθηκαν (λευκές μπάρες). Οι κατηγορίες επιπτώσεων του σχήματος 31 κυριαρχούνται από την πρωτογενή παραγωγή ατσαλιού και πολύτιμων μετάλλων, ενώ οι παράγοντες τοξικότητας του σχήματος 32 κυριαρχούνται από την καύση όλων των WEEE στο σενάριο αναφοράς. Η ποσότητα τοξικότητας που προκαλείται από το Ελβετικό σύστημα συλλογής και ανακύκλωσης είναι ελάχιστης σημασίας σε σύγκριση με το στάδιο καύσης.



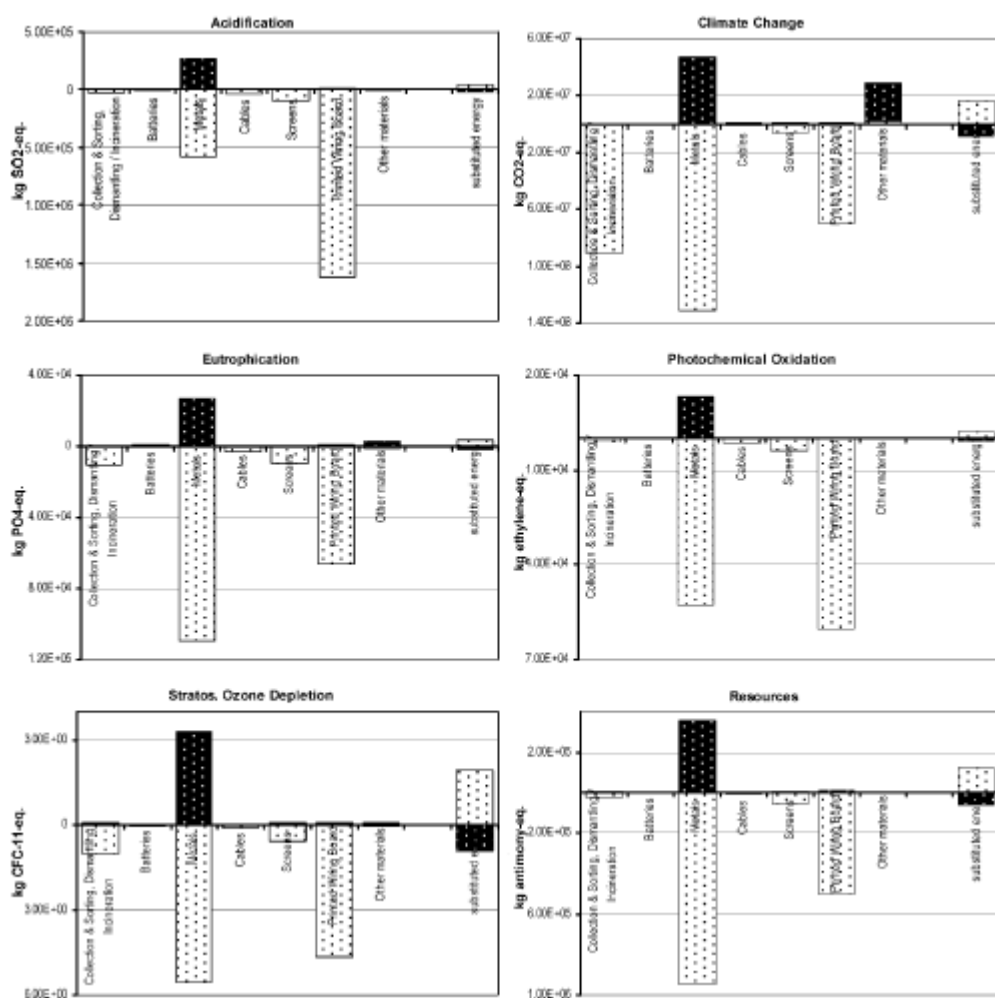
Σχήμα 28 : Σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του ολοκληρωμένου συστήματος συλλογής και ανακύκλωσης (Hischier et al., 2005)



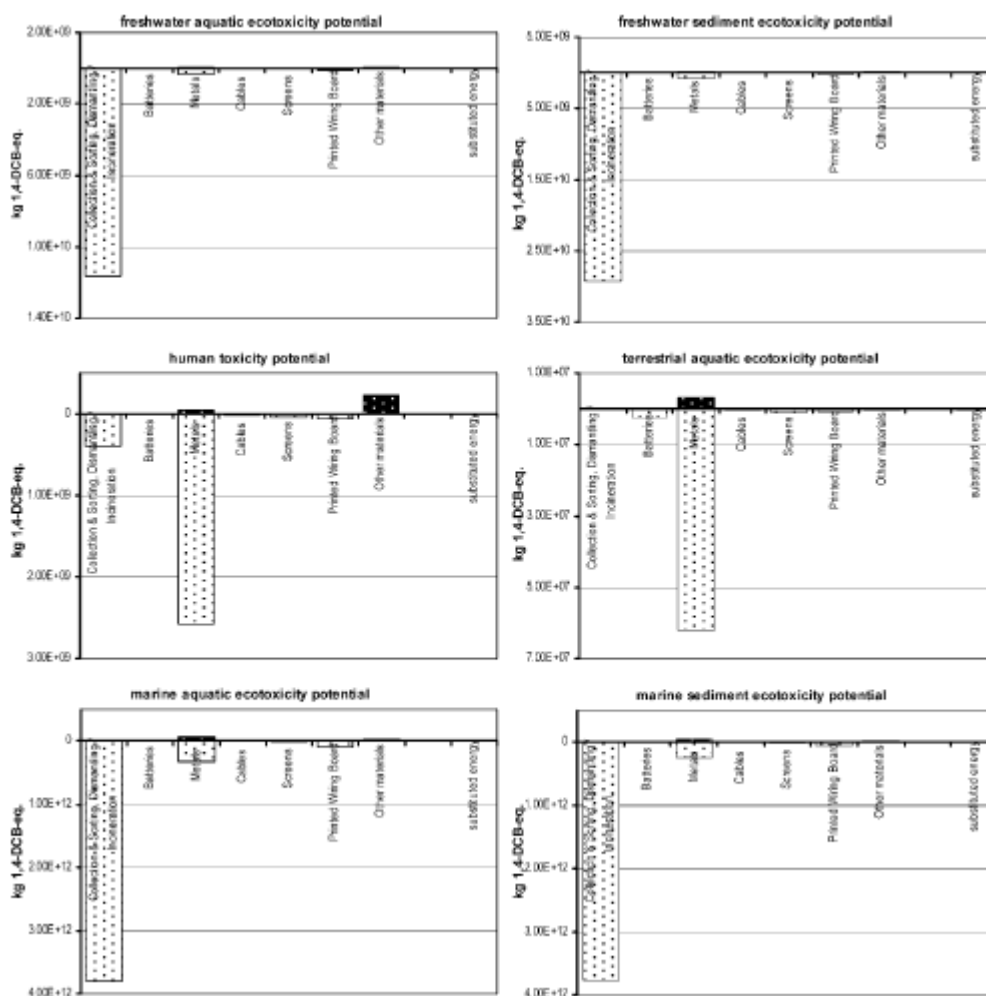
Σχήμα 29 : Σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της περαιτέρω διαχείρισης του μεταλλικού κλάσματος (Hischier et al., 2005)



Σχήμα 30 : Σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις για κίλο διαχειριζόμενου κλάσματος των διαφόρων δευτερογενών επιλογών παραγωγής (Hischier et al., 2005)



Σχήμα 31 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος ανακύκλωσης WEEE, σε σύγκριση με περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αποφεύγονται από την καύση των WEEE και την πρωτογενή παραγωγή υλικών (Hischier et al., 2005)



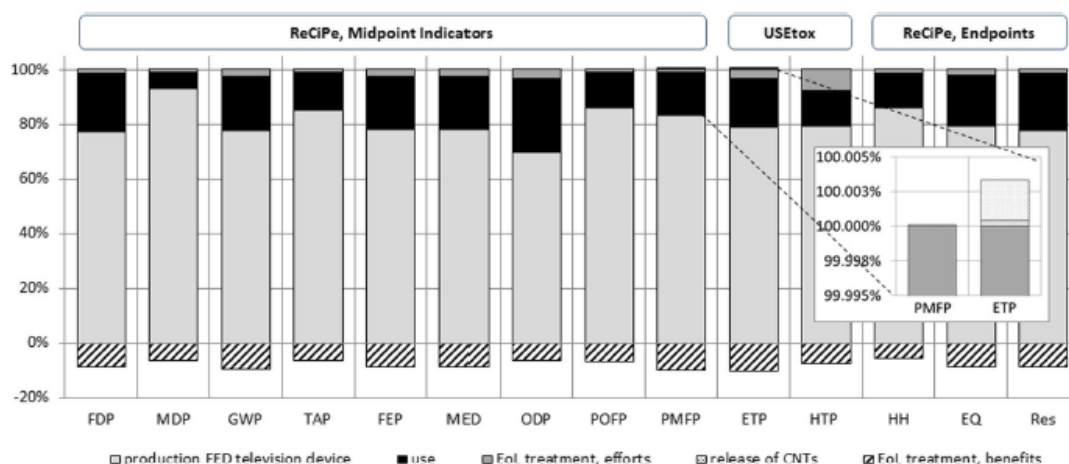
Σχήμα 32 : Δυναμικά τοξικότητας της δευτερογενούς παραγωγής, σε σύγκριση με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την καύση των WEEE και την πρωτογενή παραγωγή υλικών (Hischier et al., 2005)

3.2 Περιβαλλοντική ανασκόπηση βιβλιογραφίας για συγκεκριμένα WEEE

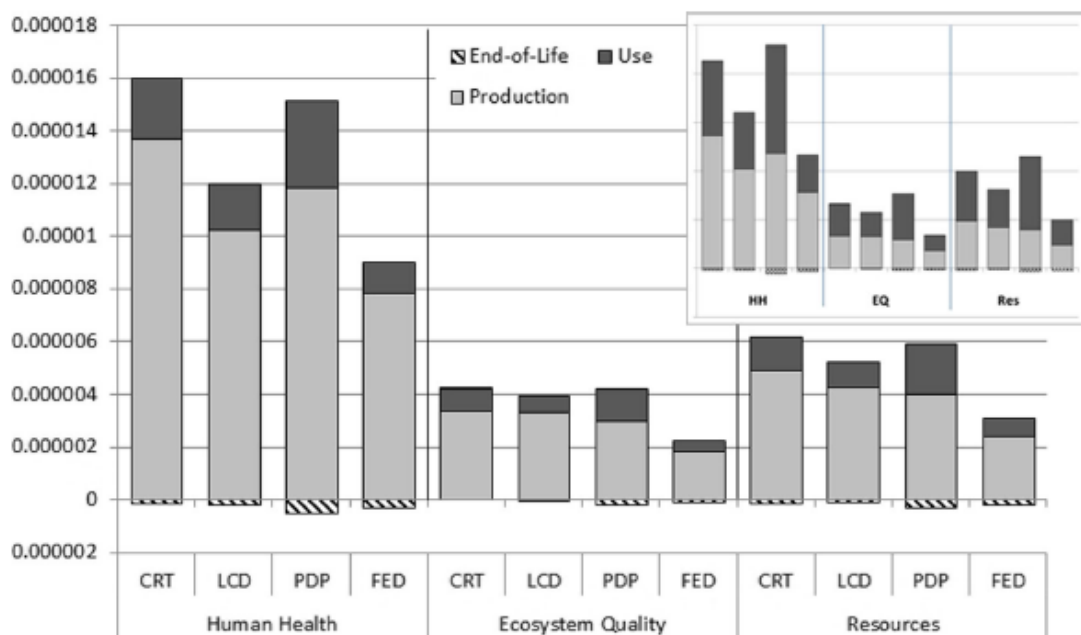
Σε κάποιες μελέτες όπως αυτές που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, η έρευνα επικεντρώθηκε απλά σε συγκεκριμένα WEEE. Ειδικότερα σε τηλεοράσεις, PCBs, υπολογιστές, πλυντήρια πιάτων και λαμπτήρες.

Ο Hischier (2014), πραγματοποίησε μια AKZ για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μιας τηλεόρασης FED και έπειτα τη σύγκρινε με άλλες τεχνολογίες τηλεοράσεων και συγκεκριμένα με τις CRT, LCD και PDP. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μιας τηλεόρασης FED φαίνονται στο σχήμα 33. Τα αποτελέσματα δείχνουν μια ξεκάθαρη υπεροχή της φάσης παραγωγής. Αυτό το στάδιο ζωής είναι υπεύθυνο για το 70% του ODP και σχεδόν του 95% του MDP των συνολικών επιπτώσεων. Οι επιπτώσεις από την απελευθέρωση ανθρακικών νανοσωλήνων είναι αμελητέες γιατί αποτελούν το 0.003% της συνολικής οικοτοξικότητας. Όσον αφορά τη

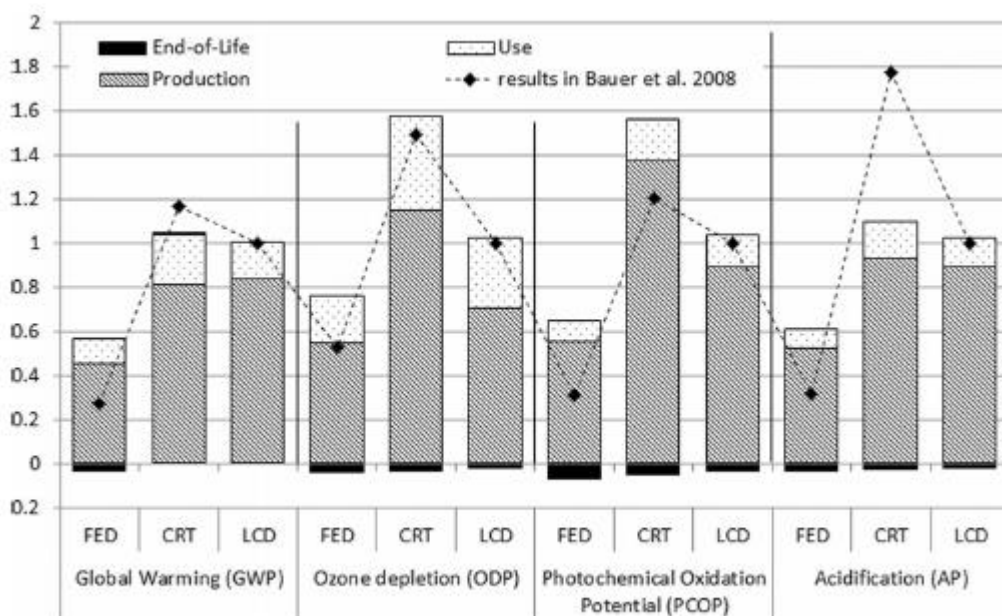
σύγκριση, χρησιμοποιείται ως λειτουργική μονάδα η μια τετραγωνική ίντσα οθόνης για μια ώρα παρακολούθησης τηλεόρασης, και παρουσιάζεται στο σχήμα 34. Και οι τέσσερις τεχνολογίες κυριαρχούνται από την παραγωγή των αντίστοιχων συσκευών, ενώ το στάδιο χρήσης (με βάση το Ελβετικό μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας) δείχνει μια ξεκάθαρα χαμηλότερη επίδραση. Όταν χρησιμοποιείται ένα περισσότερο ρυπαντικό μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας οι διαφορές ανάμεσα στις διάφορες τεχνολογίες γίνονται ακόμα πιο ευδιάκριτες. Αυτό φαίνεται στην μικρή εικόνα του σχήματος 34 και στην περίπτωση αυτή το στάδιο χρήσης γίνεται πιο σημαντικό. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι ανάλογη μελέτη είχε πραγματοποιηθεί από τους Bauer et al. (2008), δηλαδή 5 χρόνια νωρίτερα. Ένα χρονικό διάστημα στο οποίο υπήρξαν σημαντικές αναπτύξεις στον τομέα της ΑΚΖ. Ως συνέπεια, η σύγκριση ανάμεσα στους δύο υπολογισμούς δείχνει την επίδραση της ανάπτυξης στην μοντελοποίηση (πχ διεύρυνση των βάσεων δεδομένων, των κανόνων μοντελοποίησης, των κατασκευασμένων νανουλικών και άλλων). Η σύγκριση φαίνεται στο σχήμα 35 και υποδεικνύει μια εκπληκτική ομοιότητα των αποτελεσμάτων των δύο μελετών.



Σχήμα 33: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις μιας τηλεόρασης FED 36 ιντσών σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής της (Hischier, 2014)



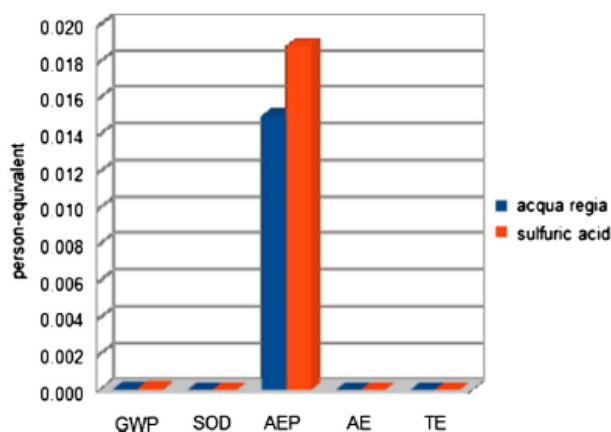
Σχήμα 34 : Επιπτώσεις για 1 ώρα παρακολούθησης τηλεόρασης από διαφορετικές τεχνολογίες τηλεόρασης. Η κύρια εικόνα βάση του μείγματος ηλεκτρικής ενέργειας της Ελβετίας και η μικρή εικόνα βάση του μείγματος ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρώπης (Hischier, 2014)



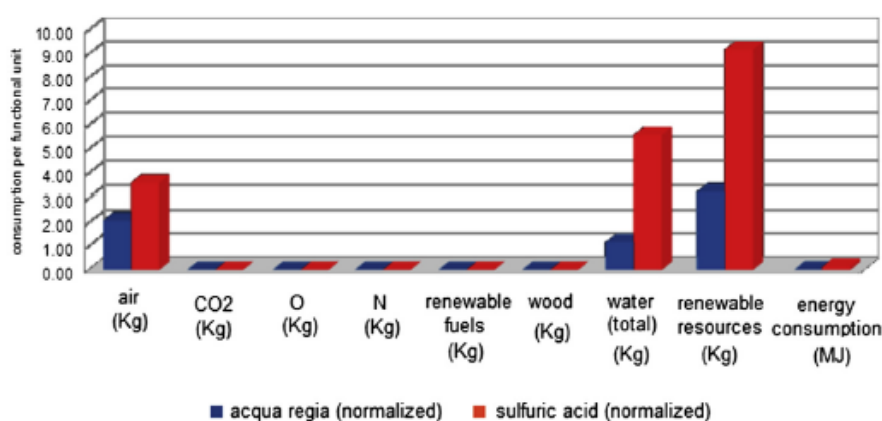
Σχήμα 35 : Σχετική επίπτωση των διαφόρων τεχνολογιών τηλεόρασης για 4 διαφορετικούς παράγοντες και συσχέτιση με τα αποτελέσματα της έρευνας των Bauer et al. (2008) (Hischier, 2014)

Οι Rubin et al. (2014), εφάρμοσαν AKZ για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη σύγκριση δύο διαδικασιών ανάκτησης χαλκού από PCBs. Και οι δύο διαδικασίες συνδυάζουν μηχανική και ηλεκτροχημική επεξεργασία και έχουν παρόμοια αποτελεσματικότητα. Η μία χρησιμοποιεί θειικό οξύ και η άλλη βασικό νερό (συνδυασμός νιτρικού και χλωρικού οξέος, αναλογία 1:3). Η αξιολόγηση των κατηγοριών επιπτώσεων έδειξε ότι η διαδικασία που χρησιμοποιεί βασικό νερό έχει καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση.

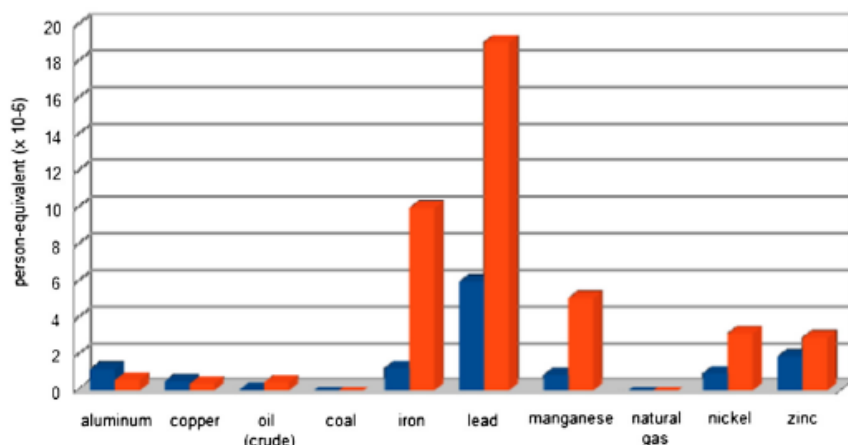
Το σχήμα 36 συνοψίζει τα ευρήματα που σχετίζονται με τις κατηγορίες επιπτώσεων κάθε διαδικασίας, μετά την κανονικοποίηση. Η οξύνιση είναι με διαφορά το μεγαλύτερο θέμα που παρουσιάζουν οι διαδικασίες, αναμενόμενα εξαιτίας της φύσης των ουσιών που χρησιμοποιούνται στις δυο διαδικασίες. Η διαδικασία με βάση το θειικό οξύ παρουσίασε τις πιο σημαντικές επιπτώσεις, οι οποίες είναι 1.26 φορές υψηλότερες σε σχέση με τη διαδικασία που χρησιμοποιεί βασιλικό νερό. Η κατανάλωση των ανανεώσιμων πόρων και της ανανεώσιμης ενέργειας παρουσιάζεται στο σχήμα 37. Το σχήμα 38 δείχνει τα ευρήματα για την κατανάλωση μη ανανεώσιμων πόρων, κυρίως μετάλλων. Η διαδικασία με βάση το βασιλικό νερό απαιτεί παραπάνω μονάχα αλουμίνιο (περίπου 2 φορές) και χαλκό (περίπου 1.3 φορές). Για την κατανάλωση των υπολοίπων υλικών υπερέρχει η διαδικασία με το θειικό οξύ και ειδικά για το μαγγάνιο (περίπου 6.2 φορές), το σίδηρο (8.2 φορές) και το μόλυβδο (περίπου 3.2 φορές) είναι αρκετά υψηλότερη.



Σχήμα 36 : Σύγκριση των κατηγοριών επιπτώσεων (Rubin et al., 2014)



Σχήμα 37 : Κατανάλωση ανανεώσιμων πόρων και ενέργειας (Rubin et al., 2014)



Σχήμα 38 : Κατανάλωση μη ανανεώσιμων πόρων (Rubin et al., 2014)

Οι Fogarasi et al. (2013), μελέτησαν με τη μέθοδο Biwer-Heinzle, λόγω ευχρηστίας, την περιβαλλοντική επίδραση δύο διαδικασιών ανάκτησης χαλκού από PCBs. Και οι δύο ηλεκτροχημικές διαδικασίες περιλαμβάνουν τη διάλυση του χαλκού από PCBs με ταυτόχρονη ηλεκτροεξαγωγή από τα προκύπτοντα διαλύματα έκπλυσης. Η πρώτη χρησιμοποιεί απευθείας ηλεκτροχημική οξείδωση ενώ η δεύτερη επιτυγχάνει τη διάλυση του χαλκού μέσω μεσολάβησης ηλεκτροχημικής οξείδωσης με χρήση του οξειδωαναγωγικού ζεύγους $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$. Συγκρίνοντας τις διαδικασίες, είναι εμφανές ότι η διαδικασία με χρήση της μεσολάβησης διάλυσης του χαλκού έχει χαμηλότερη περιβαλλοντική επίδραση σε σχέση με την απευθείας, γιατί το αναγεννημένο διάλυμα έκπλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω επεξεργασία των PCBs χωρίς την προσθήκη νέων αντιδραστηρίων. Επίσης βρέθηκε ότι και για τις δυο διαδικασίες, οι υψηλότεροι κίνδυνοι τοξικότητας μπορούν να αποδοθούν στα όξινα διαλύματα. Ο πίνακας 19 συνοψίζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την περιβαλλοντική αξιολόγηση της πρώτης προτεινόμενης διαδικασίας. Ενώ για τη δεύτερη μέθοδο, που χρησιμοποιεί τη διάλυση του χαλκού με Fe^{3+} , τα προκύπτοντα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 20.

A. Inputs																	
No.	Material	Mass index [kg/kg]	Impact factors							Environmental factors, [kg ⁻¹]		Environmental index, [kg ⁻¹]					
			1	2	3	4	5	6	7	EF _{env}	EF _{mat}	E _{env}	E _{mat}				
1	Waste PCB without EC	3.33	C	C	A	C	C	B	C	0.325	5.20	1.0823	17.32				
2	Sulfuric acid	9.33	C	B	A	C	C	A	A	C	0.500	16.00	46.650	149.28			
3	Graphite granules	7.50	C	C	C	C	C	C	B	C	0.075	1.30	0.5625	9.75			
4	Water	60.50	C	C	C	C	C	C	C	C	0.000	1.00	0.0000	60.50			
TOTAL:		80.66									Environmental index, [kg ⁻¹]:		63.008	236.85			
											General effect index, [kg ⁻¹]:		0.0782	2.94			
B. Outputs																	
No.	Material	Mass index [kg/kg]	Impact factors											Environmental factors, [kg ⁻¹]		Environmental index, [kg ⁻¹]	
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	EF _{env}	EF _{mat}	E _{env}	E _{mat}
1	Copper	1.00	C	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	0.075	1.30	0.0750	1.30
2	Epoxy waste	1.70	C	C	B	C	C	C	C	C	C	B	B	0.150	1.69	0.2250	2.87
3	Glass fiber	0.35	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C	C	0.075	1.30	0.0263	0.46
4	Other metals	0.18	C	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	0.075	1.30	0.0135	0.23
5	Sulfuric acid	8.00	C	A	A	C	C	C	C	A	C	C	C	0.500	16.00	4.0000	128.00
6	Sulfuric acid (consumed)	1.33	C	A	A	C	C	C	C	A	C	C	C	0.500	16.00	0.8850	21.28
7	Organic residue	0.10	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C	C	0.075	1.30	0.0075	0.13
8	Graphite granules	7.50	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C	C	0.075	1.30	0.5625	9.75
9	Water	60.50	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	0.000	1.00	0.0000	60.50
TOTAL:		80.66												Environmental index, [kg ⁻¹]:		5.6048	224.52
											General effect index, [kg ⁻¹]:		0.0895	2.78			

Πίνακας 19 : Περιβαλλοντική αξιολόγηση πρώτης προτεινόμενης διαδικασίας (Fogarasi et al., 2013)

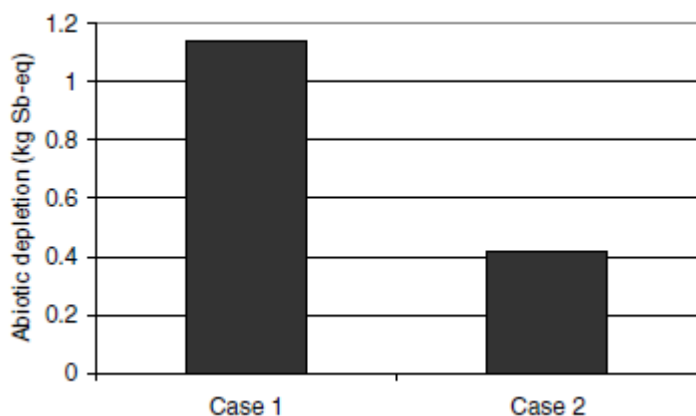
A. Inputs																	
Nr.	Material	Mass index [kg/kg]	Impact factors							Environmental factors, [kg ⁻¹]		Environmental index, [kg ⁻¹]					
			1	2	3	4	5	6	7	EF _{env}	EF _{ma}	E _{env}	E _{ma}				
1	Waste PCB	9.6	C	C	A	C	C	B	C	0.325	5.30	3.12	49.92				
2	Ferric chloride	6.6	C	C	B	C	B	B	C	0.150	1.60	0.90	11.15				
3	Hydrochloric acid	3.8	C	C	C	C	A	B	C	0.250	4.00	0.95	15.20				
4	Water	111.0	C	C	C	C	C	C	C	0.000	1.00	0.00	111.00				
	TOTAL:	131.0								Environmental index, [kg ⁻¹]:		5.06	187.27				
										General effect index, [kg ⁻¹]:		0.0186	1.43				
B. Outputs																	
Nr.	Material	Mass index [kg/kg]	Impact factors											Environmental factors, [kg ⁻¹]		Environmental index, [kg ⁻¹]	
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	EF _{env}	EF _{ma}	E _{env}	E _{ma}
1	Copper	1.0	C	B	B	C	C	C	C	C	C	C	0.075	1.30	0.075	1.30	
2	Other metals	0.6	C	B	B	C	C	C	C	C	C	C	0.075	1.30	0.045	0.78	
3	Ferric chloride	6.6	C	B	B	C	C	C	A	C	C	C	0.325	5.30	2.145	34.32	
4	Hydrochloric acid	3.8	C	A	B	C	C	C	A	C	C	C	0.250	4.00	1.900	30.80	
5	Epoxy waste	1.5	C	C	B	C	C	C	C	C	B	B	0.150	1.60	0.225	2.54	
6	Plastics	3.6	C	C	C	C	B	B	B	C	C	B	0.150	1.60	0.540	6.08	
7	Sludge	2.6	C	C	C	C	C	C	C	C	B	B	0.075	1.30	0.318	3.38	
8	Water	111.0	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	0.000	1.00	0.000	111.00	
9	Losses	0.3	C	C	B	C	C	C	C	C	B	B	0.150	1.60	0.045	0.51	
	TOTAL:	131.0											Environmental index, [kg ⁻¹]:		5.170	220.71	
													General effect index, [kg ⁻¹]:		0.0395	1.68	

Πίνακας 20 : Περιβαλλοντική αξιολόγηση δεύτερης προτεινόμενης διαδικασίας (Fogarasi et al., 2013)

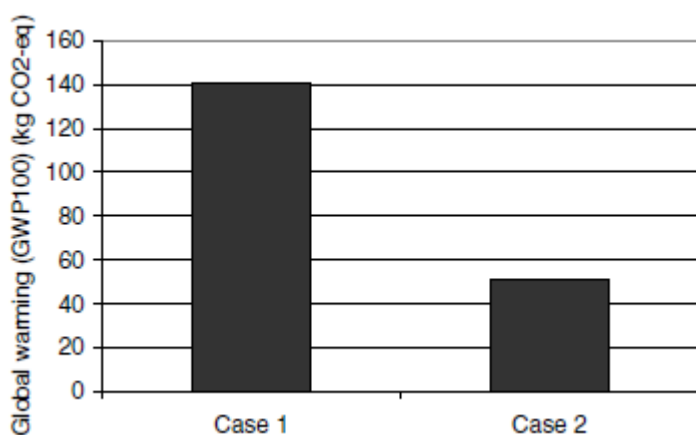
Ο Ravi (2012), με την τεχνική MAGIQ, εκτίμησε τις επιπτώσεις της ανακύκλωσης υπολογιστών. Οι υπολογιστές σε συνδυασμό με τις μπαταρίες οξέος μολύβδου δημιουργούν μια νέα πηγή ηλεκτρονικών αποβλήτων και οδηγούν εκπομπές από την παραγωγή και την ανακύκλωση των μπαταριών που θα ξεπερνούν κατά πολύ την ποσότητα όλων των άλλων τοξικών υλικών που σχετίζονται με τους υπολογιστές (Cherry and Gottesfeld, 2009). Στατιστικά έδειξαν ότι η ανακύκλωση πλαστικών χρησιμοποιεί περίπου 70-75% λιγότερη ενέργεια σε σχέση με τη δημιουργία νέων (Conner, 2009). Η ανακύκλωση αλουμινίου απαιτεί 95% λιγότερη ενέργεια από τη δημιουργία αλουμινίου από βωξίτη (Chirac, 2001). Η ανακύκλωση γυαλιού χρησιμοποιεί 21% λιγότερη ενέργεια από την παραγωγή πρωτογενούς γυαλιού (Conner, 2009). Η θερμική ανακύκλωση έχει κύριο στόχο την ανάκτηση ενέργειας καθώς τα πλαστικά έχουν υψηλή θερμαντική αξία. Για παράδειγμα, 1 τόνος πλαστικών θα μπορούσε να αντικαταστήσει 1.3 τόνους άνθρακα (USGS, 2001).

Σύμφωνα με τους Johansson and Bjorklund (2010), όσον αφορά την ανακύκλωση πλυντηρίων πιάτων, ένα αρχικό στάδιο απομάκρυνσης του χαλκού, θα ήταν επωφελές ως προς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση περιορίστηκε σε δύο κατηγορίες επιπτώσεων, εξάντληση αβιοτικών πόρων και GWP. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 39 και 40 και υποδεικνύουν ότι η ύπαρξη του αρχικού σταδίου θα έχει μια καθαρή επίδραση κατά την τελική επεξεργασία. Η διαφορά αυτή συνδέεται κυρίως με την ανάγκη για πρωτογενές ατσάλι, το οποίο χρειάζεται για την αραίωση του ανακτώμενου ατσαλιού, στην περίπτωση μη ύπαρξης αρχικού σταδίου. Μοντελοποιήθηκαν τα ποσοστά ανάκτησης χαλκού 50% και 90% σε σύγκριση με το 70% της περίπτωσης 1, όπως φαίνεται στο σχήμα 6. 20% χαμηλότερη απομάκρυνση χαλκού συντελεί σε παραπάνω από 50% αύξηση του GWP, ενώ 20% υψηλότερη έχει ως αποτέλεσμα παραπάνω από 70% μείωση της επίδρασης στην παγκόσμια θέρμανση. Οι επιπτώσεις της περίπτωσης 1 και 2 θα ήταν περίπου οι ίδιες αν το

ποσοστό απομάκρυνσης στην περίπτωση 1 μπορούσε να φτάσει κοντά στο 90%. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν για το δυναμικό εξάντλησης αβιοτικών πόρων.



Σχήμα 39 : Εξάντληση αβιοτικών πόρων της επεξεργασίας ενός πλυντηρίου πιάτων στις περιπτώσεις 1 και 2 (Ravi, 2012)



Σχήμα 40 : Δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης της επεξεργασίας ενός πλυντηρίου πιάτων στις περιπτώσεις 1 και 2 (Ravi, 2012)

Οι Syafa Bakri et al. (2008), μελέτησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του μαγνητικού και ηλεκτρονικού σκυροστρώματος χρησιμοποιώντας την προσέγγιση AKZ. Οι λαμπτήρες φθορισμού απαιτούν σκυρόστρωμα (ballast) για να λειτουργήσουν. Η απογραφή κύκλου ζωής έδειξε ότι το ατσάλι είναι το κύριο συστατικό και για τους δύο τύπους σκυροστρώματος. Τρεις κύριες επιπτώσεις προσδιορίστηκαν, η επίδραση στην ανθρώπινη υγεία, η ποιότητα του οικοσυστήματος και η εξάντληση πόρων. Η πιο σημαντική επίδραση στο περιβάλλον και για τους δύο τύπους είναι η εξάντληση των πόρων ιδιαιτέρως για τις φάσεις παραγωγής και χρήσης. Το μαγνητικό σκυρόστρωμα παρουσιάζει υψηλότερη επίδραση στο περιβάλλον κατά τα στάδια παραγωγής, κατασκευής και χρήσης σχετικά με την ανθρώπινη υγεία, την ποιότητα του οικοσυστήματος και την εξάντληση των πόρων. Και τα δύο σκυροστρώματα ωστόσο προκαλούν σημαντική επίπτωση στην εξάντληση των πόρων από άποψη ορυκτών καυσίμων

ειδικά λόγω της κατανάλωσης ενέργειας. Σύγκριση των επιπτώσεων από τα στάδια παραγωγής και κατασκευής δείχνει ότι το μαγνητικό σκυρόστρωμα συνεισφέρει περισσότερο σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων σε σχέση με τον ηλεκτρονικό, όπως φαίνεται στον πίνακα 21. Οι επιπτώσεις της κατανάλωσης ενέργειας για 10 χρόνια για τις ώρες λειτουργίας δείχνει ότι το μαγνητικό σκυρόστρωμα συνεισφέρει περισσότερο σε όλες τις επιπτώσεις, βλέπε πίνακας 22.

Impact category	Unit	Magnetic ballast	Electronic ballast
Carcinogens	DALY	1.88E-07	2.12E-08
Resp. organics	DALY	1.14E-09	4.15E-10
Resp. inorganics	DALY	1.07E-06	2.73E-07
Climate change	DALY	2.06E-07	1.53E-07
Radiation	DALY	1.83E-08	0
Ozone layer	DALY	5.38E-10	1.95E-12
Ecotoxicity	PDF*m ² yr	0.126	0.0102
Acidification/			
Eutrophication	PDF* m ² yr	0.026	0.0132
Land use	PDF* m ² yr	0.0284	0.0135
Minerals	MJ surplus	3.678978	0.00839
Fossil fuels	MJ surplus	1.007375	0.99596

Πίνακας 21 : Επιπτώσεις από την παραγωγή του μαγνητικού και ηλεκτρονικού σκυροστρώματος (Syafa Bakri et al., 2008)

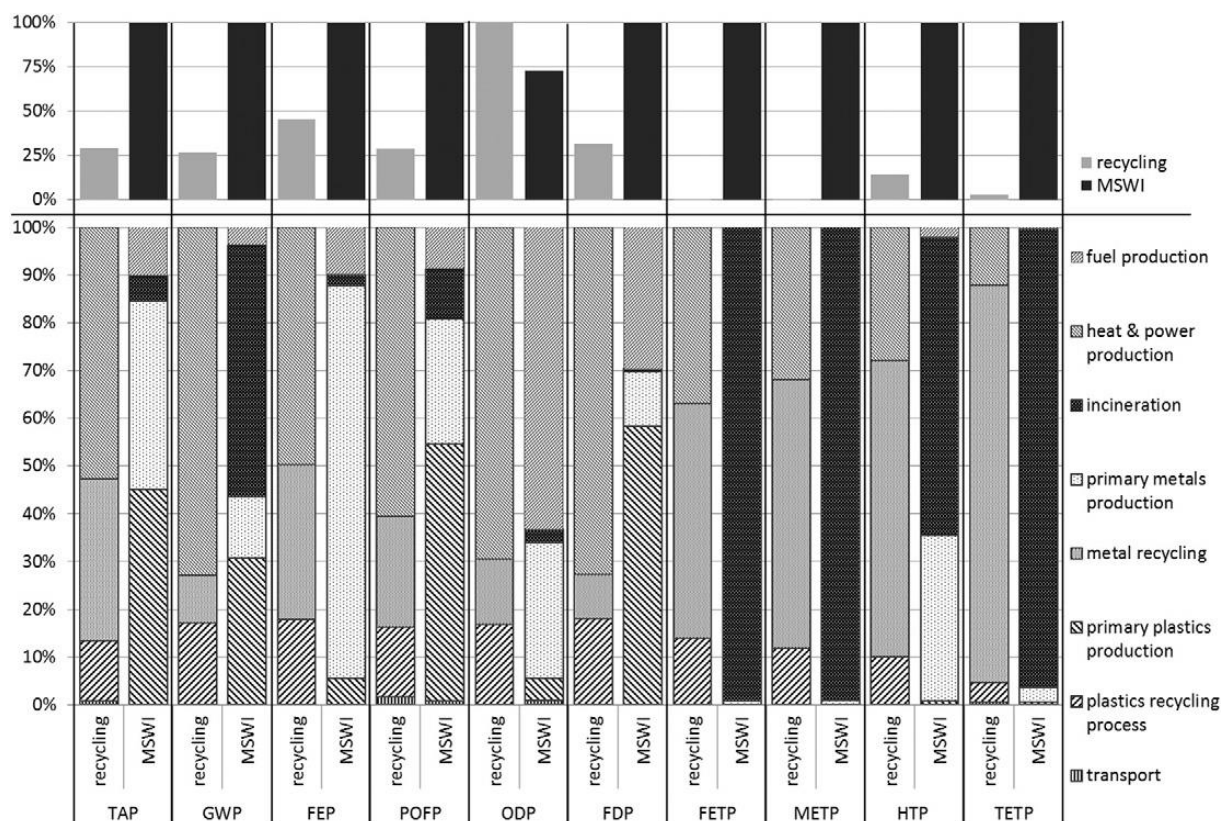
Impact category	Unit	Magnetic ballast	Electronic ballast
Carcinogens	DALY	1.8E-06	6.01E-07
Resp. organics	DALY	2.52E-08	8.39E-09
Resp. inorganics	DALY	2.08E-05	6.92 E-06
Climate change	DALY	2.29E-05	7.62 E-06
Radiation	DALY	0	0
Ozone layer	DALY	2.52E-10	8.39E-11
Ecotoxicity	PDF*m2yr	0.536	0.179
Acidification/			
Eutrophication	PDF*m2yr	1.19	0.396
Land use	PDF*m2yr	0	0
Minerals	MJ surplus	0	0
Fossil fuels	MJ surplus	172	57.5

Πίνακας 22 : Επιπτώσεις από τη χρήση του μαγνητικού και ηλεκτρονικού σκυροστρώματος (Syafa Bakri et al., 2008)

3.3 Ιδιαίτερες περιπτώσεις

Κάποιες μελέτες ασχολήθηκαν με πιο εξειδικευμένα αντικείμενα έρευνας. Η μελέτη των Wäger and Hischer (2015), εστίασε σε μια μονάδα ανακύκλωσης στην κεντρική Ευρώπη, για την παραγωγή πλαστικών. Στη μελέτη των Rocchetti et al. (2013), παρουσιάστηκε μια πρωτότυπη φορητή μονάδα επεξεργασίας υπολειμμάτων WEEE. Τέλος, οι Boesch et al. (2014), εξέτασαν τις δυνατότητες ανάκτησης υλικών από τις σκωρίες και την υπτάμενη τέφρα ενός MSWI.

Οι Wäger and Hischer (2015), μελέτησαν την παραγωγή πλαστικών από την ανακύκλωση WEEE σε μια μονάδα ανακύκλωσης στην κεντρική Ευρώπη, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αξιολόγησης τελικού σημείου (ReCiPe). Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης βρέθηκαν να είναι 50% λιγότερες ή και παραπάνω για σχεδόν όλους τους παράγοντες επιπτώσεων. Ειδικότερα, η ανακύκλωση συντελεί σε επιπτώσεις περίπου 4 φορές χαμηλότερες από αυτές της διάθεσης σε μονάδα καύσης στερεών αποβλήτων (MSWI) και 6 με 10 φορές χαμηλότερες από εκείνες της παραγωγής νέων πλαστικών. Το σχήμα 41 δείχνει τα αποτελέσματα των διαφόρων δεικτών ενδιάμεσου σημείου από τη ReCiPe για τις δύο επιλογές διαχείρισης, της ανακύκλωσης και της καύσης σε ένα εργοστάσιο MSWI. Το ανώτερο τμήμα του σχήματος δείχνει τις συνολικές τιμές σχετικά με την επιλογή με τις υψηλότερες επιπτώσεις, ενώ το κατώτερο τμήμα τις προσδιορίζει σε σχέση με τα ανεξάρτητα στάδια της διαδικασίας κάθε επιλογής. Εκτός από δύο εξαιρέσεις, η καύση σε ένα εργοστάσιο MSWI συντελεί σε επιπτώσεις που ξεπερνούν εκείνες της ανακύκλωσης με έναν συντελεστή της τάξης του 4 και περισσότερο. Οι εξαιρέσεις είναι οι παράγοντες FEP (δυναμικό ευτροφισμού φρέσκου νερού) με διαφορά συντελεστή μονάχα 2 ανάμεσα στις δύο επιλογές, και ODP (δυναμικό μείωσης όζοντος), με τις επιπτώσεις ανακύκλωσης να ξεπερνούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα της επιλογής MSWI κατά περίπου 25%.



Σχήμα 41 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις σχετιζόμενες με τις δύο επιλογές διαχείρισης για 1 τόνο πλούσιων σε πλαστικό υπολειμμάτων (Wäger and Hischier, 2015)

Στη μελέτη των Rocchetti et al. (2013), παρουσιάστηκε μια πρωτότυπη φορητή μονάδα, σε καρότσα φορτηγού, όπου γίνεται επεξεργασία υπολειμμάτων WEEE και ανάκτηση υλικών. Αρχικά εκτιμήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανάκτησης και στη συνέχεια συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες της πρωτογενούς παραγωγής.

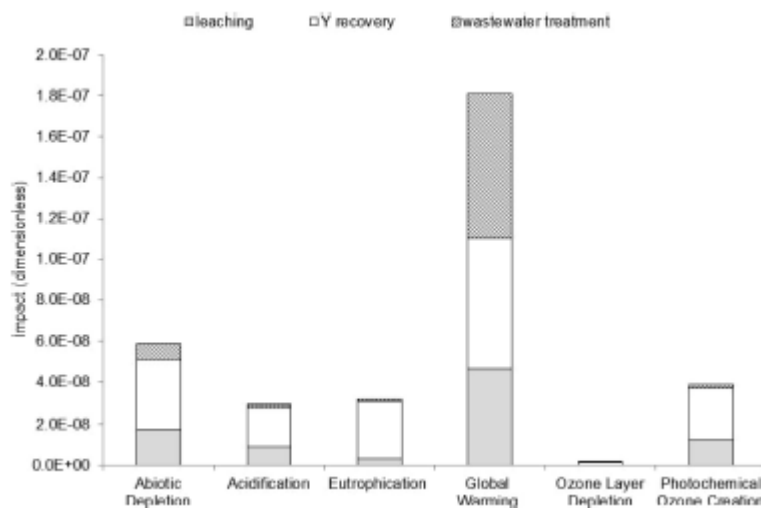
Η μονάδα τροφοδοτήθηκε με υπολείμματα WEEE για την ανακύκλωση λαμπτήρων φθορισμού, καθοδικών σωλήνων (CRTs), μπαταριών Li-ion και πλακετών τυπωμένου κυκλώματος (PCBs). Πραγματοποιήθηκε έκπλυση με θειικό οξύ, ακολουθούμενη από ανάκτηση μετάλλων με επιλεγμένη υγροποίηση. Τα ανακτώμενα μέταλλα περιελάμβαναν ύτριο, ψευδάργυρο, κοβάλτιο, λίθιο, χαλκό, χρυσό και ασήμι. Η κατηγορία του δυναμικού παγκόσμιας θέρμανσης ήταν η πιο κρίσιμη αντιλαμβανόμενοι τις ιδιαιτερότητες των περιοχών της νότιας Ευρώπης, με 13.3 kg CO₂ / kg ανακτώμενου μετάλλου από τους λαμπτήρες φθορισμού, 19.2 kg CO₂ / kg από CRTs, 27 kg CO₂ / kg από μπαταρίες Li-ion και 25.9 kg CO₂ / kg από PCBs. Τα δεδομένα επίσης έδειξαν ότι τα στάδια εξαγωγής των μετάλλων έχουν το υψηλότερο φορτίο για το περιβάλλον. Γενικά, αυτές οι διαδικασίες εμφανίζονται επωφελής για το περιβάλλον από άποψη εκπομπών CO₂, ειδικά για την ανάκτηση μετάλλων από υπολείμματα WEEE από λαμπτήρες φθορισμού και CRTs. Ο πίνακας 23 δείχνει ολόκληρη την περιβαλλοντική επίδραση των τεσσάρων διαδικασιών για την ανάκτηση μετάλλων από

υπολείμματα WEEE. Η μελέτη έδειξε ότι οι διαδικασίες παραγωγής οξαλικού οξέος για σκόνες φθορισμού από λαμπτήρες φθορισμού και CRTs, και υπεροξείδιο του υδρογόνου για συσσωρευτές Li-ion και PCBs είναι οι πιο κρίσιμες για το περιβάλλον. Τα δεδομένα λαμβάνουν υπόψη τα τρία τμήματα της υδρομεταλλουργικής διαδικασίας : εξαγωγή μετάλλων με έκπλυση, κάθαρση και ανάκτηση μετάλλων, και επεξεργασία λυμάτων. Το τελευταίο τμήμα είναι πολύ σημαντικό ειδικά για μικρούς και μεσαίους ανακυκλωτές, οι οποίοι συνήθως δεν επιτρέπεται να απορρίπτουν τα λύματα στο περιβάλλον. Οι υψηλότερες επιπτώσεις παρατηρήθηκαν για την κατηγορία του GWP, ακολουθούμενες από τις κατηγορίες επιπτώσεων του δυναμικού αβιοτικής εξάντλησης και το δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικού όζοντος, όπως φαίνεται στο σχήμα 42. Η διαδικασία ανάκτησης πολύτιμων μετάλλων από PCBs είναι περισσότερο σύνθετη από τις άλλες, εξαιτίας της ανάγκης για δύο στάδια έκπλυσης για την εξαγωγή χαλκού και πολύτιμων μετάλλων (χρυσού και άργυρου). Σε κάθε περίπτωση, η φάση έκπλυσης χαλκού που πραγματοποιείται με θειικό οξύ και υπεροξείδιο του υδρογόνου ήταν υπεύθυνη για την υψηλότερη επίδραση σε όλες τις κατηγορίες που μελετήθηκαν.

impact categories	fluorescent powder from fluorescent lamps	fluorescent powder from CRT's	ground electrodic material from Li-ion accumulators	PCB granulate from PCBs
global warming (kg CO ₂ -eq.)	9.4×10^4	2.0×10^5	5.4×10^5	7.8×10^5
abiotic depletion (kg Sb-eq.)	0.03	0.8	2.0	2.2
acidification (kg SO ₂ -eq.)	505	1225	1365	2044
eutrophication (kg phosphate-eq.)	83	182	130	137
ozone layer depletion (kg R11-eq.)	0.008	0.02	0.04	0.05
photochem. ozone creation (kg ethene-eq.)	34	122	98	154

^aThe selected impact categories were global warming, abiotic depletion, acidification, eutrophication, ozone layer depletion and photochemical ozone creation (problem oriented method, CML).

Πίνακας 23 : Εκπομπές από τη διαχείριση 100 τόνων υπολειμμάτων WEEE (Rocchetti et al., 2013)



Σχήμα 42 : Αποτελέσματα μετά από κανονικοποίηση, για παράγοντες επιπτώσεων σε σχέση με τα στάδια έκπλυσης, ανάκτησης υτρίου και επεξεργασίας λυμάτων (Rocchetti et al., 2013)

Σύγκριση των διαδικασιών πρωτογενούς παραγωγής και ανάκτησης πραγματοποιήθηκε. Ο περιορισμός που υπήρξε είναι οι διαφορετικές καθαρότητες των ανακτώμενων μετάλλων που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση (γύρω στο 95% για τις διαδικασίες HydroWEEE και 99.9% της πρωτογενούς παραγωγής). Από τα δεδομένα μας η σημαντικότερη επίδραση βρέθηκε για την κατηγορία του GWP. Ο πίνακας 24 δείχνει τις εκπομπές CO₂ για τις επεξεργασίες των υπολειμμάτων WEEE στις διαδικασίες HydroWEEE, αναφερόμενες τόσο στη μάζα των υπολειμμάτων WEEE που τροφοδοτεί τη μονάδα όσο και στη μάζα των ανακτώμενων μετάλλων. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαδικασιών HydroWEEE για σκόνες φθορισμού από λαμπτήρες φθορισμού και CRTs είναι σημαντικά χαμηλότερες από την πρωτογενή παραγωγή. Στην περίπτωση των PCBs εκτιμήθηκε μια σημαντική εξοικονόμηση εκπομπών CO₂ από τη διαδικασία HydroWEEE. Στην περίπτωση των μπαταριών Li-ion, οι εκτιμώμενες επιπτώσεις για τα ανακτώμενα μέταλλα είναι συγκρίσιμες με εκείνες των διαδικασιών πρωτογενούς παραγωγής. Αυτό οφείλεται κυρίως στη χρήση υπεροξειδίου του υδρογόνου, η παραγωγή του οποίου συμβάλλει περίπου στο 60% της συνολικής επίδρασης στην κατηγορία του GWP. Στη μελέτη αυτή δεν λήφθηκε υπόψη η μεταφορά στη μονάδα. Η φορητή φύση της μονάδας ίσως επίσης επιτρέπει διαφορετικές πηγές για την απαιτούμενη ενέργεια. Η επιλογή της πηγής ενέργειας θα επηρεάσει τις επιπτώσεις που θα προκύψουν. Η ενέργεια από ανανεώσιμους πηγές θα έχει την πιο θετική επίδραση.

WEEE residues	hydroWEEE process		primary process
	g CO ₂ /g WEEE residues	g CO ₂ /g metal	g CO ₂ /g metal
fluorescent powder from fluorescent lamps	0.9	13.3 g CO ₂ /g Y	144.9
fluorescent powder from CRTs	2.0	19.2 g CO ₂ /g metals (13.7 g for Y ; 5.5 g for Zn)	104.5
ground electrodic material from Li-ion accumulators	5.4	27.0 g CO ₂ /g metals (24.5 g for Li; 2.5 g for Co)	27.4
PCB granulate from PCBs	7.8	25.8 g CO ₂ /g metals (0.1 g for Au; 0.2 g for Ag; 25.5 g for Cu)	55.7

Πίνακας 24 : Εκπομπές CO₂ από τη διαδικασία HydroWEEE και την πρωτογενή παραγωγή (Rocchetti et al., 2013)

Στη μελέτη των Boesch et al. (2014), αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ανάκτησης μετάλλων από τα υπολείμματα καύσης σε μια μονάδα MSWI. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μοντελοποιούνται ως συνάρτηση της σύστασης των αποβλήτων καθώς και των τεχνολογιών επεξεργασίας αποβλήτων και ανάκτησης υλικών. Εφαρμογή του μοντέλου στην Ελβετία έδειξε ότι η επεξεργασία ενός τόνου αστικών στερεών αποβλήτων συντέλεσε σε περίπου 425 kg CO₂-eq. που δημιουργήθηκαν στη διαδικασία καύσης, και 54 kg CO₂-eq. λόγω των διαδικασιών μεταφοράς αποβλήτων και παραγωγής των λειτουργικών υλικών. Η απόρριψη των υπολειμμάτων δημιούργησε 5 kg CO₂-eq. Η εξοικονόμηση από την ανάκτηση ενέργειας κυμαίνεται από 67 έως 752 kg CO₂-eq. και εξαρτάται από τις υποθέσεις για την παραγωγή της υποκαθιστούμενης ενέργειας, ενώ η ανάκτηση των μετάλλων από τις σκωρίες και την ιπτάμενη τέφρα συντελεί σε καθαρή εξοικονόμηση σχεδόν 35 kg CO₂-eq.

Γύρω στο 97% των σκωριών του MSWI επεξεργάζονται για την ανάκτηση μετάλλων. Καθώς οι τρέχουσες εγκαταστάσεις διαφέρουν σημαντικά στη διάταξη τους, αξιοσημείωτες διαφορές εμφανίζονται στην αποτελεσματικότητα ανάκτησης μετάλλων. Η νέα τεχνολογία ξηρής εκφόρτισης οδηγεί σε αυξημένη αποτελεσματικότητα της ανάκτησης μετάλλων λόγω των βελτιωμένων ιδιοτήτων των σκωριών (Fierz and Bunge, 2007). Η τρέχουσα ανάκτηση μετάλλων από σκωρίες συντελεί σε καθαρή εξοικονόμηση 166 kg CO₂-eq. για κάθε τόνο σκωριών. Η μεγιστοποίηση των αποτελεσματικότητας της ανάκτησης μετάλλων θα οδηγήσει πρόχειρα σε διπλασιασμό των καθαρών εξοικονομήσεων για τις τρεις κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως φαίνεται στον πίνακα 25. Η ανάκτηση περισσότερου αλουμινίου συντελεί σε μεγαλύτερη συνεισφορά στις ολικές επιπτώσεις στην αλλαγή του κλίματος και στην εξάντληση των μη ανανεώσιμων πόρων, και η ανάκτηση χαλκού και αλουμινίου σε όρους ολικών αθροιστικών επιπτώσεων, πίνακας 25. Υπάρχει ένα ανεκμετάλλευτο δυναμικό στην

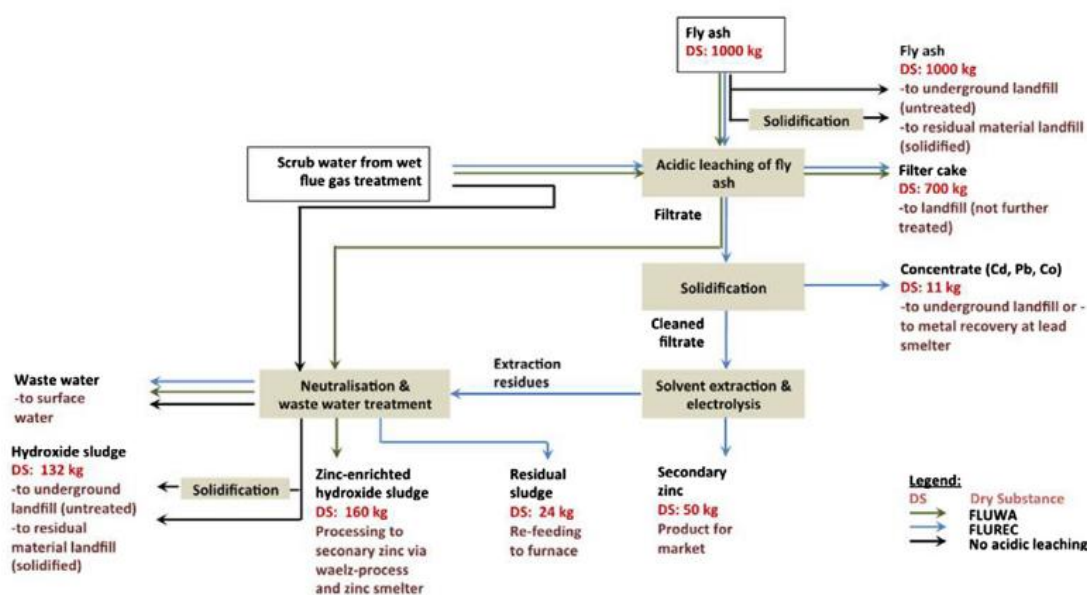
ανάκτηση μετάλλων από ιπτάμενη τέφρα καθώς το 61% των συνολικών ποσοτήτων προσφάτως απορρίπτεται χωρίς να υποστεί εξαγωγή μετάλλων. Αν και για τα MSWI η περιβαλλοντική σχέση της ανάκτησης μετάλλων από ιπτάμενη τέφρα ίσως να είναι χαμηλή σε σύγκριση με την ανάκτηση ενέργειας, το απόλυτο δυναμικό της τεχνολογίας είναι αξιοσημείωτο της τάξης των 80,000 τόνων ιπτάμενης τέφρας που παράγεται ετησίως (Hügi et al., 2008). Οι ποσότητες σκωρίων και οι επιπρόσθετες περιβαλλοντικές εξοικονομήσεις από τα βελτιωμένα ποσοστά ανάκτησης μετάλλων από σκωρίες είναι ακόμα μεγαλύτερες. Οι περιβαλλοντικές εξοικονομήσεις ίσως αυξηθούν περαιτέρω αν τα πολύτιμα μέταλλα και οι σπάνιες γαίες ανακτηθούν από τα υπολείμματα καύσης (Morf et al., 2013).

Processes	Carbon footprint (kg CO ₂ -eq.)			CExD, non-renewable (MJ-eq.)			ReCiPe H/A (points)		
	Current slag metal recovery	Landfilling w/o metal recovery	Maximum metal recovery from slag	Current slag metal recovery	Landfilling w/o metal recovery	Maximum metal recovery from slag	Current slag metal recovery	Landfilling w/o metal recovery	Maximum metal recovery from slag
Metal separation	0	0	1	21	0	80	0.02	0.00	0.8
Slag landfilling	9	10	8	285	305	256	0.49	0.53	0.44
Sec. steel production	28	0	31	560	0	631	3.00	0.00	3.37
Sec. aluminium production	12	0	25	199	0	399	0.79	0.00	1.58
Sec. copper production	4	0	7	64	0	129	1.52	0.00	3.04
Sec. stainless steel production	4	0	8	101	0	203	1.01	0.00	2.01
Credits for sec. steel production	-105	0	-118	-1762	0	-1981	-7.38	0.00	-8.31
Credits for sec. aluminium production	-109	0	-219	-1511	0	-3023	-6.06	0.00	-12.10
Credits for sec. copper production	-4	0	-7	-186	0	-373	-9.68	0.00	-19.40
Credits for sec. stainless steel	-5	0	-10	-109	0	-218	-1.03	0	-2.05
Total	-166	10	-274	-2337	305	-3899	-17.32	0.53	-31.34
Metal recovery efficiencies	Current	Maximum							
Fe (%)	80	90							
Al, Cu, stainless steel (%)	40	80							

Πίνακας 25 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης μετάλλων από τις σκωρίες του MSWI (Boesch et al., 2014)

Γύρω στο 20% του βάρους των αποβλήτων καταλήγει σε σκωρίες και το 2% σε ιπτάμενη τέφρα (Hügi et al., 2008). Και τα δύο υπολείμματα διαθέτουν αυξημένες συγκεντρώσεις ορισμένων μετάλλων και ειδικές κατανομές στο μέγεθος των σωματιδίων. Τα μέταλλα στις σκωρίες μπορούν να ανακτηθούν με μηχανικό διαχωρισμό μεταλλικών θραυσμάτων. Η διαδικασία μηχανικού διαχωρισμού εφαρμόζεται είτε στη μονάδα MSWI είτε στην υγειονομική ταφή των σκωρίων (Steiner, 2009). Η αποτελεσματικότητα ανάκτησης σιδηρούχων μετάλλων μπορεί εύκολα να φτάσει το 80%, ενώ η ανάκτηση αλουμινίου είναι τυπικά γύρω στο 30% αν και προηγμένες τεχνολογίες ίσως φτάσουν ποσοστά ανάκτησης της τάξης του 70% (Bunge, 2010 · Grosso et al., 2011). Διαδικασίες για την ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων και σπάνιων γαιών προσφάτως εφαρμόστηκαν σε βιομηχανική κλίμακα (Morf et al., 2013). Ο μηχανικός διαχωρισμός μεταλλικών θραυσμάτων δεν είναι εφικτός για την ιπτάμενη

τέφρα λόγω του μεγέθους των σωματιδίων $<1\text{ mm}$ και λόγω των χημικών ιδιοτεροτήτων των μετάλλων που περιέχονται στην τέφρα. Μια υδροχημική διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί η οποία αξιοποιεί το όξινο νερό από τη υγρή επεξεργασία των καυσαερίων για να κινητοποιήσει και να εξάγει τα μέταλλα από την αλκαλική ιπτάμενη τέφρα (Bühler and Schlumberger, 2010). Το διάγραμμα των επιλογών επεξεργασίας της ιπτάμενης τέφρας παρουσιάζεται στο σχήμα 43. Οι αποτελεσματικότητες για την ανάκτηση ενέργειας και την εξαγωγή μετάλλων από τις σκωρίες και την ιπτάμενη τέφρα φαίνονται στον πίνακα 26. Η νέα τεχνολογία FLUREC δίνει τη δυνατότητα για την παραγωγή μεταλλικού ψευδάργυρου απευθείας στη MSWI αλλά μόλις προσφάτως ξεκίνησε σε μεγάλη κλίμακα (KEBAG, 2013).



Σχήμα 43 : Διάγραμμα διαδικασιών και ροές μάζας από τις επιλογές διαχείρισης ιπτάμενης τέφρας (Boesch et al., 2014)

Efficiencies for metal extraction from slag and fly ash

	Slag: scrap separation	Fly ash: acidic scrubbing
Fe	80%	-
Al	40%	-
Cu	40%	25%
Zn	-	70%
Pb	-	55%
Cd	-	92%
SS	40%	-

Πίνακας 26 : Αποτελεσματικότητες εξαγωγής μετάλλων από σκωρίες και ιπτάμενη τέφρα (Boesch et al., 2014)

Στον πίνακα 27 παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα αποτελέσματα στο κατώτερο τμήμα του πίνακα 27 υποδεικνύουν τη σημασία της τοποθεσίας της MSWI για τη μεγιστοποίηση των οφελών από την ανάκτηση ενέργειας, ευνοϊκότερη η γειτνίαση τους με

βιομηχανικές μονάδες. Τα αποτελέσματα του πίνακα 28 καταδεικνύουν ότι η ανάκτηση μετάλλων από σκωρίες είναι προτιμότερη από την απευθείας υγειονομική ταφή.

Burdens	Carbon footprint [kg CO ₂ -eq/t waste]			CExD, non-renewable [MJ-eq/t waste]			ReCiPe (H/A) [points/t waste]		
Transport of waste	4.1			70.7			0.22		
Sec. metal production from slag	9.5			173			1.26		
Landfilling of slag	1.8			53.8			0.09		
Sec. metal production from fly ash	1.4			12.9			0.09		
Landfilling of fly ash & slurry	3.2			25.4			0.13		
Operating materials MSWI	48.9			1447			2.42		
Emissions to air	425			0.0			15.5		
Emissions to water	0.0			0.0			0.0		
Total burden	494			1783			19.7		
Material recovery, avoided burdens									
Metals from slag	-44			-616			-4.83		
Metals from fly ash	-0.9			-12.2			-0.11		
Energy recovery, avoided burdens	Swiss average	Max electricity	Max heat	Swiss average	Max electricity	Max heat	Swiss average	Max electricity	Max heat
η _{electricity, net} (%)	12	20	6	12	20	6	12	20	6
η _{heat, net} (%)	24	0	65	24	0	65	24	0	65
	[kg CO ₂ -eq/t waste]			[MJ-eq/t waste]			[points/t waste]		
Displaced electricity									
average Swiss mix	-52.8	-87.0	-25.3	-3449	-5681	-1652	-3.14	-5.17	-1.50
import, average UCTE mix	-214	-353	-103	-4337	-7143	-2077	-11.5	-18.9	-5.51
electricity from natural gas	-488	-804	-234	-7928	-13057	-3797	-9.92	-16.3	-4.75
Displaced heating system									
light fuel oil boiler	-264	0.0	-698	-3927	0.0	-10,381	-11.0	0.0	-29.0
natural gas furnace	-213	0.0	-563	-3483	0.0	-9207	-7.74	0.0	-20.5
biomass furnace	-14.4	0.0	-38.1	-275	0.0	-726	-4.64	0.0	-12.3

Πίνακας 27 : Συνεισφορά στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αποτέφρωσης αστικών στερεών αποβλήτων και οι επιπτώσεις που αποφεύγονται από την ανάκτηση ενέργειας και μετάλλων (Boesch et al., 2014)

Processes	Carbon footprint (kg CO ₂ -eq.)			CExD, non-renewable (MJ-eq.)			ReCiPe H/A (points)		
	Current slag metal recovery	Landfilling w/o metal recovery	Maximum metal recovery from slag	Current slag metal recovery	Landfilling w/o metal recovery	Maximum metal recovery from slag	Current slag metal recovery	Landfilling w/o metal recovery	Maximum metal recovery from slag
Metal separation	0	0	1	21	0	80	0.02	0.00	0.8
Slag landfilling	9	10	8	285	305	256	0.49	0.53	0.44
Sec. steel production	28	0	31	560	0	631	3.00	0.00	3.37
Sec. aluminium production	12	0	25	199	0	399	0.79	0.00	1.58
Sec. copper production	4	0	7	64	0	129	1.52	0.00	3.04
Sec. stainless steel production	4	0	8	101	0	203	1.01	0.00	2.01
Credits for sec. steel production	-105	0	-118	-1762	0	-1981	-7.38	0.00	-8.31
Credits for sec. aluminium production	-109	0	-219	-1511	0	-3023	-6.06	0.00	-12.10
Credits for sec. copper production	-4	0	-7	-186	0	-373	-9.68	0.00	-19.40
Credits for sec. stainless steel production	-5	0	-10	-109	0	-218	-1.03	0	-2.05
Total	-166	10	-274	-2337	305	-3899	-17.32	0.53	-31.34
<i>Metal recovery efficiencies</i>									
Fe (%)	Current	Maximum							
Al, Cu, stainless steel (%)	80	90							
	40	80							

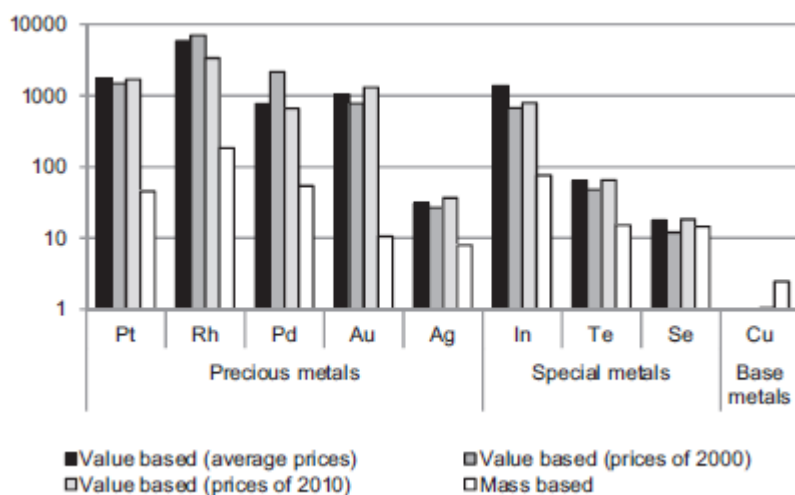
Πίνακας 28 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης μετάλλων από σκωρίες MSWI (Boesch et al., 2014)

3.4 Περιβαλλοντική ανασκόπηση βιβλιογραφίας με βάση οικονομικά στοιχεία

Στη βιβλιογραφία μας, τα άρθρα τα οποία έκαναν αναφορά σε οικονομικά στοιχεία ήταν μόλις τρία. Στα δύο πρώτα, των Stamp et al. (2013) · Bigum et al. (2012), χρησιμοποιήθηκε η τιμή των μετάλλων σε σύγκριση με τις ανακτώμενες μάζες αυτών, ώστε να τονιστεί η κρισιμότητα ανάκτησης των μετάλλων υψηλής τιμής, δηλαδή των πολύτιμων κυρίως αλλά και των σπάνιων γαιών, από άποψη περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στη μελέτη των Mayers et al. (2005), υπολογίστηκε το κόστος της ανακύκλωσης για διαφορετικά σενάρια ανάκτησης, και υποδείχθηκε τελικά ότι το κόστος της ανακύκλωσης δε σχετίζεται με συνέπεια με το επίπεδο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Σύμφωνα με τους Stamp et al. (2013), ολοκληρωμένα χυτήρια διυλιστήρια παίζουν έναν σημαντικό ρόλο στην ανάκτηση πολλαπλών μετάλλων από σύνθετα υλικά, και ως εκ τούτου κλείνουν τους κύκλους των μετάλλων. Ωστόσο, στη διαδικασία υπάρχει ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο μείγμα τροφοδοσίας. Αυτή η πολυπλοκότητα ενός χυτηρίου διυλιστηρίου απαιτεί κάποιες απλοποιήσεις που συντελούν σε ανακρίβεια όσον αφορά την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων του. Στη μελέτη γίνεται εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και σε σχέση με την τιμή των ανακτών μετalla.

Τα αποτελέσματα σχετικά με το GWP, κυμαίνονται σημαντικά μεταξύ των μετάλλων (ως τέσσερις τάξεις μεγέθους για το χαλκό σε σύγκριση με το ρόδιο). Αν αντί για μάζα, οι αλλαγές της κατανομής γίνουν με βάση την τιμή το αποτέλεσμα για ένα δεδομένο μέταλλο μπορεί να είναι ως δύο τάξεις μεγέθους. Αν χρησιμοποιείται η κατανομή με βάση την αξία, τότε η επιλεγμένη χρονιά αναφοράς για τις τιμές των μετάλλων επηρεάζει τα αποτελέσματα με συντελεστή ως δύο. Στο σχήμα 44 φαίνονται οι επιπτώσεις στο GWP. Το ρόδιο έχει γενικά τις υψηλότερες και ο χαλκός τις χαμηλότερες. Ο χαλκός διαχωρίζεται στα αρχικά στάδια με αποτέλεσμα να μην έχει τελικά πολλές επιπτώσεις. Αντίθετα τα πολύτιμα μέταλλα διαχωρίζονται τελευταία και συνεπώς έχουν υψηλότερες επιπτώσεις. Μεταξύ των πολύτιμων μετάλλων το ασήμι έχει τη χαμηλότερη επίδραση, που εξηγείται από τον υψηλό όγκο παραγωγής, και επίσης έχει τη χαμηλότερη τιμή.



Σχήμα 44 : Αποτελέσματα για το GWP, κανονικοποιημένα για τις επιπτώσεις του χαλκού, με βάση τη μάζα αλλά και τις τιμές του 2000, του 2010 και τη μέση τιμή (Stamp et al., 2013)

Οι Bigum et al. (2012), εφάρμοσαν AKZ για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανάκτησης μετάλλων από υψηλής ποιότητας WEEE, σε σχέση με την πρωτογενή παραγωγή. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των μετάλλων ώστε να γίνει κατανομή των επιπτώσεων με βάση την αξία των ανακτώμενων υλικών. Η ανάκτηση παλλαδίου, χρυσού, ασημιού, νικελίου και χαλκού απέφερε το κύριο περιβαλλοντικό όφελος. Ωστόσο τα οφέλη αυτά είναι υποεκτιμημένα στο μοντέλο καθώς δεν βρέθηκαν ακριβή δεδομένα για να συμπεριληφθούν οι επιβαρύνσεις από την εξόρυξη και τη διύλιση των κοιτασμάτων.

Η AKZ πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο EASEWASTE το οποίο είναι ένα εργαλείο ειδικά σχεδιασμένο για την περιβαλλοντική αξιολόγηση της διαχείρισης αποβλήτων. EASEWASTE χρησιμοποιεί τη μέθοδο EDIP για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της κατανάλωσης πόρων. Οι επιπτώσεις και οι πόροι κανονικοποιούνται σε ισοδύναμα ατόμου (PE) και παρουσιάζονται στον πίνακα 29. Ένα PE αναφέρεται στις ετήσιες επιπτώσεις που προκαλούνται από τις δραστηριότητες ενός ατόμου.

Impact categories	Normalization reference	
Environmental impacts	EDIP97 environmental impact potentials	
Global		
Global warming	kg CO ₂ (eq/pers/year)	8700
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 (eq/pers/year)	1.03 × 10 ⁻¹
Regional and local		
Acidification	kg SO ₂ (eq/pers/year)	74
Nutrient enrichment	kg NO ₃ ⁻ (eq/pers/year)	119
Photochemical ozone formation	kg C ₂ H ₄ (eq/pers/year)	25
Human toxicity		
Human toxicity via air	m ³ (air/air/pers/year)	6.09 × 10 ¹⁰
Persistent toxicity		
Ecotoxicity in soil	m ³ (soil/pers/year)	964,000
Ecotoxicity in water (chronic)	m ³ (water/pers/year)	352,000
Human toxicity via soil	m ³ (soil/pers/year)	127
Human toxicity via water	m ³ (water/pers/year)	50,000
Impact categories	Normalization reference	
Resource consumptions	EDIP97 resource consumption (2004)	
Non-renewable		
Aluminum	kg/pers/year	4.52
Brown coal (lignite)	kg/pers/year	264
Chromium	kg/pers/year	8.28 × 10 ⁻¹
Copper	kg/pers/year	2.27
Crude oil	kg/pers/year	604
Gold	kg/pers/year	3.86 × 10 ⁻⁴
Hard coal	kg/pers/year	602
Iron	kg/pers/year	97.7
Lead	kg/pers/year	4.92 × 10 ⁻¹
Manganese	kg/pers/year	1.72
Natural gas	kg/pers/year	353
Nickel	kg/pers/year	2.19 × 10 ⁻¹
Palladium	kg/pers/year	2.97 × 10 ⁻⁵
Silver	kg/pers/year	3.05 × 10 ⁻³
Uranium	kg/pers/year	5.63 × 10 ⁻³
Zinc	kg/pers/year	1.42

Πίνακας 29 : Παράγοντες κανονικοποίησης EASEWASTE για τις κατηγορίες επιπτώσεων σε EDIP97 (Bigum et al., 2012)

Στη μελέτη δύο μέθοδοι κατανομής ήταν πιθανές, η κατανομή μάζας και η οικονομική κατανομή. Από μια προοπτική διαχείρισης αποβλήτων η κατανομή θα πρέπει να γίνει σύμφωνα με την εισερχόμενη μάζα των WEEE καθώς η λειτουργία είναι η επεξεργασία των αποβλήτων. Για την παραγωγή πρωτογενών υλικών η κατανομή ωστόσο θα πρέπει διεξαχθεί σύμφωνα με την αξία των ληφθέντων υλικών, καθώς η αξία των μετάλλων είναι η αιτία την παραγωγή τους. Πραγματοποιήθηκαν και οι δύο κατανομές με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν να παρουσιάζονται στον πίνακα 30. Η λειτουργική μονάδα είναι η ανάκτηση αλουμινίου, χαλκού, χρυσού, σιδήρου, νικελίου, παλλαδίου και ασημιού από ένα τόνο υψηλής ποιότητας WEEE. Οι επιβαρύνσεις που αποφεύχθηκαν από την παραγωγή των ίδιων πρωτογενών υλικών αξιολογούνται. Ωστόσο η απομάκρυνση και η περαιτέρω επεξεργασία των επικίνδυνων ουσιών δε λαμβάνεται υπόψη. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά κατανομή φαίνονται στον πίνακα 31. Όλες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εμφανίζουν

αρνητικές τιμές, λόγω της αποφυγής πρωτογενούς παραγωγής. Αυτό μεταφράζεται ότι τα περιβαλλοντικά κόστη της προεπεξεργασίας και της ανάκτησης μετάλλων είναι λιγότερα σε σχέση με το κόστος παραγωγής παρόμοιων ποσοτήτων μετάλλων από πρωτογενή κοιτάσματα. Οι πραγματικές εξοικονομήσεις θα ήταν ακόμη υψηλότερες αν είχαν ληφθεί οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις από την εξόρυξη και διύλιση των πρωτογενών μετάλλων, ωστόσο υπάρχει έλλειψη αξιόπιστων δεδομένων. Οι δύο μέθοδοι κατανομής που χρησιμοποιήθηκαν έδωσαν περίπου τα ίδια αποτελέσματα. Ωστόσο αυτό ίσως να μην είναι μια γενική σύνοψη καθώς οι δύο μέθοδοι διαφέρουν αρκετά στον τρόπο που εκτελούνται. Μικρές επιδράσεις της μεθόδου κατανομής παρατηρήθηκαν σχετικά με την οικοτοξικότητα εδάφους, την οικοτοξικότητα νερού και τη διάλυση του στρατοσφαιρικού όζοντος. Στην κατανάλωση πόρων δεν παρατηρήθηκαν επιδράσεις. Υπάρχει η αισιοδοξία ότι η σύνοψη της μελέτης δεν επηρεάζεται από τη μέθοδο κατανομής.

	\$ per kg	Mass [%]	Economic [%]
Pre-treatment			
Aluminium	1.49	4.05	8.09
Iron	0.36	55.6	26.9
Plastic	0.20	36.4	9.75
Lead	1.04	0.14	0.20
Copper	3.07	3.76	15.5
Gold	31300	0.00	36.0
Silver	356	0.01	2.53
Palladium	5950	0.00	0.02
Nickel	12.8	0.04	0.73
PGM slime	2360	0.00	0.33
Kaldo plant			
Lead	1.04	71.8	12.9
Copper	3.07	27.9	14.9
Gold	31300	0.01	34.7
Silver	356	0.04	2.43
Palladium	5950	0.00	2.19
Nickel	12.8	0.32	0.70
PGM slime	2360	0.08	32.2
Converter aisle			
Copper	3.07	98.7	27.8
Gold	31300	0.01	21.6
Silver	356	0.19	6.22
Palladium	5950	0.01	2.75
Nickel	12.8	0.96	1.13
PGM slime	2360	0.19	40.4
Anode refinery			
Copper	3.07	98.7	27.8
Gold	31300	0.01	21.6
Silver	356	0.19	6.22
Palladium	5950	0.01	2.75
Nickel	12.8	0.96	1.13
PGM slime	2360	0.19	40.4
Precious metals refinery			
Gold	31300	1.93	30.5
Silver	356	48.8	8.76
Palladium	5950	1.29	3.87
PGM slime	2360	48.0	56.9

Πίνακας 30 : Κατανομή των επιβαρύνσεων ανά στάδιο διαχείρισης και οικονομική κατανομή με βάση τις τιμές (τιμές Ιανουαρίου 2009) (Bigum et al., 2012)

	Mass	Economic
Environmental impact categories	PE	PE
Acidification	-0.25	-0.27
Ecotoxicity in soil	-1.13×10^{-3}	-1.10×10^{-3}
Ecotoxicity in water (chronic)	-7.83	-4.41
Global warming 100 years	-0.25	-0.38
Human toxicity via air	-0.98	-1.00
Human toxicity via soil	-0.26	-0.50
Human toxicity via water	-0.48	-0.25
Nutrient enrichment	-0.05	-0.07
Photochemical ozone formation	-0.02	-0.04
Stratospheric ozone depletion	-1.01×10^{-4}	-2.16×10^{-3}
Resource consumption		
Aluminum	-5.07	-5.07
Brown coal (lignite)	-0.41	-2.18
Copper	-11.0	-11.0
Crude oil	-0.21	-0.49
Gold	-14.6	-14.6
Hard coal	-0.62	-0.91
Iron	-3.93	-3.94
Lead	-2.50×10^{-4}	-5.21×10^{-3}
Manganese	-1.44	-1.44
Natural gas	-0.18	-0.43
Nickel	-12.3	-12.3
Palladium	-63.0	-63.0
Silver	-11.7	-11.7
Uranium	-0.20	-0.03
Zinc	-0.04	-0.01

Πίνακας 31 : Περιβαλλοντική αξιολόγηση της ανάκτησης αλουμινίου, χαλκού, χρυσού, σιδήρου, νικελίου, παλλαδίου και ασημιού για κάθε τόνο υψηλής ποιότητας WEEE (Bigum et al., 2012)

Οι Mayers et al. (2005), μελέτησαν την ανακύκλωση εκτυπωτών στο Ηνωμένο Βασίλειο. Χρησιμοποίησαν την AKZ, όρισαν 4 σενάρια διαχείρισης, έλαβαν υπόψη το κόστος για κάθε σενάριο, και τελικά εκτίμησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στον πίνακα 32 φαίνονται τα τέσσερα εναλλακτικά σενάρια διαχείρισης αποβλήτων που ερευνήθηκαν. Στο σχήμα 45 φαίνονται ανά κατηγορία επιπτώσεων τα τρία σενάρια ανακύκλωσης και ανάκτησης. Τα καθαρά κόστη ανάκτησης και ανακύκλωσης δεν διαφοροποιούνται σημαντικά ανάμεσα στα σενάρια. Είναι 0.47 λίρες/kg για το σενάριο ανάκτησης 68% και 0.52 λίρες/kg για το σενάριο ανάκτησης 99%. Σε αντίθεση το κόστος 100% υγειονομικής ταφής είναι 0.02 λίρες/kg. Σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, του κόστους μετά την τελική χρήση και των ποσοστών ανακύκλωσης ανάμεσα στα σενάρια υποδεικνύει ότι τα κόστη συλλογής, επεξεργασίας και ανακύκλωσης δε σχετίζονται με συνέπεια με το επίπεδο περιβαλλοντικών επιπτώσεων των WEEE. Μονάχα για 5 από τις 16 κατηγορίες επιπτώσεων το κόστος αυξάνεται ως ακόλουθο του επιπέδου περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τα σενάρια ανακύκλωσης και ανάκτησης. Το σχήμα 46 δείχνει τα αποτελέσματα των κατηγοριών περιβαλλοντικών επιπτώσεων ως συνάρτηση του σεναρίου 100% υγειονομικής ταφής. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα κόστη της διαχείρισης αποβλήτων

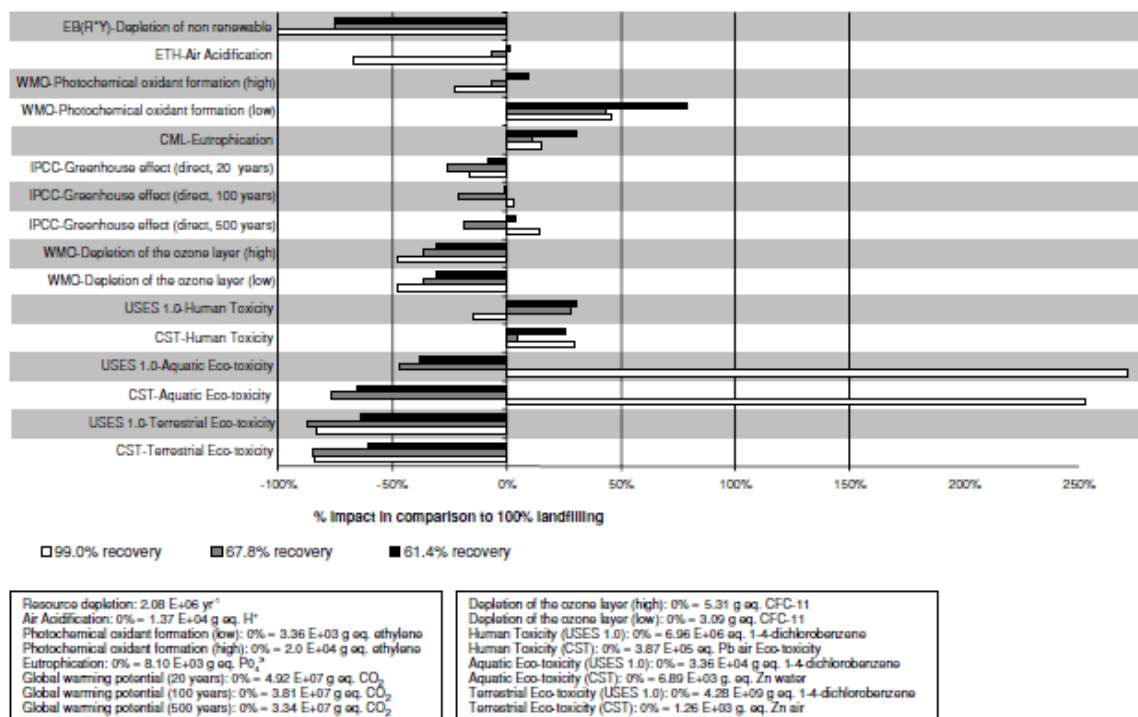
εξαρτώνται από το συνδυασμό των υλικών των αποβλήτων και των διαδικασιών διαχείρισης, και όχι ξεκάθαρα από το ποσοστό ανακύκλωσης και ανάκτησης κατά μάζα. Βρέθηκε ότι η υγειονομική ταφή χωρίς ανάκτηση υλικών δεν είναι η χειρότερη επιλογή για τον ευτροφισμό, την οξίνιση του αέρα, το δυναμικό δημιουργίας φωτοχημικών οξειδωτικών, το δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης, την ανθρώπινη τοξικότητα και την υδάτινη τοξικότητα. Το σενάριο της 99% ανάκτησης συντελεί στο χαμηλότερο επίπεδο για την εξάντληση των πόρων, την εξάντληση του όζοντος, την οξίνιση του αέρα και τη δημιουργία φωτοχημικών οξειδωτικών.

Scenario summary	Description	Sent for materials recycling ^a (by mass)	Sent for energy recovery ^a (by mass)	Total recovered & recycled ^d (by mass)
99% recovery (maximum recycling & recovery)	All components sent for recycling, energy recovery (in the case of mixed plastics), or treatment ^b	68%	31%	99%
68% recovery (recycling with no energy recovery)	Plastic components landfilled, all remaining components sent for recycling or treatment ^b	68%	0%	68%
61% recovery (partial recycling with no energy recovery)	Printed circuit boards and plastics landfilled, all remaining components sent for recycling or treatment ^b	61%	0%	61%
100% landfilling (no recycling or energy recovery)	All printers disposed of in landfill.	0%	0%	0%

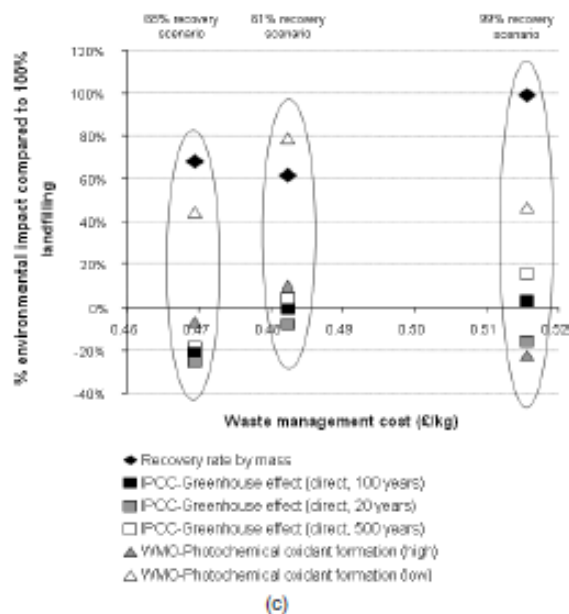
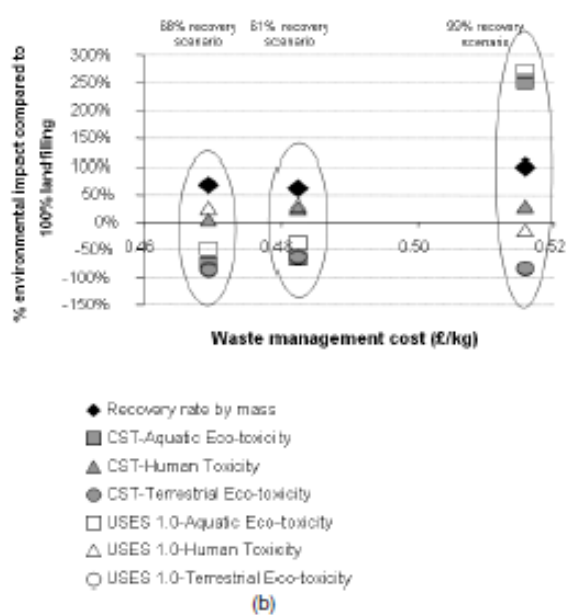
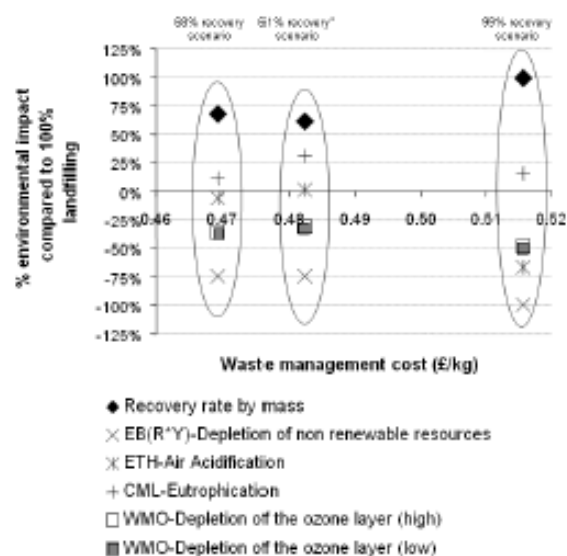
^a Out of about 14.6 tonnes of equipment sent for recycling and recovery.

^b Hazardous waste treatment, for example high temperature incineration for printer cartridges.

Πίνακας 32 : Σενάρια διαχείρισης αποβλήτων και ανακύκλωσης υπό μελέτη (Mayers et al., 2005)



Σχήμα 45 : Συνολική σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σχέση με το σενάριο 100% υγειονομικής ταφής (Mayers et al., 2005)



Σχήμα 46 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις ανά κόστος (Mayers et al., 2005)

4. REE

Σύμφωνα με τη μελέτη των Kulczycka et al. (2015), οι σπάνιες γαίες (Rare Earth Elements) έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών (Wang et al., 2003), στις εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας (Xie et al., 2014). Οι σπάνιες γαίες αναφέρονται ως σπάνιες επειδή αν και είναι σχετικά άφθονες σε συνολική ποσότητα, εμφανίζουν μικρές συγκεντρώσεις στο φλοιό της γης και η εξόρυξη και επεξεργασία τους είναι πολύπλοκη και ακριβή.

Για τους παραπάνω λόγους κρίθηκε σκόπιμη στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής η λεπτομερής ανάλυση των REE. Το λεπτομερές υλικό για τις REE, που ακολουθεί σε αυτό το υποκεφάλαιο, αντλήθηκε από το 'REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU - CRITICAL RAW MATERIALS PROFILES'. Σύμφωνα με αυτό ο όρος REE είναι ένα συγκεντρωτικό όνομα για τα 15 στοιχεία της ομάδας των λανθανίδων : λανθάνιο, δημήτριο, πρασεοδύμιο, νεοδύμιο, προμήθειο, σαμάριο, ευρώπιο, γαδολίνιο, τέρβιο, δυσπρόσιο, όλμιο,έρβιο, θούλιο, υττέρβιο και λουτήτιο. Λόγω μερικών παρόμοιων ιδιοτήτων, το σκάνδιο και το ύτριο συνήθως θεωρούνται ως REE. Σαν ομάδα οι REE είναι όλες μεταλλικές στη φύση και συνήθως σχολιάζονται μαζί λόγω των παρόμοιων τους χημικών και φυσικών ιδιοτήτων. Επιπλέον, με εξαίρεση το σκάνδιο, εξορύσσονται από τα ίδια κοιτάσματα, αν και η αναλογία μετάλλου διαφέρει σημαντικά μεταξύ των διαφορετικών τύπων κοιτασμάτων. Σε αυτή την ανάλυση γίνεται διάκριση σε ελαφριές και βαριές REE, όπως φαίνεται στον πίνακα 33. Η διάκριση αυτή γίνεται με βάση το ατομικό τους βάρος. Οι ελαφρές REE περιλαμβάνουν τις λανθανίδες από το λανθάνιο μέχρι το σαμάριο, ενώ οι βαριές από το ευρώπιο μέχρι το ύτριο. Το σκάνδιο αντιμετωπίζεται ξεχωριστά μέσα σε αυτή την εργασία καθώς γενικά δεν παράγεται από τα ίδια κοιτάσματα όπως οι υπόλοιπες REE.

	Metal	Grouping for study
Rare Earth Elements	Scandium	Scandium
	Lanthanum, Cerium, Praseodymium, Neodymium, Samarium	Rare Earth Elements -Light (LREE)
	Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Erbium, Yttrium, Others (holmium, erbium, thulium, ytterbium, and lutetium)	Rare Earth Elements -Heavy (HREE)

Πίνακας 33 : Κατηγοριοποίηση των REE στη μελέτη κρίσιμων υλικών της ΕΕ (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Οι REE κυμαίνονται σε αφθονία από το δημήτριο, το πιο άφθονο στη φύση, στο θούλιο και στο λουτήτιο, τα λιγότερο άφθονα. Ο πίνακας 34, δείχνει τη μέση κατανομή των REE σε 51 κοιτάσματα από εταιρίες που δημοσιοποιούν αυτά τα στοιχεία σύμφωνα με το JORC (Joint Ore Reserves Committee), NI -43-101 ή παρόμοια πρότυπα αναφοράς.

Light Rare Earth Elements		Heavy Rare Earth Elements			
Lanthanum	24.9%	Europium	0.3%	Erbium	0.5%
Cerium	43.2%	Gadolinium	1.4%	Thulium	0.1%
Praseodymium	4.6%	Terbium	0.2%	Ytterbium	0.4%
Neodymium	16.2%	Dysprosium	0.9%	Lutetium	0.1%
Samarium	2.2%	Holmium	0.2%	Yttrium	4.9%

Πίνακας 34 : Μέση κατανομή των ανεξάρτητων REE στα 51 κοιτάσματα (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Τα στοιχεία αυτά δείχνουν τη μη ομοιόμορφη εμφάνιση των REE, και τονίζουν τη σπανιότητα συγκεκριμένων, ειδικά των βαρέων REE. Αυτό είναι σημαντικό καθώς οι ρυθμοί ζήτησης δεν αντιπαραβάλλονται με τη φυσική τους αφθονία, και μερικές βαριές REE εμφανίζουν μεγάλη ζήτηση λόγω της σύνδεσής τους με συγκεκριμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα, το δυσπρόσιο χρησιμοποιείται σε υψηλής απόδοσης μαγνήτες και το ευρώπιο και το τέρβιο χρησιμοποιούνται σε λάμπες εξοικονόμησης ενέργειας. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμη και το θούλιο είναι γεωλογικά λιγότερο σπάνιο από το χρυσό ή την πλατίνα.

Τα πρώτα στάδια για την παραγωγή των REE είναι η εξόρυξη και η συγκέντρωση των μεταλλευμάτων REE και ο διαχωρισμός σε επιμέρους οξείδια REE με έκπλυση με διαλύτη. Αυτή η επεξεργασία είναι σύνθετη καθώς οι μεμονωμένες REE είναι χημικά παρόμοιες, και κάθε κοιτάσμα απαιτεί να αναπτυχθεί ειδική τεχνολογία μοναδική για το συγκεκριμένο κοιτάσμα , προκειμένου να εξαχθούν και να διαχωρισθούν οι REE. Το επόμενο στάδιο είναι να διυλιστούν και να καθαριστούν τα οξείδια REE για να ληφθούν τα αντίστοιχα μέταλλα με χρήση του καθαρισμού ιοντο-ανταλλαγής ώστε να επιτευχθούν υψηλότερες καθαρότητες.

Παρά το όνομά τους, οι REE δεν είναι ιδιαίτερα ασυνήθιστες, είναι σχετικά κατανεμημένες στο φλοιό της Γης, χωρίς συχνά να σχηματίζουν κοιτάσματα. Τα αποθέματα REE εκτιμώνται από το Γεωλογικό Ινστιτούτο των ΗΠΑ (USGS) σε 110 εκ. τόνους, με τα μισά παγκόσμια αποθέματα να εκτιμώνται ότι βρίσκονται στην Κίνα, όπως φαίνεται στον πίνακα 43. Ωστόσο, αυτό το σχήμα του USGS είναι πιθανόν να έχει χάσει την αξιοπιστία του καθώς δεν φαίνεται να

έχει ενημερωθεί σύμφωνα με τις σημαντικές πρόσφατες δραστηριότητες εξερεύνησης και την ύπαρξη μη συνηθισμένων πηγών REE, όπως τα ιζηματογενή φωσφορικά κοιτάσματα, μια ενδεχομένως τεράστια πηγή.

Country	Mine production (in tonnes, 2012)		Reserves (in tonnes, 2012)	
China	95,000	86.8%	55,000,000	48.3%
United States	7,000	6.4%	13,000,000	11.4%
Australia	4,000	3.7%	1,600,000	1.4%
India	2,800	2.6%	3,100,000	2.7%
Malaysia	350	0.3%	30,000	0.0%
Brazil	300	0.3%	36,000	0.0%
Other countries	NA	—	41,000,000	36.0%
World total	110,000		110,000,000	

Source: US Geological Survey (2013), Mineral Commodity Summaries

Πίνακας 35 : Παγκόσμια αποθέματα REE (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Τα κύρια κοιτάσματα από τα οποία παράγονται οι REE προσφάτως είναι ο μπαστναζίτης, οι ιοντικές άργιλοι, ο λοπαρίτης (ιδιαίτερα στη χερσόνησο Kola στη Ρωσία) και ο μοναζίτης, με τον ευδιαλύτη και τον ξενοτίμη πιθανώς να γίνουν οικονομικά σημαντικοί στο άμεσο μέλλον, καθώς αυτά τα ορυκτά εμπλουτίζονται σε βαρέες REE και έχουν και έχουν χαμηλή ραδιενέργεια, που αποτελεί πρόβλημα σε αρκετές αποθέσεις REE. Μέχρι προσφάτως, υπήρχαν περίπου 200 γνωστά ορυκτά REE αλλά διαδικασίες ανάκτησης είναι διαθέσιμες μόνο για τα παραπάνω, χωρίς να περιλαμβάνονται ο ευδιαλύτης και ο ξενοτίμης. Το προσφάτως, μεγαλύτερο παγκοσμίως ορυχείο REE (Bayan Obo στην εσωτερική Μογγολία στην Κίνα), για παράδειγμα παράγει REE ως παραπροϊόν της εξόρυξης κοιτασμάτων σιδήρου. Η παραγωγή βαρέων REE είναι συγκεντρωμένη στη Νότια Κίνα και βασίζεται στις αποθέσεις ιοντικών αργίλων.

Η παγκόσμια εξόρυξη REE για το 2012 εκτιμήθηκε από το USGS στους 110.000 τόνους. Ωστόσο αυτή η εκτίμηση είναι πιθανόν να μην περιλαμβάνει σημαντική παράνομη παραγωγή, της τάξης των 20.000-25.000 τόνων, κάποιои από τους οποίους επεξεργάζονται από επίσημα εργοστάσια. Σύμφωνα με τη βάση δεδομένων του USGS, η Κίνα είναι ο κυρίαρχος παγκοσμίως παραγωγός, υπεύθυνη για το 87% της παγκόσμιας παραγωγής, παρόλο που διαθέτει γύρω στα μισά από τα παγκόσμια αποθέματα, ταυτοποιημένα από το USGS. Ωστόσο, αυτό στην πραγματικότητα αντιπροσωπεύει μια μείωση της αγοραστικής ισχύος της Κίνας, η οποία διαμορφώθηκε στο 95% το 2011. Αυτό ήρθε ως αποτέλεσμα της επανέναρξης της παραγωγής

REE στο ορυχείο Mountain Pass στην Καλιφόρνια, ΗΠΑ (προηγουμένως λειτουργούσε από το 1952 μέχρι το 2002), και της αυξημένης παραγωγής στο Mount Weld στην Αυστραλία. Παραγωγή REE δεν υφίσταται μέσα στην ΕΕ.

Βάση δεδομένων για την προσφορά μεμονωμένων REE έχει συνταχθεί από Roskill Information Services, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 36. Η Roskill εκτιμά πως η παγκόσμια παραγωγή REE θα είναι ελαφρώς υψηλότερη, στους 127.000 τόνους για το 2012. Ωστόσο αυτό δεν περιλαμβάνει τους 4.000 τόνους εξορυγμένου υλικού από το Mount Weld της Αυστραλίας το οποίο προσφάτως αναμένει επεξεργασία.

Rare Earth	China	USA	Australia*	India	Russia ^a	Total	%
Lanthanum	29,320	2,661	1,040	169	700	33,890	26 %
Cerium	41,875	3,934	2,040	363	1,436	49,648	38 %
Praseodymium	5,700	347	160	42	95	6,344	5%
Neodymium	19,750	960	600	139	220	21,669	17 %
Samarium	2,470	64	72	20	24	2,650	2%
Europium	340	8	16		3	367	0%
Gadolinium	2,215	14	40	9	5	2,283	2%
Terbium	340	2	4		2	348	0%
Dysprosium	1,350	2	8		2	1,362	1%
Erbium	860		8		2	870	1%
Yttrium	9,915	8	2			9,925	8%
Ho, Tm, Yb, Lu	1,715		10	8	11	1,744	1%
Total	115,850	8,000	4,000	750	2,500	131,100	-

Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & *USGS Data for Australia

†This reflects uncertainty related to Chinese mineral and metal production statistics

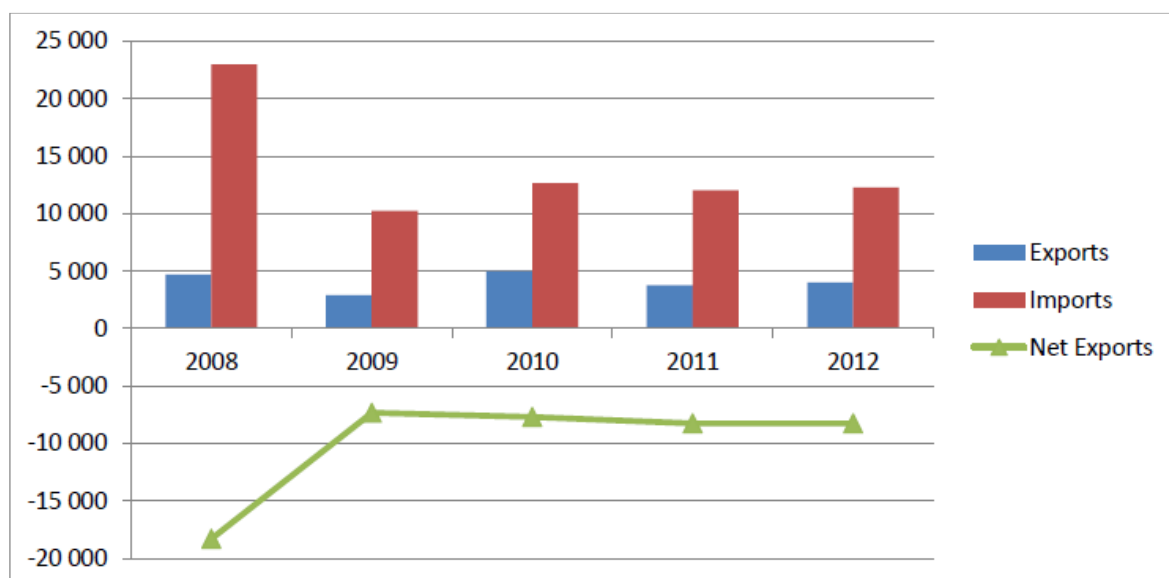
Πίνακας 36 : Εκτιμώμενη παγκόσμια παραγωγή οξειδίων REE σε τόνους, 2012, ±15% (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Οι εκτιμήσεις της Roskill είναι βασισμένες στα σχήματα ετήσιας παραγωγής που δημοσιεύθηκαν από τους παραγωγούς, αναλυτικά για κάθε REE. Για προγράμματα εκτός Κίνας, η βάση δεδομένων για την παραγωγή των ορυχείων και η σχετική ύπαρξη REE ανά πρόγραμμα και ανά απόθεση, είναι γενικά καλά αρχειοθετημένη. Η Roskill κάνει μια σημαντική διάκριση ανάμεσα στην προσφορά εξόρυξης και στην προσφορά. Υποστηρίζουν ότι κάποια επεξεργασία του εξορυγμένου υλικού είναι αναγκαία για τη μετατροπή του τουλάχιστον σε μια χημική συγκέντρωση που μπορεί να εισέλθει στην αλυσίδα εφοδιασμού. Ως εκ τούτου εξορυγμένα αποθέματα, όπως στη Βραζιλία όπου έχει σταματήσει η επεξεργασία

REE, δεν χαρακτηρίζονται ως τωρινή προσφορά, αλλά καλύτερα ως εν δυνάμει μελλοντική προσφορά. Αξιόπιστη βάση δεδομένων για την πραγματική παραγωγή στην Κίνα, ωστόσο είναι πολύ δύσκολα διαθέσιμη. Επίσημη βάση δεδομένων της παραγωγής δημοσιεύεται, αλλά αυτή η βάση δεδομένων δεν περιλαμβάνει ένα σημαντικό όγκο της προσφοράς από τα παράνομα ορυχεία, ο οποίος εκτιμάται να έχει υπολογιστεί σε περίπου 15-30% της συνολικής παραγωγής της Κίνας (15.000-20.000 τόνοι), αν και ο αριθμός αυτός δεν είναι καλά τεκμηριωμένος. Για παράδειγμα, η Roskill βασίζεται σε αναφορές τρίτων για τις παράνομες δραστηριότητες εξόρυξης ώστε να εκτιμήσει την παραγωγή από αυτά τα ορυχεία. Οι αριθμοί για τη συνολική παραγωγή ολόκληρης της χώρας θεωρούνται ότι είναι αρκετά ακριβείς. Σε περιφερειακό επίπεδο, οι βαρέες REE κυρίως παράγονται στο νότο, ενώ οι ελαφρές επικρατούν στα δυτικά και βόρεια της χώρας.

Κυρίως αναλογιζόμενοι τις δυσκολίες που σχετίζονται με την εκτίμηση της παραγωγής της Κίνας, η Roskill εκτιμά ότι η βάση δεδομένων της παραγωγής είναι ακριβής με περιθώριο απόκλισης της τάξης του 15%. Στην περίπτωση όλων των βαρέων REE, και ειδικότερα εκείνων από το όλμιο μέχρι το υτέρβιο, η βάση δεδομένων της προσφοράς είναι θεωρητική και όχι πραγματική καθώς αυτά τα στοιχεία ίσως δεν ανακτηθούν αν ο επεξεργαστής δεν έχει οδηγίες για αυτά τα στοιχεία. Δεδομένα για την προσφορά REE, από το Mount Weld έχουν επίσης συμπεριληφθεί μέσα σε αυτά τα στοιχεία, με βάση ότι σύντομα θα συνιστούν προσφορά στην αγορά. Το μερίδιο της Κίνας στην παγκόσμια παραγωγή REE είναι περίπου 87%. Ωστόσο, για τις βαρέες REE το μερίδιο της Κίνας είναι περίπου 99% της παγκόσμιας προσφοράς.

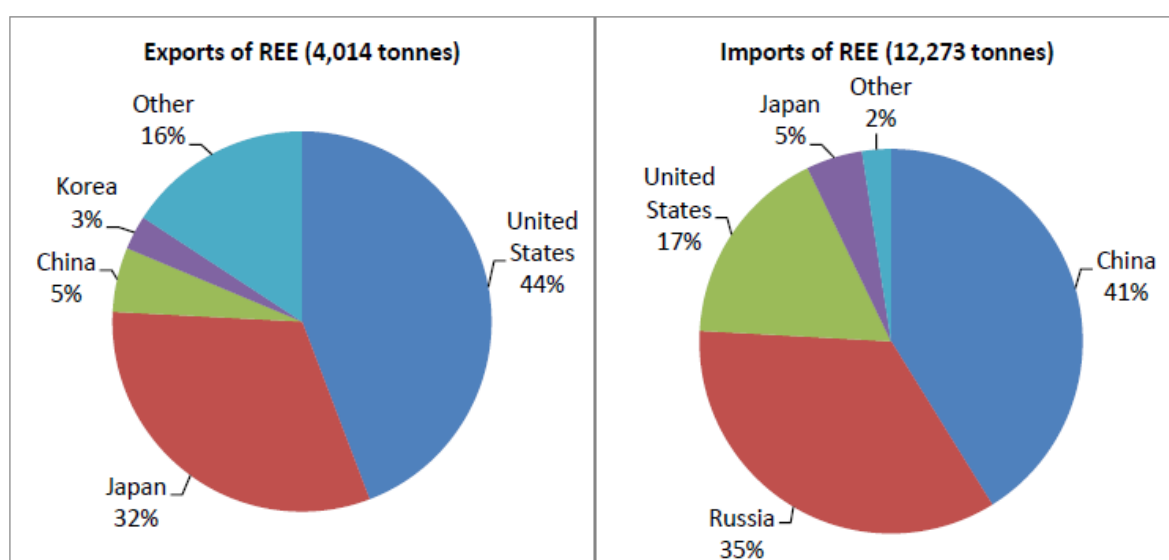
Συνολικά η EE είναι ένας σημαντικός καθαρός εισαγωγέας ενώσεων REE, μετάλλων και κραμάτων, εισάγοντας γύρω στους 8.000 τόνους κάθε χρόνο, όπως φαίνεται στο σχήμα 47. Ωστόσο, πίσω στο 2008 η EE εισήγαγε ένα σύνολο σχεδόν 20.000 τόνων REE. Αυτά τα στοιχεία δε λαμβάνουν υπόψη τις REE που εισήχθησαν και εξήχθησαν σε προϊόντα ή άλλες μορφές.



Source: Eurostat-Comext Database CN 28461000, 28053010, 28053090, 28469000 [accessed September 2013]

Σχήμα 47 : Συναλλαγές REE της ΕΕ σε τόνους (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

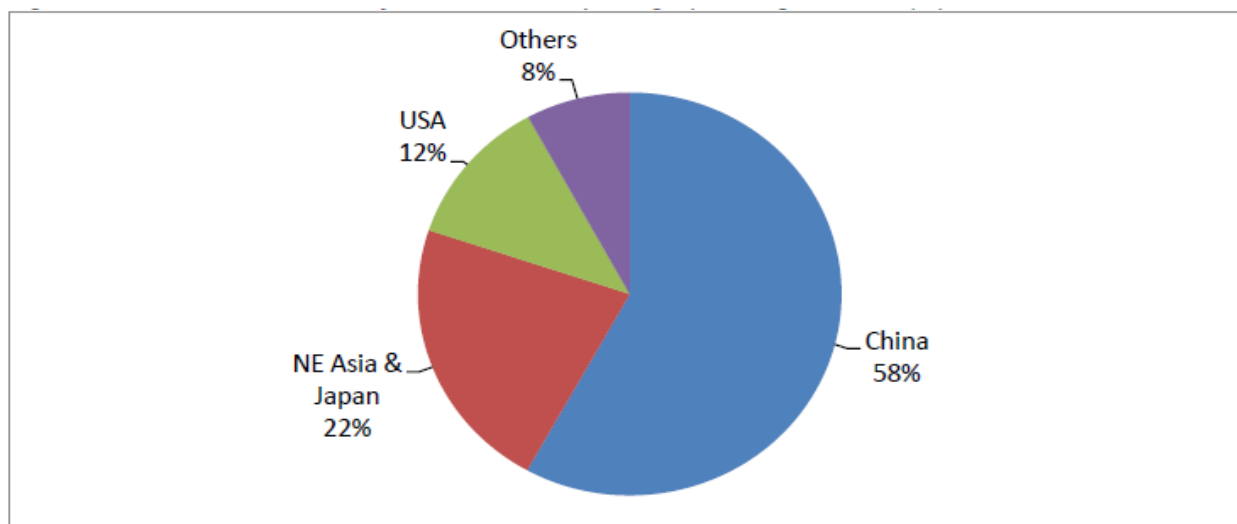
Η μεγαλύτερη πηγή των εισαγωγών της ΕΕ για το 2012 ήταν η Κίνα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 48, ωστόσο η ΕΕ κατάφερε να διαφοροποιήσει αρκετά τις πηγές της από το 2010, με τη Ρωσία και τις ΗΠΑ να έχουν γίνει σημαντικοί προμηθευτές της ΕΕ, παρόλο που μόλις το 2013 οι ΗΠΑ έγιναν ξανά παραγωγοί REE, λόγω της επαναλειτουργίας του ορυχείου Molycorp στο Mountain Pass. Η ανάλυση περισσότερων πρόσφατων στατιστικών των συναλλαγών δείχνει ότι για το 2012, η ΕΕ ήταν ένας καθαρός εισαγωγέας 8.255 τόνων REE.



Source: Eurostat-Comext Database CN 28461000, 28053010, 28053090, 28469000 [accessed September 2013]

Σχήμα 48 : Οι κύριοι συναλλασσόμενοι για REE με την ΕΕ, 2012 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Σε σύγκριση με τις εκτιμήσεις για την παγκόσμια κατανάλωση της τάξης των 113.000 τόνων για το 2012, αυτό αντιστοιχεί σε μερίδιο κατανάλωσης REE της ΕΕ κοντά στο 7%. Να σημειωθεί ότι αυτή η εκτίμηση είναι φαινομενική καθώς δεν περιλαμβάνει το περιεχόμενο σε REE των εισαγόμενων προϊόντων, μπαταριών, μαγνητών και συμπαγών φθορίζοντων λαμπτήρων. Παγκοσμίως, η Κίνα αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο καταναλωτή REE του κόσμου με ποσοστό γύρω στο 60% της παγκόσμιας αγοράς. Άλλες Ασιατικές χώρες εμφανίζουν ένα επιπλέον 22% με τις ΗΠΑ να αντιπροσωπεύουν το 12% της παγκόσμιας αγοράς, σύμφωνα με το σχήμα 49.



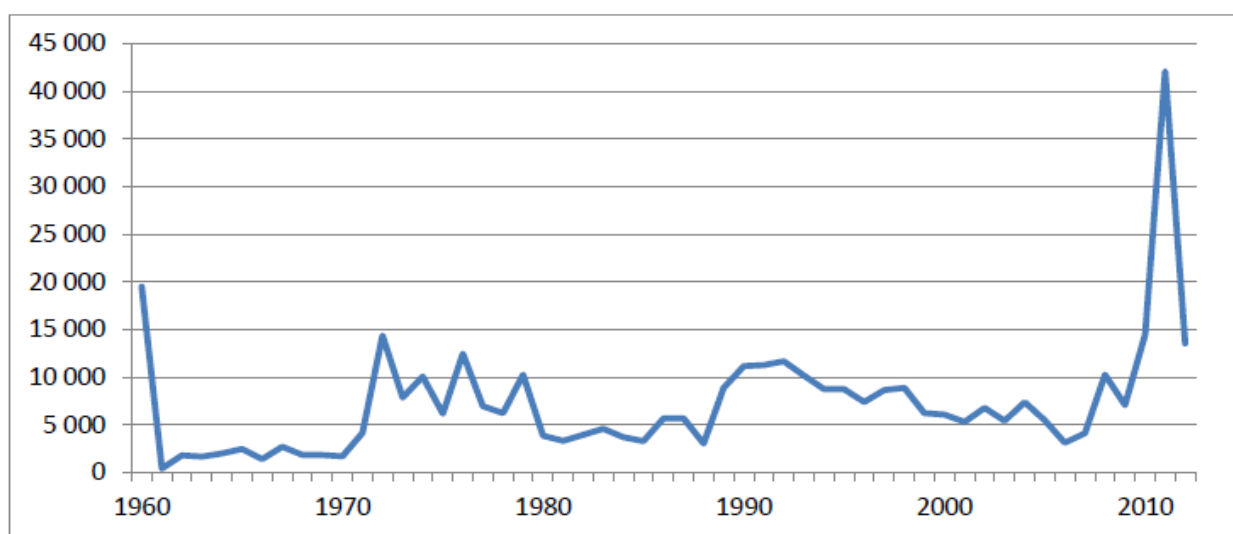
Source: Roskill/IMCOA Presentation (2011), *Rare earths – an evaluation of current and future supply*

Σχήμα 49 : Εκτιμώμενη ζήτηση για REE ανά γεωγραφική περιοχή, 2010 (%) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Όσον αφορά τη μελλοντική κατάσταση, μια ολοκληρωμένη λίστα των πιο εξελιγμένων προγραμμάτων REE παρέχεται από το Technology Metals Research και αποτελείται από 49 εξελιγμένα προγράμματα REE από 43 διαφορετικές εταιρείες σε 43 διαφορετικές χώρες. Επιπλέον, τουλάχιστον τέσσερα διαφορετικά προγράμματα κοινοπραξιών που εμπλέκουν κύριες Ιαπωνικές εταιρίες είναι γνωστό ότι βρίσκονται σε προγραμματισμό. Ωστόσο, μια έλλειψη κεφαλαίου αναβάλλει αρκετά από αυτά τα προγράμματα, πηγαίνοντας πίσω τις προγραμματισμένες ημερομηνίες εκκίνησης. Επιπλέον, η απόδοση των δύο κύριων ορυχείων που βρίσκονται εκτός Κίνας, Mountain Pass (Molycorp, USA) και Mount Weld (Lynas, Australia) είναι μάλλον πέρα των προσδοκιών. Το Norra Karr (Σουηδία), που ανήκει στην Tasman Metals, είναι άξιο αναφοράς σαν το μοναδικό εξελιγμένο πρόγραμμα REE που βρίσκεται στην ΕΕ, αν και προγράμματα υπό ανάπτυξη επίσης υπάρχουν στη Γερμανία, στη Γροιλανδία και στην Τουρκία. Το Norra Karr έχει συνολικούς πόρους της τάξης των 58,1 εκ. τόνων ποιότητας 0,59%, που σημαίνει 0,34 εκ. τόνους οξειδίων REE. Το ιδιαίτερο για το κοίτασμα στο Norra Karr είναι ο

σχετικός εμπλουτισμός σε οξείδια βαρέων REE. Η Tasman Metals έχει επίσης αναβάλει τη μελέτη σκοπιμότητας εξαιτίας έλλειψης κεφαλαίου.

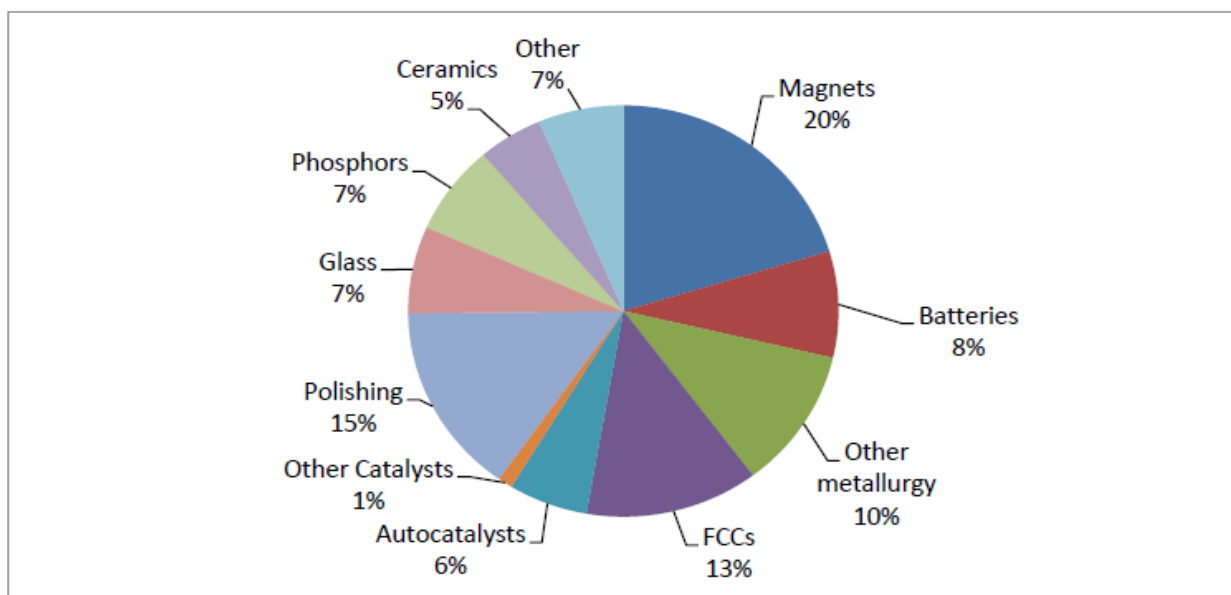
Σχετικά με τις τιμές των REE, η χρονική εξέλιξη των τιμών των REE παρουσιάζεται στο σχήμα 50. Για περισσότερα από τα τελευταία 40 χρόνια οι τιμές των σπάνιων γαιών έμειναν σταθερές γύρω στα 5.000 – 10.000\$ ανά τόνο. Το 2009 – 2011 οι τιμές των REE αυξήθηκαν δραματικά λόγω της απόφασης της Κίνας να περιορίσει σημαντικά τις ποσότητες εξαγωγών της, αν και είχαν ήδη κινηθεί σε ένα χαμηλότερο επίπεδο. Ωστόσο, ενδείξεις στην αγορά από τα μέσα του 2013 δείχνουν ότι οι τιμές αυξάνουν.



Source: USGS (2012), Metal Prices in the United States Through 2010

Σχήμα 50 : Ιστορικές τιμές REE, αξία μονάδας (98 US\$/t) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Οι REE χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, ωστόσο 4 αγορές (μαγνήτες, μεταλλουργία, καταλύτες και σκόνη γυαλίσματος) ευθύνονται για τα σχεδόν $\frac{3}{4}$ της συνολικής χρήσης το 2012, όπως φαίνεται στο σχήμα 51. Το γυαλί, τα φωσφορικά και τα κεραμικά είναι επίσης σημαντικές εφαρμογές για συγκεκριμένες REE.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 51 : Χρήση REE ανά εφαρμογή, 2012 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Στη συνέχεια ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των κύριων αγορών για REE :

- **Μαγνήτες:-** Αρκετές REE έχουν σημαντικά μαγνητικά χαρακτηριστικά, με συνέπεια να αξιοποιούνται στους μαγνήτες Νεοδύμιου-Σιδήρου-Βορικών (επίσης περιέχουν πρασεοδύμιο και δυσπρόσιο) και σαμαρικού κοβαλτίου. Οι κύριες εφαρμογές για τους μόνιμους μαγνήτες περιλαμβάνουν βιομηχανικούς κινητήρες, σκληρούς δίσκους και εφαρμογές αυτοκινήτων. Αναδυόμενες και αναπτυσσόμενες αγορές για μόνιμους μαγνήτες αναμένεται να είναι οι υβριδικές και ηλεκτρικές μηχανές και οι ανεμογεννήτριες.
- **Μπαταρίες:-** Υδρογονούχες μπαταρίες του μετάλλου του νικελίου (NiMH) είναι η πρώτη επιλογή για φορητά εργαλεία, περιέχοντας κατά το πλείστον λανθάνιο και δημήτριο. Οι μπαταρίες NiMH έχουν επίσης εκτενώς χρησιμοποιηθεί σε υβριδικές μηχανές, αν και όλο και περισσότερο οι μπαταρίες Li-ion αναμένεται να χρησιμοποιηθούν για αυτή την εφαρμογή.
- **Μεταλλουργία:-** Οι light REE χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του κράματος ατσάλιου, για αποθείωση, για τη δέσμευση ίχνων στοιχείων στο ανοξείδωτο ατσάλι και στα κράματα μαγνησίου και αλουμινίου.
- **Καταλύτες:-** Μια σημαντική χρήση για τα μέταλλα REE είναι σε καταλύτες, για παράδειγμα το λανθάνιο χρησιμοποιείται ως ρευστό καταλυτικής πυρόλυσης σε διωλιστήρια πετρελαίου, και το δημήτριο σε καταλυτικούς μετατροπείς για αυτοκίνητα. Η χρήση του λανθάνιου ως ρευστού καταλυτικής πυρόλυσης αυξάνει την απόδοση σε διωλιστήρια πετρελαίου μέχρι και 7%.

- Σκόνες γυαλίσματος και προσθετικά γυαλιών-: το οξείδιο δημητρίου είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μέσο γυαλίσματος και ως προσθετικό στην παραγωγή γυαλιού καθώς και για τον αποχρωματισμό και την αφαίρεση ακαθαρσιών.
- Φωσφορικά-: Οι βαρέες REE είναι σημαντικά συστατικά του tri-band φωσφορίζοντα φωτισμού χρησιμοποιούμενου για γραμμικούς λαμπτήρες φθορισμού και συμπαγείς λάμπες φθορισμού, καθώς και CCFL οπίσθιου φωτισμού LCD για επίπεδες οθόνες. Δεδομένου των ολοένα και αυστηρότερων κανονισμών για την ενεργειακή απόδοση και την εγκατάλειψη των οθόνων CRT, αυτή αποτελεί μια αναπτυσσόμενη αγορά αν και αναμένεται ανταγωνισμός με το φωτισμό LED.
- Άλλες εφαρμογές για REE περιλαμβάνουν κεραμικά, οπτικές ίνες και λέιζερ.

Δεδομένα για τη ζήτηση μεμονωμένα των REE καταρτίζονται από τη Roskill Information Services, όπως φαίνεται στον πίνακα 37. Η Roskill θεωρεί ότι οι εκτιμήσεις που προκύπτουν για τη ζήτηση είναι ακριβείς μέχρι 15%.

Rare earth element	Magnets	Batteries	Other metallurgy	Fluid cracking catalysts	Auto-catalysts	Other catalysts
Lanthanum		8,185	3,085	13,950	450	
Cerium		1,275	8,490	800	5,965	1,250
Praseodymium	3,600		195			
Neodymium	17,640		480		340	
Samarium	500					
Europium						
Gadolinium	360		290			
Terbium	70					
Dysprosium	835					
Erbium						
Yttrium						
Ho, Tm, Yb, Lu						
Total	23,000	9,460	12,540	14,750	6,750	1,250

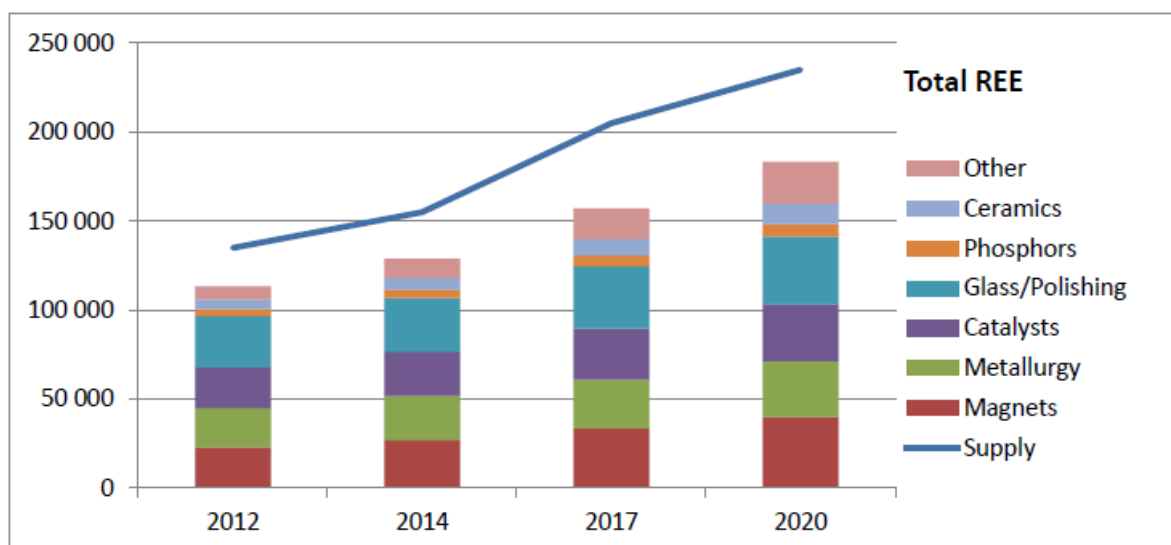
Rare earth element	Polishing	Glass	Phosphors	Ceramics	Other	Total
Lanthanum	470	1,600	455	365	2,930	31,495
Cerium	16,375	5,500	1,690	365	3,815	45,525
Praseodymium	105		570	365	110	4,945
Neodymium	55	260	185	895	75	19,925
Samarium					15	515
Europium			410		15	425
Gadolinium			230		140	1,020
Terbium			205		15	290
Dysprosium					15	845
Erbium		390	135		15	540
Yttrium			6,020	1,600	30	7,650
Ho, Tm, Yb, Lu					75	75
Total	17,000	7,750	8,000	5,500	7,250	113,250

Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) for 2013 CRM study

Πίνακας 37 : Παγκόσμια χρήση ανεξάρτητων REE, σε τόνους οξειδίων REE, 2012, $\pm 15\%$ (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

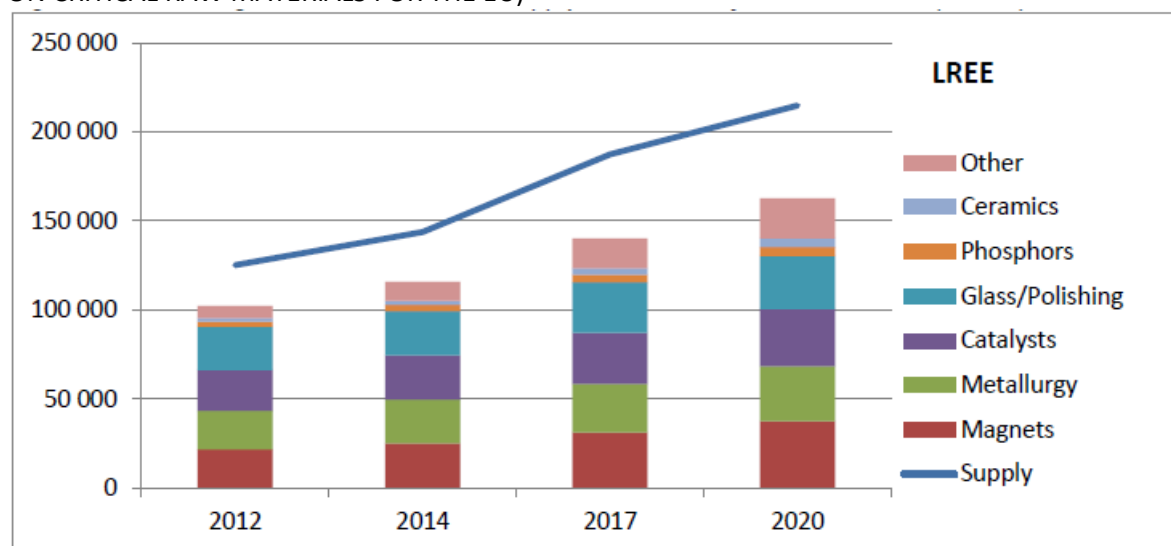
Η πρόβλεψη της ολικής αγοράς για την παγκόσμια προσφορά και ζήτηση REE παρουσιάζεται στο σχήμα 52, και βασίζεται στα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τη βιομηχανία σε συνδυασμό με την ανάλυση των τάσεων. Βασιζόμενοι σε αυτή την ανάλυση, για όλες τις REE, ένα σημαντικό πλεόνασμα υπάρχει προσφάτως, και αυτό αναμένεται να αυξηθεί καθώς προχωράει η δεκαετία. Η παγκόσμια προσφορά REE αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 7% κάθε χρόνο, καθώς ορυχεία REE άνοιξαν, όπως το Mountain Pass (ΗΠΑ), Mount Weld (Αυστραλία) ή καινούρια ορυχεία θα ανοίξουν, όπως το Indian Rare Earths, το Steenkampskraal (Νότια Αφρική), το Dubbo (Αυστραλία) και δύο μικρά ορυχεία στο Καζακστάν. Το άνοιγμα αυτών των ορυχείων θα ελαττώσει το μερίδιο της Κίνας στην προσφορά REE στο περίπου 60% της συνολικής παγκόσμιας αγοράς. Ωστόσο το Dubbo είναι το μοναδικό από τα επερχόμενα ορυχεία που έχει ένα σημαντικό ποσοστό βαρέων REE στην απόθεση του. Η πρόβλεψη για τις βαρέες REE αντιθέτως δείχνει ότι το συνολικό έλλειμμα θα συνεχιστεί μέχρι τουλάχιστον το 2016, ωστόσο πιο ουσιαστικές ευκαιρίες προσφοράς θα δημιουργηθούν προς το τέλος της δεκαετίας, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 54. Η κατάσταση αναμένεται να είναι πιο έντονη για το ύτριο, το τέρβιο και το ευρώπιο, επίσης θα μπορούσε να είναι σφιχτή για το έρβιο και το δυσπρόσιο. Για τις ελαφρές REE, μεγάλα πλεονάσματα αναμένονται συνολικά, σύμφωνα με το σχήμα 53, και ειδικά για το δημήτριο, το πρασεοδύμιο και το samάριο. Για το νεοδύμιο, η κατάσταση θα μπορούσε να παραμείνει αρκετά σφιχτή, αν η πρόσληψη των υβριδικών και των ηλεκτρικών οχημάτων πραγματοποιηθεί πιο έντονα ή

νωρίτερα από ότι αναμένεται. Ανεξάρτητες προβλέψεις REE μπορούν να βρεθούν στα αντίστοιχα προφίλ παρακάτω.



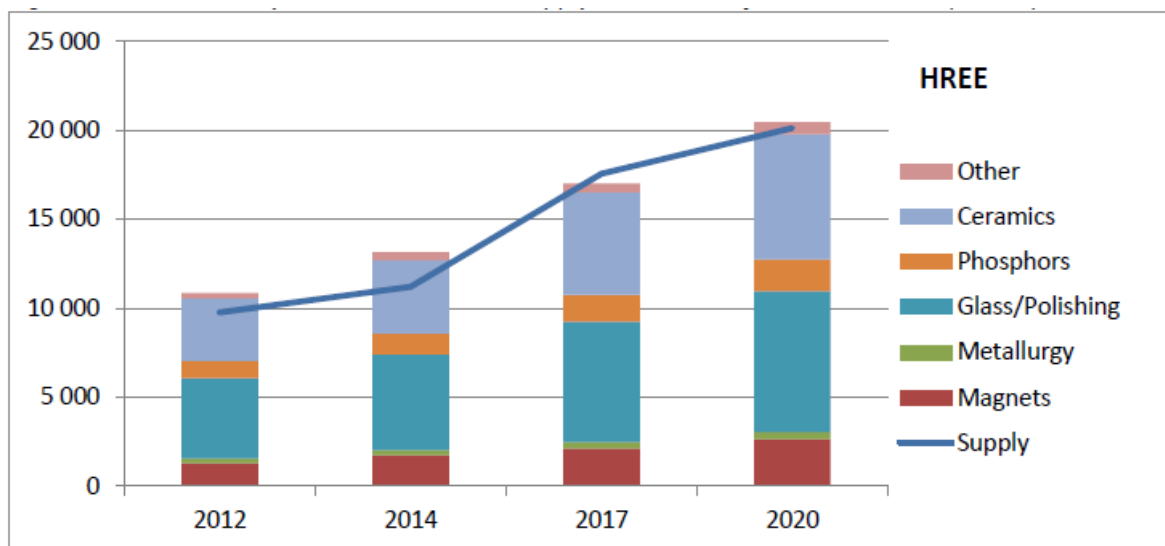
Sources: Roskill for 2013 CRM study I, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 52 : Προβλέψεις μέχρι το 2020 της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης REE (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)



Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 53 : Προβλέψεις μέχρι το 2020 της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης ελαφριών REE (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)



Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 54 : Προβλέψεις μέχρι το 2020 της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης βαρέων REE (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Από την πλευρά της ζήτησης ισχυρή ανάπτυξη αναμένεται συνολικά γύρω στο 6% κάθε χρόνο μέχρι το 2020. Η υψηλότερη ανάπτυξη ζήτησης προβλέπεται για τους μαγνήτες, τα φωσφορικά και τα κεραμικά, στα οποία η ανάπτυξη προβλέπεται να αυξηθεί κατά 7% κάθε χρόνο. Η σημασία αυτών των αγορών για τις βαρέες REE εξηγεί την υψηλότερη τάση ανάπτυξης που αναμένεται για τις βαριές σε σχέση με τις ελαφρές REE. Περισσότερο μετριοπαθής ανάπτυξη προβλέπεται για τις τελικές αγορές μεταλλουργίας, καταλυτών και γυαλιού/γυαλίσματος, κοντά στο 4% κάθε χρόνο μέχρι το 2020.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, οι ρυθμοί ανακύκλωσης όλων των REE είναι κάτω από 1%, σύμφωνα με την πρόσφατη αναφορά της UNEP (United Nations Environment Programme). Κυρίως οι REE ανακυκλώνονται από τα απορρίμματα προ κατανάλωσης, και ειδικότερα από τα θραύσματα μόνιμων μαγνητών. Για παράδειγμα, στην Ιαπωνία περίπου το 1/3 των REE που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών καταλήγουν σε νέα θραύσματα, δηλαδή μετά-βιο-μηχανικά ρεύματα αποβλήτων, τα οποία στη συνέχεια ανακυκλώνονται. Μια πρόσφατη μελέτη για τη δυνατότητα ανάκτησης στην ΕΕ των κρίσιμων μετάλλων, περιλαμβανομένου των REE, αναγνώρισε τις ακόλουθες ευκαιρίες που αντιπροσωπεύουν δυνατότητες για ανάκτηση :

- Μόνιμοι μαγνήτες:- Οι σκληροί δίσκοι είναι μια τρέχουσα ευκαιρία, με βάση την έρευνα που δημοσιεύτηκε από το πανεπιστήμιο του Μπερμινγκάμ και πιλοτικές λειτουργίες της Hitachi, με μακροπρόθεσμες δυνατότητες από ανεμογεννήτριες και υβριδικά/ηλεκτρικά οχήματα όταν φτάσουν το τέλος της χρήσης τους.

- Μπαταρίες NiMH-: τόσο από φορητές ηλεκτρονικές συσκευές όσο και από υβρικά/ηλεκτρικά οχήματα, αν αυτά μπορούν να συλλεχθούν και να αναγνωριστούν. Η Umicore και η Rhodia έχουν ανακοινώσει μια από κοινού ανεπτυγμένη διαδικασία για την ανάκτηση συμπυκνωμάτων REE που μπορούν στη συνέχεια να διυλιστούν σε REE.
- Φωσφορικά-: Η Rhodia έχει αναπτύξει μια νέα διαδικασία για την ανάκτηση και το διαχωρισμό REE που περιέχονται σε χρησιμοποιημένη σκόνη φθορίου σε εφαρμογές φωτισμού. Από τις αρχές του 2012 αυτή είναι σε εμπορική λειτουργία και θα πετύχει πλήρη δυναμικότητα 1000 τόνων ανά χρόνο επεξεργασμένης σκόνης μέχρι το 2013.

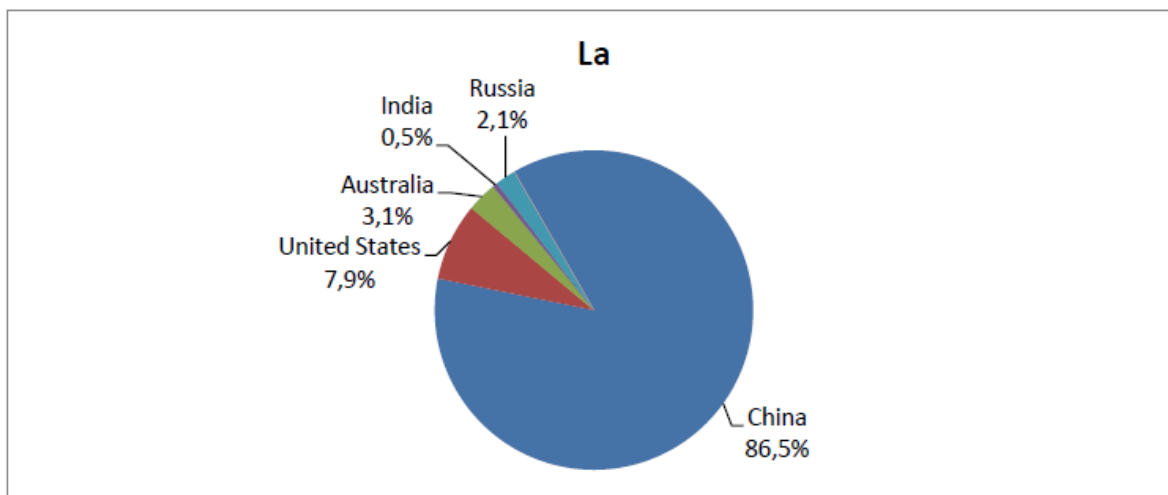
Σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η εξόρυξη και επεξεργασία των REE ευρύτερα αναφέρεται ως αιτία πρόκλησης σημαντικής περιβαλλοντικής υποβάθμισης αν δε ρυθμιστεί κατάλληλα. Αυτό περιλαμβάνει ιδιαιτέρως την έκλυση των βαρέων REE και τα ραδιενεργά απορρίμματα που καταλήγουν στα υπόγεια νερά και στην αγροτική γη. Επιπλέον η επεξεργασία και ο διαχωρισμός των REE είναι γνωστό ότι απαιτεί πολύ νερό και είναι δυνητικά ρυπογόνος. Αρκετά κοιτάσματα REE έχουν κυμαινόμενες ποσότητες ουρανίου και θορίου ως υποπροϊόντα. Η απουσία μιας αγοράς για το θόριο απαιτεί ότι το θόριο ή τα απόβλητα που περιέχουν θόριο θα αποθηκεύονται με συγκεκριμένες προφυλάξεις, ακολουθώντας τις οδηγίες της Διεθνούς Αντιπροσωπείας Ατομικής Ενέργειας.

4.1 Περιγραφή κάθε REE ξεχωριστά

Προηγουμένως εξετάστηκαν οι REE ως ομάδα με διάκριση σε βαρέες και ελαφρές REE. Ωστόσο υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των REE, όσον αφορά τα αποθέματα, τις εφαρμογές, την προσφορά και τη ζήτηση. Για αυτό το λόγο κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν στοιχεία για κάθε REE ξεχωριστά.

4.1.1 Λανθάνιο

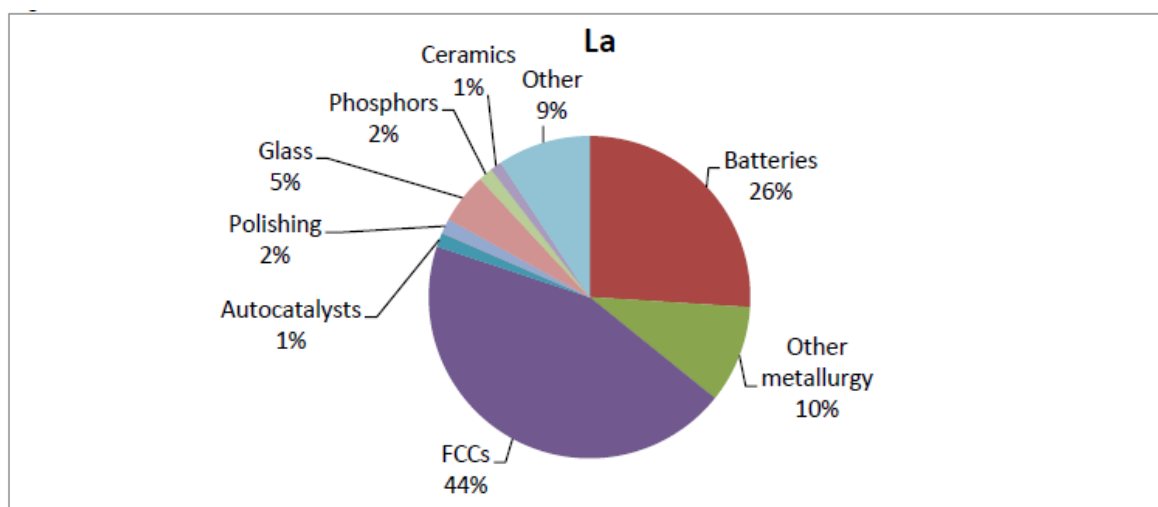
Το λανθάνιο (La, ατομικός αριθμός 57) είναι μια ελαφριά REE και είναι η δεύτερη πιο άφθονη μετά το δημήτριο, όπως παρουσιάστηκε στον πίνακα 34. Η προσφορά του λανθανίου εκτιμάται περίπου στους 34.000 τόνους κάθε χρόνο, και σύμφωνα με το σχήμα 55, το 86,5% προέρχεται από την Κίνα. Η προσφορά από τις ΗΠΑ υπολογίζεται στο 8% της παγκόσμιας προσφοράς, με κάποια επιπλέον προσφορά από την Αυστραλία και τη Ρωσία.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 55 : Προσφορά λανθάνιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

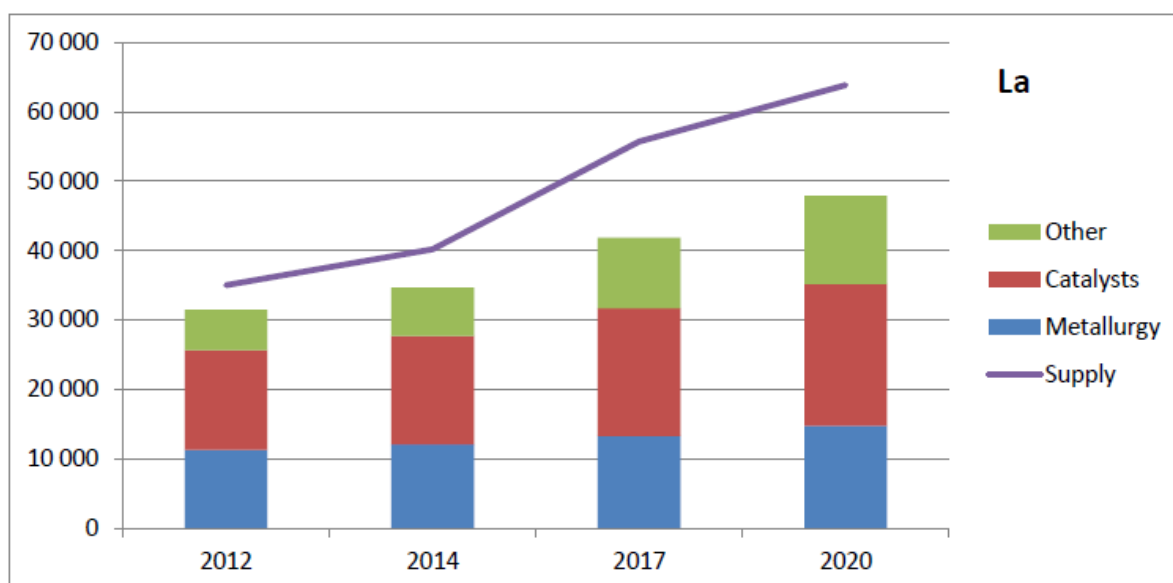
Το λανθάνιο χρησιμοποιείται για μια ποικιλία εφαρμογών, όπως φαίνεται στο σχήμα 56. Οι τρεις κύριες χρήσεις του είναι στα FCCs (44%), στις μπαταρίες NiMH (26%) και σε άλλες μεταλλουργικές χρήσεις (10%). Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση λανθανίου εκτιμάται σε 31.500 τόνους, υποδεικνύοντας ένα μικρό πλεόνασμα.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 56 : Τελική χρήση λανθάνιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση της προσφοράς και ζήτησης λανθανίου παρουσιάζεται στο σχήμα 57. Η ολική ζήτηση αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 5,5% κάθε χρόνο. Ωστόσο, η προσφορά αναμένεται να αυξηθεί και όχι να διατηρηθεί, οδηγώντας την αγορά σε ένα αυξανόμενο πλεόνασμα καθώς νέα κοιτάσματα θα πρέπει να εξορυχθούν για να ικανοποιηθεί η ανάγκη για περισσότερες βαρέες REE.

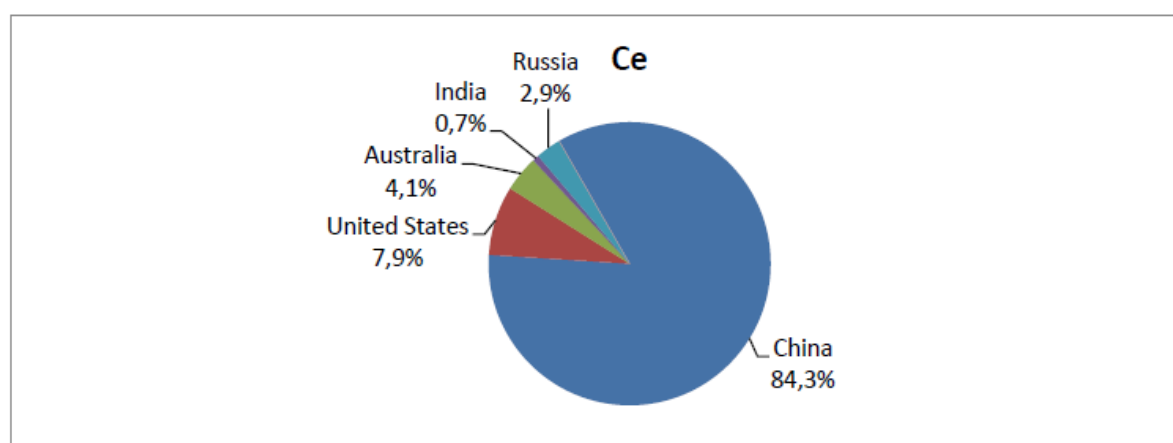


Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 57 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης λανθάνιου μέχρι το 2020 (τόνους)
(REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.1.2 Δημήτριο

Το δημήτριο (Ce, ατομικός αριθμός 58) είναι μια ελαφριά REE. Είναι με διαφορά η πιο άφθονη REE, με ένα μέσο ποσοστό του 43,2% κατά βάρος των REE, πίνακας 34. Η προσφορά δημητρίου εκτιμάται περίπου στους 49.000 τόνους ετησίως, με το 84% να προέρχεται από την Κίνα, όπως φαίνεται στο σχήμα 58. Η προσφορά από τις ΗΠΑ υπολογίζεται στο 8% της παγκόσμιας προσφοράς, με κάποια επιπρόσθετη προσφορά από Αυστραλία και Ρωσία.

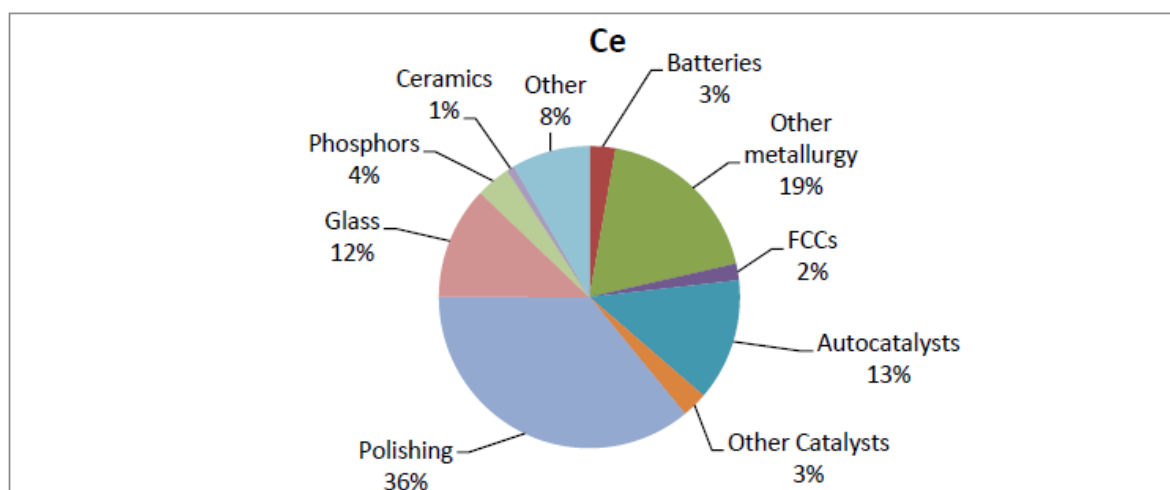


Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 58 : Προσφορά δημητρίου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Το δημήτριο χρησιμοποιείται για διάφορες εφαρμογές, σχήμα 59, αλλά οι 4 κύριες χρήσεις είναι το γυάλισμα (36%), η μεταλλουργία εκτός από τις μπαταρίες (19%), οι καταλύτες

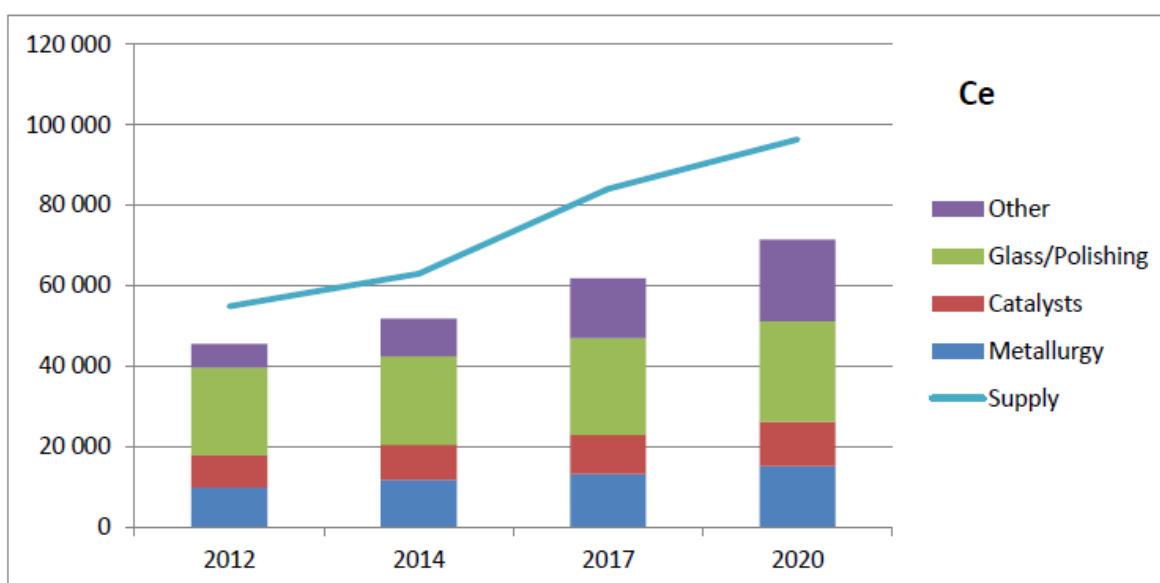
αυτοκινήτων (13%) και το γυαλί (12%). Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση δημήτριου εκτιμάται στους 45.000 τόνους, υποδεικνύοντας ένα μικρό πλεόνασμα.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 59 : Τελική χρήση δημήτριου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση της προσφοράς και ζήτησης δημητρίου παρουσιάζεται στο σχήμα 60. Η συνολική ζήτηση για δημήτριο αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 6% ετησίως. Ωστόσο, όπως και για το λανθάνιο, η προσφορά αναμένεται να αυξηθεί, οδηγώντας την αγορά σε ένα αυξανόμενο πλεόνασμα.

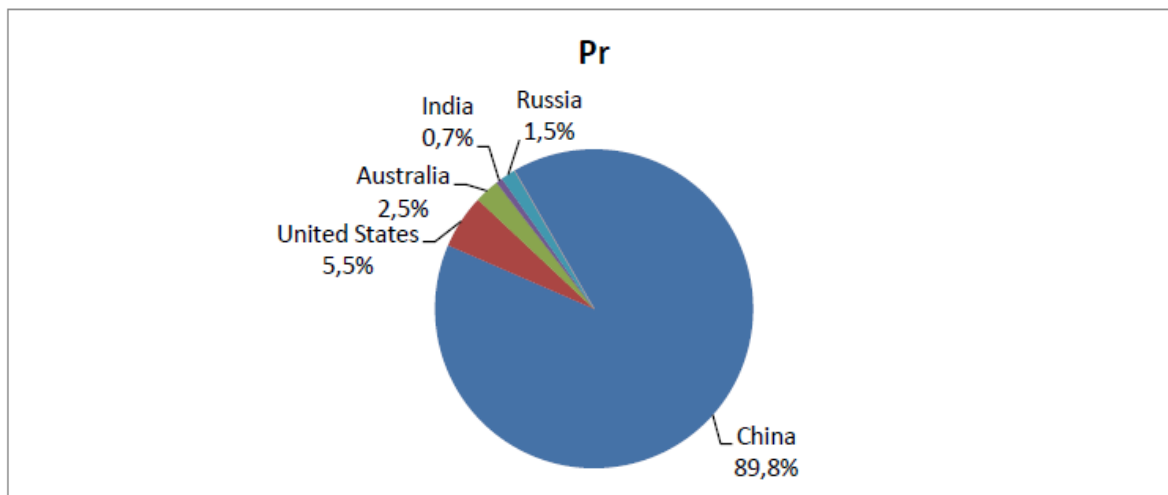


Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 60 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης δημήτριου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.1.3 Πρασεοδύμιο

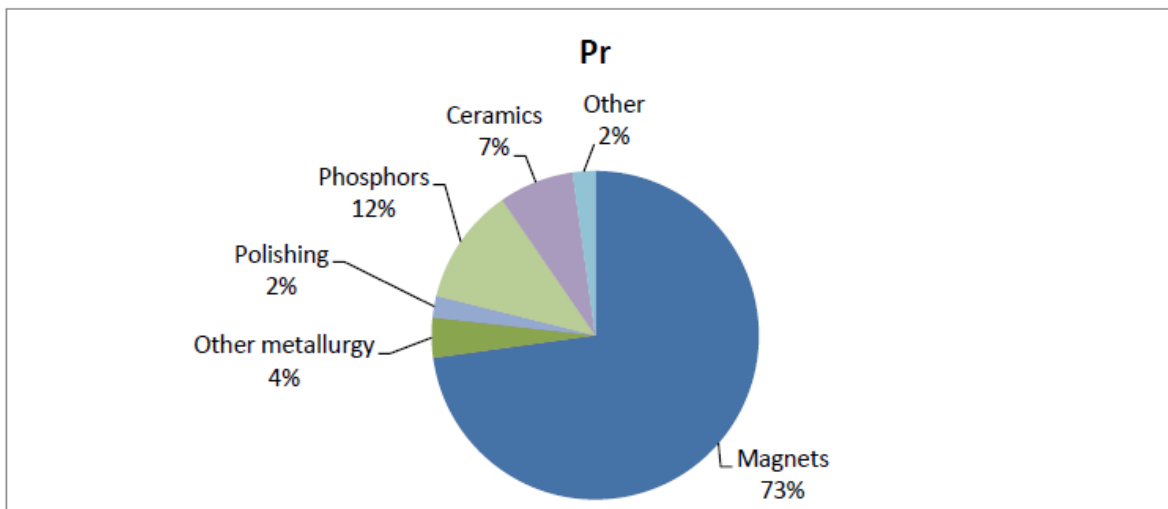
Το πρασεοδύμιο (Pr, ατομικός αριθμός 59) είναι μια ελαφριά REE. Είναι λιγότερο συνηθισμένη REE από το δημήτριο και το λανθάνιο, με μόνο 4,6% να είναι διαθέσιμο, πίνακας 34. Παρόλα αυτά είναι ανάμεσα στις πιο συνηθισμένες REE. Η προσφορά του πρασεοδύμιου εκτιμάται περίπου στους 6.300 τόνους ετησίως, με το 90% να προέρχεται από την Κίνα, σχήμα 61. Η προσφορά από τις ΗΠΑ υπολογίζεται στο 5,5% της παγκόσμιας προσφοράς, με κάποια επιπρόσθετη προσφορά από Αυστραλία και Ρωσία.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 61 : Προσφορά πρασεοδύμιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

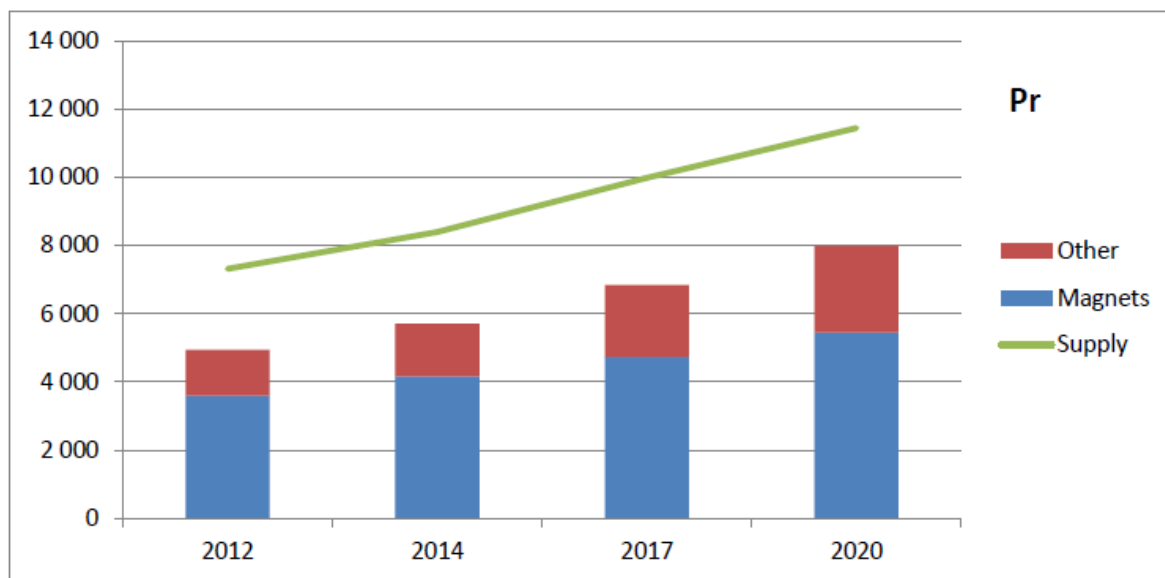
Το μεγαλύτερο ποσοστό πρασεοδύμιου χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μαγνητών σε μαγνήτες NdFeB (73%), ωστόσο τα φωσφορικά, τα κεραμικά και οι μεταλλουργικές χρήσεις εκτός από μπαταρίες είναι επίσης σημαντικές εφαρμογές, σχήμα 62. Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση πρασεοδύμιου εκτιμάται σε 5.000 τόνους, υποδεικνύοντας σημαντικό πλεόνασμα.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 62 : Τελική χρήση πρασεοδύμιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση της προσφοράς και ζήτησης πρασεοδύμιου παρουσιάζεται στο σχήμα 63. Η συνολική ζήτηση για πρασεοδύμιο αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 6% ετησίως, αφού ένας αριθμός κοιτασμάτων που τώρα εξετάζονται εκτός Κίνας αναμένεται να φτάσουν σε παραγωγή τα προσεχή χρόνια. Ωστόσο, η προσφορά αναμένεται να αυξηθεί, διατηρώντας την αγορά με σημαντικό πλεόνασμα.

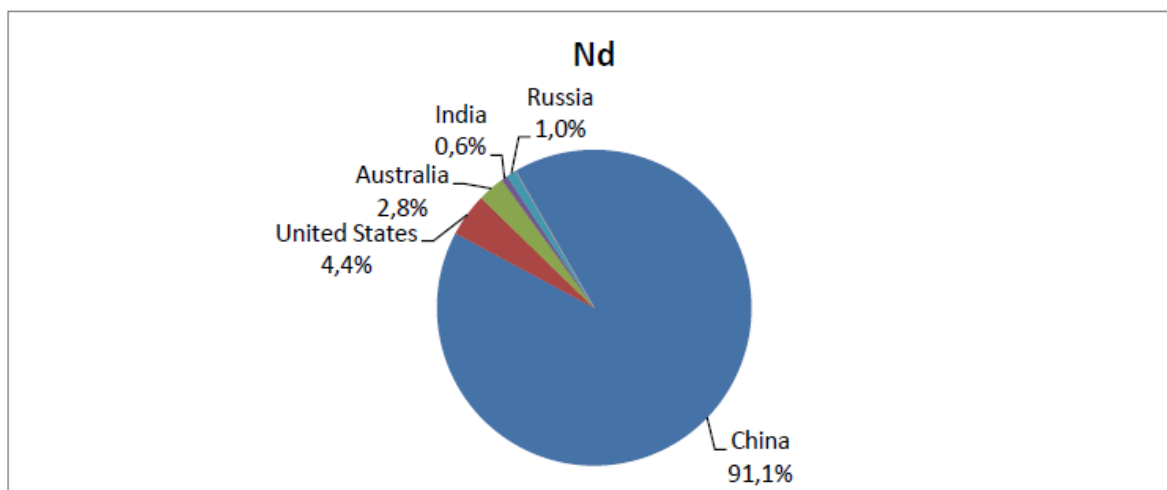


Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 63 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης πρασεοδύμιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.1.4 Νεοδύμιο

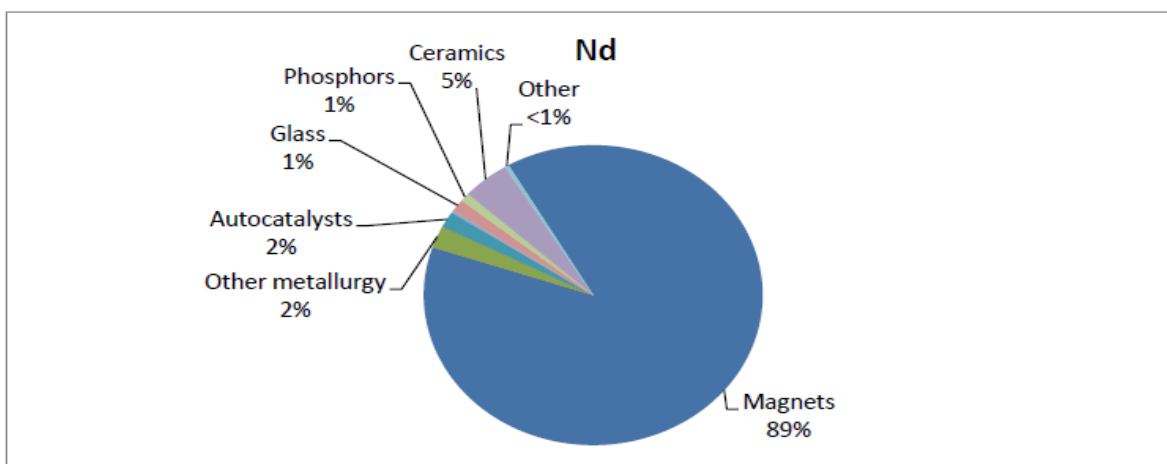
Το νεοδύμιο (Nd, ατομικός αριθμός 60) είναι μια ελαφριά REE. Είναι αρκετά άφθονο, τρίτο στην κατάταξη μεταξύ των REE, με ένα ένα μέσο ποσοστό 16,2% κατά βάρος στα αποθέματα, πίνακας 34. Η προσφορά του νεοδύμιου εκτιμάται σε περίπου 21.000 τόνους ετησίως, 91% από τους οποίους προέρχεται από την Κίνα, σχήμα 64. Η προσφορά από τις ΗΠΑ υπολογίζεται σε 4,4% της παγκόσμιας προσφοράς, με κάποια επιπρόσθετη προσφορά από Αυστραλία και Ρωσία.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 64 : Προσφορά νεοδύμιου ανά χώρα, 2012 (21000 τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

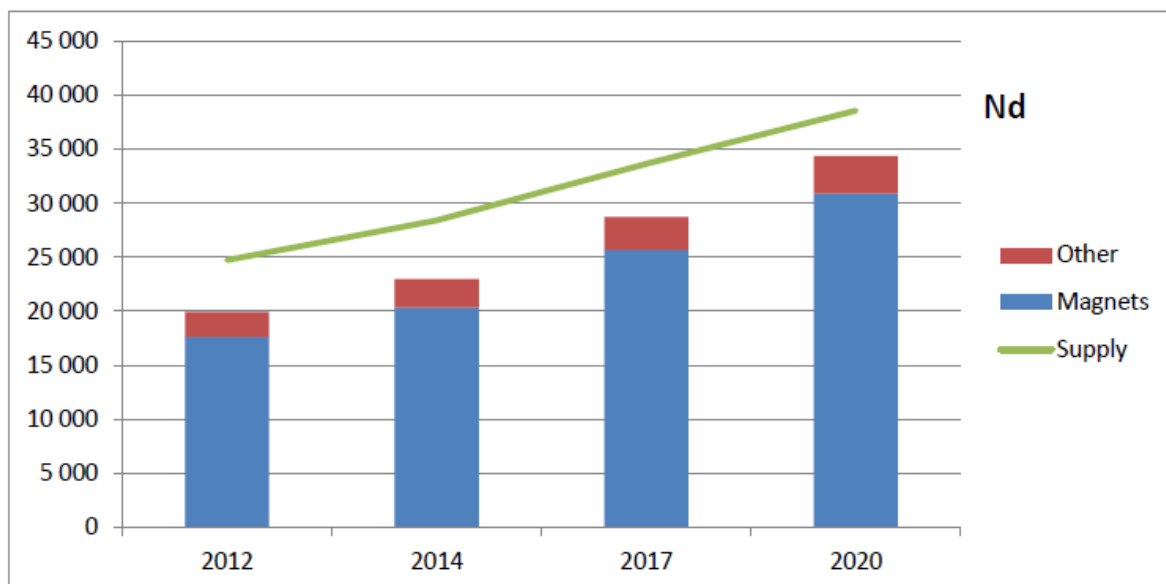
Το περισσότερο νεοδύμιο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μαγνητών, στους μαγνήτες NdFeB (89%), σχήμα 65. Άλλες χρήσεις για το νεοδύμιο περιλαμβάνουν μεταλλουργικές χρήσεις εκτός από μπαταρίες, καταλύτες αυτοκινήτων, γυάλισμα, γυαλί, φωσφορικά, λείζερ και κεραμικά. Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση νεοδύμιου εκτιμάται σε 19.900 τόνους, υποδεικνύοντας ένα μικρό πλεόνασμα.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 65 : Τελική χρήση νεοδύμιου, 2012 (19900 τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση της προσφοράς και ζήτησης νεοδύμιου παρουσιάζεται στο σχήμα 66. Η συνολική ζήτηση για το νεοδύμιο αναμένεται να αυξηθεί κατά περίπου 7% ετησίως, αφού ένας αριθμός κοιτασμάτων που τώρα ερευνώνται εκτός Κίνας αναμένεται να φτάσει σε παραγωγή τα επόμενα χρόνια. Η προσφορά αναμένεται να συμβαδίσει με τη ζήτηση, ωστόσο η ισορροπία της αγοράς θα παραμείνει λογικά σφιχτή.

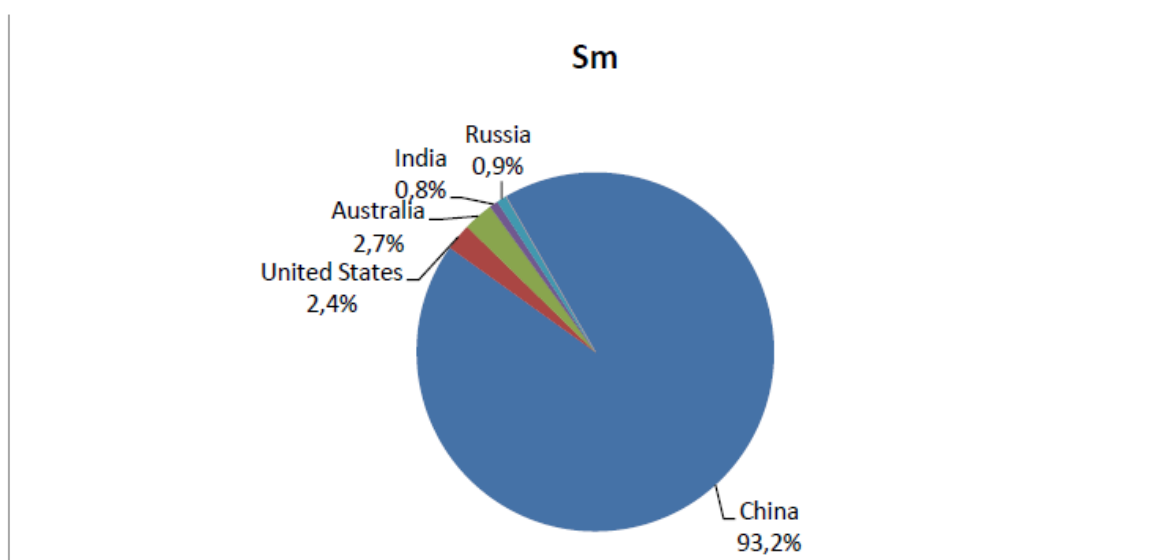


Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 66 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης νεοδύμιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.1.5 Σαμάριο

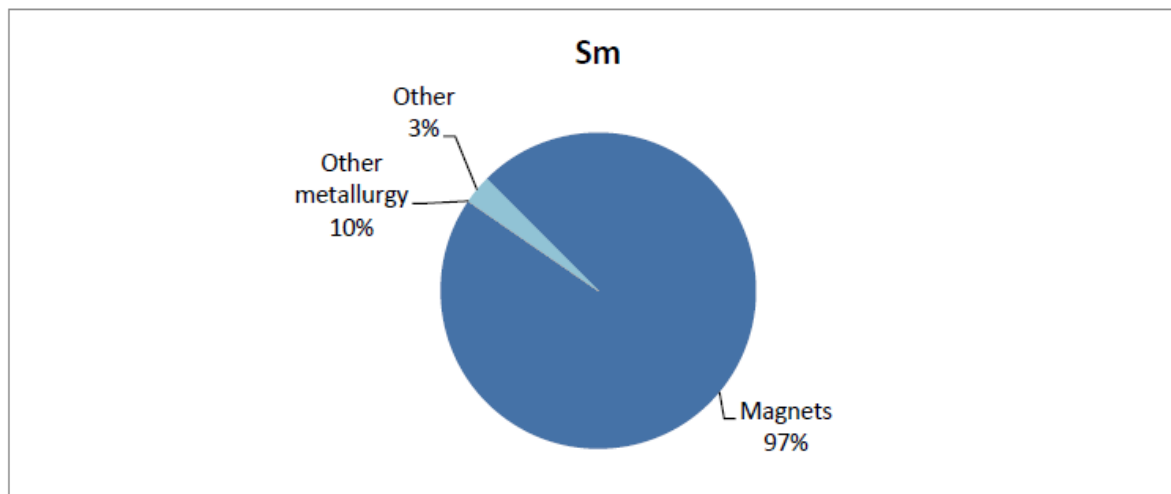
Το σαμάριο (Sm, ατομικός αριθμός 62) είναι μια ελαφριά REE. Είναι σχετικά σπάνιο, αποτελώντας μονάχα κατά μέσο όρο το 2,2% των γνωστών REE, πίνακας 34. Η προσφορά του σαμαρίου εκτιμάται σε 2.600 τόνους ετησίως, 93% των οποίων προέρχεται από την Κίνα, σχήμα 67. Η προσφορά από τις ΗΠΑ και την Αυστραλία υπολογίζεται σε περίπου 5% της παγκόσμιας προσφοράς.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 67 : Προσφορά σαμαρίου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

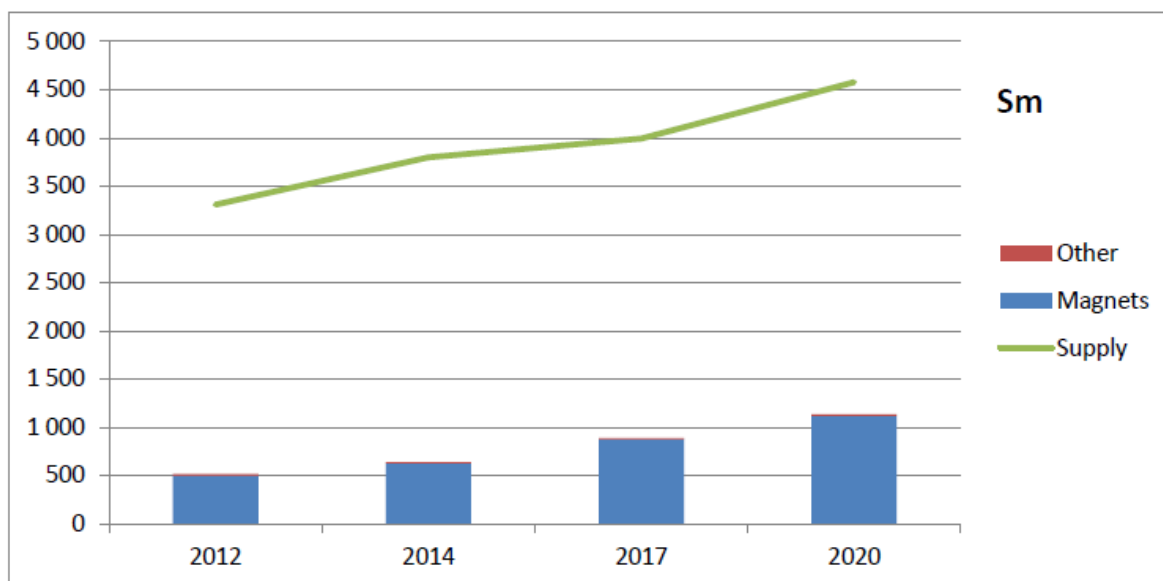
Το περισσότερο σαμάριο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μαγνητών Sm-Co όπως φαίνεται στο σχήμα 68. Αυτοί οι μαγνήτες, αν και εμφανίζουν χαμηλότερη μαγνητική απόδοση από τους NdFeB, είναι κατάλληλοι για λειτουργίες σε θερμά περιβάλλοντα όπως οι μηχανές κάποιων τρένων υψηλής ταχύτητας. Άλλες χρήσεις για το σαμάριο περιλαμβάνουν την πυρηνική βιομηχανία. Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση σαμαρίου εκτιμάται στους 500 τόνους, υποδεικνύοντας ένα μεγάλο πλεόνασμα.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 68 : Τελική χρήση σαμαρίου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση της προσφοράς και ζήτησης σαμαρίου παρουσιάζεται στο σχήμα 69. Η συνολική ζήτηση για σαμάριο αναμένεται να αυξηθεί γύρω στο 10% ετησίως. Ωστόσο, δεδομένου ότι υπάρχει ήδη ένα πολύ μεγάλο πλεόνασμα σαμαρίου, λίγες ανησυχίες θα πρέπει να εκφράζονται για αυτή την ισχυρή ανάπτυξη της ζήτησης.

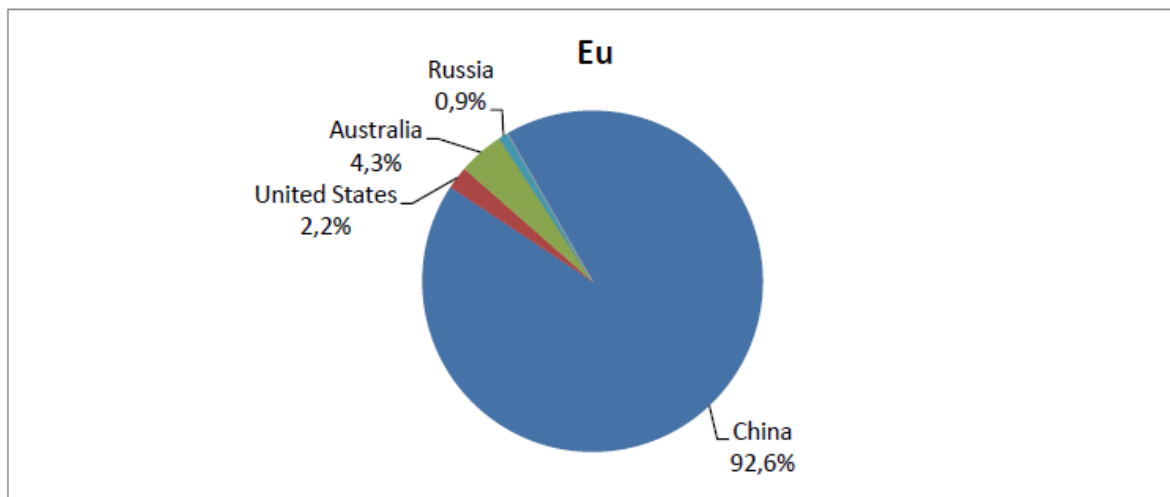


Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 69 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης σαμαρίου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.1.6 Ευρώπιο

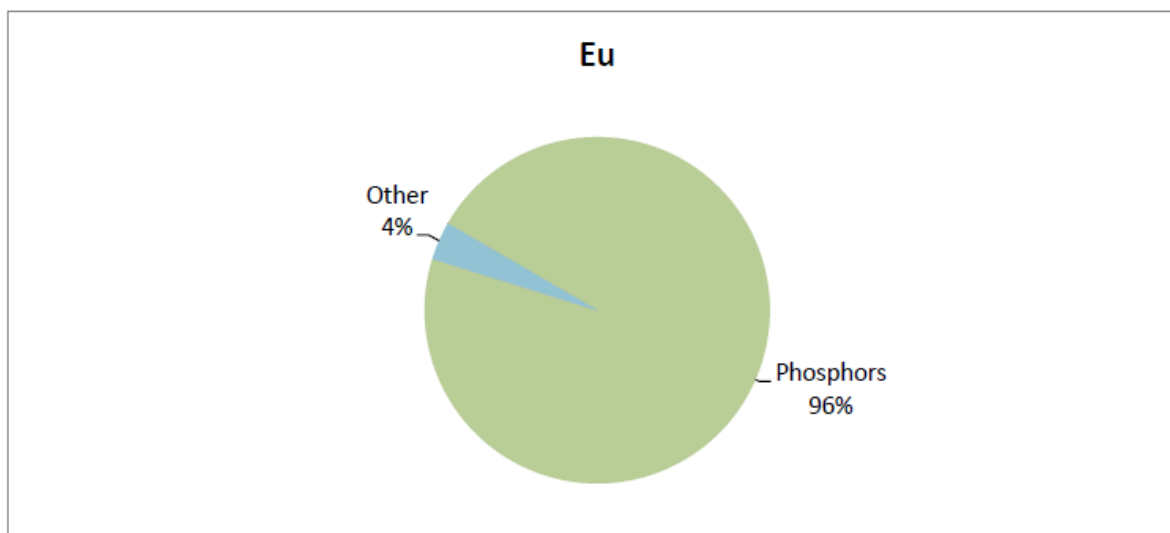
Το ευρώπιο (Eu, ατομικός αριθμός 63) είναι μια βαριά REE. Είναι από τις πιο σπάνιες REE, αντιπροσωπεύοντας μονάχα, σε μέση τιμή, το 0,3% των αποθεμάτων των REE των οποίων ο υπολογισμός ήταν δυνατός. Η προσφορά του ευρώπιου εκτιμάται στο 350 τόνους ετησίως, με το 93% να προέρχεται από την Κίνα, σχήμα 70. Η προσφορά από την Αυστραλία υπολογίζεται στο 4,3% της παγκόσμιας προσφοράς, με επιπρόσθετη προσφορά από τις ΗΠΑ και τη Ρωσία.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 70 : Προσφορά ευρώπιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

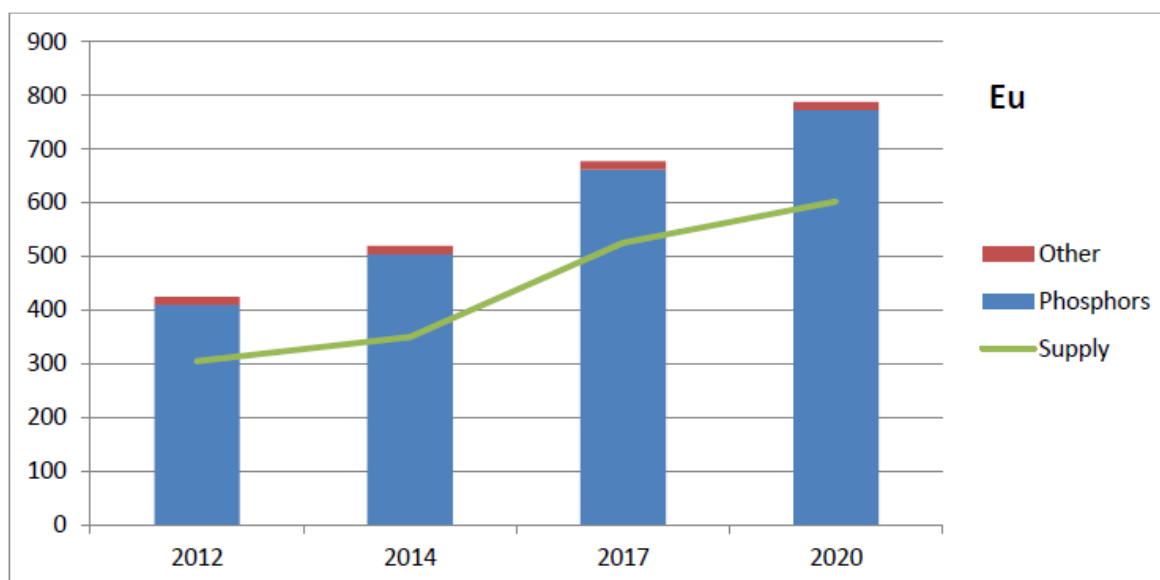
Το μεγαλύτερο ποσοστό του ευρώπιου χρησιμοποιείται στα φωσφορικά (96%) όπως φαίνεται στο σχήμα 71. Αυτά τα φωσφορικά αποτελούν απαραίτητες πρώτες ύλες για την παραγωγή συμπαγών λαμπτήρων φθορισμού (CFLs), LEDs και οθόνων βίντεο, καθιστώντας το ευρώπιο έναν πολύ στρατηγικό πόρο. Άλλες χρήσεις για το ευρώπιο περιλαμβάνουν την πυρηνική βιομηχανία και οι φθορίζουσες χρωστικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για την πρόληψη της παραχάραξης των χαρτονομισμάτων του Ευρώ. Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση για ευρώπιο εκτιμάται σε 425 τόνους, υποδεικνύοντας ένα σημαντικό έλλειμμα.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 71 : Τελική χρήση ευρώπιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση για την προσφορά και ζήτηση για ευρώπιο φαίνεται στο σχήμα 72. Η ολική ζήτηση για ευρώπιο αναμένεται να αυξηθεί γύρω στο 8% ετησίως. Η προσφορά επίσης αναμένεται να αυξηθεί με ένα παρόμοιο ρυθμό. Συνεπώς το σημαντικό έλλειμμα που υπάρχει αναμένεται να διατηρηθεί.



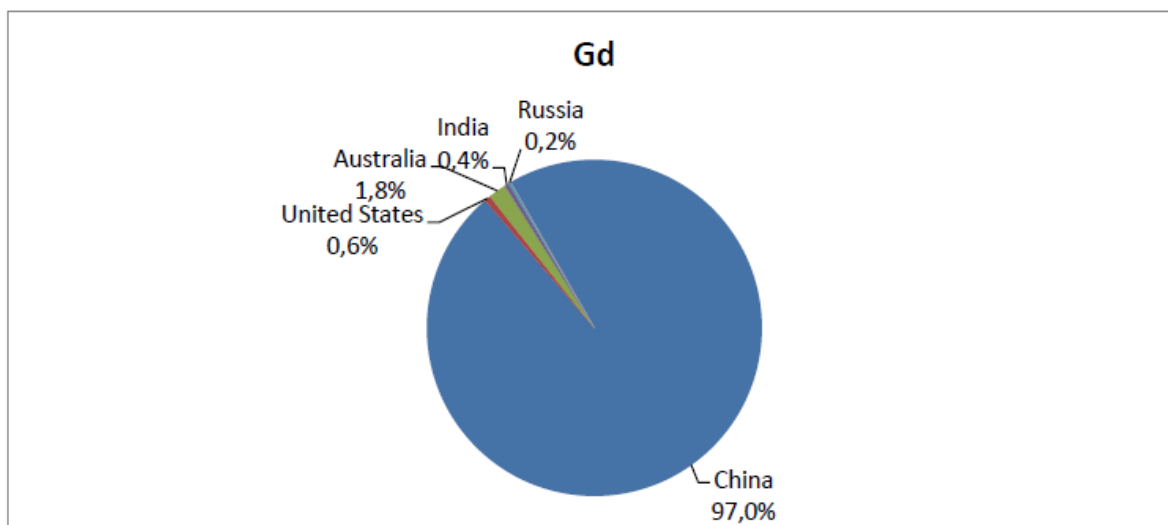
Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 72 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης ευρώπιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.1.7 Γαδολίνιο

Το γαδολίνιο (Gd, ατομικός αριθμός 64) είναι μια βαριά REE. Είναι αρκετά σπάνια, αποτελώντας το 1,4% κατά μέση τιμή των αποθεμάτων του πίνακα 34. Η προσφορά του

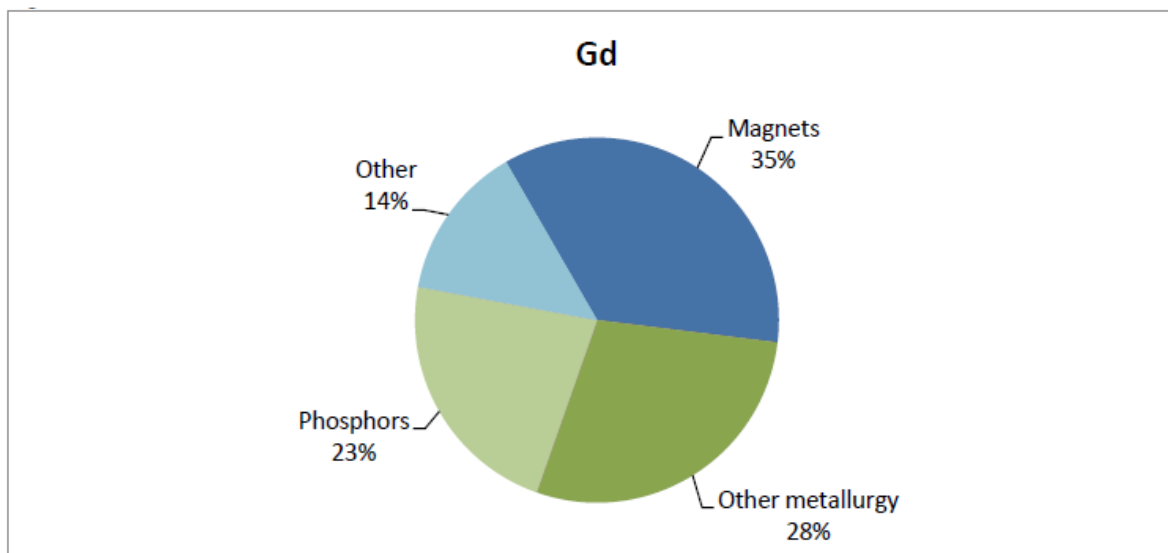
γαδολίνιου εκτιμάται στους 2.250 τόνους ετησίως, με το 97% να προέρχεται από την Κίνα, σχήμα 73.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 73 : Προσφορά γαδολίνιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Το γαδολίνιο έχει τρεις κύριες εφαρμογές, σχήμα 74, : μαγνήτες – στην Κίνα μονάχα – (35%), μεταλλουργικές χρήσεις εκτός από μπαταρίες (28%) και φωσφορικά (23%). Άλλες χρήσεις για το γαδολίνιο περιλαμβάνουν την πυρηνική βιομηχανία και ως ένα ιατρικό μέσο αντίθεσης. Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση γαδολίνιου εκτιμάται στους 1.000 τόνους, υποδεικνύοντας ένα μεγάλο πλεόνασμα.

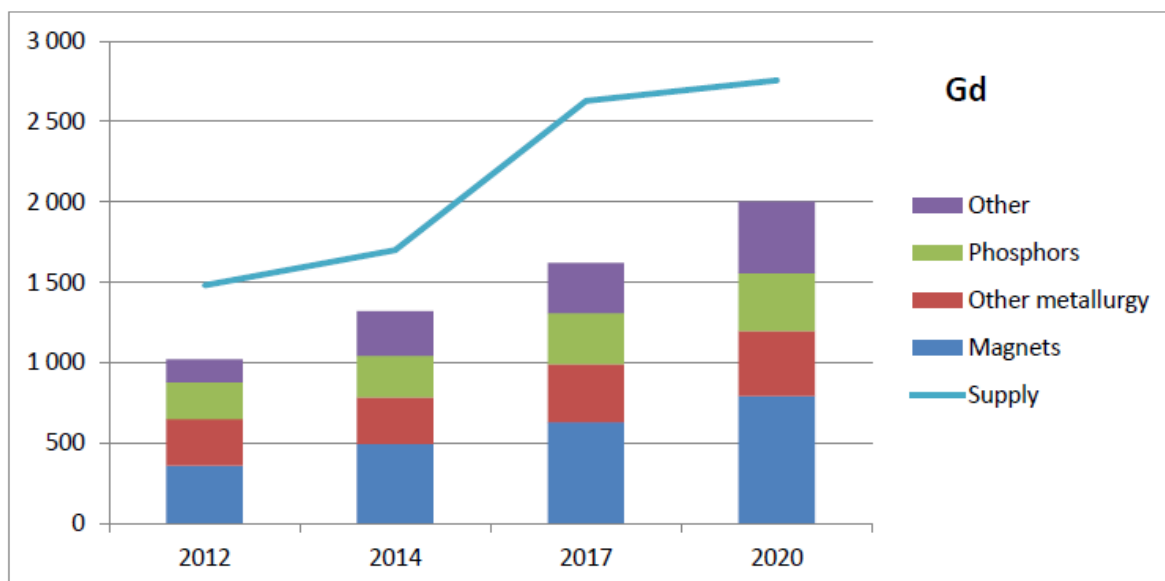


Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 74 : Τελική χρήση γαδολίνιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση για την προσφορά και ζήτηση γαδολίνιου φαίνεται στο σχήμα 75. Η ολική ζήτηση για γαδολίνιο αναμένεται να αυξηθεί γύρω στο 9% ετησίως σχετικά

με χρήσεις σε μαγνήτες και στην ιατρική απεικόνιση. Ωστόσο η αγορά προσφάτως είχε σημαντικό πλεόνασμα με συνέπεια η προσφορά να αναμένεται να αυξηθεί.

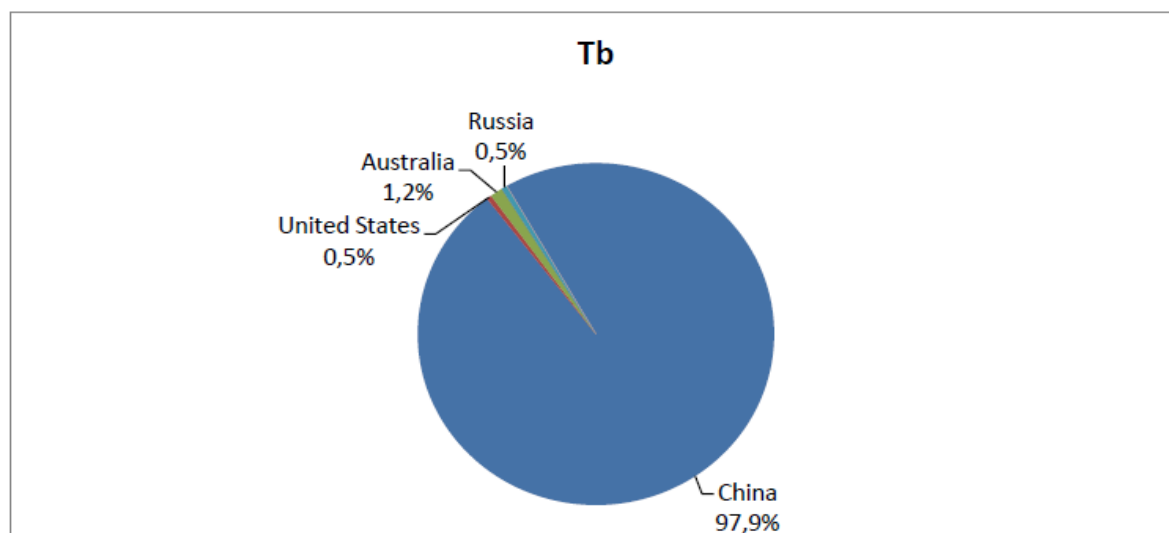


Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 75 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης γαδολίνιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.1.8 Τέρβιο

Το τέρβιο (Tb, ατομικός αριθμός 65) είναι μια βαριά REE και μια από τις πιο σπάνιες, 0,2% σύμφωνα με τον πίνακα 34. Η προσφορά τέρβιου εκτιμάται σε 340 τόνους ετησίως, με το 98% να προέρχεται από την Κίνα, σχήμα 76.

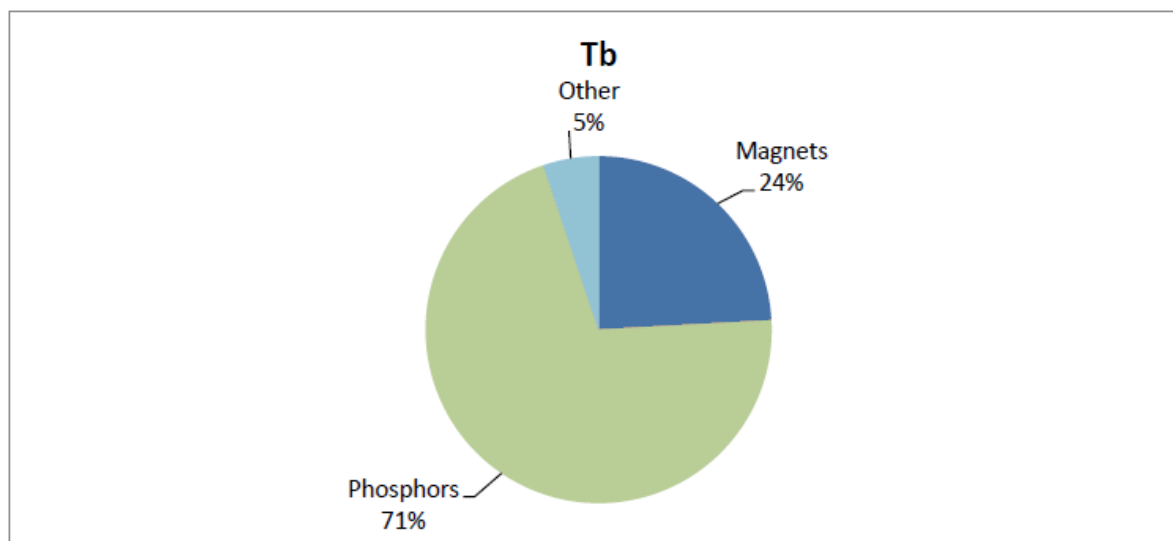


Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 76 : Προσφορά τέρβιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Το μεγαλύτερο ποσοστό του τέρβιου χρησιμοποιείται στα φωσφορικά (71%), ωστόσο και οι μαγνήτες είναι μια σημαντική εφαρμογή (24%), όπως φαίνεται στο σχήμα 77. Η συνολική

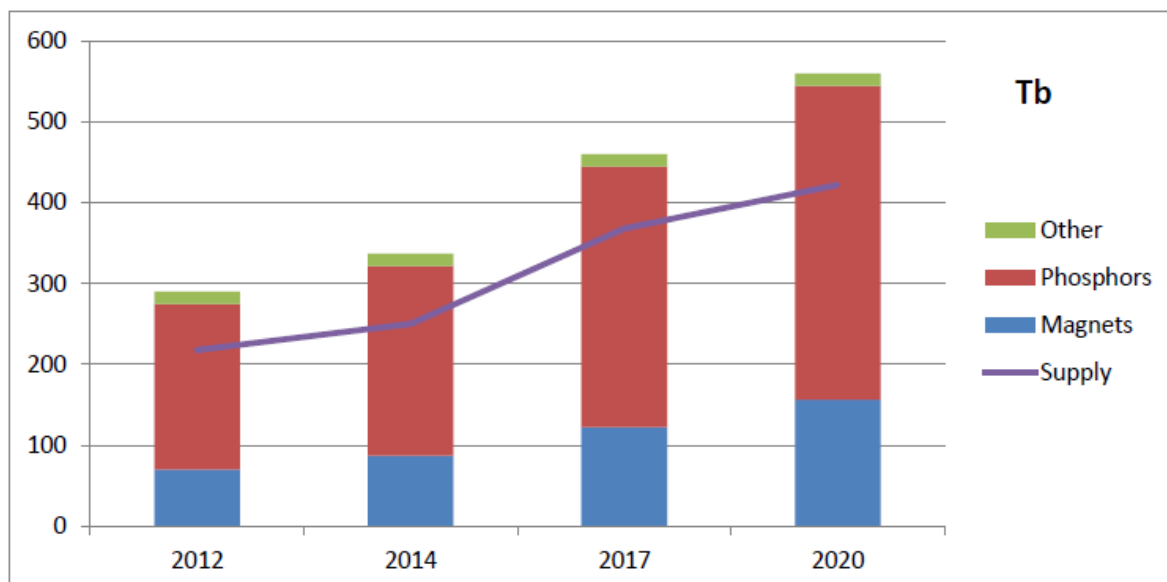
παγκόσμια κατανάλωση τέρβιου εκτιμάται στους 290 τόνους, υποδεικνύοντας ένα σημαντικό πλεόνασμα.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 77 : Τελική χρήση τέρβιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση για την προσφορά και ζήτηση τέρβιου φαίνεται στο σχήμα 78. Η συνολική ζήτηση για τέρβιο αναμένεται να αυξηθεί γύρω στο 8% ετησίως. Η προσφορά επίσης αναμένεται να αυξηθεί με ένα παρόμοιο ρυθμό. Ωστόσο υπάρχει προσφάτως ένα σημαντικό έλλειμμα για τέρβιο, το οποίο αναμένεται να διατηρηθεί λόγω των διαφορών μεταξύ της ζήτησης REE και της φυσικής τους αφθονίας.

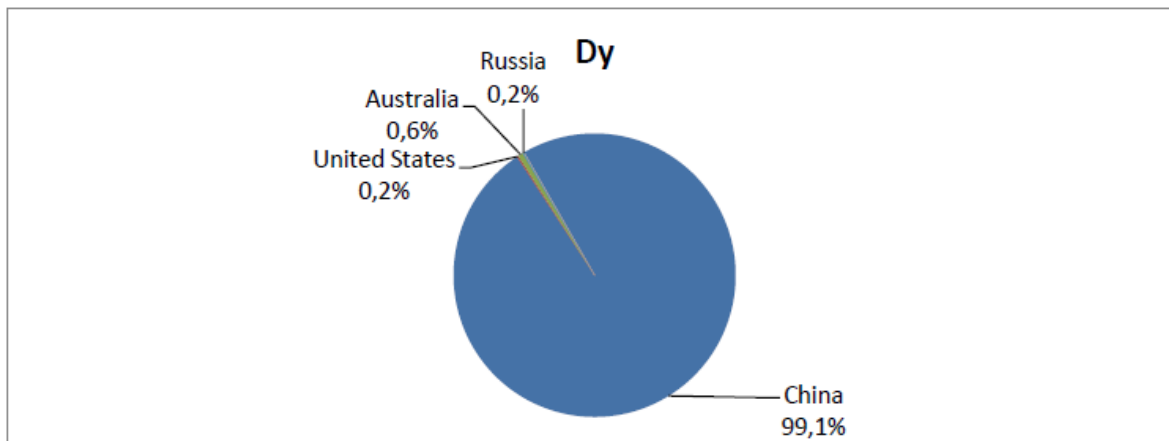


Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 78 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης τέρβιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.1.9 Δυσπρόσιο

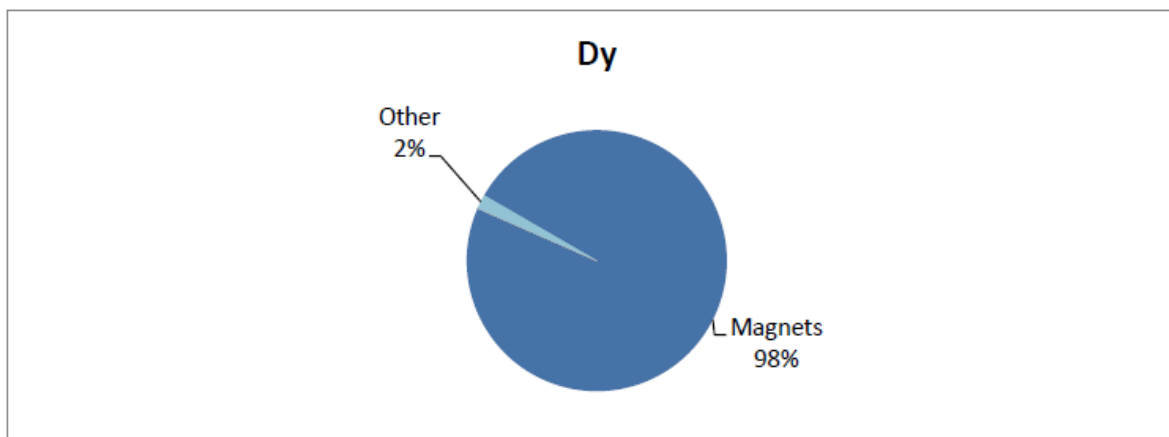
Το δυσπρόσιο (Dy, ατομικός αριθμός 66) είναι μια βαριά REE. Συμβάλλει σε ποσοστό 0,9% των πόρων και των αποθεμάτων REE του πίνακα 34. Η προσφορά δυσπρόσιου εκτιμάται στους 1.350 τόνους ετησίως, με το 99% να προέρχεται από την Κίνα, σχήμα 79.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 79 : Προσφορά δυσπρόσιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

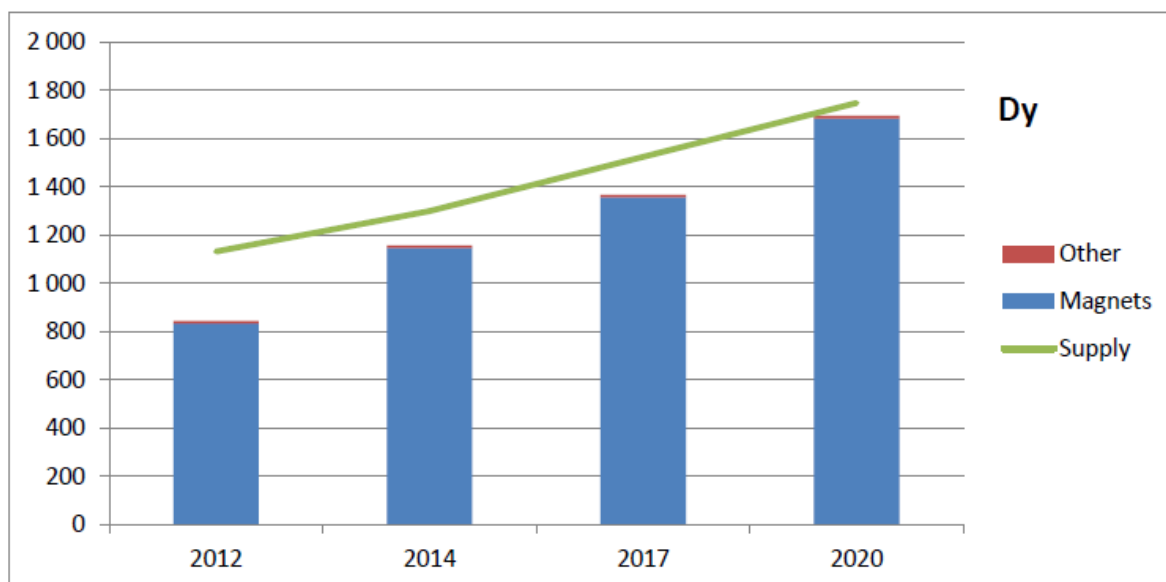
Το περισσότερο δυσπρόσιο χρησιμοποιείται στους μαγνήτες (98%) όπως φαίνεται στο σχήμα 80, όπου είναι απαραίτητο για να ενεργοποιήσει τη χρήση μαγνητών NdFeB σε αυξημένες θερμοκρασίες. Άλλες χρήσεις για το δυσπρόσιο περιλαμβάνουν τα λέιζερ και την πυρηνική βιομηχανία. Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση δυσπρόσιου εκτιμάται στους 850 τόνους, υποδεικνύοντας ένα σημαντικό πλεόνασμα. Το δυσπρόσιο θεωρείται ως ένα από τα πιο σημαντικά κρίσιμα μέταλλα σε μελέτες κρισιμότητας (ειδικά σε αυτές που σχετίζονται με ενεργειακές τεχνολογίες) λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για μόνιμους μαγνήτες για εφαρμογές όπως για ανεμογεννήτριες άμεσης μετάδοσης, σε συνδυασμό με την περιορισμένη προσφορά.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 80 : Τελική χρήση δυσπρόσιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση για την προσφορά και ζήτηση δυσπρόσιου φαίνεται στο σχήμα 81. Η συνολική ζήτηση για δυσπρόσιο αναμένεται να αυξηθεί γύρω στο 9% ετησίως. Η προσφορά αναμένεται να συμβαδίζει ακριβώς με τη ζήτηση, με συνέπεια η ισορροπία της αγοράς να διατηρηθεί με σφικτή αύξηση καθώς προχωρά η δεκαετία.

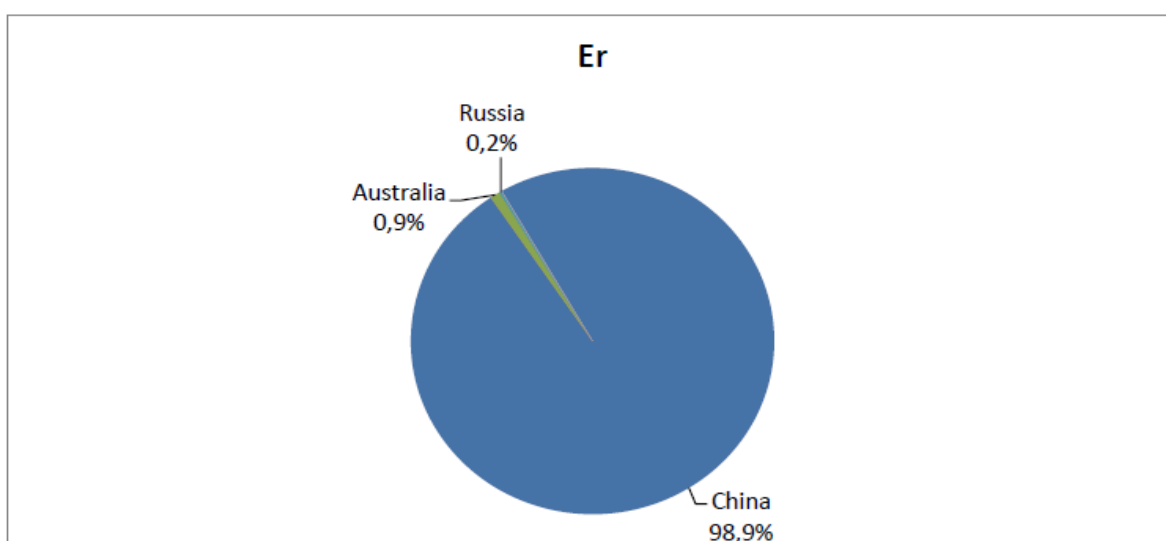


Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 81 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης δυσπρόσιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.1.10 Έρβιο

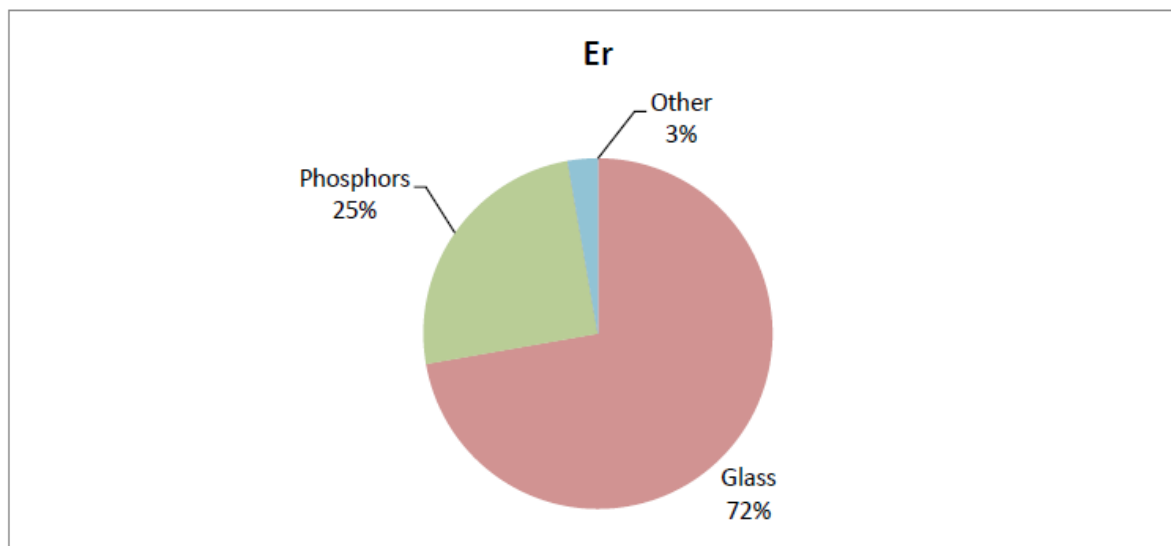
Το έρβιο (Er, ατομικός αριθμός 68) είναι μια βαριά REE. Αποτελεί μονάχα το 0,5% των πόρων και των αποθεμάτων του πίνακα 34. Η προσφορά του έρβιου εκτιμάται σε 860 τόνους ετησίως, με το 99% να προέρχεται από την Κίνα, σχήμα 82.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 82 : Προσφορά έρβιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

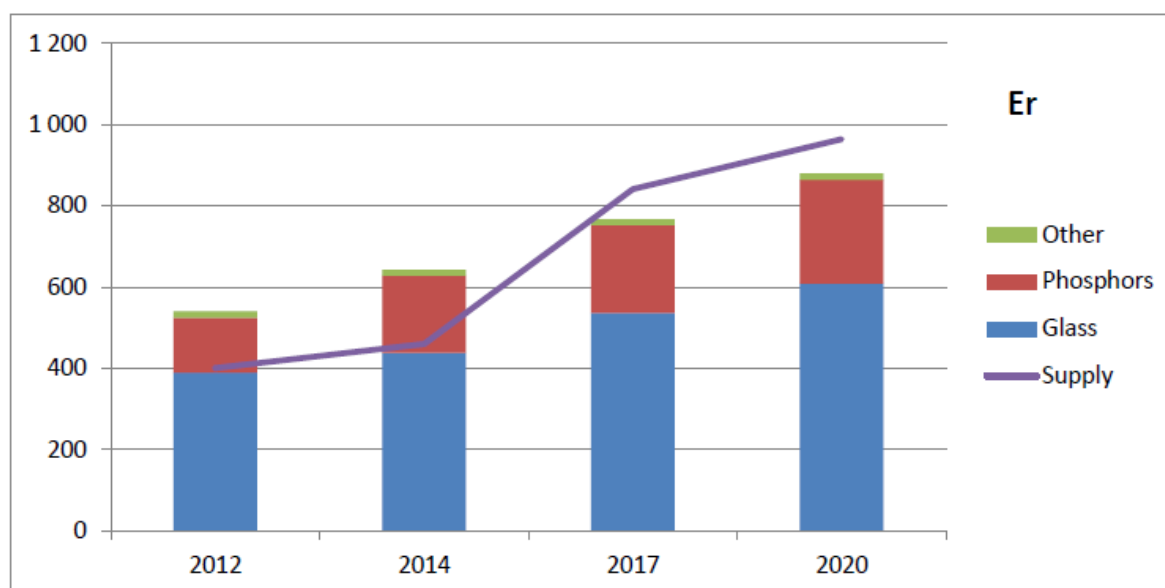
Το έρβιο κυρίως χρησιμοποιείται στο γυαλί (72%), ωστόσο τα φωσφορικά είναι επίσης μια σημαντική εφαρμογή, σχήμα 83. Άλλες χρήσεις για το έρβιο αποτελούν τα λέιζερ και η πυρηνική βιομηχανία. Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση έρβιου εκτιμάται σε 540 τόνους, υποδεικνύοντας ένα σημαντικό πλεόνασμα.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 83 : Τελική χρήση έρβιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση για την προσφορά και ζήτηση έρβιου φαίνεται στο σχήμα 84. Η συνολική ζήτηση για έρβιο αναμένεται να αυξηθεί γύρω στο 6% ετησίως. Η ανάπτυξη της προσφοράς αναμένεται να υπερβεί αυτό το ρυθμό αύξησης και σταδιακά θα οδηγήσει την αγορά από το τρέχον έλλειμμα σε ένα μικρό πλεόνασμα το 2020.

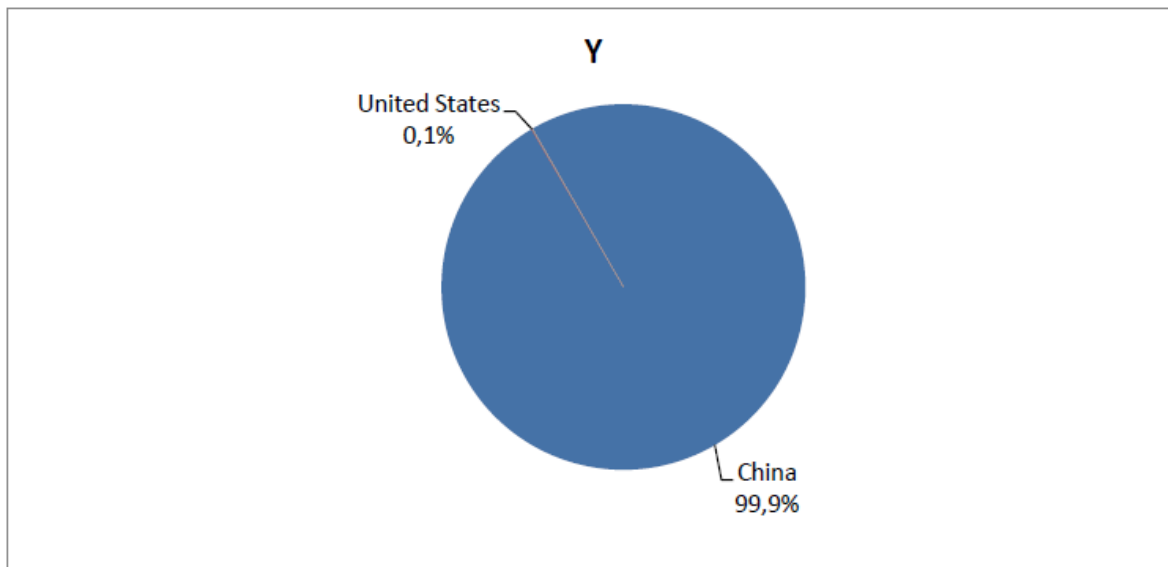


Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 84 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης έρβιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.1.11 Ύτριο

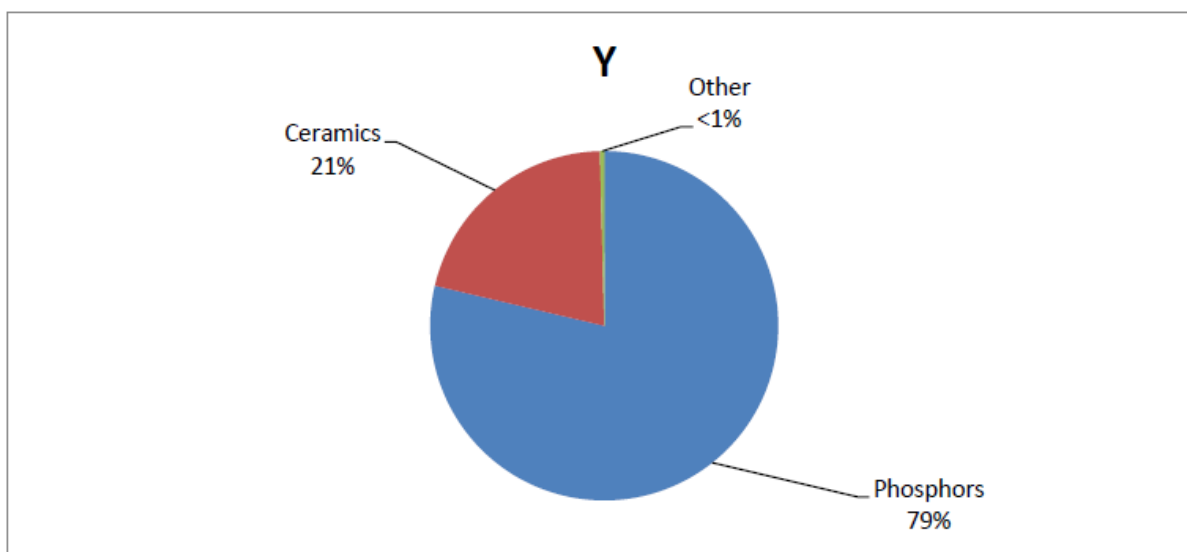
Το ύτριο (Y, ατομικός αριθμός 39) είναι μια βαριά REE και σχετικά άφθονη, αποτελώντας το 4,9% των πόρων και των αποθεμάτων του πίνακα 34. Η προσφορά ύτρίου εκτιμάται στους 9.925 τόνους ετησίως, με το 99,9% να προέρχεται από την Κίνα, σχήμα 85.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 85 : Προσφορά ύτρίου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

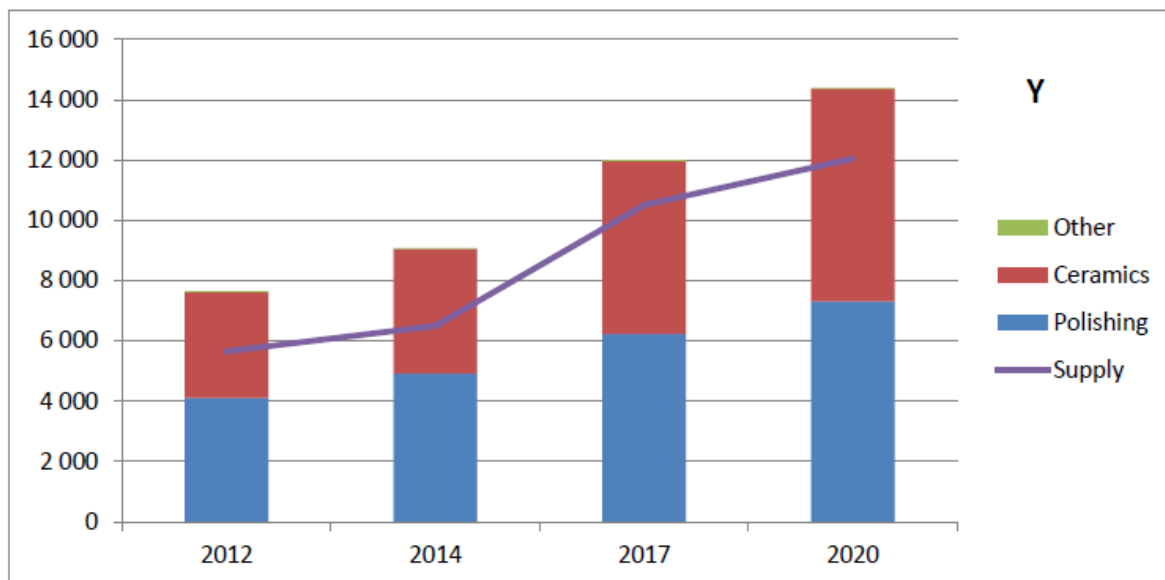
Οι δύο κύριες χρήσεις ύτρίου είναι τα φωσφορικά (79%) και τα κεραμικά (21%), όπως φαίνεται στο σχήμα 86. Η πλειονότητα των φωσφορικών χρησιμοποιείται στο φωτισμό (70%) και στις οθόνες (22%), και τα κεραμικά στα ηλεκτρονικά. Η συνολική παγκόσμια κατανάλωση ύτρίου εκτιμάται στους 7.650 τόνους, υποδεικνύοντας ένα σημαντικό πλεόνασμα.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 86 : Τελική χρήση ύτρίου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση για την προσφορά και ζήτηση ύττριου φαίνεται στο σχήμα 87. Η συνολική ζήτηση για ύττριο αναμένεται να αυξηθεί γύρω στο 8% ετησίως. Η προσφορά επίσης αναμένεται να αυξηθεί με ένα παρόμοιο ρυθμό. Συνεπώς το υπάρχον σημαντικό έλλειμμα για ύττριο αναμένεται να διατηρηθεί.

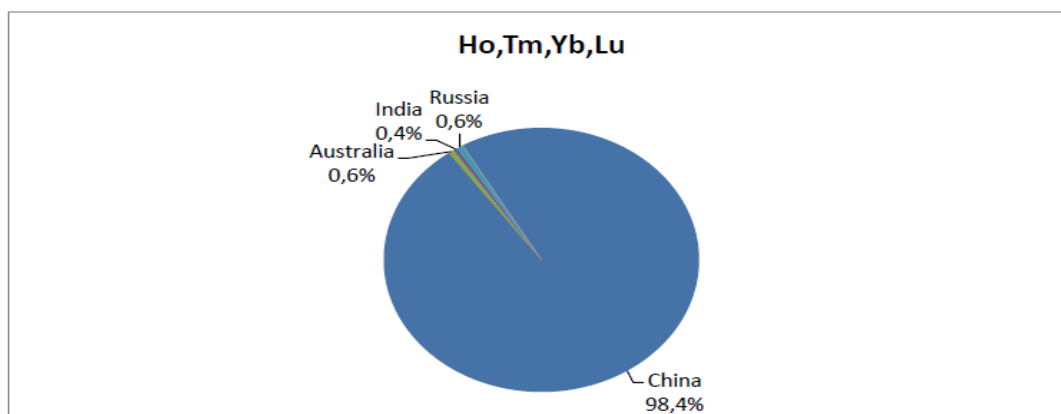


Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 87 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης ύττριου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.1.12 Όλμιο, Θούλιο, Υπτέρβιο, Λουτήτιο

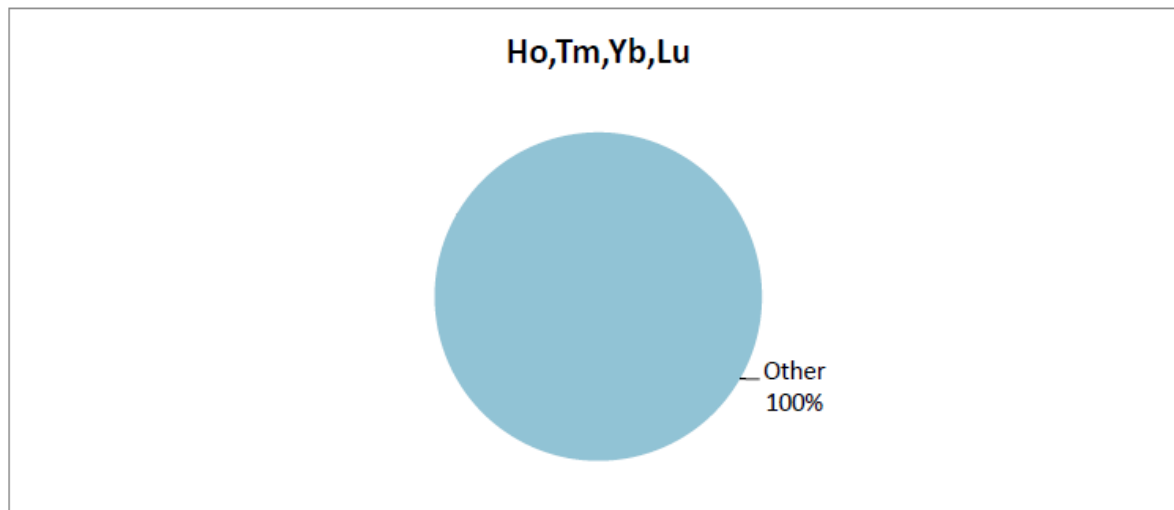
Το όλμιο (Ho, ατομικός αριθμός 67), το θούλιο (Tm, ατομικός αριθμός 68), το υπτέρβιο (Yb, ατομικός αριθμός 70) και το λουτήτιο (Lu, ατομικός αριθμός 71) είναι όλα βαρέες REE. Όλα είναι πολύ σπάνια, με πιο άφθονο το υπτέρβιο, που αποτελεί μόλις το 0,4% των γνωστών πόρων και αποθεμάτων του πίνακα 34. Η προσφορά όλμιου, θούλιου, υπτέρβιου και λουτήτιου από κοινού εκτιμάται στους 1.740 τόνους ετησίως, με το 98% να προέρχεται από την Κίνα, σχήμα 88.



Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013) & USGS Data for Australia

Σχήμα 88 : Προσφορά όλμιου, θούλιου, υπτέρβιου και λουτήτιου ανά χώρα, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Η χρήση όλμιου, θούλιου, υττέρβιου και λουτήτιου σε ανεξάρτητες εφαρμογές είναι πολύ μικρή για να εκτιμηθεί με ακρίβεια ως εκ τούτου συμπεριλαμβάνονται με τις άλλες, σχήμα 89. Η συνολική κατανάλωση όλμιου, θούλιου, υττέρβιου και λουτήτιου εκτιμάται στους 75 τόνους, υποδεικνύοντας ένα τεράστιο πλεόνασμα.



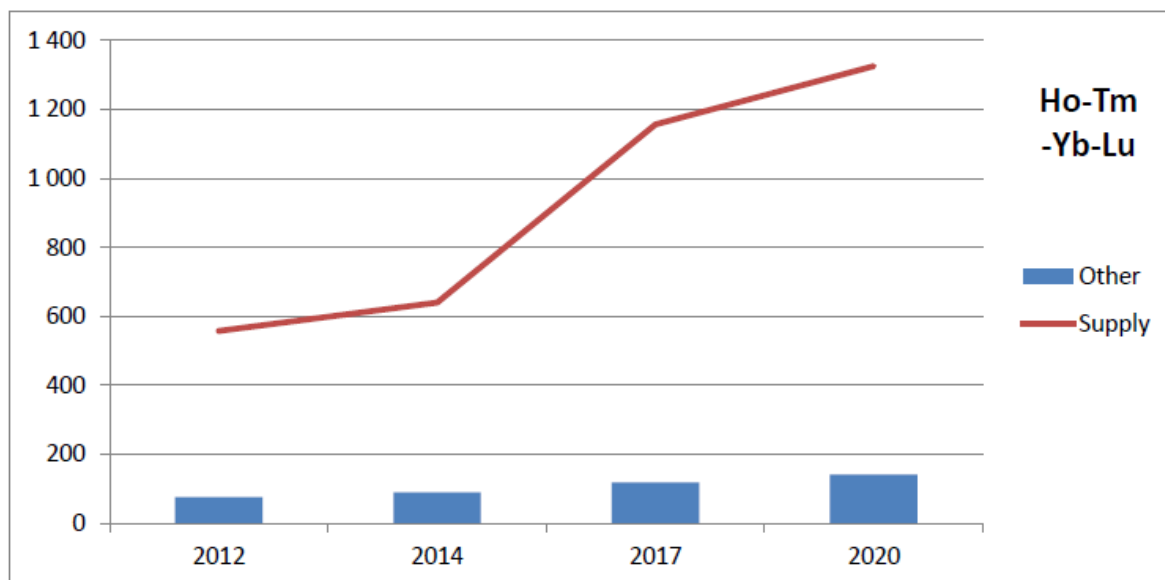
Source: Roskill Information Services / Dudley Kingsnorth, IMCOA (March 2013)

Σχήμα 89 : Τελική χρήση όλμιου, θούλιου, υττέρβιου και λουτήτιου, 2012 (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

Οι κύριες χρήσεις τους είναι οι ακόλουθες :

- Όλμιο : χρωστικές ουσίες, μαγνήτες, λέιζερ και πυρηνικά
- Θούλιο : δεν έχει καμιά πραγματική εμπορική χρήση, αλλά το γυαλί, τα φωσφορικά και οι οπτικές ίνες αποτελούν πιθανές χρήσεις
- Υττέρβιο : οπτικές ίνες, λέιζερ, φωτοβολταικά, μετρητές άγχους
- Λουτήτιο : φωσφορικά, ανιχνευτές PET, γυαλί

Η παγκόσμια μελλοντική κατάσταση για την προσφορά και ζήτηση όλμιου, θούλιου, υττέρβιου και λουτήτιου φαίνεται στο σχήμα 90. Η συνολική αγορά αναμένεται να αυξηθεί γύρω στο 8% ετησίως. Ωστόσο δεδομένου της ύπαρξης ήδη ενός πολύ μεγάλου πλεονάσματος της αγοράς λίγες ανησυχίες θα πρέπει να εκφράζονται για αυτή την ισχυρή ανάπτυξη της ζήτησης.



Sources: Roskill, IMCOA and Technology Metal Research Reports and Presentations (2012-2013)

Σχήμα 90 : Προβλέψεις της παγκόσμιας προσφοράς και ζήτησης όλμιου, θούλιου, υπτέρβιου και λουτήτιου μέχρι το 2020 (τόνους) (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU)

4.2 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

Η βιβλιογραφία για τις REE είναι σχετικά περιορισμένη, καθώς μόλις προσφάτως αναπτύχθηκε το ενδιαφέρον για αυτές, με την ανάδειξη της μεγάλης σημασίας τους ως κρίσιμων και στρατηγικών πόρων, λόγω της αξιοποίησής τους σε εφαρμογές τεχνολογίας και του σχεδόν μονοπωλίου της Κίνας, η οποία προμηθεύει την αγορά σε ποσοστό σχεδόν 90%. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν κάποια άρθρα που κρίθηκε ότι περιλαμβάνουν σημαντικές πληροφορίες για τις REE.

Στη μελέτη των Binnemans et al. (2013), τονίζεται η σημασία των REE, εξετάζονται οι δυνατότητες ανάκτησης από τις κύριες εφαρμογές τους και τέλος παρουσιάζονται κάποιες μελλοντικές εκτιμήσεις. Η ανακύκλωση REE προτείνεται ως λύση και για το επονομαζόμενο πρόβλημα ισορροπίας. Για παράδειγμα, η πρωτογενής εξόρυξη κοιτασμάτων REE για νεοδύμιο δημιουργεί περίσσεια πιο άφθονων στοιχείων, του λανθάνιου και του δημητρίου. Αυτή η μελέτη παρέχει μια επισκόπηση της βιβλιογραφίας, με έμφαση σε τρεις κύριες εφαρμογές : μόνιμοι μαγνήτες, μπαταρίες NiMY και φωσφορίζουσες λαμπτήρες. Τελικά επιβεβαιώνεται ότι επιπλέον της ελάφρυνσης του κινδύνου προσφοράς, η ανακύκλωση REE μπορεί να μειώσει τις περιβαλλοντικές δοκιμασίες εξόρυξης και επεξεργασίας των REE. Σύμφωνα με τους Du and Graedel (2011) τα αποθέματα REE εκτιμώνται ως τετραπλάσια της ετήσιας εξόρυξης για το έτος 2007.

Επί το πλείστον η έρευνα για την ανακύκλωση REE κατευθύνεται προς τη χημική επεξεργασία των συλλεχθέντων ανακυκλώσιμων υλικών REE, με τρόπο που θυμίζει την επεξεργασία των πρωτογενών πόρων REE. Ωστόσο μια αποτελεσματική ανακύκλωση REE απαιτεί στάδια επεξεργασίας συμπεριλαμβανομένου την αποσυναρμολόγηση, τη διαλογή, την προεπεξεργασία και πυρο-, ύδρο- και/ή ηλεκτρομεταλλουργική επεξεργασία. Η ανάκτηση REE από απορρίμματα κατασκευής μαγνητών και η επαναχρησιμοποίηση μεγάλων μαγνητών από ανεμογεννήτριες ή υβριδικά/ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι σημαντική. Ωστόσο οι μαγνήτες REE σε σύνθετο, με πολλά υλικά, ηλεκτρονικό και ηλεκτρικό εξοπλισμό είναι αρκετά πιο δύσκολο να ανακυκλωθούν. Σε αυτή την περίπτωση η απευθείας επαναχρησιμοποίηση των μαγνητών ή κραμάτων είναι απίθανη και οι τεχνολογικές δοκιμασίες για την ανάκτηση REE είναι ουσιώδεις. Για τους λαμπτήρες φθορισμού και τους μαγνήτες με βάση το νεοδύμιο σε μείγμα ηλεκτρονικών, οι REE θα πρέπει να διαχωριστούν από τα άλλα μέταλλα και έπειτα το μείγμα των REE θα πρέπει να διαχωριστεί σε κύρια κράμματα ή ανεξάρτητες REE. Επειδή οι μαγνήτες (Nd, Pr, Tb, Sm, Dy) και οι λαμπτήρες φθορισμού (κυρίως Eu, Y, Tb) περιέχουν μόνο έναν περιορισμένο αριθμό REE και επιπλέον, περιέχουν διαφορετικές REE, εκτός του Tb, αυτά τα ρεύματα αποβλήτων θα πρέπει να επεξεργαστούν ξεχωριστά. Η ανακύκλωση γαδολινίου από τη μαγνητική τομογραφία αντίθεσης μετά την κλινική χρήση δε φαίνεται συμφέρουσα από οικονομική άποψη, αλλά βρέθηκε ότι το ανθρωπογενές γαδολίνιο ρυπαίνει τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα (Bau and Dulski, 1996 · Knappe et al., 2005). Οι REE από τα WEEE και του καταλύτες καυσαερίων των αυτοκινήτων καταλήγουν σε σκωρίες όπου περιέχονται σε πολύ χαμηλή συγκέντρωση και κυρίως υπερσχύει το δημήτριο το οποίο είναι το πιο άφθονο. Σε αρκετές περιπτώσεις οι σκωρίες χρησιμοποιούνται ως υλικό κατασκευής και αυτή η δυνατότητα θα χαθεί αν επεξεργαστούν με χημικά για την απόπλυση των μετάλλων.

Η ανακύκλωση REE θα βοηθήσει στην επίλυση του προβλήματος ισορροπίας, με την αποφυγή παραγωγής μεγάλου πλεονάσματος λανθανίου και δημητρίου που εξορύσσονται λόγω της παραγωγής νεοδύμιου. Στους πίνακες 38 και 39 παρουσιάζονται οι κύριες εφαρμογές των REE. Σύμφωνα με το τμήμα ενέργειας των ΗΠΑ οι πέντε πιο κρίσιμες REE είναι είναι το νεοδύμιο, το ευρώπιο, το τέρβιο, το δυσπρόσιο και το ύτριο, όπως φαίνεται στο σχήμα 91.

Application	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Other
Magnets			23.4	69.4			2	0.2	5		
Battery alloys	50	33.4	3.3	10	3.3						
Metallurgy	26	52	5.5	16.5							
Auto catalysts	5	90	2	3							
FCC	90	10									
Polishing powders	31.5	65	3.5								
Glass additives	24	66	1	3						2	4
Phosphors	8.5	11				4.9	1.8	4.6		69.2	
Ceramics	17	12	6	12						53	
Others	19	39	4	15	2		1			19	

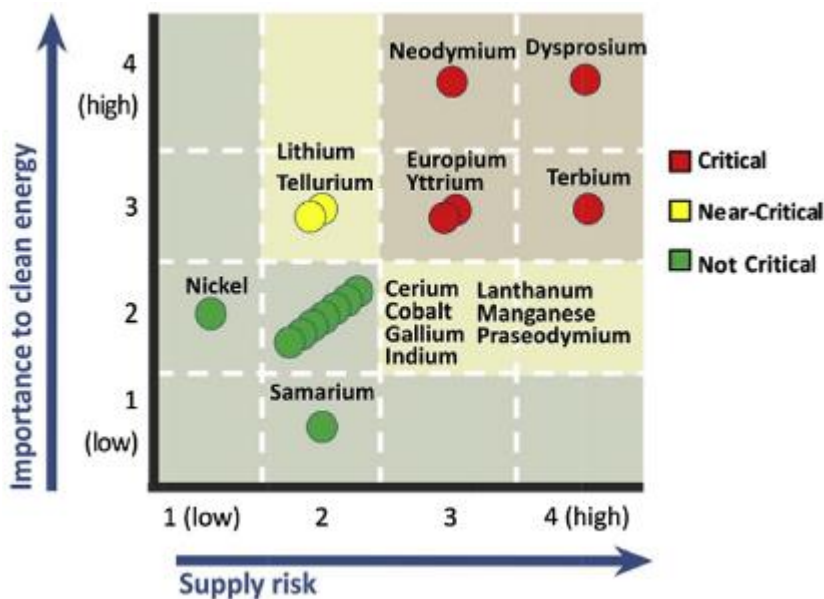
^a The percentages are estimated average consumption distribution by application; the actual distribution varies from manufacturer to manufacturer.

Πίνακας 38 : Χρήση των REE ανά εφαρμογή (%), από Curtis, 2010, (Binnemans et al., 2013)

Materials stream & application	REEs	Present/future contribution	Addressed in this review
1. Preconsumer production scrap and residues			
<i>Magnet swarf and rejected magnets</i>	<i>Nd, Dy, Tb, Pr</i>	<i>Increasing</i>	<i>Yes</i>
<i>REE containing residues arising during metal production/recycling</i>	<i>All</i>		<i>No</i>
Postsmelter and Electric Arc Furnace residues	Ce, La, critical REEs	Future levels depend on End-of-Life presmelter recycling	
Industrial residues (phosphogypsum, red mud, etc.)	All	Relatively stable	
2. End-of-Life products containing...			
<i>Phosphors</i>	<i>Eu, Tb, Y (Ce, Gd, La)</i>		<i>Yes</i>
Fluorescent lamps (straight/curved)	Eu, Tb, Y (Ce, Gd, La)	Relatively stable	
Compact fluorescent lamps (CFLs)	Eu, Tb, Y (Ce, Gd, La)	Increasing	
LEDs	Ce, Y	Increasing	
LCD Backlights	Eu, Tb, Y (Ce, Gd, La)	Relatively stable	
Plasma Screens	Eu, Tb, Y (Ce, Gd, La)	Relatively stable	
Cathode-ray tubes (CRTs)	Eu, Y	Sharply decreasing	
Others (speciality applications)	Also Tm		
<i>Permanent NdFeB magnets</i>	<i>Nd, Dy, Tb, Pr</i>		<i>Yes</i>
Automobiles (small magnets as motors, switches, sensors, actuators, etc.)		Relatively stable	
Mobile phones (loud speakers, switches, microphones, etc.)		Relatively stable	

Hard disk drives (HDDs)		Will decrease (due to solid state devices)	
Computers and peripherals (cooling fans, switches, drive motors, scanner head motors, small HDDs etc.)		Relatively stable	
Consumer electric and electronic devices (kitchen utensils, hand held tools, electric shavers etc.)		Relatively stable	
Industrial applications (electric motors etc.)	Medium Dy level	increasing (due to increasing energy efficiency demands for electric motors)	
Electric bicycles (motor)	Higher Dy level	Increasing (especially in China)	
Electric vehicle and hybrid electric vehicle motors	Higher Dy level	Increasing (but inertia for availability)	
Wind turbine generators		Increasing (but inertia for availability)	
Other magnet applications	Sm (in SmCo magnets)	Relatively stable	
<i>Nickel metal hydride batteries</i>	<i>La, Ce, Nd, Pr</i>		<i>Yes</i>
Rechargeable batteries		Increasing	
Electric vehicle and hybrid electric vehicle batteries		Increasing	
<i>Others</i>	Depending on application	Depending on application	<i>Limited</i>
CRT phosphors, glass polishing powders, fluid cracking catalysts, optical glass			
3. Landfilled REE containing residues			
<i>Industrial residues (phosphogypsum, red mud, etc.)</i>	<i>All</i>	<i>Depending on residue type</i>	<i>No</i>

Πίνακας 39: Διαθέσιμα τωρινά και μελλοντικά ρεύματα, που περιέχουν REE, για ανακύκλωση (Binnemans et al., 2013)



Σχήμα 91: Κρισιμότητα σύμφωνα με DOE για το διάστημα 2015-2025, το οποίο δείχνει τις πέντε πιο κρίσιμες σπάνιες γαίες (Y, Nd, Eu, Tb, Dy) (Binnemans et al., 2013)

Τα επόμενα 25 χρόνια η ζήτηση για νεοδύμιο και δυσπρόσιο αναμένεται να αυξηθεί κατά 700% και 2600% αντίστοιχα (Alonso et al., 2012). Η ανακύκλωση REE είναι κάτω από 1% λόγω ανεπαρκούς συλλογής, τεχνολογικών δυσκολιών και ιδιαίτερα λόγω έλλειψης κινήτρων (Graedel et al., 2011 · Reck and Graedel, 2012). Υπάρχει δυνατότητα ανακύκλωσης REE από υπολείμματα φωσφογύψου και βωξίτη(κόκκινη λάσπη). Το ποσοστό ανακύκλωσης μετά την τελική χρήση (End-of-Life recycling rate (EOL-RR)) προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του ποσοστού συλλογής με το ποσοστό αποτελεσματικότητας της διαδικασίας ανακύκλωσης. Για μια πρόχειρη εκτίμηση της παγκόσμιας EOL-RR για τις REE το 2020, αναπτύχθηκε ένα αισιόδοξο και ένα απαισιόδοξο σενάριο : 1) μαγνήτες, τα παγκόσμια ποσοστά συλλογής εκτιμώνται σε 30% (απαισιόδοξο) και 60% (αισιόδοξο), με το ποσοστό αποτελεσματικότητας της διαδικασίας ανακύκλωσης 55%. το αποτέλεσμα θα είναι 16.5% και 33% , 2)μπαταρίες NiMY, τα παγκόσμια ποσοστά συλλογής εκτιμώνται σε 40% (απαισιόδοξο) και 70% (αισιόδοξο), με το ποσοστό αποτελεσματικότητας της διαδικασίας ανακύκλωσης 50%. το αποτέλεσμα θα είναι 20% και 35% , 3)λαμπτήρες φθορισμού, τα παγκόσμια ποσοστά συλλογής εκτιμώνται σε 40% (απαισιόδοξο) και 70% (αισιόδοξο), με το ποσοστό αποτελεσματικότητας της διαδικασίας ανακύκλωσης 80%. το αποτέλεσμα θα είναι 32% και 56%. Όλες οι τιμές είναι πρόχειρες εκτιμήσεις των συγγραφέων. Στον πίνακα 7 μεταφράζονται οι εκτιμήσεις σε ποσότητες.

REE application	Estimated REE stocks in 2020 (tons)	Estimated average lifetime (years)	Estimated REE old scrap in 2020 (tons)	Pessimistic scenario: recycled REE in 2020 (tons)	Optimistic scenario: recycled REE in 2020 (tons)
Magnets	300,000	15	20,000	3300	6600
Lamp Phosphors	25,000	6	4167	1333	2333
Nickel-metal-hydride batteries	50,000	10	5000	1000	1750
Total	375,000		29,167	5633	10,683

Πίνακας 40 : Δυναμικό ανακύκλωσης για REE από μαγνήτες, μπαταρίες NiMY και φωσφορίζουσες ουσίες (Binnemans et al., 2013)

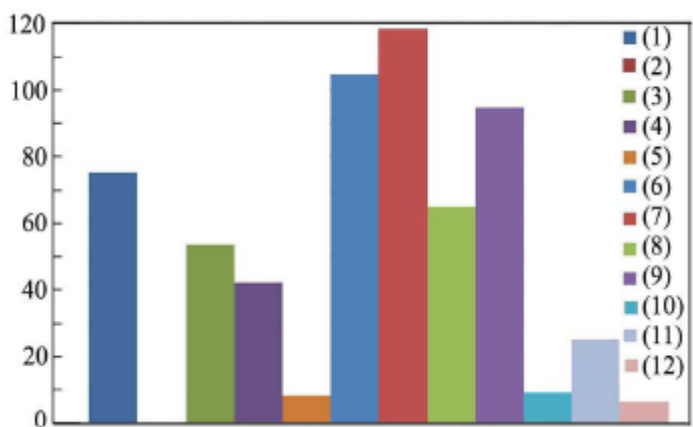
Η ποσότητα ανακυκλωμένων REE το 2020 εκτιμάται από 5600 τόνους μέχρι 10700 τόνους. Για κάθε REE ξεχωριστά η εκτίμηση βασίζεται σε (Curtis, 2010) να είναι 2390-4755 τόνοι νεοδύμιο, 805-1600 τόνοι πρασεοδύμιο, 610-1070 τόνοι λανθάνιου, 480-840 τόνοι δημήτριου, 920-1615 τόνοι ύττριου, 165-330 τόνοι δυσπρόσιου, 68-121 τόνοι τέρβιου και 65-115 τόνοι ευρώπιου.

Οι Adibi et al. (2014), μελέτησαν αν οι υπάρχουσες πρακτικές της AKZ, περιέγραφαν επαρκώς τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, της παραγωγής και κατανάλωσης REE. Κατέληξαν, πως πρέπει

να χρησιμοποιηθεί ένας δείκτης πολλαπλών κριτηρίων για να υπάρξουν πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα.

Διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις της AKZ χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιορίσουν την επίδραση της εξόρυξης REE. Ωστόσο είχαν έλλειψη σταθερότητας. Επιπλέον, εστίαζαν κυρίως στη γεωλογική διαθεσιμότητα των πόρων και όχι σε άλλους κρίσιμους παράγοντες. Η περίπτωση των REE θα μπορούσε να αποτελέσει ένα καλό παράδειγμα καθώς ξεκάθαρα, έδειξε τον περιορισμό των υπαρχόντων μεθόδων LCIA στον προσδιορισμό του θέματος της κρισιμότητας. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα αποτελέσματα LCIA, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι οι REE δεν είναι σπάνιες. Αλλά αυτό δε σημαίνει ότι είναι διαθέσιμες για χρήση. Οι REE δεν είναι σπάνιες αλλά είναι ευρέως διασκορπισμένες στο φλοιό της γης. Ωστόσο η παραγωγή και προσφορά τους είναι συγκεντρωμένη σε πολύ λίγες χώρες. Ως εκ τούτου, η αξιολόγηση η οποία λαμβάνει υπόψη μόνο τη διαθεσιμότητα των πόρων δεν μπορεί να προσδιορίσει σωστά τις πιθανές μελλοντικές συνέπειες. Τα αποτελέσματα LCIA θα ήταν διαφορετικά αν είχαν ληφθεί δείκτες πολλαπλών κριτηρίων. Η μέθοδος των Graedel et al. θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως σημείο εκκίνησης για την ανάπτυξη μιας λειτουργικής μεθόδου LCIA για την ανάλυση κρισιμότητας των μετάλλων.

Υπάρχουν παραπάνω από πέντε μέθοδοι αξιολόγησης επιπτώσεων που αξιολογούν τη χρήση των πόρων ωστόσο οι Berger and Finkbeiner (2010), υποστήριξαν ότι παρουσιάζεται έλλειψη συσχέτισης μεταξύ τους. Το σχήμα 92 παρουσιάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πρωτογενούς παραγωγής REE σε σύγκριση με το χαλκό. Επιλέχθηκε ο χαλκός καθώς η λειτουργία του είναι ιδιαιτέρως παρόμοια με τις REE και επίσης αξιόπιστα δεδομένα είναι διαθέσιμα για την παραγωγή χαλκού. Τα στοιχεία πρωτογενούς παραγωγής προέρχονται από τη Κίνα και αφορούν το ορυχείο Bayun Obo στη Μογγολία. Για το σύστημα τα στοιχεία για τα καύσιμα και την ενέργεια αντανakλούν τις μέσες συνθήκες της Κίνας.



Σχήμα 92 : Rees/Cu 1 kg περιβαλλοντικές επιπτώσεις βασισμένες σε προτεινόμενα ILCD για το πλαίσιο της Ε.Ε. : (1) Οξύνιση (Μόρια του N ή S-ισοδύναμα), (2) Εξάντληση πόρων CML2002, βασισμένη στα αποθέματα (kg CO₂ ισοδύναμα), (3) Φαινόμενο του θερμοκηπίου (IPCC), συμπεριλαμβανομένου βιογενή άνθρακα (kg CO₂ ισοδύναμα), (4) σωματίδια / αναπνευστικές ανόργανες ουσίες (kg PM_{2,5} ισοδύναμα), (5) ιονίζουσα ακτινοβολία (kg U235 ισοδύναμα), (6) θαλάσσιος ευτροφισμός (kg N-ισοδύναμα), (7) σχηματισμός φωτοχημικών οξειδωτικών (kg NMVOC), (8) επίγειος ευτροφισμός (μόρια N ή S-ισοδύναμα), (9) Κατανάλωση φρέσκου νερού (kg), (10) εξάντληση του αέριου όζοντος (kg CFC 111- ισοδύναμα), (11) USEtox, τοξικότητα στον άνθρωπο, καρκίνος (CTUh), (12) USEtox, τοξικότητα στον άνθρωπο,μη-καρκινικά (CTUh) (Adibi et al., 2014)

Οι Sprecher et al. (2014), μελέτησαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πρωτογενούς παραγωγής μόνιμων μαγνητών NdFeB και τις συνέκριναν με τις αντίστοιχες από την παραγωγή μετά από ανακύκλωση των υπαρχόντων μαγνητών. Στη μελέτη, συγκρίνεται η πρωτογενής παραγωγή των μαγνητών υψηλής απόδοσης με δύο υποθετικές διαδικασίες ανακύκλωσης, από άποψη περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η πρώτη διαδικασία ανακύκλωσης εξετάζει την χειρωνακτική αποσυναρμολόγηση των σκληρών δίσκων των υπολογιστών (HDDs) σε συνδυασμό με μία νέα διαδικασία ανακύκλωσης με βάση το υδρογόνο. Η δεύτερη διαδικασία υποθέτει τον τεμαχισμό των HDDs. Η AKZ βασίζεται τόσο στη μέχρι πρότινος βιβλιογραφία όσο και σε πειραματικά δεδομένα. Επειδή η διαδικασία παραγωγής οξειδίου νεοδύμιου είναι γενική σαν όλων των REE, τα αποτελέσματα μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε REE ξεχωριστά. Συμπεραίνεται ότι η ανακύκλωση νεοδύμιου, ειδικά μέσω χειρωνακτικής αποσυναρμολόγησης, είναι προτιμότερη της πρωτογενούς παραγωγής, όπως φαίνεται στο σχήμα για την ανθρώπινη τοξικότητα. Η επιλογή της διαδικασίας ανακύκλωσης είναι επίσης σημαντική με γνώμονα την ανάκτηση των πόρων. Ενώ η χειρωνακτική αποσυναρμολόγηση προσφέρει τη δυνατότητα όλο το μαγνητικό υλικό να ανακτηθεί, ο τεμαχισμός οδηγεί σε πολύ χαμηλά ποσοστά ανάκτησης (<10%).

Στη μελέτη ερευνήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της πρωτογενούς διαδικασίας παραγωγής 1 kg μόνιμου μαγνήτη NdFeB. Στην πρωτογενή παραγωγή είναι σημαντική η

αποτελεσματικότητα της διαδικασίας που συνδέεται με το επίπεδο της τεχνολογίας. Οι εκπομπές που αφορούν το GWP είναι διπλάσιες στην περίπτωση της χαμηλής τεχνολογίας σε σχέση με της υψηλής τεχνολογίας. Ενώ ο δείκτης ανθρώπινης τοξικότητας αυξάνει κατά μία τάξη μεγέθους. Επίσης τονίζεται ότι στο βασικό σενάριο το 64% του συνολικού νεοδύμιου χάνεται στην αλυσίδα παραγωγής. Περίπου το 50% της απώλειας συμβαίνει κατά τη διαδικασία εμπλουτισμού του κοιτάσματος. Σύμφωνα με Talens Peiró and Villalba Méndez (2013) το ποσοστό ανάκτησης αναμένεται να αυξηθεί στο 75% μέχρι το 2016. Η διαδικασία ανακύκλωσης με χειρωνακτική αποσυναρμολόγηση χρησιμοποιεί 88% λιγότερη ενέργεια και επιφέρει 98% χαμηλότερο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας σε σχέση με την πρωτογενή παραγωγή βασικού σεναρίου. Η διαδικασία ανακύκλωσης με τεμαχισμό χρησιμοποιεί 58% λιγότερη ενέργεια και επιφέρει 81% χαμηλότερο δείκτη ανθρώπινης τοξικότητας σε σχέση με την πρωτογενή παραγωγή βασικού σεναρίου.

Υπάρχουν δύο τύποι μόνιμων μαγνητών, νεοδύμιο-σίδηρος-βορικά και σαμάριο-κοβάλτιο, ωστόσο οι μαγνήτες νεοδύμιου είναι πιο ισχυροί και κυριαρχούν στην αγορά. Du and Greadel, 2011, εκτιμούν ότι τα 2/3 της συνολικής παραγωγής της Κίνας σε οξείδια REE προέρχεται από το ορυχείο Bayan-Obo, καθιστώντας το παγκοσμίως το μεγαλύτερο πόρο REE.

Στον πίνακα 41 φαίνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις για την παραγωγή 1kg οξειδίων REE.

name	1 kg REO, high-tech scenario	1 kg REO, baseline scenario	1 kg REO, low-tech scenario	unit
eutrophication potential	0.12	0.15	0.18	kg NO _x -Eq
acidification potential	0.14	0.17	0.22	kg SO ₂ -Eq
photochemical oxidation (summer smog)	5.3-E03	6.5-E03	85-E03	kg ethylene-Eq
climate change	12	14	16	kg CO ₂ -Eq
ionizing radiation	3.9×10^{-08}	4.1×10^{-08}	4.4×10^{-08}	DALYs
freshwater aquatic ecotoxicity	2.7	3.0	3.5	kg 1,4-DCB-Eq
stratospheric ozone depletion	2.5×10^{-06}	2.7×10^{-06}	3.0×10^{-06}	kg CFC-11-Eq
human toxicity	36	140	320	kg 1,4-DCB-Eq

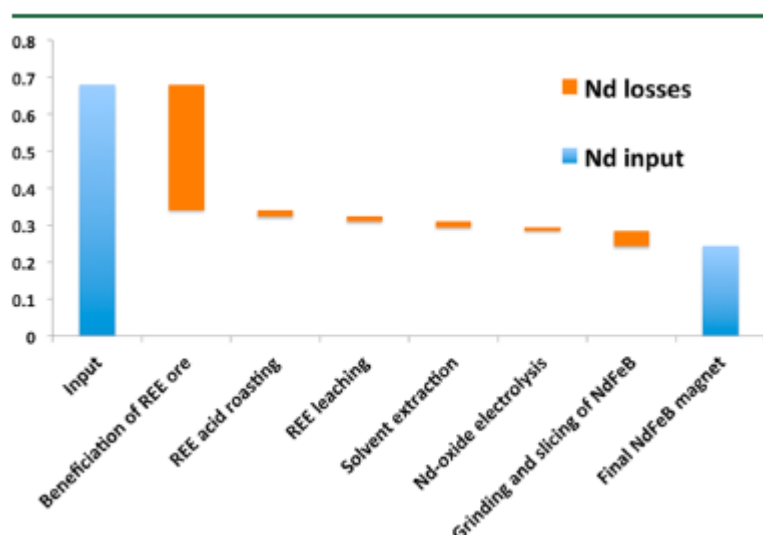
Πίνακας 41 : Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου ζωής για 1 kg του REO (Sprecher et al., 2014)

Στον πίνακα 42 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για την παραγωγή μαγνήτη NdFeB.

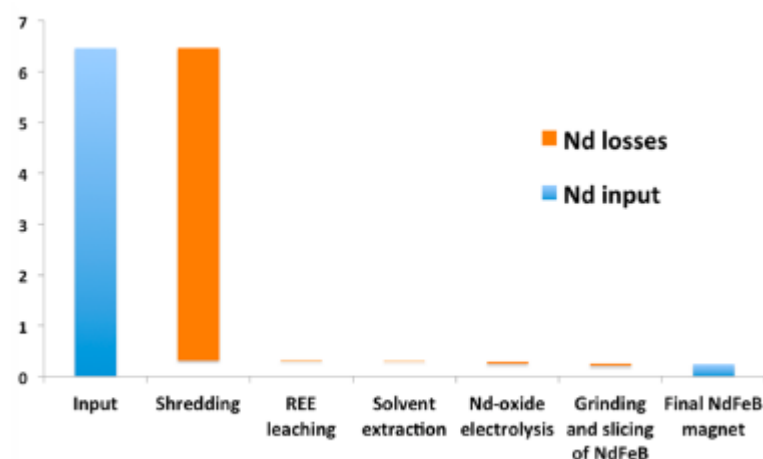
name	primary NdFeB magnet, baseline	recycled NdFeB magnet via hand picking	recycled NdFeB magnet via shredding	unit
eutrophication potential	1.9-E01	7.7-E03	3.2-E02	kg NO _x -Eq
acidification potential	0.44	0.027	0.20	kg SO ₂ -Eq
photochemical oxidation (summer smog)	1.7-E02	1.1-E03	8.0-E03	kg ethylene-Eq
climate change	27	3.3	10	kg CO ₂ -Eq
ionizing radiation	5.1×10^{-08}	2.0×10^{-08}	8.1×10^{-08}	DALYs
freshwater aquatic ecotoxicity	14	5.3	11	kg 1,4-DCB-Eq
stratospheric ozone depletion	2.6×10^{-06}	9.3×10^{-08}	1.0-E06	kg CFC-11-Eq
human toxicity	150	3.6	28	kg 1,4-DCB-Eq

Πίνακας 42 : Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου ζωής για την παραγωγή μαγνήτη NdFeB (Sprecher et al., 2014)

Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η ανθρώπινη τοξικότητα είναι με διαφορά η πιο σημαντική περιβαλλοντική επίπτωση της διαδικασίας πρωτογενούς παραγωγής. Οι διαδικασίες ανακύκλωσης επιφέρουν τις πιο σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη τοξικότητα και στην οικοτοξικότητα του υδατικού γλυκού νερού. Τα σχήματα 93 και 94 δείχνουν τις απώλειες νεοδύμιου σε κάθε στάδιο, μέχρι την παραγωγή των μαγνητών NdFeB, για την πρωτογενή παραγωγή και την ανακύκλωση με τεμαχισμό.



Σχήμα 93 : Απώλειες νεοδύμιου ανάμεσα στην βασική παραγωγική αλυσίδα, σε kg (Sprecher et al., 2014)



Σχήμα 94 : Απώλειες νεοδύμιου ανάμεσα στη αλυσίδα τεμαχισμένης ανακύκλωσης, σε kg (Sprecher et al., 2014)

Σύμφωνα με τους Ueberschaar and Rotter (2015), η ανακύκλωση των σκληρών δίσκων αποτελεί μια ελκυστική προοπτική για την ανάκτηση σημαντικών ποσοτήτων REE. Οι σκληροί

δίσκοι αποτελούνται από ένα σύνθετο μείγμα διάφορων υλικών. Ενώ το αλουμίνιο, ο χαλκός και το ατσάλι είναι εύκολο να διαχωριστούν, οι πραγματικές διαδικασίες ανακύκλωσης αραιώνουν τις περιλαμβανόμενες REE σε μη ανακτήσιμα ποσοστά σε άλλα ρεύματα υλικών. Στη μελέτη έγινε μια λεπτομερής ανάλυση των σκληρών δίσκων σταθερών και φορητών υπολογιστών ώστε να γίνει δυνατή η μελλοντική ανακύκλωση των REE. Επί πλέον πιθανές στρατηγικές διαχείρισης των REE προέκυψαν και εκτιμήθηκε το δυναμικό ανακύκλωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν υψηλές συγκεντρώσεις νεοδύμιου ($22.9 \pm 2.8 \%$), πρασεοδύμιου ($2.7 \pm 2.2 \%$) και δυσπρόσιου ($1.4 \pm 1.5 \%$) στους μαγνήτες. Επίσης μια εξάρτηση από την χρονολογία κατασκευής επισημάνθηκε. Επίπλέον, δημήτριο (0.5%) και νεοδύμιο (0.2%) προσδιορίστηκαν στις πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος (PCBs). Οι δοκιμές αποσυναρμολόγησης των σκληρών δίσκων έδειξαν μια πολύπλοκη δομή με συνέπεια τη δύσκολη πρόσβαση στους μαγνήτες NdFeB. Η ανάλυση της συλλογής έδειξε ποσότητα περίπου 12.7 τόνων μαγνητών από σκληρούς δίσκους σταθερών υπολογιστών στη Γερμανία σε ένα χρόνο. Αυτή η ποσότητα οδήγησε σε δυναμικό ανάκτησης 2.900 ± 300 kg Nd, 340 ± 280 kg Pr, 180 ± 190 kg Dy, 200 ± 170 kg Co, 15 ± 18 kg Tb and 13 ± 3 kg Gd κάθε χρόνο. Με βάση τα δεδομένα της αγοράς αναμένεται μείωση του μεριδίου των σκληρών δίσκων από σταθερούς υπολογιστές και σημαντική αύξηση των ποσοτήτων των εξαρτημάτων φορητών υπολογιστών στα WEEE.

Οι σκληροί δίσκοι δεν παρουσιάζουν σταθερή σύσταση, αλλά αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Για αυτό διαδοχικές υδρο- και πυρομεταλλουργικές διαδικασίες ανάκτησης απαιτούνται. Η ανάπτυξη τεχνικών απελευθέρωσης και διαχωρισμού είναι κρίσιμες λόγω της πολύπλοκης δομής. Όσον αφορά τους μαγνήτες NdFeB, το βασικό μείγμα του κράματος είναι αρκετά παρόμοιο ασχέτως του κατασκευαστή. Καθώς το δυσπρόσιο αποκλειστικά εφαρμόζεται σε μαγνήτες ατράκτου κινητήρα (spindle motor magnets) με συγκέντρωση έως 10%, ο διαχωρισμός των μαγνητών αυτών αποτελεί προτεραιότητα λόγω της τιμής και της κρισιμότητας του δυσπρόσιου. Από άποψη απελευθέρωσης, οι μαγνήτες ατράκτου κινητήρα είναι λιγότερο προσβάσιμοι, λόγω μικρότερου μεγέθους, και υπόσχονται μικρότερη απόδοση. Η σταθεροποίηση των μειγμάτων των κραμάτων για μαγνήτες NdFeB, των περιβλημάτων και των τύπων των κραμάτων θα απλοποιούσε την ανάκτηση του μαγνητικού υλικού για μεταγενέστερη χρήση.

Οι REE στους σκληρούς δίσκους εφαρμόζονται σε πολύ μικρές ποσότητες στις πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος (PCB) και στους μαγνήτες NdFeB που βρίσκονται in spindle and linear motor, όπως φαίνεται στο σχήμα 95.



Σχήμα 95 : Θέση PCB (αριστερά) και μαγνητών (δεξιά) σε γραμμικό και σε ατράκτου κινητήρα (Ueberschaar and Rotter, 2015)

Το πρασεοδύμιο χρησιμοποιήθηκε για τη μείωση του κόστους παραγωγής καθώς μπορεί να υποκαταστήσει το νεοδύμιο μέχρι 20-25%. Ωστόσο αυτό άλλαξε τα τελευταία χρόνια λόγω της αύξησης της τιμής του. Από την ανακύκλωση προκύπτουν συγκεντρώσεις REE που θα πρέπει με υδρομεταλλουργική κυρίως επεξεργασία να δώσουν υψηλής καθαρότητας REE.

Ο πίνακας 43 δείχνει τα αποτελέσματα όλων των καθορισμένων στοιχείων και των διάφορων προσμίξεων για voice-coil actuator and spindle motor magnets και του συνολικού μαγνητικού περιεχομένου των σκληρών δίσκων. Άλλες REE όπως Tb, Gd and Sm βρέθηκαν μόνο σε ίχνη κάτω από 0.1%. Ο πίνακας 44 δείχνει τα κύρια συστατικά των πλακετών τυπωμένου κυκλώματος από σκληρούς δίσκους. Ο πίνακας 45 δείχνει τη συγκέντρωση REE σε σταθερούς και φορητούς υπολογιστές.

Sample	Determined	Weight	Al	Fe	Cu	Sn	Pr	Nd	Tb	Dy	B	Gd	Ni	Sm	Co	Zn	Sum REE mass %
		(g)	mass %														
Linear	Average	14.3	0.37	63.03	0.13	0.01	2.77	23.04	0.14	0.97	0.58	0.10	2.54	0.22	1.50	0.02	27.23
	StDev	8.2	0.11	2.02	0.14	0.00	2.13	2.77	0.16	0.98	0.03	0.02	1.24	0.04	1.26	0.00	1.48
Spindle	Average	2.3	0.24	63.11	0.03	0.01	2.18	22.35	0.02	4.01	0.66	0.06	0.00	0.28	2.22	0.02	28.91
	StDev	0.3	0.24	5.18	0.03	0.00	2.68	2.81	0.00	4.48	0.19	0.05	0.00	0.13	1.98	0.02	4.75
Combined	Average	16.6	0.35	63.02	0.11	0.01	2.69	22.93	0.12	1.39	0.59	0.10	2.19	0.23	1.60	0.02	27.46
	StDev	8.3	0.13	2.46	0.12	0.00	2.20	2.77	0.14	1.46	0.05	0.02	1.07	0.05	1.36	0.01	1.93

Πίνακας 43 : Επισκόπηση όλων των καθοριστικών στοιχείων στους NdFeB μαγνήτες (Ueberschaar and Rotter, 2015)

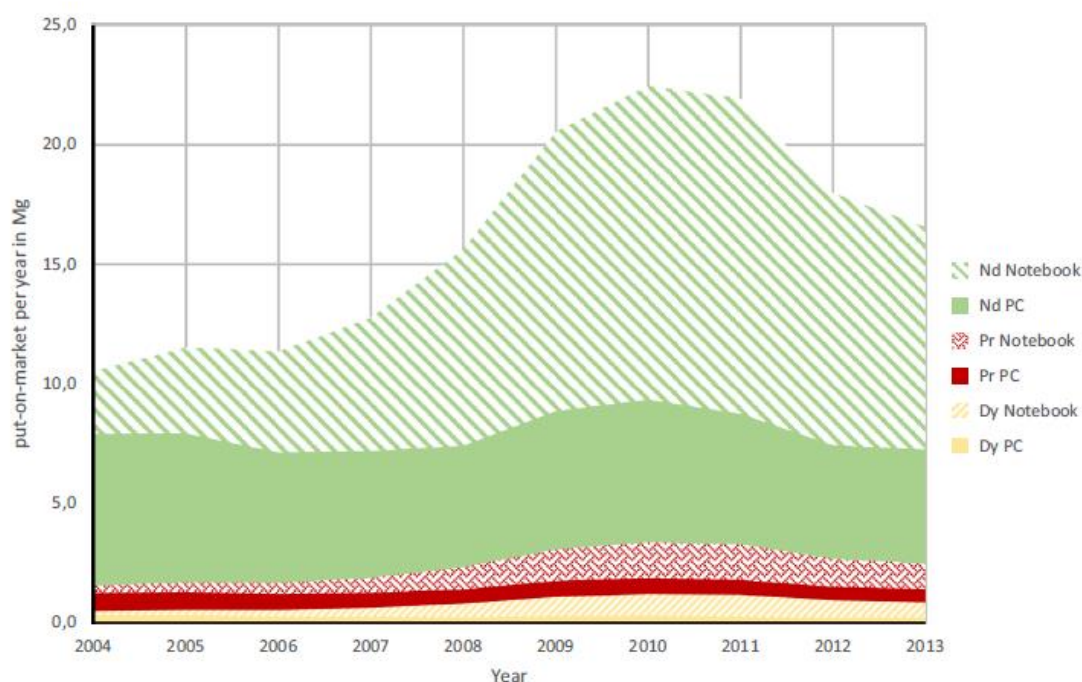
Precious metals			Base metals							Critical metals			
(ppm)			mass %							mass %			
Ag	Au	Pd	Al	Cu	Fe	Ni	Sn	Ti	Zn	Ce	Nd	Sb	Ta
3440	1020	210	2.2	31.6	7.1	2.5	2.4	0.6	0.4	0.5	0.2	0.1	0.8

Πίνακας 44 : Χημική σύνθεση των εφαρμοσμένων μετάλλων σε πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων από σκληρούς δίσκους (Ueberschaar and Rotter, 2015)

		Personal computer			Notebook		
		Nd	Dy	Pr	Nd	Dy	Pr
Concentration	kg/t HDD	6.9	0.4	0.8	13.8	0.9	1.6
	kg/t col equipment	0.3	0.02	0.04	0.6	0.04	0.07
Content	mg/unit	3700	220	440	1900	130	210

Πίνακας 45 : Περιεχόμενο και συγκέντρωση του Nd, Dy και Pr σε σταθερούς και φορητούς υπολογιστές(Ueberschaar and Rotter, 2015)

Το σχήμα 96 δείχνει τα δεδομένα εισόδου στην αγορά για το νεοδύμιο, το πρασεοδύμιο και το δυσπρόσιο από τους φορητούς και σταθερούς υπολογιστές. Ενδεικτικές τιμές για τις REE : Nd 70€/kg, Pr 120 €/kg, Dy 440 €/kg. Για να ανακτηθεί 1 kg απά τα παρακάτω υλικά θα απαιτηθεί ανακύκλωση τόσων σκληρών δίσκων από σταθερούς υπολογιστές : Nd 270, Dy 4600, Pr 2300 και από φορητούς : Nd 530, Dy 7700, Pr 4800.



Σχήμα 96 : Υπολογισμένη ετήσια ποσότητα των REE που εισέρχονται στην αγορά των σταθερών υπολογιστών της Γερμανίας εν αντιθέσει με τα Notebooks για Nd, Pr και Dy από το 2004 μέχρι το 2013 (Ueberschaar and Rotter, 2015)

Οι Kulczycka et al. (2015), μελέτησαν τη δυνατότητα επεξεργασίας του φωσφογύψου απατίτη με σκοπό την ανάκτηση REE, με παράδειγμα το εργοστάσιο Wizow (Πολωνία). Περισσότερο από 5 εκ. τόνοι φωσφογύψου απατίτη, ένα απόβλητο που προέρχεται από την παραγωγή φωσφορικού οξέος, υπάρχουν στα απόβλητα του χημικού εργοστασίου Wizow. Το απόβλητο αυτό περιέχει REE. Έχει αναπτυχθεί τεχνολογία για τη μετατροπή του απόβλητου σε ανυδρίτη και συγκεντρώσεις REE. Στη μελέτη ερευνήθηκαν οι επιπτώσεις της υγειονομικής

ταφής (σενάριο 1) και της ανάκτησης REE (σενάριο 2) με βάση οικονομικές και περιβαλλοντικές πτυχές.

Σύμφωνα με την AKZ, η τεχνολογία που αναπτύχθηκε είναι αποδοτική αλλά απαιτεί σημαντικές οικονομικές επενδύσεις και χαρακτηρίζεται από ένα σχετικά υψηλό βαθμό ρίσκου. Αυτό οφείλεται στη μεταβλητότητα των τιμών των REE καθώς και στην όχι προηγουμένως δοκιμασμένη τεχνολογία. Από αυτή την άποψη συμπεραίνεται ότι άλλες χαμηλότερης ενεργειακής έντασης διαδικασίες (πχ τεχνολογία μεμβράνης) ή άλλες πηγές ενέργειας (πχ από ανανεώσιμες πηγές) θα πρέπει να βρεθούν. Ωστόσο η μελετώμενη τεχνολογία θα μπορούσε να δώσει κίνητρο για την παγκόσμια ανάκτηση REE και να διευκολύνει τη δρομολόγηση νέων δραστηριοτήτων παραγωγής σε άλλα εργοστάσια που δημιουργούν μεγάλη ποσότητα απόβλητου φωσφογύψου. Το εργοστάσιο Wizow προμηθεύεται τον απαιτούμενο από την χερσόνησο Kola (Ρωσία). Το πέτρωμα περιέχει 0.8 – 1.0 % κατά βάρος οξειδία λανθανίδων (όπως Ln_2O_3) (Habashi, 1985). Οι αναλύσεις των ερευνητών έδειξαν ένα μέσο περιεχόμενο του φωσφογύψου σε λανθανίδες της τάξης του 0.3 – 0.7%. Αποδείχθηκε ότι το απόβλητο αυτό έχει δυναμικό δημιουργίας 6 -10 kt REE (Grabas et al., 2014). Η συγκέντρωση των οξειδίων REE από την επεξεργασία 1 Mg/h φωσφογύψου φαίνεται παρακάτω : H_2O -4.0%, Ln_2O_3 -24.0%, CeO_2 -50.5%, Pr_6O_{11} -5%, Nd_2O_3 -15.9%, Sm_2O_3 -1.9%, Eu_2O_3 -0.44%, Gd_2O_3 -0.9%, Tb_4O_7 -0.1%, Dy_2O_3 -0.2%, Ho_2O_3 <0.1%, Er_2O_3 <0.1%, Tm_2O_3 <0.1%, Yb_2O_3 <0.1%, Lu_2O_3 <0.1%, Y_2O_3 -0.3%, ThO_2 -0.2%, ThO_2 (ραδιενεργό) -440 ppm, U_2O_3 (ραδιενεργό)<4 ppm, CaO -15.26%, Fe_2O_3 -0.083%, F <0.055%. Η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε συντέλεσε στην ανάκτηση περίπου του 50% των λανθανίδων από το απόβλητο του φωσφογύψου. Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες ήταν περίπου 15 εκ ευρώ. Ο χρόνος ζωής της εγκατάστασης εκτιμάται να είναι 15 χρόνια. Τα έσοδα θα προέλθουν από την πώληση των ποσοτήτων των συγκεντρώσεων λανθανίδων, του ανυδρίτη, του τσιμέντου, του φωσφορικού οξέος και του θειικού οξέος. Για την ανάλυση θεωρήθηκαν οι ακόλουθες τιμές :

συγκεντρώσεις λανθανίδων περίπου 800 ευρώ/Mg

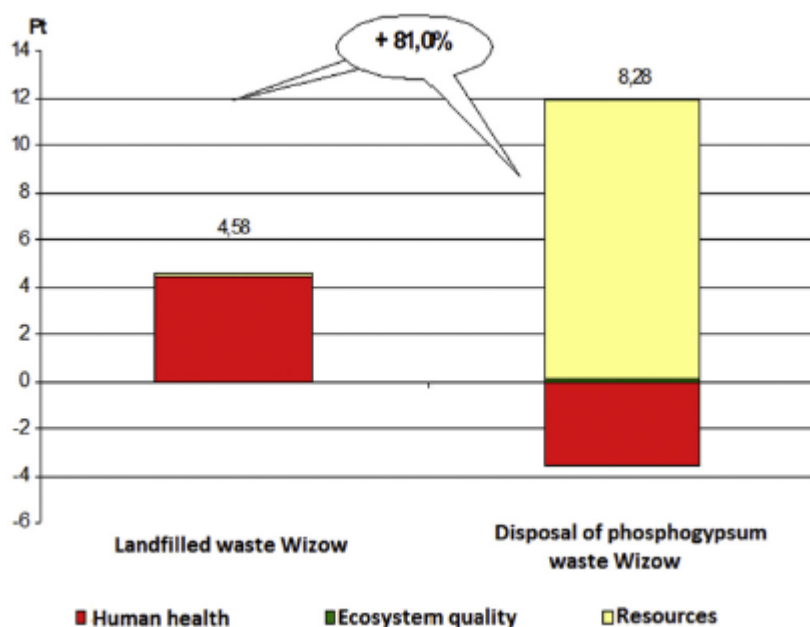
υπερθειούχο τσιμέντο περίπου 10.5 ευρώ/Mg

φωσφορικό οξύ περίπου 300 ευρώ/Mg

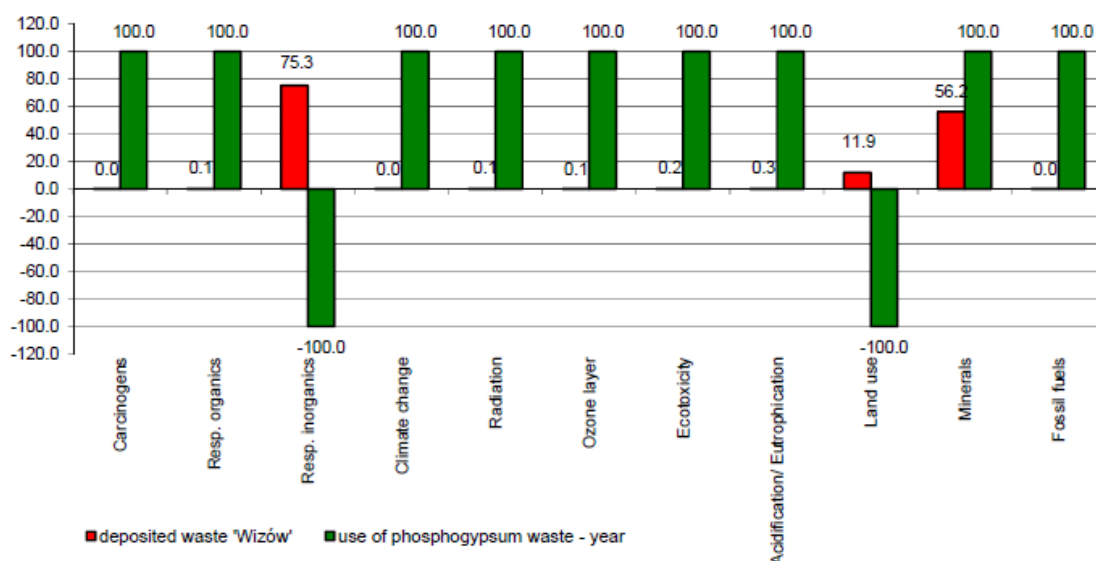
θειικό οξύ περίπου 14 ευρώ/Mg

Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ότι η απόρριψη των αποβλήτων έχει αρκετά μικρότερη επίδραση στο περιβάλλον (Pt 4.58) σε σχέση με την προτεινόμενη τεχνολογία επεξεργασίας (Pt 8.28), ακόμα και αν ληφθεί υπόψη το δυναμικό των επωφελών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από τα νέα υλικά : συγκεντρώσεις REE και ανυδρίτη, σχήμα 97. Ωστόσο θα

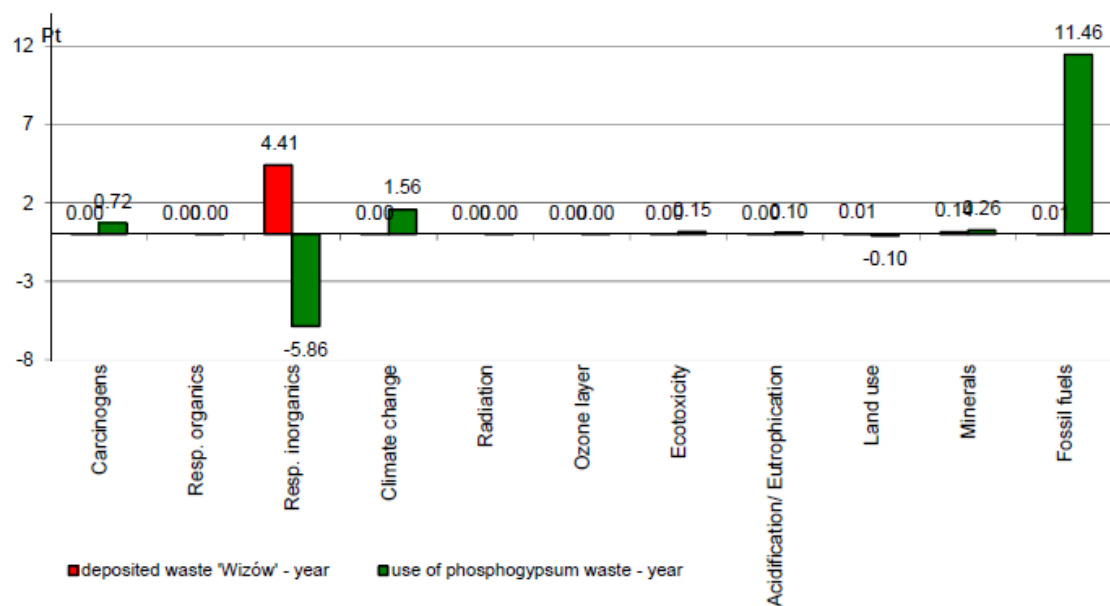
υπάρχει μείωση της φύλαξης των αποβλήτων από άποψη οικολογικών οφελών με την τεχνολογία αυτή, γεγονός που αποτελεί στόχο της κυκλικής οικονομίας. Η επεξεργασία του απόβλητου φωσφογύψου έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις στο περιβάλλον λόγω της σημαντικής χρήσης τεχνολογικού ατμού και της χρήσης φυσικού αερίου για την παραγωγή του. Αν γίνει ανάλυση ανά κατηγορία επιπτώσεων η επεξεργασία του απόβλητου είναι πιο επωφελής μονάχα όσον αφορά τη χρήση γης και του αναπνευστικού συστήματος, όπως φαίνεται στα σχήματα 98 και 99.



Σχήμα 97 : Ιστόγραμμα στάθμισης - σύγκριση των δύο επιλογών διαχείρισης αποβλήτων φωσφογύψου σε κατηγορίες επιπτώσεων (Kulczycka et al., 2015)



Σχήμα 98 : Ιστόγραμμα χαρακτηρισμού - σύγκριση μεταξύ των δυο επιλογών διαχείρισης αποβλήτων φωσφογύψου – ΕΙ'(99%) (Kulczycka et al., 2015)



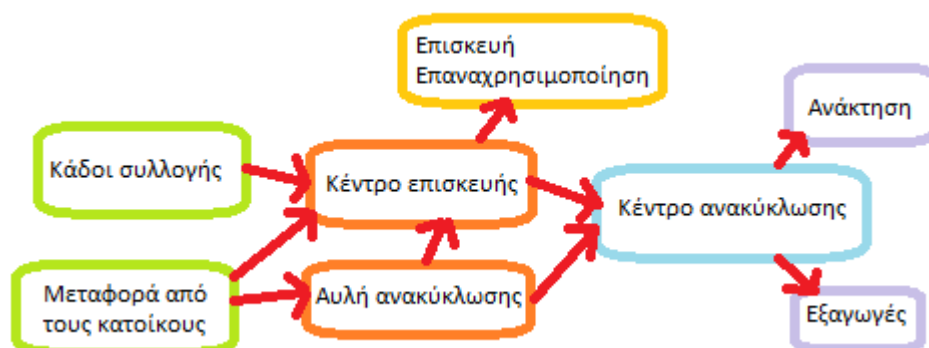
Σχήμα 99 : Ιστόγραμμα στάθμισης - σύγκριση των δυο επιλογών διαχείρισης αποβλήτων φωσφογύψου σε 11 κατηγοριών επιπτώσεων (Pt) - ΕΙ'(99%) (Kulczycka et al., 2015)

5. Αναφορά δύο συστημάτων ανακύκλωσης και εξέταση μιας ειδικής περίπτωσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα συστήματα ανακύκλωσης της Γερμανίας και της Ελλάδας. Η αντιπαραβολή αυτή, του ανεπτυγμένου συστήματος ανακύκλωσης της Γερμανίας σε σύγκριση με το αντίστοιχο της χώρας μας, θα υποδείξει κάποιες πρακτικές που η εφαρμογή τους στην Ελλάδα, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το σύστημα ανακύκλωσης. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα παρουσιαστούν στοιχεία που μας πρόσφερε η εταιρία Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε., η οποία αποτελεί τον επίσημο φορέα συλλογής και ανακύκλωσης της Ελλάδας, και με βάση αυτά τα στοιχεία καθώς και δεδομένα από τη βιβλιογραφία που μελετήθηκε, θα εξεταστεί το παράδειγμα ανακύκλωσης των πλακετών τυπωμένου κυκλώματος στην Ελλάδα για το έτος 2016. Με χρήση του λογισμικού SimaPro θα εκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανακύκλωσης των PCBs, και έπειτα με βάση τις τιμές των μετάλλων, σύμφωνα με ιστοσελίδες, θα εξεταστούν τα οικονομικά δεδομένα της ανακύκλωσης των PCBs.

5.1 Σύστημα ανακύκλωσης Γερμανίας

Στα πλαίσια σεμιναρίων που πραγματοποιήθηκαν στη Γερμανία και πιο συγκεκριμένα στο Αμβούργο, παρουσιάστηκε το τοπικό σύστημα ανακύκλωσης της πόλης του Αμβούργου. Το σύστημα ανακύκλωσης φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα 100. Οι κάτοικοι του Αμβούργου διατίθουν τα WEEE τους είτε στους κάδους συλλογής που υπάρχουν μέσα στην πόλη, είτε τα μεταφέρουν στην αυλή ανακύκλωσης ή στο κέντρο επισκευής. Τα WEEE από τους κάδους συλλογής καταλήγουν στο κέντρο επισκευής. Αξίζει να αναφερθεί ότι έχουν καταγραφεί 17 επιβεβαιωμένες απόπειρες πολιτών να κλέψουν WEEE από τους κάδους συλλογής.



Σχήμα 100 : Σύστημα ανακύκλωσης Αμβούργου, Γερμανία

Η αυλή ανακύκλωσης δεν απευθύνεται κυρίως στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά απόβλητα, αλλά στα υπόλοιπα απόβλητα των κατοίκων του Αμβούργου. Οι κάτοικοι του Αμβούργου τα μεταφέρουν στην αυλή ανακύκλωσης και μάλιστα έχουν την υποχρέωση να καταβάλλουν αντίτιμο για τη διαχείριση των αποβλήτων τους ανάλογο του όγκου τους. Ωστόσο μπορούν να διαθέσουν και τα WEEE τους χωρίς σε αυτήν την περίπτωση να οφείλουν να πληρώσουν. Στη συνέχεια, οι υπάλληλοι της αυλής ανακύκλωσης τα ελέγχουν και τα διαχωρίζουν σε αυτά που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν και σε αυτά που θα οδηγηθούν για ανακύκλωση. Στην εικόνα 1 φαίνονται οι πάγκοι στους οποίους γίνεται ο έλεγχος των WEEE. Μετά, τα WEEE που κρίνεται ότι μπορούν να επισκευαστούν και να ξαναχρησιμοποιηθούν, στοιβάζονται προσεκτικά σε κοντέινερ, εικόνες 2 και 3, και μεταφέρονται στο κέντρο επισκευής. Τα υπόλοιπα WEEE μεταφέρονται στο κέντρο ανακύκλωσης.



Εικόνα 1 : Πάγκοι ελέγχου WEEE στην αυλή ανακύκλωσης



Εικόνα 2 : Κοντέινερ όπου στοιβάζονται τα WEEE και μεταφέρονται στο κέντρο επισκευής



Εικόνα 3 : Κοντέινερ όπου στοιβάζονται τα WEEE και μεταφέρονται στο κέντρο επισκευής(2)

Στο κέντρο επισκευής υπάρχει εξειδικευμένο προσωπικό το οποίο ελέγχει τα WEEE, τα αποσυναρμολογεί και επισκευάζει όσα είναι δυνατόν να επαναχρησιμοποιηθούν. Στην εικόνα 4 φαίνεται ο εσωτερικός χώρος του κέντρου επισκευής, ενώ στην εικόνα 5 φαίνονται τα WEEE πριν υποβληθούν στον έλεγχο. Τα WEEE τα οποία δε γίνεται να επισκευαστούν, ταξινομούνται σε κατηγορίες εξαρτημάτων, όπως φαίνεται στην εικόνα 6. Στη συνέχεια τα διάφορα ρεύματα αποβλήτων θα μεταφερθούν στο κέντρο ανακύκλωσης. Ωστόσο υπάρχει και η δυνατότητα

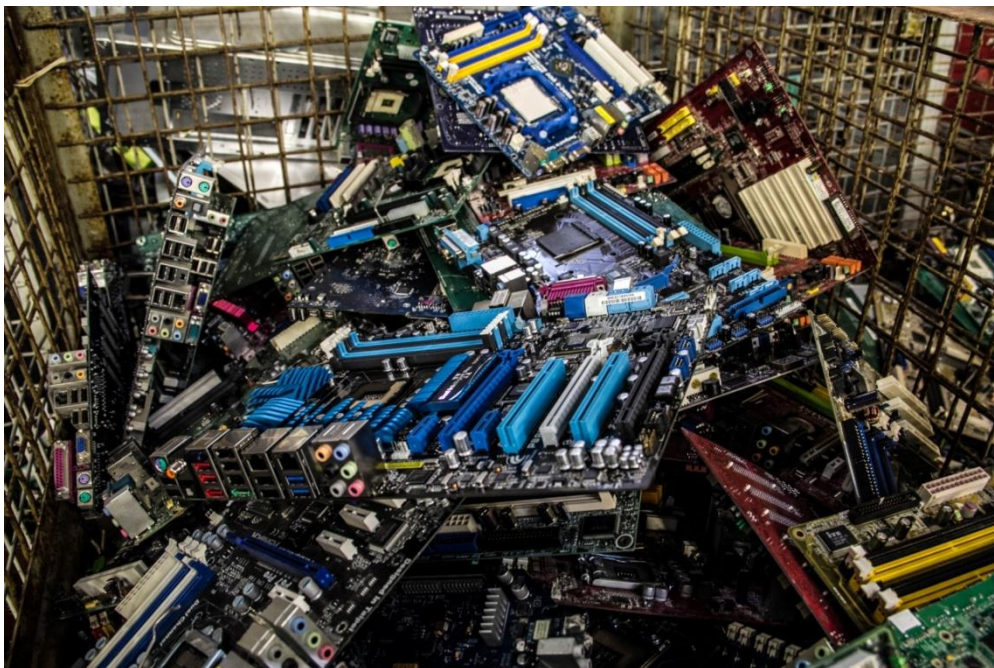
φύλαξης αυτών, ειδικά των πιο πολύτιμων από άποψη συστατικών, μέχρι να αναπτυχθούν νέες και αποτελεσματικότερες μέθοδοι ανάκτησης, καθώς έχει επικεντρωθεί η έρευνα σε αυτό το πεδίο.



Εικόνα 4 : Εσωτερικός χώρος κέντρου επισκευής



Εικόνα 5 : WEEE πριν το έλεγχο



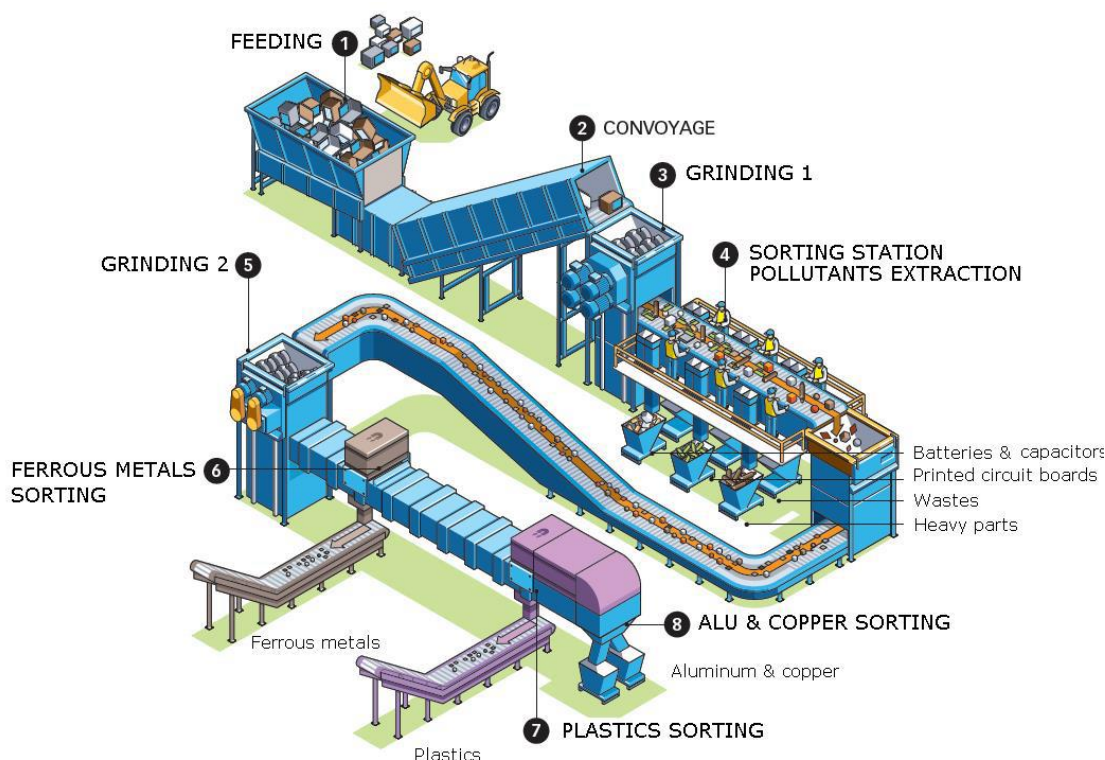
Εικόνα 6 : Ταξινόμηση σε κατηγορίες εξαρτημάτων

Τα επισκευασμένα WEEE πωλούνται στο κοινό, σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο που βρίσκεται στο ισόγειο του κέντρου επισκευής, όπως φαίνεται στην εικόνα 7. Οι τιμές των προϊόντων αυτών είναι χαμηλές και παράλληλα παρέχεται 1 χρόνος εγγύησης από την ημέρα αγοράς τους. Να αναφερθεί ότι η επαναχρησιμοποίηση δεν είναι καλά αναπτυγμένη στη Γερμανία.



Εικόνα 7 : Χώρος πώλησης επισκευασμένων WEEE

Στο κέντρο ανακύκλωσης η διαδικασία που πραγματοποιείται, περιγράφεται στο σχήμα 101. Τα απόβλητα τροφοδοτούνται από ειδικά μηχανήματα στην μονάδα επεξεργασίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 8. Στη συνέχεια τεμαχίζονται και γίνεται χειρωνακτική διαλογή και εξαγωγή των ρυπογόνων ουσιών. Έπειτα τεμαχίζονται ξανά και οδηγούνται στο μαγνητικό διαχωρισμό όπου απομονώνεται το σιδηρούχο κλάσμα (σίδηρος, ατσάλι και νικέλιο). Μετά με ηλεκτροστατικό διαχωρισμό απομονώνεται το μη σιδηρούχο κλάσμα (αλουμίνιο και χαλκός κυρίως). Τέλος, υπάρχει ο διαχωρισμός βαρύτητας, όπου τραπέζια ροής νερού ή αέρα συντελούν στο διαχωρισμό των πλαστικών από το κλάσμα σκόνης, το οποίο είναι εμπλουτισμένο από πολύτιμα μέταλλα και REE. Στην εικόνα 9 φαίνονται οι χώροι αποθήκευσης των ξεχωριστών κλασμάτων, και στην εικόνα 10 φαίνεται το κλάσμα αλουμινίου. Να αναφερθεί ότι, η ποσότητα δευτερογενούς παραγωγής περιορίζεται νομικά με συνέπεια οι παραπανίσιες ποσότητες, αφού επεξεργαστούν προς ποιοτικότερο scrap που θα κοστίζει περισσότερο, πωλούνται π.χ. στην Τουρκία όπου μεταφέρονται με πλοία.



Σχήμα 101 : Μονάδα ανακύκλωσης με πρωτοβάθμια επεξεργασία (Batinić, 2017)



Εικόνα 8 : Τροφοδοσία μονάδας επεξεργασίας



Εικόνα 9 : Χώρος αποθήκευσης ξεχωριστών κλασμάτων



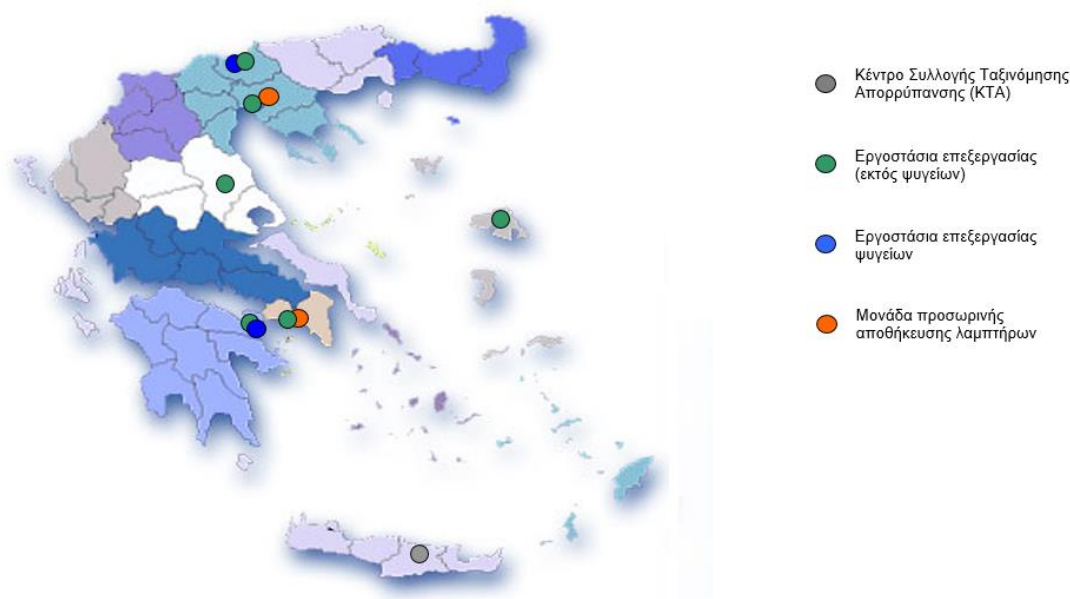
Εικόνα 10 : Κλάσμα αλουμινίου

Το κλάσμα σκόνης που προκύπτει από το κέντρο ανακύκλωσης μεταφέρεται σε μονάδα αποτέφρωσης, όπου η αποτέφρωσή του συνεισφέρει σε παραγωγή ενέργειας αλλά και ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων και REE από την τέφρα. Το κόστος στη μονάδα αποτέφρωσης προσδιορίζεται στα 100€/τόνο.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η ανακύκλωση των WEEE στη Γερμανία βρίσκεται σε πολύ ικανοποιητικό επίπεδο, φτάνοντας τα επίπεδα του 65%. Ωστόσο, πραγματοποιείται στον ακαδημαϊκό χώρο εντατική έρευνα στο πεδίο της ανακύκλωσης WEEE, ώστε να αναπτυχθούν νέες τεχνολογίες με σκοπό την αποτελεσματικότερη ανάκτηση υλικών από άποψη περιβαλλοντικών και οικονομικών όρων. Αξίζει να αναφερθεί, η μέθοδος βίο-εξόρυξης (biomining) που αναπτύσσεται για την ανάκτηση των REE, η οποία αποτελείται από τα στάδια βίο-έκπλυσης (bioleaching) και βίο-προσρόφησης (biosorption). Στο στάδιο βίο-έκπλυσης ανακτώνται τα βασικά μέταλλα. Ενώ στο στάδιο της βίο-προσρόφησης με τη βοήθεια μικροοργανισμών, και ειδικότερα του γένους *Algae*, ανακτώνται οι REE. Συγκεκριμένα στο παράδειγμα των μαγνητών NdFeB, είναι δυνατή η ανάκτηση του 99% του νεοδυμίου, το οποίο περιέχεται σε ποσοστό που κυμαίνεται από 13 μέχρι 30%.

5.2 Σύστημα ανακύκλωσης Ελλάδας

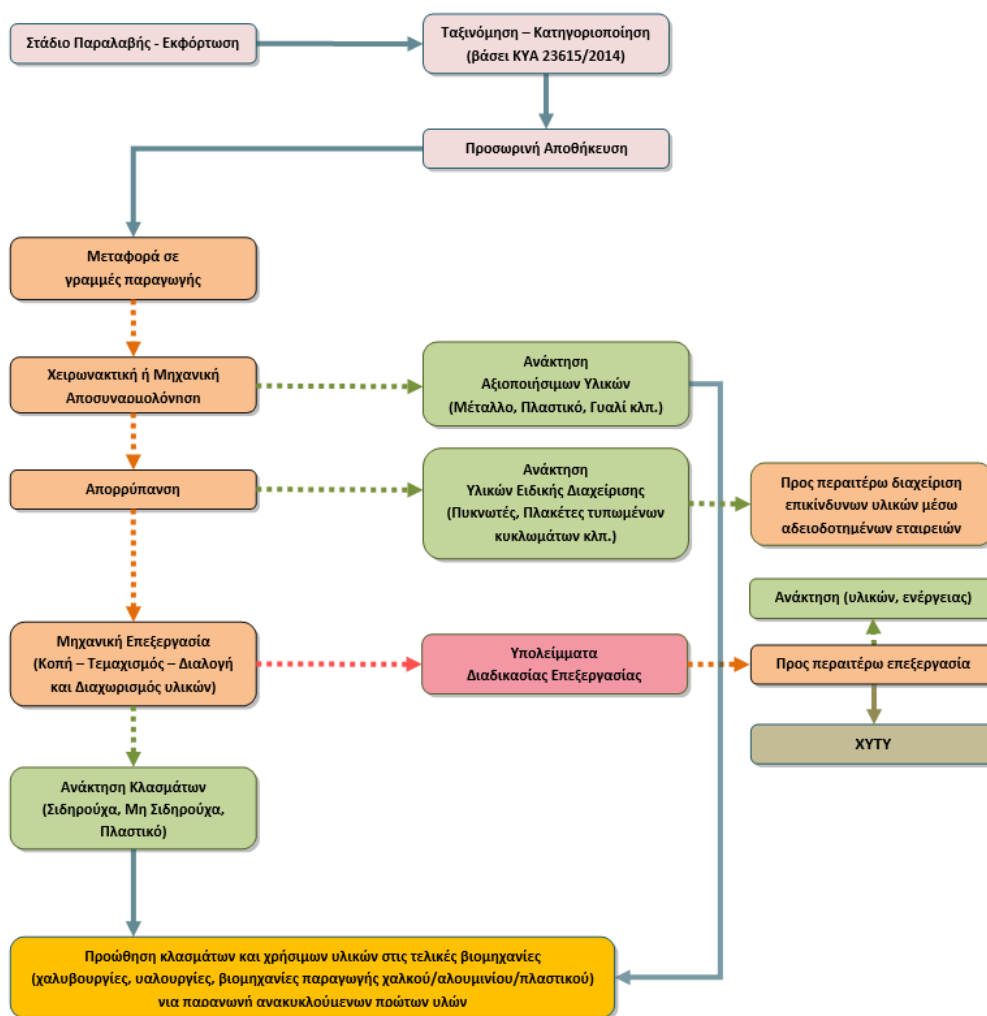
Στοιχεία για το σύστημα ανακύκλωσης της Ελλάδας μας παραχωρήθηκαν από την Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε.. Η εταιρία αυτή είναι ο υπεύθυνος φορέας της Ελλάδας για τη συλλογή και ανακύκλωση WEEE, με κάδους συλλογής WEEE της εταιρίας να είναι τοποθετημένοι σε πολλά σημεία σε όλη τη χώρα. Η Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε. συνεργάζεται με αδειοδοτημένες μονάδες επεξεργασίας που βρίσκονται σε κομβικά σημεία της χώρας, ωστόσο αποτελεί το συντονιστή της διαδικασίας ανακύκλωσης καθώς όλα τα στοιχεία και τα δεδομένα συγκεντρώνονται και διαχειρίζονται από αυτήν. Στο σχήμα 102 φαίνεται η γεωγραφική κατανομή των μονάδων επεξεργασίας και στον πίνακα 46 παρουσιάζονται η επωνυμία, οι δραστηριότητες και η πόλη στην οποία βρίσκονται. Οι μονάδες επεξεργασίας τηρούν αυστηρές προδιαγραφές κατά τη διαχείριση των WEEE, ενώ για κάθε κατηγορία ΕΕΕ ακολουθείται ειδική διαδικασία. Τα βασικά αρχικά στάδια που πραγματοποιούνται στις μονάδες επεξεργασίας είναι η υποδοχή και ζύγιση των φορτίων, η εκφόρτωση των WEEE από τα φορτηγά, η ταξινόμηση των WEEE ανάλογα με το είδος της συσκευής και η προσωρινή αποθήκευση αυτών στους χώρους του εργοστασίου. Στη συνέχεια πραγματοποιείται χειρωνακτική ή μηχανική αποσυναρμολόγηση του εξοπλισμού. Σε επόμενο στάδιο ακολουθεί η χειρωνακτική απορρύπανση του εξοπλισμού όπου αφαιρούνται οι επικίνδυνες ουσίες, μείγματα και κατασκευαστικά στοιχεία (Υλικά Ειδικής Διαχείρισης), όπως ορίζονται στην ΚΥΑ 23615/2014, τα οποία θα μεταφερθούν για περαιτέρω διαχείριση σε κατάλληλα αδειοδοτημένες εταιρίες. Έπειτα, ο εξοπλισμός οδηγείται προς μηχανική επεξεργασία όπου αφού τεμαχιστεί, διαχωρίζεται σε κλάσματα με χρήση ειδικών τεχνολογιών. Τα υλικά που παράγονται από την επεξεργασία των WEEE είναι σιδηρούχα μέταλλα, αλουμίνιο, πλαστικό, χαλκός, ορείχαλκος, ξύλο, γυαλί, γυαλί funnel, γυαλί panel, χαρτί, μπετόν, ηλεκτρομηχανολογικά μέρη, έλαια, CFC/HCF/CHFC/HC, υαλοβάμβακα, πούδρα πολυουρεθάνης, μελάνια, λαμπτήρες, καλώδια, μπαταρίες, πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων, πυκνωτές, φθορίζον επίχρισμα. Ο σίδηρος που ανακτάται διατίθεται στις ελληνικές χαλυβουργίες, ενώ το γυαλί και το πλαστικό προωθούνται στις αντίστοιχες βιομηχανίες της Ελλάδας και του εξωτερικού. Στο σχήμα 103 περιγράφεται αναλυτικά το σύστημα ανακύκλωσης WEEE της Ελλάδας.



Σχήμα 102 : Γεωγραφική κατανομή μονάδων επεξεργασίας (<http://www.electrocycle.gr/>)

EKAN ABEE	Επεξεργασία όλων των κατηγοριών εκτός ψυγείων - λαμπτήρων (υπάρχει δυνατότητα απορρύπανσης STEP1 ψυγείων)	Αγ. Θεόδωροι Κορινθίας
HFR SA	Σταθερή μονάδα ψυγείων	Αγ. Θεόδωροι Κορινθίας
ΑΦΟΙ ΚΩΝ/ΔΗ ΑΒΒΕ & ΝΕ	Επεξεργασία λευκών συσκευών εκτός ψυκτικών μηχανισμών	Θεσσαλονίκη
ΑΦΟΙ ΚΩΝ/ΔΗ ΑΒΒΕ & ΝΕ	Επεξεργασία όλων των κατηγοριών εκτός λαμπτήρων	Άσπρος Κιλκίς
HER SA	Επεξεργασία ΑΗΗΕ κατηγ. 3,4,9 Έλεγχος επαναχρησιμοποίησης μερών (εξειδίκευση πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων)	Λάρισα
ΒΙΑΝΑΤΤ ΑΕ	Επεξεργασία όλων των κατηγοριών εκτός ψυκτικών μηχανισμών - λαμπτήρων	Αττική
ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΑΙΓΑΙΟΥ - ΧΥΘΡΙΑ ΑΒΕΕ	Επεξεργασία όλων των κατηγοριών εκτός ψυγείων -λαμπτήρων	Μυτιλήνη
ΕΔΙΣΑΚ ΕΠΕ	Επεξεργασία όλων των κατηγοριών εκτός ψυκτικών μηχανισμών - λαμπτήρων	Ηράκλειο Κρήτης
POLYECO SA	Προσωρινή αποθήκευση λαμπτήρων με σκοπό την διασυνοριακή μεταφορά σε αδειοδοτημένες μονάδες επεξεργασίας του εξωτερικού	Αττική, Θεσ/νίκη

Πίνακας 46 : Επωνυμία-Δραστηριότητες-Περιοχή μονάδων επεξεργασίας (<http://www.electrocycle.gr/>)



Σχήμα 103 : Σύστημα ανακύκλωσης Ελλάδας (<http://www.electrocycle.gr/>)

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ανακύκλωσης Συσκευών Α.Ε. η συλλογή των WEEE εμφανίζει αύξηση χρόνο με το χρόνο. Συγκεκριμένα το 2014 η συλλογή ήταν 44.000tn, το 2015 ήταν 48.000 tn και για το 2016 εκτιμάται στους 52000 tn. Ειδικότερα για το 2016, μας δώθηκε η αναλυτική ανάκτηση σε κλάσματα των WEEE που ανακυκλώθηκαν, όπως φαίνεται στον πίνακα 47. Συνεπώς, το ποσοστό ανάκτησης της Ελλάδας το 2016, ξεπέρασε το 88%.

Κλάσμα ανακύκλωση	από Ποσοστό	Ποσότητα (τόνοι)
Μέταλλο σιδηρούχο	50,47%	26.244,4
Μέταλλο μη σιδηρούχο	3,05%	1.586,0
Πλαστικά μέρη	10,73%	5.579,6
Γυάλινα μέρη	9,34%	4.856,8
Η / Μ μέρη	7,71%	4.009,2
Λοιπά αξιοποιήσιμα υλικά	3,42%	1.778,4
Μη αξιοποιήσιμα υλικά	11,91%	6.193,2
		52.000,0

Πίνακας 47 : Ανακτήσιμα κλάσματα για την Ελλάδα το 2016 (<http://www.electrocycle.gr/>)

5.3 Περίπτωση PCBs στην Ελλάδα για το 2016

Για τη μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ανακύκλωσης WEEE τα δεδομένα του πίνακα 47 δεν υπήρξαν αρκετά, ώστε να μελετηθεί η ανακύκλωση WEEE στην Ελλάδα το 2016. Για το λόγο αυτό προτιμήθηκε η μελέτη μιας ειδικής περίπτωσης με μεγάλο ενδιαφέρον. Επιλέχθηκε η περίπτωση της ανακύκλωσης των PCBs στην Ελλάδα για το 2016. Σύμφωνα με τους Van Eygen et al. (2015), οι PCBs μπορεί να περιέχουν περισσότερο από 10 φορές τη συγκέντρωση σε πολύτιμα μέταλλα, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα κοιτάσματα των μετάλλων (Betts, 2008). Αυτό καθιστά τις PCBs μια αξιόλογη δευτερογενής πηγή παραγωγής πολύτιμων μετάλλων αλλά και REE. Σύμφωνα με την Ανακύκλωση Συσκευών Α.Ε. για το 2016 στην Ελλάδα, οι PCBs αποτέλεσαν το 1,69% του συνόλου των 52.000tn WEEE, δηλαδή 878,8tn. Πρέπει να αναφερθεί ότι το ποσοστό αυτό αναφέρεται στις PCBs με μέγεθος μεγαλύτερο από 10cm², δηλαδή κατά κύριο λόγο αυτές που προέρχονται από τους σκληρούς δίσκους των υπολογιστών. Με βάση την ποσότητα των 878,8tn και τις περιεκτικότητες των μετάλλων στις PCBs του πίνακα 44, κατασκευάστηκε ο πίνακας 48. Στον πίνακα 48, η στήλη ποσότητα επί του συνόλου παρουσιάζει πόσο από το κάθε μέταλλο υπάρχει στην ποσότητα των 878,8tn, με το άθροισμα της στήλης να είναι 429,44tn και να υποδηλώνει ότι το 48,86% (429,44/878,8) των PCBs είναι μέταλλα. Στην επόμενη στήλη, τιμή (€/tn), αναφέρονται οι τιμές των μετάλλων στις 13/02/2017 σύμφωνα με τις ιστοσελίδες (<http://www.infomine.com/>) για Ag, Au, Pd, Al, Cu, Fe, Ni, Sn, Ti, Zn και Ta, και (<http://mineralprices.com/>) για Ce, Nd και Sb. Στην επόμενη στήλη,

ανάκτηση 99% (τόνοι), εκτιμάται η ποσότητα ανάκτησης κάθε μετάλλου στην περίπτωση που η αποτελεσματικότητα ανάκτησης είναι 99%, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία με χρήση ανεπτυγμένης τεχνολογίας είναι δυνατή η ανάκτηση 99% για τα περισσότερα μέταλλα. Στην τελευταία στήλη, αξία για 99% (€), προβάλλεται το γινόμενο της στήλης τιμή (€/tn) με τη στήλη ανάκτηση 99% (τόνοι), με τιμές αυτές να εκφράζουν το οικονομικό όφελος από την πώληση των συγκεκριμένων ποσοτήτων μετάλλων.

Μέταλλο	Περιεκτικότητα	Ποσότητα επί του συνόλου (τόνοι)	τιμή (€/tn)	ανάκτηση 99% (τόνοι)	αξία για 99% (€)
Ag (ppm)	3440	3,02	540.440,00	2,993	1.617.451,14
Au (ppm)	1020	0,90	37.050.000,00	0,887	32.878.623,49
Pd (ppm)	210	0,18	23.630.000,00	0,183	4.317.260,55
Al (mass %)	2,2	19,33	1.744,23	19,140	33.385,02
Cu (mass %)	31,6	277,70	5.539,25	274,924	1.522.871,61
Fe (mass %)	7,1	62,39	54,99	61,771	3.396,78
Ni (mass %)	2,5	21,97	9.850,00	21,750	214.240,46
Sn (mass %)	2,4	21,09	18.110,00	20,880	378.142,02
Ti (mass %)	0,6	5,27	3.289,74	5,220	17.172,68
Zn (mass %)	0,4	3,52	2.739,17	3,480	9.532,44
Ce (mass %)	0,5	4,39	6.590,00	4,350	28.666,90
Nd (mass %)	0,2	1,76	56.480,00	1,740	98.276,56
Sb (mass %)	0,1	0,88	8.471,39	0,870	7.370,21
Ta (mass %)	0,8	7,03	117.540,00	6,960	818.089,68
Σύνολο		429,44		425,149	41.944.479,54

Πίνακας 48 : Ποσότητες και τιμές για ανάκτηση 99% των μετάλλων από τις PCBs για την Ελλάδα το 2016

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα και το λογισμικό SimaPro θα εκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανάκτησης του 99% των μετάλλων από την ανακύκλωση των 878,8 τόνων PCBs στην Ελλάδα το 2016. Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω παλαιότητας του λογισμικού, δεν έχει ενημερωθεί από τις πρόσφατες εκδόσεις, δεν υπήρχαν διαθέσιμες όλες οι επιλογές που θα ήταν δυνατό να μοντελοποιηθούν με συνέπεια να αμφισβητείται η

ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ωστόσο τα αποτελέσματα αυτά, δίνουν μια γενική εικόνα για τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την ανακύκλωση WEEE. Η λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιήθηκε είναι η ετήσια δευτερογενής παραγωγή PCBs στην Ελλάδα. Στη μελέτη μας, εξετάστηκαν δύο εκδοχές :

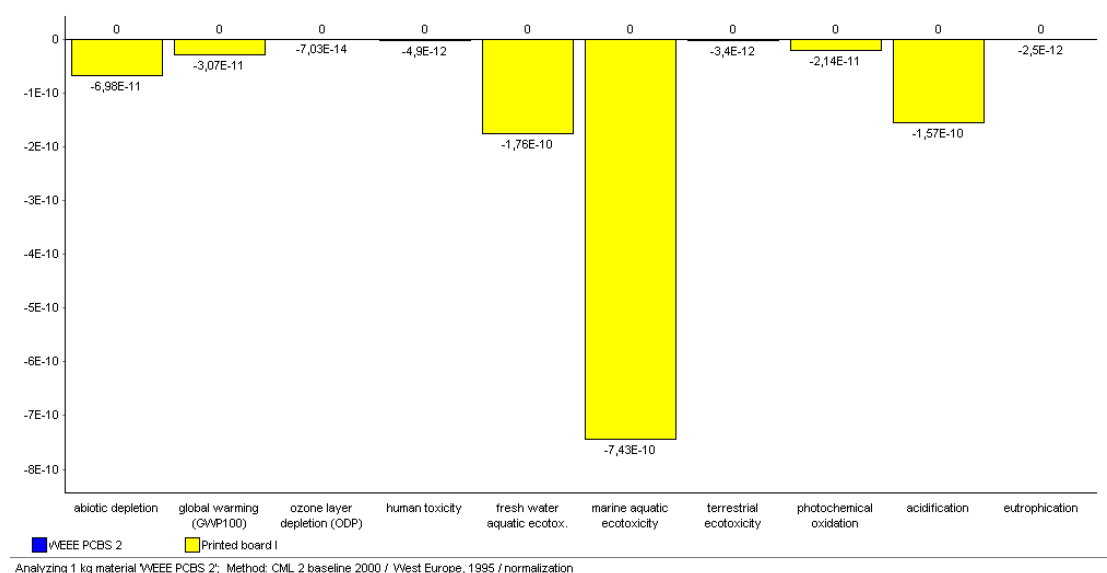
- οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που εξοικονομούνται από την ανακύκλωση 870,012 τόνων (99% του συνόλου) τυπωμένων πλακετών (printed board) και
- οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που εξοικονομούνται από την ανάκτηση (δευτερογενή παραγωγή) των ανεξάρτητων μετάλλων σύμφωνα με τη στήλη ανάκτηση 99% του πίνακα 48. Να σημειωθεί ότι στο λογισμικό δεν υπήρχαν όλα τα μέταλλα, στον πίνακα 49 σημειώνονται με √ όσα υπήρχαν και με Χ όσα όχι. Ο χρυσός, το αντιμόνιο, το ταντάλιο και οι REE δεν υπήρχαν.

Μέταλλο	Ανάκτηση 99% (τόνοι)	SimaPro
Ag	2,993	√
Au	0,887	X
Pd	0,183	√
Al	19,140	√
Cu	274,924	√
Fe	61,771	√
Ni	21,750	√
Sn	20,880	√
Ti	5,220	√
Zn	3,480	√
Ce	4,350	X
Nd	1,740	X
Sb	0,870	X
Ta	6,960	X

Πίνακας 49 : Μέταλλα που μοντελοποιήθηκαν και μέταλλα που δεν υπήρχαν στο SimaPro

Στην πρώτη περίπτωση δώθηκε εντολή στο μοντέλο να εκτιμήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής 870,012 τόνων τυπωμένων πλακετών (printed board), που ήταν ότι πιο κοντινό βρέθηκε στη βάση δεδομένων για τα PCBs. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 104 και στον πίνακα 50. Οι τιμές φυσιολογικά είναι αρνητικές

ωστόσο, θα εκφραστούν με θετικό πρόσημο ώστε να περιγράψουν τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την αποφυγή παραγωγής PCBs από πρωτογενή υλικά, λόγω ότι θα αξιοποιηθούν τα δευτερογενή υλικά από την ανάκτηση. Από το κανονικοποιημένο διάγραμμα του σχήματος 104, συμπεραίνεται ότι τα κυριότερα περιβαλλοντικά οφέλη αφορούν την οικοτοξικότητα των θαλάσσιων υδάτων με διαφορά, και στη συνέχεια την οικοτοξικότητα των πόσιμων υδάτων και την οξύνιση.



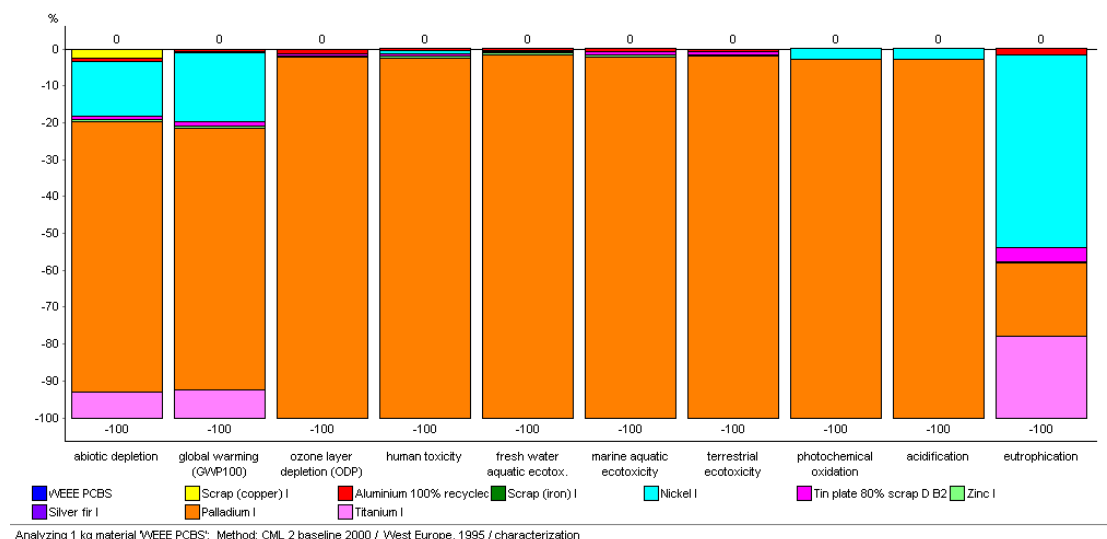
Σχήμα 104 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής 1kg τυπωμένων πλακετών στην πρώτη περίπτωση

Impact category	Unit	Total	WEEE PCBs 2	Printed board I
abiotic depletion	kg Sb eq	-1,05	x	-1,05
global warming (GWP100)	kg CO2 eq	-145	x	-145
ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	-5,86E-06	x	-0,00000586
human toxicity	kg 1,4-DB eq	-37,1	x	-37,1
fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	-89	x	-89
marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-84300	x	-84300
terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-0,16	x	-0,16
photochemical oxidation	kg C2H2	-0,177	x	-0,177
acidification	kg SO2 eq	-4,29	x	-4,29
eutrophication	kg PO4--- eq	-0,0312	x	-0,0312

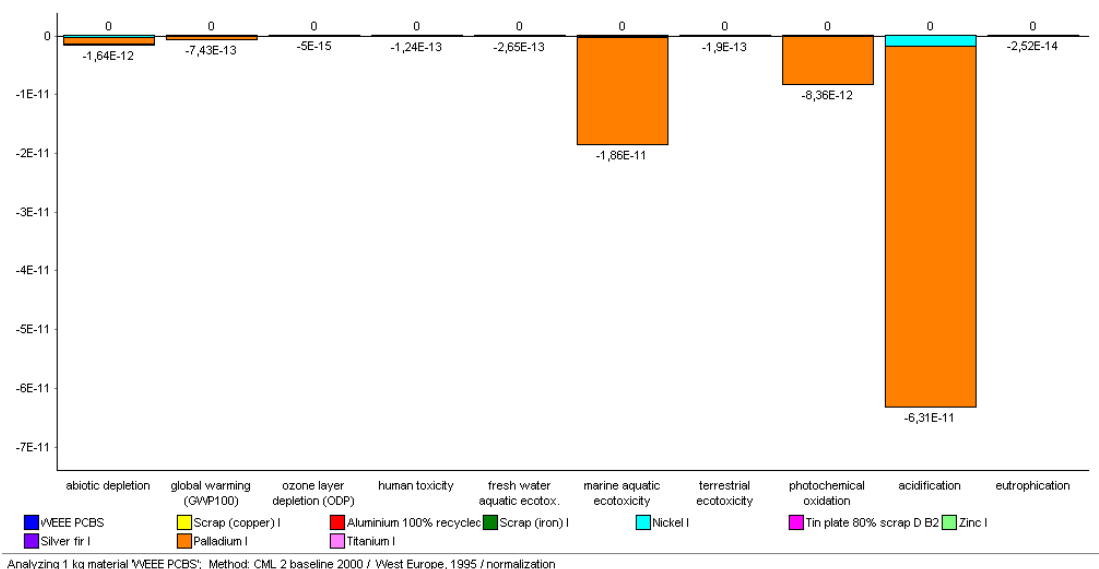
Πίνακας 50 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής 1kg τυπωμένων πλακετών στην πρώτη περίπτωση

Στη δεύτερη περίπτωση το μοντέλο τροφοδοτήθηκε με τις ποσότητες των ανεξάρτητων μετάλλων, σύμφωνα με τη στήλη ανάκτηση 99% του πίνακα 48. Δυστυχώς δεν αξιοποιήθηκαν

οι ποσότητες του χρυσού, του αντιμονίου, του ταντάλιου, του νεοδύμιου και του δημήτριου, όπως φαίνεται στον πίνακα 49, καθώς δεν ήταν διαθέσιμες στο λογισμικό. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις παρουσιάζονται στα σχήματα 105 και 106 και στον πίνακα 51. Οι τιμές φυσιολογικά είναι αρνητικές ωστόσο, θα εκφραστούν με θετικό πρόσημο ώστε να περιγράψουν τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την αποφυγή παραγωγής αυτών των ποσοτήτων πρωτογενών υλικών που θα απαιτούνταν για την κατασκευή 878,8 τόνων PCBs. Στο σχήμα 105 παρατηρείται ότι το παλλάδιο, σπάνιο μέταλλο, θα αποφέρει στην πλειονότητα τα περιβαλλοντικά οφέλη σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων εκτός από τον ευτροφισμό που επηρεάζεται περισσότερο από το νικέλιο. Στο σχήμα 106, φαίνεται το κανονικοποιημένο διάγραμμα όπου φυσιολογικά το παλλάδιο θα αποφέρει στην πλειονότητα τα περιβαλλοντικά οφέλη, με τα σημαντικότερα οφέλη να παρατηρούνται στις κατηγορίες οξύνισης, της οικοτοξικότητας των θαλάσσιων υδάτων και της φωτοχημικής οξείδωσης.



Σχήμα 105 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής 1kg PCBs στη δεύτερη περίπτωση



Σχήμα 106 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής 1kg PCBs στη δεύτερη περίπτωση μετά από κανονικοποίηση

Impact category	Unit	Total	WEEE PCBs	Scrap (copper) I	Aluminium 100% recycled ETH S	Scrap (iron) I	Nickel I
abiotic depletion	%	-100	x	-2,73	-0,699	-0,0914	-14,7
global warming (GWP100)	%	-100	x	-0,275	-0,673	-0,0987	-18,8
ozone layer depletion (ODP)	%	-100	x	x	-1,34	x	-0,102
human toxicity	%	-100	x	-0,11	-0,594	-0,0248	-0,867
fresh water aquatic ecotox.	%	-100	x	-0,0175	-0,446	-0,0039	-0,275
marine aquatic ecotoxicity	%	-100	x	-0,00348	-0,807	-0,0008	-0,216
terrestrial ecotoxicity	%	-100	x	-0,152	-0,619	-0,0343	-0,133
photochemical oxidation	%	-100	x	-0,00507	-0,0066	-0,0016	-2,84
acidification	%	-100	x	-0,00098	-0,00596	-0,0005	-2,82
eutrophication	%	-100	x	-0,0002	-1,8	-7E-05	-52

Πίνακας 51 : Περιβαλλοντικές επιπτώσεις παραγωγής 1kg PCBs στη δεύτερη περίπτωση

Impact category	Tin plate 80% scrap D B250	Zinc I	Silver fir I	Palladium I	Titanium I
abiotic depletion	-1,04	-0,554	-0,0103	-73	-7,12
global warming (GWP100)	-1,14	-0,527	-0,00679	-70,8	-7,64
ozone layer depletion (ODP)	-0,684	-0,21	-0,00153	-97,7	-0,00067
human toxicity	-0,531	-0,484	-0,00471	-97,3	-0,0828
fresh water aquatic ecotox.	-0,566	-0,578	-0,00439	-98,1	-0,00232
marine aquatic ecotoxicity	-0,742	-0,449	-0,0033	-97,8	-0,00155
terrestrial ecotoxicity	-0,739	-0,339	-0,00401	-98	-0,00719
photochemical oxidation	-0,0138	-0,0161	-9,2E-05	-97	-0,0856
acidification	-0,00838	-0,0149	-3E-05	-97,1	-0,0778
eutrophication	-3,79	-0,429	-0,00096	-19,7	-22,3

Πίνακας 52 : Συνέχεια 51

Αξίζει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα από τις δύο περιπτώσεις διαφέρουν σημαντικά. Αυτό δικαιολογείται από τις ελλείψεις του λογισμικού SimaPro ωστόσο συντελεί σε σημαντική αβεβαιότητα για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Επίσης, η αδυναμία αξιοποίησης των ποσοτήτων ανάκτησης του χρυσού και των REE κατά μεγάλη πιθανότητα επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα στη δεύτερη περίπτωση, καθώς αυτά τα μέταλλα είναι απαιτητικά ως προς την εξόρυξή τους.

5.3.1 Θεωρία κόστους/οφέλους

Δεν κατέσται δυνατό να παρασχεθούν τα απαραίτητα οικονομικά δεδομένα της διαδικασίας ανακύκλωσης των PCBs στην Ελλάδα για το 2016. Για το λόγο αυτό θα γίνουν κάποιες υποθέσεις ώστε να προκύψουν κάποια ενδεικτικά συμπεράσματα. Στο τέλος θα αξιοποιηθεί πληροφορία από τη βιβλιογραφία, ωστόσο θα υπάρξουν πολλές επιφυλάξεις για τη συμβατότητά της με την υπό εξέταση περίπτωση.

Σύμφωνα με τη 'Σύγχρονη μικροοικονομική' των Κώττης και Κώττη (2010), το κέρδος προσδιορίζεται από τον τύπο $\Pi = TR - TC$, όπου Π κέρδος, TR συνολικά έσοδα και TC συνολικό κόστος. Το TR ισούται με $P \cdot Q$ και παρέχεται από την τελευταία στήλη του πίνακα 48, υπολογίστηκε 41.944.480 € από την πώληση των ανακτώμενων ποσοτήτων μετάλλων με βάση τις τιμές τους στις 13/02/2017. Υποθέτουμε ότι το συνολικό κόστος TC είναι 0. Άρα :

$$\Pi = TR - TC \rightarrow \Pi = TR = 41.944.480 \text{ €}$$

Το κέρδος θα μπορούσε να φτάσει τα 41.944.480 € και επίσης η εταιρία θα ήταν βιώσιμη αν το συνολικό κόστος της ήταν $\leq 41.944.480$ €.

Για το τέλος, θα αξιοποιηθεί η πληροφορία από τους Mayers et al. (2005) ότι το κόστος διαχείρισης των εκτυπωτών στο Ηνωμένο Βασίλειο το 2005 για ανάκτηση 99% ήταν 0,52 λίρες ανά kg. Η συγκεκριμένη πληροφορία κατά μεγάλη πιθανότητα δεν ανταποκρίνεται στη μελέτη μας για τα PCBs, τόσο γιατί αναφέρεται σε άλλο είδος αποβλήτου όσο και γιατί περιγράφει τις συνθήκες 12 πριν. Ωστόσο κρίθηκε σκόπιμο να γίνει αυτή η ενδεικτική αντιπαραβολή του κόστους ανακύκλωσης με το οικονομικό κέρδος.

$$0,52 \text{ λίρες/ kg} = 0,61 \text{ €/ kg} = 610 \text{ €/ tn}$$

$$\text{Για τους } 878,8 \text{ τόνους της περίπτωσης μας το TC θα είναι } 878,8 \text{ tn} * 610 \text{ €/ tn} = 536.000 \text{ €}$$

$$\text{Συνεπώς θα ήταν } \Pi = \text{TR} - \text{TC} \rightarrow \Pi = 41.944.480 \text{ €} - 536.000 \text{ €} = 41.408.480 \text{ €}$$

Άρα στην περίπτωση που ήταν αυτά τα πραγματικά μας δεδομένα, θα ήταν ολοφάνερο ότι από οικονομικής άποψης είναι τεράστιο το κέρδος της ανακύκλωσης/ανάκτησης, ειδικά αν αναλογιστούμε ότι το παραπάνω κέρδος αναφέρεται μονάχα στα PCBs, που αποτελούν μόλις το 1,69% του συνόλου των WEEE της Ελλάδας για το 2016.

6. Συμπεράσματα

Η ανακύκλωση WEEE είναι μια διαδικασία γνωστή τα τελευταία χρόνια και παρουσιάζει ενδιαφέρον γιατί έχει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την εξοικονόμηση πόρων μέσω της ανάκτησης, τη μείωση του όγκου των αποβλήτων που καταλήγουν σε υγειονομική ταφή και την απομάκρυνση και διαχείριση επικίνδυνων ουσιών που σε αντίθετη περίπτωση θα κατέληγαν στο περιβάλλον. Επίσης, μπορεί να αποφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη από την πώληση των παραγόμενων πόρων και της παραγόμενης ενέργειας. Ωστόσο ακόμα, υπάρχουν πολύ μεγάλες προοπτικές από την ανάπτυξη της διαδικασίας. Περιθώρια βελτίωσης υπάρχουν σε όλα τα επιμέρους στάδια, εντούτοις το μεγαλύτερο βάρος οφείλει να πέσει στην τελική επεξεργασία όπου είναι εφικτή η ανάκτηση των πολύτιμων μετάλλων και των REE, τα οποία έχουν τον υψηλότερο περιβαλλοντικό και οικονομικό αντίκτυπο.

Όσον αφορά τη συλλογή θα πρέπει να αναπτυχθούν τα συστήματα συλλογής, ώστε να είναι ευκολότερη η πρόσβαση των καταναλωτών σε αυτά. Επίσης, θα πρέπει να ενημερωθούν οι καταναλωτές για το οφέλη της ανακύκλωσης και να τους δωθούν κίνητρα για ανακύκλωση, όπως γίνεται ήδη από κάποιες επιχειρήσεις με τις προσφερόμενες εκπτώσεις στην αγορά νέων προϊόντων. Στο κομμάτι της μεταφοράς από τα σημεία συλλογής στις μονάδες επεξεργασίας απαιτείται αποτελεσματική σχεδίαση των διαδρομών και της συχνότητας των δρομολογίων, με σκοπό να περιοριστεί όσο είναι δυνατόν η κατανάλωση καυσίμων.

Πριν γίνει αναφορά στην πρωτοβάθμια επεξεργασία, πρέπει να επισημανθεί ότι μια βάση δεδομένων για τις συστάσεις των WEEE καθώς και υπόδειξη στους παραγωγούς, να κατασκευάζουν τα προϊόντα τους με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολη η αποσυναρμολόγησή τους, θα διευκολύνει ιδιαίτερα τη διαδικασία της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας. Επιπλέον, θα ήταν επωφελής η δημιουργία και ανάπτυξη κέντρου επισκευής, όπου εξειδικευμένο προσωπικό θα ελέγχει τα WEEE, θα επισκευάζει όσα είναι δυνατόν και μετά θα τα προμηθεύει σε ειδικό κατάστημα το οποίο θα τα εμπορεύεται στους καταναλωτές σε χαμηλές τιμές. Επιπρόσθετα, η νομοθεσία επικεντρώνεται σε στόχους ανακύκλωσης με βάση το βάρος, με αποτέλεσμα μέταλλα με υψηλή περιβαλλοντική και οικονομική αξία, που όμως περιέχονται σε μικρές ποσότητες, δηλαδή τα πολύτιμα μέταλλα και οι REE, να μην ανακτώνται. Συνεπώς απαιτούνται τροποποιήσεις στη νομοθεσία, με την υιοθέτηση στόχων βάση κυρίως των περιβαλλοντικών όρων.

Σχετικά με την πρωτοβάθμια επεξεργασία, θα ήταν ευεργετικός ο κατάλληλος σχεδιασμός της διαδικασίας, ώστε σε αυτό το στάδιο να ανακτώνται εξολοκλήρου τα βασικά υλικά, δηλαδή τα βασικά μέταλλα, το πλαστικό και το γυαλί, και παράλληλα τα υπολείμματα, που θα είναι πλούσια σε πολύτιμα μέταλλα και REE, να διατηρηθούν σε διαστάσεις στις οποίες θα είναι δυνατή η ανάκτησή τους κατά την τελική επεξεργασία.

Τέλος, στο στάδιο της τελικής επεξεργασίας χρειάζεται εξέλιξη των υπαρχόντων τεχνολογιών ανάκτησης καθώς και ανάπτυξη νέων καινοτόμων τεχνολογιών. Ο κατάλληλος συνδυασμός πυρομεταλλουργικών και υδρομεταλλουργικών επεξεργασιών έχει τη δυνατότητα να επιτύχει 99% ανάκτηση των πολύτιμων μετάλλων και των REE. Ωστόσο απαιτείται σωστή διαχείριση για την αποφυγή δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Συνεπώς, η τελική επεξεργασία θα πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να πετύχει τη μέγιστη ανάκτηση και παράλληλα να απαιτεί την ελάχιστη διαχείριση με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος. Καινοτόμες τεχνολογίες, όπως η βίο-εξόρυξη (biomining) Κεφ. 5.1, μπορούν να συνεισφέρουν προς αυτήν την κατεύθυνση.

Με την υλοποίηση των παραπάνω ενεργειών θα αυξηθεί σημαντικά το ποσοστό ανακύκλωσης και το ποσοστό ανάκτησης. Η αύξηση της ανάκτησης ειδικά των πολύτιμων μετάλλων και των REE θα αποφέρει αξιοσημείωτα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη, όπως φαίνεται και από την έρευνά μας. Από την ανάκτηση του 99% του περιεχομένου σε μέταλλα των 878,8 τόνων PCBs στην Ελλάδα το 2016, τα υψηλά περιβαλλοντικά οφέλη στις κατηγορίες της οξύνισης, της οικοτοξικότητας των θαλάσσιων υδάτων και της φωτοχημικής οξείδωσης, προκύπτουν σχεδόν αποκλειστικά από την ανάκτηση του παλλαδίου (πολύτιμο μέταλλο). Αν και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αμφισβητείται, λόγω της αδυναμίας του λογισμικού να συμπεριλάβει όλα τα δεδομένα, εντούτοις γίνεται αποδεκτή η γενική τάση που υποδεικνύει. Σύμφωνα με την έρευνά μας, από οικονομική άποψη η ανάκτηση 425 τόνων μετάλλων από τα PCBs στην Ελλάδα το 2016 θα αποφέρει συνολικά έσοδα της τάξης των 41.944.480 € με το μεγαλύτερο μερίδιο από αυτά να συνεισφέρουν ο χρυσός και το παλλάδιο, 32,8 εκ. € και 4,3 εκ. € αντίστοιχα.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Baxter, J., Lyng, K. A., Askham, C., & Hanssen, O. J. (2016). High-quality collection and disposal of WEEE: Environmental impacts and resultant issues. *Waste Management*.
- Van Eygen, E., De Meester, S., Tran, H. P., & Dewulf, J. (2016). Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 53-64.
- Reuter, M. A., van Schaik, A., & Gediga, J. (2015). Simulation-based design for resource efficiency of metal production and recycling systems: Cases-copper production and recycling, e-waste (LED lamps) and nickel pig iron. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(5), 671-693.
- Wäger, P. A., & Hischier, R. (2015). Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant. *Science of the Total Environment*, 529, 158-167.
- Menikpura, S. N. M., Santo, A., & Hotta, Y. (2014). Assessing the climate co-benefits from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) recycling in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 74, 183-190.
- Hischier, R. (2015). Life cycle assessment study of a field emission display television device. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(1), 61-73.
- Biganzoli, L., Falbo, A., Forte, F., Grosso, M., & Rigamonti, L. (2015). Mass balance and life cycle assessment of the waste electrical and electronic equipment management system implemented in Lombardia Region (Italy). *Science of the Total Environment*, 524, 361-375.
- Rubin, R. S., de Castro, M. A. S., Brandão, D., Schalch, V., & Ometto, A. R. (2014). Utilization of life cycle assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. *Journal of Cleaner Production*, 64, 297-305.
- Fogarasi, S., Imre-Lucaci, F., Ilea, P., & Imre-Lucaci, Á. (2013). The environmental assessment of two new copper recovery processes from Waste Printed Circuit Boards. *Journal of Cleaner Production*, 54, 264-269.
- Stamp, A., Althaus, H. J., & Wäger, P. A. (2013). Limitations of applying life cycle assessment to complex co-product systems: the case of an integrated precious metals smelter-refinery. *Resources, Conservation and Recycling*, 80, 85-96.
- Song, Q., Wang, Z., Li, J., & Zeng, X. (2013). The life cycle assessment of an e-waste treatment enterprise in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 15(4), 469-475.
- Rocchetti, L., Vegliò, F., Kopacek, B., & Beolchini, F. (2013). Environmental impact assessment of hydrometallurgical processes for metal recovery from WEEE residues using a portable prototype plant. *Environmental science & technology*, 47(3), 1581-1588.
- Bigum, M., Brogaard, L., & Christensen, T. H. (2012). Metal recovery from high-grade WEEE: a life cycle assessment. *Journal of hazardous materials*, 207, 8-14.
- Ravi, V. (2012). Evaluating overall quality of recycling of e-waste from end-of-life computers. *Journal of Cleaner Production*, 20(1), 145-151.
- Gamberini, R., Gebennini, E., Manzini, R., & Ziveri, A. (2010). On the integration of planning and environmental impact assessment for a WEEE transportation network—A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 937-951.
- Johansson, J. G., & Björklund, A. E. (2010). Reducing life cycle environmental impacts of waste electrical and electronic equipment recycling. *Journal of Industrial Ecology*, 14(2), 258-269.

Bakri, S. N. S., Surif, S., & Ramasamy, R. K. (2008, May). A case study of life cycle assessment (LCA) on ballast for fluorescent lamp in Malaysia. In *2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment* (pp. 1-4). IEEE.

Hischier, R., Wäger, P., & Gauglhofer, J. (2005). Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective?: The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Environmental Impact Assessment Review*, 25(5), 525-539.

Mayers, C. K., France, C. M., & Cowell, S. J. (2005). Extended producer responsibility for waste electronics: An example of printer recycling in the United Kingdom. *Journal of Industrial Ecology*, 9(3), 169-189.

Kulczycka, J., Kowalski, Z., Smol, M., & Wirth, H. (2016). Evaluation of the recovery of Rare Earth Elements (REE) from phosphogypsum waste—case study of the WIZÓW Chemical Plant (Poland). *Journal of Cleaner Production*, 113, 345-354.

Adibi, N., Lafhaj, Z., Gemechu, E. D., Sonnemann, G., & Payet, J. (2014). Introducing a multi-criteria indicator to better evaluate impacts of rare earth materials production and consumption in life cycle assessment. *Journal of Rare Earths*, 32(3), 288-292.

Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 51, 1-22.

Sprecher, B., Xiao, Y., Walton, A., Speight, J., Harris, R., Kleijn, R., ... & Kramer, G. J. (2014). Life cycle inventory of the production of rare earths and the subsequent production of NdFeB rare earth permanent magnets. *Environmental science & technology*, 48(7), 3951-3958.

Boesch, M. E., Vadenbo, C., Saner, D., Huter, C., & Hellweg, S. (2014). An LCA model for waste incineration enhanced with new technologies for metal recovery and application to the case of Switzerland. *Waste management*, 34(2), 378-389.

Ueberschaar, M., & Rotter, V. S. (2015). Enabling the recycling of rare earth elements through product design and trend analyses of hard disk drives. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(2), 266-281.

EUROPEAN COMMISSION. (2013, August). Information security : Report on critical raw materials for the EU - Critical raw materials profiles. Retrieved from <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/11911/attachments/1/translations>

1st ReCreew Global Spring School (personal communication, February 6-10, 2017) informed me about Waste Electrical and Electronic Equipment

Xara Xatzizisi (personal communication, January-February, 2017) informed me about WEEE recycling in Greece

Κώπτης, Χ. Γ., & Πετράκη-Κώπτη, Α., (2010). *Σύγχρονη Μικροοικονομική*. Αθήνα : Μπένου Ε.

Eurostat – statistics explained (http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics_-_electrical_and_electronic_equipment)

The Global Source for Metals Pricing (<http://mineralprices.com/>)

Mining Intelligence and Technology (<http://www.infomine.com/>)

1st ReCreew Global Spring School (personal communication, February 6-10, 2017) informed me about Waste Electrical and Electronic Equipment

Xara Xatzizisi (personal communication, January-February, 2017) informed me about WEEE recycling in Greece