



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΟΥ ΧΥΤΟΣΙΔΗΡΟΥ (PIG IRON)**

ΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΦΟΥΝΤΗ ΜΑΡΙΑ

Αθήνα, Ιούλιος 2020

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	5
Abstract	6
Κεφάλαιο 1^ο – Εισαγωγή	7
1.1. Κλιματική αλλαγή.....	7
1.2. Γενικά στοιχεία για την βιομηχανία χάλυβα	10
Κεφάλαιο 2^ο – Βιομηχανική παραγωγή pig iron	15
2.1 Περιγραφή συστημάτων συμβατικής μεθόδου.....	16
2.1.1. Μονάδα παραγωγής κοκ (coke oven plant).....	16
2.1.2. Μονάδα πυροσυσσωμάτωσης (sinter plant).....	18
2.1.3. Μονάδα πελετοποίησης (pelletisation plant).....	21
2.1.4. Υψικάμινος (blast furnace).....	23
2.2. Περίπτωση παραγωγής pig iron από υπολείμματα πλούσια σε Zn.....	34
2.2.1. Waelz και DK process.....	34
2.2.2. Γενικά για την μέθοδο DESTINY.....	40
2.2.3. Μέθοδος παραγωγής pig iron με μικροκύματα (DESTINY).....	44
Κεφάλαιο 3^ο - Ανάλυση κύκλου ζωής	48
3.1. Γενικά στοιχεία.....	48
3.2. Μεθοδολογία AKZ.....	49
3.3. Υπολογιστικό εργαλείο (Sima Pro).....	53

Κεφάλαιο 4^ο –Ανάλυση κύκλου ζωής στην παραγωγή pig iron.....	55
4.1. Λειτουργική μονάδα	55
4.2. Όρια συστημάτων μεθόδων παραγωγής pig iron	55
4.3. Καθορισμός περιβαλλοντικών δεικτών αξιολόγησης.....	62
Κεφάλαιο 5^ο – Αποτελέσματα.....	67
5.1. Ισοζύγια μάζας – ενέργειας.....	68
5.2. Δείκτες ΑΚΖ/Συγκριτική αξιολόγηση.....	75
5.2.1. Σενάριο ενεργειακού μίγματος από την βιβλιοθήκη του Sima Pro.....	77
5.2.2. Σενάριο τρέχοντος ενεργειακού μίγματος στην Ελλάδα.....	84
5.2.3. Σενάριο μελλοντικού ενεργειακού μίγματος στην Ελλάδα.....	90
5.2.4. Σύνοψη των αποτελεσμάτων για την κλιματική αλλαγή.....	96
5.2.5. Σύγκριση DK – DESTINY process.....	100
Κεφάλαιο 6^ο – Συμπεράσματα.....	103
Παράρτημα.....	105
Πηγές – Βιβλιογραφία.....	131

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ) των συστημάτων παραγωγής ακατέργαστου χυτοσιδήρου (pig iron). Αρχικά γίνεται αναφορά στην συμβατική μέθοδο παραγωγής μέσω της υψικαμίνου και των υποσυστημάτων της. Καθώς όμως υπάρχουν περιορισμοί στο ποσοστό ψευδαργύρου (Zn) που πρέπει να υπάρχουν στα υπολείμματα καθώς προκαλούν πολλά προβλήματα στην λειτουργία της υψικαμίνου, μελετώνται και οι περιπτώσεις παραγωγής pig iron από τα υπολείμματα αυτά. Συγκεκριμένα, μελετάται η μέθοδος DESTINY η οποία λειτουργεί με χρήση μικροκυμάτων (βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο), και η μέθοδος DK με ένα καινοτόμο σύστημα υψικαμίνου και φιλτραρίσματος του ψευδαργύρου. Το σύστημα DESTINY βασίζεται στη λειτουργία μικροκυμάτων για την παραγωγή του pig iron και σκοπό έχει την μερική -τουλάχιστον- αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων και κατ' επέκταση την μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος στην ατμόσφαιρα. Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι μέθοδοι σε θεωρητικό επίπεδο μελετώντας τις διαδικασίες, τα συστήματα διεργασιών καθώς και τα υποσυστήματα που συγκροτούν τις συγκεκριμένες μονάδες. Το κομμάτι αυτό είναι μεγάλης σημασίας αφού βοηθάει στην αποσαφήνιση των εισροών και εκροών μάζας και ενέργειας που είναι απαραίτητες για την ανάλυση του κύκλου ζωής για κάθε διεργασία. Επιπλέον γίνεται εκτεταμένη αναφορά στα αποτελέσματα από τη χρήση του λογισμικού **Sima Pro**, το οποίο χρησιμοποιεί τις ροές μάζας και ενέργειας των διεργασιών καθώς και μεγάλες βάσεις δεδομένων, όσον αφορά στον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, μέσω των εκπομπών και περιβαλλοντικών δεικτών αξιολόγησης. Τέλος αναφέρονται και στα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα αυτά μεμονωμένα αλλά και συγκριτικά.

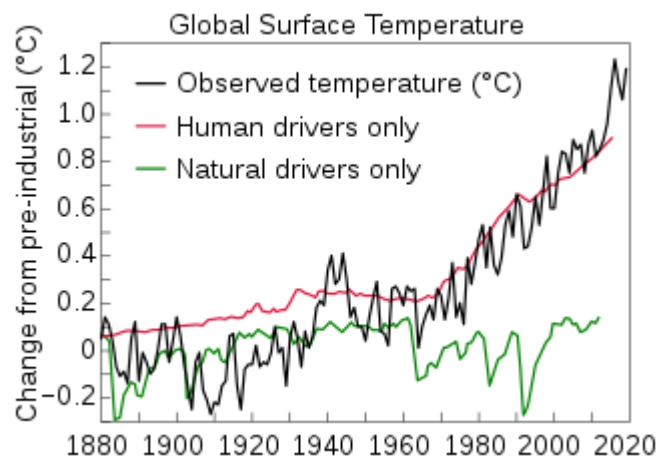
ABSTRACT

This thesis aims to analyze the life cycle (LCA) of pig iron production systems. Initially, reference is made to the conventional method of production through blast furnace and its subsystems. However, as there are restrictions on the amount of zinc (Zn) that must be present in the residues as they cause many problems in the operation of the blast furnace, the cases of pig iron production from these residues are also studied. Specifically, the DESTINY method, which works using microwaves (it is in an experimental stage), and the DK method with an innovative zinc and zinc filtration system are being studied. The DESTINY system is based on microwave operation to produce pig iron and aims to partially -at least- replace fossil fuels and thus reduce the environmental footprint in the atmosphere. Then the methods will be analyzed in theory by studying the processes, the process systems as well as the subsystems that make up the specific units. This part is very important as it helps to clarify the inputs and outputs of mass and energy that are necessary for the analysis of the life cycle for each process. In addition, extensive reference is made to the results from the use of Sima Pro software, which uses process mass and energy flows as well as large databases, in terms of environmental impact, through emissions and environmental evaluation indicators. Finally, they refer to the conclusions that emerge from these results individually and comparatively.

Κεφάλαιο 1^ο – Εισαγωγή

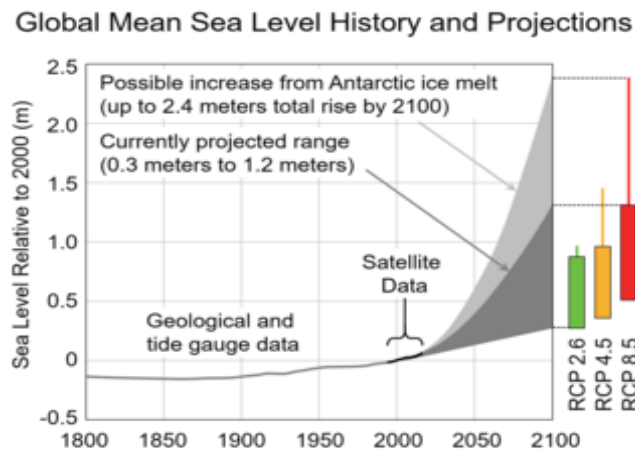
1.1. Κλιματική αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα της σύγχρονης ζωής, με τα σημάδια της να έχουν κάνει ήδη την εμφάνισή τους (Σχ.1.1). Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη και η αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με έκθεση της Διακυβερνητικής επιτροπής του ΟΗΕ για θέματα κλιματικής αλλαγής (Intergovernmental Panel for Climate Change –IPCC), επιβεβαιώνεται ότι η δεκαετία 2009-2018 ήταν θερμότερη κατά $0,93 \pm 0,07$ °C από την προ-βιομηχανική εποχή (1850-1900) [1]. Επί του παρόντος, οι επιφανειακές θερμοκρασίες αυξάνονται κατά περίπου $0,2$ °C ανά δεκαετία [2]. Η IPCC στην έκθεση του 2018 τόνισε την ανάγκη να διατηρηθεί η υπερθέρμανση του πλανήτη κάτω από $1,5$ °C σε σύγκριση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα, προκειμένου να αποφευχθούν οι μη αναστρέψιμες επιπτώσεις. Η πρόταση αυτή της IPCC έρχεται να διορθώσει την επίσης πρόσφατη κλιματική συμφωνία του Παρισιού (Paris Agreement) του 2015 όπου είχε υπογραφεί ο στόχος των 2 °C υπερθέρμανσης σε σύγκριση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα [3].



Σχ. 1.1. Μέση υπερθέρμανση του πλανήτη στην από την βιομηχανική εποχή [4]

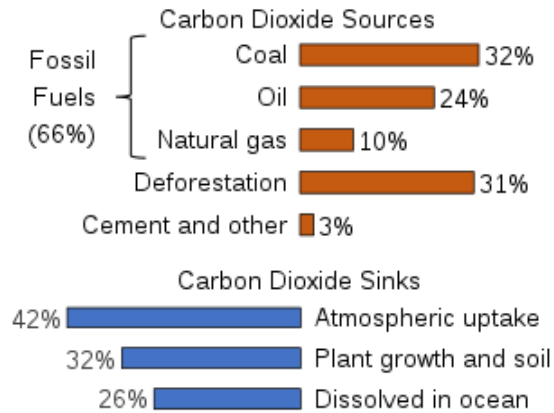
Άλλη μια επίπτωση που προκύπτει από την υπερθέρμανση είναι και η αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Μεταξύ του 1993 και του 2017, η παγκόσμια μέση στάθμη της θάλασσας αυξήθηκε κατά μέσο όρο κατά $3,1 \pm 0,3$ mm ετησίως, ενώ διαπιστώθηκε επίσης επιτάχυνση (Σχ.1.2) . Κατά τον 21ο αιώνα, η IPCC προβάλλει ότι σε ένα πολύ υψηλό σενάριο εκπομπών το επίπεδο της θάλασσας μπορεί να αυξηθεί κατά 61-110 εκατοστά [5]. Το ποσοστό απώλειας πάγου από τους παγετώνες και τα φύλλα πάγου στην Ανταρκτική αποτελεί βασικό τομέα αβεβαιότητας, καθώς η πηγή αυτή μπορεί να αντιπροσωπεύει το 90% της πιθανής αύξησης της στάθμης της θάλασσας. Η αύξηση της θερμικής θερμοκρασίας των ωκεανών υπονομεύει και απειλεί να αποσυνδέσει τις αποθήκες παγετώνων της Ανταρκτικής, με πιθανό αποτέλεσμα την ταχύτερη άνοδο της στάθμης της θάλασσας . Η υποχώρηση των μη πολικών παγετώνων συμβάλλει επίσης στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας . Φυσικά υπάρχουν και άλλες συνέπειες όπως ο κίνδυνος εξαφάνισης κάποιων ειδών ή οι επιπτώσεις στην υγεία και τον βιορυθμό των ανθρώπων.



Σχ. 1.2. Αύξηση της στάθμης της θάλασσας ανά τα χρόνια [6]

Η ανθρώπινη δραστηριότητα από τη Βιομηχανική Επανάσταση και έπειτα, κυρίως εξόρυξη και καύση ορυκτών καυσίμων, αύξησε την ποσότητα αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Ουσίες όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4), το όζον της τροπόσφαιρας, τα CFC και το υποξείδιο του αζώτου έχουν αυξημένη ραδιοσυχνότητα. Από το 2011, οι συγκεντρώσεις CO_2 και μεθανίου αυξήθηκαν κατά 40% και 150%, αντίστοιχα, από την προ-βιομηχανική εποχή [7] . Το 2013, οι αναγνώσεις CO_2 που λαμβάνονται από το παρατηρητήριο Mauna Loa υπερβαίνουν για πρώτη φορά

τις 400 ppm. Αυτά τα επίπεδα είναι πολύ υψηλότερα από οποιαδήποτε στιγμή κατά τα τελευταία 800.000 χρόνια, την περίοδο για την οποία συλλέχθηκαν αξιόπιστα δεδομένα από πυρήνες πάγου. [8,9]



Σχ 1.3. Κατανομή ρύπων CO₂ ανά καύσιμο [10]

Οι παγκόσμιες ανθρωπογενείς εκπομπές αερίων θερμοκηπίου το 2010 ισοδυναμούσαν με 49 δισεκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα (χρησιμοποιώντας τις πιο πρόσφατες δυνατότητες θέρμανσης του πλανήτη σε διάστημα 100 ετών από την έκθεση AR5). Από αυτές τις εκπομπές, το 65% ήταν το διοξείδιο του άνθρακα από την καύση ορυκτών καυσίμων και τη βιομηχανία, το 11% ήταν διοξείδιο του άνθρακα λόγω της αλλαγής χρήσης γης, η οποία οφείλεται κυρίως στην αποψίλωση των δασών, το 16% από το μεθάνιο, το 6.2% από το οξείδιο του αζώτου και το 2.0% από φθοριούχα αέρια. [11]

Σημαντικό μερίδιο έχει και η βιομηχανία χάλυβα (iron and steel industry) , αφενός επειδή πρόκειται για μια από τις πιο ενεργοβόρες βιομηχανίες , αφετέρου επειδή χρησιμοποιούνται μεγάλες ποσότητες ορυκτών καυσίμων για τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα. Υπολογίζεται ότι έχει ένα μερίδιο 5% επί της παγκόσμιας κατανάλωσης το 2017, καθώς και συνεισφορά 5% των παγκόσμιων ανθρωπογενών εκπομπών CO₂. Έτσι είναι μεγάλη η ανάγκη εύρεσης νέων τεχνολογιών που θα οδηγούν σε λιγότερες εκπομπές ρύπων, αν και έχουν γίνει ήδη κάποια βήματα στην προσπάθεια αυτή.[12]

1.2. Γενικά στοιχεία για τη βιομηχανία χάλυβα

Ο χάλυβας είναι κράμα σιδήρου και άνθρακα που περιέχει λιγότερο από 2% άνθρακα και 1% μαγγάνιο και μικρές ποσότητες πυριτίου, φωσφόρου, θείου και οξυγόνου. Ο χάλυβας είναι το σημαντικότερο μηχανολογικό και κατασκευαστικό υλικό στον κόσμο. Χρησιμοποιείται σε κάθε πτυχή της ζωής μας, σε αυτοκίνητα και δομικά προϊόντα, ψυγεία και πλυντήρια, φορτηγά πλοία και χειρουργικά νυστέρια.

Ο χάλυβας παράγεται μέσω δύο κύριων διαδρομών: της διαδρομής της υψικαμίνου-βασικού κλιβάνου οξυγόνου(Blast Furnace -Basic Oxygen Furnace/BF-BOF) και της διαδρομής του φούρνου με ηλεκτρικό τόξο (Electric Arc Furnace/EAF). Παραλλαγές και συνδυασμοί των οδών παραγωγής υπάρχουν επίσης.

Η βασική διαφορά μεταξύ των διαδρομών είναι ο τύπος των πρώτων υλών που καταναλώνουν. Για τη διαδρομή BF-BOF πρόκειται κυρίως για σιδηρομετάλλευμα, άνθρακα και ανακυκλωμένο χάλυβα, ενώ η διαδρομή EAF παράγει χάλυβα χρησιμοποιώντας κυρίως ανακυκλωμένο χάλυβα και ηλεκτρική ενέργεια. Ανάλογα με τη διαμόρφωση του εργοστασίου και τη διαθεσιμότητα του ανακυκλωμένου χάλυβα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες πηγές μεταλλικού σιδήρου, όπως ο άμεσα μειωμένος σίδηρος (DRI) ή το θερμό μέταλλο στη διαδρομή EAF. Συνολικά, το 70,7% του χάλυβα παράγεται χρησιμοποιώντας τη διαδρομή BF-BOF. Πρώτον, τα μεταλλεύματα σιδήρου ανάγονται σε σίδηρο, που ονομάζεται επίσης ζεστό μέταλλο ή χυτοσίδηρος (hot metal ή pig iron). Στη συνέχεια, ο σίδηρος μετατρέπεται σε χάλυβα στο BOF. Μετά τη χύτευση και την έλαση, ο χάλυβας παραδίδεται ως, πλάκα, τμήματα ή ράβδοι. Ο χάλυβας που κατασκευάζεται σε EAF χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια για την τήξη ανακυκλωμένου χάλυβα. Τα πρόσθετα, όπως τα κράματα, χρησιμοποιούνται για να προσαρμοστούν στην επιθυμητή χημική σύνθεση. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να συμπληρωθεί με οξυγόνο που εισάγεται στο EAF. Τα στάδια της μεταγενέστερης διαδικασίας, όπως η χύτευση, η αναθέρμανση και η έλαση, είναι παρόμοια με αυτά που βρίσκονται στη διαδρομή BF-BOF. Περίπου το 28,9% του χάλυβα παράγεται μέσω της διαδρομής του EAF. [13]

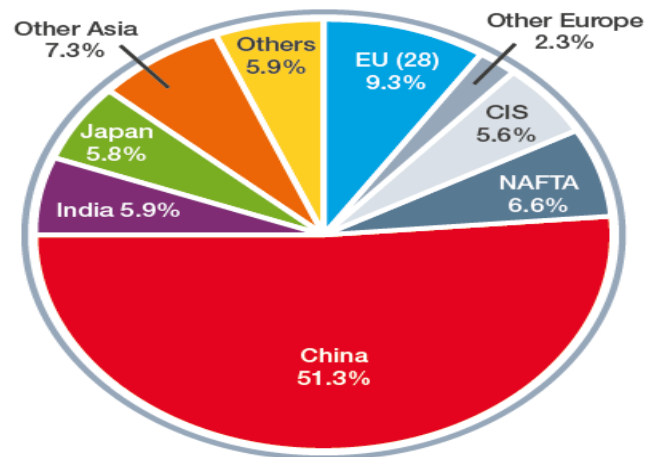
Η βιομηχανία χάλυβα είναι από τις σημαντικότερες βιομηχανίες παγκοσμίως, με αυξανόμενες μάλιστα τάσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4 όπου η παραγωγή χάλυβα έφτασε περίπου τους 1,8 δισεκατομμύρια τόνους. Από τις χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή χάλυβα είναι με μεγάλη μάλιστα διαφορά η Κίνα, καθώς καλύπτει περίπου το 50% της παγκόσμιας παραγωγής. Στη συνέχεια ακολουθούν με σαφώς μικρότερη παραγωγή χώρες όπως η Ινδία, η Ιαπωνία και οι Η.Π.Α. Αξίζει να αναφερθεί ότι το 2018 η βιομηχανία χάλυβα απασχολούσε περίπου 6,1 εκατομμύρια ανθρώπους παγκοσμίως.[14]

Years	World	Years	World	Years	World
1950	189	2000	850	2010	1 433
1955	270	2001	852	2011	1 538
1960	347	2002	905	2012	1 560
1965	456	2003	971	2013	1 650
1970	595	2004	1 063	2014	1 669
1975	644	2005	1 148	2015	1 620
1980	717	2006	1 250	2016	1 627
1985	719	2007	1 348	2017	1 730
1990	770	2008	1 343	2018	1 808
1995	753	2009	1 239		

Σχ 1.4. Συνολική παραγωγή χάλυβα σε εκατομμύρια τόνους τα έτη 1950-2018 [14]

Crude steel production

World total: 1 808 million tonnes



Others comprise:

Africa	1.0%	Central and South America	2.5%
Middle East	2.1%	Australia and New Zealand	0.4%

Σχ 1.5. Διάγραμμα-πίτα για την κατανομή της παραγωγής χάλυβα. [14]

Country	2018		2017	
	Rank	Tonnage	Rank	Tonnage
China	1	928.3	1	870.9
India	2	106.5	3	101.5
Japan	3	104.3	2	104.7
United States	4	86.6	4	81.6
South Korea	5	72.5	6	71.0
Russia	6	71.7	5	71.5
Germany	7	42.4	7	43.3
Turkey	8	37.3	8	37.5
Brazil	9	34.9	9	34.5
Italy	10	24.5	10	24.1
Iran	11	24.5	13	21.2
Taiwan, China	12	23.2	11	22.4
Ukraine	13	21.1	12	21.4
Mexico	14	20.2	14	20.0
France	15	15.4	15	15.5
Spain	16	14.3	16	14.4
Vietnam	17	14.1	18	11.5
Canada (e)	18	12.9	17	13.6
Poland	19	10.2	19	10.3
Belgium	20	8.0	21	7.8
Egypt	21	7.8	23	6.9
United Kingdom	22	7.3	22	7.5
Austria	23	6.9	20	8.1
Netherlands	24	6.8	24	6.8
South Africa	25	6.3	25	6.3
Australia	26	5.7	26	5.3
Indonesia (e)	27	5.5	27	5.2
Saudi Arabia	28	5.2	31	4.8
Slovak Republic (e)	29	5.2	28	5.0
Argentina	30	5.2	32	4.6
Czech Republic	31	4.9	33	4.6
Pakistan	32	4.7	29	5.0
Sweden	33	4.7	30	4.9
Kazakhstan (e)	34	4.6	35	4.5
Thailand	35	4.3	34	4.5
Finland	36	4.1	36	4.0
Romania	37	3.5	37	3.4
Malaysia (e)	38	3.5	39	3.2
United Arab Emirates	39	3.2	38	3.3
Qatar	40	2.6	40	2.6
Byelorussia (e)	41	2.5	41	2.3
Luxembourg	42	2.2	42	2.2
Portugal	43	2.2	43	2.1
Oman (e)	44	2.0	44	2.0
Algeria (e)	45	2.0	66	0.4
Hungary	46	2.0	45	1.9
Serbia	47	2.0	46	1.5
Switzerland (e)	48	1.5	47	1.5
Philippines (e)	49	1.5	48	1.4
Greece	50	1.5	49	1.4
Others		14.0		14.1
World		1 808.4		1 729.8

e = estimate

9

Σχ 1.6. Παραγωγή χάλυβα ανά χώρα σε εκατομμύρια τόνους [14]

Στην παρούσα διπλωματική βέβαια δε θα γίνει μελέτη για όλη την βιομηχανία χάλυβα (δηλαδή μέχρι την παραγωγή του τελικού χάλυβα) , αλλά για τη παραγωγή ενός ενδιάμεσου προϊόντος που ονομάζεται χυτοσίδηρος ή όπως είναι πιο γνωστό pig iron. Το προϊόν αυτό το οποίο είναι σε μορφή λιωμένου μετάλλου (για αυτό λέγεται και hot metal) παράγεται στην υψικάμινο (blast furnace) και είναι αυτό που μεταφέρεται σε ειδικό κλίβανο ώστε να γίνει χάλυβας με τη χρήση οξυγόνου. Η μορφή αυτή του χυτοσιδήρου την συναντάμε μόνο στην μέθοδο BF-BOF όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, για αυτό στο κεφάλαιο 2 και την περιγραφή της συμβατικής μεθόδου θα γίνει αναφορά μόνο για την υψικάμινο και τα υποσυστήματα της.

million tonnes

	Production 2017	Production 2018	- Exports 2018	+ Imports 2018	Apparent = consumption 2018
Austria	6.3	5.3	0.0	0.0	5.3
Belgium-Luxembourg	4.8	4.9	0.1	0.3	5.0
Czech Republic	3.7	4.0	0.1	0.1	3.9
Finland	2.6	2.7	0.0	0.0	2.7
France	10.7	10.5	0.1	0.2	10.6
Germany	27.8	27.3	0.2	0.5	27.5
Hungary	1.3	1.4	0.0	0.0	1.4
Italy	5.1	4.8	0.1	1.7	6.5
Netherlands	6.1	6.2	0.6	0.6	6.2
Poland	5.2	4.9	0.1	0.3	5.1
Romania	1.9	2.0	0.0	0.1	2.0
Slovak Republic	4.1	4.2	0.0	0.0	4.2
Spain	4.5	4.5	0.0	0.2	4.7
Sweden	3.1	2.9	0.0	0.1	2.9
United Kingdom	6.0	5.6	0.0	0.0	5.6
Other EU	-	-	0.0	0.1	0.1
European Union (28)	93.2	91.0	1.3	4.0	93.7
Turkey	10.6	10.5	0.0	1.3	11.8
Others	2.2	2.3	0.1	0.0	2.3
Other Europe	12.7	12.9	0.1	1.3	14.1
Kazakhstan	3.8	3.4	0.0	-	3.4
Russia	52.0	51.2	5.8	0.5	46.0
Ukraine	20.1	20.6	3.0	0.0	17.6
Other CIS	-	-	0.0	0.1	0.1
CIS	76.0	75.2	8.8	0.6	67.0

Canada	6.3	6.7	0.0	0.0	6.7
Mexico	4.2	4.4	0.0	0.4	4.8
United States	22.4	24.1	0.0	6.0	30.0
NAFTA	32.9	35.2	0.1	6.4	41.6
Argentina	2.2	2.2	-	0.0	2.2
Brazil	28.4	28.4	1.9	0.0	26.5
Chile	0.7	0.7	-	-	0.7
Other Latin America	0.2	0.2	0.0	0.1	0.4
Central and South America	31.5	31.5	1.9	0.2	29.7
South Africa	4.4	4.6	0.6	0.0	4.0
Other Africa	0.8	0.8	0.0	0.0	0.8
Africa	5.2	5.4	0.6	0.0	4.8
Iran	2.3	2.4	0.0	-	2.4
Other Middle East	-	-	0.1	0.3	0.2
Middle East	2.3	2.4	0.1	0.3	2.5
China	748.3	771.1	0.0	0.1	771.1
India	66.8	71.5	0.3	0.0	71.2
Japan	78.3	77.3	0.0	0.1	77.4
South Korea	47.1	47.1	0.1	0.2	47.2
Taiwan, China	14.4	14.8	0.0	0.6	15.5
Other Asia	5.1	6.7	0.2	1.5	8.0
Asia	960.0	988.5	0.6	2.5	990.4
Australia	3.8	3.9	0.0	0.0	3.9
New Zealand	0.7	0.7	-	0.0	0.7
Other Oceania	-	-	0.0	0.0	0.0
Oceania	4.4	4.6	0.0	0.0	4.6
World	1 218.2	1 246.6	13.5	15.4	1 248.5

Σχ 1.7. Παραγωγή pig iron ανά χώρα σε εκατομμύρια τόνους για τα έτη 2017-2018 [14]

Κεφάλαιο 2^ο – Βιομηχανική παραγωγή pig iron

Ο ακατέργαστος χυτοσίδηρος (pig iron) είναι ένα ενδιάμεσο προϊόν της βιομηχανίας σιδήρου-χάλυβα, το οποίο λαμβάνεται με τη χύτευση σιδηρομεταλλεύματος σε υψικάμινους (Σχ.2.1). Λόγω της μορφής που λαμβάνεται από την υψικάμινο ονομάζεται και καυτό μέταλλο (hot metal). Ο χυτοσίδηρος έχει πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, συνήθως 3,8-4,7% , μαζί με διοξείδιο του πυριτίου και άλλα συστατικά από σκωρία, γεγονός που το καθιστά πολύ εύθραυστο και δεν είναι χρήσιμο άμεσα ως υλικό εκτός από περιορισμένες εφαρμογές [15]. Στο υποκεφάλαιο 2.1 θα περιγραφεί η διαδικασία παραγωγής του στην υψικάμινο, αλλά επειδή οι εισροές υλικών σε αυτήν περιέχει κάποιες ειδικές έννοιες όπως το πυροσυσσωμάτωμα , το κοκ και τα πέλετ (σφαιρίδια) θα γίνει μια σύντομη αναφορά και στις διαδικασίες παραγωγής των υλικών αυτών.



Σχ 2.1 . Ακατέργαστος χυτοσίδηρος όπως λαμβάνεται από την υψικάμινο. [16]

2.1. Περιγραφή συμβατικής μεθόδου [17,18]

2.1.1. Μονάδα παραγωγής κοκ (coke oven plant)

Ο οπτάνθρακας (κοκ) είναι ένα γκρίζο, σκληρό και πορώδες καύσιμο με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και λίγες ακαθαρσίες, που παράγεται με θέρμανση άνθρακα ή ελαίου χωρίς αέρια - μια διαδικασία καταστροφικής απόσταξης. Πρόκειται για ένα σημαντικό βιομηχανικό προϊόν, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στην τήξη σιδηρομεταλλεύματος, αλλά και ως καύσιμο σε σόμπες, όταν η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί πρόβλημα.

Ο όρος «οπτάνθρακας» χωρίς περιορισμούς αναφέρεται συνήθως στο προϊόν που προέρχεται από ασφαλτούχο άνθρακα χαμηλής περιεκτικότητας σε τέφρες και χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο με μέθοδο που ονομάζεται οπτανθρακοποίηση. Ένα παρόμοιο προϊόν που ονομάζεται οπτάνθρακας πετρελαίου ή κοκ, προέρχεται από διυλιστήρια αργού πετρελαίου σε πετρέλαιο. Ο οπτάνθρακας μπορεί επίσης να σχηματιστεί φυσικά με γεωλογικές διαδικασίες.

Η πυρόλυση άνθρακα σημαίνει τη θέρμανση του άνθρακα σε ατμόσφαιρα χωρίς οξυγόνο για την παραγωγή οπτάνθρακα (στερεό), αέριο και υγρό. Η πυρόλυση άνθρακα σε υψηλή θερμοκρασία ονομάζεται εξανθράκωση. Σε αυτή τη διαδικασία, η θερμοκρασία των καυσαερίων από την καύση είναι συνήθως 1150 - 1350 ° C. Η διάρκεια εξαρτάται, π.χ. από το πλάτος του φούρνου (στην περίπτωση θέρμανσης από τις πλευρές), την πυκνότητα του άνθρακα και την ποιότητα του επιθυμητού οπτάνθρακα (π.χ. χρήση σε χυτήρια ή υψικαμίλους). Ο σημαντικότερος αναγωγικός παράγοντας στην παραγωγή pig iron είναι ο οπτάνθρακας ο οποίος αφαιρεί το οξυγόνο είτε έμμεσα σχηματίζοντας διοξείδιο του άνθρακα είτε χρησιμοποιώντας άμεσα την εγγενή περιεκτικότητά του σε άνθρακα. Η αεριοποίηση του οπτάνθρακα χρησιμεύει επίσης για την παροχή της θερμότητας που απαιτείται για τη διαδικασία αναγωγής. Ο οπτάνθρακας λειτουργεί ως υλικό υποστήριξης μέσω του οποίου κυκλοφορεί το αέριο στη στήλη αποθέματος. Ο οπτάνθρακας δεν μπορεί να αντικατασταθεί εξ ολοκλήρου από άνθρακα ή άλλα καύσιμα. Μόνο ορισμένοι άνθρακες, για παράδειγμα οι οπτάνθρακες ή οι ασφαλτούχοι άνθρακες, με τις κατάλληλες πλαστικές ιδιότητες, μπορούν να μετατραπούν σε οπτάνθρακα και, όπως με τα μεταλλεύματα, αρκετοί τύποι μπορούν να αναμιχθούν για τη βελτίωση την παραγωγικότητα της υψικαμίνου και να επεκτείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Άλλα υλικά που περιέχουν άνθρακα επίσης χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες (π.χ. οπτάνθρακας πετρελαίου (πετρελαϊκό αέριο), υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει αρνητική επίδραση στο περιβάλλον. Υπολείμματα λαδιού ή ελαίου προστίθενται για να δώσουν μια καλύτερη συμπίκνωση του άνθρακα.

Μέχρι τη δεκαετία του 1940, αναπτύχθηκε ο βασικός σχεδιασμός των σύγχρονων κλιβάνων οπτανθρακοποίησης. Οι φούρνοι ήταν μήκους περίπου 12 μ., ύψους 4 μ. και πλάτους 0,5 μ., και ήταν εξοπλισμένα με πόρτες και στις δύο πλευρές. Η ανάκτηση θερμότητας που λαμβάνει χώρα σήμερα επιτρέπει υψηλότερες θερμοκρασίες και αυξημένα ποσοστά κοκκοποίησης. Από τη δεκαετία του 1940, η διαδικασία έχει μηχανοποιηθεί και χρησιμοποιούνται τα υλικά στην κατασκευή των φούρνων έχουν βελτιωθεί χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις του σχεδιασμού. Οι μονάδες ενδέχεται να περιέχουν έως και 70 φούρνους μήκους 14 m και ύψους 6 m. Λόγω της θερμότητας και φαινομένων μεταφοράς, τα πλάτη παρέμειναν μεταξύ 0,3 και 0,6 m. Κάθε φούρνος στην μονάδα χωράει μέχρι 30 τόνους άνθρακα. Κάποια πρόσφατα κατασκευασμένα εργοστάσια παραγωγής κοκ έχουν περαιτέρω αυξημένες διαστάσεις. Για παράδειγμα, οι θάλαμοι της μονάδας παραγωγής κοκ χρησιμοποιούσαν το Duisburg-Schwelgern, Γερμανία (βλέπε σχήμα 2.2), που τέθηκε σε λειτουργία το 2003, είναι μήκους περίπου 20 μ., ύψους 8,3 μ. και πλάτους 0,59 μ. και κάθε θάλαμος έχει χωρητικότητα περίπου 70 τόνους άνθρακα. Το σχήμα 2.2 παρουσιάζει μια φωτογραφία της μονάδας παραγωγής κοκ στο Duisburg-Schwelgern, Γερμανία. [19]



Σχ. 2.2. Φωτογραφία μονάδας παραγωγής κοκ στο Duisburg-Schwelgern, Γερμανία [19]

Η διαδικασία παραγωγής οπτάνθρακα μπορεί να υποδιαιρεθεί σε:

1. χειρισμός και προετοιμασία των καυσίμων
2. λειτουργία θέρμανσης (φόρτιση άνθρακα, θέρμανση (‘ ψήσιμο’, παραγωγή κοκ, σβήσιμο κοκ)
3. χειρισμός του καπνού (εκφόρτωση, αποθήκευση, μεταφορά) και προετοιμασία .
4. Ανάκτηση αερίου της μονάδας (COG) με ανάκτηση και επεξεργασία υποπροϊόντων στην περίπτωση της συμβατικής μονάδας παραγωγής κοκ.
5. Ανάκτηση της θερμότητας του ‘ψησίματος’ και της επεξεργασίας των καυσαερίων στην περίπτωση θερμότητας εγκατάσταση ανάκτησης άνθρακα.[20]

2.1.2. Μονάδα πυροσυσσωμάτωσης (sinter plant) [21]

Οι σύγχρονες υψικάμινοι υψηλής απόδοσης επιτυγχάνουν βελτιωμένη απόδοση από προηγούμενη φυσική και μεταλλουργική προετοιμασία του φορτίου που βελτιώνει τη διαπερατότητα και την αναγωγή. Αυτή η προετοιμασία περιλαμβάνει συγχώνευση του φορτίου του κλιβάνου είτε με πυροσυσσωμάτωση είτε με σφαιροποίηση. Το φορτίο μιας διεργασίας πυροσυσσωμάτωσης αποτελείται από ένα μείγμα λεπτών μεταλλευμάτων, πρόσθετων (π.χ. ασβέστη, ολιβίνη) και ανακυκλωμένα υλικά που φέρουν σίδηρο από μεταγενέστερες εργασίες στις οποίες το κοκ προστίθεται για να διευκολυνθεί η ανάφλεξη του συνολικού φορτίου. Η μεταφορά των υλικών γίνεται σε μια ειδική ζώνη μεταφοράς (Σχ. 2.3)



Σχ 2.3. Ζώνη μεταφοράς υλικών για πυροσυσσωμάτωση [21]

Οι πρώτες ύλες απαιτούν ανάμιξη πριν από τη λειτουργία πυροσυσσωμάτωσης. Αυτό γενικά περιλαμβάνει στρώσιμο των υλικών σε προετοιμασμένες περιοχές στις ακριβείς ποσότητες που απαιτούνται από τη λειτουργία πυροσυσσωμάτωσης. Κάποιες πρόσθετες ροές μπορούν επίσης να προστεθούν σε αυτό το στάδιο, όπως ανακυκλωμένα υλικά από μεταγενέστερες λειτουργίες. Οι κλίνες όπου βρίσκονται τα μεταλλεύματα συνήθως καλύπτονται με ένα στρώμα χονδροειδούς υλικού για την αποφυγή χτυπήματος του ανέμου. Στην έναρξη της πυροσυσσωμάτωσης, το μείγμα μεταλλεύματος μεταφέρεται από τις κλίνες στις αποθήκες. Όπως αναφέρθηκε, άλλα πρόσθετα όπως ασβέστης, ολιβίνη, σκόνη που έχει συλλεχθεί (και σε πολύ μικρότερο βαθμό λάσπες) από τον καθαρισμό αερίων σε υψικαμίνους και ανακυκλωμένα πυροσυσσωμάτωματα (σωματίδια σε κλίμακα <math><5\text{ mm}</math>) μπορούν να προστεθούν στο μέταλλευμα στο στάδιο ανάμιξης. Πρόσθετα, ροές και υπολείμματα εκτός από αυτά που αναγράφονται μπορούν επίσης να αναμειχθούν στο μείγμα πυροσυσσωμάτωσης.

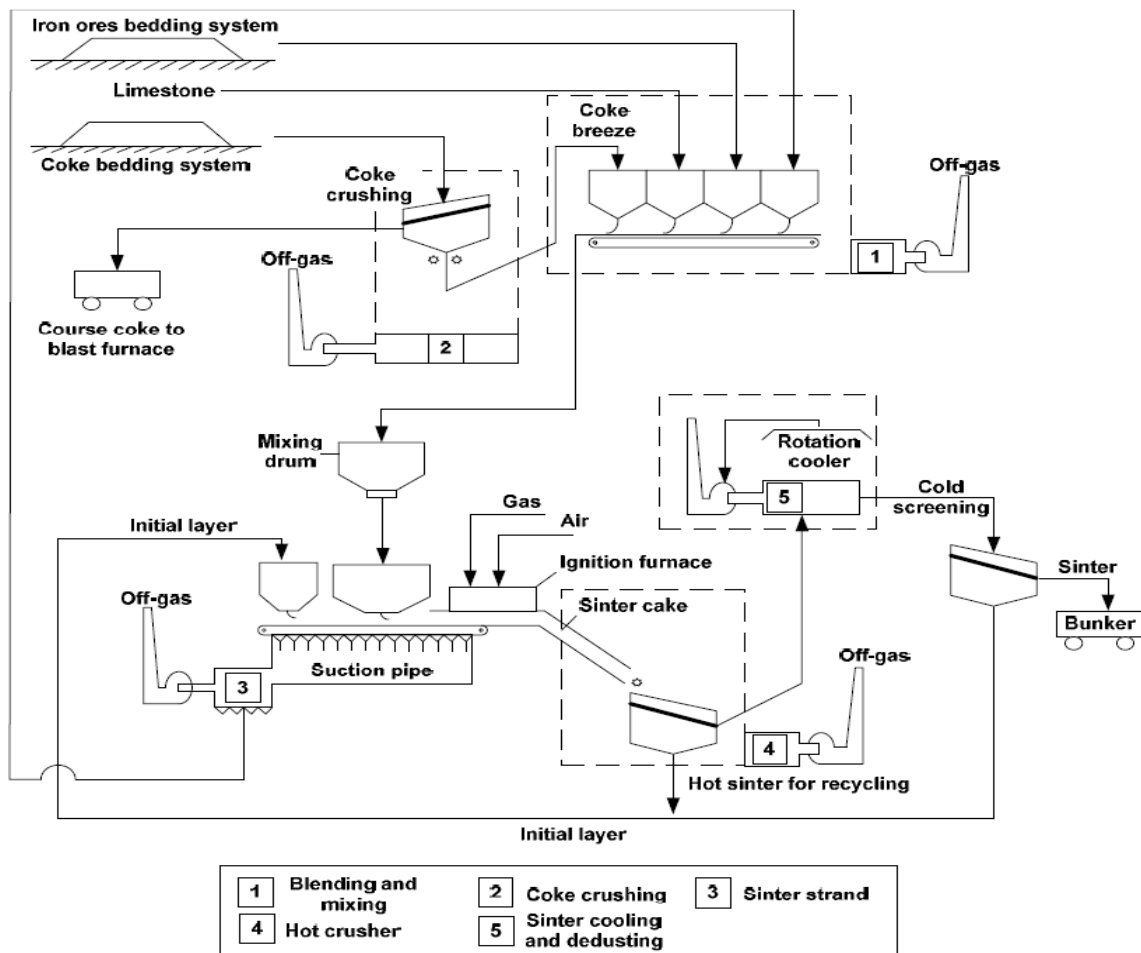
Το κοκ (μεγέθη σωματιδίων <math><5\text{ mm}</math>) είναι το καύσιμο που χρησιμοποιείται πιο συχνά για τη διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης. Λαμβάνεται συνήθως απευθείας από την μονάδα παραγωγής κοκ με σύνθλιψη. Χαλυβοβιομηχανίες με περιορισμένες δυνατότητες παραγωγής κοκ πολλές φορές αγοράζουν συγκεκριμένες προμήθειες καυσίμου για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες στην πυροσυσσωμάτωση. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ανθρακίτης μπορεί να είναι μια οικονομική εναλλακτική λύση για το κοκ και να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία υπό την προϋπόθεση ότι επιβάλλεται η δέουσα προσοχή στην επιλογή υλικού με χαμηλή πτητικότητα, προκειμένου να αποφευχθούν οι αυξημένες εκπομπές υδρογονανθράκων. Το μείγμα μεταλλεύματος και το κοκ ζυγίζονται στους ιμάντες μεταφοράς και φορτώνονται στο τύμπανο ανάμιξης. Εδώ αναμιγνύονται πλήρως και το μείγμα διαβρέχεται για να ενισχύσει τον σχηματισμό μικρό-σφαιριδίων, τα οποία βελτιώνουν τη διαπερατότητα του στρώματος πυροσυσσωμάτωσης.

Το εργοστάσιο πυροσυσσωμάτωσης αποτελείται ουσιαστικά από μια μεγάλη σχάρα από ανθεκτικό στη θερμότητα χυτοσίδηρο. Το προς σύντηξη υλικό τοποθετείται πάνω από ένα ανακυκλωμένο στρώμα βάθους 30 - 50 mm. Αυτό το κάτω στρώμα εμποδίζει το μείγμα να περάσει από τις σχισμές της σχάρας και προστατεύει τη σχάρα από την άμεση θερμότητα. Στις σύγχρονες μονάδες πυροσυσσωμάτωσης, το στρώμα των υλικών που πρέπει να συντηχθούν είναι περίπου 400 - 600 mm. Στην αρχή της σχάρας, ένας θόλος από καυστήρες αερίου φλέγουν το κοκ στο μείγμα. Καθώς το μείγμα σύντηξης προχωρά κατά μήκος της σχάρας, το μέτωπο καύσης τραβιέται προς τα κάτω μέσω του μείγματος. Αυτό δημιουργεί επαρκή θερμότητα (1300 - 1480 ° C) για τη σύντηξη των λεπτών σωματιδίων μαζί σε πορώδες κλίνκερ (είδος τσιμέντου) που αναφέρεται ως πυροσυσσωματωτής. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σύντηξης πραγματοποιούνται

διάφορες χημικές και μεταλλουργικές αντιδράσεις. Οι αντιδράσεις αλληλεπικαλύπτονται και επηρεάζουν η μία την άλλη.

Η ροή απορριμμάτων αερίων από μια μονάδα πυροσυσσωμάτωσης ποικίλλει περίπου από 333000 έως 1600000 Nm³ /ώρα, ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης και τις συνθήκες λειτουργίας. Συνήθως, η ειδική ροή αερίων αποβλήτων κυμαίνεται μεταξύ 1500 και 2500 Nm³/t. Οι μονάδες πυροσυσσωμάτωσης με μεγάλες περιοχές αναρρόφησης (πάνω από 250 m² και / ή πλάτος σχάρας άνω των 3 m) έχουν δύο κύριους αγωγούς συλλογής αερίων ρυπαντών με ξεχωριστούς ανεμιστήρες και συσκευές αφαίρεσης σκόνης, κάτι που θα μπορούσε να είναι κατάλληλο για προηγμένα μέτρα μείωσης των εκπομπών. [21]

Στο σχήμα 2.4 φαίνεται το σχεδιάγραμμα διαδικασιών για την μονάδα πυροσυσσωμάτωσης.



Σχ 2.4. Σχεδιάγραμμα διαδικασιών σε μια μονάδα πυροσυσσωμάτωσης [21]

2.1.3. Μονάδα πελετοποίησης (pelletisation plant) [22]

Τα πέλετ είναι μικρές, κρυσταλλωμένες σφαίρες μεταλλεύματος σιδήρου με μέγεθος 9 - 16 mm. Η διαδικασία σχηματισμού πέλετ αποτελείται από διάφορα στάδια όπως :

- **Άλεση και ανάμιξη**

Οι μονάδες πελετοποίησης σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. Σουηδία) βρίσκονται γενικά στο χώρο των ορυχείων και διαδικασίες όπως η ποιοτική βελτίωση των μεταλλευμάτων ή ο μαγνητικός διαχωρισμός, πραγματοποιούνται πριν από τη διαδικασία σχηματισμού πέλετ. Δεδομένου ότι αυτές οι διαδικασίες διεξάγονται σε υγρή μορφή, η τελική άλεση πριν από τη σφαιροποίηση πραγματοποιείται επίσης υγρή. Διάφορα πρόσθετα (ολιβίνη, δολομίτης, χαλαζίτης και / ή ασβεστόλιθος ανάλογα με το τελικό προϊόν) αλέθονται και στη συνέχεια προστίθενται στο μίγμα μεταλλεύματος, συνήθως σε επίπεδο 3 έως 3,5%, πριν από την ξήρανση.

Αντίθετα, άλλες μονάδες (π.χ. Ολλανδία) λειτουργούν με εισαγόμενα μεταλλεύματα που αναμιγνύονται πριν από την διαδικασία της άλεσης (εκτός εάν το μετάλλευμα είναι ήδη αρκετά καλό, ώστε να μπορεί να παρακάμψει το στάδιο άλεσης και να οδηγηθεί κατ' ευθείαν στο στάδιο διαβροχής και ανάμιξης) . Τα μεταλλεύματα ξηραίνονται και αλέθονται ταυτόχρονα μαζί με προσθήκες διάφορων ροών όπως ολιβίνη. Η θερμότητα για ξήρανση ως επί το πλείστον παρέχεται από φυσικό αέριο , αέριο από τον κλίβανο παραγωγής χάλυβα μέσω οξυγόνου , ή συμπληρωματική θερμότητα από το στάδιο ψύξης των σφαιριδίων. Οι θερμοκρασίες είναι περίπου 100 ° C.

- **Σφαιροποίηση και σκλήρυνση**

Μετά από θερμή άλεση, το υλικό συνδυάζεται με πρόσθετα πριν ξαναβρεθεί σε ξεχωριστό στάδιο διαβροχής και αναμιγνύεται με ένα συνδετικό υλικό (μπεντονίτης ή οργανικό συνδετικό ανάλογα με τον τύπο πέλετ). Στο στάδιο ανάμιξης και διαβροχής γίνεται προσθήκη στερεού καύσιμου (κοκ και / ή ανθρακίτης) μαζί με το συνδετικό

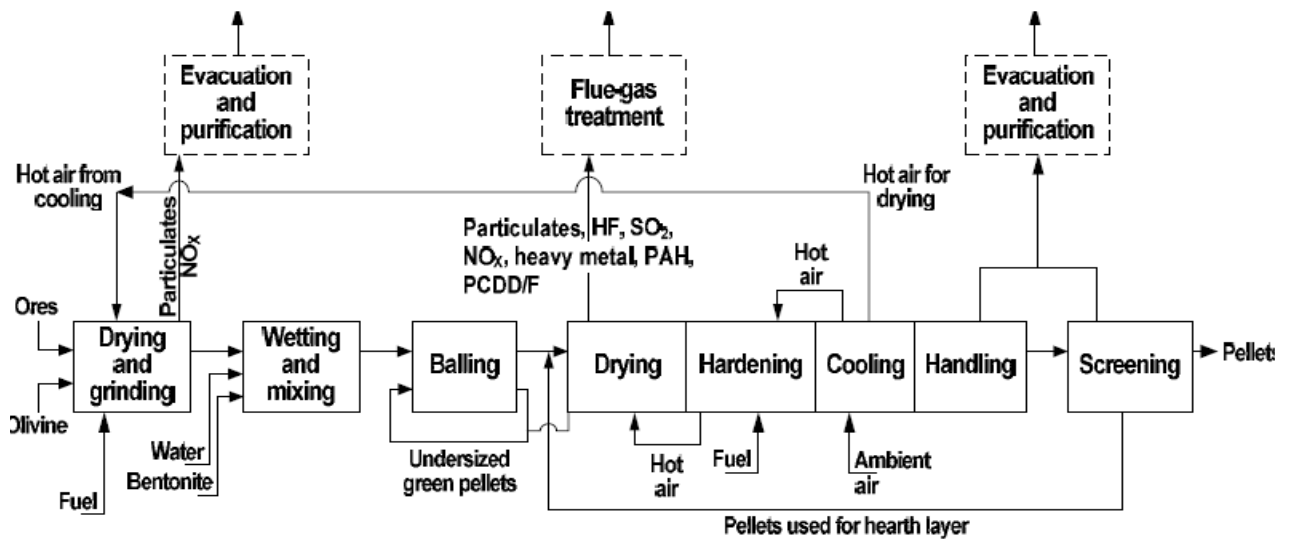
μπεντονίτη. Το επίπεδο υγρασίας του μίγματος σφαιριδίων που κατευθύνεται στο στάδιο σφαιροποίησης κυμαίνεται μεταξύ 7 - 9%. Στη συνέχεια, το κατάλληλης υγρασίας πέλετ (ακατέργαστο μείγμα) υποβάλλεται σε επεξεργασία στη μονάδα προετοιμασίας των σφαιριδίων. Αυτή είναι συνήθως εξοπλισμένη με τέσσερα έως επτά κυκλώματα σφαιροποίησης που αποτελούνται από ένα δοχείο τροφοδοσίας, τύμπανο, κυλινδρικά κόσκινα και μεταφορείς για την κυκλοφορία των υλικών. Το τύμπανο είναι κεκλιμένο από 6 έως 8 ° στο οριζόντιο επίπεδο. Για να αποκτηθεί ένα σαφώς ορισμένο μέγεθος πράσινης σφαίρας, συνήθως στο εύρος από 9 έως 16 mm, τα μικρότερα και υπερμεγέθη κλάσματα υποβάλλονται σε διαλογή και επανακυκλοφορούνται εντός το σταδίου σφαιροποίησης.

Η σκλήρυνση, δηλαδή η θερμική επεξεργασία, αποτελείται από ξήρανση, θέρμανση και ψύξη εκτελούνται σε δύο διαφορετικά συστήματα: σε συστήματα «ευθείας εσχάρας» ή «κλίβανου σχάρας». Κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας, ο μαγνητίτης οξειδώνεται σχεδόν πλήρως στον αιματίτη. Στις περισσότερες περιπτώσεις το ποσοστό του μαγνητίτη στο μέταλλευμα είναι αρκετά υψηλό. Δεδομένου ότι η οξείδωση του μαγνητίτη είναι εξώθερμη, αυτή η αντίδραση μπορεί να παρέχει έως 60% της ενέργειας που απαιτείται για την ωρίμανση των σφαιριδίων. Σε ορισμένες μονάδες όμως το μείγμα μεταλλευμάτων που έχουν υποστεί επεξεργασία έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε μαγνητίτη (μέγιστο 25%). Σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται προσθήκη κοκ και / ή ανθρακίτη για να αντισταθμιστεί η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε μαγνητίτη.

- **Έλεγχος και χειρισμός**

Στο τέλος της διαδικασίας σκλήρυνσης, τα σφαιρίδια συλλέγονται και κοσκινίζονται. Τα σφαιρίδια με μικρότερη διάμετρο από το επιτρεπτό ή τα σπασμένα σφαιρίδια μπορούν να ανακυκλωθούν. Η ανακύκλωση αυτή μπορεί να αφορά την τροφοδοσία άλλων διεργασιών μέσα στη βιομηχανία, για παράδειγμα ως τροφοδοτικό υλικό στη μονάδα πυροσυσσωμάτωσης. Ενδέχεται να υπάρχουν σημαντικές εκπομπές σκόνης.

Στο σχήμα 2.5 φαίνονται σχηματικά τα στάδια επεξεργασίας και των διαδικασιών της μονάδας.



Σχ 2.5. Σχεδιάγραμμα διαδικασιών για την μονάδα πελετοποίησης [16]

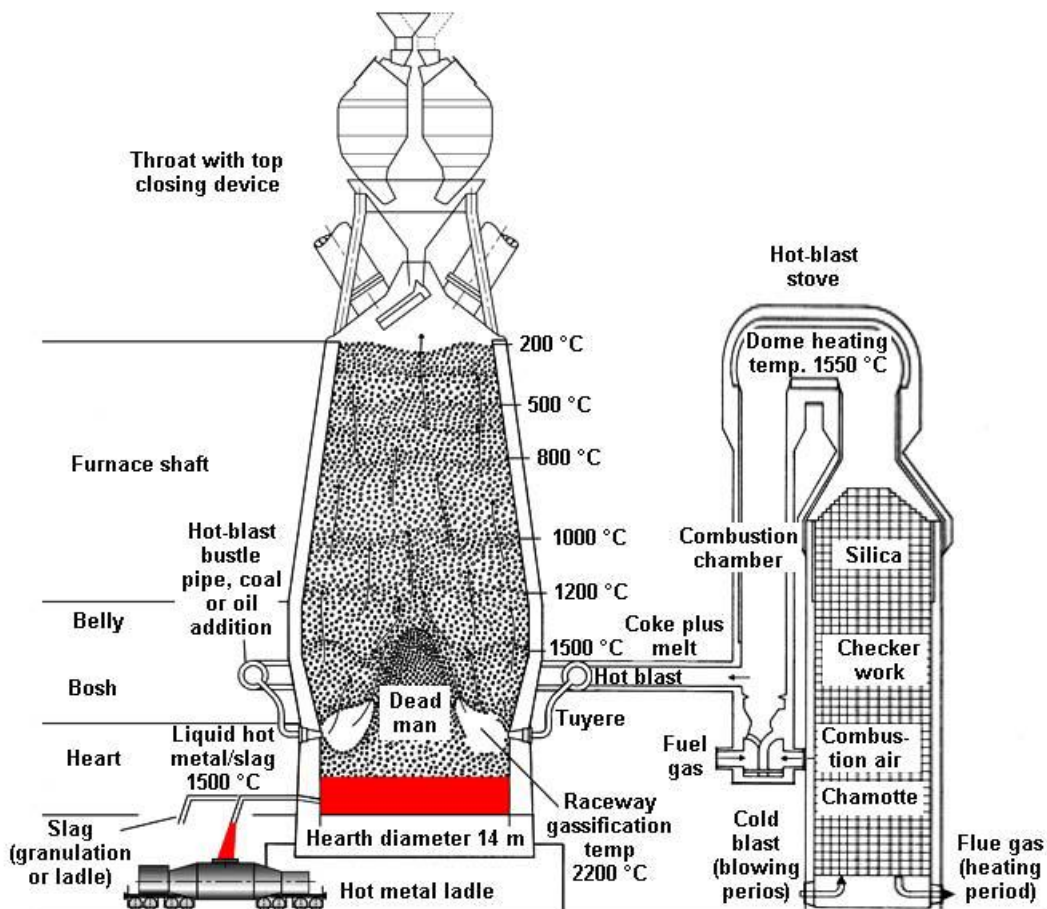
2.1.4 Υψικάμινος (blast furnace)

Η υψικάμινος (blast furnace, BF) (Σχ.2.6) είναι ένα κλειστό σύστημα στο οποίο τα υλικά που περιέχουν σίδηρο (χονδρόκοκκο σιδηρομετάλλευμα, πυροσυσσωμάτωμα και / ή πέλετ), πρόσθετα (παράγοντες σχηματισμού σκωρίας όπως ασβεστόλιθος) και αναγωγικοί παράγοντες (κοκ) τροφοδοτούνται συνεχώς από την κορυφή του άξονα του κλιβάνου μέσω ενός συστήματος φόρτισης που εμποδίζει διαφυγή αερίων της υψικαμίνου (BF gas). [23]



Σχ. 2.6. Φωτογραφία υψικαμίνου από βιομηχανία, Βαλένθια [23]

Το σχήμα 2.7 δείχνει μια απλοποιημένη διάταξη μιας υψικαμίνου που αποτελείται από τον ίδιο τον κλίβανο, το χυτοσίδηρο, τις θερμές εστίες και την επεξεργασία δύο φάσεων του αερίου της υψικαμίνου. Μια εκτόξευση θερμού αέρα, εμπλουτισμένη με οξυγόνο και βοηθητικούς αναγωγικούς παράγοντες, εγχέεται στο ειδικό ακροφύσιο (tuyère) που παρέχει ένα αντίθετο ρεύμα μειωμένων αερίων. Ο καυτός αέρας αντιδρά με τους αναγωγικούς παράγοντες για να παράγει κυρίως μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το οποίο με τη σειρά του ανάγει τα οξείδια σιδήρου στο μεταλλικό σίδηρο. Ο υγρός σίδηρος συλλέγεται στην εστία μαζί με τη σκωρία και οι δύο χυτεύονται σε τακτική βάση. ο υγρός σίδηρος μεταφέρεται σε τορπιλοφόρα δοχεία προς το εργοστάσιο χάλυβα και η σκωρία υποβάλλεται σε επεξεργασία με σκοπό την χρησιμοποίησή στην κατασκευή δρόμων και την κατασκευή τσιμέντου. Το αέριο της υψικαμίνου συλλέγεται στην κορυφή του κλιβάνου. Επεξεργάζεται και διανέμεται γύρω από τα έργα να χρησιμοποιείται ως καύσιμο για θέρμανση ή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχ 2.7. Διάταξη υψικαμίνου με τα βασικά υποσυστήματα της [24]

Διάφοροι αναγωγικοί παράγοντες είναι διαθέσιμοι. Άνθρακας / υδρογονάνθρακες υπό μορφή κόκκων ή κονιοποιημένος άνθρακας, βαρύ μαζούτ, υπολείμματα ελαίου, χρησιμοποιημένα έλαια, λίπη και γαλακτώματα, ζωικά λίπη, οικολογικό πετρέλαιο, φυσικό αέριο, αέριο από την μονάδα παραγωγής κοκ, αέριο από τον κλίβανο παραγωγής χάλυβα με οξυγόνο, αέριο από την ίδια την υψικάμινο, απορρίμματα πλαστικών, πίσσα από καύσιμα κλπ. είναι γενικά διαθέσιμα σε επαρκείς ποσότητες με λογικές δαπάνες. Ωστόσο, η επιλογή μεταξύ διαφόρων μειωτικών παραγόντων δεν καθορίζεται μόνο από το κόστος. Πέραν του ότι είναι ένας αναγωγικός παράγοντας, το κοκ χρησιμεύει επίσης ως μεταφορέας του σωρού αυτού από τη κορυφή μέσα στην υψικάμινο. Χωρίς αυτή τη φέρουσα ικανότητα, η λειτουργία της υψικαμίνου δεν θα ήταν δυνατή.

Το σιδηρομετάλλευμα που επεξεργάζεται σήμερα περιέχει μεγάλη περιεκτικότητα σε αιματίτη (Fe_2O_3) και μερικές φορές μικρή ποσότητες μαγνητίτη (Fe_3O_4). Στην υψικάμινο, αυτά τα συστατικά ανάγονται προς παραγωγή οξειδίου του σιδήρου (FeO) μέχρι τελικά να φτάσει στην μορφή στερεού σιδήρου. Τέλος, το φορτίο σιδήρου λιώνει, οι αντιδράσεις ολοκληρώνονται και το υγρό καυτό μέταλλο (pig iron) και η σκωρία συλλέγονται στο κάτω μέρος. Οι αναγωγικοί άνθρακες αντιδρούν σχηματίζοντας CO και CO_2 . Ροές και πρόσθετα προστίθενται για να μειωθεί το σημείο τήξης της φύρας, να βελτιωθεί η πρόσληψη θείου από τη σκωρία, να παράσχει την απαιτούμενη ποιότητα του υγρού θερμού μετάλλου και να επιτραπεί η περαιτέρω επεξεργασία της σκωρίας. Καθώς το φορτίο της υψικαμίνου κατεβαίνει, η θερμοκρασία αυξάνεται, διευκολύνοντας έτσι τις αντιδράσεις αναγωγής των οξειδίων και τον σχηματισμό σκωρίας. Το φορτίο υφίσταται μια σειρά αλλαγών στη σύνθεση όπως:

- το οξείδιο του σιδήρου στο φορτίο ανάγεται ολοένα και περισσότερο (σχηματίζοντας σπόγγους σιδήρου) και τελικά τετηγμένο θερμό μέταλλο.

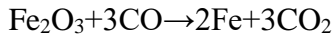
- το οξυγόνο από το σιδηρομετάλλευμα αντιδρά με το κοκ ή το μονοξείδιο του άνθρακα, σχηματίζοντας έτσι μονοξείδιο του άνθρακα ή διοξείδιο του άνθρακα αντίστοιχα, το οποίο συλλέγεται στην κορυφή.

- τα συστατικά της φύρας συνδυάζονται με τις ροές για σχηματισμό σκωρίας. Αυτή η σκωρία είναι ένα πολύπλοκο μείγμα πυριτικών ελαίων χαμηλής πυκνότητας από τον τετηγμένο σίδηρο.

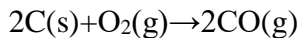
- το κοκ χρησιμεύει κυρίως ως αναγωγικός παράγοντας, αλλά και ως καύσιμο. Αφήνει το φούρνο ως μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα ή άνθρακα στο θερμό μέταλλο.

- οποιοδήποτε υπάρχον υδρογόνο δρα επίσης ως αναγωγικό μέσο αντιδρώντας με το οξυγόνο για το σχηματισμό νερού. [24]

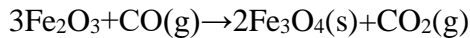
Οι κύριες χημικές αντιδράσεις που παράγουν το λιωμένο χυτοσίδηρο είναι:



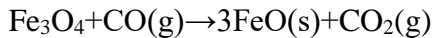
Αυτή η αντίδραση μπορεί να χωριστεί σε πολλαπλά στάδια, με το πρώτο να είναι ότι ο προθερμανθείς αέρας που ανακινείται στον κλίβανο αντιδρά με τον άνθρακα υπό μορφή κοκ για να παράξει μονοξείδιο του άνθρακα και θερμότητα:



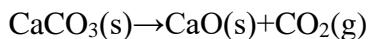
Το θερμό μονοξείδιο του άνθρακα είναι ο αναγωγικός παράγοντας για το σιδηρομετάλλευμα και αντιδρά με το οξείδιο του σιδήρου για να παράγει τηγμένο σίδηρο και διοξείδιο του άνθρακα. Ανάλογα με τη θερμοκρασία στα διάφορα μέρη του κλιβάνου (το θερμότερο στο κάτω μέρος) ο σίδηρος ανάγεται σε διάφορα στάδια. Στην κορυφή, όπου η θερμοκρασία κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 200 ° C και 700 ° C, το οξείδιο του σιδήρου ανάγεται εν μέρει στο οξείδιο του σιδήρου (II, III).



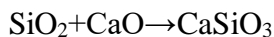
Σε θερμοκρασίες γύρω στους 850 ° C, κάτω από τον κλίβανο, ο σίδηρος (II, III) μειώνεται περαιτέρω στο οξείδιο του σιδήρου (II)



Το θερμό διοξείδιο του άνθρακα, το μονοξείδιο του άνθρακα που δεν έχει αντιδράσει και το άζωτο από τον αέρα διαπερνούν τον κλίβανο, καθώς το φρέσκο υλικό τροφοδοσίας κατεβαίνει προς τα κάτω στη ζώνη αντίδρασης. Καθώς το υλικό ταξιδεύει προς τα κάτω, τα αντίθετα ρεύματα αερίου προθερμαίνουν το φορτίο τροφοδοσίας και αποσυνθέτουν τον ασβεστόλιθο στο οξείδιο του ασβεστίου και το διοξείδιο του άνθρακα:

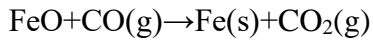


Το οξείδιο του ασβεστίου που σχηματίζεται με αποσύνθεση αντιδρά με διάφορες όξινες ακαθαρσίες στον σίδηρο (κυρίως διοξείδιο του πυριτίου), για να σχηματίσει μια φαιαλιτική σκωρία η οποία είναι ουσιαστικά πυριτικό ασβέστιο.

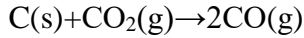


Καθώς το οξείδιο του σιδήρου (II) μετακινείται προς τα κάτω στην περιοχή με

υψηλότερες θερμοκρασίες, που κυμαίνονται έως και 1200 ° C, ανάγεται περαιτέρω στο σίδηρο.



Το διοξείδιο του άνθρακα που σχηματίζεται σε αυτή τη διεργασία αναστέλλεται εκ νέου σε μονοξείδιο του άνθρακα από το κοκ :



Η εξαρτώμενη από την θερμοκρασία ισορροπία που ελέγχει την ατμόσφαιρα του αερίου στον κλίβανο ονομάζεται αντίδραση Boudouard:



Αναλυτικά οι βασικές λειτουργίες είναι οι εξής:

• Προετοιμασία φορτίου

Η παραγωγή θερμού μετάλλου απαιτεί μεγάλες ποσότητες σφαιρίας υλικών, όπως χονδρόκοκκο σιδηρομετάλλευμα, πυροσυσσωμάτωμα σιδήρου και των βοηθητικών ροών. Τα υπερβολικά χονδροειδή θραύσματα του μεταλλεύματος πρέπει να συνθλίβονται, να αλέθονται και να κοσκινίζονται για να παράγουν καθορισμένα μεγέθη σωματιδίων που απαιτούνται. Τα μεταλλεύματα συνήθως υποβάλλονται σε συγκεκριμένα βήματα προετοιμασίας. Συνήθως προεπεξεργασμένα μεταλλεύματα και άλλα υλικά παραδίδονται από πλοία, με τρένα και μερικές φορές με φορτηγά να εκφορτώνονται με κατάλληλες συσκευές εκφόρτωσης. Ανάλογα με τις προϋποθέσεις και τις ιδιότητές τους, π.χ. η ευαισθησία των παρασυρόμενων και η διαβρεξιμότητά τους, αποθηκεύονται στο ύπαιθρο, κάτω από στέγες, δεξαμενές, σιλό ή μικρές, ενδιάμεσες και μακροχρόνιες αποθήκες. Όσον αφορά τη προετοιμασία του φορτίου, συνήθως περιλαμβάνει τις διαδικασίες προετοιμασίας του μεταλλεύματος, την διεργασία ανάμειξης πριν από την μονάδα πυροσυσσωμάτωσης στα ναυπηγεία, τη μεταφορά του πυροσυσσωμάτωματος, του κοκ και την πιθανή άμεση μεταφορά του χονδρόκοκκου σιδηρομεταλλεύματος και όλες τις δοσομετρικές διαδικασίες μέχρι την φόρτιση στην κορυφή της ψυκαμίνου.

Το σύστημα δοσομέτρησης περιλαμβάνει το κοσκίνισμα (για το σιδηρομετάλλευμα και το κοκ) ώστε να φτάσουν στην επιθυμητή διάμετρο, ένα ειδικό όργανο το οποίο

χρησιμοποιεί δονήσεις και την βαρύτητα για την μεταφορά των βοηθητικών ροών (vibro feeder) και κάδους ζυγίσματος. Από τους κάδους ζυγίσματος, η πρώτη ύλη μεταφέρεται στους κάδους εκσκαφών ή στη πλειοψηφία των περιπτώσεων στην κορυφή της υψικαμίνου μέσω ενός μεταφορικού ιμάντα. Σε περίπτωση χρήσης πυροσυσσωμαμάτων και / ή σφαιριδίων εκτός από το χονδρόκοκκο σιδηρομετάλλευμα, κατάλληλα συστήματα αποθήκευσης και δοσολογίας προστίθενται στις αποθήκες. Για την πλειονότητα των υψικαμίνων η επεξεργασία των πρώτων υλών και η ανώτερη φόρτιση τους γίνεται αυτόματα μέσω ενός εποπτικού συστήματος από την αίθουσα ελέγχου και το σύστημα προετοιμασίας φορτίου είναι πλήρως από το σύστημα φίλτρου σάκων.

• Φόρτιση και μεταφορά πρώτων υλών

Το μείγμα υλικών που φέρουν σίδηρο (απόβλητα σιδηρομεταλλεύματος, πυροσυσσωματώματα και / ή σφαιρίδια) και πρόσθετα (ροές υλικών) είναι γνωστά ως «φορτίο». Το φορτίο και το συνοδευτικό κοκ φορτώνονται στην κορυφή του κλιβάνου είτε μέσω σκαφών ή μηχανικών ιμάντων μεταφοράς. Εισέρχονται μέσα στον κλιβάνο μέσω ενός σφραγισμένου συστήματος φόρτισης το οποίο απομονώνει τα αέρια του κλιβάνου από την ατμόσφαιρα. Αυτό το σύστημα είναι απαραίτητο επειδή η πίεση υψικαμίνου υπερβαίνει την ατμοσφαιρική πίεση (0,25 - 2,5 bar μανομετρική πίεση). Ενώ πολλές νέες μεγάλες υψικάμινοι έχουν υψηλές πιέσεις στην κορυφή (έως 2,5 bar μανομετρική πίεση), υπάρχουν σύγχρονοι κλιβάνοι που λειτουργούν σε πιέσεις πολύ χαμηλότερες από αυτό. Αυτές οι πιέσεις μπορεί να είναι στο επίπεδο των 0,25 bar μανομετρικής πίεσης, ανάλογα με τα έτη λειτουργίας του κλιβάνου και άλλους περιορισμούς όπως η διαθέσιμη πίεση έκρηξης και οι περιορισμοί που οφείλονται στη κατασκευή της μονάδας επεξεργασίας αερίων.

• Λειτουργία υψικαμίνου

Σε μια υψικάμινο, οι πρώτες ύλες εισέρχονται στην κορυφή, ενώ τα προϊόντα (pig iron και σκωρία) βυθίζονται από κάτω (εστία). Το συμπαγές φορτίο καθώς κινείται προς τα κάτω, συναντείται με ένα διαρκώς αυξανόμενο ρεύμα θερμού αναγωγικού αερίου. Το αέριο της υψικαμίνου που έχει υψηλή θερμογόνο δύναμη συλλέγεται από την κορυφή του κλιβάνου για επεξεργασία. Μια υψικάμινο μπορεί να χωριστεί σε έξι ζώνες θερμοκρασίας:

1. **Την κορυφή:** Στην κορυφή, γίνεται εισαγωγή του φορτίου και η εκκένωση αερίου της υψικαμίνου.
2. **Τον άξονα:** στον άξονα, το καυτό αέριο της υψικαμίνου δίνει τη θερμότητά του στο στερεό φορτίο. Η θερμοκρασία του φορτίου αυξάνεται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος σε περίπου 950 ° C και το οξειδίο του σιδήρου ανάγεται εν μέρει στη ζώνη αυτή.
3. **Την “κοιλιά”:** η κοιλιά συνδέει τον άξονα με την εστία. Σε αυτό το κομμάτι, η θερμοκρασία αυξάνεται περαιτέρω από 950 ° C έως περίπου 1250 ° C. Περαιτέρω μείωση του οξειδίου σιδήρου λαμβάνει χώρα και αρχίζει η χημική αντίδραση που περιλαμβάνει το κοκ.
4. **Την ζώνη τήξης:** Οι αντιδράσεις κοκ συνεχίζουν να συμβαίνουν. Ο σίδηρος λιώνει και σχηματίζεται σκωρία.
5. **Τα ακροφύσια:** σε αυτή τη ζώνη καυτός αέρας εισάγεται στον κλίβανο μέσω μιας σειράς ακροφυσίων (μέχρι 42). Τα ακροφύσια βρίσκονται γύρω από την πάνω περίμετρο της εστίας και τροφοδοτούνται από έναν μεγάλο σωλήνα, που περιβάλλει τον κλίβανο στο ύψος της ζώνης τήξης. Οι θερμοκρασίες εδώ μπορούν να ξεπεράσουν τους 2000 ° C και τα οξειδία είναι εντελώς ανηγμένα.
6. **Την εστία:** στην εστία συλλέγεται το λιωμένο ζεστό μέταλλο και η σκωρία. Υπάρχουν τέσσερις οπές που βρίσκεται γύρω από την εστία, με μία ή δύο σε λειτουργία ανά πάσα στιγμή. Ο άξονας, η κοιλιά, η ζώνη τήξης και τα ακροφύσια ψύχονται με νερό από την εστία, με ψυκτικά έλαια ή με αέρα. Ο φούρνος είναι επενδεδυμένος με πυρίμαχο υλικό (η εστία έχει πάχος τουλάχιστον 1,5 m). Η παραγωγή θερμού μετάλλου κυμαίνεται από περίπου 0,5 Mt / έτος για μικρές υψικαμίνους σε περίπου 5.5 Mt / έτος για μεγάλες υψικαμίνους. [26]

Η τεχνολογία υψικαμίνου χρησιμοποιεί υψηλής ποιότητας μεταλλεύματα. Όλα τα στοιχεία που συνοδεύουν τον σίδηρο ενσωματώνονται είτε στον χυτοσίδηρο είτε στη σκωρία. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν ο φωσφόρος, το θείο, το μαγγάνιο και το πυρίτιο. Τιτάνιο, αλουμίνιο, ασβέστιο, μαγνήσιο και ίσως μικρές ποσότητες πυριτίου περνούν μέσα στη σκωρία ως οξειδία ή μεταλλοειδή. Είναι επίσης δυνατό για κάποια στοιχεία να εξατμιστούν και να κατακαθίσουν σε διάφορα μέρη της υψικαμίνου. Αυτά είναι κυρίως ο ψευδάργυρος (Zn) και ο μόλυβδος (Pb) που φθάνουν στην υψικάμινο ως σιδηρομεταλλεύματα και ανακυκλωμένα παραπροϊόντα μέσω της μονάδας πυροσυσσωμάτωσης. Ο συνολικός ψευδάργυρος στο φορτίο γενικά κυμαίνεται από 100 έως 250 g / t θερμού μετάλλου που παράγεται. Τα περισσότερα σύγχρονα εργοστάσια ωστόσο περιορίζουν τον ψευδάργυρο σε 100 - 150 g / t θερμού μετάλλου. Σκόνες και λάσπες με υψηλή περιεκτικότητα ψευδαργύρου ή μόλυβδου δεν γίνονται συνήθως αποδεκτές ως επιστροφές από το εργοστάσιο πυροσυσσωμάτωσης ή χρησιμοποιούνται μόνο σε περιορισμένα ποσά. Κάποιες φορές η απομάκρυνση του Zn και του Pb από τον κλίβανο γίνεται με τη λειτουργία του υψικαμίνου κατά τέτοιο τρόπο ώστε η θερμοκρασία

στο κέντρο του κλιβάνου διατηρείται πάνω από τους 400 ° C. Ο ψευδάργυρος είναι τότε περισσότερο που πιθανόν να απομακρυνθεί από την κορυφή ως λεπτά σωματίδια ZnO, τα οποία σχεδόν εντελώς διατηρούνται στην επεξεργασία αερίων υψικαμίνου (DK process). Βέβαια υπάρχουν τεχνικές ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης των προϊόντων που περιέχουν κυρίως ψευδάργυρο (Waelz ..), όπως θα δούμε και στη συνέχεια. Οι τεχνικές αυτές μάλιστα είναι και αρκετά σημαντικές στην όλη διαδικασία παραγωγής χάλυβα γενικότερα, καθώς μειώνουν σημαντικά την ποσότητα φύρας.

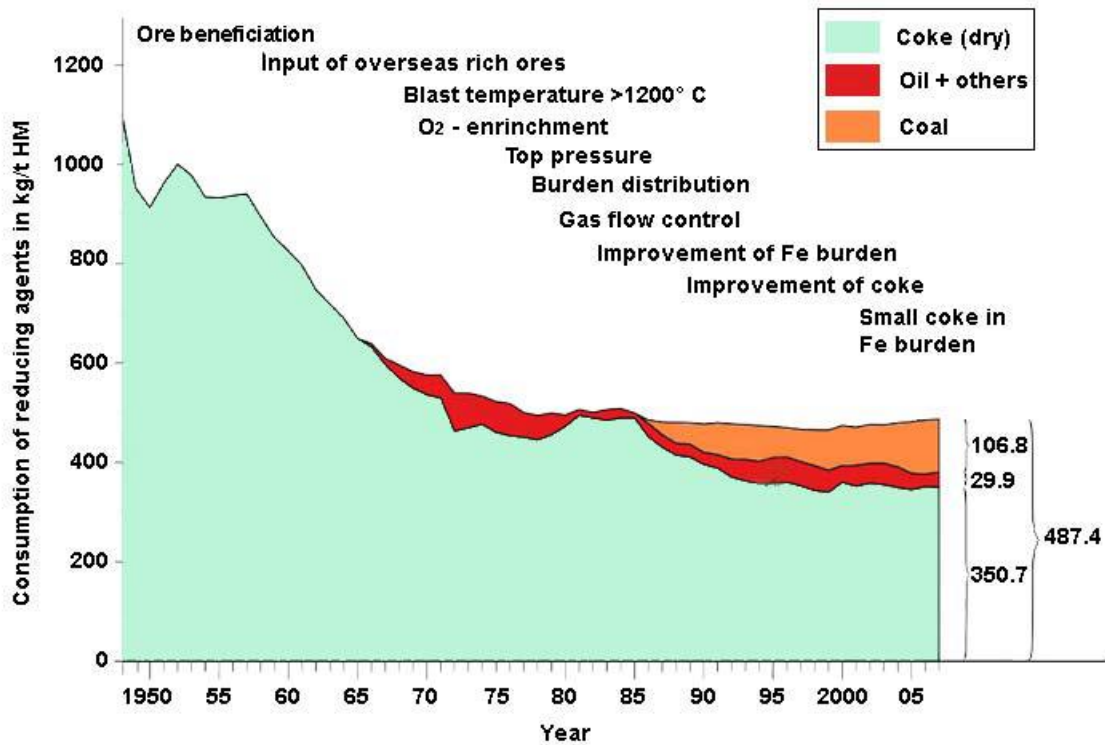
• Παραγωγή ζεστού αέρα

Ο καυτός αέρας για τη λειτουργία της υψικαμίνου παρέχεται από τις θερμές εστίες (μερικές φορές καλούνται «Καυστήρες υψικαμίνων»). Οι εστίες είναι βοηθητικές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση του αέρα. Αυξημένη θερμοκρασία του αέρα αυτού οδηγεί σε μείωση των απαιτήσεων άνθρακα. Η κύρια λειτουργία του καυτού αέρα είναι να παράσχει το οξυγόνο που είναι απαραίτητο για την αεριοποίηση του κοκ, και έτσι να παράγει το αέριο που, κατά την επαφή με το φορτίο, ανάγει τα οξειδία του σιδήρου. Οι εστίες λειτουργούν σε κυκλική βάση. Θερμαίνονται με αέρια καύσιμα (συνήθως εμπλουτισμένα με αέρια υψικαμίνου) μέχρι ο θόλος να βρίσκεται στη σωστή θερμοκρασία (περίπου 1100 - 1500 ° C). Το αέριο καύσης στη συνέχεια διακόπτεται και ο κρύος ατμοσφαιρικός αέρας ωθείται μέσω των εστιών στο αντίθετο σημείο κατεύθυνσης. Ο κρύος αέρας θερμαίνεται από τα θερμά τούβλα και φτάνει στην κατάλληλη θερμοκρασία (900 - 1350 ° C) που τροφοδοτείται στην υψικάμινο. Η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου η εστία δεν μπορεί πλέον να παράγει την κατάλληλη θερμοκρασία αέρα, μετά την οποία ο αρχικός κύκλος θέρμανσης αρχίζει και πάλι. Η διάρκεια κάθε κύκλου εξαρτάται από τις επιμέρους συνθήκες εγκατάστασης όπως η πηγή ενέργειας, το σύστημα, τα χαρακτηριστικά και τα μέτρα διατήρησης.

• Άμεση έγχυση μειωτικών παραγόντων

Οι αναγωγικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των οξειδίων του σιδήρου στην υψικάμινο είναι το κοκ, ο άνθρακας, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και άλλες πηγές υδρογονανθράκων. Αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή του αναγωγικού αερίου και έτσι για την αναγωγή των οξειδίων του σιδήρου στο μεταλλικό σίδηρο και στη συνέχεια για την υγρασία του σιδήρου. Ο σημαντικότερος αναγωγικός παράγοντας είναι ο οπτάνθρακας που παρέχεται από τη διεργασία οπτανθρακοποίησης. Ένα μέρος του κοκ στην υψικάμινο μπορεί να αντικατασταθεί από

άνθρακα, πετρέλαιο ή αέριο που εγχύθηκε στο ακροφύσιο, το οποίο ονομάζεται επίσης άμεση έγχυση. Φαίνεται άλλωστε από το σχήμα 2.8 πως όχι μόνο χρησιμοποιείται πλέον ένα μείγμα καυσίμων αλλά και ότι γενικότερα έχει μειωθεί αρκετά η απαιτούμενη ποσότητα για έγχυση.



Σχ 2.8. Τυπική κατανάλωση αναγωγικών παραγόντων σε kg/t hot metal (pig iron) [24]

Πρέπει να τονιστεί, ωστόσο, ότι μια ορισμένη ποσότητα κοκ είναι ακόμα απαραίτητη στην υψικάμινο για να επιτρέψει τη σωστή λειτουργία της. Το θεωρητικό μέγιστο για την έγχυση άνθρακα στο το επίπεδο τραύματος θεωρείται ότι είναι 270 κιλά / τόνο θερμού μετάλλου. Το όριο αυτό καθορίζεται από τη χωρητικότητα μεταφοράς του κοκ και των θερμοχημικών συνθηκών στον κλίβανο. Το κοκ παρέχει την απαιτούμενη φέρουσα ικανότητα ώστε να διατηρεί τη φόρτιση της υψικαμίνου και εξασφαλίζει επαρκή διείδυση αερίου.

Η άμεση έγχυση μειωτικών παραγόντων σημαίνει την μερική αντικατάσταση του κοκ από άλλη πηγή υδρογονάνθρακα, η οποία εγχέεται στον κλίβανο στο επίπεδο των ακροφυσίων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο γαϊάνθρακας και το πετρέλαιο είναι τα πιο

κοινά χρησιμοποιούμενα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και υδρογονάνθρακες όπως το βαρύ μαζούτ, τα κατάλοιπα πετρελαίου, τα ανακυκλωμένα απόβλητα ορυκτέλαιων, ή, συνήθεστερα, κονιοποιημένο άνθρακα, φυσικό αέριο ή αέριο υψικαμίνου και πλαστικά. Με τη μείωση της ανάγκης για κοκ, η συνολική ρύπανση και η ζήτηση ενέργειας μειώνονται.

Η έγχυση κονιοποιημένου άνθρακα ή πετρελαίου μπορεί να προσφέρει σημαντικά οικονομικά και λειτουργικά αποτελέσματα οφέλη. Αυτά περιλαμβάνουν:

1. Χαμηλότερη κατανάλωση δαπανηρών καυσίμων που χρειάζονται για παραγωγή κοκ και μεγαλύτερο εύρος χρήσης καυσίμων.
2. Μεγάλη διάρκεια ζωής του κλιβάνου παραγωγής κοκ.
3. Υψηλότερη παραγωγικότητα της υψικαμίνου.
4. Μεγαλύτερη ευελιξία στη λειτουργία υψικαμίνου (η ρύθμιση της εισόδου του ακροφυσίου είναι πολύ πιο εύκολη από την ρύθμιση εισαγωγής του φορτίου).
5. Συνεπή βελτίωση στην ποιότητα του pig iron και την περιεκτικότητα σε πυρίτιο.
6. Μειωμένες συνολικές εκπομπές στις μονάδες της βιομηχανίας χάλυβα λόγω των χαμηλότερων εκπομπών από την παραγωγή κοκ.

Τα μειονεκτήματα της έγχυσης κονιοποιημένου άνθρακα είναι:

1. Πρόσθετο κόστος για τον εμπλουτισμό του αέρα. Παρέχοντας με συνέπεια μεγάλες ποσότητες οξυγόνου απαιτούν μονάδα διαχωρισμού αέρα.
2. Πρόσθετη ανάγκη για ψεκασθήρες σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις και επιπλέον απαιτήσεις για συντήρηση της μονάδας έγχυσης.

• Χύτευση

Η υψικάμιнос χυτεύεται περιοδικά για να αφαιρεθεί το pig iron και η σκωρία από την εστία. Για αυτό, μία από τις οπές ανοίγει στο πλευρικό τοίχωμα της εστίας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται μια λαβή οξυγόνου για το άνοιγμα της οπής βρύσης. Συνήθως, μια υψικάμιнос διαθέτει μία έως τέσσερις οπές. Ο αριθμός των οπών καθορίζεται από την χωρητικότητα (μέγεθος) της υψικαμίνου. Στις σύγχρονες υψικαμίνους, το pig iron και η σκωρία λαμβάνονται μαζί (συνήθως η σκωρία αρχίζει να ρέει μετά το ζεστό μέταλλο). Η σκωρία και το θερμό μέταλλο στη συνέχεια διαχωρίζονται στο skimmer και μετά το καθένα συνεχίζει σε ξεχωριστό δρομέα. Το θερμό μέταλλο που λαμβάνεται από την υψικάμινο ρέει κατά μήκος πυρίμαχων δρομέων από τσιμέντο, υπενδεδυμένο με ένα ανθεκτικό στη θερμότητα μίγμα αλουμίνιου-

άνθρακα ή καρβιδίου του πυριτίου (SiC), και χύνεται σε ειδικές κουτάλες (απευθείας ή μέσω κεκλιμένων δρομέων). Αυτά οι κουτάλες μπορούν να είναι ανοιχτής ή κλειστής κορυφής. Σε αυτή τη τετηγμένη κατάσταση, το μέταλλο έχει θερμοκρασία περίπου 1440 - 1500 ° C. Η σκωρία που απορροφάται από τον κλίβανο ρέει στους δρομείς προς μια μονάδα κοκκοποίησης ή σε ανοικτούς λάκκους. Στο τέλος του κύκλου χύτευσης, η οπή κλείνει μηχανικά με έγχυση ενός ειδικού θερμικής αντοχής μίγματος τσιμεντόλιθου .

• Ψύξη και επεξεργασία της σκωρίας

Η ποσότητα σκωρίας που παράγεται στην υψικάμινο εξαρτάται από την περιεκτικότητα αυτής σε γκάζι της υψικαμίνου, το φορτίο, την τέφρα από το κοκ και την τέφρα από τα υλικά έγχυσης (π.χ. γαιάνθρακα) και την ποσότητα των βοηθητικών ροών που απαιτούνται για την επίτευξη της απαραίτητης ποιότητας θερμού μετάλλου. Για να είναι η σκωρία της υψικαμίνου αποδεκτή για χρήση και εκτός της βιομηχανίας σιδήρου και χάλυβα, είναι απαραίτητο να ληφθούν πρόσθετα μέτρα ώστε οι χημικές και φυσικές ιδιότητες της να είναι οι απαιτούμενες. Η σκωρία έχει μια μεγάλη ποικιλία χρήσεων όπως σαν υλικό για οδοποιία, ως συσσωματωμένο σκυρόδεμα, ως θερμομόνωση (ορυκτοβάμβακας) και ως υποκατάστατο του πλίνθου στην παραγωγή τσιμέντου. Η συνολική χρησιμοποίηση της σκωρίας είναι ένας στόχος που έχει ήδη επιτευχθεί σε πολλές περιπτώσεις.

Τρεις κύριες διαδικασίες χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία υγρών υψικαμίνου σκωρία:

1. διαδικασία κοκκοποίησης σκωρίας με νερό (75%)
2. διαδικασία σβωλοποίησης σκωρίας (2%)
3. διαδικασία ψύξης σκωρίας (που ονομάζεται επίσης ψύξη στον αέρα) (23%).

Όλες αυτές οι μέθοδοι ψύξης σκωρίας μπορούν να δημιουργήσουν υδρόθειο, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε οσμή. Η κοκκοποίηση με αέρα χρησιμοποιείται προς το παρόν για την επεξεργασία σκωρίας υψικαμίνου σε ορισμένες βιομηχανικές μονάδες μεγάλης κλίμακας. Σε όλες τις διεργασίες κοκκοποίησης αέρα, η σκωρία διασκορπίζεται και τα σωματίδια ψύχονται κατά τη διάρκεια της διαδρομής τους μέσω του περιβάλλοντος αέρα. Συχνά εφαρμόζεται επιπλέον ψεκασμός νερού στην διασκορπισμένη σκωρία για την επίτευξη ταχύτερης ψύξης. Λόγω ορισμένων

μειονεκτημάτων (π.χ. υψηλός χώρος απαιτήσεις, θόρυβος, ανεξέλεγκτες εκπομπές αέριων ενώσεων αερίων), η κοκκοποίηση αέρα λειτουργεί σε πολύ λίγες βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

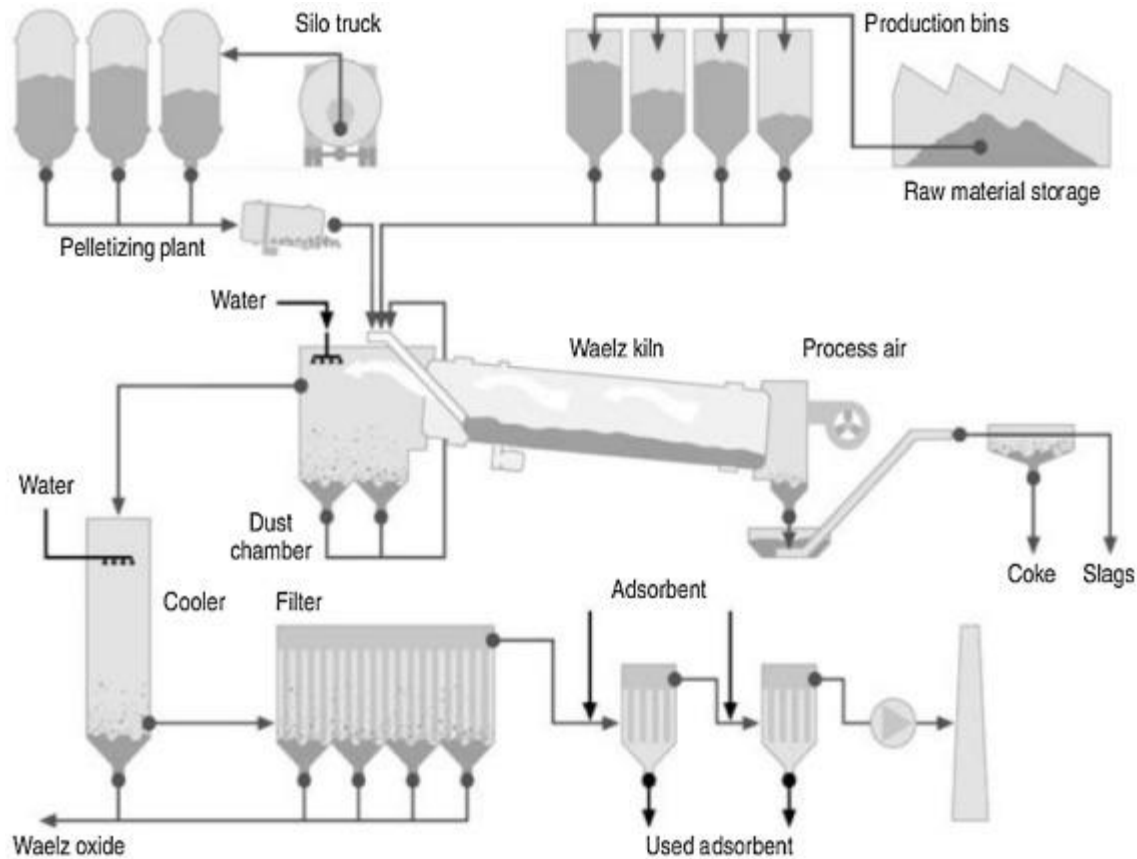
2.2. Ανακύκλωση και επεξεργασία υπολειμμάτων πλούσιων σε Zn

Τα στερεά απόβλητα παραγωγής σιδήρου και χάλυβα περιέχουν σίδηρο, άνθρακα και ροές και μπορούν να ανακυκλωθούν στο εργοστάσιο για την αντικατάσταση μεταλλευμάτων σιδήρου, άνθρακα, ασβεστόλιθων και δολομίτη στη διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης σιδήρου και παραγωγής pig iron στην υψικάμινο, καθώς και για την αντικατάσταση χαλύβδινων απορριμμάτων και πετρών στη διαδικασία παραγωγής μπρικετοποίησης - στον κλίβανο οξυγόνου (BOF) . Η ανακύκλωση εντός του εργοστασίου δεν είναι μόνο επωφελής για τη διατήρηση των φυσικών πόρων και για την προστασία του περιβάλλοντος, αλλά και για τη μέγιστη μείωση του κόστους της χαλυβουργίας στα ολοκληρωμένα χαλυβουργεία. Ωστόσο, η υψηλή συγκέντρωση ψευδαργύρου (Zn) στα στερεά απόβλητα μπορεί να έχει πολύ αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, την παραγωγή, τα προϊόντα και τον εξοπλισμό και έχει θεωρηθεί ως ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια που εμποδίζουν την ανακύκλωση των στερεών αποβλήτων στο εργοστάσιο. Ειδικότερα, στη διαδικασία παραγωγής σιδήρου σε υψικάμινους, οι υπερβολικές φορτώσεις ψευδαργύρου μπορούν να επιδεινώσουν σοβαρά την αντοχή των πρώτων υλών και τη διαπερατότητα φορτίου, να προκαλέσουν φθορά σε τοίχους και ψύκτες , σπάσιμο της εσωτερικής επένδυσης της υψικάμινου καθώς και ζημιές στα ακροφύσια (tuyeres). Αυτά τα αρνητικά αποτελέσματα μπορούν να αποσταθεροποιήσουν τη λειτουργία υψικάμινου και τελικά μπορούν να βλάψουν την παραγωγή και να μειώσουν τη διάρκεια ζωής της υψικάμινου γενικότερα. Οι σύγχρονες υψικάμινοι έχουν επιβάλει ορισμένα όρια φόρτωσης ψευδάργυρου για την αποφυγή καταστροφικών ζημιών ψευδάργυρου στην παραγωγή και τον εξοπλισμό της υψικάμινου. Μια διαισθητική προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος του ψευδαργύρου είναι η απομάκρυνση του ψευδαργύρου από τα στερεά απόβλητα. [27]

2.2.1. Waelz και DK process

Μία από τις παλαιότερες μεθόδους ανάκτησης αποβλήτων που περιέχουν ψευδάργυρο, η διαδικασία Waelz, περιλαμβάνει τη θέρμανση σκόνης αναμειγμένη με ένα καύσιμο άνθρακα, στη συνέχεια θερμαίνεται ($> 1000^{\circ}\text{C}$) σε περιστρεφόμενο κλίβανο (Waelz kiln) και πυροδοτείται από έναν καυστήρα στο άκρο εξόδου του (Σχ. 2.9). Ένας τυπικός κλίβανος Waelz έχει μήκος περίπου 50-70 m με διάμετρο 4-5m. Οι ενώσεις που περιέχουν ψευδάργυρο ανάγονται, εξατμίζονται και κατά συνέπεια

επανοξειδώνονται στο ρεύμα αερίου, διαχωρίζοντας έτσι τον ψευδάργυρο από το σιδηρούχο υλικό. [28]



Σχ.2.9. Σχεδιάγραμμα της διαδικασίας Waelz [29]

Το κοκ (οπτάνθρακας) αποτελεί το 25-40% της προσφοράς της διαδικασίας Waelz. Αυτό το υλικό δημιουργεί τις συνθήκες αναγωγής σε ολόκληρο τον κλίβανο (de Goicoechea and Gandiaga, 1996). Η περιστροφική κίνηση του κλιβάνου και η μικρή κλίση του σχεδιασμένου δοχείου (2%) κάνουν την πρώτη ύλη να προχωρήσει μέσα στην εγκατάσταση.

Ο κλίβανος χωρίζεται σε δύο ζώνες:

- Ζώνη φόρτωσης: δημιουργούνται ισχυρές συνθήκες αναγωγής. Παρέχονται υλικά που περιέχουν κάρβουνο και ψευδάργυρο.

• Ελεύθερη ζώνη: Εκεί βρίσκονται πιο ασθενείς συνθήκες αναγωγής και οξειδώσεως . Αυτή η ατμόσφαιρα ευνοεί τον αέριο μετασχηματισμό ψευδαργύρου ως σωματίδια ZnO.

Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του εξοπλισμού ρυθμίζεται μέσω του αέρα που εισάγεται στον κλίβανο. Η θερμοκρασία μπορεί να φτάσει τους 1.250 ° C λόγω του μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και των αντιδράσεων μεταλλικού ψευδαργύρου στην ελεύθερη ζώνη. Χρησιμοποιούνται ατμοί ψευδαργύρου και μια ροή αερίου CO προκειμένου να διαχωριστούν οι δύο ζώνες του κλιβάνου. Και οι δύο ροές προέρχονται από τη ζώνη εισόδου με καθορισμένη πίεση και η καύση συμβαίνει πάνω από την επιφάνεια του φορτίου.

Αυτές οι αντιδράσεις συμβαίνουν επειδή ο κλίβανος λειτουργεί με περίσσεια κοκ (οπτάνθρακα) και το μεγαλύτερο μέρος του ανακτάται από τη διαδικασία. Αυτή η διαδικασία είναι ο συνδυασμός των ακόλουθων κύριων αντιδράσεων (σε τυπικές συνθήκες, 25 ° C και 1 atm). [29]

- (1) $C (g) + \frac{1}{2} O_2 (g) \rightleftharpoons CO (g) + 110,4 \text{ KJ mol}^{-1}$ (Αρχική αντίδραση)
- (2) $ZnO (s) + CO(g) \rightleftharpoons Zn (g) + CO_2 (g) + 186,0 \text{ KJ mol}^{-1}$
- (3) $C (s) + CO_2 (s) \rightleftharpoons 2 CO (g) - 172,2 \text{ KJ mol}^{-1}$ (αντίδραση του Boudouard)

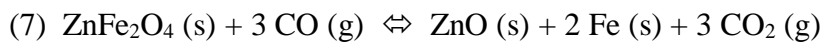
Κατά τη διαδικασία Waelz, ο μόλυβδος (Pb) που περιέχεται στα απόβλητα εξατμίζεται σημαντικά ως σουλφίδιο μολύβδου (II) (PbS). Με εξαίρεση την ένωση χλωριούχου μολύβδου (II) (PbCl₂), το PbS δείχνει την υψηλότερη πίεση ατμών (130 Pa) μεταξύ των ενώσεων μολύβδου.

Στη συνέχεια, οι ατμοί Zn, PbS και CO που παράγονται στη ζώνη φορτίου καίγονται με περίσσεια αέρα στην ελεύθερη ζώνη του κλιβάνου. Αυτή η διαδικασία παράγει τις ακόλουθες κύριες αντιδράσεις (σε τυπικές συνθήκες, 25 ° C και 1 atm) :

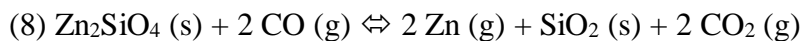
- (4) $CO (g) + \frac{1}{2} O_2 (g) \rightleftharpoons CO_2 (g) + 282,6 \text{ KJ mol}^{-1}$
- (5) $Zn (g) + \frac{1}{2} O_2 (g) \rightleftharpoons ZnO (s) + 469,2 \text{ KJ mol}^{-1}$
- (6) $PbS (g) + 2 O_2 (g) \rightleftharpoons PbSO_4 (s) + 823,3 \text{ KJ mol}^{-1}$

Τα φρυγμένα μεταλλεύματα ψευδαργύρου περιέχουν πολλές ακαθαρσίες και άλλα παραπροϊόντα ψευδάργυρου όπως φερρίτες, πυριτικά άλατα, θειικά άλατα και θειικά άλατα. Το απελευθερωμένο οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) και οι φερρίτες ψευδαργύρου ($Zn_xFe_{3-x}O_4$) δεν είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς στην καρβοθερμική παραγωγή ψευδαργύρου, το αντίθετο, οι φερρίτες ψευδαργύρου έχουν πολύ δύσκολη απόδοση διάλυσης σε πολλά διαλύματα έκπλυσης.

Δεδομένου ότι ο ψευδάργυρος είναι λιγότερο ευγενής από τον σίδηρο, ο φερρίτης ψευδαργύρου ($ZnFe_2O_4$) θα αντιδράσει κάτω από τους 900 ° C σύμφωνα με την αντίδραση:



Δεδομένου ότι το διοξείδιο του πυριτίου είναι πιο σταθερό από το οξείδιο του ψευδαργύρου, το πυριτικό ψευδάργυρο θα αναχθεί με την ακόλουθη αντίδραση:



Ως εκ τούτου, η διαδικασία Waelz επιτρέπει τον εμπλουτισμό ψευδαργύρου και τον ορυκτολογικό μετασχηματισμό του προκειμένου να αυξηθεί η ανάκτηση ψευδαργύρου σε διάφορες μεταλλουργικές διεργασίες, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος.

Τα σακκόφιλτρα ή οι ηλεκτροστατικοί ιζηματοποιητές που βρίσκονται μετά τον κλίβανο είναι υπεύθυνοι για τον καθαρισμό του αερίου του κλιβάνου. Αυτό το αέριο περιέχει τον λεπτά διαχωρισμένο καπνό ψευδαργύρου. Η θερμότητα οξείδωσης εκπέμπει πίσω στο φορτίο εισόδου και βοηθά στην παροχή της απαραίτητης θερμότητας για τη διαδικασία αναγωγής.

Το οξείδιο του Waelz συλλέγεται με μεταφορική αλυσίδα και μεταφέρεται στη συνέχεια στο θερμό εργοστάσιο μπρικετοποίησης ή σε άλλα εργοστάσια επεξεργασίας μέσω ενός πνευματικού συστήματος. Ταυτόχρονα, η δημιουργημένη σκωρία Waelz εκκενώνεται συνεχώς από το τέλος του κλιβάνου σε ένα σύστημα σβέσης. Αυτό το υποπροϊόν (Waelz Iron Product) περιέχει όλα τα μη πτητικά συστατικά της πρώτης ύλης, κυρίως οξείδια σιδήρου και ασβεστίου, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία κεραμικών αργίλου. [30]

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το οξείδιο Waelz είναι το προϊόν της διαδικασίας Waelz. Αυτό το στερεό είναι ένα μείγμα οξειδίων ψευδαργύρου και μολύβδου με πολλές

ακαθαρσίες. Ο χημικός και ορυκτολογικός χαρακτηρισμός του οξειδίου Waelz καθώς και του σιδηρούχου υποπροϊόντος που χρησιμοποιείται ως παράδειγμα πρώτης ύλης σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζεται στον Πίνακα. [31]

	Waelz Slag	Waelz oxide
Zinc (%)	0.2-2	55-58
Lead(%)	0.1-2	7-10
Cadmium(%)	<0.002	0.3-0.5
Clorine(%)	0.1-0.5	4-8
FeO(%)	30-50	2-5
SiO2(%)	25-40	0.5-1.5
CaO(%)	4-10	0.3-1

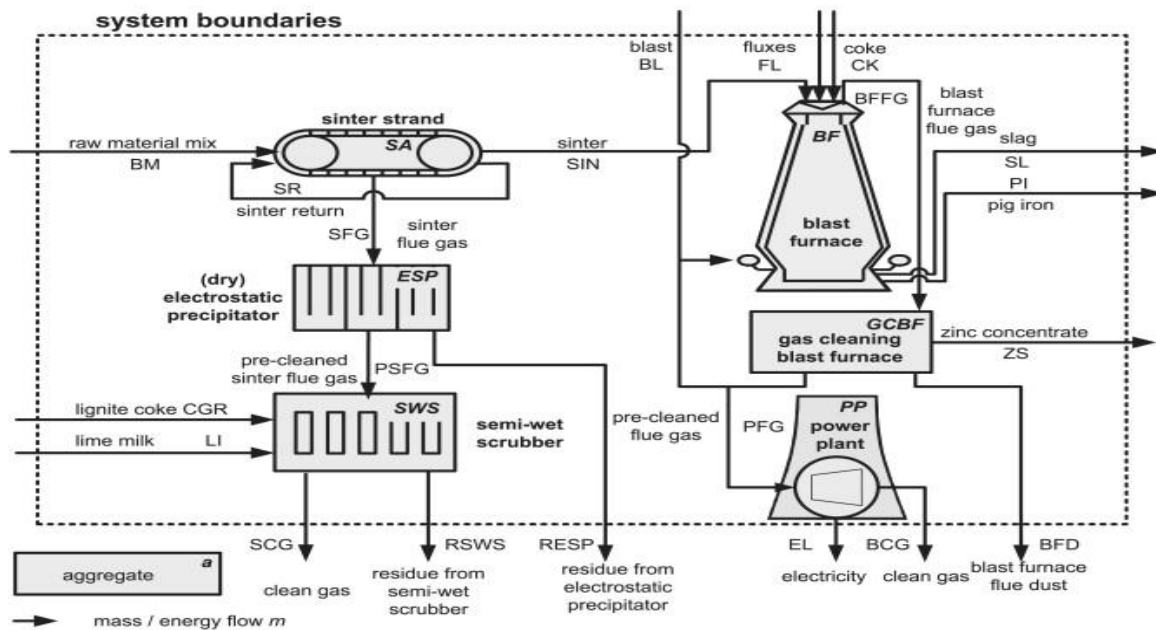
Πίν. 2.1. Χημικός και ορυκτολογικός χαρακτηρισμός του οξειδίου Waelz καθώς και του σιδηρούχου υποπροϊόντος [31,32]

DK Process

Η διεργασία ανακύκλωσης που διερευνήθηκε πραγματοποιείται από την DK Recycling und Roheisen GmbH στο Duisburg της Γερμανίας. Η ανακύκλωση πραγματοποιείται σε μια προσαρμοσμένη και ειδικά λειτουργική διαδικασία υψικαμίνου. Χρησιμοποιεί σκόνες από φίλτρα και λάσπες από τον καθαρισμό αερίων, σκόνες και λάσπες υψικαμίνου, απώλειες τήξης από το ‘ψήσιμο’ σιδήρου, λάσπες έλασης, άλλα οξειδωτικά υπολείμματα και μεταλλεύματα σιδήρου. Στη συνέχεια δίνουμε μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας. Τα περιγραφόμενα στοιχεία και οι ροές μάζας απεικονίζονται στο Σχ. 2.10. Οι πρώτες ύλες αποθηκεύονται σε κάδους τροφοδοσίας και μεταφέρονται σε ένα τύμπανο ανάμιξης και κοκκοποίησης σύμφωνα με συγκεκριμένα μείγματα. Αυτό το μείγμα πρώτων υλών τοποθετείται σε παλέτες που κινούνται οριζόντια κατά μήκος του μάντα πυροσυσσωμάτωσης. Το ανώτερο στρώμα του μίγματος φορτίου αναφλέγεται και απορροφάται ο αέρας μέσω αυτού. Ενώ κινείται αργά οριζόντια, το λεγόμενο μέτωπο καύσης κινείται προς τα κάτω. Σε αυτό το μέτωπο καύσης, τα σιδηρούχα οξείδια μαλακώνουν στα όρια των κόκκων τους και τα συμπληρώματα τήκονται σε κάποιο βαθμό. Η εκ νέου κρυστάλλωση συσσωματώνει τα λεπτά υλικά. Η διαδικασία σύντηξης τελειώνει όταν το μέτωπο καύσης φτάσει στον πυθμένα του στρώματος υλικού. Στη συνέχεια, το μίγμα συνθλίβεται σε ένα προκαθορισμένο μέγεθος σωματιδίων. Στον καθαρισμό του αερίου συγκεντρώνονται δύο

υπολείμματα: μια σκόνη (RESP), από τον ηλεκτροστατικό ιζηματοποιητή (ESP) και ένα υπόλειμμα (RSWS) από το ημί-υγρό πλυντήριο (SWS). Το ημί-υγρό πλυντήριο χρειάζεται επίσης λιγνίτη- οπτάνθρακα και ασβέστη ως προσροφητικά για την απομάκρυνση του SO₂ και των διοξινών, καθώς και των furans (C₄H₄O) από τα προκαθαρισμένα καυσαέρια καύσης. Μαζί με το κοκ και τις ροές, φορτίζεται ασυνεχώς στην υψικάμινου. Εκεί το πυροσυσσωμάτωμα ανάγεται και το pig iron (PI) χτυπάται ασυνεχώς. Για να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη ποιότητα pig iron, είναι δυνατή η δημιουργία ενός κράματος με συμπληρώματα σε έναν επαγωγικό κλίβανο προτού τελικά το σίδηρο χυτευθεί σε μια μηχανή χύτευσης. Στη σκωρία υψικάμινου (SL) και από τον καθαρισμό αερίων της υψικάμινου συμπυκνώματα ψευδαργύρου (Zn), σκόνη καυσαερίων υψικάμινου (BFD) και ηλεκτρική ενέργεια (EL) συγκεντρώνονται ως υποπροϊόντα (Σχ.2.10). [33,34]

Λόγω του ειδικού φορτίου, η περιγραφόμενη διαδικασία διαφέρει από τις συνήθεις διαδικασίες υψικάμινου. Συγκεκριμένα, ο ψευδάργυρος, το αλκάλιο και ο μόλυβδος απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Το φορτίο ψευδαργύρου είναι, για παράδειγμα, 300 φορές υψηλότερο από ό, τι σε άλλες υψικάμινους και το αλκαλικό φορτίο έως και 3 φορές υψηλότερο. Ο ψευδάργυρος, ένα πολύτιμο υποπροϊόν, αφαιρείται από τον υψικάμινου κυρίως μέσω της κορυφής με το αέριο υψικάμινου. Με πλύσιμο και πάχυνση του αερίου υψικάμινου, ο ψευδάργυρος λαμβάνεται και πωλείται σε εγκαταστάσεις ηλεκτρόλυσης ψευδαργύρου. [35,36,37]



Σχ. 2.10. Σχεδιάγραμμα της διαδικασίας DK [33]

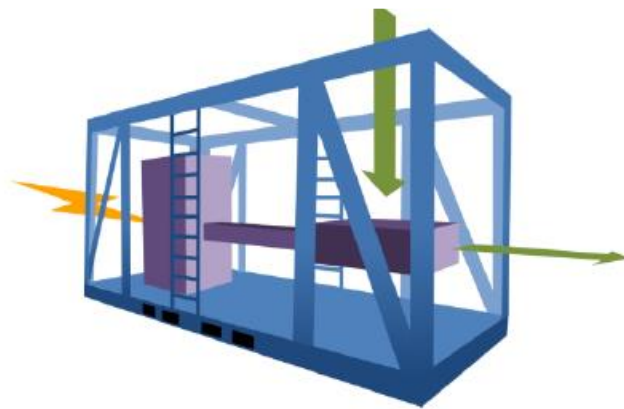
Οι ποσότητες και οι ποιότητες των περαιτέρω ροών εισόδου της διαδικασίας, όπως ειδικά αναγωγικά μέσα, μεταλλεύματα, υπολείμματα και ροές, αφενός, και ροές εξόδου της διαδικασίας pig iron, οξειδίου ψευδαργύρου, σκωρίας υψικαμίνου και υπολειμμάτων από το ESP και το SWS, από την άλλη πλευρά, εξαρτώνται από τη χημική σύνθεση του μίγματος πρώτων υλών και επομένως από το μείγμα των υπολειμμάτων. Σε γενικές γραμμές, αυτές οι ροές μάζας και ενέργειας καθορίζουν το κόστος και τα έσοδα που σχετίζονται με την εταιρεία σε επίπεδο επιχειρησιακού σχεδιασμού για υλικά εισροών, προϊόντα και υποπροϊόντα. Για παράδειγμα, μια υψηλότερη περιεκτικότητα σε ψευδάργυρο στα μίγματα πρώτων υλών οδηγεί σε υψηλότερα έσοδα επεξεργασίας, αλλά αυξάνει σημαντικά την κατανάλωση οπτάνθρακα, τον κύριο παράγοντα κόστους. [38,39]

2.2.2. Γενικά για την μέθοδο DESTINY [40]

Το ερευνητικό έργο DESTINY αφορά τη χρήση τεχνολογίας μικροκυμάτων για τη συνεχή επεξεργασία υλικών σε ενεργοβόρες βιομηχανικές διεργασίες. Πρόκειται για μια λειτουργική και «πράσινη» λύση, η οποία θα εξοικονομεί ενέργεια και θα μπορεί να αναπαραχθεί και να προσαρμοστεί σε διάφορες κλίμακες ισχύος, αναλόγως με την ζήτηση. Ο στόχος είναι να αναπτυχθεί και να αποδειχθεί μια νέα προσέγγιση θέρμανσης κοκκωδών (granular) πρώτων υλών, καθώς ο μετασχηματισμός του υλικού θα πραγματοποιείται με χρήση μικροκυμάτων ως εναλλακτική πηγή ενέργειας, η οποία θα συμπληρώνει την υφιστάμενη συμβατική παραγωγή. Το σύστημα DESTINY περιλαμβάνει φορητούς, αρθρωτούς (modular) κλιβάνους με σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την αποδοτικότητα πόρων και ενέργειας, τη λειτουργική ευελιξία, επεκτασιμότητα του συστήματος καθώς και το μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Η επίδραση της προσέγγισης του DESTINY θα διερευνηθεί μέσω πραγματικής εφαρμογής, ως προς τη σταθερότητα και την αποδοτικότητα του συστήματος, καθώς και των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών, των ενδιάμεσων και τελικών προϊόντων αλλά και των παραπροϊόντων. Η εφαρμογή θα αφορά τη βελτίωση των επιδόσεων βιομηχανικών διεργασιών σε 3 βιομηχανικούς τομείς (τσιμέντο, κεραμικά και χάλυβα). Νέες τεχνολογίες θέρμανσης, συστήματα παρακολούθησης και αριθμητικά εργαλεία προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθούν για την καθοδήγηση του σχεδιασμού και την εξασφάλιση θετικών αποτελεσμάτων.

Το έργο DESTINY βασίζεται στη νέα έννοια της τροφοδοσίας κοκκώδους πρώτης ύλης για τον μετασχηματισμό υλικών με χρήση ενέργειας μικροκυμάτων σε κυψελωτούς κλιβάνους. Η νέα ιδέα της διαδικασίας γρήγορης εκτόξευσης μικροκυμάτων που προτείνεται από το DESTINY είναι αρκετά ευπροσάρμοστη ώστε να επικυρώνεται και να επιδεικνύεται σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς. Βασίζεται σε μια προσέγγιση σε εμπορευματοκιβώτιο (container) με διαφορετικά σχέδια προσαρμοσμένα στη βιομηχανική διαδικασία που πρέπει να επικυρωθεί (Σχήμα 2.11). Το σύστημα DESTINY σχεδιάζεται ως αρθρωτές μονάδες (τροφοδοσία υλικού + επεξεργασία προϊόντος μέσω μικροκυμάτων). Έτσι, το σύστημα είναι συμβατό και εύκολο να ενσωματωθεί, πράγμα που μειώνει τις απαιτούμενες επενδύσεις. Η συμπαγής του φύση συμβάλλει επίσης στη μείωση του χώρου που απαιτείται για την εγκατάσταση.



Σχ. 2.11 . Container που πραγματοποιούνται οι διαδικασίες

Η ιδέα DESTINY είναι πράγματι μια αλλαγή παραδείγματος: επιτρέπει την ενσωμάτωση νέων λύσεων χαμηλού κόστους σε μεγάλες υπάρχουσες βιομηχανικές διαδικασίες για γρήγορη βιομηχανική εφαρμογή. Το νέο σύστημα που προτείνεται στο DESTINY θα είναι μια σαφής ευκαιρία για τη βελτίωση των σημερινών βιομηχανικών διαδικασιών θέρμανσης με την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, ιδίως για τη χαμηλή παραγωγή (downscale), δεδομένου ότι οι περισσότερες από αυτές είναι προς το παρόν ανεπαρκείς, δαπανηρές και μη πραγματοποιήσιμες για αποτελεσματική παραγωγή.

Επιπλέον, η ιδέα του συστήματος DESTINY μπορεί να ενσωματωθεί καλά σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις για τη βελτίωση των σημερινών βιομηχανικών εναλλακτικών λύσεων που καταναλώνουν ενέργεια.

Αυτό θα επιτευχθεί αξιοποιώντας:

- Τεχνολογία μικροκυμάτων που βασίζεται σε μια νέα ριζοσπαστική ηλεκτρομαγνητική ιδέα με ικανότητα θερμικής επεξεργασίας κοκκωδών υλικών με πολύ χαμηλό συντελεστή απώλειας (χαμηλή απορρόφηση μικροκυμάτων).
- Σύζευξη τεχνολογίας μικροκυμάτων (MW) με νέα τροφοδοσία ρευστοποιημένου στρώματος, ειδικά σχεδιασμένο για υψηλές επιδόσεις και χαμηλότερο κόστος συντήρησης. Το περιστροφικό σύστημα θα απευθυνθεί στον τομέα του χάλυβα.
- Στρατηγικές παρακολούθησης και ελέγχου για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας και τη διατήρηση των εκπομπών υπό έλεγχο.

Το έργο DAPhNE έδειξε σε εργαστηριακή κλίμακα (~ 5kg / h) ότι η διαδικασία συνεχούς μικροκυμάτων σε υψηλή θερμοκρασία είναι εφικτή τεχνικά και ενεργειακά. Το DESTINY υλοποιεί και επικυρώνει ένα αποδοτικό βιομηχανικό ολοκληρωμένο σύστημα μικροκυμάτων σε πιλοτική κλίμακα, με στόχο να φθάσει για σκοπούς επίδειξης περισσότερα από 20 kg / ώρα από έναν ενιαίο κυψελωτό θάλαμο. Ένα σύστημα που αποτελείται από μια σειρά κυψελωτών κλιβάνων μικροκυμάτων θα εννοείται λαμβάνοντας υπόψη τα 130 kg / h ανά κυψέλη, πράγμα που θα επέτρεπε εμπορικά λειτουργικά ποσοστά παραγωγής. Το DESTINY θα επιδείξει μια βιομηχανική διαδικασία συνεχούς θέρμανσης σε ημι-βιομηχανικό επίπεδο, ανταγωνιστική στα υφιστάμενα συστήματα όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση, την παραγωγικότητα και τις επενδύσεις κόστους. Η διαδικασία κλιμάκωσης προς το λειτουργικό πρωτότυπο DESTINY θα επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση των εξαρτημάτων και στο σχεδιασμό σε διπλές διαμορφώσεις: κλίβανος ρευστοποιημένης κλίνης και περιστροφικός κλίβανος σε νέα διαμόρφωση με πολύ μεγαλύτερη διάμετρο. Ο σχεδιασμός δύο διαφορετικών διαμορφώσεων θα αυξήσει περαιτέρω την δυνατότητα αναπαραγωγής και θα επιτρέψει στο DESTINY να καλύψει διαφορετικά υλικά / βιομηχανικούς τομείς όπως αυτά που επιλέχθηκαν στο πλαίσιο του έργου: πυρωμένοι άργιλοι, κεραμικές χρωστικές ουσίες καθώς και ενδιάμεσα προϊόντα χάλυβα.

Το DESTINY θα καλύψει νέες επικυρωμένες έννοιες στη διαμόρφωση των κλιβάνων μικροκυμάτων, την προετοιμασία / τροφοδοσία και τον έλεγχο των υλικών για την εκβιομηχάνιση της θέρμανσης με μικροκύματα ως λύση για υψηλής ενεργειακής απόδοσης διαδικασίες καύσης με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

Η θέρμανση με μικροκύματα είναι γνωστό ότι προσφέρει μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές τεχνικές θέρμανσης με υψηλή κατανάλωση ενέργειας, που είναι ακόμα κοινές σε ένα ευρύ φάσμα διαδικασιών βιομηχανικής παραγωγής. Σε αντίθεση με τη συμβατική θέρμανση, η οποία βασίζεται στην μεταφορά της θερμικής ενέργειας που παρέχεται από μια εξωτερική πηγή σε όλη την επιφάνεια στον όγκο του δείγματος, η θέρμανση με μικροκύματα προκύπτει από τη μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στη θερμότητα σε μοριακό επίπεδο. Ο φούρνος

μικροκυμάτων ζευγνύει απευθείας με τα ηλεκτρόνια στα άτομα, τα μόρια, τους κρυστάλλους ή τις συστάδες των υλικών και η ενέργεια μπορεί σχεδόν να καταναλωθεί για ενέργεια θέρμανσης και ενεργοποίησης υλικού, έχοντας μόνο την υπολειπόμενη θερμότητα στο σύστημα (ψυχρή κάμινο).

Για να εξασφαλιστεί η σωστή μετατροπή, το DESTINY θα αναπτύξει ένα νέο εφαρμοστή εφαρμογής, συνδυάζοντας ένα συγκεκριμένο σχέδιο που εστιάζει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στα υλικά στόχους, μαζί με μια πιο ομοιόμορφη διαμόρφωση πεδίου κατά μήκος του θαλάμου αντίδρασης. Πρόσφατες μελέτες σχετικά με την αλληλεπίδραση υλικών και μικροκυμάτων σε υψηλές θερμοκρασίες έδειξαν τα πλεονεκτήματα της διαμόρφωσης του εσωτερικού μήκους κύματος για την προσαρμογή του σήματος στην επιλεκτική θέρμανση των πρώτων υλών (π.χ. αποφυγή ανεπιθύμητου πλάσματος). Αυτή η προσέγγιση θα επιτρέψει την αποτελεσματική θέρμανση των πρώτων υλών παρά την χαμηλή απορρόφηση μικροκυμάτων (παράγοντας απώλειες, ε"). Μια κυκλική δόνηση και μια πνευματική ροή θα εξασφαλίσουν επίσης την κατάλληλη κατανομή σωματιδίων.

Το DESTINY θα εκμεταλλευτεί αυτές τις πτυχές της θέρμανσης με μικροκύματα:

1. Ομοιόμορφη θέρμανση σε μέγεθος σωματιδίων σε ολόκληρο τον όγκο ενός στερεού προδρόμου οδηγεί σε υψηλή χημική και μικροδομική ομοιογένεια (υψηλότερη ποιότητα).
2. Ταχεία επεξεργασία: η εξαιρετικά γρήγορη θέρμανση (και οι ρυθμοί ψύξης) επιτρέπουν πολύ σύντομους χρόνους επεξεργασίας, σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και επεξεργασία υψηλής απόδοσης. επιτρέπει επίσης τη διατήρηση μετασταθών φάσεων και, το σημαντικότερο, μικροδομών εξαιρετικά λεπτών ή νανοκλίμακων.
3. Ενεργειακή απόδοση: Η ενέργεια των μικροκυμάτων είναι αφιερωμένη κυρίως στην αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών-στόχων, αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το επεξεργασμένο υλικό θα εξάγεται ψυχρότερο από ό, τι στις συμβατικές επεξεργασίες.
4. Νέα και βελτιωμένα υλικά με βάση την επεξεργασία των μικροκυμάτων: Η μοναδική δυνατότητα για επιλεκτική θέρμανση και τροποποίηση της διαδρομής για στερεές και χημικές αντιδράσεις ή η μικροδομή αποδίδουν εντελώς νέα υλικά, φάσεις ή μικροδομές.

Η θέρμανση με μικροκύματα είναι μια καθιερωμένη τεχνική θέρμανσης για πολλούς βιομηχανικούς τομείς με απαιτήσεις θέρμανσης χαμηλής θερμοκρασίας (<500°C) σε εφαρμογές στη βιομηχανία τροφίμων και σε άλλους κλάδους βιομηχανιών, όπως πλαστικό (βουλκανισμός από καουτσούκ, σκλήρυνση), χημικά (πολυμερισμός) ή υφάσματος (ξήρανση). Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σταθερή αύξηση της χρήσης μικροκυμάτων για βιομηχανική θέρμανση σε υψηλές θερμοκρασίες (> 500 ° C).

Η επεξεργασία μικροκυμάτων σε υψηλότερες θερμοκρασίες έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τη συμβατική θέρμανση σε αρκετές περιοχές με υψηλότερες ταχύτητες θέρμανσης και ταχύτερη επεξεργασία και υιοθετείται ως τεχνολογία για εφαρμογές σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η σύντηξη με μικροκύματα είναι πλέον καλά αναγνωρισμένη για να προσφέρει ταχύ ρυθμούς θέρμανσης και συντομότερους χρόνους σύντηξης σε σχέση με τη συμβατική διαδρομή και διατηρώντας ακόμα τη θερμοκρασία και την μικροδομική ομοιομορφία. Στο πλαίσιο του έργου DESTINY, για την εκτέλεση αυτής της μελέτης στον τομέα των αλληλεπιδράσεων μικροκυμάτων-ουσίας θα αναπτυχθεί προηγμένος εξοπλισμός που έχει αναπτυχθεί πρόσφατα.

Πολλές μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιήσουν οικονομικά αποδοτικά μικροκύματα αναφέρονται στη βιβλιογραφία, αλλά πολλά δεν έχουν ακόμη εφαρμοστεί στο πλαίσιο της βιομηχανίας. Γενικά, οι ερευνητικές μελέτες συμφώνησαν ότι θα επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας, που κυμαίνεται από 10% έως 90% σε υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με αυτή της συμβατικής ηλεκτρικής θέρμανσης ή αερίου. Μεγάλος αριθμός ερευνητικών, αναπτυξιακών και εφαρμοσμένων ομάδων τεχνολογιών μικροκυμάτων από την Ασία, την Ευρώπη και τις ΗΠΑ υπέβαλε εκθέσεις στην πρώτη διεθνή διάσκεψη με θέμα «Οικονομία και ενεργειακή αξιοποίηση των μικροκυμάτων» που πραγματοποιήθηκε στις ΗΠΑ το 2006, οικονομικά πλεονεκτήματα που θα μπορούσαν να επιτευχθούν με την εκμετάλλευση μικροκυμάτων σε βιομηχανικές διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας.

2.2.3. Μέθοδος παραγωγής pig iron με μικροκύματα (DESTINY) [40]

Η νέα διαδικασία DESTINY θα παρέχει ένα ενδιάμεσο προϊόν νέας ποιότητας που μπορεί να προσαρμοστεί στη διαφορετική χρήση σε μεταγενέστερες διαδικασίες κατασκευής χάλυβα (BP, MP, EAF, BOF,...)

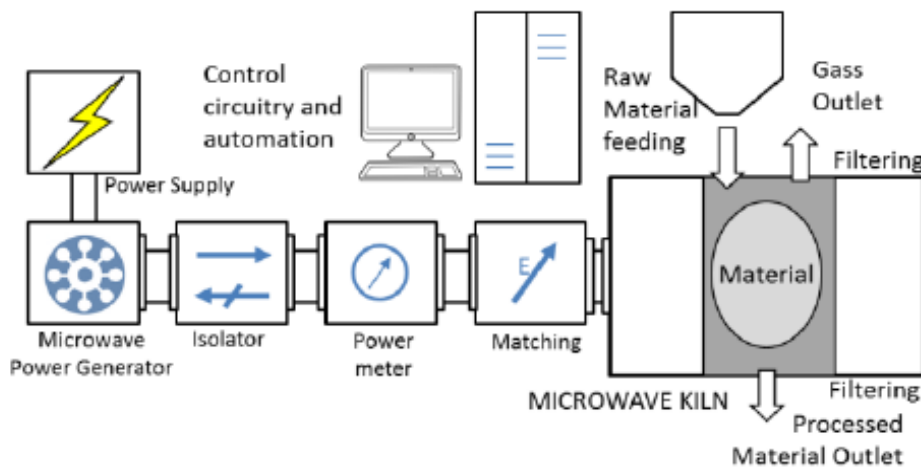
Τα οξειδία του σιδήρου διαφορετικής φύσης και η ελεύθερη περιεκτικότητα σε σίδηρο δοκιμάστηκαν στο πλαίσιο του έργου innMETÆ σε περιστροφικό κλίβανο σε εργαστηριακή κλίμακα. Μέσα στο DESTINY, τα υπολείμματα που φέρουν σίδηρο και τα υποπροϊόντα θα υποστούν επεξεργασία για να επιτευχθεί η συσσωμάτωση, η μερική αναγωγή των οξειδίων του σιδήρου και να ανακυκλωθεί το μίγμα πλούσιο σε ψευδάργυρο ως ZnO. Το αναβαθμισμένο πρωτότυπο εργαστηρίου DESTINY θα χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της επεξεργασίας.

Αυτή η σύντομη επισκόπηση δείχνει τη σημασία της στοχευόμενης βιομηχανικής διαδικασίας του έργου DESTINY σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Ωστόσο, η προσέγγιση DESTINY μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε περαιτέρω βιομηχανικές διεργασίες (π.χ.

παραγωγή γυαλιού / τήξη ή παραγωγή κλίνκερ / σύντηξη), όπου εμπλέκεται υψηλή θερμική ζήτηση και αντίστοιχη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων.

Παρόλο που τα συστατικά ενός συστήματος για την επεξεργασία MW είναι σχετικά απλά, η αλληλεπίδραση των υλικών με την ακτινοβολία και οι αλλαγές που παράγουν σε αυτές καθιστούν το σχεδιασμό και την κλιμάκωση των διαδικασιών όχι πάντα εύκολη. Αυτή η πολυπλοκότητα απαιτεί μια πολυεπιστημονική προσέγγιση με τη συμμετοχή διαφόρων ειδικών σε υλικά, επεξεργασία και σχεδιασμό εφαρμογών MW. Το σχήμα 2.12 δείχνει τα διάφορα μέρη της εγκατάστασης του συστήματος DESTINY:

- Μονάδα ισχύος όπου δημιουργούνται μικροκύματα στην απαιτούμενη ζώνη συχνοτήτων.
- Φούρνος μικροκυμάτων, όπου το υλικό υπόκειται σε έντονα πεδία μικροκυμάτων. Είναι κατασκευασμένο με αγωγίμα υλικά και πυρίμαχα κεραμικά συμβατά με το φούρνο μικροκυμάτων σε κατάλληλη διαμόρφωση.
- Κύκλωμα ελέγχου για τη βελτιστοποίηση και ρύθμιση της συνολικής απόδοσης του θερμαντήρα μικροκυμάτων. Ένας αισθητήρας ελέγχου μετράει το ανακλώμενο σήμα μικροκυμάτων και ρυθμίζει (τροφοδοτεί) τις ρυθμίσεις των εξαρτημάτων στο κύκλωμα αντιστοίχισης (αντίστασης).

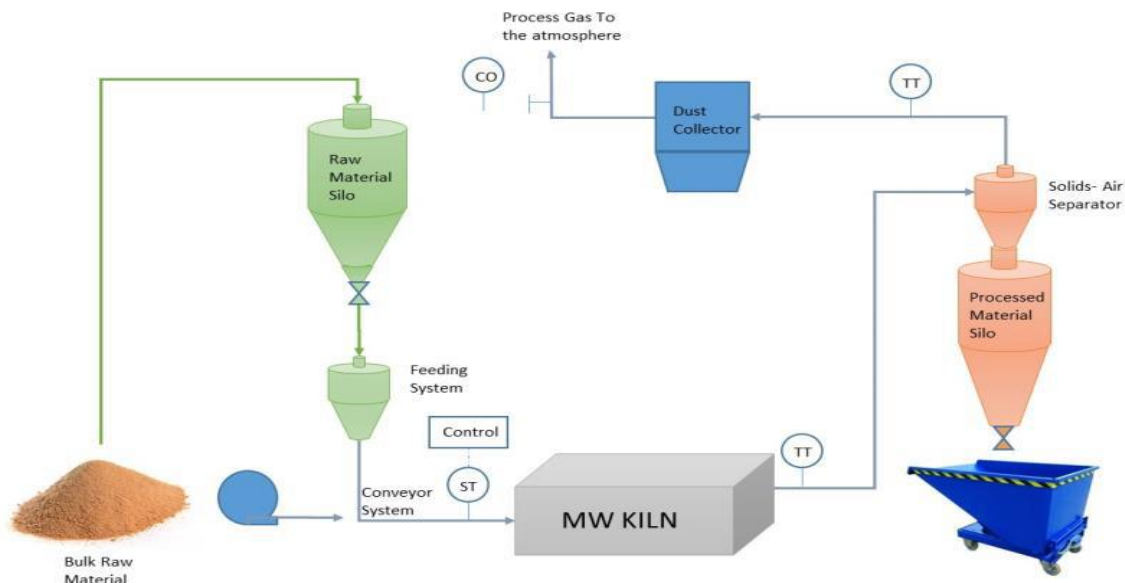


Σχ. 2.12. Μέρη της εγκατάστασης του συστήματος DESTINY

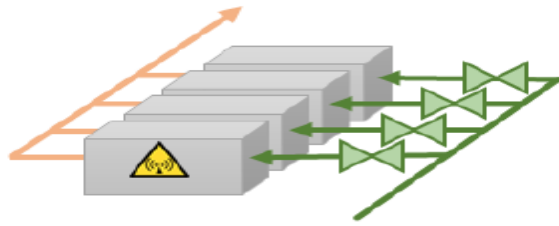
ΜΟΝΑΔΑ ΚΛΙΝΗΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ

Το δομοστοιχείο DESTINY αποτελείται από έναν νέο αυτόνομο φούρνο μικροκυμάτων με ένα ειδικό σύστημα μεταφοράς υλικού (Σχήμα 2.13) που εξασφαλίζει συνεχή ροή και συνδέεται με ένα σύστημα διαχωρισμού και φιλτραρίσματος στο οποίο τα επεξεργασμένα στερεά προϊόντα αποθηκεύονται μετά την αφαίρεση της αέριας φάσης.

Το σύστημα τροφοδοσίας θα εκχυλίσει το στερεό προϊόν από το σιλό πρώτων υλών και θα το δώσει στο σύστημα μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς θα μεταφέρει την πρώτη ύλη σε συνεχή ροή μέσω του συστήματος μικροκυμάτων και θα την μεταφέρει στην περιοχή διαχωρισμού και φιλτραρίσματος πριν την εκφορτώσει στο σιλό του επεξεργασμένου υλικού. Επιπλέον, το σύστημα μεταφοράς θα είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της ταχύτητας μεταφοράς υλικού και του ρυθμού ροής του συστήματος. Ένα σύστημα μεταφοράς ρευστοποιημένου στρώματος προορίζεται να χρησιμοποιηθεί, αλλά ανάλογα με τα προς επεξεργασία υλικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν άλλες εναλλακτικές λύσεις που να ταιριάζουν καλύτερα με τις απαιτήσεις τροφοδοσίας του κλιβάνου μικροκυμάτων. Τα αέρια της διεργασίας (αέρας για ρευστοποίηση και αέρια αντίδρασης) θα διαχωριστούν από τα σωματίδια στερεών με ένα παρόμοιο σύστημα κυκλώνα, μέσω συλλέκτη σκόνης και με παρακολούθηση εκπομπών (π.χ. CO₂) για την εξασφάλιση φιλικών προς το περιβάλλον αερίων.



Σχ 2.13. Διάγραμμα ροής συστήματος διεργασιών



Σχ 2.14. Σενάριο εν σειρά κλίνες μικροκυμάτων

Κεφάλαιο 3^ο - Ανάλυση κύκλου ζωής

3.1. Γενικά στοιχεία

Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι μια μέθοδος για την αξιολόγηση και ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Ως προϊόν μπορεί να θεωρηθεί οτιδήποτε, από μια μεμονωμένη δραστηριότητα έως μια ολοκληρωμένη διαδικασία παραγωγής.

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες ξεκινώντας από την παραγωγή των πρώτων υλών (“Cradle”) μέχρι την τελική διάθεση των προϊόντων (“grave”), περιλαμβάνοντας και την ανακύκλωση των υλικών εφόσον αυτό χρειάζεται. Απλούστερες προσεγγίσεις AKZ οι οποίες περιλαμβάνουν μέρος μόνο των σταδίων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος είναι:

- Gate to Gate: Μελετάει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά την επεξεργασία των πρώτων υλών μέχρι την παραγωγή του τελικού προϊόντος
- Gate to Grave: Μελετάει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση και την τελική μέθοδο διάθεσης του υπό εξέταση προϊόντος
- Cradle to Gate: Μελετάει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συνόλου των διεργασιών από την εξαγωγή των πρώτων υλών μέχρι την παραγωγή του τελικού προϊόντος. [41]

Η AKZ μπορεί να βοηθήσει :

- στην επίδειξη δυνατοτήτων για βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης προϊόντων σε διάφορα στάδια κατά τον κύκλο ζωής τους
- στην ενημέρωση φορέων λήψεως αποφάσεων, στην βιομηχανία, σε κυβερνητικούς ή μη οργανισμούς
- στην επιλογή κατάλληλων δεικτών περιβαλλοντικής απόδοσης , περιλαμβάνοντας τεχνικές μέτρησης και
- στο μάρκετινγκ (πχ συμβάλλοντας στην παραγωγή περιβαλλοντικών δηλώσεων για προϊόντα (Environmental Product Declaration – EPD)). [42]

3.2. Μεθοδολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η ανάλυση κύκλου ζωής είναι μια τυποποιημένη μεθοδολογία, η οποία προσφέρει αξιοπιστία και διαφάνεια. Τα πρότυπα παρέχονται από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (International Organization for Standardization – ISO) στα ISO 14040 και 14044 και περιγράφουν τα τέσσερα βασικά στάδια μιας ΑΚΖ:

1. Προσδιορισμός στόχου και του πεδίου εφαρμογής της μελέτης (goal and scope definition) (ISO 14041)
2. Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων για το σύστημα (inventory analysis) (ISO14041)
3. Εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη λειτουργία του συστήματος (Impact assessment) (ISO 14042)
4. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων και εκτίμηση βελτιώσεων του συστήματος (interpretation) (ISO 14043) [43,44]

Προσδιορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής

Ένα LCA ξεκινά με μια ρητή δήλωση του στόχου και του εύρους της μελέτης, η οποία καθορίζει το πλαίσιο της μελέτης και εξηγεί πώς και σε ποιον πρέπει να κοινοποιηθούν τα αποτελέσματα. Πρόκειται για ένα βήμα-κλειδί και τα πρότυπα ISO απαιτούν ο στόχος και η εμβέλεια μιας ΑΚΖ να είναι σαφώς καθορισμένα και συνεπή με την προβλεπόμενη εφαρμογή. Το έγγραφο στόχου και εμβέλειας περιλαμβάνει επομένως τεχνικές λεπτομέρειες που καθοδηγούν τις επόμενες εργασίες:

- η λειτουργική μονάδα, η οποία ορίζει ακριβώς τι μελετάται, ποσοτικοποιεί την υπηρεσία που παρέχεται από το σύστημα, παρέχει μια αναφορά στην οποία μπορούν να συνδεθούν οι εισροές και οι εκροές και παρέχει τη βάση για τη σύγκριση / ανάλυση εναλλακτικών προϊόντων ή υπηρεσιών .
- τα όρια του συστήματος, τα οποία οριοθετούν τις διαδικασίες που πρέπει να συμπεριληφθούν στην ανάλυση ενός συστήματος, συμπεριλαμβανομένου του κατά πόσο το σύστημα παράγει οποιαδήποτε συμπαραγωγή τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επέκταση ή την κατανομή του συστήματος .
- οποιεσδήποτε υποθέσεις και περιορισμοί .
- απαιτήσεις ποιότητας δεδομένων, οι οποίες καθορίζουν τα είδη δεδομένων που θα συμπεριληφθούν και ποιοι περιορισμοί (εύρος ημερομηνιών, πληρότητα, νομός ή περιοχή μελέτης κλπ.) θα εφαρμοστούν.

- οι μέθοδοι κατανομής, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να χωρίσουν ένα περιβαλλοντικό φορτίο μιας διαδικασίας όταν πολλά προϊόντα ή λειτουργίες μοιράζονται την ίδια διαδικασία. Η κατανομή συνήθως αντιμετωπίζεται με έναν από τους τρεις τρόπους: επέκταση συστήματος, υποκατάσταση και διαμέριση. Η επιλογή της μεθόδου κατανομής για τα παραπροϊόντα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα μιας ΑΚΖ
- τις κατηγορίες επιπτώσεων, τις απαιτούμενες διευκρινίσεις οι οποίες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν κατηγορίες όπως η τοξικότητα στον άνθρωπο, ο νέφος, η υπερθέρμανση του πλανήτη και ο ευτροφισμός . [45]

Ανάλυση και καταγραφή δεδομένων

Η ανάλυση του Κύκλου Ζωής (LCI) περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός αποθέματος ροών από και προς τη φύση για ένα σύστημα προϊόντων. Οι ροές των αποθεμάτων περιλαμβάνουν εισροές ύδατος, ενέργειας και πρώτων υλών και εκλύσεις στον αέρα, στη γη και στο νερό. Για την ανάπτυξη του αποθέματος, κατασκευάζεται ένα μοντέλο ροής του τεχνικού συστήματος χρησιμοποιώντας δεδομένα για εισόδους και εξόδους. Το μοντέλο ροής απεικονίζεται συνήθως με ένα διάγραμμα ροής που περιλαμβάνει τις δραστηριότητες που πρόκειται να αξιολογηθούν στη σχετική αλυσίδα εφοδιασμού και δίνει μια σαφή εικόνα των ορίων του τεχνικού συστήματος. Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου που απαιτούνται για την κατασκευή του μοντέλου συλλέγονται για όλες τις δραστηριότητες εντός των ορίων του συστήματος, μεταξύ άλλων από την αλυσίδα εφοδιασμού (που αναφέρονται ως εισροές από την τεχνόσφαιρα).

Τα δεδομένα πρέπει να σχετίζονται με τη λειτουργική μονάδα που ορίζεται στον ορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής. Τα δεδομένα μπορούν να παρουσιαστούν σε πίνακες και ορισμένες ερμηνείες μπορούν να γίνουν ήδη σε αυτό το στάδιο. Τα αποτελέσματα της απογραφής είναι ένας LCI ο οποίος παρέχει πληροφορίες για όλες τις εισροές και τις εκροές με τη μορφή στοιχειώδους ροής προς και από το περιβάλλον από όλες τις διαδικασίες μονάδας που εμπλέκονται στη μελέτη.

Οι ροές των αποθεμάτων μπορούν να ανιχνευθούν στις εκατοντάδες ανάλογα με το όριο του συστήματος. Για τα LCA προϊόντων σε γενικούς (δηλαδή σε αντιπροσωπευτικούς βιομηχανικούς μέσους όρους) ή σε επίπεδο συγκεκριμένης επωνυμίας, τα δεδομένα συλλέγονται συνήθως μέσω ερωτηματολογίων έρευνας. Σε επίπεδο βιομηχανίας, πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε τα ερωτηματολόγια να συμπληρωθούν από ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα παραγωγών, που δεν θα προσανατολίζονται προς το καλύτερο ούτε το χειρότερο και θα αντιπροσωπεύουν πλήρως τις περιφερειακές διαφορές που οφείλονται στη χρήση ενέργειας, την προμήθεια υλικών ή άλλους παράγοντες. Τα ερωτηματολόγια καλύπτουν το πλήρες φάσμα εισροών

και εκροών, που συνήθως αποσκοπούν στο να αντιπροσωπεύουν το 99% της μάζας ενός προϊόντος, το 99% της ενέργειας που καταναλώνεται στην παραγωγή του και οποιεσδήποτε περιβαλλοντικώς ευαίσθητες ροές, ακόμη και αν εμπίπτουν στο επίπεδο του 1% εισροές.

Εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Στο τέλος του σταδίου της ανάλυσης και καταγραφής των δεδομένων για το σύστημα, οι εκπομπές κάθε διεργασίας έχουν εκφραστεί ως προς την λειτουργική μονάδα του συστήματος. Ωστόσο, η παρούσα μορφή των αποτελεσμάτων γίνεται δύσκολα κατανοητή τόσο λόγω του μεγάλου πλήθους των διαφορετικών ρυπαντών όσο και της μη απευθείας συσχέτισής τους με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Στο στάδιο της εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων τα παραπάνω αποτελέσματα ακολουθώντας μια σειρά βημάτων, μπορούν να εκφραστούν σε κατηγορίες οι οποίες δίνουν άμεση εικόνα για την περιβαλλοντική συμπεριφορά του προϊόντος. Τα βήματα αυτά περιγράφονται παρακάτω.

Ταξινόμηση (Classification)

Σε αυτό το στάδιο τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά το στάδιο της ανάλυσης και καταγραφής των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ταξινομούνται σε κατηγορίες (Impact categories) ανάλογα με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Χαρακτηρισμός (Characterization)

Ο χαρακτηρισμός αποτελεί το επόμενο βήμα μετά την ταξινόμηση. Κάθε ουσία η οποία έχει ταξινομηθεί σε μια κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων πολλαπλασιάζεται με έναν παράγοντα χαρακτηρισμού ο οποίος εκφράζει την συνεισφορά της σε σχέση με ένα ρύπο βάσης. Το τελικό αποτέλεσμα αποτελεί το άθροισμα του συνόλου συνεισφορών και εκφράζεται ως δείκτης κατηγορίας επίπτωσης, ενώ έχει μονάδες τις μονάδες του ρύπου βάσης. Για παράδειγμα εάν για την κατηγορία κλιματική αλλαγή χρησιμοποιηθεί ως ρύπος βάσης το CO₂, τότε ο παράγοντας χαρακτηρισμού του CO₂ θα είναι 1 ενώ για το μεθάνιο (CH₄) θα είναι 25. «Αυτό σημαίνει πως η απελευθέρωση 1kg μεθανίου έχει την ίδια επίδραση κλιματικής αλλαγής όσο 25 kg CO₂».

Κανονικοποίηση (Normalization) – προαιρετικό –

Η κανονικοποίηση συσχετίζει τα αποτελέσματα που προέκυψαν για μια κατηγορία περιβαλλοντικής επίπτωσης, μετά το στάδιο του χαρακτηρισμού, με μια τιμή αναφοράς, διαφορετική ανά κατηγορία. Αυτό επιτρέπει την άμεση κατανόηση του μεγέθους της επίδρασης, του προς εξέταση προϊόντος σε κάθε κατηγορία επίπτωσης. Παράλληλα αποκαλύπτει τις δυσμενέστερες κατηγορίες επίπτωσης, μέσω σύγκρισης των κανονικοποιημένων αποτελεσμάτων. Κατά την σύγκριση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η υποκειμενικότητα των αποτελεσμάτων η οποία οφείλεται στην εξάρτησή τους από την τιμή αναφοράς η οποία έχει επιλεγθεί.

Ομαδοποίηση (Grouping) – προαιρετικό –

Η ομαδοποίηση είναι η τοποθέτηση των αποτελεσμάτων του χαρακτηρισμού σε ένα ή περισσότερα σύνολα. Τα σύνολα αυτά μπορεί να στοχεύουν στην ιεράρχηση των αποτελεσμάτων των κατηγοριών, όπως σε υψηλής, μέσης ή χαμηλής προτεραιότητας ή να εξετάζουν την επίδρασή τους σε παγκόσμιο, περιφερειακό ή τοπικό επίπεδο. Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος ομαδοποίησης είναι επιλογή του εκάστοτε μελετητή η οποία έχει ως σκοπό την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, ανάλογα με το σκοπό της μελέτης.

Στάθμιση (Weighting) – προαιρετικό –

Ο σκοπός της στάθμισης είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μιας ΑΚΖ με μια μοναδική βαθμολογία (σκορ). Η τελική αυτή βαθμολογία θα προκύψει ως σταθμισμένος μέσος όρος των αποτελεσμάτων για το σύνολο των κατηγοριών επίπτωσης. Δεδομένου πως οι τιμές των παραγόντων στάθμισης εξαρτώνται από τις κατηγορίες επίπτωσης που θεωρούνται πιο σημαντικές από τον εκάστοτε μελετητή, γίνεται αντιληπτή η υποκειμενικότητα της τελικής βαθμολογίας.

Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία του κύκλου ζωής είναι μια συστηματική τεχνική για τον εντοπισμό, την ποσοτικοποίηση, τον έλεγχο και την αξιολόγηση πληροφοριών από τα αποτελέσματα του αποθέματος του κύκλου ζωής ή / και την αξιολόγηση αντίκτυπου κύκλου ζωής. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση των απογραφών και την εκτίμηση των επιπτώσεων συνοψίζονται κατά τη διάρκεια της φάσης ερμηνείας. Το αποτέλεσμα της φάσης ερμηνείας είναι ένα σύνολο συμπερασμάτων και συστάσεων για τη μελέτη. Σύμφωνα με το ISO 14040, η ερμηνεία πρέπει να περιλαμβάνει:

- προσδιορισμός σημαντικών θεμάτων με βάση τα αποτελέσματα των φάσεων LCI και LCIA μιας ΑΚΖ ·
- αξιολόγηση της μελέτης σχετικά με τους ελέγχους πληρότητας, ευαισθησίας και συνέπειας · και
- συμπεράσματα, περιορισμοί και συστάσεις.

Βασικός σκοπός της ερμηνείας του κύκλου ζωής είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου εμπιστοσύνης στα τελικά αποτελέσματα και η επικοινωνία τους με δίκαιο, πλήρες και ακριβή τρόπο. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων ενός LCA δεν είναι τόσο απλή όσο το "3 είναι καλύτερη από 2, επομένως η Εναλλακτική Α είναι η καλύτερη επιλογή. Η ερμηνεία ξεκινά με την κατανόηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και τη διασφάλιση ότι πληρούν το στόχο της μελέτης. Αυτό επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό των στοιχείων δεδομένων που συμβάλλουν σημαντικά σε κάθε κατηγορία επιπτώσεων, την αξιολόγηση της ευαισθησίας αυτών των σημαντικών στοιχείων δεδομένων, την αξιολόγηση της πληρότητας και της συνέπειας της μελέτης και την εξαγωγή συμπερασμάτων και συστάσεων βάσει μιας σαφούς κατανόησης του τρόπου διεξαγωγής της ΑΚΖ και τα αποτελέσματα αναπτύχθηκαν.

Συγκεκριμένα, όπως επεσήμανε ο M. A. Curran, ο στόχος της ερμηνευτικής φάσης της ΑΚΖ είναι να προσδιοριστεί η εναλλακτική λύση που έχει το λιγότερο αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον, στους χερσαίους, θαλάσσιους και εναέριους πόρους. [44,45]

3.3. Υπολογιστικό εργαλείο

Στην εργασία αυτή το λογισμικό που θα χρησιμοποιήσουμε είναι το Sima Pro . Το Sima Pro είναι ένα λογισμικό με κυρίαρχο ρόλο στον τομέα ανάλυσης του κύκλου ζωής των υλικών με πάνω από 25 χρόνια εμφάνισης στον κλάδο και το έχουν εμπιστευτεί εταιρίες και ακαδημίες σε περισσότερες από 80 χώρες στον κόσμο. Το Sima Pro είναι ένα επαγγελματικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη συλλογή δεδομένων που αναλύουν και παρακολουθούν την απόδοση της βιωσιμότητας των προϊόντων και υπηρεσιών από τα αντίστοιχα υλικά που γίνεται η ανάλυση του κύκλου ζωής. Μέσω του εργαλείου αυτού μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες σχετικά με την βιωσιμότητα των υλικών, τις εκπομπές σε άνθρακα και άλλα καθώς επίσης μας βοηθάει και στον σχεδιασμό του προϊόντος για καλύτερη μελλοντική χρήση τους, τη δημιουργία περιβαλλοντικών δηλώσεων για τα προϊόντα, και τέλος τον προσδιορισμό βασικών δεικτών απόδοσης. Τα δεδομένα αυτά βρίσκονται ήδη σε ηλεκτρονικές βιβλιοθήκες που απαρτίζουν το λογισμικό χωρισμένες σε κατηγορίες ανάλογα τα υλικά και οι οποίες έχουν φτιαχτεί έπειτα από πολλές μελέτες. Επίσης δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη εύκολα να προσθέσει μία δικιά του πληροφορία στην βιβλιοθήκη. Στην εργασία αυτή η

βιβλιοθήκη από τη οποία θα αντληθούν σχεδόν όλες οι πληροφορίες είναι ηecoinvent.
[46,47]

Κεφάλαιο 4^ο –Ανάλυση κύκλου ζωής στην παραγωγή pig iron

4.1. Λειτουργική μονάδα

Λειτουργική μονάδα για την εργασία αυτή θεωρείται ο ένας τόνος (t) ακατέργαστου χυτοσιδήρου (pig iron).

4.2. Όρια συστημάτων παραγωγής pig iron

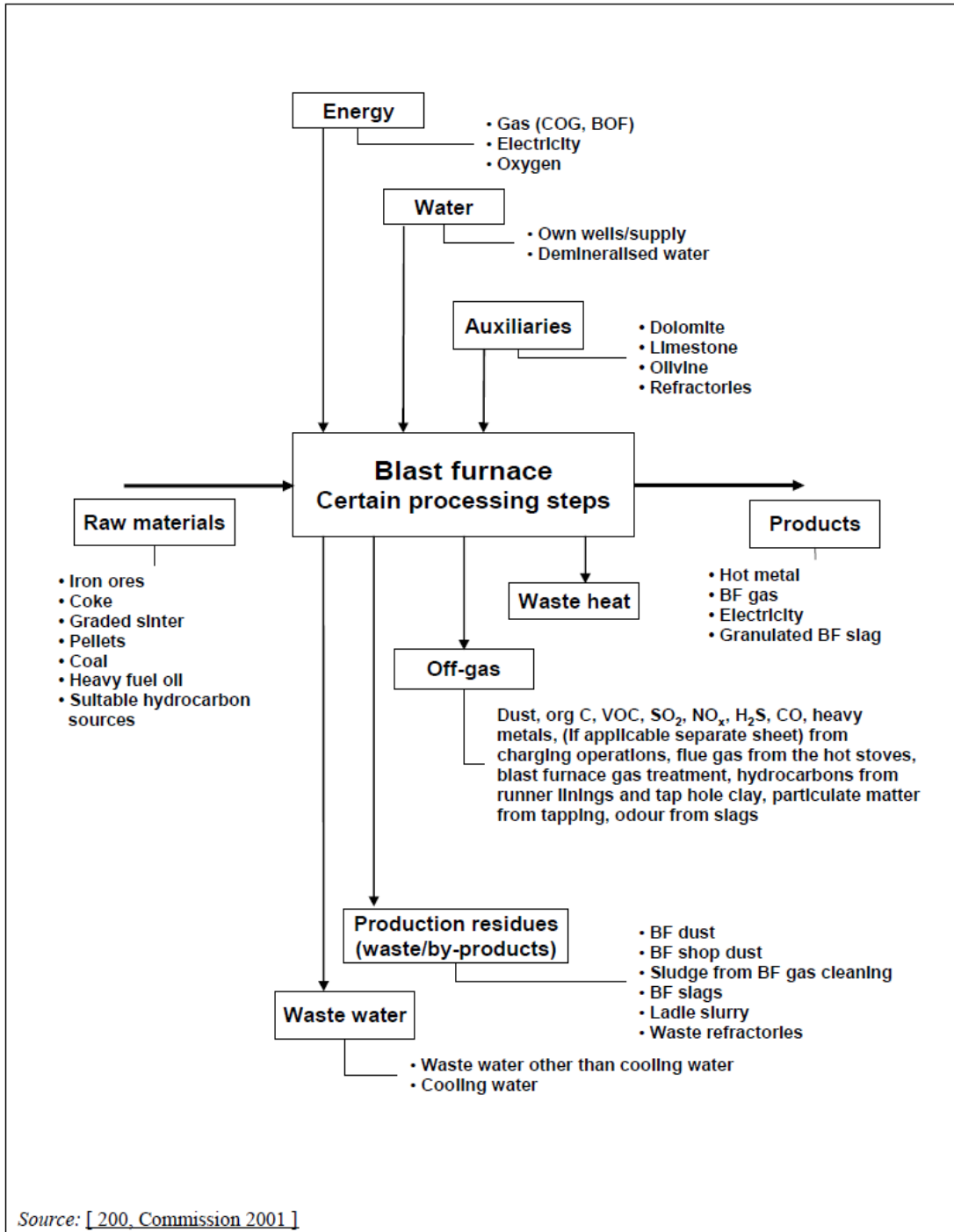
Το υπό εξέταση σύστημα είναι η υψικάμινος (blast furnace) μαζί με όλα τα υποσυστήματα της, όπως έχουν περιγραφεί στο Κεφάλαιο 2.

Σύμφωνα λοιπόν με αυτά στα όρια περιλαμβάνονται τα εξής στάδια:

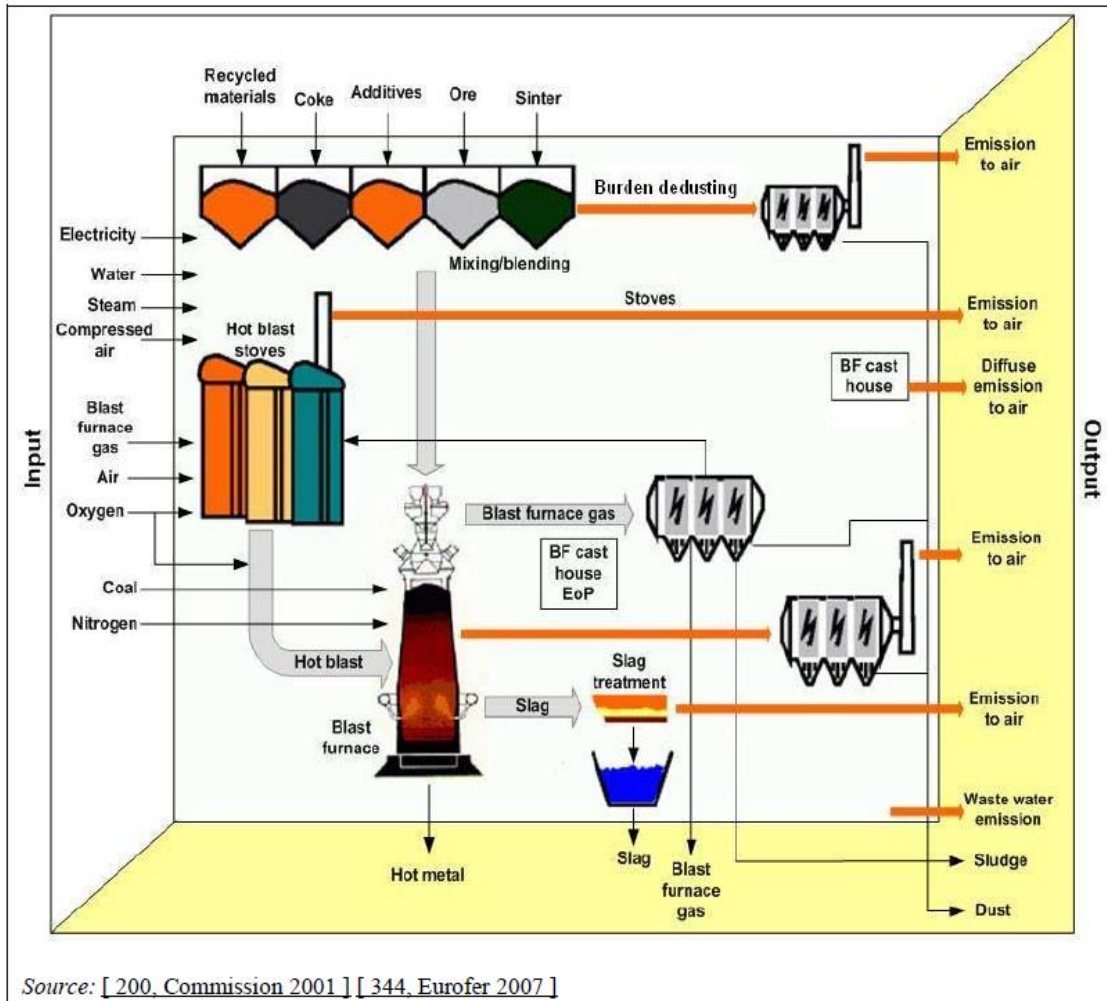
- εξόρυξη, επεξεργασία και παραγωγή των Α' υλών
- κατασκευή των κύριων υλικών που απαρτίζουν το σύστημα
- λειτουργία και συντήρηση
- μεταφορές όπου υπάρχει διαθεσιμότητα πληροφοριών

Όσον αφορά τις εισροές και εκροές του εξεταζόμενου συστήματος αυτές λαμβάνονται ως εξής:

- ως εισροές θεωρούνται οι ποσότητες υλικών και ενέργειας που απαιτούνται για την πραγματοποίηση των διαφόρων σταδίων και
- ως εκροές θεωρούνται η παραγωγή του ενδιάμεσου αυτού προϊόντος χάλυβα και οι εκπομπές διαφόρων ρυπαντών που προκύπτουν από τα στάδια παραγωγής. [48]

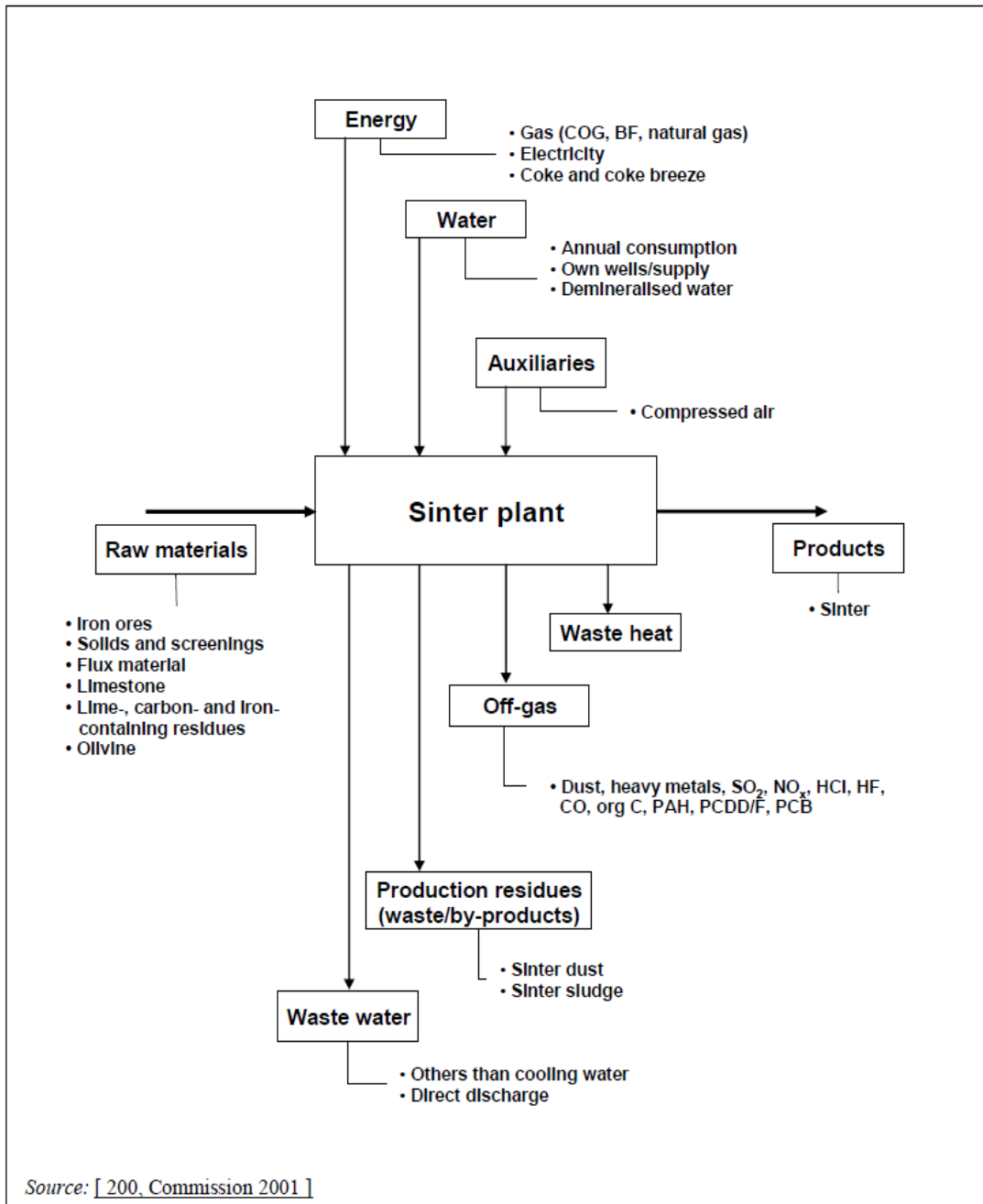


Σχ 4.1. Διάγραμμα ροής για την παραγωγή pig iron[17]

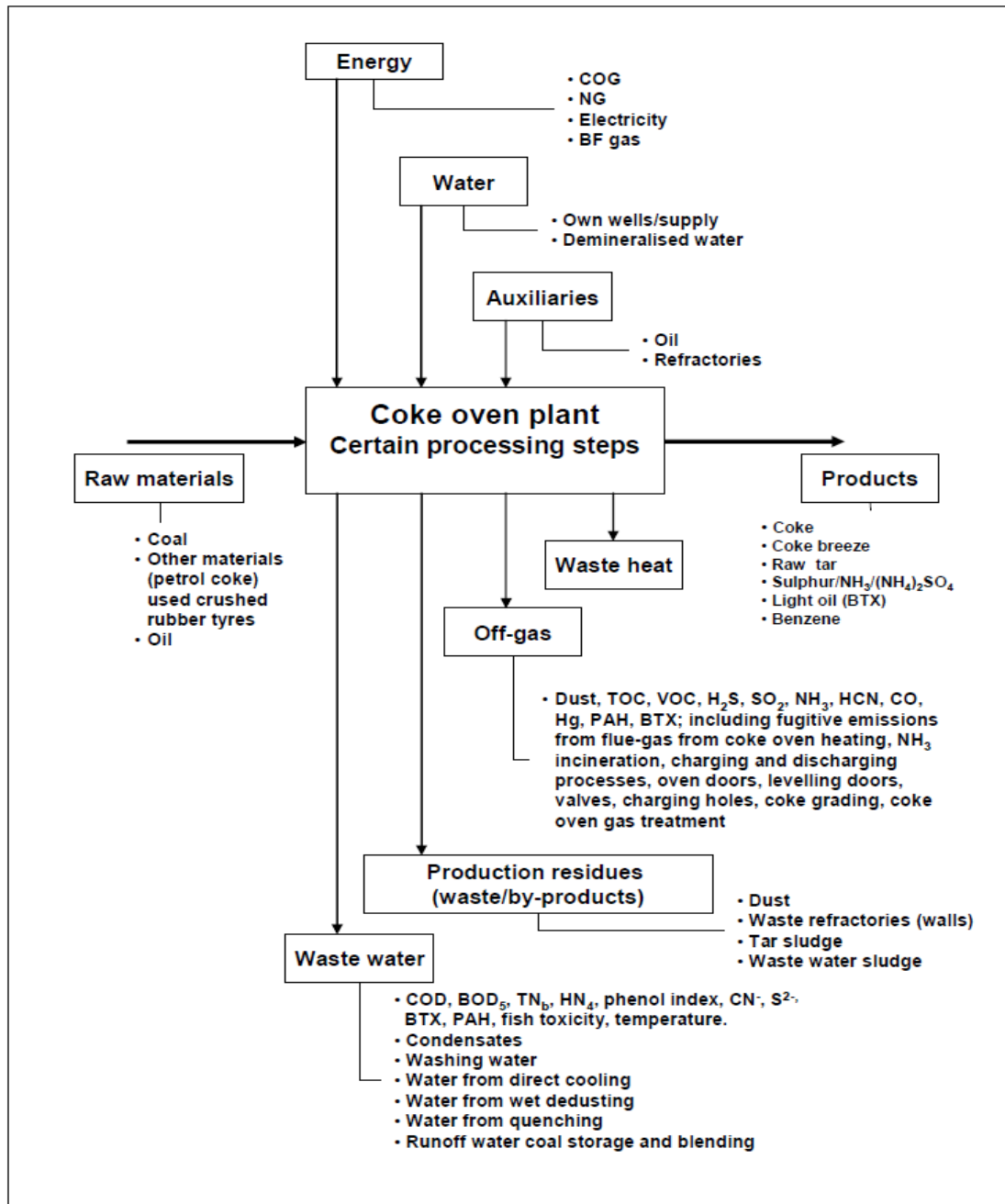


Σχ. 4.2. Διάγραμμα ροής για την παραγωγή pig iron (Πιο λεπτομερής ανάλυση)

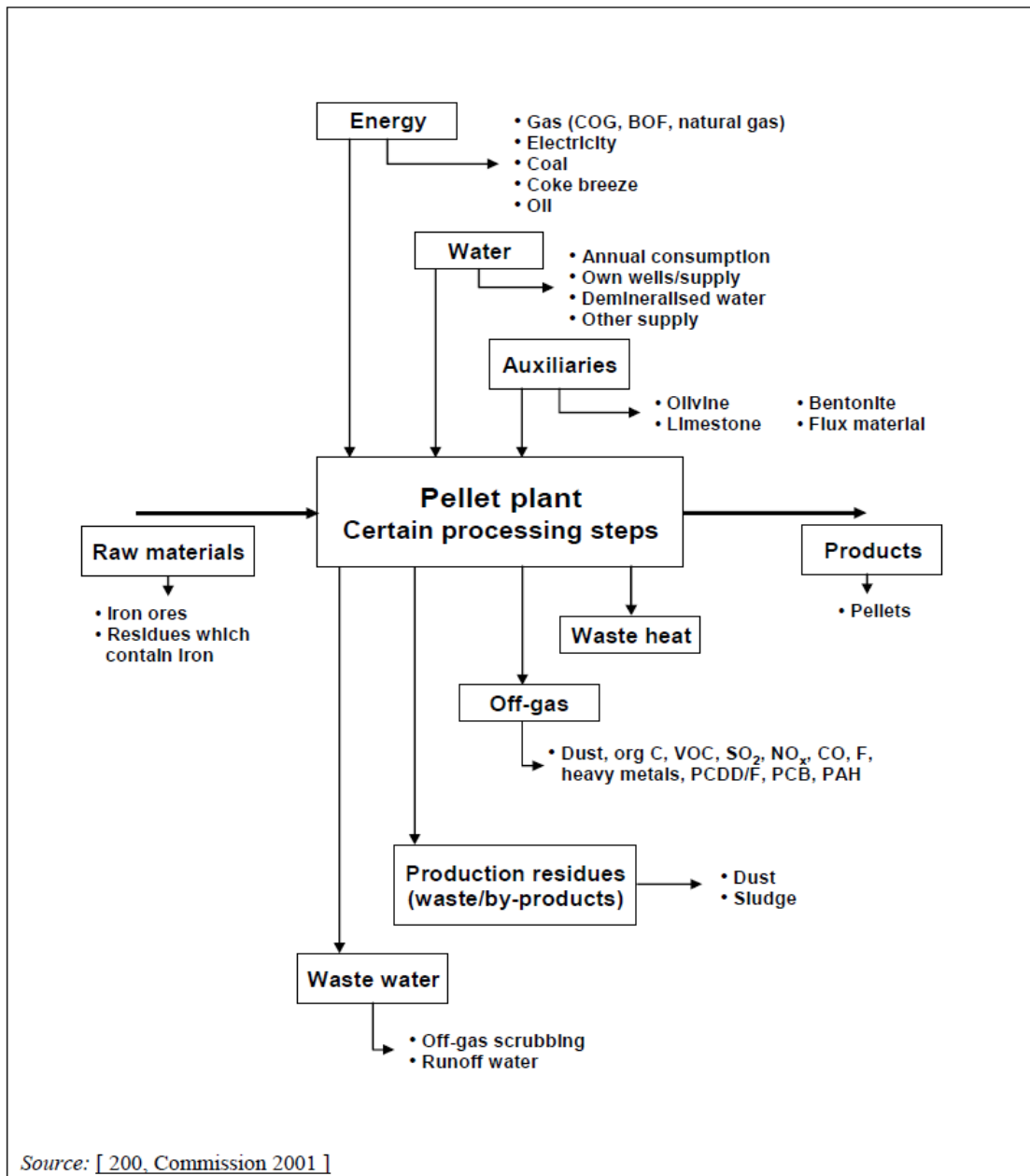
Η ανάλυση η οποία γίνεται για την παραγωγή του pig iron βέβαια γίνεται με την λογική 'cradle to gate', επομένως αυτό σημαίνει πως από την στιγμή που στις εισροές της υψικαμίνου είναι και προϊόντα όπως κοκ, πέλετ και πυροσυσσωμάτωμα (sinter) σε συγκεκριμένες αναλογίες, σαν όρια συστήματος πρέπει να θεωρηθεί το σύνολο των μονάδων αυτών και να ληφθούν υπόψη στην μελέτη και οι εκπομπές που προκύπτουν από την παραγωγή αυτών των προϊόντων. Επομένως θα ήταν χρήσιμο να παρουσιαστούν τα διαγράμματα ροής και των διεργασιών αυτών.



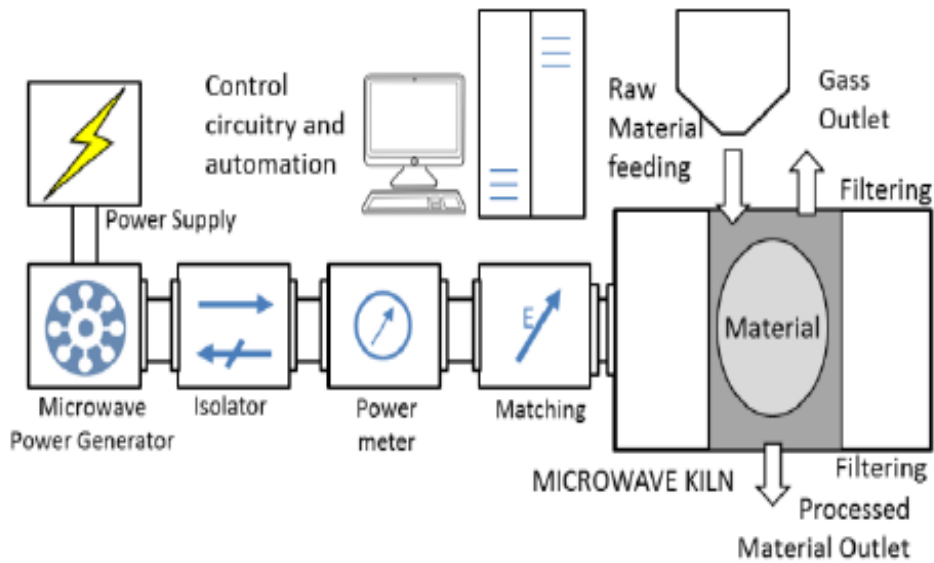
Σχ 4.3. Διάγραμμα ροής μονάδας πυροσσωμάτωσης [16]



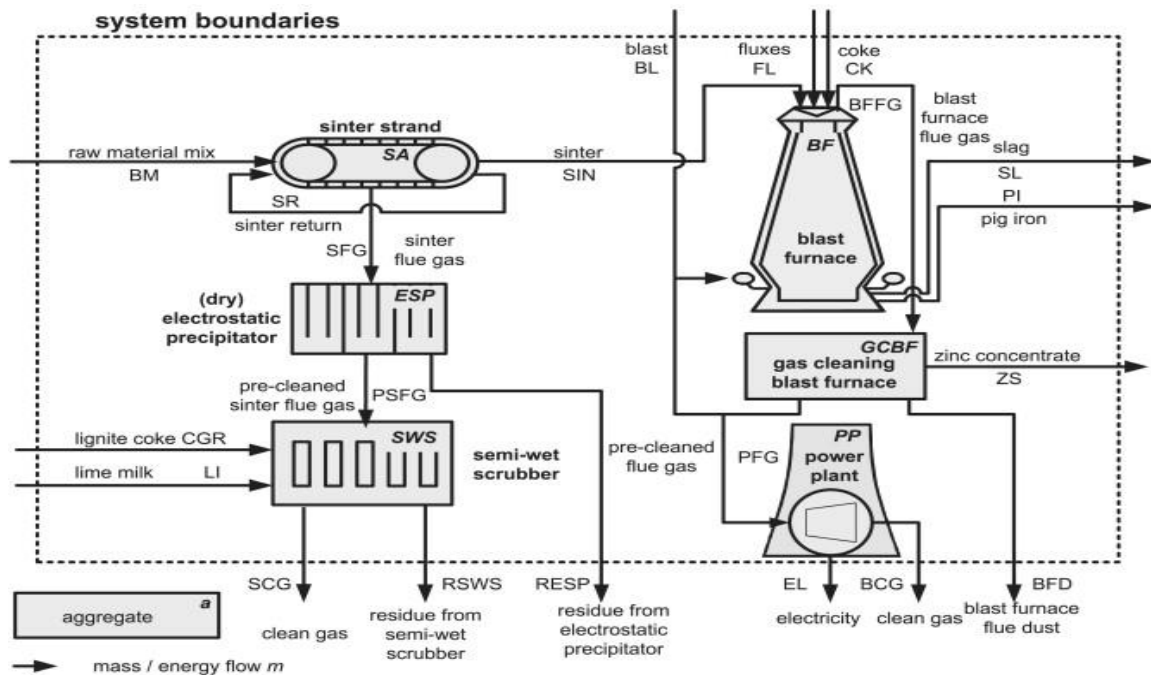
Σχ.4.4. Διάγραμμα ροής μονάδας παραγωγής κοκ (coke oven plant) [13]



Σχ.4.5. Διάγραμμα ροής μονάδας πελετοποίησης [15]



Σχ.4.6. Διάγραμμα ροής μεθόδου DESTINY



Σχ. 4.7. Διάγραμμα ροής μεθόδου DK

4.3. Κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων [37,40,41]

Για τον προσδιορισμό και την κατηγοριοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας διαδικασίας (εν προκειμένω της παραγωγής ενός τόνου pig iron) χρησιμοποιούμε ορισμένους δείκτες επιπτώσεων, όπως προκύπτουν από διάφορες μεθόδους. Υπάρχουν ευρωπαϊκές μέθοδοι όπως η CML-IA, παγκόσμιες όπως η ReCiPe, μέθοδοι οι οποίες εξετάζουν σε βάθος το αποτύπωμα στον υδάτινο ορίζοντα όπως η AWARE κ.α. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η νέα έκδοση της ReCiPe.

Η ReCiPe 2016 αποτελεί μια παγκόσμια μέθοδο εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αναπτύχθηκε από το Ολλανδικό Εθνικό Ινστιτούτο για τη Δημόσια Υγεία και το Περιβάλλον (RIVM), από το Πανεπιστήμιο Ράντμπουντ του Ναϊμέγκεν, το Νορβηγικό Πανεπιστήμιο Υγείας και Τεχνολογίας και την PReSustainabilityBV. Είναι η ανανεωμένη και εκτεταμένη έκδοση της ReCiPe2008, η οποία ήταν ο διάδοχος των μεθόδων Eco-indicator99 και CML-IA. Η πρώτη μέθοδος είναι προσανατολισμένη στον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε επίπεδο “midpoint” ενώ η δεύτερη σε επίπεδο “endpoint”. Για τη ReCiPe αυτό πρακτικά σημαίνει πως έχει αναπτυχθεί κατάλληλη μεθοδολογία η οποία επιτρέπει την μετάβαση από κατηγορίες του πρώτου επιπέδου στις κατηγορίες του δεύτερου.

Για το επίπεδο “midpoint” η ReCiPe2016 περιλαμβάνει δεκαοχτώ κατηγορίες επίπτωσης, ενώ για το επίπεδο “endpoint” τρεις. Γενικά ο χαρακτηρισμός σε επίπεδο “midpoint” παρέχει σχετικά μικρή αβεβαιότητα και μεγαλύτερη συνάφεια με τις περιβαλλοντικές ροές. Αντίθετα ο χαρακτηρισμός σε επίπεδο “endpoint” παρουσιάζει μεγαλύτερη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα, ωστόσο οι κατηγορίες επίπτωσης του είναι πιο εύκολα κατανοητές και ερμηνεύσιμες, δίνοντας άμεση εικόνα για την βλάβη την οποία προκαλεί η παραγωγή ενός προϊόντος ανά λειτουργική μονάδα. Αυτός είναι και ο λόγος που οι συντελεστές στάθμισης για την μεταφορά από επίπεδο “midpoint” σε επίπεδο “endpoint” ονομάζονται συντελεστές βλάβης (damage factors). [49]

Οι περιβαλλοντικοί δείκτες επιπτώσεων σε επίπεδο midpoint είναι

- Παγκόσμια υπερθέρμανση-Κλιματική αλλαγή (Climate change)
- Εδαφική οξίνιση (Terrestrial Acidification)
- Ευτροφισμός του γλυκού νερού (Freshwater Eutrophication)
- Θαλάσσιος ευτροφισμός (Marine Eutrophication)
- Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity)
- Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical oxidant creation)
- Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity)
- Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Freshwater ecotoxicity)

- Θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine ecotoxicity)
- Εξάντληση όζοντος (Ozone depletion)
- Σχηματισμός σωματιδίων (Particulate matter formation)
- Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionizing radiation)
- Χρήση αγροτικής γης (Agricultural land occupation)
- Χρήση αστικής γης (Urban land occupation)
- Μεταμόρφωση φυσικού περιβάλλοντος (Natural land transformation)
- Εξάντληση υδάτινων πόρων (Water depletion)
- Εξάντληση μεταλλευμάτων (Metal depletion)
- Εξάντληση ορυκτών πόρων (Fossil depletion)

Παγκόσμια υπερθέρμανση-Κλιματική αλλαγή(Climate change). Η κλιματική αλλαγή μπορεί να ερμηνευτεί ως η μεταβολή στην παγκόσμια θερμοκρασία, η οποία προκαλείται από την επίδραση των αερίων του θερμοκηπίου, που προκαλούνται και απελευθερώνονται λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας. Η αύξηση των εκπομπών αυτών φαίνεται να έχει άμεση επίδραση στο κλίμα και να επηρεάζει δυσμενώς την υγεία των οικοσυστημάτων, την υγεία των ανθρώπων και την υλική ευημερία γενικότερα. Ο δείκτης της κλιματικής αλλαγής ορίζεται ως η πιθανότητα παγκόσμιας υπερθέρμανσης, για χρονικό ορίζοντα 100 ετών και εκφράζεται σε παραγόμενα kg ισοδύναμου CO₂.

Εδαφική Οξίνιση (Terrestrial Acidification). Αυτή η κατηγορία σχετίζεται με τις ουσίες που προκαλούν επιπτώσεις οξίνισης στο έδαφος. Οι κυριότερες ουσίες οξίνισης είναι: SO₂, NH₃, HCl και ευρύτερα SO_x και NO_x. Για τις αέριες εκπομπές, η πιθανότητα οξίνισης ορίζεται βάσει των ιόντων H⁺ που παράγονται ανά kg ουσίας, σε σχέση με τις παραγόμενες ποσότητες SO₂. Η μονάδα αναφοράς της πιθανότητας οξίνισης ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου SO₂.

Ευτροφισμός του γλυκού νερού (Freshwater Eutrophication). Αυτή η κατηγορία σχετίζεται με τις επιπτώσεις που οφείλονται σε υψηλά επίπεδα θρεπτικών ουσιών στο περιβάλλον, τα οποία προκαλούνται από τις εκπομπές θρεπτικών ουσιών στον αέρα, το νερό και το έδαφος. Ο ευτροφισμός οδηγεί σε μη-φυσιολογική ανάπτυξη της άλγης στα ποτάμια και τα «κλειστά» οικοσυστήματα, με αποτέλεσμα τη μείωση της ποιότητας του νερού και των πληθυσμών της πανίδας. Οι κύριες πηγές ευτροφισμού είναι οι υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου (N) και φωσφόρου (P) και η μονάδα αναφοράς ισούται με kg ισοδύναμου φώσφορου (P). Για τον θαλάσσιο ευτροφισμό αντίστοιχα (**marine Eutrophication**) η μονάδα αναφοράς είναι το kg ισοδύναμου αζώτου (N).

Ανθρώπινη τοξικότητα (Human toxicity). Η ανθρώπινη τοξικότητα αποτυπώνει τις πιθανές βλάβες από την απελευθέρωση χημικών ουσιών στο περιβάλλον και σχετίζεται τόσο με την τοξικότητα της χημικής ένωσης, όσο και με τη ληφθείσα δόση από τον άνθρωπο. Η έκθεση στις συγκεκριμένες ουσίες είναι εν δυνάμει επικίνδυνη για τον άνθρωπο και πραγματοποιείται μέσω της αναπνοής, της κατάποσης ή της επαφής, σε βάθος χρόνου. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου 1,4-DB (διχλωροβενζολίου).

Φωτοχημική οξείδωση (Photochemical oxidant formation). Η παρουσία του όζοντος της ατμόσφαιρας λειτουργεί προστατευτικά στη στρατόσφαιρα, αλλά γίνεται τοξικό για τους ανθρώπους στο επίπεδο του εδάφους και σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Το φωτοχημικό όζον δημιουργείται από την αντίδραση πτητικών οργανικών χημικών ενώσεων και οξειδίων του αζώτου, παρουσία θερμότητας και ηλιακού φωτός. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg NMVOC (Non-methane volatile organic compounds).

Εδαφική οικοτοξικότητα (Terrestrial ecotoxicity). Οι εκπομπές ουσιών, όπως τα βαρέα μέταλλα, δύνανται να έχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η εδαφική οικοτοξικότητα σχετίζεται με τις επιπτώσεις στα χερσαία οικοσυστήματα. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου 1,4-DB (διχλωροβενζολίου).

Οικοτοξικότητα του γλυκού νερού (Fresh water ecotoxicity). Η οικοτοξικότητα του γλυκού νερού σχετίζεται με τις επιπτώσεις στα οικοσυστήματα γλυκού νερού, ως αποτέλεσμα της παρουσίας τοξικών ουσιών στον αέρα, το νερό, και το έδαφος, για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου 1,4-DB (διχλωροβενζολίου).

Θαλάσσια οικοτοξικότητα (Marine ecotoxicity). Η θαλάσσια οικοτοξικότητα σχετίζεται με τις επιπτώσεις στα θαλάσσια οικοσυστήματα. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου 1,4-DB(διχλωροβενζολίου).

Εξάντληση όζοντος (Ozone depletion). Τα αέρια που καταστρέφουν το όζον προκαλούν βλάβη στο στρατοσφαιρικό όζον ή στο "στρώμα του όζοντος". Υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα σχετικά με τις συνδυασμένες επιδράσεις διαφορετικών αερίων στη στρατόσφαιρα και όλες οι χλωριωμένες και βρωμιωμένες ενώσεις που είναι αρκετά

σταθερές ώστε να φτάσουν στη στρατόσφαιρα μπορούν να έχουν αποτέλεσμα. Τα CFC (φθοροχλωράνθρακες) και τα Halons (CBrF₃) είναι οι κύριες αιτίες εξάντλησης του όζοντος. Η ζημιά στο στρώμα του όζοντος μειώνει την ικανότητά της να εμποδίζει την υπεριώδη ακτινοβολία (UV) να εισέρχεται στην ατμόσφαιρα της γης, αυξάνοντας την ποσότητα καρκινογόνου φωτός UVB που χτυπά την επιφάνεια της γης. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg CFC .

Σχηματισμός σωματιδίων (Particulate matter formation). Η πορεία αιτίας και αποτελέσματος του σχηματισμού σωματιδίων ξεκινά με εκπομπή NO_x, NH₃, SO₂ στην ατμόσφαιρα,. Τα στοιχεία αυτά μετασχηματίζονται στον αέρα σε δευτερεύοντα αερολύματα. Συνεπώς, τα PM σωματίδια μπορούν να εισπνευστούν από τον ανθρώπινο πληθυσμό, οδηγώντας σε αυξημένο αριθμό περιπτώσεων θνησιμότητας και μεγάλων βλαβών στην ανθρώπινη υγεία (προβλήματα στους πνεύμονες, καρκίνοι και άλλα). Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμων PM₁₀ .

Ιονίζουσα ακτινοβολία (Ionizing radiation). Η ιονίζουσα ακτινοβολία είναι ακτινοβολία υψηλής ενέργειας που μπορεί να προκαλέσει ιονισμό, να φορτίσει δηλαδή την ύλη διώχνοντας ηλεκτρόνια από τα άτομα δημιουργώντας ιόντα, καθώς και να σπάσει τους δεσμούς των χημικών ενώσεων. Θεωρείται επικίνδυνη για τους ζωντανούς οργανισμούς καθώς μπορεί να προκαλέσει καρκίνο με την αλλοίωση των μορίων DNA. Η πιο διεισδυτική ιονίζουσα ακτινοβολία είναι η ηλεκτρομαγνητική και η ακτινοβολία νετρονίων, τα οποία έχουν ουδέτερο φορτίο και δεν αντιδρούν ηλεκτρικά με τα άτομα της ύλης. Η μονάδα αναφοράς ισούται με παραγόμενα kg ισοδύναμου ουρανίου U 235 .

Χρήση αγροτικής γης (Agricultural land occupation). Η μονάδα αναφοράς ισούται με ένα τετραγωνικό μέτρο (m²).

Χρήση αστικής γης (Urban land occupation). Η μονάδα αναφοράς ισούται με ένα τετραγωνικό μέτρο (m²).

Μεταμόρφωση φυσικού περιβάλλοντος (Natural land transformation). Η μονάδα αναφοράς ισούται με ένα τετραγωνικό μέτρο (m²).

Εξάντληση υδάτινων πόρων (Water depletion). Η μονάδα αναφοράς ισούται με ένα κυβικό μέτρο (m^3).

Εξάντληση μεταλλευμάτων (Metal depletion). Η μονάδα αναφοράς ισούται με kg ισοδύναμου σιδήρου (Fe).

Εξάντληση ορυκτών πόρων (Fossil depletion). Η μονάδα αναφοράς ισούται με kg ισοδύναμου πετρελαίου (oil).

Σε επίπεδο endpoint οι κατηγορίες επιπτώσεων είναι οι εξής 3.

Βλάβη στην ανθρώπινη υγεία (Damage to human health). Η βλάβη στην ανθρώπινη υγεία εκφράζεται ως ο αριθμός των χρόνων ζωής τα οποία χάνονται και τα χρόνια ζωής τα οποία βιώνονται με αναπηρία. Αυτά συνδυάζονται παρέχοντας τα «αναπροσαρμοσμένα λόγω αναπηρίας έτη ζωής» (disability adjusted life years –DALY).

Βλάβη στην ποιότητα των οικοσυστημάτων (Damage to Ecosystem Diversity). Η βλάβη στην ποιότητα των οικοσυστημάτων εκφράζεται ως η απώλεια ειδών σε μια συγκεκριμένη περιοχή για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.3).

Βλάβη στη διαθεσιμότητα των πόρων (Damage to Resource Availability). Εκφράζεται ως το επιπλέον κόστος για παραγωγή/εξόρυξη πόρων σε ένα άπειρο χρονικό πλαίσιο (θεωρώντας σταθερή παραγωγή ανά έτος) με προεξοφλητικό επιτόκιο 3%. Το κόστος εκφράζεται σε USD 2013. [49]

Στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά των αποτελεσμάτων μόνο για την κατηγορία midpoint, όπου υπάρχει μικρότερη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα. Η αναφορά και στις endpoint κατηγορίες επιπτώσεων έγινε για λόγους βιβλιογραφικούς και λόγους πληρότητας.

Κεφάλαιο 5^ο – Αποτελέσματα

Αρχικά πρέπει να καταστεί σαφές το πώς έγινε η συλλογή και καταγραφή δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό Sima Pro. Αρχικά, στο περιβάλλον του Sima Pro υπάρχει βιβλιοθήκη με δεδομένα εισροών - εκροών του συστήματος, τα οποία όμως βασίζονται σε παλαιότερα δεδομένα και ίσως να μην είναι πλήρως αξιόπιστα. Για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκε ένα νέο σύνολο εισροών - εκροών με βάση πιο πρόσφατη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των καυσίμων (fuels) που χρειάστηκαν (άνθρακας, φυσικό αέριο...), την ποσότητα νερού που χρειάζεται για τις διεργασίες καθώς και την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία της μονάδας, η καταγραφή έγινε με την βοήθεια του άρθρου της Ευρωπαϊκής επιτροπής σε θέματα περιβάλλοντος (JRC REFERENCE REPORT- Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production).

Συγκεκριμένα όσον αφορά τα δεδομένα για τον ηλεκτρισμό έγινε κατάλληλη προσαρμογή στο λογισμικό, ώστε να ληφθεί υπόψη το αντίστοιχο ελληνικό μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας. Θα μελετηθούν 3 διαφορετικά σενάρια για κάθε μέθοδο παραγωγής pig iron.

- Με βάση το ελληνικό ενεργειακό μίγμα της βιβλιοθήκης ecoinvent v.2.2
- Με βάση το τρέχον ελληνικό ενεργειακό μίγμα (2020)
- Με βάση το ελληνικό ενεργειακό μίγμα που έχει προβλεφθεί και υπάρχει σαν στόχος για το μέλλον (2050)

Σκοπός της μελέτης των σεναρίων αυτών είναι η ανάδειξη της σημασίας μια πιο 'καθαρής' ενέργειας (κυρίως μέσω ΑΠΕ) στο περιβαλλοντικό αντίκτυπο και ειδικότερα σε κάποιους δείκτες επίπτωσης όπως η κλιματική αλλαγή (Climate change) και η εξάντληση φυσικών πόρων (Fossil depletion). Στην περίπτωση της συμβατικής παραγωγής pig iron μέσω της υψικαμίνου ή της DK process δεν προβλέπονται μεγάλες διαφοροποιήσεις, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια συνεισφέρει περίπου ένα 6-7% στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (ανάλογα και την κατηγορία επίπτωσης). Στη περίπτωση όμως της μεθόδου DESTINY μέσω μικροκυμάτων η ηλεκτρική ενέργεια καταλαμβάνει ένα πολύ σημαντικό ποσοστό της όλης διαδικασίας. Συνεπώς, αφού ένα μίγμα ενέργειας γίνεται όλο και πιο ανεξάρτητο από άνθρακα θα υπάρχει ένα οριακό σημείο καμπής τέτοιο ώστε η μέθοδος DESTINY να έχει μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα από συμβατικές μεθόδους.

Τέλος, όσον αφορά τα κομμάτια των μεταφορών (Transport) και κατασκευής των μονάδων-εργοστασίων (Infrastructure) , τα δεδομένα που υπήρχαν ήδη στην βιβλιοθήκη του Sima Pro (Ecoinvent) θεωρήθηκαν αρκετά αντιπροσωπευτικά και δεν έγινε κάποια

τροποποίηση πέρα από την προσαρμογή στο ότι η λειτουργική μονάδα δεν είναι το 1 kg pig iron, αλλά 1 τόνος (t). Άλλωστε από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, φαίνεται ότι η συνεισφορά των παραμέτρων αυτών στο συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο είναι αρκετά μικρή (περίπου 3-4 %), συνεπώς τροποποιήσεις στις παραμέτρους αυτές δεν επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στο συνολικό αποτέλεσμα.

Inputs	Cases original	Up date study	to Destiny concept	DK process
Fuels	Ecoinvent v.2.2	B.A.T	DESTINY PROJECT	DK
Electricity	Ecoinvent v.2.2	B.A.T/ Own data	DESTINY PROJECT	DK
Water	Ecoinvent v.2.2	B.A.T	Own estimation according to ecoinvent data	Own estimation according to ecoinvent data
Infrastructure	Ecoinvent v.2.2	Ecoinvent v.2.2	Own estimation according to ecoinvent data	Own estimation according to ecoinvent data
Transport	Ecoinvent v.2.2	Ecoinvent v.2.2	Own estimation according to ecoinvent data	Own estimation according to ecoinvent data

Πίν. 5. 1. Πηγές πληροφοριών για τα δεδομένα

5.1. Ισοζύγια μάζας-ενέργειας

Στο 4^ο κεφάλαιο έγινε η σχηματική παρουσίαση των συστημάτων παραγωγής pig iron ώστε να υπάρχει μια εποπτεία των ροών μάζας και ενέργειας. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αριθμητικά τα ισοζύγια μάζας ενέργειας όπως αυτά προέκυψαν από την βιβλιογραφία και τις βιβλιοθήκες του λογισμικού Sima Pro.

Για την περίπτωση της συμβατικής παραγωγής pig iron, στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι εισροές και εκροές μάζας και ενέργειας στο σύστημα. Η παρουσίαση γίνεται για κάθε μονάδα ξεχωριστά (coke oven plant, sinter plant, pelletisation plant,

blast furnace) για πλήρη εποπτεία. Να σημειωθεί ότι κάποιες επανακυκλοφορίες εντός του συστήματος προς μελέτη έχουν παραλειφθεί, καθώς δεν προσφέρουν κάτι στο συνολικό ισοζύγιο.

Sinter plant

Products	Amount	Unit
Sinter, iron	1	ton
Resources		
Water, unspecified natural origin/m3	0,15	m3
Materials/fuels		
Aluminium oxide	2,5E-08	p
Electricity, medium voltage	80	MJ
Hard coal coke, at plant	1276,6	MJ
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation	1063,8	kg
Natural gas, high pressure, at consumer	67	MJ
Quicklime, in pieces, loose, at plant	5	kg
Transport, barge	31,5	tkm
Transport, freight, rail	308,75	tkm
Transport, lorry >16t, fleet average	2	tkm
Transport, transoceanic freight ship	2835	tkm
Limestone, at mine	140	kg
Emissions to air		
Cadmium	138,45	mg
Carbon dioxide, Fossil	264766,5	g
Carbon monoxide, Fossil	22891,5	g
Chromium	64,35	mg
Copper	301,2	mg
Heat, waste	1538,6	MJ
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	7E-08	kg
Hydrogen chloride	424,5	g
Hydrogen fluoride	4,3	g
Lead	2843,65	mg

Manganese	271,4	mg
Nickel	88,45	mg
Nitrogen oxides	666,65	g
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	295,95	mg
Particulates, < 2.5 mm	0,20635	kg
Polychlorinated biphenyls	101,25	ng
Sulfur dioxide	596,6	g
Titanium	43,55	mg
Vanadium	79,95	mg
Zinc	966,7	mg
Methane	224	g
NMVOOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	131,2	g

Πίν. 5.2. Εισροές – εκροές μονάδας πυροσυσσωμάτωσης [22]

Coke oven plant

Materials/fuels	Amount	Unit
Hard coal coke production plant	5,9E-13	p
Hard coal mix, at regional storage	1285	kg
Water, decarbonised, at plant	1620	kg
Transport, freight, rail	69,7	tkm
Electricity, medium voltage	100	MJ
Steam, for chemical processes, at plant	85	kg
Nitrogen, liquid, at plant	0,0046	kg
Products		
Hard coal coke	1	ton
Emissions to air		
Heat, waste	6,1064	MJ
Ammonia	12,6	g
Benzene	40	g
Carbon dioxide, Fossil	510	kg
Carbon monoxide, Fossil	2330	g
Cyanide	0,96	g

Methane, Fossil	40,5	g
Nitrogen oxides	1059,5	g
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	603	mg
Particulates, > 2.5 mm, and < 10mm	156,85	g
Sulfur dioxide	490	g
TOC, Total Organic Carbon	18	g
Hydrogen sulfide	56	g
Tar	37	kg
Emissions to water		
Ammonium	0,000631	kg
Chloride	0,049268	kg
Hydrogen sulfide	0,000101	kg
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	7,6E-05	kg
Sodium	0,003168	kg
Solids, inorganic	0,027861	kg

Πίν. 5.3. Εισροές – εκροές μονάδας παραγωγής κοκ [19,20]

Pelletisation plant

Products	Amount	Unit
Pellets, iron, at plant	1	ton
Resources		
Water, unspecified natural origin/m3	0,68	m3
Materials/fuels		
Aluminum oxide, plant	2,5E-11	p
Bentonite, at processing	5,45	kg
Electricity, medium voltage	76,5	MJ
Hard coal mix, at regional storage	7,53378	kg
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation	990	kg
Natural gas, burned in industrial furnace	14	MJ
Transport, freight, rail	24,091	tkm
Transport, lorry >28t, fleet average	4,0091	tkm
Limestone, at mine	2,5	kg

Emissions to air		
Cadmium	1,11	mg
Carbon dioxide, Fossil	105	kg
Carbon monoxide, Fossil	210	g
Copper	4	mg
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	5,7E-09	kg
Heat, waste	0,53077	MJ
Hydrogen chloride	112	g
Hydrogen fluoride	3,8	g
Lead	43,2	mg
Manganese	34,7	mg
Nickel	9,6	mg
Nitrogen oxides	350	g
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	0,9	mg
Particulates, < 2.5 um	60	g
Sulfur dioxide	3,8	g
Vanadium	14,25	mg
Zinc	651,5	mg
VOC, volatile organic compounds	22,5	g

Πίν. 5.4. Εισροές – εκροές μονάδας πελετοποίησης [21]

Blast furnace

Products	Amount	Unit
Pig iron, at plant	1	ton
Resources		
Water, unspecified natural origin/m3	3,5	m3
Materials/fuels		
Blast furnace Infrastructure	1,33E-	p

	11	
Hard coal coke, at plant/	359	kg
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation	180	kg
Limestone, at mine	25,7	kg
Natural gas, high pressure	114,4	MJ
Pellets, iron, at plant	358	kg
Refractory, fireclay, packed, at plant	20	kg
Hard coal mix, at regional storage	162	kg
Sinter, iron, at plant	1088	kg
Light fuel oil, at regional storage	30,1	kg
Transport, barge	16,5	tkm
Transport, freight, rail	251,65	tkm
Transport, lorry >16t, fleet average	10,04	tkm
Transport, transoceanic freight ship	1485	tkm
Oxygen, liquid, at plant	54,4	kg
Electricity, medium voltage	268	MJ
Emissions to air		
Carbon dioxide, Fossil	650	kg
Carbon monoxide, Fossil	2,448	kg
Heat, waste	142,84	MJ
Lead	13,26	mg
Manganese	49	mg
Nickel	17	mg
Nitrogen oxides	91,58	g
Particulates, > 10 um	13,06	g
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	3	g
Sulfur dioxide	80	g
Iron dust	23	kg
Hydrocarbons, aromatic	230	g
Cyanide compounds	0,9	g
Hydrogen fluoride	0,08	g
Chlorine	1	kg
TOC, Total Organic Carbon	17,83	g
Benzo(a)pyrene	0,25	g
Fluoranthene	0,51	g
Zinc	80,62	mg
Copper	14	mg

Πίν. 5.5. Εισροές – εκροές υψικαμίνου [24]

Οι ροές μάζας ενέργειας για την μέθοδο DK είναι οι εξής

Products	Amount	Unit
Outputs /Products		
Pig iron	1	ton
Avoided products		
ZnO	0,179	ton
Materials/Fuels		
BOF granulates	1,11	ton
Coke	0,6	ton
Natural gas	72	kWh
Electricity	30	kWh
Transport freight, rail	45	tkm
Infrastructure	2,61E-11	p
Emissions to air		
CO ₂	1,56	ton

Πίν. 5.6. Εισροές – εκροές μεθόδου DK

Για την μέθοδο μικροκυμάτων DESTINY

Products	Amount	Unit
Outputs/ Products		
Pig iron	1	ton
Avoided products		
ZnO	0,179	ton
Materials/Fuels		
BOF granulates	1,11	ton

Coke	0,414	ton
Transport freight, rail	30	tkm
Electricity	690	kWh
SiO ₂	0,075	ton
Infrastructure	2,1E-11	p
Emissions to air		
CO ₂	1,07	ton

Πίν. 5.7. Εισροές – εκροές μεθόδου DESTINY [40]

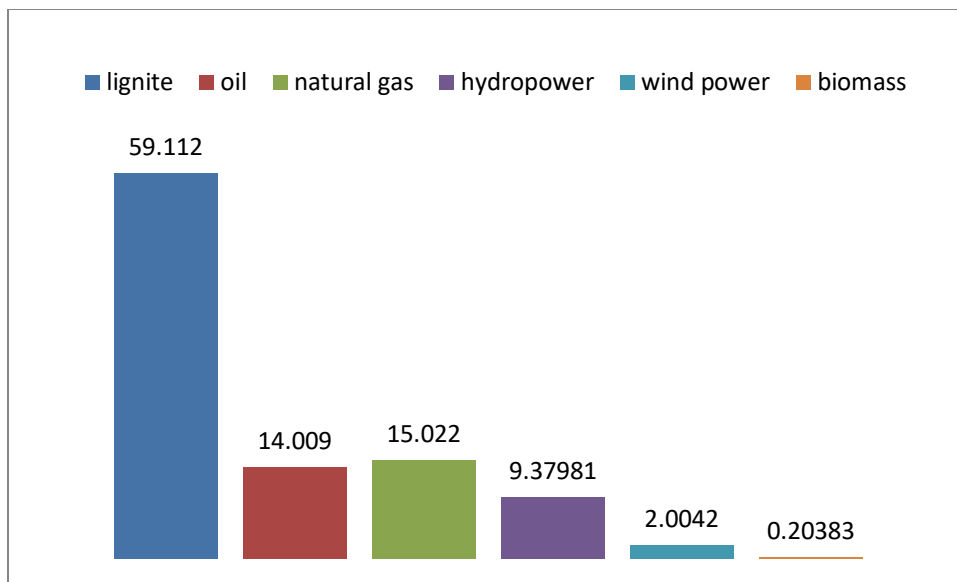
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι για τις μεθόδους DESTINY και DK τα δεδομένα που αντλήσαμε δεν ήταν πλήρη. Για παράδειγμα για τις εκπομπές στην ατμόσφαιρα δεν είχαμε πληροφορίες για NO_x, SO_x, PM και άλλους ρυπαντικούς παράγοντες. Για αυτό, για τις συγκεκριμένες μεθόδους, θα δοθεί έμφαση σε κατηγορίες επίπτωσης όπως κλιματική αλλαγή (έχοντας δεδομένα για CO₂) και εξάντληση πόρων, καθώς οι υπόλοιπες κατηγορίες ίσως να μην δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα.

5.2. Δείκτες AKZ/ συγκριτική αξιολόγηση

Στην ενότητα αυτήν θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το Sima Pro τόσο σε μορφή πινάκων για την ποσοτικοποίηση των κατηγοριών επιπτώσεων, όσο και σε μορφή διαγραμμάτων δείχνοντας την επίπτωση που έχει κάθε διεργασία στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η πιο σημαντική επίπτωση που θα δοθεί μεγαλύτερη σημασία είναι η κλιματική αλλαγή. Προκειμένου να ελεγχθούν διαφορετικές περιπτώσεις και σενάρια, έχει γίνει μια κατηγοριοποίηση.

Η κατηγοριοποίηση αυτή σχετίζεται με τις διαφορετικές περιπτώσεις μίγματος ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για κάθε διεργασία. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου 5, για κάθε περίπτωση παραγωγής pig iron θα μελετηθούν τρία διαφορετικά σενάρια παραγωγής ανάλογα με το μίγμα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται. [50]

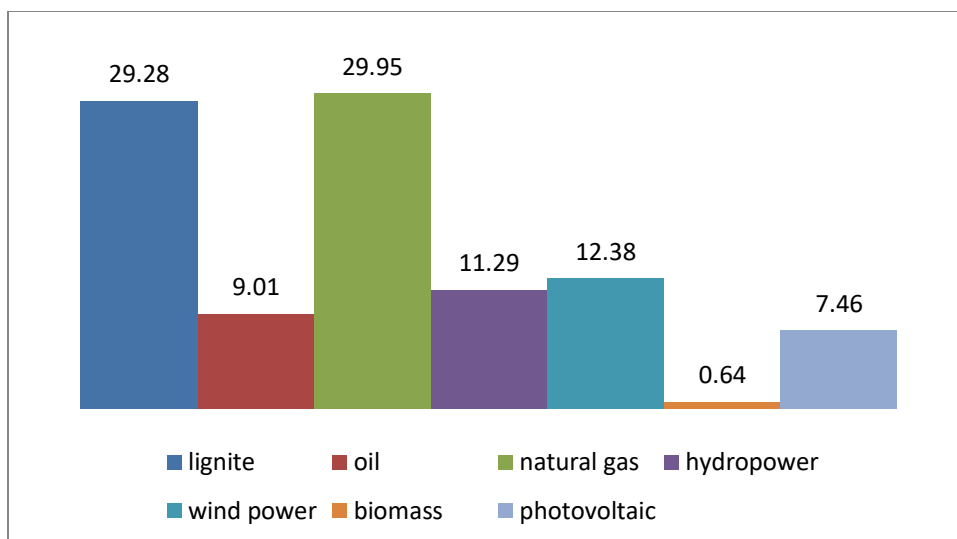
- Με βάση το ελληνικό ενεργειακό μίγμα της βιβλιοθήκης ecoinvent v.2.2 (Σχ.5.1)



Σχ. 5.1. Ποσοστιαία κατανομή ηλεκτρικού μίγματος βιβλιοθήκης Sima Pro

Το συγκεκριμένο μίγμα συνεισφέρει στην κλιματική αλλαγή εκπέμποντας 1,02 kg CO₂ / kWh.

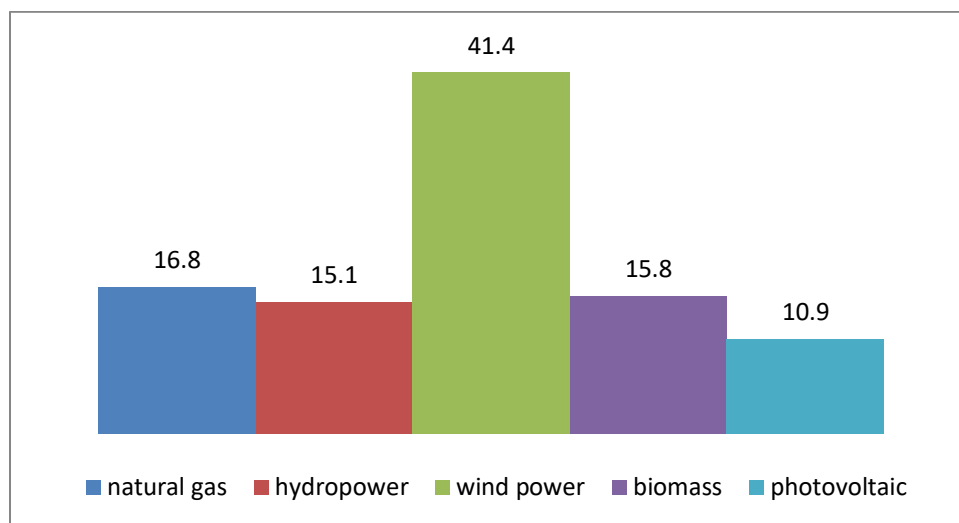
- Με βάση το τρέχον ελληνικό ενεργειακό μίγμα (2020) (Σχ 5.2)



Σχ. 5.2. Ποσοστιαία κατανομή ηλεκτρικού μίγματος το 2020

Το συγκεκριμένο μίγμα συνεισφέρει στην κλιματική αλλαγή εκπέμποντας 0,665 kg CO₂ / kWh.

- Με βάση το ελληνικό ενεργειακό μίγμα που έχει προβλεφθεί και υπάρχει σαν στόχος για το μέλλον (2050) (Σχ.5.3)



Σχ. 5.3. Ποσοστιαία κατανομή ηλεκτρικού μίγματος 2050 [50]

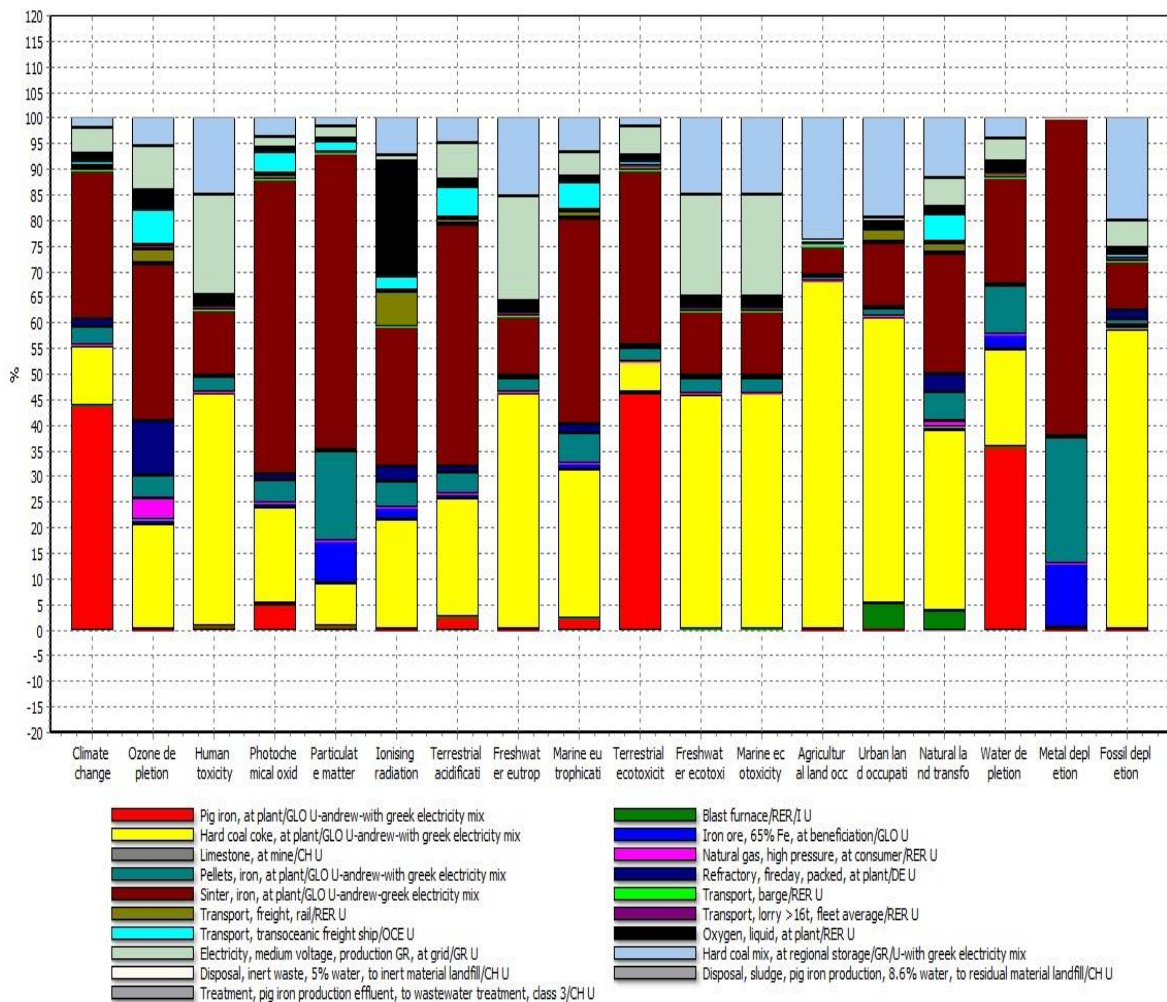
Το συγκεκριμένο μίγμα συνεισφέρει στην κλιματική αλλαγή εκπέμποντας 0,165 kg CO₂ / kWh.

5.2.1. Σενάριο ενεργειακού μίγματος από την βιβλιοθήκη του Sima Pro

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα για κάθε κατηγορία επίπτωσης από τις 18. (Πίν. 5.8 , Σχ. 5.4)

Impact category	Unit	Total
Climate change	kg CO2 eq	1483,6
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	2,7E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	28041,92
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	5,983376
Particulate matter formation	kg PM10 eq	5,391057
Ionising radiation	kg U235 eq	77,6023
Terrestrial Acidification	kg SO2 eq	5,94506
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,035383
Marine eutrophication	kg N eq	1,595355
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,984729
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	14,9265
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	23301,28
Agricultural land occupation	m2a	42,90279
Urban land occupation	m2a	12,34745
Natural land transformation	m2	0,146819
Water depletion	m3	9,776237
Metal depletion	kg Fe eq	1097,459
Fossil depletion	kg oil eq	542,9452

Πίν. 5.8. Αποτελέσματα κατηγοριών επίπτωσης συμβατικής μεθόδου



Σχ. 5.4. Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε διαδικασίας στις κατηγορίες επίπτωσης συμβατικής μεθόδου

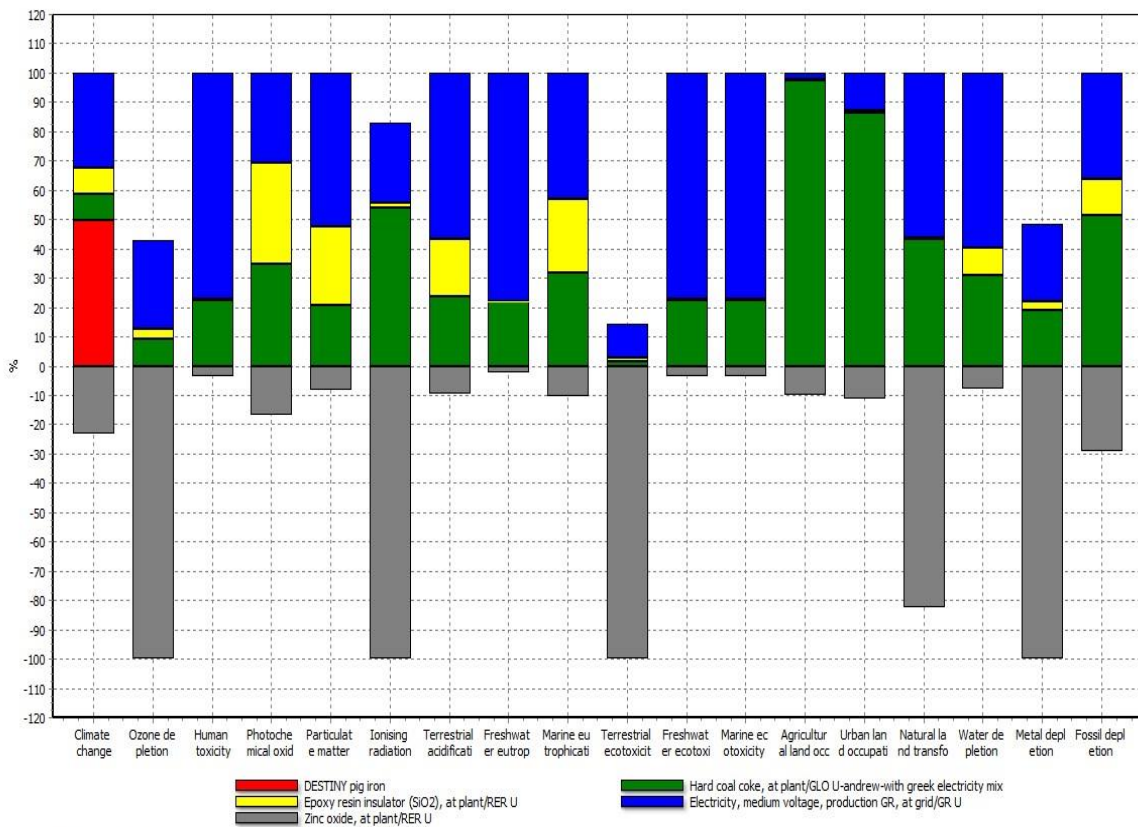
Αυτό που παρατηρείται από τον πίνακα αλλά και το διάγραμμα είναι ότι για την παραγωγή ενός τόνου pig iron ένα ποσοστό περίπου 90% της επίπτωσης στην κλιματική αλλαγή οφείλεται στις διαδικασίες της υψικαμίνου, πυροσυσσωμάτωσης, πελετοποίησης και παραγωγής κοκ, γεγονός το οποίο ήταν σχετικά προφανές. Το υπόλοιπο ποσοστό καταλαμβάνουν διαδικασίες όπως η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται για τις διαδικασίες (περίπου 5%), μεταφορά υλικών (περίπου 2-3%) και σε μικρότερα ποσοστά διαδικασίες όπως η ανακύκλωση υλικών, επεξεργασία υπολειμμάτων. Στην επίπτωση που αφορά την εξάντληση πόρων η παραγωγή κοκ συνεισφέρει περίπου 57% και αμέσως

μετά η μονάδα πυροσυσσωμάτωσης 10%. Παρατηρούμε ότι η παραγωγή κοκ εκτός από την εξάντληση πόρων συνεισφέρει κατά μεγαλύτερο ποσοστό σε κάποιες επιπτώσεις όπως ο ευτροφισμός, η οικοτοξικότητα και η χρήση γης (με ποσοστά που κυμαίνονται από 40 -55%). Ενώ σε επιπτώσεις όπως η οξίνιση και ο σχηματισμός σωματιδίων κατέχει τη μερίδα του λέοντος η παραγωγή πυροσυσσωμάτωματος.

Για την περίπτωση της μεθόδου DESTINY προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα (Πίν. 5.9, Σχ. 5.5)

Impact category	Unit	Total
Climate change	kg CO2 eq	1658,006
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-4E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	63356,58
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	3,11648
Particulate matter formation	kg PM10 eq	2,262075
Ionising radiation	kg U235 eq	-6,10717
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	6,108442
Freshwater eutrophication	kg P eq	2,462701
Marine eutrophication	kg N eq	1,500351
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-3,81039
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	34,19417
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	53022,57
Agricultural land occupation	m2a	31,00538
Urban land occupation	m2a	8,153933
Natural land transformation	m2	0,024383
Water depletion	m3	6,361245
Metal depletion	kg Fe eq	-6,97346
Fossil depletion	kg oil eq	504,6282

Πίν. 5.9. Αποτελέσματα κατηγοριών επίπτωσης μεθόδου DESTINY



Analysing 1 ton DESTINY pig iron;
Method: ReCiPe Midpoint (E) V1.04 / World ReCiPe E / Characterisation

Σχ. 5.5. Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε διαδικασίας στις κατηγορίες επίπτωσης μεθόδου DESTINY

Εδώ παρατηρείται (όπως αναμενόταν άλλωστε) η μεγαλύτερη συνεισφορά που έχει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο τελικό αποτέλεσμα. Ανάλογα και με την κάθε κατηγορία επίπτωσης, η συνεισφορά μπορεί να φτάνει έως και 75% (π.χ. στην οικοτοξικότητα). Στην κλιματική αλλαγή, καταλαμβάνει ένα ποσοστό 35% του συνολικού αντίκτυπου, ενώ η παραγωγή pig iron στην κλίση μικροκυμάτων ένα 50%. Άλλες διαδικασίες όπως η παραγωγή SiO₂ ή η παραγωγή κοκ (απαραίτητος αναγωγικός παράγοντας) επηρεάζουν σε μικρότερα ποσοστά. Βέβαια υπάρχουν κάποιες κατηγορίες όπως η χρήση γης, η εξάντληση πόρων όπου η παραγωγή κοκ παίζει έναν μεγαλύτερο ρόλο (95%, 55% αντίστοιχα). Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δώσουμε και στην παραγωγή

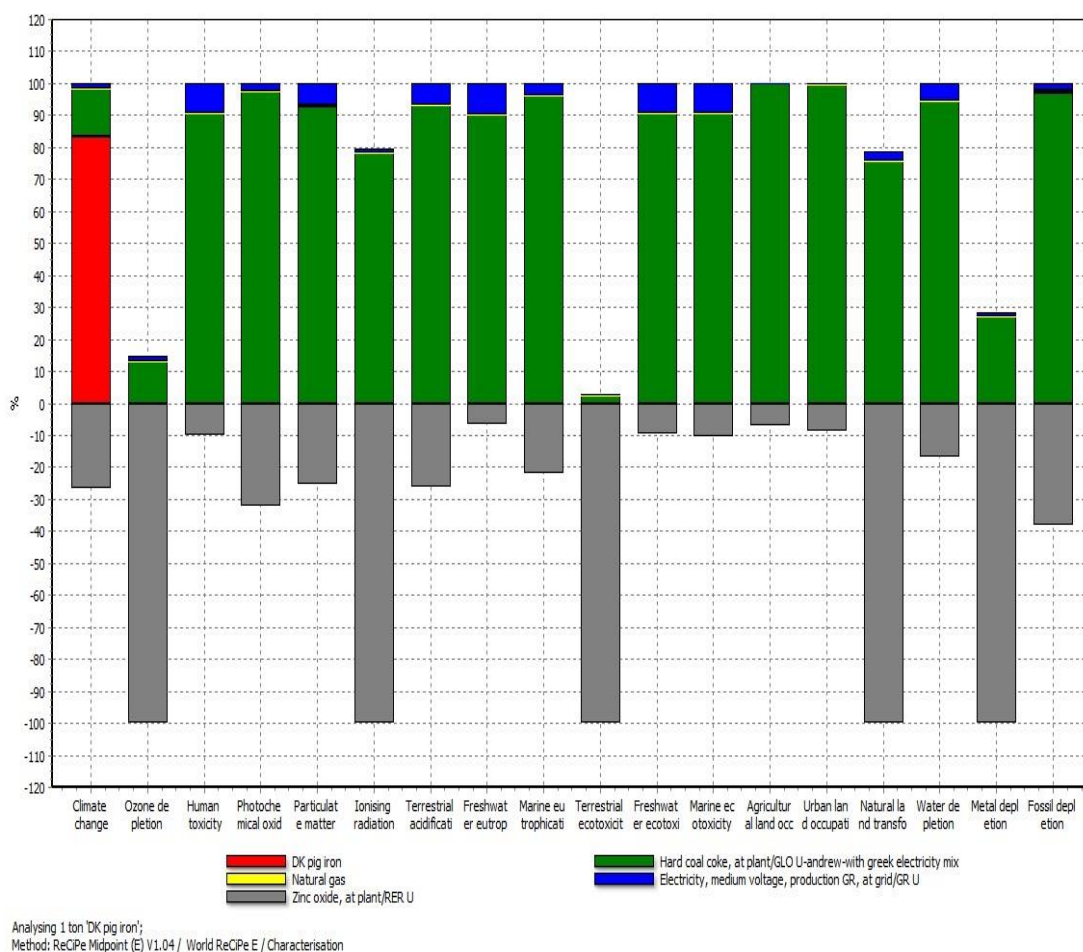
του υποπροϊόντος οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) καθώς δρα θετικά στους δείκτες επίπτωσης ρίχνοντας την ολική επίπτωση. Συγκεκριμένα στην κλιματική αλλαγή αφαιρεί από τον συνολικό αντίκτυπο περίπου 22% επί του συνόλου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πρόκειται για παραπροϊόν (άρα δεν χρειάστηκε κάποια επιπλέον διαδικασία για την παραγωγή του) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλους τομείς της βιομηχανίας (Κεφάλαιο 2) γλιτώνοντας δηλαδή περιττές διαδικασίες.

Για την μέθοδο DK προέκυψαν τα εξής (Πίν. 5.10, Σχ. 5.6)

Impact category	Unit	Total
Climate change	kg CO2 eq	1378,925
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-6E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	21091,46
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	1,313264
Particulate matter formation	kg PM10 eq	0,59618
Ionising radiation	kg U235 eq	-7,32147
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	1,825345
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,825505
Marine eutrophication	kg N eq	0,631988
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-4,33357
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	11,37133
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	17659,17
Agricultural land occupation	m2a	45,27328
Urban land occupation	m2a	10,49064

Natural land transformation	m2	-0,0245
Water depletion	m3	2,713128
Metal depletion	kg Fe eq	-9,69656
Fossil depletion	kg oil eq	340,6244

Πίν. 5.10. Αποτελέσματα κατηγοριών επίπτωσης μεθόδου DK



Σχ. 5.6. Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε διαδικασίας στις κατηγορίες επίπτωσης μεθόδου DK

Για την μέθοδο DK προκύπτει ότι στην κατηγορία της κλιματικής αλλαγής οι εκπομπές που προέρχονται από την διαδικασία αναγωγής στον κλίβανο αποτελούν το 83% του συνολικού αντίκτυπου, ενώ ένα 13% προκύπτει από την παραγωγή κοκ. Παρατηρείται ξανά η μικρή συνεισφορά της παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας στο συνολικό αποτέλεσμα (σε σχέση με την μέθοδο DESTINY). Ακόμα υπάρχει μια ανεπαίσθητη συνεισφορά του φυσικού αερίου (κοντά στο 1%), καθώς είναι η πολύ μικρή η ποσότητα που χρειάζεται για την διαδικασία. Σχετικά με την μέθοδο DESTINY παρατηρούνται μικρότερες εκπομπές CO₂ eq, λόγω της ποιότητας μίγματος της ηλεκτρικής ενέργειας. Πάλι παρατηρείται όπως και στην μέθοδο DK η θετική επίπτωση που έχει η παραγωγή του υποπροϊόντος οξειδίου ψευδαργύρου (ZnO), σε ένα ποσοστό -27% αυτή τη φορά.

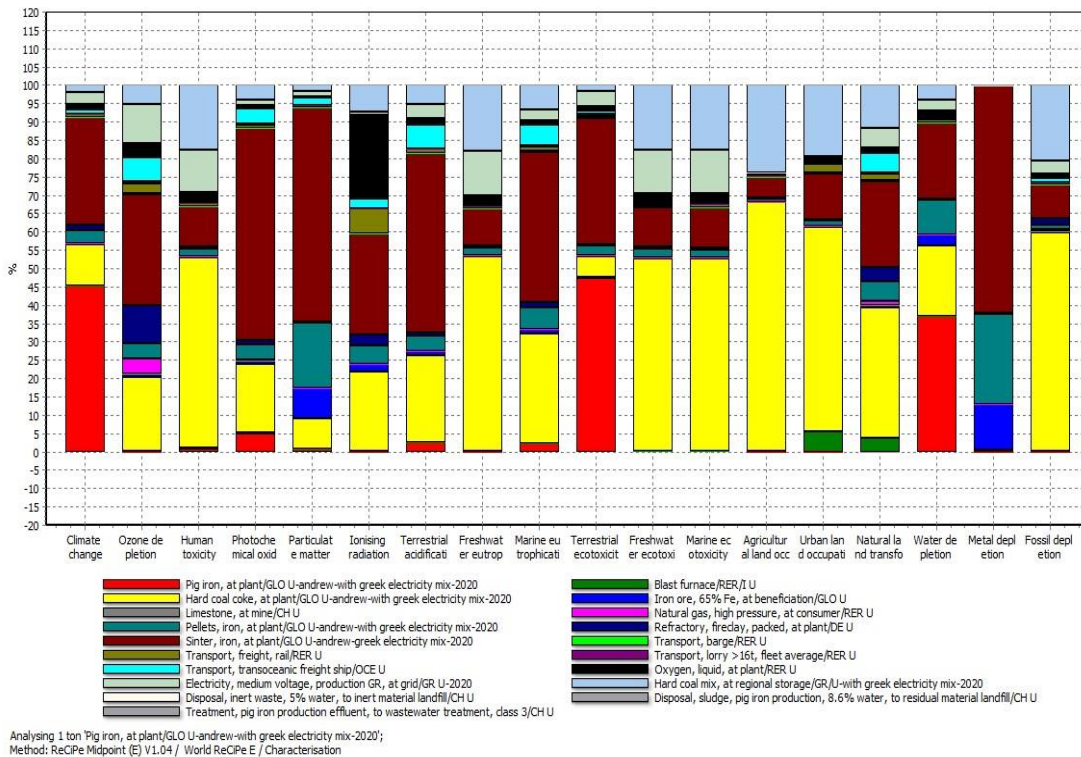
5.2.2. Σενάριο τρέχοντος ενεργειακού μίγματος στην Ελλάδα

Για την συμβατική μέθοδο έχουμε τα εξής (Πίν. 5.11, Σχ. 5.7)

Impact category	Unit	Total
Climate change	kg CO ₂ eq	1440,694
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	2,8E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	23511,28
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	5,946504
Particulate matter formation	kg PM10 eq	5,286494
Ionising radiation	kg U235 eq	76,98872
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	5,641879
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,858569
Marine eutrophication	kg N eq	1,540079
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,959325
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	12,48144
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	19503,61
Agricultural land	m ² a	42,87503

occupation		
Urban land occupation	m2a	12,26977
Natural land transformation	m2	0,145752
Water depletion	m3	9,474464
Metal depletion	kg Fe eq	1097,761
Fossil depletion	kg oil eq	527,9675

Πίν. 5.11. Αποτελέσματα κατηγοριών επίπτωσης συμβατικής μεθόδου



Σχ. 5.7. Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε διαδικασίας στις κατηγορίες επίπτωσης συμβατικής μεθόδου

Παρατηρείται εδώ η επίπτωση που έχει στο συνολικό αποτέλεσμα η αλλαγή του μίγματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στην κλιματική αλλαγή συνολικά φαίνεται να υπάρχει

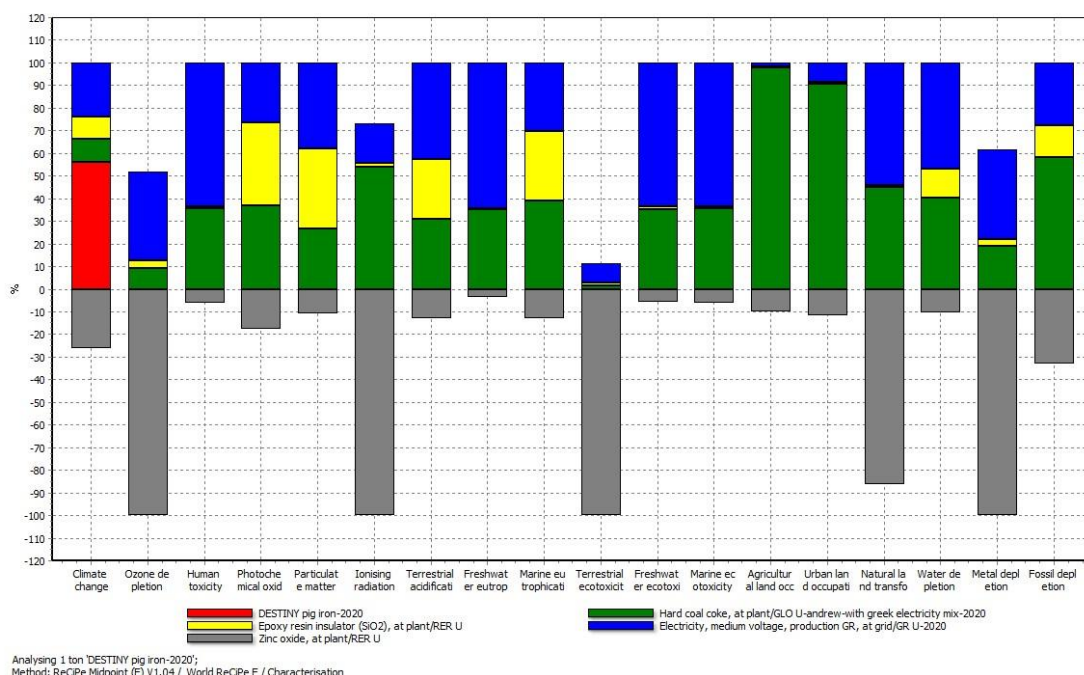
μια μείωση της τάξης του 3% (από 1483 σε 1440 kg CO₂ /t pig iron). Ποσοστό που δεν φαίνεται ψηλό αλλά έχει και αυτό την σημασία του. Άλλωστε δεν θα αναμενόταν κάτι διαφορετικό αφού όπως αναφέρθηκε στην συμβατική μέθοδο η ηλεκτρική ενέργεια δεν καταλαμβάνει μεγάλο ποσοστό. Μια τέτοια μείωση (περίπου 2,7%) παρατηρείται και στην εξάντληση (ορυκτών) πόρων (fossil depletion). Από εκεί και πέρα, το ραβδοδιάγραμμα δεν διαφέρει από το αντίστοιχο του Κεφαλαίου 5.2.1 καθώς το μόνο που ‘πειράχθηκε’ είναι το μίγμα ενέργειας και όχι οι υπόλοιπες ροές υλικών.

Για την μέθοδο DESTINY (Πίν. 5.12, Σχ. 5.8)

Impact category	Unit	Total
Climate change	kg CO2 eq	1410,15
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-3,4E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	37184,05
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	2,903476
Particulate matter formation	kg PM10 eq	1,658039
Ionising radiation	kg U235 eq	-9,65171
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	4,357033
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,441284
Marine eutrophication	kg N eq	1,181032
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-3,95715
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	20,06955
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	31084,21
Agricultural land occupation	m2a	30,84503
Urban land occupation	m2a	7,705185

Natural land transformation	m2	0,018218
Water depletion	m3	4,61797
Metal depletion	kg Fe eq	-5,22922
Fossil depletion	kg oil eq	418,1052

Πίν. 5.12. Αποτελέσματα κατηγοριών επίπτωσης μεθόδου DESTINY



Σχ. 5.8. Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε διαδικασίας στις κατηγορίες επίπτωσης μεθόδου DESTINY

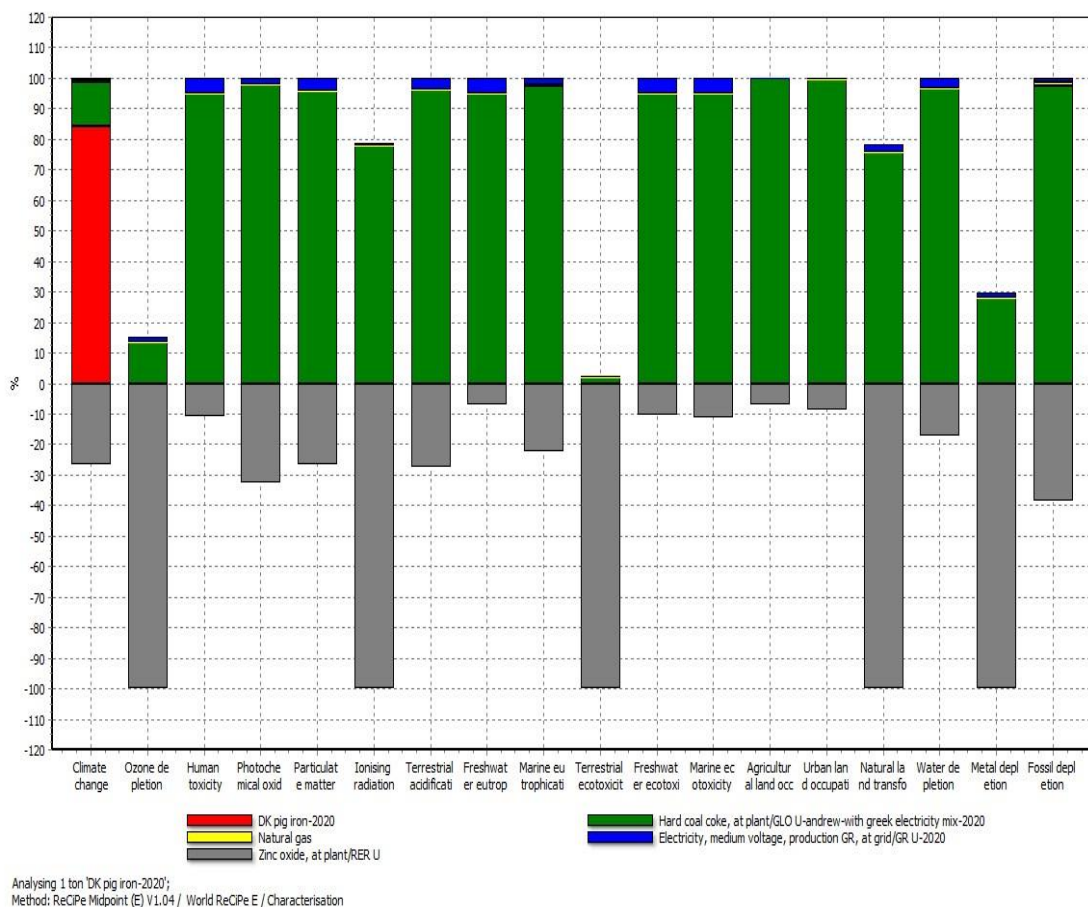
Εδώ φαίνεται η μεγαλύτερη επίπτωση που έχει στο τελικό αποτέλεσμα της μεθόδου DESTINY η αλλαγή του μίγματος ηλεκτρισμού. Συγκεκριμένα για την κλιματική αλλαγή, από 1658 kg CO₂ / t pig iron υπάρχει μείωση της τάξης του 17% (1410 kg CO₂ / t pig iron). Για την υπόλοιπες διεργασίες πάλι δεν παρατηρούνται (σημαντικές τουλάχιστον) αλλαγές στο συνολικό αποτέλεσμα σε απόλυτους αριθμούς. Συνεπώς στο

διάγραμμα την σημαντική μείωση του ποσοστού της ηλεκτρικής ενέργειας ‘απορροφούν’ οι διεργασίες αυτές. Στην εξάντληση (ορυκτών) πόρων παρατηρείται επίσης μεγάλη μείωση (από 504 kg oil eq σε 418 kg oil eq), δηλαδή μια μείωση της τάξης του 18%.

Για την μέθοδο DK (Πίν. 5.13, Σχ. 5.9)

Impact category	Unit	Total
Climate change	kg CO2 eq	1359,908
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-6E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	19083,37
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	1,296922
Particulate matter formation	kg PM10 eq	0,549835
Ionising radiation	kg U235 eq	-7,59343
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	1,690969
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,747137
Marine eutrophication	kg N eq	0,607489
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-4,34482
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	10,28762
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	15975,95
Agricultural land occupation	m2a	45,26098
Urban land occupation	m2a	10,45621
Natural land transformation	m2	-0,02497
Water depletion	m3	2,579376
Metal depletion	kg Fe eq	-9,56273
Fossil depletion	kg oil eq	333,9859

Πίν. 5.13. Αποτελέσματα κατηγοριών επίπτωσης μεθόδου DK



Σχ. 5.9. Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε διαδικασίας στις κατηγορίες επίπτωσης μεθόδου DK

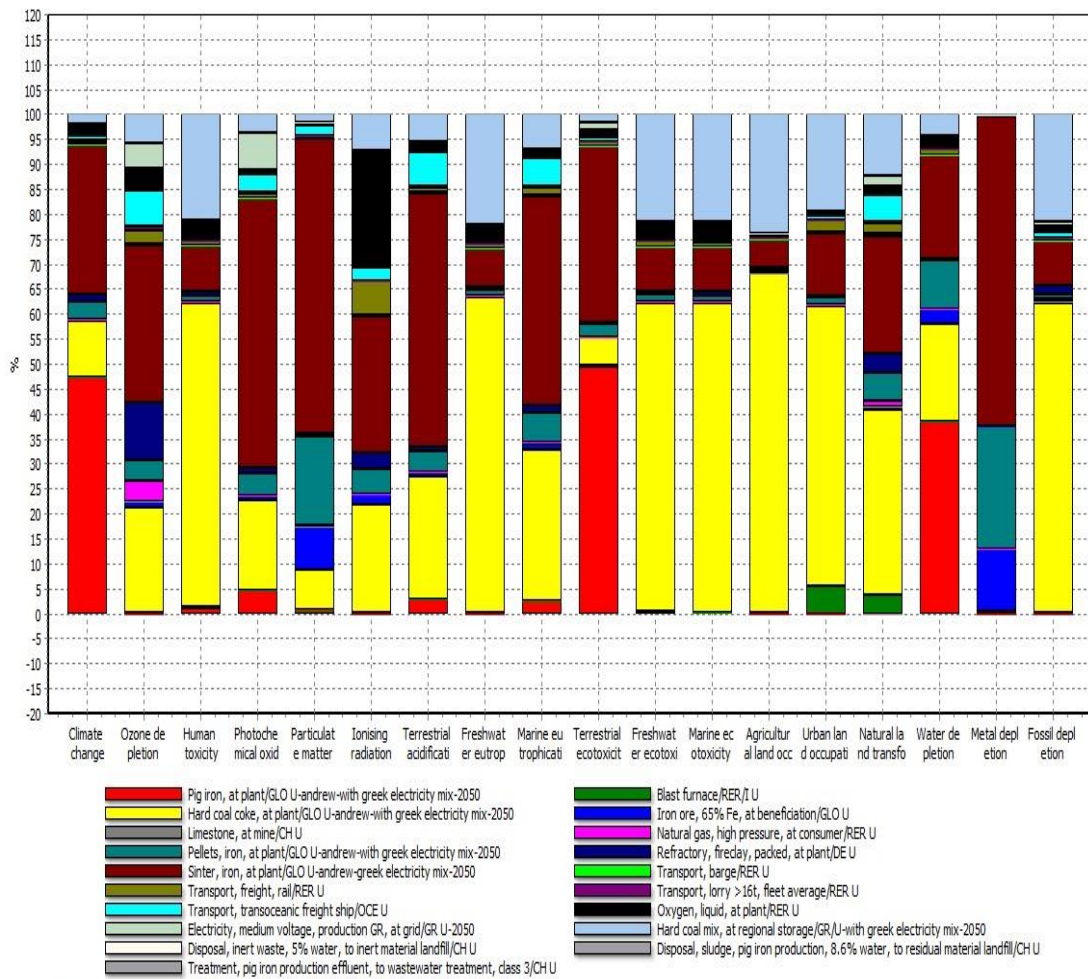
Παρατηρείται όπως είναι λογικό ότι με την χρήση του τρέχοντος ενεργειακού μίγματος υπάρχει μία μικρή μείωση στον συνολικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Στην κλιματική αλλαγή από 1379 οδηγούμαστε σε 1359 kg CO₂ eq. Με το σημερινό μίγμα ενέργειας παρατηρείται ότι μέθοδοι DK και DESTINY βρίσκονται πολύ κοντά στην επίπτωση της κλιματικής αλλαγής με την πρώτη όμως να είναι ακόμα οριακά πιο συμφέρουσα (1359 έναντι 1410 kg CO₂ eq) σε σχέση με την πρώτη.

5.2.3. Σενάριο μελλοντικού ενεργειακού μίγματος στην Ελλάδα

Για την συμβατική μέθοδο έχουμε τα εξής (Πίν. 5.14, Σχ. 5.10)

Impact category	Unit	Total
Climate change	kg CO2 eq	1375,114
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	2,53E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	19152,5
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	6,603354
Particulate matter formation	kg PM10 eq	5,1741
Ionising radiation	kg U235 eq	76,29397
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	5,306048
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,688981
Marine eutrophication	kg N eq	1,480179
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	0,917542
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	10,13135
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	15836,53
Agricultural land occupation	m2a	42,83728
Urban land occupation	m2a	12,19874
Natural land transformation	m2	0,137942
Water depletion	m3	9,105737
Metal depletion	kg Fe eq	1098,213
Fossil depletion	kg oil eq	503,0947

Πίν. 5.14. Αποτελέσματα κατηγοριών επίπτωσης συμβατικής μεθόδου



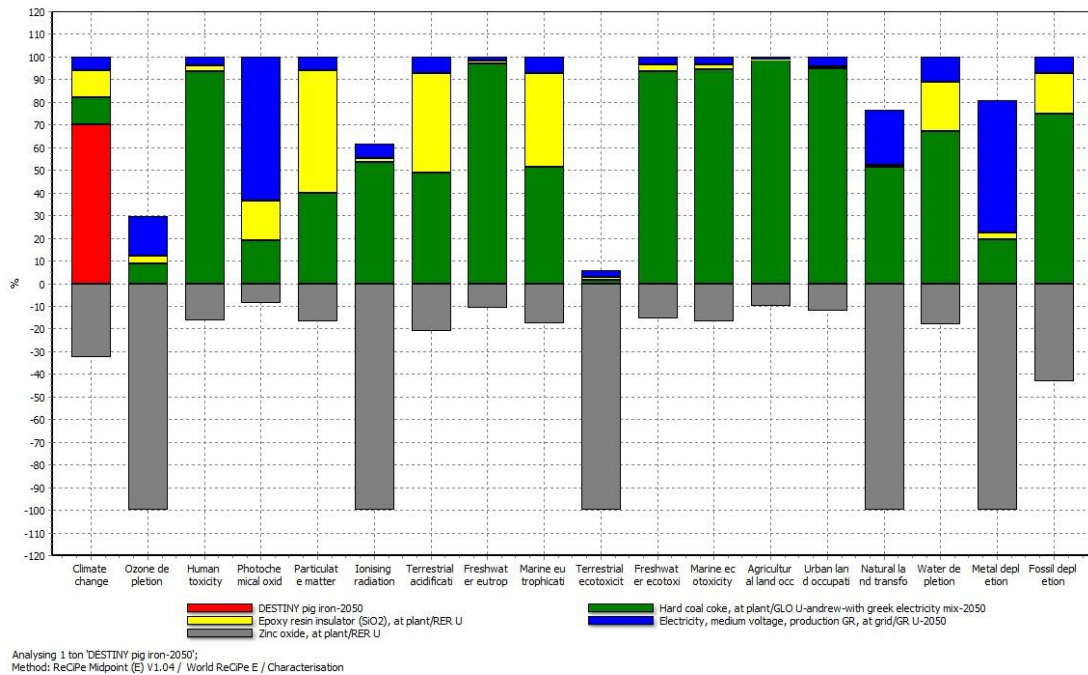
Σχ. 5.10. Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε διαδικασίας στις κατηγορίες επίπτωσης συμβατικής μεθόδου

Στην υπόθεση του ενεργειακού μίγματος με βάση τις προβλέψεις για το 2050 παρατηρείται η μείωση που επιφέρει στο τελικό αποτέλεσμα. Για την περίπτωση της κλιματικής αλλαγής από 1440 kg CO₂ eq οδηγούμαστε στο ποσό των 1375 kg CO₂ eq. Πρόκειται πλέον για μια διαδικασία όπου η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται είναι πολύ καθαρή, εξαρτημένη σε πολύ μικρό ποσοστό από πηγές άνθρακα.

Για την μέθοδο DESTINY (Πίν. 5.15, Σχ. 5.11)

Impact category	Unit	Total
Climate change	kg CO2 eq	1031,304
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-5E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	12004,3
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	6,697957
Particulate matter formation	kg PM10 eq	1,008761
Ionising radiation	kg U235 eq	-13,6651
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	2,417009
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,461614
Marine eutrophication	kg N eq	0,835002
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-4,19852
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	6,493597
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	9900,334
Agricultural land occupation	m2a	30,62691
Urban land occupation	m2a	7,294816
Natural land transformation	m2	-0,0269
Water depletion	m3	2,487912
Metal depletion	kg Fe eq	-2,61843
Fossil depletion	kg oil eq	274,4207

Πίν. 5.15. Αποτελέσματα κατηγοριών επίπτωσης μεθόδου DESTINY



Σχ. 5.11. Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε διαδικασίας στις κατηγορίες επίπτωσης μεθόδου DESTINY

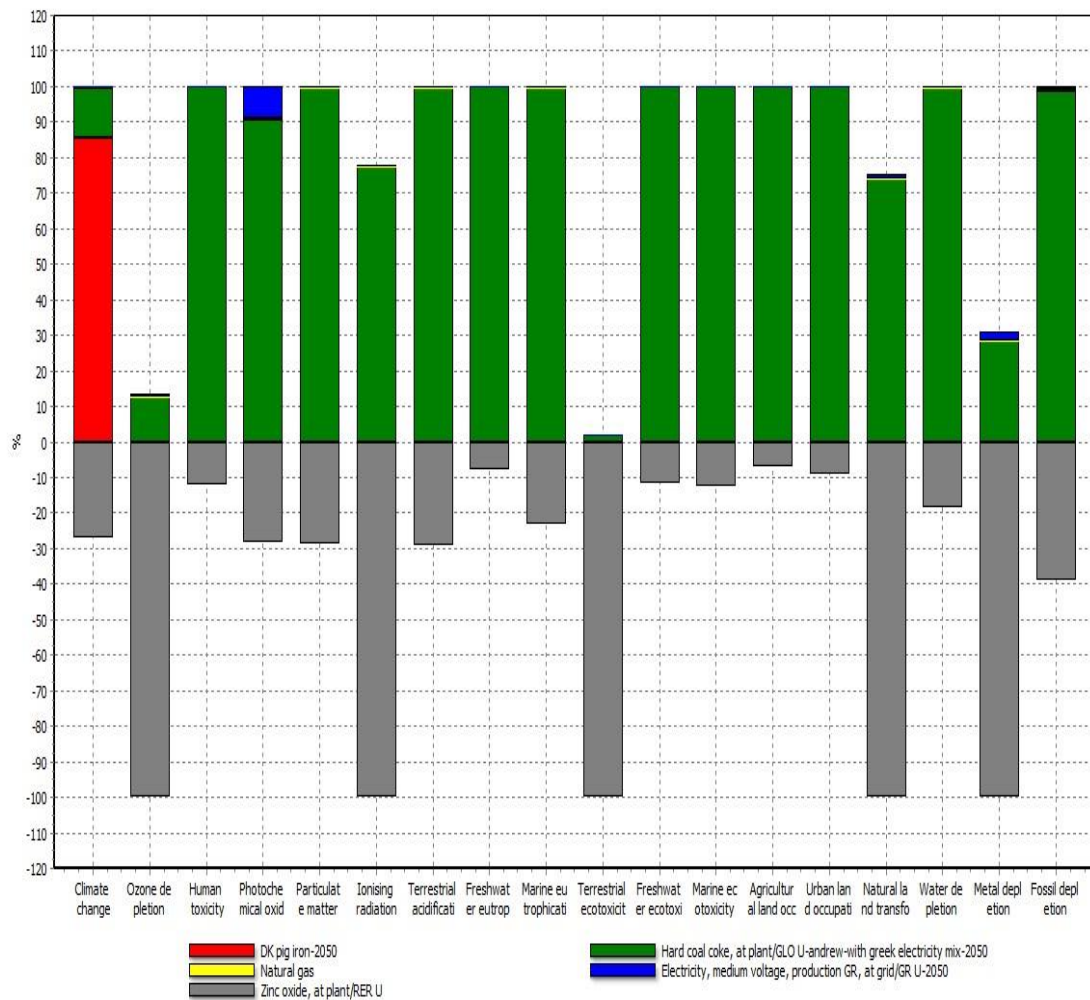
Εδώ είναι που φαίνεται πλέον ότι ένα αρκετά καθαρό ενεργειακό μίγμα η μέθοδος DESTINY έχει ένα αρκετά σημαντικό προβάδισμα. Με συνολικό αντίκτυπο στην κλιματική αλλαγή 1031 kg CO₂ eq βρίσκεται πιο χαμηλά σε περιβαλλοντικό αντίκτυπο, αφενός σε σχέση με την ίδια μέθοδο αλλά το τρέχον ενεργειακό μίγμα (1410 kg CO₂ eq), αφετέρου σε σχέση την μέθοδο DK με το ενεργειακό μίγμα του 2050 (1330 kg CO₂ eq) όπως θα δούμε ακριβώς παρακάτω.

Για την μέθοδο DK (Πίν. 5.16, Σχ. 5.12)

Impact category	Unit	Total
Climate	kg CO ₂ eq	1330,841

change		
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-6,1E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	17151,46
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	1,588052
Particulate matter formation	kg PM10 eq	0,500019
Ionising radiation	kg U235 eq	-7,90135
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	1,542121
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,671972
Marine eutrophication	kg N eq	0,58094
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-4,36334
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	9,246008
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	14350,62
Agricultural land occupation	m2a	45,24424
Urban land occupation	m2a	10,42472
Natural land transformation	m2	-0,02843
Water depletion	m3	2,415947
Metal depletion	kg Fe eq	-9,36242
Fossil depletion	kg oil eq	322,9617

Πίν. 5.16. Αποτελέσματα κατηγοριών επίπτωσης μεθόδου DK



Analysing 1 ton 'DK pig iron-2050';
 Method: ReCPE Midpoint (E) V1.04 / World ReCPE E / Characterisation

Σχ. 5.12. Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε διαδικασίας στις κατηγορίες επίπτωσης μεθόδου DK

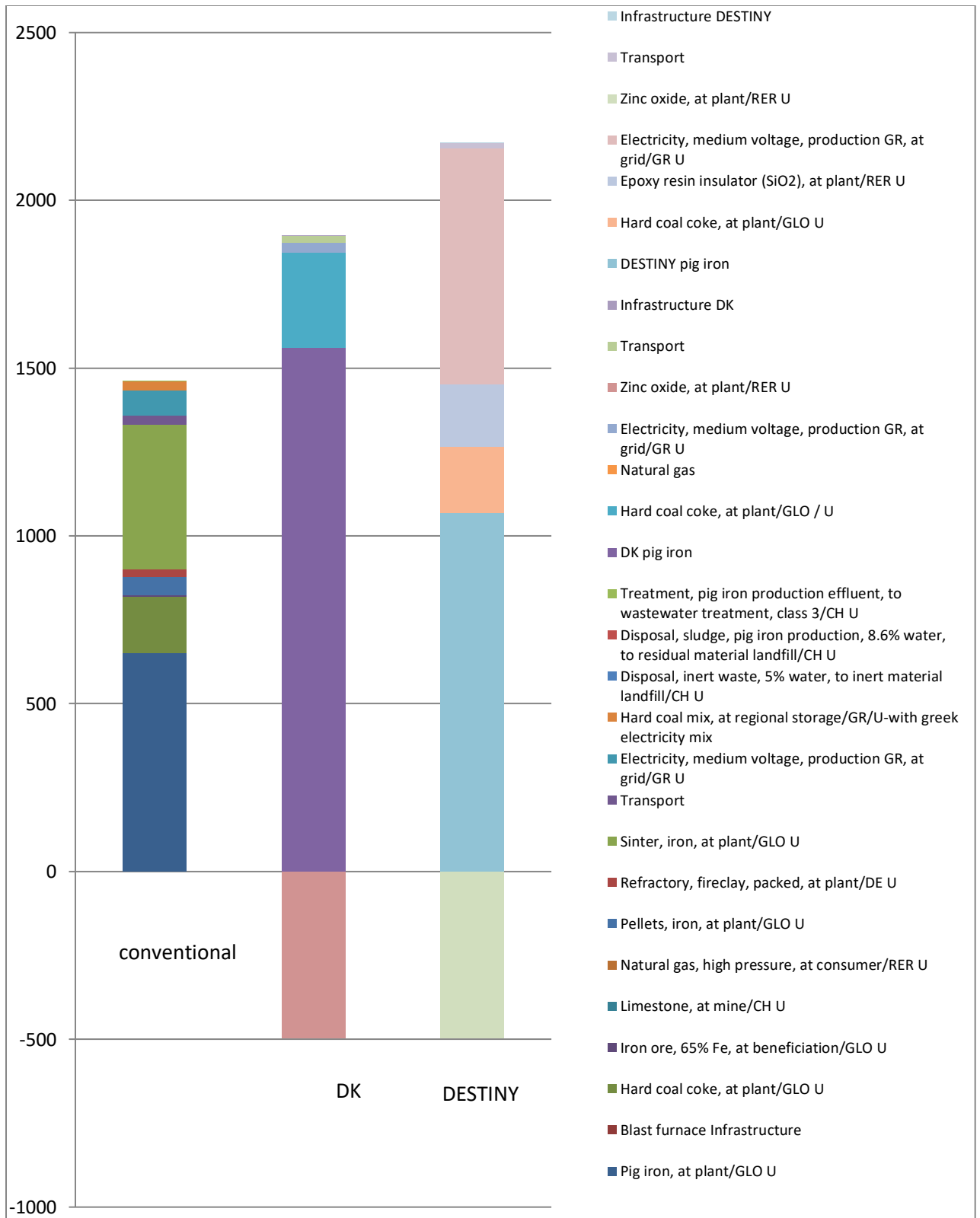
Πάλι παρατηρείται αυτή η μικρή μείωση στην κλιματική αλλαγή από 1359 σε 1330 kg CO₂ eq. Όπως αναφέρθηκε και πριν, με το ενεργειακό μίγμα του 2050 πλέον η μέθοδος DESTINY είναι ξεκάθαρα πιο συμφέρουσα.

5.2.4. Σύνοψη των αποτελεσμάτων για την κλιματική αλλαγή

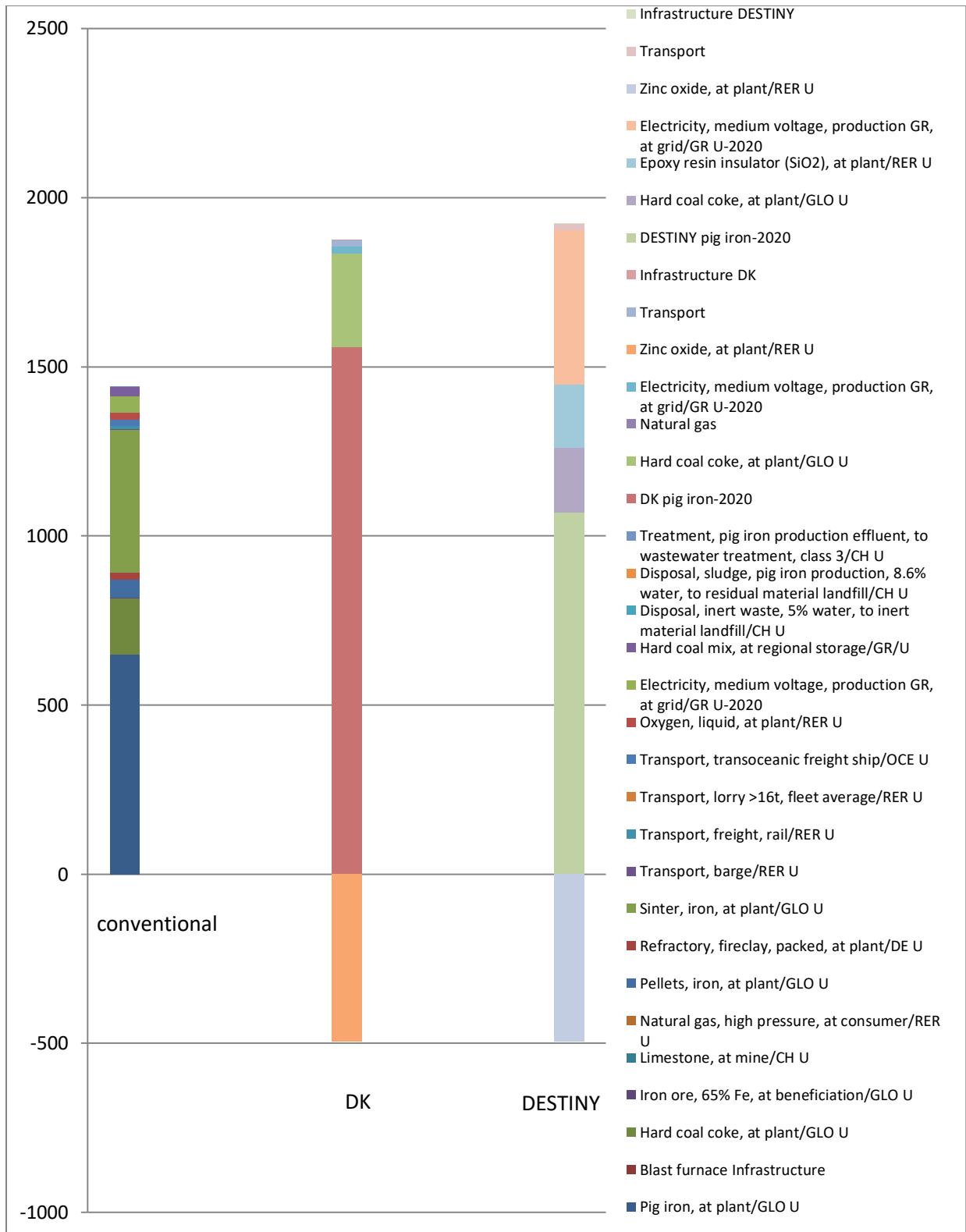
Στην παράγραφο αυτή συνοψίζονται τα αποτελέσματα της επίπτωσης της κλιματικής αλλαγής για κάθε μέθοδο παραγωγής pig iron και για κάθε ένα σενάριο μίγματος ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλο που έχουν αναφερθεί και σχολιασθεί τα αποτελέσματα παρατίθεται και σε κοινά διαγράμματα και σε απόλυτους αριθμούς-αντί για ποσοστά- για ακόμα καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων αυτών. Παρατηρείται λοιπόν για την συμβατική μέθοδο ότι στην περίπτωση του μίγματος του Sima Pro η διαδικασία της υψικαμίνου οφείλεται για περίπου 650 kg CO₂ eq, η διαδικασία παραγωγής sinter (πυροσυσσωματώματος) για 430 kg CO₂ eq, ενώ για την παραγωγή κοκ περίπου 170 kg CO₂ eq. Για την παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας η αντίστοιχη συνεισφορά είναι 74 kg CO₂ eq, φτάνοντας μέχρι και τα μόλις 10 στην περίπτωση του μελλοντικού μίγματος. (Σχ. 5.13)

Στη περίπτωση της DK μεθόδου οι εκπομπές στην υψικάμινο και γενικά στην προετοιμασία των υλικών κυμαίνονται στα 1056 kg CO₂ eq ενώ για την παραγωγή του ανάλογου κοκ 283 kg CO₂ eq. Αυτά αποτελούν και την συντριπτική πλειοψηφία. Θετική επίπτωση έχει κατά 494 kg CO₂ eq η παραγωγή του υποπροϊόντος ZnO, που δεν παράγεται στην κλασική μέθοδο. (Σχ. 5.14)

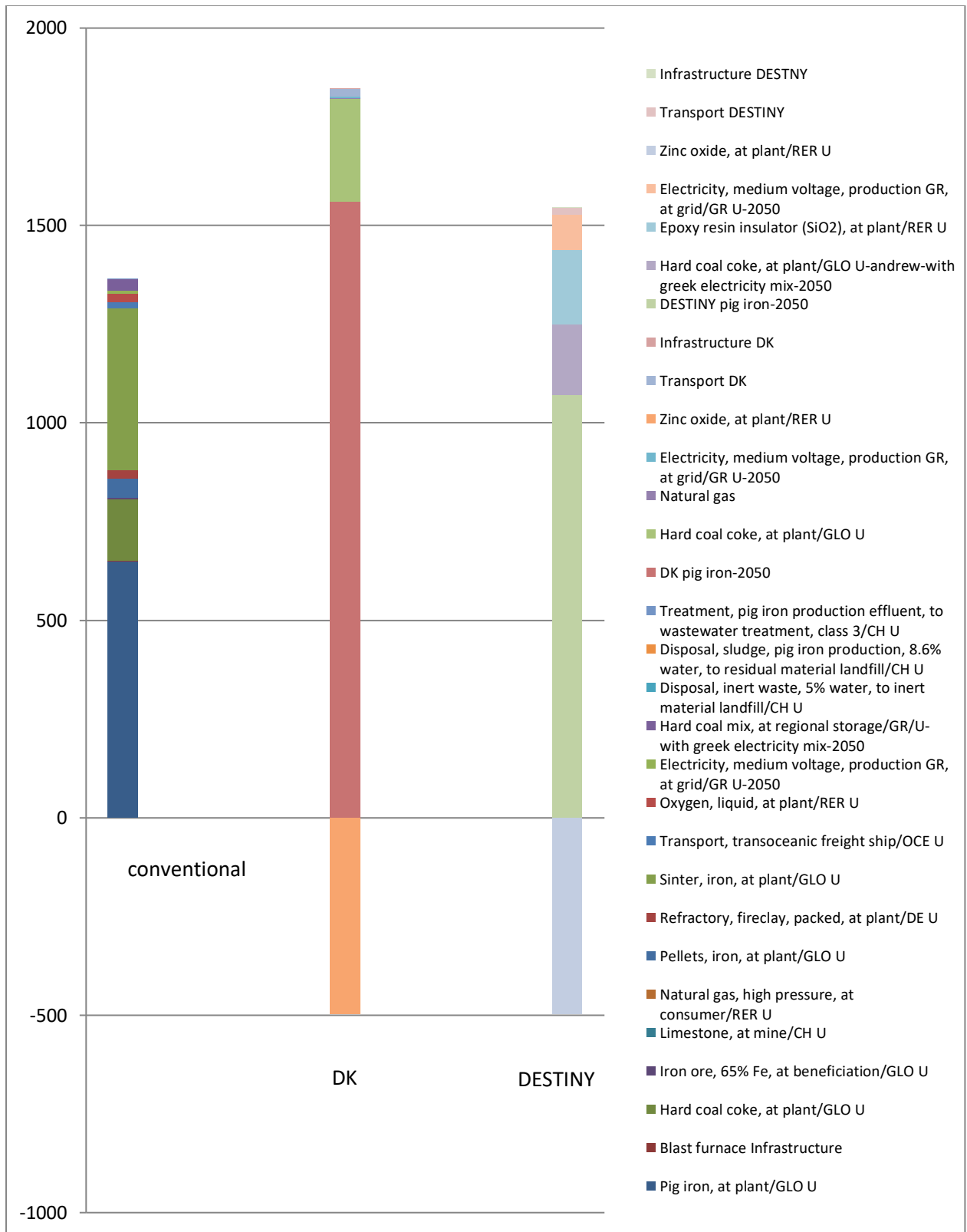
Τέλος στην περίπτωση της μεθόδου DESTINY η ηλεκτρική ενέργεια έχει μεγαλύτερη συνεισφορά. Με το ρεύμα του Sima Pro (το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από άνθρακα και δεν είναι περιβαλλοντικά βιώσιμο) οφείλεται για 700 kg CO₂ eq. Το ποσό αυτό μειώνεται σε 458 και 90 kg CO₂ eq αντίστοιχα με την "βελτίωση" του μίγματος ενέργειας. Έτσι η μέθοδος DESTINY οδηγείται να είναι πιο συμφέρουσα στο μέλλον όπως θα δούμε και παρακάτω. (Σχ. 5.15)



Σχ. 5. 13. Κλιματική αλλαγή για κάθε μέθοδο (σενάριο μίγματος Sima Pro)



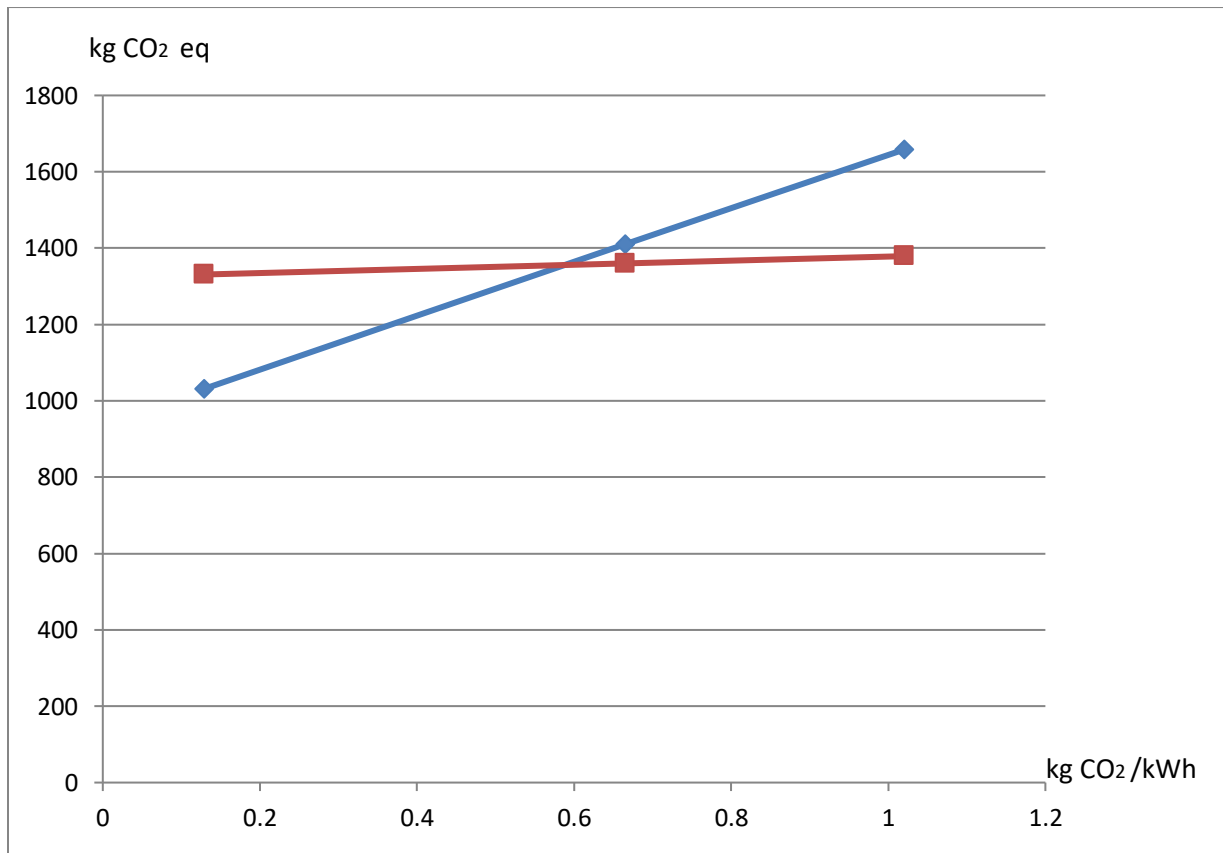
Σχ. 5. 14. Κλιματική αλλαγή για κάθε μέθοδο (σενάριο τρέχοντος μίγματος)



Σχ. 5. 15. Κλιματική αλλαγή για κάθε μέθοδο (σενάριο μελλοντικού μίγματος)

5.2.5. Σύγκριση DK – DESTINY process

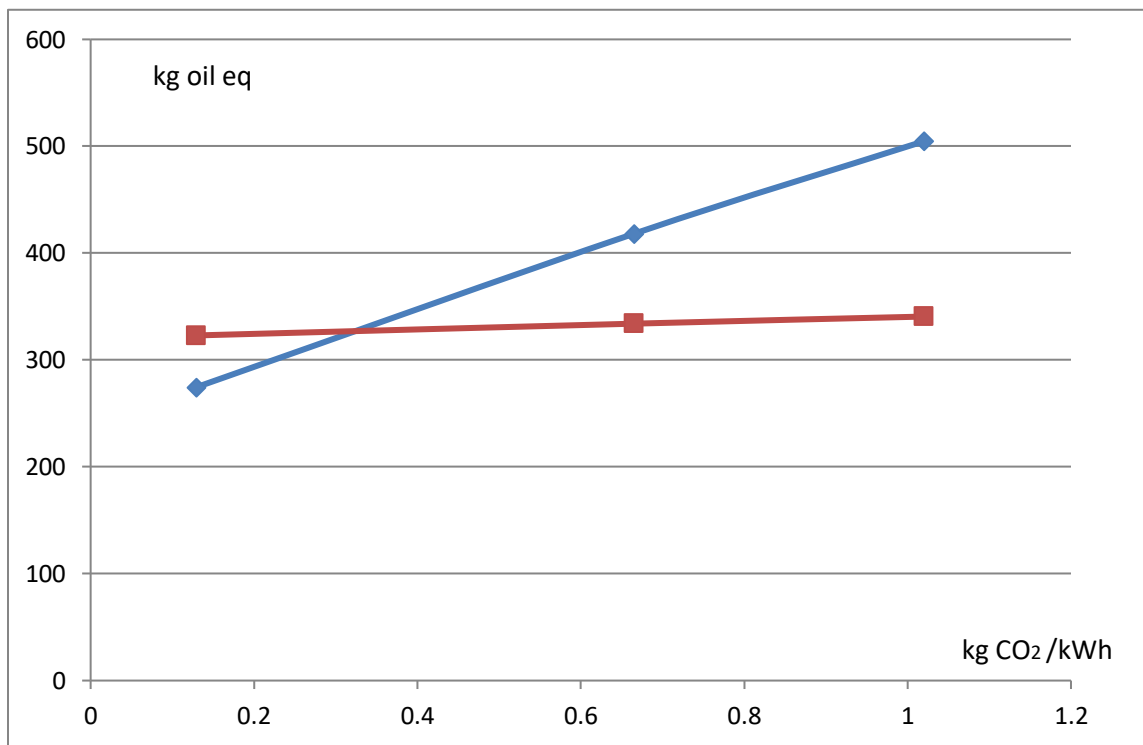
Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχ. 5.16) φαίνεται η μεταβολή της κλιματικής αλλαγής με την αλλαγή του ενεργειακού μίγματος για τις διεργασίες DESTINY (μπλε) και DK(κόκκινο). Στον οριζόντιο άξονα έχει τοποθετηθεί ο παράγοντας ($\frac{kg\ CO_2}{kWh}$), όπου δείχνει το πόσο καθαρό είναι το κάθε ενεργειακό μίγμα (βλ. Κεφάλαιο 5.2). Στον κάθετο άξονα έχει τοποθετηθεί η κατηγορία επίπτωσης της κλιματικής αλλαγής για κάθε περίπτωση. Συγκρίνοντας την μέθοδο DESTINY με την μέθοδο DK για τον παράγοντα της κλιματικής αλλαγής για τα διαφορετικά ενεργειακά μίγματα παρατηρείται ότι καθώς το ρεύμα γίνεται πιο καθαρό και εξαρτάται λιγότερο από τον άνθρακα (λιγότερα $\frac{kg\ CO_2}{kWh}$), οι δύο καμπύλες μειώνονται με διαφορετικό ρυθμό και συγκεκριμένα η καμπύλη DESTINY μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό.



Σχ. 5.16. Σύγκριση DK – DESTINY process για την κλιματική αλλαγή

Αναλύοντας το παραπάνω διάγραμμα, προκύπτει για τις 2 μεθόδους (DESTINY, DK) προκύπτει ότι υπάρχει ένα οριακό σημείο στο οποίο η μέθοδος DESTINY είναι πιο συμφέρουσα περιβαλλοντικά από την μέθοδο DK. Προκύπτει με απλή παρεμβολή ότι το σημείο αυτό είναι το $(x,y) = (0,5875, 1354,256)$. Δηλαδή το ενεργειακό μίγμα πέρα από το οποίο η μέθοδος μικροκυμάτων DESTINY είναι πιο συμφέρουσα ενεργειακά είναι αυτό που εκπέμπει $0,5875 \text{ kg CO}_2 / \text{kWh}$. Ένα τέτοιο μίγμα με βάση τις προβλέψεις αναμένεται στην πενταετία 2025-2030. Στο σημείο τομής αυτό η κοινή επίπτωση της κλιματικής αλλαγής για την παραγωγή pig iron είναι $1354,256 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$.

Κάνοντας την ίδια διαδικασία για την επίπτωση της εξάντληση πόρων (Fossil depletion) προκύπτει το εξής διάγραμμα (Σχ. 5.17)



Σχ. 5.17. Σύγκριση DK – DESTINY process για την εξάντληση πόρων

Αναλύοντας το παραπάνω διάγραμμα, προκύπτει για τις 2 μεθόδους (DESTINY, DK) προκύπτει ότι υπάρχει ένα οριακό σημείο στο οποίο η μέθοδος DESTINY είναι πιο συμφέρουσα περιβαλλοντικά από την μέθοδο DK. Προκύπτει με απλή παρεμβολή ότι το

σημείο αυτό είναι το $(x,y) = (0,3403, 327)$. Δηλαδή το ενεργειακό μίγμα πέρα από το οποίο η μέθοδος μικροκυμάτων DESTINY είναι πιο συμφέρουσα ενεργειακά είναι αυτό που εκπέμπει $0,3403 \text{ kg CO}_2 / \text{kWh}$. Ένα τέτοιο μίγμα με βάση τις προβλέψεις αναμένεται στην πενταετία 2035-2040. Στο σημείο τομής αυτό η κοινή επίπτωση της κλιματικής αλλαγής για την παραγωγή pig iron είναι 327 kg oil eq . Άρα παρατηρούμε ότι ενώ για την κλιματική αλλαγή η DESTINY θα γίνει πολύ σύντομα η πιο συμφέρουσα, για την εξάντληση πόρων θα αργήσει περισσότερα χρόνια να γίνει αυτό.

Κεφάλαιο 6^ο – Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν 3 διαφορετικές μέθοδοι παραγωγής pig iron. Η συμβατική μέθοδος υψικαμίνου η οποία υπάρχει εδώ και πολλά χρόνια, η οποία όμως είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στην περίπτωση που οι εισροές έχουν υψηλά ποσοστά ψευδαργύρου (Zn), καθώς δημιουργούν προβλήματα στην λειτουργία της υψικαμίνου. Στην περίπτωση των πλουσίων σε Zn υλικών υπάρχουν δύο μέθοδοι. Η DK που στηρίζεται σε μια ειδικής μορφής υψικάμινο και σύστημα φιλτραρίσματος του ψευδαργύρου για παραγωγή ZnO, και η μέθοδος μικροκυμάτων DESTINY που δεν χρησιμοποιεί καύσιμα (εκτός από κοκ σαν αναγωγικό προϊόν).

Μελετήθηκαν στη συνέχεια τρία διαφορετικά σενάρια για κάθε μέθοδο. Το πρώτο είναι παραγωγή pig iron με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το μίγμα της βιβλιοθήκης του Sima Pro, ενώ τα άλλα δύο σενάρια είναι με χρήση ενεργειακού μίγματος του 2020 και 2050 (με βάση τις προβλέψεις) αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Sima Pro για την παραγωγή ενός τόνου pig iron ένα ποσοστό περίπου 90% της επίπτωσης στην κλιματική αλλαγή οφείλεται στις διαδικασίες της υψικαμίνου, πυροσυσσωμάτωσης, πελετοποίησης και παραγωγής κοκ. Το υπόλοιπο ποσοστό καταλαμβάνουν διαδικασίες όπως η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται για τις διαδικασίες (περίπου 5%), μεταφορά υλικών (περίπου 2-3%) και σε μικρότερα ποσοστά διαδικασίες όπως η ανακύκλωση υλικών, επεξεργασία υπολειμμάτων. Στην επίπτωση που αφορά την εξάντληση πόρων η παραγωγή κοκ συνεισφέρει περίπου 57% και αμέσως μετά η μονάδα πυροσυσσωμάτωσης 10%.

Για την μέθοδο DESTINY, στην κλιματική αλλαγή η παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας καταλαμβάνει ένα ποσοστό 35% του συνολικού αντίκτυπου, ενώ η παραγωγή pig iron στην κλίση μικροκυμάτων ένα 50%. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δώσουμε και στην παραγωγή του υποπροϊόντος οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) καθώς δρα θετικά στους δείκτες επίπτωσης ρίχνοντας την ολική επίπτωση. Συγκεκριμένα στην κλιματική αλλαγή αφαιρεί από τον συνολικό αντίκτυπο περίπου 22% επί του συνόλου.

Όσον αφορά την μέθοδο DK προκύπτει ότι στην κατηγορία της κλιματικής αλλαγής οι εκπομπές που προέρχονται από την διαδικασία αναγωγής στον κλίβανο αποτελούν το 83% του συνολικού αντίκτυπου, ενώ ένα 13% προκύπτει από την παραγωγή κοκ. Παρατηρείται ξανά η μικρή συνεισφορά της παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής

ενέργειας στο συνολικό αποτέλεσμα (σε σχέση με την μέθοδο DESTINY). Πάλι παρατηρείται όπως και στην μέθοδο DK η θετική επίπτωση που έχει η παραγωγή του υποπροϊόντος οξειδίου ψευδαργύρου (ZnO), σε ένα ποσοστό -27% αυτή τη φορά.

Παρατηρήθηκε ότι όσο αλλάζει το ενεργειακό μίγμα και γίνεται πιο ‘καθαρό’ και ανεξαρτητοποιείται σταδιακά από άνθρακα τόσο λιγότερος είναι ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της κάθε διαδικασίας. Στις περιπτώσεις της συμβατικής και της μεθόδου DK η διαφορά φαίνεται μικρότερη καθώς η συνεισφορά της ηλεκτρικής ενέργειας είναι γενικά μικρή. Στην περίπτωση όμως της μεθόδου DESTINY που η εξάρτηση από την ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγαλύτερη, είναι προφανές ότι με αλλαγή του ενεργειακού μίγματος προκύπτει μεγάλη διαφορά για κάθε μέθοδο. Για παράδειγμα στην μέθοδο DESTINY με το ενεργειακό μίγμα βιβλιοθήκης η επίπτωση της κλιματικής αλλαγής είναι περίπου 1650 kg CO₂ eq, ενώ με το ενεργειακό μίγμα του 2050 είναι 1030 kg CO₂ eq, οδηγώντας σε μια ποσοστιαία μείωση 37%. Η αντίστοιχη μείωση στις άλλες μεθόδους είναι της τάξης του 4-5 %.

Συγκρίνοντας τις μεθόδους DESTINY και DK στις κατηγορίες επίπτωσης κλιματικής αλλαγής και εξάντλησης πόρων, παρατηρείται ότι στο μέλλον η μέθοδος DESTINY θα είναι πιο συμφέρουσα περιβαλλοντικά. Για την πρώτη κατηγορία αυτό αναμένεται την πενταετία 2025-2030, ενώ για την δεύτερη την πενταετία 2035-2040.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Impact category	Climate change	Ozone depletion	Human toxicity	Photochemical oxidant formation
Unit	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kg 1,4-DB eq	kg NMVOC
Total	1483,6	2,7E-05	28041,92	5,983376
Pig iron, at plant	650	0	211,0955	0,301007
Blast furnace	0,721414	4,07E-08	41,31216	0,002843
Hard coal coke, at plant	169,4802	5,56E-06	12714,33	1,130397
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation	3,081692	2,35E-07	63,16851	0,050131
Limestone, at mine	0,047596	5,86E-09	0,20594	0,001387
Natural gas, high pressure, at consumer	0,988063	1,12E-06	1,687938	0,005134
Pellets, iron, at plant	53,60694	1,15E-06	783,5815	0,251594
Refractory, fireclay, packed, at plant	22,88917	2,92E-06	144,0868	0,076163
Sinter, iron, at plant	430,3368	8,24E-06	3516,521	3,437444
Transport, barge	0,746331	8,02E-08	3,712209	0,009254
Transport, freight, rail	9,649823	7,19E-07	184,8569	0,056712
Transport, lorry >16t, fleet average	1,29728	2,16E-07	6,721244	0,01303
Transport, transoceanic freight ship	15,65378	1,81E-06	101,8574	0,246336
Oxygen, liquid, at plant	21,52707	1,09E-06	598,9999	0,046495

Electricity, medium voltage	75,6287	2,3E-06	5472,136	0,123493
Hard coal mix, at regional storage	27,94304	1,47E-06	4197,629	0,231949
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill	0,00014	4,42E-11	0,000673	1,63E-06
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill	0,001375	6,99E-11	0,010809	3,27E-06
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class	0,000519	2,28E-11	0,007891	1,53E-06

Impact category	Particulate matter formation	Ionising radiation	Terrestrial acidification	Freshwater eutrophication
Unit	kg PM10 eq	kg U235 eq	kg SO2 eq	kg P eq
Total	5,391057	77,6023	5,94506	1,035383
Pig iron, at plant	0,039148	0	0,145022	0
Blast furnace	0,002693	0,132659	0,004265	0,000735
Hard coal coke, at plant	0,443181	16,68159	1,375487	0,477006
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation	0,445045	1,643263	0,052219	0,002086
Limestone, at mine	0,00161	0,001996	0,001252	3,62E-06
Natural gas, high pressure, at consumer	0,001227	0,018239	0,004437	3,73E-05
Pellets, iron, at plant	0,944995	3,934292	0,251937	0,029367
Refractory, fireclay, packed, at plant	0,02275	2,298618	0,060474	0,005101
Sinter, iron, at plant	3,107705	21,26703	2,811831	0,120704
Transport, barge	0,002377	0,068769	0,00711	9,57E-05
Transport, freight, rail	0,022657	5,182635	0,058844	0,006306
Transport, lorry >16t, fleet average	0,003401	0,121804	0,009317	0,000129
Transport, transoceanic	0,100633	2,09870	0,35632	0,002775

freight ship		2		
Oxygen, liquid, at plant	0,029247	17,51671	0,098293	0,021984
Electricity, medium voltage	0,13979	1,044561	0,413548	0,211776
Hard coal mix, at regional storage	0,084594	5,591204	0,294699	0,157275
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill	4,3E-07	1,36E-05	1,11E-06	1,16E-08
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill	1,02E-06	0,00013	2,86E-06	1,42E-06
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3	9,56E-07	0,000101	1,5E-06	1,19E-07

Impact category	Marine eutrophication	Terrestrial ecotoxicity	Freshwater ecotoxicity	Marine ecotoxicity
Unit	kg N eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
Total	1,595355	0,984729	14,9265	23301,28
Pig iron, at plant	0,035625	0,454231	0,013666	7,680365
Blast furnace/RER/I U	0,000837	0,002344	0,023825	34,58381
Hard coal coke, at plant/GLO U	0,464819	0,058047	6,817183	10677,22
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	0,017275	0,00188	0,038518	53,50061
Limestone, at mine/CH U	0,000468	2,38E-05	9,92E-05	0,142535
Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,001034	0,00026	0,000883	1,64243
Pellets, iron, at plant/GLO U	0,094864	0,026377	0,444921	657,3974
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,024897	0,004924	0,077441	116,2264
Sinter, iron, at plant/GLO U	0,641768	0,335203	1,841124	2906,061
Transport, barge/RER U	0,003291	0,000287	0,00195	2,837236
Transport, freight, rail/RER U	0,019817	0,007788	0,105804	159,3542
Transport, lorry >16t, fleet	0,004325	0,002282	0,003835	4,839778

average/RER U				
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	0,08349	0,007756	0,048532	83,53117
Oxygen, liquid, at plant/RER U	0,01903	0,012356	0,312102	486,241
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U	0,077958	0,055429	2,94691	4586,964
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	0,105854	0,01554	2,249674	3523,037
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	4,98E-07	1,12E-07	3,61E-07	0,000434
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill/CH U	1,05E-06	3,1E-07	3,16E-05	0,019117
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	4,63E-07	6,8E-07	8,4E-06	0,010633

Impact category	Agricultural land occupation	Urban land occupation	Natural land transformation	Water depletion
Unit	m2a	m2a	m2	m3
Total	42,90279	12,34745	0,146819	9,776237
Pig iron, at plant/GLO U	0	0	0	3,5
Blast furnace/RER/I U	0,107195	0,659954	0,005316	0,008041
Hard coal coke, at plant/GLO U	29,08876	6,860396	0,051999	1,841427
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	0,043841	0,045415	0,000789	0,292407
Limestone, at mine/CH U	0,000622	0,002358	2,35E-05	9,7E-05
Natural gas, high pressure, at	0,001563	0,002754	0,001716	0,001173

consumer/RER U				
Pellets, iron, at plant/GLO U	0,302749	0,17351	0,008152	0,914817
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,186951	0,046717	0,00563	0,042136
Sinter, iron, at plant/GLO U	2,372004	1,537916	0,034073	2,021889
Transport, barge/RER U	0,003076	0,041198	0,000724	0,002508
Transport, freight, rail/RER U	0,174316	0,296171	0,002579	0,086205
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,005498	0,01462	0,000485	0,005367
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	0,043964	0,075787	0,00746	0,037654
Oxygen, liquid, at plant/RER U	0,287525	0,071044	0,002383	0,180567
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U	0,080831	0,128651	0,008443	0,445004
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	10,20387	2,390876	0,017047	0,39692
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	5,1E-06	2,07E-05	-8,4E-07	3,55E-06
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill/CH U	9,76E-06	4,62E-05	-4,2E-07	6,85E-06
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	5,71E-06	1,26E-05	1,08E-08	1,22E-05

Impact category	Metal depletion	Fossil depletion
Unit	kg Fe eq	kg oil eq
Total	1097,459	542,9452
Pig iron, at plant	0	0
Blast furnace	1,379613	0,22493
Hard coal coke, at plant	2,211694	317,7872
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation	137,9317	0,970063
Limestone, at mine	0,001718	0,016532

Natural gas, high pressure, at consumer	0,022274	3,207672
Pellets, iron, at plant	271,7752	7,387423
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,428014	8,94863
Sinter, iron, at plant	680,6778	51,67331
Transport, barge/RER U	0,02607	0,237843
Transport, freight, rail/RER U	1,319079	3,015395
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,070268	0,504216
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	0,237856	5,40479
Oxygen, liquid, at plant	0,2854	6,437817
Electricity, medium voltage	0,390917	27,95182
Hard coal mix, at regional storage	0,701569	109,1772
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill	5,47E-06	9,38E-05
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water	1,42E-05	0,00018
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3	0,000201	0,000113

Πίν.1. Αναλυτικά αποτελέσματα συμβατικής μεθόδου για τις 18 κατηγορίες επίπτωσης (περίπτωση μίγματος βιβλιοθήκης Sima Pro)

Impact category	Unit	Total	DESTINY pig iron	Hard coal coke, at plant/GRU	Epoxy resin insulator (SiO ₂), at plant/GRU	Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GRU	Zinc oxide, at plant/GRU
Climate change	kg CO ₂ eq	1658,006	1070	195,4452	187,4924	700,9764	-495,908
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-4E-05	0	6,41E-06	2,41E-06	2,13E-05	-7E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	63356,58	0	14662,21	338,3358	50719,35	-2363,31
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	3,11648	0	1,303578	1,296374	1,144615	-0,62809
Particulate matter formation	kg PM10 eq	2,262075	0	0,511078	0,65667	1,295662	-0,20133
Ionising radiation	kg U235 eq	-6,10717	0	19,23726	0,596391	9,681681	-35,6225
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	6,108442	0	1,586216	1,330937	3,833039	-0,64175
Freshwater eutrophication	kg P eq	2,462701	0	0,550085	0,006797	1,962881	-0,05706
Marine eutrophication	kg N eq	1,500351	0	0,536031	0,418898	0,722569	-0,17715
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-3,81039	0	0,06694	0,061832	0,513751	-4,45292
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	34,19417	0	7,861598	0,228525	27,3139	-1,20985
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	53022,57	0	12313	228,8114	42514,99	-2034,24
Agricultural	m ² a	31,005	0	33,5452	0,08653	0,74919	-

land occupation		38		6	3	8	3,37561
Urban land occupation	m2a	8,153933	0	7,911431	0,077129	1,192422	-1,02705
Natural land transformation	m2	0,024383	0	0,059965	0,000964	0,078259	-0,11481
Water depletion	m3	6,361245	0	2,12354	0,656912	4,124588	-0,5438
Metal depletion	kg Fe eq	-6,97346	0	2,550533	0,403251	3,623273	-13,5505
Fossil depletion	kg oil eq	504,6282	0	366,4732	87,317	259,0758	-208,238

Πίν.2. Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου DESTINY για τις 18 κατηγορίες επίπτωσης (περίπτωση μίγματος βιβλιοθήκης Sima Pro)

Impact category	Unit	Total	DK pig iron	Hard coal coke, at plant/GLOU	Natural gas	Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GRU	Zinc oxide, at plant/REUR
Climate change	kg CO ₂ eq	1378,925	1560	283,2539	1,101705	30,47724	-495,908
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-6E-05	0	9,29E-06	0	9,26E-07	-7E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	21091,46	0	21249,58	0,000413	2205,189	-2363,31
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	1,313264	0	1,889243	0,002342	0,049766	-0,62809
Particulate matter formation	kg PM10 eq	0,59618	0	0,740693	0,000488	0,056333	-0,20133
Ionising radiation	kg U235 eq	-7,32147	0	27,88009	0	0,420943	-35,6225

Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	1,825345	0	2,298864	0,001577	0,166654	-0,64175
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,825505	0	0,797224	0	0,085343	-0,05706
Marine eutrophication	kg N eq	0,631988	0	0,776857	0,000862	0,031416	-0,17715
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-4,33357	0	0,097015	1,59E-07	0,022337	-4,45292
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	11,37133	0	11,39362	4,96E-08	1,187561	-1,20985
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	17659,17	0	17844,93	1,47E-08	1848,478	-2034,24
Agricultural land occupation	m ² a	45,27328	0	48,61631	0	0,032574	-3,37561
Urban land occupation	m ² a	10,49064	0	11,46584	0	0,051844	-1,02705
Natural land transformation	m ²	-0,0245	0	0,086906	0	0,003403	-0,11481
Water depletion	m ³	2,713128	0	3,077594	0	0,17933	-0,5438
Metal depletion	kg Fe eq	-9,69656	0	3,696425	0	0,157534	-13,5505
Fossil depletion	kg oil eq	340,6244	0	531,1206	6,477408	11,26417	-208,238

Πίν.3. Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου DK για τις 18 κατηγορίες επίπτωσης (περίπτωση μίγματος βιβλιοθήκης Sima Pro)

Impact category	Climate change	Ozone depletion	Human toxicity	Photochemical oxidant formation
Unit	kg CO ₂ eq	kg CFC-11 eq	kg 1,4-DB eq	kg NMVOC
Total	1440,694	2,8E-05	23511,28	5,946504
Pig iron, at plant/GLO U	650	0	211,095	0,301007

			5	
Blast furnace/RER/I U	0,721414	4,07E-08	41,31216	0,002843
Hard coal coke, at plant/GLO U	164,3973	5,69E-06	12177,59	1,126029
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	3,081692	2,35E-07	63,16851	0,050131
Limestone, at mine/CH U	0,047596	5,86E-09	0,20594	0,001387
Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,988063	1,12E-06	1,687938	0,005134
Pellets, iron, at plant/GLO U	50,92959	1,22E-06	500,8654	0,249293
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	22,88917	2,92E-06	144,0868	0,076163
Sinter, iron, at plant/GLO U	421,8573	8,46E-06	2621,117	3,430157
Transport, barge/RER U	0,746331	8,02E-08	3,712209	0,009254
Transport, freight, rail/RER U	9,649823	7,19E-07	184,8569	0,056712
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	1,29728	2,16E-07	6,721244	0,01303
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	15,65378	1,81E-06	101,8574	0,246336
Oxygen, liquid, at plant/RER U	21,52707	1,09E-06	598,9999	0,046495
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U-2020	49,51976	2,95E-06	2715,149	0,101055
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	27,38624	1,48E-06	4138,834	0,23147
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	0,00014	4,42E-11	0,000673	1,63E-06
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill/CH U	0,001375	6,99E-11	0,010809	3,27E-06
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	0,000519	2,28E-11	0,007891	1,53E-06

Impact category	Particulate matter formation	Ionising radiation	Terrestrial acidification	Freshwater eutrophication
Unit	kg PM10 eq	kg U235 eq	kg SO2 eq	kg P eq
Total	5,286494	76,98872	5,641879	0,858569
Pig iron, at plant/GLO U	0,039148	0	0,145022	0
Blast furnace/RER/I U	0,002693	0,132659	0,004265	0,000735
Hard coal coke, at plant/GLO U	0,430794	16,6089	1,33957	0,456059
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	0,445045	1,643263	0,052219	0,002086
Limestone, at mine/CH U	0,00161	0,001996	0,001252	3,62E-06
Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,001227	0,018239	0,004437	3,73E-05
Pellets, iron, at plant/GLO U	0,938471	3,896004	0,233018	0,018334
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,02275	2,298618	0,060474	0,005101
Sinter, iron, at plant/GLO U	3,08704	21,14576	2,751912	0,08576
Transport, barge/RER U	0,002377	0,068769	0,00711	9,57E-05
Transport, freight, rail/RER U	0,022657	5,182635	0,058844	0,006306
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,003401	0,121804	0,009317	0,000129
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	0,100633	2,098702	0,35632	0,002775
Oxygen, liquid, at plant/RER U	0,029247	17,51671	0,098293	0,021984
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U-2020	0,076161	0,671183	0,229057	0,104181
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	0,083237	5,583241	0,290764	0,15498
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	4,3E-07	1,36E-05	1,11E-06	1,16E-08
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to	1,02E-06	0,00013	2,86E-06	1,42E-06

residual material landfill/CH U				
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	9,56E-07	0,000101	1,5E-06	1,19E-07

Impact category	Marine eutrophication	Terrestrial ecotoxicity	Freshwater ecotoxicity	Marine ecotoxicity
Unit	kg N eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
Total	1,540079	0,959325	12,48144	19503,61
Pig iron, at plant/GLO U	0,035625	0,454231	0,013666	7,680365
Blast furnace/RER/I U	0,000837	0,002344	0,023825	34,58381
Hard coal coke, at plant/GLO U	0,458271	0,055038	6,527518	10227,31
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	0,017275	0,00188	0,038518	53,50061
Limestone, at mine/CH U	0,000468	2,38E-05	9,92E-05	0,142535
Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,001034	0,00026	0,000883	1,64243
Pellets, iron, at plant/GLO U	0,091415	0,024791	0,292346	420,4189
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,024897	0,004924	0,077441	116,2264
Sinter, iron, at plant/GLO U	0,630844	0,330182	1,357898	2155,515
Transport, barge/RER U	0,003291	0,000287	0,00195	2,837236
Transport, freight, rail/RER U	0,019817	0,007788	0,105804	159,3542
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,004325	0,002282	0,003835	4,839778
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	0,08349	0,007756	0,048532	83,53117
Oxygen, liquid, at plant/RER U	0,01903	0,012356	0,312102	486,241
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U-2020	0,044322	0,03997	1,459038	2276
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	0,105137	0,015211	2,217944	3473,753

Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	4,98E-07	1,12E-07	3,61E-07	0,000434
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill/CH U	1,05E-06	3,1E-07	3,16E-05	0,019117
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	4,63E-07	6,8E-07	8,4E-06	0,010633

Impact category	Agricultural land occupation	Urban land occupation	Natural land transformation	Water depletion
Unit	m2a	m2a	m2	m3
Total	42,87503	12,26977	0,145752	9,474464
Pig iron, at plant/GLO U	0	0	0	3,5
Blast furnace/RER/I U	0,107195	0,659954	0,005316	0,008041
Hard coal coke, at plant/GLO U	29,08547	6,851193	0,051872	1,805676
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	0,043841	0,045415	0,000789	0,292407
Limestone, at mine/CH U	0,000622	0,002358	2,35E-05	9,7E-05
Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,001563	0,002754	0,001716	0,001173
Pellets, iron, at plant/GLO U	0,301017	0,168663	0,008085	0,895986
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,186951	0,046717	0,00563	0,042136
Sinter, iron, at plant/GLO U	2,366518	1,522564	0,033863	1,962249
Transport, barge/RER U	0,003076	0,041198	0,000724	0,002508
Transport, freight, rail/RER U	0,174316	0,296171	0,002579	0,086205
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,005498	0,01462	0,000485	0,005367
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	0,043964	0,075787	0,00746	0,037654

Oxygen, liquid, at plant/RER U	0,287525	0,071044	0,002383	0,180567
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U-2020	0,06394	0,08138	0,007794	0,261369
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	10,20351	2,389868	0,017033	0,393009
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	5,1E-06	2,07E-05	-8,4E-07	3,55E-06
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill/CH U	9,76E-06	4,62E-05	-4,2E-07	6,85E-06
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	5,71E-06	1,26E-05	1,08E-08	1,22E-05

Impact category	Metal depletion	Fossil depletion
Unit	kg Fe eq	kg oil eq
Total	1097,761	527,9675
Pig iron, at plant/GLO U	0	0
Blast furnace/RER/I U	1,379613	0,22493
Hard coal coke, at plant/GLO U	2,247465	316,0128
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	137,9317	0,970063
Limestone, at mine/CH U	0,001718	0,016532
Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,022274	3,207672
Pellets, iron, at plant/GLO U	271,7941	6,452799
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,428014	8,94863
Sinter, iron, at plant/GLO U	680,7374	48,71322
Transport, barge/RER U	0,02607	0,237843
Transport, freight, rail/RER U	1,319079	3,015395
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,070268	0,504216
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	0,237856	5,40479
Oxygen, liquid, at plant/RER	0,2854	6,437817

U		
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U-2020	0,574653	18,83757
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	0,705488	108,9828
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	5,47E-06	9,38E-05
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill/CH U	1,42E-05	0,00018
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	0,000201	0,000113

Πίν. 4. Αναλυτικά αποτελέσματα συμβατικής μεθόδου για τις 18 κατηγορίες επίπτωσης (περίπτωση τρέχοντος μίγματος)

Impact category	Unit	Total	DESTINY pig iron-2020	Hard coal coke, at plant/GR U	Epoxy resin insulator (SiO ₂), at plant/GR U	Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U	Zinc oxide, at plant/GR U
Climate change	kg CO ₂ eq	1410,15	1070	189,5835	187,4924	458,9816	-495,908
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-3,4E-05	0	6,56E-06	2,41E-06	2,74E-05	-7E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	37184,05	0	14043,24	338,3358	25165,79	-2363,31
Photochemical oxidant	kg NMV	2,903476	0	1,29854	1,296374	0,936648	-0,62809

formation	OC						
Particulate matter formation	kg PM10 eq	1,658039	0	0,496793	0,656671	0,705911	-0,20133
Ionising radiation	kg U235 eq	-9,65171	0	19,15343	0,596391	6,220965	-35,6225
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	4,357033	0	1,544796	1,330937	2,12305	-0,64175
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,441284	0	0,525929	0,006797	0,96562	-0,05706
Marine eutrophication	kg N eq	1,181032	0	0,528479	0,418898	0,410802	-0,17715
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-3,95715	0	0,06347	0,061832	0,37047	-4,45292
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	20,06955	0	7,527556	0,228525	13,52332	-1,20985
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	31084,21	0	11794,17	228,8114	21095,46	-2034,24
Agricultural land occupation	m2a	30,84503	0	33,54146	0,086533	0,592635	-3,37561
Urban land occupation	m2a	7,705185	0	7,900819	0,077129	0,754287	-1,02705
Natural land transformation	m2	0,018218	0	0,059819	0,000964	0,07224	-0,11481
Water depletion	m3	4,61797	0	2,082312	0,656912	2,422541	-0,5438
Metal depletion	kg Fe eq	-5,22922	0	2,591784	0,403251	5,326265	-13,5505
Fossil depletion	kg oil eq	418,1052	0	364,427	87,317	174,599	-208,238

Πίν. 5. Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου DESTINY για τις 18 κατηγορίες επίπτωσης (περίπτωση τρέχοντος μίγματος)

Impact category	Unit	Total	DK pig iron - 2020	Hard coal coke, at plant/GLOU-andrew-with greek electricity mix-2020	Natural gas	Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GRU-2020	Zinc oxide, at plant/REU
Climate change	kg CO2 eq	1359,908	1560	274,7587	1,101705	19,95572	-495,908
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-6E-05	0	9,5E-06	0	1,19E-06	-7E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	19083,37	0	20352,52	0,000413	1094,165	-2363,31
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	1,296922	0	1,881943	0,002342	0,040724	-0,62809
Particulate matter formation	kg PM10 eq	0,549835	0	0,71999	0,000488	0,030692	-0,20133
Ionising radiation	kg U235 eq	-7,59343	0	27,7586	0	0,270477	-35,6225
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	1,690969	0	2,238835	0,001577	0,092307	-0,64175
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,747137	0	0,762215	0	0,041983	-0,05706
Marine eutrophication	kg N eq	0,607489	0	0,765912	0,000862	0,017861	-0,17715
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-4,34482	0	0,091985	1,59E-07	0,016107	-4,45292
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	10,28762	0	10,9095	4,96E-08	0,58797	-1,20985
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	15975,95	0	17092,99	1,47E-08	917,1941	-2034,24
Agricultural land occupation	m2a	45,26098	0	48,61082	0	0,025767	-3,37561
Urban land	m2a	10,456	0	11,4504	0	0,03279	-1,02705

occupation		21		6		5	
Natural land transformation	m2	-0,02497	0	0,086695	0	0,003141	-0,11481
Water depletion	m3	2,579376	0	3,017843	0	0,105328	-0,5438
Metal depletion	kg Fe eq	-9,56273	0	3,756209	0	0,231577	-13,5505
Fossil depletion	kg oil eq	333,9859	0	528,1551	6,477408	7,591261	-208,238

Πίν. 6. Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου DK για τις 18 κατηγορίες επίπτωσης (περίπτωση τρέχοντος μίγματος)

Impact category	Climate change	Ozone depletion	Human toxicity	Photochemical oxidant formation
Unit	kg CO2 eq	kg CFC-11 eq	kg 1,4-DB eq	kg NMVOC
Total	1375,114	2,53E-05	19152,5	6,603354
Pig iron, at plant/GLO U	650	0	211,0955	0,301007
Blast furnace/RER/I U	0,721414	4,07E-08	41,31216	0,002843
Hard coal coke, at plant/GLO U	156,628	5,37E-06	11661,21	1,203845
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	3,081692	2,35E-07	63,16851	0,050131
Limestone, at mine/CH U	0,047596	5,86E-09	0,20594	0,001387
Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,988063	1,12E-06	1,687938	0,005134
Pellets, iron, at plant/GLO U	46,83729	1,05E-06	228,8734	0,290281
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	22,88917	2,92E-06	144,0868	0,076163
Sinter, iron, at plant/GLO U	408,8963	7,92E-	1759,67	3,559972

		06	9	
Transport, barge/RER U	0,746331	8,02E-08	3,712209	0,009254
Transport, freight, rail/RER U	9,649823	7,19E-07	184,8569	0,056712
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	1,29728	2,16E-07	6,721244	0,01303
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	15,65378	1,81E-06	101,8574	0,246336
Oxygen, liquid, at plant/RER U	21,52707	1,09E-06	598,9999	0,046495
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U-2050	9,612533	1,31E-06	62,74183	0,500762
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	26,53518	1,45E-06	4082,269	0,239994
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	0,00014	4,42E-11	0,000673	1,63E-06
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill/CH U	0,001375	6,99E-11	0,010809	3,27E-06
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	0,000519	2,28E-11	0,007891	1,53E-06

Impact category	Particulate matter formation	Ionising radiation	Terrestrial acidification	Freshwater eutrophication
Unit	kg PM10 eq	kg U235 eq	kg SO2 eq	kg P eq
Total	5,1741	76,29397	5,306048	0,688981
Pig iron, at plant/GLO U	0,039148	0	0,145022	0
Blast furnace/RER/I U	0,002693	0,132659	0,004265	0,000735
Hard coal coke, at plant/GLO U	0,417479	16,52659	1,299784	0,435968
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	0,445045	1,643263	0,052219	0,002086
Limestone, at mine/CH U	0,00161	0,001996	0,001252	3,62E-06

Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,001227	0,018239	0,004437	3,73E-05
Pellets, iron, at plant/GLO U	0,931457	3,852651	0,212062	0,007752
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,02275	2,298618	0,060474	0,005101
Sinter, iron, at plant/GLO U	3,064827	21,00846	2,685541	0,052244
Transport, barge/RER U	0,002377	0,068769	0,00711	9,57E-05
Transport, freight, rail/RER U	0,022657	5,182635	0,058844	0,006306
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,003401	0,121804	0,009317	0,000129
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	0,100633	2,098702	0,35632	0,002775
Oxygen, liquid, at plant/RER U	0,029247	17,51671	0,098293	0,021984
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U-2050	0,007767	0,248413	0,024697	0,000984
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	0,081779	5,574225	0,286406	0,15278
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	4,3E-07	1,36E-05	1,11E-06	1,16E-08
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill/CH U	1,02E-06	0,00013	2,86E-06	1,42E-06
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	9,56E-07	0,000101	1,5E-06	1,19E-07

Impact category	Marine eutrophication	Terrestrial ecotoxicity	Freshwater ecotoxicity	Marine ecotoxicity
Unit	kg N eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq	kg 1,4-DB eq
Total	1,480179	0,917542	10,13135	15836,53
Pig iron, at plant/GLO U	0,035625	0,454231	0,013666	7,680365
Blast furnace/RER/I U	0,000837	0,002344	0,023825	34,58381

Hard coal coke, at plant/GLO U	0,451175	0,050088	6,249106	9792,875
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	0,017275	0,00188	0,038518	53,50061
Limestone, at mine/CH U	0,000468	2,38E-05	9,92E-05	0,142535
Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,001034	0,00026	0,000883	1,64243
Pellets, iron, at plant/GLO U	0,087677	0,022184	0,145698	191,5903
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,024897	0,004924	0,077441	116,2264
Sinter, iron, at plant/GLO U	0,619006	0,321925	0,893444	1430,782
Transport, barge/RER U	0,003291	0,000287	0,00195	2,837236
Transport, freight, rail/RER U	0,019817	0,007788	0,105804	159,3542
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,004325	0,002282	0,003835	4,839778
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	0,08349	0,007756	0,048532	83,53117
Oxygen, liquid, at plant/RER U	0,01903	0,012356	0,312102	486,241
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U-2050	0,007871	0,014544	0,028961	44,51382
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	0,104359	0,014668	2,187446	3426,164
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	4,98E-07	1,12E-07	3,61E-07	0,000434
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill/CH U	1,05E-06	3,1E-07	3,16E-05	0,019117
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	4,63E-07	6,8E-07	8,4E-06	0,010633

Impact category	Agricultural land occupation	Urban land occupation	Natural land transformation	Water depletion
-----------------	------------------------------	-----------------------	-----------------------------	-----------------

Unit	m2a	m2a	m2	m3
Total	42,83728	12,19874	0,137942	9,105737
Pig iron, at plant/GLO U	0	0	0	3,5
Blast furnace/RER/I U	0,107195	0,659954	0,005316	0,008041
Hard coal coke, at plant/GLO U	29,081	6,842777	0,050947	1,761993
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	0,043841	0,045416	0,000789	0,292407
Limestone, at mine/CH U	0,000622	0,002358	2,35E-05	9,7E-05
Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,001563	0,002754	0,001716	0,001173
Pellets, iron, at plant/GLO U	0,298661	0,164231	0,007598	0,872977
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,186951	0,046717	0,00563	0,042136
Sinter, iron, at plant/GLO U	2,359056	1,508528	0,032319	1,889376
Transport, barge/RER U	0,003076	0,041198	0,000724	0,002508
Transport, freight, rail/RER U	0,174316	0,296171	0,002579	0,086205
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,005498	0,01462	0,000485	0,005367
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	0,043964	0,075787	0,00746	0,037654
Oxygen, liquid, at plant/RER U	0,287525	0,071044	0,002383	0,180567
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U-2050	0,040964	0,038153	0,003042	0,036991
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	10,20302	2,388946	0,016932	0,388224
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	5,1E-06	2,07E-05	-8,4E-07	3,55E-06
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill/CH U	9,76E-06	4,62E-05	-4,2E-07	6,85E-06
Treatment, pig iron production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U	5,71E-06	1,26E-05	1,08E-08	1,22E-05

Impact category	Metal depletion	Fossil depletion
Unit	kg Fe eq	kg oil eq
Total	1098,213	503,0947
Pig iron, at plant/GLO U	0	0
Blast furnace/RER/I U	1,379613	0,22493
Hard coal coke, at plant/GLO U	2,301006	313,0661
Iron ore, 65% Fe, at beneficiation/GLO U	137,9317	0,970063
Limestone, at mine/CH U	0,001718	0,016532
Natural gas, high pressure, at consumer/RER U	0,022274	3,207672
Pellets, iron, at plant/GLO U	271,8223	4,900717
Refractory, fireclay, packed, at plant/DE U	0,428014	8,94863
Sinter, iron, at plant/GLO U	680,8268	43,79755
Transport, barge/RER U	0,02607	0,237843
Transport, freight, rail/RER U	1,319079	3,015395
Transport, lorry >16t, fleet average/RER U	0,070268	0,504216
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	0,237856	5,40479
Oxygen, liquid, at plant/RER U	0,2854	6,437817
Electricity, medium voltage, production GR, at grid/GR U-2050	0,849671	3,702006
Hard coal mix, at regional storage/GR/U	0,711353	108,66
Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	5,47E-06	9,38E-05
Disposal, sludge, pig iron production, 8.6% water, to residual material landfill/CH U	1,42E-05	0,00018
Treatment, pig iron	0,000201	0,000113

production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U		
--	--	--

Πίν. 7 . Αναλυτικά αποτελέσματα συμβατικής μεθόδου για τις 18 κατηγορίες επίπτωσης (περίπτωση μίγματος 2050)

Impact category	Unit	Total	DESTI NY pig iron	Hard coal coke, at plant/G LO U	Epoxy resin insulator (SiO ₂), at plant/RE U	Electricity, medium voltage, production GR, at grid	Zinc oxide, at plant/RE U
Climate change	kg CO ₂ eq	1031,304	1070	180,6239	187,4924	89,09527	-495,908
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-5E-05	0	6,19E-06	2,41E-06	1,21E-05	-7E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	12004,3	0	13447,75	338,3358	581,5324	-2363,31
Photochemical oxidant formation	kg NMV OC	6,697957	0	1,388278	1,296374	4,641391	-0,62809
Particulate matter formation	kg PM10 eq	1,008761	0	0,481438	0,65667	0,071988	-0,20133
Ionising radiation	kg U235 eq	-13,6651	0	19,05852	0,596391	2,302451	-35,6225
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	2,417009	0	1,498915	1,330937	0,228907	-0,64175
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,461614	0	0,50276	0,006797	0,009119	-0,05706
Marine eutrophication	kg N eq	0,835002	0	0,520296	0,418898	0,072955	-0,17715
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-	-4,1985	0	0,057761	0,061832	0,134807	-4,45292

	DB eq	2					
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	6,493597	0	7,20649	0,228525	0,268434	-1,20985
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	9900,334	0	11293,18	228,8114	412,5833	-2034,24
Agricultural land occupation	m2a	30,62691	0	33,53631	0,086533	0,379681	-3,37561
Urban land occupation	m2a	7,294816	0	7,891114	0,077129	0,353624	-1,02705
Natural land transformation	m2	-0,0269	0	0,058752	0,000964	0,028191	-0,11481
Water depletion	m3	2,487912	0	2,031937	0,656912	0,342858	-0,5438
Metal depletion	kg Fe eq	-2,61843	0	2,653528	0,403251	7,875309	-13,5505
Fossil depletion	kg oil eq	274,4207	0	361,0289	87,317	34,31262	-208,238

Πίν. 8 . Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου DESTINY για τις 18 κατηγορίες επίπτωσης (περίπτωση μίγματος 2050)

Impact category	Unit	Total	DK pig iron	Hard coal coke, at plant/GLOU	Natural gas	Electricity, medium voltage, production GR, at grid	Zinc oxide, at plant/REU
Climate change	kg CO2 eq	1330,841	1560	261,7738	1,101705	3,873707	-495,908
Ozone depletion	kg CFC-11 eq	-6,1E-05	0	8,97E-06	0	5,28E-07	-7E-05
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	17151,46	0	19489,49	0,000413	25,28402	-2363,31
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	1,588052	0	2,011998	0,002342	0,2018	-0,62809

Particulate matter formation	kg PM10 eq	0,500019	0	0,697736	0,000488	0,00313	-0,20133
Ionising radiation	kg U235 eq	-7,90135	0	27,62104	0	0,100107	-35,6225
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	1,542121	0	2,172341	0,001577	0,009952	-0,64175
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,671972	0	0,728637	0	0,000396	-0,05706
Marine eutrophication	kg N eq	0,58094	0	0,754052	0,000862	0,003172	-0,17715
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	-4,36334	0	0,083712	1,59E-07	0,005861	-4,45292
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	9,246008	0	10,44419	4,96E-08	0,011671	-1,20985
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	14350,62	0	16366,92	1,47E-08	17,9384	-2034,24
Agricultural land occupation	m2a	45,24424	0	48,60334	0	0,016508	-3,37561
Urban land occupation	m2a	10,42472	0	11,4364	0	0,015375	-1,02705
Natural land transformation	m2	-0,02843	0	0,085148	0	0,001226	-0,11481
Water depletion	m3	2,415947	0	2,944836	0	0,014907	-0,5438
Metal depletion	kg Fe eq	-9,36242	0	3,845693	0	0,342405	-13,5505
Fossil depletion	kg oil eq	322,9617	0	523,2303	6,477408	1,491853	-208,238

Πίν. 9 . Αναλυτικά αποτελέσματα μεθόδου DK για τις 18 κατηγορίες επίπτωσης (περίπτωση μίγματος 2050)

Πηγές- Βιβλιογραφία

1. [IPCC \(2018\). "Summary for Policymakers" \(PDF\). IPCC SR15 2018. pp. 3–24.](#)
2. Allen, M. R.; Dube, O. P.; Solecki, W.; Aragón-Durand, F.; et al. (2018). ["Chapter 1: Framing and Context" \(PDF\). IPCC SR15 2018. pp. 49–91](#)
3. *Climate Focus (December 2015). "The Paris Agreement: Summary. Climate Focus Client Brief on the Paris Agreement III" (PDF). Archived (PDF) from the original on 5 October 2018. Retrieved 12 April 2019.*
4. ["Global Annual Mean Surface Air Temperature Change". NASA. Retrieved 23 February 2020.](#)
5. WCRP Global Sea Level Budget Group (2018). ["Global sea-level budget 1993–present". Earth System Science Data. 10 \(3\): 1551–1590. Bibcode:2018ESSD...10.1551W. doi:10.5194/essd-10-1551-2018. ISSN 1866-3508](#)
6. NOAA. ["January 2017 analysis from NOAA: Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States" \(PDF\). Archived \(PDF\) from the original on 18 December 2017. Retrieved 7 February 2019.](#)
7. World Meteorological Organization (2020). [WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019](#). WMO-No. 1248. Geneva. ISBN 978-92-63-11248-4.
8. Amos, Jonathan (10 May 2013). ["Carbon dioxide passes symbolic mark". BBC. Archived from the original on 29 May 2013. Retrieved 27 May 2013.](#)
9. Ritchie, H. and M. Roser. 2017 [cited 2019 18/3/2019]; Available from: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
10. ["CO2 is making Earth greener—for now". NASA. Retrieved 28 February 2020.](#)
11. Olivier, J.G.J.; Peters, J.A.H.W. (2019). [Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions \(PDF\)](#). The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
12. World Steel Association, *Crude steel production for the 65 countries reporting to worldsteel*. 2015, World Steel Association
13. <https://www.worldsteel.org/about-steel.html>
14. <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f7982217-cfde-4fdc-8ba0-795ed807f513/World%20Steel%20in%20in%20Figures%202020i.pdf>
15. Camp, James McIntyre; Francis, Charles Blaine (1920). [The Making, Shaping and Treating of Steel \(2nd ed.\)](#). Pittsburgh: Carnegie Steel Co. pp. 174. OCLC 2566055.
16. https://en.wikipedia.org/wiki/Pig_iron#cite_note-DThomasBio-2
17. Gianluca Cusano, Miguel Rodrigo Gonzalo, Frank Farrell, Rainer Remus, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho, 2017: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries

18. Rainer Remus, Miguel A. Aguado-Monsonet, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho, 2013: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production
19. Eurofer, *Review of coke oven plants chapter*
20. Eurofer, *Review of energy demand in coke ovens*, p. 1.
21. Eurofer, *Review of the pelletisation chapter*, Eurofer, 2007
22. Eurofer, *General review of Sintering section of BREF*
23. https://en.wikipedia.org/wiki/Blast_furnace
24. Eurofer, *Review blast furnace chapter*
25. John A. Ricketts, 2015: How it works: The Blast Furnace
26. Pasquale Cavaliere, Blast Furnace: Most Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement, 2019
27. Pyrometallurgical removal of zinc from basic oxygen steelmaking dust – A review of best available technology, [Daniel J.C. Stewart, Andrew R. Barron](#), 2020
28. Pyrometallurgical recycling of electric arc furnace dust, [Xiaolong Lin, Zhiwei Peng, Jiaying Yan, Zhizhong Li, Jiann-Yang Hwang, Yuanbo Zhang, Guanghui Li, Tao Jiang](#), 2017
29. Hydrometallurgical processes for Waelz oxide valorization – An overview, Antunano, Cambra, Arias, 2019
30. Development of a combined solid and liquid wastes treatment integrated into a high purity ZnO hydrometallurgical production process from Waelz oxide, Antunano, Cambra, Arias, 2017
31. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries, Miguel A. Aguado-Monsonet, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho, 2017
32. TECHNOLOGIES TO TRANSFORM STEELMAKING SLUDGE/DUST IN BYPRODUCTS, Jorge Madias, 2015
33. A case study on raw material blending for the recycling of ferrous wastes in a blast furnace, Magnus Frohling, Otto Rentz, 2009
34. Hillman, C. and Sassen, K.-J., 'Solutions for dusts and sludges from the BOF process', *Stahl und Eisen*, Vol. 128 Nr. 5, 2006
35. The DK process – for the recovery of iron and zinc from BOF dusts and sludges, Karl Josef Sassen, Ing- Carsten Hillmann, 2011
36. Der DK – Prozess, R. Deike, Dings, 2013
37. Recovery of Zinc from Spent Batteries by the Treatment in a Shaft Furnace, Carsten Hillmann, 2014
38. <https://www.dk-duisburg.de/en/unternehmen/aktuelles.html>
39. Endemann, G., 'Description of the DK-Process', Personal Communication, 2008
40. <https://www.destinyh2020andbeyond.eu/el/>
41. Pre Sustainability BV. *The basics of the LCA methodology*. 19/3/2019]; Available from: <https://www.pre-sustainability.com/sustainability-consulting/lca-methodology-basics>.

42. Zimmermann, A., et al., *Techno-Economic Assessment & Life-Cycle Assessment Guidelines for CO2 Utilization*. 2018.
43. ISO, E., *14044: 2006*. Environmental management-Life cycle assessment- Requirements and guidelines, 2006.
44. Organization, I., *ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. 2006.
45. Curran, M.A., *Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment LCA Compendium - The Complete World of Life Cycle Assessment* ed. W. Klopffer and M.A. Curran. 2017, USA: Springer. 170.
46. Ecoinvent. *Why ecoinvent* 19/3/2019]; Available from: <https://www.ecoinvent.org/about/about.html>.
47. Golsteijn, L. *Updated method ReCiPe 2016 improves accuracy in quantifying impacts on human health and environment* 2017 19/3/2019]; Available from: <https://www.pre-sustainability.com/news/recipe-2016-improves-accuracy-quantifying-impacts-human-health-environment>.
48. A methodology to determine the LCI of steel industry co-products
49. Ανάλυση Κύκλου Ζωής Βιολογικών Διεργασιών Δέσμευσης και Μετατροπής CO2 Βιομηχανικής Κλίμακας για Παραγωγή Χημικών Ενώσεων, Κάλλης, 2019
50. Life Cycle Inventories datasets for future European electricity mix scenarios, Maria Laura Parisi, Simone Mranghi, Riccardo Basosi, Adalgisa Sinicropi, 2020
51. https://www.engineeringtoolbox.com/gas-air-systems-t_22.html
52. https://www.engineeringtoolbox.com/thermodynamics-t_36.html
53. <https://www.wolframalpha.com/examples/mathematics/>
54. <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=google+maps>