



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΜΕΣΟΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ:
ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΥΛΩΝ
ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ
ΖΩΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΙΚΗ Ι. ΣΤΕΡΓΙΟΥ

Πτυχιούχου Γεωλογίας Πανεπιστημίου Πατρών

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:

Κ. ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**ΜΕΣΟΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΕΝΩΣΕΙΣ:
ΥΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΡΙΣΙΜΩΝ ΥΛΩΝ
ΕΞΟΡΥΞΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ
ΖΩΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΙΚΗ Ι. ΣΤΕΡΓΙΟΥ

Πτυχιούχου Γεωλογίας Πανεπιστημίου Πατρών

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Κ. ΧΑΡΙΤΙΔΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2018

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Μεσομεταλλικές ενώσεις : Υποκατάσταση Κρίσιμων Υλών Εξόρυξης κι Ανάλυση Κύκλου Ζωής» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος «Επιστήμη και Τεχνολογία υλικών» της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στην Εργαστήριο Προηγμένων, Σύνθετων, Νανο υλικών και Νανοτεχνολογίας (R-Nano Lab).

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όσους βοήθησαν στη μεταπτυχιακή μου εργασία.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμότατα τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Χαριτίδη ο οποίος με εμπιστεύτηκε, πίστεψε στις ικανότητές μου και με καθοδήγησε με τη μεγάλη του εμπειρία. Επίσης η ανυπολόγιστη προσφορά των γνώσεων του κι η ηθική υποστήριξη του συνέβαλαν αναμφισβήτητα στην ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τους δύο μεταδιδακτορικούς ερευνητές, τον Δρ. Αθανάσιο Μοροζίνη και τον Δρ. Ιωάννη Ξιάρχο. Τους ευχαριστώ για το συνεχές κι έντονο ενδιαφέρον τους και για το ότι ήταν πάντα στο πλευρό μου σε όλη τη διάρκεια της εργασίας μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλη την ομάδα του R-Nano Lab για την εξαιρετική συνεργασία μας.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ θα ήθελα να το εκφράσω στους γονείς μου, Γιάννη κι Αγλαΐα και την αδερφή μου Σοφία που είναι πάντα δίπλα μου τόσο στις χαρές όσο και στις λύπες, που με στηρίζουν ακατάπαυστα σε όλες μου τις προσπάθειες και που με την αγάπη τους και τη βοήθεια τους συμβάλλουν στις επιτυχίες μου.

Αθήνα, 2018

Ανέβα, Ανέβα
Πάντα ανέβαινε ακόμη πιο ψηλά..
Στη κορφή σε περιμένει η αγάπη
μ' ένα μπουκέτο τριαντάφυλλα..

Ανέβα όλο μπρος όλο ψηλά..
Κι αν δε βρεις δρόμο φτιάξε..
Στην αγάπη
δεν υπάρχουν δρόμοι έτοιμοι,
τους φτιάχνεις εσύ..

Ανέβα έστω κι αν δεις
πως τα λουλούδια είναι ψεύτικα
κι η αγάπη -η ολόφλογη αγάπη-
ένας καπνός, εσύ ανέβα..

Ανέβα έστω κι αν στην κορφή
αντίς για τριαντάφυλλα
σε περιμένει ένα μπουκέτο μαχαίρια,
εσύ ανέβα..

Ανέβα και πες "ευχαριστώ"
όχι στα τριαντάφυλλα, όχι στα μαχαίρια..
Πες ευχαριστώ στη δύναμη,
που σ' έκανε ν' ανέβεις...

M.ΛΟΥΝΤΕΜΗΣ

Μα πάντα ανέβαινε ακόμη πιο ψηλά...

Αφιερώνεται στους γονείς μου

και την αδερφή μου

που είναι πάντα δίπλα μου

Περιεχόμενα :

Κατάλογος πινάκων.....	7
Κατάλογος σχημάτων	8
Κατάλογος διαγραμμάτων.....	10
Περίληψη.....	11
Abstract.....	13
Εισαγωγή.....	15
<u>Κεφάλαιο 1^ο : Ανάλυση Κύκλου Ζωής (AKZ)</u>	18
1.1.Εισαγωγή στην AKZ.....	18
1.2. Ορισμός στόχου και συστήματος.....	22
1.2.1. Στόχος μελέτης.....	22
1.2.2. Πεδίο εφαρμογής.....	23
1.2.3. Λειτουργία συστήματος.....	24
1.2.4. Λειτουργική μονάδα.....	25
1.2.5. Ορισμός συστήματος.....	26
1.2.6. Όρια συστήματος.....	29
1.3. Ανάλυση αποθέματος.....	30
1.4. Εκτίμηση αντίκτυπου.....	34
1.5. Ερμηνεία αποτελεσμάτων.....	40
1.6. Λογισμικό AKZ.....	42
1.6.1. SimaPro 8.3.....	42
1.6.2. Βάση δεδομένων αποθέματος.....	42
1.6.3. Μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων.....	43

<u>Κεφάλαιο 2^ο : Ανάλυση Κύκλου Ζωής σε Μεσομεταλλικές ενώσεις και Κρίσιμες πρώτες ύλες.....</u>	45
2.1. Εισαγωγή στις Μεσομεταλλικές ενώσεις.....	45
2.1.1. Ανάλυση Κύκλου Ζωής σε Μεσομεταλλικές ενώσεις.....	46
2.2. Εισαγωγή στις Κρίσιμες πρώτες ύλες.....	50
2.2.1. Ανάλυση Κύκλου Ζωής σε Κρίσιμες πρώτες ύλες.....	53
<u>Κεφάλαιο 3^ο : Αποτελέσματα διεργασιών που μελετήθηκαν.....</u>	59
3.1. Εισαγωγή.....	59
3.2. 1 ^η Διεργασία.....	60
3.3. 2 ^η Διεργασία.....	63
3.4. 3 ^η Διεργασία.....	66
3.5. 4 ^η Διεργασία.....	69
<u>Κεφάλαιο 4^ο : Συμπεράσματα – Προτάσεις για το μέλλον.....</u>	73
4.1. Συμπεράσματα ΑΚΖ των διεργασιών που μελετήθηκαν – Προτάσεις για το μέλλον.....	73
Αναφορές.....	75
Παράρτημα.....	78

Κατάλογος Πινάκων:

Πίνακας 1.1 : Μη ανανεώσιμη πρωτογενής ενέργεια (Nonrenewable Primary Energy), ποσότητα CO₂ ανά μονάδα μάζας και λόγος gco₂/MJ για διαφορετικούς τύπους ενέργειας,φορείς κι υλικά

Πίνακας 1.2 : Κύριες κατηγορίες επιπτώσεων, παράγοντες χαρακτηρισμού που σχετίζονται με ζημιές στην ανθρώπινη υγεία (Human Health) (HH), την ποιότητα του οικοσυστήματος (Ecosystem Quality) (EQ) και τις υπηρεσίες και τους πόρους των οικοσυστημάτων(Ecosystem Resources) (ER)

Πίνακας 2.1 : Διαδικασίες και πρώτες ύλες που περιλαμβάνονται στη μελέτη ΑΚΖ. Συγκεκριμένα στον πίνακα παρουσιάζονται οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του ανοξειδωτού χάλυβα, τα αντίστοιχα ποσοστά (%) αυτών των πρώτων υλών καθώς κι οι διαδικασίες που παίρνουν μέρος

Πίνακας 2.2 : Στοιχεία απογραφής για την παραγωγή σιδηροχρωμίου

Πίνακας 2.3 : Στοιχεία απογραφής για την παραγωγή σιδηρονικελίου

Πίνακας 2.4 : Στοιχεία απογραφής για την παραγωγή ανοξειδωτού χάλυβα

Πίνακας 2.5 : Αποτελέσματα ΑΚΖ για παραγωγή ανοξειδωτού χάλυβα

Πίνακας 2.6 : Κατάλογος Κρίσιμων Πρώτων Υλών

Πίνακας 2.7 : Αποτελέσματα ΑΚΖ για 1 kg REO

Πίνακας 2.8 : Αποτελέσματα ΑΚΖ γιατην παραγωγή 1 kg NdFeB

Πίνακας 2.9 : Αποτελέσματα ΑΚΖ των τριών σεναρίων. [A1]Σενάριο υψηλής τεχνολογίας για την παραγωγή μαγνητών NdFeB (high-tech,primary, NdFeB,[A2] Βασικό σενάριο πρωτεγενούς παραγωγής μαγνητών NdFeB (baseline, primary, NdFeB magnet), [A3] Σενάριο χαμηλής τεχνολογίας για την παραγωγή μαγνητών NdFeB (low-tech, primary, NdFeB magnet)

Πίνακας 3.1 : Δεδομένα που συλλέχθηκαν για το στάδιο της ανάλυσης του αποθέματος

Πίνακας 3.2 : Δεδομένα που συλλέχθηκαν για το στάδιο της ανάλυσης του αποθέματος

Πίνακας 3.3 : Δεδομένα που συλλέχθηκαν για το στάδιο της ανάλυσης του αποθέματος

Πίνακας 3.4 : Δεδομένα που συλλέχθηκαν για το στάδιο της ανάλυσης του αποθέματος

Κατάλογος σχημάτων :

Σχήμα 1.1 : Σχηματική απεικόνιση ενός γενικού κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Παρουσιάζονται όλα τα στάδια ζωής ενός προϊόντος τα οποία είναι : Σχεδιασμός/Ανάπτυξη (Design/Development), Παραγωγή (Production), Χρήση και Ικανοποίηση αναγκών (Use/Fulfillment of needs), Συλλογή/Διάθεση (Collection/Sorting), Επαναχρησιμοποίηση/Ανακύκλωση (Reuse/Recycling), Επεξεργασία Αποβλήτων (Waste treatment) και Ταφή/Τελική Διάθεση (Landfil/Final Disposal)

Σχήμα 1.2 : Απογραφή Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory) (LCI), ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων (Midpoint categories) και κατηγορίες γενικών ή τελικών ζημιών (Endpoint categories)

Σχήμα 1.3 : Δομικά στοιχεία, φάσεις και εφαρμογές της LCA (βάσει του προτύπου ISO 14040: 2006)

Σχήμα 1.4 : Σχέσεις και ανταλλαγές μεταξύ ενός συστήματος μελέτης, του οικονομικού κόσμου και του περιβάλλοντος. Ορίζεται και το όριο του συστήματος (System boundary) μεταξύ οικονομίας και περιβάλλοντος

Σχήμα 1.5 : Παράδειγμα μιας σειράς διεργασιών σε ένα σύστημα. Δεδομένα στοιχειωδών ροών που εισέρχονται στο σύστημα μελέτης μιας διαδικασίας (input elementary flows) , όπως εξορύξεις πρώτων υλών από το περιβάλλον (extraction from the environment) τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της διαδικασίας (unit process). Μετά το τέλος της διαδικασίας εξέρχονται από το σύστημα στοιχειώδεις ροές (exiting elementary flows) όπως εκπομπές προς το περιβάλλον (emissions to the environment) (ISO:14040)

Σχήμα 1.6 : Δεδομένα που σχετίζονται με την παραγωγή υγρού πρωτογενούς αλουμινίου στο εργοστάσιο. Οι στοιχειώδεις ροές από και προς το περιβάλλον παρουσιάζονται με πλάγιους χαρακτήρες. Για παράδειγμα ροές από το περιβάλλον είναι το Aluminium oxide και ροές προς το περιβάλλον το Hydrogen fluoride

Σχήμα 1.7 : Διάγραμμα ροής. Απεικόνιση της συνολικής ροής για την παραγωγή υγρού πρωτογενούς αλουμινίου σε εργοστάσιο. Περιλαμβάνονται αναλυτικά όλα τα στάδια παραγωγής καθώς και οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, οι οποίες φαίνονται με τα βέλη

Σχήμα 1.8 : Γενική δομή του πλαισίου της μεθόδου IMPACT 2002+ για την αξιολόγηση των επιπτώσεων. Παρουσιάζεται η Απογραφή Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory) (LCI), οι ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων (Midpoint

categories) κι οι κατηγορίες γενικών ή τελικών ζημιών (Endpoint categories). Τα διακεκομμένα βέλη αντιπροσωπεύουν τη μετάβαση από τις Midpoint στις Endpoint categories. Κάποιες Midpoint categories αντιστοιχούν σε περισσότερες από μία Endpoint

Σχήμα 2.1 : Σχηματική απεικόνιση της παραγωγής ανοξειδωτου χάλυβα.

Παρουσιάζονται τόσο οι πρώτες ύλες που είναι απαραίτητες για την παραγωγή του ανοξειδωτου χάλυβα όπως ο ακατέργαστος Fe (Pig iron) όσο κι οι αναγκαίες διεργασίες όπως η συνεχής χύτευση (Continuous casting)

Σχήμα 2.2 : Η οικονομική σημασία κι ο κίνδυνος εφοδιασμού προκύπτουν από την εκτίμηση κρισιμότητας. Οι κρίσιμες πρώτες ύλες βρίσκονται εντός της ζώνης κρισιμότητας του γραφήματος, που παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία αντιπροσωπεύουν τις μη κρίσιμες πρώτες ύλες . Συγκεκριμένα οι κρίσιμες πρώτες ύλες καταλαμβάνουν το ροζ κομμάτι ενώ οι μη κρίσιμες το πορτοκαλί

Κατάλογος διαγραμμάτων :

Διάγραμμα 2.1 : Εισροές κι απώλειες Nd κατά μήκος της πρωτογενούς αλυσίδας παραγωγής εκφρασμένες σε kg. Συγκεκριμένα οι εισροές κι οι απώλειες αφορούν όλα να στάδια παραγωγής ενός μαγνήτη Nd, όπως για παράδειγμα το στάδιο εκχύλης με διαλύτη (solvent extraction) και της ηλεκτρόλυσης του οξειδίου του Nd (Nd-oxide electrolysis)

Διάγραμμα 2.2 : Εισροές κι απώλειες Nd κατά μήκος της αλυσίδας ανακύκλωσης μέσω τεμαχισμού εκφρασμένες σε kg

Διάγραμμα 3.1 : Ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων για την παραγωγή δίσκων φρένων

Διάγραμμα 3.2 : Κατηγορίες τελικών ζημιών για την παραγωγή δίσκων φρένων

Διάγραμμα 3.3 : Ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων για την παραγωγή προμορφομάτων μέσω της διεργασίας SLM

Διάγραμμα 3.4 : Κατηγορίες τελικών ζημιών για την παραγωγή προμορφομάτων μέσω της διεργασίας SLM

Διάγραμμα 3.5 : Ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων για την προετοιμασία μεταλλογραφικών δειγμάτων

Διάγραμμα 3.6 : Κατηγορίες τελικών ζημιών για την προετοιμασία μεταλλογραφικών δειγμάτων

Διάγραμμα 3.7 : Ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων για τη μηχανική κατεργασία μεσομεταλλικών ενώσεων Fe_3Al με εργαλεία σκληρών μετάλλων

Διάγραμμα 3.8 : Κατηγορίες τελικών ζημιών για τη μηχανική κατεργασία μεσομεταλλικών ενώσεων Fe_3Al με εργαλεία σκληρών μετάλλων

Περίληψη

Οι τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος της “κρίσιμότητας των πόρων” είναι άμεσα συνδεδεμένοι με τις συνεχιζόμενες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των υλικών. Πιο συγκεκριμένα, η βιωσιμότητά τους απαιτεί τη χρήση μεθόδων κι εργαλείων για την αξιολόγηση, τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι μέθοδοι και τα εργαλεία αυτά, θα βοηθήσουν στη σχεδίαση κι υιοθέτηση πολιτικών, που θα ενσωματώνουν οικονομολογικά κι οικολογικά στοιχεία, για την ενδεδειγμένη αντιμετώπιση του προβλήματος της “κρίσιμότητας των πόρων”. Υπάρχει σαφής ανάγκη για την παροχή πρόσθετων γνώσεων πέρα από τα καθιερωμένα πρωτόκολλα κι εργαλεία. Η Αξιολόγηση του Κύκλου Ζωής (AKZ) έχει αναπτυχθεί ως μια μεθοδολογία που αξιολογεί συστηματικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με όλα τα στάδια της ζωής ενός υλικού. Αναλύει την αλληλεπίδραση μεταξύ του προϊόντος (ή της υπηρεσίας) και του περιβάλλοντος, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις διαδικασίες, δηλαδή από την εξόρυξη πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του μέχρι την τελική διάθεσή του με την εξάντληση του ωφέλιμου χρόνου ζωής του, με τελικό στόχο τον ποσοτικό προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Με αυτόν τον τρόπο, η AKZ επιτρέπει να επισημανθούν τυχόν αδυναμίες της παραγωγικής διαδικασίας, όπως τεχνικές που χαρακτηρίζονται από έντονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις ή τη χρήση εξοπλισμού υψηλής κατανάλωσης ενέργειας. Επομένως, επιτρέπει στους χρήστες να αξιολογήσουν και να προσδιορίσουν τις εναλλακτικές λύσεις για τη βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Επιπλέον, η AKZ προτάσσει τη χρήση της έννοιας του κύκλου ζωής στη χάραξη πολιτικής για τον προσδιορισμό των βασικών πτυχών της υποστήριξης των αποφάσεων για τα αναδυόμενα υλικά και τη διαχείριση της συναπτόμενης αβεβαιότητας. Επίσης η AKZ μπορεί να παίξει καθοριστικό ρόλο στη βιομηχανία ως μηχανισμός υποστήριξης αποφάσεων για την παραγωγή και χρήση νέων υλικών. Ωστόσο, προκειμένου να επιτευχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα με την εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας, απαιτείται ένας μεγάλος αριθμός (πρωτογενών ή δευτερογενών) δεδομένων. Η συγκέντρωσή τους δεν είναι πάντοτε δυνατό να επιτευχθεί. Για το λόγο αυτό, μερικές φορές, για να απλουστευθεί η πολυπλοκότητα της ανάλυσης, πρέπει να γίνουν κάποιες υποθέσεις, οι οποίες επιτυγχάνουν τη διατήρηση μιας καλής ισορροπίας μεταξύ του επιπέδου της εφικτής ακρίβειας και του βαθμού υποκειμενικότητας της ανάλυσης.

Σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία, η AKZ εφαρμόστηκε σε μία πρωτοποριακή διαδικασία για την κατασκευή συμπλοκοποιημένων μεσομεταλλικών τμημάτων Σιδήρου-Αλουμινίου (Fe-Al) ανθεκτικών σε ακραία περιβάλλοντα. Ο ρόλος της AKZ είναι ιδιαίτερα σημαντικός, δεδομένου ότι οι προτεινόμενες μεσομεταλλικές ενώσεις είναι υποψήφιοι αντικαταστάτες του ανοξειδωτού χάλυβα, σε συγκεκριμένες εφαρμογές, παρέχοντας λύση στο πρόβλημα κρίσιμων πρώτων υλών : του Χρωμίου (Cr) και του Νικελίου (Ni). Ως εκ τούτου, οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις κι επιπτώσεις, καθώς κι η εφαρμογή εναλλακτικών λύσεων για την ελαχιστοποίησή τους, θα κρίνουν μαζί με άλλα κριτήρια (οικονομικά, κοινωνικά, πολιτικά)

εάν μια τέτοια καινοτόμος, από τεχνική άποψη, προσέγγιση είναι επίσης εφαρμόσιμη και βιώσιμη σε μεγάλη κλίμακα.

Στόχος της μεταπτυχιακής εργασίας είναι να επισημάνει τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τους περιορισμούς της διαδικασίας AKZ με την εφαρμογή της, από το “λίκνο εως τον τάφο” (“cradle to grave”), σε μια μελέτη μιας καινοτόμου διεργασίας, να αποδώσει πλήρως το περιβαλλοντικό κι ενεργειακό αποτύπωμα αυτής καθώς και να προτείνει εναλλακτικές λύσεις για την ελαχιστοποίηση των επιβαρύνσεων που αυτή επιφέρει. Επιπρόσθετα, να διερευνήσει λύσεις για την αντικατάσταση των Κρίσιμων Πρώτων Υλών (Critical Raw Materials) (CRMs) όπως το Cr, το Ni, το Μολυβδαίνιο (Mo) και το Βανάδιο (V) σε προϊόντα υψηλής κατανάλωσης μέσω των μεσομεταλλικών ενώσεων λόγω του πλεονεκτήματος που φέρουν, αυτό της ανακύκλωσης. Επιπρόσθετα, η εργασία αυτή δίνει έναυσμα προς επιστημονικό διάλογο σχετικά με τις συνέπειες της υψηλής κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας και των ορυκτών πόρων, θέτοντας ως επιτακτική ανάγκη την στροφή προς τη χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας.

Το λογισμικό που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή της μελέτης ήταν το SimaPro 8.3, λόγω της ευελιξίας και της ευρείας διαφορετικών επιλογών – λειτουργιών που προσφέρει. Τέλος, η «βιβλιοθήκη» Ecoinvent v3.3 χρησιμοποιήθηκε ως βάση δεδομένων αναφοράς επειδή είναι μια πλήρης κι ευπροσάρμοστη βάση δεδομένων συσχετιζομένων με τον κύκλο ζωής κι ο αλγόριθμος IMPACT 2002+ ως μέθοδος εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Abstract

Management and mitigation measures for the problem of critical resources are directly connected with ongoing technological developments in the field of materials. More specifically, their sustainability requires the establishment of methods for the evaluation of environmental impacts. These methods and tools will assist in the formulation and adoption of policies, which will incorporate economic and ecological aspects for the proper management of resources' criticality. There is a clear need for additional knowledge beyond existing standards and tools. For that reason, Life Cycle Analysis (LCA) has been developed which systematically and thoroughly evaluates the entire life cycle of a product.

LCA is a highly efficient method which is used to examine and evaluate the environmental "performance" of products/services/processes during their entire life cycle. LCA analyzes the interaction between the product and the environment, taking into account the involved processes, from raw materials extraction up to final disposal, aiming to quantify the environmental impacts. In this way, LCA allows for the identification of any weak points in the production process, such as techniques that have a strong environmental impact or use of energy-intensive equipment. Consequently, LCA provide experts with the necessary information to evaluate and identify alternatives to optimize the production's process in relation to environmental and financial variables.

In addition, LCA introduce the use of life-cycle thinking in policy-making for the determination of the key aspects of decision support for the new innovative materials and the management of inherent uncertainties. Also, it can play a key – role as support mechanism to decision making for industry in the area of new innovative materials. However, a large number of (primary or secondary) data is required in order to achieve accurate results by applying this methodology. Their gathering is not always feasible in a timely way. Thus, sometimes, in order to simplify the complexity of LCA's analysis, some assumptions need to be made, which maintain a good balance between accuracy and subjectivity of the analysis.

In the current Master thesis, LCA has been applied to a highly pioneering process for the production of (Fe- Al) intermettalic compounds possessing high resistance to extreme environments. The role of LCA is extremely important, considering that the aforementioned intermetallics are potential candidates for the substitution of stainless steel, in certain applications, providing an alternative solution to the problem of Chromium (Cr) and Nickel (Ni) as critical materials. Hence, environmental impacts and other criteria (political, sociological, financial), will turn the tide in favor of or against the implementation of this innovative approach on large scale.

In this context, the aim of the current Master thesis is to point out both the advantages and limitations of the LCA s through its application in a real study of an innovative material production process. The final goal is to fully clarify its environmental and energy footprint and to propose alternatives in order to minimize impacts. Moreover, one of the main goals of the

present work is to find solutions for the substitution of Critical Raw Materials such as Cr, Ni, Mo and V in high- consumption products via the intermetallic compounds due to their advantage of recyclability. Additionally, this Master thesis gives rise to a scientific debate on the consequences of high consumption of electricity and mineral resources, highlighting a compelling need for the use of alternative forms of energy.

The software chosen in the present study was SimaPro 8.3 due to its versatility and wide variety of functionalities. Finally, Ecoinvent v3.3 was used as a reliable reference database for life cycle inventory (LCI) and IMPACT 2002+ as an impact assessment method.

Εισαγωγή

Η περιβαλλοντική βιωσιμότητα κι η τεχνολογική ανάπτυξη των υλικών αναμφισβήτητα είναι ζητήματα με ανοιχτές προκλήσεις. Ταυτόχρονα, λόγω της αυξανόμενης τεχνολογικής προόδου με την συνεχή είσοδο νέων υλικών που μετασχηματίζουν την καθημερινή ζωή με κοινωνικοοικονομικά οφέλη, έχει δημιουργηθεί η ανάγκη προσδιορισμού των επιπτώσεων που επιφέρουν τα υλικά αυτά. Δηλαδή υπάρχει άμεση ανάγκη αξιολόγησης της ασφάλειας των υλικών και της κρισιμότητας των πόρων.

Η αυξημένη προσοχή στην ανάγκη να επιδιωχθεί η βιώσιμη ανάπτυξη οδήγησε στη δημιουργία κι ανάπτυξη προτύπων, πρωτοβουλιών, μεθοδολογιών κι εργαλείων. Μεταξύ των διαφόρων θεσμικών πρωτοβουλιών που αναλαμβάνει η Ευρωπαϊκή Ένωση, οι σημαντικότερες από αυτές ενθαρρύνουν την εμπορευματοποίηση αυτών των προϊόντων κι υπηρεσιών που παρουσιάζουν το χαμηλότερο “αποτύπωμα” (footprint) ενεργειακής κατανάλωσης και περιβαλλοντικής ρύπανσης καθ’ όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Στην πραγματικότητα, δεδομένου ότι όλα τα προϊόντα κι οι υπηρεσίες παράγουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους (παραγωγή, χρήση, διάθεση κ.λπ.), η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει μεταξύ άλλων στόχων και τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων των προϊόντων κι υπηρεσιών. Στο πλαίσιο αυτό, ένα από τα κύρια εργαλεία αξιολόγησης και ποσοτικοποίησης των δυνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων και των υπηρεσιών αντιπροσωπεύεται από την AKZ. Η AKZ επιτρέπει την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων προϊόντων, διαδικασιών κι οργανισμών, αρχίζοντας από την απόκτηση πρώτων υλών για την κατασκευή και τη χρήση, έως την διεργασία της ανακύκλωσης στο τέλος της ζωής και της τελικής απόρριψης.

Λόγω των υψηλών αβεβαιοτήτων, η ερμηνεία της AKZ πρέπει να περιλαμβάνει την αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων, τις παραδοχές των μοντέλων και τους περιορισμούς των τρεχουσών μεθόδων αξιολόγησης. Πρέπει επίσης να επιτρέψει τη συγκριτική αξιολόγηση των υποκατάστατων ή νέων υλικών με τα υπάρχοντα. Αυτές οι πτυχές συχνά δεν αναλύονται επαρκώς στις μελέτες AKZ και χρειάζεται περισσότερη προσπάθεια για την ανάπτυξη βέλτιστων στρατηγικών για την αντιμετώπιση των αβεβαιοτήτων. [8], [23] Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό για να εξασφαλιστεί ότι η λήψη αποφάσεων σχετικά με τα αναδυόμενα υλικά επιτυγχάνει τη σωστή ισορροπία μεταξύ κινδύνου για το περιβάλλον ή την ανθρώπινη υγεία και του κόστους για τη βιομηχανία και την κοινωνία. Αυτό σημαίνει ότι τα σχετικά οφέλη και το κόστος της δράσης πρέπει να αντιμετωπιστούν με ορθό τρόπο.

Οι πρώτες ύλες αποτελούν τη βάση για τη σύνθεση και την παραγωγή του μεγάλου αριθμού προϊόντων κι εφαρμογών που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή. Η τεχνολογική καινοτομία και η ταχεία ανάπτυξη των ανερχόμενων οικονομιών έχουν οδηγήσει στη δημιουργία ενός καταλόγου Κρίσιμων Πρώτων Υλών (Critical Raw Materials) (CRMs) σε ευρωπαϊκό επίπεδο, προκειμένου να διασφαλιστεί η αδιάλειπτη λειτουργία της ευρωπαϊκής βιομηχανίας. Εντούτοις, υπάρχει ανησυχία για τις κρίσιμες πρώτες ύλες, γι αυτό πολλές εναλλακτικές λύσεις εξετάζονται για την αντικατάστασή τους. Η αντικατάσταση μπορεί να γίνει

από κράματα, υπερκρματικά υλικά και μεσομεταλλικές ενώσεις που περιέχουν Cr, Ni, Al, Fe, Mo και V. [4] Τα μεσομεταλλικά μπορεί να είναι μια πολλά υποσχόμενη επιλογή υλικών για την αντικατάσταση κραμάτων που περιέχουν CRMs (όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας). Αυτό είναι σύμφωνο με το ευρωπαϊκό σχέδιο επιστημονικής και στρατηγικής εφαρμογής με σκοπό τη διασφάλιση της βιώσιμης προσφοράς και της ασφαλούς κι ισχυρής εδραίωσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης στον τομέα των υλικών. [9], [17]

Τα μεσομεταλλικά κράματα με βάση Fe-Al δεν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Παρά το γεγονός ότι έχουν ανώτερη αντοχή σε διάβρωση, χαμηλότερη πυκνότητα κι υψηλότερη σκληρότητα και σημείο τήξης, σε σχέση με τον ανοξείδωτο χάλυβα, είναι σχετικά εύθραυστα σε ενδιάμεσες και χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ έχουν κακή μηχανική κατεργασία. Η έντονη μελέτη των μεσομεταλλικών κραμάτων στις δεκαετίες του '50 και του '60 δεν κατόρθωσε να λύσει τις προαναφερθείσες ανεπάρκειες. Επί του παρόντος, μελετάται εντατικά μια νέα μέθοδος παραγωγής, στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου με τον τίτλο EQUINOX που χρηματοδοτείται στα πλαίσια του προγράμματος της Ευρωπαϊκής Ένωσης "Ορίζοντας 2020" (Horizon 2020). Η προσέγγιση αυτού του ερευνητικού έργου βασίζεται στον έλεγχο της μικροδομής των μεσομεταλλικών κραμάτων. Πιο συγκεκριμένα, στην βελτίωση των κόκκων των τελικών προϊόντων, πράγμα που θα προσφέρει αυξημένη ολκιμότητα και βελτιωμένη μηχανική ικανότητα στα νέα υλικά.

Ανταποκρινόμενοι σε αυτά τα κρίσιμα ζητήματα, η AKZ συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας της τεχνολογικής αξιολόγησης, προσδιορίζοντας κι υπολογίζοντας τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επίσης η AKZ είναι μια μέθοδος που αξιολογεί και συγκρίνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος. Σκοπός της AKZ είναι να εντοπίσει αρχικά όλες τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να τις ελαχιστοποιήσει προτείνοντας εναλλακτικές λύσεις. Επιπλέον, με την εφαρμογή της διεθνώς τυποποιημένης μεθοδολογίας AKZ, ενισχύεται η ανταγωνιστικότητα όλων των τομέων, οδηγώντας σε ριζική καινοτομία στον κόσμο των υλικών, με την αλληλεπίδραση των επιχειρήσεων, της βιομηχανίας, της εκπαίδευσης και της έρευνας. [9] Επιπροσθέτως, δίνει τη δυνατότητα στα μεσομεταλλικά κράματα να δράσουν ως υποκατάστατα και να βοηθήσουν στην αειφόρο οικονομική παραγωγή και τη διατήρηση των περιβαλλοντικών ισορροπιών. Με τον τρόπο αυτό, μέσω του εργαλείου AKZ, επιτυγχάνεται τελικά η πλήρης περιγραφή ενός προϊόντος συνοδευόμενη από ένα λεπτομερές αρχείο των πόρων που διατίθενται για την προμήθεια αγαθών κι υπηρεσιών καθώς και το ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα της συνολικής διαδικασίας παραγωγής. [17]

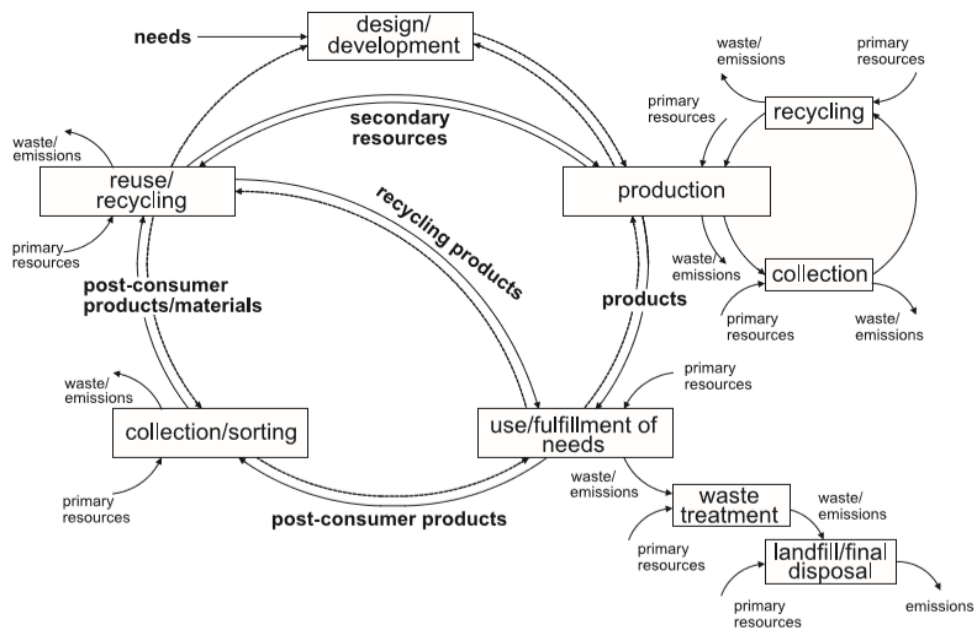
Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μέσω της μεθοδολογίας AKZ κι ειδικότερα με τη χρήση του λογισμικού SimaPro και συγκεκριμένα του αλγορίθμου IMPACT 2002+ [23], πέρα από την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, επιτυγχάνεται η υποκατάσταση των CRMs από τα μεσομεταλλικά κράματα. Συμβάλλοντας έτσι στην οικονομία χρήσης των CRMs, ιδιαιτέρως σε περιπτώσεις διεργασιών ακραίων συνθηκών, δεδομένου ότι οι μεσομεταλλικές ενώσεις Fe-Al παρέχουν βελτιωμένες ιδιότητες κι ένα καλύτερο ενεργειακό προφίλ.

Συμπερασματικά, όλες αυτές οι δράσεις ενσωματώνουν τον στρατηγικό ρόλο του εργαλείου AKZ του οποίου τα αποτελέσματα κι η ανάλυση είναι σημαντικά για τη λήψη αποφάσεων σε βιομηχανικό, οικονομικό και πολιτικό επίπεδο. Τέλος, μια πρόσθετη ένδειξη της αναγκαιότητας της AKZ είναι η άμεση σχέση με την εκτίμηση κινδύνου καθώς και την ορθή διαχείρισή τους.

Κεφάλαιο 1^ο: Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ)

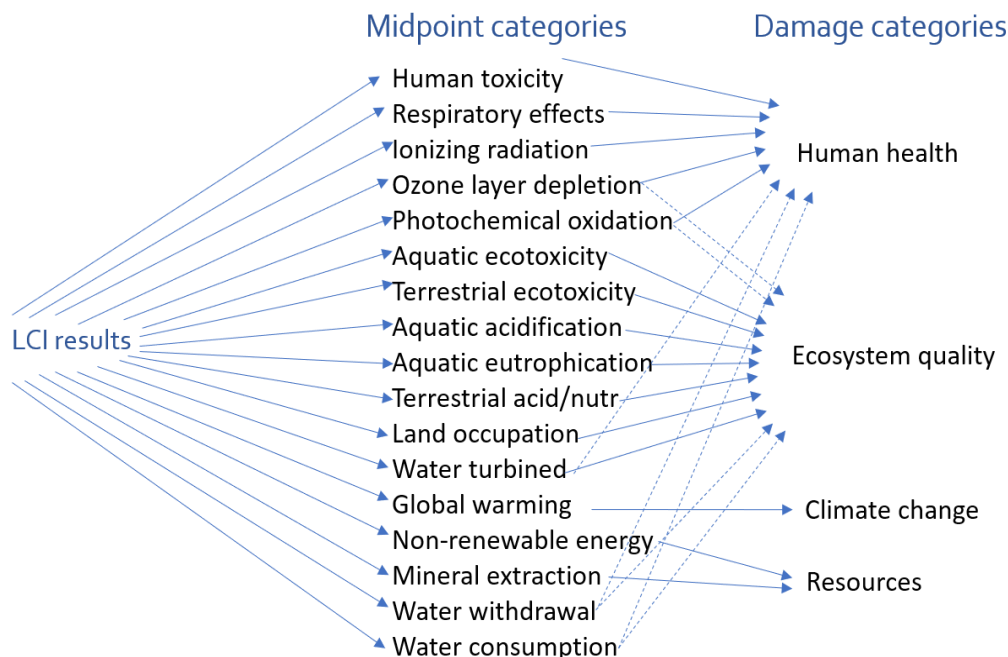
1.1. Εισαγωγή στην ΑΚΖ

Η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής, που γενικά ορίζεται με το ακρωνύμιο ΑΚΖ, είναι μία ισχυρή μεθοδολογία που μπορεί να εφαρμοστεί όχι μόνο για τη σύγκριση δύο ή περισσότερων ανταγωνιστικών συστημάτων αλλά και για τη βελτιστοποίηση ενός υπάρχοντος συστήματος. Η ΑΚΖ έχει αναπτυχθεί ως επιστημονική τεχνική που αξιολογεί συστηματικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος (ή υπηρεσίας).



Σχήμα 1.1 : Σχηματική απεικόνιση του γενικού κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Παρουσιάζονται όλα τα στάδια ζωής ενός προϊόντος τα οποία είναι : Σχεδιασμός/Ανάπτυξη (Design/Development), Παραγωγή (Production), Χρήση κι Ικανοποίηση αναγκών (Use/Fulfillment of needs), Συλλογή/Διάθεση (Collection/Sorting), Επαναχρησιμοποίηση/Ανακύκλωση (Reuse/Recycling), Επεξεργασία Αποβλήτων (Waste treatment) και Ταφή/Τελική Διάθεση (Landfil/Final Disposal) [1]

Ειδικότερα, τα στάδια του κύκλου ζωής είναι η εξόρυξη πρώτων υλών, η επεξεργασία, η διανομή, η χρήση, η διάθεση, η μεταφορά κι η ανακύκλωση (Σχήμα 1.1). Οι πολυάριθμες επιπτώσεις που εμφανίζονται σε αυτά τα στάδια περιλαμβάνουν τις εκπομπές στο περιβάλλον, την κατανάλωση πόρων κι άλλες επιβαρύνσεις που πραγματοποιούνται καθ'όλη τη διάρκεια των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στα στάδια του κύκλου ζωής. [1] Όλα τα φορτία που διαδραματίζουν ξεχωριστό ρόλο συμβάλλουν σε ένα ευρύ φάσμα Ενδιάμεσων (Midpoint categories) κατηγοριών καθώς και σε κατηγορίες Γενικών ή Τελικών ζημιών-βλαβών (General Damage/ Endpoint categories) [1], [8], [12], [22] (Σχήμα 1.2) .



Σχήμα 1.2 : Απογραφή Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory) (LCI), ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων (Midpoint categories) και κατηγορίες γενικών ή τελικών ζημιών (Endpoint categories)

Εφόσον οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις καλύπτουν πολλές διαφορετικές μορφές συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών επικίνδυνων ουσιών, της εξόρυξης των πρώτων υλών και της χρήσης γης, το «προϊόν» μπορεί να περιλαμβάνει υπηρεσίες καθώς και φυσικά αγαθά.

Η μεθοδολογία της ΑΚΖ έχει αναπτυχθεί με την πάροδο του χρόνου. [12], [23] Το 1990, υπό την αιγίδα της Εταιρείας Τοξικολογίας και Περιβαλλοντικής Χημείας (UNEP / SETAC 2011), η ΑΚΖ εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε μια σειρά εργαστηρίων της Pellston. Παρόλο που άλλες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν νωρίτερα με διαφορετικές μορφές, κατά τη διάρκεια αυτού του εγχειρήματος συντάχθηκε το έγγραφο που συνθέτει το όνομα της μεθόδου. Το αρχικό πλαίσιο της ΑΚΖ απαρτιζόταν μόνο από τρία στάδια (ο ορισμός της φάσης στόχου έλειπε). Αυτή η παράλειψη διορθώθηκε το 1993 σε συνέδριο της SETAC, που πραγματοποιήθηκε στην Sesimbra της Πορτογαλίας, όπου εισήχθη μια νέα συνιστώσα που ονομάζεται "Ορισμός σκοπού-επιδίωξης και πεδίου εφαρμογής" για να απεικονίσει τη διασύνδεση των φάσεων.

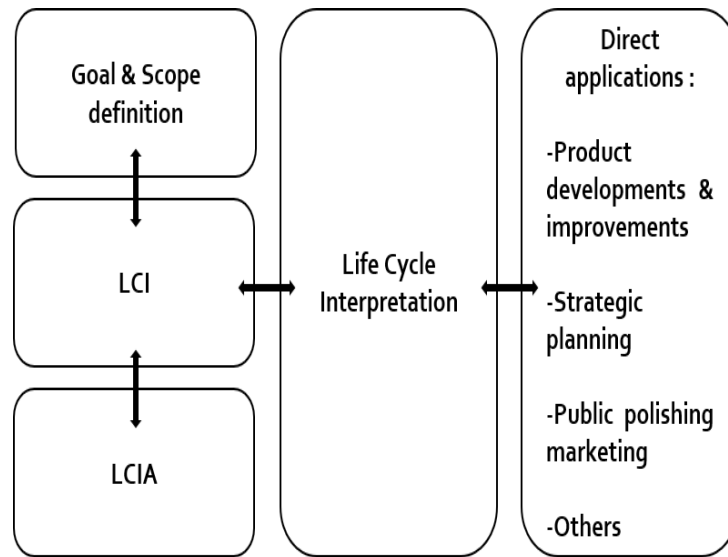
Πράγματι, ο ορισμός του στόχου-επιδίωξης και του πεδίου εφαρμογής δεν είναι απλώς μια απλή εισαγωγή στην ΑΚΖ, αλλά είναι ένα ουσιαστικό κι αναπόσπαστο μέρος αυτής της ανάλυσης αφού συνδέει όλες τις άλλες φάσεις.

Σήμερα η δομή της μεθοδολογίας ΑΚΖ έχει καθιερωθεί με το Διεθνές Πρότυπο 14040 (ISO 2006b) και 14044 (ISO 2006a).[20], [21], [23] Αυτό περιλαμβάνει:

- ISO 14040: Πρότυπο για τις αρχές και το πλαίσιο
- ISO 14044: Απαιτήσεις και κατευθυντήριες γραμμές

- ISO 14047: Επεξηγηματικά παραδείγματα σχετικά με τον τρόπο εφαρμογής του ISO 14044 στις καταστάσεις αξιολόγησης αντικτύπου
- ISO 14049: Επεξηγηματικά παραδείγματα σχετικά με τον τρόπο εφαρμογής του ISO 14044 στον ορισμό του στόχου και της εμβέλειας και στην ανάλυση απογραφής

Επιπλέον η AKZ χωρίζεται σε τέσσερις φάσεις (Σχήμα 1.3), [1], [18], [12], [23] οι οποίες παρατίθενται με περισσότερες λεπτομέρειες στις ακόλουθες παραγράφους:



Σχήμα 1.3 : Δομικά στοιχεία, φάσεις κι εφαρμογές της LCA (βάσει του προτύπου ISO 14040: 2006)

1. Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής της μελέτης (**Goal & Scope Definition**) (συμπεριλαμβανομένης της επιλογής μιας λειτουργικής μονάδας)
2. Ανάλυση αποθέματος (**Life Cycle Inventory**) (**LCI**) - σύνταξη καταλόγου των σχετικών ενεργειακών κι υλικών εισροών και περιβαλλοντικών εκλύσεων
3. Εκτίμηση αντικτύπου (**Life Cycle Impact Assessment**) (**LCIA**) - αξιολόγηση των πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με προσδιορισμένες εισροές κι εκροές
4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (**Life Cycle Interpretation**)

Η AKZ μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην περιβαλλοντική διαχείριση των προϊόντων. [12] Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

- Σύγκριση δύο υπαρχόντων προϊόντων
- Αξιολόγηση της αλυσίδας εφοδιασμού και πράσινων προμήθειων
- Σχέδια οικολογικής σήμανσης. Ένας αυξανόμενος αριθμός σχεδίων περιβαλλοντικής σήμανσης της ΕΕ χρησιμοποιεί πλέον την AKZ
- Οικολογικός σχεδιασμός. Η AKZ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των επιλογών σχεδιασμού προϊόντων για πιο φιλικά προς το περιβάλλον τελικά προϊόντα.

Η ΑΚΖ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εδραίωση μιας στρατηγικής καθώς και για τη λήψη αποφάσεων πολιτικής. Παραδείγματα μπορεί να είναι η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων διαχείρισης αποβλήτων με σκοπό την ενημέρωση της στρατηγικής διαχείρισης αποβλήτων ή η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών ωφελειών από τη χρήση διαφορετικών τύπων υλικού / μεταφοράς / πηγής ενέργειας κ.λπ. Οι μέθοδοι ΑΚΖ εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο για την καλύτερη αξιοποίηση των κεφαλαίων, η οποία είναι καίριας σημασίας για τις επιχειρηματικές αποφάσεις. Τόσο ο ιδιωτικός τομέας όσο κι ο δημόσιος μπορούν να επωφεληθούν από την ανάλυση ΑΚΖ.[9],[12], [19]

Στον ιδιωτικό τομέα, η ΑΚΖ ενσωματώνεται σε πολλές εφαρμογές που περιλαμβάνουν διάφορες πτυχές των προϊόντων σε όλη τη διάρκεια του σχεδιασμού και της ανάπτυξης, παραγωγής, εμπορίας, χρήσης κι επαναχρησιμοποίησης και τελικά τη διάθεση και τη διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Για παράδειγμα, ο καθορισμός μιας βάσης των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τον εντοπισμό σημείων εστίασης, ο προσδιορισμός πιθανών ευκαιριών βελτίωσης σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, η σύγκριση εναλλακτικών μεθόδων παραγωγής ή αλυσίδων εφοδιασμού για τον εντοπισμό δυνητικών αλλαγών καθώς και προϊόντα μέσω συνεχών βελτιώσεων που καθορίζονται συχνά με συγκεκριμένους στόχους μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αποτελούν σημεία ενδιαφέροντος της ΑΚΖ στον ιδιωτικό τομέα. [9]

Οι κυβερνήσεις κι ο δημόσιος τομέας μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ΑΚΖ ως εργαλείο υποστήριξης της λήψης αποφάσεων και τη δημιουργία κατάλληλων πολιτικών. Αυτό μπορεί να συμβεί σε πολλαπλά επίπεδα που οδηγούν σε ένα περιβαλλοντικό σενάριο που επιτρέπει την υιοθέτηση του βέλτιστου κύκλου ζωής και συμβάλλει στον καθορισμό της πορείας προς μια πιο πράσινη και περισσότερο βιώσιμη για το περιβάλλον οικονομία. [9] Η ανάλυση ΑΚΖ είναι χρήσιμη για την ενημέρωση των κυβερνητικών προγραμμάτων και την ιεράρχηση των δραστηριοτήτων τους, τη θέσπιση συνεκτικών πολιτικών για τους καταναλωτές, τους παραγωγούς, τους προμηθευτές, τους λιανοπωλητές και τους διαχειριστές αποβλήτων, όπως η εναρμόνιση των κανονισμών, παρέχοντας κατάλληλα συστήματα υποστήριξης για την ενίσχυση των οικονομιών που βασίζονται στη διατήρηση πόρων.

Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στην ΑΚΖ. [9], [12], [23] Αυτοί είναι:

- Η ΑΚΖ είναι μια σταθερή κι όχι δυναμική προσέγγιση που σημαίνει ότι οι χρονικές ιδιότητες της εξαγωγής, της χρήσης και των εκπομπών χάνονται κατά τη διάρκεια του σταδίου ανάλυσης των αποθεμάτων. Ωστόσο, η ΑΚΖ χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για την ανάλυση των μελλοντικών τεχνολογικών εξελίξεων
- Περιλαμβάνει υποθέσεις
- Περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα δεδομένων απογραφής. Οι βάσεις δεδομένων που αναπτύσσονται συχνά είναι ελλιπείς
- Είναι ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων κι όχι ένα εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων. Λόγω της φύσης, του επιπέδου των υποθέσεων και της καθαρά

περιβαλλοντικής εστίασής του, ο όρος «υποστήριξη των αποφάσεων» αναφέρεται στις χρήσεις AKZ που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων αντί να αποτελούν τη μοναδική βάση για τη λήψη απόφασης.

Συνοπτικά, μια AKZ μεθοδολογία ποσοτικοποιεί τις ροές υλικών καθ'όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας. Οι εκτιμήσεις των επιπτώσεων μπορούν να εκτιμηθούν σε γενικές γραμμές σε ένα σύνολο κατηγοριών περιβαλλοντικών επιδράσεων. Η AKZ είναι μία μέθοδος που μπορεί να συσχετιστεί με πολλαπλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στη λειτουργία ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας.

1.2. Ορισμός στόχου και συστήματος

Ο ορισμός του στόχου και του συστήματος είναι η πρώτη φάση της AKZ. Σε πολλές περιπτώσεις τα αποτελέσματα της AKZ εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις επιλογές που έγιναν σε αυτό το βασικό στάδιο. Στον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040) [21], αυτή η φάση αναφέρεται ως στόχος/επιδίωξη και πεδίο εφαρμογής. Σε αυτή τη μεταπτυχιακή εργασία το αναφέρουμε ως τον ορισμό του στόχου και του συστήματος για να επισημάνουμε στον αναγνώστη της σημασία της σαφούς οριοθέτησης και περιγραφής ενός συστήματος και του σκοπού της εφαρμογής της μεθόδου. [1], [12], [20], [23] Αυτή η φάση συνίσταται, πρώτον, από την περιγραφή των επιδιώξεων και ποιος είναι ο σκοπός της AKZ, που θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα, ποιος είναι το κοινό και ποιοι είναι οι ενδιαφερόμενοι. Δεύτερον, η λειτουργία του συστήματος που εξετάζεται αναλύεται για να οριστεί μια μονάδα που αντιπροσωπεύει αυτή τη λειτουργία. Επιπλέον αυτή η φάση χαρακτηρίζεται από τη διαδικασία κατανομής (η κατανομή των ροών εισροών ή εκροών μεταξύ του υπό εξέταση συστήματος προϊόντος κι άλλων συστημάτων), την ποιότητα των δεδομένων, τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο εκτίμησης επιπτώσεων, τους περιορισμούς και τον τύπο κριτικής αναθεώρησης κι ερμηνείας, τη λειτουργική μονάδα (Functional Unit) (FU) και τέλος τα όρια του συστήματος που καθορίζουν ποιες εισροές κι εκροές περιλαμβάνονται στη μελέτη και ποιες εξαιρούνται. [12], [23]

1.2.1. Στόχος μελέτης

Ο ορισμός του στόχου και του συστήματος αρχίζει με την περιγραφή των στόχων της μελέτης η οποία προσδιορίζει το πρόβλημα κι ορίζει την προβλεπόμενη εφαρμογή των αποτελεσμάτων της AKZ, συμπεριλαμβανομένου του επιθυμητού κοινού, των ενδιαφερομένων και του πεδίου της μελέτης. Σε σύγκριση με τα πιο τεχνικά βήματα μιας AKZ, αυτή έχει μια περιγραφική προσέγγιση. [8], [12], [23]

Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14044 [21], [23] για τον καθορισμό του σκοπού μιας AKZ, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν σαφώς οι ακόλουθες πτυχές:

- Η προβλεπόμενη εφαρμογή

- Οι λόγοι για τη διεξαγωγή της μελέτης
- Το κοινό στο οποίο απευθύνεται, δηλαδή, στους οποίους προορίζονται να κοινοποιηθούν τα αποτελέσματα της μελέτης
- Εάν τα αποτελέσματα προορίζονται να δημοσιοποιηθούν ή όχι.

Ο σκοπός μιας συγκεκριμένης ΑΚΖ [12], [23] πρέπει να προσδιορίζεται με σαφήνεια, ώστε να αποφεύγεται η ασάφεια μεταξύ των πιθανών εφαρμογών μιας διεργασίας και του ενδιαφερόμενου κοινού, όπως αποδεικνύεται από τα ακόλουθα παραδείγματα :

- Πληροφορίες για ένα υπάρχον προϊόν: Η ΑΚΖ χρησιμοποιείται συχνά για την παροχή πληροφοριών σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των προϊόντων/υπηρεσιών, καθώς και για τη σύγκριση διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων
- Ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος: Κατά την ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος, μια ΑΚΖ μπορεί να διεξαχθεί στο υπάρχον προϊόν. Οι επιλογές για την βελτίωση του προϊόντος επιλέγονται κι αξιολογούνται βάσει περιβαλλοντικών, τεχνικών, ή οικονομικών παραγόντων. Επιπλέον οι διαφορετικές διεργασίες παραγωγής μεταξύ του νέου και του υπάρχοντος προϊόντος συγκρίνονται μεταξύ τους
- Εκπόνηση πολιτικών στρατηγικών: Λόγω των δυνατοτήτων της για ευρεία εφαρμογή, μια ΑΚΖ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση διαφορετικών πολιτικών στρατηγικών
- Κανονισμοί λειτουργίας υπάρχοντος προϊόντος: Η ΑΚΖ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση ενός προϊόντος παρέχοντας πληροφορίες για ρυθμιστικούς σκοπούς. Λειτουργεί, δηλαδή ως ένα εργαλείο αξιολόγησης και ποσοτικοποίησης

1.2.2. Πεδίο εφαρμογής

Μόλις προσδιοριστεί ο στόχος, το εύρος του πεδίου εφαρμογής μιας ΑΚΖ πρέπει να ληφθεί υπόψιν και να περιγραφούν με σαφήνεια τα ακόλουθα στοιχεία (ISO 14044) [21], [23]:

- Το σύστημα προϊόντος που πρόκειται να μελετηθεί
- Η λειτουργία του συστήματος ή των συστημάτων στην περίπτωση συγκριτικών μελετών
- Η FU
- Τα όρια του συστήματος
- Διαδικασίες κατανομής
- Μεθοδολογία αξιολόγησης του αντίκτυπου κύκλου ζωής και τύποι επιπτώσεων
- Ερμηνεία των δεδομένων και των αποτελεσμάτων
- Ποιότητα κι αξιολόγηση των δεδομένων
- Υποθέσεις
- Περιορισμοί.

Αυτό που ορίζεται ως πεδίο εφαρμογής έχει σημαντικό αντίκτυπο στα αποτελέσματα της ΑΚΖ, για αυτό το λόγο το πεδίο της μελέτης πρέπει να είναι επαρκώς καθορισμένο ώστε να διασφαλίζεται ότι το εύρος του ταιριάζει με τον καθορισμένο στόχο. Για παράδειγμα, τα όρια του συστήματος θα πρέπει να ορίζονται με βάση τον επιδιωκόμενο σκοπό της μελέτης. Τα όρια του συστήματος καθορίζουν ποιες εισροές κι εκροές περιλαμβάνονται στη μελέτη και ποιες εξαιρούνται. Θα πρέπει να γίνει αξιολόγηση των επιπτώσεων της παράλειψης ορισμένων τμημάτων του συστήματος και ποια συνέπεια θα μπορούσε να έχει αυτό στα αποτελέσματα της μελέτης. Για παράδειγμα, εξετάζοντας μόνο τη διαδικασία παραγωγής ενός προϊόντος στη μονάδα παραγωγής του, μπορεί να παραλειφθούν τα σημαντικά οφέλη που εμφανίζονται στο στάδιο της χρήσης του εν λόγω συστήματος προϊόντος. [12]

Ο ορισμός του στόχου και του πεδίου εφαρμογής είναι μια επαναληπτική διαδικασία κι ως εκ τούτου μπορεί να αλλάξει καθώς η μελέτη εξελίσσεται ως απάντηση σε δεδομένα απογραφής ή αξιολόγησης αντικτύπου.

1.2.3. Λειτουργία συστήματος

Μετά τον καθορισμό του στόχου μιας συγκριτικής μελέτης και του πεδίου εφαρμογής, τα διαφορετικά συστήματα ή τα διαφορετικά προϊόντα πρέπει να συγκριθούν χρησιμοποιώντας ένα κοινό σημείο αναφοράς/σύγκρισης. Τα σενάρια, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις διάφορες εναλλακτικές λύσεις, επιλέγονται για την ίδια λειτουργία. Αυτή η λειτουργία είναι απαραίτητη για το σύστημα κι απαιτεί σαφή ορισμό. Στην πραγματικότητα, αποτελεί τη βάση για τον προσδιορισμό δύο βασικών στοιχείων ΑΚΖ: της λειτουργικής μονάδας και των ορίων του συστήματος. Για την αντικειμενική αξιολόγηση κάθε εναλλακτικής, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί η λειτουργία πριν καθοριστεί η λειτουργική μονάδα ή τα όρια του συστήματος.

Δεν είναι πάντα εύκολο να βρεθεί μία μοναδική κι ακριβής λειτουργία ενός συστήματος, επειδή ένα μόνο προϊόν μπορεί να φέρει περισσότερα από ένα χαρακτηριστικά. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να προσδιοριστεί η κύρια λειτουργία κι οι δευτερεύουσες λειτουργίες. Η κύρια λειτουργία, εξ ορισμού, είναι κοινή στις διάφορες εναλλακτικές λειτουργίες. Οι δευτερεύουσες λειτουργίες είναι συγκεκριμένες για κάθε σενάριο και, αν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των εναλλακτικών, μπορούν να δημιουργήσουν σύγχυση στα αποτελέσματα. Όταν μελετάται ένα συστατικό ενός μεγαλύτερου συστήματος, η λειτουργία που επιλέγεται είναι γενικά αυτή του συνόλου του συστήματος. [1], [9], [12]

Επιπλέον όταν εφαρμόζεται μια ΑΚΖ, πρέπει να ελέγχεται ότι η λειτουργία του συστήματος είναι έγκυρη σε όλα τα σενάρια, εξηγώντας τις διαφορές μεταξύ των σεναρίων. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί όταν οι δευτερεύουσες λειτουργίες των εναλλακτικών σεναρίων διαφέρουν σημαντικά.

1.2.4. Λειτουργική μονάδα

Μόλις προσδιοριστεί η λειτουργία του συστήματος, έπειτα πρέπει να οριστεί η FU . Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14044 (ISO 2006a) [21], [23], η FU είναι η "ποσοτικοποιημένη απόδοση ενός συστήματος προϊόντος για χρήση ως μονάδα αναφοράς". Η FU περιγράφει τις κύριες λειτουργίες που συναντώνται σε ένα σύστημα προϊόντος και ποσοτικοποιεί τη λειτουργία ενός συστήματος από την άποψη της προσφερόμενης υπηρεσίας/αξίας.

Τα προϊόντα συχνά πληρούν περισσότερες από μία λειτουργίες. Για ανεξάρτητες ΑΚΖ των μεμονωμένων προϊόντων, ο ορισμός της FU μπορεί να μην είναι τόσο κρίσιμος. Εντούτοις, απαιτείται μεγαλύτερη εξέταση της FU όταν ο στόχος της ΑΚΖ είναι να συγκρίνει δύο ή περισσότερα προϊόντα. Στην περίπτωση αυτή, η σύγκριση πρέπει να είναι ισοδύναμη. Επομένως, κάθε σύστημα πρέπει να ορίζεται έτσι ώστε να παρέχεται στον καταναλωτή ίση ποσότητα προϊόντος ή ισοδύναμη υπηρεσία. Συγκεκριμένα η FU πρέπει να είναι η ίδια για όλα τα σενάρια, έτσι ώστε οι ροές αποθεμάτων κι οι επιπτώσεις που εντοπίζονται σε κάθε σενάριο να υπολογίζονται ανά FU. [23]

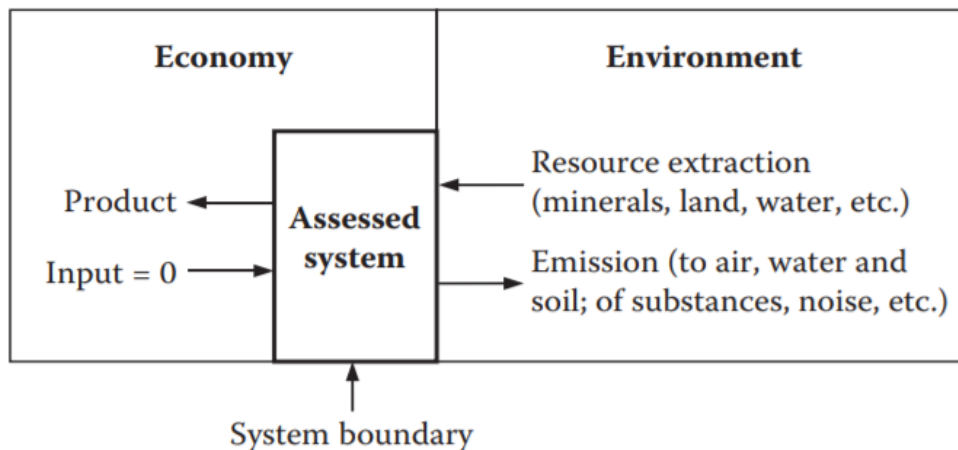
Επιπλέον, η FU πρέπει να είναι ένα μετρήσιμο μέγεθος με μονάδα μέτρησης, έτσι ώστε ο αντίκτυπος δύο FUs να είναι διπλάσιος από το FU. Η FU για την αξιολόγηση ενός στοιχείου ενός μεγαλύτερου συστήματος βασίζεται στην FU του συστήματος στο σύνολό του. Για μια δεδομένη FU, οι ροές αναφοράς είναι οι ποσότητες αγαθών ή υπηρεσιών που "αγοράστηκαν" για την εκπλήρωση της λειτουργίας και την παραγωγή αυτής της FU. Η FU κι οι ροές αναφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την εκτίμηση του κόστους για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος όσο και για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υπάρχοντων προϊόντων και την παροχή πληροφοριών για την καθοδήγηση του σχεδιασμού νέων προϊόντων. Αυτή η διαδικασία κοστολόγησης κύκλου ζωής (Life Cycle Cost) (LCC) δεν είναι τεχνικό μέρος της περιβαλλοντικής ΑΚΖ, αλλά επειδή χρησιμοποιεί την ίδια πορεία λογικής, το ίδιο πλαίσιο κι έννοιες, τα δύο μπορούν εύκολα να συνδυαστούν. [12], [23]

Κατά τη σύγκριση των προϊόντων ή των υπηρεσιών, εάν οι λειτουργίες τους δεν είναι πανομοιότυπες αλλά παρόμοιες, είναι σημαντικό αυτό να υποδεικνύεται σαφώς και να αξιολογούνται όλες τις πιθανές συνέπειες στα αποτελέσματα της μελέτης. Οι λειτουργίες μπορεί να διαφέρουν στην απόδοση του προϊόντος ή της υπηρεσίας. Για παράδειγμα οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των διαφόρων μέσων μεταφοράς (σιδηροδρομικές, οδικές κι αεροπορικές), ο χρόνος διαδρομής για μια δεδομένη απόσταση μπορεί να ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό κι ως εκ τούτου ο συγκεκριμένος χρόνος ταξιδιού δεν μπορεί να συμπεριληφθεί άμεσα στην FU. Ακόμα, όπως συμβαίνει με τις οικονομικές επιδόσεις, αυτή η τεχνική απόδοση μπορεί να μετρηθεί και να συγκριθεί με τις περιβαλλοντικές επιδόσεις στην τελική ερμηνεία. Όταν η πολύ-λειτουργική πτυχή αλλάζει τις απαραίτητες ροές αναφοράς, η FU πρέπει να ρυθμιστεί για να τηρείται αυτό [12]. Υπάρχουν ορισμένα συστήματα που εκτελούν ταυτόχρονα πολλαπλές λειτουργίες. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι σημαντικό να προσδιορίζεται σωστά η λειτουργία που επιλέγεται για την ανάλυση.

1.2.5. Ορισμός συστήματος

Οι ροές αναφοράς κι οι επακόλουθες επιπτώσεις για κάθε FU υπολογίζονται με βάση ένα σαφώς καθορισμένο σύστημα. Το σύστημα δεν ορίζεται μόνο από τα ποσά των εισροών / εκροών κι από τα επιμέρους στοιχεία του, αλλά κι από τις συνδέσεις και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Αυτή η σύνδεση θέλει να τονίσει ότι η μοντελοποίηση του συστήματος είναι μια ολιστική προσέγγιση με δυναμικό χαρακτήρα. Επομένως, το σύστημα είναι κάτι περισσότερο από το άθροισμα των στοιχείων του. [12]

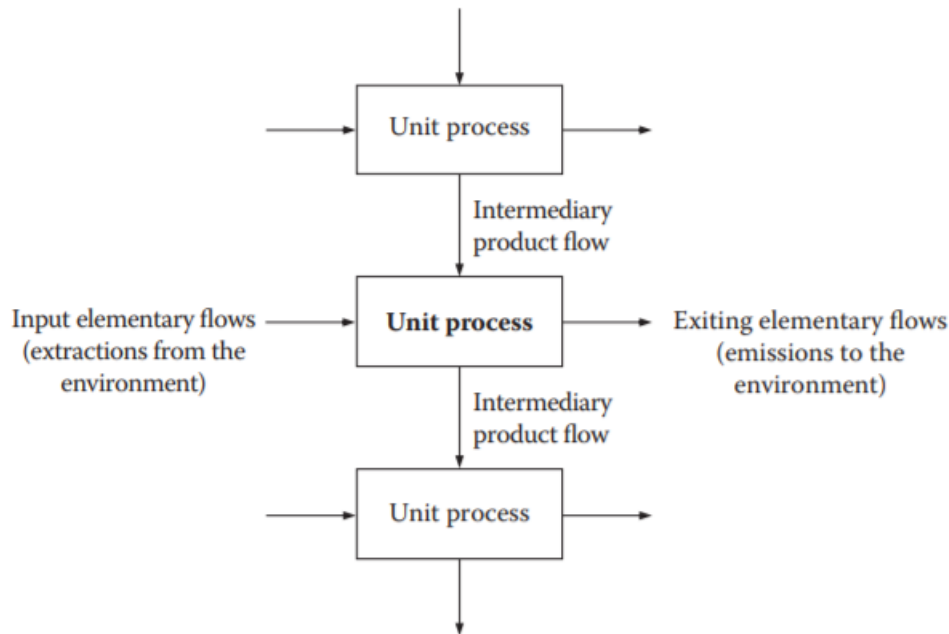
Στη συνέχεια περιγράφεται ένα σύστημα παρουσιάζοντας λεπτομερώς αυτές τις σχέσεις κι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων του συστήματος. Με αυτή τη σχηματική απεικόνιση (Σχήμα 1.4) τονίζεται η σημασία τους για τη λειτουργία του συστήματος. Για την ΑΚΖ, γίνεται διάκριση μεταξύ του περιβάλλοντος και του συστήματος που παρέχει ένα προϊόν ή μια λειτουργία (Σχήμα 1.4). [12] Το σύστημα εντοπίζεται από τα στοιχεία που περιέχει τα οποία καλούνται διεργασίες, καθώς κι από τους δεσμούς μεταξύ αυτών των στοιχείων και τα όρια που οριοθετούν το σύστημα μελέτης, δηλαδή τα όρια μεταξύ της οικονομίας και του περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.4 : Σχέσεις κι ανταλλαγές μεταξύ ενός συστήματος μελέτης, του οικονομικού κόσμου και του περιβάλλοντος. Ορίζεται και το όριο του συστήματος (System boundary) μεταξύ οικονομίας και περιβάλλοντος [12]

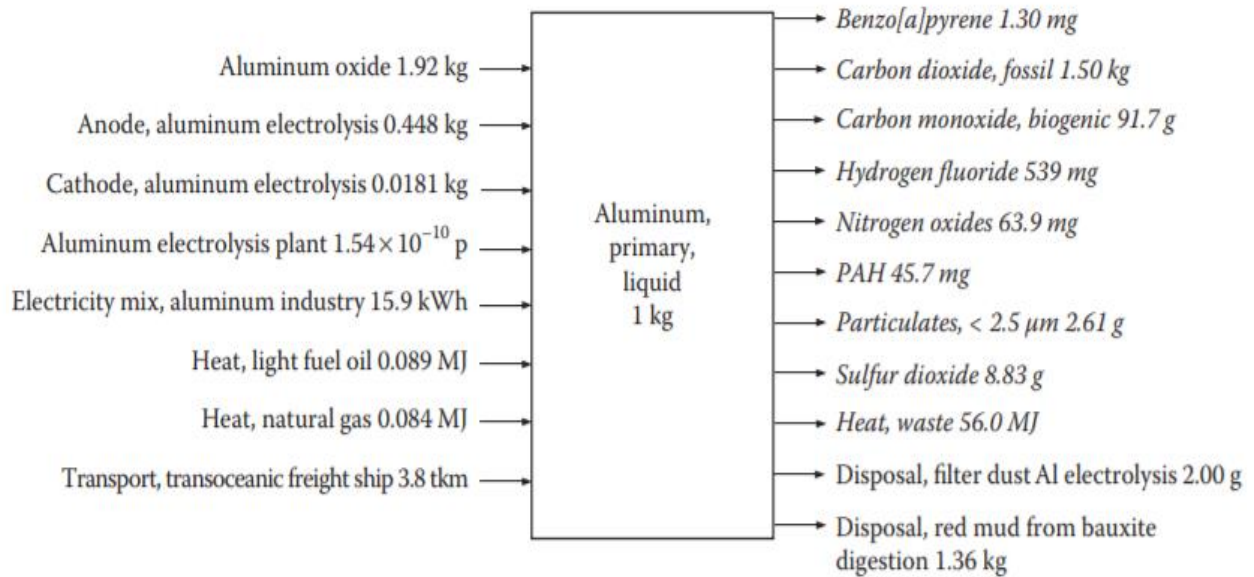
Το εκτιμώμενο και διαμορφωμένο σύστημα κατασκευάζεται με τη σύνδεση διαφορετικών ενοτήτων/τμημάτων διεργασιών (Σχήμα 1.5). [12] Αφού προσδιοριστούν οι διεργασίες και τα στοιχεία που απαιτούνται για την εκτέλεση της λειτουργίας, εκφράζονται ως μια σειρά επιμέρους διεργασιών, τα οποία είναι τα μικρότερα στοιχεία της ανάλυσης, καθένα από τα οποία ποσοτικοποιεί τις εισροές κι εκροές. Μέσω των ενδιάμεσων ροών, οι επιμέρους διεργασίες συνδέονται μεταξύ τους μέσα στο σύστημα. Αυτή η ένωση καθίσταται δυνατή από τη σύνδεση μεταξύ της ποσότητας κάθε διεργασίας που απαιτείται έτσι ώστε να δώσει την σκυτάλη στην επόμενη διεργασία. Το παραγόμενο προϊόν που «ρέει» στην οικονομία είναι προϊόντα που εξέρχονται από το σύστημα. Οι στοιχειώδεις ροές συνδέουν τις πολυάριθμες διεργασίες με το περιβάλλον μέσω της χρήσης στοιχειωδών ροών εισροών που αντιστοιχούν

στη χρήση φυσικών πόρων όπως η εξαγόμενη πρώτη ύλη, η ενέργεια κι η χρήση της γης. Οι στοιχειώδεις ροές που εξέρχονται από μια διεργασία είναι εκπομπές στο νερό, στον αέρα ή στο έδαφος.



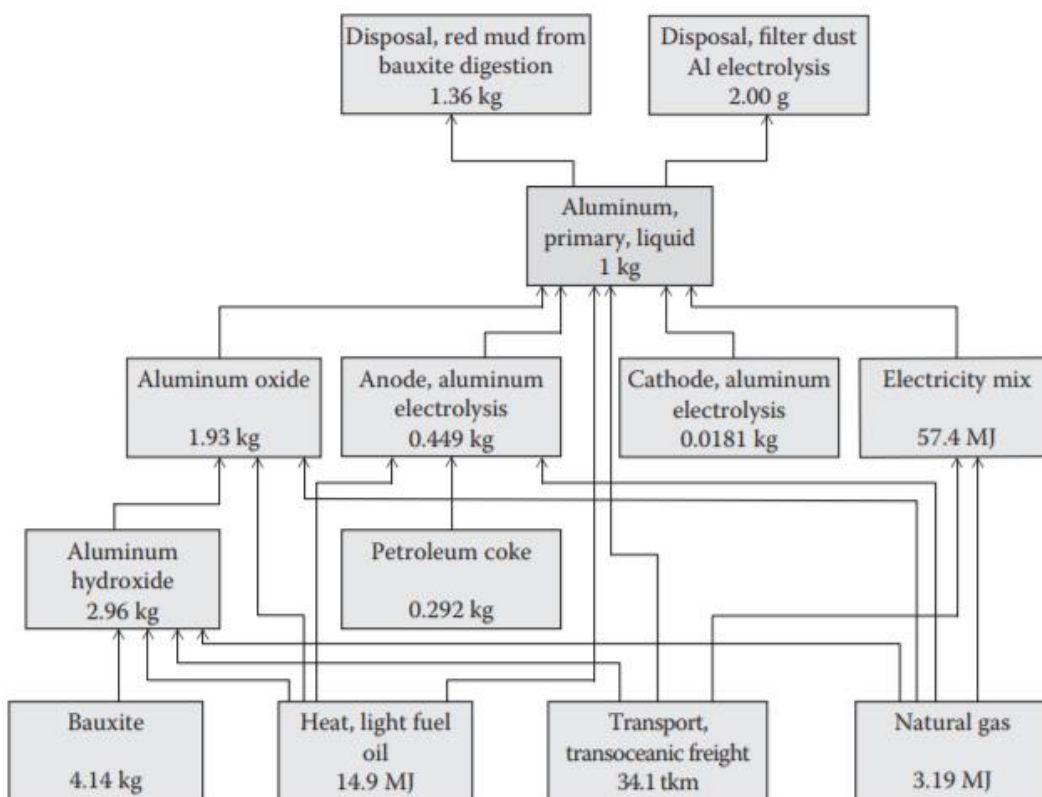
Σχήμα 1.5 : Παράδειγμα μιας σειράς διεργασιών σε ένα σύστημα. Δεδομένα στοιχειωδών ροών που εισέρχονται στο σύστημα μελέτης μιας διαδικασίας (input elementary flows) , όπως εξορύξεις πρώτων υλών από το περιβάλλον (extraction from the environment) τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της διαδικασίας (unit process). Μετά το τέλος της διαδικασίας εξέρχονται από το σύστημα στοιχειώδεις ροές (exiting elementary flows) όπως εκπομπές προς το περιβάλλον (emissions to the environment) (ISO:14040) [12], [21]

Το σχήμα 1.6 παρουσιάζει τις ενδιάμεσες και στοιχειώδεις ροές του πρωτογενούς υγρού αλουμινίου. Η διεργασία παραγωγής υγρού αλουμινίου χρησιμοποιεί τις εξής ενδιάμεσες ροές: οξείδιο του αργιλίου, ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για να λειτουργήσουν τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου κατά την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, θερμότητα, πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Περιλαμβάνει επίσης την υπερωκεάνια μεταφορά και την επεξεργασία των αποβλήτων από την παραγωγή αλουμινίου. Άμεσες εκπομπές ρύπων που προκύπτουν από την κατασκευή υγρού αλουμινίου είναι οι εκπομπές στον αέρα. Τέτοιες στοιχειώδεις ροές είναι: βενζο-[α]-πυρένιο κι άλλες εκπομπές πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων, διοξείδιο του άνθρακα και χλωροφθοράνθρακες-14 (CFC-14), διοξείδιο του θείου, οξείδια του αζώτου καθώς κι απόβλητα προερχόμενα από διεργασίες καύσης. Κάθε μία από τις ενδιάμεσες ροές απαιτεί άλλες ενδιάμεσες ροές και δημιουργεί πρόσθετες άμεσες εκπομπές. [12]



Σχήμα 1.6 : Δεδομένα που σχετίζονται με την παραγωγή υγρού πρωτογενούς αλουμινίου στο εργοστάσιο. Οι στοιχειώδεις ροές από και προς το περιβάλλον παρουσιάζονται με πλάγιους χαρακτήρες. Για παράδειγμα ροές από το περιβάλλον είναι το Aluminium oxide και ροές προς το περιβάλλον το Hydrogen fluoride [12]

Σύμφωνα με τους στόχους που απαιτούνται για την εκπλήρωση της μελέτης, απαιτείται κατάλληλη μοντελοποίηση ενιαίων διεργασιών. Στην πραγματικότητα, κάθε διεργασία μπορεί να υποδιαιρεθεί σε άλλες διεργασίες ανάλογα με το επίπεδο λεπτομέρειας που απαιτείται. Δεδομένου ότι πρόκειται για ένα φυσικό σύστημα, είναι απαραίτητο να γίνουν ισοζύγια μάζας και ενέργειας για να εξακριβωθεί ότι όλες οι διεργασίες που ορίζουν το σύστημα σέβονται τη διατήρηση της μάζας και της ενέργειας. Τέλος, το διάγραμμα ροής ή δενδρόγραμμα της διεργασίας (Σχήμα 1.7) [12] παρέχει μια σαφή εικόνα των διαδικασιών και των μεταξύ τους σχέσεων. Εμφανίζει κάθε ενδιάμεση διαδικασία που εξετάζεται στο πλαίσιο του συστήματος και ποσοτικοποιεί τις ροές που συνδέουν αυτές τις διεργασίες.



Σχήμα 1.7 : Διάγραμμα ροής. Απεικόνιση της συνολικής ροής για την παραγωγή υγρού πρωτογενούς αλουμινίου σε εργοστάσιο. Περιλαμβάνονται αναλυτικά όλα τα στάδια παραγωγής καθώς κι οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, οι οποίες φαίνονται με τα βέλη [12]

1.2.6. Όρια συστήματος

Ο ορισμός κι η περιγραφή των ορίων του συστήματος είναι μία από τις πιο σημαντικές πτυχές του ορισμού του στόχου και του πεδίου εφαρμογής. Στην πραγματικότητα, τα όρια του συστήματος επηρεάζουν τόσο τη συλλογή των δεδομένων όσο και την επιλογή δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν και μοντελοποιηθούν, καθώς και την προσομοίωση νέων στοιχείων.

Επομένως, τα όρια του συστήματος καθορίζουν ποιες συγκεκριμένες διεργασίες περιλαμβάνονται και ποιες εξαιρούνται κατά τη μοντελοποίηση του συστήματος. Δηλαδή ορίζονται όλες οι απαιτούμενες διεργασίες, από το την αρχή μέχρι το τέλος ζωής, με σκοπό να εκπληρωθεί η λειτουργία του συστήματος. Αυτό μπορεί να ακούγεται απλό, αλλά γρήγορα γίνεται περίπλοκο σε πραγματικές εφαρμογές. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14044, το όριο του συστήματος είναι το "σύνολο κριτηρίων που καθορίζουν ποιες διεργασίες αποτελούν μέρος ενός συστήματος προϊόντων/υπηρεσιών". Μια πλήρης AKZ θα προβλέπει την ανάλυση και τη μοντελοποίηση όλων των διεργασιών παραγωγής που συμβαίνουν σε κάθε σημείο της αλυσίδας παραγωγής, χρήσης ή διάθεσης. Για την ανάλυση AKZ, είναι σημαντικό να

καθοριστούν τα κριτήρια για την συμπερίληψη ή τον αποκλεισμό ορισμένων διεργασιών και να εφαρμοστούν σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14000. [21], [23]

Αρχίζοντας από τις ροές αναφοράς, το σύστημα πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις ροές που απαιτούνται για την εκπλήρωση της λειτουργίας και να καλύπτει τα κύρια στάδια του κύκλου ζωής (ISO 14040) [21]:

- Εξόρυξη και διύλιση πρώτων υλών κι ενέργειας
- Παροχή υποδομών, μηχανημάτων, εισροών και μεταφορών
- Κύριο στάδιο κατασκευής και διεργασίας
- Στάδιο χρήσης, συμπεριλαμβανομένης της συντήρησης
- Επεξεργασία αποβλήτων, λαμβάνοντας υπόψη την ανάκτηση των χρησιμοποιημένων προϊόντων (συμπεριλαμβανομένης της επαναχρησιμοποίησης, της ανακύκλωσης και της ανάκτησης ενέργειας).

Δεδομένου ότι η διάθεση των αποβλήτων παράγει εκπομπές, η επεξεργασία τους πρέπει να περιλαμβάνεται εντός των ορίων του συστήματος.

1.3. Ανάλυση αποθέματος

Μόλις ολοκληρωθεί η πρώτη φάση της ΑΚΖ, καθορίζονται τα διαφορετικά σενάρια, οι λειτουργίες που εκτελούνται και τα συστήματα που θα μελετηθούν. Έπειτα μπορεί να εφαρμοστεί η δεύτερη φάση μιας ΑΚΖ. Αυτή η φάση ποσοτικοποιεί την απογραφή των διαφόρων ροών και των εκπεμπόμενων ουσιών που διασχίζουν το όριο του συστήματος. Δύο μέθοδοι για τον υπολογισμό του αποθέματος κυριαρχούν σήμερα: η προσέγγιση που βασίζεται στη διεργασία κι η προσέγγιση εισόδου-εξόδου ή αλλιώς εισροών-εκροών [18]

Η προσέγγιση που βασίζεται στη διεργασία χρησιμοποιεί φυσικές ροές αναφοράς κι ενδιαμέσες ροές για τον εντοπισμό και τη σύνδεση των διαδικασιών που ορίζουν ένα σύστημα. [4], [18], Η προσέγγιση εισόδου-εξόδου στηρίζεται στην ανάλυσή των ροών που δημιουργούνται από το εξεταζόμενο προϊόν ή υπηρεσία.

Η απογραφή των στοιχειωδών ροών ή των εκπομπών είναι, εξ ορισμού, η ποσοτική περιγραφή των ροών της ύλης, της ενέργειας και των ρύπων που διασχίζουν τα όρια του συστήματος. Αυτή περιλαμβάνει τις εκπομπές ρυπογόνων ουσιών στο περιβάλλον καθώς και τις ποσότητες των εξορυσσόμενων πόρων από το περιβάλλον (ορυκτά, φορείς ενέργειας, εδαφική επιφάνεια, κλπ.) καθ 'όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του αναλυόμενου προϊόντος ή υπηρεσίας. [1], [14]

Για την προσέγγιση της διεργασίας, ο υπολογισμός του αποθέματος υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τις ροές αναφοράς και τις αντίστοιχες ενδιαμέσες ροές ανά FU με τους συντελεστές εκπομπών κι εξόρυξης της κάθε διεργασίας. [8], [14], [23], Αυτοί οι συντελεστές

εκπομπών κι εξόρυξης που είναι διαθέσιμοι στις διάφορες βάσεις δεδομένων των λογισμικών που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση της ΑΚΖ παράσχουν τις ποσότητες του εξορυσθέντος μεταλλεύματος και των ρύπων που εκπέμπονται για κάθε διαδικασία. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η διατήρηση ισορροπίας μάζα μεταξύ της κάθε ουσίας στη μελετώμενη διαδικασία και των χρησιμοποιούμενων δεδομένων και στοιχειωδών ροών.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστεί ένα πρόβλημα σχετικά με την συνάθροιση των εκπομπών. Οι διαδικασίες που περιλαμβάνονται σε ένα κύκλο ζωής ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας εμφανίζονται γενικά σε διάφορα σημεία στο χρόνο και στο χώρο. Για παράδειγμα, εάν ένα προϊόν οδηγεί σε συνολική εκπομπή 5 kg SO₂ στον αέρα, αυτό μπορεί να συμβεί από 1 kg που εκπέμπεται στην Ινδία το 2000, 0,1 kg που εκπέμπεται στην Ελβετία το 1995, 3 kg που εκπέμπονται στη Βραζιλία το 2010 και 0,9 kg που εκπέμπονται στην "παγκόσμια αγορά" (χωρίς γεωγραφική προδιαγραφές) το 2014. Ακριβής προσέγγιση για τον συγκεκριμένο χρόνο και τόπο κάθε εκπομπής ρύπου μπορεί να οδηγήσει σε μια συντριπτική ποσότητα των απαραίτητων δεδομένων κι υπολογισμών. Για να μειωθεί αυτή η ποσότητα της περίπλοκης και χρονοβόρας εργασίας, πραγματοποιείται μια συσσωμάτωση/συνάθροιση των αποτελεσμάτων. [14], [23]

Το πρώτο βήμα είναι μια συνάθροιση με την πάροδο του χρόνου, υποθέτοντας ότι το αποτέλεσμα είναι ανεξάρτητο από το χρόνο κατά την οποία λαμβάνει χώρα. Μια άλλη κοινή συνάθροιση είναι να αθροίζονται όλες οι εκπομπές ανεξαρτήτως της φυσικής θέσης. Αυτές οι απλουστεύσεις των υπολογισμών των ρύπων βασίζονται στη παραδοχή ότι η επίπτωση μιας ουσίας βασίζεται κυρίως στις εγγενείς της ιδιότητες και της συνολικής εκπομπής κι όχι του τόπου που απελευθερώνεται, πράγμα που είναι σαφώς απλούστευση. Στην πραγματικότητα, η ίδια εκπομπή ουσιών σε διαφορετικά μέρη μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές παραγόμενες ουσίες ως προς την ποιότητα αλλά και την ποσότητα, λόγω των διαφορετικών κλιματικών συνθηκών ή της μορφολογίας και της σύστασης των εδαφών, την έκθεση του πληθυσμού, βάσει της εγγύτητας μιας κατοικημένης ζώνης και της τοξικότητας, βασισμένη στην ευαισθησία του οικοσυστήματος. Εάν ληφθούν υπόψη αυτοί οι παράγοντες για τον υπολογισμό της ανάλυσης του αποθέματος πρέπει όλοι οι υπολογισμοί να γίνουν σύμφωνα με το χώρο και το χρόνο που πραγματοποιήθηκε η διεργασία. [12]

Πώς γίνεται όμως επ' ακριβώς ο υπολογισμός του αποθέματος βάσει μιας διεργασίας; Θα δείξουμε παρακάτω πως υπολογίζεται η κατανάλωση της ενέργειας κι οι παραγόμενες εκπομπές του CO₂ για την παραγωγή υγρού Αλουμινίου.

Αρχικά πρέπει να εκτελεστούν τα παρακάτω βήματα :

- Ορίζονται οι διεργασίες, η λειτουργία του συστήματος, η λειτουργική μονάδα και σχεδιάζεται το διάγραμμα ροής
- Για κάθε διεργασία καταγράφονται και ποσοτικοποιούνται όλα τα δεδομένα εισροών/εκροών κι οι παραγόμενοι ρύποι
- Καταγράφονται όλα τα δεδομένα σε ένα πίνακα

- Υπολογίζονται οι εκπομπές κάθε διαδικασίας πολλαπλασιάζοντας την ποσότητα της έκαστης μονάδας ανα FU με τους συντελεστές εκπομπής
- Για τον συνολικό υπολογισμό των εκπομπών συγκεντρώνονται όλες οι στοιχειώδεις ροές όλων των διεργασιών του μελετώμενου συστήματος.

Τα αποτελέσματα απογραφής σχετικά με την ενέργεια αποτελούνται μόνο από μη-ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, όπως για παράδειγμα η ενέργεια που απαιτείται για την εξόρυξη των ακατέργαστων πρώτων υλών κι ορυκτών μεταλλευμάτων, το πετρέλαιο, ο άνθρακας, το φυσικό αέριο, όλα δηλαδή τα ορυκτά καύσιμα. Έπειτα η ενέργεια αυτή πολλαπλασιάζεται με καθορισμένες θερμοκρασιακές τιμές για τη λήψη της κατανάλωσης της μη-ανανεώσιμης πρωτογενούς ενέργειας. [12]

Πρωτογενής ενέργεια είναι η ενέργεια που προέρχεται απευθείας από τη γη, όπως τα ορυκτά καύσιμα, και δεν απαιτείται επεξεργασία για την μετατροπή της σε χρήσιμη ενέργεια. Συγκεκριμένα, η πρωτογενής ενέργεια αποτελεί το άθροισμα της τελικής ενέργειας που καταναλώθηκε κατά τη διεργασία και της ενέργειας που χρειάστηκε για την εξόρυξη, την προετοιμασία και τη διανομή των πρώτων υλών. Η αναλογία μεταξύ της τελικής και της πρωτογενούς ενέργειας καθορίζει την ενέργεια που απαιτείται σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. [12], [19], [20] Ένα μέρος της πρωτογενούς ενέργειας είναι μη-ανανεώσιμο, πράγμα που σημαίνει ότι η βασική πηγή της εν λόγω ενέργειας είναι αναντικατάστατη (ή αντικαθίσταται πολύ αργά μέσω φυσικών διεργασιών). Η μη-ανανεώσιμη πρωτογενής ενέργεια καταλήγει τελικά στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Ενέργεια από πηγές όπως υδροηλεκτρικά φράγματα, θερμικούς κι ηλιακούς συλλέκτες καθώς κι η αιολική ενέργεια είναι τεχνικά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες αποτελούν λύση για την προστασία των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων και της ισορροπίας του περιβάλλοντος.

Η ζήτηση της μη ανανεώσιμης πρωτογενούς ενέργειας κι οι εκπομπές CO₂ για διαφορετικά υλικά και διεργασίες υπολογίζονται και απαριθμούνται στη βάση δεδομένων ecoinvent του προγράμματος SimaPro. Ο Πίνακας 1.1 [12] παρουσιάζει κάποιες τυπικές τιμές για ένα σύνολο διαφορετικών διαδικασιών κι υλικών που χρησιμοποιούνται συνήθως, και δείχνουν ότι η κατανάλωση της μη-ανανεώσιμης πρωτογενούς ενέργειας κι οι παραγόμενες εκπομπές διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τη χώρα που πραγματοποιείται η διεργασία μελέτης. Οι τιμές που παρέχονται στον Πίνακα 1.1 [12] πρέπει να ερμηνεύονται με προσοχή και γενικά δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ δύο υλικών μόνο με βάση τη μονάδα μέτρησης της μάζας. [12] Για παράδειγμα, το αλουμίνιο απαιτεί επτά φορές περισσότερη ενέργεια κι εκπέμπει επτά φορές περισσότερη ποσότητα CO₂ ανά μονάδα μάζας από το χάλυβα. Ωστόσο, αυτά τα υλικά θα πρέπει να συγκριθούν με βάση τη λειτουργία κι όχι με βάση τη μονάδα μάζας διότι η κάθε διεργασία και λειτουργία ενός συστήματος απαιτεί και διαφορετικές ποσότητες πρώτων υλών.

Πίνακας 1.1 : Μη ανανεώσιμη πρωτογενής ενέργεια (Nonrenewable Primary Energy), ποσότητα CO₂ ανά μονάδα μάζας και λόγος g_{CO2}/MJ για διαφορετικούς τύπους ενέργειας, φορείς κι υλικά [12]

	Nonrenewable Primary Energy (MJ per unit)	CO ₂ (kg per unit)	g _{CO2} /MJ ratio
Energy Carriers			
1 kWh electricity (Europe)	10.5	0.49	47
1 kWh electricity (United States)	12.1	0.71	59
1 kWh electricity (Japan)	11.5	0.53	46
1 kWh electricity (Switzerland)	7.9	0.11	13
1 kWh electricity (China)	10.4	0.98	94
1 L gasoline (no combustion) ^a	42.9	0.49	11
1 L gasoline (with combustion)	42.9	2.88	65
1 kg light oil (42.7 MJ final)	56.8	3.71	65
Transportation			
1000 km-kg transportation by 16–32-ton lorry	2.6	0.15	58
1 person-km by train (Intercity)	0.98	0.06	58
1 person-km by airplane (European flight)	3.28	0.19	60
1 person-km by car	3.0	0.17	57
Material			
1 kg steel, low alloy	27.4	1.63	59
1 kg primary aluminum	160.4	9.55	60
1 kg recycled aluminum	22.4	1.32	59
1 m ³ concrete	1,381	257	186
1 kg copper	31.2	1.86	60
1 m ³ water	5.55	0.30	54
1 kg newsprint paper	24.3	1.22	50
1 kg polyethylene HDPE ^a	76.4	1.56	20
1 kg glass	11.5	0.63	55
End of Life			
1 kg landfilled steel	0.197	0.00657	33
1 kg landfilled aluminum	0.521	0.02010	39
1 kg incinerated municipal solid waste (MSW)	0.43	0.50	1,161
1 kg incinerated polypropylene	0.209	2.53	12,060

Οι εκπομπές CO₂ αξιολογούνται με παρόμοιο τρόπο με εκείνον της ενέργειας. Οι εκπομπές CO₂ είναι άμεσα συνυφασμένες με τη χρήση της μη ανανεώσιμης πρωτογενούς ενέργειας, δεδομένου ότι ένα μεγάλο μέρος των εκπομπών CO₂ προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Ο βασικός κανόνας είναι ότι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας συνεπάγεται υψηλές εκπομπές CO₂, εκτός εάν χρησιμοποιείται πυρηνική ενέργεια. Επιπλέον, η ποσότητα CO₂ που εκπέμπεται εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιείται. Όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία του υδρογόνου προς τον άνθρακα (λόγος H/C) των καυσίμων μορίων, τόσο λιγότερο CO₂ παράγεται.

Αν κι η κατανάλωση της ενέργειας κι οι εκπομπές CO₂ είναι συχνά καλοί δείκτες συνολικά των εκπομπών και των επιπτώσεων των ενεργειακών διαδικασιών, δεν επαρκούν για την εκτίμηση όλων των επιπτώσεων που επιφέρει μία διεργασία, όπως για παράδειγμα η τοξικότητα στον άνθρωπο κι η οικοτοξικότητα. [12], [19] Για αυτές τις κατηγορίες των επιπτώσεων όπως και για αρκετές άλλες, όλες οι εκπομπές πρέπει να αποτιμώνται προσεκτικά και να αναλύονται οι διαφορετικές επιπτώσεις τους.

Για την πραγματοποίηση αυτής της καταγραφής κι ανάλυσης των αποθεμάτων πρέπει να ακολουθηθούν βήμα προς βήμα όλα τα στάδια μελέτης της ΑΚΖ, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα σενάρια που δομούν μια διεργασία. Κάθε σενάριο αποτελείται από ροές αναφοράς που η κάθε ροή χαρακτηρίζεται από συντελεστές εκπομπών εξόρυξης (*E*) [12] για κάθε ουσία που λαμβάνει μέρος σε ολόκληρη την αλυσίδα παραγωγής. Συγκεκριμένα για κάθε σενάριο ισχύει η παρακάτω εξίσωση :

$$u = E \cdot x \quad (1.1)$$

u: δiάνυσμα απογραφής των εκπομπών/FU

E : συντελεστής εκπομπών εξόρυξης

γ : ροές αναφοράς του κάθε σεναρίου, περιλαμβάνεται η μάζα του υλικού κι η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε διαδικασία από την αρχή έως τη λήξη της διεργασίας

1.4. Εκτίμηση αντίκτυπου

Μετά τη συλλογή των δεδομένων σχετικά με τις εξορύξεις των πρώτων υλών και τις σχετικές εκπομπές κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ζωής ενός προϊόντος, ακολουθεί η τρίτη φάση της ΑΚΖ που είναι η αξιολόγηση αντίκτυπου κύκλου ζωής. Ο απολογισμός καθορίζει τις ποσότητες των υλικών που εξορύσσονται και της ενέργειας που καταναλώνεται, καθώς και των εκπομπών που εκκρίνονται στο νερό, τον αέρα και το έδαφος. [1], [12], [18], [23] Αλλά, πώς ερμηνεύουμε αυτά τα δεδομένα απογραφής; Πώς συνδέουμε αυτές τις ποσότητες με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που επιφέρουν; Η εκτίμηση των επιπτώσεων είναι η φάση που αντιμετωπίζει αυτές τις ερωτήσεις. Τα διάφορα στάδια της εκτίμησης των επιπτώσεων είναι :

- 1) Η ταξινόμηση των εκπομπών σε διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων
- 2) Ο χαρακτηρισμός των εκπομπών στην κατηγορία των ενδιάμεσων επιπτώσεων
- 3) Ο χαρακτηρισμός των εκπομπών στην κατηγορία των τελικών επιπτώσεων ή γενικών ζημιών/βλαβών.

Η φάση απογραφής περιλαμβάνει γενικά μια πρώτη συνάθροιση των δεδομένων αθροίζοντας τις συνολικές εκπομπές κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής με αποτέλεσμα να παραχθεί ένας πίνακας απογραφής των συνολικών εκπομπών. Όμως για μία πλήρη ΑΚΖ χρειάζεται λεπτομερής αξιολόγηση του μεγέθους σημασίας και του αντίκτυπου των

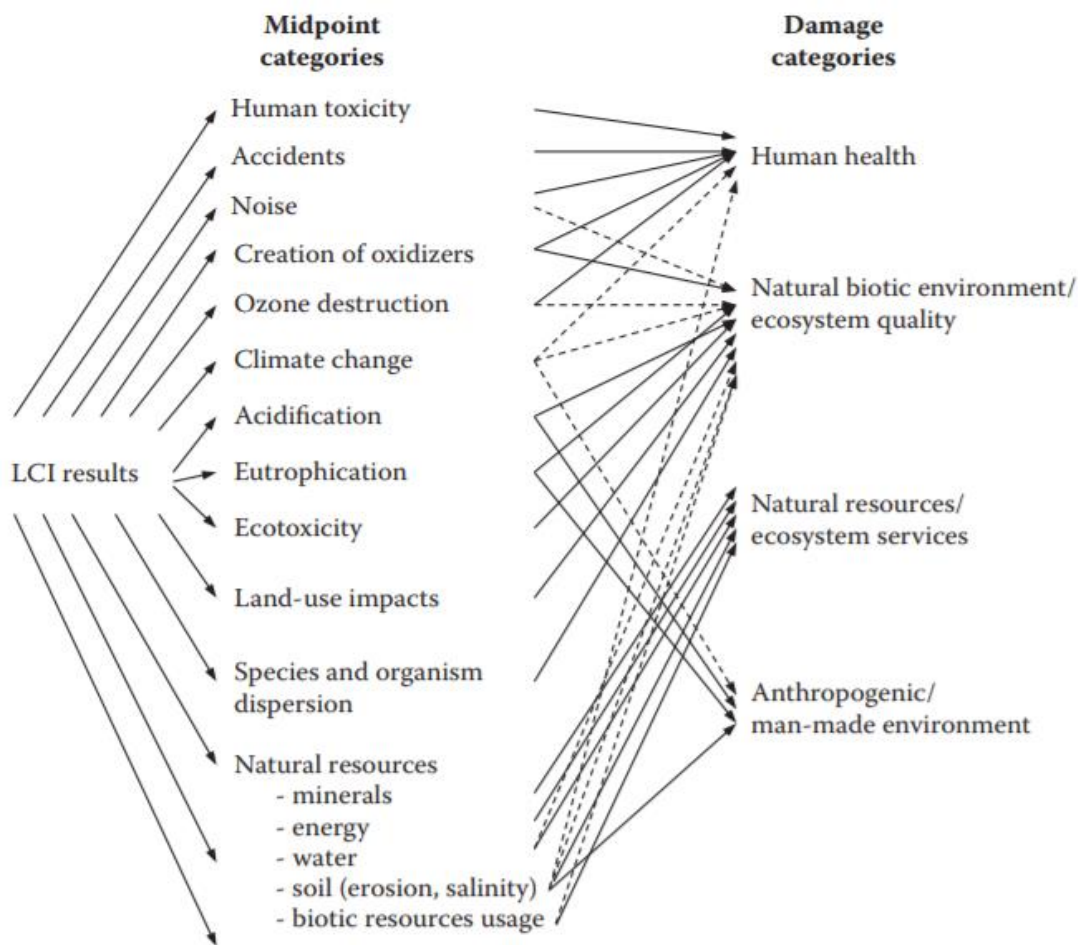
επιπτώσεων που προκαλούνται από κάθε ουσία της διεργασίας. Αυτό το έργο επιτελεί το στάδιο της εκτίμησης του αντίκτυπου. Είναι διαθέσιμες διάφορες μέθοδοι για την εκτίμησή του αντίκτυπου σε ένα κύκλο ζωής. Για την επιλογή και τη χρήση της μεθόδου έχει προταθεί ένα γενικό πλαίσιο [20], [21] καθώς κι ένα σύνολο κριτηρίων (ISO 14044 2006).

Για τη σύνδεση των δεδομένων απογραφής με περιβαλλοντικές ζημίες, ένα μεθοδολογικό πλαίσιο έχει αναπτυχθεί μέσα στην ΑΚΖ. Πρώτον, όλα τα αποτελέσματα της απογραφής που έχουν παρόμοια αποτελέσματα, για παράδειγμα όλες οι εκπομπές ουσιών που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, πρέπει να ταξινομηθούν σε μια κατηγορία επιπτώσεων, σε ενδιάμεσο επίπεδο, που ονομάζεται κατηγορία μέσου όρου. Για κάθε κατηγορία ενδιάμεσων επιπτώσεων, ορίζεται ένας δείκτης μέσου σημείου. Κάθε ροή αποθέματος πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή χαρακτηρισμού για να υπολογιστεί η συνεισφορά του σε αυτή την ενδιάμεση κατηγορία. Η ενδιάμεση αυτή κατηγορία των επιπτώσεων εκφράζει και ποσοτικοποιεί τις επιδράσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων απογραφής και των τελικών ζημιών. Επιπλέον θέλει να επισημάνει ότι δεν υπάρχει μόνο αρχή και τέλος σε μία παραγωγική διαδικασία, αλλά κι ενδιάμεσοι οδοί με σημαντική επίδραση.

Η αλλαγή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στο πέρασμα του χρόνου, τυπικά λαμβάνεται ως ένας ενδιάμεσος δείκτης κι η συμβολή κάθε αερίου του θερμοκηπίου ως προς αυτή την αλλαγή χαρακτηρίζεται από ένα δυναμικό θέρμανσης, το οποίο χρησιμεύει ως δείκτης χαρακτηρισμού που αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά κάθε εκπομπής των παραγόμενων αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με το CO₂.

Έπειτα, κάθε ενδιάμεση κατηγορία κατανέμεται σε μία ή περισσότερες κατηγορίες τελικών επιπτώσεων που αφορούν ζημίες σε διαφορετικές περιοχές μελέτης, όπως η ανθρώπινη υγεία και το οικοσύστημα. Η κατηγορία των γενικών ζημιών χαρακτηρίζονται από ένα δείκτη ζημιών, ο οποίος αναφέρεται μερικές φορές ως δείκτης τελικού σημείου. Επειδή όμως κάθε βήμα της διαδικασίας εκτίμησης των επιπτώσεων περιλαμβάνει υποθέσεις σχετικά με τον τρόπο χαρακτηρισμού των ζημιών, έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται η αβεβαιότητα περνώντας από το στάδιο της ανάλυσης των αποθεμάτων στο μέσο σημείο και από το μέσο στο τελικό σημείο των ζημιών της διεργασίας.

Το Σχήμα 1.8 [12] παρουσιάζει τη γενική απεικόνιση του μεθοδολογικού πλαισίου της μεθόδου IMPACT 2002+ , το οποίο συνδέει κάθε αποτέλεσμα αποθέματος με μία ή περισσότερες κατηγορίες γενικών ζημιών μέσω των κατηγοριών των μεσαίων σημείων. Η ιδέα αυτού του αναλυτικού πλαισίου είναι ότι η μέθοδος αξιολόγησης των επιπτώσεων προσφέρει την επιλογή στο χρήστη του λογισμικού να μπορεί να επιλέξει να σταματήσει στο μεσαίο επίπεδο ή να φτάσει μέχρι το τελικό επίπεδο των επιπτώσεων.



Σχήμα 1.8 : Γενική δομή του πλαισίου της μεθόδου IMPACT 2002+ για την αξιολόγηση των επιπτώσεων. Παρουσιάζεται η Απογραφή Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory) (LCI), οι ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων (Midpoint categories) κι οι κατηγορίες γενικών ή τελικών ζημιών (Endpoint categories). Τα διακεκομμένα βέλη αντιπροσωπεύουν τη μετάβαση από τις Midpoint στις Endpoint categories. Κάποιες Midpoint categories αντιστοιχούν σε περισσότερες από μία Endpoint [12]

Ακολουθώντας το μεθοδολογικό πλαίσιο που περιγράφεται παραπάνω, υπάρχουν τρία βήματα για την αξιολόγηση των επιπτώσεων:

- 1) Η ταξινόμηση των εκπομπών
- 2) Ο χαρακτηρισμός των ενδιάμεσων κατηγοριών
- 3) Ο χαρακτηρισμός των τελικών κατηγοριών.

Αρχικά, στην ταξινόμηση των εκπομπών ορίζεται ένα σύνολο κατηγοριών ενδιάμεσων περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τα είδη των περιβαλλοντικών προβλημάτων που εντοπίστηκαν. Στη συνέχεια, οι εκπομπές ταξινομούνται σε κάθε σχετική μεσαία κατηγορία στην οποία επιφέρουν ανάλογη επίδραση. Για παράδειγμα, CO₂, το οξείδιο του αζώτου (N₂O) και το μεθάνιο (CH₄) συμβάλλουν στην παγκόσμια υπερθέρμανση. Επίσης, τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και διοξειδίου του θείου (SO₂) συμβάλλουν στις επιπτώσεις στο αναπνευστικό

σύστημα λόγω των ανόργανων ουσιών. Μια δεδομένη ουσία μπορεί να συμβάλει σε διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων, όπως το CH₄, που συμβάλλει τόσο στην αλλαγή του κλίματος όσο και στη δημιουργία φωτοχημικών οξειδίων. [12], [19]

Στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια του χαρακτηρισμού του μεσαίου σημείου, οι εκπομπές κι οι εξορύξεις σταθμίζονται, υπολογίζονται για να ποσοτικοποιηθεί η συμβολή τους σε κάθε ενδιάμεση κατηγορία. Αυτοί οι συντελεστές στάθμισης καλούνται συντελεστές χαρακτηρισμού του μεσαίου σημείου κι εκφράζουν τη σημασία των εκπεμπόμενων ουσιών στο πλαίσιο μιας συγκεκριμένης ενδιάμεσης κατηγορίας περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτοί οι παράγοντες πρέπει να μοντελοποιούνται με έγκυρο και συνεκτικό τρόπο. Οι ροές αποθεμάτων, οι εκπομπές (π.χ. u_i , kg/FU) πολλαπλασιάζονται με αυτούς τους παράγοντες και στη συνέχεια αθροίζονται σε κάθε κατηγορία ενδιάμεσου μέσου (m) για να δωθεί μία τελική τιμή στην κατηγορία μεσαίου σημείου. [12]

$$S_m^{midpoint} = \sum_i (CF_{m,i}^{midpoint} u_i) \quad (1.2)$$

Η τελική τιμή στην κατηγορία του μεσαίου σημείου εκφράζεται συχνά σε μονάδες ισοδύναμης μάζας μιας ουσίας αναφοράς. Για παράδειγμα, όλες οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (CO₂, CH₄, NO₂, κ.λπ.) μπορεί να εκφραστούν ως ισοδύναμες εκπομπές CO₂, με βάση το πόσο συνεισφέρει 1 kg αερίων ρύπων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε σχέση με 1 kg CO₂. Για την κατηγορία της υπερθέρμανσης του πλανήτη, η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή παρέχει δείκτες χαρακτηρισμού για τα αέρια του θερμοκηπίου, που ονομάζονται δυναμικά θέρμανσης του πλανήτη. Δεδομένου ότι τα αέρια αυτά παραμένουν στην ατμόσφαιρα με τη μεταβολή του χρόνου, το δυναμικό αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη μιας ουσίας εξαρτάται από το "Χρονικό ορίζοντα". [12], [23]

Τέλος, στο στάδιο του χαρακτηρισμού των εκπομπών στην κατηγορία των τελικών επιπτώσεων ή γενικών ζημιών πραγματοποιείται η μετάβαση από το μέσο σημείο στο τελικό. Στο σημείο αυτό αξιολογείται η συνεισφορά κάθε ενδιάμεσης κατηγορίας επιπτώσεων σε μία ή περισσότερες γενικές κατηγορίες ζημιών. Δεδομένου ότι κάθε ρυπογόνος ουσία συμβάλλει σε μία ή περισσότερες κατηγορίες μεσαίων σημείων, κάθε ενδιάμεση επίπτωση μπορεί να συμβάλλει σε μία ή περισσότερες κατηγορίες τελικών ζημιών. Για να ποσοτικοποιηθεί αυτή η συνεισφορά πολλαπλασιάζεται η τιμή της επίπτωσης μιας κατηγορίας των ενδιάμεσων σημείων με ένα συντελεστή χαρακτηρισμού που αντιπροσωπεύει τη μετάβαση από το ενδιάμεσο στο τελικό σημείο.

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η ζημία που προκάλεσε στην κατηγορία επιπτώσεων του τελικού σημείου. Η συνολική εκτίμηση του αντίκτυπου του τελικού σημείου στην κατηγορία των τελικών ζημιών (d) που παρατηρείται η επιβάρυνση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση, που αποτελεί ένα άθροισμα αντικτύπων. [12]

$$S_d^{damage} = \sum_i (CF_{d,i}^{damage} u_i) \quad (1.3)$$

$$CF_{d,i}^{damage} = \sum_m MDF_{d,m} \times CF_{m,i}^{midpoint} \quad (1.4)$$

Για παράδειγμα, οι συνολικές επιβαρύνσεις που σημειώνονται στην κατηγορία της Ανθρώπινης Υγείας, που είναι ένα πεδίο επιπτώσεων των τελικών ζημιών, προκύπτουν από το άθροισμα των ζημιών που φέρουν επιπτώσεις στο αναπνευστικό σύστημα καθώς κι από το άθροισμα των ζημιών που προκαλεί η υπερθέρμανση του πλανήτη και το φωτοχημικό νέφος. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι συντελεστές χαρακτηρισμού που αντιπροσωπεύουν τη μετάβαση από το ενδιάμεσο στο τελικό σημείο εκτίμησης του αντίκτυπου. [12]

Πίνακας 1.2 : Κύριες κατηγορίες επιπτώσεων, παράγοντες χαρακτηρισμού που σχετίζονται με ζημιές στην ανθρώπινη υγεία (Human Health) (HH), την ποιότητα του οικοσυστήματος (Ecosystem Quality) (EQ) και τις υπηρεσίες και τους πόρους των οικοσυστημάτων (Ecosystem Resources) (ER) [12]

Midpoint Impact Categories	Damage Categories	Damage Categories		
		HH	EQ	ER
Name	Unit	DALY	PDF-m ² -year ^a	\$
Global warming	kgCO ₂ -eq	8.3 × 10 ⁻⁷ + 2.0 × 10 ⁻⁶ LT ^b	0.185 + 0.43 LT	
Marine acidification	kgCO ₂		0.0165 + 0.152 LT	
Land occupation, biodiversity	ha-year arable eq		6000	
Fossil energy use	MJ deprived			0.005 ^c
Mineral resources use	kg deprived			Interim
Water use	m ³ deprived	1.8 × 10 ⁻⁴	0.0020	Interim
Terrestrial acidification	kgSO ₂ -eq		8.32	
Aquatic eutrophication	kg PO ₄ P-lim eq		55.3	
Marine eutrophication	kg N N-lim eq		12.5	
Aquatic ecotoxicity (USEtox)	CTU _e [*]		1	
Toxicity cancer (USEtox)	CTU _h	11.5		
Toxicity noncancer (USEtox)	CTU _h	2.7		
Ionizing radiations	Bq _{C-14} -eq	2.1 × 10 ⁻¹⁰	1.9 × 10 ⁻¹⁰	
Respiratory inorganics (PM)	kg _{PM2.5} -eq	0.00083		
Respiratory organics	kg _{NM VOC} -eq	3.9 × 10 ⁻⁸		
Ozone layer depletion	kg _{CFC-11} -eq	0.00176		

Note: For example, global warming causes 8.3 × 10⁻⁷ DALY (disability-adjusted life years) per kilogram of CO₂ equivalent emitted.

^a Potentially disappeared fraction of species over 1 m² in 1 year.

^b LT stands for long-term impacts beyond 100 years, so the top number represents impact for the first 100 years.

^c This midpoint to end point damage factor is substance specific.

*CTU refers to USEtox comparative toxic units, corresponding to potentially affected fraction of species-cubic meter-days per kilogram for ecosystem impacts (CTU_e) and to cases of cancer and noncancer for HH impacts (CTU_h).

Εκτός από τα τρία στάδια που ορίστηκαν προηγουμένως, η εκτίμηση των επιπτώσεων μπορεί να περιλαμβάνει τρία προαιρετικά στάδια για την ενίσχυση της ερμηνείας και της εξαγωγής συμπερασμάτων: την ομαλοποίηση, την ομαδοποίηση και τη στάθμιση. [12] Για την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας εφαρμόστηκε το βήμα της ομαλοποίησης.

Οι μονάδες αναφοράς πολλών κατηγοριών ενδιάμεσων σημείων και κάποιων τελικών ζημιών δεν είναι συχνά εξ' αρχής κατανοητές. Επομένως, οι συνεπαγόμενες επιπτώσεις είναι δύσκολο να ερμηνευτούν. [1], [12] Το βήμα της ομαλοποίησης εκφράζει μια συγκεκριμένη επίπτωση ανά λειτουργική μονάδα που σχετίζεται με το συνολικό αντίκτυπο σε αυτήν την κατηγορία για την καλύτερη κατανόηση του μεγέθους της ζημίας. Επομένως, συγκρίνει την αντίστοιχη συνεισφορά του υπό εξέταση προϊόντος ή υπηρεσίας προς το σημερινό συνολικό αποτέλεσμα σε παγκόσμιο επίπεδο για μίας δεδομένης κατηγορίας επιπτώσεων (μεσαίο σημείο ή ζημία). Συγκεκριμένα, συνίσταται να γίνεται ομαλοποίηση στην κατηγορία των τελικών ζημιών κι όχι των ενδιάμεσων, διότι η κανονικοποίηση του μεσαίου σημείου δηλώνει το μέγεθος συμβολής μόνο για την κατηγορία των ενδιάμεσων επιπτώσεων. Όμως για τη συνολική εκτίμηση των επιπτώσεων μιας διεργασίας είναι αναγκαίο να δίνεται η συνολική βαρύτητα των επιβαρύνσεων, στη διαδρομή από το ενδιάμεσο σημείο στο τελικό. Για αυτό το λόγο η ομαλοποίηση πραγματοποιείται στην κατηγορία των τελικών ζημιών. Επομένως, η συνολική κανονικοποιημένη εκτίμηση (S_d) [12] σε μία κατηγορία των τελικών ζημιών (d) για 1 άτομο/FU ή 1 χρόνο/FU εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση :

$$S_{d-normalized}^{damage} = \frac{S_d^{damage}}{N_d} \quad (1.5)$$

Αυτή η συνολική ζημία υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό των συνολικών ετήσιων παγκόσμιων εκπομπών ή εξορύξεων σε μία περιοχή r ($u_{i,total,r}$, π.χ. kgCO₂-eq /έτος) με τους αντίστοιχους συντελεστές χαρακτηρισμού μεσαίας τάξης ή τελικών ζημιών και με τη διαίρεση του με το συνολικό πληθυσμό P της εξεταζόμενης περιοχής r ($P_{total,r}$, άτομο) ώστε να υπάρχει μια κανονικοποιημένη βαθμολογία ανά άτομο. Η ομαλοποιημένη τιμή για την κατηγορία ζημιών d , N_d , είναι έτσι [12]

$$N_d = \frac{CF_{m,i}^{damage} \times u_{i,total,r}}{P_{total,r}} \quad (1.6)$$

1.5. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Η τέταρτη και τελευταία φάση μιας AKZ είναι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η πλειονότητα των ερμηνειών των αποτελεσμάτων συμβαίνει μετά τον ορισμό του στόχου, την απογραφή και την εκτίμηση των επιπτώσεων.[20], [23] Θα ήταν πιο χρήσιμο να εφαρμόζεται και σε κάθε φάση χωριστά, σαν μια επαναληπτική διαδικασία, ώστε να υπάρχει μία πιο ολοκληρωμένη και λεπτομερής εικόνα των αποτελεσμάτων, καθώς και να αποφευχθεί η όποια παράληψη.

Σκοπός της φάσης της ερμηνείας είναι αρχικά να προσδιοριστούν τα στάδια του κύκλου ζωής στα οποία η όποια παρέμβαση μπορεί να μειώσει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος ή του προϊόντος και στη συνέχεια να τεθούν προτεραιότητες για τη λήψη κατάλληλων μέτρων. [1] Συγκεκριμένα, σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η ανάλυση των σχετικών αβεβαιοτήτων που προκύπτουν κατά τη μελέτη της διεργασίας, η απόδοση κι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων μέσω της αλληλεπίδρασης των τριών προηγούμενων σταδίων, εντοπίζονται σημαντικά θέματα στα οποία η μέθοδος AKZ θα προσφέρει λύσεις, αξιολογείται η ισορροπία μεταξύ του ανθρώπου, του οικοσυστήματος και του κοινωνικού περιβάλλοντος, εξηγούνται οι περιορισμοί της μελέτης και τέλος εξάγονται τα απαραίτητα συμπεράσματα.

Για να επιτευχθούν οι στόχοι, η φάση της ερμηνείας πρέπει να περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των κρίσιμων σημείων στον κύκλο ζωής, δηλαδή στην απογραφή και την εκτίμηση των επιπτώσεων καθώς και να προσδιορίζονται τρόποι βελτίωσης για τη μείωση της κατανάλωσης των πόρων και την ενέργειας. Επιπρόσθετα, πρέπει να αξιολογείται η ποιότητα των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας μια σειρά από ελέγχους όπως ο ποιοτικός έλεγχος κι ανάλυση της αβεβαιότητας. Τέλος, πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι μεθοδολογίες που έχουν ακολουθηθεί σε όλη τη μελέτη της διεργασίας, οι κανόνες κατανομής, τα όρια του συστήματος καθώς και τα πρότυπα μοντέλα.

Πρακτικά, για να συμβεί η σωστή κι ολοκληρωμένη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, ένα πρώτο βήμα είναι να δοθεί η απαραίτητη σημασία στα στάδια του κύκλου ζωής και στις ομάδες των διαδικασιών που επιφέρουν το μεγαλύτερο αντίκτυπο. Ωστόσο, αυτή η ομαδοποίηση των διαδικασιών μπορεί να είναι αυθαίρετη και να εξαρτάται μόνο από τον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνεται το σύστημα. Γι αυτό το λόγο θα πρέπει να δίνεται μεγάλη σημασία στις διαδικασίες, διότι μια διαδικασία ως μεμονωμένη ενότητα μπορεί να έχει μικρή επιβάρυνση, αλλά όταν αθροίζεται στην τελική τιμή της εκτίμησης του αντίκτυπου να οδηγήσει σε σημαντικές επιπτώσεις. [12], [14]

Επιπλέον, ολοκληρωμένη ερμηνεία μπορεί να πραγματοποιηθεί με το να δοθεί έμφαση στα στάδια του κύκλου ζωής που υπάρχει η υψηλότερη δυνατότητα μείωσης των επιπτώσεων με περιορισμένες Τέλος, η σημασία αυτού του τελευταίου σταδίου της AKZ αποδεικνύεται από το γεγονός ότι δίνεται μεγάλη ευκαιρία και δυνατότητα στις εταιρείες να βελτιώσουν τις λειτουργίες τους, μειώνοντας τις επιβαρύνσεις και τις επιπτώσεις κι επενδύοντας με σωστότερο και φιλικότερο τρόπο προς το περιβάλλον. [14]

1.6. Λογισμικό AKZ

1.6.1. SimaPro 8.3

Οι μελέτες AKZ χρησιμοποιούν μεγάλο όγκο δεδομένων, καθιστώντας αδύνατη την εκτέλεση των υπολογισμών με μη-αυτόματο τρόπο κι ως εκ τούτου απαιτείται η χρήση εξειδικευμένου λογισμικού για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και των επιπτώσεων. [23]

Το SimaPro έχει σχεδιαστεί για την απλή παρουσίαση κι ερμηνεία των αποτελεσμάτων της απογραφής και των επιπτώσεων της κάθε διαδικασίας. Είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση μελετών AKZ, σύμφωνα με τους κανόνες ISO [21], [23] και την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων κι υπηρεσιών καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε η τελευταία έκδοση του λογισμικού η SimaPro 8.3 η οποία περιλαμβάνει πολλές βάσεις δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής, συμπεριλαμβανομένης της βάσης δεδομένων Ecoinvent v3.3. Πρόκειται για μία από τις πιο εκτεταμένες διεθνείς βάσεις δεδομένων με 10.000 διεργασίες σχετικές με ένα ευρύ φάσμα τομέων. [23]

1.6.2. Βάση δεδομένων αποθέματος

Η Ecoinvent είναι μία βάση δεδομένων αποθέματος που στοχεύει να συνδυάσει και να ενισχύσει διαφορετικά υπάρχοντα αποθέματα για να αποκτηθεί στο τέλος ένα ενοποιημένο και γενικό σύνολο δεδομένων αποθεμάτων εξαιρετικά υψηλής ποιότητας.

Αρχικά αναπτύχθηκε για την Ελβετία και τις χώρες της Δυτικής Ευρώπης, αλλά προσαρμόζεται όλο και περισσότερο σε παγκόσμια σύνολα δεδομένων. Τα στοιχεία αποθέματος αναφέρονται σε ένα μεγάλο αριθμό προϊόντων κι υπηρεσιών. [23] Συγκεκριμένα, η βάση δεδομένων Ecoinvent αποτελείται από περισσότερες από 4000 διαδικασίες συνδεδεμένες με ροές υλικών κι ενέργειας που καλύπτουν περισσότερες από 400 ουσίες και πόρους. Εκτός από τις ποσοτικές πληροφορίες σχετικά με τις εισροές και τις εκροές, συμπεριλαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με την τεχνολογική, χρονική και γεωγραφική εγκυρότητα των δεδομένων της διεργασίας. Η βάση δεδομένων οργανώνεται σύμφωνα με τις ακόλουθες κύριες κατηγορίες:

- Πηγές ενέργειας
- Κατασκευαστικά υλικά και διαδικασίες
- Χημικά
- Απορρυπαντικά
- Χαρτί
- Υπηρεσίες επεξεργασίας αποβλήτων

- Γεωργικά προϊόντα και διαδικασίες
- Μεταφορά.

1.6.3. Μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων

Η IMPACT 2002+ είναι η μέθοδος (αλγόριθμος) εκτίμησης των επιπτώσεων που έχει επιλεγεί για την ΑΚΖ της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Η μέθοδος αυτή παρέχει αποτελέσματα τόσο για τις ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων όσο και για τις κατηγορίες των γενικών ζημιών/βλαβών. Αρχικά, τα αποτελέσματα του αποθέματος ομαδοποιούνται σε δεκατέσσερις ενδιάμεσες κατηγορίες αντίκτυπου με παρόμοιους μηχανισμούς επιπτώσεων. Στη συνέχεια αυτές οι ενδιάμεσες κατηγορίες διακλαδίζονται σε τέσσερις κατηγορίες ζημιών που αντιπροσωπεύουν τις αλλαγές στην ανθρώπινη υγεία και την περιβαλλοντική ποιότητα. [12], [23]

Στην IMPACT 2002+ ο κανονικοποιημένος παράγοντας ζημίας λαμβάνεται διαιρώντας τις υπολογισμένες επιπτώσεις με τις συνολικές επιπτώσεις όλων των ευρωπαϊκών εκπομπών που συνεισφέρουν στην εξεταζόμενη κατηγορία, κατά προτίμηση κατηγορία γενικών ζημιών. Επομένως, η τελική τιμή εκφράζεται σε ισοδύναμα άτομα-έτη/FU. Τέλος, ο γενικός στόχος της IMPACT 2002+ είναι να ομαδοποιήσει τις κατηγορίες των ενδιάμεσων επιπτώσεων σε τέσσερις κατηγορίες ζημιών: την ανθρώπινη υγεία, την ποιότητα του οικοσυστήματος, την κλιματική αλλαγή και τους πόρους. [23]

Η τοξικότητα στον άνθρωπο, είτε είναι καρκινογόνα είτε μη, η ιονίζουσα ακτινοβολία, η εξάντληση της στιβάδας του όζοντος, οι επιδράσεις των ανόργανων σωματιδίων στο αναπνευστικό σύστημα κι ο φωτο-οξειδωτικός σχηματισμός είναι οι κατηγορίες μεσαίων σημείων που συμβάλλουν στη ζημία της ανθρώπινης υγείας. [23] Οι επιπτώσεις των τοξικών ουσιών στους ανθρώπους και στα οικοσυστήματα μοντελοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας την μέθοδο IMPACT 2002+ το έτος 2002, με ένα μοντέλο έκθεσης πολυμέσων και πολλαπλών διαδρομών που αναπτύχθηκε για τη Δυτική Ευρώπη. Αυτό το μοντέλο επιτρέπει επίσης τη χωρική διαφοροποίηση και κατανομή σε 135 Ευρωπαϊκές περιφέρειες. Για την τοξικότητα στον άνθρωπο, η ζημία στην ανθρώπινη υγεία υπολογίζεται απευθείας στο επίπεδο των ζημιών και στη συνέχεια υπολογίζεται ξανά όσον αφορά την ουσία αναφοράς για την εν λόγω ενδιάμεση κατηγορία, που είναι το χλωριούχο βινύλιο. Οι συντελεστές χαρακτηρισμού που αντιπροσωπεύουν τη μετάβαση από τις κατηγορίες ενδιάμεσων επιπτώσεων στις τελικές ζημίες μετατρέπουν οποιαδήποτε ενδιάμεση επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία από χιλιόγραμμα (kg) ισοδύναμης ουσίας σε επιπτώσεις τελικών ζημιών εκφραζόμενες σε DALYS, αντιπροσωπεύοντας δηλαδή τα χρόνια ζωής που χάνει ένας άνθρωπος εξαιτίας των επιπτώσεων του υλικού ή αντιπροσωπεύοντας μια αναπηρία ή ασθένεια που προκλήθηκε από το υλικό αυτό. [23] Μία τιμή ομαλοποίησης για τις ζημίες στην ανθρώπινη υγεία είναι 0.0068 DALY/άτομο-έτος που αντιστοιχεί σε μείωση ζωής προσδοκία 0.5 έτους ανά άτομο κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Αυτή η τιμή υπολογίζεται αθροίζοντας όλες τις επιπτώσεις που έχουν επίδραση στην ανθρώπινη υγεία, εξαιρουμένων εκείνων που προκαλούνται από την αλλαγή του κλίματος.

Ακολουθούν, οι κατηγορίες των ενδιάμεσων επιπτώσεων που συμβάλλουν στην απώλεια της ποιότητας του οικοσυστήματος, που είναι η υδάτινη οικοτοξικότητα του εδάφους, η υδάτινη οξίνιση, ο χερσαίος ευτροφισμός κι η χρήση της γης. Η ζημία που προκαλείται στο οικοσύστημα μετριέται σε PDF (potentially disappeared fraction of species), εκφράζοντας τα είδη που έχουν εξαφανιστεί σε ένα τετραγωνικό μέτρο (m^2) γης σε χρονικό διάστημα ενός έτους. Οι ζημίες που σχετίζονται με την ποιότητα του οικοσυστήματος έχουν τιμή ομαλοποίησης 13.700 PDF (m^2 -έτος/άτομο). Αυτή η τιμή κανονικοποίησης προσδιορίστηκε συνδυάζοντας όλες τις επιπτώσεις του οικοσυστήματος που οφείλονται στην υδρόβια και χερσαία οικοτοξικότητα, τον ευτροφισμό, την υδάτινη και γήινη οξίνιση και τη χρήση της γης. [12], [23]

Σχετικά με τις επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή, υπάρχουν συντελεστές χαρακτηρισμού για πολλαπλούς χρονικούς ορίζοντες, όπου ο καθένας αντιπροσωπεύει τη συμβολή του στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη σε καθορισμένο χρόνο. Η μέθοδος IMPACT 2002+ χρησιμοποιεί ως χρονικό ορίζοντα τα 500 έτη για τον υπολογισμό των συντελεστών χαρακτηρισμού. [12] Η τιμή της κανονικοποίησης για την αλλαγή του κλίματος αντιστοιχεί στην ποσότητα των αέριων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται ανά άτομο ετησίως στην Ευρώπη. Η τιμή αυτή είναι 9950 kgCO₂-eq/άτομο/έτος.

Τέλος, οι δύο ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων που εντείνουν το πρόβλημα της κρισιμότητας των πόρων είναι η κατανάλωση της μη ανανεώσιμης πρωτογενούς ενέργειας κι η εξόρυξη των ακατέργαστων πρώτων υλών και μεταλλευμάτων. Επειδή οι ενεργειακοί πόροι εκφράζονται σε όρους μη-ανανεώσιμης πρωτογενούς ενέργειας, οι συντελεστές χαρακτηρισμού των πόρων περιλαμβάνουν την πλεονάζουσα ενέργεια που απαιτείται για την εξόρυξη μελλοντικών πόρων καθώς και το συνολικό μη ανανεώσιμο πρωτογενές ενεργειακό περιεχόμενο των ορυκτών καυσίμων. [12], [23] Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που αποτελούν μη ανανεώσιμη πρωτογενή ενέργεια, άλλες μορφές εναλλακτικής ενέργειας όπως οι ανανεώσιμες, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ευνοώντας έτσι την οικονομία και την περιβαλλοντική ισορροπία. Η τιμή της κανονικοποίησης για τη ζημία των πόρων βασίζεται στην ετήσια κατανάλωση μη ανανεώσιμης πρωτογενούς ενέργειας ανά άτομο στη Δυτική Ευρώπη, η οποία είναι 152.000 MJ/άτομο/έτος.

Κεφάλαιο 2^ο: Ανάλυση Κύκλου Ζωής σε Μεσομεταλλικές ενώσεις και Κρίσιμες Πρώτες Ύλες

2.1. Εισαγωγή στις Μεσομεταλλικές ενώσεις

Μετά το Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο ορισμένες χώρες της Ανατολικής Ευρώπης αντιμετώπιζαν σοβαρά προβλήματα σχετικά με την παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα κι υλικών που χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, λόγω της δυσκολίας αγοράς Cr και της έλλειψης Ni. Για να ξεπεραστεί αυτή η έλλειψη, η Σοβιετική Ένωση κι η Τσεχοσλοβακία ξεκίνησαν μία ισχυρή εταιρική σχέση μεταξύ των εθνικών ερευνητικών ιδρυμάτων, των πανεπιστημίων και της τοπικής βιομηχανίας. [24] Σκοπός αυτής της συνεργασίας ήταν η ανάπτυξη εναλλακτικών λύσεων, χαμηλού κόστους και θερμικής ανθεκτικότητας, όπως για παράδειγμα χυτοσίδηρο και κράματα ανοξείδωτου χάλυβα που βασίζονται σε μεσομεταλλικές ενώσεις από Fe και Al. Αυτές οι προσπάθειες είχαν σαν αποτέλεσμα την παραγωγή των υλικών Thermagal, Tchugal και Pyroferal. Το Pyroferal, το οποίο κατασκευάστηκε μόνο με χύτευση, είχε αρκετά καλή αντοχή στη διάβρωση σε υψηλές θερμοκρασίες. [2] Όμως, το Pyroferal και τα άλλα υλικά αντιμετώπιζαν προβλήματα κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, η οποία δεν ήταν σημαντική μόνο για την παραγωγή περίπλοκων σχημάτων, αλλά και για την αποκατάσταση τυχόν ελαττωμάτων. Αυτά τα προβλήματα δεν μπορούσαν να ξεπεραστούν από την επιστήμη των υλικών εκείνης της εποχής. Στη δεκαετία του '60 η πρόσβαση στο Cr δεν αποτελούσε πλέον πρόβλημα από οικονομικής πλευράς, όμως άρχιζε σιγά σιγά να υπάρχει πρόβλημα με την διαθεσιμότητά του. Έτσι, το Cr και το Ni καταγράφηκαν στον πίνακα των Κρίσιμων Πρώτων Υλών (Critical Raw Materials) (CRMs) με τρέχουσα προβλεπόμενη διάρκεια ζωής 25-100 έτη. [24]

Επομένως, υπήρξε κι υπάρχει ακόμα ανάγκη να εξευρεθούν λύσεις για την υποκατάσταση των Κρίσιμων Πρώτων Υλών όπως το Cr, το Ni, το Mo και το V σε προϊόντα υψηλής κατανάλωσης. Αυτό το ζήτημα έρχεται να ερευνηθεί η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, παρουσιάζοντας ως εναλλακτική λύση μια νέα τεχνολογία παραγωγής, που θα επιτρέπει την αντικατάσταση τμημάτων ανοξείδωτου χάλυβα από μεσομεταλλικές ενώσεις αποτελούμενες από Fe και Al κι απαλλαγμένες από Κρίσιμες Πρώτες Ύλες. [3], [4], [5] Τα τελευταία χρόνια, οι μεσομεταλλικές ενώσεις έχουν προσελκύσει σημαντικά την προσοχή ως πιθανά, νέα υλικά για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο λόγος που τα καθιστά τόσο τόσο περιζήτητα είναι ότι συχνά διαθέτουν πολλές επιθυμητές ιδιότητες όπως χαμηλή πυκνότητα, υψηλό σημείο τήξης και υψηλή αντοχή στη διάβρωση. Η ατομική κινητικότητα είναι εξαιρετικά περιορισμένη σε αυτά τα υλικά λόγω της χημικής τάξης και, ως εκ τούτου, μεταλλουργικές διεργασίες, όπως ερπυσμός, διάβρωση κι ανακρυστάλλωση παρεμποδίζονται έντονα. [15], [16]

Ωστόσο, ένα σοβαρό μειονέκτημα που περιορίζει την εφαρμογή και τη λειτουργία των μεσομεταλλικών είναι η μειωμένη αντοχή τους σε θραύση, ιδιαίτερα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου υλικού, που παραμορφώνεται πλαστικά με

συμπύεση, αλλά θραύεται πολύ εύκολα όταν υποστεί τάση, είναι το Al_3Ti . [15] Επίσης, μεσομεταλλικές ενώσεις όπως το Αλουμίνιο του Σιδήρου (Fe_3Al) συγκέντρωσαν το ενδιαφέρον από το 1930, όταν σε σύνθετα υλικά με ποσοστό Al περίπου 18%, εμφάνισαν εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. [14], [16] Αυτά τα κράματα χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος υλικών κι από χαμηλότερη πυκνότητα από τους ανοξείδωτους χάλυβες. Τέλος, το Fe_3Al έχει λίγες σχετικά δομικές εφαρμογές, λόγω της περιορισμένης ολκιμότητας σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος κι έλλειψη αντοχής πάνω από 6000°C. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι η βελτιωμένη μηχανική ολκιμότητα των κραμάτων μπορεί να επιτευχθεί μέσω ελέγχου της σύνθεσης και της μικροδομής τους. Η βελτίωση αυτή συνεισέφερε στην κατανόηση των αιτιών για τη θραύση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

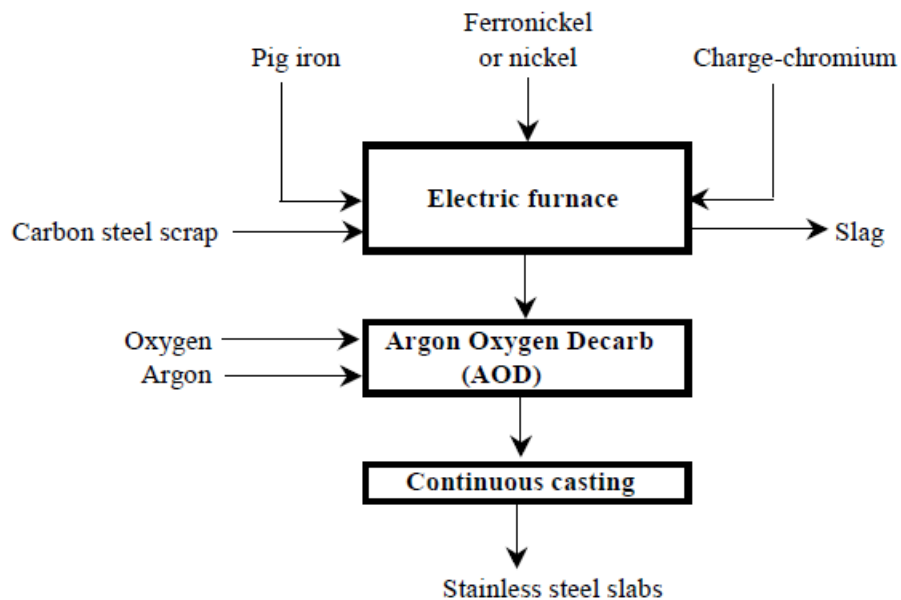
2.1.1. Ανάλυση Κύκλου Ζωής σε Μεσομεταλλικές ενώσεις

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζεται, μέσω χρήσης δεδομένων απογραφής από βιβλιογραφική ανασκόπηση, η ΑΚΖ της παραγωγής ανοξείδωτου χάλυβα (Σχήμα 2.1), [10], [16] συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής Ni, σιδηρονικελίου, σιδηροχρωμίου και Fe. Οι κατηγορίες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που εξετάστηκαν στη μελέτη ήταν το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, η πιθανότητα οξίνισης κι η συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας των κατάλληλων δεδομένων για μία πλήρη προσέγγιση της ΑΚΖ καθώς και του χρονικού περιορισμού για να συλλεχθούν τα δεδομένα (Πίνακας 2.1), [10], [18] το όριο του συστήματος μελέτης περικλείει τις διεργασίες που λαμβάνουν μέρος από το σημείο που ο ανοξείδωτος χάλυβας είναι εξευγενισμένος κι έτοιμος για δευτερογενή επεξεργασία. Η λειτουργική μονάδα για την ΑΚΖ ήταν το 1 kg ανοξείδωτου χάλυβα. Επιπλέον όλες οι επιπτώσεις εκφράστηκαν ανά kg.

Πίνακας 2.1 : Διαδικασίες και πρώτες ύλες που περιλαμβάνονται στη μελέτη ΑΚΖ. Συγκεκριμένα στον πίνακα παρουσιάζονται οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του ανοξείδωτου χάλυβα, τα αντίστοιχα ποσοστά (%) αυτών των πρώτων υλών καθώς κι οι διαδικασίες που παίρνουν μέρος

Metal	Feedstock	Process
Iron/steel	Iron ore (64% Fe)	Blast furnace & Basic Oxygen furnace
Nickel	Sulphide ore (2.3% Ni)	Flash smelting & Sherritt-Gordon refining
Ferrochromium	Chromite ore (27.0% Cr, 17.4% Fe)	Pelletising/sintering/pre-reduction/ submerged arc furnace
Ferronickel	Laterite ore (2.4% Ni, 13.4% Fe)	Rotary kiln / electric furnace
Stainless steel	Pig iron (94% Fe, 4.4% C) Ferrochromium (55% Cr, 30% Fe) Ferronickel (23% Ni, 69% Fe) Nickel (100% Ni)	Electric arc furnace / argon oxygen decarburization



Σχήμα 2.1 : Σχηματική απεικόνιση της παραγωγής ανοξείδωτου χάλυβα. Παρουσιάζονται τόσο οι πρώτες ύλες που είναι απαραίτητες για την παραγωγή του ανοξείδωτου χάλυβα όπως ο ακατέργαστος Fe (Pig iron) όσο κι οι αναγκαίες διεργασίες όπως η συνεχής χύτευση (Continuous casting) [10]

Οι παραδοχές για την παραγωγή σιδηροχρωμίου, σιδηρονικελίου κι ανοξείδωτου χάλυβα κατά την διεξαγωγή της AKZ [10] ήταν οι εξής :

- Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από μαύρο άνθρακα, με την υψηλότερη θερμιδική αξία τα 30 MJ/kg
- Βαθμός συμπύκνωσης 56% για το Cr_2O_3
- Σύσταση σιδηροχρωμίου : 55% Cr, 7% C, 1.5% Ni και 30% Fe
- Σύσταση σιδηρονικελίου : 23% Ni, 69% Fe, 1.9% C και 1.3% Cr
- Σύσταση ανοξείδωτου χάλυβα : 68.6% Fe, 9.3% Ni, 19.8% Cr και 0.08% C
- Η αναλογία θραυσμάτων χάλυβα προς ακατέργαστο χάλυβα είναι 0.054.

Τα δεδομένα απογραφής των τριών διεργασιών παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες.

Πίνακας 2.2 : Στοιχεία απογραφής για την παραγωγή σιδηροχρωμίου [10]

Stage	Inventory		
Mining	Electricity	2.2	kWh/t ore
	Diesel	0.001	t/t ore
Mineral processing	Electricity	32	kWh/t ore
Smelting	Electricity	2800 **	kWh/t FeCr
		4100 **	
	Coke	0.56	t/t FeCr
	Limestone	0.25	t/t FeCr
	Water	10	t/t FeCr

Πίνακας 2.3 : Στοιχεία απογραφής για την παραγωγή σιδηρονικελίου [10]

Stage	Inventory		
Mining	Electricity	3.9	kWh/t ore
	Diesel	0.0014	t/t ore
Smelting - rotary dryer	Natural gas	1.1	GJ/t ore
		0.023	t/t ore
- rotary kiln	Natural gas	2.2	GJ/t ore
		0.042	t/t ore
- electric furnace	Coal	0.077	t/t ore
	Electricity	470	kWh/t ore

Πίνακας 2.4 : Στοιχεία απογραφής για την παραγωγή ανοξειδωτου χάλυβα [10]

Stage	Inventory		
EAF & AOD	<i>Ferronickel feedstock</i>		
	Pig iron	0.323	t/t s steel
	Ferronickel	0.382	t/t s steel
	Charge chromium	0.336	t/t s steel
	Carbon steel scrap	0.017	t/t s steel
	<i>Nickel feedstock</i>		
	Pig iron	0.586	t/t s steel
	Nickel	0.088	t/t s steel
	Charge chromium	0.345	t/t s steel
	Carbon steel scrap	0.032	t/t s steel
	Electricity	600	kWh/t s steel
	Oxygen	0.036	t/t s steel
	Argon	0.032	t/t s steel
Electrodes	0.004	t/t s steel	
Continuous casting	Electricity	25	kWh/t s steel

Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά, μεμονωμένα μοντέλα υπολογιστικών φύλλων LCA για τις διαφορετικές διαδικασίες παραγωγής μετάλλων. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 2.5. [10] Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα της AKZ έδειξαν ότι ο ανοξειδωτος χάλυβας που παράγεται χρησιμοποιώντας σιδηρονικέλιο ως πηγή νικελίου καταναλώνει 75MJ/kg ηλεκτρική ενέργεια, ενώ ο ανοξειδωτος χάλυβας που παράγεται με τη χρήση μετάλλου Ni με κύρια πηγή Ni το ίδιο το μέταλλο καταναλώνει 49 MJ/kg ηλεκτρική ενέργεια. Σημειώνεται υψηλότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή του ανοξειδωτου χάλυβα όταν η πρώτη ύλη είναι το σιδηρονικέλιο, διότι η παραγωγή του ίδιου του σιδηρονικελίου απαιτεί 110 MJ/kg κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που καταναλώνουν οι ηλεκτρικοί κλίβανοι που χρησιμοποιήθηκαν και για τις τρεις

διεργασίες συνείσφερε περίπου στο 50% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται μόνο για την διεργασία παραγωγής του ανοξειδωτού χάλυβα.

Πίνακας 2.5 : Αποτελέσματα AKZ για παραγωγή ανοξειδωτού χάλυβα [10]

Environmental impact	Feedstock materials for stainless steel production				304 Stainless steel	
	Iron	Nickel	Ferrochrome	Ferronickel	From nickel	From ferronickel
Total energy (MJ/kg)	22	114	56	110	49	75
Gaseous emissions						
CO ₂ (kg/kg)	2.0	11.1	5.1	8.9	4.8	6.6
CO (g/kg)	1.9	2.9	5.4	5.6	3.4	4.7
N ₂ O (g/kg)	0.02	0.05	0.06	0.07	0.04	0.06
CH ₄ (g/kg)	2.6	16.6	6.2	18.4	6.0	10.8
NO _x (g/kg)	12.6	44.6	29.6	70.6	24.8	44.1
NM ₂ VOC ^{**} (g/kg)	0.20	2.7	0.17	1.6	0.4	0.8
SO ₂ (kg/kg)	0.007	0.107	0.018	0.026	0.022	0.020
GWP (kg CO ₂ e/kg)	2.1	11.4	5.3	9.3	4.9	6.8
AP (kg SO ₂ e/kg)	0.015	0.138	0.039	0.075	0.039	0.051

2.2. Εισαγωγή στις Κρίσιμες πρώτες ύλες

Οι πρώτες ύλες είναι ζωτικής σημασίας για την ευρωπαϊκή και την παγκόσμια οικονομία. Αποτελούν μια ισχυρή βιομηχανική βάση, που παράγει ένα ευρύ φάσμα προϊόντων κι εφαρμογών που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή και τις σύγχρονες τεχνολογίες. Επίσης, οι πρώτες ύλες είναι εξαιρετικά σημαντικές για την ανάπτυξη των αναδυόμενων καινοτομιών στην Ευρώπη, οι οποίες είναι απαραίτητες για την εδραίωση πιο οικολογικών, φιλικών προς το περιβάλλον και παγκοσμίως ανταγωνιστικών τεχνολογιών.[3], [17] Η ταχεία ανάπτυξη αυτών των αναδυόμενων καινοτομιών έχει οδηγήσει στην αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης μετάλλων κι ορυκτών. Η εξασφάλιση της πρόσβασης κι η επαρκής διαθεσιμότητα των πρώτων υλών έχει αποτελέσει μεγάλη πρόκληση για τις εθνικές και περιφερειακές οικονομίες, καθώς και της ευρωπαϊκής οικονομίας, η οποία βασίζεται στις εισαγωγές ορυκτών και μετάλλων που απαιτούνται για την κάλυψη των βιομηχανικών αναγκών, συμπεριλαμβανομένων πολλών κρίσιμων πρώτων υλών.

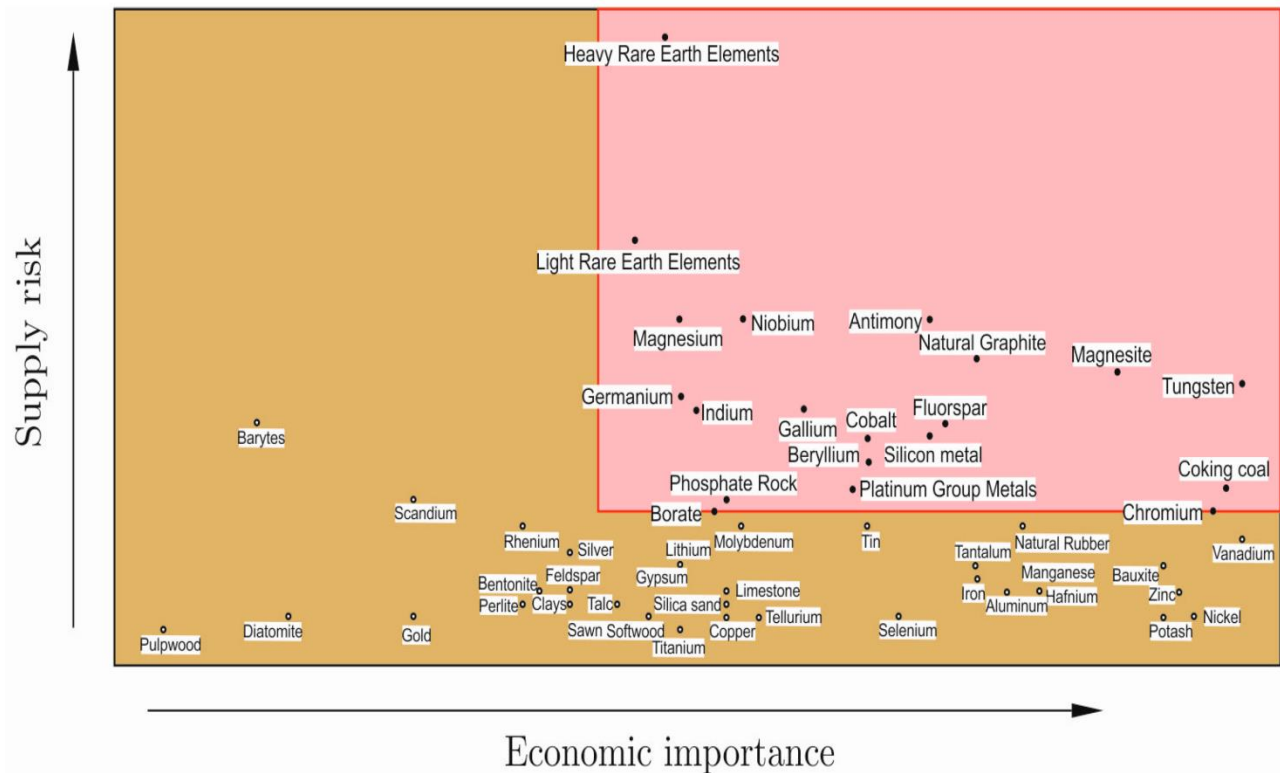
Για να αντιμετωπιστεί η αυξανόμενη ανησυχία για την εξασφάλιση πολύτιμων πρώτων υλών της ευρωπαϊκής οικονομίας, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ξεκίνησε το 2008 τη δράση της Ευρωπαϊκής Πρωτοβουλίας για τις Πρώτες Ύλες. [3], [4] Πρόκειται για μία ολοκληρωμένη στρατηγική που καθορίζει συγκεκριμένα μέτρα για την εξασφάλιση, τη βελτίωση της

πρόσβασης στις ακατέργαστες πρώτες ύλες, την ενίσχυση της αποδοτικότητας των πόρων και την προώθηση της διαδικασίας της ανακύκλωσης. Μία από τις αρχικές δράσεις της πρωτοβουλίας ήταν η δημιουργία ενός καταλόγου κρίσιμων πρώτων υλών (Πίνακας 2.6) σε ευρωπαϊκό επίπεδο λόγω της υψηλής ζήτησης αυτών των πρώτων υλών, οι οποίες αναζητούν άμεση υποκατάσταση για την αντιμετώπιση της έλλειψης του εφοδιασμού τους. Σύμφωνα με την τελευταία ενημέρωση του καταλόγου, που πραγματοποιήθηκε το 2017, οι κρίσιμες πρώτες ύλες απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα. [4]

Πίνακας 2.6 : Κατάλογος Κρίσιμων Πρώτων Υλών [4]

2017 Critical Raw Materials (26)			
Antimony	Gallium	Magnesium	Scandium
Baryte	Germanium	Natural graphite	Silicon metal
Beryllium	Hafnium	Natural Rubber	Tantalum
Bismuth	Helium	Niobium	Tungsten
Borate	HREEs	PGMs	Vanadium
Cobalt	Indium	Phosphate rock	
Fluorspar	LREEs	Phosphorus	

Τα συνολικά αποτελέσματα της αξιολόγησης της κρισιμότητας των πρώτων υλών που πραγματοποιήθηκε το 2017 παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2. [4] Οι κρίσιμες πρώτες ύλες βρίσκονται εντός της ζώνης κρισιμότητας του γραφήματος που παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία αντιπροσωπεύουν τις μη κρίσιμες πρώτες ύλες.



Σχήμα 2.2 : Η οικονομική σημασία κι ο κίνδυνος εφοδιασμού προκύπτουν από την εκτίμηση κρισιμότητας. Οι κρίσιμες πρώτες ύλες βρίσκονται εντός της ζώνης κρισιμότητας του γραφήματος, που παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία αντιπροσωπεύουν τις μη κρίσιμες πρώτες ύλες. Συγκεκριμένα οι κρίσιμες πρώτες ύλες καταλαμβάνουν το ροζ κομμάτι ενώ οι μη κρίσιμες το πορτοκαλί [4]

Όπως παρατηρείται από τον πίνακα και το διάγραμμα το Cr δεν συγκαταλέγεται στα κρίσιμα στοιχεία. Συγκεκριμένα στο διάγραμμα εντοπίζεται ακριβώς πάνω στη ζώνη κρισιμότητας. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει ότι υπάρχει πλήρης έλλειψη κρισιμότητας ή ότι δεν θα ξανά καταχωρηθεί ως κρίσιμη πρώτη ύλη. [6] Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, ερευνάται η υποκατάστασή του μετάλλου Cr εφόσον η ευρωπαϊκή βιομηχανία απαιτεί να παράγει τεράστιες ποσότητες ανοξείδωτου χάλυβα, αλλά δεν μπορεί να διατίθενται οι απαραίτητες ποσότητες Cr.[4], [13]

Οι κρίσιμες πρώτες ύλες είναι σημαντικές για τους εξής λόγους :

- Αποτελούν συνδετικό κρίκο με τη βιομηχανία. Οι μη-ενεργειακές πρώτες ύλες συνδέονται με όλους τους κλάδους σε όλα τα στάδια της αλυσίδας εφοδιασμού
- Έχουν άμεση σύνδεση με τη σύγχρονη τεχνολογία. Η τεχνολογική πρόοδος κι η ποιότητα ζωής βασίζονται στην πρόσβαση σε έναν αυξανόμενο αριθμό πρώτων υλών
- Άρρηκτη σύνδεση των πρώτων υλών με το περιβάλλον.

Συγκεκριμένα η Ευρωπαϊκή Επιτροπή για να διεξάγει την αξιολόγηση της κρισιμότητας των ακατέργαστων πρώτων υλών λαμβάνει υπόψιν τις παρακάτω κύριες παραμέτρους :

- Σημαντική οικονομική σπουδαιότητα: Αποτιμάται με βάση το ποσοστό της πρώτης ύλης που σχετίζεται άμεσα με κάποιον από τους μεγάλους βιομηχανικούς κλάδους (π.χ. κατασκευαστικός), σε συνδυασμό με το πόσο συμβάλλει στο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ) της Ε.Ε.
- Σημαντικός κίνδυνος ανεφοδιασμού: Ο κίνδυνος ανεφοδιασμού καθορίζεται από την πολιτική σταθερότητα των περιοχών από όπου οι πρώτες ύλες εξορύσσονται και λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η παρουσία ένοπλων συγκρούσεων, η αποτελεσματικότητα της εκάστοτε κυβέρνησης, η σχετική νομοθεσία κι η αυστηρότητά της. [6]

Έτσι, η εφαρμογή της ΑΚΖ έχει οδηγήσει σε αποτελεσματική διαχείριση των κρίσιμων πρώτων υλών και σε μία κατευθυντήρια πολιτική με σκοπό την εξεύρεση ευκαιριών με γνώμονα την καινοτομία των πρώτων υλών. Με την εφαρμογή της μεθόδου της ΑΚΖ, η ανάλυση των αποθεμάτων, το δυναμικό εξάντλησης καθώς κι η απόδοση του υλικού ανοίγουν το δρόμο για να ελαχιστοποιηθεί η χρήση των κρίσιμων πρώτων υλών και να διευκολυνθεί η υποκατάστασή τους. Στην προκειμένη περίπτωση συμβαίνει η υποκατάσταση των κρίσιμων πρώτων υλών από μεσομεταλλικές ενώσεις με βάση το Fe και το Al τα οποία στοιχεία έχουν το πλεονέκτημα της ανακύκλωσης. [7], [13]

Η ανακύκλωση είναι μία διαδικασία που αποτελεί σημαντική πηγή των πρώτων υλών αφού δίνει το πλεονέκτημα στο υλικό να επαναχρησιμοποιηθεί. Έτσι το υλικό δεν χάνεται, μπορεί να ξανά συμμετάσχει στην αλυσίδα παραγωγής τονίζοντας την κυκλική πορεία που ακολουθεί σε μία παραγωγική διαδικασία. [5],[7], [14] Επίσης μέσω της ανακύκλωσης ενισχύεται η οικονομία και μειώνεται ο κίνδυνος της προσφοράς των πρώτων υλών.

2.2.1. Ανάλυση Κύκλου Ζωής σε Κρίσιμες πρώτες ύλες

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζεται μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης, η ΑΚΖ για την παραγωγή Μαγνήτη Νεοδυμίου (NdFeB). Το Νεοδύμιο (Nd) σύμφωνα με την τρέχουσα διαθεσιμότητα είναι ένα στοιχείο των σπάνιων γαιών που συγκαταλέγεται στις κρίσιμες πρώτες ύλες και χρησιμοποιείται κυρίως σε μαγνήτες υψηλής απόδοσης. Σε αυτή την περίπτωση συγκρίνεται η παραγωγή αυτών των μαγνητών με δύο υποθετικές διαδικασίες ανακύκλωσης μαγνητών Nd που βρίσκονται σε σκληρούς δίσκους υπολογιστών, όσον αφορά τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο. Η πρώτη διαδικασία ανακύκλωσης εξετάζει την χειρωνακτική αποσυναρμολόγηση των μονάδων σκληρού δίσκου, ενώ η δεύτερη διαδικασία υποθέτει ότι οι σκληροί δίσκοι είναι τεμαχισμένοι. Η λειτουργική μονάδα για την εκτέλεση της ΑΚΖ ήταν το 1 kg μαγνητών Ne. [22]

Γενικά, υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες σχετικά με την κατάσταση της τεχνολογίας που επικρατεί στις διαδικασίες παραγωγής των Σπάνιων Γαιών. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι αβεβαιότητες αυτές, κατασκευάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια τα οποία είναι τα εξής :

- 1^ο σενάριο : Παραγωγή οξειδίων των Σπάνιων Γαιών (REO)
- 2^ο σενάριο : Παραγωγή Μαγνητών Νεοδυμίου (NdFeB)
- 3^ο σενάριο : Επιπλέον συνεισφορά στην ΑΚΖ

Για την ΑΚΖ, η παραγωγή REO μοντελοποιήθηκε με μία εμπορική διαδικασία παραγωγής Νεοδυμίου (Nd), Δημητρίου, Λανθανίου, Πρασεοτρίου, Ευρωπίου, Γαδολινίου και Σαμαρίου. Τα αποτελέσματα της ΑΚΖ αφορούν την παραγωγή 1 kg REO καθαρότητας 99% (Πίνακας 2.7) [22]

Πίνακας 2.7 : Αποτελέσματα ΑΚΖ για 1 kg REO [22]

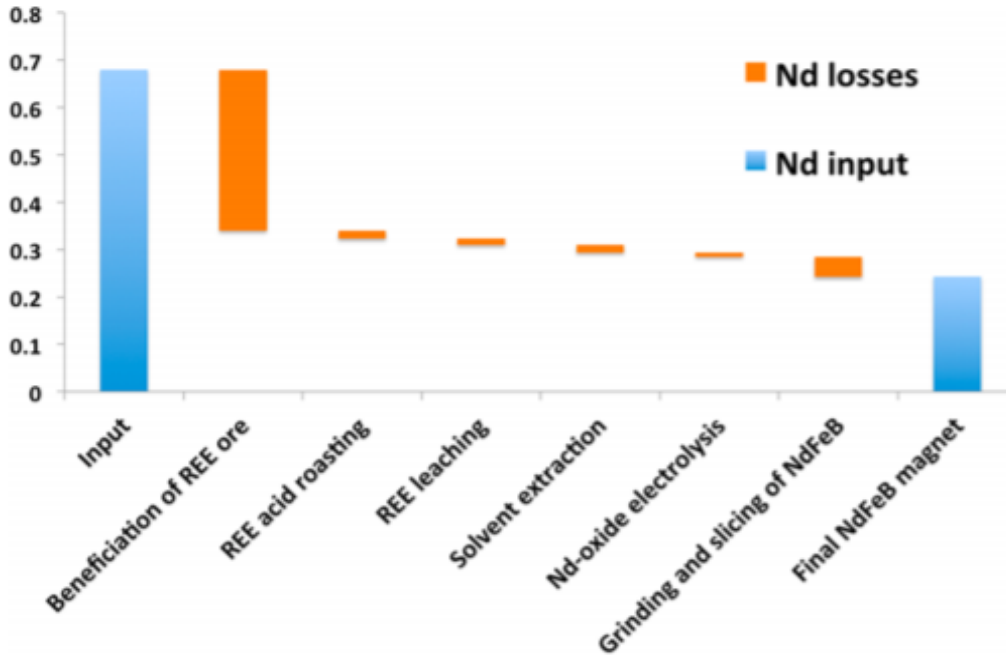
name	1 kg REO, high-tech scenario	1 kg REO, baseline scenario	1 kg REO, low-tech scenario	unit
eutrophication potential	0.12	0.15	0.18	kg NOx-Eq
acidification potential	0.14	0.17	0.22	kg SO ₂ -Eq
photochemical oxidation (summer smog)	5.3-E03	6.5-E03	8.5-E03	kg ethylene-Eq
climate change	12	14	16	kg CO 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

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ΑΚΖ για το βασικό σενάριο που είναι η παραγωγή Μαγνητών Νεοδυμίου. [22] Σε αυτή την περίπτωση συγκρίνεται ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του βασικού αυτού σεναρίου με δύο διαδικασίες ανακύκλωσης Μαγνητών Νεοδυμίου που βρίσκονται σε σκληρούς δίσκους υπολογιστών. (Πίνακας 2.8)

Πίνακας 2.8 : Αποτελέσματα AKZ για την παραγωγή 1 kg NdFeB [22]

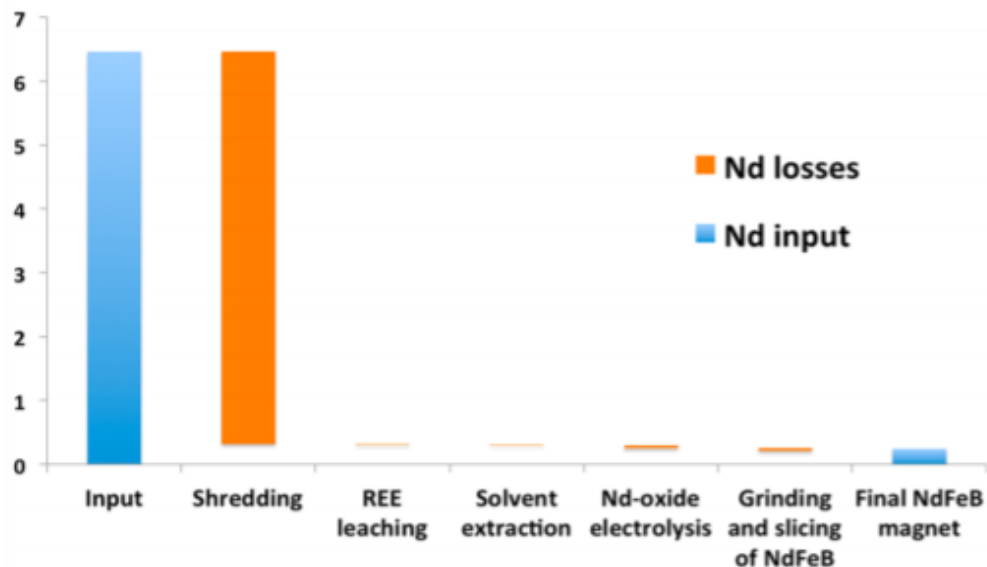
name	primary NdFeB magnet, baseline	recycled NdFeB magnet via hand picking	recycled NdFeB magnet via shredding	unit
eutrophication potential	1.9-E01	7.7-E03	3.2-E02	kg NO _x -Eq
acidification potential	0.44	0.027	0.20	kg SO ₂ -Eq
photochemical oxidation (summer smog)	1.7-E02	1.1-E03	8.0-E03	kg ethylene-Eq
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

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 2.8 [22] η διαδικασία ανακύκλωσης μέσω της χειρωνακτικής αποσυναρμολόγησης επιφέρει λιγότερες επιπτώσεις σε σύγκριση με την πρωτογενή διαδικασία παραγωγής, λόγω της χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον αυτή η διαδικασία ανακύκλωσης έχει το χαμηλότερο αντίκτυπο στην τοξικότητα στην ανθρώπινη υγεία, διότι δεν περιλαμβάνει ρυπογόνες επεξεργασίες που συνδέονται με την παραγωγή παρθένου μαγνήτη Νεοδυμίου. Το ίδιο ισχύει και για την ανακύκλωση μέσω τεμαχισμού, η οποία επιφέρει μεγαλύτερες επιπτώσεις στην ανθρώπινη τοξικότητα σε σχέση με την προηγούμενη διαδικασία ανακύκλωσης, αλλά αισθητά λιγότερες επιπτώσεις σε σύγκριση με αυτές του βασικού σεναρίου. Τα ομαλοποιημένα αποτελέσματα έδειξαν ότι η σημαντικότερη επίπτωση κατά την πρωτογενή παραγωγή, εντοπίζεται στην ανθρώπινη υγεία λόγω της τοξικότητας. [22] Συγκεκριμένα, οι κύριες κατηγορίες επιπτώσεων που αντιπροσωπεύουν και ποσοτικοποιούν οι δύο διαδικασίες ανακύκλωσης, είναι η τοξικότητα στον άνθρωπο κι η υδάτινη οικοτοξικότητα.



Διάγραμμα 2.1 : Εισροές κι απώλειες Nd κατά μήκος της πρωτογενούς αλυσίδας παραγωγής εκφρασμένες σε kg. Συγκεκριμένα οι εισροές κι οι απώλειες αφορούν όλα να στάδια παραγωγής ενός μαγνήτη Nd, όπως για παράδειγμα το στάδιο εκχύλισης με διαλύτη (solvent extraction) και της ηλεκτρόλυσης του οξειδίου του Nd (Nd-oxide electrolysis) [22]

Το διάγραμμα 2.1 [22] δείχνει την ποσότητα του Nd που χάθηκε κατά μήκος της αλυσίδας της πρωτογενούς επεξεργασίας. Οι μεγαλύτερες απώλειες σημειώνονται κατά τη διάρκεια όπου το 50% των ορυκτών που περιέχουν REE χάνοντας με τη μορφή αποβλήτων. Επίσης, οι απώλειες υλικού που εντοπίζονται κατά τη διάρκεια της λείανσης και του τεμαχισμού των μαγνητών Νεοδυμίου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το τελικό σχήμα και μέγεθος του μαγνήτη. Το διάγραμμα 2.2 [22] παρουσιάζει τις απώλειες του Ne κατά τη διαδικασία της ανακύκλωσης. Πρέπει να επισημανθεί ότι περισσότερο υλικό χάθηκε στη διαδικασία της ανακύκλωσης μέσω τεμαχισμού του υλικού.



Διάγραμμα 2.2 : Εισροές κι απώλειες Nd κατά μήκος της αλυσίδας ανακύκλωσης μέσω τεμαχισμού εκφρασμένες σε kg [22]

Τέλος, για λεπτομερέστερα αποτελέσματα της AKZ εξετάστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια για την πρωτογενή διαδικασία παραγωγής μαγνητών Nd. [22] Το πρώτο σενάριο που μελετήθηκε είναι το βασικό σενάριο που αντιπροσωπεύει την τρέχουσα κατάσταση της βιομηχανίας. Έπειτα μελετήθηκε ένα σενάριο υψηλής τεχνολογίας που προϋποθέτει την καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία για την διαδικασία παραγωγής και τέλος ένα σενάριο χαμηλής τεχνολογίας. Ο πίνακας δείχνει συνολικά τα αποτελέσματα και των τριών σεναρίων.

Πίνακας 2.9 : Αποτελέσματα AKZ των τριών σεναρίων. [A1] Σενάριο υψηλής τεχνολογίας για την παραγωγή μαγνητών NdFeB (high-tech, primary, NdFeB), [A2] Βασικό σενάριο πρωτεγενούς παραγωγής μαγνητών NdFeB (baseline, primary, NdFeB magnet), [A3] Σενάριο χαμηλής τεχνολογίας για την παραγωγή μαγνητών NdFeB (low-tech, primary, NdFeB magnet) [22]

name	[A1] high-tech, primary, NdFeB magnet	[A2] baseline, primary, NdFeB magnet	[A3] low-tech, primary, NdFeB magnet	unit
eutrophication potential	0.14	0.19	0.30	kg NO _x -Eq
acidification potential	0.37	0.44	0.66	kg SO ₂ -Eq
photochemical oxidation (summer smog)	1.4-E02	1.7-E02	2.6-E02	kg ethylene-Eq
climate change	21	27	41	kg CO ₂ -Eq
ionizing radiation	4.1 × 10 ⁻⁰⁸	5.1 × 10 ⁻⁰⁸	7.2 × 10 ⁻⁰⁸	DALYs
freshwater aquatic ecotoxicity	13	14	20	kg 1,4-DCB-Eq
stratospheric ozone depletion	2.0 × 10 ⁻⁰⁶	2.6 × 10 ⁻⁰⁶	3.9 × 10 ⁻⁰⁶	kg CFC-11-Eq
human toxicity	42	150	470	kg 1,4-DCB-Eq
cumulative energy demand	260	330	490	MJ-Eq
ore use (4.1% REO)	28	43	76	kg

Το σενάριο υψηλής τεχνολογίας απαιτεί 22% λιγότερη ενέργεια και 35% λιγότερο μέταλλευμα σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. Το σενάριο υψηλής τεχνολογίας επηρεάζει λιγότερο την ανθρώπινη τοξικότητα σε σχέση με τα άλλα δύο σενάρια. Επίσης το σενάριο χαμηλής τεχνολογίας απαιτεί 32% περισσότερη ενέργεια και 77% περισσότερο μέταλλευμα ανά kg μαγνήτη Nd σε σύγκριση με το βασικό σενάριο, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 2.9. [22]

Όσον αφορά την ανθρώπινη τοξικότητα, στο βασικό σενάριο το 80% οφείλεται στις εκπομπές του υδροφθορίου (HF), ενώ στο σενάριο υψηλής τεχνολογίας οφείλεται το 52%. Επιπλέον, υπάρχουν μικρότερες εκπομπές βαρέων μετάλλων που ενισχύουν τις επιπτώσεις σε αυτή την κατηγορία. Τέλος, το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, ο ευτροφισμός, η φωτοχημική οξείδωση, η οικοτοξικότητα του γλυκού νερού κι η εξάντληση του στρατοσφαιρικού όζοντος οφείλονται σχεδόν αποκλειστικά από την έντονη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 2.9. [22]

Κεφάλαιο 3^ο: Αποτελέσματα διεργασιών που μελετήθηκαν

3.1. Εισαγωγή

Οι διεργασίες που μελετήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, αποτελούν μέρος του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος EQUINOX. Η έρευνα αυτή χρηματοδοτείται από το χρηματοδοτικό πλαίσιο HORIZON 2020 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (GA No. 689510) (<http://equinox-project.eu/>).

Το EQUINOX έχει ως στόχο να κάνει τα μεσομεταλλικά υλικά χρήσιμα για ένα ευρύ φάσμα τεχνολογικών εφαρμογών, προσδίδοντάς τους το μοναδικό χαρακτηριστικό που τους λείπει ως τώρα: την ευπλαστότητα. Είναι προφανές ότι η επιτυχία αυτού του στόχου θα οδηγήσει στην αντικατάσταση του ανοξείδωτου χάλυβα, ο οποίος περιέχει Cr σε μέγιστη αναλογία γύρω στο 18% κατά βάρος, σε μια σειρά εφαρμογών. Η βασική καινοτομία που εφαρμόζεται από το EQUINOX αφορά τη μέθοδο δημιουργίας του μεσομεταλλικού υλικού. Η διαδικασία ξεκινάει με την παραγωγή ενός πορώδους δοκιμίου από καθαρό σίδηρο. Το δοκίμιο αυτό έχει το σχήμα που απαιτείται από την τελική εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί. Σε συνέχεια, ο κενός χώρος του πορώδους αυτού δοκιμίου γεμίζει με τήγμα αργιλίου. Με άλλα λόγια, στην πρώτη φάση κατασκευάζεται κάτι σαν ένα σιδερένιο σφουγγάρι. [24] Όπως ένα σφουγγάρι είναι φτιαγμένο για να απορροφά νερό, το σιδερένιο «σφουγγάρι» που κατασκευάζεται από το EQUINOX είναι φτιαγμένο για να απορροφά τήγμα αργιλίου. Στη συνέχεια το τήγμα πρέπει να γεμίσει το σύνολο του κενού χώρου των πόρων, γιατί αλλιώς το τελικό υλικό θα έχει οπές στο εσωτερικό του, κάτι που είναι ανεπιθύμητο. Ακόμα, οι συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνεται η πλήρωση του πορώδους δοκιμίου (π.χ. θερμοκρασία, διάρκεια) θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε αυτό να αντιδράσει χημικά με το τήγμα αργιλίου. [24] Τελικά, θα προκύπτει ένα δοκίμιο με σχήμα παρόμοιο με αυτό του σιδερένιου «σφουγγαριού», το οποίο θα είναι φτιαγμένο από το επιθυμητό μεσομεταλλικό υλικό. Το γεγονός ότι το σχήμα του προϊόντος θα είναι παρόμοιο με το σχήμα π.χ. του εξαρτήματος που πρέπει να παραχθεί έχει το πλεονέκτημα ότι δεν είναι αναγκαία κάποια χρονοβόρα διαδικασία μορφοποίησης (π.χ. τόννευση, φινίρισμα-τελική κατεργασία). Τελικός στόχος όμως είναι το υλικό που έχει κατασκευαστεί να έχει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η βελτίωση αφορά στην αύξηση της ευπλαστότητάς του, δηλαδή τη μείωση της ευκολίας δημιουργίας σχισμών. [24]

Για όλες αυτές τις διεργασίες πραγματοποιήθηκε AKZ, οι οποίες θα παρουσιαστούν αμέσως παρακάτω, με σκοπό να εντοπιστούν οι επιπτώσεις που επιφέρουν στο περιβάλλον, στην ανθρώπινη υγεία και στο οικοσύστημα. Επιπλέον, στόχος της εργασίας είναι να ποσοτικοποιηθεί και να ελαχιστοποιηθεί με το βέλτιστο τρόπο ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των διαδικασιών καθώς και να προταθούν λύσεις υποκατάστασης των κρίσιμων πρώτων υλών. Επίσης, όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την AKZ των διεργασιών συλλέχθηκαν μέσω κατάλληλου ερωτηματολογίου (Παράρτημα) το οποίο μοιράστηκε σε όλους τους συμμετέχοντες του EQUINOX.

3.2. 1^η Διεργασία

Η πρώτη διεργασία που μελετήθηκε αφορά την κατασκευή δίσκων φρένων από ανοξείδωτο χάλυβα από την εταιρεία BREMBO. Για να κατασκευαστούν όμως οι δίσκοι φρένων θα πρέπει πρώτα να γίνει ο σωστός σχεδιασμός των προϊόντων και των πορωδών δοκιμίων που αποτελούνται από Fe έτσι ώστε να γίνει πλήρης διείσδυση του Al. Αφού γίνει ο σωστός σχεδιασμός, θα χρησιμοποιηθεί ένα καλούπι κατάλληλο για τη διείσδυση του Al λαμβάνοντας υπόψιν το πάχος του τοιχώματος και την ταχύτητα ψύξης. Έτσι η BREMBO θα σχεδιάσει τους δίσκους φρένων, με το κατάλληλο σχήμα και μηχανικές ιδιότητες, οι οποίοι θα τοποθετηθούν σε ένα τυπικό ευρωπαϊκό όχημα.

Οι φάσεις της AKZ για τους δίσκους φρένων είναι οι εξής :

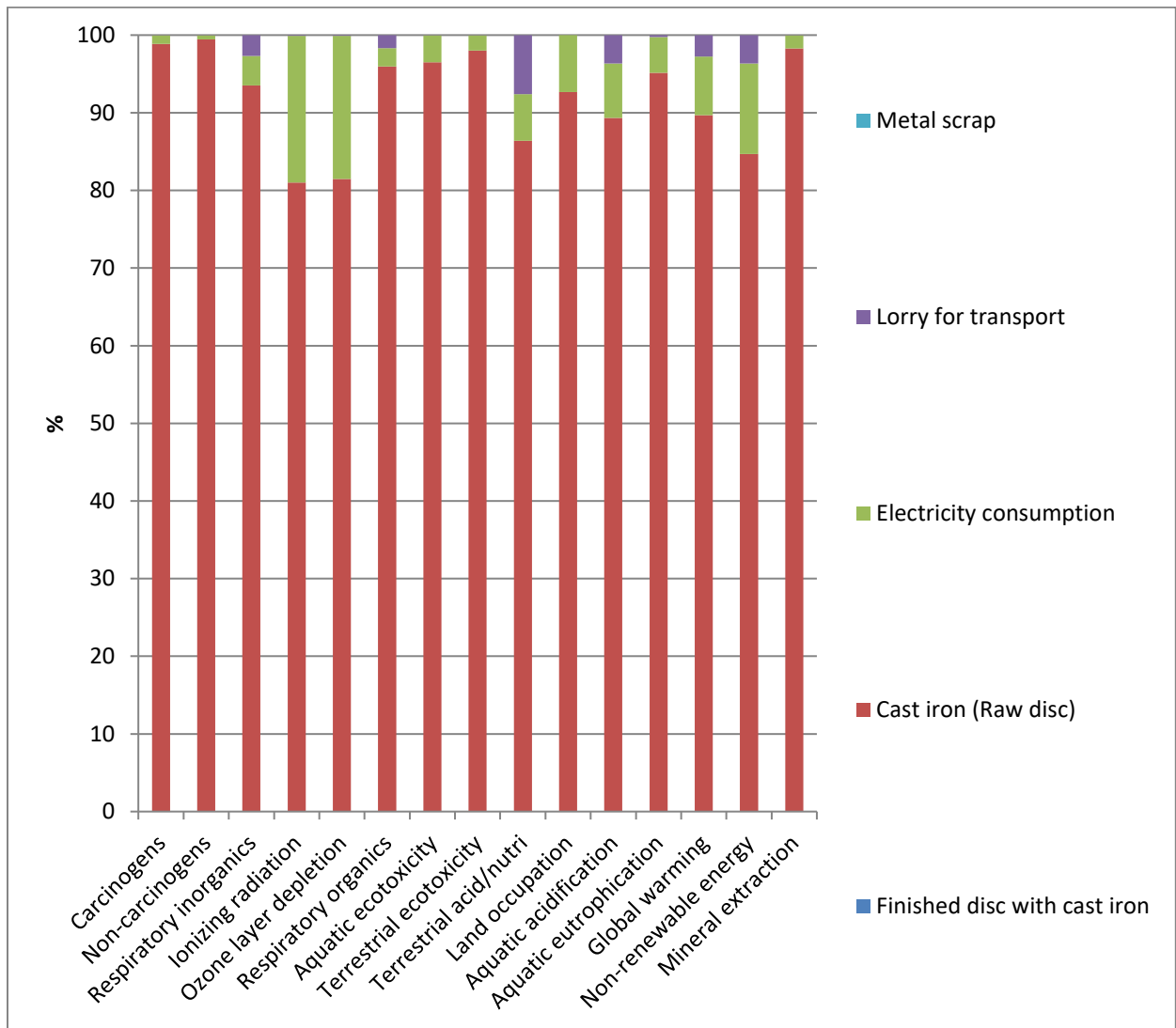
- **Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής:** Στόχος είναι κατασκευή δίσκων φρένων με το υλικό του EQUINOX τα οποία θα καλύπτουν τις ανάγκες της αυτοκινητοβιομηχανίας και θα είναι λειτουργικά για ένα ευρωπαϊκό όχημα. Λειτουργική μονάδα είναι το 1 τεμάχιο (p) δίσκων φρένων από ανοξείδωτο χάλυβα.
- **Ανάλυση αποθέματος:** Για τη συγκεκριμένη διεργασία τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αλλά κι οι αντίστοιχες επιλογές που έγιναν εντός του λογισμικού παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.1 : Δεδομένα που συλλέχθηκαν για το στάδιο της ανάλυσης του αποθέματος

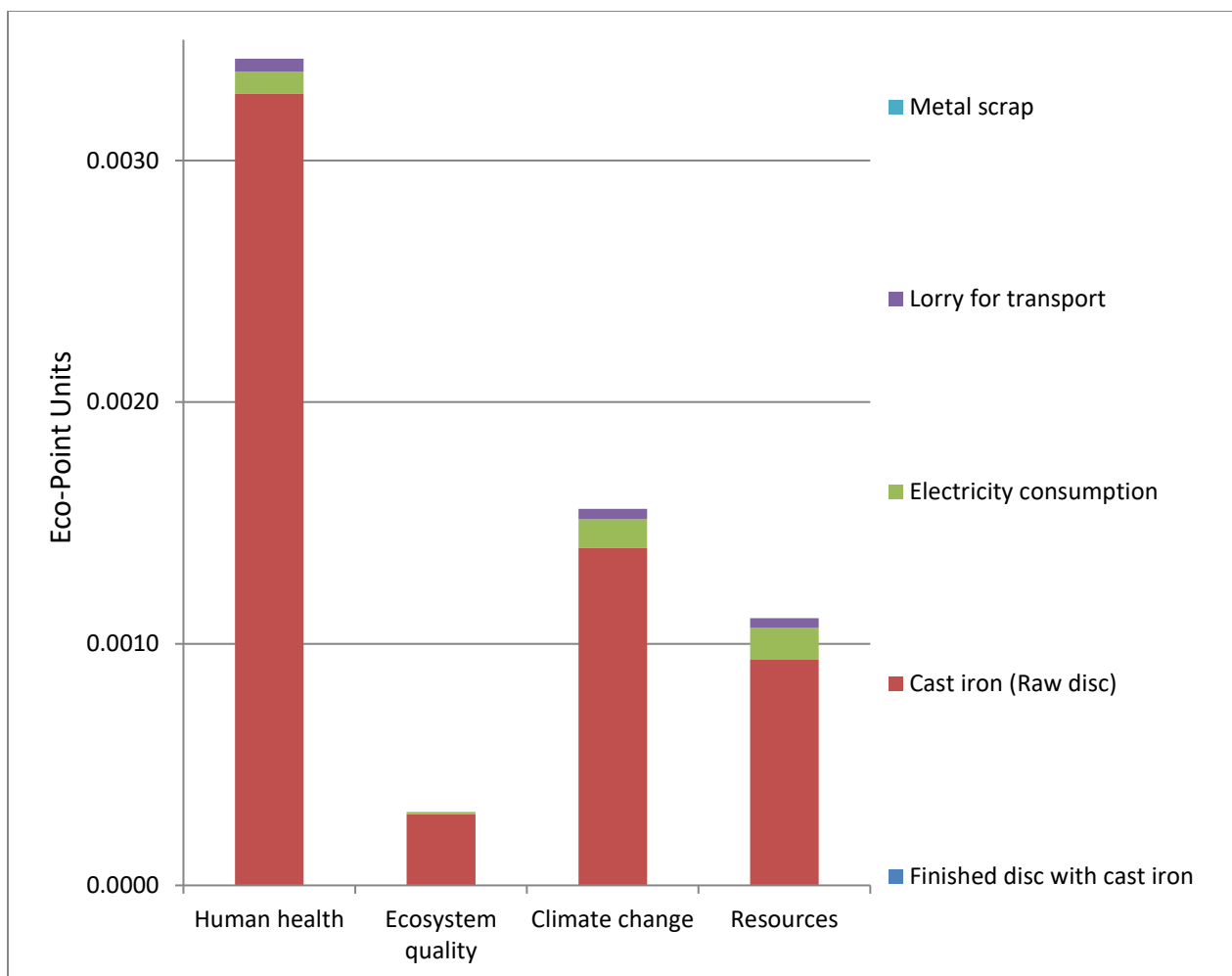
Input given	Selection from SimaPro database
7 kg of cast iron = raw disc	7 kg Cast iron
Energy consumption for machining and finishing operations = 2kWh	2 kWh electricity, medium voltage (IT)
Materials to recycling = 3 kg Cast iron	3 kg Cast iron
Lorry for transport to the end user for the considered application (800 km)	Small lorry transport (3.2 tkm)

- **Εκτίμηση αντίκτυπου:** Μετά τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων από όλα τα στάδια ζωής του υλικού, ακολουθεί η αξιολόγηση κι ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων. Για τη διαδικασία που ακολούθησε η BREMBO τα διαγράμματα του περιβαλλοντικού αντίκτυπου είναι τα ακόλουθα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί τι σημαίνει το 100% στο διάγραμμα των ενδιάμεσων κατηγοριών επιπτώσεων. Το 100% ενός πεδίου αποτελεί το συνολικό αντίκτυπο-φορτίο που επιφέρουν τα δεδομένα εισροών κι εκροών στο πεδίο αυτό. Για παράδειγμα στο πεδίο της Παγκόσμιας Υπερθέρμανσης (Global warming) το 82% του συνολικού φορτίου (100%) είναι λόγω

της χρήσης του χυτοσίδηρου, το 15% οφείλται στην ηλεκτρική ενέργεια και τέλος το 3% στη μεταφορά. Αντίστοιχα στο πεδίο των Καρκινογενέσεων (Carcinogens) το 97% του συνολικού αντίκτυπου οφείλεται στη χρήση του ανοξείδωτου χάλυβα ενώ το 3% στην ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι ο αντίκτυπος στις κατηγορίες τελικών ζημιών μετριέται σε Eco-Point Units. Το Eco-Point Unit υπολογίζεται διαιρώντας το συνολικό περιβαλλοντικό φορτίο του κάθε πεδίου χωριστά στην Ευρώπη με τον αριθμό των κατοίκων και πολλαπλασιάζοντας το με 1000.



Διάγραμμα 3.1 : Ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων για την παραγωγή δίσκων φρένων



Διάγραμμα 3.2 : Κατηγορίες τελικών ζημιών για την παραγωγή δίσκων φρένων

- Ερμηνεία αποτελεσμάτων:** Τόσο στις κατηγορίες των ενδιάμεσων επιπτώσεων όσο και στις κατηγορίες των τελικών ζημιών παρατηρείται ότι η κύρια επιβάρυνση οφείλεται στη χρήση του χυτοσίδηρου. Αυτό το αποτέλεσμα είναι απολύτως εύλογο για τη διαδικασία, επειδή ο χυτοσίδηρος είναι το μόνο υλικό που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία. Επίσης εντοπίζεται χαμηλή αλλά αξιοσημείωτη επίδραση της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Από το διάγραμμα των ενδιάμεσων επιπτώσεων φαίνεται να επιβαρύνει την εξασθένηση της στιβάδας του όζοντος, την υπερθέρμανση του πλανήτη καθώς και τις μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λόγω της χρήσης των ορυκτών καυσίμων. Αντίστοιχα στο διάγραμμα των τελικών ζημιών η ηλεκτρική ενέργεια επιβαρύνει την ανθρώπινη υγεία, την κλιματική αλλαγή και τους ορυκτούς πόρους κατά τον ίδιο τρόπο.

3.3. 2^η Διεργασία

Η AKZ της δεύτερης εργασίας που μελετήθηκε αφορά την ανάπτυξη πορωδών δοκιμών για μηχανές πυραύλων δίνοντας ιδιαίτερη βάση στις μηχανικές ιδιότητες και κυρίως στην αντοχή στη διάβρωση. Το έργο αυτό πραγματοποιείται από την εταιρεία YUZHNOYE και συγκεκριμένα με τη μέθοδο Επιλεκτικής τήξης με λέιζερ. Η Επιλεκτική τήξη με λέιζερ (Selective laser melting) (SLM) [11] είναι μία τεχνική κατασκευής που προέκυψε στα τέλη της δεκαετίας του 1980. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας SLM, ένα προϊόν σχηματίζεται από επιλεκτική τήξη διαδοχικών στρωμάτων σκόνης με την αλληλεπίδραση μιας ακτίνας λέιζερ. Το υλικό της σκόνης θερμαίνεται με τη χρήση ακτινοβολίας. Εάν εφαρμόζεται επαρκής ισχύς, τήκεται και σχηματίζει μια υγρή «δεξαμενή». Στη συνέχεια, η λιωμένη δεξαμενή στερεοποιείται και το ενοποιημένο υλικό αρχίζει να διαμορφώνει το προϊόν. Έπειτα τοποθετείται νέα στρώση σκόνης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί το προϊόν.

Οι φάσεις της AKZ για τη δημιουργία των προμορφωμάτων μέσω της διεργασίας SLM είναι οι εξής :

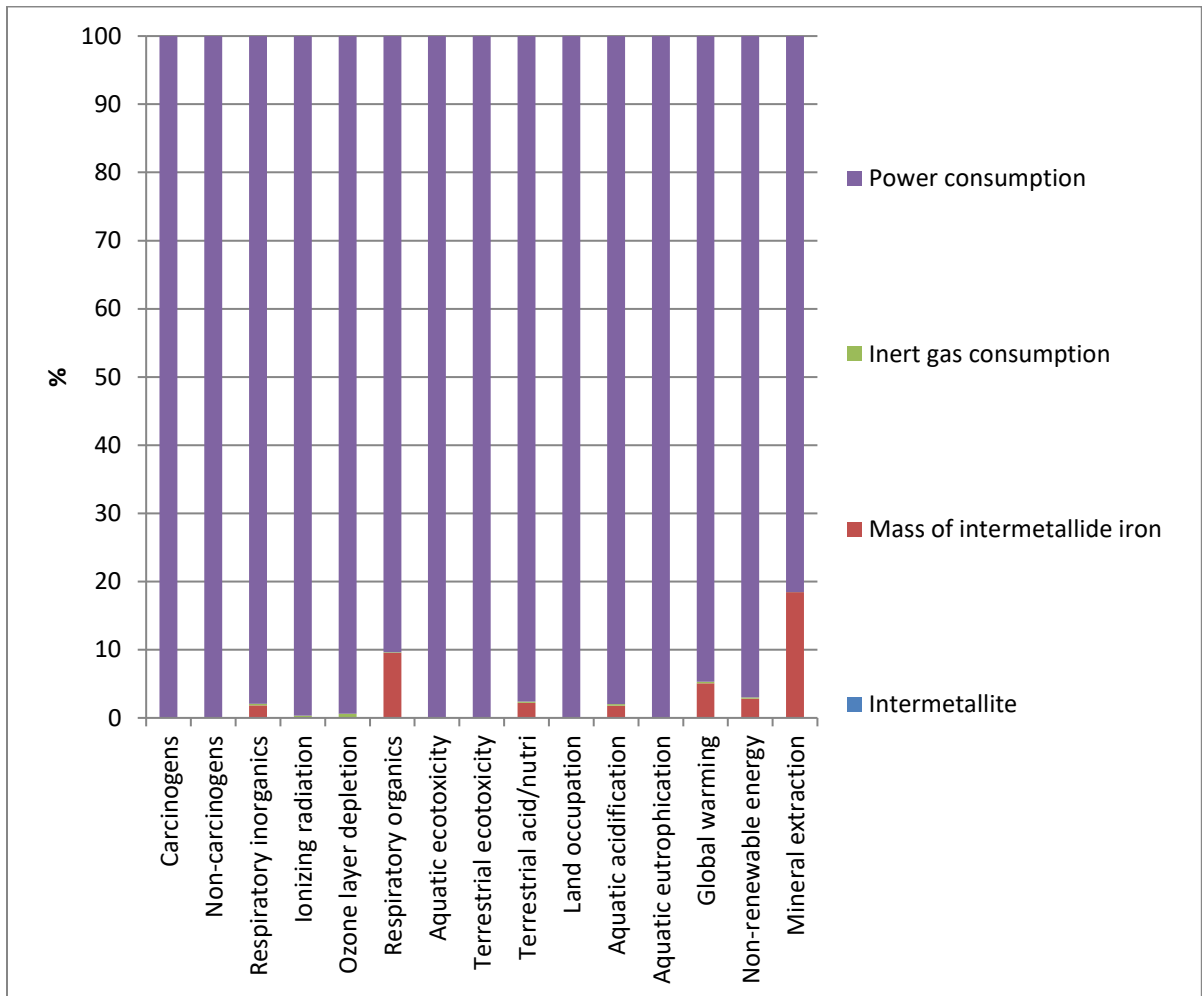
- **Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής:** Στόχος της παρούσας διεργασίας είναι η ανάπτυξη των κατάλληλων προμορφωμάτων μέσω της διεργασίας SLM τα οποία θα έχουν εφαρμογή στην αεροδιαστημική. Λειτουργική μονάδα ορίζεται το 1 kg μεταλλεύματος Fe.
- **Ανάλυση αποθέματος:** Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν για την πραγματοποίηση της AKZ της διεργασίας παρασκευής προμορφωμάτων είναι τα εξής :

Πίνακας 3.2 : Δεδομένα που συλλέχθηκαν για το στάδιο της ανάλυσης του αποθέματος

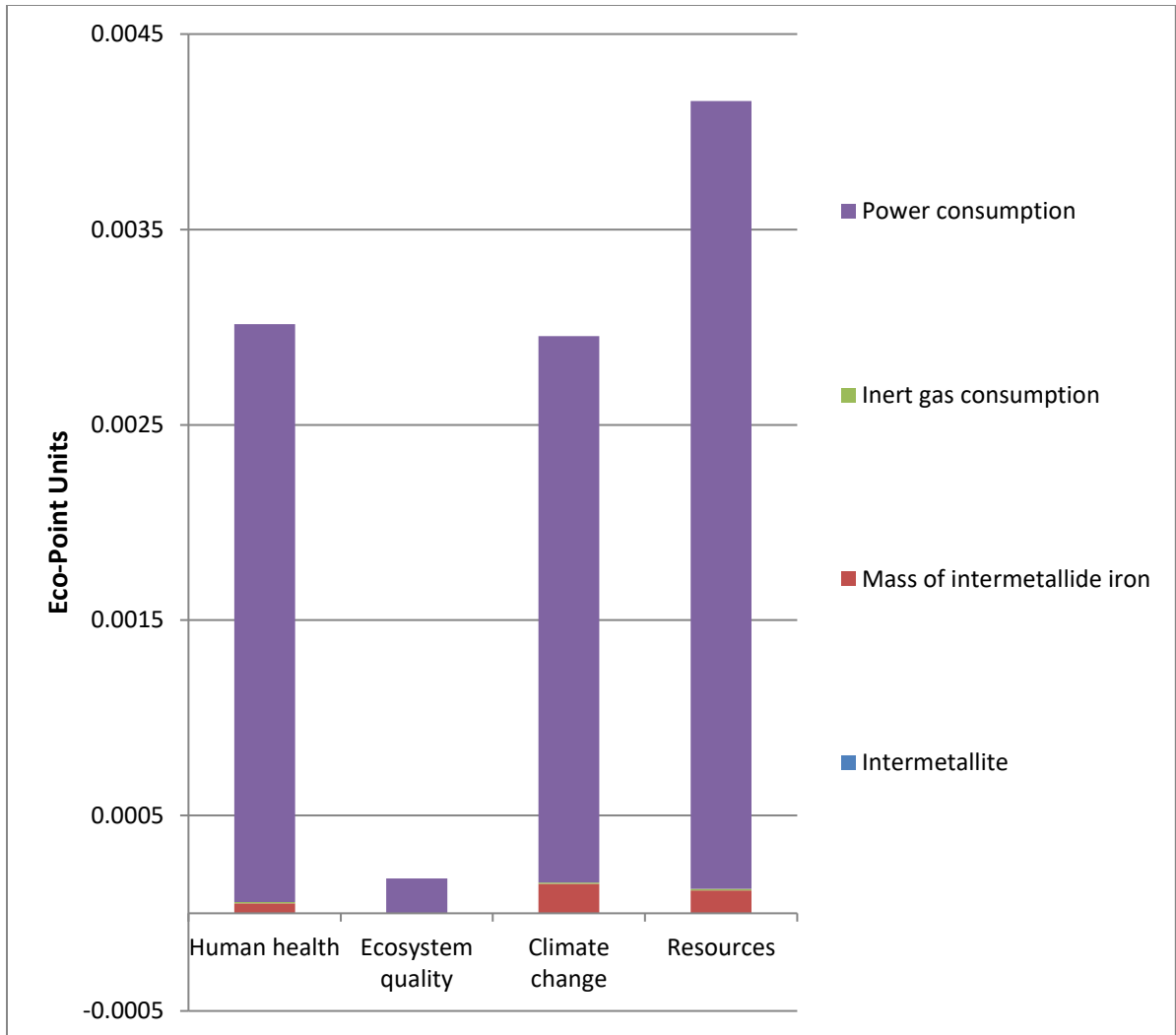
Input given	Selection from SimaPro database
778 gr Iron	778 gr Ferrite
Time for building 125 cm ³ /28 cm ³ /h ~45h	Power consumption: 48 kW
Machine capacity 6 kW/h	
Time for the part manufacture 4.5 h (intermetallide manufacturing) +1.5 h (machine preparation) + 2 h (machine cleanup) = 8 h.	
Power consumption: 8 h * 6 kW/h = 48 kW.	
Inert gas consumption – 2.5 l/min (675 l) = 0.675 m ³	0,79 kg Nitrogen

- **Ανάλυση αποθέματος:** Το ενεργειακό προφίλ που προκύπτει μέσω των προηγούμενων δεδομένων παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα. Επιπλέον,

όχι μόνο εντοπίζονται οι επιπτώσεις που προκύπτουν από τη διεργασία αλλά και ποσοτικοποιούνται.



Διάγραμμα 3.3 : Ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων για την παραγωγή προμορφομάτων μέσω της διεργασίας SLM



Διάγραμμα 3.4 : Κατηγορίες τελικών ζημιών για την παραγωγή προμορφομάτων μέσω της διεργασίας SLM

- Ερμηνεία αποτελεσμάτων:** Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι κύριες επιπτώσεις σε όλες τις κατηγορίες οφείλονται στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Σημειώνεται υψηλή επίδραση από την ηλεκτρική ενέργεια στους πόρους, την ανθρώπινη υγεία και την κλιματική αλλαγή δεδομένου ότι η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε ορυκτά καύσιμα αλλά και λόγω της ενέργειας που απαιτείται για την εξόρυξη του μεταλλεύματος Fe. Επίσης, παρατηρούνται ασήμαντες επιπτώσεις λόγω του αδρανούς αερίου και των εκπομπών του. Το άζωτο δεν λαμβάνει μέρος σε χημικές αντιδράσεις υπό δεδομένες συνθήκες. Επίσης, η χρήση του αζώτου ελαχιστοποιεί τις εκπομπές CO₂. Τέλος, υπάρχει χαμηλή επίδραση από τη χρήση σιδήρου στην αλλαγή του κλίματος λόγω της μικρής ποσότητας που χρησιμοποιείται.

3.4. 3^η Διεργασία

Η 3^η διεργασία της οποίας μελετήθηκε η AKZ πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο του Liberec κι αφορά την προετοιμασία μεταλλογραφικών δειγμάτων που δομούνται από μεσομεταλλικές ενώσεις με βάση το Fe και το Al. Για την σωστή προετοιμασία έγινε ανάλυση και μελέτη της μικροδομής με διάφορα μέσα μεταλλογραφικής ανάλυσης όπως, ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης και διάχυση ακτίνων X. Επίσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση του πορώδους των δειγμάτων με μη καταστρεπτικές δοκιμές καθώς και βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους.

Οι φάσεις της AKZ για τα μεταλλογραφικά δείγματα Fe₃Al είναι οι εξής :

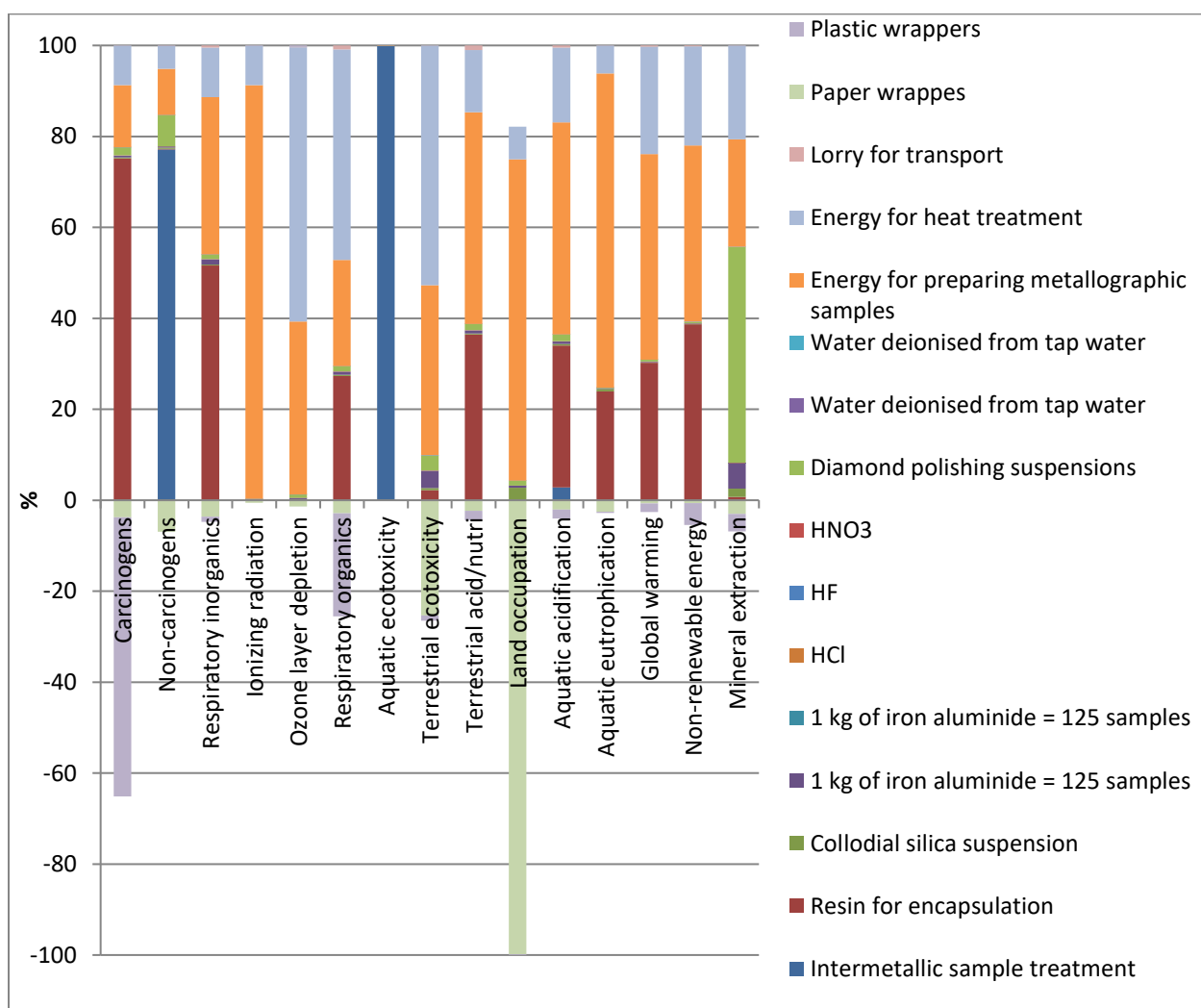
- **Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής:** Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η διεξαγωγή της AKZ για μεταλλογραφικά δείγματα που συνθέτονται από μεσομεταλλικές ενώσεις. Λειτουργική μονάδα της διεργασίας είναι το 1 μεταλλογραφικό δείγμα.
- **Ανάλυση αποθέματος:** Όλα τα δεδομένα εισροών κι εκροών για αυτή την AKZ λήφθηκαν απευθείας από το Πανεπιστήμιο του Liberec τα οποία μαζί με τις αντίστοιχες επιλογές του λογισμικού είναι τα εξής :

Πίνακας 3.3 : Δεδομένα που συλλέχθηκαν για το στάδιο της ανάλυσης του αποθέματος

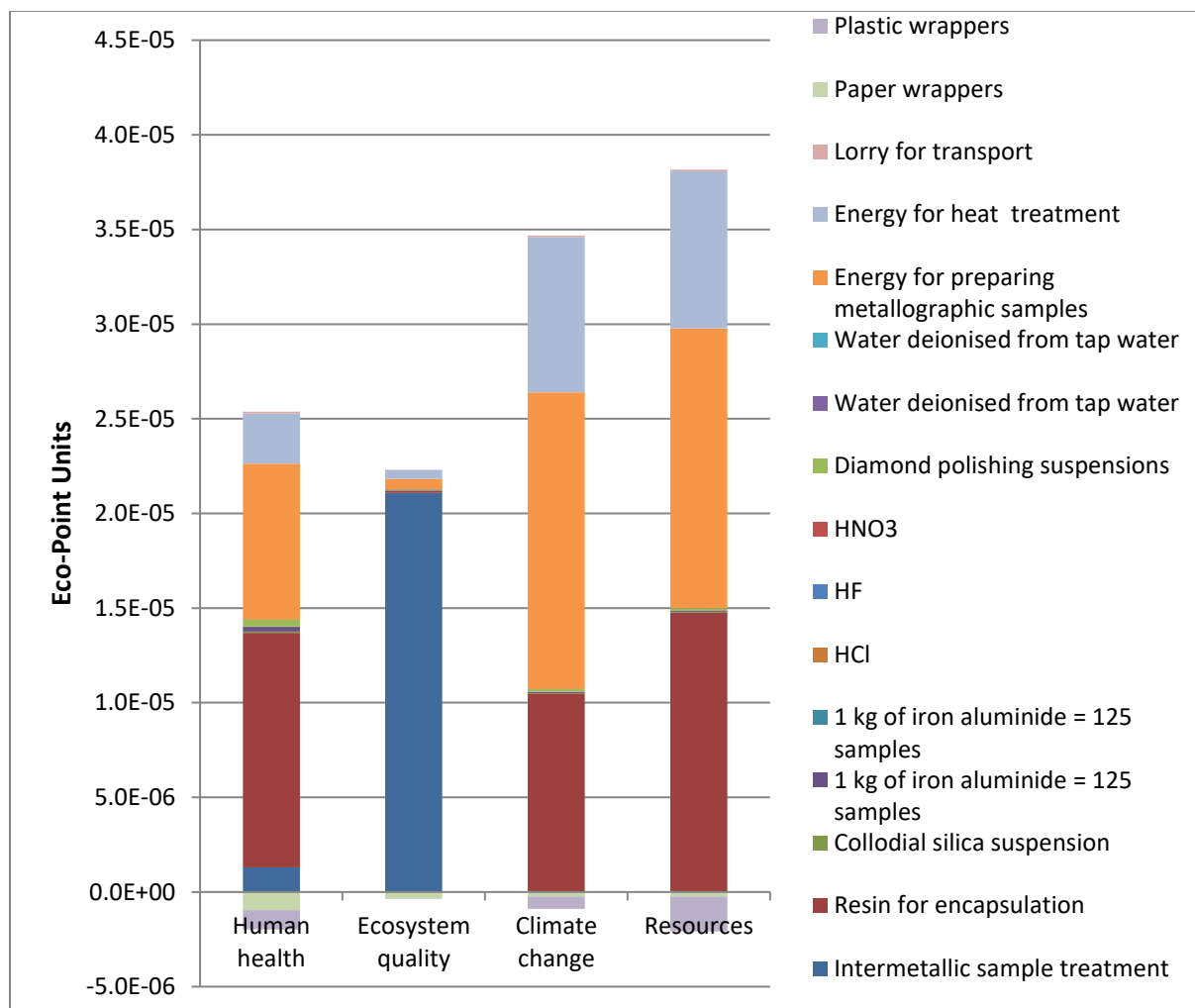
Input given	Selection from SimaPro database
1 kg of iron aluminide = 125 samples	600 g Iron pellet & 400 g Aluminum, primary, smelt
Water for cooling during cutting (3 liter), water for cooling during grinding (0.5l per 4 samples, 16l per 125 samples)	19l Water cooling
Resin for encapsulation (2 kg)	2 kg liquid epoxy resins E
Diamond polishing suspensions (0.8 liter)	96 g aluminium oxide & 864 g water deionized from tap water
Collodial silica suspension (0.5 liter)	260 g silica sand & 390 g water deionized from tap water
HCl (2 ml) HF (0.05 ml), HNO ₃ (5 ml)	0.75 mg hydrochloric acid 0.058 mg hydrogen fluoride 7.6 g nitric acid, without water
Energy for preparing metallographic samples – 25kWh per 125 samples	25 kWh electricity, medium voltage
Energy for heat treatment – 32kWh for 10 thermal cycles	32 kWh heat, central or small-scale
Oil for cooling after heat treatment – 0.25 l	0.2125 kg mineral oil
0.5 kg of iron aluminide scraps after cutting and	0.3 kg iron & 0.2 kg aluminium

grinding	
0.5 kg paper wrappers	0.5 kg paper recycling
0.5 kg plastic wrappers	0.5 kg mixed plastics recycling
Lorry for transport of consumables for preparing metallographic samples. (800 km)	Small lorry transport (0.8 tkm)

- Εκτίμηση αντίκτυπου:** Με την είσοδο των δεδομένων στο λογισμικό SimaPro και με τους αυτοματοποιημένους υπολογισμούς των δεικτών χαρακτηρισμού τόσο για τις κατηγορίες των ενδιάμεσων επιπτώσεων όσο και τις κατηγορίες των τελικών επιπτώσεων προκύπτουν τα εξής διαγράμματα τα οποία ποσοτικοποιούν τις επιπτώσεις που επιφέρει η διεργασία.



Διάγραμμα 3.5 : Ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων για την προετοιμασία μεταλλογραφικών δειγμάτων



Διάγραμμα 3.6 : Κατηγορίες τελικών ζημιών για την προετοιμασία μεταλλογραφικών δειγμάτων

- Ερμηνεία αποτελεσμάτων:** Μελετώντας το διάγραμμα με τις κατηγορίες των ενδιάμεσων επιπτώσεων συμπεραίνουμε ότι οι κύριες επιπτώσεις οφείλονται στη χρήση του ηλεκτρισμού και της θερμότητας, λόγω της μηχανικής διαδικασίας. Επιπλέον εντοπίζεται ότι οι υγρές εποξειδικές ρητίνες επηρεάζουν κυρίως τους καρκινογόνους κι αναπνευστικούς ανόργανους παράγοντες εξαιτίας της χημικής τους σύνθεσης. Μία σημαντική διαπίστωση είναι η θετική επίδραση της χρήσης των χαρτιών και των πλαστικών που δίνουν το πλεονέκτημα της ανακύκλωσης. Η θετική αυτή επίδραση εμφανίζεται με αρνητικό πρόσημο δηλώνοντας όμως τη θετική επίδραση στο συνολικό σύστημα μελέτης. Είναι σαφές ότι η επεξεργασία των μεσομεταλλικών δειγμάτων έχει εξαιρετικά αρνητική επίδραση στην υδάτινη οικοτοξικότητα με ποσοστό 100% εφόσον το υλικό “χάνεται” και δεν ανακυκλώνεται. Επίσης οι επιβαρύνσεις αυτές επαληθεύονται με το διάγραμμα των τελικών ζημιών. Η ηλεκτρική ενέργεια, η θερμότητα κι η χρήση των υγρών εποξειδικών ρητινών επηρεάζουν τους πόρους, την ανθρώπινη υγεία και την κλιματική αλλαγή καθώς κι η επεξεργασία του

μεσομεταλλικού δείγματος επηρεάζει την ποιότητα του οικοσυστήματος. Τέλος, η χρήση των χαρτιών και των πλαστικών έχει θετική επίδραση στην ανθρώπινη υγεία, την κλιματική αλλαγή και τους πόρους λόγω της ανακύκλωσης τους και της επαναφοράς στο σύστημα.

3.5. 4^η Διεργασία

Η 4^η διεργασία αφορά την AKZ μιας διαδικασίας παραγωγής προϊόντος που έγινε στις εγκαταστάσεις της εταιρείας Elastotec GmbH. Η Elastotec GmbH είναι μία εταιρεία που παράγει τα δικά της προϊόντα όπως, μάντες υψηλής πίεσης, προφυλακτήρες κι αντλίες υψηλού ιξώδους. Επίσης διαθέτει ισχυρό υπόβαθρο στις τεχνολογίες Computer Numerical Control (CNC) οι οποίες είναι τυπικές μηχανολογικές διαδικασίες όπως η διάτρηση, η στίλβωση, η λείανση κι η κοπή. Συγκεκριμένα η διεργασία που μελετήθηκε είναι η μηχανική κατεργασία μεσομεταλλικών ενώσεων Fe₃Al με εργαλεία σκληρών μετάλλων η οποία βασίζεται στην τυπική τεχνολογία CNC.

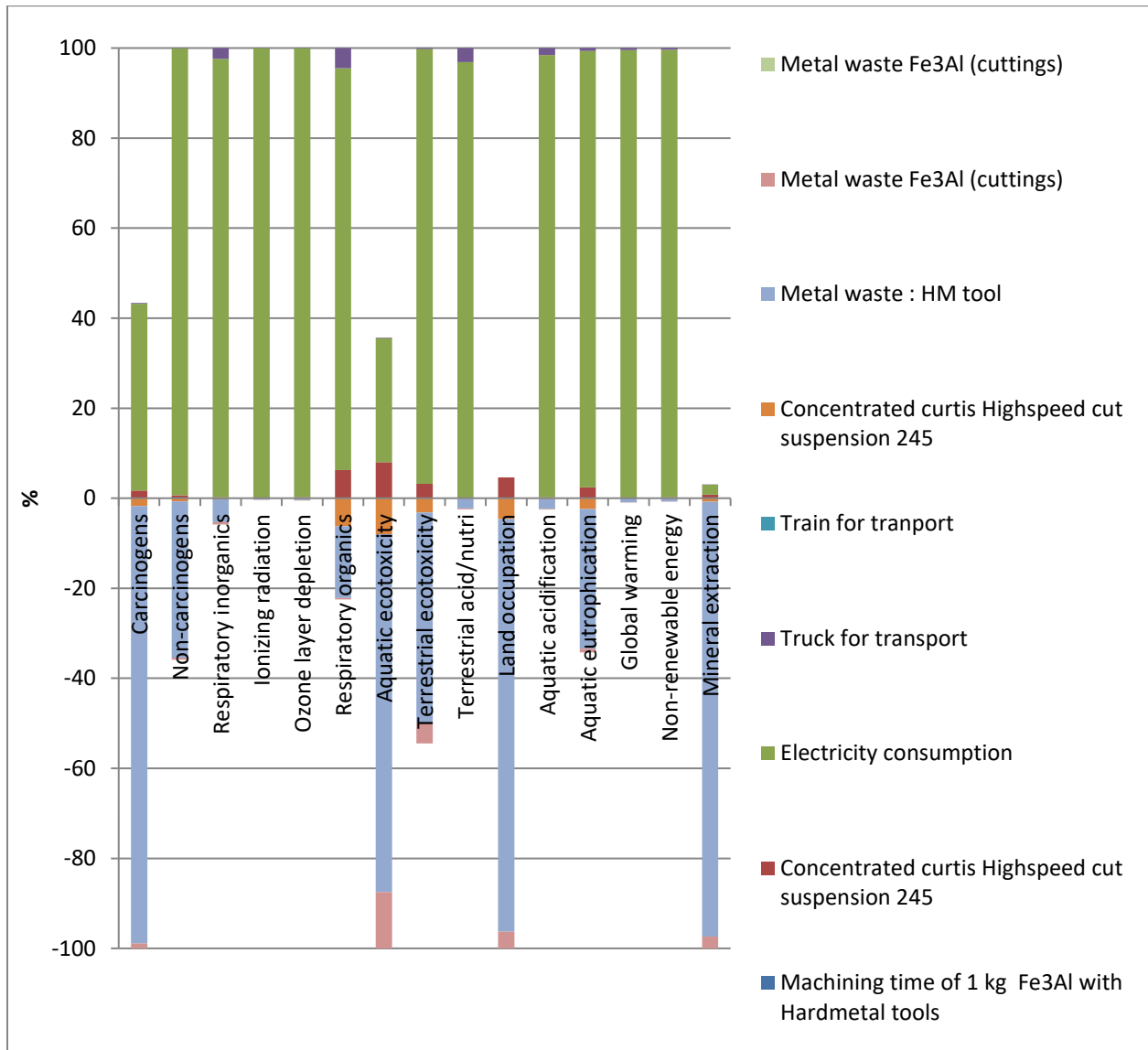
Οι φάσεις της AKZ για αυτή τη διεργασία είναι οι εξής :

- **Ορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής:** Στόχος είναι η AKZ της μηχανικής κατεργασίας μεσομεταλλικών ενώσεων Fe₃Al με εργαλεία σκληρών μετάλλων για την παραγωγή του τελικού προϊόντος που είναι ένας προφυλακτήρας. Επίσης λειτουργική μονάδα είναι είναι 1 ώρα επεξεργασίας Fe₃Al.
- **Ανάλυση αποθέματος:** Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την εταιρεία για την απογραφή και την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων από παραθέτονται στον παρακάτω πίνακα.

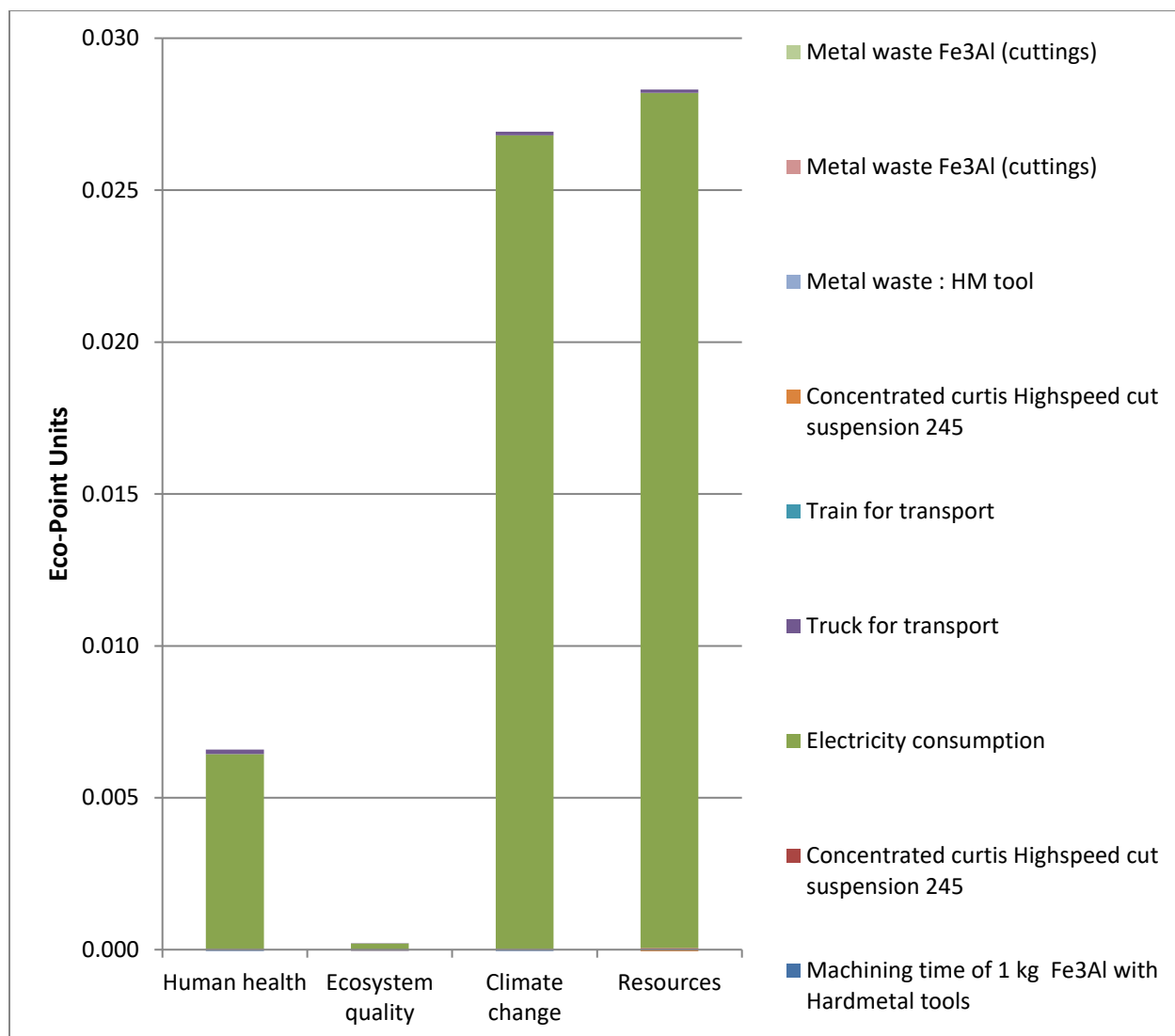
Πίνακας 3.4 : Δεδομένα που συλλέχθηκαν για το στάδιο της ανάλυσης του αποθέματος

Input given	Selection from SimaPro database
Machining time of 1 kg Fe ₃ Al with HM tools	0.1 kgy
Water 3l/h	0.003 m3 Water cooling
Concentrated CURTIS High-speed cut suspension 2450,01l/h	0.0098 kglubricatingoil
Electricity consumption:40kWh per machine	40 kWh electricity mix
Metal waste: HM tool 0.1 kg	0.1 kg reinforcing steel
Metal waste: Fe ₃ Al (cuttings) 0.1 kg	60 g iron pellet & 40 g aluminum, primary, smelt
Truck for transport of bumper end product <1000 km	0.9 tkm small lorry transport
Train for transport of building machines >1000 km	1.1 tkm transport, train, diesel powered

- **Εκτίμηση αντίκτυπου :** Οι ενδιάμεσες κι οι τελικές κατηγορίες των επιπτώσεων παρουσιάζονται στα εξής διαγράμματα :



Διάγραμμα 3.7 : Ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων για τη μηχανική κατεργασία μεσομεταλλικών ενώσεων Fe₃Al με εργαλεία σκληρών μετάλλων



Διάγραμμα 3.8 : Κατηγορίες τελικών ζημιών για τη μηχανική κατεργασία μεσομεταλλικών ενώσεων Fe₃Al με εργαλεία σκληρών μετάλλων

- Ερμηνεία αποτελεσμάτων:** Μέσω των διαγραμμάτων που δείχνουν τη συνολική συμπεριφορά και τα αποτελέσματα της διαδικασίας τόσο στις ενδιάμεσες κατηγορίες όσο και στις τελικές, είναι φανερό ότι το στάδιο της παραγωγής προκαλεί μεγάλες επιβαρύνσεις. Στις ενδιάμεσες κατηγορίες επιπτώσεων παρατηρείται ότι η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υπεύθυνη για όλες τις αρνητικές επιπτώσεις σε όλα τα πεδία. Η μεγάλη αυτή επιβάρυνση οφείλεται στην ενεργοβόρα συμπεριφορά του μηχανικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για τη μηχανική κατεργασία των μεσομεταλλικών δειγμάτων. Επιπλέον υπάρχει χαμηλή επίδραση από το λιπαντικό λάδι που εφαρμόζεται για να μειώνονται οι τριβές κατά την επεξεργασία. Τέλος, παρατηρείται μεγάλη θετική επίδραση από τα εργαλεία σκληρού μετάλλου που αποτελούνται από ενισχυμένο χάλυβα καθώς κι από τα ρινίσματα Fe₃Al τα οποία παρόλο που εμφανίζονται ως απόβλητα της διεργασίας φέρουν το πλεονέκτημα της

ανακύκλωσης. Η ανακύκλωση έχει μεγάλη σημασία διότι ελαχιστοποιεί τις συνολικές επιβαρύνσεις σε όλα τα πεδία. Επίσης, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις κατηγορίες των τελικών ζημιών επιβεβαιώνουν όλα τα προηγούμενα.

Κεφάλαιο 4^ο : Συμπεράσματα – Προτάσεις για το μέλλον

4.1. Συμπεράσματα ΑΚΖ των διεργασιών που μελετήθηκαν – Προτάσεις για το μέλλον

Ο γενικός στόχος αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας ήταν να **αναδείξει και να συζητήσει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της διαδικασίας ΑΚΖ**. Για την επίτευξη αυτού του στόχου η ΑΚΖ εφαρμόστηκε σε τέσσερις διεργασίες οι οποίες, με διαφορετικές τεχνολογίες και μεθόδους παρήγαγαν διαφορετικά τελικά προϊόντα, τα οποία όμως είχαν την ίδια σύσταση. Αποτελούνταν δηλαδή από μεσομεταλλικές ενώσεις Fe και Al. Επιπλέον στόχοι της εργασίας ήταν 1) να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις των διαδικασιών και των τελικών προϊόντων, 2) να ποσοτικοποιηθεί ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος καθώς και 3) να δωθούν πιθανές ευκαιρίες και λύσεις για τη βελτίωση των προϊόντων.

Η ΑΚΖ εκτελέστηκε από το “λίκνο έως τον τάφο” ώστε να ληφθούν υπόψιν όλες οι επιπτώσεις που σχετίζονται 1) με την παραγωγή δίσκων φρένων από χυτοσίδηρο, 2) την παραγωγή προμορφωμάτων μέσω της διαδικασίας SLM, 3) την προετοιμασία μεταλλογραφικών δειγμάτων καθώς και 4) με τη μηχανική κατεργασία μεσομεταλλικών ενώσεων Fe₃Al με εργαλεία σκληρών μετάλλων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν κι από τις τέσσερις διεργασίες υπογραμμίζουν ότι **οι κύριες αρνητικές επιπτώσεις σε όλες τις κατηγορίες των επιπτώσεων, τόσο στις ενδιάμεσες όσο και στις τελικές, οφείλονται στην υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας**. Ένας τρόπος ελαχιστοποίησης αυτού του αρνητικού αντίκτυπου είναι η αντικατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας από άλλη πηγή που περιλαμβάνει εναλλακτικές μορφές ενέργειας όπως για παράδειγμα ενέργεια που προέρχεται από τη βιομάζα, την ηλιακή ενέργεια, την αιολική ενέργεια. Αυτή η αντικατάσταση ελαχιστοποιεί σημαντικά τη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Γενικά, όλες οι μηχανικές διεργασίες είναι εξαιρετικά ενεργοβόρες λόγω του μηχανολογικού εξοπλισμού που περιλαμβάνουν. Επίσης, μία σημαντική επιβάρυνση στην ανθρώπινη υγεία προκαλείται από τη χρήση εποξειδικής ρητίνης εξαιτίας της χημικής σύστασής της. Οι εποξειδικές ρητίνες μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα υγείας γι αυτό απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά τη χρήση τους καθώς κι η λήψη μέτρων ασφαλείας. Ωστόσο, εκτός από τις αρνητικές επιπτώσεις, υπάρχει επίσης ένα θετικό αποτέλεσμα που συμβάλλει στη λύση της κρισιμότητας των υλικών. Αναλύοντας την ΑΚΖ της μηχανικής κατεργασίας μεσομεταλλικών ενώσεων Fe₃Al με εργαλεία σκληρών μετάλλων, παρατηρήθηκε ότι τα απόβλητα που προκύπτουν από τη διεργασία μπορούν να ανακυκλωθούν. Τα μεταλλικά απόβλητα αποτελούνται από μοσχεύματα Fe₃Al κι από ρινίσματα Fe των εργαλείων σκληρών μετάλλων. Η ανακύκλωση είναι μια σωτήρια λύση για τον κόσμο των υλικών, καθιστώντας τις μεσομεταλλικές ενώσεις Fe-Al ικανές να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατα των CRM, δηλαδή του Cr-Ni σε τμήματα από ανοξείδωτο χάλυβα. Εκτός από τις καλές μηχανικές ιδιότητες των μεσομεταλλικών ενώσεων που τα καθιστούν κατάλληλα υποκατάστατα, τα ανακυκλωμένα υλικά μπορούν να επανέλθουν στο σύστημα και να επαναχρησιμοποιηθούν. Συνεπώς, υπάρχει ένας κύκλος συνεχούς ανανέωσης των υλικών. Επιπλέον, η ανακύκλωση αυτών των υλικών θα συμβάλει στην επίτευξη

περιβαλλοντικών κι οικονομικών ισορροπιών, στις επενδυτικές αποφάσεις και στην ενίσχυση της αγοράς και της τεχνολογίας.

Γενικά, ένα βασικό πλεονέκτημα που προσφέρει η AKZ είναι ότι εξετάζει πολλαπλές κατηγορίες επιπτώσεων σε αντίθεση με τις προσεγγίσεις που εξετάζουν μόνο μία ροή ή επίπτωση, όπως το αποτύπωμα άνθρακα (C) ή το ενεργειακό ισοζύγιο. Επίσης η AKZ όχι μόνο εκτιμά αλλά και ποσοτικοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός συστήματος αλλά και με το τέλος ζωής. Ακόμη η AKZ αποτελεί κίνητρο αλλαγών με σκοπό τη βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης. Αυτό συμβαίνει μέσω 1) της καταγραφής σημαντικών δεδομένων, 2) της δυνατότητας συστηματικής εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, 3) της αναγνώρισης ευκαιριών για τη βελτίωση των διαδικασιών και των προϊόντων και 4) της διεξαγωγής σύγκρισης της απόδοσης των εναλλακτικών διαδικασιών, προϊόντων και τεχνολογιών. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα που φέρει η AKZ είναι αυτό της βελτίωσης της επικοινωνίας με τις αντίστοιχες ομάδες ενδιαφερομένων (stakeholders). Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή ποσοτικής πληροφόρησης στους stakeholders καθώς και την ανάπτυξη σχέσης εμπιστοσύνης κι εδραίωσης ενός παραγωγικότερου πλαισίου επικοινωνίας με την ευρύτερη κοινωνία. Εκτός από τα πλεονεκτήματα, η AKZ χαρακτηρίζεται κι από περιορισμούς. Ένας από τους πιο βασικούς περιορισμούς της AKZ είναι η ανεπαρκής διαθεσιμότητα κι αμφισβητήσιμη ποιότητα των δεδομένων για τη διεξαγωγή της. Επίσης άλλοι ανασταλτικοί παράγοντες είναι η αδυναμία αναγνώρισης των τοπικών και χρονικών επιδράσεων κι η δυσκολία του συνυπολογισμού των μηχανισμών αγοράς και των δευτερογενών αποτελεσμάτων της τεχνολογικής ανάπτυξης.

Η έρευνα αυτή έχει επικεντρωθεί στην αξιολόγηση των μεσομεταλλικών υλικών μόνο από περιβαλλοντική άποψη, αλλά αναγνωρίζεται ότι οι κοινωνικές κι οικονομικές ανησυχίες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε πολλούς διαφορετικούς τομείς κι επίπεδα στην καθημερινή ζωή. Μια βασική πρόκληση για τις βιομηχανίες είναι να είναι σε θέση να εμπιστεύονται και να αφομοιώνουν τα δεδομένα που παράγονται και τα συμπεράσματα που αντλούνται από τη μέθοδο AKZ με έναν τρόπο που να είναι χρήσιμος για τη διαχείριση των επιχειρήσεων, τις μακροοικονομικές αποφάσεις και τις αποτελεσματικές πολιτικές διαχείρισης και χρήσης των προϊόντων. Μια πρόσθετη προοπτική είναι να συνδεθεί η AKZ στην Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής (Life Cycle Cost) (LCC). Αυτή η σύνδεση θα χρησιμεύσει ως πυλώνας για την αειφόρο ανάπτυξη και θα δώσει «πνοή» στις βιομηχανίες που πραγματοποιούν πιο αποτελεσματική διαχείριση και κοστολόγηση των διαδικασιών.

Αναφορές

- [1] Rebitzer, G. et al. (2004). *Environment International* **30**, 701(2004)
- [2] Yamaguchi, M. et al. (1996). *Physical metallurgy and processing of intermettalic compounds*
- [3] Novák, P. et al. (2017). Intermetallics as innovative CRM-free materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **329**
- [4] *Background report of Critical raw materials and the circular economy* (JRC SCIENCE FOR POLICY REPORT, 2017)
- [5] Mancini, L. et al. (2015). Potential of life cycle assessment for supporting the management of critical raw materials. *Int J Life Cycle Assess*, **20**:100–116
- [6] *Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials* (REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU, 2014)
- [7] *Criticality Assessments, Study on the review of the list of Critical Raw Materials for the EU* (Final Report, 2017)
- [8] M. Bordin, *Life Cycle Assessment applied to the case study of a lawn mower tractor* (Final Thesis, Ca' Foscari University of Venice, 2016/2017)
- [9] S. Parsons, *Interpreting Life Cycle Assessment for Decision-Making on Emerging Materials* (Volume I – Thesis, University of Surrey)
- [10] Jahanshahi, S. et al. (2004). ALTERNATIVE ROUTES TO STAINLESS STEEL – A LIFE CYCLE APPROACH. *Proceedings: Tenth International Ferroalloys Congress*
- [11] E.O. Olakanmi et al. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science* **74** 401–477

- [12] Jolliet, O. et al (2016). *ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE ASSESSMENT*.
- [13] Kolotzek, S. et al. (2018). A company-oriented model for the assessment of raw material supply risks, environmental impact and social implications. *Journal of Cleaner Production*, **176**
- [14] Nguyen, R. et al. (2018). Analyzing critical material demand : A revised approach. *Science of the Total Environment*, **630**
- [15] Zedan, Y. et al. (2010). Effects of Fe intermetallics on the machinability of heat-treated Al-(7–11) % Si alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, **210**
- [16] Pauliuk, S. et al. (2013). Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources, Conservation and Recycling*, **71**
- [17] Glöser, S. et al. (2015). Raw material criticality in the context of classical risk assessment. *Resources Policy*, **44**
- [18] Azapagic, A. (2002). Life cycle assessment: a tool for identification of more sustainable products and processes. In J. Clark & D. Macquarrie (Ed.), *Handbook of Green Chemistry and Technology* (pp. 62-85). Oxford: Blackwell; Science
- [19] Warner, C.J. et al. (2004). Green Chemistry. *Environmental Impact Assessment Review*, 24, 775-799
- [20] Ζουμπούλης, Α.Ι. Σημειώσεις για την ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ). <https://drive.google.com/file/d/0B2tgZVb0xkFmbI9jOG9DSW05d3M/view?pli=1>
- [21] Life cycle assessment – An operational guide to the ISO standards. <http://media.leidenuniv.nl/legacy/new-dutch-lca-guide-part-1.pdf>
- [22] Sprecher, B. et al. (2014). Life Cycle Inventory of the Production of Rare Earths and the Subsequent Production of NdFeB Rare Earth Permanent Magnets. *Environmental Science & Technology*, **48**

[23] Goedkoop, M. et al. (2016). *Introduction to LCA with SimaPro*

[24] Grant Agreement EQUINOX PROJECT, No. 689510

Παράρτημα

Παραθέεται το ερωτηματολόγιο που στάλθηκε στους συμμετέχοντες του ερευνητικού προγράμματος EQUINOX ώστε να γίνει η συλλογή των απαραίτητων δεδομένων για την ΑΚΖ των διεργασιών.

General information

Partner's name	
Person in charge	
Date	

Product / Case study	
Product functional unit (*1)	
Annual capacity	

Process 1. (i.e. material production)	
Process 2 (i.e. packaging process)	
Process 3 (i.e. other)	

Materials

Team A. Raw materials

Material name	Product Functional Unit (same value as at *1)	Quantity	Unit	Transportation mode (i.e. air, pipe, van)	Distance	Comment (if applicable)

Packaging materials	Product Functional Unit (same value as at *1)	Quantity	Unit	Transportation mode (i.e. air, pipe, van)	Distance	Comment (if applicable)

Team B. Energy

Source	Product Functional Unit (same value as at *1)	Quantity	Unit	Comment (if applicable)

Team C. Emission(s)

Please fill in the table providing the emitted substances of the production process in air, water, soil, etc.

Name	Product Functional Unit (same value as at *1)	Quantity	Unit	Comment (if applicable)

Team D. Waste(s)

Waste stream (i.e. hazardous, non-hazardous, toxic)	Product Functional Unit (same value as at *1)	Quantity	Unit	Transportation mode (i.e. air, pipe, van)	Distance	Comment (if applicable)

