ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΜΙΝΟΥ ΤΟΞΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΑΛΥΒΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΣΓΑΡΔΕΛΗΣ

Επιβλέπων: Άνθιμος Ξενίδης
Καθ. ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΑΜΙΝΟΥ ΤΟΞΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΧΑΛΥΒΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΣΓΑΡΔΕΛΗΣ

Επιβλέπων: Άνθιμος Ξενίδης
Καθ. ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις .....

Α. Ξενίδης, Καθ. ΕΜΠ, …… (Υπογραφή)
Σ. Παπαευθυμίου,Επ. Καθ. ΕΜΠ, …… (Υπογραφή)
Δ. Πάνιας, Καθ. ΕΜΠ, …… (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2018

Copyright © Δημήτριος Σγαρδέλης, 2018

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί τη λήξη των προπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών, τμήματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Επομένως, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλο το προσωπικό της σχολής και ιδιαιτέρως τους καθηγητές καθώς με τις γνώσεις και την επιρροή τους συνέβαλαν στη διαμόρφωση του χαρακτήρα και της σκέψης μου. Οι εμπειρίες και οι γνώσεις που αμέριστα μου μετέδωσαν αποτελούν οδηγό στη χάραξη της μετέπειτα πορείας μου εκτός της σχολής.

Η εργασία εκπονήθηκε κατά το τελευταίο εξάμηνο των σπουδών μου και αφορά την προσομοίωση των βασικών διεργασιών ενός χαλυβουργείου με χρήση του λογισμικού HSC Chemistry της Outotec Oyj με στόχο τον υπολογισμό των ισοζυγίων μάζας του. Η προσομοίωση αυτή έγινε χρησιμοποιώντας ως μελέτη περίπτωσης το χαλυβουργείο της ΣΙΔΕΝΟΡ στη Θεσσαλονίκη του ομίλου ΒΙΟΧΑΛΚΟ.

Ο βασικός όγκος εργασιών, που περιλαμβάνει την διαμόρφωση του διαγράμματος ροής, την τροφοδοσία των επιμέρους μονάδων, των χημικών μοντέλων και των ρευμάτων με στοιχεία, και, τέλος, την εκτέλεση του προγράμματος προσομοίωσης, έγινε στο Εργαστήριο Μεταλλουργίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών. Ωστόσο, αναζητήθηκαν στοιχεία λειτουργίας της χαλυβουργίας της ΣΙΔΕΝΟΡ κατά την παραμονή μου στις εγκαταστάσεις της κατά τον Ιούλιο του 2018.

Στο σημείο αυτό, θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή Άνθιμο Ξενίδη για την καθοδήγηση και την υπομονή του, καθώς και τη διαρκή προσπάθεια και συμβολή του κατά την εκπόνηση της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Καθ. Σπύρο Παπαευθυμίου για την συμμετοχή του στην ανάθεση του θέματος και τις συμβουλές του, καθώς επίσης και τον Καθ. Δημήτριο Πάνια για τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία ΣΙΔΕΝΟΡ για την αποδοχή της παρουσίας μου στις εγκαταστάσεις της και το επιστημονικό της προσωπικό και, κυρίως, τον Δρ. Ιωάννη Στογιάννη για τις ανεκτίμητες πληροφορίες, που μου προσέφεραν. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία ΛΑΡΚΟ, η οποία μου παραχώρησε το λογισμικό HSC Chemistry για την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω όλους τους μηχανικούς αντίστοιχων βιομηχανιών, από τους οποίους αναζητήθηκαν και δόθηκαν στοιχεία και να μην αναφερθώ στην πολύτιμη και καθοριστική συνεισφορά του Δρ. Λευτέρη Μπούριθη, χωρίς τη συμμετοχή του οποίου, η προσπάθειά μου θα ήταν ατελέσφορη. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του Εργαστηρίου Μεταλλουργίας για τη δημιουργία ενός ευχάριστου και δημιουργικού περιβάλλοντος εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένειά μου για τη διαρκή ηθική υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Προλογος **1**

Περιεχομενα **2**

Σύνοψη **10**

Abstract **12**

1. Εισαγωγη **14**

2. Παραγωγή Χάλυβα **16**

2.1 Κύρια Μέθοδος Παραγωγής Χάλυβα από Παλαιοσίδηρο 16

2.2 Τήξη στην Ηλεκτρική Κάμινο Τόξου 17

2.2.1 Ηλεκτρική κάμινος ανοιχτού τόξου - Περιγραφή 18

2.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά 19

2.2.2.1 Κινήσεις ηλεκτρικής καμίνου 19

2.2.2.2 Ψύξη της καμίνου 19

2.2.2.3 Ηλεκτρόδια 20

2.2.2.4 Ηλεκτρικό ρεύμα 21

2.2.3 Τεχνικές και καινοτομίες 22

2.2.3.1 Τεχνική αφρισμού της σκωρίας 22

2.2.3.2 Μετάκαυση απαερίων 23

2.2.3.3 Προθέρμανση του scrap 24

2.2.3.4 Διαχείριση σκωρίας 25

2.3 Μεταλλουργία Κάδου 26

2.3.1 Εμφύσηση αργού 26

2.3.2 Θέρμανση και αναθέρμανση 27

2.3.2.1 Θέρμανση μέσω εμφύσησης οξυγόνου 27

2.3.2.2 Θέρμανση μέσω ηλεκτρικού τόξου 27

2.3.3 Αποφωσφορίωση 29

2.3.4 Αποθείωση 30

2.3.4.1 Μέθοδος Thyssen-Niederrheim 31

2.3.4.2 Ανάδευση με αργό και δημιουργία ασβεστοαλουμινικής σκωρίας 31

2.3.4.3 Μέθοδος “EXOSLAG” 32

2.3.4.4 Ρυθμός αποθείωσης 32

2.3.5 Αποξείδωση και απομάκρυνση αερίων 33
2.3.5.1 Αποξείδωση 33
2.3.5.2 Απομάκρυνση N_2, H_2 33
2.4 Χύτευση 33
2.4.1 Συνεχής χύτευση 34
2.4.1.1 Tundish (Διανομέας) 35
2.5 Παραγωγική Διαδικασία της Σιδενόρ Βιομηχανική Χάλυβα 36
3. HSC CHEMISTRY 9 38
3.1 Αρχικό Μενού 38
3.2 Υποσύστημα "Sim" 39
3.2.1 Μπάρες πληροφοριών 39
3.2.2 Μπάρα "Sim" 40
3.2.3 Εκκίνηση προσομοίωσης 41
3.3 "Reactions Unit" 41
3.3.1 Είσοδος 41
3.3.2 Φύλλο εργασίας "Output" 43
3.3.3 Φύλλο εργασίας "Distribution" 44
3.3.4 Σημεία ελέγχου ("Controls") 45
3.3.5 Φύλλο εργασίας "Model" 46
4. Μοντέλο 49
4.1 Παραδοχές 49
4.2 Διάγραμμα Ροής 50
4.3 Είσοδος στην Ηλεκτρική Κάμινο 51
4.3.1 Παλαιοσίδηρος (scrap) 51
4.3.2 Οξυγόνο 52
4.3.3 Άνθρακας εμφύσησης 52
4.3.4 Ηλεκτρόδια 52
4.3.5 Συλλιπάσματα 52
4.3.6 Άνθρακας καλαθιού 53
4.3.7 Πυρίμαχα 53
4.3.8 Φυσικό αέριο 55

4.4 Έξοδος Ηλεκτρικής Καμίνου 55
4.4.1 Απαέρια 55
4.4.2 Σκωρία 56
4.4.3 Μέταλλο 57
4.4.4 Scrap EAF 57
4.5 Ρεύματα Εισόδου στον Κάδο 57
4.5.1 Μέταλλο 57
4.5.2 Ηλεκτρόδια Ladle 57
4.5.3 Πρόσθετα 58
4.5.4 Συλλιπάσματα Ladle 58
4.5.5 Πυρίμαχα Ladle 58
4.5.6 Αργό 58
4.6 Ρεύματα Εξόδου στον Κάδο 59
4.6.1 Απαέρια Ladle 59
4.6.2 Σκωρία Ladle 59
4.6.3 Scrap Ladle 59
4.6.4 Προϊόν Ladle 59
4.7 Χύτευση 60
4.7.1 Σκωρία χύτευσης 60
4.7.2 Σίδηρος σκάφης 60
4.7.3 Τελικό προϊόν 60
4.8 Πρότυπο Ηλεκτρικής Καμίνου 60
4.8.1 P 61
4.8.2 Si, Mn, Cr 61
4.8.3 Zn, Pb 62
4.8.4 Mg 63
4.8.5 Ca 63
4.8.6 C 63
4.8.7 Fe 64
4.8.8 S 65
4.8.9 O 66

4.8.10 Ni, Cu, V, H 67
4.8.11 Al 67
4.9 Πρότυπο Μεταλλουργίας Κάδου 67
4.10 Αντιδράσεις Ρεύματος «Προσθήκες» 68
4.10.1 Κράματα 68
4.10.2 C 68
4.11 Πρότυπο Χύτευσης 69
5. Αποτελέσματα Προσομοίωσης 70
5.1 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Φάσεων για τις τρεις Μονάδες 70
5.2 Αναλυτικοί Πίνακες Ρευμάτων 71
5.2.1 Ηλεκτρική κάμινος – είσοδος 71
5.2.2 Ηλεκτρική κάμινος – έξοδος 73
5.2.3 Μεταλλουργία κάδου – είσοδος 76
5.2.4 Μεταλλουργία κάδου – έξοδος 79
5.2.5 Χύτευση- είσοδος 82
5.2.6 Χύτευση – έξοδος 85
5.3 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Ρευμάτων 87
5.3.1 Ηλεκτρική κάμινος 87
5.3.2 Μεταλλουργία κάδου 89
5.3.3 Χύτευση 91
6. Ανάλυση Ευαισθησίας 92
6.1 Ποσοστό Χώματος στο Scrap 92
6.2 Ποσοστό Απωλειών στη Χύτευση 93
6.3 Καθαρότητα Οξυγόνου Εμφύσησης της Ηλεκτρικής Καμίνου 93
7. Συμπεράσματα 95
8. Βιβλιογραφία 97

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Ιδιότητες σκωρίας ηλεκτρικής καμίνου και υψικαμίνου. 25

Πίνακας 4.1. Χημική σύσταση Scrap. 51

Πίνακας 4.2. Χημική σύσταση του άνθρακα εμφύσησης. 52

Πίνακας 4.3. Χημική σύσταση ασβέστη (quick lime). 53

Πίνακας 4.4. Σύσταση ανθρακομαγνησιακών πυρίμαχων τούβλων. 53

Πίνακας 4.5. Σύσταση πυρίμαχης μάζας του πυθμένα της ηλεκτρικής καμίνου. 54

Πίνακας 4.6. Σύσταση πυρίμαχης μάζας επισκευών. 54

Πίνακας 4.7. Μέση χημική σύσταση πυρίμαχων υλικών της ηλεκτρικής καμίνου. 54

Πίνακας 4.8. Χημική σύσταση φυσικού αερίου. 55

Πίνακας 4.9. Χημική σύσταση απαερίων. 56

Πίνακας 4.10. Χημική σύσταση σκωρίας ηλεκτρικής καμίνου. 57

Πίνακας 4.11. Ισοδύναμη περιεκτικότητα Fe, Si, Mn στο μίγμα κραμάτων που εισάγεται στη μεταλλουργία κάδου. 58

Πίνακας 4.12. Χημική σύσταση συλλιπασμάτων για τη μεταλλουργία κάδου. 58

Πίνακας 4.13. Χημική σύσταση σκωρίας Ladle Furnace 59

Πίνακας 4.14. Χημική σύσταση τελικού προϊόντος. 60

Πίνακας 4.15. Αντιδράσεις φωσφόρου. 61

Πίνακας 4.16. Ο βαθμός προόδου των αντιδράσεων τήξης των στοιχείων που ορίζεται μέσω Control και ο βαθμός οξείδωσής τους που αποτελεί το υπόλοιπο ποσοστό των στοιχείων. 61

Πίνακας 4.17. Πίνακας για την κατανομή οξειδίων στα απαέρια και τη σκωρία. 62

Πίνακας 4.18. Οι αντιδράσεις τήξης των οξειδίων του πυριτίου, του μαγγανίου και του χρωμίου. 62

Πίνακας 4.19. Οι αντιδράσεις οξείδωσης του ψευδαργύρου και του μολύβδου. 63

Πίνακας 4.20. Αντιδράσεις μαγνησίου. 63

Πίνακας 4.21. Αντιδράσεις ασβεστίου. 63

Πίνακας 4.22. Αντιδράσεις άνθρακα. 64

Πίνακας 4.23. Αντιδράσεις σιδήρου. 65

Πίνακας 4.24. Αντιδράσεις θείου. 66

Πίνακας 4.25. Η αντίδραση του διαλελυμένου στο μέταλλο οξυγόνου. 67

Πίνακας 4.26. Οι αντιδράσεις τήξης του νικελίου, του χαλκού, του βαναδίου και του τιτανίου. 67

Πίνακας 4.27. Οι αντιδράσεις του αλουμινίου. 67

Πίνακας 4.28. Αντιδράσεις διάσπασης ανθρακικών ενώσεων, αποθείωσης και τήξης στοιχείων και οξειδίων. 68

Πίνακας 4.29. Αντιδράσεις αποξείδωσης της δευτερογενούς μεταλλουργίας. 68

Πίνακας 4.30. Η αντίδραση τήξης των πυριμάχων. 69

Πίνακας 5.1. Ποσότητες εισόδου και εξόδου για τις φάσεις της ηλεκτρικής καμίνου. 70

Πίνακας 5.2. Ποσότητες εισόδου και εξόδου για τις φάσεις στον κάδο. 70

Πίνακας 5.3. Ποσότητες εισόδου και εξόδου για τις φάσεις της χύτευσης. 71

Πίνακας 5.4. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εισόδου και ποσότητες αέριας φάσης στα ρεύματα εισόδου ηλεκτρικής καμίνου, καθώς και επιμέρους συστατικών. 71

Πίνακας 5.5. Ποσότητες εισόδου ηλεκτρικής καμίνου φάσεων υγρού χάλυβα, υγρής σκωρίας και στερεής φάσης καθώς και επιμέρους συστατικών. 72

Πίνακας 5.6. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εξόδου και ποσότητες αέριας φάσης και υγρού χάλυβα στα ρεύματα εξόδου της ηλεκτρικής καμίνου, καθώς και επιμέρους συστατικών. 73

Πίνακας 5.7. Ποσότητες φάσης στερεών στα ρεύματα εξόδου της ηλεκτρικής καμίνου, καθώς και επιμέρους συστατικών. 74

Πίνακας 5.8. Ποσότητες φάσης υγρής σκωρίας στα ρεύματα εξόδου της ηλεκτρικής καμίνου, καθώς και επιμέρους συστατικών. 75

Πίνακας 5.9. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εισόδου μεταλλουργίας κάδου και ποσότητες αέριας φάσης για τα ρεύματα εισόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών. 76

Πίνακας 5.10. Ποσότητες εισόδου της φάσης υγρού χάλυβα για τα ρεύματα εισόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών. 77

Πίνακας 5.11. Ποσότητες φάσης στερεών και υγρής σκωρίας για τα ρεύματα εισόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών. 78

Πίνακας 5.12. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εξόδου και ποσότητες αέριας φάσης για τα ρεύματα εξόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών. 79

Πίνακας 5.13. Ποσότητες φάσης υγρού χάλυβα για τα ρεύματα εξόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών. 80

Πίνακας 5.14. Ποσότητες φάσης στερεών και υγρής σκωρίας για τα ρεύματα εξόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών. 81

Πίνακας 5.15. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εισόδου και ποσότητες αέριας φάσης και υγρού χάλυβα για τα ρεύματα εισόδου της χύτευσης, καθώς και επιμέρους συστατικών. 82

Πίνακας 5.16. Ποσότητες εισόδου φάσης στερεών για τα ρεύματα εισόδου της χύτευσης , καθώς και επιμέρους συστατικών. 83

Πίνακας 5.17. Ποσότητες φάσης υγρής σκωρίας για τα ρεύματα εισόδου της χύτευσης, καθώς και επιμέρους συστατικών. 84

Πίνακας 5.18. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εξόδου και ποσότητες αέριας, στερεής φάσης και υγρού χάλυβα για τα ρεύματα εξόδου της χύτευσης, καθώς και επιμέρους συστατικών. 85

Πίνακας 5.19. Ποσότητες φάσης υγρής σκωρίας για τα ρεύματα εξόδου της χύτευσης, καθώς και επιμέρους συστατικών. 86

Πίνακας 5.20. Συγκεντρωτικός πίνακας ρευμάτων και φάσεων της ηλεκτρικής καμίνου. 87

Πίνακας 5.21. Συγκεντρωτικός πίνακας ρευμάτων και φάσεων της μεταλλουργίας κάδου. 89

Πίνακας 5.22. Ποσοστά ρευμάτων και φάσεων χύτευσης. 91

Πίνακας 6.1. Ποσοστό χώματος στο scrap. 92

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1. Τυπική εικόνα διάταξης ηλεκτρικής καμίνου τόξου – Πρόσοψη. 18

Εικόνα 2.2. Τυπική εικόνα διάταξης ηλεκτρικής καμίνου τόξου – Κάτοψη. 18

Εικόνα 2.3. Εξωτερική πλευρά οροφής της καμίνου. 19

Εικόνα 2.4. Ηλεκτρόδια ηλεκτρικής καμίνου τόξου. 20

Εικόνα 2.5. Η μεταφορά θερμότητας από το τόξο στο μέταλλο. Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το τόξο είναι 36 kA και το μήκος του τόξου 25 cm. 29

Εικόνα 2.8. Το αρχικό μενού του HSC Chemistry. 38

Εικόνα 2.9. Η αρχική οθόνη του Flowsheet Simulation. 39

Εικόνα 2.10. Τα Docking Bars. 40

Εικόνα 2.11. Η μπάρα Sim. 40

Εικόνα 2.12. Το εικονίδιο εκκίνησης της προσομοίωσης. 41

Εικόνα 2.13. Αρχική οθόνη του φύλλου εργασίας Input των Reactions Unit. 42

Εικόνα 2.14. Η οθόνη του φύλλου εργασίας Output. 44

Εικόνα 2.15. Η οθόνη του φύλλου εργασίας Distribution. 45

Εικόνα 2.16. Η οθόνη του φύλλου εργασίας Controls 46

Εικόνα 2.17. Το μενού Model για τη λειτουργία Chemical Reactions Wizard. 47

Εικόνα 2.18. Η οθόνη του οδηγού χημικών αντιδράσεων (Chemical Reactions Wizard). 48

Εικόνα 4.1. Το διάγραμμα ροής της προσομοίωσης παραγωγής χάλυβα. 50

Εικόνα 4.2. Διάγραμμα απεικόνισης της σχέσης του διαλελυμένου οξυγόνου και άνθρακα σε ισορροπία με το μονοξείδιο του άνθρακα σε διαφορετικές πιέσεις. 66

Εικόνα 5.1. Ποσοστά ρευμάτων εισόδου της ηλεκτρικής καμίνου. 88

Εικόνα 5.2. Ποσοστά ρευμάτων εξόδου της ηλεκτρικής καμίνου. 88

Εικόνα 5.3. Ποσοστά ρευμάτων εισόδου μεταλλουργίας κάδου. 89

Εικόνα 5.4. Ποσοστά ρευμάτων εξόδου μεταλλουργίας κάδου. 90

Εικόνα 6.1. Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή απόδοσης. 92

Εικόνα 6.2. Διάγραμμα μεταβολής ποσότητας scrap που εισάγεται στην ηλεκτρική κάμινο σε συνάρτηση με το ποσοστό χώματος. 93

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Σύστημα συλλογής και ψύξης απαερίων. 23

Σχήμα 2.2. Τυπική εικόνα διάταξης συνεχούς χύτευσης. 35

Σχήμα 2.3. Διαφορετικές διατάξεις του Tundish για διαφορετικά είδη προϊόντος χύτευσης. 36

ΣΥΝΟΨΗ

Ο χάλυβας ως κράμα αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα τεχνικά υλικά σε κατασκευές, αλλά και στην καθημερινότητα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης συγκεκριμένης παραγωγικής διαδικασίας χάλυβα μέσω υπολογιστικού προγράμματος, με σκοπό τη μελέτη ισοζυγίων μάζας της διαδικασίας. Μια από τις βασικότερες μεθόδους αποτελεί η τήξη scrap (παλαιοσιδήρου) μέσω ηλεκτρικής καμίνου, η ρύθμιση της σύστασης του ρευστού μετάλλου κατά τη δευτερογενή μεταλλουργία και η χύτευση του υγρού χάλυβα σε ημιέτοιμο προϊόν. Η παραγωγική διαδικασία, η οποία αποτυπώθηκε, βασίστηκε στη παραγωγική διαδικασία του χαλυβουργείου του εργοστασίου Σιδενόρ Βιομηχανική Χάλυβα Α.Ε. Προκειμένου να γίνει προσέγγιση της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα "HSC Chemistry 9" της εταιρείας "Outotec Oyj". Το υποπρόγραμμα, το οποίο επιλέχθηκε ήταν το Flowsheet Simulation το οποίο δίνει δυνατότητα δημιουργίας διαγράμματος ροής της διαδικασίας.

Εντός του συγκεκριμένου υποπρογράμματος η διαδικασία διακρίνεται σε τρία βασικά σημεία: ηλεκτρική κάμινος τόξου, μεταλλουργία κάδου και χύτευση. Στις μονάδες αυτές δημιουργήθηκαν όλα τα ρεύματα εισόδου και εξόδου και συμπεριλήφθηκαν οι βασικές αντιδράσεις, που πραγματοποιούνται. Λόγω των περιορισμών του λογισμικού πραγματοποιήθηκαν παραδοχές, χωρίς να επηρεάζεται η ακρίβεια της προσομοίωσης. Οι παραδοχές είναι οι εξής:

- Η βάση υπολογισμού των ρευμάτων και των δεδομένων εισόδου είναι 80 tn μετάλλου στην έξοδο της χύτευσης
- Καθώς δεν υπάρχουν μετρήσεις για όλα τα ρεύματα της διαδικασίας, κάποιες πληροφορίες αντλήθηκαν μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης και προστέθηκαν στο μοντέλο
- Κατά την παραγωγική διαδικασία της ΣΙΔΕΝΟΡ, αφού το ρευστό μέταλλο αποχυθεί στον κάδο, ο κάδος δεν προωθείται αμέσως προς τη μεταλλουργία κάδου, αλλά υπάρχει ένα ενδιάμεσο στάδιο, κατά το οποίο γίνονται προσθήκες συλλιπασμάτων, καθώς και ανάδευση με αργό. Αυτό το στάδιο δεν αποτυπώθηκε ανεξάρτητα ως διεργασία στο διάγραμμα ροής, αλλά ενσωματώθηκε στη διεργασία της Μεταλλουργίας Κάδου. Έχει βρεθεί ότι αν συμπεριλαμβανόταν στην προσομοίωση αυτό το ενδιάμεσο στάδιο, οι υπολογισμοί θα γίνονται περισσότερο πολύπλοκοι χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερη διαφορά στα αποτελέσματα
- Επειδή δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στο **HSC** οι χρονικές μεταβολές της σύστασης ορισμένων ρευμάτων π.χ. της ποιότητας των απαερίων της ηλεκτρικές καμίνου τόξου που διαφοροποιείται ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας εντός της καμίνου, αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία και αξιολογήθηκαν συνεχείς μετρήσεις από τις οποίες προέκυψαν οι σχετικοί μέσοι όροι για τον προσδιορισμό της μέσης ποιότητας ρευμάτων όπως για παράδειγμα προσδιορίστηκε η αναλογία CO και CO_2 στα απαέρια της καμίνου

- Επειδή υπάρχουν ορισμένα συστατικά που μπορεί να κατανέμονται σε περισσότερα του ενός ρεύματα για την εύρεση των συντελεστών κατανομής χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα συστάσεων ενός συστατικού στα επιμέρους ρεύματα
- Οι μορφές των οξειδίων του σιδήρου, οι οποίες συναντώνται στα ρεύματα εξόδου είναι δυο: ο αιματίτης και ο βουστίτης. Η σχετική παρουσία του ενός ή του άλλου στα επιμέρους ρεύματα δεν είναι πάντοτε σαφώς προσδιορισμένη, η δε μετατροπή του ενός στο άλλο εξαρτάται κάθε φορά από τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες που επικρατούν στην κάθε διεργασία. Θεωρήθηκε ότι ο αιματίτης βρίσκεται σε όλα τα ρεύματα εξόδου πλην στο ρεύμα του μετάλλου. Στο τελευταίο ρεύμα το οξείδιο του σιδήρου το οποίο περιέχεται στη συγκεκριμένη φάση θεωρείται ότι είναι ο βουστίτης
- Σε ορισμένα ρεύματα, τα οποία αφορούν κυρίως πολύ μικρές απώλειες σε υλικό της ηλεκτρικής καμίνου, της μεταλλουργίας κάδου και της χύτευσης δόθηκαν μηδενικές τιμές . Ο λόγος είναι ότι η ποσότητα των ρευμάτων είναι τόσο μικρή, ώστε να μην επηρεάζει τους υπολογισμούς
- Τα ρεύματα απωλειών ενέργειας και ηλεκτρικής ενέργειας των μονάδων δεν υπολογίστηκαν κατά την προσομοίωση, καθώς δεν προσεγγίστηκε το ισοζύγιο ενέργειας της διαδικασίας. Η απεικόνισή τους στο διάγραμμα γίνεται για λόγους πληρότητας της διαδικασίας
- Λόγω του γεγονότος ότι το πρόγραμμα δεν διαθέτει την ένωση Fe_2O_3 σε υγρή μορφή, θεωρήθηκε ότι οι ποσότητες που προκύπτουν μπορούν να αποτυπωθούν σε στερεή μορφή του αιματίτη

Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αποτελεί ένα ισοζύγιο μάζας με σκοπό την παραγωγή σιδήρου προς χύτευση 80 tn με προκαθορισμένη χημική σύσταση. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια ανάλυση ευαισθησίας της προσομοίωσης, μεταβάλλοντας συγκεκριμένες παραμέτρους. Τέλος, γίνεται μια σύνοψη των αποτελεσμάτων της διαδικασίας και σχολιασμός τους.

ABSTRACT

Steel is one of the most common materials in construction and everyday use. In the current thesis an attempt was made to model specific type of production of steel using suitable software in order to study the mass balance of the process. One of the most common practices in steel production is the melting of scrap by an electric arc furnace and the refining and casting of molten steel as a semi - finished product. As the basis of the simulation, Sidenor Steel Industries' production process was studied. The software used was "HSC Chemistry 9" by the company "Outotec Oyj". This software consists of several modules from which the Flowsheet Simulation was utilized. This module has the potential of drawing a flowchart diagram.

The diagram of this project is focused on three basic elements: the electric arc furnace, the ladle furnace and casting. In these elements all the input and output flows were added, as well as the basic chemical reactions occurring during the process. Due to the limitations of the software, certain simplifications were made. However, these simplifications do not compromise the quality and the integrity of the simulation. The simplifications are:

- As the basis of the calculations, regarding the input flows and input data, is the result of production of 80 tn of steel at the end of the process
- As data for specific flows are unknown, the data were acquired through literature review
- In SIDENOR's process, there is an intermediate step between the electric arc furnace and the ladle furnace. In this step, a portion of additives is introduced to the bath and at the same time argon stirring is utilized. In the current simulation, this step is not implemented in the flowsheet and instead it is integrated in the Ladle Furnace Unit. Through calculations it has been proved that the implementation of this exact step in the simulation would only complicate the calculations, with little to no differences in the results
- In the software **HSC** the changes over time of certain flows cannot be introduced. For example, the chemical composition of the off-gas of the electric arc furnace is affected by the stage of the operation of the electric arc furnace. As a solution, through literature review, graphs presenting measurements of the change of the analogy of carbon monoxide and carbon dioxide in the off-gas of the electric arc furnace were studied. Through these graphs the average analogy of the oxides was extracted and introduced in the calculations
- Specific species are distributed in more than one output flows. In order to specify the distribution of these species, real data where studied regarding the chemical composition and quantities of the output flows in which these species can be found
- There are two compounds regarding iron oxides, which are hematite and wustite. The analogy of these oxides in the output flows cannot always be determined. In addition, the rates in which hematite is transformed to wustite and visa versa, are governed by the reduction/oxidation conditions in each unit. As a result, it is presumed that hematite can be found in all output flows, except for the output flow of molten steel. In this specific flow, it is presumed that only wustite can be found

- The quantity of the flows regarding the mass loss of the electric arc furnace, the ladle furnace and the casting units are excluded from the calculations. The reason is that the quantity of these flows is so small that by omitting the calculations regarding these flows, the results are not affected
- Due to the fact that the energy balance was not studied, the flows of the electric current and energy losses of the units were not implemented in the calculations. The illustration of these flows in the flowsheet is done to present a complete flowsheet of the process
- **HSC**'s database does not include hematite in its liquid state. As a result, the liquid state of hematite is presented at its solid state

The result of the whole process is a mass balance resulting in 80 tn of steel with a specific chemical composition. Additionally, a sensitivity analysis of the simulation is realized by varying certain parameters. In the last chapter, the results and conclusions of the whole project are presented.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο χάλυβας ως υλικό αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα υλικά στις κατασκευές αλλά και στην καθημερινή χρήση. Χάλυβες ορίζονται τα κράματα Fe – C με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη του 2,1% κ.β. Ο χάλυβας είναι ένα στερεό διάλυμα παρεμβολής του άνθρακα στο σίδηρο. Ως διάλυμα παρεμβολής ορίζεται η εναπόθεση μικρότερων ατόμων εντός της κρυσταλλικής δομής μεγαλύτερων ατόμων, χωρίς όμως να καταλαμβάνουν θέσεις της δομής. Ένα χαρακτηριστικό του χάλυβα που οφείλεται στο σίδηρο είναι η αλλοτροπία. Λόγω της αλλοτροπίας του σιδήρου, ο χάλυβας αποτελείται από διαφορετικές κρυσταλλικές δομές σε διαφορετικές θερμοκρασίες και άρα διαφορετικές μικρογραφικές δομές όπως τον φερρίτη και τον ωστενίτη. Με την κατακρήμνιση του άνθρακα στο κρυσταλλικό πλέγμα του σιδήρου και την εκμετάλλευση των διαφορετικών κρυσταλλικών δομών μέσω συγκεκριμένων τεχνικών, κατασκευάζονται κράματα με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, προσαρμοσμένα για κάθε χρήση. Ωστόσο, εκτός από το σχεδιασμό και τη μεταποίηση προϊόντων χάλυβα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μελέτη της παραγωγής του χάλυβα.

Η παραγωγική διαδικασία είναι γνωστή, καθώς χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια στην πλειονότητα των χαλυβουργείων. Πρόκειται για μη συνεχή διαδικασία, δηλαδή χωρίς διαρκή τροφοδοσία υλικού (batch process). Το υλικό που χρησιμοποιείται ονομάζεται scrap και είναι υλικό που έχει περατώσει το χρόνο λειτουργίας του. Το υλικό τήκεται σε ηλεκτρικές καμίνους τόξου σχεδιασμένες κατάλληλα για τη μεταποίηση του scrap. Η εφεύρεση της ηλεκτρικής καμίνου αποδίδεται στον Paul Heroult το 1889. Από τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και έπειτα γίνονται διαρκείς προσπάθειες βελτιστοποίησης της καμίνου, αύξησης της αποδοτικότητας, καθώς και μείωσης του κόστους λειτουργίας της. Για να γίνει κατανοητή η σημασία της συγκεκριμένης τεχνολογίας στην παραγωγή χάλυβα, πρέπει να σημειωθεί ότι για την ανακύκλωση του scrap η χρήση ηλεκτρικής καμίνου έχει τον κύριο ρόλο. Επομένως, η συμβολή στην κοινωνία είναι προφανής, ενώ ταυτόχρονα εισάγεται προστιθέμενη αξία στην πρώτη ύλη. Η χρήση της ηλεκτρικής καμίνου καθιστά τα χαλυβουργεία μέρος της κυκλικής οικονομίας, μιας προσπάθειας επαναχρησιμοποίησης υλικών που έχουν περατώσει τη λειτουργία τους. Τέλος, σημειώνεται ότι η χρήση της ηλεκτρικής καμίνου αναλογεί στο 29% της συνολικής παραγωγής ανεπεξέργαστου χάλυβα (Madias 2014).

Ενώ ο ρόλος της ηλεκτρικής καμίνου έχει ήδη αναφερθεί, αναπόσπαστα κομμάτια της παραγωγικής διαδικασίας αποτελούν και τα επόμενα στάδια. Αφού το υλικό τηχθεί, στη συνέχεια το ρευστό μέταλλο αποχύνεται σε ένα χωνευτήριο, το οποίο ονομάζεται κάδος. Το επόμενο βήμα είναι ο περαιτέρω καθαρισμός από προσμίξεις του ρευστού μετάλλου προκειμένου το μέταλλο να αποκτήσει την απαιτούμενη χημική σύσταση, στο τμήμα της μεταλλουργίας κάδου. Το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας είναι η χύτευση του μετάλλου με σκοπό να ψυχθεί και να μετατραπεί σε ενδιάμεσο (ημιέτοιμο) προϊόν. Το επόμενο βήμα είναι το προϊόν που έχει παραχθεί να αποσταλεί σε εγκαταστάσεις, οι οποίες μεταποιούν ημιέτοιμα προϊόντα χάλυβα σε οπλισμούς δομικών έργων ή σε τελικά προϊόντα διαφορετικών εφαρμογών.

Κατά τη παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια προσπάθεια μοντελοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας χάλυβα, που χρησιμοποιείται κυρίως ως πρώτη ύλη για την παραγωγή δομικού υλικού, μέσω του προγράμματος “HSC Chemistry 9”. Ως πρότυπο της

προαναφερθείσας παραγωγικής διαδικασίας απετέλεσε η παραγωγική διαδικασία του χαλυβουργείου του εργοστασίου Σιδενόρ Βιομηχανική Χάλυβα Α.Ε.

Ωστόσο, λόγω των περιορισμών του λογισμικού πραγματοποιήθηκαν κάποιες απλοποιήσεις προκειμένου να είναι δυνατή η αποτύπωση της παραγωγικής διαδικασίας. Οι περιορισμοί που τέθηκαν δεν επηρεάζουν την ακρίβεια της προσομοίωσης.

Στη συνέχεια γίνεται μια αναφορά στα κύρια σημεία της εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο θα αναλυθεί η παραγωγή του χάλυβα μέσω ηλεκτρικών καμίνων τόξου και των ακόλουθων διαδικασιών. Θα παρουσιασθούν τα κύρια στοιχεία της κάθε μονάδας και η βασική λειτουργία τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα γίνει μια αναφορά στο λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιήθηκε, με επίκεντρο το υποπρόγραμμα στο οποίο αποτυπώθηκε η παραγωγική διαδικασία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η προσομοίωση με τα διαφορετικά ρεύματα εισόδου και εξόδου, καθώς και τις αντιδράσεις και τους περιορισμούς που τη διέπουν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορα σενάρια που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τη διεργασία, όπως η ποιότητα (καθαρότητα) του οξυγόνου εμφύσησης κ.α.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, τα οποία εξάγονται από την ανάλυση της προσομοίωσης και των σεναρίων.

2. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΛΥΒΑ

2.1 Κύρια Μέθοδος Παραγωγής Χάλυβα από Παλαιοσίδηρο

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι για την παραγωγή χάλυβα από παλαιοσίδηρο (scrap). Σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις, γίνονται τροποποιήσεις μιας βασικής μεθόδου που περιλαμβάνει α) την τήξη των παλαιοσιδήρων σε ηλεκτρικές καμίνους, β) την απόχυση του μετάλλου και κατεργασία του σε κάδο (δευτερογενής μεταλλουργία ή μεταλλουργία κάδου) και γ) την τροφοδοσία του παραχθέντος υγρού χάλυβα σε μονάδες τελικής χύτευσης για την παραγωγή μπιγιετών χάλυβα που στη συνέχεια θα τροφοδοτήσουν τις διεργασίες μορφοποίησης και παραγωγής τελικών προϊόντων. Στόχος των πολλών τροποποιήσεων της βασικής μεθόδου που έχουν προταθεί ή/και εφαρμοσθεί είναι κυρίως η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης της εκάστοτε διαδικασίας.

Αρχικά, εισάγεται παλαιοσίδηρος (scrap) και εναποτίθεται σε ειδικά σχεδιασμένο χώρο αποθήκευσης. Στη συνέχεια, τα διάφορα είδη scrap αναμειγνύονται προκειμένου να δημιουργηθεί μια τροφοδοσία στην ηλεκτρική κάμινο με περίπου ομοιόμορφη σύσταση. Επίσης, στο scrap μπορεί να προστεθεί και ποσότητα άνθρακα ώστε να δημιουργηθεί μονοξείδιο του άνθρακα στην αρχή της διαδικασίας και να μειωθούν οι ποσότητες ανεπιθύμητων διαλελυμένων αερίων.

Στη συνέχεια, το scrap τροφοδοτείται μέσω καλαθιών από την οροφή της καμίνου. Το επόμενο βήμα είναι η τήξη του scrap με σκοπό τη δημιουργία ρευστού μετάλλου, ενώ παράλληλα σχηματίζεται και ξεχωριστή φάση που επιπλέει στο μέταλλο, η φάση της σκωρίας. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτό το στάδιο, εμφυσάται μέσω των ακροφυσίων φυσικό αέριο σε συνδυασμό με οξυγόνο, ώστε μέσω της καύσης να δοθεί ενέργεια στο σύστημα. Ταυτόχρονα, γίνεται καταβίβαση ηλεκτροδίων που μέσω τριφασικού ρεύματος προσδίδουν την απαραίτητη ενέργεια. Κατά το στάδιο αυτό, επειδή η τροφοδοσία είναι χονδρομερής, υπάρχει εμφύσηση οξυγόνου με μεγάλη πίεση, με στόχο την κοπή μεγάλων τεμαχίων.

Αφού τηχθεί το scrap και σχηματισθεί σκωρία, συνυπάρχουν μαζί με το ρευστό μέταλλο και τεμάχια scrap που επιπλέουν. Σε αυτό το στάδιο προστίθεται ασβέστης ως συλλίπασμα, προκειμένου να ρυθμιστεί η σύσταση της σκωρίας. Μετά την προσθήκη των συλλιπασμάτων, προστίθεται επιπλέον scrap, ώστε να πραγματοποιηθεί εκ νέου η παραπάνω διαδικασία και να προκύψει η επιθυμητή ποσότητα μετάλλου. Το επόμενο στάδιο είναι η δειγματοληψία (πρόβα) προκειμένου να διαπιστωθεί εάν το σύστημα βρίσκεται στην κατάλληλη θερμοκρασία (περίπου 1550°C) για την τήξη του σιδήρου. Παράλληλα, με το δείγμα αυτό εντοπίζονται οι συγκεντρώσεις σε Mn, Si, S, P, C.

Εφόσον η ανάλυση είναι ικανοποιητική, εμφυσάται οξυγόνο στη μέγιστη ένταση και ανθρακίτης ώστε να πραγματοποιηθεί το φαινόμενο του αφρισμού της σκωρίας. Ο αφρισμός είναι απαραίτητος για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων εντός της καμίνου και προστασία των πυριμάχων. Αφού η κάμινος παραμείνει σε αυτές τις συνθήκες για αρκετό χρονικό διάστημα, γίνεται αποσκωρίωση, δηλαδή απομακρύνεται η σκωρία από την κάμινο. Φυσικά, ένα μέρος της σκωρίας δεν απομακρύνεται, καθώς θα χρησιμοποιηθεί στο επόμενο χυτήριο. Τέλος, αφού πραγματοποιηθεί εκ νέου δειγματοληψία για τη θερμοκρασία, το ρευστό μέταλλο

αποχύνεται στον κάδο, όπου θα οδηγηθεί στη μεταλλουργία κάδου προς περαιτέρω καθαρισμό και ρύθμιση της ποιότητας του. Ο κύκλος της ηλεκτρικής καμίνου είναι 50 με 55 λεπτά.

Αφότου το ρευστό μέταλλο έχει αποχυθεί στον κάδο, ο κάδος οδηγείται στο τμήμα της μεταλλουργίας κάδου. Ωστόσο, πριν την απόχυση και μεταφορά προστίθεται στον κάδο ορισμένη ποσότητα συλλιπασμάτων και παράλληλα, εμφυσάται αργό το οποίο αναδεύει το ρευστό μέταλλο.

Στον κάδο, προστίθεται ένας θόλος ο οποίος φέρει ηλεκτρόδια. Η όλη διαδικασία που εφαρμόζεται ονομάζεται μεταλλουργία κάδου (**Ladle Furnace**). Τα ηλεκτρόδια προσφέρουν ηλεκτρική ενέργεια, που είναι απαραίτητη για την διατήρηση της θερμότητας. Στο σημείο αυτό προστίθενται συλλιπάσματα, αλλά και σιδηροκράματα προκειμένου να ρυθμιστεί η σύσταση της σκωρίας και άρα του μετάλλου. Ταυτόχρονα και στο στάδιο αυτό συνεχίζεται η διοχέτευση ποσότητας αργού, που αποσκοπεί σε ανάδευση εντός του κάδου. Κατά τη μεταλλουργία κάδου, η διαδικασία μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με τη διαδικασία της ηλεκτρικής καμίνου. Το μεγαλύτερο μέρος των ακαθαρσιών έχει απομακρυνθεί στην ηλεκτρική κάμινο και, επομένως, στη μεταλλουργία κάδου ρυθμίζονται οι περιεκτικότητες σε προσμίξεις με βάση τις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος. Αφού ολοκληρωθούν οι αντιδράσεις και μέσω δείγματος διαπιστωθεί ότι η σύσταση είναι κατάλληλη, το ρευστό μέταλλο τροφοδοτείται προς τη χύτευση.

Στο στάδιο της χύτευσης το ρευστό υλικό αποχύνεται σε ειδική σκάφη (**Tundish -** Διανομέας) από όπου προωθείται στις γραμμές χύτευσης, οι οποίες περιέχουν λάδι ή χυτευτική σκόνη προκειμένου να πραγματοποιηθεί λίπανση στο καλούπι, καθώς και μια πρώτη ψύξη του μετάλλου. Στο πέρας του καλουπιού (mould), υπάρχουν καταιονιστήρες νερού, οι οποίοι ψύχουν το μέταλλο προς ημίρρευστη κατάσταση. Μετά την έξοδο από το καλούπι, το ημίρρευστο υλικό προωθείται με ράουλα και ψύχεται περαιτέρω στον αέρα. Το επόμενο στάδιο είναι η κοπή του υλικού σε μπιγιέτες μέσω οξυγονοκοπής (εμφύσηση οξυγόνου μεγάλης πίεσης) και τέλος το τεμάχιο αφαιρείται και ψύχεται σε ατμοσφαιρικό αέρα. Το ημιέτοιμο προϊόν προωθείται σε μονάδες, οι οποίες το επεξεργάζονται για την παραγωγή τελικού προϊόντος χάλυβα.

Στη συνέχεια, στις επόμενες παραγράφους δίδονται αναλυτικά στοιχεία για την κάθε μονάδα παραγωγής χάλυβα.

2.2 Τήξη στην Ηλεκτρική Κάμινο Τόξου

Οι ηλεκτρικές κάμινοι εισάγουν ηλεκτρική ενέργεια, την οποία μετατρέπουν σε θερμική. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές (όπως κάμινοι με αντίσταση και κάμινοι με πλάσμα), όμως οι πιο διαδεδομένες είναι οι ηλεκτρικές κάμινοι τόξου. Η κατηγορία αυτή χωρίζεται σε δυο υποκατηγορίες οι οποίες αφορούν το είδος του τόξου και χωρίζονται σε ανοιχτού και εμβαπτιζόμενου. Η πρώτη τεχνολογία είναι η κάμινος ανοιχτού τόξου, στην οποία τα ηλεκτρόδια δεν εισέρχονται στην τηγμένη μάζα και η θερμότητα μεταφέρεται μέσω ακτινοβολίας. Στο δεύτερο είδος ηλεκτρικών καμίνων τόξου, τα ηλεκτρόδια εισέρχονται στη σκωρία. Στον κλάδο της χαλυβουργίας χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο κατά το πρώτο στάδιο το πρώτο είδος καμίνου. Ο κύκλος λειτουργίας είναι 50 - 55 min (Ζευγώλης, 2014, Νέου – Συγκούνα).

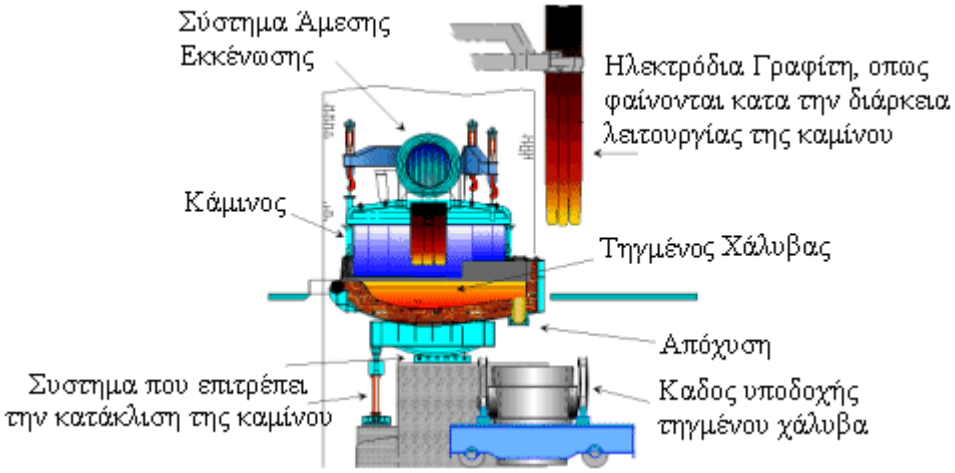
Μια παραλλαγή των ηλεκτρικών καμίνων είναι ο συνδυασμός της ηλεκτρικής και της χημικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια έχει το μεγαλύτερο μέρος της εισαγόμενης ενέργειας, η οποία

κυμαίνεται για διαφορετικές δυναμικότητες καμίνων, καθώς και για διαφορετικό συνδυασμό ηλεκτρικής και χημικής ενέργειας.

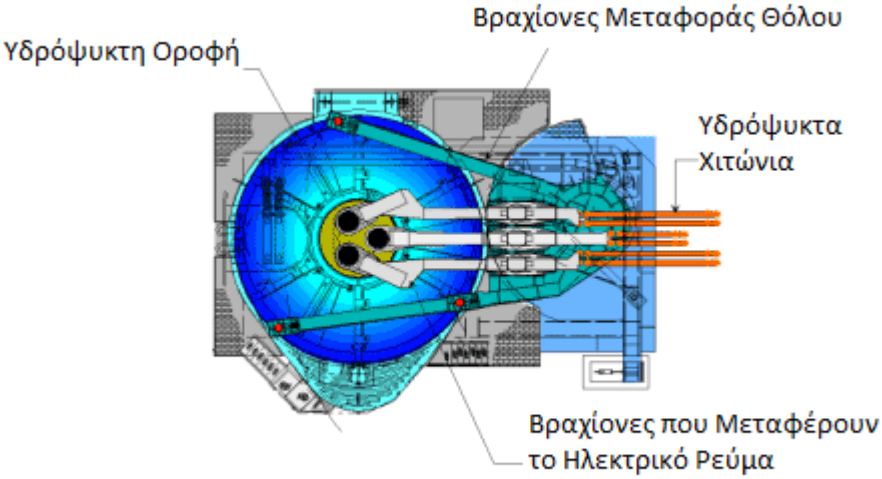
Η υπόλοιπη απαιτούμενη ενέργεια προέρχεται από τις αντιδράσεις, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στην κάμινο είναι εξώθερμες. Προκειμένου να μπορέσουν να πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις απαιτείται σημαντική ποσότητα οξυγόνου η οποία διοχετεύεται μέσω ακροφυσίων (Fruehan, 1998).

2.2.1 Ηλεκτρική κάμινος ανοιχτού τόξου - Περιγραφή

Το πιο διαδεδομένο είδος ηλεκτρικής καμίνου είναι η ανοιχτού τόξου που περιέχει ακροφύσια. (Εικόνα 2.1, Aula et al. 2012 και Εικόνα 2.2, SDMET 2018) Η επιλογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας καμίνου από τα χαλυβουργεία έγινε με γνώμονα την πρώτη ύλη την οποία διαχειρίζονται, καθώς η χαλυβουργία αποτελεί βιομηχανικό κλάδο που διαχειρίζεται υλικό που έχει περατώσει τον χρόνο λειτουργίας του (scrap). Επομένως, οι απαιτήσεις των χαλυβουργείων καλύπτονται μόνο από τις ηλεκτρικές καμίνους ανοιχτού τόξου, τα κύρια χαρακτηριστικά των οποίων αναφέρονται παρακάτω (Ζευγώλης, 2014).



Εικόνα 2.1. Τυπική εικόνα διάταξης ηλεκτρικής καμίνου τόξου – Πρόσοψη.

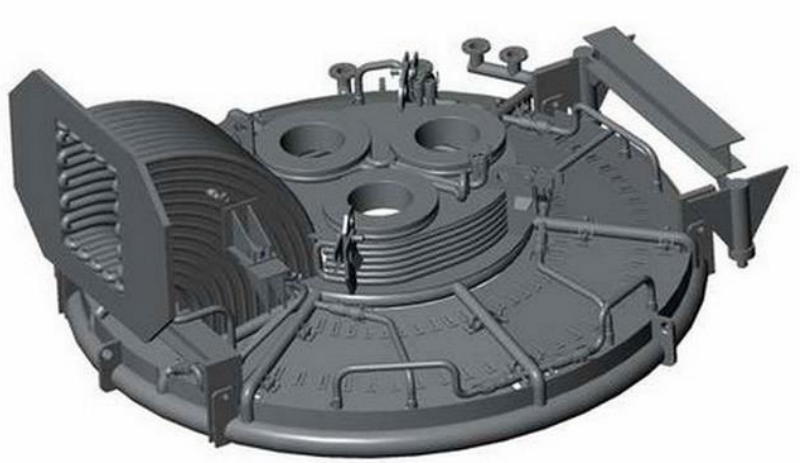


Εικόνα 2.2. Τυπική εικόνα διάταξης ηλεκτρικής καμίνου τόξου – Κάτοψη.

2.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά

2.2.2.1 Κινήσεις ηλεκτρικής καμίνου

Η κάμινος έχει εγκατεστημένο έναν αριθμό βοηθητικών συστημάτων προκειμένου να εκτελούνται συγκεκριμένες κινήσεις κατά τη λειτουργία της. Λόγου χάρη, η οροφή της καμίνου (Εικόνα 2.3, Fabron) μπορεί να εκτελέσει κινήσεις, ώστε να γίνει τροφοδοσία μέσω καλαθιών scrap. Επιπροσθέτως, υπάρχουν συστήματα, τα οποία ελέγχουν την προώθηση των ηλεκτροδίων της καμίνου. Τέλος, η κάμινος μπορεί να αποκτήσει κλίση προς δυο κατευθύνσεις.



Εικόνα 2.3. Εξωτερική πλευρά οροφής της καμίνου.

Μέσω της κλίσης της καμίνου μπορούν να εξαχθούν το μέταλλο και η σκωρία. Ωστόσο, απαιτείται το μέταλλο να μην περιέχει σκωρία, καθώς και η σκωρία να είναι καθαρή από μέταλλο, προκειμένου να μην υπάρχουν απώλειες σε υλικό. Επομένως, εκτός από τους μηχανισμούς που βοηθούν τη κάμινο να «γύρει», υπάρχουν κενά στην κάμινο σε διαφορετικά ύψη από τα οποία εξάγονται οι δυο φάσεις. Είναι προφανές ότι καθώς η σκωρία επιπλέει στο ρευστό μέταλλο, το κενό από το οποίο εξάγεται η σκωρία βρίσκεται σε πιο μεγάλο ύψος σε σχέση με το κενό από το οποίο εξάγεται το μέταλλο. Προς αρωγή του παραπάνω σχεδιασμού, τα κενά βρίσκονται σε αντίθετες πλευρές τις καμίνου. Γι' αυτό το λόγο η κάμινος μπορεί να αποκτήσει κλίση στις δυο πλευρές που υπάρχουν τα κενά (Fruehan, 1998).

2.2.2.2 Ψύξη της καμίνου

Η ηλεκτρική κάμινος αποτελείται από πυρίμαχα υλικά, τα οποία προστατεύουν το κέλυφός της, αλλά και από υδρόψυκτες επιφάνειες (Fruehan, 1998).

Τα πυρίμαχα υλικά ορίζονται ως μη μεταλλικά (κεραμικά) υλικά, τα οποία είναι δύστηκτα σε υψηλές θερμοκρασίες. Άλλες ιδιότητές τους είναι η καλή μηχανική αντοχή, καλή συμπεριφορά στους θερμικούς αιφνιδιασμούς (απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας), καθώς και η δυνατότητά τους να διατηρούν τις φυσικές και χημικές ιδιότητές τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σε όλες τις βιομηχανίες και εφαρμογές, στις οποίες αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες και φυσικά εφαρμόζεται και στην περίπτωση της ηλεκτρικής καμίνου. Ο ρόλος τους είναι η προστασία του κελύφους της μονάδας ή της

κατασκευής αλλά και ο περιορισμός των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον (Τσετσέκου, 2007).

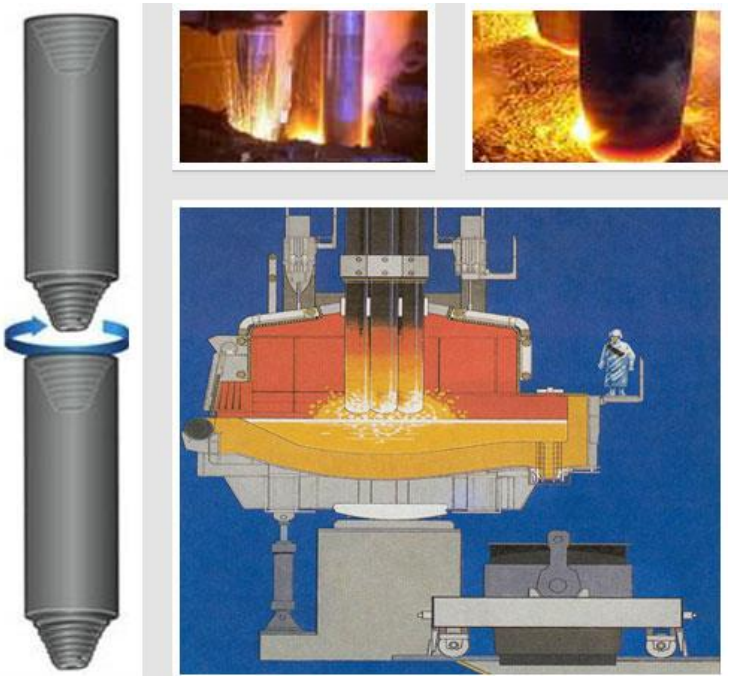
Ιδιαίτερη σημασία έχουν τα πυρίμαχα, τα οποία βρίσκονται σε επαφή με το ρευστό μέταλλο και τη σκωρία, τα οποία είναι συνήθως μαγνησιακά ή ανθρακομαγνησιακά. Επίσης, τα πυρίμαχα τα οποία είναι τοποθετημένα στο σημείο από το οποίο γίνεται η απόχυση, καθώς και στην οροφή είναι ειδικά σχεδιασμένα, ώστε να έχουν καλή αντοχή στα θερμικά σοκ (Fruehan, 1998).

Εκτός από τη χρήση πυριμάχων, γίνεται χρήση υδρόψυκτων επιφανειών. Ενώ αρχικά χρησιμοποιούνταν σε συγκεκριμένα σημεία της ηλεκτρικής καμίνου, πλέον το κέλυφος περικλείεται σχεδόν εξ ’ολοκλήρου από υδρόψυκτες επιφάνειες. Οι επιφάνειες διαρρέονται από νερό το οποίο είναι ανακυκλώμενο και απάγει τη θερμότητα από το κέλυφος εμποδίζοντας τη διαστολή του κελύφους. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μικρότερη θερμική καταπόνηση της ηλεκτρικής καμίνου (Madias 2014, Fruehan, 1998).

Η αντοχή των επιφανειών εξαρτάται από παράγοντες, όπως την ποσότητα του νερού, την ποιότητα, την ταχύτητα και τη ροή του νερού, καθώς και την πίεση του νερού. Γενικά να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη ροή για το νερό στις υδρόψυκτες επιφάνειες, πρέπει να είναι τυρβώδης. Μια άλλη τεχνολογία για τη ψύξη επιφανειών της καμίνου είναι ο καταιονισμός νερού. Συνήθως η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την ψύξη της οροφής, των πλευρικών τοιχωμάτων της καμίνου αλλά και των ηλεκτροδίων (Fruehan, 1998).

2.2.2.3 Ηλεκτρόδια

Η ηλεκτρική κάμινος ανοιχτού τόξου περιέχει τρία προοπτημένα ηλεκτρόδια (Εικόνα 2.4, CoWorker 2013), τα οποία είναι τοποθετημένα στις κορυφές ισόπλευρου τριγώνου. Τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από γραφίτη και γίνεται συνεχής προώθηση υλικού. Τέλος, να σημειωθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται ψύξη και προστασία των ηλεκτροδίων από οξειδώσεις μέσω καταιονισμού με νερό (Fruehan, 1998, Νέου – Συγκούνα).



Εικόνα 2.4. Ηλεκτρόδια ηλεκτρικής καμίνου τόξου.

2.2.2.4 Ηλεκτρικό ρεύμα

Το ρεύμα, το οποίο άγεται από τα ηλεκτρόδια μπορεί να είναι συνεχές ή εναλλασσόμενο. Η επιλογή αφορά την προτίμηση του κάθε χαλυβουργείου. Για το συνεχές ρεύμα, η ηλεκτρική κάμινος αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο το οποίο αποτελεί την κάθοδο, ενώ η άνοδος βρίσκεται στον πυθμένα της καμίνου. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για τη δημιουργία ανόδου στην κάμινο, όπως η τοποθέτηση πολλαπλών ηλεκτροδίων στον πυθμένα ή η τοποθέτηση αγώγιμων πυρίμαχων υλικών. Όσον αφορά στο τόξο, το οποίο σχηματίζεται, δεν αποτελεί ένα συμμετρικό γεωμετρικό σχήμα. Αντίθετα, παράμετροι όπως το μήκος του τόξου και το ρεύμα επηρεάζουν τη φύση του τόξου με μεγαλύτερες τιμές να δυσχεραίνουν τη σταθερότητα του τόξου.

Στην περίπτωση του εναλλασσόμενου ρεύματος όλα τα ηλεκτρόδια άγουν ρεύμα, το οποίο βρίσκεται σε διαφορετική φάση. Η διαφορά δυναμικού του ρεύματος, που άγεται προς τα ηλεκτρόδια πρέπει να φτάνει έως μια συγκεκριμένη τιμή, καθώς αν ξεπεραστεί, το τόξο το οποίο δημιουργείται εντός της καμίνου γίνεται μη διαχειρίσιμο. Επιπροσθέτως, επειδή το ρεύμα άγεται μέσω ελεύθερων ηλεκτρονίων και κατιόντων εντός της καμίνου οι θερμοκρασίες μπορεί να φτάσουν και τους 15.000^{o}C στα πιο θερμά σημεία. Επίσης, η διαφορά δυναμικού εξαρτάται από το μήκος της στήλης του τόξου που δημιουργείται (Fruehan, 1998).

Τα τόξα, τα οποία δημιουργούνται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών αλλά και της χαμηλής τους πυκνότητας μπορούν πολύ εύκολα να αλλάξουν την πορεία τους. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται λόγω των μαγνητικών πεδίων που προέρχεται από τα φορτισμένα τεμάχια scrap. Η ηλεκτρική κάμινος με τη δημιουργία ηλεκτρικών τόξων δημιουργεί και μαγνητικά πεδία. Τα πεδία δεν επηρεάζουν μόνο τα ηλεκτρικά τόξα της καμίνου, αλλά επηρεάζουν και τα βοηθητικά συστήματα, όπως εκείνα τα οποία ευθύνονται για την κίνηση των ηλεκτροδίων. Προκειμένου να αποφευχθούν αστοχίες στα συστήματα, τα καλώδια των συστημάτων τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ισόπλευρο τρίγωνο. Με αυτόν τον τρόπο εξουδετερώνονται οι συνέπειες των μαγνητικών πεδίων, ως ένα σημείο. Ο λόγος είναι ότι κατά την περίοδο τήξης του scrap το ηλεκτρικό τόξο είναι ασταθές και επομένως επηρεάζει τα καλώδια των βοηθητικών συστημάτων (Odenthal et al, 2017).

2.2.2.4.1 Σύγκριση εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος

Ένα από τα πλεονεκτήματα των καμίνων, που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα έναντι του εναλλασσόμενου είναι ότι κατά το συνεχές ρεύμα, το ηλεκτρόδιο διαρρέεται σε όλο τον όγκο από ηλεκτρικό ρεύμα, σε αντίθεση με το εναλλασσόμενο, όπου το ρεύμα άγεται στην περιφέρεια. Για αυτόν τον λόγο η αντίσταση του ηλεκτροδίου κατά το συνεχές ρεύμα είναι μικρότερη. Επομένως, κατά την αύξηση του ρεύματος δεν γίνεται τόσο μεγάλη θέρμανση του ηλεκτροδίου, σε αντίθεση με την περίπτωση του εναλλασσόμενου ρεύματος (Fruehan, 1998).

Ένα άλλο πλεονέκτημα του συνεχούς ρεύματος είναι ότι δημιουργεί σχετικά πιο σταθερό τόξο και δεν προκαλούνται αυξομειώσεις του ρεύματος. Αυτές οι αυξομειώσεις έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο δίκτυο του ηλεκτρικού ρεύματος της ευρύτερης περιοχής, ιδιαίτερα εφόσον το δίκτυο δεν είναι αρκετά ισχυρό (Jones, 2011).

Εντούτοις, το εναλλασσόμενο ρεύμα υπερτερεί του συνεχούς ρεύματος στον τομέα της αντοχής των ηλεκτροδίων. Έχει παρατηρηθεί ότι εφόσον δεν ληφθούν μέτρα για επαρκή στήριξη των ηλεκτροδίων που διαρρέονται από συνεχές ρεύμα, η πιθανότητα αστοχίας των

ηλεκτροδίων είναι μεγάλη. Σε αντίθεση, το εναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί μαγνητικά πεδία με κατεύθυνση αντίθετα από τη φορά του ρολογιού τα οποία βοηθούν τη στήριξη των ηλεκτροδίων. Το φαινόμενο αυτό γίνεται αρκετά σημαντικό σε ακραίες καταστάσεις (χαμηλή και υψηλή ενέργεια).

Όσον αφορά στο ρυθμό κατανάλωσης των ηλεκτροδίων, έχει διαπιστωθεί ότι το συνεχές ρεύμα είναι περισσότερο συμφέρον από το εναλλασσόμενο. Παρόλο που το συνεχές ρεύμα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη κατανάλωση στην άκρη του ηλεκτροδίου από τη συνδυασμένη κατανάλωση των τριών ηλεκτροδίων στο εναλλασσόμενο ρεύμα, τελικά προκύπτει μικρότερη κατανάλωση υλικού. Αυτό συμβαίνει καθώς περιορίζεται η οξείδωση του ηλεκτροδίου στα τοιχώματα. Η διαφορά σε κατανάλωση υλικού μπορεί να φτάσει έως και 25%.

Τέλος, μια συνέπεια των ηλεκτρικών τόξων είναι η κίνηση του μετάλλου εντός της καμίνου. Οι διαφορετικές φάσεις ρεύματος στα ηλεκτρόδια των καμίνων εναλλασσόμενου ρεύματος δημιουργούν μαγνητικό πεδίο το οποίο περιστρέφεται, δημιουργώντας ως συνέπεια ανάδευση στη ρευστή μάζα. Αν όμως συγκριθεί η συγκεκριμένη κίνηση μεταξύ των καμίνων εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος, παρατηρείται ότι η κίνηση είναι περισσότερο έντονη στις καμίνους της τελευταίας κατηγορίας (Fruehan, 1998).

2.2.3 Τεχνικές και καινοτομίες

Με την πάροδο των χρόνων έχουν εφευρεθεί διάφορες τεχνικές με τις οποίες η παραγωγική διαδικασία της ηλεκτρικής καμίνου βελτιστοποιείται.

2.2.3.1 Τεχνική αφρισμού της σκωρίας

Έχει βρεθεί ότι ο αφρισμός της σκωρίας αποτελεί σημαντικό στοιχείο της λειτουργίας της ηλεκτρικής καμίνου. Χρησιμοποιείται προς το τέλος του κύκλου λειτουργίας της καμίνου με σκοπό την εισαγωγή μεγάλου ποσού ενέργειας στο σύστημα. Επιπροσθέτως, η τεχνική συμβάλει στην αύξηση του χρόνου ζωής των πυριμάχων. Το τόξο, το οποίο δημιουργείται παράγει ακτινοβολία η οποία είναι επιβλαβής για τα πυρίμαχα. Έτσι, το ηλεκτρικό τόξο πρέπει να περιορίζεται. Κατά την περίοδο τήξης του scrap, η ακτινοβολία δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς το scrap περιβάλλει τα ηλεκτρόδια και περιορίζει τη μετάδοση ακτινοβολίας. Ωστόσο, μετά από το στάδιο αυτό τα ηλεκτρόδια δεν καλύπτονται. Προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα, εφευρέθηκε η τεχνική του αφρισμού της σκωρίας.

Για να πραγματοποιηθεί αφρισμός της σκωρίας υπάρχουν κάποιες προϋποθέσεις. Αρχικά, η σκωρία πρέπει να περιέχει ορισμένη ποσότητα μονοξειδίου του άνθρακα. Η ποσότητα αυτή εισάγεται μέσω των ακροφυσίων της καμίνου, τα οποία εμφυσούν οξυγόνο και άνθρακα και μέσω της καύσης του άνθρακα παράγεται μονοξείδιο. Επιπλέον, μια ένωση, η οποία ενισχύει το φαινόμενο είναι ο βουστίτης (FeO), καθώς ο άνθρακας αντιδρά με τον βουστίτη και σχηματίζει μονοξείδιο του άνθρακα. Ωστόσο, αν υπάρχει σε μεγάλη ποσότητα ο FeO, τότε ο αφρισμός εμποδίζεται και υπάρχει φθορά των πυριμάχων. Τέλος, η χημική σύσταση της σκωρίας πρέπει να είναι κατάλληλος, με τη βασικότητα της σκωρίας να έχει τουλάχιστον τιμή 1,5 προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη τεχνική (Fruehan, 1998, Madias, 2014).

Με την τεχνική του αφρισμού της σκωρίας ελαττώνεται η φθορά των πυριμάχων και η ακουστική ρύπανση και παράλληλα μπορεί να αποδοθεί μεγαλύτερη ηλεκτρική ενέργεια στο

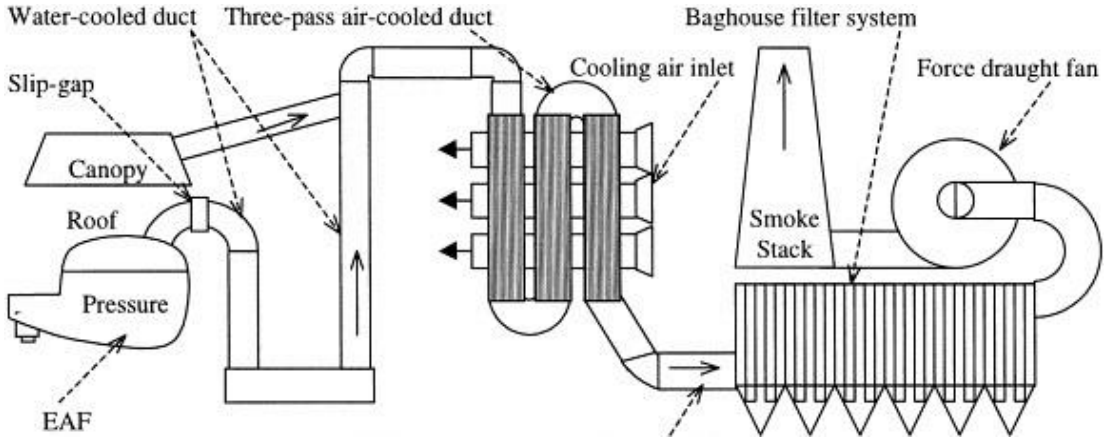
σύστημα, καθώς δεν υπάρχουν μεγάλες απώλειες προς τα τοιχώματα της καμίνου. Επίσης, προσδίδεται ενέργεια στο σύστημα λόγω του σχηματισμού του μονοξειδίου του άνθρακα. Ταυτόχρονα όμως υπάρχουν και αρνητικές επιπτώσεις καθώς κατά την περίοδο του αφρισμού της σκωρίας παράγονται μεγάλες ποσότητες CO στα απαέρια ρυπαίνοντας το περιβάλλον (Fruehan, 1998).

Υπάρχουν πολλές διατάξεις μέσω των οποίων ελέγχεται το επίπεδο αφρισμού της σκωρίας. Μια από αυτές βασίζεται στην καταγραφή και την ανάλυση του ήχου εντός του συστήματος. Μέσω μικροφώνου το οποίο είναι τοποθετημένο στην οροφή της καμίνου, είναι εφικτός ο υπολογισμός του ύψους της σκωρίας (Turkdogan, 1996).

2.2.3.2 Μετάκαυση απαερίων

Η ποσότητα του μονοξειδίου του άνθρακα αυξάνεται στις περιόδους εμφύσησης οξυγόνου με σκοπό την απανθράκωση του ρευστού μετάλλου, καθώς και κατά την περίοδο του αφρισμού της σκωρίας στην οποία εμφυσάται οξυγόνο συνδυασμένο με άνθρακα. Παρόλο που η εμφύσηση οξυγόνου συνδέεται με αύξηση της παραγωγικότητας, λόγω της ενέργειας των εξώθερμων αντιδράσεων που προκαλεί, η μέθοδος αυτή επηρεάζει την ποσότητα και τη σύσταση των απαερίων (Toulouevski και Zinurov, 2013).

Για τη συλλογή των απαερίων υπάρχουν δυο διατάξεις (Σχήμα 2.1,Bekker, 2000). Η πρώτη είναι ένας απαγωγός ο οποίος τοποθετείται στην οροφή του κτιρίου στο οποίο είναι εγκατεστημένη η κάμινος. Απάγει τα απαέρια, τα οποία διαφεύγουν μέσω των κενών στην κάμινο (λόγου χάρη πόρτες) και τα απαέρια, τα οποία διαφεύγουν όταν η οροφή της καμίνου ανοιχθεί προκειμένου να φορτωθεί καινούριο καλάθι με scrap. Τα απαέρια του συγκεκριμένου απαγωγού καταλήγουν στο ίδιο σύστημα με τα απαέρια της δεύτερης διάταξης. Η δεύτερη διάταξη αποτελείται από έναν απαγωγό ο οποίος απάγει τα απαέρια που δημιουργούνται εντός της καμίνου. Ο συγκεκριμένος απαγωγός ταυτόχρονα ρυθμίζει την πίεση εντός της καμίνου η οποία πρέπει να είναι ελαφρά αρνητική. Στη διάταξη αυτή υπάρχει ένα κενό, το οποίο εισάγει αέρα σε έναν θάλαμο, στον οποίο πραγματοποιείται ανάμειξη του αέρα με τα απαέρια. Ο θάλαμος αποτελείται από υδρόψυκτες επιφάνειες. Μέσω αυτής της μεθόδου γίνεται καύση του περίσσιου μονοξειδίου του άνθρακα (Labiscsak et al, 2011).



Σχήμα 2.1. Σύστημα συλλογής και ψύξης απαερίων.

Από τη βιβλιογραφία διαπιστώθηκε ότι για να είναι επαρκής η καύση των αερίων απαιτείται συγκεκριμένο άνοιγμα, από το οποίο εισέρχεται ο αέρας. Αν το άνοιγμα είναι πολύ μικρό, τότε

το οξυγόνο το οποίο εισάγεται στο θάλαμο δεν επαρκεί για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων. Ωστόσο, αν το κενό είναι πολύ μεγάλο, υπάρχει μικρή απώλεια σε θερμότητα σε σχέση με το προτεινόμενο κενό. Επομένως, είναι εφικτή η λειτουργία του θαλάμου μετάκαυσης ακόμα και με λίγο μεγαλύτερο κενό από το προτεινόμενο. Τέλος, μέσω προσομοίωσης με υπολογιστική ρευστομηχανική (Computational Fluid Dynamics, CFD) βρέθηκε ότι η ανώτατη θερμοκρασία εξόδου των απαερίων από τον θάλαμο μετάκαυσης είναι μεταξύ 300 και 600 βαθμών Κελσίου (Labiscsak et al, 2011, Kirschen et al, 2006).

2.2.3.3 Προθέρμανση του scrap

Η προθέρμανση του scrap είναι μια τεχνική η οποία βοηθάει στη μείωση της ενέργειας, η οποία εισάγεται στο σύστημα. Για την προθέρμανση χρησιμοποιούνται αέρια σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα αέρια μπορούν να αποτελούνται από τα απαέρια της ηλεκτρικής καμίνου ή από αέρια που παράγονται μέσω καύσης φυσικού αερίου. Ως επί το πλείστον, στην πράξη χρησιμοποιείται η προθέρμανση του scrap από τα απαέρια της καμίνου (Schmitt και Goodwill, 1997).

Μέσω της θέρμανσης του scrap μειώνεται η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία απαιτείται για την τήξη του εξασφαλίζοντας μικρότερους κύκλους λειτουργίας, ενώ ταυτόχρονα απομακρύνεται η υγρασία στο scrap, αλλά εξασφαλίζεται και μειωμένη κατανάλωση ηλεκτροδίων και πυριμάχων. Επιπροσθέτως, η θέρμανση του scrap με τη συγκεκριμένη τεχνική επανεισάγει ενέργεια η οποία διαφορετικά δεν θα ήταν αξιοποιήσιμη ως αισθητή θερμότητα των απαερίων και καθιστά την ηλεκτρική κάμινο πιο αποδοτική.

Η ανάγκη προθέρμανσης του scrap γίνεται αισθητή αν ληφθεί υπ’ όψιν ο τρόπος λειτουργίας της καμίνου. Τα τεμάχια του scrap δεν θερμαίνονται ομοιόμορφα εντός της καμίνου. Ως αποτέλεσμα είναι η συνύπαρξη ρευστού μετάλλου με τεμάχια scrap. Όταν όμως τα τεμάχια εμβαπτιστούν στην τηγμένη μάζα, τότε η θέρμανσή τους και η τήξη τους γίνεται πολύ δύσκολη, καταλαμβάνοντας μεγάλο κομμάτι του χρόνου λειτουργίας της καμίνου. Με την εφαρμογή της προθέρμανσης του scrap έχει βρεθεί ότι ο κύκλος λειτουργίας της καμίνου μπορεί να μειωθεί κατά ένα τρίτο (Fruehan, 1998).

Η διοχέτευση των απαερίων για τη θέρμανση του scrap γίνεται μέσω σωληνώσεων που οδηγούν τα απαέρια σε ειδική διάταξη η οποία βρίσκεται πάνω από το καλάθι τροφοδοσίας του scrap και εισάγει τα απαέρια στο καλάθι. Με αυτόν τον τρόπο τα απαέρια ψύχονται καθώς όταν εξέρχονται από την κάμινο εξέρχονται σε θερμοκρασία 1200°C, όταν εισάγονται στο καλάθι βρίσκονται σε θερμοκρασία 815°C, ενώ όταν εξέρχονται από το καλάθι βρίσκονται σε θερμοκρασία 200°C. Με την παραπάνω διαδικασία το scrap ανέρχεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 315°C και 415°C. Η μεταβολή της θερμοκρασίας μπορεί να αποδοθεί και ως μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας έως 60 kWh/tn ρευστού μετάλλου ή μείωση του κύκλου λειτουργίας έως και 8 λεπτά.

Μια άλλη μέθοδος της προθέρμανσης scrap είναι η εισαγωγή του scrap από κάμινο, η οποία διοχετεύει το scrap από την οροφή της ηλεκτρικής καμίνου. Τα απαέρια διοχετεύονται κατ’ αντιρροή με το scrap, με αποτέλεσμα τη θέρμανσή του έως και 450°C. Ένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου ωστόσο είναι ότι υπάρχει το ενδεχόμενο κάποια τεμάχια του scrap να προσκολληθούν στα τοιχώματα της καμίνου και επομένως με αυτόν τον τρόπο να εμποδίζεται η διοχέτευση του scrap προς την ηλεκτρική κάμινο. Επιπροσθέτως, η μέθοδος έχει

ως συνέπεια μειωμένη αντοχή του καλαθιού, έλλειψη ελέγχου της προθέρμανσης λόγω διακύμανσης της παροχής των απαερίων κατά τη λειτουργία της ηλεκτρικής καμίνου κ.α. (Schmitt και Goodwill, 1997).

2.2.3.4 Διαχείριση σκωρίας

Ένας τρόπος διαχείρισης της σκωρίας είναι η χρήση της σε έργα οδοποιίας. Ωστόσο, κοινή πρακτική είναι η ενσωμάτωσή της κατά την παρασκευή σκυροδέματος. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται από τον μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων που έχουν πραγματοποιηθεί. Η βασική λειτουργία της σκωρίας είναι να χρησιμοποιείται ως αδρανές λόγω των καλών μηχανικών ιδιοτήτων. Ωστόσο, πρέπει να προετοιμασθεί σε κατάλληλα κοκκομετρικά κλάσματα προκειμένου να είναι αποτελεσματική. Στη συνέχεια παρατίθεται ένας πίνακας με τις ιδιότητες σκωρίας ηλεκτρικής καμίνου και μεταλλάκτη (Πίνακας 2.1, de Brito και Saikia, 2013).

Πίνακας 2.1. Ιδιότητες σκωρίας ηλεκτρικής καμίνου και υψικαμίνου.

Property	Steel slag	Type of steel slag	Natural aggregate	Type of natural aggregate	Reference
Specific gravity	3.51	EAF-slag	2.71	Quartzite	Almusallam et al. (2004).
Los Angeles abrasion (%)	11.6		19.2		
Water absorption (%)	0.85		1.60		
Specific gravity	3.64	EAF-slag	2.66	–	Al-Negheimish et al. (1997)
Water absorption (%)	0.54		1.67		
Specific gravity	3.35	EAF-slag			Manso et al. (2004)
Los Angeles abrasion (%)	~20				
Water absorption (%)	3.29				
Porosity (%)	10.5		–		
Specific gravity	3.02	EAF-slag	2.63	Limestone	Ahmedzade and Sengoz (2009)
Los Angeles abrasion (%)	20		29		
Shape (flat and long) (%)	<10	BOF-slag	10	Basalt	Xue et al. (2006)
LA abrasion (%)	13.1		14.9		
Crushing value (%)	12.0		12.9		
Water absorption (%)	1.18		0.70		
Specific gravity	3.48	BOF-slag	2.66	River crushed stone	Shen et al. (2009)
Water absorption (%)	2.2		1.3		
LA abrasion (%)	20.96		23.52		
Shape (flat and elongated) (%)	5.14		7.55		
Roundness index (%)	0.60		0.54		

Τέλος, να σημειωθεί ότι παρόλο που η συγκέντρωση των σκωριών σε τοξικά στοιχεία είναι μεγαλύτερη απ' ότι στο έδαφος, λόγω της δομής της σκωρίας οι ουσίες δεν απελευθερώνονται σε συνθήκες εκχύλισης. Ωστόσο, έχουν διεξαχθεί έρευνες κατά τις οποίες βρέθηκε ότι η σκωρία είχε περιεκτικότητα σε τοξικά στοιχεία μεγαλύτερη από την επιτρεπτή και συγκεκριμένα στο χρώμιο (Cr) και το μολυβδαίνιο (Mo). Φυσικά, τέτοια φαινόμενα δεν αποκλείεται να υπάρχουν, λόγω της φύσης της πρώτης ύλης επεξεργασίας της ηλεκτρικής καμίνου (scrap) (de Brito και Saikia, 2013).

2.3 Μεταλλουργία Κάδου

Η μεταλλουργία κάδου υπάγεται στις τεχνικές δευτερογενούς μεταλλουργίας. Υπάρχουν διαφορετικές τεχνικές στη μεταλλουργία κάδου, όπως η λειτουργία υπό κενό, η τροφοδοσία κραμάτων μετάλλου με τη μορφή συρμάτων, όμως όλες οι τεχνικές έχουν έναν κοινό σκοπό, τη ρύθμιση της σύστασης του μετάλλου. Ένα πλεονέκτημα της ενσωμάτωσης του σταδίου της δευτερογενούς μεταλλουργίας είναι η εξασφάλιση ομογενοποίησης των φάσεων σκωρίας και μετάλλου, γεγονός που οδηγεί στην απομάκρυνση ακαθαρσιών. Με την εισαγωγή της δευτερογενούς μεταλλουργίας κάδου μειώνεται ο χρόνος τήξης της ηλεκτρικής καμίνου που συνεπάγεται μεγαλύτερη αποδοτικότητα της καμίνου (Fruehan, 1998).

Η απλούστερη μέθοδος, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως για την παραγωγή κοινού χάλυβα και η οποία ακολουθείται και στο εργοστάσιο της ΣΙΔΕΝΟΡ ονομάζεται **Ladle Furnace** ή μεταλλουργία κάδου. Η μεταλλουργία κάδου μοιάζει με τη λειτουργία της ηλεκτρικής καμίνου, όμως έχει βασικές διαφορές. Η κυριότερη διαφορά βρίσκεται στις συνθήκες εντός του συστήματος καθώς οι συνθήκες δεν είναι οξειδωτικές αφού δεν εμφυσάται οξυγόνο. Επιπροσθέτως, δεν εφαρμόζονται συνθήκες κενού όπως σε άλλες τεχνικές ή εμφύσηση με μίγματα αερίων. Ωστόσο, μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου επικρατούν αναγωγικές συνθήκες οι οποίες είναι αναγκαίες για την απομάκρυνση ακαθαρσιών κυρίως του θείου από το ρευστό μέταλλο.

2.3.1 <u>Εμφύσηση αργού</u>

Οι διατάξεις στη δευτερογενή μεταλλουργία διαθέτουν ακροφύσια για την εμφύσηση αργού. Τα ακροφύσια περιβάλλονται από πορώδες πυρίμαχο. Η εμφύσηση του αργού πραγματοποιείται για την ανάδευση μετάλλου και σκωρίας στον κάδο. Με τον τρόπο αυτό είναι πιο αποτελεσματική η ρύθμιση της σύστασης του χάλυβα.

Οι αντιδράσεις μεταξύ ρευστού μετάλλου και σκωρίας καθορίζονται από μεταφορά μάζας μεταξύ των δυο φάσεων. Επομένως, είναι φυσικό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ανάμειξη των δυο φάσεων τόσο θα αυξάνει η ταχύτητα των αντιδράσεων. Σ ’αυτόν τον παράγοντα συμβάλλει σε πολύ μεγάλο βαθμό η εμφύσηση του αργού. Γενικά οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται σε μικρό χρόνο εφόσον η ροή του αργού είναι μεγάλη (Fruehan, 1998).

Κατά τον Turkdogan (Turkdogan, 1996) η τοποθέτηση του ακροφυσίου σε σημείο εκτός του κέντρου του κάδου έχει ευεργετικό αποτέλεσμα, συμβάλλοντας στη μείωση του χρόνου ανάδευσης των φάσεων της σκωρίας και του μετάλλου. Ωστόσο, κατά τον Kim και τον Fruehan (Kim και Fruehan, 1987) βρέθηκε ότι η θέση του ακροφυσίου εκτός του κέντρου έχει αρνητικές συνέπειες στο σύστημα για μεγάλη παροχή αργού. Επομένως, συμπεραίνεται ότι αν το ακροφύσιο βρίσκεται στο κέντρο του πυθμένα του κάδου υπάρχει γρήγορη αλλά όχι επαρκής ανάμειξη των φάσεων, ενώ εκτός κέντρου παρουσιάζεται το αντίθετο φαινόμενο. Άρα, πρέπει να γίνει επιλογή μεταξύ της ταχύτητας της ανάμειξης των φάσεων και του βαθμού ανάμειξης.

Τέλος, κατά την εμφύσηση αργού οι φυσαλίδες οι οποίες δημιουργούνται, απάγουν τα διαλελυμένα αέρια εντός του ρευστού μετάλλου. Έχει παρατηρηθεί ότι με την εμφύσηση αργού για χρονικό διάστημα 5 με 8 min, το διαλελυμένο οξυγόνο στο μέταλλο βρίσκεται σε συγκέντρωση κάτω από 15 ppm. Εντούτοις, οι φυσαλίδες διαχωρίζουν στην επιφάνεια του λουτρού το μέταλλο από τη σκωρία δημιουργώντας ένα «μάτι», εφόσον η παροχή του αργού

γίνεται σε υπερθετικό βαθμό. Το φαινόμενο είναι ανεπιθύμητο καθώς εισάγεται από την ατμόσφαιρα εκ νέου οξυγόνο στο μέταλλο και επομένως επιτυγχάνονται αντίθετα αποτελέσματα από τα επιδιωκόμενα (Turkdogan, 1996, Fruehan, 1998).

2.3.2 Θέρμανση και αναθέρμανση

Λόγω της φύσης της διαδικασίας υπάρχει ψύξη στον κάδο. Στο στάδιο μετά την απόχυση του προϊόντος της ηλεκτρικής καμίνου, στο οποίο προστίθεται μια ποσότητα συλλιπασμάτων και πραγματοποιείται ανάδευση με αργό, υπάρχει απώλεια ενέργειας. Μπορεί οι παραπάνω τεχνικές να ελαττώνουν την απώλεια ενέργειας, αλλά δεν την εκμηδενίζουν. Επιπροσθέτως, οι προσθήκες των συλλιπασμάτων και των σιδηροκραμάτων κατά τη μεταλλουργία κάδου μειώνουν τη θερμοκρασία εντός του συστήματος, καθώς τα παραπάνω πρόσθετα βρίσκονται σε θερμοκρασία δωματίου. Σε συνδυασμό με τους παραπάνω παράγοντες προστίθεται και η απώλεια της ακτινοβολίας του κάδου. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι πρέπει να υπάρχει κάποια πηγή η οποία προσθέτει ενέργεια στο σύστημα.

Αρχικά, με την προσθήκη των σιδηροκραμάτων (συνήθως FeSi και SiMn) εισάγεται ενέργεια στο σύστημα μέσω των εξώθερμων αντιδράσεων οξείδωσης του πυριτίου και του μαγγανίου. Οι αντιδράσεις πραγματοποιούνται μέσω του διαλελυμένου οξυγόνου στο ρευστό μέταλλο.

Εκτός από την παραπάνω μορφή εισαγωγής ενέργειας υπάρχουν δυο τεχνικές, με τις οποίες είναι δυνατή η θέρμανση του μετάλλου (Turkdogan, 1996).

2.3.2.1 Θέρμανση μέσω εμφύσησης οξυγόνου

Με την εμφύσηση οξυγόνου εντός του μετάλλου είναι δυνατή η οξείδωση του αλουμινίου και του πυριτίου. Επιπροσθέτως, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν οξειδώσεις του μαγγανίου και του άνθρακα. Οι αντιδράσεις είναι εξώθερμες και επομένως εκλύουν ενέργεια. Κατά μέσο όρο η ενέργεια που εκλύεται είναι 27000 kJ/kg και 28500 kJ/kg για το Al και Si αντίστοιχα (Turkdogan, 1996).

Μια παραλλαγή της μεθόδου εμφύσησης οξυγόνου είναι η προσθήκη διάταξης με τη μορφή καμπάνας προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο δημιουργίας «ματιού». Με την εμφάνιση του φαινομένου, η διάταξη – καμπάνα τοποθετείται επάνω στη σκωρία και γίνεται ταυτόχρονη τροφοδοσία σιδηροκραμμάτων και εμφύσηση οξυγόνου.

Ωστόσο, για να εξασφαλισθεί η απομάκρυνση των διαλελυμένων αερίων στο μέταλλο, καθώς και η ομογενοποίηση της θερμοκρασίας, μετά την εμφύσηση του οξυγόνου πρέπει να πραγματοποιηθεί εμφύσηση αργού.

Έχει υπολογισθεί ότι με την παραπάνω μέθοδο είναι δυνατή η επίτευξη ρυθμού ανόδου της θερμοκρασίας 6°C/min (Adolf και Socha, 2016).

2.3.2.2 Θέρμανση μέσω ηλεκτρικού τόξου

Η θέρμανση μέσω ηλεκτρικού τόξου είναι η πλέον συνήθης μέθοδος και γίνεται με τον ίδιο τρόπο με τη θέρμανση της ηλεκτρικής καμίνου. Τρία ηλεκτρόδια διαρρέονται από ρεύμα διαφορετικής φάσης δημιουργώντας ηλεκτρικά τόξα τα οποία μεταδίδουν θερμότητα στο σύστημα. Το πλεονέκτημα της μεταλλουργίας κάδου είναι ότι είναι δυνατή η δημιουργία και

η διατήρηση ηλεκτρικών τόξων μεγάλου μήκους οδηγώντας έτσι σε μικρότερη κατανάλωση ηλεκτροδίων και αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα.

Τα ηλεκτρόδια μεταφέρουν θερμότητα μέσω τεσσάρων τρόπων:

- **Συναγωγής:** τα ιονισμένα αέρια της ατμόσφαιρας μεταφέρουν ενέργεια με τη μορφή θερμότητας στο μέταλλο. Η εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο είναι:

  $$Q_{con}= \frac{0,915}{\sigma_{Tw}} \left(\frac{\rho_b \mu_{lb}}{\rho_w \mu_{1w}}\right)^{0,43} \left(\frac{\rho_w \mu_{1w} u_b}{r}\right)^{0,5} (h_b - h_w) \quad (1)$$

  Όπου μ_1, είναι το δυναμικό μοριακό ιξώδες, σ είναι η θερμική αγωγιμότητα, u είναι η ακτινική ταχύτητα, ρ είναι η πυκνότητα και h είναι η ενθαλπία του αερίου. Τα w και b συμβολίζουν την επιφάνεια της τηγμένης μάζας και την οριακή επιφάνεια, αντίστοιχα.

- **Ακτινοβολίας:** η θερμότητα μέσω ακτινοβολίας υπολογίζεται από τον τύπο:

  $$Q_r = \sum \frac{S_{R,j}}{4\pi d_{i,j}^2} \cos(\psi)\, \Delta V_j \quad (2)$$

  Όπου $S_{R,j}$ είναι η απώλεια από ακτινοβολία από όγκο ΔV_j στην στήλη τόξου προς την επιφάνεια του μετάλλου i, $d_{i,j}$ είναι το διάνυσμα το οποίο συνδέει την επιφάνεια i με τον όγκο j και ψ είναι η γωνία μεταξύ του d και του κανονικού διανύσματος της επιφάνειας.

- **Φαινόμενο Thompson:** κατά το οποίο τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν θερμότητα. Η εξίσωση του φαινομένου είναι:

  $$Q_e = \frac{5J_A}{2e} k_b (T_{A,g} - T_{Anode}) \quad (3)$$

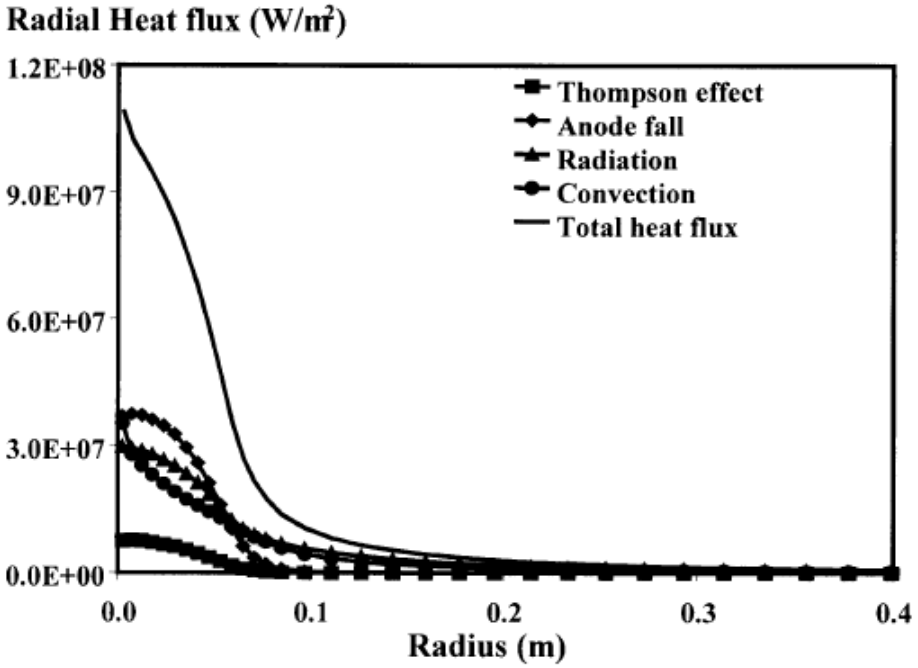
  Όπου J_A είναι η πυκνότητα του ρεύματος του ηλεκτροδίου, e είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, k_b είναι η σταθερά Boltzmann και $T_{A,g}, T_{Anode}$ είναι η θερμοκρασία σε απόσταση 0,01 mm από την άνοδο και η θερμοκρασία στην άνοδο αντίστοιχα

- **Στήλη ηλεκτρονίων:** τα ηλεκτρόνια, τα οποία απορρέουν από το ηλεκτρόδιο με κατεύθυνση προς το μέταλλο, μεταφέρουν θερμότητα.

  $$Q_A= J_A(V_A+q_A) \quad (4)$$

  Όπου q_A είναι η εξίσωση του έργου και V_Aη πτώση τάσης της ανόδου.

Με τον συνδυασμό των παραπάνω φαινομένων και των αντίστοιχων εξισώσεων που τα διέπουν, είναι δυνατός ο υπολογισμός της θερμότητας η οποία μεταφέρεται από το ηλεκτρόδιο στη μάζα του μετάλλου. Η θερμότητα που μεταφέρεται, αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Alexis et al, 2007).



Εικόνα 2.5. Η μεταφορά θερμότητας από το τόξο στο μέταλλο. Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το τόξο είναι 36 kA και το μήκος του τόξου 25 cm.

Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες μελέτες για το κόστος της μεταλλουργίας κάδου. Κατά γενική ομολογία, το ηλεκτρικό ρεύμα αποτελεί το μεγαλύτερο μερίδιο κόστους λειτουργίας της μεταλλουργίας κάδου, ακολουθούμενο από την κατανάλωση των ηλεκτροδίων και τέλος από την κατανάλωση των πυριμάχων (Fruehan, 1998).

2.3.3 Αποφωσφορίωση

Η μεγάλη περιεκτικότητα σε φώσφορο του μετάλλου έχει αρνητικές συνέπειες στο τελικό προϊόν. Μερικές από τις συνέπειες είναι:

- Δημιουργία ρωγμών και επιδείνωση των διακρυσταλλικών δυνάμεων
- Έλλειψη ομοιογένειας μηχανικών ιδιοτήτων σε προϊόντα έλασης εν θερμώ
- Κακή διαμορφωσιμότητα εν ψυχρώ
- Ευθραυστότητα σε θερμικά επηρεασμένες ζώνες (Pretorius)

Η αποφωσφορίωση του μετάλλου προτιμάται σε οξειδωτικές συνθήκες, όπως εκείνες που επικρατούν εντός της ηλεκτρικής καμίνου. Από το γεγονός αυτό προκύπτει ότι η μεγαλύτερη ποσότητα φωσφόρου απομακρύνεται κατά την ηλεκτρική κάμινο, όπου ο φώσφορος οξειδώνεται προς πεντοξείδιο του φωσφόρου. Ωστόσο, το στάδιο της αποφωσφορίωσης είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί και κατά τη μεταλλουργία κάδου. Η αποφωσφορίωση στο συγκεκριμένο στάδιο επηρεάζεται από τη σύσταση και τη θερμοκρασία της σκωρίας (Fruehan, 1998, Ikeda και Matsuo, 1982).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη από τον Ikeda (Ikeda και Matsuo, 1982) κατά την οποία παρατηρήθηκε η απόδοση της αποφωσφορίωσης σε ρευστό μέταλλο προσθέτοντας δυο διαφορετικά μέσα αποφωσφορίωσης. Το πρώτο μέσο αποτελούνταν από σκωρία από

μεταλλουργία κάδου και οξείδιο του σιδήρου, ενώ το δεύτερο μέσο αποτελούνταν από οξείδιο του ασβεστίου και οξείδιο του σιδήρου.

Με την προσθήκη του πρώτου μέσου παρατηρήθηκε ότι η περιεκτικότητα σε φώσφορο μειώθηκε σε 0,04%, ενώ με την προσθήκη του δεύτερου μέσου η περιεκτικότητα μειώθηκε σε 0,003%. Η βασικότητα της σκωρίας για το πρώτο μέσο έχει τιμή 0,8, ενώ για το δεύτερο έχει 2,1. Μεγαλύτερη βασικότητα σκωρίας συνεπάγεται μικρότερη περιεκτικότητα φωσφόρου στο μέταλλο και άρα καλύτερη αποφωσφορίωση. Επιπροσθέτως, τα οξείδια του σιδήρου ευνοούν τη διαδικασία και επομένως, μεγαλύτερη περιεκτικότητα στη σκωρία συνεπάγεται καλύτερη αποφωσφορίωση. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η αποφωσφορίωση ευνοείται με τη μείωση του πυριτίου και του μαγγανίου στο μέταλλο, καθώς και με τη μείωση της απανθράκωσης.

Να σημειωθεί ότι η διαδικασία της αποφωσφορίωσης στην πειραματική διαδικασία έφτασε σχεδόν σε συνθήκες ισορροπίας. Αυτό διαπιστώθηκε συγκρίνοντας τις πειραματικές τιμές και τις θεωρητικές τιμές, μέσω εξισώσεων και διαγραμμάτων. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η υψηλή βασικότητα της σκωρίας, η μεγάλη συγκέντρωση σε οξείδια του σιδήρου, καθώς και η παρεμπόδιση της απανθράκωσης είναι οι κυριότεροι παράγοντες που ευνοούν την αποφωσφορίωση (Ikeda και Matsuo, 1982).

2.3.4 <u>Αποθείωση</u>

Το θείο αποτελεί ανεπιθύμητη πρόσμιξη στη μεταλλική φάση. Το θείο ενώνεται με το σίδηρο σχηματίζοντας θειούχο σίδηρο (FeS). Το σημείο τήξης του συγκεκριμένου σουλφιδίου είναι χαμηλό και για αυτόν το λόγο ο θειούχος σίδηρος στερεοποιείται στα τελευταία στάδια της στερεοποίησης του χάλυβα. Η ένωση εναποτίθεται σε περικρυσταλλικές θέσεις του μετάλλου. Το φαινόμενο αυτό μειώνει τη συνοχή του κρυσταλλικού πλέγματος του σιδήρου με αποτέλεσμα τη μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του κράματος, κυρίως σε θερμικές κατεργασίες διαμόρφωσης του μετάλλου λόγω του χαμηλού σημείου τήξης του FeS. Το φαινόμενο ονομάζεται θερμή ρηγμάτωση (Luiz, 2008).

Ωστόσο ένα σουλφίδιο που μπορεί να είναι και επιθυμητό σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (ιδιαίτερα στους ηλεκτρικούς χάλυβες) είναι το σουλφίδιο του μαγγανίου (MnS). Το MnS έχει υψηλότερο σημείο τήξης και είναι πιο σταθερό σε σχέση με το σουλφίδιο του σιδήρου. Παρόλα αυτά το συγκεκριμένο σουλφίδιο ιδιαίτερα σε χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης μπορεί να έχει καταστρεπτικές συνέπειες (λόγου χάρη αστοχία λόγω προσρόφησης υδρογόνου). Ο σχηματισμός του σουλφιδίου του μαγγανίου παρεμποδίζεται με την προσθήκη ασβεστίου και τη δημιουργία σουλφιδίου του ασβεστίου. Επιπροσθέτως, ο σχηματισμός του CaS ευνοείται από χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο και οξυγόνο. Από τα παραπάνω συνεπάγεται ότι η επίτευξη χαμηλών περιεκτικοτήτων θείου στο μέταλλο αποτελεί βασικό στόχο για τη διαφύλαξη των μηχανικών ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος (Luiz, 2008, Turkdogan, 1996).

Η διαδικασία της αποθείωσης στη μεταλλουργία κάδου αποτελεί τη βασική διαδικασία καθαρισμού του μετάλλου της συγκεκριμένης μονάδας. Ο λόγος είναι ότι η απομάκρυνση του θείου ευνοείται στις αναγωγικές συνθήκες, ή τουλάχιστον μη ύπαρξη οξειδωτικών συνθηκών. Κατά τον Turkdogan (Turkdogan, 1996) για να γίνει επαρκής αποθείωση η σκωρία της μεταλλουργίας κάδου πρέπει να περιέχει κάτω από 10% οξείδιο του πυριτίου και κάτω από 0,5% οξείδιο του μαγγανίου και του σιδήρου. Επιπροσθέτως, η ανάμειξη μεταξύ μετάλλου και σκωρίας πρέπει να είναι επαρκής, η οποία επιτυγχάνεται με εμφύσηση αργού με παροχή 1-1,8

Nm^3/min. Τέλος, η διαδικασία της αποφωσφορίωσης έρχεται σε αντίθεση με την διαδικασία της αποθείωσης. Αυτό συμβαίνει καθώς η αποφωσφορίωση απαιτεί οξειδωτικές συνθήκες προκειμένου να απομακρυνθεί ο φώσφορος από το μέταλλο, ενώ η απομάκρυνση του θείου ευνοείται σε αναγωγικές συνθήκες.

Για την αποθείωση θα περιγραφούν στη συνέχεια τρεις ειδικές περιπτώσεις: η Thyssen-Niederrheim, η ανάδευση με αργό και δημιουργία ασβεστοαλουμινικής σκωρίας και τέλος η μέθοδος EXOSLAG.

2.3.4.1 Μέθοδος Thyssen-Niederrheim

Κατά την πρώτη μέθοδο η σκωρία στη μεταλλουργία κάδου δημιουργείται με την προσθήκη 8 kg/tn μετάλλου μίγματος 80% CaO και 20% CaF_2. Το μίγμα προστίθεται κατά την απόχυση του ρευστού μετάλλου από την ηλεκτρική κάμινο. Η ποσότητα του οξειδίου του αλουμίνιου, που σχηματίζεται στην αποξείδωση της ηλεκτρικής καμίνου, η οποία πραγματοποιείται κατά την απόχυση του μετάλλου στον κάδο, αντιδρά με το ρευστό αργιλικό ασβέστιο που προστίθεται στον κάδο. Ταυτόχρονα, η περιεκτικότητα του σιδήρου σε αργίλιο ρυθμίζεται περίπου σε 0,07 – 0,1%.

Η αποθείωση του σιδήρου στη μονάδα μεταλλουργίας κάδου πραγματοποείται μέσω της εμφύσησης ασβεστοπυριτίου (CaSi) ή μίγματος οξειδίου ασβεστίου και φθοριούχου ασβεστίου, τα οποία τροφοδοτούνται από ακροφύσια τοποθετημένα στην οροφή. Ταυτόχρονα εμφυσάται αργό σε ποσότητα περίπου 1 Nm^3/min. Με την παραπάνω διαδικασία έχει βρεθεί ότι 50 – 80% της αποθείωσης επιτυγχάνεται εντός 12 – 15 min. Επομένως, αν υποτεθεί ότι η αρχική περιεκτικότητα του θείου στο μέταλλο είναι 110 ppm, μέσω της αποθείωσης η περιεκτικότητα μειώνεται σε 20 – 40 ppm.

Μια παραλλαγή της μεθόδου περιλαμβάνει εμφύσηση ποσότητας αλουμινίου σε συνδυασμό με τα παραπάνω μίγματα. Έχει υπολογισθεί ότι η περιεκτικότητα σε θείο μπορεί να μειωθεί από 0,014% σε 25 – 45 ppm εντός 7 min (Turkdogan, 1996).

2.3.4.2 Ανάδευση με αργό και δημιουργία ασβεστοαλουμινικής σκωρίας

Με τη δημιουργία σκωρίας πλούσια σε ασβέστιο και αργίλιο αλλά και εμφύσηση αργού παροχής 1,5 – 1,8 Nm^3/min, υπάρχει δυνατότητα εκτεταμένης αποθείωσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται βέλτιστα σε δευτερογενή μεταλλουργία υπό κενό, όπου υπάρχει καλή ανάμειξη σκωρίας μετάλλου και μικρή πίεση εντός του συστήματος. Ταυτόχρονα γίνεται και μερική απομάκρυνση ποσότητας υδρογόνου και αζώτου.

Έχει παρατηρηθεί ότι όσο μικρότερη είναι η συγκέντρωση του οξειδίου του πυριτίου στη σκωρία, τόσο περισσότερο ευνοείται η αποθείωση. Αυτό συμβαίνει καθώς το αλουμίνιο ανάγει το SiO_2 σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:

$$SiO_2 + \frac{4}{3}[Al] \rightarrow [Si] + \frac{2}{3}(Al_2O_3) \qquad (4)$$

Με τα στοιχεία και τις ενώσεις που βρίσκονται εντός της παρένθεσης να είναι διαλελυμένα στη σκωρία και εντός της αγκύλης να βρίσκονται στο μέταλλο.

Επομένως έχει βρεθεί ότι με περιεκτικότητα μικρότερη του 5% σε SiO_2 η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε ικανοποιητικό βαθμό (Turkdogan, 1996).

2.3.4.3 Μέθοδος "EXOSLAG"

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται σε μέταλλο με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε αλουμίνιο και χρησιμοποιείται πριν το στάδιο της μεταλλουργίας κάδου. Η αποθείωση πραγματοποιείται κατά την απόχυση του μετάλλου στον κάδο μέσω προπαρασκευασμένου αποθειωτικού μέσου (σκωρίας). Το μέσο το οποίο προστίθεται στον κάδο πριν την απόχυση έχει προπαρασκευασθεί χυτεύοντας σίδηρο σε μίγμα αργιλίου - ασβεστίου. Οι εξώθερμες αντιδράσεις οι οποίες πραγματοποιούνται είναι:

$$Fe_2O_3 + 2Al \rightarrow Al_2O_3 + 2Fe \quad (5)$$

$$xCaO + Al_2O_3 \rightarrow xCaO \cdot Al_2O_3 \quad (6)$$

Για την πραγματοποίηση των παραπάνω αντιδράσεων απαιτείται αύξηση της θερμοκρασίας σε 870°C έως 890°C. Σε βιομηχανική κλίμακα είναι εφικτή η πραγματοποίηση των αντιδράσεων καθώς μέσω της προθέρμανσης του κάδου, η θερμοκρασία βρίσκεται περίπου στους 1000°C. Το χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης των αντιδράσεων είναι 5 min (Turkdogan, 1996).

Η χρήση της παραπάνω μεθόδου είναι συμφέρουσα σύμφωνα με τον Turkdogan (Turkdogan, 1996) καθώς η θερμοκρασία χύτευσης του μετάλλου στον κάδο μπορεί να μειωθεί κατά 24°C. Ωστόσο, υπάρχουν δυο παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά την εκτέλεση της μεθόδου. Ο πρώτος είναι ότι το μίγμα πρέπει να είναι πλήρως απαλλαγμένο από υγρασία καθώς υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας έκρηξης. Ο δεύτερος παράγοντας είναι ότι κατά την ολοκλήρωση των αντιδράσεων, η απόχυση του σιδήρου πρέπει να γίνει αμέσως καθώς υπάρχει κίνδυνος στερεοποίησης της σκωρίας, γεγονός που έχει καταστρεπτικές συνέπειες στη μεταλλουργία κάδου (Turkdogan, 1996).

2.3.4.4 Ρυθμός αποθείωσης

Ο ρυθμός της αποθείωσης είναι άμεση συνάρτηση των φαινομένων μεταφοράς μάζας και ανάμειξης των φάσεων μετάλλου και σκωρίας, καθώς επίσης και της θειοχωρητικότητας της σκωρίας. Η θειοχωρητικότητα ορίζεται ως η ικανότητα της σκωρίας να προσροφάει θείο και δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{K\ \alpha_{CaO}}{f_s} \quad (7)$$

Όπου f_s είναι ο συντελεστής ενεργότητας του θείου στη σκωρία, α_{CaO} η θερμοδυναμκή ενεργότητα του CaO στη σκωρία και K η σταθερά ισορροπίας της αντίδρασης:

$$\frac{1}{2}S_2 + CaO \rightarrow CaS + \frac{1}{2}O_2 \quad (8)$$

Η θειοχωρητικότητα επηρεάζεται από τη φύση του βασικού οξειδίου, το οποίο περιέχει. Συγκεκριμένα, η θειοχωρητικότητα της σκωρίας αυξάνεται για ένα ισχυρά βασικό οξείδιο όπως το CaO σε σχέση με ένα λιγότερο βασικό οξείδιο όπως το FeO (Νέου – Συγκούνα).

Σημειώνεται ότι η σκωρία της μεταλλουργίας κάδου έχει μεγάλη ικανότητα απορρόφησης του θείου. Επομένως, προκειμένου να ολοκληρωθεί η αποθείωση σε ικανοποιητικό χρόνο, απαιτείται σημαντική παροχή αργού, καλή ανάδευση των φάσεων, μεγάλη θειοχωρητικότητα και μικρή οξείδωση του μετάλλου (Νέου – Συγκούνα, Fruehan, 1998, Pretorius).

2.3.5 Αποξείδωση και απομάκρυνση αερίων

2.3.5.1 Αποξείδωση

Για την αποξείδωση κατά τη μεταλλουργία κάδου έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνικές. Στη παραγωγική διαδικασία της Σιδενόρ, γίνεται τροφοδοσία κραμάτων σιδήρου - πυριτίου και πυριτίου – μαγγανίου.

2.3.5.1.1 Προσθήκη Mn

Μέσω της τροφοδοσίας μαγγανίου στο σύστημα, το μαγγάνιο προσλαμβάνει το διαλελυμένο στο σίδηρο οξυγόνο και οξειδώνεται σε MnO. Καθώς το μαγγάνιο προστίθεται, η περιεκτικότητα του σιδήρου σε μαγγάνιο αυξάνεται. Ωστόσο, με την ολοκλήρωση της οξείδωσης του μαγγανίου, σταδιακά η περιεκτικότητα μειώνεται αφού το οξείδιο του μαγγανίου οδηγείται στη σκωρία (Turkdogan, 1996).

2.3.5.1.2 Προσθήκη Mn – Si

Έχει βρεθεί ότι η αποξείδωση, που επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη εισαγωγή του μαγγανίου και του πυριτίου στο σύστημα, πραγματοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό από την εισαγωγή των στοιχείων ξεχωριστά. Με μικρή παρουσία αλουμινίου στο σύστημα, το προϊόν που σχηματίζεται είναι μαγγανιούχο αργιλοπυρίτιο και το διαλελυμένο οξυγόνο βρίσκεται σε συγκέντρωση 50 ppm. Αρωγός στη παραπάνω διαδικασία είναι η προσθήκη CaSi στο σύστημα (Turkdogan, 1996, Fruehan, 1998).

Να σημειωθεί ότι στις σκωρίες της μεταλλουργίας κάδου οι οποίες περιέχουν ασβέστιο και αλουμίνιο και σε μικρότερο βαθμό μαγγάνιο και πυρίτιο, το διαλελυμένο οξυγόνο εξαρτάται από το αλουμίνιο το οποίο βρίσκεται διαλελυμένο σε όλη τη μάζα του λουτρού (Fruehan, 1998).

2.3.5.2 Απομάκρυνση N_2, H_2

Ενώ η αποξείδωση στη μεταλλουργία κάδου είναι εφικτή, η απομάκρυνση των διαλελυμένων αερίων και κυρίως του αζώτου και του υδρογόνου από το μέταλλο απαιτούν την ύπαρξη ειδικευμένων διατάξεων. Για την απομάκρυνση του N_2 και του H_2 έχει αναπτυχθεί η μεταλλουργία υπό κενό. Κατά τη διαδικασία αυτή με τις συνθήκες πίεσης που δημιουργούνται, τα συγκεκριμένα αέρια μετακινούνται εντός της ρευστής μάζας με τη μορφή φυσαλίδων και εξέρχονται προς την ατμόσφαιρα του κάδου. Εντός του κάδου υπάρχει ακροφύσιο για την εμφύσηση αργού (Turkdogan, 1996).

2.4 Χύτευση

Η χύτευση αποτελεί το τελικό στάδιο για την παραγωγή χάλυβα. Το ρευστό μέταλλο από τη μεταλλουργία κάδου τοποθετείται σε ειδικές διατάξεις προκειμένου το μέταλλο σταδιακά να στερεοποιηθεί και να αποκτήσει συγκεκριμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Υπάρχουν δυο είδη χύτευσης, η συνεχής και η χύτευση σε παρτίδες. Η επιλογή της μεθόδου χύτευσης πραγματοποιείται με βάση την παραγωγική διαδικασία του εκάστοτε χαλυβουργείου. Στην

παρούσα εργασία θα γίνει περιγραφή της συνεχούς χύτευσης, καθώς αποτελεί μέρος της παραγωγικής διαδικασίας του χαλυβουργείου της ΣΙΔΕΝΟΡ.

2.4.1 Συνεχής χύτευση

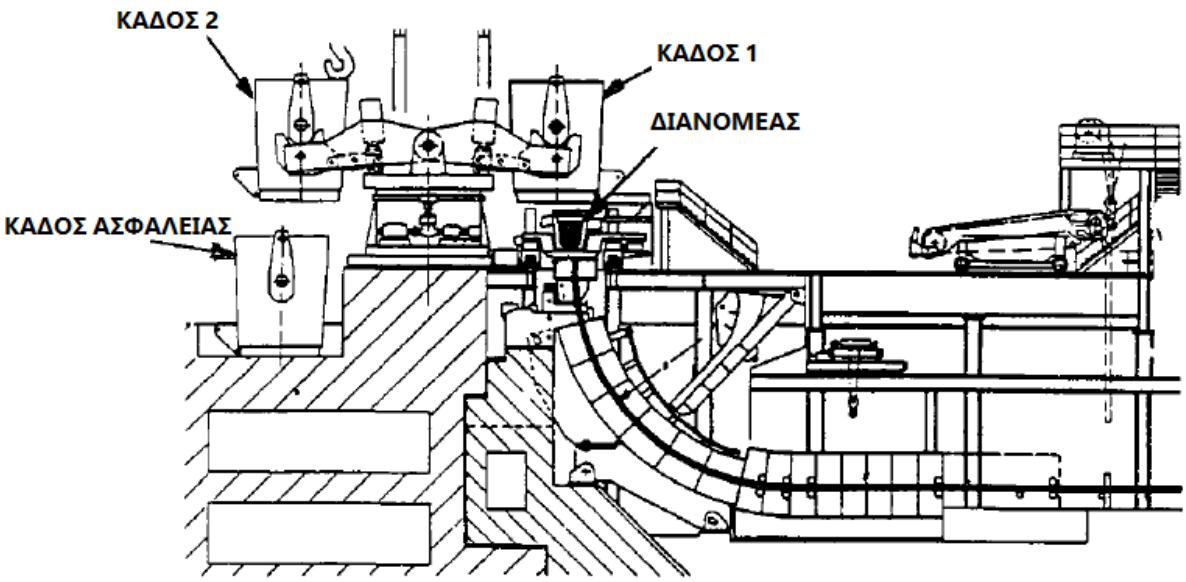
Το μέταλλο της μεταλλουργίας κάδου αποχύνεται μέσω στομίου, το οποίο βρίσκεται στο εξωτερικό κέλυφος του κάδου προς κατασκευές οι οποίες ονομάζονται **Tundish** (Διανομέας). Το στόμιο φέρει πυρίμαχα με στόχο την απομόνωση του μετάλλου από το περιβάλλον για την αποφυγή οξείδωσης. Διαφορετικά είδη στομίων μπορούν να ρυθμίσουν τη ροή του μετάλλου, καθώς και να διακόψουν τη διαδικασία απόχυσης ώστε να μην προστεθεί σκωρία στη χύτευση.

Το προϊόν της μεταλλουργίας κάδου αποχύνεται μέσω του **Tundish** σε μήτρες ή καλούπια από χαλκό, οι οποίες είναι υδρόψυκτες. Από τη ψύξη του καλουπιού μειώνεται η θερμοκρασία του ρευστού μετάλλου. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν ορισμένα μέτρα προκειμένου να μην υπάρξει προσκόλληση υλικού στα τοιχώματα (Irving, 1993).

- Η μήτρα έχει ημιτονοειδή κίνηση, τέτοια ώστε να κινείται προς τα κάτω με μεγαλύτερο βαθμό από το εξωτερικό μέρος του μετάλλου, το οποίο στερεοποιείται.
- Μεταξύ της μήτρας και του του μετάλλου, που στερεοποιείται, τροφοδοτείται έλαιο ή χυτευτική σκόνη για προστασία της μήτρας και του μετάλλου. Επιπροσθέτως, στο μέταλλο τροφοδοτείται συνθετική σκόνη η οποία δημιουργεί σκωρία καθώς αντιδράει με το μέταλλο. Η σκωρία εισχωρεί στο κενό που δημιουργείται μεταξύ του καλουπιού και του μετάλλου και με αυτόν τον τρόπο δρα ως λιπαντικό.

Αφού δημιουργηθεί περίβλημα στερεοποιημένου μετάλλου προς το κατώτερο μέλος της μήτρας, η ψύξη του μετάλλου δεν πραγματοποιείται από νέο καλούπι, αλλά πραγματοποιείται από καταιονισμό νερού. Ο λόγος της διακοπής της χρήσης μήτρας είναι το κενό, το οποίο δημιουργείται μεταξύ των τοιχωμάτων της μήτρας και της στερεοποιημένης μάζας μετάλλου. Ο αέρας, ο οποίος εισχωρεί στο κενό μειώνει την αποδοτικότητα της ψύξης του υλικού. Για αυτόν το λόγο η ψύξη του μετάλλου μέσω καταιονισμού νερού υπό πίεση στο υλικό έχει βρεθεί ότι είναι περισσότερο αποδοτική. Εντούτοις, το πρόβλημα με τη συγκεκριμένη μέθοδο ψύξης είναι ότι το στερεοποιημένο περίβλημα του υλικού δέχεται πίεση από το ρευστό μέταλλο στο εσωτερικό. Για να αντισταθμιστεί η πίεση και να μην υπάρξει διαρροή του ρευστού μετάλλου στο περιβάλλον μέσω ειδικών μηχανισμών, λόγου χάρη ράουλα, υποστηρίζεται το στερεοποιημένο περίβλημα και προωθείται το υλικό. Να σημειωθεί ότι εφόσον υπάρξει αστοχία στη διαδικασία της χύτευσης, οι οικονομικές συνέπειες είναι μεγάλες καθώς η μονάδα της χύτευσης σταματάει τη λειτουργία της και φυσικά με αυτόν τον τρόπο επηρεάζονται και τα προηγούμενα στάδια της παραγωγής (Irving, 1993).

Όσον αφορά στη συνεχή ροή υλικού, υπάρχει ειδική κατασκευή, στην οποία τοποθετούνται οι κάδοι της μεταλλουργίας κάδου (Σχήμα 2.2, Irving, 1993). Στη μια θέση τοποθετείται ο κάδος, από τον οποίο χυτεύεται το υλικό, ενώ στην άλλη θέση τοποθετείται ο κάδος, του οποίου το υλικό έχει μόλις επεξεργασθεί κατά τη μεταλλουργία κάδου και προορίζεται για χύτευση. Η διάταξη περιστρέφεται προκειμένου με το πέρας της χύτευσης του κάδου να εναλλαχθεί ο κάδος χωρίς υλικό με τον κάδο που περιέχει ρευστό μέταλλο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται συνεχής ροή υλικού. Ο κενός κάδος μεταφέρεται μέσω γερανού και τοποθετείται σε κενό χώρο ώστε ο κάδος να χρησιμοποιηθεί σε επόμενο χυτήριο. Μια τυπική διάταξη συνεχούς χύτευσης είναι η παρακάτω:



Σχήμα 2.2. Τυπική εικόνα διάταξης συνεχούς χύτευσης.

Να σημειωθεί ότι κάτω από τον κάδο ο οποίος βρίσκεται σε αναμονή, τοποθετείται ένας κάδος για λόγους ασφαλείας.

Προκειμένου να γίνει ομαλή μετάβαση από την ημίρρευστη κατάσταση στη στερεή, το υλικό προωθείται μέσω καμπύλης κατασκευής προς το ευθύγραμμο κομμάτι της χύτευσης. Το τόξο κύκλου που σχηματίζει η καμπύλη της κατασκευής εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος.

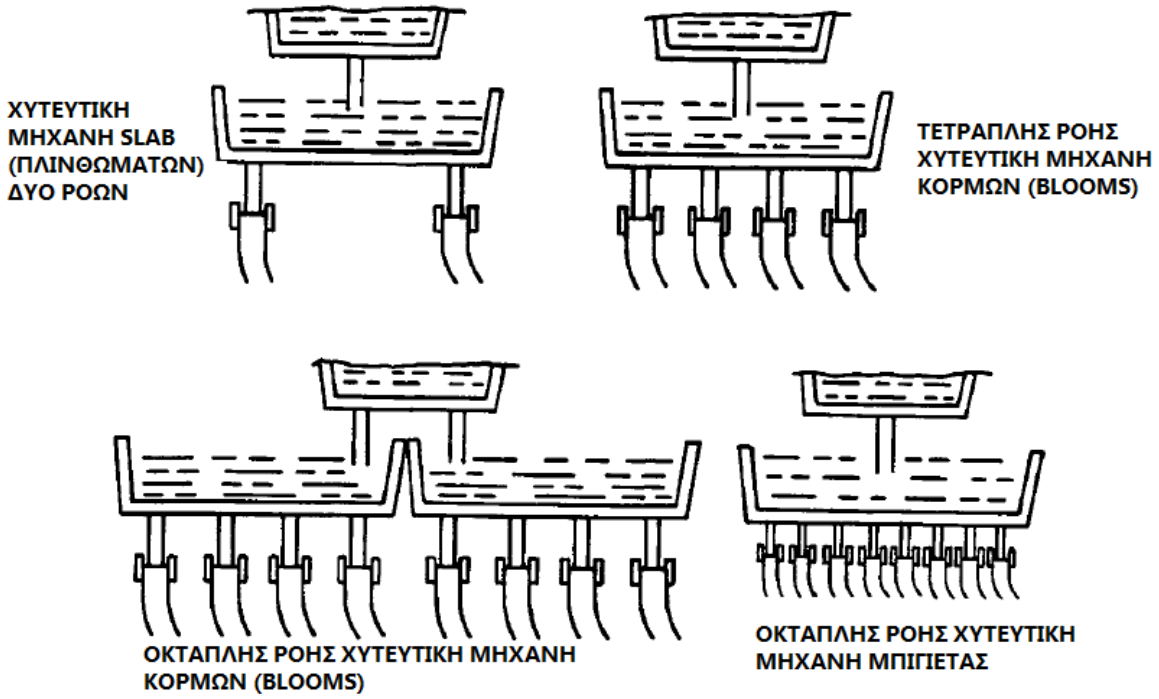
Αφού το υλικό εξέλθει από το παραπάνω σημείο της χύτευσης, μέσω ράουλων προωθείται στη μονάδα της έλασης. Στη συγκεκριμένη μονάδα, μειώνεται το πάχος της μπιγιέτας και αυξάνεται το μήκος της, ενώ ταυτόχρονα προσδίδονται τα τελικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προϊόντος. Στο τέλος της χύτευσης υπάρχουν μονάδες οξυγονοκοπής σε κάθε γραμμή χύτευσης, στις οποίες με εμφύσηση οξυγόνου με μεγάλη πίεση η μπιγιέτα τεμαχίζεται σε κομμάτια συγκεκριμένου μήκους. Αφού με την παραπάνω επεξεργασία έχουν ρυθμιστεί όλες οι προδιαγραφές του ημιέτοιμου προϊόντος, το τελευταίο βήμα είναι η ψύξη του υλικού. Η ψύξη πραγματοποιείται μέσω του ατμοσφαιρικού αέρα τοποθετώντας τις μπιγιέτες σε κατάλληλα σχεδιασμένο χώρο του εργοστασίου (Irving, 1993).

2.4.1.1 Tundish (Διανομέας)

Από τον κάδο το ρευστό υλικό αποχύνεται στο **Tundish**. Το **Tundish** έχει σχήμα δεξαμενής, κατά την οποία η στάθμη του ρευστού μετάλλου πρέπει να κυμαίνεται σε συγκεκριμένα όρια.

Για την προστασία της κατασκευής χρησιμοποιούνται πυρότουβλα υψηλής αλούμινας, ή συνηθέστερα μαγνησίας.

Το **Tundish** έχει δυο βασικές λειτουργίες. Η πρώτη είναι να κατανέμει το ρευστό μέταλλο σε μήτρες και άρα σε διαφορετικές γραμμές χύτευσης. Ο αριθμός των γραμμών αλλά και το μήκος τους καθορίζουν το μέγεθος του **Tundish** (Σχήμα 2.3, Irving, 1993).



Σχήμα 2.3. Διαφορετικές διατάξεις του Tundish για διαφορετικά είδη προϊόντος χύτευσης

Η δεύτερη λειτουργία είναι να διατηρήσει σταθερή τη χημική σύσταση του μετάλλου. Για να πραγματοποιηθεί η παραπάνω λειτουργία, γίνεται προσθήκη σκόνης η οποία δημιουργεί σκωρία στην επιφάνεια του μετάλλου. Φυσικά είναι επόμενο ότι εκτός από την προφύλαξη της χημικής σύστασης του μετάλλου, η σκωρία αποτρέπει την απώλεια θερμότητας από το μέταλλο προς το περιβάλλον. Επίσης, να σημειωθεί ότι σε αυτό το στάδιο της χύτευσης είναι δυνατή η ρύθμιση της χημικής σύστασης του μετάλλου. Συνήθως για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών μπορεί να προστεθεί ποσότητα ασβεστίου.

Υπάρχουν διάφορες διατάξεις μέσω των οποίων το μέταλλο αποχύνεται από το **Tundish** στις μήτρες. Η συνηθέστερη εξ' αυτών είναι η χρήση στομίων τα οποία μπορούν να ρυθμίσουν την παροχή μετάλλου, ενώ άλλες μέθοδοι ρύθμισης παροχής περιλαμβάνουν την τοποθέτηση διατάξεων ρύθμισης παροχής ρευστού μετάλλου στις μήτρες (Irving, 1993).

2.5 Παραγωγική Διαδικασία της Σιδενόρ Βιομηχανική Χάλυβα

Ως πρότυπο για την προσομοίωση χαλυβουργείων λήφθηκε η παραγωγική διαδικασία του εργοστασίου του ομίλου ΣΙΔΕΝΟΡ. Ο όμιλος ΣΙΔΕΝΟΡ ασχολείται με την παραγωγή, μεταποίηση και εμπορία προϊόντων χάλυβα με σημαντική παρουσία στην Ελλάδα αλλά και στην Ανατολική Ευρώπη. Τα προϊόντα της εταιρείας καλύπτουν απαιτητικές ανάγκες πελατών. (Σιδενόρ)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως σε επιμέρους παραγράφους η παραγωγική διαδικασία της μονάδας της ΣΙΔΕΝΟΡ στη Θεσσαλονίκη περιλαμβάνει:

- Τοποθέτηση του scrap σε ειδικά σχεδιασμένους χώρους και ανάμειξη των διαφόρων ποιοτήτων με σκοπό την ομογενοποίηση της χημικής σύστασης της τροφοδοσίας

- Τροφοδοσία του scrap μέσω καλαθιών στην ηλεκτρική κάμινο
- Εμφύσηση φυσικού αερίου και οξυγόνου για τη θέρμανση του scrap
- Καταβίβαση ηλεκτροδίων με σκοπό την τήξη scrap
- Εμφύσηση οξυγόνου μεγάλης πίεσης με σκοπό την κοπή του scrap
- Προσθήκη συλλιπασμάτων για δημιουργία σκωρίας
- Επανάληψη παραπάνω σταδίων για την επίτευξη επιθυμητής ποσότητας μετάλλου
- Δειγματοληψία για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας και περιεκτικότητας σε συγκεκριμένα στοιχεία (πχ Mn, Si, P κ.α.)
- Δημιουργία αφρισμού σκωρίας μέσω εμφύσησης άνθρακα και οξυγόνου σε μέγιστη ένταση
- Απομάκρυνση ποσότητας σκωρίας
- Απόχυση ρευστού μετάλλου στον κάδο
- Προσθήκη συλλιπασμάτων και ανάδευση με αργό για μείωση απωλειών ενέργειας
- Μεταφορά του κάδου στο τμήμα μεταλλουργίας κάδου με σκοπό τη ρύθμιση της ποιότητας
- Καταβίβαση ηλεκτροδίων με σκοπό τη θέρμανση του λουτρού και την πραγματοποίηση των αντιδράσεων
- Προσθήκη συλλιπασμάτων και σιδηροκραμάτων για τη δημιουργία σκωρίας
- Με τη ρύθμιση της ποιότητας του χάλυβα ακολουθεί η χύτευση του υλικού
- Το υλικό χυτεύεται σε μήτρες που ψύχονται και σε καταιονιστήρες νερού με σκοπό την επίτευξη ημίρρευστης κατάστασης
- Προώθηση υλικού μέσω ράουλων και τεμαχισμός μέσω οξυγονοκοπής
- Ψύξη σε ατμοσφαιρικό αέρα και προώθηση προϊόντος σε μονάδες επεξεργασίας με σκοπό την παραγωγή τελικού προϊόντος χάλυβα.

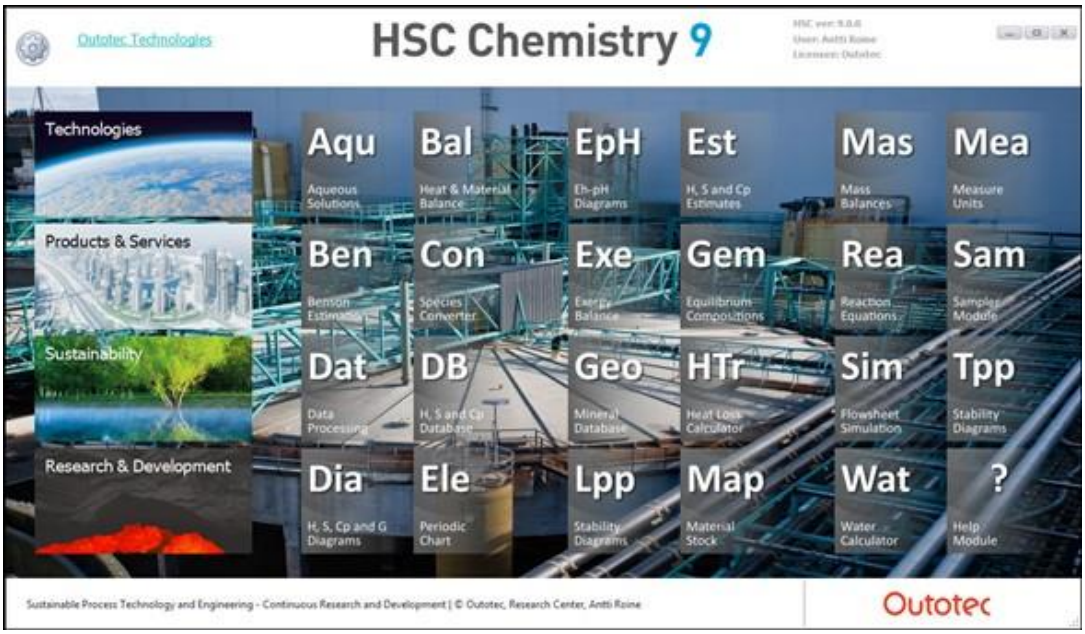
3. HSC CHEMISTRY 9

Το "**HSC Chemistry 9**" είναι ένα λογισμικό της εταιρείας "Outotec Oyj" που χρησιμοποιείται για θερμοδυναμικούς υπολογισμούς, ενώ παράλληλα δίνεται η δυνατότητα σχεδιασμού διαγραμμάτων ροής. Μέσω της βάσης δεδομένων που διαθέτει το πρόγραμμα είναι ικανό να υπολογίσει τις θερμοδυναμικές ιδιότητες συστημάτων όπως την ενθαλπία, την ελεύθερη ενέργεια κ.α. (Outotec, 2016).

Παρά το γεγονός ότι είναι ένα λογισμικό, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εγκατεστημένο από προσωπικούς υπολογιστές μέχρι και υπολογιστές στη βιομηχανία, το αρνητικό του είναι ότι περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο πλήθος εφαρμογών. Αυτό συμβαίνει καθώς κατά τη διεξαγωγή υπολογισμών δεν συμπεριλαμβάνονται έννοιες όπως κινητική των αντιδράσεων ή μη ιδανικά διαλύματα. Επομένως, αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την προσομοίωση διεργασιών αλλά κυρίως για το σχεδιασμό νέων διεργασιών. Φυσικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποτελούν μια ιδεατή θεώρηση των διαδικασιών.

3.1 Αρχικό Μενού

Όταν ξεκινήσει το **HSC Chemistry 9**, η εικόνα που παρουσιάζεται είναι η εξής:



Εικόνα 2.6. Το αρχικό μενού του HSC Chemistry.

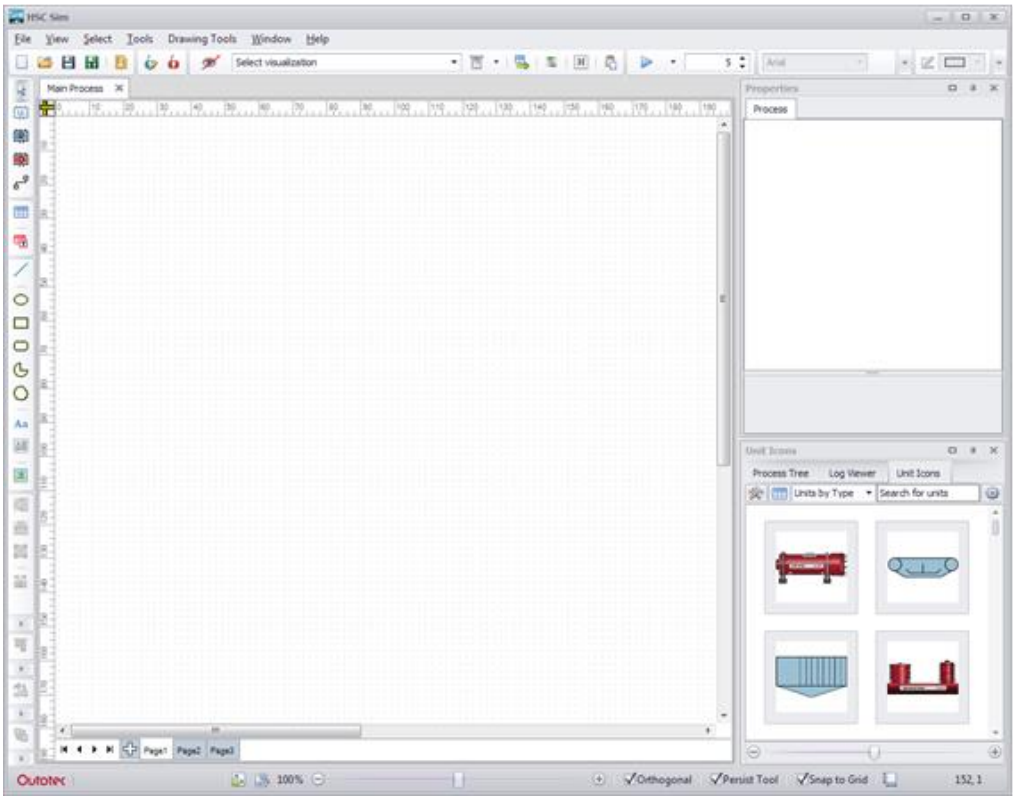
Όλες οι επιλογές που εμφανίζονται στην κεντρική οθόνη του **HSC** (**Aqu**, **Bal**, **EpH** κλπ) αντιστοιχούν σε υποσυστήματα (**Modules**) του προγράμματος. Όταν επιλεγεί κάποιο υποσύστημα, μεταφέρεται ο έλεγχος σε ένα διαφορετικό από τα άλλα υποπρόγραμμα, το οποίο έχει διαφορετικό περιβάλλον και διαφορετικές λειτουργίες. Για παράδειγμα το **Module Mass Balances** (**Mass**) χρησιμοποιείται για προβλήματα που αφορούν ισοζύγια μάζας (Outotec, 2016).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το υποπρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το **Flowsheet Simulation** που εμφανίζεται στην κεντρική οθόνη με το ακρωνύμιο **Sim**. Στη συνέχεια θα αναπτυχθούν περιληπτικά τα βασικά σημεία του υποπρογράμματος.

3.2 Υποσύστημα "Sim"

Το **υποσύστημα Sim** χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και την προσομοίωση διεργασιών. Βασίζεται στο πρόγραμμα **Excel**. Επομένως, υπάρχουν οι βασικές λειτουργίες και κάποιες βασικές εξισώσεις οι οποίες υπάρχουν και στο **Excel**. Όλες οι μονάδες οι οποίες σχεδιάζονται στο διάγραμμα ροής, αποτελούν ξεχωριστά αρχεία **Excel** στον ίδιο φάκελο που αποθηκεύεται το βασικό αρχείο προσομοίωσης.

Όταν επιλεγεί το συγκεκριμένο υποσύστημα εμφανίζεται η παρακάτω οθόνη:



Εικόνα 2.7. Η αρχική οθόνη του Flowsheet Simulation.

Στον κενό χώρο μπορεί να γίνει ο σχεδιασμός του διαγράμματος ροής της προς μελέτη μεθόδου κατεργασίας. Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάζεται ένα διάγραμμα ροής αλλά και ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος, θα περιγραφούν τα πιο σημαντικά σημεία της παραπάνω οθόνης.

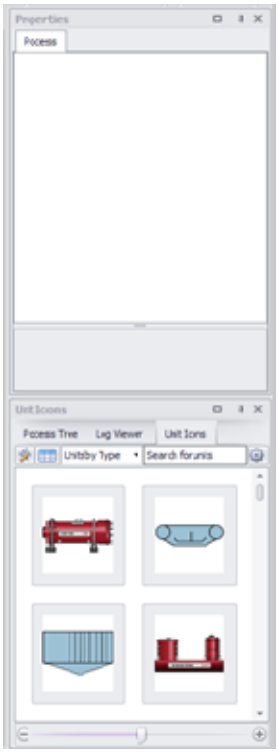
3.2.1 <u>Μπάρες πληροφοριών</u>

Στα δεξιά της οθόνης υπάρχουν οι δυο μπάρες πληροφοριών (**Docking Bars**) που χωρίζονται σε άνω και κάτω. Σε αυτές εμφανίζονται πληροφορίες που αφορούν την προσομοίωση αλλά και το διάγραμμα ροής.

Πιο συγκεκριμένα στο ανώτερο μέρος, αν επιλεχθεί ένα ρεύμα ή μια μονάδα εμφανίζονται πληροφορίες όπως η ονομασία, το χρώμα της ονομασίας στο διάγραμμα ροής, η πηγή και ο προορισμός αν αφορά ρεύμα κ.α.

Στο κατώτερο μέρος εμφανίζονται πληροφορίες όπως εικονίδια των μονάδων τα οποία μπορούν να προστεθούν στο διάγραμμα ροής, συγκεκριμένα μηνύματα του προγράμματος τα οποία αφορούν την προσομοίωση και τα σφάλματα τα οποία προέκυψαν κατά τη διεξαγωγή

της και ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα ροής που απεικονίζει της μονάδες και τα ρεύματα, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο τα παραπάνω συνδέονται αλλά και τη σειρά διεξαγωγής των υπολογισμών. Λόγου χάρη, μια μονάδα που βρίσκεται πιο πάνω από μια άλλη προηγείται στην διεξαγωγή υπολογισμών κατά την προσομοίωση.



Εικόνα 2.8. Τα Docking Bars.

3.2.2 <u>Μπάρα "Sim"</u>

Η μπάρα **Sim (Sim Bar)** τοποθετείται στα αριστερά της οθόνης και αποτελεί το πιο σημαντικό σημείο του προγράμματος κατά τον σχεδιασμό του διαγράμματος ροής.

Εικόνα 2.9. Η μπάρα Sim.

Θα περιγραφούν τα εικονίδια από τα αριστερά προς τα δεξιά. Το πρώτο είναι το εικονίδιο επιλογής (**Select**). Αυτό το εικονίδιο χρησιμοποιείται για την επιλογή στοιχείων στο διάγραμμα ροής. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να εκτελεστούν τροποποιήσεις στο διάγραμμα ροής καθώς αφού επιλεγεί ένα στοιχείο του διαγράμματος μπορεί να μεταβληθεί το όνομά του, η πηγή του και το πέρας του εφόσον είναι ρεύμα, να μετακινηθεί κάποια μονάδα κ.α.

Το επόμενο είναι εικονίδιο που σχετίζεται με την μονάδα (**Unit**). Με αυτό μπορεί να σχεδιασθεί μια μονάδα στο διάγραμμα ροής χωρίς όμως να υπάρχει κάποια συσχέτιση με τον τρόπο λειτουργίας ή κάποιο μοντέλο που ακολουθείται για τους υπολογισμούς. Χρησιμοποιείται όταν πρέπει να εισαχθεί ένα νέο είδος μονάδας, πλην των δυο επιλογών που μας δίδονται στο **Sim Bar**.

Η κεντρική επιλογή απεικονίζει το **Reactions Unit**. Το συγκεκριμένο είδος μονάδας χρησιμοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου κατά την προσομοίωση. Αναλυτικά θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο, όμως αναφέρεται ότι η μονάδα αυτή εξειδικεύεται και επιλέγεται όταν

πρόκειται να προσομοιωθεί μια μονάδα με βάση τις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται εντός της μονάδας.

Το αμέσως επόμενο εικονίδιο ονομάζεται **Distributions Unit**. Οι μονάδες αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως όταν υπάρχει ανάμειξη των ρευμάτων εισόδου. Επίσης, λόγω του τρόπου με τον οποίο λειτουργούν οι συγκεκριμένες μονάδες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εισαχθεί στο σύστημα η χημική σύσταση ενός ρεύματος.

Το τελευταίο εικονίδιο απεικονίζει τα ρεύματα. Μέσω αυτού του εικονιδίου μπορούν να απεικονισθούν στο διάγραμμα ροής τα ρεύματα.

3.2.3 Εκκίνηση προσομοίωσης

Το τελευταίο εικονίδιο που θα αναφερθεί είναι εκείνο της εκκίνησης της προσομοίωσης.

Εικόνα 2.10. Το εικονίδιο εκκίνησης της προσομοίωσης.

Το συγκεκριμένο εικονίδιο βρίσκεται ακριβώς πάνω από τα **Docking Bars** και φυσικά ο ρόλος του είναι η εκκίνηση υπολογισμών της διεργασίας και η παρουσίαση αποτελεσμάτων. Ακριβώς δεξιά από το εικονίδιο μπορούν να ρυθμιστούν οι επαναλήψεις της προσομοίωσης. Η τελευταία επιλογή ίσως είναι χρήσιμη όταν στο σύστημα υπάρχουν ανακυκλούμενα ρεύματα, τα οποία επηρεάζουν τη διαδικασία καθώς εισάγουν μια νέα παράμετρο στις μονάδες, στις οποίες καταλήγουν τα συγκεκριμένα ρεύματα.

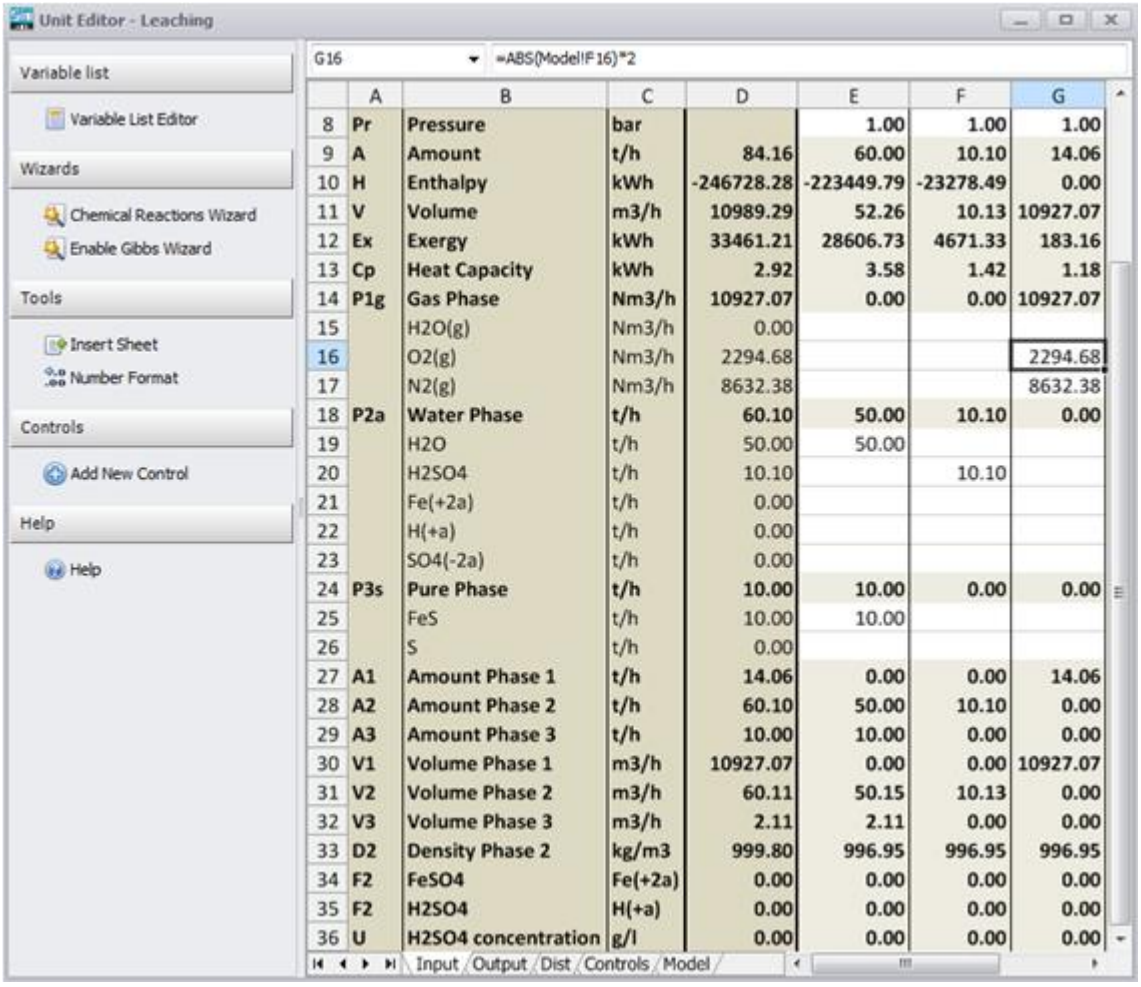
Αφού έγινε μια περιγραφή των βασικών στοιχείων της αρχικής οθόνης, σκόπιμο είναι να περιγραφεί η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των μονάδων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη προσομοίωση της διαδικασίας, δηλαδή οι μονάδες **Reactions Unit**.

3.3 “Reactions Unit”

Όπως προαναφέρθηκε οι συγκεκριμένες μονάδες χρησιμοποιούνται όταν ο χρήστης επιθυμεί να βασίσει το μοντέλο του στις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα εντός της μονάδας.

3.3.1 Είσοδος

Όταν ο χρήστης επιλέξει τη μονάδα, παρουσιάζεται η παρακάτω οθόνη:



	A	B	C	D	E	F	G
8	Pr	Pressure	bar		1.00	1.00	1.00
9	A	Amount	t/h	84.16	60.00	10.10	14.06
10	H	Enthalpy	kWh	-246728.28	-223449.79	-23278.49	0.00
11	V	Volume	m3/h	10989.29	52.26	10.13	10927.07
12	Ex	Exergy	kWh	33461.21	28606.73	4671.33	183.16
13	Cp	Heat Capacity	kWh	2.92	3.58	1.42	1.18
14	P1g	Gas Phase	Nm3/h	10927.07	0.00	0.00	10927.07
15		H2O(g)	Nm3/h	0.00			
16		O2(g)	Nm3/h	2294.68			2294.68
17		N2(g)	Nm3/h	8632.38			8632.38
18	P2a	Water Phase	t/h	60.10	50.00	10.10	0.00
19		H2O	t/h	50.00	50.00		
20		H2SO4	t/h	10.10		10.10	
21		Fe(+2a)	t/h	0.00			
22		H(+a)	t/h	0.00			
23		SO4(-2a)	t/h	0.00			
24	P3s	Pure Phase	t/h	10.00	10.00	0.00	0.00
25		FeS	t/h	10.00	10.00		
26		S	t/h	0.00			
27	A1	Amount Phase 1	t/h	14.06	0.00	0.00	14.06
28	A2	Amount Phase 2	t/h	60.10	50.00	10.10	0.00
29	A3	Amount Phase 3	t/h	10.00	10.00	0.00	0.00
30	V1	Volume Phase 1	m3/h	10927.07	0.00	0.00	10927.07
31	V2	Volume Phase 2	m3/h	60.11	50.15	10.13	0.00
32	V3	Volume Phase 3	m3/h	2.11	2.11	0.00	0.00
33	D2	Density Phase 2	kg/m3	999.80	996.95	996.95	996.95
34	F2	FeSO4	Fe(+2a)	0.00	0.00	0.00	0.00
35	F2	H2SO4	H(+a)	0.00	0.00	0.00	0.00
36	U	H2SO4 concentration	g/l	0.00	0.00	0.00	0.00

Εικόνα 2.11. Αρχική οθόνη του φύλλου εργασίας Input των Reactions Unit.

Αρχικά θα αναλυθούν οι επιλογές στα αριστερά, οι οποίες υπάρχουν σε όλες τις καρτέλες των συγκεκριμένων μονάδων.

Ξεκινώντας από πάνω διακρίνεται η επιλογή **Variable List Editor**. Αυτή η επιλογή είναι από τις πιο σημαντικές κατά την κατασκευή του μοντέλου καθώς στο μενού αυτό ρυθμίζονται παράμετροι όπως οι φάσεις των μονάδων (είδος και πλήθος), οι μονάδες μέτρησης των φάσεων, καθώς και τα στοιχεία και οι χημικές ενώσεις οι οποίες περιέχονται στο σύνολο των διεργασιών που υπάρχουν στο υπό μελέτη διάγραμμα ροής. Να σημειωθεί ότι όλες οι ρυθμίσεις και οι επιλογές που πραγματοποιούνται στο συγκεκριμένο μενού είναι κοινές για όλες τις μονάδες της προσομοίωσης. Επίσης, εφόσον επιλεγεί η μονάδα των χημικών αντιδράσεων πρέπει να προστεθούν και τα προϊόντα των αντιδράσεων στο **Variable List Editor**, εφόσον δεν υπάρχουν ήδη στα ρεύματα εισόδου.

Η επόμενη επιλογή είναι η **Chemical Reactions Wizard**. Το μενού αυτό είναι η καρδιά των μονάδων **Reactions Unit**, καθώς εφόσον επιλεχθεί το συγκεκριμένο μενού δίνεται η εντολή η μονάδα να δημιουργήσει ένα μοντέλο με βάση τις χημικές αντιδράσεις. Το μοντέλο ρυθμίζεται μέσω της καρτέλας **Model**, η οποία θα περιγραφεί στη συνέχεια.

Η αμέσως επόμενη επιλογή είναι η **Enable Gibbs Wizard**, η οποία επιλέγεται όταν επιθυμείται η μονάδα να κάνει υπολογισμούς με βάση την ελεύθερη ενέργεια. Όπως και με την επιλογή **Chemical Reactions Wizard**, έτσι και με το συγκεκριμένο μενού δίνεται η δυνατότητα της

ρύθμισης του μοντέλου στην καρτέλα **Model**. Καθώς το συγκεκριμένο μενού δεν χρησιμοποιήθηκε κατά την προσομοίωση, δεν θα περιγραφεί ο τρόπος λειτουργίας της συγκεκριμένης επιλογής.

Το επόμενο εικονίδιο είναι το **Insert Sheet**. Αυτή η επιλογή εισάγει μια νέα καρτέλα στη μονάδα. Η λειτουργία εισαγωγής καρτέλας αποδείχθηκε πολύ χρήσιμη κατά το σχεδιασμό της προσομοίωσης. Ο λόγος είναι ότι μέσω της λειτουργίας **Insert Sheet** εισήχθη στο υπό μελέτη σύστημα ένα καινούριο φύλλο **Excel** στο οποίο έγιναν υπολογισμοί των συστάσεων ορισμένων ρευμάτων. Ο συγκεκριμένος τρόπος επιλέχθηκε για την εισαγωγή συστάσεων, καθώς η προσθήκη περαιτέρω μονάδων θα επιβάρυνε την μοντελοποίηση και οι υπολογισμοί θα ήταν χρονοβόροι.

Η επόμενη επιλογή είναι η **Number Format**. Μέσω της συγκεκριμένης επιλογής ο χρήστης μπορεί να ορίσει τα δεκαδικά ψηφία όλων των αριθμών στο μοντέλο.

Το επόμενο εικονίδιο είναι το **Add New Control**. Επιλέγοντας το συγκεκριμένο εικονίδιο είναι δυνατόν να εισαχθεί ένα νέο σημείο ελέγχου (**Control)** στην καρτέλα με τα σημεία ελέγχου (καρτέλα **Controls**).

Το τελευταίο εικονίδιο είναι το **Help** το οποίο ανοίγει σε ένα καινούριο παράθυρο το εγχειρίδιο του προγράμματος σε ηλεκτρονική μορφή. Όταν το εγχειρίδιο ανοιχθεί, η ενότητα που εμφανίζεται αφορά την οθόνη στην οποία επιλέχθηκε το **Help.**

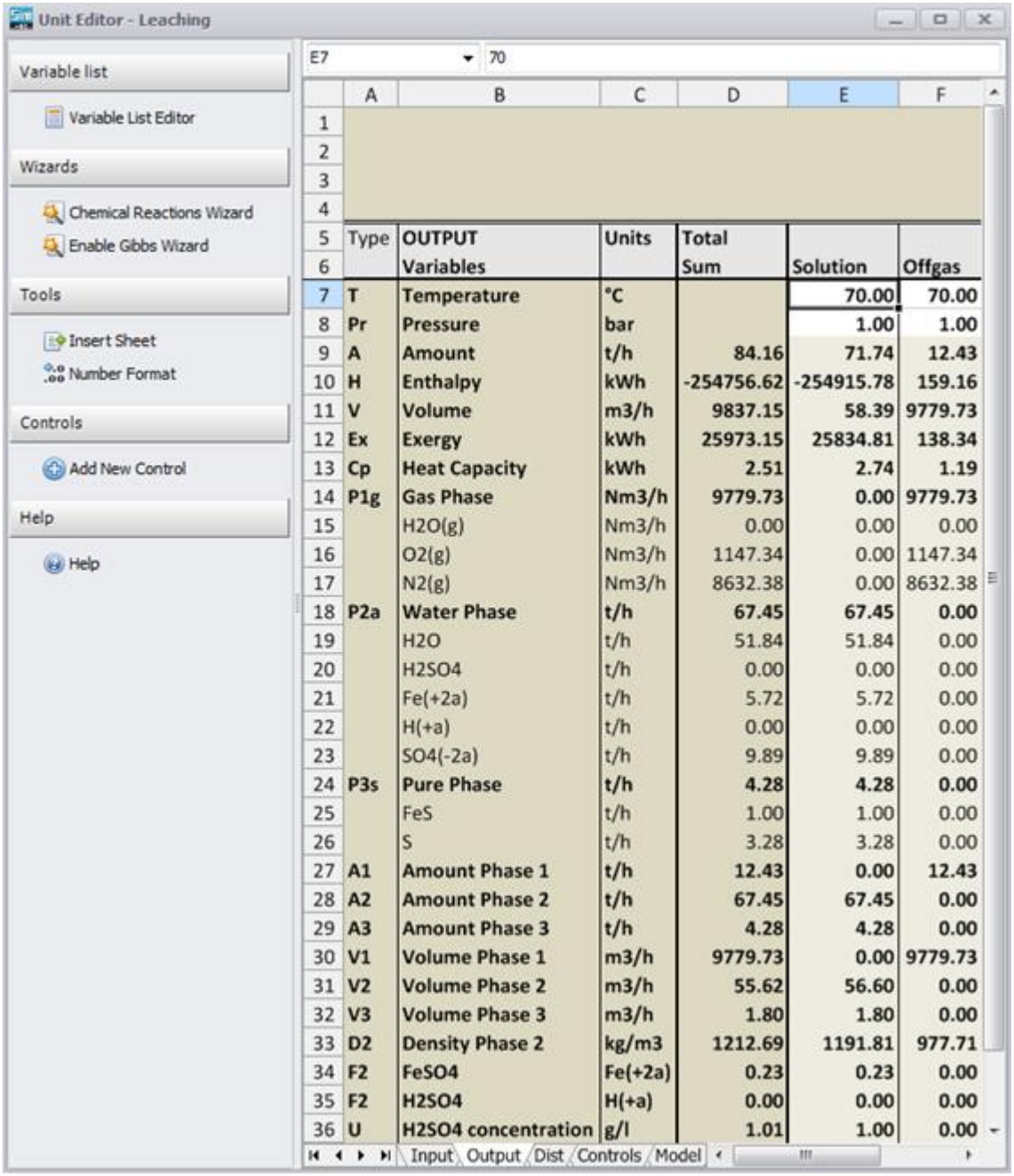
Αφού έγινε μια ανάλυση των επιλογών στα αριστερά της οθόνης στη συνέχεια θα περιγραφούν τα χαρακτηριστικά της κάθε καρτέλας των **Reactions Unit.**

Το μενού της καρτέλας **Input** αφορά τα ρεύματα εισόδου στη μονάδα. Στο πάνω μέρος της οθόνης εμφανίζονται τα ρεύματα εισόδου ενώ ακριβώς από κάτω εμφανίζονται πληροφορίες για το κάθε ρεύμα όπως ποσότητα, πίεση, θερμοκρασία, ενέργεια κ.α. Να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία και η πίεση ρυθμίζονται από το χρήστη, ενώ η ποσότητα του ρεύματος προκύπτει από τη συνολική ποσότητα των ποσοτήτων των φάσεων της μονάδας.

Στη συνέχεια εμφανίζονται οι φάσεις και τα επιμέρους στοιχεία και ενώσεις που αποτελούν την κάθε φάση. Η εικόνα αυτή είναι ίδια με την εικόνα του μενού **Variable List Editor** με τη διαφορά ότι στη συγκεκριμένη οθόνη εισάγονται ποσότητες των συστατικών και δεν μπορούν να προστεθούν καινούρια συστατικά. Ο χρήστης ορίζει τις ποσότητες των επιμέρους συστατικών των φάσεων του κάθε ρεύματος, με την εξαίρεση των ρευμάτων που αποτελούν εξόδους μονάδων. Στην τελευταία περίπτωση η ποσότητα του ρεύματος, των φάσεων του ρεύματος και των συστατικών των φάσεων υπολογίζονται μέσω των υπολογισμών της μονάδας από την οποία προκύπτει το συγκεκριμένο ρεύμα.

3.3.2 <u>Φύλλο εργασίας “Output”</u>

Η επόμενη επιλογή είναι το μενού **Output**, στο οποίο εμφανίζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών της μονάδας. Η εμφάνιση του συγκεκριμένου μενού ομοιάζει με την εμφάνιση του μενού **Input**. Στο συγκεκριμένο μενού, ο χρήστης μπορεί να εισάγει τη θερμοκρασία και την πίεση των ρευμάτων εξόδου. Ωστόσο δεν μπορεί να εισάγει τη σύσταση των ρευμάτων ή την ποσότητά τους καθώς τα δεδομένα αυτά προκύπτουν από τους υπολογισμούς της μονάδας.



	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3						
4						
5	Type	OUTPUT	Units	Total		
6		Variables		Sum	Solution	Offgas
7	T	Temperature	°C		70.00	70.00
8	Pr	Pressure	bar		1.00	1.00
9	A	Amount	t/h	84.16	71.74	12.43
10	H	Enthalpy	kWh	-254756.62	-254915.78	159.16
11	V	Volume	m3/h	9837.15	58.39	9779.73
12	Ex	Exergy	kWh	25973.15	25834.81	138.34
13	Cp	Heat Capacity	kWh	2.51	2.74	1.19
14	P1g	Gas Phase	Nm3/h	9779.73	0.00	9779.73
15		H2O(g)	Nm3/h	0.00	0.00	0.00
16		O2(g)	Nm3/h	1147.34	0.00	1147.34
17		N2(g)	Nm3/h	8632.38	0.00	8632.38
18	P2a	Water Phase	t/h	67.45	67.45	0.00
19		H2O	t/h	51.84	51.84	0.00
20		H2SO4	t/h	0.00	0.00	0.00
21		Fe(+2a)	t/h	5.72	5.72	0.00
22		H(+a)	t/h	0.00	0.00	0.00
23		SO4(-2a)	t/h	9.89	9.89	0.00
24	P3s	Pure Phase	t/h	4.28	4.28	0.00
25		FeS	t/h	1.00	1.00	0.00
26		S	t/h	3.28	3.28	0.00
27	A1	Amount Phase 1	t/h	12.43	0.00	12.43
28	A2	Amount Phase 2	t/h	67.45	67.45	0.00
29	A3	Amount Phase 3	t/h	4.28	4.28	0.00
30	V1	Volume Phase 1	m3/h	9779.73	0.00	9779.73
31	V2	Volume Phase 2	m3/h	55.62	56.60	0.00
32	V3	Volume Phase 3	m3/h	1.80	1.80	0.00
33	D2	Density Phase 2	kg/m3	1212.69	1191.81	977.71
34	F2	FeSO4	Fe(+2a)	0.23	0.23	0.00
35	F2	H2SO4	H(+a)	0.00	0.00	0.00
36	U	H2SO4 concentration	g/l	1.01	1.00	0.00

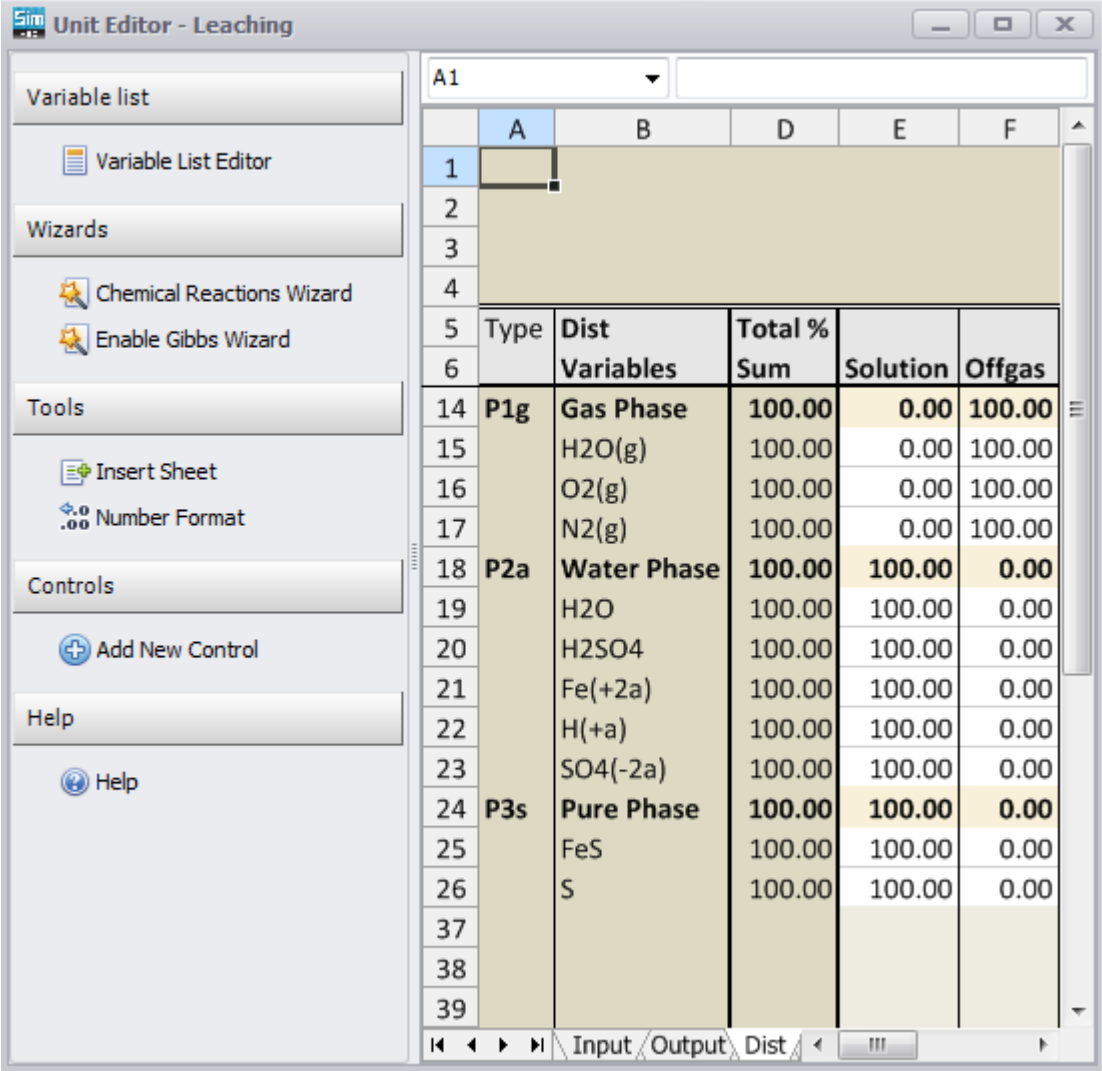
Εικόνα 2.12. Η οθόνη του φύλλου εργασίας Output.

3.3.3 Φύλλο εργασίας "Distribution"

Η επόμενη επιλογή είναι το φύλλο εργασίας **Distribution**. Το μενού αυτό αποτελεί σημαντικό κομμάτι για τη λειτουργία του μοντέλου. Η λειτουργία του συγκεκριμένου μενού είναι να κατανείμει τα προϊόντα των αντιδράσεων και τις ενώσεις και τις ουσίες των ρευμάτων εισόδου που δεν αντέδρασαν, στα ρεύματα που έχει δημιουργήσει ο χρήστης. Ωστόσο, η επιλογή των ρευμάτων στις οποίες θα κατανεμηθούν οι ενώσεις και τα στοιχεία καθορίζονται από το χρήστη. Επομένως, μέσω των εκατοστιαίων ποσοστών ο χρήστης ορίζει τον τρόπο κατανομής των προϊόντων στα ρεύματα εξόδου. Εντούτοις, η διαδικασία αυτή δεν είναι εύκολη. Συγκεκριμένα, αν ορισμένα ρεύματα αντιπροσωπεύουν μόνο συγκεκριμένες φάσεις, η εισαγωγή των ποσοστών είναι εύκολη. Αν όμως το συγκεκριμένο συστατικό κατανέμεται σε περισσότερα από ένα ρεύματα από, τότε δεν είναι τόσο ξεκάθαρο το ποσοστό το οποίο πρέπει

ανατεθεί στο κάθε ρεύμα. Αυτή η περίπτωση αποτέλεσε σημαντική τροχοπέδη για τη διεξαγωγή της συγκεκριμένης άσκησης προσομοίωσης.

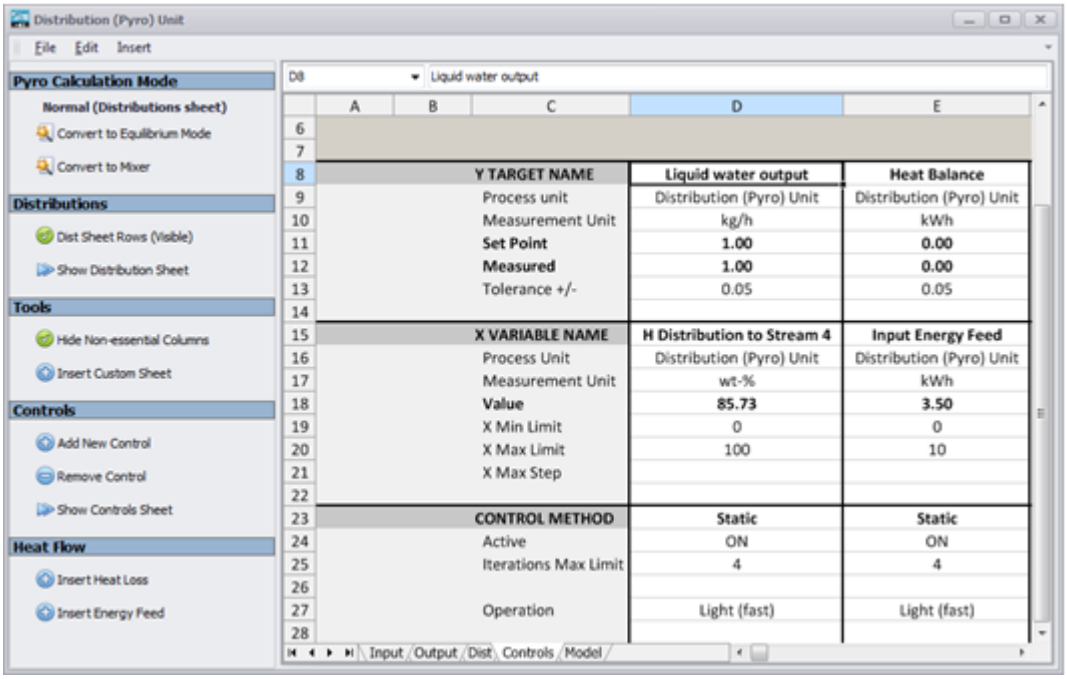
Αν δεν συμπληρωθούν όλα τα ποσοστά των συστατικών η προσομοίωση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. Αποτέλεσμα είναι να μην πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί και το μήνυμα το οποίο θα εμφανισθεί ως λάθος κατά την προσπάθεια προσομοίωσης είναι η έλλειψη ποσοτήτων στοιχείων που απαιτούνται για να πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις.



Εικόνα 2.13. Η οθόνη του φύλλου εργασίας Distribution.

3.3.4 <u>Σημεία ελέγχου (“Controls”)</u>

Η επόμενη καρτέλα είναι η **Controls**. Η λειτουργία της συγκεκριμένης καρτέλας είναι η εισαγωγή περιορισμών στο σύστημα. Λόγου χάρη μπορεί να ορισθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα για το ρεύμα των απαερίων. Η λειτουργία των περιορισμών είναι όμοια με τη λειτουργία αναζήτησης στόχου (**Goal Seek**) του **Excel**.



Εικόνα 2.14. Η οθόνη του φύλλου εργασίας Controls

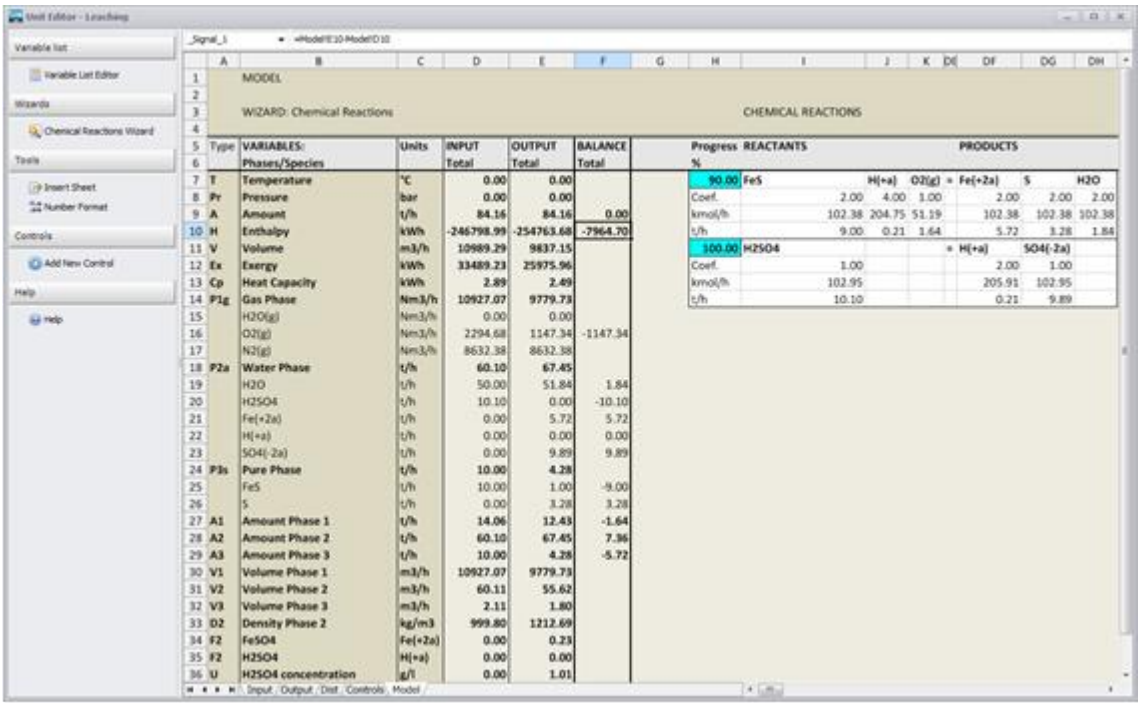
Η οθόνη χωρίζεται σε τρεις βασικές περιοχές. Πιο συγκεκριμένα στο άνω μέρος της οθόνης ορίζεται το όνομα του περιορισμού, στη συνέχεια ορίζονται στη γραμμή **Measurement Unit** οι μονάδες μέτρησης της ποσότητας που επιδιώκεται ο στόχος και από κάτω εισάγεται η ποσότητα στόχου. Στο επόμενο κελί πρέπει να εισαχθεί η θέση στην οποία βρίσκεται η ποσότητα που επιθυμείται να πάρει τη συγκεκριμένη τιμή και με αυτόν τον τρόπο στη σειρά **Measured** εμφανίζεται η ποσότητα που υπάρχει στο σύστημα πριν τους υπολογισμούς. Το τελευταίο κελί παρουσιάζει την ακρίβεια με την οποία θα επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή.

Στο μισό της συγκεκριμένης καρτέλας εισάγεται η ποσότητα που θα πρέπει να μεταβληθεί προκειμένου να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αρχικά, ορίζεται ένα όνομα για τη μεταβλητή που θα επιλεγεί. Στη συνέχεια εισάγονται οι μονάδες μέτρησης στη γραμμή **Measurement Unit**. Το επόμενο βήμα είναι να εισαχθεί το σημείο, στο οποίο βρίσκεται το δεδομένο το οποίο θα μεταβληθεί, ενώ στα επόμενα κελιά ορίζονται τα όρια (κατώτερη και ανώτερη τιμή) διακύμανσης της μεταβλητής.

Το τρίτο και τελευταίο μέρος της οθόνης αφορά τη φύση του ίδιου του **Control**. Σε αυτό το σημείο μπορεί να ρυθμιστεί εάν το **Control** θα συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς, πόσες φορές το πρόγραμμα θα κάνει υπολογισμούς για την εξαγωγή της ζητούμενης τιμής, εάν το **Control** εφαρμόζεται μόνο στο συγκεκριμένο **Unit** ή εφαρμόζεται σε όλη τη διαδικασία κ.α.

3.3.5 Φύλλο εργασίας "Model"

Το τελευταίο φύλλο εργασίας, το οποίο θα αναλυθεί για τις **Reactions Unit** μονάδες, είναι το φύλλο **Model**. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν δυο ξεχωριστά μοντέλα για τις εν λόγω μονάδες. Καθώς τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν βασίστηκαν στις χημικές αντιδράσεις, χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία **Chemical Reactions Wizard**. Αφού επιλεγεί η συγκεκριμένη λειτουργία στην καρτέλα **Model** εμφανίζεται η παρακάτω οθόνη:

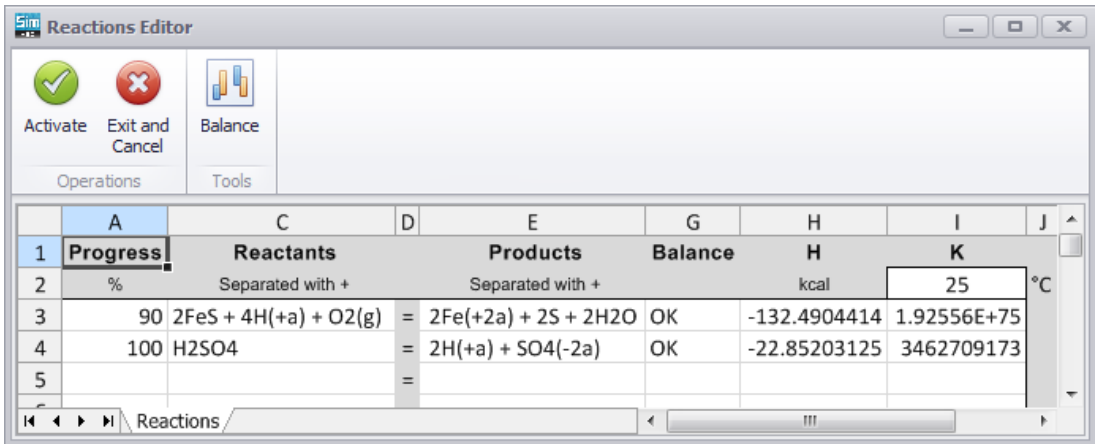


Εικόνα 2.15. Το μενού Model για τη λειτουργία Chemical Reactions Wizard.

Παρατηρείται ότι το αριστερό μέρος της οθόνης είναι όμοιο με τα μενού **Input** και **Output**. Η διαφορά είναι ότι δεν παρουσιάζονται τα ρεύματα εισόδου και εξόδου, αλλά αντιθέτως εμφανίζονται οι ποσότητες των συστατικών των φάσεων. Να αναφερθεί ότι η τελευταία στήλη αποτελεί ένα ισοζύγιο μάζας των συστατικών, καθώς σε κάθε κελί εμφανίζεται η ποσότητα του συστατικού κατά την έξοδο αφαιρώντας την ποσότητα του συστατικού κατά την είσοδο. Είναι προφανές ότι οι ποσότητες των συστατικών κατά την έξοδο εμφανίζονται μετά τους υπολογισμούς της προσομοίωσης. Επιπροσθέτως, μέσω της διαφοράς των ποσοτήτων, μπορεί να γίνει ένας πρώτος έλεγχος για την εγκυρότητα του μοντέλου και των υπολογισμών.

Στο δεξί μέρος της οθόνης βρίσκεται η ουσία του μοντέλου. Σε αυτό το μέρος εμφανίζονται οι αντιδράσεις που έχουν προστεθεί, καθώς και στοιχεία όπως στοιχειομετρία των αντιδράσεων και ποσότητες των αντιδρώντων και των προϊόντων των αντιδράσεων. Να σημειωθεί ότι σημαντικό ρόλο κατέχει το ποσοστό που βρίσκεται πριν τις αντιδράσεις. Το ποσοστό αυτό καθορίζει την ποσότητα του πρώτου αντιδρώντος που θα συμμετέχει στη συγκεκριμένη αντίδραση. Φυσικά το άθροισμα των ποσοστών για ένα αντιδρών σε όλες τις αντιδράσεις δεν μπορεί να ξεπερνάει το 100%. Αν παραβλεφθεί αυτός ο περιορισμός θα έχει ως αποτέλεσμα να μην πραγματοποιηθούν υπολογισμοί και κατά την παρουσίαση των σφαλμάτων με το πέρας της προσομοίωσης εμφανίζεται ότι δεν υπάρχει αρκετή ποσότητα της χημικής ένωσης ή του στοιχείου του οποίου το ποσοστό ξεπερνάει το 100%.

Για να ρυθμιστούν οι αντιδράσεις του μοντέλου πρέπει να επιλεχθεί το εικονίδιο **Chemical Reactions Wizard**, το οποίο οδηγεί σε ξεχωριστό μενού.



	A	C	D	E	G	H	I	J
1	Progress	Reactants		Products	Balance	H	K	
2	%	Separated with +		Separated with +		kcal	25	°C
3	90	2FeS + 4H(+a) + O2(g)	=	2Fe(+2a) + 2S + 2H2O	OK	-132.4904414	1.92556E+75	
4	100	H2SO4	=	2H(+a) + SO4(-2a)	OK	-22.85203125	3462709173	
5			=					

Εικόνα 2.16. Η οθόνη του οδηγού χημικών αντιδράσεων (Chemical Reactions Wizard).

Στο πάνω μέρος της οθόνης μπορούν αφενός να ενεργοποιηθούν οι αλλαγές μέσω του **Activate** ή να απορριφθούν μέσω του **Exit and Cancel** και αφετέρου να διορθωθεί η στοιχειομετρία των αντιδράσεων μέσω του **Balance**. Στο κάτω μέρος της οθόνης εισάγεται σε κάθε σειρά το ποσοστό του πρώτου αντιδρώντος που θα αντιδράσει (βαθμός μετατροπής), τα αντιδρώντα αριστερά από το ίσον και τα προϊόντα δεξιά από το ίσον. Αφού επιλεχθεί το εικονίδιο **Balance** και διορθωθούν οι στοιχειομετρικοί συντελεστές, στην στήλη **Balance** εμφανίζεται η λέξη **OK** που δηλώνει ότι οι αντιδράσεις έχουν γραφεί σωστά. Επίσης δίδονται δεδομένα των αντιδράσεων όπως η ενθαλπία **H** και η σταθερά ισορροπίας **K**. Αφού έχουν εισαχθεί όλες οι αντιδράσεις επιλέγεται, το **Activate** και οι τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν ενσωματώνονται στο μοντέλο στο φύλλο εργασίας **Model**.

4. ΜΟΝΤΕΛΟ

4.1 Παραδοχές

Η προσομοίωση της παραγωγικής διαδικασίας της ΣΙΔΕΝΟΡ αποτυπώθηκε πλήρως στο πρόγραμμα. Φυσικά υπήρξαν κάποιες τροποποιήσεις και συμβάσεις προκειμένου να απλουστευθεί η προσομοίωση, αλλά παρόλα αυτά να αποτελεί μια αρκετά ακριβή απεικόνιση της πραγματικότητας.

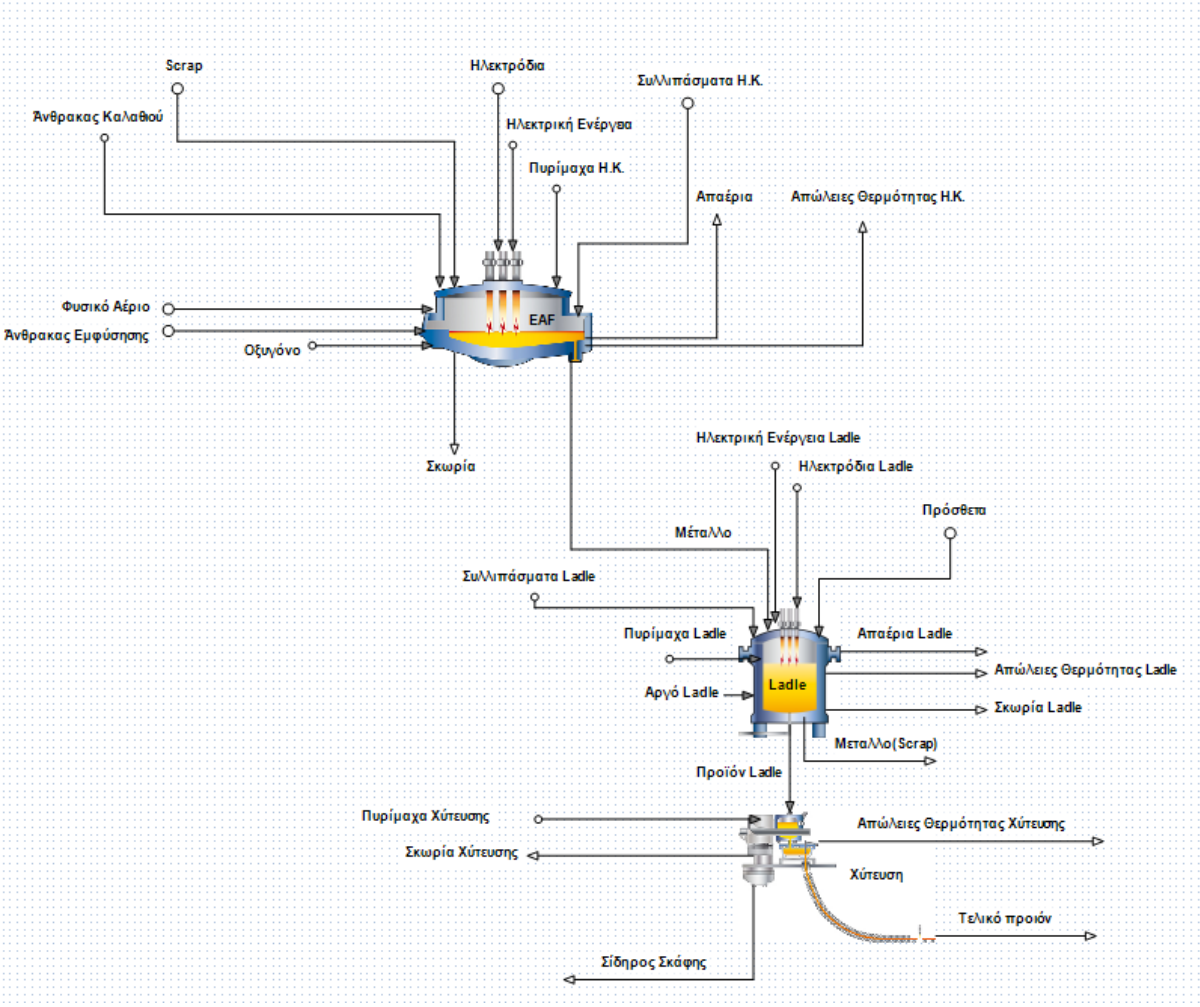
- Η βάση υπολογισμού των ρευμάτων και των δεδομένων εισόδου είναι 80 tn μετάλλου στην έξοδο της χύτευσης
- Καθώς δεν υπάρχουν μετρήσεις για όλα τα ρεύματα της διαδικασίας, κάποιες πληροφορίες αντλήθηκαν μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης και προστέθηκαν στο μοντέλο
- Κατά την παραγωγική διαδικασία της ΣΙΔΕΝΟΡ, αφού το ρευστό μέταλλο αποχυθεί στον κάδο, ο κάδος δεν προωθείται αμέσως προς τη μεταλλουργία κάδου, αλλά υπάρχει ένα ενδιάμεσο στάδιο, κατά το οποίο γίνονται προσθήκες συλλιπασμάτων, καθώς και ανάδευση με αργό. Αυτό το στάδιο δεν αποτυπώθηκε ανεξάρτητα ως διεργασία στο διάγραμμα ροής, αλλά ενσωματώθηκε στη διεργασία της Μεταλλουργίας Κάδου. Έχει βρεθεί ότι αν συμπεριλαμβανόταν στην προσομοίωση αυτό το ενδιάμεσο στάδιο, οι υπολογισμοί θα γίνονται περισσότερο πολύπλοκοι χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερη διαφορά στα αποτελέσματα
- Επειδή δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στο **HSC** οι χρονικές μεταβολές της σύστασης ορισμένων ρευμάτων π.χ. της ποιότητας των απαερίων της ηλεκτρικές καμίνου τόξου που διαφοροποιείται ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας εντός της καμίνου, αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία και αξιολογήθηκαν συνεχείς μετρήσεις από τις οποίες προέκυψαν οι σχετικοί μέσοι όροι για τον προσδιορισμό της μέσης ποιότητας ρευμάτων όπως για παράδειγμα προσδιορίστηκε η αναλογία CO και CO_2 στα απαέρια της καμίνου
- Επειδή υπάρχουν ορισμένα συστατικά που μπορεί να κατανέμονται σε περισσότερα του ενός ρεύματα για την εύρεση των συντελεστών κατανομής χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα συστάσεων ενός συστατικού στα επιμέρους ρεύματα
- Οι μορφές των οξειδίων του σιδήρου, οι οποίες συναντώνται στα ρεύματα εξόδου είναι δυο: ο αιματίτης και ο βουστίτης. Η σχετική παρουσία του ενός ή του άλλου στα επιμέρους ρεύματα δεν είναι πάντοτε σαφώς προσδιορισμένη, η δε μετατροπή του ενός στο άλλο εξαρτάται κάθε φορά από τις οξειδοαναγωγικές συνθήκες που επικρατούν στην κάθε διεργασία. Θεωρήθηκε ότι ο αιματίτης βρίσκεται σε όλα τα ρεύματα εξόδου πλην στο ρεύμα του μετάλλου. Στο τελευταίο ρεύμα το οξείδιο του σιδήρου το οποίο περιέχεται στη συγκεκριμένη φάση θεωρείται ότι είναι ο βουστίτης
- Σε ορισμένα ρεύματα, τα οποία αφορούν κυρίως πολύ μικρές απώλειες σε υλικό της ηλεκτρικής καμίνου, της μεταλλουργίας κάδου και της χύτευσης δόθηκαν μηδενικές τιμές . Ο λόγος είναι ότι η ποσότητα των ρευμάτων είναι τόσο μικρή, ώστε να μην επηρεάζει τους υπολογισμούς

- Τα ρεύματα απωλειών ενέργειας και ηλεκτρικής ενέργειας των μονάδων δεν υπολογίστηκαν κατά την προσομοίωση, καθώς δεν προσεγγίστηκε το ισοζύγιο ενέργειας της διαδικασίας. Η απεικόνισή τους στο διάγραμμα γίνεται για λόγους πληρότητας της διαδικασίας
- Λόγω του γεγονότος ότι το πρόγραμμα δεν διαθέτει την ένωση Fe_2O_3 σε υγρή μορφή, θεωρήθηκε ότι οι ποσότητες που προκύπτουν μπορούν να αποτυπωθούν σε στερεή μορφή του αιματίτη

4.2 Διάγραμμα Ροής

Αφού τέθηκαν οι βάσεις για τη δημιουργία της προσομοίωσης το επόμενο βήμα είναι να περιγραφούν οι μονάδες στο διάγραμμα ροής και τα χαρακτηριστικά των ρευμάτων.

Το διάγραμμα ροής το οποίο προέκυψε είναι το παρακάτω:



Εικόνα 4.1. Το διάγραμμα ροής της προσομοίωσης παραγωγής χάλυβα.

Μέσω του διαγράμματος παρατηρείται ότι η παραγωγική διαδικασία χωρίζεται σε τρεις βασικές διεργασίες:

- Την τήξη scrap στην ηλεκτρική κάμινο
- Τη μεταλλουργία κάδου

- Τη χύτευση

Να σημειωθεί ότι κατά την χύτευση δεν υπάρχει σημαντική απώλεια υλικού ή πολύπλοκες χημικές αντιδράσεις, όμως το στάδιο αυτό προστέθηκε προκειμένου να υπάρχει πληρότητα της παραγωγικής διαδικασίας.

Στη συνέχεια θα περιγραφούν τα χαρακτηριστικά της κάθε μονάδας και θα γίνει περιγραφή των ρευμάτων εισόδου και εξόδου της.

4.3 Είσοδος στην Ηλεκτρική Κάμινο

Όλα τα ρεύματα εισόδου στο σύστημα βρίσκονται σε κανονικές συνθήκες (1atm, 25^0C).

4.3.1 Παλαιοσίδηρος (scrap)

Ενδεικτική χημική ανάλυση του scrap δίδεται στον επόμενο πίνακα

Πίνακας 4.1. Χημική σύσταση Scrap.

Χημική Σύσταση	%
Fe	90,89
Si	0,30
Mn	0,80
Cu	0,20
Cr	0,20
Ni	0,05
Zn	0,67
Pb	0,10
Al	0,15
Ti	0,02
V	0,02
C	0,30
S	0,10
P	0,10
CaO	1,50
MgO	0,50
SiO_2	1,20
Al_2O_3	0,80
FeO	2,00
H_2O	0,10

Η χημική ανάλυση λόγω της φύσεως του scrap δεν είναι σταθερή. Προέκυψε μέσω στοιχείων λειτουργίας της ΣΙΔΕΝΟΡ, στοιχείων από το Internet και από στοιχεία που λήφθηκαν από μηχανικούς εταιρειών που δραστηριοποιούνται σε ελληνικές χαλυβουργίες.

Σημειώνεται ότι το scrap θεωρείται ότι εισάγεται στο σύστημα σε ποσότητα τέτοια που να προκύπτει παραγωγή 80 tn ρευστού σιδήρου κατά το πέρας της παραγωγικής διαδικασίας. Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό έχει ενσωματωθεί στο σύστημα ένα σημείο ελέγχου (**Control**) που

να υπολογίζει την ποσότητα του scrap έτσι ώστε να προκύπτουν 80 tn ρευστού χάλυβα στην έξοδο της διαδικασίας.

4.3.2 Οξυγόνο

Η ποσότητα του οξυγόνου εμφύσησης αρχικά θεωρήθηκε ότι είναι περίπου 40 m^3/tn μετάλλου. Το οξυγόνο χρησιμοποιείται και για την καύση του φυσικού αερίου, η οποία θεωρείται τέλεια, αλλά και για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων εντός του συστήματος.

Ωστόσο κατά την έναρξη της προσομοίωσης διαπιστώθηκε πως η παραπάνω ποσότητα δεν επαρκεί για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων. Επομένως, η καινούρια ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε είναι 55 m^3/tn μετάλλου.

Αναφερόμενοι στην σύσταση του οξυγόνου, θεωρήθηκε ότι η καθαρότητά του είναι 94% με πρόσμιξη αζώτου 6%.

4.3.3 Άνθρακας εμφύσησης

Ο άνθρακας εμφύσησης που εισάγεται στην ηλεκτρική κάμινο αποτελείται από ανθρακίτη. Ωστόσο, ο ανθρακίτης έχει πτητικά τα οποία πρέπει να αφαιρεθούν. Μια τυπική σύσταση ανθρακίτη χωρίς πτητικά δίδεται παρακάτω.

Πίνακας 4.2. Χημική σύσταση του άνθρακα εμφύσησης.

Χημική Σύσταση	%
C	88,15
S	2,50
CaO	0,63
MgO	0,63
SiO_2	3,55
Al_2O_3	0,84
Fe_2O_3	3,70

Η ποσότητα που εισέρχεται εντός της ηλεκτρικής καμίνου είναι 16 kg/tn.

4.3.4 Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια της ηλεκτρικής καμίνου αποτελούνται από γραφίτη και άρα από άνθρακα, πλήρως. Η ποσότητα που εισέρχεται στο σύστημα είναι 1,25 kg/tn.

4.3.5 Συλλιπάσματα

Το συλλίπασμα που χρησιμοποιείται στην ηλεκτρική κάμινο είναι ασβέστης ο οποίος προέρχεται από την εξόρυξη ασβεστολίθου. Η τυπική σύσταση του ασβέστη που διατίθεται στην αγορά δίνεται στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 4.3, Minerals 2009).

Πίνακας 4.3. Χημική σύσταση ασβέστη (quick lime).

Χημική Σύσταση	%
CaO	96,00
MgO	0,80
SiO_2	2,00
Al_2O_3	0,10
Fe_2O_3	0,10
$CaCO_3$	1,00

Η ποσότητα που εισάγεται είναι 40 kg/tn ρευστού μετάλλου προς απόχυση.

4.3.6 Άνθρακας καλαθιού

Σε ορισμένες περιπτώσεις, κατά τη φόρτωση του scrap στα καλάθια, προστίθεται λίγος άνθρακας εφόσον η περιεκτικότητα στο scrap είναι μικρή. Ωστόσο, τα δεδομένα τα οποία εισήχθησαν στην κάμινο δεν απαιτούν προσθήκη άνθρακα στο scrap. Επομένως, η ποσότητα του ρεύματος είναι μηδενική.

4.3.7 Πυρίμαχα

Η ηλεκτρική κάμινος αποτελείται από τριών ειδών πυρίμαχη επένδυση:

- **Ανθρακομαγνησιακά πυρίμαχα (Magnesian carbon bricks):** τα οποία αποτελούνται κυρίως από μαγνησία και άνθρακα. Χρησιμοποιούνται για την επένδυση όλης της επιφάνειας της καμίνου, εκτός από τον πυθμένα. Η σύσταση τους είναι (Πίνακας 4.4, The McKeown Group):

Πίνακας 4.4. Σύσταση ανθρακομαγνησιακών πυρίμαχων τούβλων.

Χημική Σύσταση	%
MgO	85,59
CaO	1,11
SiO_2	0,54
Al_2O_3	0,16
C	12,00
Fe_2O_3	0,60

- **Bottom ramming masses:** οι οποίες είναι πυρίμαχες μάζες που χρησιμοποιούνται στην επένδυση του πυθμένα της καμίνου. Η σύσταση είναι η παρακάτω (Πίνακας 4.5, Hitech Industrial Solution Leader):

Πίνακας 4.5. Σύσταση πυρίμαχης μάζας του πυθμένα της ηλεκτρικής καμίνου.

Χημική Σύσταση	%
MgO	83,00
CaO	10,00
SiO_2	1,20
Al_2O_3	0,30
C	0,00
Fe_2O_3	5,50

- **Gunning material:** που είναι πυρίμαχη μάζα, η οποία τοποθετείται στην κάμινο με την μέθοδο gunning (εκτόξευση μάζας μέσω ειδικής διάταξης). Η συγκεκριμένη πυρίμαχη επένδυση χρησιμοποιείται στις επισκευές της ηλεκτρικής καμίνου, χωρίς να απαιτείται η διακοπή λειτουργίας της για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η σύσταση της πυρίμαχης μάζας είναι η παρακάτω (Πίνακας 4.6, Ossola Industrials):

Πίνακας 4.6. Σύσταση πυρίμαχης μάζας επισκευών.

Χημική Σύσταση	%
MgO	91,00
CaO	3,00
SiO_2	4,50
Al_2O_3	0,50
C	0,00
Fe_2O_3	1,00

Όσον αφορά στη σύσταση των πυριμάχων, που εισέρχονται στο υπό μελέτη σύστημα, θεωρήθηκε, μέσω εμπειρικού κανόνα, ότι οι πυρίμαχες επενδύσεις καταναλώνονται με ίδιο ρυθμό κατά τη διάρκεια ενός κύκλου. Επομένως, η μέση σύσταση των πυριμάχων υπολογίστηκε αθροίζοντας την περιεκτικότητα επί της εκατό σε κάθε στοιχείο – ένωση και διαιρώντας με το τρία. Με αυτόν τον τρόπο η μέση σύσταση είναι:

Πίνακας 4.7. Μέση χημική σύσταση πυρίμαχων υλικών της ηλεκτρικής καμίνου.

Χημική Σύσταση	%
MgO	86,53
CaO	4,70
SiO_2	2,08
Al_2O_3	0,32
C	4,00
Fe_2O_3	2,37

Τέλος, για την ποσότητα της πυρίμαχης επένδυσης, θεωρήθηκε ότι η κατανάλωση ανά χυτήριο είναι 5 kg/tn.

4.3.8 Φυσικό αέριο

Η ποσότητα του φυσικού αερίου, που εμφυσάται στην κάμινο είναι 0,76 m^3/tn μετάλλου. Η ποσότητα αυτή θεωρείται σχετικά χαμηλή. Αυτό συμβαίνει καθώς η ηλεκτρική ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα, αντικαθιστά την χημική ενέργεια που εισέρχεται από την καύση του φυσικού αερίου. Η χημική ενέργεια του φυσικού αερίου αξιοποιείται στην προθέρμανση του scrap πριν ξεκινήσει η διαδικασία της τήξης. Στην περίπτωση της ΣΙΔΕΝΟΡ προτιμάται η ηλεκτρική ενέργεια έναντι της χημικής του φυσικού αερίου.

Η χημική σύσταση του φυσικού αερίου θεωρήθηκε ότι είναι η εξής (Πίνακας 4.8, Θεσσαλίας):

Πίνακας 4.8. Χημική σύσταση φυσικού αερίου.

Χημική Σύσταση	%
$N_2(g)$	0,80
$CO_2(g)$	0,10
$CH_4(g)$	98,00
$C_2H_6(g)$	0,60
$C_3H_8(g)$	0,50

4.4 Έξοδος Ηλεκτρικής Καμίνου

Στην περίπτωση των ρευμάτων εξόδου της ηλεκτρικής καμίνου, οι θερμοκρασίες διαφοροποιούνται, ενώ η πίεση είναι 1 atm και είναι κοινή για όλα τα ρεύματα. Οι θερμοκρασίες είναι 1620°C για τα απαέρια, 1700 ^{o}C για τη σκωρία και 1650 ^{o}C για το μέταλλο.

4.4.1 Απαέρια

Τα απαέρια αποτελούν ένα μεγάλο εμπόδιο στην πλήρωση του υπολογισμού του συστήματος. Το πρόβλημα εκτείνεται τόσο στην ποσότητα παραγωγής των απαερίων όσο και στη χημική τους σύσταση. Αυτό συμβαίνει για δυο κυρίως λόγους. Το σύστημα ψύξης, που χρησιμοποιείται αποτελείται από έναν απαγωγό, ο οποίος στην αρχή του έχει ένα κενό από το οποίο εισέρχεται αέρας στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται η πρώτη ψύξη. Το κενό αυτό είναι μεταβλητό, ρυθμίζοντας έτσι τις συνθήκες πίεσης της καμίνου αλλά και την θερμοκρασία εξόδου των απαερίων. Επιπροσθέτως, η σύσταση του αέρα δεν είναι σταθερή και φυσικά δεν μπορεί να μετρηθεί και επομένως προκύπτει ένα μεγάλο πρόβλημα στον προσδιορισμό της χημικής σύστασης των απαερίων.

Ο δεύτερος λόγος της αδυναμίας προσδιορισμού σύστασης και ποσότητας των απαερίων οφείλεται στην έλλειψη πραγματικών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, η πλειονότητα των εταιρειών δεν έχει τοποθετήσει διατάξεις ικανές να μετρήσουν την παραγωγή απαερίων της καμίνου, ούτε διατάξεις προσδιορισμού της χημικής τους σύστασης. Αυτό συμβαίνει καθώς δεν υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τις βιομηχανίες για τον προσδιορισμό των παραγόντων αυτών. Ωστόσο, υπάρχουν τοποθετημένες διατάξεις οι οποίες καταγράφουν συγκεκριμένα αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα. Επιπροσθέτως, λόγω του τρόπου καθαρισμού των απαερίων, δηλαδή μέσω της κόνεως που παραμένει στα σακόφιλτρα, μπορεί να προσδιορισθεί η χημική σύσταση και η ποσότητα της σκόνης που παράγεται από την ηλεκτρική κάμινο.

Φυσικά, πρέπει να τονισθεί ότι και η χημική σύσταση καθώς και η ποσότητα της κόνεως υπολογίζεται από ετήσιους δείκτες (μέσο όρο παραγωγής κόνεως ανά έτος).

Για να αντιμετωπισθούν τα παραπάνω εμπόδια, μέσω της βιβλιογραφίας προσδιορίσθηκε η μέση σύσταση της κόνεως της ηλεκτρικής καμίνου.

Πίνακας 4.9. Χημική σύσταση απαερίων.

Χημική Σύσταση	%
Fe	20,00
SiO_2	2,00
CaO	12,00
Al_2O_3	1,00
MgO	2,00
P_2O_5	0,20
MnO	1,50
Cr_2O_3	0,50
Na_2O	0,50
K_2O	0,50
Zn	27,00
Pb	3,00
C	2,00
S	0,50

Η ποσότητα ωστόσο της σκόνης της καμίνου προκύπτει από υπολογισμούς του μοντέλου. Το συγκεκριμένο ρεύμα απεικονίζει και τη σκόνη και τα απαέρια που παράγονται. Τέλος, να σημειωθεί ότι η ποσότητα του οξειδίου του νατρίου και του καλίου ενσωματώθηκαν σε άλλες ενώσεις, λόγω των μικρών ποσοτήτων.

4.4.2 Σκωρία

Η σκωρία αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι του μοντέλου. Εμπειρικά προσδιορίζεται ότι η ποσότητά της αποτελεί το 9,4% του scrap που διοχετεύεται στην ηλεκτρική κάμινο. Μια τυπική σύσταση της σκωρίας είναι:

Πίνακας 4.10. Χημική σύσταση σκωρίας ηλεκτρικής καμίνου.

Χημική Σύσταση	%
Fe_2O_3	32,91
SiO_2	12,62
CaO	32,26
Al_2O_3	6,12
MgO	6,25
P_2O_5	0,20
MnO	5,38
Cr_2O_3	1,46
Fe	1,00
C	1,8

Η σύσταση της σκωρίας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της προσομοίωσης καθώς επηρεάζει της χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται. Αυτό συμβαίνει καθώς μέσω της σύστασης προσδιορίζονται τα ποσοστά των αντιδρώντων που καταναλώνονται στην καρτέλα **Model**.

Επειδή στη μέτρηση των οξειδίων της σκωρίας δεν λαμβάνεται υπ' όψιν ο βαθμός σθένους του κάθε στοιχείου, θεωρείται ότι λόγω των οξειδωτικών συνθηκών που επικρατούν στην κάμινο, ο σίδηρος της σκωρίας είναι τρισθενής.

4.4.3 Μέταλλο

Αυτό το ρεύμα είναι το πιο σημαντικό για την προσομοίωσή μας. Βάση της ποσότητας του ρευστού χάλυβα που αποτελεί προϊόν της ηλεκτρικής καμίνου προσδιορίζεται ο βαθμός απόδοσης καθώς και η ποσότητα όλων των ρευμάτων εισόδου. Να σημειωθεί ότι ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως η ποσότητα του υγρού χάλυβα προς απόχυση, προς την ποσότητα του scrap που εισάγεται στο σύστημα.

4.4.4 Scrap EAF

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, λόγω της ποσότητας του συγκεκριμένου ρεύματος στην πράξη, κατά την προσομοίωση η ποσότητα του ρεύματος θεωρείται μηδενική.

4.5 Ρεύματα Εισόδου στον Κάδο

4.5.1 Μέταλλο

Το ρεύμα αυτό φυσικά είναι ταυτόσημο με το ρεύμα εξόδου της ηλεκτρικής καμίνου. Αντιπροσωπεύει την ποσότητα του ρευστού μετάλλου στο οποίο θα προστεθούν συλλιπάσματα και κραματικά στοιχεία, προκειμένου να προκύψει η επιθυμητή σύσταση του τελικού προϊόντος.

4.5.2 Ηλεκτρόδια Ladle

Τα ηλεκτρόδια της μεταλλουργίας κάδου είναι ίδια με τα ηλεκτρόδια της ηλεκτρικής καμίνου. Επομένως αποτελούνται από γραφίτη και άρα C σε ποσοστό 100%. Η ποσότητα του άνθρακα που εισάγεται είναι 0,3 kg/tn παραγόμενου χάλυβα.

4.5.3 Πρόσθετα

Στα πρόσθετα περιλαμβάνονται τα σιδηροκράματα τα οποία προστίθενται αλλά και ο άνθρακας ο οποίος εισάγεται. Τα σιδηροκράματα είναι FeSi ποσότητας 1,5 kg/tn παραγόμενου χάλυβα και SiMn ποσότητας 4,5 kg/tn παραγόμενου χάλυβα. Για την εισαγωγή των σιδηροκραμάτων στο σύστημα δεν θεωρήθηκαν ενώσεις, αλλά αποτυπώθηκαν ως ποσότητες σιδήρου, πυριτίου και μαγγανίου που εισάγονται στο σύστημα. Αν ληφθούν υπ' όψιν οι ποσότητες προσθήκης των επιμέρους προσθέτων, καθώς και μια τυπική τους σύσταση, η σύσταση του ρεύματος **Πρόσθετα** στα συγκεκριμένα στοιχεία είναι:

Πίνακας 4.11. Ισοδύναμη περιεκτικότητα Fe, Si, Mn στο μίγμα κραμάτων που εισάγεται στη μεταλλουργία κάδου.

Στοιχείο	%
Fe	10,00
Si	71,25
Mn	18,75

Εκτός από τα σιδηροκράματα τα οποία προστίθενται στον κάδο, προστίθεται και ποσότητα άνθρακα προκειμένου να ρυθμιστεί η σύσταση του παραγόμενου χάλυβα. Ωστόσο, κατά την προσομοίωση βρέθηκε ότι η ποσότητα του άνθρακα είναι μηδενική.

4.5.4 Συλλιπάσματα Ladle

Τα συλλιπάσματα που χρησιμοποιούνται είναι ίδια με εκείνα της ηλεκτρικής καμίνου. Επομένως, η σύσταση είναι:

Πίνακας 4.12. Χημική σύσταση συλλιπασμάτων για τη μεταλλουργία κάδου.

Χημική Σύσταση	%
CaO	96,00
MgO	0,80
SiO_2	2,00
Al_2O_3	0,10
Fe_2O_3	0,10
$CaCO_3$	1,00

Η ποσότητα τους ανέρχεται στα 8 kg/tn παραγόμενου χάλυβα.

4.5.5 Πυρίμαχα Ladle

Τα πυρίμαχα του κάδου είναι κατά κύριο λόγω ανθρακομαγνησιακά. Η σύσταση των πυριμάχων είναι η ίδια με τη σύσταση των ανθρακομαγνησιακών πυριμάχων της ηλεκτρικής καμίνου. Η ποσότητα των πυριμάχων που εισάγεται στο λουτρό είναι 1 kg/tn παραγόμενου χάλυβα.

4.5.6 Αργό

Η ποσότητα του αργού που εμφυσάται κατά τη μεταλλουργία κάδου δεν συμμετέχει στις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται. Αντιθέτως, χρησιμοποιείται για την ανάδευση

του λουτρού, προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι αντιδράσεις του συλλιπάσματος και των κραματικών στοιχείων με το ρευστό μέταλλο, σε μεγαλύτερο βαθμό. Να σημειωθεί ότι η ποσότητα που εισάγεται στο σύστημα είναι 1500 m^3.

4.6 Ρεύματα Εξόδου στον Κάδο

4.6.1 Απαέρια Ladle

Λόγω της απουσίας της εμφύσησης οξυγόνου και άνθρακα, τα απαέρια, τα οποία παράγονται κατά τη μεταλλουργία κάδου συγκριτικά με τα απαέρια της ηλεκτρικής καμίνου, είναι πολύ μικρότερης ποσότητας. Η σύσταση των απαερίων καθορίζεται πλήρως από τις αντιδράσεις. Επιπροσθέτως, το αργό αφού δεν αντιδράει με καμία φάση, εξέρχεται όλο στα απαέρια.

4.6.2 Σκωρία Ladle

Η σκωρία της μεταλλουργίας κάδου αποτίθεται στο περιβάλλον για να ψυχθεί και δεν χρησιμοποιείται κατά την χύτευση. Τυπική σύσταση σκωρίας μεταλλουργίας κάδου είναι:

Πίνακας 4.13. Χημική σύσταση σκωρίας Ladle Furnace

Χημική Σύσταση	%
MgO	6,00
Al_2O_3	5,50
SiO_2	22,00
CaO	63,00
MnO	0,50
FeO	1,30

4.6.3 Scrap Ladle

Όπως και με το ρεύμα απωλειών υλικού της ηλεκτρικής καμίνου, έτσι και στο συγκεκριμένο ρεύμα, η ποσότητα θεωρείται μηδενική.

4.6.4 Προϊόν Ladle

Το προϊόν της μεταλλουργίας κάδου αποτελεί και το τελικό προϊόν της διαδικασίας. Αυτό συμβαίνει καθώς δεν πραγματοποιούνται περαιτέρω αντιδράσεις στη διαδικασία. Όσον αφορά την ποσότητα του ρευστού μετάλλου που οδηγείται προς χύτευση, κατά τη διάρκεια της χύτευσης υπάρχει ένα πολύ μικρό ποσοστό απώλειας, το οποίο δεν υπολογίζεται. Τελικά, η χημική σύσταση του ρευστού μετάλλου είναι η παρακάτω:

Πίνακας 4.14. Χημική σύσταση τελικού προϊόντος.

Χημική Σύσταση	%
Fe	98,50
Si	0,14
Mn	0,65
Cu	0,29
Cr	0,11
Ni	0,09
C	0,11
P	0,02
S	0,03

4.7 Χύτευση

Ως ρεύματα εισόδου είναι το προϊόν της μεταλλουργίας κάδου και τα πυρίμαχα της διάταξης τα οποία έχουν κάποια φθορά. Η ποσότητα είναι 0,0005 tn/tn παραγόμενου μετάλλου, ενώ τα πυρίμαχα αποτελούνται πλήρως από οξείδιο του μαγνησίου. Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στα ρεύματα εξόδου της χύτευσης.

4.7.1 Σκωρία χύτευσης

Η σκωρία της χύτευσης έχει διττό ρόλο. Προφυλάσσει τη σύσταση του μετάλλου, ενώ ταυτοχρόνως μειώνονται οι απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Θεωρείται ότι η σκωρία δεν επηρεάζει τη χημική σύσταση του μετάλλου μας.

4.7.2 Σίδηρος σκάφης

Το ρεύμα αυτό προσδιορίζει το μέταλλο το οποίο αποτελεί απώλεια της διαδικασίας σε ρευστό μέταλλο. Η ποσότητα είναι περίπου το 2% του προϊόντος της μεταλλουργίας κάδου, ωστόσο αποτελεί μικρή ποσότητα. Για αυτόν το λόγο ο υπολογισμός του συγκεκριμένου ρεύματος παραλείπεται.

4.7.3 Τελικό προϊόν

Το τελικό προϊόν φυσικά αποτελεί την έξοδο όλης της διαδικασίας. Μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας εξέρχεται ημιέτοιμο προϊόν το οποίο έχει την προκαθορισμένη χημική σύσταση.

4.8 Πρότυπο Ηλεκτρικής Καμίνου

Πολύ μεγάλο ενδιαφέρον και πολύ μεγάλη δυσκολία παρουσίασε η προσομοίωση της λειτουργίας της ηλεκτρικής καμίνου. Λόγω του πλήθους των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται εντός της καμίνου, συμπεριλήφθηκαν οι δεσπόζουσες αντιδράσεις στο μοντέλο.

Αρχικά, τοποθετούνται οι αντιδράσεις καύσης του φυσικού αερίου. Οι αντιδράσεις αυτές ακολουθούνται από τις αντιδράσεις διάσπασης των ανθρακικών ενώσεων. Στη συνέχεια δίδονται οι αντιδράσεις οξειδώσεως των στοιχείων και κάποιες αντιδράσεις μεταξύ μετάλλου σκωρίας. Οι αντιδράσεις αυτές ακολουθούνται από την τήξη των στοιχείων και τέλος δίδονται

οι αντιδράσεις τήξης των οξειδίων. Η σειρά των εξισώσεων δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα αλλά αντίθετα διευκολύνει τους υπολογισμούς.

Ιδιαίτερη σημασία θα δοθεί στα ποσοστά προόδου των αντιδράσεων. Τα στοιχεία έχουν ξεχωριστή συμπεριφορά, ωστόσο ορισμένα μπορούν να ομαδοποιηθούν.

4.8.1 P

Ο φώσφορος αποτελεί ένα πολύ μικρό κομμάτι του ισοζυγίου μάζας, καθώς η μάζα, η οποία εισέρχεται και εξέρχεται στο σύστημα είναι πολύ μικρή. Στο μοντέλο υπάρχουν δυο αντιδράσεις που αφορούν την τήξη του φωσφόρου και την οξείδωσή του προς πεντοξείδιο του φωσφόρου. Καθώς η δημιουργία ενός **Control** αποτελεί μεγάλη επιβάρυνση για τους υπολογισμούς και τη διεξαγωγή της προσομοίωσης, οι παρακάτω βαθμοί προόδου των αντιδράσεων του φωσφόρου θεωρήθηκαν έγκυροι, ώστε να προκύψουν οι επιθυμητές συστάσεις στα ρεύματα εξόδου.

Πίνακας 4.15. Αντιδράσεις φωσφόρου.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Οξείδωση	90,00	2P	+	$O_2(g)$	=	P_2O_5				
Τήξη	10,00			P	=	P(l)				

4.8.2 Si, Mn, Cr

Το πυρίτιο μετά το πέρας των αντιδράσεων συναντάται και στο μέταλλο και στη σκωρία και στη σκόνη των απαερίων. Επομένως, θεωρήθηκε ότι απαιτείται η σύνθεση ενός **Control**, το οποίο καθορίζει την ποσότητα του πυριτίου που καταλήγει στο μέταλλο. Αυτό έγινε μέσω της σύστασης του προϊόντος της ηλεκτρικής καμίνου, από την οποία βρέθηκε ότι το πυρίτιο βρίσκεται σε ποσοστό 0,07%. Άρα στο **Control** τέθηκε ως στόχος η επίτευξη του συγκεκριμένου ποσοστού, μεταβάλλοντας το βαθμό προόδου της τήξης του πυριτίου. Η υπόλοιπη ποσότητα πυριτίου θεωρείται ότι οξειδώνεται προς SiO_2. Ακριβώς η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για το Cr, αλλά και το Mn.

Πίνακας 4.16. Ο βαθμός προόδου των αντιδράσεων τήξης των στοιχείων που ορίζεται μέσω Control και ο βαθμός οξείδωσής τους που αποτελεί το υπόλοιπο ποσοστό των στοιχείων.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Οξείδωση	78,58	Si	+	$O_2(g)$	=	SiO_2				
	55,06	2Mn	+	$O_2(g)$	=	2MnO				
	58,50	2Cr	+	$1{,}5O_2(g)$	=	Cr_2O_3				
Τήξη Στοιχείων	21,42			Si	=	Si(l)				
	44,94			Mn	=	Mn(l)				
	41,50			Cr	=	Cr(l)				
Τήξη Οξειδίων	97,08			SiO_2	=	$SiO_2(l)$				
	94,98			MnO	=	MnO(l)				
	93,91			Cr_2O_3	=	$Cr_2O_3(l)$				

Από αυτήν την ποσότητα του οξειδίου του πυριτίου πρέπει κάποια ποσότητα να αποδοθεί στη σκωρία και κάποια στη σκόνη των απαερίων. Προκειμένου να βρεθούν οι ποσότητες αυτές απαιτήθηκαν οι ποσότητες και οι συστάσεις της σκωρίας και των απαερίων. Μέσω αυτών των δεδομένων ήταν δυνατόν να βρεθούν οι ποσότητες των οξειδίων των δυο ρευμάτων. Από τις

συνολικές ποσότητες διαιρώντας με τις επιμέρους ποσότητες των οξειδίων στα ρεύματα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας που αποτελεί την κατανομή των οξειδίων.

Πίνακας 4.17. Πίνακας για την κατανομή οξειδίων στα απαέρια και τη σκωρία.

Ενώσεις	Dust (%)	Slag (%)
Fe_2O_3	14,14	85,86
SiO_2	2,92	97,08
CaO	6,59	93,41
Al_2O_3	3,00	97,00
MgO	5,72	94,28
P_2O_5	15,93	84,07
MnO	5,02	94,98
Cr_2O_3	6,10	93,90
ZnO	100,00	0,00
PbO	100,00	0,00
Fe	0,00	100,00
C	17,40	82,60

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι τα οξείδια στη σκωρία είναι ρευστά, προσδιορίσθηκαν από τα ποσοστά των παραπάνω πινάκων οι βαθμοί προόδου των αντιδράσεων τήξεως των οξειδίων. Επομένως, η υπόλοιπη ποσότητα οξειδίων που δεν έχει τηχθεί, οδηγείται στα σακόφιλτρα και λαμβάνεται στη σκόνη.

Με την παραπάνω μεθοδολογία προσδιορίσθηκαν οι βαθμοί προόδου τήξης των οξειδίων του πυριτίου, του μαγγανίου και του χρωμίου.

Πίνακας 4.18. Οι αντιδράσεις τήξης των οξειδίων του πυριτίου, του μαγγανίου και του χρωμίου.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Τήξη Οξειδίων	97,08			SiO_2	=	$SiO_2(l)$				
	94,98			MnO	=	MnO(l)				
	93,91			Cr_2O_3	=	$Cr_2O_3(l)$				

4.8.3 Zn, Pb

Τα συγκεκριμένα μέταλλα προέρχονται από επιμεταλλώσεις σιδήρου, από βαφές ή από ξένα αντικείμενα στο scrap. Καθώς είναι πτητικά, σχηματίζουν ενώσεις οξειδίων που διαφεύγουν στα απαέρια. Μέσω της αναλύσεως του προϊόντος της ηλεκτρικής καμίνου, αλλά και των συστάσεων της σκόνης και της σκωρίας, παρατηρήθηκε ότι τα οξείδια του ψευδαργύρου και του μολύβδου περιέχονται μόνο στα απαέρια. Επομένως, ο βαθμός προόδου οξείδωσης των συγκεκριμένων στοιχείων είναι 100%, ενώ ο βαθμός προόδου τήξης των στοιχείων και τήξης των οξειδίων είναι 0.

Πίνακας 4.19. Οι αντιδράσεις οξείδωσης του ψευδαργύρου και του μολύβδου.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Οξείδωση	100,00	Zn	+	$0,5O_2(g)$	=	ZnO				
	100,00	Pb	+	$0,5O_2(g)$	=	PbO				

Εντούτοις, παρόλο που ο βαθμός προόδου των αντιδράσεων των στοιχείων δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη δυσκολία, η ποσότητά τους στη σκόνη δεν είναι τόσο προφανής. Αυτό συμβαίνει καθώς δεν είναι γνωστή η ποσότητα των συγκεκριμένων στοιχείων στο scrap. Επομένως, απαιτείται η χρήση ενός **Control** προκειμένου να βρεθούν οι ποσότητες του Zn και του Pb στο scrap. Αφού όμως η σύσταση των απαερίων είναι γνωστή, ο περιορισμός του συστήματος αφορά τα ποσοστά των οξειδίων στα απαέρια. Άρα το **Control** έχει ως στόχο την επίτευξη των ποσοστών των οξειδίων στα απαέρια, ρυθμίζοντας την εισαγόμενη ποσότητα των στοιχείων μέσω του scrap.

4.8.4 Mg

Το μαγνήσιο έχει παρόμοια συμπεριφορά με τα Zn και Pb, δηλαδή οξειδώνεται πλήρως προς οξείδιο του μαγνησίου. Ωστόσο, με βάση τον πίνακα κατανομής οξειδίου προσδιορίζεται ο βαθμός τήξης του MgO. Τέλος, το μαγνήσιο το οποίο εισάγεται με τη μορφή ανθρακικών ενώσεων διασπάται πλήρως προς οξείδιο του μαγνησίου και διοξείδιο του άνθρακα.

Πίνακας 4.20. Αντιδράσεις μαγνησίου.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Τήξη Οξειδίου	94,28			MgO	=	MgO(l)				
Διάσπαση	100,00			$MgCO_3$	=	MgO	+	$CO_2(g)$		
	100,00			$CaMg(CO_3)_2$	=	CaO	+	MgO	+	$2CO_2(g)$

4.8.5 Ca

Το ασβέστιο συναντάται στη σκωρία και στη σκόνη. Οποιαδήποτε πηγή ασβεστίου καταλήγει σε οξείδιο του ασβεστίου. Αυτό συμβαίνει καθώς το στοιχειακό ασβέστιο οξειδώνεται μέσω του οξυγόνου που εμφυσάται στην κάμινο.

Συνέπεια είναι κάποια ποσότητα οξειδίου του ασβεστίου να καταλήγει στη σκωρία και η υπόλοιπη ως σκόνη στα απαέρια. Σύμφωνα με τον πίνακα κατανομής των οξειδίων προσδιορίζεται η ποσότητα του CaO το οποίο τήκεται και παραμένει στη σκωρία. Το υπόλοιπο οξείδιο του ασβεστίου διαφεύγει στη σκόνη των απαερίων. Τέλος, το οξείδιο του ασβεστίου το οποίο μπορεί να βρίσκεται με τη μορφή ανθρακικών ενώσεων, διασπάται.

Πίνακας 4.21. Αντιδράσεις ασβεστίου.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Διάσπαση	100,00			$CaCO_3$	=	CaO	+	$CO_2(g)$		
Οξείδωση	100,00	Ca	+	$0,5O_2(g)$		CaO				
Τήξη Οξειδίου	93,41			CaO		CaO(l)				

4.8.6 C

Ο άνθρακας αποτελεί σημαντικό στοιχείο στις αντιδράσεις. Αρχικά να σημειωθεί ότι οι υδρογονάνθρακες που περιέχονται στο φυσικό αέριο καίγονται πλήρως. Με το πέρας των

αντιδράσεων, ο άνθρακας ως στοιχείο εξέρχεται σε όλα τα ρεύματα. Επομένως, πρέπει να βρεθεί μια μέθοδος προκειμένου να καταλήγει η σωστή ποσότητα άνθρακα σε κάθε ρεύμα.

Αρχικά κατασκευάστηκαν δυο **Control:**

- Το πρώτο καθορίζει την ποσότητα του άνθρακα, η οποία βρίσκεται στο ρευστό μέταλλο. Η μεταβλητή η οποία θα μεταβάλλεται είναι ο βαθμός προόδου της αντίδρασης του άνθρακα που τήκεται.
- Το δεύτερο καθορίζει την ποσότητα του άνθρακα, η οποία περιλαμβάνεται στα απαέρια μέσω της μεταβολής του βαθμού προόδου της οξείδωσης του άνθρακα προς μονοξείδιο.

Ο άνθρακας ο οποίος τήκεται πρέπει να κατανεμηθεί στις φάσεις του μετάλλου και της σκωρίας. Μέσω των συστάσεων και των ποσοτήτων του μετάλλου και της σκωρίας βρέθηκε ο συνολικός άνθρακας ο οποίος περιέχεται σε αυτές τις φάσεις. Αφού όμως είναι γνωστό το ποσοστό σε άνθρακα της κάθε φάσης, είναι δυνατόν να βρεθεί ο άνθρακας ο οποίος περιέχεται στις επιμέρους φάσεις. Διαιρώντας τις ποσότητες αυτές με την συνολική ποσότητα άνθρακα στις δυο φάσεις, προκύπτουν συντελεστές κατανομής. Οι συντελεστές κατανομής τοποθετήθηκαν στην καρτέλα **Distribution** και είναι 75,50% για τη σκωρία και 24,50% για το μέταλλο.

Με τα παραπάνω βήματα προκύπτει ο άνθρακας που απαιτείται για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων εντός της μονάδας, αλλά και οι απαραίτητες ποσότητες άνθρακα για την κάθε φάση. Ωστόσο, ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην αναλογία μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα στα απαέρια. Από αναλυτικά στοιχεία συνεχούς καταγραφής ποιότητας απαερίων σε ηλεκτρικές καμίνους που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία (Kirschen et al, 2005) βρέθηκε ότι το ποσοστό του μονοξειδίου του άνθρακα το οποίο μετατρέπεται προς διοξείδιο είναι το 20%. Το παραπάνω ποσοστό εισάγεται στον βαθμό προόδου της αντίδρασης μονοξειδίου προς διοξείδιο.

Πίνακας 4.22. Αντιδράσεις άνθρακα.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Καύση Υδρογονανθράκων	100,00	$CH_4(g)$	+	$2O_2(g)$	=	$CO_2(g)$	+	$2H_2O(g)$		
	100,00	$C_2H_6(g)$	+	$3,5O_2(g)$	=	$2CO_2(g)$	+	$3H_2O(g)$		
	100,00	$C_3H_8(g)$	+	$5O_2(g)$	=	$3CO_2(g)$	+	$4H_2O(g)$		
Οξείδωση C και CO	20,00	$2CO(g)$	+	$O_2(g)$	=	$2CO_2(g)$				
	81,74	C	+	$O_2(g)$	=	$2CO(g)$				
Τήξη C	15,18			C	=	C(l)				

4.8.7 Fe

Ο σίδηρος αποτελεί ένα από τα πιο απαιτητικά σημεία του μοντέλου, μαζί με τον άνθρακα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στις συμβάσεις του μοντέλου, όλες οι μορφές των οξειδίων του σιδήρου που θα περιέχονταν στα ρεύματα, οξειδώνονται σε αιματίτη εξαιρουμένου του οξειδίου του σιδήρου στο μέταλλο. Η τελευταία περίπτωση θα αναλυθεί στο κεφάλαιο του οξυγόνου. Επομένως, η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του σιδήρου εντός της μονάδας αποτελεί επιτεύξιμο στόχο.

Καθώς ο σίδηρος αλλά και όλα τα οξείδια του σιδήρου εντός της καμίνου οξειδώνονται προς αιματίτη, μπορούν να τεθούν όλοι οι βαθμοί προόδου ίσοι με 100%. Εξαίρεση αποτελούν οι αντιδράσεις του θειούχου σιδήρου καθώς περιγράφουν τη συμπεριφορά του θείου, καθώς και η αντίδραση του σιδήρου που οξειδώνεται προς βουστίτη. Η τελευταία αντίδραση συμπεριλαμβάνεται σε ένα **Control** το οποίο ρυθμίζει το ποσοστό του οξειδίου του σιδήρου στη σκωρία μεταβάλλοντας τον βαθμό μετατροπής της αντίδρασης.

Τέλος, όπως και με τον άνθρακα, μέσω των συστάσεων και της περιεκτικότητας των ρευμάτων εξόδου βρέθηκε ο συντελεστής κατανομής του μεταλλικού σιδήρου στη σκωρία και στο μέταλλο, καθώς και του οξειδίου του σιδήρου στη σκωρία και στη σκόνη.

- Οι συντελεστές που αφορούν το ρευστό σίδηρο αποτυπώθηκαν στην καρτέλα **Distribution**. Οι συντελεστές είναι 0,12% του σιδήρου στη σκωρία και ο υπόλοιπος στο μέταλλο.
- Οι συντελεστές για το οξείδιο του σιδήρου χρησιμοποιήθηκαν στην καρτέλα **Distribution** και είναι 14,14% για τα απαέρια και 85,86% για τη σκωρία

Πίνακας 4.23. Αντιδράσεις σιδήρου.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Διάσπαση μαγνητίτη	100,00			Fe_3O_4	=	FeO(l)	+	Fe_2O_3		
Οξείδωση	2,50	2Fe(l)	+	O_2(g)	=	2FeO(l)				
Τήξη	100,00			Fe	=	Fe(l)				
	100,00			FeO	=	FeO(l)				

4.8.8 S

Το θείο όπως και ο άνθρακας περιέχεται σε όλα τα ρεύματα εξόδου. Για να βρεθεί το θείο στο μέταλλο δημιουργήθηκε ένα **Control** το οποίο ρυθμίζει το τελικό ποσοστό του θείου που περιέχεται στο μέταλλο, μέσω του βαθμού προόδου της αντίδρασης τήξης του θείου.

Το θείο το οποίο περιέχεται στα απαέρια αλλά και το θείο το οποίο περιέχεται στη σκωρία δεν ελέγχονται από **Control**. Αντιθέτως, το θείο το οποίο οξειδώνεται ρυθμίζεται μέσω συγκεκριμένου ποσοστού το οποίο εισάγεται για τον βαθμό προόδου της αντίδρασης.

Τέλος, όσον αφορά την ποσότητα του θείου που περιέχεται στη σκωρία, ο μηχανισμός αποτελείται από δυο αντιδράσεις. Η πρώτη αντίδραση αφορά την ένωση του θείου με το σίδηρο και τον σχηματισμό του θειούχου σιδήρου. Ο βαθμός προόδου της αντίδρασης καθορίζεται από τον βαθμό προόδου της οξείδωσης του θείου αλλά και της τήξης του θείου. Με άλλα λόγια, η ποσότητα του θείου που βρίσκεται σε στερεή μορφή και αντιδρά με το σίδηρο είναι εκείνη που δεν συμμετείχε στις προηγούμενες αντιδράσεις του θείου. Στη συνέχεια, το θείο που βρίσκεται με τη μορφή του θειούχου σιδήρου, αντιδρά με το οξείδιο του ασβεστίου το οποίο βρίσκεται στη σκωρία και σχηματίζει θειούχο ασβέστιο. Αυτή είναι και η τελική μορφή του θείου όσον αφορά τη μορφή του στη σκωρία.

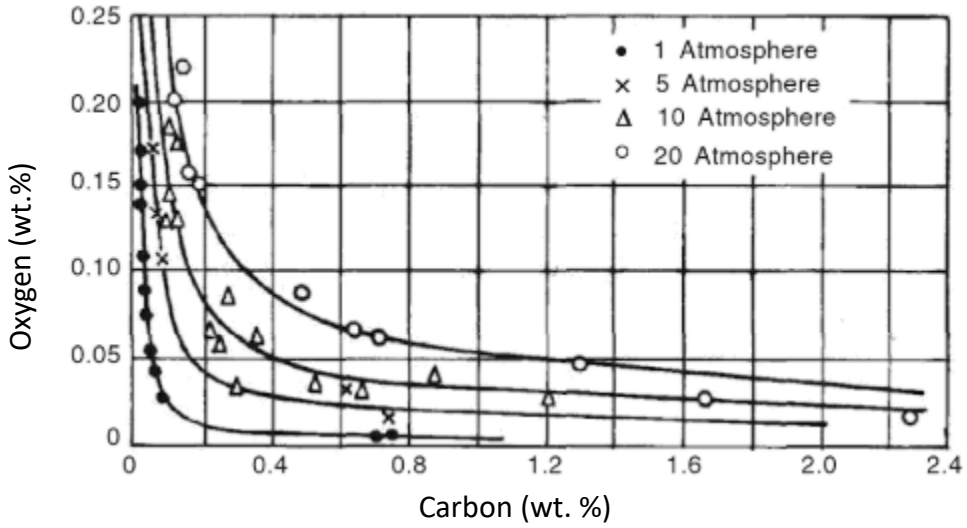
Πίνακας 4.24. Αντιδράσεις θείου.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Οξείδωση	20,00	S	+	O_2(g)	=	SO_2(g)				
Τήξη	39,00			S	=	S(l)				
Μηχανισμός Απαγωγής Θείου στη Σκωρία	41,00	S	+	Fe	=	FeS				
	100,00	FeS	+	CaO	=	CaS(l)	+	FeO(l)		

4.8.9 O

Το οξυγόνο αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για τις αντιδράσεις εντός της καμίνου. Όπως είναι γνωστό, η ατμόσφαιρα εντός της καμίνου είναι κυρίως οξειδωτική με εξαίρεση τις περιόδους κατά τις οποίες εμφυσάται άνθρακας σε μεγάλες ποσότητες. Επομένως, το οξυγόνο συμμετέχει σε ένα μεγάλο αριθμό αντιδράσεων και βοηθάει στην απομάκρυνση των ακαθαρσιών στο μέταλλο. Οι αντιδράσεις οξείδωσης με αντιδρών το οξυγόνο παρατέθηκαν παραπάνω.

Σημασία έχει η απόδοση του διαλελυμένου οξυγόνου στο μέταλλο. Θεωρείται ότι όλο το οξυγόνο στο μέταλλο βρίσκεται με τη μορφή βουστίτη. Προκειμένου όμως να προσδιορισθεί το ποσοστό, απαιτήθηκε η μελέτη του παρακάτω διαγράμματος (Εικόνα 4.2, Chakrabarti, 2012):



Εικόνα 4.2. Διάγραμμα απεικόνισης της σχέσης του διαλελυμένου οξυγόνου και άνθρακα σε ισορροπία με το μονοξείδιο του άνθρακα σε διαφορετικές πιέσεις.

Το διάγραμμα περιγράφει την εξίσωση:

$$(\text{w/w \% C})(\text{w/w \% O}) = \frac{p_{co}}{K} \quad (9)$$

Όπου (w/w % C) είναι το ποσοστό του άνθρακα στο μέταλλο, (w/w % O) το ποσοστό του οξυγόνου στο μέταλλο, p_{co}, η μερική πίεση του μονοξειδίου εντός της καμίνου και K η σταθερά ισορροπίας της αντίδρασης οξείδωσης του άνθρακα προς μονοξείδιο.

Μέσω της εξίσωσης βρίσκεται το ποσοστό του διαλελυμένου οξυγόνου το οποίο μετατρέπεται σε βουστίτη. Ωστόσο, η ποσότητα του βουστίτη πρέπει να εισαχθεί στο σύστημα. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί αυτό, δημιουργήθηκε ένα **Control** το οποίο έχει ως στόχο τη ποσότητα

του βουστίτη η οποία βρέθηκε ότι πρέπει να υπάρξει το μέταλλο, μεταβάλλοντας το ποσοστό προόδου της οξείδωσης του βουστίτη σε αιματίτη.

Πίνακας 4.25. Η αντίδραση του διαλελυμένου στο μέταλλο οξυγόνου.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα					Προϊόντα				
Διαλελυμένο Οξυγόνο	96,60	4FeO(l)	+	O_2(g)		=	$2Fe_2O_3$				

4.8.10 Ni, Cu, V, H

Το νικέλιο καθώς και ο χαλκός, το βανάδιο και το τιτάνιο αποτελούν τα απλούστερα στοιχεία προς διαχείριση στο σύστημα. Όλη η εισαγόμενη ποσότητα των παραπάνω στοιχείων τήκεται και εισάγεται στο μέταλλο. Επομένως, οι μοναδικές αντιδράσεις που αφορούν τα στοιχεία είναι οι αντιδράσεις τήξης.

Τέλος να σημειωθεί ότι το υδρογόνο που εισάγεται στο σύστημα ως υγρασία στο scrap μετατρέπεται σε αέριο το οποίο διαφεύγει στα απαέρια.

Πίνακας 4.26. Οι αντιδράσεις τήξης του νικελίου, του χαλκού, του βαναδίου και του τιτανίου.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα					Προϊόντα				
Τήξη	100,00			Ni		=	Ni(l)				
	100,00			Cu		=	Cu(l)				
	100,00			V		=	V(l)				
	100,00			Ti		=	Ti(l)				

4.8.11 Al

Το αλουμίνιο εντός του scrap δεν τήκεται. Αντιθέτως οξειδώνεται πλήρως προς τριοξείδιο. Η ποσότητα του οξειδίου του αλουμινίου το οποίο τήκεται και παραμένει στη σκωρία καθορίζεται από τον πίνακα κατανομής των οξειδίων.

Πίνακας 4.27. Οι αντιδράσεις του αλουμινίου.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα					Προϊόντα				
Οξείδωση	100,00	2Al	+	$1,5O_2$(g)		=	Al_2O_3				
Τήξη Οξειδίου	97,00			Al_2O_3			Al_2O_3(l)				

4.9 Πρότυπο Μεταλλουργίας Κάδου

Το μοντέλο της μεταλλουργίας κάδου είναι σαφώς πιο διαχειρίσιμο από το μοντέλο της ηλεκτρικής καμίνου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει εμφύσηση οξυγόνου ή άνθρακα με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πληθώρα αντιδράσεων. Οι πιο σημαντικές αντιδράσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται εντός της καμίνου είναι οι αντιδράσεις αποξείδωσης του μετάλλου μέσω των σιδηροκραμάτων που εισάγονται, καθώς και οι αντιδράσεις οι οποίες αφορούν στην αποθείωση. Εκτός από τις παραπάνω αντιδράσεις πραγματοποιούνται αντιδράσεις διάσπασης των ανθρακικών ενώσεων, που πιθανώς υπάρχουν στα συλλιπάσματα, καθώς και τήξη των στοιχείων και των οξειδίων. Στον επόμενο πίνακα δίδονται οι αντιδράσεις διάσπασης ανθρακικών ενώσεων, αποθείωσης και τήξης στοιχείων και οξειδίων. Να σημειωθεί ότι ο βαθμός προόδου αντίδρασης του θείου προς θειούχο σίδηρο βρέθηκε μέσω των τελικών συστάσεων μετάλλου και σκωρίας.

Πίνακας 4.28. Αντιδράσεις διάσπασης ανθρακικών ενώσεων, αποθείωσης και τήξης στοιχείων και οξειδίων.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Διάσπαση	100,00			$CaCO_3$	=	CaO	+	$CO_2(g)$		
	100,00			$MgCO_3$	=	MgO	+	$CO_2(g)$		
	100,00			$CaMg(CO_3)_2$	=	CaO	+	MgO	+	$2CO_2(g)$
S	60,00	S	+	Fe	=	FeS				
	100,00	FeS	+	CaO	=	CaS(l)	+	FeO(l)		
Τήξη	100			Fe	=	Fe(l)				
	100			Si	=	Si(l)				
	100			C	=	C(l)				
	100			Mn	=	Mn(l)				
	100			CaO	=	CaO(l)				
	100			MgO	=	MgO(l)				
	100			SiO_2	=	$SiO_2(l)$				
	100			P_2O_5	=	$P_2O_5(l)$				

4.10 Αντιδράσεις Ρεύματος «Προσθήκες»

4.10.1 Κράματα

Η αποξείδωση του χάλυβα μέσω κραμάτων αποτελεί μια από τις σημαντικότερες διεργασίες της μεταλλουργίας κάδου. Τα κράματα τα οποία εισάγονται αποτελούνται από σίδηρο, μαγγάνιο και πυρίτιο. Τα τελευταία στοιχεία ευθύνονται για την αποξείδωση του χάλυβα, καθώς αντιδρούν με το διαλελυμένο οξυγόνο με τη μορφή βουστίτη. Εντούτοις, το ποσοστό αποξείδωσης του κάθε στοιχείου δηλαδή ο βαθμός προόδου των αντιδράσεων αποξείδωσης για τα στοιχεία δεν είναι γνωστός. Μέσω βιβλιογραφικής ανασκοπήσεως βρέθηκε ότι ο βαθμός αποξείδωσης του πυριτίου είναι πολύ μεγαλύτερος από του μαγγανίου. Συγκεκριμένα ο βαθμός προόδου της αντίδρασης αναγωγής του βουστίτη από το πυρίτιο είναι 98%, ενώ του μαγγανίου είναι 2%. Οι αντιδράσεις αποξείδωσης είναι:

Πίνακας 4.29. Αντιδράσεις αποξείδωσης της δευτερογενούς μεταλλουργίας.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Αποξείδωση	2,00	FeO(l)	+	Mn(l)	=	Fe(l)	+	MnO(l)		
	98,00	2FeO(l)	+	Si(l)	=	2Fe(l)	+	$SiO_2(l)$		

4.10.2 C

Καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα ενώ κάθε ποιότητα προϊόντος απαιτεί διαφορετική ποσότητα άνθρακα, δημιουργήθηκε ένα **Control**. Το **Control** ρυθμίζει την ποσότητα του άνθρακα που εισέρχεται στο ρεύμα **Προσθήκες** προκειμένου το ποσοστό του άνθρακα στο μέταλλο να φτάσει σε συγκεκριμένη τιμή και συγκεκριμένα σε ποσοστό 0,11%. Μετά την εκτέλεση των υπολογισμών βρέθηκε ότι η εισαγόμενη ποσότητα σε άνθρακα είναι μηδενική.

4.11 Πρότυπο Χύτευσης

Η χύτευση αποτελεί το απλούστερο εκ των τριών σύστημα προς προσομοίωση. Ο λόγος είναι ότι υπάρχουν δυο ρεύματα εισόδου: το μέταλλο του οποίου οι παράμετροι έχουν καθοριστεί στα προηγούμενα στάδια και τα πυρίμαχα. Η ποσότητα και η σύσταση των πυριμάχων μπορεί να αποτυπωθεί με ευκολία στο σύστημα. Επομένως, οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται εντός της χύτευσης είναι οι εξής:

Πίνακας 4.30. Η αντίδραση τήξης των πυριμάχων.

	Βαθμός Προόδου (%)	Αντιδρώντα				Προϊόντα				
Τήξη	100,00			MgO	=	MgO(l)				

Η ποσότητα των πυριμάχων που εισέρχεται στο σύστημα σχηματίζει τη σκωρία της χύτευσης.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα παραπάνω, αποτυπώνοντας τα δεδομένα και τους περιορισμούς του προγράμματος, προέκυψαν τα αποτελέσματα κατά της προσομοίωσης, που παρατίθενται στη συνέχεια. Ο αριθμός επαναλήψεων των υπολογισμών ήταν 100.

5.1 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Φάσεων για τις τρεις Μονάδες

Στους επόμενους πίνακες δίδονται οι συγκεντρωτικοί πίνακες ροής των τριών φάσεων (αέρια, υγρά, στερεά) για τα διάφορα ρεύματα.

Πίνακας 5.1. Ποσότητες εισόδου και εξόδου για τις φάσεις της ηλεκτρικής καμίνου.

Ηλεκτρική κάμινος (EAF)					
Ονομασία ρεύματος	Τύπος	Σύνολο (tn)	Αέρια (Nm^3)	Υγρά (tn)	Στερεά (tn)
Scrap	Είσοδος*	88,93	0,00	0,00	88,93
Άνθρακας Εμφύσησης	Είσοδος	1,27	0,00	0,00	1,27
Άνθρακας Καλαθιού	Είσοδος	0,00	0,00	0,00	0,00
Ηλεκτρική Ενέργεια	Είσοδος	0,00	0,00	0,00	0,00
Ηλεκτρόδια	Είσοδος	0,10	0,00	0,00	0,10
Οξυγόνο	Είσοδος	6,20	4378,18	0,00	0,00
Πυρίμαχα	Είσοδος	0,40	0,00	0,00	0,40
Συλλιπάσματα	Είσοδος	3,18	0,00	0,00	3,18
Φυσικό Αέριο	Είσοδος	0,04	60,50	0,00	0,00
Απαέρια	Έξοδος*	7,82	4189,94	0,00	2,04
Scrap EAF	Έξοδος	0,00	0,00	0,00	0,00
Απώλειες Θερμότητας	Έξοδος	0,00	0,00	0,00	0,00
Μέταλλο	Έξοδος	79,60	0,00	0,00	79,60
Σκωρία	Έξοδος	12,71	0,00	0,00	12,71
	ΙΣΟΖΥΓΙΟ:	0,00	-248,73	0,00	0,48

με **μπλε υποδηλώνονται τα ρεύματα εισόδου και με **κόκκινο** τα ρεύματα εξόδου*

Πίνακας 5.2. Ποσότητες εισόδου και εξόδου για τις φάσεις στον κάδο.

Μεταλλουργία κάδου (Ladle)					
Ονομασία ρεύματος	Τύπος	Σύνολο (tn)	Αέρια (Nm^3)	Υγρά (tn)	Στερεά (tn)
Αργό Ladle	Είσοδος*	5,70	3200,00	0,00	0,00
Ηλεκτρική Ενέργεια	Είσοδος	0,00	0,00	0,00	0,00
Ηλεκτρόδια	Είσοδος	0,02	0,00	0,00	0,02
Μέταλλο	Είσοδος	79,60	0,00	0,00	79,60
Πρόσθετα	Είσοδος	0,48	0,00	0,00	0,48
Πυρίμαχα	Είσοδος	0,08	0,00	0,00	0,08
Συλλιπάσματα	Είσοδος	0,64	0,00	0,00	0,64
Απαέρια	Έξοδος*	5,71	3201,43	0,00	0,00
Απώλειες Θερμότητας	Έξοδος	0,00	0,00	0,00	0,00
Scrap Ladle	Έξοδος	0,00	0,00	0,00	0,00
Προϊόν Ladle	Έξοδος	80,01	0,00	0,00	80,01
Σκωρία	Έξοδος	0,81	0,00	0,00	0,81
	ΙΣΟΖΥΓΙΟ:	0,00	1,43	0,00	0,00

με **μπλε υποδηλώνονται τα ρεύματα εισόδου και με **κόκκινο** τα ρεύματα εξόδου*

Πίνακας 5.3. Ποσότητες εισόδου και εξόδου για τις φάσεις της χύτευσης.

Χύτευση					
Ονομασία ρεύματος	**Τύπος**	**Σύνολο (tn)**	**Αέρια (Nm^3)**	**Υγρά (tn)**	**Στερεά (tn)**
Προϊόν Ladle	**Είσοδος***	**80,01**	**0,00**	**0,00**	**80,01**
Πυρίμαχα	**Είσοδος**	**0,04**	**0,00**	**0,00**	**0,04**
Απώλειες Θερμότητας	**Έξοδος***	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**
Σίδηρος Σκάφης	**Έξοδος**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**
Σκωρία	**Έξοδος**	**0,04**	**0,00**	**0,00**	**0,04**
Τελικό προιόν	**Έξοδος**	**80,01**	**0,00**	**0,00**	**80,01**
	ΙΣΟΖΥΓΙΟ:	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**

με **μπλε υποδηλώνονται τα ρεύματα εισόδου και με **κόκκινο** τα ρεύματα εξόδου*

5.2 Αναλυτικοί Πίνακες Ρευμάτων

5.2.1 Ηλεκτρική κάμινος – είσοδος

Πίνακας 5.4. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εισόδου και ποσότητες αέριας φάσης στα ρεύματα εισόδου ηλεκτρικής καμίνου, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Scrap**	**Άνθρακας Εμφύσησης**	**Άνθρακας Καλαθιού**	**Ηλεκτρική Ενέργεια**	**Ηλεκτρόδια**	**Οξυγόνο**	**Πυρίμαχα**	**Συλλιπάσματα**	**Φυσικό Αέριο**
Πηγή										
Προορισμός		EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF
Ποσό	**tn**	**88,93**	**1,27**	**0,00**	**0,00**	**0,10**	**6,20**	**0,40**	**3,18**	**0,04**
Όγκος	**m^3**	**12,41**	**0,55**	**0,00**	**0,00**	**0,04**	**4378,18**	**0,11**	**0,96**	**60,50**
Αέρια φάση	**Nm^3**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**4378,18**	**0,00**	**0,00**	**60,50**
$O_{2(g)}$	**Nm^3**	0,00					4115,49			
$N_{2(g)}$	**Nm^3**	0,00					262,69			0,48
$CO_{(g)}$	**Nm^3**	0,00								
$CO_{2(g)}$	**Nm^3**	0,00								0,06
$H_2O_{(g)}$	**Nm^3**	0,00								
$Ar_{(g)}$	**Nm^3**	0,00								
$SO_{2(g)}$	**Nm^3**	0,00								
$CH_{4(g)}$	**Nm^3**	0,00								59,29
$C_2H_{6(g)}$	**Nm^3**	0,00								0,36
$C_3H_{8(g)}$	**Nm^3**	0,00								0,30

Πίνακας 5.5. Ποσότητες εισόδου ηλεκτρικής καμίνου φάσεων υγρού χάλυβα, υγρής σκωρίας και στερεής φάσης καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Scrap**	**Άνθρακας Εμφύσησης**	**Άνθρακας Καλαθιού**	**Ηλεκτρική Ενέργεια**	**Ηλεκτρόδια**	**Οξυγόνο**	**Πυρίμαχα**	**Συλλιπάσματα**	**Φυσικό Αέριο**
Πηγή										
Προορισμός		EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF	EAF
Ποσό	**tn**	**88,93**	**1,27**	**0,00**	**0,00**	**0,10**	**6,20**	**0,40**	**3,18**	**0,04**
Όγκος	**m^3**	**12,41**	**0,55**	**0,00**	**0,00**	**0,04**	**4378,18**	**0,11**	**0,96**	**60,50**
Υγρός χάλυβας	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**
Στερεή φάση	**tn**	**88,93**	**1,27**	**0,00**	**0,00**	**0,10**	**0,00**	**0,40**	**3,18**	**0,00**
Fe	tn	80,83								
Si	tn	0,27								
Mn	tn	0,71								
Cu	tn	0,18								
Cr	tn	0,18								
Ni	tn	0,04								
Zn	tn	0,59								
Pb	tn	0,09								
Al	tn	0,13								
Ti	tn	0,02								
Ca	tn									
Mg	tn									
V	tn	0,02								
C	tn	0,27	1,12			0,10		0,02		
S	tn	0,09	0,03							
P	tn	0,09								
FeS	tn									
MnSi	tn									
CaS	tn									
CaO	tn	1,33	0,01					0,02	3,06	
MgO	tn	0,44	0,01					0,34	0,03	
SiO_2	tn	1,07	0,05					0,01	0,06	
Al_2O_3	tn	0,71	0,01							
MnO	tn									
TiO_2	tn									
FeO	tn	1,78								
Fe_2O_3	tn		0,05					0,01		
Fe_3O_4	tn									
Cr_2O_3	tn									
ZnO	tn									
PbO	tn									
$ZnFe_2O_4$	tn									
$CaCO_3$	tn								0,03	
$MgCO_3$	tn									
$CaMg(CO_3)_2$	tn									
P_2O_5	tn	0,00	0,00							
Υγρή σκωρία	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**

5.2.2 Ηλεκτρική κάμινος – έξοδος

Πίνακας 5.6. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εξόδου και ποσότητες αέριας φάσης και υγρού χάλυβα στα ρεύματα εξόδου της ηλεκτρικής καμίνου, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Απαέρια**	**Απώλειες Θερμότητας**	**Σκωρία**	**Μέταλλο**	**Scrap EAF**
Πηγή		EAF	EAF	EAF	EAF	EAF
Προορισμος					Ladle	
Ποσό	**tn**	**7,82**	**0,00**	**12,71**	**79,60**	**0,00**
Όγκος	**m^3**	**4190,38**	**0,00**	**3,25**	**10,19**	**0,00**
Αέρια φάση	**Nm^3**	**4189,94**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**
$O_{2(g)}$	Nm^3	1314,75				
$N_{2(g)}$	Nm^3	263,17				
$CO_{(g)}$	Nm^3	1836,41				
$CO_{2(g)}$	Nm^3	527,21				
$H_2O_{(g)}$	Nm^3	231,52				
$Ar_{(g)}$	Nm^3					
$SO_{2(g)}$	Nm^3	16,88				
$CH_{4(g)}$	Nm^3					
$C_2H_{6(g)}$	Nm^3					
$C_3H_{8(g)}$	Nm^3					
Υγρός χάλυβας	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,27**	**79,60**	**0,00**
$Fe_{(l)}$	tn			0,09	78,63	
$Si_{(l)}$	tn				0,06	
$Mn_{(l)}$	tn				0,32	
$C_{(l)}$	tn			0,17	0,06	
$S_{(l)}$	tn				0,05	
$P_{(l)}$	tn				0,01	
$Cr_{(l)}$	tn				0,07	
$Cu_{(l)}$	tn				0,18	
$Ni_{(l)}$	tn				0,04	
$Zn_{(l)}$	tn					
$Pb_{(l)}$	tn					
$V_{(l)}$	tn				0,02	
$Ti_{(l)}$	tn				0,02	
$Mg_{(l)}$	tn					
$Al_{(l)}$	tn					
$N_2O_{4(l)}$	tn					
$FeO_{(l)}$	tn				0,15	

Πίνακας 5.7. Ποσότητες φάσης στερεών στα ρεύματα εξόδου της ηλεκτρικής καμίνου, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Απαέρια**	**Απώλειες Θερμότητας**	**Σκωρία**	**Μέταλλο**	**Scrap EAF**
Πηγή		EAF	EAF	EAF	EAF	EAF
Προορισμός					Ladle	
Ποσό	**tn**	**7,82**	**0,00**	**12,71**	**79,60**	**0,00**
Όγκος	**m^3**	**4190,38**	**0,00**	**3,25**	**10,19**	**0,00**
Στερεή φάση	**tn**	**2,04**	**0,00**	**4,18**	**0,00**	**0,00**
Fe	tn					
Si	tn					
Mn	tn					
Cu	tn					
Cr	tn					
Ni	tn					
Zn	tn					
Pb	tn					
Al	tn					
Ti	tn					
Ca	tn					
Mg	tn					
V	tn					
C	tn	0,05				
S	tn					
P	tn					
FeS	tn					
MnSi	tn					
CaS	tn					
CaO	tn	0,29				
MgO	tn	0,05				
SiO_2	tn	0,05				
Al_2O_3	tn	0,03				
MnO	tn	0,03				
TiO_2	tn					
FeO	tn					
Fe_2O_3	tn	0,69		4,18		
Fe_3O_4	tn					
Cr_2O_3	tn	0,01				
ZnO	tn	0,74				
PbO	tn	0,10				
$ZnFe_2O_4$	tn					
$CaCO_3$	tn					
$MgCO_3$	tn					
$CaMg(CO_3)_2$	tn					
P_2O_5	tn	0,03				
H_2O	tn					

Πίνακας 5.8. Ποσότητες φάσης υγρής σκωρίας στα ρεύματα εξόδου της ηλεκτρικής καμίνου, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Απαέρια**	**Απώλειες Θερμότητας**	**Σκωρία**	**Μέταλλο**	**Scrap EAF**
Πηγή		EAF	EAF	EAF	EAF	EAF
Προορισμός					Ladle	
Ποσό	**tn**	**7,82**	**0,00**	**12,71**	**79,60**	**0,00**
Όγκος	**m^3**	**4190,38**	**0,00**	**3,25**	**10,19**	**0,00**
Υγρή σκωρία	**tn**	**0,00**	**0,00**	**8,26**	**0,00**	**0,00**
$CaO_{(l)}$	tn			4,06		
$MgO_{(l)}$	tn			0,78		
$FeO_{(l)}$	tn					
$MnO_{(l)}$	tn			0,48		
$SiO_{2(l)}$	tn			1,59		
$TiO_{2(l)}$	tn					
$Al_2O_{3(l)}$	tn			0,95		
$Cr_2O_{3(l)}$	tn			0,14		
$V_2O_{5(l)}$	tn					
$P_2O_{5(l)}$	tn			0,16		
$ZnO_{(l)}$	tn					
$PbO_{(l)}$	tn					
$CaS_{(l)}$	tn			0,11		

5.2.3 Μεταλλουργία κάδου – είσοδος

Πίνακας 5.9. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εισόδου μεταλλουργίας κάδου και ποσότητες αέριας φάσης για τα ρεύματα εισόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Αργό**	**Ηλεκτρική Ενέργεια**	**Ηλεκτρόδια**	**Πρόσθετα**	**Πυρίμαχα**	**Συλλιπάσματα**	**Μέταλλο**
Πηγή								EAF
Προορισμός		Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle
Ποσό	**tn**	**2,67**	**0,00**	**0,02**	**0,48**	**0,08**	**0,64**	**79,60**
Όγκος	**m^3**	**1500,00**	**0,00**	**0,01**	**0,17**	**0,02**	**0,19**	**10,19**
Αέρια φάση	**Nm^3**	**1500,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**
O_2(g)	Nm^3							
O_2(10bar)	Nm^3							
N_2(g)	Nm^3							
CO(g)	Nm^3							
CO_2(g)	Nm^3							
H_2O(g)	Nm^3							
Ar(g)	Nm^3	1500						
SO_2(g)	Nm^3							
CH_4(g)	Nm^3							
C_2H_6(g)	Nm^3							
C_3H_8(g)	Nm^3							

Πίνακας 5.10. Ποσότητες εισόδου της φάσης υγρού χάλυβα για τα ρεύματα εισόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Αργό**	**Ηλεκτρική Ενέργεια**	**Ηλεκτρόδια**	**Πρόσθετα**	**Πυρίμαχα**	**Συλλιπάσματα**	**Μέταλλο**
Πηγή								EAF
Προορισμός		Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle
Ποσό	**tn**	**2,67**	**0,00**	**0,02**	**0,48**	**0,08**	**0,64**	**79,60**
Όγκος	**m^3**	**1500,00**	**0,00**	**0,01**	**0,17**	**0,02**	**0,19**	**10,19**
Υγρός χάλυβας	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**79,60**
Fe(l)	tn							78,63
Si(l)	tn							0,06
Mn(l)	tn							0,32
C(l)	tn							0,06
S(l)	tn							0,05
P(l)	tn							0,01
Cr(l)	tn							0,07
Cu(l)	tn							0,18
Ni(l)	tn							0,04
Zn(l)	tn							
Pb(l)	tn							
V(l)	tn							0,02
Ti(l)	tn							0,02
Mg(l)	tn							
Al(l)	tn							
N_2O_4(l)	tn							
FeO(l)	tn							0,15

Πίνακας 5.11. Ποσότητες φάσης στερεών και υγρής σκωρίας για τα ρεύματα εισόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Αργό**	**Ηλεκτρική Ενέργεια**	**Ηλεκτρόδια**	**Πρόσθετα**	**Πυρίμαχα**	**Συλλιπάσματα**	**Μέταλλο**
Πηγή								EAF
Προορισμός		Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle
Ποσό	**tn**	**2,67**	**0,00**	**0,02**	**0,48**	**0,08**	**0,64**	**79,60**
Όγκος	**m^3**	**1500,00**	**0,00**	**0,01**	**0,17**	**0,02**	**0,19**	**10,19**
Στερεή φάση	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,02**	**0,48**	**0,08**	**0,64**	**0,00**
Fe	tn				0,05			
Si	tn				0,34			
Mn	tn				0,09			
Cu	tn							
Cr	tn							
Ni	tn							
Zn	tn							
Pb	tn							
Al	tn							
Ti	tn							
Ca	tn							
Mg	tn							
V	tn							
C	tn			0,02		0,01		
S	tn							
P	tn							
FeS	tn							
MnSi	tn							
CaS	tn							
CaO	tn						0,61	
MgO	tn					0,07	0,01	
SiO_2	tn						0,01	
Al_2O_3	tn							
MnO	tn							
TiO_2	tn							
FeO	tn							
Fe_2O_3	tn							
Fe_3O_4	tn							
Cr_2O_3	tn							
ZnO	tn							
PbO	tn							
$CaCO_3$	tn						0,01	
$MgCO_3$	tn							
$CaMg(CO_3)_2$	tn							
P_2O_5	tn							
H_2O	tn							
Υγρή σκωρία	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**

5.2.4 Μεταλλουργία κάδου – έξοδος

Πίνακας 5.12. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εξόδου και ποσότητες αέριας φάσης για τα ρεύματα εξόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Απαέρια**	**Απώλειες Θερμότητας**	**Scrap Ladle**	**Σκωρία**	**Προϊόν Ladle**
Πηγή		Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle
Προορισμός						Χύτευση
Ποσό	**tn**	**2,68**	**0,00**	**0,00**	**0,81**	**80,01**
Όγκος	**m^3**	**1501,43**	**0,00**	**0,00**	**0,31**	**10,33**
Αέρια φάση	**Nm^3**	**1501,43**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**
O_2(g)	Nm^3					
O_2(10bar)	Nm^3					
N_2(g)	Nm^3					
CO(g)	Nm^3					
CO_2(g)	Nm^3	1,43				
H_2O(g)	Nm^3					
Ar(g)	Nm^3	150				
SO_2(g)	Nm^3					
CH4(g)	Nm^3					
C_2H_6(g)	Nm^3					
C_3H_8(g)	Nm^3					

Πίνακας 5.13. Ποσότητες φάσης υγρού χάλυβα για τα ρεύματα εξόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Απαέρια**	**Απώλειες Θερμότητας**	**Scrap Ladle**	**Σκωρία**	**Προϊόν Ladle**
Πηγή		Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle
Προορισμός						Χύτευση
Ποσό	**tn**	**2,68**	**0,00**	**0,00**	**0,81**	**80,01**
Όγκος	**m^3**	**1501,43**	**0,00**	**0,00**	**0,31**	**10,33**
Υγρός χάλυβας	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**80,01**
Fe(l)	tn					78,80
Si(l)	tn					0,36
Mn(l)	tn					0,41
C(l)	tn					0,09
S(l)	tn					0,02
P(l)	tn					0,01
Cr(l)	tn					0,07
Cu(l)	tn					0,18
Ni(l)	tn					0,04
Zn(l)	tn					
Pb(l)	tn					
V(l)	tn					0,02
Ti(l)	tn					0,02
Mg(l)	tn					
Al(l)	tn					
N_2O_4(l)	tn					
FeO(l)	tn					

Πίνακας 5.14. Ποσότητες φάσης στερεών και υγρής σκωρίας για τα ρεύματα εξόδου της μεταλλουργίας κάδου, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Απαέρια**	**Απώλειες Θερμότητας**	**Scrap Ladle**	**Σκωρία**	**Προϊόν Ladle**
Πηγή		Ladle	Ladle	Ladle	Ladle	Ladle
Προορισμός						Χύτευση
Ποσό	**tn**	**2,68**	**0,00**	**0,00**	**0,81**	**80,01**
Όγκος	**m^3**	**1501,43**	**0,00**	**0,00**	**0,31**	**10,33**
Στερεή φάση	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**
Υγρή σκωρία	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,81**	**0,00**
CaO(l)	tn				0,57	
MgO(l)	tn				0,07	
FeO(l)	tn					
MnO(l)	tn					
SiO_2(l)	tn				0,10	
TiO_2(l)	tn					
Al_2O_3(l)	tn					
Cr_2O_3(l)	tn					
V_2O_5(l)	tn					
P_2O_5(l)	tn					
ZnO(l)	tn					
PbO(l)	tn					
CaS(l)	tn				0,06	
$CaSiO_3$(l)	tn					
$CaSO_4$(l)	tn					

5.2.5 Χύτευση- είσοδος

Πίνακας 5.15. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εισόδου και ποσότητες αέριας φάσης και υγρού χάλυβα για τα ρεύματα εισόδου της χύτευσης, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Πυρίμαχα**	**Προϊόν Ladle**
Πηγή			Ladle
Προορισμός		Χύτευση	Χύτευση
Ποσότητα	**tn**	**0,04**	**80,01**
'Ογκος	**m^3**	**0,01**	**10,33**
Αέρια φάση	**Nm^3**	**0,00**	**0,00**
Υγρός χάλυβας	**tn**	**0,00**	**80,01**
Fe(l)	tn		78,80
Si(l)	tn		0,36
Mn(l)	tn		0,41
C(l)	tn		0,09
S(l)	tn		0,02
P(l)	tn		0,01
Cr(l)	tn		0,07
Cu(l)	tn		0,18
Ni(l)	tn		0,04
Zn(l)	tn		
Pb(l)	tn		
V(l)	tn		0,02
Ti(l)	tn		0,02
Mg(l)	tn		
Al(l)	tn		
N_2O_4(l)	tn		
FeO(l)	tn		

Πίνακας 5.16. Ποσότητες εισόδου φάσης στερεών για τα ρεύματα εισόδου της χύτευσης , καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Πυρίμαχα**	**Προϊόν Ladle**
Πηγή			Ladle
Προορισμός		Χύτευση	Χύτευση
Ποσότητα	**tn**	**0,04**	**80,01**
'Ογκος	**m^3**	**0,01**	**10,33**
Στερεή φάση	**tn**	**0,04**	**0,00**
Fe	tn		
Si	tn		
Mn	tn		
Cu	tn		
Cr	tn		
Ni	tn		
Zn	tn		
Pb	tn		
Al	tn		
Ti	tn		
Ca	tn		
Mg	tn		
V	tn		
C	tn		
S	tn		
P	tn		
FeS	tn		
MnSi	tn		
CaS	tn		
CaO	tn		
MgO	tn	0,04	
SiO_2	tn		
Al_2O_3	tn		
MnO	tn		
TiO_2	tn		
FeO	tn		
Fe_2O_3	tn		
Fe_3O_4	tn		
Cr_2O_3	tn		
ZnO	tn		
PbO	tn		
$ZnFe_2O_4$	tn		
$CaCO_3$	tn		
$MgCO_3$	tn		
$CaMg(CO_3)_2$	tn		
P_2O_5	tn		
H_2O	tn		

Πίνακας 5.17. Ποσότητες φάσης υγρής σκωρίας για τα ρεύματα εισόδου της χύτευσης, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Πυρίμαχα**	**Προϊόν Ladle**
Πηγή			Ladle
Προορισμός		Χύτευση	Χύτευση
Ποσότητα	**tn**	**0,04**	**80,01**
'Ογκος	**m^3**	**0,01**	**10,33**
Υγρή σκωρία	**tn**	**0,00**	**0,00**

5.2.6 Χύτευση – έξοδος

Πίνακας 5.18. Συνολικές ποσότητες ρευμάτων εξόδου και ποσότητες αέριας, στερεής φάσης και υγρού χάλυβα για τα ρεύματα εξόδου της χύτευσης, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Απώλειες Θερμότητας**	**Σίδηρος Σκάφης**	**Σκωρία**	**Τελικό προιόν**
Πηγή		Χύτευση	Χύτευση	Χύτευση	Χύτευση
Προορισμός					
Ποσότητα	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,04**	**80,01**
Όγκος	**m^3**	**0,00**	**0,00**	**0,01**	**10,33**
Αέρια φάση	**Nm^3**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**
Υγρός χάλυβας	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**80,01**
Fe(l)	tn				78,80
Si(l)	tn				0,36
Mn(l)	tn				0,41
C(l)	tn				0,09
S(l)	tn				0,02
P(l)	tn				0,01
Cr(l)	tn				0,07
Cu(l)	tn				0,18
Ni(l)	tn				0,04
Zn(l)	tn				
Pb(l)	tn				
V(l)	tn				0,02
Ti(l)	tn				0,02
Mg(l)	tn				
Al(l)	tn				
N_2O_4(l)	tn				
FeO(l)	tn				
Στερεή φάση	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**

Πίνακας 5.19. Ποσότητες φάσης υγρής σκωρίας για τα ρεύματα εξόδου της χύτευσης, καθώς και επιμέρους συστατικών.

Ρεύματα		**Απώλειες Θερμότητας**	**Σίδηρος Σκάφης**	**Σκωρία**	**Τελικό προιόν**
Πηγή		Χύτευση	Χύτευση	Χύτευση	Χύτευση
Προορισμός					
Ποσότητα	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,04**	**80,01**
Όγκος	**m^3**	**0,00**	**0,00**	**0,01**	**10,33**
Υγρή σκωρία	**tn**	**0,00**	**0,00**	**0,04**	**0,00**
CaO(l)	tn				
MgO(l)	tn			0,04	
FeO(l)	tn				
MnO(l)	tn				
SiO_2(l)	tn				
TiO_2(l)	tn				
Al_2O_3(l)	tn				
Cr_2O_3(l)	tn				
V_2O_5(l)	tn				
P_2O_5(l)	tn				
ZnO(l)	tn				
PbO(l)	tn				
CaS(l)	tn				
$CaSiO_3$(l)	tn				
$CaSO_4$(l)	tn				

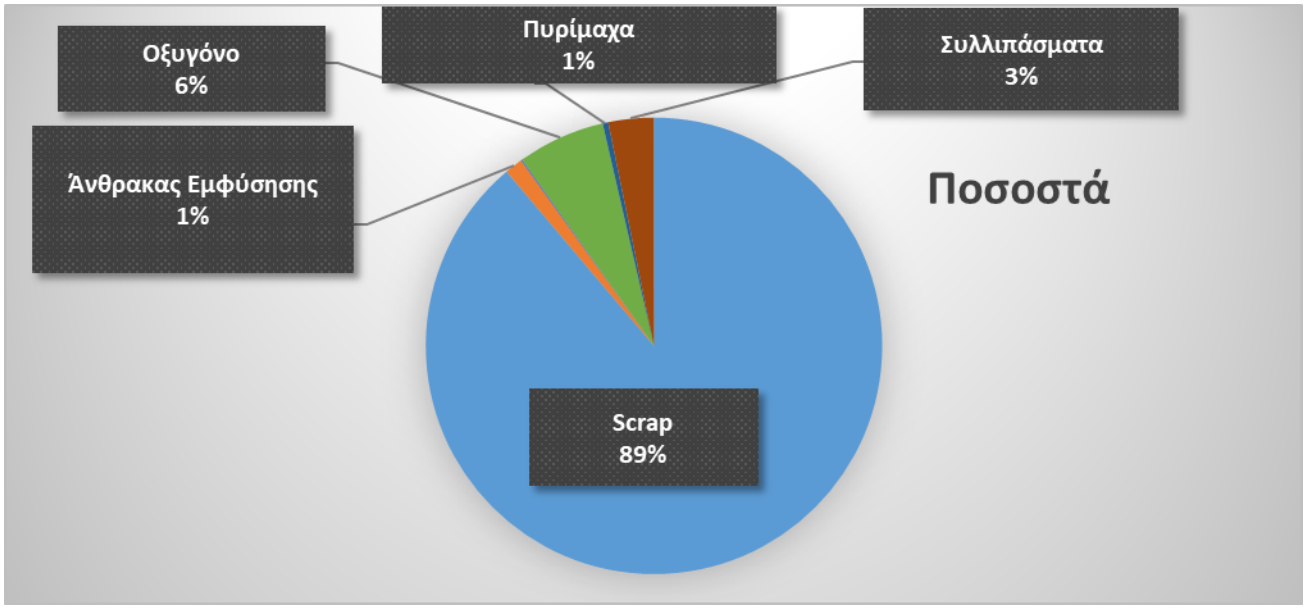
5.3 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Ρευμάτων

5.3.1 Ηλεκτρική κάμινος

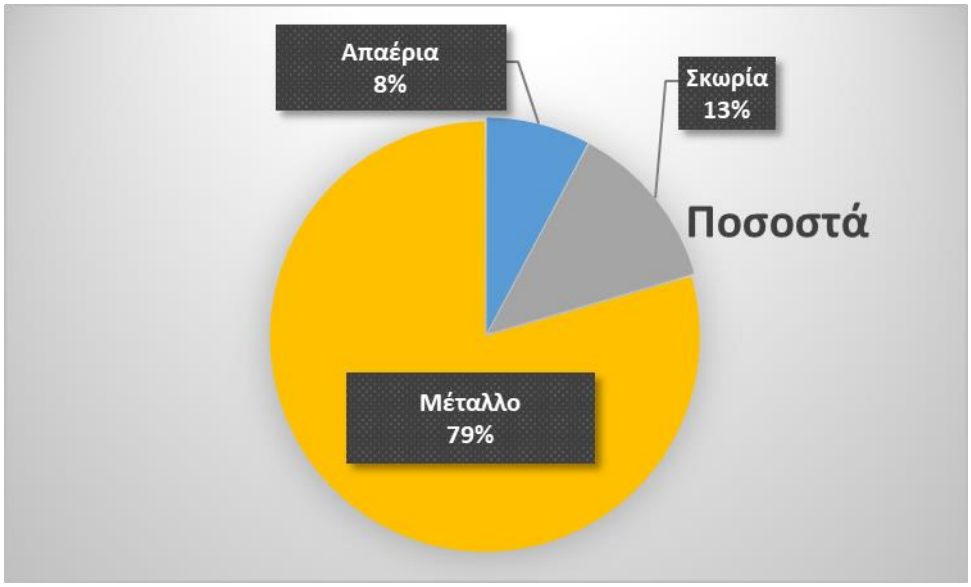
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συγκεντρωτικοί πίνακες των ρευμάτων εισόδου και εξόδου στην κάθε μονάδα. Σημειωνεται ότι οι διαφορά μεταξύ του εισαγόμενου και του εξαγόμενου όγκου των ρευμάτων, οφείλεται στις αντιδράσεις σχηματισμών αερίων.

Πίνακας 5.20. Συγκεντρωτικός πίνακας ρευμάτων και φάσεων της ηλεκτρικής καμίνου.

Είσοδος						
Ρεύματα	Ποσό	Όγκος	Αέρια φάση	Υγρός χάλυβας	Στερεή φάση	Υγρή σκωρία
	tn	m^3	Nm^3	tn	tn	tn
Scrap	88,93	12,41	0,00	0,00	88,93	0,00
Άνθρακας Εμφύσησης	1,27	0,55	0,00	0,00	1,27	0,00
Άνθρακας Καλαθιού	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ηλεκτρική Ενέργεια	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ηλεκτρόδια	0,10	0,04	0,00	0,00	0,10	0,00
Οξυγόνο	6,20	4378,18	4378,18	0,00	0,00	0,00
Πυρίμαχα	0,40	0,11	0,00	0,00	0,40	0,00
Συλλιπάσματα	3,18	0,96	0,00	0,00	3,18	0,00
Φυσικό Αέριο	0,04	60,50	60,50	0,00	0,00	0,00
Σύνολα	100,12	4452,75	4438,68	0,00	93,88	0,00
Έξοδος						
Ρεύματα	Ποσό	Όγκος	Αέρια φάση	Υγρός χάλυβας	Στερεή φάση	Υγρή σκωρία
	tn	m^3	Nm^3	tn	tn	tn
Απαέρια	7,82	4190,38	4189,94	0,00	2,04	0,00
Απώλειες Θερμότητας	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σκωρία	12,71	3,25	0,00	0,27	4,18	8,26
Μέταλλο	79,60	10,19	0,00	79,60	0,00	0,00
Scrap EAF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σύνολα	100,13	4203,82	4189,94	79,87	6,22	8,26



Εικόνα 5.1. Ποσοστά ρευμάτων εισόδου της ηλεκτρικής καμίνου.

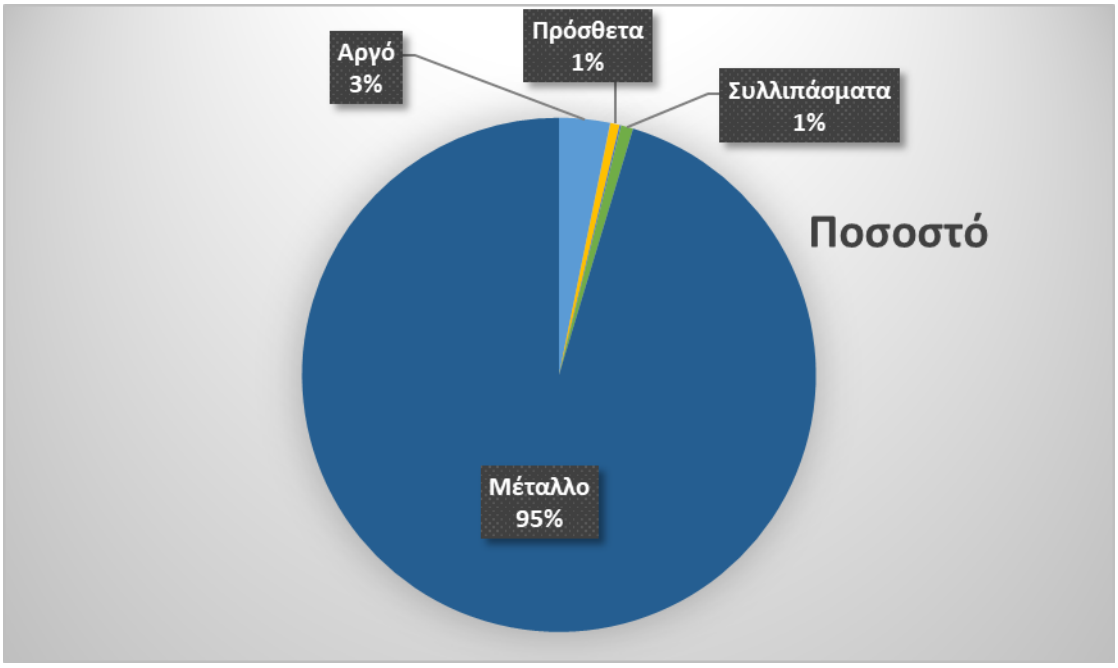


Εικόνα 5.2. Ποσοστά ρευμάτων εξόδου της ηλεκτρικής καμίνου.

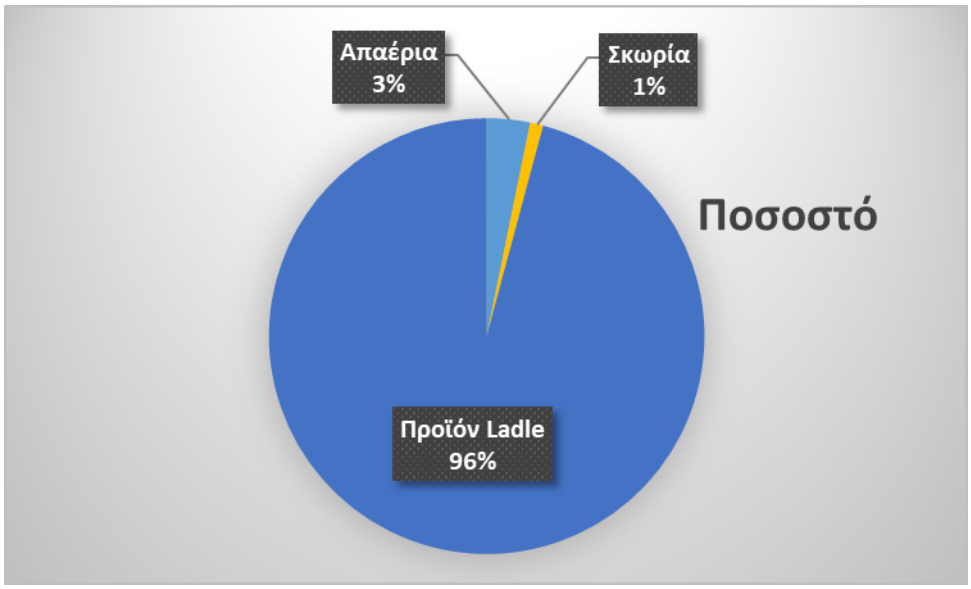
5.3.2 Μεταλλουργία κάδου

Πίνακας 5.21. Συγκεντρωτικός πίνακας ρευμάτων και φάσεων της μεταλλουργίας κάδου.

Είσοδος						
Ρεύματα	Ποσό	Όγκος	Αέρια φάση	Ρευστό μέταλλο	Στερεή φάση	Υγρή σκωρία
	tn	m^3	Nm^3	tn	tn	tn
Αργό	2,67	1500,00	1500,00	0,00	0,00	0,00
Ηλεκτρική Ενέργεια	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ηλεκτρόδια	0,02	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00
Πρόσθετα	0,48	0,17	0,00	0,00	0,48	0,00
Πυρίμαχα	0,08	0,02	0,00	0,00	0,08	0,00
Συλλιπάσματα	0,64	0,19	0,00	0,00	0,64	0,00
Μέταλλο	79,60	10,19	0,00	79,60	0,00	0,00
Σύνολα	83,5	1510,6	1500	79,6	1,22	0
Έξοδος						
Ρεύματα	Ποσό	Όγκος	Αέρια φάση	Ρευστό μέταλλο	Στερεή φάση	Υγρή σκωρία
	tn	m^3	Nm^3	tn	tn	tn
Απαέρια	2,68	1501,4	1501,43	0	0,00	0
Απώλειες Θερμότητας	0	0	0	0	0,00	0
Scrap Ladle	0	0	0,00	0	0,00	0
Σκωρία	0,81	0,31	0	0	0,00	0,81
Προϊόν Ladle	80	10,33	0	80,01	0,00	0
Σύνολα	83,5	1512,1	1501,43	80,01	0	0,81



Εικόνα 5.3. Ποσοστά ρευμάτων εισόδου μεταλλουργίας κάδου.



Εικόνα 5.4. Ποσοστά ρευμάτων εξόδου μεταλλουργίας κάδου.

5.3.3 Χύτευση

Σημειώνεται ότι στη μονάδα της χύτευσης δεν παρουσιάζονται διαγράμματα ποσοστών ποσοτήτων των ρευμάτων εισόδου και εξόδου, καθώς η ποσότητα του μετάλλου που εισέρχεται στη χύτευση και κατ' επέκταση του προϊόντος που εξέρχεται συνιστά περίπου το 100% των ρευμάτων.

Πίνακας 5.22. Ποσοστά ρευμάτων και φάσεων χύτευσης.

Είσοδος						
Ρεύματα	**Ποσό**	**Ογκος**	**Αέρια φάση**	**Υγρό μέταλλο**	**Στερεή φάση**	**Υγρή σκωρία**
	tn	**m^3**	**Nm^3**	**tn**	**tn**	**tn**
Πυρίμαχα	**0,04**	**0,01**	**0**	**0**	**0,04**	**0**
Προϊόν Ladle	**80**	**10,33**	**0**	**80,01**	**0**	**0**
Σύνολα	**80,05**	**10,34**	**0**	**80,01**	**0,04**	**0**
Έξοδος						
Ρεύματα	**Ποσό**	**Όγκος**	**Αέρια φάση**	**Υγρός χάλυβας**	**Στερεή φάση**	**Υγρή σκωρία**
	tn	**m^3**	**Nm^3**	**tn**	**tn**	**tn**
Απώλειες Θερμότητας	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**
Σίδηρος Σκάφης	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**
Σκωρία	**0,04**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**0,04**
Τελικό προιόν	**80,01**	**10,33**	**0,00**	**80,01**	**0,00**	**0,00**
Σύνολα	**80,05**	**10,33**	**0,00**	**80,01**	**0,00**	**0,04**

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

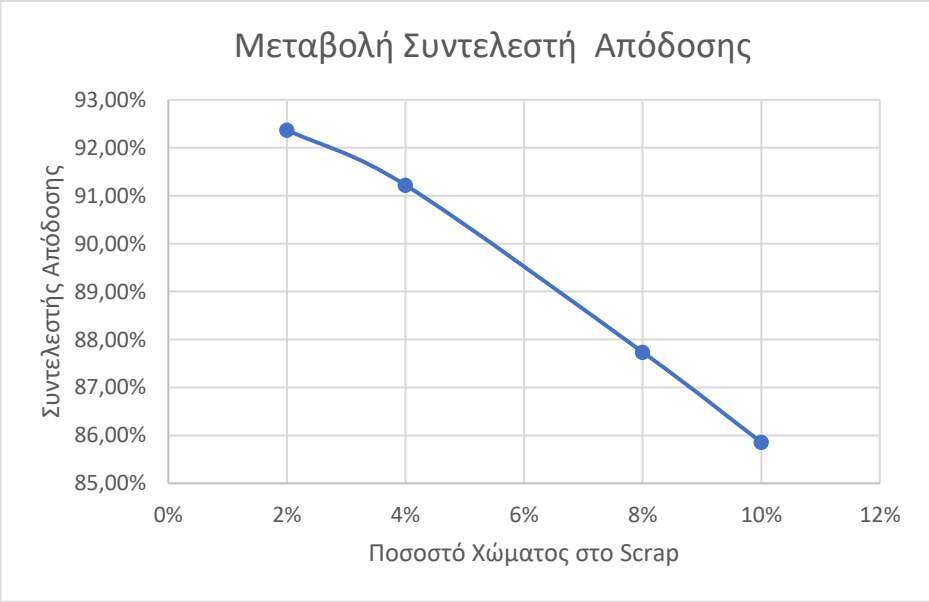
6.1 Ποσοστό Χώματος στο Scrap

Κατά την κατασκευή του μοντέλου, λήφθηκαν υπ' όψιν κάποιες αυθαίρετες ορισμένες φορές ή μεταβαλλόμενες από τις συνθήκες της αγοράς παραδοχές. Μια από αυτές τις παραδοχές είναι και η ποιότητα του εισαγόμενου scrap, ένα χαρακτηριστικό της οποίας είναι και το ποσοστό του χώματος που μπορεί να περιέχει. Στο κύριο σενάριο της διαδικασίας θεωρήθηκε ότι το ποσοστό του εδαφικού υλικού που εισέρχεται στο σύστημα μέσω του scrap είναι 4% και η σύσταση είναι η εξής:

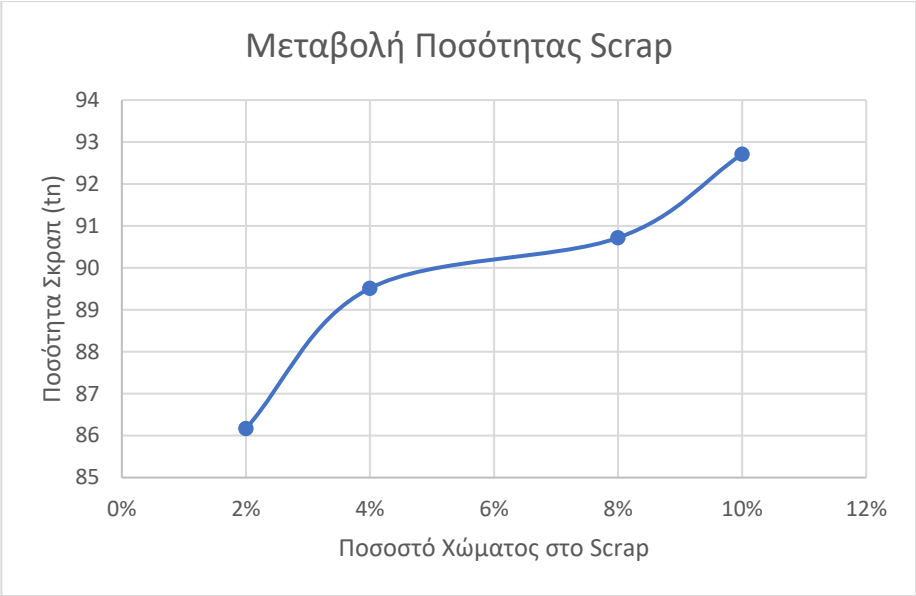
Πίνακας 6.1. Ποσοστό χώματος στο scrap.

Ενώσεις	%
CaO	1,50
MgO	0,50
SiO_2	1,20
Al_2O_3	0,80

Διατηρώντας τις αναλογίες των ποσοστών των επιμέρους συστατικών του χώματος, πραγματοποιούνται σενάρια για περιεκτικότητα του scrap σε χώμα 2%, 8% και 10%. Προκειμένου η χημική σύσταση του scrap να ανάγεται στο 100%, θεωρείται ότι η ποσότητα του εδαφικού υλικού μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το ποσοστό του σιδήρου στο scrap. Συγκεκριμένα, αν γίνει προσθήκη εδαφικών υλικών (χειρότερη ποιότητα scrap), το ποσοστό του σιδήρου στο scrap μειώνεται, ενώ αν το scrap περιέχει μικρότερο ποσοστό σε εδαφικά υλικά (καλύτερης ποιότητας scrap), το ποσοστό του σιδήρου αυξάνεται. Το αποτέλεσμα της παραπάνω μελέτης συνοψίζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Εικόνα 6.1. Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή απόδοσης.



Εικόνα 6.2. Διάγραμμα μεταβολής ποσότητας scrap που εισάγεται στην ηλεκτρική κάμινο σε συνάρτηση με το ποσοστό του χώματος.

Από τα παραπάνω διαγράμματα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η αύξηση της ποσότητας του χώματος στο scrap, μειώνει το συντελεστή απόδοσης της διαδικασίας. Υπενθυμίζεται ότι ο συντελεστής απόδοσης της ηλεκτρικής καμίνου ορίζεται ως η παραγόμενη ποσότητα ρευστού μετάλλου της ηλεκτρικής καμίνου, προς την εισαγόμενη ποσότητα scrap.
- Η αύξηση της ποσότητας του χώματος στο scrap συνεπάγεται αύξηση της απαιτούμενης ποσότητας scrap στο σύστημα. Το συμπέρασμα αυτό είναι άμεση απορροή της μεταβολής του συντελεστή απόδοσης.

6.2 Ποσοστό Απωλειών στη Χύτευση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι απώλειες του μετάλλου κατά τη χύτευση ανέρχονται στο 2% του τελικού προϊόντος. Ωστόσο, κατά το βασικό σενάριο ο παράγοντας αυτός δεν συμπεριλήφθηκε στους υπολογισμούς. Επομένως, έγινε διεξαγωγή σεναρίου προσομοίωσης όπου το παραπάνω ποσοστό εισέρχεται στους υπολογισμούς. Για την εισαγωγή του ποσοστού, μεταβάλλονται στην καρτέλα **Distribution** της μονάδας χύτευσης τα ποσοστά κατανομής της φάσης του υγρού χάλυβα. Θεωρείται ότι το 98% της ποσότητας του μετάλλου εξέρχεται με το ρεύμα του τελικού προϊόντος, ενώ το 2% εξέρχεται με το ρεύμα σιδήρου σκάφης. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης επηρεάζει την είσοδο της ηλεκτρικής καμίνου. Η νέα ποσότητα του scrap που πρέπει να εισαχθεί προκειμένου να προκύψουν 80 tn ρευστού μετάλλου στην έξοδο της χύτευσης είναι 90,74 tn αντί 88,93 tn που εισάγονται στο βασικό σενάριο. Να σημειωθεί ότι ο συντελεστής απόδοσης της ηλεκτρικής καμίνου έμεινε σταθερός. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να εισαχθεί μεγαλύτερη ποσότητα υλικού στα επόμενα στάδια. Συγκεκριμένα η νέα ποσότητα προϊόντος της ηλεκτρικής καμίνου είναι 81,23 tn έναντι 79,60 tn που προκύπτει στο βασικό σενάριο.

6.3 Καθαρότητα Οξυγόνου Εμφύσησης της Ηλεκτρικής Καμίνου

Στο βασικό σενάριο η καθαρότητα του οξυγόνου που εισάγεται στο σύστημα είναι 94% οξυγόνο και 6% άζωτο. Θα θεωρηθεί η περίπτωση όπου το οξυγόνο έχει καθαρότητα 99%. Η

ποσότητα, η οποία πρέπει να εισαχθεί στο σύστημα είναι 36 m^3/tn μετάλλου, έναντι 55 m^3/tn μετάλλου. Είναι κατανοητό ότι η διαφορά της ποσότητας που πρέπει να εισαχθεί στο σύστημα είναι μεγάλη, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπ' όψιν η ποσότητα του μετάλλου η οποία εξέρχεται από το σύστημα. Σημειώνεται ότι η ποσότητα του οξυγόνου που εμφυσάται στο βασικό σενάριο είναι 6,20 tn (4378,18 m^3), ενώ η ποσότητα που εμφυσάται στο παρόν σενάριο είναι 4,09 tn (2865,72 m^3).

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκε προσομοίωση παραγωγικής διαδικασίας χάλυβα. Ως πρότυπο για την κατασκευή της προσομοίωσης λήφθηκε η παραγωγική διαδικασία του χαλυβουργείου της ΣΙΔΕΝΟΡ. Η βάση των υπολογισμού της προσομοίωσης ήταν η εξαγωγή τελικού προϊόντος χάλυβα 80 tn. Με βάση την παραπάνω ποσότητα υπολογίστηκαν οι ποσότητες των ρευμάτων που εισάγονται στις επιμέρους μονάδες. Η ποσότητα των ρευμάτων εξόδου της κάθε μονάδας είναι:

1. Ηλεκτρική κάμινος τόξου
    - Η ποσότητα των απαερίων που προέκυψε είναι 4189,94 m^3
    - Η ποσότητα της σκόνης που προέκυψε είναι 2,04 tn
    - Η ποσότητα της σκωρίας που προέκυψε είναι 12,71 tn
    - Η ποσότητα του μετάλλου που προέκυψε είναι 79,60 tn
2. Μεταλλουργία κάδου
    - Η ποσότητα των απαερίων που προέκυψε είναι 1501,43 m^3
    - Η ποσότητα της σκωρίας που προέκυψε είναι 0,81 tn
    - Η ποσότητα του μετάλλου που προέκυψε είναι 80,01 tn
3. Χύτευση
    - Η ποσότητα της σκωρίας που προέκυψε είναι 0,04 tn
    - Η ποσότητα του τελικού προϊόντος που προέκυψε είναι 80,01 tn

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν ένας αριθμός σεναρίων κατά τον οποίο αναλύθηκαν ορισμένες παράμετροι αβεβαιότητας της διαδικασίας.

- Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει το χώμα που περιέχεται στο scrap. Η τιμή αυτή προφανώς δεν είναι σταθερή λόγω της φύσης του υλικού αλλά και της φύσης της τροφοδοσίας του scrap στην ηλεκτρική κάμινο. Με τη διεξαγωγή υπολογισμών για διαφορετικές ποσότητες χώματος βρέθηκε ότι η παραγωγική διαδικασία επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό. Συγκεκριμένα, με την εισαγωγή μεγάλης ποσότητας χώματος, απαιτείται η τροφοδοσία μεγάλης ποσότητας scrap, σε σχέση με την εισαγωγή scrap με μικρή περιεκτικότητα σε χώμα. Επίσης, ο συντελεστής απόδοσης της ηλεκτρικής καμίνου μειώνεται όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε χώμα. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η προσπάθεια ελάττωσης της εισαγωγής χώματος στο scrap έχει ευεργετικά αποτελέσματα στην παραγωγική διαδικασία.
- Στη συνέχεια μελετήθηκε η περίπτωση της παραμέτρου απωλειών υλικού στη χύτευση. Η απώλεια ανέρχεται σε 2% της ποσότητας του προϊόντος της παραγωγικής διαδικασίας. Μέσω της υλοποίησης υπολογισμών βρέθηκε ότι ο συντελεστής απόδοσης της ηλεκτρικής καμίνου παραμένει σταθερός, ενώ η ποσότητα του εισαγόμενου scrap αυξάνεται από 88,93 tn σε 90,74 tn και η ποσότητα του προϊόντος της ηλεκτρικής

καμίνου αυξάνεται από 79,60 tn σε 81,23 tn . Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι η απώλεια υλικού επηρεάζει αρνητικά την παραγωγική διαδικασία, όχι όμως σε μεγάλο βαθμό.

- Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση στην καθαρότητα του οξυγόνου. Κατά τη διεξαγωγή της βασικής προσομοίωσης θεωρήθηκε ότι η χημική σύσταση του οξυγόνου είναι 94% σε οξυγόνο και 6% σε άζωτο. Κατά την ανάλυση ευαισθησίας θεωρήθηκε ότι η σύσταση του οξυγόνου είναι 99% σε οξυγόνο και 1% σε άζωτο. Μέσω των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ότι η απαιτούμενη ποσότητα του οξυγόνου για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων είναι 36 m^3/tn μετάλλου, έναντι 55 m^3/tn. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η καθαρότητα του οξυγόνου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την οικονομικότητα της παραγωγικής διαδικασίας. Άρα, θα ήταν συμφέρουσα η τροφοδοσία οξυγόνου πολύ υψηλής καθαρότητας.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στην προσομοίωση της παραπάνω παραγωγικής διαδικασίας αποτελούν τη μελέτη του ισοζυγίου ενέργειας της διεργασίας και τη μελέτη των μονάδων εφαρμόζοντας μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Κατά την περίπτωση της μελέτης του ισοζυγίου ενέργειας της διεργασίας είναι δυνατός ο εντοπισμός των κοστοβόρων ρευμάτων και μέσω της παραπάνω διαδικασίας να γίνει μια προσπάθεια εύρεσης εναλλακτικών μεθόδων εισαγωγής ενέργειας στο σύστημα, μικρότερου κόστους.

Μέσω της υπολογιστικής ρευστομηχανικής είναι δυνατή η δυναμική προσομοίωση της διαδικασίας . Με τη συγκεκριμένη μέθοδο μπορεί να γίνει μελέτη των διαφορετικών σταδίων των μονάδων. Επομένως, είναι δυνατή η δημιουργία προσομοίωσης μεγαλύτερης ακρίβειας σε σχέση με την προσομοίωση η οποία κατασκευάστηκε κατά την παρούσα εργασία. Τέλος, μέσω της παραπάνω μεθόδου είναι δυνατή η προσέγγιση πολύπλοκων διαδικασιών εντός των μονάδων χωρίς να απαιτείται μελέτη σε πιλοτική κλίμακα και άρα είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σε μικρό χρόνο και με μικρό κόστος.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Adolf, Z, και L. Socha. 2016. *Secondary Metallurgy Lecture Notes.* Ostrava.

Alexis, J, P Jonsson, και L. Jonsson. 2007. «Heating and Electromagnetic Stirring in a Ladle Furnace - A Simulation Model.» *J - Stage* 40 (8): 1286.

Aula, M, J Haapakangas, A Heikkila, και V. Visuri. 2012. «Some Environmental Aspects of BF, EAF and BOF.» Technical Report.

Bekker, J, I Craig, και P. Pistorius. 2000. «Model Predictive Control of an Electric Arc Furnace Off-Gas Process.»

Chakrabarti, A. 2012. *Steel Making.* New Delhi: Asoke K. Ghosh.

Colpaert, H. 2008. *Metallography of Steels Interpretation of Structure and the Effects of Processing.* Editora Blucher.

CoWorker. 2013. *Coworker.* Πρόσβαση 9 2, 2018. http://www.anthonydpmann.com/post.html#dF9hcmMgZnVybmFjZSBlbGVjdHJvZGVz.

de Brito, J, και N. Saikia. 2013. *Recycled Aggregate in Concrete.*

Fabron, Airtech Engineers. χ.χ. *Fabron Airtech Engineers.* Πρόσβαση 9 5, 2018. https://www.indiamart.com/fabronairtech-engineers/steel-plant-components.html.

Fruehan, R. 1998. *The Making Shaping and Treating of Steel.* Pittsburgh: AISE Steel Foundation.

χ.χ. *Hitech Industrial Solution Leader.* Πρόσβαση 8 25, 2018. http://www.hitech-material.com/monolithic-materials/dry-ramming-mass-for-EAF-bottom.html.

Ikeda, T, και T. Matsuo. 1982. «The Dephosphorization of Hot Metal Outside the Steelmaking Furnace.» *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan* 22.

Irving, W. 1993. *Continuous Casting of Steel.* London: The Institute of Materials.

Jones, R, Q Reynolds, και T. Curr. 2011. «Some Myths About DC Arc Furnaces.» Πρόσβαση 9 30, 2018. http://www.mintek.co.za/Pyromet/Files/2011Jones1.pdf.

Kim, S, και R. Fruehan. 1987. *Met. Trans. B.*

Kirschen, M, V Velikorodov, H Pfeifer, R Kuhn, S Lenz, J Loh, και K. Schafers. 2005. «Off-Gas Measurements at the EAF Primary Dedusting System.» Birmingham.

Kirschen, M, V Velikorodov, και H. Pfeifer. 2006. «Mathematical Modelling of Heat Transfer in Dedusting Plants and Comparison to Off-Gas Measurements at Electric Arc Furnaces.»

Labiscsak, L, G Straffelini, C Corbetta, και M. Bodino. 2011. «Fluid Dynamics of a Post-Combustion Chamber in Electric Arc Steelmaking Plants.» *WIT Transactions on Modelling and Simulation.*

Madias, J. 2014. «Electric Furnace Steelmaking.» 12. Πρόσβαση 10 3, 2018. https://www.researchgate.net/publication/261710722_Electric_Arc_Furnace.

Minerals, Specialty. 2009. *Minerals Technologies.* Πρόσβαση 8 20, 2018. https://www.mineralstech.com/Documents/MTI/SDS%20Technical%20Data%20Sheets/Adams/Adams%20Quicklime%20Products/Quicklime-Chemical%20Grade%20(Adams%2C%20MA).pdf.

Odenthal, H, A Kemminger, F Krause, L. Sankowski, N Uebber, και N. Vogl. 2017. «Review on Modeling and Simulation of the Electric Arc Furnace.» *Steel Research International*, 28 11.

χ.χ. *Ossola Industrials.* Πρόσβαση 8 25, 2018. http://ossolaindustrials.com/steel-industry/electric-arc-furnace/eaf-gunning-mixes/.

Outotec. 2016. *HSC Chemistry User's Guide.* Pori.

Pretorius, E. χ.χ. *EAF Fundamentals.*

Schmitt, R, και J. Goodwill. 1997. *Electric Arc Furnace Scrap Preheating.* ERPI Center for Materials Production.

SDMET. 2018. *Shanye.* Πρόσβαση 9 20, 2018. http://www.sdmet.com/products/SteelMaking/.

χ.χ. *The McKeown Group.* Πρόσβαση 8 25, 2018. http://www.mckeowninternational.com/New/images/Magnesia_CarbonBig.jpg.

Toulouevski, Y, και I. Zinurov. 2013. *Innovation in Electric Arc Furnaces: Scientific Basis for Selection.* New York.

Turkdogan, E. 1996. *Fundamentals of Steelmaking.* London: The Institute of Materials.

Ζευγώλης, Ε. 2014. *Μεταλλουργία Σιδήρου - Θεωρία και Τεχνολογία.* Αθήνα: Εκδοτικός Οίκος Ίων.

Θεσσαλίας, ΕΔΑ Θεσσαλονίκης. χ.χ. *Σύσταση Φυσικού Αερίου.* Πρόσβαση 6 21, 2018. https://www.edathess.gr/genika-sxhmatismos-fa-metafora/systash-fysikoy-aeriou/.

Νέου - Συγκούνα, Π. χ.χ. *Εξαγωγική Μεταλλουργία - Πυρομεταλλουργικές και Υδρομεταλλουργικές Διεργασίες.* Αθήνα: Εκδόσεις Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Παπαδημητρίου, Γ. 1993. *Γενική Μεταλλογνωσία ΙΙ, τα Κράματα.* Αθήνα: Εκδόσεις Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

χ.χ. *ΣΙΔΕΝΟΡ.* Πρόσβαση 7 2018. http://sidenor.gr.

Τσετσέκου, Α. 2007. *Σημειώσεις Μαθήματος Πυρίμαχα.* Αθήνα: Εκδόσεις Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.