

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διδακτορική Διατριβή

**ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΡΥΠΑΝΣΗΣ – ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ – ΕΠΕΚΤΑΣΗ
ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΝΤΗΡΗΣΕΩΝ**

ΤΟΥ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΙΔΗ ΙΩΑΝΝΗ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού Α.Π.Θ.

Επιβλέπων

Τουρλιδάκης Αντώνιος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Τουρλιδάκης Αντώνιος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Τομπουλίδης Ανάνιας, Καθηγητής Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου

Λεφάκης Χαράλαμπος, Αν. Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

ΚΟΖΑΝΗ, 2017

Διδακτορική Διατριβή

**ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΡΥΠΑΝΣΗΣ – ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ – ΕΠΕΚΤΑΣΗ
ΧΡΟΝΟΥ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΝΤΗΡΗΣΕΩΝ**

ΤΟΥ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΙΔΗ ΙΩΑΝΝΗ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού Α.Π.Θ.

Επιβλέπων

Τουρλιδάκης Αντώνιος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Τουρλιδάκης Αντώνιος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Τομπουλίδης Ανανίας, Καθηγητής Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου

Λεφάκης Χαράλαμπος, Αν. Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στη Μονάδα Νο IV του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού Καρδιάς της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού. Σκοπός είναι η διερεύνηση του μηχανισμού σχηματισμού επικαθίσεων στους Υπερθερμαντές, Αναθερμαντές και στα τοιχώματα των Λεβήτων και η αντιμετώπισή τους ώστε να επεκταθεί ο χρόνος λειτουργίας των Μονάδων.

Αυτό έγινε καταστρώνοντας και υλοποιώντας ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα μετρήσεων και αναλύσεων όλων των στοιχείων της Μονάδας Νο IV. Αποσπασματικά επαναλήφθηκαν μετρήσεις και σε άλλες Μονάδες του ΑΗΣ Καρδιάς καθώς και σε Μονάδες Ηλεκτροπαραγωγής με καύσιμο λιγνίτη άλλων Σταθμών με τα ίδια αποτελέσματα.

Τέλος, με τη βοήθεια του λογισμικού DNA δημιουργήσαμε ένα μοντέλο το οποίο αποτυπώνει την επίδραση του φαινομένου των επικαθίσεων.

Επιβλέπων

- Τουρλιδάκης Αντώνιος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

- Τουρλιδάκης Αντώνιος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας
- Τομπουλίδης Ανανίας, Καθηγητής Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου
- Λεφάκης Χαράλαμπος, Αν. Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

- Τουρλιδάκης Αντώνιος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας
- Τομπουλίδης Ανανίας, Καθηγητής Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου
- Λεφάκης Χαράλαμπος, πρώην Αν. Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας
- Μαρνέλλος Γεώργιος, Αν. Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας
- Κωνσταντινίδης Ευστάθιος, Αν. Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας
- Γιαγκόπουλος Δημήτριος, Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας
- Γραμμέλης Παναγιώτης, Ερευνητής ΕΚΕΤΑ / ΙΔΕΠ

Περίληψη

Σημαντικό μέρος των απαιτήσεων ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα καλύπτεται από λιγνιτικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Ο ελληνικός λιγνίτης χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και τέφρα και χαμηλή θερμογόνο δύναμη. Η ανάπτυξη επικαθίσεων είναι σύνηθες φαινόμενο στο εσωτερικό των λεβήτων και έχουν σημαντική επίδραση στη λειτουργία των σταθμών παραγωγής ενέργειας (μειωμένη απόδοση, απώλειες ατμού από τους αυλούς του υπέρθερμου και των υδροτοιχωμάτων με συνέπεια τη διαφυγή των καυσαερίων με υψηλότερη θερμοκρασία γεγονός που οδηγεί στη δυσλειτουργία των ηλεκτροστατικών φίλτρων). Επιπλέον, η εκτεταμένη ρύπανση των λεβήτων προκαλεί συχνότερες κρατήσεις των μονάδων για καθαρισμό και οδηγεί σε μειωμένη παραγωγή και αυξημένο κόστος συντήρησης.

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από μια σειρά μετρήσεων σε έναν λέβητα ο οποίος εμφάνισε εκτεταμένη ρύπανση στο εσωτερικό του. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά σχεδιασμού του κατασκευαστή. Εντοπίστηκε ένα πλήθος διαφορών μεταξύ των μετρήσεων και των σχεδιαστικών δεδομένων που οφείλονται στις ιδιαιτερότητες της εκτεταμένης εμφάνισης επικαθίσεων. Επιπλέον, μελετήθηκε η χημική σύσταση και συμπεριφορά των επικαθίσεων που αναπτύσσονται στις μονάδες του ατμοηλεκτρικού σταθμού Καρδιά ενώ συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν και δείγματα τέφρας από την τεφρολεκάνη και δείγματα ιπτάμενης τέφρας. Το σύστημα ατμού της μονάδας προσομοιώθηκε με το λογισμικό DNA με σκοπό την μοντελοποίηση της επίδρασης των επικαθίσεων στα γενικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της μονάδας. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Επιπλέον, μια σειρά πρακτικών μείωσης των επιπέδων επιμόλυνσης των λεβήτων προτείνεται και αξιολογείται με σκοπό την αύξηση του χρόνου μεταξύ των κρατήσεων των μονάδων για συντήρηση.

Στους γονείς μου Γιώργο και Αντιγόνη

Abstract

A significant proportion of the electrical power requirements of Greece are covered by lignite-fired power plants. Greek lignite is characterized by a high water and ash content and a low heating value. Slagging and fouling are common inside the power units and severely affect the performance of the power plants (reduced efficiency, steam leakage in the superheaters and water walls whereas the high temperature of the exhaust gases leads to the mal-functioning of the electrostatic filters). In addition excessive interior pollution cause the units to stop for cleaning resulting in a reduced production and increased maintenance costs.

In this dissertation the results from a measurement campaign in a steam boiler affected by excessive deposits are presented and compared against the manufacturer's operating data. A number of differences were found between the two sets of data and were attributed to the particulars of excessive amount of deposits in the boiler. In addition, the present study investigates the chemical composition and behavior of the slagging and fouling deposits that occur in units of the Kardias power plant as well as of a bottom ash and a fly ash sampled from the same unit. The steam path of the unit was simulated using the DNA software in order to model the effect of the contamination on the global performance parameters of the power plant and the results were compared against the experienced operational performance parameters. In addition, a number of practices are proposed and assessed for reducing the levels of boiler contamination and extending the time between successive maintenance stoppages.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	i
Abstract.....	iii
ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1. ANTI ΠΡΟΛΟΓΟΥ	1
2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΛΙΓΝΙΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ.3	
2.1. Κοιτασματολογία του λιγνίτη.....	5
2.2. Αποθέματα – Ποιότητα λιγνίτη	6
2.3. Λεκανοπέδιο Πτολεμαΐδας/Αμύνταιου	7
2.4. Προσφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	9
2.5. Ζήτηση 13	
2.6. Ηλεκτροπαραγωγή	16
3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	20
ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ.....	21
4. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	22
4.1. Μετάδοση θερμότητας Με Ακτινοβολία	22
4.1.1. Βασικές Έννοιες Μετάδοσης θερμότητας Με Ακτινοβολία	22
4.1.2. Ροή Ενέργειας Ακτινοβολίας	24
4.1.3. Στερεές Γωνίες	24
4.1.4. Ακτινοβολία Μέλανος Σώματος	25
4.1.5. Ένταση Ακτινοβολίας.....	27
4.1.6. Βασικά Μεγέθη Ακτινοβολίας	28
4.1.7. Εξίσωση Μεταφοράς Της Εντάσεως Της Ακτινοβολίας	31
4.2. Μετάδοση Θερμότητας Με Συναγωγή	33

4.3.	Μετάδοση Θερμότητας Με Αγωγή.....	35
5.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥ (ΛΕΒΗΤΑ).....	37
5.1.	Τα Μέρη ενός Ατμοπαραγωγού	37
5.2.	Θάλαμος Καύσης	38
5.2.1.	Φλογοθάλαμος με Κονιορτώδη Τέφρα.....	39
5.2.2.	Φλογοθάλαμος Με Τετηγμένη Τέφρα (Κυκλοτερής Φλογοθάλαμος Ή Ελίσσόμενη Φλόγα).....	41
5.2.3.	Φλογοθάλαμος με Υποπίεση και Υπερπίεση	42
5.3.	Τύμπανο (Ατμοϋδροθάλαμος)	43
5.4.	Προθερμαντήρες Τροφοδοτικού Νερού (Οικονομητήρες - ECO).....	44
5.5.	Αυλοί Κυκλοφορίας	45
5.6.	Υπερθερμαντές Και Αναθερμαντές	46
5.7.	Ελκυσμός Καυσαερίων.....	50
5.7.1.	Φυσικός Ελκυσμός.....	50
5.7.2.	Τεχνητός Ελκυσμός.....	51
5.8.	Προθερμαντήρες Αέρα Καύσης.....	52
5.8.1.	Τύποι Προθερμαντήρων Αέρα.....	53
5.8.2.	Θερμοκρασία Καυσαερίων Στην Έξοδο Των Προθερμαντήρων	56
5.9.	Τα Κυκλώματα Του Λέβητα.....	57
5.9.1.	Το Κύκλωμα Αέρα Καύσης - Καυσαερίων.	57
5.9.2.	Το Κύκλωμα Νερού - Ατμού.	58
5.9.3.	Το Κύκλωμα Καυσίμου.	59
6.	Ο ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΣ ΩΣ ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	61
6.1.	Η μετάδοση της θερμότητας στους αυλούς νερού και ατμού	61
6.2.	Ανύψωση της θερμοκρασίας του μετάλλου της θερμαινόμενης επιφάνειας	62
6.3.	Διάταξη θερμαινόμενης επιφάνειας του λέβητα.....	64
6.4.	Απώλειες στον ατμοπαραγωγό	67

7. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΦΡΑΣ	69
7.1. Σύσταση της Τέφρας	70
7.1.1. Χημική Ανάλυση	71
7.1.2. Ορυκτολογικές Αναλύσεις	72
7.2. Χημικές αντιδράσεις κατά την καύση.....	75
7.3. Σίδηρος στην τέφρα	76
7.4. Μέτρηση θερμοκρασίας τήξης τέφρας.....	77
7.4.1. Τυποποιημένη Μέθοδος ASTM.....	77
7.4.2. Βρετανική τυποποιημένη μέθοδος	79
7.4.3. Γερμανική τυποποιημένη μέθοδος	80
7.4.4. Λοιπές μέθοδοι.....	80
7.4.5. Συσχετίσεις θερμοκρασίας τήξης	81
7.5. Σχέση μεταξύ χημικής και ορυκτολογικής σύστασης	81
7.6. Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας μαλάκυνσης και απομάκρυνσης επικάθισης..	83
7.7. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμοκρασιών I.T. και F.T.	83
7.8. Ιξώδες	84
7.9. Δείκτες επιμόλυνσης.....	87
7.9.1. Αναλογία Βάσεων/Οξινών (Base/AcidRatio)	87
7.9.2. Αναλογία Πυριτίου/Αλουμίνας (Silica/AluminaRatio).....	88
7.9.3. Αναλογία Σιδήρου/Ασβεστίου (Iron/Calcium Ratio)	90
7.9.4. Αναλογία Σιδήρου/Δολομίτη (Iron/DolomiteRatio).....	91
7.9.5. Ποσοστό Δολομίτη DP (Dolomite Percentage).....	92
7.9.6. Ισοδύναμο Fe ₂ O ₃ και ποσοστό Σιδηρούχων FP (Equivalent Percentage & Ferric Percentage).....	92
7.9.7. Ποσοστό Πυριτίου (Silica Percentage)	93
7.9.8. Συνολικά Αλκάλια (Na ₂ O + K ₂ O)	93
7.9.9. Άλλοι δείκτες	94
7.10. Ιδιότητες των συστατικών της τέφρας.....	95
7.11. Μορφές αλκαλίων στους άνθρακες	96

7.12. Επιλεκτική εναπόθεση συστατικών της τέφρας.....	98
7.13. Κατανομή της ανόργανης ύλης στον άνθρακα	99
7.14. Ανάλυση του άνθρακα συναρτήσει του μεγέθους των σωματιδίων	102
7.14.1. Διαδικασία βαρυτικού διαχωρισμού	102
7.14.2. Επίδραση της περιεκτικότητας σε σίδηρο στον σχηματισμό σκωρίας	103
8. ΕΠΙΚΑΘΙΣΕΙΣ	107
8.1. Τύποι επικαθίσεων	107
8.2. Μηχανισμός σχηματισμού επικαθίσεων και επιπτώσεις	109
8.2.1. Εστία	109
8.2.2. Υπερθερμαντές και αναθερμαντές ακτινοβολίας	111
8.2.3. Επιφάνειες συναγωγής θερμότητας	113
8.3. Θερμικές ιδιότητες ακτινοβολίας προϊόντων καύσης	117
8.4. Θερμικές ιδιότητες ακτινοβολίας των επικαθίσεων τέφρας	118
8.5. Θερμικές ιδιότητες ακτινοβολίας για τηγμένο στρώμα επικαθίσεων (Slagged Layer)	119
8.6. Θερμικές ιδιότητες ακτινοβολίας για μη τηγμένο στρώμα επικαθίσεων (Sintered Layer).....	121
8.7. Αγωγιμότητα επικαθίσεων τέφρας	121
8.7.1. Επίδραση διαφόρων παραμέτρων στον συντελεστή αγωγιμότητας των επικαθίσεων τέφρας.....	122
8.7.2. Εκτίμηση του συντελεστού θερμικής αγωγιμότητας	123
8.7.3. Εκτίμηση του συντελεστού θερμικής αγωγιμότητας χρησιμοποιώντας μοντέλα ανεξάρτητα του πορώδους	126
8.7.3.1. Μοντέλο Εκτίμησης Αγωγιμότητας με Στρωματική Θεώρηση των Επικαθίσεων	127
8.7.3.2. Μοντέλο Εκτίμησης Αγωγιμότητας μέσω εκτίμησης του πορώδους από την κατανομή των σωματιδίων που αποτελούν τις επικαθίσεις.	129
9. ΔΙΑΒΡΩΣΗ	132
9.1. Χημική διάβρωση	132

9.1.1.	Χημική διάβρωση υδροτοιχωμάτων	137
9.1.2.	Χημική διάβρωση αναθέρμου και υπέρθερμου	139
9.1.3.	Ο ρόλος του χλωρίου στη χημική διάβρωση.....	143
9.1.4.	Πρόβλεψη χημικής διάβρωσης του άνθρακα	145
9.1.5.	Λύσεις στο πρόβλημα της χημικής διάβρωσης.....	146
9.2.	Μηχανική διάβρωση.....	148
10.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	152
	ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	155
11.	ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΟΝΑΔΑΣ IV ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ	
	ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ.....	156
11.1.	Παρουσίαση αποτελεσμάτων μετρήσεων	159
11.1.1.	Αποτελέσματα Μελέτης Συστήματος Μύλων.....	161
11.1.2.	Χαρακτηριστικά Τροφοδοτών Λιγνίτη.....	167
11.1.3.	Παροχή Μύλων.....	169
11.1.4.	Θερμοκρασία αερίων στην έξοδο των μύλων.....	172
11.1.5.	Ροή αερίων διαμέσου των μύλων.....	173
11.1.6.	Συγκέντρωση κονιορτοποιημένου λιγνίτη στη ροή των αερίων.....	174
11.1.7.	Κατανομή κονιορτοποιημένου λιγνίτη και αέρα στο στόμιο των καυστήρων	175
11.1.8.	Ταχύτητες κονιορτοποιημένου λιγνίτη και μίγματος αέρα	176
11.2.	Εξέταση Μύλων	179
11.2.1.	Στεγανότητα Συστήματος Μύλων	179
11.2.2.	Χαρακτηριστικά ακατέργαστου και κονιορτοποιημένου λιγνίτη	179
11.2.3.	Ανάλυση Ακατέργαστου Λιγνίτη	179
11.2.4.	Ανάλυση κονιορτοποιημένου λιγνίτη	181
11.2.5.	Δείκτης Hardgrove	186
11.3.	Αποτελέσματα θερμικών ελέγχων σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας .	189
11.3.1.	Αποτελέσματα ισοζυγίου θερμότητας και αέρα του λέβητα συνοδευμένα με ελέγχους της κατάστασης του λέβητα και των υπόλοιπων μύλων	189

11.3.2.	Χαρακτηριστικά λιγνίτη και στερεών προϊόντων κατά τη διενέργεια των θερμικών ελέγχων στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας.....	191
11.3.3.	Αποτελέσματα Θερμικών Ελέγχων και Προσδιορισμός Συνθηκών Λειτουργίας του Λέβητα	194
11.3.4.	Ισοζύγιο αέρα και Θερμότητας	196
11.3.5.	Θερμικοί έλεγχοι συνθηκών λειτουργίας του θαλάμου καύσης και των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας.....	203
11.3.6.	Έλεγχος λειτουργίας μύλων στα πλαίσια των ελέγχων στην κατάσταση λειτουργίας 1	214
11.3.7.	Πτώση πίεσης κατά μήκος της ροής των καυσαερίων.....	219
11.3.8.	Εκτίμηση δυναμικού επιμόλυνσης καιόμενου λιγνίτη	221
11.3.8.1.	Εκτίμηση δυναμικού επιμόλυνσης λιγνίτη σχεδιασμού και πραγματικού	
	222	
11.3.9.	Εκτίμηση δυναμικού επιμόλυνσης λιγνίτη από το 1998 έως το 2004.....	224
11.3.10.	Οπτική Επιθεώρηση.....	226
11.4.	Πρόσκρουση λεβητολίθων στον πυθμένα του λέβητα.....	236
11.4.1.	Σύστημα καταγραφής πρόσκρουσης επικαθίσεων.....	237
11.4.2.	Αξιολόγηση δεδομένων.....	237
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο1 : Εργαστηριακές Αναλύσεις και πειραματικός εξοπλισμός		
	242
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο2 : Επιφάνειες Συναλλαγής Θερμότητας και Αγωγοί Ανακυκλοφορίας Θερμού Αέρα		252
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο3 : Θάλαμος Καύσης.....		282
12.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	290
ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ.....		293
13.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	294
14.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	295
14.1.	Περιγραφή του προγράμματος DNA	295

14.2. Υπολογιστική Μέθοδος.....	298
14.2.1. Μαθηματική διατύπωση της μεθόδου Newton-Raphson	298
14.2.2. Η τροποποιημένη μέθοδος Newton.....	300
14.3. Μοντελοποίηση θαλάμου καύσης	301
14.4. Περιγραφή Μοντέλου Θαλάμου Καύσης του DNA	306
14.5. Μοντελοποίηση υπέρθερμων	308
14.5.1. Περιγραφή Μοντέλου Υπέρθερμου του DNA	311
14.6. Σύνταξη Μοντέλου Ατμοπαραγωγού	313
14.6.1. Απλοποιήσεις και παραδοχές.....	314
14.6.2. Παρουσίαση μοντέλου ατμοπαραγωγού	317
14.7. Συλλογή δεδομένων	320
14.7.1. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης σε Συνθήκες Ρύπανσης	321
14.7.1.1. Εκτίμηση συντελεστή ρύπανσης Rfoul	321
14.8. Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	327
14.8.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης σε συνθήκες ρύπανσης για κάθε εναλλάκτη	327
14.8.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης σε συνθήκες ρύπανσης για τον ατμοπαραγωγό	332
15. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	364
ΜΕΡΟΣ ΠΕΜΠΤΟ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	368
16. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	369
16.1. Συμπεράσματα σχετικά με το υπό μελέτη φαινόμενο	369
17. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	372
18. ΔΡΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ.....	375

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Αιτία για την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής στάθηκαν τα πολλά και μεγάλα προβλήματα που αντιμετώπισα τα είκοσι και πλέον χρόνια που υπηρετώ την θητεία μου σε σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη θέση του προϊστάμενου λειτουργίας.

Κάθε φορά που σταματούσε η μονάδα για διαρροή ή άλλη αιτία, ο οπτικός έλεγχος που γίνονταν στο εσωτερικό του λέβητα και στους υπερθερμαντές μας εξέπληττε η κατάσταση που επικρατούσε στους υπερθερμαντές και στα τοιχώματα του λέβητα. Η τέφρα υπό μορφή σκόνης και τεμαχίων σκέπαζε τα πάντα και σε κάποια σημεία του λέβητα σχημάτιζε λόφους (Εικόνα 1-1).



Εικόνα 1-1 : Σχηματισμός επικαθίσεων τέφρας στους υπερθερμαντές

Η οικονομική ζημία είναι πολύ μεγάλη. Υπάρχει μείωση του βαθμού απόδοσης του λέβητα (λόγω μη καλής μεταφοράς θερμότητας στον ατμό από τα καυσαέρια) και η έξοδος των καυσαερίων σε θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτές του σχεδιασμού του λέβητα, έχουν ως αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση των ηλεκτροστατικών φίλτρων. Το σημαντικότερο βέβαια είναι ότι θα πρέπει να σταματά τη λειτουργία της η μονάδα για έναν περίπου μήνα κάθε χρόνο για να γίνει καθαρισμός του λέβητα.

Αφορμή όμως, ήταν η γνωριμία και η συναναστροφή με τους καθηγητές και φοιτητές του τμήματος σήμερα Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Μου μετέδωσαν το μεράκι της γνώσης και την όρεξη να

υπερνικήσω τα πολλά εμπόδια και προβλήματα που είχα λόγω υποχρεώσεων στη δουλειά, την οικογένεια και στη κοινωνία και να γίνει πραγματικότητα αυτή η εργασία.

Για να υλοποιηθεί όμως αυτή η εργασία, με βοήθησαν πρώτοι από όλους οι διευθυντές μου κ.κ. Ν. Γιωτόπουλος και Θ. Παπαδέλης. Σημαντική και η βοήθεια των συνεργατών μου καθηγητών S.VDjekic και P.M.Radovanovic.

Καθοριστικό ρόλο έπαιξε η παρότρυνση και ενθάρρυνση των καθηγητών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, κ.κ. Α. Τομπουλίδη, Α. Τουρλιδάκη και Χ. Λεφάκη.

Όμως δεν θα ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί αυτή εργασία αν δεν συνεργάζονταν μαζί μου και δεν με βοηθούσαν σημαντικά, η γραμματέας του Τομέα Λειτουργίας Τουφεξή Μαρίνα στις μεταφράσεις και οι φοιτητές τότε βάζοντας τη φρέσκια γνώση τους και εγώ την εμπειρία μου και τώρα συνάδελφοι μου Α. Γκατζούλης, Π. Παπανικολάου, Κ. Βαφειάδης και Ν. Τσακωμάκας.

Τέλος σημαντική ήταν η βοήθεια των παιδιών μου Αντιγόνης, Ασπασίας και της συζύγου που υπέστησαν την ενασχόλησή μου με την εργασία.

2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΛΙΓΝΙΤΙΚΩΝ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ

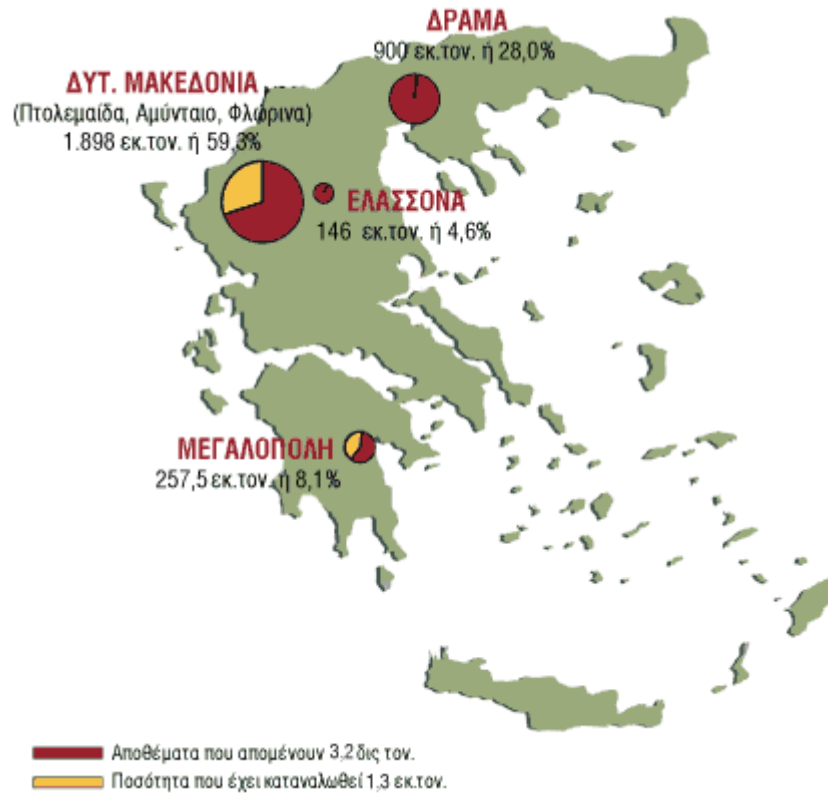
Η πρώτη σοβαρή προσπάθεια για την εκμετάλλευση λιγνιτικών κοιτασμάτων στη χώρα μας άρχισε στο Αλιβέρι (Εύβοια) το 1873. Δυστυχώς μια φοβερή πλημμύρα το 1897 κατέστρεψε όλες τις επιφανειακές και υπόγειες εγκαταστάσεις εξόρυξης. Η εκμετάλλευση ξανάρχισε μετά τον πρώτο Παγκόσμιο πόλεμο. Το 1922 η ετήσια παραγωγή έφθασε τους 23000 τόνους και διατηρήθηκε μέχρι το 1927. Το επόμενο έτος η εκμετάλλευση σταμάτησε για οικονομικούς λόγους.

Μετά το δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο η ανάγκη εξηλεκτισμού της χώρας οδήγησε στην απόφαση κατασκευής ατμοηλεκτρικού σταθμού στο Αλιβέρι, που θα λειτουργούσε αποκλειστικά με λιγνίτη.

Το 1951 ανέλαβε η ΔΕΗ την υπόγεια εκμετάλλευση των Ορυχείων στο Αλιβέρι, κατορθώνοντας να αυξήσει την παραγωγή σε 750 χιλιάδες τόνους το χρόνο και να τροφοδοτήσει μονάδες συνολικής ισχύος 230 MW. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 σταμάτησε η λειτουργία του λιγνιτωρυχείου Αλιβερίου.

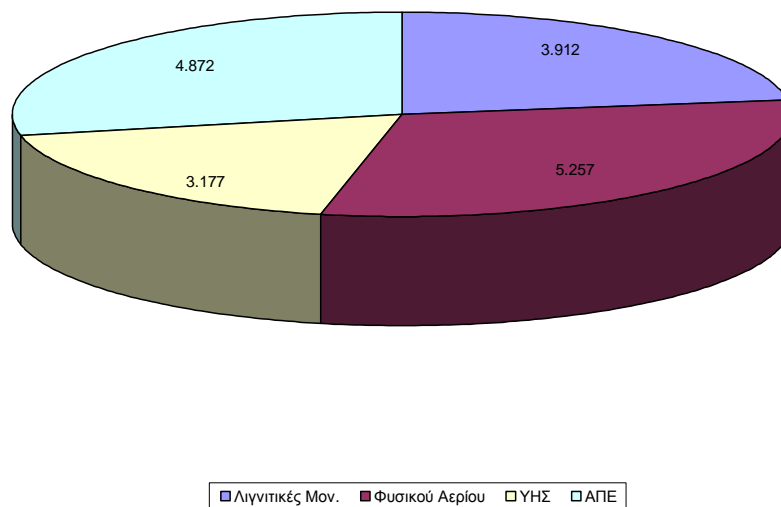
Οι πρώτες συστηματικές έρευνες για την εντόπιση και αξιολόγηση των λιγνιτών της ευρύτερης περιοχής Πτολεμαΐδας άρχισαν μετά το 1938. Το 1955 συστάθηκε η εταιρία ΛΙΠΤΟΛ που είχε ως αντικείμενο την εκμετάλλευση του λιγνίτη και τη χρησιμοποίησή του για την παραγωγή μπρικετών, αζωτούχων λιπασμάτων, ημικώκ και ηλεκτρικής ενέργειας. Το 1959 το 90% των μετοχών της ΛΙΠΤΟΛ περιήλθαν στη ΔΕΗ. Το 1975 συγχωνεύθηκε η ΛΙΠΤΟΛ στη ΔΕΗ. Η παραγωγή λιγνίτη που ήταν το 1959 1.3 εκ. τόνους, αυξήθηκε το 1975 σε 11.7 εκ. τόνους, το 1985 σε 27.3 εκ. τόνους και το 2006 σε 49 εκ. τόνους (συμπεριλαμβανομένου και του ορυχείου στη Φλώρινα).

Το λιγνιτικό κοίτασμα Μεγαλόπολης μελετήθηκε επιστημονικά για πρώτη φορά το 1957 και τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά. Το 1969 άρχισε από τη ΔΕΗ η εκμετάλλευση του λιγνίτη. Το γεγονός αυτό ήταν μία ιδιαίτερη περίπτωση σε παγκόσμιο επίπεδο, επειδή για πρώτη φορά τόσο φτωχός λιγνίτης εξορύσσεται και χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το λιγνιτωρυχείο Μεγαλόπολης ξεκίνησε με μία ετήσια παραγωγή 1 εκ. τόνους και έφθασε το 2006 τους 13.5 εκ. τόνους.



Εικόνα 2-1 : Χάρτης ελληνικών λιγνιτικών κοιτασμάτων(ΙΓΜΕ)

Εγκατεστημένη ισχύς (MW) Σταθμών στο διασυνδεδεμένο δίκτυο



Εικόνα 2-2 : Εγκατεστημένη ισχύς (MW) σταθμών στο διασυνδεδεμένο σύστημα (ΛΑΓΗΕ ΔΕΚ 2016)

Η χρήση του λιγνίτη, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αποφέρει στην Ελλάδα τεράστια εξοικονόμηση συναλλάγματος (περίπου 1 δις. δολάρια ετησίως). Ο λιγνίτης είναι καύσιμο στρατηγικής σημασίας για τη ΔΕΗ, γιατί έχει χαμηλό κόστος εξόρυξης, σταθερή και άμεσα ελέγξιμη τιμή και παρέχει σταθερότητα και ασφάλεια στον ανεφοδιασμό καυσίμου. Συγχρόνως, προσφέρει χιλιάδες θέσεις εργασίας στην ελληνική περιφέρεια, ιδιαίτερα σε περιοχές που εμφανίζουν μεγάλα ποσοστά ανεργίας. Ο λιγνίτης έχει συντελέσει τα μέγιστα στην αύξηση του εθνικού προϊόντος.

2.1. Κοιτασματολογία του λιγνίτη

Οι λιγνίτες ανήκουν στις στερεές ορυκτές καύσιμες ύλες με τη γενική ονομασία γαιάνθρακες και προήλθαν από φυτικά υπολείμματα μέσω μιας σειράς διεργασιών ενανθράκωσης. Οι διεργασίες αυτές είχαν ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό των φυτικών υπολειμμάτων σε άνθρακα. Η μετατροπή των φυτών σε τύρφη και η μετάβαση από την τύρφη (αρχικό στάδιο ενανθράκωσης) στον ανθρακίτη (τελικό στάδιο ενανθράκωσης) είναι συνάρτηση της επίδρασης του χρόνου, της θερμοκρασίας και της πίεσης.

Η αύξηση του βαθμού ενανθράκωσης επηρεάζει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των γαιανθράκων. Οι λιγνίτες σχηματίστηκαν κατά τα πρώτα στάδια της ενανθράκωσης αμέσως μετά την τύρφη. Για το σχηματισμό ενός κυβικού μέτρου λιγνίτη, έχει υπολογισθεί ότι απαιτείται χρονικό διάστημα 1000 έως 4000 ετών.

Το θερμιδικό περιεχόμενο των λιγνιτών είναι από 3 έως 7 φορές μικρότερο από το θερμιδικό περιεχόμενο του λιθάνθρακα και 5 έως 10 φορές μικρότερο από αυτό του πετρελαίου. Κατάλληλες συνθήκες για το σχηματισμό λιγνιτών στον ελλαδικό χώρο συνέτρεξαν, κατά περιόδους και κατά περιοχές, από τις αρχές του Καινοζωικού αιώνα μέχρι τους πρόσφατους γεωλογικούς χρόνους.

Η κύρια φάση λιγνιτογένεσης συμπίπτει με την Νεοτριτογενή και Τεταρτογενή γεωλογική περίοδο. Τα σημαντικότερα κοιτάσματα λιγνίτη αναπτύχθηκαν σε αβαθείς λίμνες και έλη κλειστών ενδοηπειρωτικών λεκανών. Κύριο χαρακτηριστικό των κοιτασμάτων είναι ο έντονος τεκτονισμός.

Σήμερα η ΔΕΗ παράγει συνολικά περίπου 30 εκ. τόνους λιγνίτη σε ετήσια βάση. Η εντυπωσιακή ανάπτυξη των Λιγνιτωρυχείων της ΔΕΗ επιτρέπει στη χώρα μας να

κατέχει τη δεύτερη θέση στην παραγωγή λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση, την πέμπτη θέση στην Ευρώπη και την έκτη στον Κόσμο.

2.2. Αποθέματα – Ποιότητα λιγνίτη

Τα συνολικά βεβαιωμένα γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη στη χώρα ανέρχονται σε περίπου 5 δις. τόνους. Τα κοιτάσματα αυτά παρουσιάζουν αξιοσημείωτη γεωγραφική εξάπλωση στον ελληνικό χώρο.

Με τα σημερινά τεχνικοοικονομικά δεδομένα τα κοιτάσματα που είναι κατάλληλα για ενεργειακή εκμετάλλευση, ανέρχονται σε περίπου 3.2 δις τόνους και ισοδυναμούν με 450 εκ. τόνους πετρελαίου.

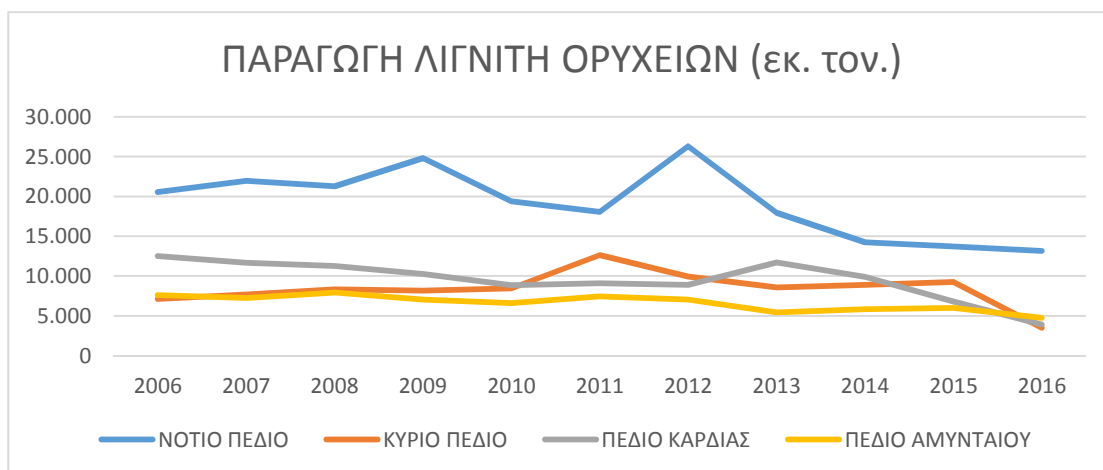
Τα κυριότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα λιγνίτη βρίσκονται στις περιοχές Πτολεμαΐδας, Αμυνταίου και Φλώρινας με υπολογισμένο απόθεμα 1.8 δις τόνους, στην περιοχή της Δράμας με απόθεμα 900 εκ. τόνους και στην περιοχή Ελασσόνας με 169 εκ. τόνους. Επίσης στην Πελοπόννησο, περιοχή Μεγαλόπολης, υπάρχει λιγνιτικό κοιτάσμα με απόθεμα περίπου 223 εκ. τόνους.

Με βάση τα συνολικά εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη της χώρας και τον προγραμματιζόμενο ρυθμό κατανάλωσης στο μέλλον, υπολογίζεται ότι τα αποθέματα αυτά επαρκούν για περισσότερο από 45 χρόνια. Μέχρι σήμερα οι εξορυχθείσες ποσότητες λιγνίτη φτάνουν περίπου στο 29% των συνολικών αποθεμάτων. Εκτός από λιγνίτη η Ελλάδα διαθέτει και ένα μεγάλο κοιτάσμα Τύρφης στην περιοχή των Φιλίππων (Ανατολική Μακεδονία). Τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα στο κοιτάσμα αυτό εκτιμώνται σε 4 δις κυβικά μέτρα και ισοδυναμούν περίπου με 125 εκατ. τόνους πετρελαίου.

Γενικά η ποιότητα των ελληνικών λιγνιτών είναι χαμηλή. Η θερμογόνο δύναμη κυμαίνεται από 975-1380 kcal/kg στις περιοχές Μεγαλόπολης, Αμυνταίου και Δράμας, από 1261-1615 kcal/kg στην περιοχή Πτολεμαΐδας και 1927-2257 στις περιοχές Φλώρινας και Ελασσόνας. Σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα των λιγνιτών της χώρας μας είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε καύσιμο θείο.

ΛΙΓΝΙΤΙΚΟ ΛΕΝΤΡΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ			
ΑΗΣ			ΟΡΥΧΕΙΑ
	ΜΟΝΑΔΕΣ	ΙΣΧΥΣ	
ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	5	1.595	ΝΟΤΙΟ ΠΕΔΙΟ
ΚΑΡΔΙΑ	4	1.212	ΚΥΡΙΟ ΠΕΔΙΟ
ΑΜΥΝΤΑΙΟ	2	600	ΠΕΔΙΟ ΚΑΡΔΙΑΣ
ΜΕΛΙΤΗ	1	330	ΠΕΔΙΟ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ: 3.737 MW			ΣΥΝ. ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ: 765 Mt

Εικόνα 2-3 : Μονάδες Παραγωγής και Ορυχεία ΔΥΤ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ.(ΔΕΗ ΑΕ 2017)



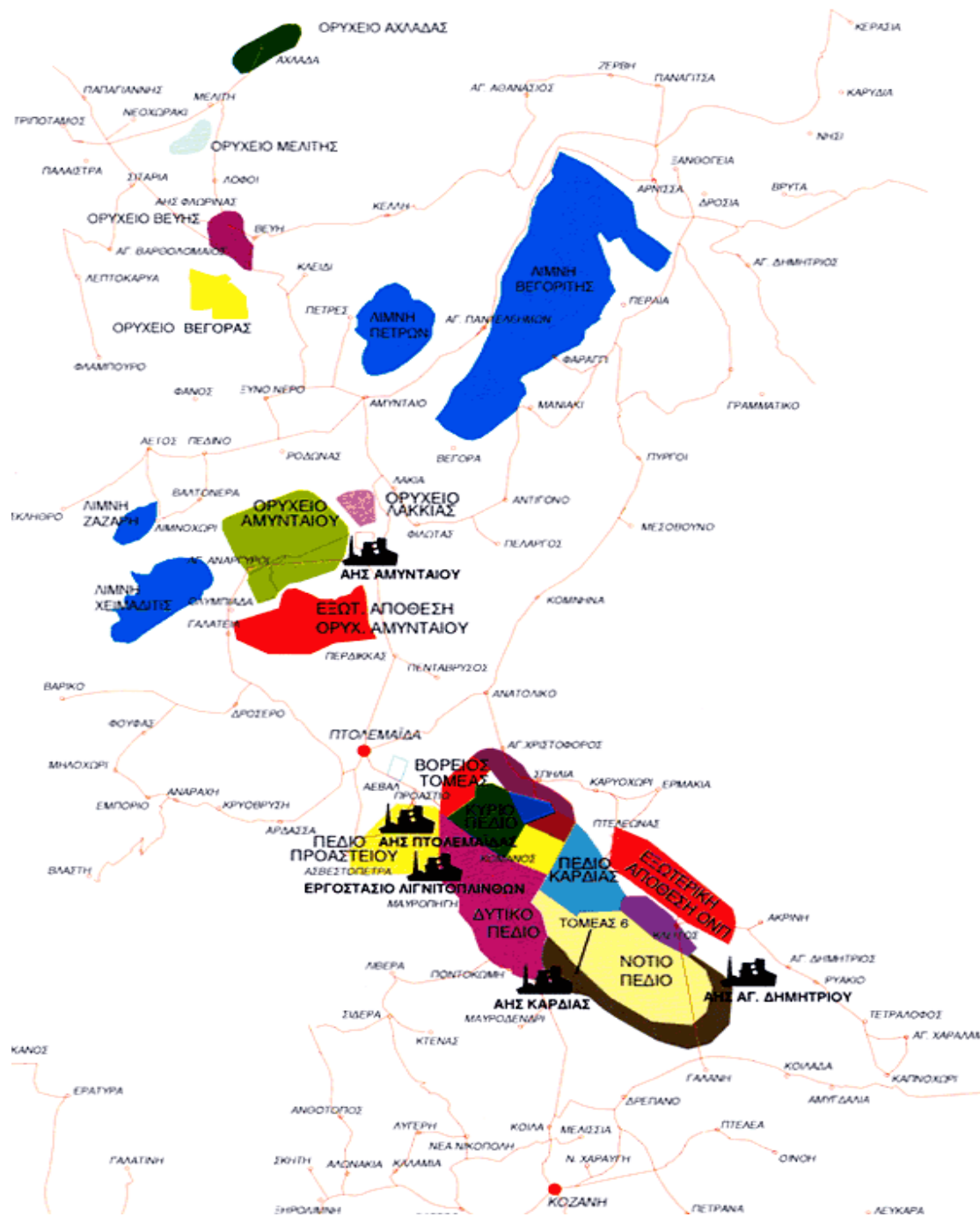
Εικόνα 2-4 : Παραγωγή λιγνίτη ανά Ορυχείο 2006-2016 (ΔΕΗ ΑΕ 2017)

ΟΡΥΧΕΙΟ	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
ΝΟΤΙΟ ΠΕΔΙΟ	20.560	21.975	21.275	24.834	19.366	18.076	26.320	17.930	14.245	13.697	13.151
ΚΥΡΙΟ ΠΕΔΙΟ	7.135	7.666	8.338	8.177	8.433	12.637	9.928	8.571	8.893	9.241	3.508
ΠΕΔΙΟ ΚΑΡΔΙΑΣ	12.523	11.650	11.256	10.262	8.846	9.097	8.880	11.697	9.873	6.803	3.911
ΠΕΔΙΟ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ	7.614	7.249	7.917	7.015	6.601	7.448	7.018	5.418	5.845	5.996	4.745

Εικόνα 2-5 : Ετήσια παραγωγή λιγνίτη 2006-2016 εκκατ τόνοι (ΓΔ ΟΡΥΧΕΙΩΝ)

2.3. Λεκανοπέδιο Πτολεμαΐδας/Αμύνταιου

Ο λιγνίτης Πτολεμαΐδας σχηματίστηκε κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης χρονικής περιόδου (10 εκατομμύρια χρόνια περίπου) και εκτιμάται ότι οι διεργασίες τελείωσαν πριν 1 εκατομμύριο χρόνια. Παρακάτω φαίνονται τα Ορυχεία και οι Σταθμοί Παραγωγής στον άξονα Κοζάνη-Πτολεμαΐδα-Αμύνταιο-Φλώρινα.



Εικόνα 2-6 : Σταθμοί-Ορυχεία Λεκανοπέδιου Αμυνταίου/Πτολεμαΐδας (ΓΔ Ορυχείων)

Η ευρύτερη λεκάνη Μοναστηρίου, Φλώρινας, Αμυνταίου, Πτολεμαΐδας, Κοζάνης και Σερβίων καλύπτονταν την εποχή εκείνη από αβαθείς λίμνες και έλη. Οι κλιματολογικές συνθήκες ευνόησαν τη μεγάλη βλάστηση, υδροχαρών φυτών (βρύα, καλάμια, κλπ) σε διάφορες θέσεις της λεκάνης. Με το χρόνο τα φυτά αυτά συγκεντρώθηκαν σε μεγάλες ποσότητες στον πυθμένα των λιμνών. Στη συνέχεια η βλάστηση καλύφθηκε από γαιώδη υλικά. Έτσι οι οργανικές ύλες των φυτών, ευρισκόμενες υπό πίεση και με την επίδραση διαφόρων μικροοργανισμών,

μετατράπηκαν με το χρόνο σε στρώματα λιγνίτη. Αυτό επαναλήφθηκε πολλές φορές και τέλος πάνω από τα νεώτερα στρώματα λιγνίτη επικάθισαν άλλα γαιώδη υλικά, τα λεγόμενα «υπερκείμενα». Έτσι προέκυψαν λιγνιτικά κοιτάσματα μορφής Zebra.

Το πάχος των υπερκειμένων υλικών κυμαίνεται από 12 μέχρι 230 μέτρα για τα Ορυχεία που βρίσκονται σε λειτουργία στην περιοχή Πτολεμαΐδας. Τα υλικά αυτά είναι, συνήθως άμμος, αμμοχάλικα, μαλακός ασβεστόλιθος και άργιλος. Αλλά και το κοιτάσμα του λιγνίτη δεν είναι ενιαίο διότι μέσα στο κοιτάσμα αυτό υπάρχουν λεπτά στρώματα από τα γαιώδη υλικά και τα οποία επειδή βρίσκονται μεταξύ των λιγνιτικών στρωμάτων, ονομάζονται «ενδιάμεσα». Το μέσο πάχος των απολήψιμων στρωμάτων λιγνίτη ανέρχεται σε 2 μέτρα περίπου, ο αριθμός των οποίων κυμαίνεται από 20 έως 30.

Οι ενεργειακές μονάδες που τροφοδοτούνται σήμερα με λιγνίτη από το Λιγνιτικό Κέντρο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου αναφέρονται παρακάτω:

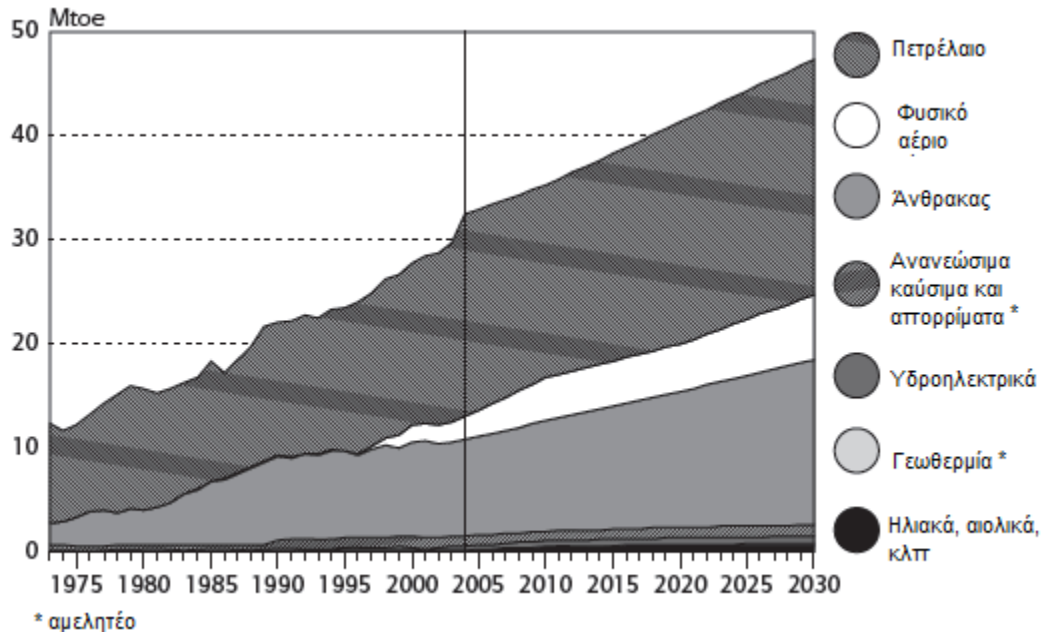
Εικόνα 2-7 : Τροφοδοσία λιγνιτικών μονάδων με λιγνίτη από το λεκανοπέδιο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου

ΣΤΑΘΜΟΣ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)
ΑΗΣ ΚΑΡΔΙΑΣ	1250
ΑΗΣ ΑΓ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ	1595
ΑΗΣ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ	600
ΑΗΣ ΜΕΛΙΤΗΣ-ΑΧΛΑΔΑΣ	330
ΣΥΝΟΛΟ	3775

2.4. Προσφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το 2004, η συνολική πρωτογενής παροχή ενέργειας (ΣΠΠΕ) έφθασε τους 33 Mtoe. Σημειώθηκε δηλαδή αύξηση της τάξεως του 48% σε σχέση με το επίπεδο των 22 Mtoe το 1990. Η (ΣΠΠΕ) έχει αυξηθεί κατά μέσο όρο 2,3% ανά έτος μεταξύ 1990 και 2003, αλλά αυξήθηκε κατά 9,5% μεταξύ 2003 και 2004. Η αύξηση της προβλέπεται από την ελληνική κυβέρνηση να κινηθεί κατά μέσο όρο στο 1,4% μεταξύ 2004 και

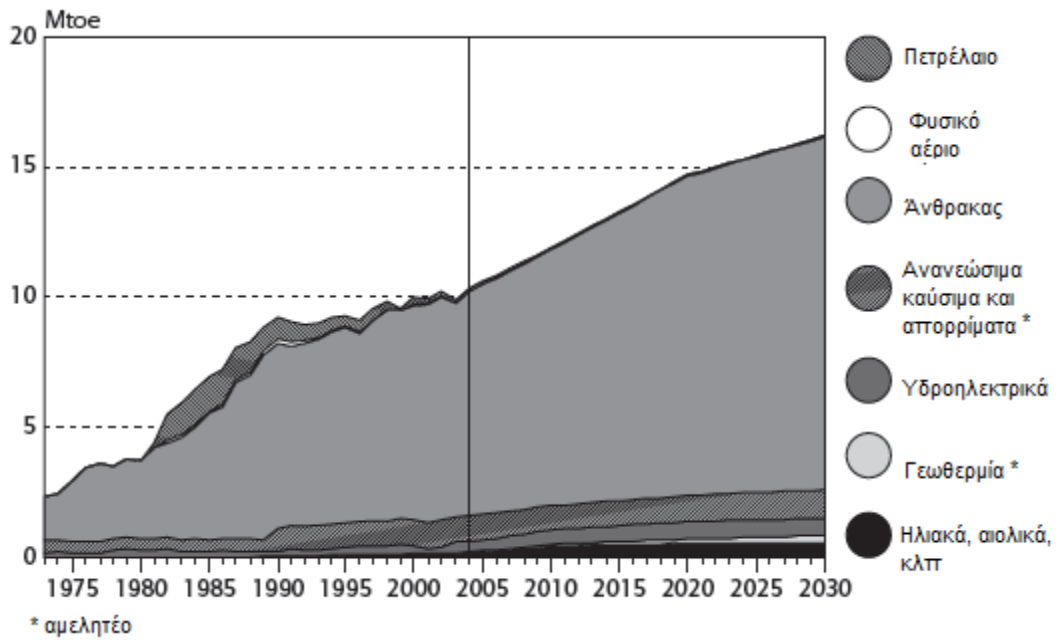
2010, κάτι που αντανακλά τις προσπάθειες που καταβάλλονται για να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα και να επιτευχθεί η υποκατάσταση καυσίμων με την περαιτέρω διεύδυση του φυσικού αερίου στην ελληνική οικονομία.



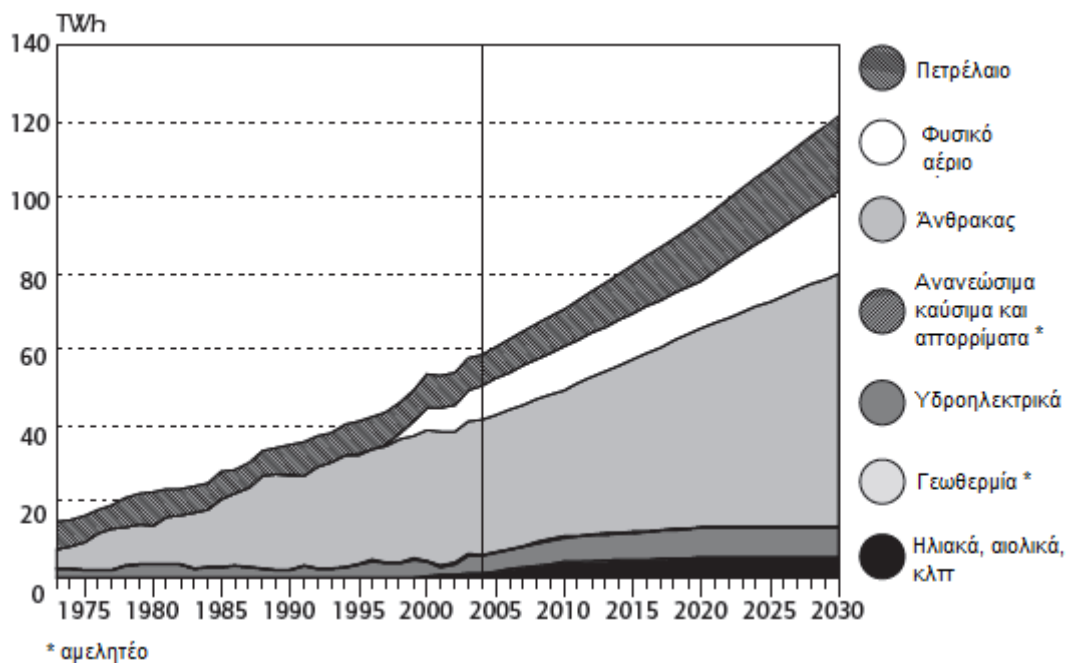
Εικόνα 2-8 : Συνολική προσφορά πρωτογενούς ενέργειας 1975-2030

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2006.

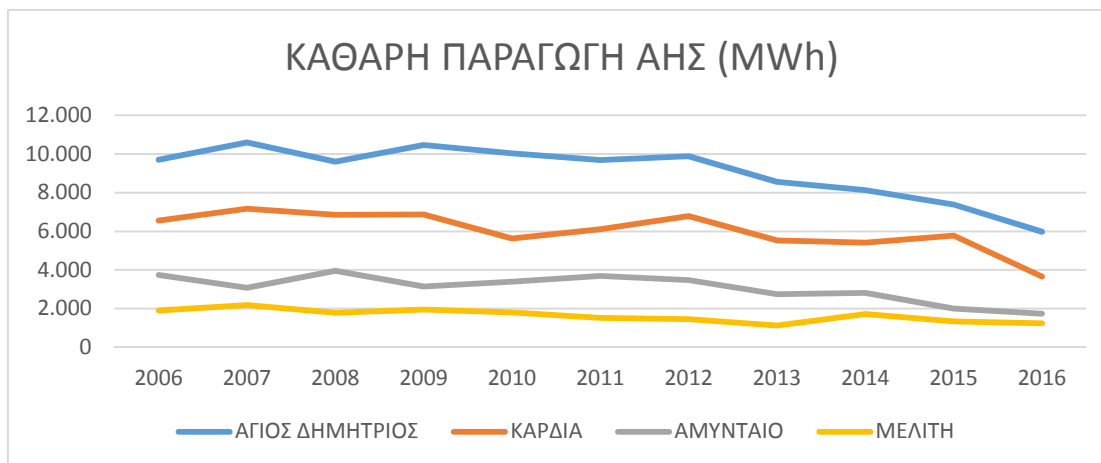
Η πιο σημαντική αλλαγή στο ενεργειακό μίγμα της ΣΠΠΕ είναι η μεταστροφή από τον λιγνίτη στο φυσικό αέριο. Ο λιγνίτης υπολογιζόταν σε 8 Mto e (36% της ΣΠΠΕ) το 1990 και 9 Mtoe (ποσοστό 28%) το 2004, εμφανίζοντας πτώση της τάξεως του 23%. Το φυσικό αέριο εισήχθη στο ενεργειακό μίγμα της Ελλάδας το 1995, και έκτοτε η χρήση του έχει αυξηθεί σημαντικά, από 0,14 Mtoe (0,6%) το 1990 σε 2,23 Mtoe (6,8%) το 2004. Η συμμετοχή του πετρελαίου στην ΣΠΠΕ επίσης αυξήθηκε από 12,8 Mtoe (58%) σε 19,5 Mtoe (59,5%). Έκτοτε το μερίδιο του πετρελαίου μειώνεται ενώ του Φ.Α αυξάνει. Το μερίδιο όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ΣΠΠΕ παρέμεινε σταθερό, με ποσοστό 5% επί της ΣΠΠΕ, μεταξύ 1990 (1,1 Mtoe) και 2004 (1,6 Mtoe). Λόγω του μεριδίου των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων, η παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας μπορεί να διαφέρει σημαντικά από έτος σε έτος. Το πιο σημαντικό εγχώριο ορυκτό καύσιμο είναι ο λιγνίτης, ο οποίος χρησιμοποιείται και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως. Αν και σχεδόν δεν έχουν απομείνει ενεργά αποθέματα φυσικού αερίου και πετρελαίου στην Ελλάδα, ωστόσο θεωρείται ότι υπάρχουν νέα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα υδρογονανθράκων σε κάποιες περιοχές της χώρας.



Εικόνα 2-9 : Παραγωγή ενέργειας ανά πηγή, 1975-2030 INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2006.



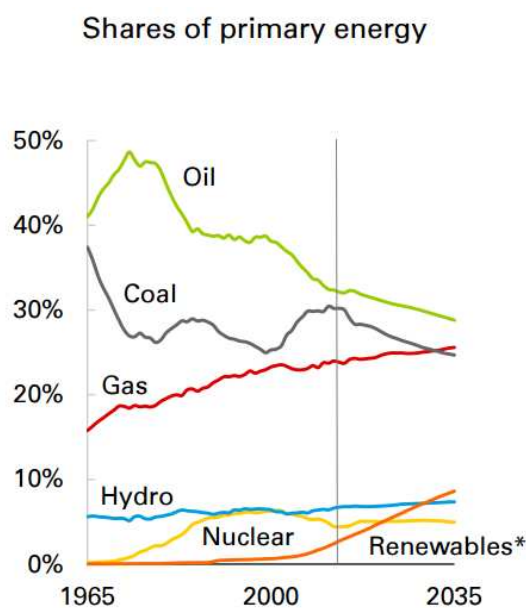
Εικόνα 2-10 : Παραγωγή ενέργειας ανά πηγή, 1975-2030 INTERNATIONAL ENERGY AGENCY 2006.



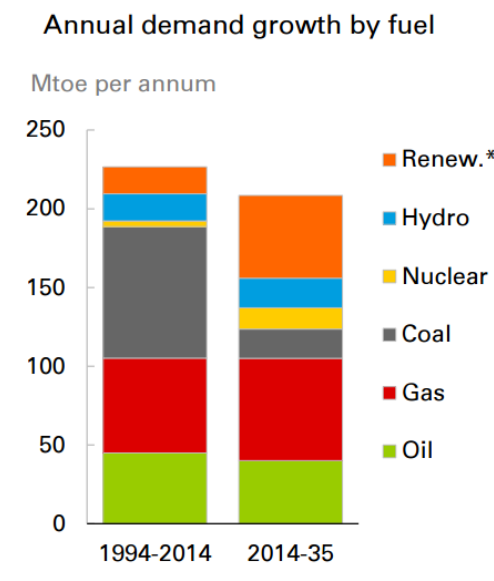
Εικόνα 2-11 : Καθαρή παραγωγή ΑΗΣ ΔΥΤ.ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ 2006-2016(ΓΛ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ)

ΑΗΣ	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
ΑΓΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ	9.697	10.596	9.607	10.462	10.041	9.690	9.886	8.569	8.136	7.392	5.984
ΚΑΡΔΙΑ	6.562	7.178	6.857	6.874	5.637	6.118	6.793	5.534	5.412	5.787	3.659
ΑΜΥΝΤΑΙΟ	3.738	3.082	3.957	3.152	3.390	3.687	3.474	2.741	2.817	1.996	1.732
ΜΕΛΙΤΗ	1.908	2.189	1.784	1.954	1.799	1.521	1.454	1.123	1.726	1.337	1.245

Εικόνα 2-12 : Καθαρή παραγωγή ΑΗΣ ΔΥΤ.ΜΑΚ .σε GWh (ΓΛ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ)



Εικόνα 2-13 : Κατανομή πρωτογενούς ενέργειας παγκοσμίως (BP 2017 Energyshare)



Εικόνα 2-14 : Ετήσια ενεργειακή ζήτηση ανά καύσιμο παγκοσμίως (BP 2017 Energyshare)

2.5. Ζήτηση

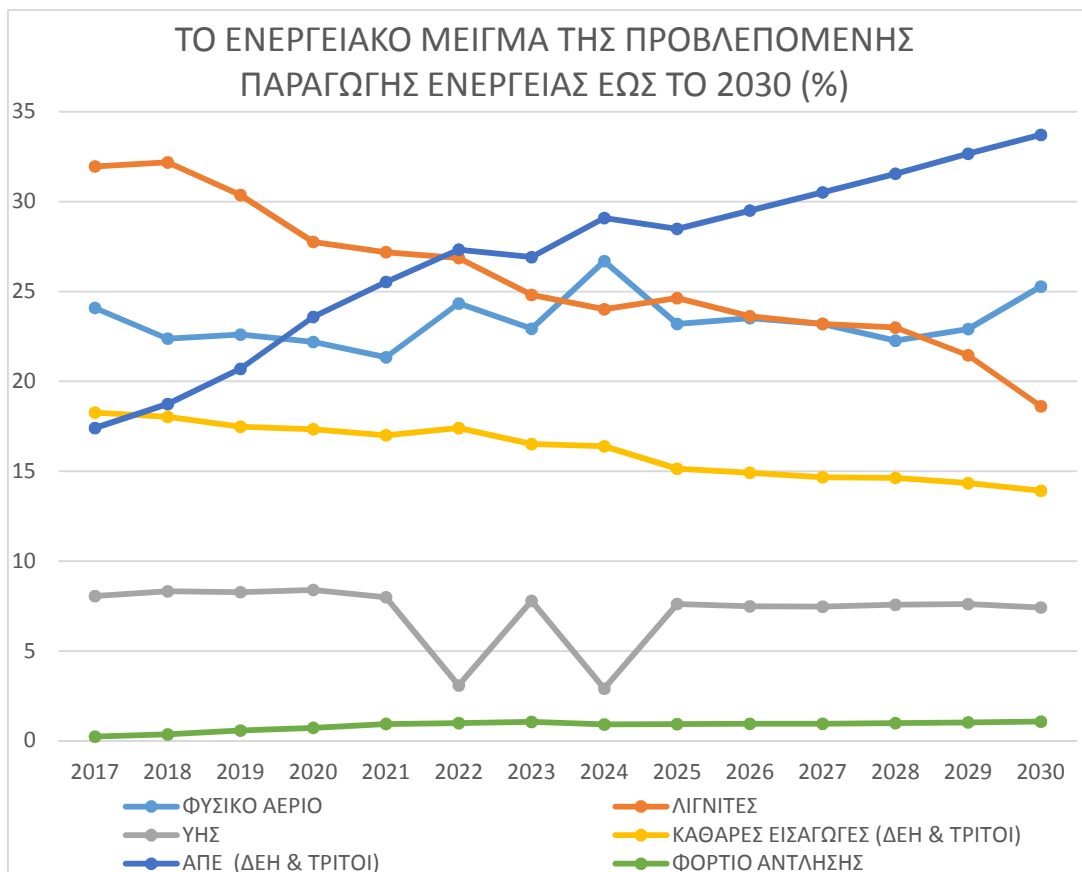
Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα αυξήθηκε ταχέως σε όλους τους τομείς από το 1990. Η βασική αύξηση παρατηρήθηκε στον οικιακό και τους λοιπούς τομείς (εμπορικό δημοσίων υπηρεσιών, αγροτικό) όπου αυξήθηκε η ζήτηση. Το 2003, ο οικιακός τομέας ήταν ο μεγαλύτερος καταναλωτής ηλεκτρικού ρεύματος στην Ελλάδα, με 16,4TWh ετήσια κατανάλωση. Πρόκειται για αύξηση της τάξης του 81% σε σύγκριση με το 1990, όταν βρισκόταν στις 9,1 TWh. Ενώ η βιομηχανία ήταν ο μεγαλύτερος καταναλωτής το 1990, με 12,1TWh, έπεσε στην τρίτη θέση το 2003, οπότε κατανάλωνε 14,2TWh, μία αύξηση της τάξης του 17% κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης περιόδου. Το 2003, ο εμπορικός τομέας ξεπέρασε το βιομηχανικό και έγινε ο δεύτερος μεγαλύτερος καταναλωτής ηλεκτρικού ρεύματος στην Ελλάδα. Κατανάλωνε 15 TWh, σε σύγκριση με τις 5,6 TWh το 1990, μία μέση ετήσια αύξηση της τάξης του 8%, και μία συνολική αύξηση της τάξης του 167% κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου, κάτι που ανακλά τις μεταβολές που συντελέστηκαν στην ελληνική οικονομία το διάστημα αυτό.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στο οποίο καλείται να ανταποκριθεί το ελληνικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η κορύφωση της ζήτησης

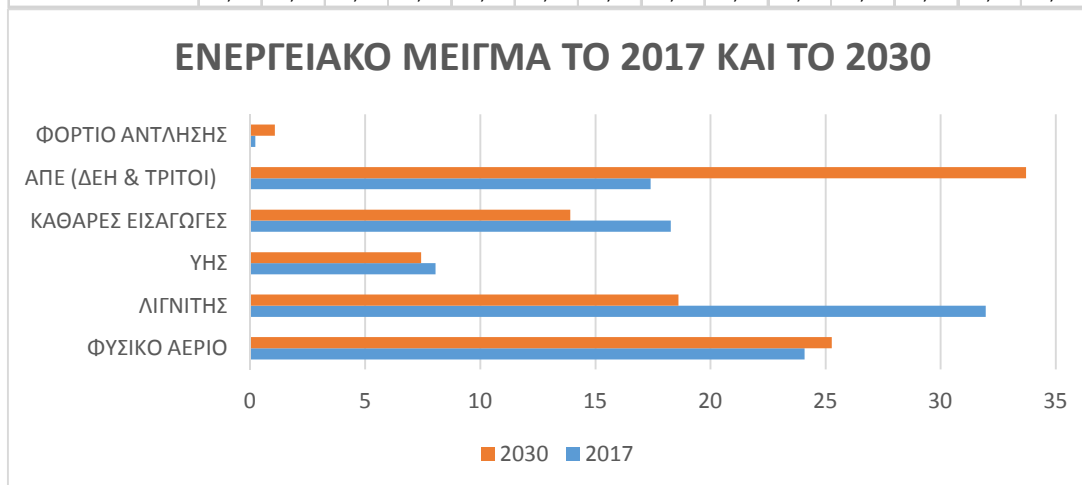
ηλεκτρικής ενέργειας τα μεσημέρια του καλοκαιριού που λαμβάνει χώρα την περίοδο Ιουλίου- Αυγούστου. Αυτή η θερινή ζήτηση αιχμής εμφανίστηκε το 1992, και έχει έκτοτε γίνει πιο έντονη, με μία αυξανόμενη διαφορά μεταξύ της ζήτησης αιχμής και της βασικής ζήτησης. Η αύξηση στην ζήτηση αιχμής οδήγησε σε προβλήματα στην προσφορά κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, συμπεριλαμβανομένου και του μεγάλου μπλακ-άουτ στην περιοχή των Αθηνών το 2004.

Το 2003, σχεδόν το 100% του ηλεκτρικού ρεύματος παρείχετο από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ΔΕΗ . Λιγότεροι από πέντε μεταξύ 7.500 επιλέξιμων πελατών κάλυπταν ένα μικρό τμήμα του φορτίου τους (329 GWh) μέσω εισαγωγών.

Ο αριθμός αυτός σήμερα αυξήθηκε με τη έναρξη λειτουργίας περισσότερων ιδιωτικών Σταθμών ηλεκτροπαραγωγής , σε συνδυασμό με μία αύξηση του αριθμού των πελατών που δικαιούνται να επιλέξουν τους προμηθευτές τους.



	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ	24,09	22,38	22,61	22,19	21,34	24,33	22,93	26,69	23,20	23,52	23,19	22,26	22,91	25,27
ΛΙΓΝΙΤΕΣ	31,96	32,18	30,37	27,76	27,19	26,87	24,81	24,02	24,63	23,63	23,20	22,99	21,46	18,61
ΥΗΣ	8,05	8,32	8,27	8,40	7,99	3,08	7,79	2,91	7,62	7,48	7,46	7,57	7,60	7,42
ΚΑΘΑΡΕΣ ΕΙΣΑΓΩΓΕΣ	18,27	18,03	17,48	17,34	17,00	17,40	16,51	16,39	15,14	14,92	14,67	14,63	14,34	13,91
ΑΠΕ (ΔΕΗ & ΤΡΙΤΟΙ)	17,40	18,74	20,70	23,59	25,53	27,33	26,91	29,09	28,49	29,51	30,52	31,55	32,67	33,71
ΦΟΡΤΙΟ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	0,23	0,36	0,58	0,72	0,94	0,99	1,05	0,91	0,93	0,95	0,95	0,99	1,03	1,07



Εικόνα 2-15 : Ενεργειακό μίγμα πρόβλεψη (ΔΕΚ 2016 ΛΑΓΓΗΕ)

2.6. Ηλεκτροπαραγωγή

Το 2005, η ΔΕΗ παρείχε το 97% της ελληνικής ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ικανότητα των ανεξάρτητων παραγωγών ενέργειας αυξήθηκε σε 540 MW θερμική, 405 MW ανανεώσιμων και 850 MW εισαγωγής μέσω αγωγών διασύνδεσης, κατά τη διάρκεια του έτους. Ο πρώτος σημαντικός ανεξάρτητος σταθμός ηλεκτροπαραγωγής ήταν η μονάδα στροβίλου φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου 150 MW της «ΗΡΩΝ ΑΕ» που συνδέθηκε το 2004. Στο τέλος του 2005, ακολούθησε η μονάδα στροβίλου φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου 400MW των «ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ» στη Θεσσαλονίκη. Συνολικά η ικανότητα των ανεξάρτητων παραγωγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των αγωγών διασύνδεσης, είναι σήμερα στο 20% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγικής ισχύος της ηπειρωτικής χώρας, σε όρους καθαρής ισχύος, ενώ η ικανότητα κάλυψης της αγοράς (θερμικές μονάδες παραγωγής, αγωγοί διασύνδεσης που χρησιμοποιούνται για τις εισαγωγές) φθάνει ίσως το 10%.

Άλλα σημαντικά καύσιμα στην ηπειρωτική χώρα ήταν το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, οι υδατικοί πόροι και η αιολική ενέργεια. Οι πετρελαιοκίνητοι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής στην ηπειρωτική χώρα βαθμιαία μετατράπηκαν σε φυσικού αερίου, προκειμένου να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το κόστος παραγωγής. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί λειτουργούν με ετήσιους συντελεστές φορτίου μεταξύ 10% και 20%, ανάλογα με τα επίπεδα βροχοπτώσεων. Σήμερα η ελληνική ηλεκτροπαραγωγική ισχύς ανά καύσιμο στο διασυνδεδεμένο σύστημα είναι: λιγνίτης 3912 MW (23.55%), φυσικό αέριο 5257.6 MW(28.40%), ΥΗΣ 3177 MW(19.10%) και ανανεώσιμες πηγές 4872.5 MW (29.33%).

Η ΔΕΗ βρίσκεται σήμερα στη διαδικασία αύξησης της αποδοτικότητας των παλαιότερων σταθμών λιγνίτη μέσω επενδυτικών προγραμμάτων , αλλά δεν υπάρχουν οι παραγωγικές μονάδες για την επέκταση της ισχύος των σταθμών αυτών. Η μέση αποδοτικότητα των παλαιότερων μονάδων είναι πολύ χαμηλή, και εκτιμάται σε ποσοστό κάτω του 33% ως αποδοτικότητα μετατροπής. Ο νεώτερος σταθμός ηλεκτροπαραγωγής με καύσιμο λιγνίτη λειτουργεί στη Φλώρινα ,και είναι η πρώτη μονάδα που υπερβαίνει τα όρια, με αποδοτικότητα περίπου 38%. Στην ημερήσια αγορά ηλεκτρικού ρεύματος, η Φλώρινα προσφέρει τις χαμηλότερες τιμές από όλους τους θερμικούς ηλεκτροπαραγωγικούς σταθμούς στην Ελλάδα, κάτι που αντικατοπτρίζει το χαμηλό κόστος του λιγνίτη και τη συγκριτικά υψηλή αποδοτικότητα του σταθμού της Φλώρινας.

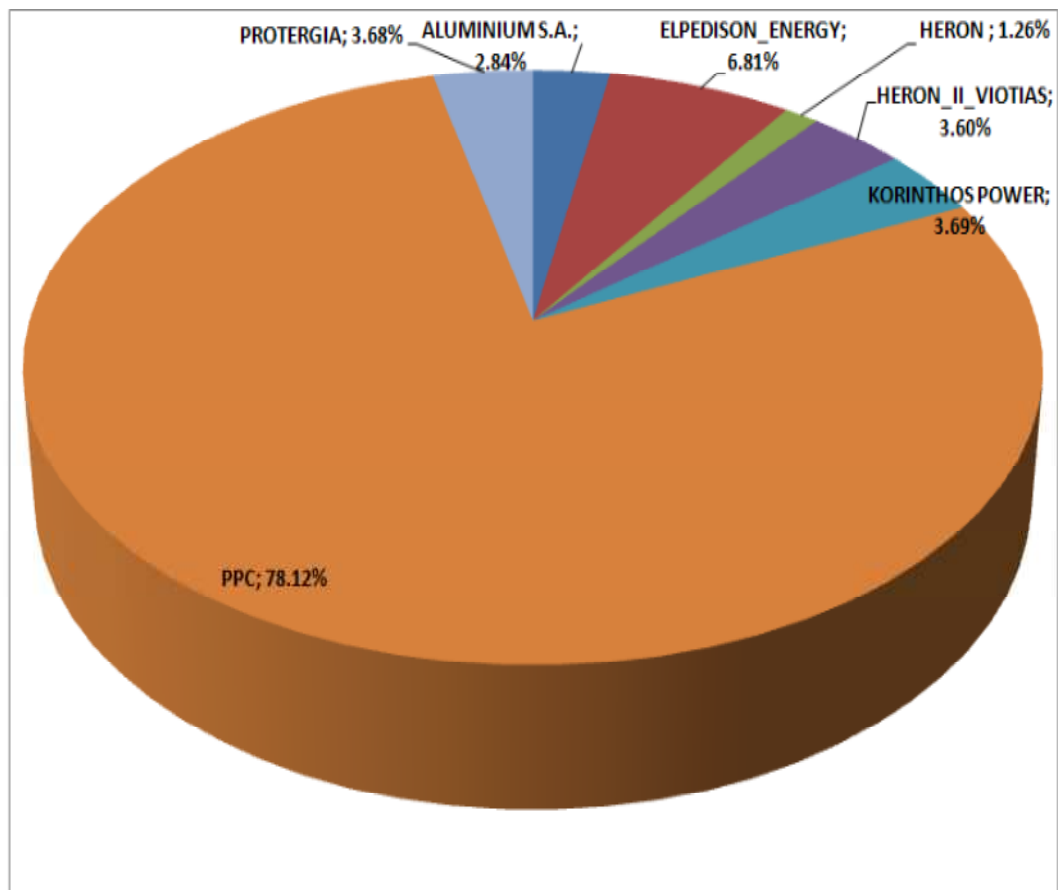
Η ΔΕΗ παρέχει ρεύμα σε όλα τα μη διασυνδεδεμένα νησιά, των οποίων. η παραγωγή στα μη διασυνδεδεμένα νησιά βασίζεται κυρίως στο πετρέλαιο. Επίσης, ένα μικρό μερίδιο της ισχύος των ελληνικών ανανεώσιμων πηγών είναι εγκατεστημένο στα νησιά, αλλά η περαιτέρω εξέλιξή τους παρεμποδίζεται από την ανεπάρκεια του δικτύου.

Παρότι το 2001 εκδόθηκαν 21 άδειες για ιδιωτικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, οι περισσότερες από αυτές δεν έχουν ενεργοποιηθεί λόγω προβλημάτων διακανονισμού της χρηματοδότησης και της απόκτησης πρόσθετων αδειών. Σήμερα υποχρεώνεται η ΔΕΗ ΑΕ να δημοπρατεί ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας (NOME) μέχρις ότου περάσουν Μονάδες της σε ποσοστό 40% σε ιδιώτες σύμφωνα με τις οδηγίες της ΕΕ.

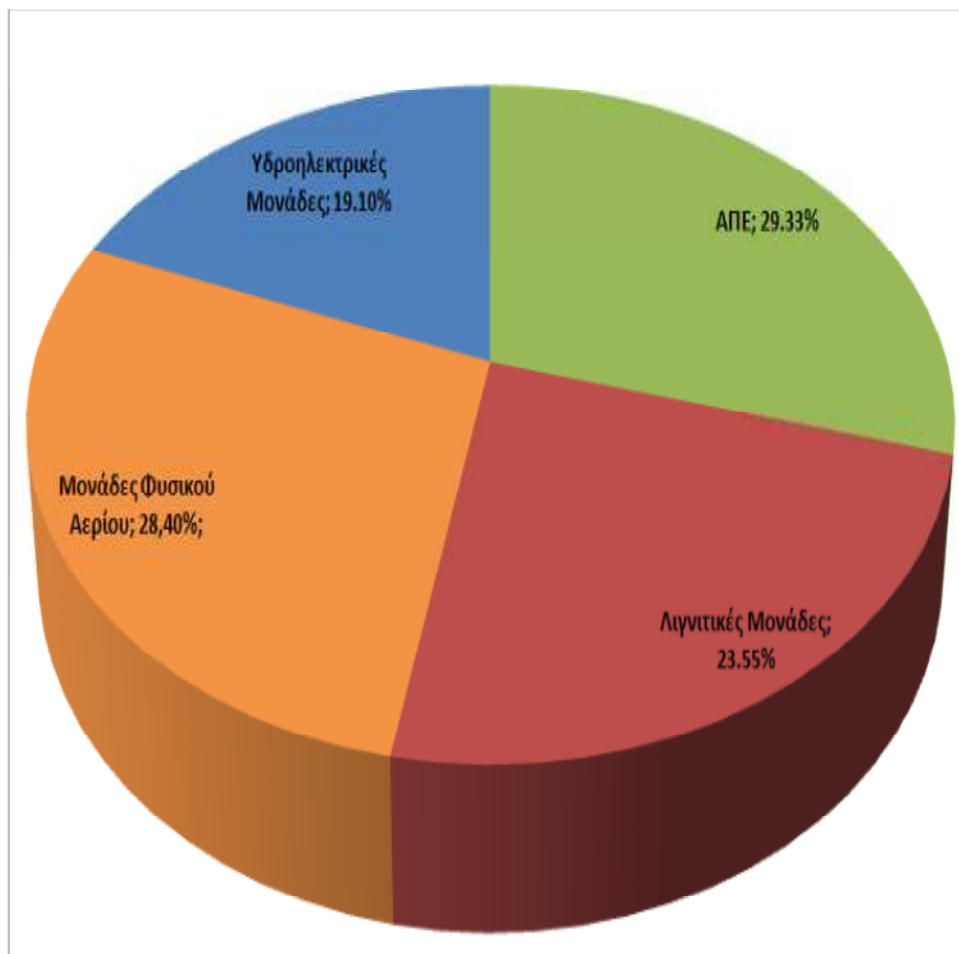
Σήμερα η Οδηγία της ΕΕ για τις μεγάλες μονάδες καύσης (2001/80/ΕΚ) περιορίζει τον υπολειπόμενο χρόνο λειτουργίας των παλαιών λιγνιτικών μονάδων του συστήματος στις 20.000 ώρες, κάτι που ισοδυναμεί σε συντελεστή φορτίου 45%.

Η ΔΕΗ έχει προσθέσει τη μονάδα φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου ισχύος 400 MW της Κομοτηνής το 2004, τη μονάδα φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου ισχύος 377 MW στο Λαύριο το 2006, τη μονάδα φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου ισχύος 420MW στο Αλιβέρι το 2015 και τη μονάδα φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου ισχύος 830 MW στη Μεγαλόπολη. Η ολοκληρωμένη υδροηλεκτρική μονάδα στη Μεσοχώρα (162MW) πρόκειται να λειτουργήσει το 2019.

Η ΔΕΗΑΕ κατασκευάζει σήμερα τη νέα λιγνιτική μονάδα ισχύος 660 MW Πτολεμαΐδα V η οποία προβλέπεται να ενταχθεί στο δίκτυο στις αρχές του 2020. Επίσης εξετάζει την δυνατότητα σε συνεργασία με ιδιωτική εταιρεία να κατασκευάσει στην Μελίτη τη νέα μονάδα Μελίτη II.



Εικόνα 2-16 : Ποσοστό (%) της Ισχύος ανά Παραγωγό (πλην ΑΠΕ) στο Σύνολο της Εγκατεστημένης Ισχύος (ΔΕΚ 2016 ΛΑΓΗΕ)



Εικόνα 2-17 : Ποσοστό (%) στο Σύνολο της Εγκατεστημένης Ισχύος στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα ανά καύσιμο .(ΔΕΚ 2016 ΛΑΓΗΕ)

3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY
Energy Policies of IEA Countries- GREECE- Review .s. I: INTERNATIONAL
AGENCY 2006
2. ΔΕΗ ΑΕ ΔΕΗ ΑΕ (Ηλεκτρονικό) 2009 <http://www.dei.gr>
3. ΔΕΣΜΗΕ ΔΕΣΜΗΕ (Ηλεκτρονικό) <http://www.desmie.gr/home>
4. BP 2017 Energy Scare
BP Energy Outlook 2017 Edition [bp.com/energy outlook](http://bp.com/energy_outlook)
ΛΑΓΗΕ www.lagie.gr

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ
ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

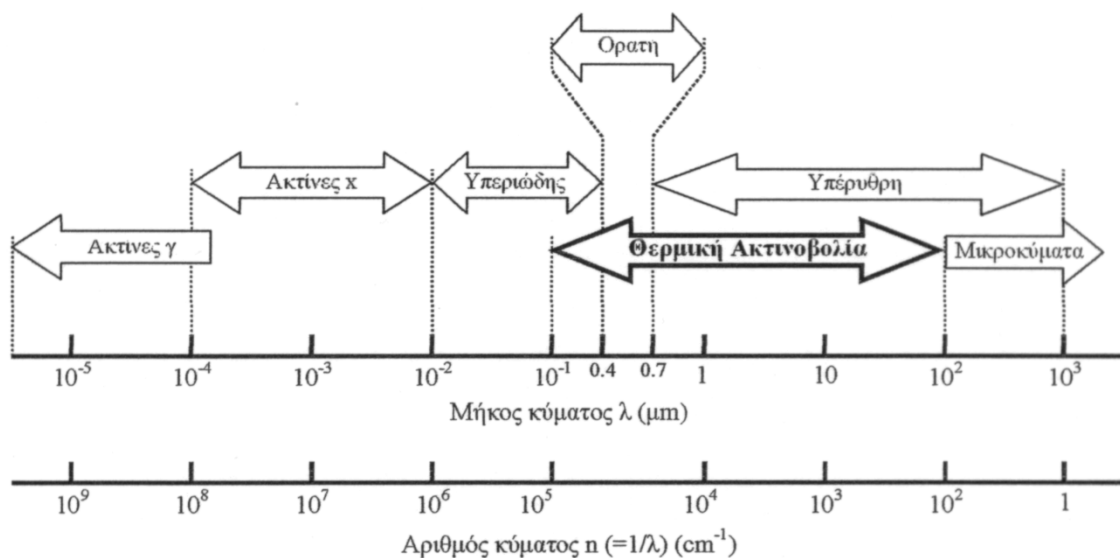
4. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

4.1. Μετάδοση Θερμότητας Με Ακτινοβολία

Στην ενότητα, που ακολουθεί, γίνεται αναφορά στον μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία. Υπάρχουν αναφορές στις βασικές έννοιες μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία και στα μοντέλα μετάδοσης θερμότητας (μοντέλα επίλυσης της εξίσωσης μεταφοράς της έντασης της ακτινοβολίας). Αμέσως μετά υπάρχει αναλυτική περιγραφή του μοντέλου των σφαιρικών αρμονικών μέσω του οποίου έγινε η μοντελοποίηση της μετάδοσης θερμότητας και παρατίθενται αποτελέσματα αυτού και αξιολόγηση του.

4.1.1. Βασικές Έννοιες Μετάδοσης Θερμότητας Με Ακτινοβολία

Η θερμική ακτινοβολία, (όπως η αγωγή και η συναγωγή), είναι ένας μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας από ένα θερμό σώμα σε ένα ψυχρότερο. Ενώ όμως, στους δύο άλλους μηχανισμούς είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός υλικού μέσου για την μεταφορά θερμότητας, στην μετάδοση με ακτινοβολία αυτό δεν είναι απαραίτητο. Έτσι, μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία μπορεί να υπάρχει ακόμη και στο κενό. Η ακτινοβολία, λοιπόν, είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα και ανάλογα με το μήκος κύματος χωρίζεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-1. Η θερμική ακτινοβολία εκτείνεται από 0.1 μm έως 100 μm [1].



Εικόνα 4-1 : Μετάδοση Θερμότητας με Ακτινοβολία

Για την μελέτη της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία δύο είναι οι προσεγγίσεις που μπορούν να γίνουν.

- Κβαντική θεώρηση της ακτινοβολίας, όπου η θερμότητα μεταδίδεται με την μορφή "πακέτων" ενέργειας τα οποία δεν έχουν μάζα (φωτόνια).
- Ηλεκτρομαγνητική θεώρηση, όπου η ακτινοβολία θεωρείται ότι αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Η μετάδοση της ακτινοβολίας γίνεται με ταχύτητα που εξαρτάται από τον δείκτη διάθλασης (n) του μέσου διάδοσης. Ο δείκτης διάθλασης είναι ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα διάδοσης του κύματος στο συγκεκριμένο μέσο.

$$n = \frac{c_0}{c} \quad [4-1]$$

Όπου:

- n Δείκτης διάθλασης
 c_0 Ταχύτητα φωτός στο κενό 2,998·10⁸m/sec
 c Ταχύτητα διάδοσης ακτινοβολίας m/sec

Ο δείκτης διάθλασης (refractiveindex) έχει την τιμή 1 για το κενό και για τα περισσότερα αέρια τιμή πολύ κοντά στην μονάδα.

Κάθε κύμα χαρακτηρίζεται από : τη συχνότητα (ν) ή το μήκος κύματος (λ) ή τον κυματαριθμό (η) ή τη γωνιακή συχνότητα (ω). Τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται με τις σχέσεις:

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{c}{\lambda} = c \cdot \eta \quad [4-2]$$

Όπου:

- ν Συχνότητα της ακτινοβολίας s⁻¹
 ω Γωνιακή συχνότητα s⁻¹
 η Κυματαριθμός m⁻¹
 λ Μήκος κύματος m

Η ενέργεια κάθε φωτονίου ή κύματος δίδεται από το νόμο του Planck:

$$E = h \cdot \nu \quad [4-3]$$

Όπου :

h	Σταθερά του Planck	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec}$
ν	Συχνότητα της ακτινοβολίας	sec^{-1}

4.1.2. Ροή Ενέργειας Ακτινοβολίας

Η ενέργεια που εκπέμπεται από μία στοιχειώδη επιφάνεια, ανά χρόνο και μονάδα μήκους κύματος, (φασματική ροή ενέργειας) είναι:

$$\dots \dots \dots \dots \dots \quad [4-4]$$

Ολοκληρώνοντας σε όλο το φάσμα του μήκους κύματος, προκύπτει η ολική ροή ενέργεια:

$$E_{\lambda} = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \frac{\text{Ισχύς}}{dA} \quad [4-5]$$

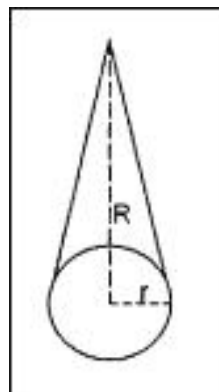
4.1.3. Στερεές Γωνίες

Καθώς η ακτινοβολία εκπέμπεται από ένα σώμα, είναι πιθανό να διαφέρει η ένταση της (μέγεθος στο οποίο θα αναφερθούμε παρακάτω) σε κάθε διεύθυνση. Για αυτό τον λόγο, ορίζεται η στερεά γωνία. Στερεά γωνία, είναι ένα ανάλογο μέγεθος με την γωνία, μόνο που αναφέρεται στο χώρο. Έχει αδιάστατες μονάδες, τα στερακτίνα (srad) και ορίζεται ως εξής:

$$\Omega = \frac{\pi r^2}{R^2} \quad [4-6]$$

Όπου:

r	Ακτίνα	m
R	Ύψος κώνου	m



Εικόνα 4-2 : Στερεά Γωνία

Είναι προφανές, ότι σε ένα σημείο που περικλείεται από μια σφαίρα αντιστοιχεί στερεά γωνία $4\pi \text{ srad}$. Είναι σύνηθες να περιγράψουμε ένα διάνυσμα κατεύθυνσης με σφαιρικές συντεταγμένες. Έτσι, το διάνυσμα χαρακτηρίζουν η πολική γωνία (θ) και η γωνία αζιμουθίου (ϕ). Η επιφάνεια dA είναι:

$$dA = R^2 \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad [4-7\alpha]$$

Έτσι η στερεά γωνία που αντιστοιχεί στην επιφάνεια dA είναι:

$$d\Omega = \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad [4-7\beta]$$

Η στερεά γωνία που αντιστοιχεί σε ένα ημισφαίριο είναι:

$$\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin\theta \, d\theta \, d\phi = 2\pi \quad [4-7\gamma]$$

4.1.4. Ακτινοβολία Μέλανος Σώματος

Μέλαν σώμα θεωρείται το σώμα που απορροφά και εκπέμπει, σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, το μέγιστο ποσό θερμότητας. Η φασματική ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας είναι:

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad [4-8]$$

Όπου :

$$c_1 = 37413 \frac{W \cdot \mu m^4}{cm^2}$$

$$c_2 = 14388 \mu m \cdot ^\circ K$$

λ	Μήκος κύματος	m
T	Θερμοκρασία	°K

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι όσο αυξάνει η θερμοκρασία, αυξάνει και η $E_b \lambda$ με το μέγιστο της συνάρτησης να μετατοπίζεται προς τα αριστερά σε μικρότερα μήκη κύματος. Αν μηδενίσουμε την παράγωγο ως προς το μήκος κύματος, προκύπτει το μέγιστο της συνάρτησης το οποίο ικανοποιεί την σχέση :

$$\lambda \cdot T = 2898 \quad [4-9]$$

Έτσι για δεδομένη θερμοκρασία προκύπτει το μήκος κύματος που μεγιστοποιεί την συνάρτηση. Με ολοκλήρωση της φασματικής ροής ενέργειας σε όλα τα μήκη κύματος, προκύπτει η ολική ροή ενέργειας μέλανος σώματος:

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad [4-10]$$

Όπου :

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12}$$

Σε αρκετές εφαρμογές είναι αναγκαίος ο υπολογισμός της ροής ενέργειας μέσα σε ένα πεπερασμένο εύρος μήκος κύματος (π.χ. λ_1 έως λ_2). Για τον λόγο αυτό ορίζεται η κλασματική συνάρτηση $f(\lambda, T)$ η οποία είναι η ροή για μήκη κύματος από 0 έως λ και είναι:

$$f(\lambda, T) = \frac{\int_0^{\lambda} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda} = \int_0^{\lambda T} \frac{E_{b\lambda} d(\lambda, T)}{\sigma \cdot T^5} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\sigma \cdot T^4} \quad [4-11]$$

Είναι φανερό ότι $f(0) = 0$ και $f(\infty) = 1$. Έτσι προκύπτει ότι η ροή ενέργειας μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος είναι:

$$\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E_{b\lambda} d\lambda = [f(\lambda_2 T) - f(\lambda_1 T)] \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [4-12]$$

4.1.5. Ένταση Ακτινοβολίας

Ολική ένταση ακτινοβολίας είναι η ακτινοβολούμενη ισχύς ενέργειας ανά μονάδα στερεάς γωνίας, ανά μονάδα επιφάνειας (κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης). Όταν η ένταση, ανάγεται σε μονάδα μήκους κύματος, τότε ορίζεται η φασματική ένταση ακτινοβολίας. Δηλαδή ισχύει:

Πίνακας 4-1 : Ένταση Ακτινοβολίας

Φασματική			
Ένταση	$I_\lambda = \frac{\text{Ισχύς}}{\perp \text{ επιφάνεια} \cdot \text{στερεά γωνία} \cdot \text{μήκος κύματος}}$		$\left[\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m} \right]$
Ακτινοβολίας			

Ολική			
Ένταση	$I = \frac{\text{Ισχύς}}{\perp \text{ επιφάνεια} \cdot \text{στερεά γωνία}}$		$\left[\frac{W}{m^2 \cdot sr} \right]$
Ακτινοβολίας			

Είναι προφανές ότι με ολοκλήρωση της φασματικής έντασης σε όλα τα μήκη κύματος, μεταβαίνουμε στην ολική ένταση ακτινοβολίας. Όσον αφορά την φασματική ένταση, αυτή είναι συνάρτηση της θέσης στον χώρο (x,y,z), της κατεύθυνσης (θ,φ) και του μήκους κύματος λ. Έτσι η ολική ένταση είναι:

$$I(r, s) = \int_0^\infty I_\lambda(r, s, \lambda) d\lambda \quad [4-13]$$

Όπου :

- r Διάνυσμα θέσης
- s Διάνυσμα κατεύθυνσης

4.1.6. Βασικά Μεγέθη Ακτινοβολίας

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μία σύντομη αναφορά (και όχι αναλυτική περιγραφή) των μεγεθών που απαιτούνται ώστε να περιγραφούν φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία. Όταν ακτινοβολία προσπέσει σε ένα σώμα, τότε οι πιθανότητες είναι είτε να ανακλαστεί, είτε να απορροφηθεί από το σώμα, είτε να το διαπεράσει. Επιπρόσθετα το σώμα θα εκπέμπει ακτινοβολία. Έτσι ορίζονται οι ακόλουθοι συντελεστές:

$$\text{Ανακλαστικότητα} \quad \rho = \frac{\text{Ανακλώμενο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας}}{\text{Ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία}} \quad [4-14]$$

$$\text{Απορροφητικότητα} \quad \alpha = \frac{\text{Απορροφούμενο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας}}{\text{Ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία}} \quad [4-15]$$

$$\text{Διαπερατότητα} \quad \tau = \frac{\text{Μεταφερόμενο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας}}{\text{Ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία}} \quad [4-16]$$

$$\text{Εκπεψιμότητα} \quad \varepsilon = \frac{\text{Εκπεμπόμενη ενέργεια ακτινοβολίας}}{\text{Εκπεμπόμενη ενέργεια από μέλαν σώμα στην ίδια θερμοκρασία}} \quad [4-17]$$

Πίνακας 4-2 : Συντελεστές Ακτινοβολίας για Διάφορα Υλικά

ΥΛΙΚΟ	as	ε	t _s
Αργίλιο (φύλλο)	0,15	0,05	
Πλίνθος (κόκκινος)	0,63	0,93	
Φύλλο μετάλλου γαλβανισμένο (καινούργιο και καθαρό)	0,65	0,13	
Φύλλο μετάλλου γαλβανισμένο (οξειδωμένο, διαβρωμένο)	0,80	0,28	
Γυαλί πάχους 3,2 mm(επίπεδο ή σκληρυμένο)			0,97
Γυαλί πάχους 3,2 mm(μικρής περιεκτικότητας σε οξείδια του σιδήρου)			0,88
Μέταλλα με επικάλυψη από μαύρο σουλφίδιο	0,92	0,10	
Μέταλλα με επικάλυψη από μαύρο οξείδιο κοβαλτίου	0,93	0,30	
Μέταλλα με επικάλυψη από μαύρο οξείδιο νικελίου	0,92	0,08	
Μέταλλα με επικάλυψη από μαύρο χρώμιο	0,87	0,09	
Χρώμα μαύρο (parsons)	0,98	0,98	
Χρώμα λευκό ακρυλικό	0,26	0,90	

as βαθμός απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας

ε συνολικός βαθμός εκπομπής στους 300 °K

ts βαθμός διαπερατότητας ηλιακής ακτινοβολίας

Έτσι, συμπεραίνουμε ότι για μια επιφάνεια ισχύει

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad [4-18\alpha]$$

Στην περίπτωση που ένα σώμα θεωρείται φαίο (opaque), η διαπερατότητα είναι 0 και ισχύει:

$$\rho + \alpha = 1 \quad [4-18\beta]$$

Εάν τώρα το σώμα είναι μέλαν, απορροφά όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία και

$$\alpha = 1(\rho = \tau = 0) \quad [4-18\gamma]$$

Όσον αφορά την εκπεμψιμότητα, αυτή κυμαίνεται από 0 έως 1 και για μέλαν σώμα είναι 1. Στον Πίνακα 4-2 παρουσιάζονται τυπικές τιμές εκπεμψιμότητας, απορροφητικότητας και διαπερατότητας για διάφορα υλικά.

Οι προηγούμενες τέσσερις ιδιότητες συνήθως είναι εξαρτώμενες από το μήκος κύματος. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει φασματική εξάρτηση, τότε το σώμα λέγεται γκρι (gray).

Η ένταση της ακτινοβολίας, καθώς αυτή διαπερνά ένα σώμα, εξασθενεί. Για την ποσοτικοποίηση αυτής της εξασθένησης εισάγεται ο συντελεστής απόσβεσης (extinction coefficient) K_{ext} . Ο συντελεστής αυτός περιγράφει την εξασθένηση της έντασης και ισχύει σύμφωνα με τον νόμο των Beer- Lambert:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = -K_{ext\lambda} \cdot I_\lambda \quad [4-19]$$

Ο φασματικός συντελεστής απόσβεσης ($K_{ext\lambda}$) μετριέται σε m^{-1} και έχει δύο συνιστώσες. Πρώτον, τον συντελεστή απορρόφησης (K_{abs}) ο οποίος ποσοτικοποιεί την εξασθένηση της έντασης ακτινοβολίας λόγω απορρόφησης από το σώμα και δεύτερον τον συντελεστή σκέδασης (K_{sca}) ο οποίος ποσοτικοποιεί την εξασθένηση λόγω σκέδασης από το σώμα.

Ισχύει ότι:

$$K_{ext\lambda} = K_{abs\lambda} + K_{sca\lambda} \quad [4-20]$$

Η διαπερατότητα συνδέεται με τους παραπάνω συντελεστές μέσω του τύπου

$$\tau = \exp(-K_{ext\lambda} \cdot s) \quad [4-21]$$

Εάν ολοκληρώσουμε τον συντελεστή απόσβεσης κατά μήκος μιας διεύθυνσης της ακτινοβολίας, προκύπτει το οπτικό πάχος (ή βάθος) τ_λ .

$$\tau_\lambda = \int_0^s K_{ext\lambda} ds \quad [4-22]$$

Ένα άλλο μέγεθος που απαντάται συχνά σε ζητήματα ακτινοβολίας είναι η παράμετρος ω (albedo) που εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας που σκεδάζεται προς αυτή που χάνεται, κατά μήκος μιας διεύθυνσης.

$$\omega_\lambda = \frac{K_{sca\lambda}}{K_{ext\lambda}} \quad [4-23]$$

Επίσης βασικός συντελεστής είναι και η παράμετρος g (forward nessfactor) ο οποίος ποσοτικοποιεί το πόσο ανισότροπα σκεδάζετε η ακτινοβολία. Ορίζεται ως το συνημίτονο της γωνίας σκέδασης. Έτσι παίρνει την τιμή 0 για ισότροπη σκέδαση (ομοιόμορφη σκέδαση προς όλες τις κατευθύνσεις), την τιμή 1 για εμπρόσθια σκέδαση και την τιμή -1 για προς τα πίσω σκέδαση.

Τέλος, ένα βασικό μέγεθος είναι και η συνάρτηση φάσης $P(\Omega' \rightarrow \Omega)$ και εκφράζει την ενέργεια που σκεδάζετε στην συγκεκριμένη διεύθυνση προς την ολικά σκεδαζόμενη ενέργεια. Ολοκληρώνοντας την συνάρτηση φάσης σε στερεά γωνία 4π προκύπτει:

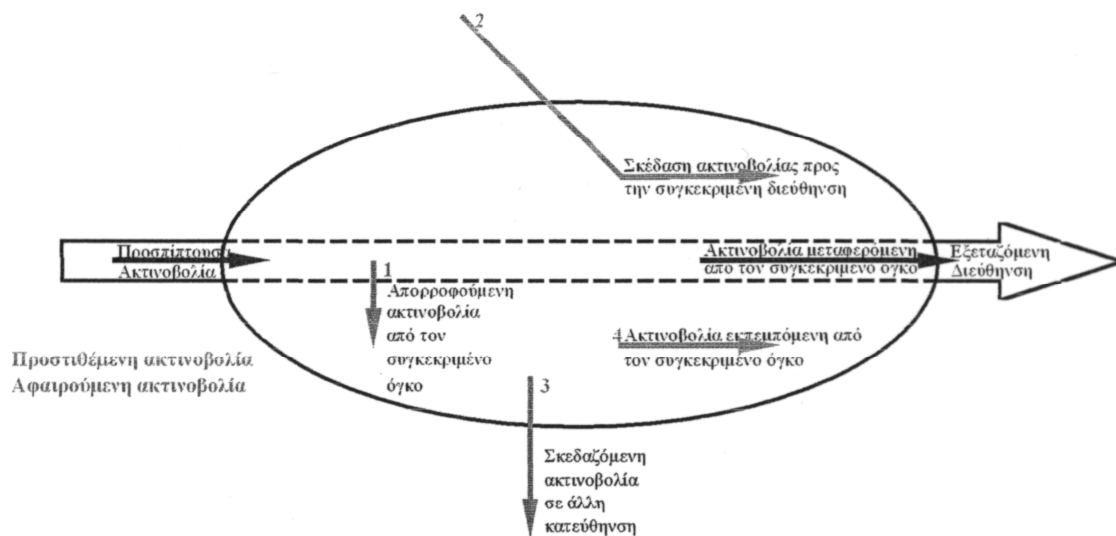
$$\frac{1}{4\pi} \cdot \int_0^{4\pi} P(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega = 1 \quad [4-24]$$

4.1.7. Εξίσωση Μεταφοράς Της Εντάσεως Της Ακτινοβολίας

Για να είμαστε σε θέση να μελετήσουμε την μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, είναι αναγκαίο να καταλήξουμε σε μια εξίσωση η οποία θα περιγράφει το φαινόμενο. Αυτή η εξίσωση είναι η Εξίσωση Μεταφοράς της Εντάσεως (EME) και προκύπτει από την εφαρμογή ενός ενεργειακού ισοζυγίου σε ένα στοιχειώδη όγκο. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 4-3 κατά την όδευση της ακτινοβολίας κατά

μήκος μιας διεύθυνσης s είναι πιθανό να συμβούν διάφορες μεταβολές. Εξετάζεται εδώ η γενική περίπτωση όπου ένα σώμα εκπέμπει, απορροφά αλλά και σκεδάζει την ακτινοβολία. Έτσι η εξίσωση που προκύπτει από την εφαρμογή του ισοζυγίου είναι:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = -I_\lambda \cdot K_{ext\lambda} + I_{b\lambda} \cdot K_{abs\lambda} + \frac{K_{sca\lambda}}{4\pi} \cdot \int_{4\pi} I'_\lambda(\Omega') \cdot P(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega' \quad [4-25]$$



Εικόνα 4-3 : Μεταβολές κατά την όδευση της ακτινοβολίας σε ένα σώμα

Πίνακας 4-3 : Μεγέθη που εμφανίζονται κατά την Όδευση της Ακτινοβολίας από ένα Σώμα

$\frac{dI_\lambda}{ds}$	Μεταβολή της έντασης κατά την όδευση της ακτινοβολίας στην διεύθυνση s
$I_\lambda \cdot K_{ext\lambda}$	Μείωση της έντασης της ακτινοβολίας λόγω απορρόφησης και σκέδασης από το μέσο στο οποίο οδεύει η ακτινοβολία
$I_{b\lambda} \cdot K_{abs\lambda}$	Επαύξηση της έντασης λόγω εκπομπής του μέσου προς την εξεταζόμενη διεύθυνση
$\frac{K_{sca\lambda}}{4\pi} \cdot \int_{4\pi} I'_\lambda(\Omega') \cdot P(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega'$	Επαύξηση της έντασης λόγω σκέδασης της ακτινοβολίας από άλλες διευθύνσεις προς την εξεταζόμενη διεύθυνση

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάστηκαν οι βασικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση του μηχανισμού μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία. Δεν έγινε εις βάθος θεώρηση των πραγμάτων, στόχος είναι η απλή παράθεση των μεγεθών και η επεξήγηση αυτών.

4.2. Μετάδοση Θερμότητας Με Συναγωγή

Η συναγωγή, αναφέρεται στη μετάδοση θερμότητας σε κινούμενα ρευστά. Στην περίπτωση αυτή συνυπάρχουν δύο μηχανισμοί μετάδοσης ενέργειας. Ο πρώτος είναι η διάχυση ενέργειας μέσω των σωματιδιακών αλληλεπιδράσεων (όπως συμβαίνει και στην περίπτωση της αγωγής), ενώ ο δεύτερος μηχανισμός συνδέεται με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού. Κατά τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού, τα στοιχειώδη σωματίδια που απαρτίζουν τα στοιχεία του ρευστού, μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους και την θερμική ενέργεια που σχετίζεται με την τυχαία μεταφορική κίνησή τους, την εσωτερική περιστροφή τους και την ταλάντωσή τους. Έτσι η συνολική μετάδοση θερμικής ενέργειας είναι το άθροισμα της μετάδοσης λόγω συγκρούσεων (διάχυση) και της μετάδοσης λόγω της μεταφοράς της θερμικής ενέργειας των σωματιδίων μέσω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού.

Η κύρια περιοχή εφαρμογής της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή είναι η μετάδοση από στερεή επιφάνεια προς κινούμενο ρευστό σε επαφή με την επιφάνεια, ή το αντίθετο. Γνωρίζουμε από τη μηχανική των ρευστών, ότι στην περιοχή επαφής του ρευστού με στερεή επιφάνεια αναπτύσσεται το λεγόμενο οριακό στρώμα ταχύτητας (ή υδραυλικό οριακό στρώμα), ως αποτέλεσμα της δράσης των δυνάμεων συνεκτικότητας στο εσωτερικό του ρευστού. Στο οριακό στρώμα εμφανίζεται ομαλή μετάβαση από την ταχύτητα της ροής μακριά από το τοίχωμα (ταχύτητα ελεύθερης ροής) στην μηδενική ταχύτητα στην επιφάνεια του ακίνητου τοιχώματος. Στην περίπτωση κινούμενης επιφάνειας, η ταχύτητα της ροής πάνω στην επιφάνεια ισούται, ως γνωστόν, με την ταχύτητα της επιφάνειας (συνθήκη μη ολίσθησης). Το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνεται κατάντη της ροής.

Στην περίπτωση διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της στερεής επιφάνειας και του ρευστού, εμφανίζεται και το λεγόμενο **θερμικό οριακό στρώμα (thermal boundary**

layer), του οποίου το πάχος μπορεί να είναι ίσο, μικρότερο ή μεγαλύτερο από αυτό του υδραυλικού οριακού στρώματος. Εντός του θερμικού οριακού στρώματος εμφανίζεται ομαλή μεταβολή της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία της στερεής επιφάνειας T_s μέχρι τη θερμοκρασία της κύριας ροής T_0 . Στην περίπτωση που η πρώτη είναι μεγαλύτερη της δεύτερης, η ροή θερμότητας πραγματοποιείται από την θερμή επιφάνεια στο ψυχρότερο ρευστό.

Επειδή στην περιοχή κοντά στο στερεό τοίχωμα οι ταχύτητες της ροής είναι πολύ μικρές, ο μηχανισμός της διάχυσης είναι αυτός που επικρατεί. Αντίθετα, μακριά από το τοίχωμα, όπου έχουν αυξηθεί οι ταχύτητες της ροής, επικρατεί η μετάδοση θερμότητας με μεταφορά. Ειδικά πάνω στο τοίχωμα, που η σχετική ταχύτητα της ροής είναι μηδέν, υπάρχει μόνο μετάδοση θερμότητας με διάχυση.

Συνήθως, η συναλλαγή θερμότητας με συναγωγή αναφέρεται στην εσωτερική θερμική ενέργεια, η οποία συνδέεται με τη θερμική του κίνηση. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις όπου η μετάδοση θερμότητας συνοδεύεται από αλλαγή φάσης, δηλαδή περιλαμβάνει και τη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης. Ένα παράδειγμα της παραπάνω περίπτωσης είναι η μετάδοση θερμότητας προς το ρευστό από τις φυσαλίδες ατμού που ανέρχονται προς την επιφάνεια, σε δοχείο με νερό που βράζει και προκαλούν ισχυρή κίνηση εντός του ρευστού, με αποτέλεσμα να εντείνεται η συναγωγή. Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή όταν υπάρχει και αλλαγή φάσης είναι πολύ πιο έντονη από την απλή περίπτωση της συναγωγής.

Το φαινόμενο της συναγωγής εξαρτάται από την ροή του ρευστού (και τα χαρακτηριστικά της) και από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και της στερεής επιφάνειας. Μια γενική σχέση που περιγράφει τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι ο νόμος του Newton για τη συναγωγή, ο οποίος δίνει την πυκνότητα ροής θερμότητας:

$$q_x'' = h(T_s - T_0) \quad [4-26]$$

Ο συντελεστής h ονομάζεται **συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή** και δίδεται σε $W/(m^2K)$. Η τιμή του εξαρτάται από το είδος της ροής, τη μορφή της επιφάνειας και τα θερμοδυναμικά και ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του ρευστού. Ο προσδιορισμός του συνήθως απαιτεί σοβαρές γνώσεις ρευστομηχανικής, ενώ για τυπικές ροές η τιμή του βρίσκεται από πίνακες και διαγράμματα.

Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης θερμότητας μέσα από την επιφάνεια (θερμοροή μέσα από την εν λόγω επιφάνεια) προκύπτει πολλαπλασιάζοντας με το εμβαδόν της επιφάνειας, δηλαδή:

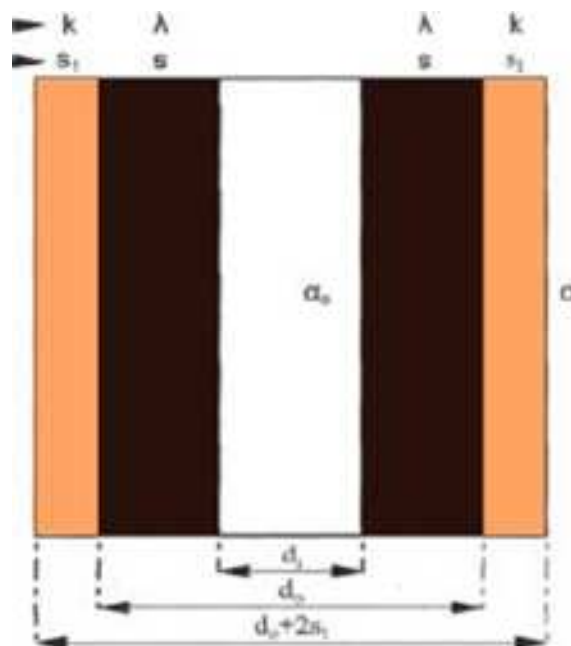
$$q_x = q_x'' A = A \cdot h(T_s - T_o) \quad [4-27]$$

4.3. Μετάδοση Θερμότητας Με Αγωγή

Για τις σωληνώσεις του λέβητα, ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας με αγωγή είναι γνωστός και η θεώρηση που μπορεί να γίνει εδώ είναι μια και μοναδική (σε αντίθεση με την μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία). Στην Εικόνα 4-4. παρουσιάζεται σχηματικά ένας σωλήνας (συντελεστής αγωγής λ) με επικαθίσεις τέφρας (συντελεστής αγωγής k). Η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα είναι d_i , η εξωτερική διάμετρος α_o και το πάχος του στρώματος των επικαθίσεων s_1 . Εντός του σωλήνα ρέει το εργαζόμενο μέσο (νερό ή ατμός) και ο συντελεστής συναγωγής είναι α_o . Εξωτερικά υπάρχουν τα προϊόντα της καύσης και ο συντελεστής συναγωγής είναι α_i .

Αγωγιμότητα (W/mK) | Πάχος
στρώματος (m)

Σωλήνας	
Επικαθίσεις τέφρας	



Εικόνα 4-4 : Σωλήνας με επικαθίσεις τέφρας

Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας του σωλήνα και των επικαθίσεων είναι:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{a_0} + \frac{d_0 + 2 \cdot s_1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_0 + 2 \cdot s_1}{2k} \cdot \ln \frac{d_0 + 2 \cdot s_1}{d_0} + \frac{d_0 + 2 \cdot s_1}{d_i} + \frac{1}{a_i}} \quad [4-28\alpha]$$

Στην περίπτωση της μετάδοσης θερμότητας εντός λεβήτων όπου η ατμοποίηση λαμβάνει χώρα η συνεισφορά της συναγωγής είναι αμελητέα. Έτσι απαλείφεται ο αντίστοιχος όρος από την εξίσωση και ο συνολικός συντελεστής είναι:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{a_0} + \frac{d_0 + 2 \cdot s_1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_0 + 2 \cdot s_1}{2k} \cdot \ln \frac{d_0 + 2 \cdot s_1}{d_0}} \quad [4-28\beta]$$

Έτσι η μετάδοση θερμότητας από τις επικαθίσεις έως το εργαζόμενο μέσο περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T \quad [4-29]$$

Όπου :

Q	Θερμορορή	W
U	Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας	W/ (m² °K)
A	Επιφάνεια	m²
ΔT	Διαφορά θερμοκρασίας	°K

Ο συντελεστής αγωγιμότητας της τέφρας είναι μέγεθος που δύσκολα μπορεί να εκτιμηθεί λόγω της έντονης εξάρτησης του από την θερμοκρασία και την φυσική και χημική σύσταση της τέφρας. Ποικίλει από 0,15 W/m²°K έως 3 W/m²°K.

5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥ (ΛΕΒΗΤΑ)

Ο ατμοπαραγωγός είναι ένα σύστημα παραγωγής ατμού, με ορισμένα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά και καθορισμένη παροχή. Μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας εναλλάκτης θερμότητας, μεταξύ ενός ρεύματος θερμού καυσαερίου και ενός ρεύματος νερού, που καθώς διαρρέει τον ατμοπαραγωγό, μετασχηματίζεται βαθμιαία σε κορεσμένο και υπέρθερμο ατμό, παίρνοντας θερμότητα από το καυσαέριο.

Το ρεύμα του θερμού καυσαερίου, που αποτελεί τον φορέα της συναλλασσόμενης θερμότητας, δημιουργείται μέσα στον ατμοπαραγωγό με την καύση του καυσίμου. Τόσο το εργαζόμενο μέσο (νερό ή ατμός), όσο και ο φορέας της θερμότητας (καυσαέριο), κυκλοφορούν σε σύστημα αγωγών, μέσα από τα τοιχώματα των οποίων, μεταδίδεται η θερμότητα από το καυσαέριο, στο εργαζόμενο μέσο. Η επιφάνεια των τοιχωμάτων των αγωγών νερού ή ατμού, που έρχεται σε επαφή με το καυσαέριο, αποτελεί την θερμαινόμενη επιφάνεια του ατμοπαραγωγού.

5.1. Τα Μέρη του Λέβητα ενός Ατμοπαραγωγού

Στους λέβητες ανεξάρτητα από την κατηγορία, διακρίνουμε τα εξής κύρια μέρη:

1. Το θάλαμο καύσης (εστία): Μέσα σ' αυτόν τον θάλαμο καίγεται το μίγμα "αέρα - καυσίμου" και απελευθερώνεται έτσι μια ορισμένη ποσότητα θερμότητας.
2. Το τύμπανο (ατμοϋδροθάλαμος ή διαχωριστής): Είναι το μέρος όπου γίνεται ο διαχωρισμός νερού και ατμού.
3. Τους εναλλάκτες θερμότητας: (οικονομητήρας "ECO" - υδραυλοί - υπερθερμαντές - αναθερμαντές) αποτελούνται κατά το μεγαλύτερο μέρος από δέσμες αυλών. Στο εξωτερικό μέρος των αυλών αυτών διέρχονται τα αέρια της καύσης (καυσαέρια) με υψηλή θερμοκρασία (κύκλος-καυσαερίων). Στο εσωτερικό των αυλών κυκλοφορεί το νερό (για θέρμανση και ατμοποίηση) ή ο ατμός (για υπερθέρμανση και αναθέρμανση).

Τα καυσαέρια στο τέλος της διαδρομής τους, πριν από το διαχωρισμό της τέφρας και την είσοδό τους στην καμινάδα, διασχίζουν έναν άλλον τύπο εναλλάκτη θερμότητας, τον προθερμαντήρα αέρα που δεν είναι πάντα υποχρεωτικά με αυλούς. Ο ρόλος του είναι, να ανακτήσει ένα μεγάλο μέρος από την θερμότητα που μένει ακόμη στα καυσαέρια και να την διαβιβάσει στον αέρα που θα χρησιμοποιηθεί για την καύση.

5.2. Θάλαμος Καύσης

Ο θάλαμος καύσης ή φλογοθάλαμος ή εστία, είναι το κυριότερο μέρος του λέβητα. Μέσα στον χώρο που σχηματίζει, αναπτύσσεται η φλόγα της καύσης και συντελούνται οι κυριότερες εναλλαγές θερμότητας που είναι απαραίτητες για την παραγωγή του ατμού. Αυτές οι εναλλαγές της θερμότητας, πραγματοποιούνται κυρίως με ακτινοβολία. Το σχήμα του φλογοθαλάμου και ο τύπος των καυστήρων, εξαρτώνται ιδιαίτερα από το είδος του χρησιμοποιούμενου καύσιμου και από το μήκος που πρέπει να έχει η φλόγα ώστε η καύση να είναι κατά το δυνατόν τέλεια. Εξάλλου, η επιδίωξη είναι, ο φλογοθάλαμος και οι καυστήρες, να έχουν την κατάλληλη διάταξη ώστε η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την καύση, να διαχέεται κατά το δυνατόν ομοιόμορφα. Μ' αυτόν τον τρόπο, γίνεται καλή εκμετάλλευση του όγκου του φλογοθαλάμου και αποφεύγεται να σχηματίζονται πολύ θερμές ζώνες, της τάξης των 150.000 - 300.000 Kcal/m³.

Το χαμηλότερο μέρος του φλογοθαλάμου, οφείλει να επιτρέπει την αφαίρεση της τέφρας. Συνήθως, σχηματίζει ένα είδος χοάνης την «τεφροδόχο», από όπου η κονιορτώδης τέφρα εκβάλλεται με μηχανικό ή υδραυλικό τρόπο ή με πίεση αέρα.

Τα πλευρικά τοιχώματα των φλογοθαλάμων έχουν πάντα σχεδόν μια επένδυση με αυλούς ατμοποίησης και αποτελούν ένα μεγάλο μέρος της ατμοπαραγωγού δέσμης. Η τεφροδόχος, στην περίπτωση της κονιορτώδους τέφρας, ψύχεται όμοια, από τα στρώματα των υδραυλών που σχηματίζουν την επένδυση της χοάνης.

Η έξοδος των θερμών καυσαερίων γίνεται συνήθως από ένα άνοιγμα, που προβλέπεται στο πάνω μέρος της πίσω πλευράς του φλογοθαλάμου και οι αυλοί εκεί, σχηματίζουν μια αραιή παράταξη.

Παρά την σημαντική ψύξη που υφίστανται τα καυσαέρια, λόγω της εναλλαγής θερμότητας με την ακτινοβολία εν τούτοις, η θερμοκρασία μέσα στον φλογοθάλαμο παραμένει υψηλή γιατί, αφ' ενός η περίσσεια του αέρα είναι αρκετά μικρή και αφ'

ετέρου ο προσαγόμενος αέρας για την καύση, έχει ήδη προθερμανθεί ικανοποιητικά.

Τους φλογοθαλάμους τους διακρίνουμε:

1. Ανάλογα με την μορφή της λαμβανόμενης τέφρας:

- Φλογοθαλάμους με κονιορτώδη τέφρα
- Φλογοθαλάμους με τετηγμένη τέφρα (κυκλοτερής φλογοθαλάμους).

2. Ανάλογα με την πίεση των καυσαερίων:

- Φλογοθαλάμους με υποπίεση
- Φλογοθαλάμους με υπερπίεση

5.2.1. Φλογοθάλαμος με Κονιορτώδη Τέφρα

Οι φλογοθάλαμοι του τύπου αυτού, μπορεί να είναι εφοδιασμένοι με καυστήρες στην εμπρόσθια πλευρά ή στις γωνίες (εφαπτομενική καύση) ή στην οροφή (φλογοθάλαμος με φλόγα σε σχήμα U), ανάλογα με το είδος του κονιοποιημένου καυσίμου που χρησιμοποιείται. Η καύση του κάρβουνου συντελείται σε μια θερμοκρασία που δεν ξεπερνά τους 950 έως 1000 °C. Η θερμοκρασία τήξης της τέφρας δεν κατεβαίνει κάτω από 1200 °C περίπου, επομένως δεν υπάρχει τήξη κατά τη διάρκεια της καύσης.

Η τέφρα που προκύπτει από την καύση, παρασύρεται κατά μεγάλο ποσοστό (περίπου κατά 85%) από τα καυσαέρια. Το υπόλοιπο 15% πέφτει στην τεφροδόχο του λέβητα. Το μεγάλο ποσοστό τέφρας που περιέχεται στα καυσαέρια, επιβάλλει την εγκατάσταση των διαχωριστών (ή και ηλεκτροστατικών φίλτρων), των οποίων ο ρόλος είναι να κατακρατούν το μεγαλύτερο μέρος της τέφρας, πριν αυτή διαφύγει στην ατμόσφαιρα.

Ο φλογοθάλαμος περιλαμβάνει εν γένει:

- πλευρικά τοιχώματα αυλών
- 1 εμπρόσθιο τοίχωμα αυλών
- 1 οπίσθιο τοίχωμα αυλών

Γενικά, το σύνολο των αυλών που σχηματίζουν την επένδυση των τοιχωμάτων, αποτελούν την ατμοπαραγωγό δέσμη του λέβητα.

Οι αυλοί των τοιχωμάτων (υδραυλοί) είναι σιδερένιοι. Η εξωτερική τους διάμετρος είναι εν γένει:

- 76 mm με πάχος 8mm για τους λέβητες με φυσική κυκλοφορία.
- 38 mm με πάχος 4mm για τους λέβητες με επιβοηθούμενη ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία.

Κάθε τοίχωμα υδραυλών, διαθέτει ένα ή περισσότερους συλλέκτες "εισόδου νερού" οι οποίοι τροφοδοτούνται:

- είτε με σωληνώσεις κατ' ευθείαν από τον υδροθάλαμο
- είτε με σωληνώσεις, που συνδέονται με ένα γενικό συλλέκτη τοποθετημένο προς το χαμηλότερο μέρος του λέβητα, ή με σωληνώσεις που συνδέονται με ενδιάμεσους συλλέκτες, συνδεόμενους με τον υδροθάλαμο.

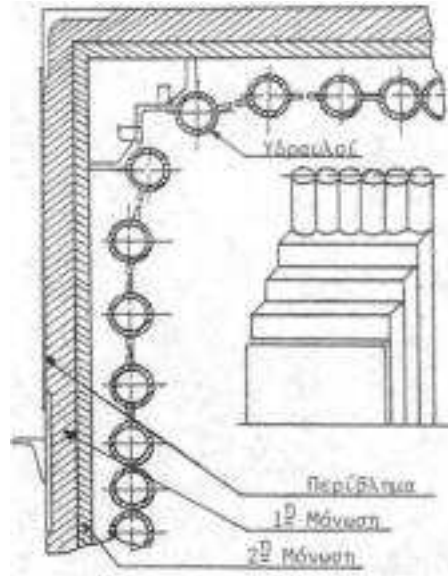
Κάθε τοίχωμα υδραυλών διαθέτει επίσης και έναν συλλέκτη εξόδου νερού ατμού ο οποίος συνδέεται με σωληνώσεις με τον ατμοθάλαμο. Ενίοτε, ο συλλέκτης παραλείπεται και οι αυλοί του τοιχώματος είναι συγκολλημένοι απ' ευθείας στον ατμοθάλαμο.

Ορισμένοι αυλοί έχουν τέτοιο σχήμα ώστε, να επιτρέπουν την διέλευση των καυστήρων και των εκκαπνιστών.

Οι αυλοί κρέμονται από το περίβλημα του λέβητα. Το περίβλημα αποτελείται από λαμαρίνες πάχους 4 mm περίπου, στερεωμένες πάνω στον οικοδομικό σκελετό του λέβητα. Η ανάρτηση των αυλών πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να επιτρέπει την ελεύθερη διαστολή των αυλών σχετικά με το περίβλημα.

Η στεγανότητα του φλογοθαλάμου εξασφαλίζεται από το περίβλημα του λέβητα. Η θερμική μόνωση των τοιχωμάτων των αυλών, αποτελείται από την τοιχοποιία (συνήθως δύστηκτο αμμοκονίαμα) και δυσθερμαγωγά μονωτικά στρώματα. Η αμμοκονία επιβαρύνει τους αυλούς ενώ οι συμπληρωματικές θερμικές μονώσεις, στηρίζονται στο περίβλημα. Μια γραφитоύχος επιφάνεια, επιτρέπει την σχετική μετακίνηση των δύο αυτών ειδών μόνωσης.

Στην εικόνα που ακολουθεί, φαίνεται η λεπτομέρεια της μόνωσης, στην γωνία που σχηματίζουν δύο τοιχώματα αυλών.



Εικόνα 5-1 : Φλογοθάλαμος

5.2.2. Φλογοθάλαμος Με Τετηγμένη Τέφρα (Κυκλοτερής Φλογοθάλαμος Ή Ελίσσόμενη Φλόγας)

Μέσα στον κυκλοτερή φλογοθάλαμο, η καύση του κάρβουνου συντελείται σε μια υψηλή θερμοκρασία, περίπου 1800 °C, η οποία είναι αρκετά ψηλότερη από το σημείο τήξης της τέφρας που περιέχεται στο καύσιμο. Ως εκ τούτου η τέφρα τήκεται. Η τετηγμένη τέφρα ρέει μέσα σ' ένα φρεάτιο, από όπου εκκενώνεται με μηχανικό τρόπο.

Προκύπτουν πολλά πλεονεκτήματα, από την καύση του κάρβουνου σε υψηλή θερμοκρασία, μέσα στον κυκλοτερή φλογοθάλαμο.

1. Η τέφρα πέφτει, ως επί το πλείστον, μέσα στην τεφροδόχο του λέβητα. Επομένως η ποσότητα της τέφρας που παρασύρεται από τα καυσαέρια, είναι σημαντικά μειωμένη και ως εκ τούτου, οι διαστάσεις του διαχωριστή τέφρας για την απαλλαγή των καυσαερίων από αυτήν, είναι σημαντικά μικρότερες.
2. Η ποσότητα της τέφρας, που αποβάλλεται από την καμινάδα στην ατμόσφαιρα, είναι πολύ μειωμένη.
3. Τα πτωχά κάρβουνα με μεγάλη περιεκτικότητα τέφρας, που μπορεί να φθάσει μέχρι 45%, μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

4. Δεν υπάρχει λόγος να συντελείται πολύ λεπτή κονιοποίηση του καυσίμου. Τούτο έχει σαν αποτέλεσμα, τη μικρότερη κατανάλωση ενέργειας για την κονιοποίηση.

Αντίστοιχα, τα μειονεκτήματα που προκύπτουν είναι:

1. Η περίπλοκη κατασκευή των φλογοθαλάμων
2. Το μεγαλύτερο κόστος συντήρησης του φλογοθαλάμου και της τεφροδόχου.

5.2.3. Φλογοθάλαμος με Υποπίεση και Υπερπίεση

Οι περισσότεροι λέβητες είναι εφοδιασμένοι με ανεμιστήρες κατάθλιψης (F.D.F.) και ανεμιστήρες αναρρόφησης (I.D.F.). Οι πρώτοι αναρροφούν τον ατμοσφαιρικό αέρα και τον καταθλίζουν στον φλογοθάλαμο, μέσω του προθερμαντήρα αέρα. Οι δεύτεροι αναρροφούν τα καυσαέρια και τα καταθλίζουν στην καμινάδα. Ο φλογοθάλαμος σ' αυτούς τους λέβητες βρίσκεται σε ελαφρά υποπίεση.

Σε ορισμένους λέβητες, η κυκλοφορία του αέρα και των καυσαερίων, εξασφαλίζεται μόνο με τους ανεμιστήρες κατάθλιψης. Τότε ο φλογοθάλαμος βρίσκεται υπό πίεση, γι' αυτό και λέγεται "υπέρθλιπτος".

Η πίεση μέσα στον φλογοθάλαμο, μεταβάλλεται με το φορτίο του λέβητα. Φθάνει σε μια τιμή, περίπου 200 έως 250 mm στήλης νερού μεγαλύτερη από την πίεση του ατμοσφαιρικού αέρα, για το κανονικό φορτίο του λέβητα.

Ο φλογοθάλαμος με υπερπίεση, δεν επιτρέπει την είσοδο του αέρα κατά την διαδρομή των καυσαερίων και ως εκ τούτου προκύπτει βελτίωση στον θερμικό βαθμό απόδοσης. Αφ' ετέρου η κατανάλωση ενέργειας, για την εξασφάλιση της κυκλοφορίας του αέρα και των καυσαερίων, είναι σημαντικά μικρότερη, λόγω έλλειψης των ανεμιστήρων αναρρόφησης.

Σε αντιδιαστολή:

Για να αποφευχθεί η έξοδος των καυσαερίων από τα τοιχώματα του λέβητα, το περίβλημα του φλογοθαλάμου και των άλλων μερών του κυκλώματος των καυσαερίων, πρέπει να έχουν εξαιρετική στεγανότητα. Η προϋπόθεση αυτή πρέπει να πληρούται επίσης και για τους φλογοθαλάμους με υποπίεση, για να αποφεύγεται η είσοδος του αέρα μέσα στο κύκλωμα των καυσαερίων.

Το περίβλημα του φλογοθαλάμου πρέπει να έχει υπολογιστεί, όχι μόνο να αντέχει στην πίεση των καυσαερίων, αλλά να μπορεί να ανθίσταται και στις τυχαίες εκρήξεις που μπορούν να προκληθούν μέσα στον φλογοθάλαμο.

Ιδιαίτερες προφυλάξεις πρέπει να ληφθούν, για να αποφευχθούν οι διαφυγές των καυσαερίων από διάφορα ανοίγματα ή από τις θέσεις του περιβλήματος, όπου τοποθετούνται οι διάφορες συσκευές ή τέλος από τα σημεία των ενώσεων στο κύκλωμα των καυσαερίων.

5.3. Τύμπανο (Ατμοϋδροθάλαμος)

Το τύμπανο αποτελεί μια δεξαμενή, μέσα στην οποία συνυπάρχουν το νερό και ο κεκορεσμένος ατμός του λέβητα. Από το γεγονός αυτό η θερμοκρασία του νερού του τύμπανου είναι και η θερμοκρασία του κεκορεσμένου ατμού, που αντιστοιχεί στην πίεση, που επικρατεί μέσα στο τύμπανο.

Η στάθμη στο τύμπανο διατηρείται κατά τη λειτουργία με συνεχή τροφοδότηση μέσω μιας ρυθμιστικής βαλβίδας που παρεμβάλλεται μεταξύ τροφοδοτικών αντλιών και λέβητα. Πάνω από τη σταθερή αυτή στάθμη του νερού, υπάρχει ο υγρός κεκορεσμένος ατμός ο οποίος καταλήγει στους υπερθερμαντές για περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του. Το τύμπανο αποτελεί επίσης ένα απόθεμα νερού, ικανό να μπορέσει να καλύψει, μέσα σε ορισμένα όρια, κάθε απότομη μεταβολή της ατμοπαραγωγής.

Η κατασκευή του τύμπανου γίνεται με μεγάλη προσοχή λόγω των θερμικών τάσεων που παρουσιάζονται, κυρίως κατά την ανύψωση της πίεσης στην εκκίνηση, όπου η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο οποιοδήποτε σημείων του τύμπανου να μην ξεπερνά τους 50 °C

Εξωτερικά στο τύμπανο υπάρχουν:

1. Τα ασφαλιστικά
2. Οι διάφορες σωληνώσεις
 - της τροφοδότησης από τον οικονομητήρα
 - της τροφοδότησης με νερό των αυλών καθόδου
 - των αυλών ατμοποίησης (αυλών ανόδου)

- της εξόδου του κεκορεσμένου ατμού προς τους υπερθερμαντές
- των εξαεριστικών
- της εξαγωγής νερού (BLOWDOWN)
- της δειγματοληψίας νερού
- των υδροδεικτών για έλεγχο και ρύθμιση της στάθμης.

Εσωτερικά το τύμπανο περιλαμβάνει:

- Τις σωληνώσεις της τροφοδότησης, διατεταγμένες έτσι ώστε να συγκροτούν ένα διάτρητο συλλέκτη, για να εξασφαλίζεται μια καλή κατανομή του νερού σε όλο το μήκος του τύμπανου.
- Τα περιφερειακά διαφράγματα για την καθοδήγηση του μίγματος νερού-ατμού που έρχεται από τις δέσμες των αυλών ατμοποίησης.
- Τους διαχωριστές και ξηραντές, των οποίων ο σκοπός είναι να αφαιρέσουν τα σταγονίδια του νερού που περιέχονται στον ατμό πριν οδηγηθεί προς τους υπερθερμαντές.
- Ακόμη, στο τύμπανο υπάρχουν τοποθετημένα θερμοηλεκτρικά στοιχεία για έλεγχο των θερμοκρασιών του μετάλλου, ιδίως κατά την εκκίνηση.

5.4. Προθερμαντήρες Τροφοδοτικού Νερού (Οικονομητήρες - ECO)

Οι προθερμαντήρες τροφοδοτικού νερού (οικονομητήρες) έχουν σαν αντικειμενικό σκοπό την προθέρμανση του νερού τροφοδότησης των λεβήτων με εκμετάλλευση των καυσαερίων. Αυτοί βρίσκονται τοποθετημένοι στο τελευταίο τμήμα του λέβητα και μέσα στη ροή των καυσαερίων, εκμεταλλεύονται περαιτέρω τη θερμότητα τους και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται οικονομία καυσίμου. Με την προθέρμανση αυτή του νερού από τα καυσαέρια αποφεύγονται οι πρόσθετες θερμικές τάσεις στα τοιχώματα του τύμπανου, οι οποίες παρουσιάζονται όταν τροφοδοτείται με κρύο νερό.

Ο προθερμαντήρας νερού είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας με μεθοδική κυκλοφορία, δηλαδή η έννοια της κυκλοφορίας του νερού είναι αντίστροφη από εκείνη των καυσαερίων, η δε μετάδοση της θερμότητας γίνεται με την επαφή.

Η θερμοκρασία των καυσαερίων στο σημείο αυτό είναι της τάξης των 400 - 450 °C περίπου και η ταχύτητα τους περίπου 4 έως 12 m/sec μέσα στον οικονομητήρα. Η δε ταχύτητα του νερού αντίστοιχα είναι:

- για προθερμαντήρες με λείους αυλούς 0,10 m/sec ενώ
- για προθερμαντήρες με πτερυγοφόρους αυλούς 0,25 έως 0,75 m/sec.

Οι προθερμαντές τροφοδοτικού νερού πρέπει να εκπληρούν ορισμένες συνθήκες όπως:

1. Να έχουν μεγάλη θερμαινόμενη επιφάνεια, μιας και οι θερμοκρασίες των καυσαερίων δεν είναι σε μεγάλα επίπεδα. Γι' αυτό γίνεται χρήση πτερυγοφόρων αυλών.
2. Ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Χρησιμοποίηση κατάλληλων υλικών.
3. Καθαρότητα επιφανειών.
4. Κατάλληλο μέγεθος για την αποφυγή ατμοποίησης στη συσκευή.

Οι οικονομητήρες κατασκευάζονται ή από χυτοσίδηρο με πτερύγια ή από χαλύβδινους κεκαμένους αυλούς όπως οι υπερθερμαντές.

5.5. Αυλοί Κυκλοφορίας

Στους σύγχρονους λέβητες οι αυλοί κυκλοφορίας, που λέγονται και αυλοί ατμοποίησης, καλύπτουν σε παράλληλες σειρές τα τοιχώματα του φλογοθαλάμου και σχηματίζουν τους υδρότοιχους, δηλαδή μια καθ' ολοκληρία εσωτερική επένδυση. Με την ενέργεια της θερμότητας που παρέχει η καύση του καυσίμου, το νερό που διέρχεται μέσα στους αυλούς, ατμοποιείται υπό μορφή φυσαλίδων, πρόκειται τότε περί αναβρασμού στο εσωτερικό της μάζας του νερού, σε αντίθεση προς τον βρασμό πλησίον του μετάλλου του αυλού, του οποίου προσπαθούν να αποφύγουν για λόγους υπερθέρμανσης του μετάλλου των αυλών. Οι δέσμες των αυλών κυκλοφορίας, τροφοδοτούνται από τον υδροθάλαμο του τύμπανου, μέσω των εξωτερικών αυλών τροφοδότησης (αυλοί καθόδου) και των ιλυοσυλλεκτών. Οι αυλοί καθόδου βρίσκονται ως γνωστόν έξω από την εστία. Το μίγμα νερού ατμού ανέρχεται μέσα στους αυλούς ανόδου, προς τους άνω συλλέκτες των αυλών και από εκεί στους συνδετικούς αυλούς που καταλήγουν στο άνω μέρος του τυμπάνου. Στην περίπτωση αυτή η κυκλοφορία ονομάζεται φυσική.

Οι αυλοί σε ορισμένα σημεία αποκλίνουν ώστε να δημιουργηθούν ανοίγματα στα σημεία που υπάρχουν οι θυρίδες επιθεώρησης, η είσοδος των καυστήρων πετρελαίου κ.λπ. Η θερμαντική επιφάνεια που καταλαμβάνουν οι αυλοί ανόδου είναι περίπου 10 % της συνολικής θερμαντικής επιφάνειας, αλλά υπολογίζεται ότι απορροφούν το 45 % της συνολικής θερμότητας. Η μεγάλη αυτή αποδοτικότητα στην απορρόφηση της θερμότητας προέρχεται από την έκθεση της επιφάνειας αυτής στις πιο υψηλές θερμοκρασίες και στην ακτινοβολία της φλόγας του καιόμενου καυσίμου.

5.6. Υπερθερμαντές Και Αναθερμαντές

Οι υπερθερμαντές και αναθερμαντές είναι συσκευές επιφάνειας και αποτελούνται από σύστημα αυλών, εσωτερικά των οποίων κυκλοφορεί ο ατμός. Σκοπός της ύπαρξης των υπερθερμαντών είναι η μετατροπή του κεκορεσμένου ατμού σε υπέρθερμο ατμό, με περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας και με σταθερή πίεση. Ο κεκορεσμένος ατμός μετά από τον ατμοθάλαμο διέρχεται μέσα από τους αυλούς των υπερθερμαντών όπου αρχικά εξατμίζεται η υγρασία που υπάρχει σ' αυτόν, μέχρις ότου γίνει ξηρός. Με την απόκτηση όμως, μεγαλύτερης θερμοκρασίας τελικά μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό.

Οι αναθερμαντές είναι και αυτοί συσκευές όπως και οι υπερθερμαντές αλλά μέσα από τους αυλούς των διέρχεται ατμός που έχει υποστεί μια πρώτη εκτόνωση στο στρόβιλο υψηλής πίεσης.

Σκοπός των αναθερμαντών είναι η ανύψωση της θερμοκρασίας του ατμού για δεύτερη φορά με σταθερή την πίεση. Η αύξηση της θερμοκρασίας του υπέρθερμου και ανάθερμου ατμού επιφέρει τα παρακάτω πλεονεκτήματα.

1. Εξάτμιση των σταγονιδίων που περιέχονται στον κεκορεσμένο ατμό.
2. Παρεμπόδιση των υγροποιήσεων του ατμού μέσα στους αγωγούς.
3. Αύξηση της ενθαλπίας του ατμού (θερμοχωρητικότητα) και κατά συνέπεια αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης.
4. Όταν έχει ο ατμός υψηλή θερμοκρασία η συμπύκνωση του μέσα στις τελευταίες βαθμίδες είναι πιο περιορισμένη και η διάβρωση που προκαλείται από την προσβολή των σταγονιδίων του νερού στα τελευταία περύγια, ελαττώνεται σημαντικά.

Σύμφωνα λοιπόν με τα πιο πάνω όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του υπέρθερμου ή ανάθερμου ατμού τόσο αυξάνει και ο βαθμός απόδοσης.

Όμως υπάρχουν ορισμένα όρια υπερθέρμανσης που δεν πρέπει να ξεπεραστούν διότι:

- Εάν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή κινδυνεύει η αντοχή των μετάλλων.
- Εάν η θερμοκρασία του ατμού φθάνει στους 550 °C περίπου υπάρχει η τάση να αποχωρίζεται από τον ατμό μια ποσότητα οξυγόνου, το οποίο ως γνωστόν οξειδώνει τις μεταλλικές επιφάνειες.

Σαν υλικό κατασκευής, ώστε να είναι ανθεκτικό για τις υψηλές θερμοκρασίες ατμού, χρησιμοποιούν τους οστενικούς χάλυβες με υψηλή περιεκτικότητα σε χρώμιο (Cr) 18 % περίπου και νικέλιο 8 % περίπου. Για χαμηλότερες θερμοκρασίες ατμού χρησιμοποιούν τους φερρετικούς χάλυβες, με μικρές ποσότητες χρωμίου, μολυβδενίου και βαναδίου.

Κατασκευή

Οι υπερθερμαντές αποτελούνται από φουρκέτες αυλών, τοποθετημένες σε παράλληλα στρώματα μεταξύ δύο συλλεκτών που βρίσκονται έξω από τη ροή των καυσαερίων. Οι αυλοί έχουν μια διάμετρο αρκετά περιορισμένη (εσωτερική διάμετρος από 27 μέχρι 45 mm) για να κυκλοφορεί ο ατμός με μεγάλη ταχύτητα (20 μέχρι 50 m/sec) ώστε να επιτευχθεί ένας υψηλός συντελεστής μετάδοσης ης θερμότητας και μια δραστική ψύξη του χάλυβα από τον ατμό.

Η κατασκευή των αναθερμαντών είναι ανάλογη με την κατασκευή των υπερθερμαντών. Κατά το πλείστον η μετάδοση θερμότητας σ' αυτούς γίνεται με επαφή. Εξ' άλλου επειδή ο ειδικός όγκος του ατμού είναι μεγαλύτερος οι αυλοί είναι κατασκευασμένοι με μεγαλύτερη διάμετρο. (εσωτερική διάμετρο από 45 μέχρι 63.5 mm).

Είδη Υπερθερμαντών

Όλοι οι υπερθερμαντές χρησιμοποιούν τη θερμότητα των καυσαερίων του λέβητα για την υπερθέρμανση, είναι δηλαδή συσκευές επιφάνειας όπου εσωτερικά των αυλών κυκλοφορεί ο ατμός που πρόκειται να υπερθερμανθεί.

Το σύστημα των υπερθερμαντών τοποθετείται μέσα στον θερμαντήρα του λέβητα, με τρόπο που να γίνεται η καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση ή μάλλον η κατανομή της θερμότητας μεταξύ λέβητα, υπερθερμαντή και προθερμαντή αέρα, αλλά και η επίτευξη του επιθυμητού βαθμού υπερθέρμανσης χωρίς όμως και να ερυθροπυρώνονται και να αχρηστεύονται οι αυλοί των υπερθερμαντών. Ανάλογα με τον τύπο του υπερθερμαντή και του λέβητα προβλέπεται και η διάταξη των υπερθερμαντών και του βαθμού υπερθέρμανσης που επιθυμούμαι.

Επειδή όμως, σε πολλές περιπτώσεις, ο βαθμός υπερθέρμανσης ξεπερνά το επιτρεπόμενο ή χρήσιμο όριο, υπάρχει ανάγκη ρύθμισης της υπερθέρμανσης με τεχνητά μέσα.

Τους υπερθερμαντές ανάλογα με τον τρόπο μετάδοσης της θερμότητας τους διακρίνουμε σε:

Υπερθερμαντές ακτινοβολίας

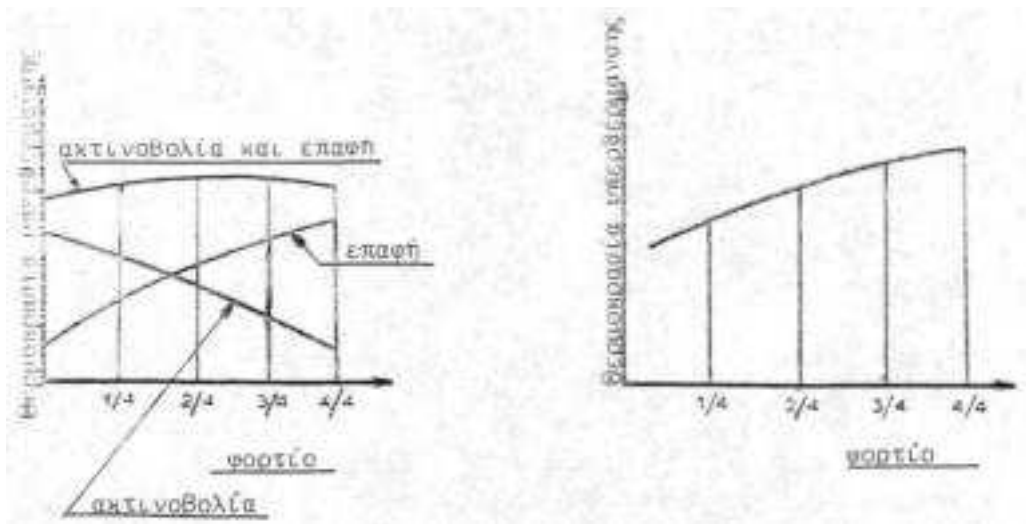
Οι υπερθερμαντές αυτοί είναι εκτεθειμένοι εξ' ολοκλήρου στην ακτινοβολία της εστίας. Ο υπερθερμαντής ακτινοβολίας με την επιφάνεια του εκτεθειμένη στην άμεση ακτινοβολία της φλόγας παρουσιάζει μείωση της θερμοκρασίας του ατμού, επειδή η αύξηση της μετάδοσης της θερμότητας με ακτινοβολία δεν παρακολουθεί την αύξηση του φορτίου, δηλαδή της ποσότητας του ατμού. Επειδή η ακτινοβολούμενη θερμότητα εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασιών μεταξύ καυσαερίων και επιφανειών, οι δε θερμοκρασίες ελάχιστα διαφέρουν για μικρό ή για μεγάλο βαθμό καύσης (ποσότητα καιόμενου καυσίμου ανά ώρα), μπορούμε να δεχθούμε ότι το ίδιο ποσό ακτινοβολούμενης θερμότητας απορροφάται πάντοτε ανεξάρτητα της ποσότητας καυσίμου που θα κάψουμε.

Υπερθερμαντές επαφής

Στους υπερθερμαντές αυτούς η μετάδοση της θερμότητας γίνεται με αγωγή, δηλαδή με την επαφή των θερμών καυσαερίων. Σε ότι αφορά τη μετάδοση της θερμότητας και την αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού σ' έναν υπερθερμαντή επαφής συμβαίνει το αντίθετο από ότι σ' έναν υπερθερμαντή ακτινοβολίας. Με την αύξηση του φορτίου, άρα και του καυσίμου αυξάνεται και η ταχύτητα των καυσαερίων αλλά και η ποσότητα αυτών και έτσι ευνοείται η μετάδοση της θερμότητας με αγωγή στη μεγαλύτερη ποσότητα του ατμού. Ο ιδανικός, λοιπόν, τρόπος για να επιτύχουμε μια θερμοκρασία υπέρθερμου, σχετικά σταθερή κατά τη

Λειτουργία του λέβητα είναι η συνεργασία ενός υπερθερμαντή με ακτινοβολία και ενός υπερθερμαντή με επαφή.

Τους υπερθερμαντές επαφής τους ονομάζουμε και υπερθερμαντές χαμηλής θερμοκρασίας ή πρωτεύοντες, τους δε ακτινοβολίας υπερθερμαντές υψηλής θερμοκρασίας ή δευτερεύοντες.



Εικόνα 5-2 : Μετάδοση Θερμότητας στους Υπερθερμαντές συναρτήσει του Φορτίου του Λέβητα

Αναθερμαντής

Όπως πιο πάνω αναφέρθηκε, ο αναθερμαντής, είναι κι αυτός ένας εναλλάκτης θερμότητας όπως και ο υπερθερμαντής. Σκοπός του αναθερμαντή είναι η αύξηση του βαθμού απόδοσης του όλου κυκλώματος της εγκατάστασης με την ενδιάμεση αναθέρμανση του ατμού.

Οι αναθερμαντές τοποθετούνται σε κατάλληλη ζώνη θερμοκρασιών, περισσότερο όμως σαν αναθερμαντές επαφής και όχι ακτινοβολίας.

Κατά την εκκίνηση του λέβητα ο αναθερμαντής δεν τροφοδοτείται με ατμό εκτός εάν υπάρχει διάταξη βραχυκυκλώματος. Αν, όμως, δεν έχει προβλεφθεί τέτοια διάταξη είναι απαραίτητο να απαλλαγεί ο αναθερμαντής από την ακτινοβολία της φλόγας, πράγμα που εξασφαλίζεται εάν τοποθετηθεί αρκετά μακριά από την εστία.

Επειδή ο ατμός που διαρρέει τον αναθερμαντή έχει χαμηλή πίεση, είναι δυνατό οι θερμοκρασίες των τοιχωμάτων να παρουσιασθούν σχετικά υψηλές, γιατί ο

εσωτερικός συντελεστής ψύξης ελαττώνεται όταν η πίεση του ρευστού ελαττώνεται, αφού βέβαια η ταχύτητα του ατμού παραμένει η ίδια.

5.7. Ελκυσμός Καυσαερίων

Για την καύση του καυσίμου απαιτείται παροχή ποσότητας αέρα στην εστία. Ελκυσμός, ονομάζεται η διοχέτευση αέρα και το δημιουργούμενο ρεύμα αυτού προς την καπνοδόχο.

Η παροχή αέρα για την καύση μπορεί να γίνει είτε με φυσικά μέσα, οπότε έχουμε τον φυσικό ελκυσμό, είτε με τεχνικά μέσα (I.D.F.), οπότε έχουμε τον τεχνητό ελκυσμό.

Η ποσότητα του αέρα που παρέχουμε είναι πάντοτε μεγαλύτερη από τη θεωρητική, η δε επιπλέον ποσότητα αέρα, ονομάζεται περίσσεια αέρα.

5.7.1. Φυσικός Ελκυσμός

Ο φυσικός ελκυσμός δημιουργείται λόγω της διαφοράς βάρους, η οποία υπάρχει μεταξύ δύο στηλών των ίδιων διαστάσεων, δηλαδή, μιας στήλης καυσαερίων με διατομή ίση με την διατομή της καπνοδόχου, ύψος ίσο με το ύψος της καπνοδόχου και μιας στήλης ατμοσφαιρικού αέρα με την αυτή διατομή και το ίδιο ύψος. Η διαφορά του βάρους οφείλεται στη διαφορά των θερμοκρασιών και μόνο, μια και το ειδικό βάρος των καυσαερίων σε συνηθισμένη θερμοκρασία, είναι μεγαλύτερο του ειδικού βάρους του αέρα.

Η στήλη των καυσαερίων, λόγω της ψηλής θερμοκρασίας αυτών, είναι ελαφρότερη από τη στήλη του αέρα. Έτσι υπάρχει διαφορά βάρους μεταξύ τους, η οποία και προκαλεί την κίνηση του αέρα μέσα από τον λέβητα. Δηλαδή τα καυσαέρια της καπνοδόχου, σαν ειδικά ελαφρύτερα, βγαίνουν στην ατμόσφαιρα και δημιουργούν έτσι ένα κενό. Το κενό αυτό αναπληρώνει ο ατμοσφαιρικός αέρας, ο οποίος αναγκάζεται να μπει στον λέβητα.

Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία των καυσαερίων, τόσο μικρότερο είναι το βάρος τους και συνεπώς, τόσο μεγαλύτερος ο ελκυσμός. Οι ψηλές όμως θερμοκρασίες των καυσαερίων, δημιουργούν θερμικές απώλειες. Για το λόγο αυτό και για οικονομική λειτουργία του λέβητα, προτιμάται η χαμηλή θερμοκρασία των καυσαερίων αντί του ισχυρού φυσικού ελκυσμού.

Αν όμως κατά την διαδρομή των καυσαερίων παρεμβάλλονται θερμαινόμενες επιφάνειες (όπως υπερθερμαντές, αναθερμαντές, οικονομητήρας, κλπ), τότε παρουσιάζεται μία αντίσταση στη ροή των καυσαερίων. Η αντίσταση αυτή οφείλεται στο ότι οι δίοδοι των καυσαερίων έγιναν στενότεροι, πράγμα που σημαίνει ότι θα πρέπει να αυξηθεί η ταχύτητα τους. Στις περιπτώσεις αυτές ο φυσικός ελκυσμός δεν ικανοποιεί και είμαστε υποχρεωμένοι να ενισχύσουμε τον ελκυσμό με τεχνητά μέσα (ανεμιστήρες ελκυσμού 'I.D.F.').

5.7.2. Τεχνητός Ελκυσμός

Σκοπός του τεχνητού ελκυσμού είναι η παροχή στην εστία μεγαλύτερης ποσότητας αέρα απ' όση με φυσικό ελκυσμό. Η είσοδος μεγαλύτερης ποσότητας αέρα στον λέβητα μας δίνει την ευκαιρία να καίμε μεγαλύτερες ποσότητες καυσίμων, και έτσι ώστε με αυτόν τον τρόπο να αυξάνει ο βαθμός καύσης. Μαζί δε μ' αυτόν και ο βαθμός ατμοπαραγωγής, επομένως επιτυγχάνουμε κατασκευή μηχανών με μεγαλύτερη ισχύ.

Ο τεχνητός ελκυσμός επιτυγχάνεται είτε με ενίσχυση του ρεύματος του εισερχόμενου αέρα, οπότε έχουμε τη μέθοδο της βεβιασμένης εισπνοής, είτε με ενίσχυση του ρεύματος των εξερχόμενων καυσαερίων, οπότε έχουμε την μέθοδο της βεβιασμένης εκπνοής.

Στη βεβιασμένη εισπνοή, καταθλίβεται αέρας με μεγαλύτερη πίεση από την ατμοσφαιρική, ενώ στη βεβιασμένη εκπνοή, αναρροφούνται καυσαέρια και έτσι ελαττώνεται η πίεση στο χώρο της εστίας.

Και στις δύο περιπτώσεις, αυξάνεται η διαφορά πίεσης μεταξύ αέρα και καυσαερίων, η οποία ονομάζεται πίεση ελκυσμού. Εκτός των δυο πιο πάνω μεθόδων γίνεται και συνδυασμός αυτών.

Πλεονεκτήματα τεχνητού ελκυσμού

Η χρήση τεχνητού ελκυσμού, ανεξάρτητα από το σκοπό της αύξησης του βαθμού απόδοσης της καύσης, συνδέεται με τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

1. Μικρότερο βάρος της εγκατάστασης, το οποίο οφείλεται στην μεγαλύτερη ποσότητα αέρα που παρέχουμε και τη δυνατότητα καύσης μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου, δηλαδή αύξηση στο βαθμό καύσης.

2. Μικρότερη κατανάλωση καυσίμου αφού αυξάνει η απόδοση του λέβητα. Η απόδοση αυξάνεται:
 - από την καλύτερη ανάμιξη του αέρα με το καύσιμο, κυρίως στα στερεά καύσιμα.
 - η καλύτερη ανάμιξη περιορίζει την περίσσεια αέρα που μας αυξάνει τις απώλειες.
 - με την καλύτερη ανάμιξη έχουμε καλύτερη καύση.
 - γιατί μπορούμε να χρησιμοποιούμε τα καυσαέρια για την προθέρμανση του αέρα καύσης.
3. Ευχέρεια γρήγορης προσαρμογής στις απαιτήσεις της ατμοπαραγωγής.
4. Ανεξαρτησία από τις καιρικές συνθήκες.
5. Ανεξαρτησία από την καπνοδόχο.

Τα μειονεκτήματα του τεχνητού ελκυσμού

1. Εξάρτηση της λειτουργίας του λέβητα από την καλή λειτουργία των ανεμιστήρων ελκυσμού.
2. Κόπωση του λέβητα, λόγω αναπτυσσόμενων ψηλών θερμοκρασιών και τάσεων από τις συστολές και τις διαστολές.

5.8. Προθερμαντήρες Αέρα Καύσης

Ο προθερμαντήρας αέρα είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας, με σκοπό την ανάκτηση ενός μέρους από τη θερμότητα που περιέχεται μέσα στα καυσαέρια. Πράγματι, τα καυσαέρια κατά την έξοδό τους από τον οικονομητήρα, έχουν μια θερμοκρασία περίπου 300°C και επομένως μπορούμε ακόμα να τα εκμεταλλευτούμε.

Οι προθερμαντήρες αέρα έχουν διπλό σκοπό.

1. Να πάρουν τη θερμότητα που περιέχουν ακόμη τα ζεστά καυσαέρια στην έξοδο τους από τους εναλλάκτες θερμότητας του νερού και του ατμού.

2. Να ανεβάσουν την θερμότητα του αέρα της καύσης, για να βελτιωθεί η καύση. Επιπλέον, στους λέβητες που καίνε κονιοποιημένο λιγνίτη, ο ζεστός αέρας χρησιμεύει για να στεγνώνει το κάρβουνο.

Η προθέρμανση του αέρα καύσης που απαιτείται για την καύση παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Ελαττώνει τις απώλειες θερμότητας από τα καυσαέρια
- Βελτιώνει το φαινόμενο της καύσης και δεν ψύχει την εστία

Η ανάκτηση όμως της θερμότητας από τα καυσαέρια δεν μπορεί να φθάσει σε μεγάλα όρια γιατί κινδυνεύουμε σοβαρά από τη διάβρωση. Πράγματι, η θερμοκρασία των καυσαερίων, δεν πρέπει να κατέβει κάτω από ένα ορισμένο όριο που λέγεται «θερμοκρασία δρόσου» και κυμαίνεται από 110 - 140 °C. Όταν η θερμοκρασία των καυσαερίων πέσει κάτω από αυτή την τιμή (110 - 140 °C), τότε το θεικό οξύ υγροποιείται και ως υγρό πλέον, προσβάλλει ισχυρά τις μεταλλικές επιφάνειες του προθερμαντή αέρα.

5.8.1. Τύποι Προθερμαντήρων Αέρα

Οι κυριότεροι τύποι προθερμαντήρων αέρα από αυτούς που υπάρχουν σήμερα, είναι οι ακόλουθοι:

1. Προθερμαντήρες αέρα φυλλωτοί με ελάσματα
2. Προθερμαντήρες αέρα αυλωτοί από σίδηρο ή μαντέμι
3. Προθερμαντήρες αέρα περιστρεφόμενοι ή εναλλασσόμενης ροής (τύπου LJUNGSTROM- ROTHEMUEHLE)

Προθερμαντήρες αέρα φυλλωτοί με ελάσματα

Αυτοί αποτελούνται από επίπεδα παράλληλα ελάσματα τα οποία απέχουν μεταξύ τους περίπου 20 mm. Μεταξύ των ελασμάτων κυκλοφορούν εναλλακτικά ο αέρας και τα καυσαέρια.

Προθερμαντήρες αέρα αυλωτοί

Οι προθερμαντήρες αυτοί αποτελούνται από αυλούς μέσα από τους οποίους διέρχονται τα καυσαέρια και εξωτερικά ο αέρας καύσης. Οι προθερμαντήρες αυτοί τοποθετούνται αμέσως μετά το λέβητα και η θερμαινόμενη επιφάνεια αυτών

καταλαμβάνει το 40 - 45% περίπου της συνολικής θερμαινόμενης επιφάνειας του λέβητα, ενώ απορροφούν το 10 % της συνολικής παρεχόμενης θερμότητας στο λέβητα.

Σαν βασικά μειονεκτήματα των προθερμαντών αυτών θα αναφέρουμε:

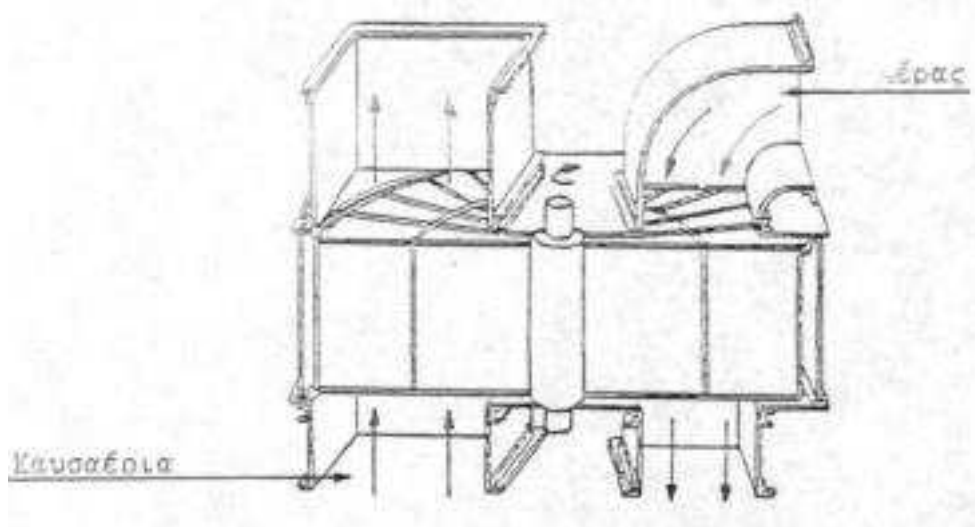
- Το μεγάλο κόστος κατασκευής
- Τη γρήγορη ρύπανση αυτών, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της μεταφοράς της θερμότητας από τα καυσαέρια προς τον αέρα και την παρεμπόδιση της ελεύθερης διέλευσης των καυσαερίων.

Προθερμαντήρες αέρα περιστροφικοί, εναλλασσόμενης ροής LJUNGSTROM (LUVO)

Ο περιστροφικός προθερμαντήρας αέρα «LJUNGSTROM» αποτελείται:

- από ένα ρότορα που περιλαμβάνει έναν κάθετο άξονα, γύρω από τον οποίο είναι στοιβαγμένα κατακόρυφα πολύ λεπτά ελάσματα, με μορφή κυματοειδή. Το στοίβαγμα των ελασμάτων γίνεται κατά τομείς. Ο ρότορας περιστρέφεται πολύ αργά, με μια ταχύτητα γύρω στις 3-4 στροφές το λεπτό. Οι τομείς αυτοί διέρχονται διαδοχικά μέσα στο χώρο των καυσαερίων και αέρα
- από ένα στάτη που περικλείει τον ρότορα και τους αγωγούς διέλευσης των καυσαερίων και του αέρα. Εξωτερικά ο ρότορας είναι μονωμένος προς αποφυγή απωλειών

Οι προθερμαντήρες αυτοί μπορεί να είναι οριζόντιοι ή κάθετοι ως προς την τοποθέτησή τους. Τα καυσαέρια διέρχονται από το μεγαλύτερο τμήμα του ρότορα (2/3) και ο αέρας από το 1/3 αλλά σε αντίθετη φορά. Οι επιφάνειες εναλλαγής της θερμότητας είναι πολύ μεγάλες στους προθερμαντήρες αυτούς γιατί και οι δύο πλευρές των ελασμάτων έρχονται σε επαφή με τα καυσαέρια αλλά και με τον αέρα που κυκλοφορεί.



Εικόνα 5-3 : Προθερμαντήρας Αέρα LUVO

Ιδιαίτερες προφυλάξεις απαιτούνται για να εξασφαλισθεί η καλύτερη δυνατή στεγανότητα μεταξύ των κυκλωμάτων αέρα και καυσαερίων. Λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ του αέρα και των καυσαερίων και καθώς ο αέρας είναι σε μεγαλύτερη, πίεση από τα καυσαέρια, υπάρχει μια συνεχής διαρροή αέρα μέσα στα καυσαέρια περίπου 4 % έως 8 %.

Η στεγανότητα αυτή εξασφαλίζεται κατά το δυνατό με τη διατήρηση ακτινικών και αξονικών διακένων, καθώς και με ειδικούς ανεμιστήρες οι οποίοι αναρροφούν τον αέρα καύσης που διαφεύγει προς τα καυσαέρια και τον καταθλίβει στο κύκλωμα του αέρα. Η περιστροφή των προθερμαντήρων αυτών πραγματοποιείται με ένα ή δύο ελαιοστροβίλους με αντίστοιχες αντλίες.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι για τον καθαρισμό της επιφάνειας των κυματοειδών ελασμάτων υπάρχουν συστήματα εκκαπνισμού με προσβολή αέρα ή ατμού.

Η θερμοκρασία του αέρα καύσης στην είσοδο του προθερμαντή κυμαίνεται από 30 - 50 °C και όχι χαμηλότερα, ενώ η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο φθάνει τους 290 - 330 °C.

Προθερμαντήρες Αέρα περιστροφικοί ROTHEMUMLE

Ο προθερμαντήρας αέρα ROTHEMUMLE, ως προς την αρχή λειτουργίας του, συγκρίνεται με τον προθερμαντήρα LJUNGSTROM. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι, τα στοιχεία μετάδοσης θερμότητας είναι σταθερά και αντίθετα. Μόνο το μέρος διόδου του αέρα περιστρέφεται και μάλιστα με ταχύτητα 1 στροφή ανά λεπτό.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του προθερμαντήρα, είναι συγκριτικά, τα ίδια με εκείνα του προθερμαντήρα LJUNGSTROM, δηλαδή:

- Η απλοποίηση του μηχανισμού κίνησης, εξαιτίας του βάρους του περιστρεφόμενου μέρους, που είναι τώρα σημαντικά μικρότερο.
- Η διατήρηση για μεγάλο χρονικό διάστημα της στεγανότητας των κυκλωμάτων του αέρα. Η εισαγωγή της ποσότητας του αέρα μέσα στον χώρο των καυσαερίων, αν και μπορεί εδώ να είναι λίγο περισσότερος από τον αντίστοιχο που υπάρχει στον προθερμαντήρα LJUNGSTROM, δεν αυξάνει με τον χρόνο λειτουργίας του μηχανήματος.
- Η δυνατότητα να τοποθετηθεί ο προθερμαντήρας αέρα ROTHEMUEHLE σε θέση κατακόρυφη, οριζόντια ή με μια οποιαδήποτε κλίση.
- Ο περιορισμένος κίνδυνος πυρκαγιάς.
- Η λιγότερη δαπανηρή συντήρηση.

5.8.2. Θερμοκρασία Καυσαερίων Στην Έξοδο Των Προθερμαντήρων

Ο προθερμαντήρας αέρα, είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας, με σκοπό την απορρόφηση ενός μέρους από την θερμότητα, που περιέχεται μέσα στα καυσαέρια. Πράγματι, τα καυσαέρια κατά την έξοδο τους από τον προθερμαντήρα νερού (οικονομητήρα), έχουν μια θερμοκρασία, της τάξης των 250 °C- 300 °C.

Η προθέρμανση του απαιτούμενου για τη καύση αέρα, παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Ελαττώνει τις απώλειες θερμότητας, η οποία χάνεται από τα καυσαέρια στην καπνοδόχο.
- Βελτιώνει τα φαινόμενα της καύσης, όπως π.χ. διευκολύνει την προξήρανση του καυσίμου στο μύλο και στην ανάπτυξη των πτητικών.

Η απορρόφηση της θερμότητας, δεν μπορεί να φθάσει σε μεγάλα όρια, χωρίς να διακινδυνεύσουμε σοβαρά από την διάβρωση. Πράγματι η θερμοκρασία των καυσαερίων δεν πρέπει να κατέβει κάτω από μια ορισμένη τιμή, που λέγεται 'θερμοκρασία δρόσου', και εξαρτάται από τη φύση του χρησιμοποιούμενου καυσίμου και την περίσσεια του αέρα της καύσης. Η 'θερμοκρασία δρόσου', είναι

αυτή που αντιστοιχεί στην εμφάνιση συμπυκνώσεων μέσα στα καυσαέρια και κυμαίνεται μεταξύ 110 °C και 150 °C.

Έτσι μόλις εμφανιστούν συμπυκνώσεις, δημιουργούνται οξέα τα οποία προσβάλουν τις μεταλλικές επιφάνειες. Το φαινόμενο αυτό της διάβρωσης είναι περισσότερο επικίνδυνο, όσο τα καύσιμα που χρησιμοποιούμε είναι πιο πλούσια σε θείο (όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο).

5.9. Τα Κυκλώματα Του Λέβητα

Σε κάθε λέβητα υπάρχουν τρία ανεξάρτητα μεταξύ τους κυκλώματα:

- Το κύκλωμα Αέρα - Καυσαέριων,
- Το κύκλωμα Νερού - Ατμού και
- Το κύκλωμα Καυσίμου.

5.9.1. Το Κύκλωμα Αέρα Καύσης - Καυσαερίων.

Ο αέρας που χρησιμεύει για την καύση στον λέβητα, παίρνεται από την ατμόσφαιρα και αποστέλλεται μέσα στον χώρο της εστίας με τους ανεμιστήρες κατάθλιψης (F.D.F.). Οι ανεμιστήρες αυτοί καταθλίβουν τον αέρα μέσα στους προθερμαντήρες αέρα.

Στην έξοδο των προθερμαντήρων αέρα, ο ζεστός αέρας της καύσης, έχει έναν ειδικό ρόλο. Καθώς συνοδεύει το χρησιμοποιούμενο καύσιμο, καταθλίβεται μέσα στο χώρο της εστίας (θάλαμος καύσης) κατά διαφορετικούς τρόπους.

- Ένα μέρος απ' αυτόν, μαζί με το καύσιμο σαν μίγμα, περνά μέσα από τους καυστήρες και, λέγεται πρωτεύων αέρας.
- Ένα άλλο μέρος από τους καυστήρες από διαφράγματα και, λέγεται δευτερεύων αέρας.

Στην περίπτωση του κονιορτοποιημένου λιγνίτη, ο πρωτεύων αέρας χρησιμεύει (βοηθάει) επίσης για την μεταφορά του καυσίμου προς τους καυστήρες.

Μέσα στον θάλαμο καύσης το οξυγόνο του αέρα ενώνεται με το καύσιμο και παράγεται θερμότητα και καυσαέρια. Εδώ ακριβώς απελευθερώνεται όλη η θερμική ενέργεια του καυσίμου, γι' αυτό και ο θάλαμος καύσης (εστία) είναι η πιο

ζεστή περιοχή του λέβητα. Στους περισσότερους λέβητες που είναι σήμερα σε χρήση, ο θάλαμος καύσης είναι ντυμένος εσωτερικά σε όλη του την επιφάνεια, με κατακόρυφους αυλούς. Αυτές οι επενδύσεις με αυλούς λέγονται υδρότοιχοι ατμοποίησης. Από τον θάλαμο καύσης τα καυσαέρια προχωρούν προς μεγάλα ανοίγματα, μέσα στα οποία είναι τοποθετημένοι οι εναλλάκτες θερμότητας. Μέσα από τους αυλούς του κάθε εναλλάκτη, περνάει το νερό ή ο ατμός. Στην επαφή τους με τους εναλλάκτες θερμότητας, τα καυσαέρια δίνουν ένα μεγάλο μέρος από την θερμότητά τους που διοχετεύεται στο νερό και στον ατμό. Έτσι, η θερμοκρασία των καυσαερίων ελαττώνεται και αντίστοιχα αυξάνει η θερμοκρασία του νερού και του ατμού. Η θερμοκρασία των καυσαερίων ελαττώνεται ακόμη περισσότερο, όταν κατά την έξοδό τους, έλθουν σε επαφή με τον προθερμαντήρα νερού (οικονομητήρας - economizer) που τροφοδοτεί με ζεστό νερό τους υδρότοιχους ατμοποίησης. Για να αποδώσουν τα καυσαέρια το μεγαλύτερο κατά το δυνατόν ποσό της θερμότητάς τους, διέρχονται από έναν τελευταίο εναλλάκτη τον προθερμαντήρα αέρα, που βρίσκεται τοποθετημένος αρκετά μετά από τον τελευταίο εναλλάκτη νερού - ατμού. Στη συνέχεια τα καυσαέρια εισέρχονται μέσα στους διαχωριστές τέφρας (ηλεκτροστατικά φίλτρα - E.S.P.), όπου απαλλάσσονται από τα στερεά μόριά τους (ιπτάμενη τέφρα) και τέλος οδηγούνται στην ατμόσφαιρα, διά μέσου της καμινάδας.

Όταν ο φυσικός ελκυσμός της καμινάδας δεν είναι αρκετός, για να εξασφαλίσει την κυκλοφορία των καυσαερίων από το θάλαμο καύσης μέχρι την ατμόσφαιρα, προβλέπεται η εγκατάσταση ανεμιστήρων αναρρόφησης (I.D.F.) ,στη βάση της καμινάδας. Τότε, όλο το κύκλωμα των καυσαερίων, διατηρείται σε μια υποπίεση. Μια ελαφριά υποπίεση διατηρείται επίσης, κατά γενικό κανόνα, μέσα στο θάλαμο καύσης. Η υποπίεση αυξάνει συνεχώς όσο απομακρυνόμαστε από τον θάλαμο καύσης και πλησιάζουμε στην αναρρόφηση του ανεμιστήρα αναρρόφησης. Για να αποφύγουμε την φθορά των ανεμιστήρων αναρρόφησης από την τέφρα των καυσαερίων, τους τοποθετούμε μετά τους διαχωριστές τέφρας.

5.9.2. Το Κύκλωμα Νερού - Ατμού.

Ο ειδικός σκοπός του λέβητα, είναι η παραγωγή του ατμού. Θα δούμε αμέσως, παίρνοντας για παράδειγμα έναν κλασικό τύπο λέβητα, ποια είναι τα μέρη του εκείνα, που χρησιμεύουν ακριβώς για την παραγωγή του ατμού.

Γενικά, τα μέρη που συνθέτουν το κύκλωμα Νερού - Ατμού είναι τα ακόλουθα:

- Ο οικονομητήρας που θερμαίνει το νερό τροφοδότησης του λέβητα.
- Ο ατμοϋδροθάλαμος (τύμπανο ή διαχωριστής) είναι η δεξαμενή νερού του λέβητα που μαζί με τους υδρότοιχους ατμοποίησης αποτελούν το σύνολο των μερών που παράγουν τον ατμό.
- Οι υπερθερμαντές: Ο ρόλος τους είναι να ανεβάσουν την θερμοκρασία του ατμού μόλις αυτός παράγεται και να εμπλουτίσουν τις θερμίδες του, και γενικά να αυξήσουν το θερμικό δυναμικό του. Διακρίνουμε πρώτα τον πρωτεύοντα υπερθερμαντή και μετά τον δευτερεύοντα ή και τον τριτεύοντα υπερθερμαντή, από την έξοδο του οποίου ο ατμός τροφοδοτεί το στροφέιο υψηλής πίεσης του στροβίλου.
- Οι αναθερμαντές: Λαμβάνουν τον ατμό από την έξοδο του στροφείου υψηλής πίεσης του στροβίλου, μετά από μερική αποτόνωση και ανεβάζουν τη μειωμένη θερμοκρασία του. Από την έξοδο του αναθερμαντή, ο ατμός τροφοδοτεί το στροφέιο μέσης πίεσης του στροβίλου.

Όλα αυτά τα μέρη που αναφέρθηκαν αποτελούνται από συλλέκτες εισόδου και εξόδου, που ενώνονται μεταξύ τους με μια δέσμη αυλών. Μέσα στους αυλούς κυκλοφορεί το νερό ή ο ατμός.

Η θέση τους μέσα στο κύκλωμα των καυσαερίων διαφέρει λίγο ανάλογα με τον τύπο του λέβητα.

5.9.3. Το Κύκλωμα Καυσίμου.

Σαν βασικά καύσιμα των λεβήτων οι περισσότεροι Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα χρησιμοποιούν τον κονιοποιημένο λιγνίτη. Εκτός όμως από τον λιγνίτη χρησιμοποιείται και το πετρέλαιο είτε σαν βασικό καύσιμο (λέβητες πετρελαίου) είτε σαν δευτερεύον καύσιμο στους λέβητες γαιανθράκων.

Τα μέρη τα οποία συνθέτουν το σύστημα καύσης ενός λέβητα με κονιοποιημένο λιγνίτη είναι:

- Ο μύλος: Ο ρόλος του οποίου είναι αφ' ενός μεν η κονιοποίηση του λιγνίτη και αφ' ετέρου η κατάθλιψη αυτού στον καυστήρα.

- Ο διαχωριστής: Ο σκοπός του διαχωριστή είναι να διαχωρίζει τον κονιοποιημένο λιγνίτη στην κατάθλιψη του μύλου και να επιστρέφουν τα πιο χοντρά κομμάτια και πάλι στο μύλο για άλεσμα.
- Ο καυστήρας: Έχει σκοπό να προξενήσει και να διατηρήσει την καύση του καυσίμου και να εξασφαλίσει ένα εντελώς ομοιογενές μείγμα του καυσίμου με τον αέρα καύσης.

Η τροφοδότηση των μύλων με ακατέργαστο λιγνίτη γίνεται από τους τροφοδότες, με την ενέργεια της βαρύτητας. Οι τροφοδότες, είναι μεταλλικές ταινίες οι οποίες μεταφέρουν το κάρβουνο από τα σιλό που βρίσκονται πάνω από αυτούς, με ρυθμιζόμενες τις στροφές και οι οποίες εξαρτώνται από την ατμοπαραγωγή και τη θερμογόνο δύναμη του λιγνίτη.

Εκτός όμως του λιγνίτη όπως προαναφέρθηκε υπάρχει και το πετρέλαιο σαν δευτερεύων καύσιμο.

Στο σύστημα λοιπόν πετρελαίου τα κύρια μέρη είναι:

- Η δεξαμενή για την αποθήκευση του πετρελαίου
- Η αντλία που σκοπό έχει την αναρρόφηση του πετρελαίου από τη δεξαμενή και την κατάθλιψη αυτού με πίεση στους καυστήρες λιγνίτη.
- Ο καυστήρας: Ο ρόλος του οποίου είναι να προετοιμάσει το καύσιμο ώστε, να περάσει από την υγρή μορφή στη μορφή των ατμών, είτε κατ' ευθείαν (με καυστήρα ατμοποίησης) είτε πρώτα από ένα ενδιάμεσο στάδιο, το στάδιο της διασκόρπισης (καυστήρας ψεκασμού). Επιπλέον ο καυστήρας πρέπει να δημιουργεί το μίγμα αέρα - πετρελαίου κατά τρόπο, όσο το δυνατό ομοιογενή σε τέτοια αναλογία που να αντιστοιχεί στην επίτευξη της καλύτερης δυνατής καύσης

6. Ο ΑΤΜΟΠΑΡΑΓΩΓΟΣ ΩΣ ΜΕΣΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Για να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας στο λέβητα, θα γίνει περιγραφή των βασικών λειτουργιών που συμβαίνουν σ' αυτόν.

1. Καύση του καυσίμου γίνεται σ' ένα χώρο κλειστό που λέγεται εστία. Εκεί το καύσιμο το οποίο μπορεί να είναι γαιάνθρακας, πετρέλαιο ή αέριο καύσιμο, ενώνεται με το οξυγόνο, καίγεται και αποδίδει την θερμότητα που υπάρχει μέσα σ' αυτό.
2. Μετάδοση της θερμότητας από την καύση στο νερό. Η θερμότητα καύσης μεταδίδεται με τους τρεις γνωστούς τρόπους (αγωγιμότητα, μεταφορά, ακτινοβολία), στα τοιχώματα του λέβητα και από εκεί στο νερό, το οποίο απορροφά την θερμότητα και εξατμίζεται.
3. Κυκλοφορία νερού και ατμού. Εάν θερμανθεί ο κεκορεσμένος ατμός, θα γίνει υπέρθερμος και εάν αυτό συνεχισθεί, είναι δυνατό η θερμοκρασία να αυξηθεί τόσο, ώστε να καεί ή να λιώσει το δοχείο που περιέχει τον ατμό. Για να αποφύγουμε το λιώσιμο του μετάλλου είναι απαραίτητο να υπάρχει συνεχής κυκλοφορία νερού και ατμού. Για την περίπτωση λεβήτων που διαθέτουν υπερθερμαντήρα για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού, πρέπει να κυκλοφορεί μέσα σ' αυτόν ατμός κατά τον χρόνο που τα τοιχώματα του δέχονται την θερμότητα από τις φλόγες ή τα καυσαέρια.

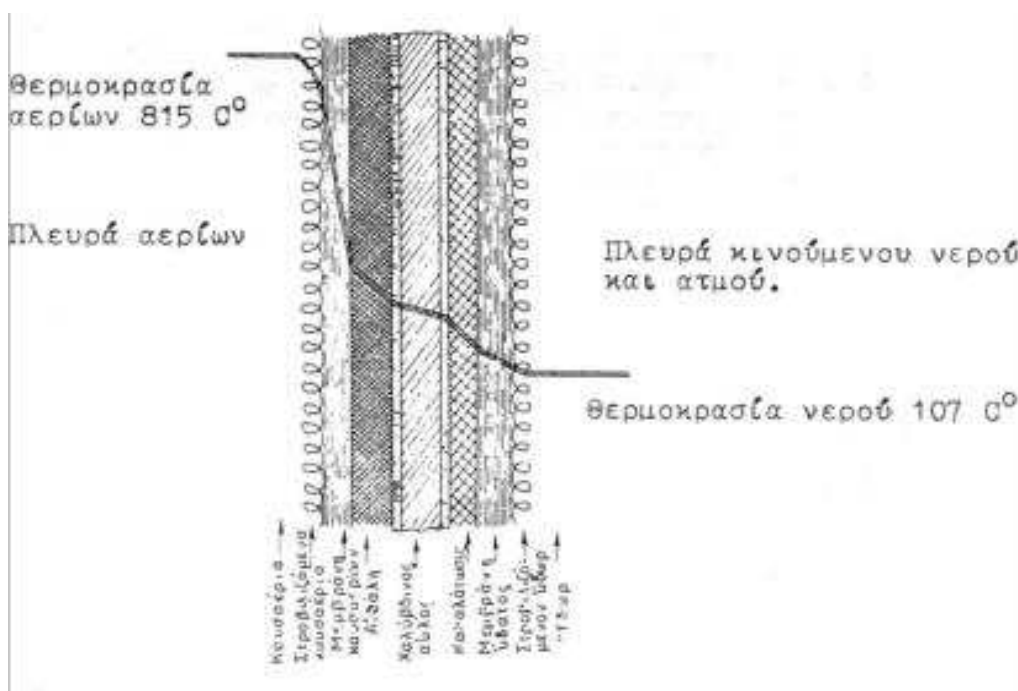
Η παροχή του τροφοδοτικού νερού γίνεται με μία αντλία η οποία ονομάζεται τροφοδοτική αντλία. Η κυκλοφορία του νερού μέσα στο λέβητα εξαρτάται από την διάταξη των αυλών και από την κατηγορία του λέβητα (φυσικής κυκλοφορίας - τεχνητής κυκλοφορίας). Η κυκλοφορία του ατμού εξαρτάται κυρίως από την διάταξη της ατμοπαραγωγού θερμαινόμενης επιφάνειάς του.

6.1. Η μετάδοση της θερμότητας στους αυλούς νερού και ατμού

Τα καυσαέρια της εστίας αφού μεταδώσουν μερική από τη θερμότητα τους στις θερμαινόμενες επιφάνειες με ακτινοβολία, λόγω της ελαφρότητας τους, ανέρχονται προς τα ανώτερα σημεία του λέβητα, όπου δίνουν θερμότητα στους υπερθερμαντές, οικονομητήρα και προθερμαντήρες αέρα, με επαφή.

Στην πραγματικότητα, η μετάδοση της θερμότητας γίνεται σε συνδυασμό μεταφοράς και αγωγής και είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αερίων και δεχόμενης επιφάνειας. Επίσης και η ταχύτητα ροής είναι μεγαλύτερη.

Η μετάδοση της θερμότητας με αγωγιμότητα από την πλευρά των καυσαερίων στο έλασμα και από εκεί στο νερό και στον ατμό με την άλλη πλευρά φαίνεται διαγραμματικά στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6-1 : Μετάδοση Θερμότητας στους Αυλούς του Ατμοπαραγωγού

6.2. Ανύψωση της θερμοκρασίας του μετάλλου της θερμαινόμενης επιφάνειας

Τα αναγραφόμενα στην προηγούμενη παράγραφο, μας δείχνουν αρκετά καθαρά, ότι η θερμότητα συναντά πολλές αντιστάσεις μέσα στο λέβητα μέχρι να μεταδοθεί στο νερό.

Από τις αντιστάσεις αυτές, άλλες, όπως η βραδεία κυκλοφορία των αερίων και η τέφρα, εμποδίζουν την είσοδο της θερμότητας στο μέταλλο και άλλες όπως οι καθαλατώσεις, καθώς και η βραδεία κυκλοφορία του νερού μέσα στο λέβητα, εμποδίζουν την έξοδο της θερμότητας προς το νερό.

Οι αντιστάσεις εκείνες που εμποδίζουν την είσοδο της θερμότητας έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια της θερμότητας εκείνης, η οποία λόγω των αντιστάσεων δεν πρόφθασε να περάσει στο μέταλλο και παρασύρθηκε από τα καυσαέρια μέσω της καπνοδόχου προς την ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης.

Οι αντιστάσεις όμως που εμποδίζουν την έξοδο της θερμότητας από το μέταλλο προς το νερό, εκτός από την απώλεια της θερμότητας, έχουν σαν αποτέλεσμα την συγκέντρωση θερμότητας μέσα στο μέταλλο και την υπερθέρμανση του, η οποία σε περίπτωση έντονης ατμοπαραγωγής μπορεί να επιφέρει και την ερυθροπύρωση ακόμη του μετάλλου, οπότε η αντοχή του μειώνεται και υπάρχει κίνδυνος διαρροής.

Γι' αυτό οι καθαλατώσεις των θερμαινόμενων επιφανειών πρέπει να αφαιρούνται πριν αποκτήσουν αρκετό πάχος. Είναι δε προτιμότερο να γίνεται κατάλληλη επεξεργασία του τροφοδοτικού νερού ώστε να αποφεύγονται τελείως οι καθαλατώσεις.

Αλλά και η μικρή ταχύτητα κυκλοφορίας του νερού δημιουργεί στάσιμο στρώμα νερού σε επαφή με τους αυλούς, το οποίο εμποδίζει τη μετάδοση της θερμότητας, πάντως όμως σε μικρότερη κλίμακα από τις καθαλατώσεις.

Έτσι λοιπόν, συμπεραίνουμε ότι για να επιτύχουμε την μεγαλύτερη μετάδοση θερμότητας και επομένως καλή απόδοση του λέβητα πρέπει:

1. Οι θερμαινόμενες επιφάνειες να διατηρούνται καθαρές εσωτερικά και εξωτερικά κατά το δυνατό. Αυτό εξαρτάται και επιτυγχάνεται με συχνούς εκκαπνισμούς και με χρησιμοποίηση αφαλατωμένου νερού ή με κατάλληλη επεξεργασία αυτού κατά την λειτουργία ώστε να αποφεύγεται ο σχηματισμός καθαλατώσεων.
2. Να περιορισθεί το πάχος των στάσιμων στρωμάτων αερίου και νερού στο ελάχιστο. Αυτό επιτυγχάνεται από τους κατασκευαστές λεβήτων με αύξηση της ταχύτητας ροής των αερίων της καύσης και της κυκλοφορίας νερού και ατμού με κατάλληλο υπολογισμό του λέβητα. Η αύξηση της ταχύτητας ροής προκαλεί ελάττωση του πάχους του στάσιμου στρώματος αερίου. Είναι μάλιστα δυνατό, για μεγάλη αύξηση της ταχύτητας ροής, το πάχος στάσιμων αερίων να ελαττωθεί τόσο πολύ, ώστε το παράπλευρο στρώμα στροβιλισμών να το σπάσει τελείως οπότε η αντίσταση αυτή μηδενίζεται και η μετάδοση αυξάνεται σημαντικά.

Ένα δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι η έκταση της θερμαινόμενης επιφάνειας, αλλά κύριως η σχετική θέση και διάταξη αυτής ως προς την θερμαντική πηγή και το νερό, έχουν άμεση επίδραση στην ατμοπαραγωγική ικανότητα του λέβητα και του βαθμού απόδοσης αυτού.

Όστε:

1. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμαινόμενη επιφάνεια του λέβητα και όσο ταχύτερη είναι η κυκλοφορία του νερού και των καυσαερίων, τόσο μεγαλύτερο ποσό θερμότητας απορροφάται και μεταδίδεται στο νερό και επομένως τόσο μεγαλύτερη θα είναι η ατμοπαραγωγική ικανότητα του λέβητα. Σ' αυτό βασίζονται και ο λέβητας τεχνικής κυκλοφορίας.
2. Η απορροφούμενη θερμότητα με ακτινοβολία είναι πολύ μεγαλύτερη από την απορροφούμενη με αγωγιμότητα. Σ' αυτό οφείλεται η χρησιμοποίηση λεβήτων των οποίων το μεγαλύτερο μέρος της θερμαινόμενης επιφάνειας των ατμογώνων αυλών δέχεται την θερμότητα ακτινοβολίας.
3. Μεγαλύτερα ποσά θερμότητας απορροφούν εκείνα τα σημεία των θερμαινόμενων επιφανειών στα οποία τα καυσαέρια φθάνουν με μεγαλύτερη θερμοκρασία. Όσο μειώνεται η θερμοκρασία τους, τόσο μειώνεται και η μεταδιδόμενη θερμότητα.

6.3. Διάταξη θερμαινόμενης επιφάνειας του λέβητα

Στις αρχικές μελέτες ο λέβητας ήταν ένα απλό δοχείο με αγωγό τροφοδότησης με νερό και με αγωγό εξαγωγής του παραγόμενου ατμού. Το καύσιμο καιγόταν επάνω σε σχάρα και η φλόγα και τα προϊόντα της καύσης του 'χτυπούσαν' μόνο στην κάτω επιφάνεια του λέβητα. Οι μελετητές των λεβήτων όμως, διαπίστωσαν ότι η ατμοποίηση του νερού σ' ένα τέτοιο λέβητα, δεν είναι καθόλου αποδοτική. Γι' αυτό θεώρησαν απαραίτητο να φέρουν σε θέρμανση, περισσότερη επιφάνεια νερού.

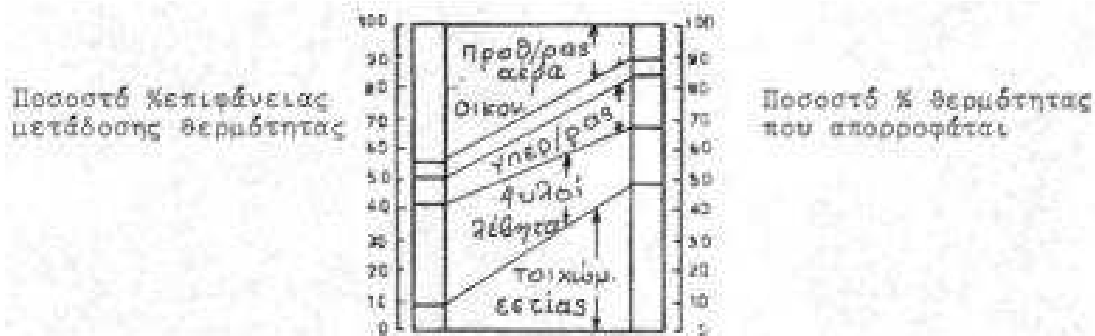
Έτσι κατασκευάστηκαν οι φλογαυλωτοί λέβητες όπου τα προϊόντα της καύσης διέρχονται μέσα από αυλούς που διαπερνούν το δοχείο - λέβητα. Τέτοια φλογαυλωτή κατασκευή όχι μόνο αυξάνει την επιφάνεια μετάδοσης της θερμότητας προς το νερό, αλλά τείνει επίσης να διασκορπίσει το σχηματισμό του ατμού περισσότερο ομοιόμορφα διαμέσου της μάζας του νερού.

Σε αντίθεση με τον φλογαυλωτό λέβητα, ο υδραυλικός που αναπτύχθηκε αργότερα, απαρτίζεται κυρίως από πλήθος αυλών ατμοποίησης στους οποίους κυκλοφορεί μείγμα νερού και ατμού, και από ένα τύμπανο (ατμοϋδροθάλαμος) όπου γίνεται ο διαχωρισμός του ατμού από το νερό. Η κατασκευή των υδραυλωτών λεβήτων έκανε δυνατή την ατμοπαραγωγή σε μεγάλες ποσότητες, πίεσης και θερμοκρασίας.

Το μέγεθος της θερμαινόμενης επιφάνειας και ο τρόπος με τον οποίο αυτή τοποθετείται στην εστία του λέβητα επιδρά πολύ στην ατμοπαραγωγή και στην απόδοση του, που σε γενικές γραμμές είναι ο λόγος της απορροφημένης θερμότητας από το ρευστό (νερό και ατμό), προς την θερμότητα που παρέχεται στην εστία του λέβητα. Οι επιδράσεις της μεταβολής του μεγέθους της επιφάνειας όπως και της διάταξης της, μπορούν να φανούν καθαρά σ' έναν απλό υδραυλικό λέβητα.

Ας φαντασθούμε ένα λέβητα ορισμένου πλάτους με διαδοχικές σειρές ευθύγραμμων αυλών εκτεθειμένων στα προϊόντα καύσης που μεταδίδουν θερμότητα. Αν οι σειρές των αυλών είναι, τρεις και η θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο της πρώτης είναι 1500 °C, στην έξοδο της τρίτης σειράς ενδέχεται να είναι 1000 °C, δηλαδή μικρότερη λόγω της θερμότητας που απορροφήθηκε από το ρευστό των αυλών. Στην είσοδο τώρα μιας δεύτερης παρόμοιας ομάδας αυλών, η θερμοκρασία των καυσαερίων θα είναι 1000 °C και επομένως θα είναι μικρότερη η θερμότητα που θα απορροφηθεί από το ρευστό των αυλών αυτών. Έτσι το ίδιο θα συνέβαινε με κάθε όμοια διαδοχική ομάδα αυλών όπου η θερμότητα που θα απορροφάται από το ρευστό των αυλών, θα είναι σχετικά μικρότερη της προηγούμενης.

Στον προηγούμενο λέβητα, κάθε επιπρόσθετη ομάδα αυλών αυξάνει, την ποσότητα της θερμότητας που συνολικά απορροφάται. Επομένως, αυξάνει την ικανότητα και την απόδοση του λέβητα. Είναι όμως βέβαιο ότι σε κάποιο σημείο, η δαπάνη της προστιθέμενης επιφάνειας αυλών είναι μεγαλύτερη από το κέρδος της θερμότητας που απορροφάται. Επιπλέον, καθώς τα καυσαέρια είναι πιο κρύα, η διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού (νερό - ατμός) και των καυσαερίων είναι τόσο μικρή, ώστε να τίθεται επί πλέον ένα όριο στην προσπάθεια να αυξηθεί η απόδοση του λέβητα, με πρόσθετη επιφάνεια απορρόφησης της θερμότητας.



Εικόνα 6-2 : Κατανομή Μεταφερόμενης Θερμότητας στα Επιμέρους Στοιχεία του Ατμοπαραγωγού

Μια σύγχρονη μονάδα ατμοπαραγωγής έχει την εστία της 'περικυκλωμένη' με μεγάλες επιφάνειες θερμότητας. Όπως φαίνεται στην εικόνα τα υδροτοιχώματα παρότι είναι το 9% της συνολικής θερμαινόμενης επιφάνειας υπολογίζεται ότι απορροφούν το 48% (σχεδόν το μισό) της συνολικής θερμότητας. Η μεγάλη αυτή αποδοτικότητα στην απορρόφηση της θερμότητας προξενείτε από την έκθεση της επιφάνειας αυτής στις πιο ψηλές θερμοκρασίες και στην ακτινοβολία της φλόγας του καιγόμενου καυσίμου.

Ο υπερθερμαντήρας που βρίσκεται στο πάνω μέρος της εστίας, δέχεται την επίδραση της ακτινοβολίας, αλλά και την θερμοκρασία των καυσαερίων που είναι ακόμη πολύ ψηλά. Αυτός κατέχει το 9% της συνολικής θερμαινόμενης επιφάνειας, αλλά η θερμότητα που απορροφά είναι 16%.

Στο πίσω μέρος του υπερθερμαντήρα και προς τον οικονομητήρα είναι η επιφάνεια του λέβητα που θερμαίνεται κυρίως με επαφή. Στην περιοχή αυτή τα καυσαέρια έχουν χαμηλή θερμοκρασία, η δε επιφάνεια φθάνει το 33% της συνολικής θερμαινόμενης επιφάνειας, αλλά η θερμότητα που απορροφά είναι 20%. Από τη θερμότητα των καυσαερίων που εξέρχονται του κυρίως λέβητα είναι δυνατό να ανακτηθεί ένα μεγάλο ποσοστό της. Αυτό επιτυγχάνεται με τον οικονομητήρα του οποίου η επιφάνεια είναι το 6% της συνολικής θερμαινόμενης επιφάνειας και υπολογίζεται ότι απορροφά το 6% της συνολικής θερμότητας.

Τέλος για την ανάκτηση πρόσθετης θερμότητας από τα καυσαέρια που εξέρχονται από τον οικονομητήρα, προβλέπεται μια μετάδοση θερμότητας στον αέρα καύσης με τους προθερμαντήρες αέρα. Η επιφάνεια του προθερμαντήρα είναι πολύ μεγάλη (43%) λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας των καυσαερίων, η δε απορροφούμενη θερμότητα φθάνει το 10% περίπου της συνολικής θερμότητας. Ευνόητο είναι ότι με

την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα καύσης στον προθερμαντήρα αέρα, ελαττώνεται η ποσότητα του καυσίμου που απαιτείται για να δώσει μια δεδομένη ποσότητα θερμότητας στην εστία.

6.4. Απώλειες στον ατμοπαραγωγό

Τα διάφορα φαινόμενα μετατροπής της ενέργειας, από την χημική μορφή αυτής όπως παρουσιάζεται στα καύσιμα, μέχρι την ηλεκτρική ενέργεια στους ακροδέκτες της γεννήτριας σύμφωνα με το δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα, είναι στενά συνδεδεμένα με απώλειες. Παρακάτω γίνεται αναφορά μόνο για τις απώλειες του ατμοπαραγωγού.

Απώλειες λόγω ακαύστων στην τέφρα. Η απώλεια αυτή ενδιαφέρει κυρίως τα στερεά καύσιμα και οφείλεται στο γεγονός ότι κομμάτια του καυσίμου πέφτουν άκαυστα, αναμεμιγμένα με τέφρα και σκωρίες (slag) στο χώρο της τεφρολεκάνης. Οι απώλειες αυτές είναι περίπου 3 %.

Απώλειες λόγω θερμών καυσαερίων. Η απώλεια αυτή είναι η σημαντικότερη όλων και οφείλεται στην ψηλή θερμοκρασία με την οποία εξέρχονται τα καυσαέρια στην ατμόσφαιρα. Ένα μεγάλο ποσό θερμότητας παραμένει αχρησιμοποίητο και αυτό γιατί δεν είναι δυνατό να ψύξουμε τα καυσαέρια μέχρι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, ώστε να έχουμε πλήρη εκμετάλλευση της θερμότητας.

Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων, εξαρτάται από την ποιότητα του καυσίμου και από το είδος του ελκυσμού. Δηλαδή, τα καυσαέρια με φυσικό ελκυσμό εξέρχονται με μια θερμοκρασία περίπου 180 °C και άνω.

Ένας άλλος λόγος που αυξάνει την απώλεια αυτή, είναι και η ποσότητα του αέρα καύσης που χρησιμοποιούμε όταν αυτή είναι μεγαλύτερη του κανονικού.

Απώλειες λόγω ακτινοβολίας και αγωγιμότητας. Η απώλεια αυτή οφείλεται στη μετάδοση μέρους της αναπτυσσόμενης θερμότητας, τόσο με ακτινοβολία, όσο και με αγωγή, στα τοιχώματα της εστίας και από εκεί στο περιβάλλον. Η απώλεια αυτή γενικά δε μετριέται.

Απώλειες λόγω ακαύστων αερίων. Αυτή οφείλεται στην ατελή καύση, δηλαδή στην ύπαρξη μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου ή υδρογονάνθρακα μέσα στα εξερχόμενα καυσαέρια.

Η απώλεια αυτή για τα συνήθη καύσιμα είναι περίπου 1-2%.

Ο βαθμός απόδοσης του ατμοπαραγωγού είναι $\eta_k = 0,85 - 0,95$.

7. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΕΦΡΑΣ

Οι ορυκτοί άνθρακες προέρχονται από συσσώρευση φυτικής ύλης, που καλύφθηκε και συμπιέστηκε από διάφορα ορυκτά στρώματα. Η διεργασία της ανθρακοποίησης (coalification) διήρκεσε χιλιάδες χρόνια και είχε σαν αποτέλεσμα την σταδιακή απομάκρυνση του οξυγόνου και συνεπώς την σταδιακή αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα. Ο χρόνος σχηματισμού κυμαίνεται από 300.000.000 χρόνια ως και λιγότερο από 20.000 για τα κοιτάσματα τύρφης. Τα Ελληνικά λιγνιτικά κοιτάσματα έχουν ηλικία από 2.000.000 έως 18.000.000 χρόνια.

Τα βασικότερα συστατικά των γαιανθράκων είναι η καύσιμη ύλη, η υγρασία και η τέφρα.

Η **καύσιμη ύλη** περιλαμβάνει τον μόνιμο άνθρακα και τα πτητικά συστατικά. Πτητικά θεωρούνται τα συστατικά που απομακρύνονται από τον άνθρακα με θέρμανση σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου και σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 750°C. Αποτελούνται κύρια από υδρογονάνθρακες, CO και CO₂.

Η **υγρασία** αποτελεί σημαντικό συστατικό όλων γενικά των γαιανθράκων χαμηλού βαθμού ενανθράκωσης. Η υγρασία είναι δεσμευμένη σε ισχυρότατες δυνάμεις στον άνθρακα σε μονομοριακές και πολυμοριακές στοιβάδες και απαντάται σε γέφυρες υδρογόνου και σε πόρους διαμέτρου 3-5 nm. Η υπόλοιπη υγρασία υπάρχει υπό μορφή εξωτερικής (επιφανειακής) υγρασίας.

Η **τέφρα** περιλαμβάνει τα ανόργανα συστατικά των φυτικών υπολειμμάτων (**πρωτογενής τέφρα**) και το ανόργανο υλικό που προέρχεται από εξωτερικές πηγές και συναποτέθηκε με τα φυτικά υπολείμματα (**δευτερογενής τέφρα**). Στην πράξη, κατά την εξόρυξη των γαιανθράκων προστίθεται και το ανόργανο υλικό των ενδιάμεσων «στείρων» ενστρώσεων που συνεξορύσσονται (**τέφρα εκμετάλλευσης ή τριτογενής**).

Τα παραπάνω τρία συστατικά των γαιανθράκων συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$(\text{καύσιμη ύλη})\% + (\text{υγρασία})\% + (\text{τέφρα})\% = 100 \%$$

Η διαχείριση της τέφρας η οποία περιέχεται στον άνθρακα που χρησιμοποιείται ως καύσιμο, μελετάται εκτενώς στο στάδιο σχεδιασμού του λέβητα. Η συμπεριφορά των ανόργανων στοιχείων της τέφρας, καθώς επηρεάζει το σχηματισμό επικαθίσεων

στα τοιχώματα του λέβητα κατά τη διαδικασία της καύσης, είναι βασική παράμετρος σχεδιασμού του λέβητα. Το ποσοστό τέφρας της τέφρας στον άνθρακα είναι χαρακτηριστικό στοιχείο διότι επιδρά:

- στην επισκωρίαση και των αλκαλικά αλάτων που σχηματίζονται
- στην επιβάρυνση των συστημάτων απομάκρυνσης τέφρας
- στη συχνότητα και στη διάρκεια των εκκαπνισμών
- στη μείωση της μεταφερόμενης θερμότητας
- στην ροή των καυσαερίων
- στη φθορά και διάβρωση των συσκευών

Τοιουτοτρόπως, για συγκεκριμένες χημικές και φυσικές ιδιότητες της τέφρας, η συνολική επίδρασή της στη λειτουργία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι άμεσα ανάλογη με την ποσότητα καυσίμου που καταναλώθηκε κατά το χρονικό αυτό διάστημα.

Η τέφρα συνήθως συσσωρεύεται στα τοιχώματα του λέβητα επί των σωληνώσεων του νερού κοντά στην περιοχή του καυστήρα. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια των σωλήνων είναι μεταξύ 200°C- 400°C και συνεπώς δεν είναι αρκετή για τήξη των ανόργανων συστατικών της τέφρας. Το επιφανειακό όμως στρώμα τέφρας που βρίσκεται από την πλευρά της φλόγας δημιουργεί μια ρευστή φάση στην οποία διαλύεται η ιπτάμενη τέφρα. Έτσι μια αρχική τοπική απόθεση δημιουργεί συνθήκες για απόθεση και σε άλλα σημεία. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια των σωληνώσεων του νερού μειώνεται και η θερμοκρασία της φλόγας αυξάνεται.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χημικές και φυσικές ιδιότητες της τέφρας καθώς και διάφορες παράμετροι κατηγοριοποίησής της. Επίσης παρουσιάζονται μέθοδοι ανάλυσης της τέφρας που αναπτύχθηκαν το τελευταίο διάστημα.

7.1. Σύσταση της Τέφρας

Η χημική σύσταση της τέφρας συνίσταται σχεδόν εξολοκλήρου από οξείδια μετάλλων η αναλογία των οποίων ποικίλει.

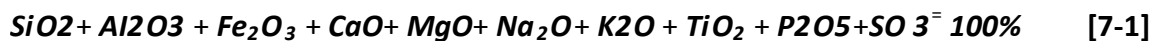
Πίνακας 7-1 : Τυπική Χημική Σύσταση Τέφρας Λιγνίτη

Στοιχείο	Ποσοστό %
SiO ₂	10 - 70
Al ₂ O ₃	8 - 38
Fe ₂ O ₃	2 - 50
CaO	0,5 - 30
MgO	0,3 - 8
Na ₂ O	0,1 - 8
K ₂ O	0,1 - 3
TiO ₂	0,4 - 3,5
SO ₃	0,1 - 30

7.1.1. Χημική Ανάλυση

Η χημική ανάλυση του άνθρακα παρέχει στοιχεία βάσει των οποίων εκτιμάται το ποσοστό της τέφρας, η ικανότητα επισκωρίασης καθώς επίσης και η αλληλεπίδραση διάφορων παραμέτρων. Η αναλύσεις γίνονται σε δείγμα τέφρας προετοιμασμένο βάση του προτύπου ASTM D3174. Κονιορτοποιημένος άνθρακας θερμαίνεται σε ένα κεραμικό δοκίμιο σε σχήμα χοάνης, παρουσία αέρα, σε θερμοκρασία 1560°C-1660°C, μέχρι να καεί πλήρως (εκτός από το υπόλειμμα της τέφρας).

Η χημική ανάλυση της τέφρας δίνει το ποσοστό μάζας κάθε οξειδίου και γενικώς εκφράζεται ως εξής:



Επειδή το ποσοστό του P_2O_5 είναι συνήθως αμελητέο σε σύγκριση με το ποσοστό των υπόλοιπων στοιχείων, ορισμένες φορές παραλείπεται.

Από έρευνες που έχουν γίνει έχει παρατηρηθεί διαφοροποίηση τις χημικής σύστασης τις εργαστηριακής τέφρας (βάσει του προτύπου ASTM D3174), από αυτή τις ιπτάμενης τέφρας καθώς και τις υγρής τέφρας. Ωστόσο επειδή οι αποκλίσεις που παρατηρούνται είναι ελάχιστες, η εκτίμηση τις συμπεριφοράς τις τέφρας γίνεται βάσει τις χημικής σύστασης τις εργαστηριακής τέφρας. Προκειμένου να προσομοιωθεί η επίδραση του διαχωρισμού σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας

λέβητα κονιορτοποιημένου καυσίμου, χρησιμοποιούνται μέθοδοι τις διαχωρισμός δια κατασταλάξεως.

7.1.2. Ορυκτολογικές Αναλύσεις

Οι χημικές αναλύσεις τις τέφρας θα πρέπει να συμπληρώνονται με την ορυκτολογική σύσταση του ανόργανου μέρους του γαιάνθρακα και των στείρων, για την αντιμετώπιση προβλημάτων μηχανικής διάβρωσης λόγω παρουσίας ορυκτών με υψηλή σκληρότητα, επισκωριώσεων και επικαθήσεων και τη γενικότερη πρόβλεψη τις συμπεριφοράς τις τέφρας (π.χ. σημείο μαλάκυνσης και τήξης, αποδέσμευση αερίων, σύσταση τέφρας και δέσμευση χημικών στοιχείων σε αυτή).

Οι ορυκτολογικές αναλύσεις τις τέφρας αποσκοπούν στο να προσδιοριστεί η πρωτογενής ορυκτή ύλη που σχηματίζεται μέσα στον άνθρακα. Η θερμική συμπεριφορά τις τέφρας κατά την καύση τις στον λέβητα εξαρτάται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από τις αντιδράσεις οι οποίες γίνονται μεταξύ των ανόργανων στοιχείων από τα οποία συνίσταται και τα οποία δεν γίνεται να εντοπιστούν από τη χημική ανάλυση. Σε αυτό το σημείο δημιουργείται διαφωνία για το εάν η συμπεριφορά τις τέφρας σχετικά με τις επικαθίσεις πρέπει να καθορίζεται από την χημική ή από την ορυκτολογική ανάλυση. Εντούτοις, μέχρι στιγμής, δεν έχει καθοριστεί κάποια τυποποιημένη διαδικασία εκτίμησης τις ποσότητας τις τέφρας που σχηματίζεται με την τεχνική σχηματισμού τέφρας σε χαμηλή θερμοκρασία αλλά ούτε και εκτίμησης τις ορυκτολογικής σύστασής τις.

Η ορυκτολογική ανάλυση μπορεί να εκτελεστεί βάσει του προτύπου ASTM D3174 ή κατά προτίμηση με την τεχνική σχηματισμού τέφρας σε χαμηλή θερμοκρασία. Οξυγόνο χρησιμοποιείται για την οξειδωση τις οργανικής ύλης σε θερμοκρασίες <math><150^{\circ}\text{C}</math>, έτσι ώστε τα πτητικά ανόργανα συστατικά να υποστούν ελάχιστη μεταβολή. Τα συστατικά αυτά μπορούν στη συνέχεια να προσδιοριστούν με περιθλασιμετρία ακτίνων Χ, υπέρυθη φασματοσκοπία, διαφορική θερμική ανάλυση ή ανίχνευση σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Η κατανομή τις ανόργανης ύλης μπορεί να προσδιοριστεί με οπτικά μικροσκόπια ή ραδιογραφικές μεθόδους.

Τουλάχιστον 100 ανόργανα στοιχεία σχετίζονται με τον άνθρακα. Στον πίνακα 6-2 παρουσιάζονται τα συχνότερα εμφανιζόμενα από αυτά.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ορυκτή ύλη διαφέρει ποιοτικά και ποσοτικά από την τέφρα που υπολογίζεται κατά την προσεγγιστική ανάλυση λόγω των συνθηκών

υψηλής θερμοκρασίας που επικρατούν κατά την παραγωγή τις τέφρας και έχουν ως αποτέλεσμα την αφυδάτωση, διάσπαση και οξειδωση κάποιων ανόργανων ουσιών, καθώς τις και τη μερική απώλεια πτητικών συστατικών (Hg, K, Na, Cl, P και S).

Ποσοτικές συσχετίσεις μεταξύ τέφρας (A) και ορυκτής ύλης (MM) είναι δυνατό να γίνουν με τις ακόλουθες εμπειρικές εξισώσεις Parr:

$$M M = 1,08 [A + 0,555] (\%) \quad [7-2]$$

$$C_{fix} - 0,155$$

$$fix_{dryMMfree} \sim_{10} Q - (W + 1,08A + 0,555) \quad \kappa \} \quad [7-3]$$

$$V^o I_{dryMMfree} - 100 C_{fix_{dryMMfree}} (\%) \quad [7-4]$$

$$\frac{HHV - 505}{100 - (1,08A + 0,555)} \quad 100 (Btu/lbm) \quad [7-5]$$

ή την εξίσωση Brownetal.:

$$MM = 1,06A + 0,555 + 0,74CO_2 - 0,32 \quad [7-6]$$

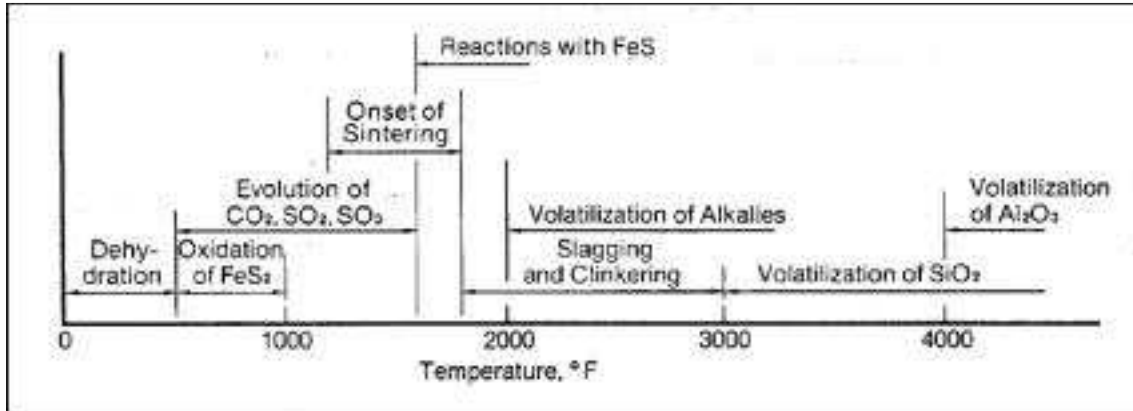
Πίνακας 7-2 : Χαρακτηριστικά Ανόργανα Στοιχεία που έχουν εντοπιστεί στον Άνθρακα

Στοιχείο	Φόρμουλα
Kaolinite	Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂ · H ₂ O
Illite	K ₂ O · 3Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂ · 2H ₂ O
Muscovite	K ₂ O · 3Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂ · 2H ₂ O
Biotite	K ₂ O · MgO · Al ₂ O ₃ · 3SiO ₂ · H ₂ O
Orthoclase	K ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂
Albite	Na ₂ O · Al ₂ O ₃ · 6SiO ₂
Calcite	CaCO ₃
Dolomite	CaCO ₃ · MgCO ₃
Siderite	Fe CO ₃
Pyrite	FeS ₂

Στοιχείο	Φόρμουλα
Gypsum	CaSO ₄ · 2H ₂ O
Quartz	SiO ₂
Hematite	Fe ₂ O ₃
Magnetite	Fe ₃ O ₄
Rutile	TiO ₂
Halite	NaCl
Sylvite	KCl

Η σύσταση και η ποσότητα της ορυκτής ύλης μπορεί να προκαλέσει πολλά προβλήματα κατά την εξόρυξη, αποθήκευση, απανθράκωση και καύση των γαιανθράκων. Ενδεικτικά αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Αργιλικά ορυκτά που διογκώνονται όταν έρθουν σε επαφή με το νερό, όπως αυτά της ομάδας του μοντμοριλονίτη, προκαλούν μείωση των αντοχών και είναι δυνατό να θέσουν σε κίνδυνο την ευστάθεια των μετώπων εξόρυξης.
- Όξιμες συνθήκες στα νερά των ορυχείων ή τα νερά καθαρισμού λόγω της οξείδωσης του πυρίτη μπορούν να προκαλέσουν διαβρώσεις σε μηχανήματα εξόρυξης και προετοιμασίας του γαιάνθρακα.
- Διογκωμένα πυριτικά ορυκτά μπορούν να μεταβάλουν την πυκνότητα των υδάτων που χρησιμοποιούνται για την προετοιμασία του γαιάνθρακα και να σχηματίσουν κρούστες πάνω σε «αποδεσμευμένα» σωματίδια του.
- Χοντρά τεμάχια χαλαζία προκαλούν φθορές στα μηχανήματα κονιοποίησης του γαιάνθρακα.
- Πτητικά συστατικά, όπως το χλώριο, μπορούν να διαβρώσουν τους λέβητες καύσης και να ρυπάνουν την ατμόσφαιρα.
- Η παρουσία μοντμοριλλονίτη και άλλων ορυκτών μπορεί να υποβιβάσει σημαντικά το σημείο τήξης της τέφρας



Εικόνα 7-1 : Χημικές Αντιδράσεις κατά την Καύση Ανθράκων

7.2. Χημικές αντιδράσεις κατά την καύση

Τα περισσότερα συστατικά της τέφρας που σχηματίζονται κατά την εισαγωγή του άνθρακα στο θάλαμο καύσης δεν είναι στη μορφή που φαίνεται στην Πίνακα 6-2. Όπως τονίστηκε, το κύριο τμήμα της τέφρας προέρχεται από το νερό και κατά βάση αποτελεί ένα μείγμα από διάφορα συστατικά. Οι ενώσεις αυτές μεταβάλλονται σημαντικά καθώς εκτίθενται στις υψηλές θερμοκρασίες του θαλάμου καύσης. Κατά την καύση του άνθρακα, οι ενώσεις αυτές ενώνονται μεταξύ τους αλλά και με τα αναγωγικά καυσαερίων. Έτσι δημιουργούνται σύνθετες ενώσεις οι οποίες συνήθως περιέχουν λιγότερο οξυγόνο από τις αρχικές, διότι το οξυγόνο αντιδρά με τα αναγωγικά καυσαερία και τον άνθρακα. Αυτό είναι ιδιαίτερα αληθές για τα σιδηρούχα οξείδια (Fe_2O_3) τα οποία εντοπίζονται σε μεγάλη έκταση στον άνθρακα, όπως και για τον σιδηροπυρίτη (FeS_2). Ο τελευταίος μπορεί να αναχθεί σε FeS ή σε οξείδια όπως Fe_3O_4 και FeO ή ακόμα και σε μεταλλικό σίδηρο. Τα χαμηλότερα σουλφίδια και οξείδια έχουν μικρότερες θερμοκρασίες τήξης. Καθώς τα συστατικά της τέφρας περνάνε στη φάση της τήξης, οι σχηματιζόμενες ενώσεις λύνονται με αποτέλεσμα η αλλαγή αυτή να ελαττώνει επιπλέον τη θερμοκρασία τήξης της τέφρας.

Κατά κανόνα, τέφρα με υψηλή περιεκτικότητα σε SiO ή αλουμίνα, έχει υψηλή θερμοκρασία τήξης η οποία μεταβάλλεται ελάχιστα σε οξειδωτικό περιβάλλον. Η παρουσία αλκαλικών μετάλλων Na_2O και K_2O , όπως και τα οξείδια του μαγνησίου έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας τήξης της τέφρας.

7.3. Σίδηρος στην τέφρα

Οι χημικές ενώσεις του σιδήρου έχουν το μεγαλύτερο μερίδιο ευθύνης για την προβληματική συμπεριφορά της τέφρας. Γι' αυτό το λόγο, άνθρακες οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά σιδήρου, θεωρούνται άμεσα ύποπτοι για πρόκληση προβλημάτων. Εάν η τέφρα και συγκεκριμένα ο σίδηρος είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος στον άνθρακα τότε υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να δημιουργηθούν δυσκολίες, ενώ στην περίπτωση που ο σίδηρος εμφανίζεται σε μεγάλα κομμάτια είναι ευκολότερη η απομάκρυνσή του. Κατά την κονιορτοποίηση του άνθρακα, τα μεγαλύτερα και βαρύτερα κομμάτια απομακρύνονται από κάποιους μύλους και δεν εισάγονται στον θάλαμο καύσης. Σε αποκοσκινίδια με υψηλό ποσοστό φιλτραρίσματος, ο σίδηρος κατανέμεται ομοιόμορφα στον άνθρακα και δημιουργεί προβλήματα.

Σε λέβητες κονιορτοποιημένου καυσίμου, είναι δυνατόν να επιτευχθεί επαρκής διαχωρισμός των διάφορων συστατικών της τέφρας. Η τέφρα η οποία επικάθεται στο πυθμένα του λέβητα έχει διαφορετική σύσταση και φυσικές ιδιότητες από την ιπτάμενη τέφρα που μεταφέρεται με τα καυσαέρια. Ένα σημαντικό μέρος του σιδήρου που περιέχεται στην σκωρία που παρουσιάζεται, μπορεί να αναχθεί σε μεταλλικό σίδηρο, ο οποίος βυθίζεται στην επιφάνεια διεπαφής της σκωρίας και του μετάλλου. Ο σχηματισμός αυτός, δύσκολα απομακρύνεται τόσο σε θερμή όσο και σε ψυχρή κατάσταση.

Σε ορισμένους άνθρακες, ο σίδηρος παρουσιάζεται με τη μορφή πυρίτη, FeS_2 , ο οποίος, κατά τη διέλευσή του από το λέβητα υπόκειται σε διάφορες αλλαγές. Ο σίδηρος και το θείο αντιδρώντας με το οξυγόνο σχηματίζοντας υποξείδια του σιδήρου και SO_2 ή SO_3 . Το θείο επίσης αντιδρά με τα αλκαλικά μέταλλα, νάτριο και κάλιο, σχηματίζοντας ενώσεις οι οποίες έχουν πολύ χαμηλή θερμοκρασία τήξης. Σε λέβητες όπου σχηματίζεται σκωρία στον πυθμένα η τέφρα παραμένει σε ρευστή κατάσταση για μεγάλα χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα κάποιες από τις ενώσεις του θείου με το νάτριο και το κάλιο να αεριοποιούνται στη συνέχεια και να συμπυκνώνονται στα υδροτοιχώματα τα οποία ψύχονται από το νερό τροφοδοσίας προκαλώντας χημική διάβρωση.

7.4. Μέτρηση θερμοκρασίας τήξης τέφρας

Η θερμοκρασία τήξης της τέφρας έχει από καιρό αναγνωριστεί ως ένας δείκτης εκτίμησης της απόδοσης του άνθρακα σε σχέση με τον σχηματισμό επικαθίσεων. Γενικά η τέφρα η οποία έχει υψηλή θερμοκρασία τήξης, έχει μικρή ικανότητα σχηματισμού επικαθίσεων, σε αντίθεση με την τέφρα η οποία τήκεται σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η τέφρα δεν είναι καθαρή χημική ένωση και δεν έχει συγκεκριμένο σημείο τήξης. Το υψηλό σημείο τήξης σημαίνει καύση χωρίς προβλήματα και η ιδανική περιοχή θερμοκρασιών τήξης είναι από 1450 - 1650 °C. Τα προβλήματα δημιουργούνται κυρίως για θερμοκρασίες τήξης κάτω από 1200 °C.

Έχουν αναπτυχθεί πολλές πειραματικές μέθοδοι μέτρησης της θερμοκρασίας της τέφρας. Τα περισσότερα πειράματα βασίζονται στη σταδιακή θερμική αλλοίωση ενός δείγματος τέφρας. Οι χαρακτηριστικές θερμοκρασίες τήξης, κατά τις μεθόδους αυτές, προσδιορίζονται σε θερμοκρασίες όπου η τηγμένη το δείγμα τέφρας παίρνει κάποιο χαρακτηριστικό σχήμα ή ύψος σε ελεγχόμενο περιβάλλον:

- Αναγωγικό περιβάλλον (50% CO₂+ 50% H₂)
- Οξειδωτικό περιβάλλον (αέρας ή CO₂)

Η παρουσία αναγωγικού περιβάλλοντος έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας τήξης της τέφρας. Οι αναγωγικές συνθήκες έχουν σαν αποτέλεσμα τα περιεχόμενα στην τέφρα οξείδια του σιδήρου (Fe²⁺) θα αυξηθούν εις βάρος των υψηλότερα οξειδωμένων οξειδίων του σιδήρου (Fe³⁺). Τα ιόντα του σιδήρου ενεργούν σαν τηκτικά, ελαττώνοντας την θερμοκρασία Αρχικής Αλλοίωσης, η οποία περιγράφεται παρακάτω, πάνω από 100 °C.

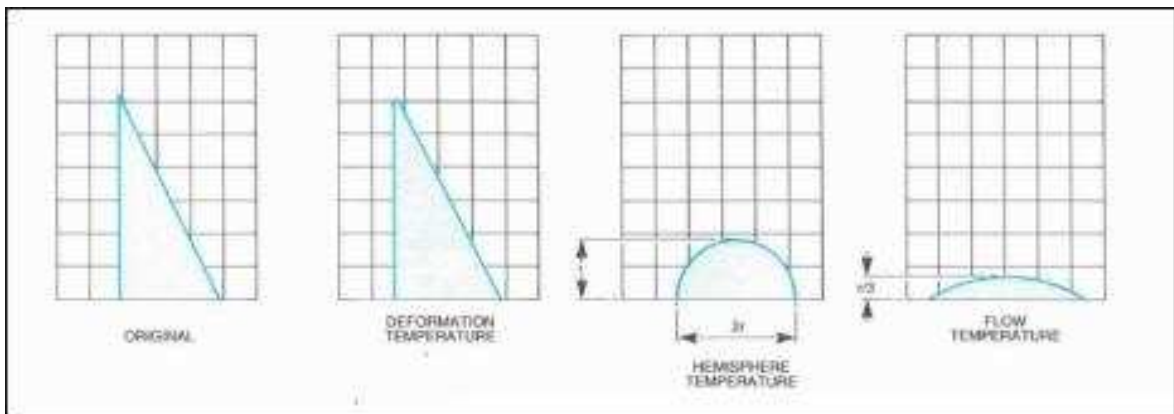
Οι περισσότερες μέθοδοι είναι εμπειρικές και δε βασίζονται σε κάποιο θεωρητικό υπόβαθρο. Παρακάτω δίνονται οι περιγραφές ορισμένων μεθόδων.

7.4.1. Τυποποιημένη Μέθοδος ASTM

Η τυποποιημένη μέθοδος ASTM D1857, προσδιορίζει τη πειραματική διαδικασία εκτίμησης της θερμοκρασίας τήξης της τέφρας. Το τεστ αυτό βασίζεται στη σταδιακή θερμική αλλοίωση ενός δείγματος τέφρας ύψους % της ίντσας και πλάτους βάσης ισόπλευρου τριγώνου % της ίντσας. Το δείγμα τοποθετείται σε μία βάση πυριμάχου υποστρώματος και θερμαίνεται με σταθερό ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας μέσα σε φούρνο. Η θερμοκρασία εντός του φούρνου είναι

ελεγχόμενη (αναγωγική ή οξειδωτική ανάλογα με τα τεστ που θα εκτελεστούν). Κατά τη διαδικασία της θέρμανσης παρατηρείται το σχήμα του δείγματος και καταγράφονται τέσσερις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες:

1. Θερμοκρασία Αρχικής Αλλοίωσης (Initial Deformation Temperature, IT): Είναι η θερμοκρασία στην οποία η κορυφή της πυραμίδας εμφανίζει αλλοίωση. Αγνοείται τυχόν συρρίκνωση του δείγματος εφόσον η κορυφή παραμένει αιχμηρή.
2. Θερμοκρασία Μαλάκυνσης (Softening Temperature, ST) $H=W$: Είναι η θερμοκρασία στην οποία το δείγμα της τέφρας έχει τηχθεί σε σχήμα σφαίρας το ύψος της οποίας είναι ίσο με το πλάτος της βάσης. Η θερμοκρασία αυτή σε αναγωγικές συνθήκες αποδίδεται ως η «θερμοκρασία τήξης της τέφρας».
3. Θερμοκρασία ημισφαιρίου (Hemispherical Temperature, HT) $H=1/2W$: Είναι η θερμοκρασία στην οποία το δείγμα τηγμένο τέφρας έχει πάρει το σχήμα ενός ημισφαιρίου το ύψος του οποίου είναι ίσο με το $1/2$ του πλάτους της βάσης.
4. Θερμοκρασία Ρευστού (Fluid Temperature, FT): Είναι η θερμοκρασία στην οποία το δείγμα τηγμένης τέφρας πάρει τη μορφή επίπεδου στρώματος με μέγιστο ύψος $1/16$ της ίντσας.



Εικόνα 7-2 : Χαρακτηριστικές Θερμοκρασίες Τήξης της Τέφρας (ASTMStandard)

Η μέθοδος αυτή προβλέπει ένα περιθώριο σφάλματος 55 °C.

Πριν από την αναθεώρηση της τυποποιημένης μεθόδου ASTM D1857, καταγραφόντουσαν μόνο τρεις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες (IT, ST, FT) χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι διαστάσεις. Σε πιο πρόσφατες μελέτες γινότανε αναφορά

στις θερμοκρασίες αλλοίωσης χωρίς να γίνεται διάκριση ανάμεσα σε σφαιρική η ημισφαιρική αλλοίωση.

Παρόλο που οι νεότερες τυποποιημένες μέθοδοι χρησιμοποιούν μόνο αναγωγικό περιβάλλον, πολλές μελέτες καταγράφουν τις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες χωρίς να προσδιορίζουν το περιβάλλον. Στις περιπτώσεις αυτές θεωρείται ως δεδομένο ότι οι συνθήκες είναι πάντα αναγωγικές.

7.4.2. Βρετανική τυποποιημένη μέθοδος

Η Βρετανική Τυποποιημένη μέθοδος προσδιορισμού της θερμοκρασίας τήξης είναι κατά βάση παρόμοια με αυτή της ASTM. Η διαφορά εντοπίζεται σε ορισμένα πειραματικά χαρακτηριστικά. Η πειραματική διαδικασία προσδιορισμού της θερμοκρασίας τήξης με βάση τη Βρετανική μέθοδο περιγράφεται μέσα από το πρότυπο B.S. 1016, Part15. Η μέθοδος αυτή ορίζει ότι το ύψος της πυραμίδας του δείγματος πρέπει να είναι 8 με 13 χιλιοστά και πλάτος της βάσης του ισόπλευρου 2 με 3 φορές το ύψος. Το δείγμα τοποθετείται σε μία βάση πυριμάχου υποστρώματος και θερμαίνεται με σταθερό ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας 5 °C/min μέσα σε φούρνο. Η θερμοκρασία εντός του φούρνου είναι ελεγχόμενη (αναγωγική ή οξειδωτική ανάλογα με τα τεστ που θα εκτελεστούν). Κατά τη διαδικασία της θέρμανσης παρατηρείται το σχήμα του δείγματος και καταγράφονται τρεις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες:

1. Θερμοκρασία Αρχικής Αλλοίωσης (Initial Deformation Temperature, IT): Είναι η θερμοκρασία στην οποία η κορυφή της πυραμίδας εμφανίζει αλλοίωση.
2. Θερμοκρασία ημισφαιρίου (Hemispherical Temperature, HT) $H=1/2W$: Είναι η θερμοκρασία στην οποία το δείγμα τηγμένο τέφρας έχει πάρει το σχήμα ενός ημισφαιρίου το ύψος του οποίου είναι ίσο με το \sqrt{A} του πλάτους της βάσης.
3. Θερμοκρασία Ροής (Flow Temperature): Είναι η θερμοκρασία στην οποία το δείγμα τηγμένης τέφρας πάρει τη μορφή επίπεδου στρώματος με μέγιστο ύψος $1/16$ του πλάτους.

Η θερμοκρασία ID αποτελεί τη χαρακτηριστική τιμή της θερμοκρασίας για την οποία η τέφρα αρχίζει να είναι κολλώδης.

7.4.3. Γερμανική τυποποιημένη μέθοδος

Η πειραματική διαδικασία προσδιορισμού της θερμοκρασίας τήξης με βάση τη Γερμανική μέθοδο περιγράφεται μέσα από το πρότυπο DIN51 730. Το τεστ αυτό βασίζεται στη παρατήρηση της σταδιακής αλλοίωσης ενός δείγματος τέφρας κυλινδρικού σχήματος, με ύψος 3 χιλιοστά και διάμετρο 3 χιλιοστά. Το δείγμα τοποθετείται σε πυρίμαχη βάση επικαλυμμένη με πλατίνα και πάνω σε ηλεκτρικό θερμοστοιχείο. Το δείγμα μαζί με το θερμοστοιχείο εισάγονται σε φούρνο και θερμαίνονται με σταθερό ρυθμό. Η εξέλιξη της διαδικασίας καταγράφεται με κάμερα και η εικόνα προβάλλεται σε βαθμονομημένη οθόνη ώστε να υπάρχει ακρίβεια στον προσδιορισμό των θερμοκρασιών. Κατά τη διαδικασία της θέρμανσης παρατηρείται το σχήμα του δείγματος και καταγράφονται τρεις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες:

1. Θερμοκρασία Αρχικής Αλλοίωσης (Initial Deformation Temperature, IT): Είναι η θερμοκρασία στην οποία υπάρχει ένδειξη αλλοίωσης κυρίως με τη μορφή στρογγυλέματος των άκρων ή με τη μορφή διόγκωσης του δείγματος.
2. Θερμοκρασία ημισφαιρίου (Hemispherical Temperature, HT) $H=1/2W$: Είναι η θερμοκρασία στην οποία το δείγμα τηγμένο τέφρας έχει πάρει το σχήμα ενός ημισφαιρίου το ύψος του οποίου είναι ίσο με το \sqrt{A} του πλάτους της βάσης.
3. Θερμοκρασία Ροής (Flow Temperature): Είναι η θερμοκρασία στην οποία το δείγμα τηγμένης τέφρας πάρει τη μορφή επίπεδου δίσκου με μέγιστο ύψος $1/3$ του αρχικού ύψους του δείγματος.

7.4.4. Λοιπές μέθοδοι

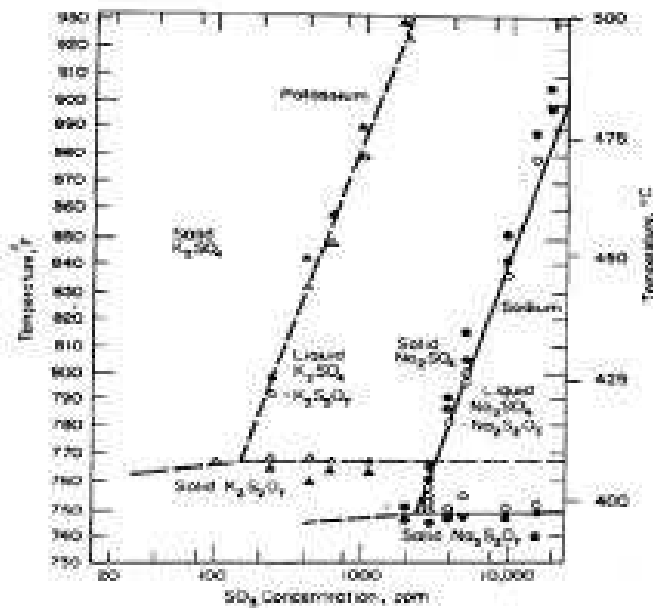
Η μέθοδος προσδιορισμού της θερμοκρασίας τήξης της τέφρας ISO540, είναι παρόμοια με τη Γερμανική. Κατά τη μέθοδο αυτή καταγράφονται τρεις θερμοκρασίες (IT, HT, FT). Ωστόσο σε αυτή τη περίπτωση επιτρέπεται ένα μεγαλύτερο εύρος γεωμετρικών χαρακτηριστικών και διαστάσεων του δείγματος τέφρας διότι έχει αποδειχθεί ότι εντός κάποιων ορίων, τυχών διαφοροποιήσεις αυτών, έχουν ελάχιστη επίδραση στις θερμοκρασίες που καταγράφονται.

Οι Ρωσική μέθοδος (GOST2057-68) είναι και αυτή παρόμοια με τη Γερμανική. Οι θερμοκρασίες που καταγράφονται είναι η DT, η HD και θερμοκρασία έναρξης ρευστής φάσης.

7.4.5. Συσχετίσεις θερμοκρασίας τήξης

Στον Πίνακα 6-3 παρουσιάζονται από τη διεθνή βιβλιογραφία, 11 συσχετίσεις της θερμοκρασίας τήξης της τέφρας και των συστατικών της. Οι έρευνες που έχουν γίνει στο παρελθόν βασίζονται σε 8 βασικά οξειδία τα οποία εντοπίζονται στην τέφρα. $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{TiO}_2, \text{Fe}_2\text{O}_3, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$.

Στην Εικόνα 4-3 παρουσιάζονται θερμοκρασίες τήξης της τέφρας για τα Συστήματα $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-SO}_3$ και $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-SO}_3$ (Beckering, 1970) (Parrington, 1950).



Εικόνα 7-3 : Θερμοκρασίες Τήξης για τα Συστήματα $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-SO}_3$ και $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-SO}_3$

7.5. Σχέση μεταξύ χημικής και ορυκτολογικής σύστασης

Οι (Barrett, 1945) (Estep, Seltz, & Osbor, 1937) και (Thiessin, Ball, & Grotts, 1936) έχουν αποδείξει ότι η συμπεριφορά της τέφρας κατά την τήξη της αρκετά όμοια με αυτή των αντίστοιχων μιγμάτων των οξειδίων που περιέχονται σε αυτή. Ο Barrett μάλιστα κατέληξε στο ότι εφόσον η τέφρα είναι πλήρως κονιορτοποιημένη και ανακατεμένη και στην ίδια σταθερή κατάσταση πριν από τη φάση της τήξης τότε:

1. Οι θερμοκρασίες τήξης εξαρτώνται μόνο από τη σύσταση της τέφρας και όχι από τον τρόπο με τον οποίο διαμορφώθηκε η σύσταση αυτή
2. Η θερμοκρασία μαλάκυνσης είναι άμεσα συσχετισμένη με Δ διάγραμμα ισορροπίας φάσεων των αντίστοιχων οξειδίων που συνιστούν την τέφρα.

Πίνακας 7-3 : Συσχετίσεις Θερμοκρασίας Τήξης της Τέφρας

Nichols, Selving	$SiO_2 + Al_2O_3$
Rickets, 1932	$Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O$
Shaefer, 1933	$R_2S = Al_2O_3 / SiO_2 \times SiO_2 + Al_2O_3 / FeO + 0.6(CaO + MgO + Na_2O + K_2O)$
Estep, Seltz, Osborn, 1937	$CaO = 100\% - [SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3]$ Προσδιορισμός της Η.Τ. από το διάγραμμα συγκεντρώσεων/φάσεων του $SiO_2/Al_2O_3/Fe_2O_3$ (%CaO=Const.)
Gauger, 1951	$S = SiO_2 + TiO_2 + P_2O_5 + A - Al_2O_3$ $T = CaO + 0,7 MgO + 2,25 Na_2O + 1,5 K_2O$ Προσδιορισμός %S, A, T Προσδιορισμός S.T. από το τριαδικό διάγραμμα των S, A, T.
Majumdar, 1955	$R_m = [3.3 SiO_2 + 1.96 Al_2O_3] / [2.5 Fe_2O_3 + 3.57 CaO + 5.0 MgO + 3.22(K_2O + Na_2O)]$
Garner, 1964	Βάρος επικάλυψης = x Όπου: $x_1 = 0.03 [TiO_2] + 0.09 [Fe_2O_3] + 0.061 [CaO] + 0.264 [MgO] + 0.423 [IVa_2O] - 10.6$ $x_2 = 0.044 [TiO_2]^{0.094} \cdot [Fe_2O_3]^{0.499} \cdot [CaO]^{0.221} \cdot [MgO]^{0.226} \cdot [IVa_2O]^{0.728}$ Διαθεσιμότητα λέβητα = f(x-i, x2)
Duzy, 1965	$ST = [Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O] / [SiO_2 + Al_2O_3]$
Winegartner, Rhodes, 1974	$F, T, S, T, I, D = f(51 \text{ ανεξάρτητες μεταβλητές})$
Sondrcal, 1975	$L.R. = [1.74(K_2O + Na_2O) + 0.73(SiO_2) + 0.39(Fe_2O_3)] / [1.40(CaO) + MgO]$
Kovitsikii, Karagodina, Marynova, 1975	$Kfu = (SiO_2 + Al_2O_3) / (Fe_2O_3 + CaO + MgO)$ $S.T. = 1094 + 42,5 Kfu$ $F.T. = 1139 + 48.6 Kfu$
Bryers, Taylor, 1975	Western $S.T.red = 2863 - 37X + 0.151X^2, SiO_2/Al_2O_3 \gg 1$ $S.T.red = 2992 - 27.1X + 0.27X^2, SiO_2/Al_2O_3 \approx 1$ Eastern $S.T.red = 3114 - 38.6X + 0.37X^2$ Όπου $X = [Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O]$

7.6. Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας μαλάκυνσης και απομάκρυνσης επικάθισης

Εάν η τέφρα έρθει σε επαφή με μία επιφάνεια η οποία απορροφάει θερμότητα και η οποία βρίσκεται σε θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία μαλάκυνσης της τέφρας τότε η επικάθιση που θα δημιουργηθεί θα έχει πορώδη δομή. Ανάλογα με τη δύναμη του δεσμού, η επικάθιση μπορεί να αποκολληθεί από το μέταλλο εξαιτίας του βάρους της ή να απομακρυνθεί από τον εκκαπνισμό. Εάν μία τέτοια επικάθιση επιτραπεί να σχηματιστεί σε μία περιοχή όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες τότε η επιφάνειά της (λόγω του μονωτικού χαρακτήρα της τέφρας) μπορεί να πιάσει τη θερμοκρασία τήξης της και να αρχίσει να ρέει στα τοιχώματα του λέβητα.

Εάν τα σωματίδια της τέφρας έρθουν σε επαφή μία επιφάνεια η οποία απορροφάει θερμότητα και η οποία βρίσκεται σε θερμοκρασία κάτω από τη θερμοκρασία μαλάκυνσης, δεν δημιουργούνται ισχυροί δεσμοί και η επικάθιση αυτή απομακρύνεται εύκολα.

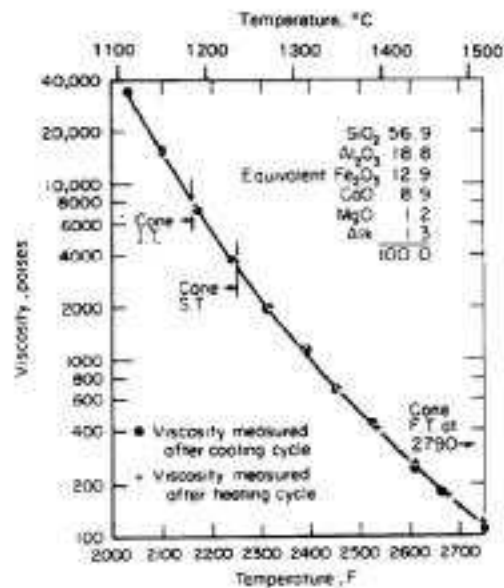
Τέλος, αν τα σωματίδια της τέφρας εκτεθούν σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία μαλάκυνσης για αρκετό χρονικό διάστημα, η επικάθιση θα πάρει τη μορφή τραχείας, τηγμένης μάζας συμπυκνωμένη στην επιφάνεια του ψυχρότερου μετάλλου. Το επαναστερεοποιημένο υλικό έχει ισχυρούς δεσμούς και είναι δύσκολο να απομακρυνθεί. Καθώς η επικάθιση αυξάνει σε μέγεθος, οι μονωτικές της ιδιότητες αυξάνουν συνεχώς τη θερμοκρασία στην επιφάνεια διεπαφής της τέφρας με το μέταλλο των σωλήνων μέχρι τη θερμοκρασία ροής FT με αποτέλεσμα να δημιουργείται ρέουσα σκωρία.

7.7. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμοκρασιών I.T. και F.T.

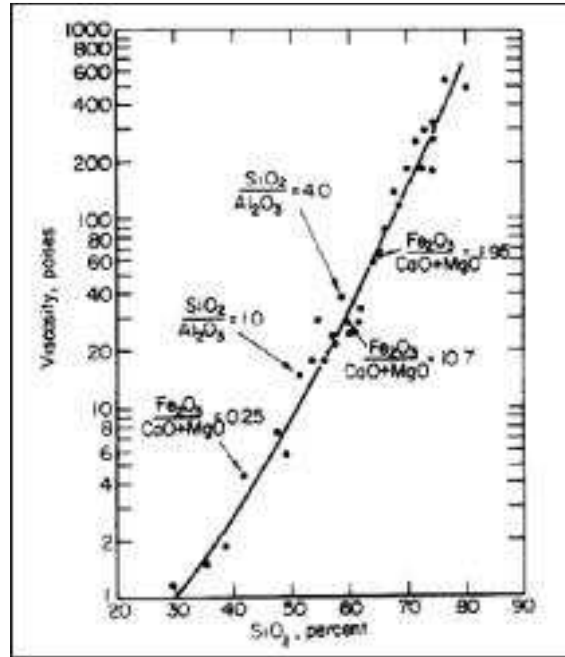
Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θερμοκρασίας Αρχικής Αλλοίωσης και της θερμοκρασίας Ροής αποτελεί ένδειξη για το είδος της επικάθισης που πρόκειται να σχηματιστεί στην επιφάνεια των σωλήνων. Εάν η διαφορά αυτή είναι μικρή η σκωρία στα τοιχώματα θα είναι μικρού πάχους, ρέουσα και ισχυρή. Καθώς η διαφορά των δύο χαρακτηριστικών θερμοκρασιών ανοίγει, η σκωρία που θα σχηματιστεί θα είναι σε πιο πυκνές αναλογίες μέχρι να αρκετά ρευστή. Οι συνεκτικές δυνάμεις μεταξύ των επικαθίσεων και των μετάλλων σε αυτή τη περίπτωση είναι πιο αδύναμες καθιστώντας τους εκκαπνισμούς πιο αποτελεσματικούς.

7.8. Ιξώδες

Μετά το 1930 η έρευνα πάνω στη συμπεριφορά των επικαθίσεων επικεντρώθηκε στο ιξώδες. Αναπτύχθηκαν μετρητικές μέθοδοι προσδιορισμού του ιξώδους και γίνανε μετρήσεις του ιξώδους της τέφρας και της σκωρίας σε θερμοκρασίες ύψους 1600°C σε οξειδωτική και ουδέτερη ατμόσφαιρα. Βρέθηκε ότι η σκωρία όταν βρίσκεται σε υγρή φάση συμπεριφέρεται σαν Νευτώνειο ρευστό και πως ο ρυθμός μεταβολής του ιξώδους σε μία αλλαγή της θερμοκρασίας και για δεδομένη τιμή του ιξώδους, είναι σταθερός. Αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η σχέση ιξώδους - θερμοκρασίας στη Νευτώνεια περιοχή, είναι η ίδια για όλους τους τύπους σκωρίας προερχομένη από άνθρακα. Η Εικόνα 6-4 παρουσιάζει τη μεταβολή του ιξώδους συναρτήσει της θερμοκρασίας (Reid' 1971) (Corey' 1964) και η Εικόνα 6-5 παρουσιάζει τις καμπύλες ιξώδους για τη σκωρία συναρτήσει της σύστασης (μετά από κατάλληλη παραμετρική διόρθωση) (Corey' 1964).



Εικόνα 7-4 : Μεταβολή Ιξώδους συναρτήσει της Θερμοκρασίας



Εικόνα 7-5 : Καμπύλες Ιξώδους για τη Σκωρία συναρτήσει της Σύστασης

Καθώς η σκωρία ψύχεται κάτω από τη θερμοκρασία κρυσταλοποίησής της, η συμπεριφορά της διαφέρει ανάλογα την σύστασή της. Γενικώς έχουν διακριθεί τρεις κατηγορίες:

1. Σκωρία πλούσια σε πυρίτιο παραμένει υαλοποιημένη σε όλο το εύρος της ιξώδους κατάστασής της. Δεν προκαλείται αφυέλωση και το ιξώδες της σκωρίας εξαρτάται καθαρά και μόνο από τη θερμοκρασία.
2. Σε μια άλλη κατηγορία σκωρίας, στερεή φάση υγροποιείται ξαφνικά σε δεδομένη θερμοκρασία, σχηματίζοντας ένα ψευδοπλαστικό ρευστό. Κατά την αναθέρμανσή του, η στερεή φάση σταδιακά υγροποιείται σε θερμοκρασία πολύ υψηλότερα από αυτή στην οποία σχηματίστηκαν αρχικά οι κρύσταλλοι. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτή στην οποία σχηματίζονται οι κρύσταλλοι και αυτής στην οποία οι κρύσταλλοι τήκονται εξαρτάται από τη ρυθμό ψύξης.
3. Στην τρίτη κατηγορία η θερμοκρασία στην οποία οι κρύσταλλοι υγροποιούνται είναι ίδια με τη θερμοκρασία στερεοποίησής τους.

Ορισμένα είδη σκωρίας παρουσιάζουν σημαντική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ στερεοποίησης και υγροποίησης των κρυστάλλων. Η θερμοκρασία κρυσταλοποίησης της σκωρίας αποτελεί σημαντική παράμετρο η οποία λαμβάνεται

υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού του λέβητα τόσο σε λέβητες υγρού πυθμένα, όσο και σε λέβητες ξηρού πυθμένα και ορίζεται ως Κρίσιμη Θερμοκρασία Ιξώδους T_{cv} .

Η σχέση μεταξύ της Κρίσιμης Θερμοκρασίας Ιξώδους και της σύστασης της σκωρίας είναι πολύ πιο σύνθετη από την πρόβλεψη της ρευστότητας της σκωρίας. Ο σχηματισμός των κρυστάλλων εξαρτάται από τρεις παράγοντες:

- Ισορροπία φάσεων εντός ενός σύνθετου συστήματος συστατικών
- Παρουσία καταλυτικού στοιχείου για τον σχηματισμό κρυστάλλων
- Ρυθμός ψύξης της σκωρίας

Μία εμπειρική συσχέτιση της Κρίσιμης Θερμοκρασίας Ιξώδους και των συστατικών της σκωρίας είναι η εξής (BCURA Research):

$$T_{cv} = 2990 - 1470 \times [(SiO_2 / Al_2O_3) \times 0.3] + 360 \times [(SiO_2 / Al_2O_3) \times 0.3] - 14.7(Fe_2O_3 + CaO + MgO) + 0.15(Fe_2O_3 + CaO + MgO) \quad [7-7]$$

Οι συσχετίσεις οι οποίες έχουν αναπτυχθεί στο παρελθόν είχαν σαν στόχο να προβλέψουν τη ροή της τηγμένης τέφρας στις θερμοκρασίες στις οποίες είναι πλήρως τηγμένη. Το ιξώδες αποτελεί σημαντικό δείκτη σχηματισμού σκωρίας, ειδικότερα για λέβητες υγρού πυθμένα. Ως εκ τούτου, η Κρίσιμη Θερμοκρασία Ιξώδους έχει χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της ρευστότητας των επικαθίσεων ή της πλαστικότητας της σύγκρουσης των μορίων στις επιφάνειες των σωλήνων.

Μία άλλη σχέση που έχει προκύψει από μελέτες είναι η Θερμοκρασία για ιξώδες 250 poise [25 (Nsec) / m^2] (T_{250}). Είναι εκείνη η θερμοκρασία στην οποία το ιξώδες απόκτα την οριακή τιμή 250 poise. Για τιμές ιξώδους κάτω των 250 poise η τέφρα αρχίζει να ρέει και είναι εύκολο να απομακρυνθεί σε αυτή τη μορφή (slagtapping). Ο συνηθέστερος τύπος που συναντάται στην βιβλιογραφία είναι:

$$T_{250} = \sqrt{\frac{10^7 \cdot m}{2.39794 - c}} + 150 \quad [7-8]$$

Όπου,

$$m = 0,00835 \cdot [SiO_2] + 0,00601 \cdot [Al_2O_3] - 0,109$$

$$c = 0,0415 \cdot [SiO_2] + 0,0192 \cdot [Al_2O_3] + 0,0276 \cdot [Fe_2O_3] + 0,016 \cdot [CaO] - 3.92$$

Στους λέβητες ξηρού πυθμένα, η σκωρία ξεκινάει να σχηματίζεται από μια αρχομένη τήξης διαδικασία και κατά την οποία παρατηρούνται οι μεγαλύτερες απώλειες μετάδοσης θερμότητας. Η διαδικασία αυτή ίσως οφείλεται στην ιξώδη ροή των επιφανειακών στρωμάτων των επικαθίσεων, στη διάχυση της στερεής φάσης, στην επαφή των επικαθίσεων με τα αιωρούμενα σωματίδια ή και στις χημικές αντιδράσεις μεταξύ των αερίων και των στερεών. Το πλαστικό η ρευστό τμήμα της επικαθίσης εμφανίζεται μόνο από την πλευρά της εστίας. Οι επικαθίσεις οι οποίες σχηματίζονται από άνθρακες με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία μπορεί να βρίσκονται σε όλη τους την έκταση σε αρχομένη τήξης κατάσταση. Οι ρευστομηχανικές ιδιότητες οι οποίες έχουν μεγαλύτερη σημασία, στην περίπτωση των λεβήτων ξηρού πυθμένα, εντοπίζονται στην περιοχή της πλαστικής συμπεριφοράς και εξαρτώνται από τον ρυθμό απόσβεσης της κρυσταλλοποίησης, τη συγκέντρωση των κρυστάλλων και από τις αλλαγές στη χημική σύσταση του ρευστού. Συνεπώς η χρήση του ιξώδους ως δείκτης σχηματισμού σκωρίας σε λέβητες ξηρού πυθμένα και οι οποίοι λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

7.9. Δείκτες επιμόλυνσης

Από έρευνες που έχουν γίνει στο παρελθόν, έχουν προκύψει διάφορες εμπειρικές σχέσεις βάσει των οποίων μπορεί να γίνει μια εκτίμηση για την τάση που έχει ένας άνθρακας να δημιουργήσει επικαθίσεις. Πέρα από τις σχέσεις οι οποίες έχουν αναφερθεί προηγουμένως και έχουν ως βάση τις χαρακτηριστικές θερμοκρασίες και το ιξώδες, επιπρόσθετα παρουσιάζονται και οι εμπειρικές σχέσεις οι οποίες βασίζονται στη χημική σύσταση του καυσίμου. Σημειώνεται ότι η χρησιμότητα όσων σχέσεων έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα καθώς και αυτών που ακολουθούν είναι περιορισμένη διότι δε λαμβάνουν υπόψη σημαντικούς παράγοντες όπως η επιλεκτική εναπόθεση της τέφρας. Προκειμένου να εξαχθούν έγκυρα συμπεράσματα μέσα από τη χρήση τέτοιων σχέσεων θα πρέπει να γίνεται συνδυασμένη χρήση τους.

7.9.1. Αναλογία Βάσεων/Οξινών (Base/AcidRatio)

$$\frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \quad [7-9]$$

Λόγω του ότι τα περισσότερα στοιχεία συνδυάζονται μεταξύ τους βάσει λόγω του ιδιοτήτων τους ως βάσεις ή όξινα, ο δείκτης αναλογίας βάσεων/όξινων αποτελεί μια ένδειξη για το εάν τα μέταλλα που περιέχονται στην τέφρα θα αντιδράσουν μεταξύ τους και θα δημιουργήσουν άλατα με χαμηλό σημείο τήξης. Υψηλές τιμές είτε βάσεων είτε όξινων καταδεικνύουν μικρή τάση σχηματισμού επικαθίσεων. Σημειώνεται πως τα αλκαλικά μέταλλα, κάλιο και νάτριο, αποτελούν εξαίρεση διότι η παρουσία τους ρίχνει το σημείο τήξης της τέφρας χωρίς να επηρεάζεται από την αναλογία βάσεων και όξινων. Ως εκ τούτου όταν αυτά εμφανίζονται στη σύσταση της τέφρας σε επαρκής συγκεντρώσεις μεταβάλλουν σημαντικά την επίδραση της αναλογίας Β/Ο.

Παρόλο που η αναλογία Β/Ο αποτελεί ένδειξη της συμπεριφοράς της τέφρας σχετικά με την τήξη της δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως το μόνο κριτήριο εκτίμησης. Μια τόσο απλοποιημένη θεώρηση όπως είναι η αναλογία Β/Ο δεν λαμβάνει υπόψη διαφορές στην συμπεριφορά των βάσεων κατά την τήξη τους αλλά ούτε και αναγνωρίζει τον βαθμό με τον οποίο αλληλεπιδρούν με τα όξινα συστατικά.

Επίσης, τέφρα στην οποία παρουσιάζονται κυρίως αλουμίνιο και σίδηρος, θα έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά επιμόλυνσης από μία τέφρα με υψηλά ποσοστά πυριτίου και σιδήρου παρόλο που μπορεί να παρουσιάζουν ίδια αναλογία Β/Ο.

Σε κάθε περίπτωση, η αναλογία Β/Ο αποτελεί μία πολύτιμη συμπληρωματική πληροφορία σχετικά με τη θερμοκρασία τήξης της τέφρας και τη συμπεριφορά του άνθρακα στον λέβητα.

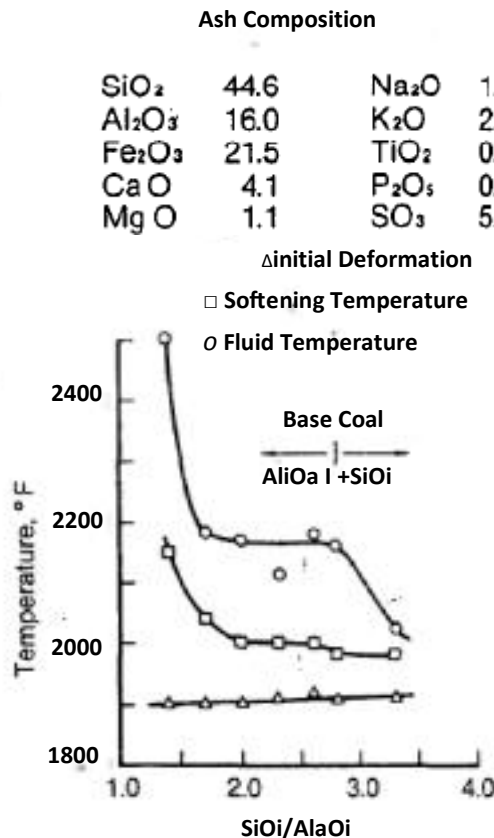
7.9.2. Αναλογία Πυριτίου/Αλουμίνας (*Silica/Alumina Ratio*)

$$\frac{S}{A} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad [7-10]$$

Οι τιμές του δείκτη αυτού κυμαίνονται μεταξύ 0.8 και 0.4. Η αναλογία πυριτίου/αλουμίνας παρέχει επιπρόσθετες πληροφορίες σχετικά με την τήξη της τέφρας. Καθώς και τα δύο αυτά συστατικά είναι όξινα και ως εκ τούτου έχουν υψηλές θερμοκρασίες τήξης, το πυρίτιο είναι πιο πιθανό να αντιδράσει με βάσεις και να σχηματίσει στοιχεία με χαμηλή θερμοκρασία τήξης απ' ότι η αλουμίνη. Συγκρίνοντας δύο άνθρακες οι οποίοι παρουσιάζουν την ίδια αναλογία

βάσεων/όξινα, αυτός ο οποίος παρουσιάζει μεγαλύτερη αναλογία πυριτίου/αλουμίνας θα έχει χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης της τέφρας.

Η επίδραση των αυξημένων ποσοστών αλουμίνας στον σχηματισμό πυριτικών αλάτων, εξαρτάται από το ποσοστό και τον συνδυασμό των βάσεων που παρουσιάζονται, τη θερμοκρασία και το χρόνο αντίδρασης και άλλους παράγοντες.



Εικόνα 7-6 : Θερμοκρασίες Τήξης της Τέφρας όπως αυτές Επηρεάζονται από την Αναλογία Πυριτίου/Αλουμίνας (C-ELaboratory)

Στην εικόνα 6-6 παρουσιάζεται η επίδραση της αναλογίας Π/Α στη θερμοκρασία τήξης της τέφρας. Κατά την εργαστηριακή ανάλυση διάφορες ποσότητες πυριτίου και αλουμίνας αναμίχθηκαν με άνθρακα (Illinois). Σύμφωνα με τα δεδομένα που προκύπτουν, για τιμές της αναλογίας Π/Α μεταξύ 1.7 έως 2.8 δεν παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές. Για τιμές κάτω του 1.7 η θερμοκρασία μαλάκυνσης και ρευστού αυξάνονται. Η θερμοκρασία αρχικής αλλοίωσης δεν μεταβάλλεται συναρτήσει των μεταβολών της αναλογίας Π/Α.

7.9.3. Αναλογία Σιδήρου/Ασβεστίου (Iron/Calcium Ratio)

$$\frac{I}{C} = \frac{Fe_2O_3}{CaO} \quad [7-11]$$

Ο δείκτης αναλογία σιδήρου/ασβεστίου δεν λαμβάνει υπόψη τις διαφορές στη συμπεριφορά της τέφρας κατά την τήξη. Ανάμεσα στα πέντε πιο σημαντικά συστατικά (βάσεων, όξινων), ο σίδηρος και το ασβέστιο, είναι τα πιο σημαντικά κυρίως διότι συνιστούν το μεγαλύτερο μέρος των βάσεων. Τα οξειδία του σιδήρου αποτελούν το 5% με 40% της τέφρας και τα οξειδία του ασβεστίου αποτελούν το 2% με 30%. Από μελέτες που έχουν γίνει έχουν γίνει κατά καιρούς οι εξής δηλώσεις:

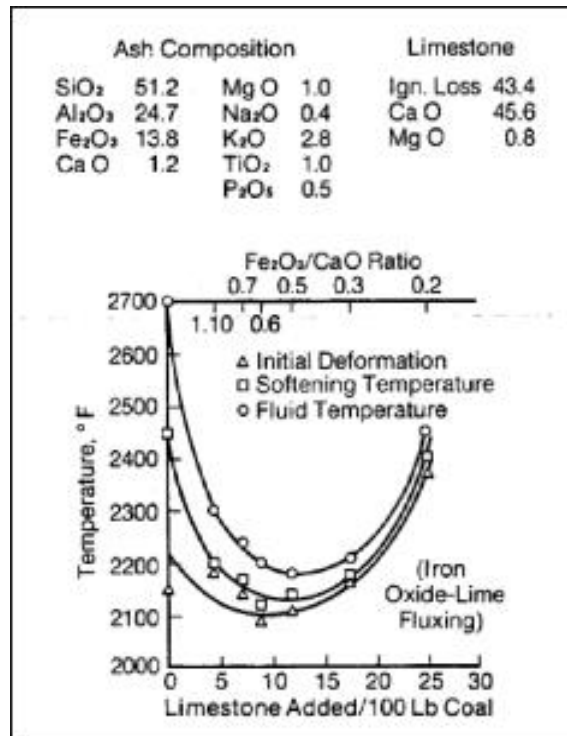
- Απουσία ασβεστίου, τα οξειδία του σιδήρου δεν αυξάνουν την ευτηξία της σκωρίας
- Τα οξειδία του φερρίτη σε ποσοστό ως και 20%, αυξάνουν την ευτηξία καθώς το ποσοστό αυξάνεται. Από 20% έως 40% η ευτηξία δεν επηρεάζεται.
- Ο συνδυασμός των οξειδίων του σιδήρου και του ασβεστίου επηρεάζει την μεταβολή της ευτηξίας. Σε τέφρα με ποσοστό οξειδίων του σιδήρου πάνω από 14%, η προσθήκη δεδομένου ποσοστού ασβεστίου έχει σαν συνέπεια πτώση της θερμοκρασίας τήξης μεγαλύτερη από αυτή που θα προκαλούσε η προσθήκη ίσου ποσοστού οξειδίου του σιδήρου.
- Η ποσότητα οξειδίου του μαγνησίου (μαγνησία) είναι συνήθως μικρότερη από την ποσότητα του ασβεστίου. Η αύξηση της ευτηξίας που προκαλεί, παρουσία ασβεστίου, είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα προκαλούσε η προσθήκη ίσης ποσότητας ασβεστίου σε αναλογία 3:2.

Τα συγκριτικά αποτελέσματα που ακολουθούν επιβεβαιώνουν αυτή την συσχέτιση.

Πίνακας 7-4 : Θερμοκρασία Μαλάκυνσης Τέφρας Συναρτήσει Fe₂O₃ και CaO

Άνθρακας	Fe ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃ / CaO	Θερμοκρασία Μαλάκυνσης (°C)
(1)	31.8	0.3	106.0	1293
(2)	24.8	2.0	12.4	1243
(3)	21.3	4.8	4.4	1165

Η αναλογία ασβεστίου σιδήρου για τις τρεις περιπτώσεις είναι 106, 12.4 και 4.4 αντίστοιχα. Στην Εικόνα 6-7 φαίνεται η επίδραση της προσθήκης ασβεστόλιθου στη θερμοκρασία τήξης της τέφρας. Βάση αυτών των αποτελεσμάτων καθώς και μέσα από την παρατήρηση άλλων συσχετίσεων της θερμοκρασίας τήξης και της σύστασης της τέφρας, συμπεραίνεται ότι η αναλογία σιδήρου/ασβεστίου μεταξύ 0.2% και 10% έχει σημαντική επίδραση στην πτώση της θερμοκρασίας τήξης της τέφρας. Για ποσοστό μάλιστα μεταξύ 0.3% και 3% η επίδραση αυτή είναι εντονότατη.



Εικόνα 7-7 : Θερμοκρασίες Τήξης Τέφρας όπως αυτές Επηρεάζονται από τη Προσθήκη Ασβεστόλιθου

7.9.4. Αναλογία Σιδήρου/Δολομίτη (Iron/Dolomite Ratio)

$$\frac{I}{D} = \frac{Fe_2O_3}{CaO + MgO} \quad [7-12]$$

Η παράμετρος αυτή είναι ουσιαστικά πανομοιότυπη με την αναλογία Fe₂O₃/CaO. Το CaO και το MgO έχουν όμοιες τηκτικές ιδιότητες. Η χρήση αυτού του δείκτη ενδείκνυται όταν το ποσοστό του μαγνησίου στην τέφρα είναι υψηλό. Για βιτομινούχους άνθρακες η αναλογία σιδήρου/δολομίτη είναι πάνω από την μονάδα, ενώ για λιγνιτικούς άνθρακες η αναλογία είναι κάτω από τη μονάδα.

7.9.5. Ποσοστό Δολομίτη DP (Dolomite Percentage)

$$DP = \left(\frac{CaO + MgO}{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O} \right) \times 100 \quad [7-13]$$

Η παράμετρος χρησιμοποιείται κυρίως για τέφρα με ποσοστό βάσεων - οξειδίων πάνω από 40%. Επίσης έχει συσχετιστεί εμπειρικά με το ιξώδες της σκωρίας της τέφρας. Κυμαίνεται από 40% έως 98%. Για ένα δεδομένο ποσοστό βάσεων, η αύξηση του ποσοστού δολομίτη συνήθως έχει σαν αποτέλεσμα της αύξηση της θερμοκρασίας τήξης της τέφρας καθώς και την αύξηση του ιξώδους της σκωρίας.

7.9.6. Ισοδύναμο Fe₂O₃ και ποσοστό Σιδηρούχων FP (Equivalent Percentage & Ferric Percentage)

$$\text{Equivalent Fe}_2\text{O}_3 = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 1.11\text{FeO} + 1.43\text{Fe} \quad [7-14]$$

$$FP = \left(\frac{Fe_2O_3}{\text{Equivalent Fe}_2O_3} \right) \times 100 \quad [7-15]$$

Οι δύο αυτές σχέσεις περιγράφουν ουσιαστικά το βαθμό οξειδωσης του σιδήρου που περιέχεται στη σκωρία που σχηματίζεται από την τέφρα του άνθρακα

Οι όροι αυτοί εισήχθησαν όταν παρατηρήθηκε ότι οι θερμοκρασίες τήξης της τέφρας και η θερμοκρασία κρυσταλοποίησης της σκωρίας ήταν χαμηλότερες σε αναγωγική ατμόσφαιρα απ' ότι σε οξειδωτική ατμόσφαιρα. Πειραματικές μελέτες έδειξαν πως αυτή η απόκλιση προέκυπτε λόγω των διάφορων μορφών οξειδίων του σιδήρου που μπορούσαν να σχηματιστούν ανάλογα με το είδος της ατμόσφαιρας. Αποδείχθηκε πως το FeO και ο Fe είναι ισχυρότεροι ρευστοποιητές απ' ότι το Fe₂O₃ με αποτέλεσμα να ελαττώνουν τις θερμοκρασίες τήξης και κρυσταλοποίησης. Κατά συνέπεια οι δύο δείκτες (equivalent Fe₂O₃ και FP) εξαρτώνται από τις συνθήκες καύσης και προσδιορίζονται μέσω της χημικής ανάλυσης της σκωρίας του λέβητα.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι βάσει του προτύπου ASTM D1857, έχει προσδιοριστεί ότι η αναγωγική ατμόσφαιρα θα πρέπει να περιέχει μείγμα οξειδωτικών και αναγωγικών αερίων των οποίων το ποσοστό των οξειδωτικών αερίων θα πρέπει να κυμαίνεται εντός των ορίων **20%** με 80% κατ' όγκο. Εντός αυτού του εύρους σύστασης ο σίδηρος είναι κυρίως στη μορφή του μονοξειδίου

του σιδήρου FeO. Υπό εντονότερες οξειδωτικές συνθήκες, ο σίδηρος εμφανίζεται κυρίως με τη μορφή Fe₂O₃. Τέλος υπό πιο αναγωγικές συνθήκες ο σίδηρος εμφανίζεται κυρίως στη μεταλλική κατάσταση Fe.

7.9.7. Ποσοστό Πυριτίου (Silica Percentage)

$$SP = \left(\frac{SiO_2}{SiO_2 + \text{Equivalent } Fe_2O_3 + CaO + MgO} \right) \times 100 \quad [7-16]$$

Το ποσοστό πυριτίου, το οποίο κυμαίνεται από 35% με 90%, έχει συσχετιστεί εμπειρικά με το ιξώδες της σκωρίας. Καθώς το SP αυξάνεται, αυξάνεται και το ιξώδες της σκωρίας (το ποσοστό πυριτίου συχνά αναφέρεται και ως αναλογία πυριτίου ή ισοδύναμο περιεχόμενο πυρίτιο).

7.9.8. Συνολικά Αλκάλια (Na₂O + K₂O)

$$\text{Alkali Content of Ash} = \sum (\%Na_2O + 0.6589\%K_2O) \quad [7-17]$$

Σημείωση: Ο δείκτης αυτός έχει χρηστικότητα μόνο για βιτομινούχους άνθρακες

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το κάλιο και το νάτριο ενώνονται με άλλα στοιχεία σχηματίζοντας στοιχεία με χαμηλή θερμοκρασία τήξης. Η επίδραση των αλκαλίων στην μεταβολή της θερμοκρασίας τήξης της τέφρας είναι ανάλογη της περιεκτικότητας με την οποία αυτά εμφανίζονται στην τέφρα.

Σε άνθρακες οι οποίοι περιέχουν νάτριο, ο ρυθμός συσσώρευσης των επικαθίσεων και η δυνατότητα να ελεγχθούν αποτελεσματικά, φαίνεται να έχουν σχέση με το ποσοστό του νατρίου. Κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα αληθές για τέφρα προερχόμενη από λιγνιτικούς άνθρακες (μικρό ποσοστό σιδήρου, υψηλό ποσοστό αλκαλίων και υψηλό ποσοστό αλκαλικών γαιών). Η τέφρα αυτών των ανθράκων περιέχει CaO έως και 40% και το οξείδιο του νατρίου κυμαίνεται μεταξύ 1% και 15%.

Πολλές ενώσεις του νατρίου τήκονται σε θερμοκρασίες κάτω των 900 °C. Επιπλέον, οι στερεές μορφές του νατρίου είναι αυτές οι οποίες συνεισφέρουν στο σχηματισμό των επικαθίσεων. Εκτός Από τις χαμηλές θερμοκρασίες τήξης, κάποιες ενώσεις του νατρίου αεριοποιούνται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτές διασκορπίζονται δια μέσου της ροής των καυσαερίων και στη συνέχεια, καθώς η θερμότητα

απορροφάται και η θερμοκρασία των καυσαερίων ελαττώνεται, συμπυκνώνονται πάνω σε άλλα σωματίδια της τέφρας στις μεταλλικές επιφάνειες. Το συμπυκνωμένο νάτριο παρέχει ένα «καλούπι» για τα σωματίδια της τέφρας, για να τηχθούν μαζί και να σχηματίσουν επικαθίσεις στις επιφάνειες των σωλήνων.

Τα οξειδία του νατρίου, στη θερμοκρασία 1276 °C, περνούν απευθείας από τη στερεή στην αέρια κατάσταση. Λόγω του ότι σε ορισμένους λιγνίτες και σε χαμηλής ποιότητας άνθρακες, το νάτριο μπορεί να εμφανιστεί με τη μορφή οργανικών ενώσεων, έχουν μεγάλη πιθανότητα να σχηματίσουν οξειδία του νατρίου τα οποία θα αεριοποιηθούν στην περιοχή όπου λαμβάνει χώρα η καύση. Το νάτριο έτσι ελευθερώνεται, καθώς τα οργανικά συστατικά των ενώσεων καταναλώνονται στη φλόγα και είναι άμεσα διαθέσιμα για αεριοποίηση εντός της ροής των καυσαερίων. Από την άλλη, το νάτριο το οποίο κατακρατείται με τη μορφή ανόργανων αλάτων, θα πρέπει πρώτα να αποσυντεθεί σε ελεύθερη κατάσταση πριν να είναι διαθέσιμο για αεριοποίηση και ως εκ τούτου να μην είναι κατ' ανάλογο τρόπο ενεργό.

Μια εκτεταμένη κατανομή αερίου νατρίου εντός των καυσαερίων καθιστά βέβαιη επαφή του με τα σωματίδια της τέφρας και τις μεταλλικές επιφάνειες καθώς τα καυσαέρια ψύχονται και το νάτριο συμπυκνώνεται. Ως εκ τούτου οι επιφάνειες παρουσιάζουν αυξημένη τάση συγκέντρωσης επικαθίσεων οι οποίες αυξάνονται σε μέγεθος ταχύτατα. Ο ρυθμός συγκέντρωσης είναι ανάλογος του ενεργού νατρίου που περιέχεται στον άνθρακα. Σε άνθρακα οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλες συγκεντρώσεις ενεργού νατρίου, το διάκενο μεταξύ των σωλήνων στις επιφάνειες συναγωγής πρέπει να διατηρείται αρκετά μεγάλο ούτως ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία γεφυρωμάτων επικαθίσεων από σωλήνα σε σωλήνα.

7.9.9. Άλλοι δείκτες

Πέρα από τους δείκτες που έχουν είδη αναφερθεί, παρακάτω παρουσιάζονται εν συντομία και κάποιοι επιπλέον δείκτες επιμόλυνσης που έχουν εκφραστεί κατά καιρούς στη διεθνή βιβλιογραφία και που έχουν παρουσιαστεί στη μελέτη του BryersR. (1995).

Δείκτες σκωρίας (slagging)

1. Δείκτης επισκωρίασης (Slagging index Rs):

$$RS = \left(\frac{B}{A}\right) \cdot (\%S_2 \text{ στο καύσιμο επί ξηρού}) \quad [7-18]$$

Σημείωση: Ο δείκτης αυτός έχει χρησιμότητα μόνο για βιτομινούχους άνθρακες

Δείκτες πουριού (fouling)

1. Δείκτης πουριού (fouling index RF):

$$RF = \left(\frac{B}{A}\right) \cdot (\%Na_2O \text{ στην εργαστηριακή τέφρα}) \quad [7-19]$$

Σημείωση: Ο δείκτης αυτός έχει χρησιμότητα μόνο για βιτομινούχους άνθρακες

2. Περιεκτικότητα εργαστηριακής τέφρας σε %Na₂O

7.10. Ιδιότητες των συστατικών της τέφρας

Η παρουσία όξινων οξέων στα συστατικά της τέφρας SiO₂, Al₂O₃ και TiO₂ αυξάνουν τη θερμοκρασία τήξης της. Αντίστοιχα, η θερμοκρασία τήξης ελαττώνεται παρουσία βασικών οξέων Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O και K₂O. Τα ορυκτά τα οποία σχετίζονται με τον άνθρακα αποτελούνται από πολλαπλούς συνδυασμούς των στοιχείων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-5.

Πίνακας 7-5 : Ιδιότητες Συστατικών Τέφρας

Στοιχείο	Οξείδιο	Θερμοκρασία Τήξης m	Χημική Ιδιότητα	Χημική Ένωση	Θερμοκρασία Τήξης m
Si	SiO ₂	1715	Όξινο	Na ₂ SiO ₃	877
Al	Al ₂ O ₃	2043	Όξινο	K ₂ SiO ₃	977
Ti	TiO ₂	1838	Όξινο	Al ₂ O ₃ -Na ₂ O-6SiO ₂	1099
Fe	Fe ₂ O ₃	1566	Βασικό	Al ₂ O ₃ -K ₂ O-6SiO ₂	1149
Ca	CaO	2521	Βασικό	FeSiO ₃	1144
Mg	MgO	2793	Βασικό	CaO-Fe ₂ O ₃	1249
Na	Na ₂ O	Αεριοποιείται στους 1277	Βασικό	CaO-MgO-2SiO ₂	1391
K	K ₂ O	Διαλύεται στους 349	Βασικό	CaSiO ₃	1540

Το άθροισμα των παρατηρούμενων όξινων οξειδίων της τέφρας κυμαίνεται μεταξύ 20% και 90% της σύστασής της. Γενικά, τέφρα με υψηλό ποσοστό οξειδίων παρουσιάζει υψηλή θερμοκρασία τήξης και υψηλό ιξώδες σκωρίας.

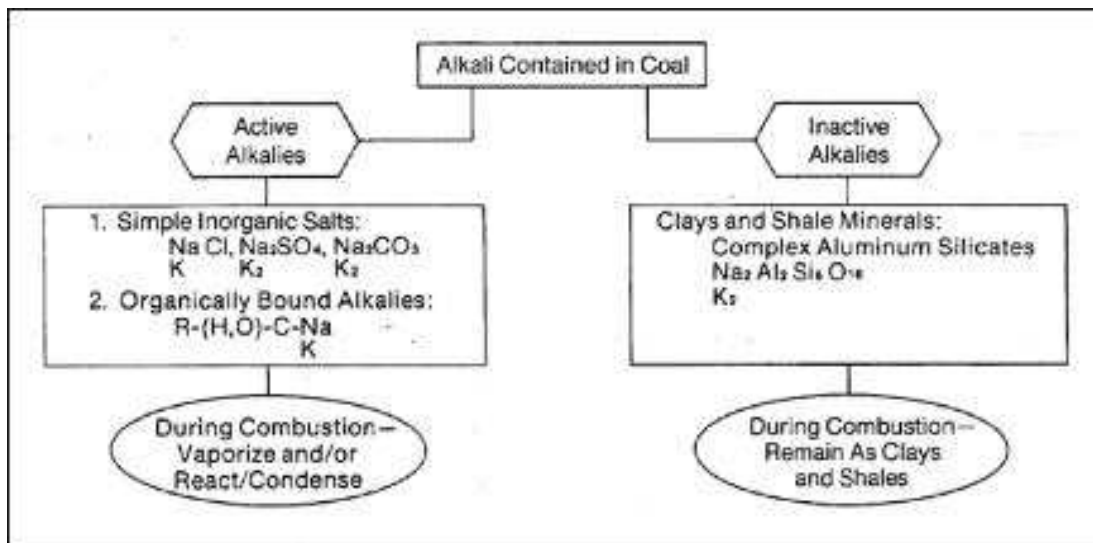
Το άθροισμα των παρατηρούμενων βασικών οξειδίων της τέφρας κυμαίνεται μεταξύ 5% και 80% της σύστασής της. Γενικώς η παρουσία βασικών οξειδίων, είτε υψηλή είτε χαμηλή, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της τέφρας. Η ελάχιστη θερμοκρασία τήξης λαμβάνεται για περιεκτικότητα σε βασικά συστατικά 30% με 40%.

7.11. Μορφές αλκαλίων στους άνθρακες

Τα περιεχόμενα στην τέφρα αλκάλια, τα οποία στην θερμοκρασία καύσης ατμοποιούνται, συμπυκνώνονται σε περιοχές ψυχρές και δημιουργούν τις προϋποθέσεις για την ρύπανση των επιφανειών. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα, την αύξηση της θερμοκρασίας των σωληνώσεων, που είναι συνέπεια της πρόσθετης αντίστασης στη ροή θερμότητας, που προήλθε από το στρώμα ρύπανσης. Πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς της τέφρας, αποτελεί η περιεκτικότητα της, σε Na₂O. Ο χαρακτηριστικός αριθμός αλκαλίων χαρακτηρίζει την συμπεριφορά της τέφρας και της καύσης.

Τα αλκάλια μπορούν να εμφανιστούν στους άνθρακες με διάφορες μορφές. Τα αλκάλια τα οποία αεριοποιούνται κατά την καύση συχνά χαρακτηρίζονται ως ενεργά αλκάλια διότι είναι ελεύθερα να αντιδράσουν ή να συμπυκνωθούν στα

ακόλουθα τμήματα του λέβητα. Τα ενεργά αλκάλια αποτελούνται καταρχήν από απλά ανόργανα άλατα και από οργανικούς δεσμούς αλκαλίων. Οι πιο σταθερές μορφές αλκαλίων (ανενεργά) εμφανίζονται στις ακαθαρσίες, όπως ο άργιλος και σχιστολιθικά ορυκτά (πυριτικό άλας), οι οποίες παραμένουν σχετικά αδρανείς κατά την καύση και γι' αυτό έχουν μικρότερη επιρροή στο μηχανισμό σχηματισμού των επικαθίσεων. Στην εικόνα 6-8 παρουσιάζονται οι δύο κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται οι διάφορες μορφές αλκαλίων ανάλογα με τη συμπεριφορά τους κατά την καύση.



Εικόνα 7-8 : Κατανομή Αλκαλίων στον Άνθρακα

Ο Η. Ε. Crossley (1962) σε μια ομιλία του στο Ινστιτούτο Καυσίμων είχε δηλώσει τα εξής σχετικά με τις μορφές αλκαλίων στους άνθρακες:

«Ήταν γνωστό ότι τα αλκάλια στον άνθρακα υπήρχαν σε δύο μορφές: ως ενώσεις χλωρίου και ως σύνθετα πυριτικά άλατα. Οι ενώσεις του χλωρίου αναμενότανε να εξαερώνονται άμεσα κατά την καύση αλλά τα πυριτικά άλατα αναμενότανε να παραμείνουν ως αλκάλια στην τέφρα. Έτσι, εάν γινότανε μια προσπάθεια να συσχετίσουμε τις μορφές των αλκαλίων που εμφανίζονται στις επικαθίσεις οι οποίες είναι πλούσιες σε αλκάλια με τα αλκάλια στον άνθρακα, θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη και τα ανενεργά αλκάλια. Αντί αυτού, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί η ποσότητα του χλωρίου ως δείκτης σχετικά με την ποσότητα των εξαερωμένων αλκαλίων. Έτσι, ο προσδιορισμός του χλωρίου κατά τη χημική ανάλυση των ανθράκων αποτελεί μια πολύ σημαντική πληροφορία.» (Η δήλωση αυτή δεν συμπεριλαμβάνει ούτε και περιγράφει το μηχανισμό εξαέρωσης του νατρίου όπως αυτός εμφανίζεται στους λιγνίτες)

Το περιεχόμενο χλώριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη της τάσης σχηματισμού επικαθίσεων ενός άνθρακα. Στον πίνακα 6-6 παρουσιάζεται η κατάταξη των ανθράκων βάσει της περιεκτικότητας τους σε χλώριο.

Πίνακας 7-6 : Δυναμικό επιμόλυνσης – Περιεκτικότητα σε Χλώριο

Τάση σχηματισμού επικαθίσεων	Περιεκτικότητα χλωρίου % στον άνθρακα
Υψηλή	Πάνω από 0,3
Μέση	0,3 με 0,15
Χαμηλή	Λιγότερο από 0,15

Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού της τάσης του άνθρακα να σχηματίσει επικαθίσεις χωρίς να χρησιμοποιείται αυτός ως μέτρο σύγκρισης είναι ο προσδιορισμός του υδατο-διαλυτού νατρίου στον άνθρακα. Στον πίνακα 6-7 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ υδατο-διαλυτού νατρίου και χλωρίου.

Πίνακας 7-7 : Δυναμικό Επιμόλυνσης - Υδατο-Διαλυτού Νατρίου και Χλωρίου

Τάση σχηματισμού επικαθίσεων	Cl%	Ισοδύναμο Na %
Υψηλή	Πάνω από 0,5	Πάνω από 0,33
Μέση	0,3	0,2
Χαμηλή	Λιγότερο από 0,1	Λιγότερο από 0,07

Παρόλο που το υδατο-διαλυτό νάτριο στον άνθρακα είναι ενδεικτικό του νατρίου που υπάρχει στον άνθρακα ως ενεργό αλκάλιο, ενδεχομένως να μην αντιπροσωπεύει όλο το ενεργό νάτριο που περιέχεται σε αυτόν. Για πολλούς άνθρακες, κυρίως χαμηλής ποιότητας, ένα μεγάλο μέρος του νατρίου περιέχεται σε οργανικούς δεσμούς ο οποίοι δεν διαλύονται στο νερό.

7.12. Επιλεκτική εναπόθεση συστατικών της τέφρας

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφοροι δείκτες επιμόλυνσης, οι οποίοι αποτελούν ένδειξη της συμπεριφοράς της τέφρας σχετικά με τις επικαθίσεις. Οι αναλύσεις αυτές βασίζονται στην ομογενή κατανομή της ανόργανης ύλης στον άνθρακα. Αυτή η θεώρηση μπορεί να είναι αληθής στην περίπτωση όπου ο άνθρακας καίγεται με

τη μορφή μεγάλων σωματιδίων. Στην περίπτωση όμως όπου ο άνθρακας κονιορτοποιείται, κάτι τέτοιο δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρως ορθό, διότι η αναλογία των ανόργανων συστατικών των σωματιδίων του εμφανίζει μεγάλη διαφοροποίηση (O'Gorman & Walker, Mineral Matter Characteristics of Some American Coals, 1971) (O'Gorman & Walker, Thermal Behavior of Mineral Fractions Separated from Selected American Coals, 1973) (Payner & Marskell, 1963). Λόγω του ότι η συμπεριφορά των σωματιδίων του άνθρακα εξαρτάται άμεσα από την αναλογία των συστατικών του στοιχείων, η εξέτασή της βάση μιας μέσης τιμής των ιδιοτήτων τους προκειμένου να προσδιοριστεί η τάση επιμόλυνσης, ενδεχομένως να μην είναι ακριβής.

Οι περισσότερες εκτιμήσεις της τέφρας, συμπεριλαμβανομένων και των θερμοκρασιών τήξης, δεν λαμβάνουν υπόψη το φαινόμενο της επιλεκτικής εναπόθεσης της τέφρας όταν μελετάται η συμπεριφορά της σχετικά με τις επικαθίσεις. Η διαχωρισμός του άνθρακα στα συστατικά του, πριν από την εκτίμηση των θερμοκρασιών τήξης της τέφρας, μπορεί να βελτιώσει την επίγνωση του τι ακριβώς συμβαίνει μέσα στο λέβητα, π.χ. μεμονωμένα σωματάρια τέφρας μπορούν να δρουν ανεξάρτητα το ένα με το άλλο σχετικά με τη φυσική τους κατάσταση και τον τρόπο με τον οποίο αντιδρούν στη φλόγα.

7.13. Κατανομή της ανόργανης ύλης στον άνθρακα

Η σύσταση της τέφρας κατά την καύση διαφέρει σημαντικά από τη σύσταση της τέφρας η οποία σχηματίζει τις επικαθίσεις στο πυθμένα του λέβητα. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι θερμοκρασίες τήξης καθώς και η αναλογία τέφρας στον άνθρακα, δεν επεξηγεί την επιλεκτική εναπόθεση των συστατικών της τέφρας όπως αυτή παρατηρείται στο εσωτερικό του λέβητα.

Στον πίνακα 6-8 καταγράφεται η σύσταση των επικαθίσεων στο πυθμένα του λέβητα σε αντιπαράθεση με τη σύσταση της τέφρας όπως αυτή σχηματίζεται κατά την καύση. Οι τιμές αυτές προέρχονται από λέβητα ο οποίος καίει βιτομηνιούχο άνθρακα με υψηλά ποσοστά πτητικών. Η πιο αξιοσημείωτη διαφορά των δύο δειγμάτων είναι η περιεκτικότητα σε σίδηρο. Οι επικαθίσεις στον πυθμένα του λέβητα παρουσιάζουν τριπλάσια περιεκτικότητα σε σίδηρο απ' ότι η τέφρα ως έχει κατά την καύση. Η διαφορά αυτή αποτελεί ένδειξη του τρόπου με τον οποίο κατανέμεται η οργανική ύλη στον άνθρακα.

Βάση αυτού του μηχανισμού, είναι δυνατόν να δοθεί μία εξήγηση σχετικά με την αιτία που ορισμένοι άνθρακες μολύνουν πολύ περισσότερο τον λέβητα απ' ότι προβλέπουν οι συμβατικές μέθοδοι ανάλυσης (δείκτες επιμόλυνσης). Ο άνθρακας είναι ετερογενές ορυκτό αποτελούμενο από οργανικά και ανόργανα συστατικά. Οι διαφορές στην πυκνότητα καθώς και στις επιφανειακές ιδιότητες, αξιοποιούνται κατά το διαχωρισμό του καθαρού άνθρακα από τα σείρα και τα τμήματα του άνθρακα που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα.

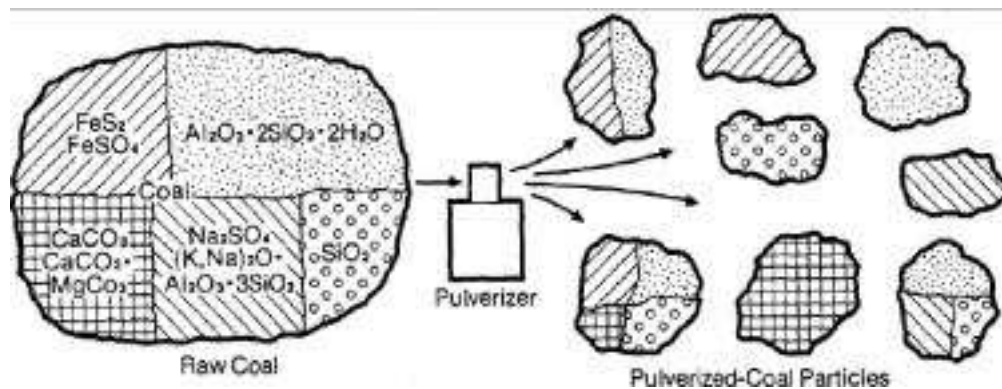
**Πίνακας 7-8 : Σύγκριση Σύστασης Τέφρας Επικαθίσεων και Τέφρας κατά την Καύση
- Σύγκριση Σύστασης Τέφρας Επικαθίσεων και Τέφρας στην Καύση**

Συστατικό	Τέφρα κατά την Καύση (%)	Επικάθιση Τέφρας στον Πυθμένα του Λέβητα (%)
SiO ₂	47,0	33,3
Al ₂ O ₃	26,7	18,0
Fe ₂ O ₃	14,6	43,5
CaO	2,2	1,2
MgO	0,7	0,5
Na ₂ O	0,4	0,2
K ₂ O	2,3	1,6
TiO ₂	1,3	0,8
P ₂ O ₅	0,9	0,4
SO ₃	1,1	0,5

Επιπλέον, η εκτενής κονιορτοποίηση του άνθρακα βελτιώνει την απελευθέρωση της ανόργανης ύλης. Οι Moody και Langan έχουν εκτιμήσει ότι το 40% με 70% των σωματιδίων είναι καθαρός άνθρακας (περιέχει μόνο εγγενή ανόργανη ύλη), το 20% - 40% είναι άνθρακας και ανόργανη ύλη (και εγγενή και ξένη ανόργανη ύλη) και το 10% με 40% είναι καθαρή ανόργανη ύλη (μόνο ξένη ανόργανη ύλη).

Η συμπεριφορά της ανόργανης ύλης ενός σωματιδίου άνθρακα εξαρτάται από τη σύσταση του σωματιδίου αυτού καθαυτού, και φυσικά, από τη σύνθεση των καυσαερίων. Κάθε σωματίδιο θα έρθει σε μία φυσική κατάσταση (κολλώδες, ημιτετηγμένο, τηγμένο) εξαρτώμενη από τη σύνθεσή του και τον τρόπο με τον οποίο θα αντιδράσει με τα περιβάλλοντα καυσαέρια χωρίς να επηρεαστεί από τη

φυσική κατάσταση ή τη σύνθεση των γειτονικών αιωρούμενων σωματιδίων. Στην Εικόνα 6-9 παρουσιάζεται η υποθετική ανάλυση ενός κομματιού.



Εικόνα 7-9 : Υποθετική Κατανομή Ανόργανης Ύλης σε Ένα Σωματίδιο Άνθρακα

Κάθε κόκκος καυσίμου, μπορεί να έχει τις εξής βασικές συστάσεις:

- Καύσιμο ελεύθερο ανόργανων ή μεταλλικών προσμείξεων, με πυκνότητα $< 1,3 \text{ gr/cm}^3$.
- Μεταλλικές - ανόργανες ενώσεις, με διαφορετική πυκνότητα και θερμοκρασία τήξης, όπως π.χ. πυρίτης με χαμηλή θερμοκρασία τήξης και μεγάλη πυκνότητα ή άμμος με υψηλή θερμοκρασία τήξης και μέση πυκνότητα.
- Μείγματα μεταλλικών ενώσεων, όπου η θερμοκρασία τήξης και η πυκνότητα, προκύπτουν από μέσες τιμές.
- Προσμείξεις καυσίμου, με ανόργανες ενώσεις (π.χ. Άργιλο). Οι προσμείξεις αυτές, συμπεριφέρονται κατά την καύση, όπως η τέφρα που προέρχεται από τα φυτά, έτσι ώστε, το ποσοστό του 1-2%, να αυξάνει σημαντικά. Η τέφρα αυτή, χαρακτηρίζεται ως συνδεδεμένη με το καύσιμο τέφρα και δεν μπορεί να απομακρυνθεί με τα διάφορα συστήματα διαλογής.

Ορισμένα τμήματα του άνθρακα ενδεχομένως να έχουν εμπλουτιστεί με συγκεκριμένα ανόργανα συστατικά. Όταν το κύριο κομμάτι του άνθρακα κονιορτοποιηθεί, η σύσταση κάθε σωματιδίου ξεχωριστά δεν είναι αντιπροσωπευτική της μέσης σύστασης του κυρίως κομματιού. Όταν τα σωματίδια αυτά καούν στο λέβητα, η τάση τους για να σχηματίσουν επικάθιση εξαρτάται από τις φυσικές τους ιδιότητες, τις αεροδυναμικές τους ιδιότητες και τις ρευστομηχανικές τους ιδιότητες. Τα σωματίδια της τέφρας τα οποία έχουν υψηλή

τάση να σχηματίζουν επικαθίσεις είναι πιθανώς τηγμένα, έχουν υψηλή πυκνότητα, σφαιρικό σχήμα, δεν ακολουθούν τη ροή των καυσαερίων και προσκολλούν άμεσα στις επιφάνειες με τις οποίες έρχονται σε επαφή. Αντιθέτως, σωματίδια με χαμηλή τάση για σχηματισμό επικαθίσεων, είναι πιθανώς ξηρά, έχουν ακανόνιστο σχήμα και ακολουθούν τη ροή των καυσαερίων χωρίς να προσκολλούν στις επιφάνειες του λέβητα.

Από μελέτες έχει προκύψει πως οι ενώσεις του σιδήρου συγκαταλέγονται ανάμεσα στα στοιχεία που συμπεριλαμβάνονται στην τέφρα, τα οποία έχουν τη χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης (Byers, 1975). Είναι δεδομένο ότι σωματίδια με υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο σχηματίζουν σφαιρίδια υψηλής πυκνότητας τα οποία έχουν χαμηλό συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης, διευκολύνοντας την διέλευσή τους μέσα από τη ροή των καυσαερίων προς τα διάφορα τμήματα του λέβητα. Αντιθέτως, σωματίδια τα οποία έχουν υψηλή θερμοκρασία τήξης, δεν τήκονται και δε σχηματίζουν σφαιρίδια. Το ακανόνιστο σχήμα τους, δίνει έναν αυξημένο συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης, αναγκάζοντας τα να ακολουθούν τη ροή των καυσαερίων. Επίσης ορισμένα σωματίδια με χαμηλή θερμοκρασία τήξης περιέχουν ενώσεις ανθρακικών αλάτων των οποίων ο μετασχηματισμός σε CO₂ παράγει καινόςφαιρες, χαμηλής πυκνότητας που επίσης ακολουθούν τη ροή των καυσαερίων.

7.14. Ανάλυση του άνθρακα συναρτήσει του μεγέθους των σωματιδίων

Προκειμένου να γίνει μια πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ανόργανων συστατικών του άνθρακα κατά την καύση, είναι σημαντικό να γίνει μία ανάλυση εύρους μεγέθους των σωματιδίων με τη μορφή που εισάγονται στο θάλαμο καύσης, διότι ο διαχωρισμός των ανόργανων συστατικών γίνεται συναρτήσει του μεγέθους των σωματιδίων. Καθώς κάθε σωματίδιο είναι διαφορετικό, το ιδανικό θα ήταν να αναλύσουμε το κάθε σωματίδιο ξεχωριστά. Κάτι τέτοιο όμως είναι απαγορευτικό σε σχέση με το κόστος και το βαθμό δυσκολίας. Εναλλακτικά έχει αναπτυχθεί μια μέθοδος βαρυτικού διαχωρισμού των σωματιδίων της τέφρας.

7.14.1. Διαδικασία βαρυτικού διαχωρισμού

Η διαδικασία του βαρυτικού διαχωρισμού προϋποθέτει ο άνθρακας να είναι κονιορτοποιημένος όπως ακριβώς εισάγεται στο θάλαμο καύσης. Τα σωματίδια του

άνθρακα διαχωρίζονται βάσει της πυκνότητάς τους, με τη χρήση διάφορων μιγμάτων οργανικών ρευστών με ειδικό βάρος 1,3 , 1,5 , 1,7 , 1,9 , 2,1 , 2,5 και 2,9 (διαχωριστές). Μετά το διαχωρισμό, τα έξι κλάσματα, ξηραίνονται και υποβάλλονται στις εξής αναλύσεις: επί της εκατό ποσοστό τέφρας, σύσταση τέφρας, θερμοκρασία τήξης της τέφρας και, προαιρετικά, σε ανάλυση διάθλασης με ακτίνες Χ.

Τα πιο σημαντικά δεδομένα που προκύπτουν από αυτή την ανάλυση είναι οι διαφορές στη σύσταση που παρατηρούνται ανάμεσα σε κάθε κλάσμα. Από τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά όπως η επίδραση της σύστασης στις θερμοκρασίες τήξης.

7.14.2. Επίδραση της περιεκτικότητας σε σίδηρο στον σχηματισμό σκωρίας

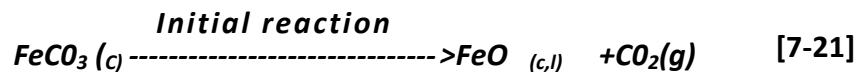
Ο ρόλος του σιδήρου που περιέχεται στην τέφρα είναι μια από τις βασικότερες παραμέτρους κατά την μελέτη των επικαθίσεων. Οι ερευνητές συχνά εκτιμούν την τάση ενός άνθρακα για σχηματισμό επικαθίσεων βασιζόμενοι στην συνολική συγκέντρωση του σιδήρου. Ωστόσο μία τέτοια προσέγγιση ενδεχομένως να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα καθώς δε λαμβάνει υπόψη τη κατανομή των ενώσεων του σιδήρου στη μάζα του άνθρακα. Επιπλέον, μία ακόμα σημαντική παράμετρος στο μηχανισμό σχηματισμού των επικαθίσεων είναι και το είδος των ανόργανων ενώσεων. Για παράδειγμα ο σίδηρος συχνά εμφανίζεται με τη μορφή σιδηροπυρίτη (FeS_2) και ανθρακικών αλάτων (FeCO_3) και/ή ως ακαθαρσίες στον ασβεστίτη και στο δολομίτη, και λιγότερο συχνά ως άλλες ενώσεις όπως κερροσίλβη (CaFe_3Si_4) και αιματίτης (Fe_2O_3). Ο σιδηροπυρίτης συνήθως παρουσιάζεται ως απομονωμένα σωματίδια ανάμεσα στα βαρύτερα σωματίδια κατά τον βαρυτικό διαχωρισμό, ενώ τα ανθρακικά άλατα συνήθως θα διασκορπιστούν σε όλη τη μάζα του άνθρακα. Η ύπαρξη αυτών και άλλων ενώσεων του ενανθράκωσης.

Τα αρχικά στάδια των αντιδράσεων της ανόργανης ύλης κατά τη καύση επηρεάζουν σημαντικά το σχηματισμό των επικαθίσεων. Οι διαφορές στις φυσικές ιδιότητες (όπως η πυκνότητα και το μέγεθος) και κυρίως στις θερμοκρασίες τήξης (και επομένως στο σχήμα των σωματιδίων), καθορίζονται από τα προϊόντα των παροδικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά την καύση, ανάλογα με το είδος της ανόργανης ένωσης:

Πίνακας 7-9 : Θερμοκρασίες Τήξης Προϊόντων Καύσης

	FeS ₂	FeS	FeCO ₃	FeO
Ειδικό Βάρος	5,02	4,62	3,96	5,70
Θερμοκρασία Τήξης [°C]	750(d)	1195	600(d)	1378

Όπου το d δηλώνει ότι η ένωση διαλύεται σε εκείνη τη θερμοκρασία. Οι ενώσεις οι οποίες φτάνουν στα τοιχώματα καθορίζουν το είδος της επικάθισης που θα σχηματιστεί.



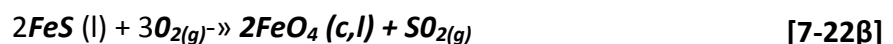
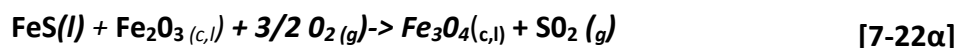
Όπου

c = crystalline

g = gaseous και

l = liquid

Η πρώτη αντίδραση οξειδωσης του σιδηροπυρίτη σε σουλφίδιο του σιδήρου και SO₂ είναι μια από τις πιο σημαντικές αντιδράσεις των ανόργανων συστατικών της τέφρας κατά την καύση. Το παραγόμενο FeS σχηματίζει τηγμένες σφαίρες, έχοντας μικρότερη αεροδυναμική αντίσταση και μεγαλύτερη πυκνότητα από τα άλλα σωματίδια που σχηματίζονται στη φλόγα, έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να έρθουν σε επαφή με τα τοιχώματα του λέβητα. Ανάλογα με τη σύσταση των επικαθίσεων που είδη υπάρχουν στα τοιχώματα του λέβητα, οι ακόλουθες αντιδράσεις στις οποίες μετέχει ο FeS ενδεχομένως να σχηματίσουν υλικό με χαμηλή θερμοκρασία τήξης. Παρακάτω παρουσιάζονται τρεις αντιδράσεις με δύο πιθανά προϊόντα, οι οποίες έχουν σημαντική διαφορά στη θερμοκρασία τήξης της τέφρας.



Η πρώτη αντίδραση δείχνει το σχηματισμό του μαγνητίτη (Fe₃O₄) ο οποίος μπορεί να αντέξει σχετικά μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι να διαλυθεί σε FeO και

O₂. Η παρουσία του Fe₃O₄ στις επικαθίσεις θα έχει σαν αποτέλεσμα αυτές να είναι «στεγνές». Η αντίδραση 6-22β δείχνει το σχηματισμό του FeO σαν ενδιάμεσο προϊόν το οποίο μπορεί να αντιδράσει με το πυρίτιο και να σχηματίσει πυριτικό άλας του σιδήρου με χαμηλή θερμοκρασία τήξης. Η παρουσία πυριτικού άλατος του σιδήρου στις επικαθίσεις θα έχει σαν αποτέλεσμα αυτές να είναι σε ρευστή κατάσταση.

Οι ενώσεις του σιδήρου οι οποίες κατά το βαρυτικό διαχωρισμό συγκεντρώνονται στο διαχωριστή που έχει ειδικό βάρος 2,9 είναι αυτές οι οποίες συμβάλλουν κατά το μεγαλύτερο ποσοστό στο σχηματισμό σκωρίας. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6-10, ο βαθμός διασποράς των ενώσεων στη μάζα του άνθρακα δεν έχει σχέση με τη συνολική ποσότητα του σιδήρου στον ακατέργαστο άνθρακα.

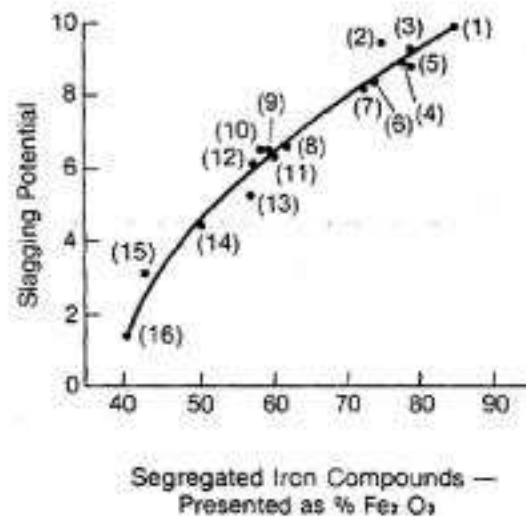
Πίνακας 7-10 : Συνολικός Σίδηρος σε σύγκριση με τον Απομονωμένο Σίδηρο

Άνθρακας %	Σίδηρος στη Μάζα του Άνθρακα %	Σίδηρος στον Διαχωριστή Ειδικού Βάρους 2,9
A	9,5	39,9
B	15,5	11,9
Γ	8,9	69,7

Η τάση σχηματισμού σκωρίας εκτιμάται με βάση την ικανότητα του άνθρακα να σχηματίσει επικαθίσεις τηγμένης τέφρας οι οποία είναι δύσκολο να απομακρυνθεί με εκκαπνισμό. Εξετάζοντας τη παρουσία του σιδήρου στη τέφρα (ως ποσοστό επί τις εκατό Fe₂O₃) δεν παρατηρείται κάποια αλληλεπίδραση με την τάση σχηματισμού σκωρίας. Πολλοί άνθρακες με χαμηλό έως μέσο ποσοστό σιδήρου (4% - 9%) παρουσιάζουν έντονη τάση σχηματισμού σκωρίας. Από την άλλη πολλοί άνθρακες (13% - 16%) με υψηλό ποσοστό σιδήρου παρουσιάζουν χαμηλή τάση για σχηματισμό σκωρίας. Η εξέταση των θερμοκρασιών τήξης επίσης παρουσιάζουν ελάχιστη αλληλεπίδραση με την τάση για σχηματισμό σκωρίας.

Ωστόσο η εξέταση της αλληλεπίδρασης της ποσοστιαίας σύστασης σιδήρου στον διαχωριστή 2,9 με την τάση για σχηματισμό σκωρίας δείχνει πως οι δύο αυτές τιμές σχετίζονται άμεσα. Ο σίδηρος που περιέχεται στην τέφρα του διαχωριστή 2,9 συσχετίζεται αρκετά αποτελεσματικά με την τάση σχηματισμού σκωρίας και αποτελεί μία εξαιρετική ένδειξη του απομονωμένου, αναχθέντος (κυρίως

σιδηροπυρίτη) σιδήρου. Οι άνθρακες χαμηλής και μέσης περιεκτικότητας σε σίδηρο που παρουσιάζουν μεγάλη τάση για σχηματισμό σκωρίας παρουσιάζουν επίσης και υψηλό ποσοστό ενώσεων του σιδήρου στο διαχωριστή 2,9 (74% - 79%). Από την άλλη οι άνθρακες με μέση έως υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο που παρουσιάζουν χαμηλή τάση για σχηματισμό σκωρίας, εμφανίζουν μικρότερα ποσοστά ενώσεων του σιδήρου στο διαχωριστή (57% - 60%). Στην εικόνα 4-10 παρουσιάζεται η συσχέτιση αυτή. Η αλληλεπίδραση αυτή έχει πολύ υψηλό ποσοστό εμπιστοσύνης για άνθρακες οι οποίοι παρουσιάζουν πάνω από 50% Fe_2O_3 στην τέφρα του διαχωριστή 2,9. Στην περίπτωση αυτή, η επίδραση του σιδήρου διαδραματίζει σημαντικότατο ρόλο στην τάση για σχηματισμό σκωρίας.



Εικόνα 7-10 : Επίδραση Ποσοστιαίας Σύστασης Σιδήρου στο Σχηματισμό Σκωρίας

Η συσχέτιση της τάσης σχηματισμού σκωρίας με το ποσοστό απομονωμένου σιδήρου στο διαχωριστή 2,9 έχει πολύ μεγαλύτερο επίπεδο εμπιστοσύνης από τη συσχέτιση με την τέφρα στον άνθρακα.

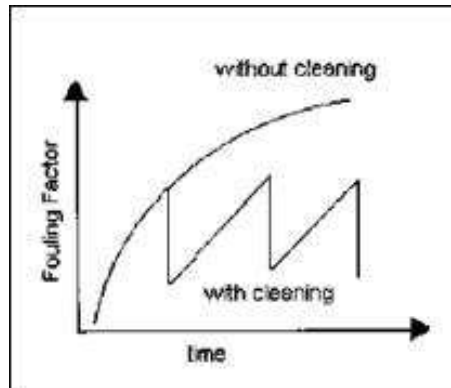
8. ΕΠΙΚΑΘΙΣΕΙΣ

Κατά την καύση των γαιανθράκων αυτό το ορυκτό υλικό σχηματίζει την τέφρα. Η περιεκτικότητα αυτών σε τέφρα ποικίλει, όπως επίσης ποικίλει και η χημική σύστασή της. Ο σχηματισμός της τέφρας και η συμπεριφορά των συστατικών της κατά την καύση και τη διέλευσή της από το λέβητα είναι η αιτία σχηματισμού των επικαθίσεων.

8.1. Τύποι επικαθίσεων

Σε ένα καυστήρα που λειτουργεί με καύσιμη ύλη τον άνθρακα, το 15% με 30% της τέφρας απομακρύνεται από την τεφρολεκάνη και το υπόλοιπο μέρος από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Ωστόσο ένα μικρό ποσοστό εναποτίθεται στις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας. Η τέφρα εναποτίθεται στην περίπτωση αυτή με δύο τρόπους:

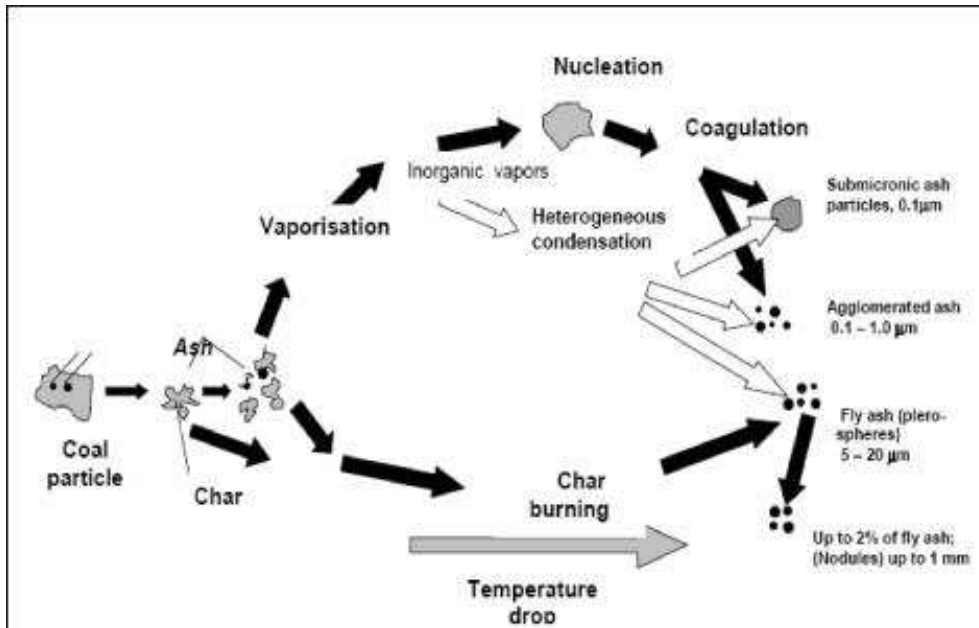
1. Με τη μορφή επισκωρίασης (slagging), όπου τηγμένο ή επαναστερεοποιημένο υλικό σχηματίζεται στις επιφάνειες οι οποίες είναι εκτεθειμένες σε υψηλή θερμική ακτινοβολία και καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας. Τέτοιες περιοχές είναι αυτές των υπερθέρμων και των αυλών ανόδου που έχουν ως μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας την ακτινοβολία. Η φύση, ο βαθμός και η σύσταση της σκωρίας ποικίλουν στα διάφορα τμήματα του λέβητα και εξαρτώνται από τις θερμοκρασίες στις επιφάνειες των μετάλλων, τη θερμοκρασία της φλόγας καύσης, τους ρυθμούς μεταφοράς θερμότητας, τη φορά των καυσαερίων, τη σύσταση του καυσίμου, την κατανομή του καυσίμου, τη συγκέντρωση της ανόργανης ύλης και τα επίπεδα οξυγόνου των καυσαερίων που έρχονται σε επαφή με τις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας.



Εικόνα 8-1 : Σχηματισμός Επικαθίσεων στο Χρόνο

2. Με την μορφή πουριού ή αλκαλικών αλάτων (fouling, deposits) των εναλλακτών θερμότητας όπου δημιουργούνται επικαθίσεις μη τηγμένης τέφρας κυρίως στις περιοχές όπου ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι η συναγωγή. Στις περιοχές αυτές οι θερμοκρασίες που επικρατούν είναι κάτω από το σημείο τήξης της τέφρας. Όπως φαίνεται και από το Εικόνα 7-1, ο σχηματισμός αυτού του είδους επικαθίσεων εξαρτάται από τον χρόνο. Από την αρχική κατάσταση όπου έχουμε μηδενική επικαθιση, αυτή ενισχύεται ασύμπτωτα σε μία μέγιστη τιμή όπου ο ρυθμός σχηματισμού ισούται με τον ρυθμό απομάκρυνσης. Η δημιουργία αυτού του είδους ρύπανσης είναι κυρίως συνέπεια της συγκέντρωσης και της αντίδρασης των πτητικών ανόργανων αλκαλίων με την ιπτάμενη τέφρα, είτε στη ροή των καυσαερίων, είτε στις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας δημιουργώντας επικαθίσεις με συνέπεια οι επιφάνειες να έχουν αυξημένη τάση να συγκεντρώνουν και άλλα στοιχεία τα οποία σε κανονικές συνθήκες θα ήταν αβλαβή.

8.2. Μηχανισμός σχηματισμού επικαθίσεων και επιπτώσεις



Εικόνα 8-2 : Μηχανισμός Σχηματισμού Επικαθίσεων

8.2.1. Εστία

Η ρύπανση και η σκωρία παίζουν σημαντικότερο ρόλο στον σχεδιασμό και την λειτουργία λεβήτων κονιοροποιημένου λιγνίτη. Είναι δυνατόν για μία μονάδα παραγωγής ρεύματος που χρησιμοποιεί άνθρακα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά να σχεδιάσει έναν λέβητα οποίος θα απομακρύνει το 85% της τέφρας με την μορφή ρέουσας τέφρας από τα υδροτοιχώματα στην τεφρολεκάνη. Ένας τέτοιος σχεδιασμός θα είχε σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της ρύπανσης των εναλλακτών θερμότητας συναγωγής καθώς επίσης και την καλύτερη λειτουργία των φίλτρων. Δοκιμές που έχουν γίνει στο παρελθόν αποδεικνύουν ότι η ευμετάβλητη σύσταση των στερεών καυσίμων ανά περιοχή καθιστούν αδύνατη την αποδοτική λειτουργία τέτοιων λεβήτων. Σαν συνέπεια αυτού ο σχεδιασμός των λεβήτων πλέον γίνεται έτσι ώστε η τέφρα να μην τήκεται και ρέει προς την τεφρολεκάνη, αλλά να παραμένει σε στερεή μορφή και να απομακρύνεται με εκκαπνισμό. Προκειμένου η τέφρα να παραμένει σε στερεή μορφή, οι θερμοκρασίες εντός του λέβητα θα πρέπει να παραμένουν κάτω από την θερμοκρασία τήξης της τέφρας. Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με μικρής χρονικής διάρκειας κράτηση της μονάδος προκειμένου αυτή να ψυχθεί και να δημιουργηθεί ένα οξειδωτικό περιβάλλον. Οι απαιτήσεις όμως αυτές έρχονται σε αντιπαράθεση με την ανάγκη για πλήρη καύση και για ελάττωση

της περίσσειας αέρα προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η απορρυπτόμενη θερμότητα προς το περιβάλλον. Ένας επιπλέον περιορισμός είναι η αύξηση του μονοξειδίου του άνθρακα όσο μικρότερη είναι η περίσσεια αέρα. Για ποσοστό περίσσειας αέρα 16%, το μονοξείδιο του άνθρακα αυξάνεται δραματικά πάνω από το όριο. Προκειμένου να αποφευχθεί ένα τέτοιο φαινόμενο η περιεκτικότητα των καυσαερίων σε O_2 θα πρέπει να κυμαίνεται στο 3.5%.

Ένας λέβητας που λειτουργεί βάση αυτού του σχεδιασμού, όπου οι επικαθίσεις είναι αναμενόμενες παρουσιάζει τους εξής κινδύνους κατά τη λειτουργία του:

- Αποκόλληση μεγάλων συσσωματώσεων επικαθίσεων μπορεί να προκαλέσουν ζημιά στην τεφρολεκάνη. Εάν τα τμήματα αυτά είναι αρκετά μεγάλα, ενδεχομένως να δημιουργηθεί ένα "γεφύρωμα" στερεοποιημένης τέφρας μέσα από το οποίο μεγάλες μάζες τηγμένης τέφρας οδηγούνται στην έξοδο της τεφρολεκάνης και σφηνώνουν εκεί. Επιπλέον εάν αυτοί οι σχηματισμοί παραμείνουν για αρκετό χρονικό διάστημα τότε η τεφρολεκάνη φράζει πλήρως και ο καθαρισμός της είναι πολύ δύσκολος.
- Γύρω από την περιοχή των καυστήρων, στην περίπτωση που αυτοί είναι τοποθετημένοι στα τοιχώματα του λέβητα, παρουσιάζονται θερμικά φορτία μεγέθους γύρω στα 500 kW/m², ενώ η εσωτερική επιφάνεια του καυστήρα ψύχεται από την είσοδο του δευτερεύοντος/τριτεύοντος αέρα. Αυτό έχει σαν συνέπεια η ρέουσα σκωρία που δημιουργείται στην ζώνη των υψηλών θερμικών φορτίων κατευθυνόμενη προς την επιφάνεια όπου επικρατούν χαμηλότερες θερμοκρασίες, να ψύχεται και να στερεοποιείται. Με την πάροδο του χρόνου στο πάνω μέρος του καυστήρα συσσωρεύεται μεγάλο μέρος στερεοποιημένης σκωρίας η οποία παρεμποδίζει την ομαλή ροή καύσιμου μίγματος στον λέβητα ή ακόμα και σε ακόμα πιο προχωρημένο στάδιο τον φράζει πλήρως ειδικότερα εάν αυτός βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να επιδεινωθεί λόγω της αεροδυναμικής ανακυκλοφορίας άκαυστου κονιορτοποιημένου μίγματος καθώς και στην περίπτωση χρήσης πετρελαίου ως καύσιμο στην περίπτωση εκκίνησης της μονάδας. Πρόληψη αυτού μπορεί να γίνει με σωστό σχεδιασμό των μερών του καυστήρα καθώς και με την επαρκή παροχή δευτερευόντως αέρα.

8.2.2. Υπερθερμαντές και αναθερμαντές ακτινοβολίας

Οι υπερθερμαντές και οι αναθερμαντές είναι εκτεθειμένοι σε υψηλά θερμικά φορτία ακτινοβολίας, κυρίως στα άκρα τους. Η τέφρα η οποία βρίσκεται σε θερμοκρασία υψηλότερη από το σημείο τήξης της κατακρατείται. Επίσης η τέφρα η οποία είναι σε χαμηλότερη θερμοκρασία από το σημείο τήξης της κατακρατείται λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών όπως η εναλλασσόμενη διάταξη των σωλήνων. Σε κάθε περίπτωση η αυξανόμενη θερμική αντίσταση οδηγεί σε αυξανόμενη επιφανειακή θερμοκρασία στα σημεία όπου επικάθεται η τέφρα. Καθώς η θερμοκρασία της τέφρας αυξάνεται, αυτή λιώνει και τελικά δημιουργείται ρέουσα σκωρία. Στην περίπτωση που οι προγραμματισμένοι εκκαπνισμοί δεν αποκολλήσουν την τέφρα, δημιουργούνται εναποθέσεις μεγάλου μεγέθους. Στην περίπτωση που επιτραπεί ο σχηματισμός μεγάλων όγκων σκωρίας, σχηματίζονται γεφυρώματα από συστοιχία σε συστοιχία σωλήνων κυρίως εάν η απόσταση μεταξύ τους είναι κάτω από 600 χιλιοστά. Οι επικαθίσεις μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες παραμορφώσεις στους σωλήνες καθώς και αυξημένες απώλειες ελκυσμού. Ένα επιπλέον πρόβλημα που μπορεί να δημιουργήσει η αυξημένη συγκέντρωση επικαθίσεων είναι η πιθανή αποκόλληση αυτών και σύγκρουση με τον πυθμένα του λέβητα με συνέπεια την πρόκληση ζημιών.



Before



After

Εικόνα 8-3 : Σχηματισμός Επικαθίσεων στο Εσωτερικό του Λέβητα Πριν και Μετά τον Καθαρισμό

Από άποψη μεταφοράς θερμότητας, ακόμα και στην περίπτωση μεγάλης ποσότητας επικαθίσεων στα άκρα των υπερθερμαντών και των αναθερμαντών, η ροή θερμότητας στο εργαζόμενο μέσον δεν είναι πάντα μειωμένη.

Η μεταφορά θερμότητας σε έναν υπερθερμαντή λαμβάνει χώρα με τους εξής τρόπους:

- Με άμεση ακτινοβολία προερχόμενη από τα φωτοβόλα καυσαέρια της εστίας καύσης
- Με μη φωτοβόλο ακτινοβολία από τις συσσωματώσεις επικαθίσεων στις κοιλότητες του λέβητα
- Με ακτινοβολία από τον εξοπλισμό
- Με συναγωγή

Η μεταφερόμενη θερμότητα με συναγωγή αποτελεί το 10% - 15% της συνολικής παραλαβή θερμότητας από τους εναλλάκτες. Στην περίπτωση όπου τα άκρα τους έχουν μεγάλες ποσότητες επικαθίσεων η παραλαβή θερμότητας με άμεση ακτινοβολία ελαττώνεται ενώ η ποσότητα θερμότητας η οποία εκπέμπεται πίσω στον λέβητα αυξάνεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο του λέβητα καθώς και στην περιοχή των εναλλακτών. Παράλληλα η μη φωτοβόλος ακτινοβολία αυξάνεται, και διαμοιράζεται μεταξύ των καθαρότερων επιφανειών των αυλών και σε χειρότερες

περιπτώσεις στις επιφάνειες των υπερθερμαντών και αναθερμαντών που ακολουθούν. Οπότε ακόμα και στην περίπτωση όπου ο λέβητας έχει μεγάλες ποσότητες επικαθίσεων, οι θερμότητα που παραλαμβάνει το εργαζόμενο μέσον δεν ελαττώνεται, αντιθέτως σε κάποιες περιπτώσεις αυξάνεται υπερβολικά.

Προκειμένου να αποφεύγονται προβλήματα που μπορεί να προκληθούν από αυτό το φαινόμενο, ο σχεδιασμός των λεβήτων και οι τροποποιήσεις αυτών πρέπει να συμπεριλαμβάνουν αποτελεσματικότερη διάταξη και σχεδιασμό των σωλήνων στους υπερθέρμους και αναθέρμους.

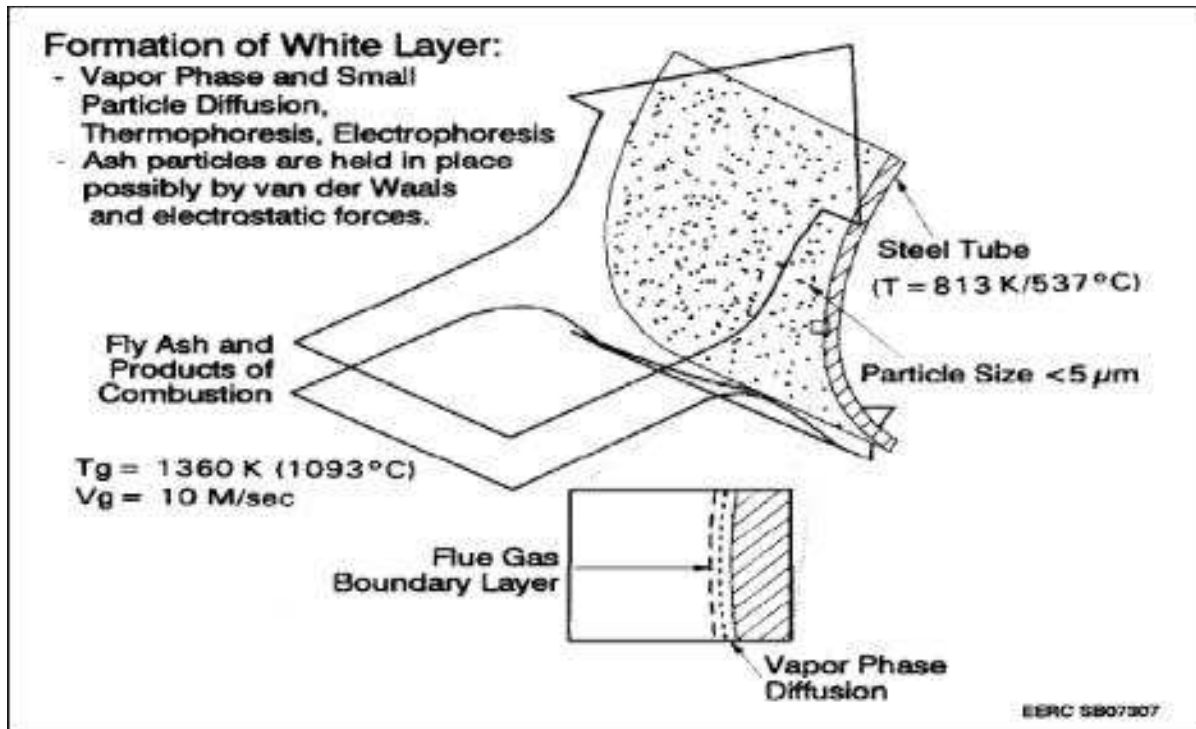
Επίσης η θερμοκρασία των μετάλλων των σωλήνων πρέπει να μην υπερβαίνει τους 625°C προκειμένου να μην αναπτύσσονται μεγάλες συνεκτικές δυνάμεις στις επικαθίσεις. Προκειμένου να μελετηθεί η πιθανότητα σχηματισμού επικαθίσεων, η

ισχύς των δυνάμεων συνοχής της σκωρίας αποτελεί σαφέστερη ένδειξη από τη θερμοκρασία τήξης της τέφρας διότι υποδηλώνει την ικανότητα των επικαθίσεων να αντιστέκονται στον εκκαπνισμό.

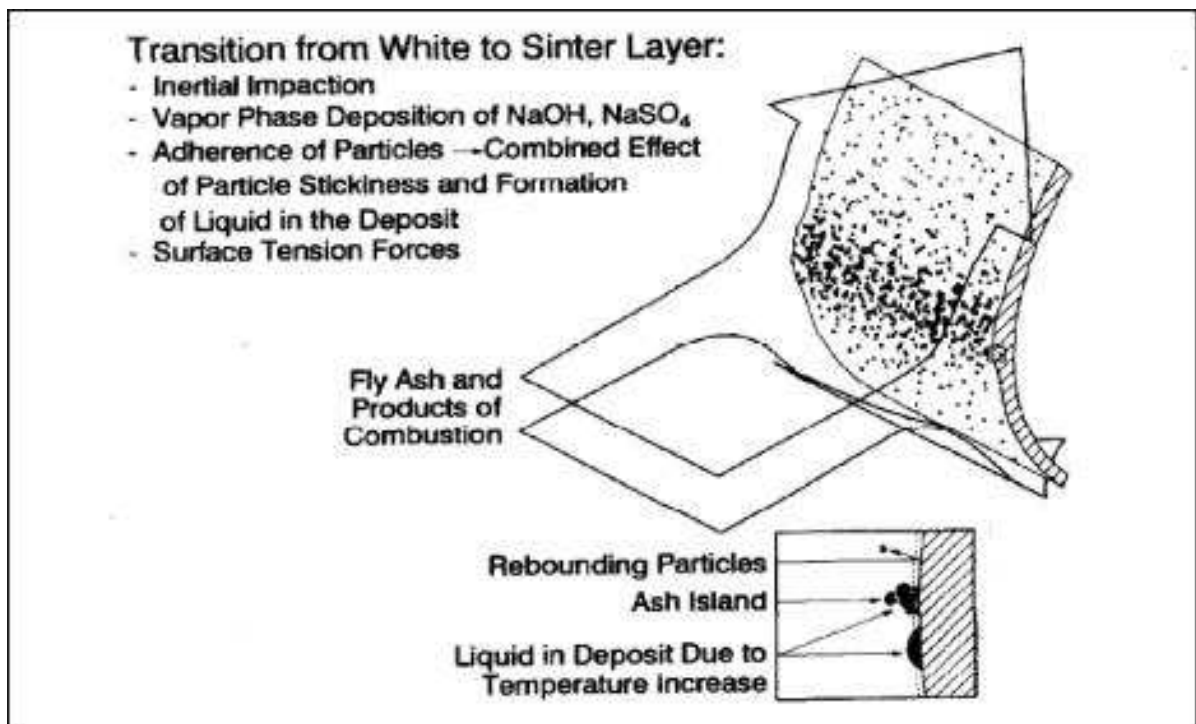
8.2.3. Επιφάνειες συναγωγής θερμότητας

Τα καυσαέρια τα οποία διέρχονται από τους αναθερμαντές και τους υπερθερμαντές περιέχουν εξαερωμένο νάτριο και κάλιο προερχόμενο από τον καιόμενο άνθρακα και θειικό οξύ προερχόμενο από τον σιδηροπυρίτη και τις οργανικές ενώσεις του θείου.

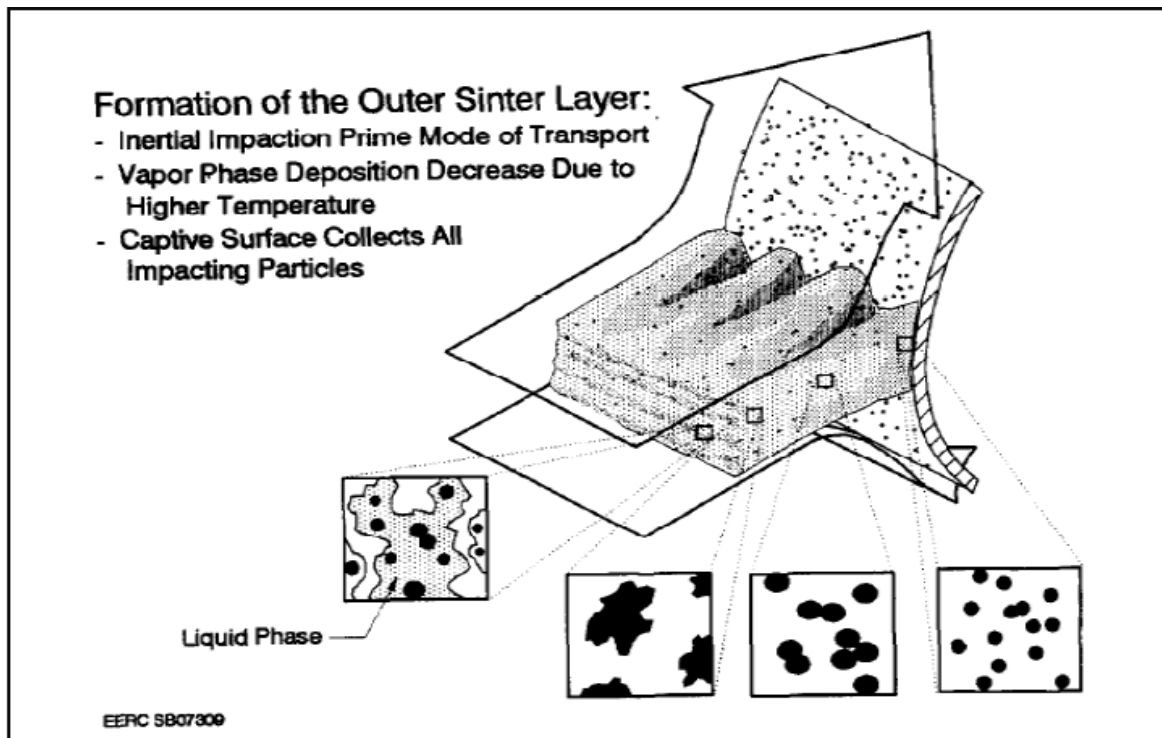
Τα συστατικά αυτά μπορούν να αντιδράσουν μεταξύ τους και να σχηματίσουν αλκαλικά θειικά άλατα και να συσσωματωθούν σε στρώματα στην επιφάνεια των σωλήνων. Η ιπτάμενη τέφρα αιχμαλωτίζεται από το θειικό άλας σχηματίζοντας μια πορώδη επιφάνεια από μη τετηγμένο εναπόθεμα, κάτω από το οποίο ίσως προκληθεί μηχανική διάβρωση. Αυτή η μορφή επικαθίσης έχει σαν επακόλουθο την δημιουργία ενός ημίλευκου στρώματος εναποθέματος πάνω στους σωλήνες, το οποίο περιέχει 50% - 70% θειικά άλατα και ενός εξωτερικού στρώματος, καφέ χρώματος, αποτελούμενο από ανεπηρέαστη ιπτάμενη τέφρα σε στερεή μορφή αποτελούμενη από 20% - 40% πυριτιούχα θειικά άλατα. Όταν η καύσιμη ύλη είναι το πετρέλαιο, κατά την εκκίνηση της μονάδας, η τέφρα περιέχει επίσης ενώσεις βαναδίου, νατρίου και θείου. Στους οικονομητήρες επίσης σχηματίζονται επικαθίσεις. Στην περίπτωση όπου η καύσιμη ύλη έχει υψηλό ποσοστό ασβεστίου (πάνω από 7% CaO στην τέφρα), αδιάλυτα ασβεστούχα άλατα σχηματίζουν συσσωματώσεις αρκετά ισχυρές οι οποίες είναι δύσκολο να απομακρυνθούν με εκκαπνισμό.



Εικόνα 8-4 : Μηχανισμός Σχηματισμού Επικαθίσεων. 1^ο Στρώμα Επικάθισης (Λευκό Στρώμα)



Εικόνα 8-5 : Μηχανισμός Σχηματισμού Επικαθίσεων. 2^ο Στρώμα Επικάθισης (Ημιτετηγμένο Στρώμα)



Εικόνα 8-6 : Μηχανισμός Σχηματισμού Επικαθίσεων. 3^ο Στρώμα Επικάθισης (Τηγμένο Στρώμα)

Οι οπτικές παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια της αύξησης του πάχους των επικαθίσεων δείχνουν τουλάχιστον τρεις ευδιάκριτες ζώνες:

1. Ένα αρχικό στρώμα μαλακής, εύθρυπτης τέφρας που συνδέεται χαλαρά με τους σωλήνες. Δεδομένου ότι η επιφάνεια των αυλών του υδρότοιχου είναι μόνο 400 °C, δεν έχει παρατηρηθεί τήξη των σωματιδίων τέφρας σε αυτό το στρώμα. Το πάχος αυτού του στρώματος είναι περίπου **1 με 2 mm**.
2. Ένα συμπαγές στρώμα ελαφρώς ημιτετηγμένης τέφρας. Η δομή αυτού του στρώματος μπορεί να ποικίλει από την ύπαρξη πορώδους δομής, μερικές φορές και με μια ανοικτή δενδριτική δομή, σε ένα στρώμα κάπως πυκνότερο, που εξακολουθεί να έχει συμπαγή μορφή, χωρίς να είναι ευδιάκριτη η τήξη στην επιφάνεια του στρώματος.
3. Ένα στρώμα τηγμένης τέφρας που έχει τη δυνατότητα να ρεύσει από την κάθετη επιφάνεια.

Ενώ είναι δυνατόν να σχεδιαστεί ένας λέβητας ο οποίος θα είχε τη δυνατότητα να καίει οποιοδήποτε άνθρακα ή κάποια είδη ανθράκων, δεν είναι οικονομικά συμφέρων να κατασκευαστεί ένας λέβητας ο οποίος θα είχε την δυνατότητα να λειτουργεί με οποιοδήποτε γαιάνθρακα. Οι γαιάνθρακες, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους κατατάσσονται σε βιτομενιούχους, ανθρακιτικούς, λιγνιτικούς κλπ. Κατά συνέπεια ο σχεδιασμός πρέπει να γίνεται βάση των χαρακτηριστικών του εκάστοτε διαθέσιμου καυσίμου.

Η εγκάρσια απόσταση των συστοιχιών σωλήνων των υπερθερμαντών και των αναθερμαντών στις περιοχές όπου οι θερμοκρασίες των καυσαερίων είναι πάνω από την θερμοκρασία τήξης της τέφρας θα πρέπει να είναι επαρκείς ώστε να ελαχιστοποιείται το ενδεχόμενο σχηματισμού επικαθίσεων κατά την καύση της χειρίστης διαθέσιμης ποιότητας γαιάνθρακα. Επιπλέον οι υπερθερμαντές και αναθερμαντές συναγωγής στα σημεία όπου οι θερμοκρασίες είναι κάτω του σημείου τήξης της τέφρας είναι δυνατόν να σχεδιαστούν με μικρότερη απόσταση μεταξύ των συστοιχιών των σωλήνων εφόσον η εισχώρηση των εκκαπνισμών είναι επαρκείς προκειμένου να αποφευχθούν υψηλές ταχύτητες των καυσαερίων λόγω της ελαττωμένης επιφάνειας διέλευσης που θα προκαλούσαν οι επικαθίσεις και κατά συνέπεια την υπερβολική αύξηση των θερμοκρασιών και την πρόκληση μηχανικής διάβρωσης.

Επίσης ο σχεδιασμός των επιφανειών συναγωγής εξαρτάται από την επιθυμητή

μεταφορά θερμότητας προς το εργαζόμενο μέσον και τους περιορισμούς σχετικά με την πτώση πίεσης. Βάσει αυτών των παραμέτρων καθορίζεται η διάμετρος των σωλήνων, η μεταξύ τους απόσταση και το πλήθος τους στο οριζόντιο και κατακόρυφο βήμα.

Συνοψίζοντας μπορούμε να εντοπίσουμε τις εξής βασικές ενδείξεις που καταδεικνύουν έντονη ρύπανση:

Λειτουργία

1. Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον λέβητα αυξάνει με την πάροδο του χρόνου. Για παράδειγμα, αν η κανονική θερμοκρασία εξόδου είναι 277°C και κατά τη λειτουργία παρατηρείται ότι έχει αυξηθεί κατά 20°C με 50°C τότε γίνεται σαφές πως έχουμε υψηλό ποσοστό επικαθίσεων.

2. Παρατηρείται αυξημένη πτώση πίεσης κατά μήκος των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας με συναγωγή.
3. Παρατηρείται αυξημένο φορτίο λειτουργίας των ανεμιστήρων ελκυσμού διότι λόγω των επικαθίσεων η διέλευση των καυσαερίων προς την έξοδο του λέβητα δυσχεραίνεται.
4. Η ατμοπαραγωγή ελαττώνεται.
5. Η θερμοκρασία του υπέρθερμου ατμού πρέπει να μελετάται με προσοχή διότι ο όγκος των επικαθίσεων σε διάφορους τομείς του λέβητα διαφέρει. Προκειμένου να εξαχθεί ένα σαφές συμπέρασμα πρέπει να λαμβάνεται σε κάθε εναλλάκτη η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου των καυσαερίων, η θερμοκρασία εισόδου και εξόδου του ατμού καθώς και οι ροές αυτών. Οι επικαθίσεις ενδεχομένως να αυξήσουν την θερμοκρασία στις επιφάνειες των υδροτοιχωμάτων προκαλώντας υπερθέρμανση.
6. Αυξάνονται οι ρυθμοί χημικής και μηχανικής διάβρωσης των επιφανειών του λέβητα λόγω της ιπτάμενης τέφρας και των εκκαπνισμών με συνέπεια την πρόκληση διαρροών.

8.3. Θερμικές ιδιότητες ακτινοβολίας προϊόντων καύσης

Τα προϊόντα καύσης αποτελούνται από αέρια (H_2O , CO_2 , CO , NO_x ...) και σωματίδια (ΚΟΚ, Αιθάλη, Ιπτάμενη Τέφρα). Για της εφαρμογή ενός μοντέλου μετάδοσης θερμότητας είναι απαραίτητος ο καθορισμός των θερμικών ιδιοτήτων αυτών. Τα αέρια δεν σκεδάζουν την ακτινοβολία αλλά μερικά από αυτά (H_2O , CO_2) απορροφούν και εκπέμπουν ακτινοβολία. Τα αέρια όμως δεν απορροφούν και εκπέμπουν ομοιόμορφα σε όλο το φάσμα. Έτσι μια προσέγγιση τους ως 'γκρί' μέσου (σταθερή απορροφητικότητα και εκπεμψιμότητα σε όλο το φάσμα) οδηγεί σε σφάλματα. Για να παρακαμφθεί το πρόβλημα, το φάσμα του μήκους κύματος διαιρείται σε ζώνες (bands). Για τα αέρια της καύσης εφαρμόζεται ένα μοντέλο ευρέων ζωνών (Wide Band model) όπου χωρίζεται το φάσμα σε ζώνες και γίνεται εκτίμηση των ιδιοτήτων (Bhattacharya, A theoretical investigation of the optical constants and particle size on the radiative properties and heat transfer involving clouds and deposits, 2000). Τα σωματίδια απορροφούν, εκπέμπουν αλλά και σκεδάζουν την ακτινοβολία. Έτσι, προσεγγίζονται σαν υποθετικά σφαιρικά σωματίδια και με βάση την θεωρία σκέδασης κατά Mie (Mie Theory) υπολογίζονται

οι ζητούμενοι συντελεστές (Bhattacharya & Wall, Development of Emittance of Coal Particles During Devolatilisation and Burnof, 1999). Έπειτα, αθροίζονται οι συντελεστές απορροφητικότητας και σκέδασης αερίων και σωματιδίων και προκύπτει ένας ολικός συντελεστής για το μίγμα αερίων και στερεών. Η ανάλυση τέτοιων μοντέλων ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτής της διπλωματικής και για αυτό ^ λόγο δεν επιχειρείται.

8.4. Θερμικές ιδιότητες ακτινοβολίας των επικαθίσεων τέφρας

Οι θερμικές ιδιότητες ακτινοβολίας των επικαθίσεων τέφρας είναι άμεσα εξαρτώμενες από παραμέτρους όπως το μήκος κύματος, την θερμοκρασία, το μέγεθος σωματιδίων, την χημική σύσταση και την δομή του στρώματος. Η βασικότερη παράμετρος είναι η δομή του στρώματος. Διαφορετική είναι η προσέγγιση όταν το στρώμα είναι τηγμένο και ομογενοποιημένο (slagged) και διαφορετική όταν το στρώμα περιέχει κενά αέρα (sintered). Για τις δυο αυτές προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί μοντέλα εκτίμησης των θερμικών ιδιοτήτων (Wall, Bhattacharya, Zhang, Gupta, & He, 1993) (Goetz, Nsakala, & Bono, 1979). Πριν αναπτυχθούν τα μοντέλα γίνεται μια μικρή παραμετρική μελέτη της επίπτωσης των παραμέτρων στις θερμικές ιδιότητες της ακτινοβολίας (Bhattacharya, Wall, & Arduini-Schuster, A study on the importance of dependent effects in determining the spectral and total emittance of particulate ash deposits in pulverised fuel fired furnaces, 1997) (Bhattacharya, Apparent emittance of non-isothermal particulate deposits, 1999) (Bhattacharya, Wall, & Gupta, An analysis of the angular scatter measurement to determine the optical constants of coal and ashy materials, 1996).

Μήκος Κύματος

Όπως όλα τα διηλεκτρικά υλικά, έτσι και η τέφρα παρουσιάζει μικρές τιμές φασματικής εκπεμψιμότητας για μικρά μήκη κύματος (έως 3 μm). Σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, οι τιμές είναι σημαντικά αυξημένες. Σε κάθε περίπτωση η απορροφητικότητα είναι μικρότερη από την εκπεμψιμότητα.

Θερμοκρασία

Με αύξηση της θερμοκρασίας, η εκπεμψιμότητα και η απορροφητικότητα της τέφρας μειώνεται.

Μέγεθος σωματιδίων

Καθώς αυξάνεται το μέγεθος των σωματιδίων, αυξάνονται και οι τιμές της εκπεμψιμότητας και της απορροφητικότητας.

Χημική σύσταση

Στην βιβλιογραφία η πληροφορία για την επίπτωση της χημικής σύστασης στις θερμικές ιδιότητες της ακτινοβολίας είναι μικρή. Είναι γνωστή μια κάποια εξάρτηση των ιδιοτήτων με τον λόγο πυριτίου και το περιεχόμενο σε σίδηρο. Η χημική σύσταση επιδρά δυναμικά στις ιδιότητες, γιατί καθορίζει τις ιδιότητες τήξης της τέφρας και το αν θα είναι slagged ή sintered το στρώμα.

Δομή του στρώματος

Σημαντική, τέλος, είναι η επίδραση της δομής του στρώματος, με τηγμένα στρώματα (slagged) να έχουν μεγαλύτερες τιμές εκπεμψιμότητας και απορροφητικότητας.

8.5. Θερμικές ιδιότητες ακτινοβολίας για τηγμένο στρώμα επικαθίσεων (Slagged Layer)

Εφαρμόζοντας την ηλεκτρομαγνητική θεωρία για τηγμένο στρώμα επικαθίσεων προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις για την φασματική (ακτινική και ημισφαιρική) εκπεμψιμότητα και απορροφητικότητα και την ολική (ακτινική και ημισφαιρική) εκπεμψιμότητα. Οι ολικές και ημισφαιρικές τιμές προκύπτουν με ολοκλήρωση των φασματικών και ακτινικών τιμών σε όλο το φάσμα και σε όλο το ημισφαίριο αντίστοιχα. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις που υπολογίζουν την εκπεμψιμότητα σαν συνάρτηση των οπτικών ιδιοτήτων.

Φασματική ακτινική εκπεμψιμότητα:

$$\epsilon'_\lambda = 1 - \frac{1}{2} (\rho'_{\beta\alpha r, \lambda} + \rho'_{\beta\alpha r, \lambda}) \quad [8-1]$$

Όπου:

$$\rho'_{\text{παρ},\lambda} = \frac{(n_\lambda \cdot \cos \theta - n_{\text{med},\lambda} \cdot \cos x)^2 + (k_\lambda \cdot \cos \theta - k_{\text{med},\lambda} \cdot \cos x)^2}{(n_\lambda \cdot \cos \theta + n_{\text{med},\lambda} \cdot \cos x)^2 + (k_\lambda \cdot \cos \theta + k_{\text{med},\lambda} \cdot \cos x)^2} \quad [8-2]$$

$$\rho'_{\text{περ},\lambda} = \frac{(n_\lambda \cdot \cos x - n_{\text{med},\lambda} \cdot \cos \theta)^2 + (k_\lambda \cdot \cos x - k_{\text{med},\lambda} \cdot \cos \theta)^2}{(n_\lambda \cdot \cos x + n_{\text{med},\lambda} \cdot \cos \theta)^2 + (k_\lambda \cdot \cos x + k_{\text{med},\lambda} \cdot \cos \theta)^2} \quad [8-3]$$

όπου η γωνία διάθλασης x υπολογίζεται από τον τύπο:

$$x = \alpha \sin \left(\sin \theta \cdot \frac{\sqrt{n_{\text{med},\lambda}^2 + k_{\text{med},\lambda}^2}}{\sqrt{n_\lambda^2 + k_\lambda^2}} \right) \quad [8-4]$$

όπου:

- n, k δείκτες διάθλασης του εξεταζόμενου σώματος,
 $n_{\text{med}}, k_{\text{med}}$ δείκτες διάθλασης του σώματος που περιβάλλει το στρώμα (συνήθως είναι $n = 1, k = 0$).

Φασματική ημισφαιρική εκπεψιμότητα

$$\varepsilon_\lambda(T) = 1 - \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon'_\lambda(\theta, T) \cdot \cos \theta \cdot \frac{\sin \theta \, d\theta \, d\varphi}{d\omega} \quad [8-5]$$

Ολική ακτινική εκπεψιμότητα

$$\varepsilon'(T) = \frac{\pi \cdot \int_0^\infty \varepsilon'_\lambda(\theta, T) \cdot i'_{b,\lambda}(\theta, T) \, d\lambda}{\sigma \cdot T^4} \quad [8-6]$$

Ολική ημισφαιρική εκπεψιμότητα

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \varepsilon'_\lambda(\theta, T) \cdot i'_{b,\lambda}(\theta, T) \, d\omega \, d\lambda}{\sigma \cdot T^4} \quad [8-7]$$

8.6. Θερμικές ιδιότητες ακτινοβολίας για μη τηγμένο στρώμα επικαθίσεων (Sintered Layer).

Στην περίπτωση που το στρώμα των επικαθίσεων δεν είναι τηγμένο, η προσέγγιση είναι διαφορετική. Έτσι, σε επιφάνειες συναλλαγής που βρίσκονται σε υψηλά τμήματα, όπου οι θερμοκρασίες που επικρατούν είναι χαμηλότερες (υπερθερμαντές, αναθερμαντές), το στρώμα

των επικαθίσεων δεν έχει πλήρως τηχθεί και υπάρχουν συσσωματώσεις σωματιδίων. Έτσι, σε τέτοιες περιπτώσεις, η ακτινοβολία εισχωρεί στο στρώμα και φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης λαμβάνουν χώρα. Πολλά μοντέλα ακτινοβολίας μπορούν να εφαρμοστούν ώστε να μοντελοποιηθεί η μετάδοση θερμότητας εντός του στρώματος (Monte-Carlo, Discrete Ordinates, Fluxmodels). Με την εφαρμογή ενός μοντέλου του Bohren (2-fluxtechnique), που λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα πολλαπλής σκέδασης, προκύπτει η παρακάτω απλή συνάρτηση για την εκτίμηση της εκπεμψιμότητας:

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \frac{\sqrt{(1 - \omega \cdot g)} - \sqrt{1 - \omega}}{\sqrt{1 - \omega \cdot g} + \sqrt{1 - \omega}} \quad [8-8]$$

όπου,

- Ελ η φασματική εκπεμψιμότητα του στρώματος
- ω albedo (παράμετρος εξαρτώμενη από το μήκος κύματος)
- g παράγοντας ασυμμετρίας

8.7. Αγωγιμότητα επικαθίσεων τέφρας

Η απόδοση των λεβήτων επηρεάζεται άμεσα από τις επικαθίσεις τέφρας στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας. Η μετάδοση θερμότητας προς το εργαζόμενο μέσο δυσχεραίνεται, με άμεσο αντίκτυπο στην απόδοση του λέβητα. Σε ένα λέβητα συνυπάρχουν όλοι οι τρόποι μετάδοσης θερμότητας (ακτινοβολία, συναγωγή και αγωγή). Όσον αφορά την αγωγή, οι επικαθίσεις δημιουργούν ένα στρώμα πάχους κάποιων χιλιοστών, που παρουσιάζει χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (της τάξης του 1 W/m²·K). Ενώ θεωρητικά εντός του στρώματος η μετάδοση θερμότητας έπρεπε να γίνεται μόνο με αγωγή, εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν, μεταφέρεται θερμότητα και με ακτινοβολία, σε μικρότερο βέβαια

ποσοστό. Για αυτό το λόγο, με τον όρο συντελεστής αγωγιμότητας ή συντελεστής μετάδοσης θερμότητας των επικαθίσεων θα εννοείται ένας συνολικός συντελεστής, ο οποίος συμπεριλαμβάνει μετάδοση θερμότητας με αγωγή αλλά και ακτινοβολία. Παρακάτω γίνεται μια περιληπτική περιγραφή των παραμέτρων που επηρεάζουν, τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, επίσης παρατίθενται μοντέλα πρόβλεψης του συντελεστού αγωγιμότητας βασισμένα σε μοντέλα εκτίμησης αγωγιμότητας πορώδους υλικού πολλών φάσεων.

8.7.1. Επίδραση διαφόρων παραμέτρων στον συντελεστή αγωγιμότητας των επικαθίσεων τέφρας

Υπάρχουν διάφοροι παράμετροι που επηρεάζουν τον συντελεστή αγωγιμότητας όπως: η φυσική σύσταση (το πορώδες του στρώματος και το μέγεθος των κόκκων), ο χρόνος τήξης και η θερμοκρασία (Anderson, R., & Incropera, 1987). Η θερμοκρασία επεμβαίνει με δυο παραμέτρους, πρώτον ως απόλυτο μέγεθος (με αύξηση της οποία αυξάνει και ο συντελεστής αγωγιμότητας) και δεύτερον ως θερμοκρασία κατά την οποία λαμβάνει χώρα η τήξη των επικαθίσεων. Η χημική σύσταση της τέφρας είναι ελάσσονος σημασίας παράμετρος όσον αφορά την μετάδοση θερμότητας με αγωγή (σε αντίθεση με την περίπτωση της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία όπου και παίζει σημαντικό ρόλο). Τα αποτελέσματα αυτών των παραμέτρων παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7-1. Από όλες τις παραμέτρους οι πιο σημαντικές είναι η θερμοκρασία και το πορώδες, για αυτό τον λόγο τα διάφορα μοντέλα εκτίμησης του συντελεστού αγωγιμότητας βασίζονται πάνω σε αυτές

Πίνακας 8-1 : Αποτελέσματα της μεταβολής παραμέτρων στον συντελεστή αγωγιμότητας

	Μεταβολή παραμέτρου	Αποτέλεσμα στον συντελεστή αγωγιμότητας
Φυσικές ιδιότητες	Αύξηση θερμοκρασίας	Αύξηση
	Αύξηση θερμοκρασίας τήξης	Αύξηση
	Αύξηση χρόνου τήξης	Αύξηση
	Αύξηση πορώδους	Μείωση
Φυσικές ιδιότητες κόκκων	Αύξηση διαμέτρου	Αύξηση
Χημικές ιδιότητες	Σύσταση επικαθίσεων	Αμετάβλητος

8.7.2. Εκτίμηση του συντελεστού θερμικής αγωγιμότητας

Στην βιβλιογραφία, αναφέρονται διάφορες πειραματικές, παραμετρικές μελέτες της επίδρασης των επικαθίσεων στην μετάδοση θερμότητας και διάφορα μοντέλα εκτίμησης του συντελεστού αγωγιμότητας (Hadley, 1986) (Laubitz, 1959) (Leach, 1993). Στην περίπτωση της τέφρας, δυο είναι οι πιθανές καταστάσεις που μπορεί να εμφανιστούν, είτε οι επικαθίσεις δεν είναι τηγμένες και βρίσκονται σε μια φάση θέρμανσης και μετά ψύξης τους, οπότε κατά την ψύξη ο συντελεστής αγωγιμότητας είναι μεγαλύτερος ή είναι ήδη τηγμένες οπότε είτε είμαστε σε φάση θέρμανσης είτε σε φάση ψύξης, ο συντελεστής αγωγιμότητας δεν αλλάζει. Για κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις παρατίθενται μοντέλα εκτίμησης του συντελεστού και επιλέγεται αυτό που ικανοποιεί περισσότερο τις ανάγκες μας. Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν και μοντέλα που θέτουν απλά ένα άνω και κάτω όριο στον συντελεστή αγωγιμότητας (Baxter).

Σε όλους τους υπολογισμούς που ακολουθούν οι συντελεστές αγωγιμότητας του αέρα και της τέφρας των επικαθίσεων, δίνονται αντίστοιχα από τις εξισώσεις που ακολουθούν.

$$K_a = 0,00038 T^{0,75} \quad [W/m^{\circ}K] \quad [7-9]$$

$$K_s = 0,0015 T T^{1,1} \quad [W/m^{\circ}K] \quad [7-10]$$

όπου

T = Θερμοκρασία [°K]

Την πρώτη περίπτωση (διαφορετικοί συντελεστές για την φάση θέρμανσης και ψύξης) την προσεγγίζουν δύο ειδών μοντέλα: πρώτον αυτά που θεωρούν τους κόκκους τέφρας σαν σφαίρες κατανεμημένες σε αέριο (μοντέλα βασισμένα στην εξίσωση Rayleigh) και δεύτερον αυτά που θεωρούν κυψέλες αερίου μέσα στο στρώμα (CSP και CPS).

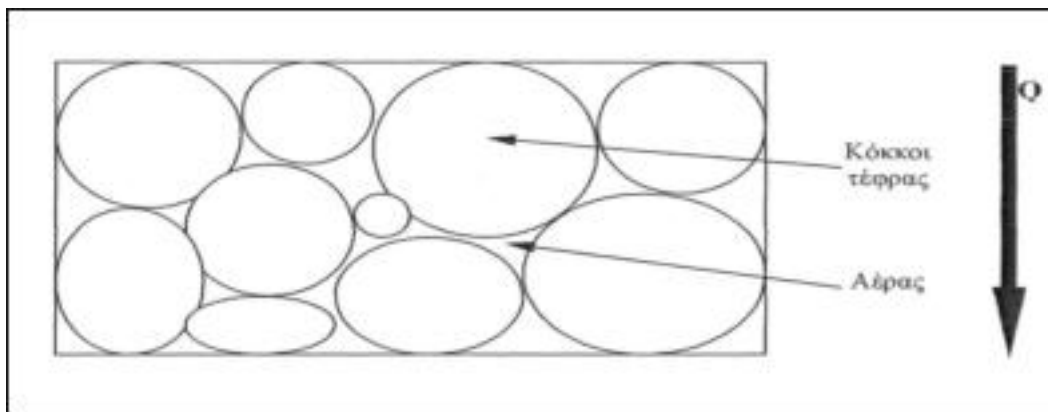
Στα μοντέλα που βασίζονται στην εξίσωση Rayleigh (Εικόνα 7-7) θεωρείται στο μέσο μια φάση, σαν συνεχόμενη και μια, ως μη συνεχόμενη. Έτσι, στην περίπτωση τηγμένης τέφρας, συνεχόμενη φάση θεωρούνται οι κόκκοι, ενώ στην περίπτωση μη τηγμένης τέφρας ο αέρας. Ο Laubitz παραθέτει τέσσερις εξισώσεις υπολογισμού του συντελεστού αγωγιμότητας βασισμένες στην εξίσωση του Rayleigh. Οι τρεις από αυτές (των Rayleigh, Deissler και Elian, και Woodside) ισχύουν για υλικά με πορώδη μικρότερα του $\pi/6$ (0,52), ενώ η τέταρτη (Russell) ισχύει για εύρος πορώδους από 0

έως 1. Για αυτό το λόγο από τα μοντέλα αυτού του τύπου θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση του Russell.

$$K = K_m \cdot \{v \cdot \rho^{2/3} + (1 - \rho^{2/3})\} / \{v \cdot (\rho^{2/3} - \rho) + (1 - \rho^{2/3} + \rho)\} \quad [8-11]$$

όπου

K	αγωγιμότητα του υλικού	[W/moK]
K _m	αγωγιμότητα της συνεχόμενης φάσης	[W/moK]
K _o	αγωγιμότητα της μη συνεχόμενης φάσης	[W/moK]
v	= K _o /K _m	
ρ	πορώδες	



Εικόνα 8-7 : Μοντέλο Rayleigh

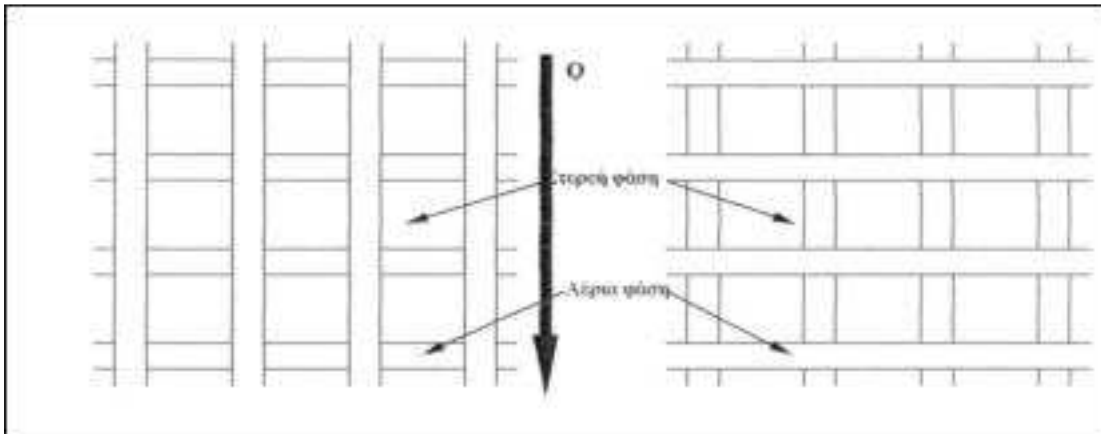
Η άλλη κατηγορία μοντέλων για την ίδια περίπτωση (θέρμανσης - ψύξης) είναι, όπως αναφέρθηκε, αυτά των κυβικών κυψελών. Αυτά είναι δύο ειδών, τα CSP και CPS και παρουσιάζονται στην Εικόνα 7-8. Οι εξισώσεις που δίνουν τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας για τα μοντέλα CSP και CPS είναι αντίστοιχα:

$$K = K_s \cdot (1 - \rho^{2/3}) + \{K_s \cdot \rho^{2/3}\} / \{K_a + (K_s - K_a) \cdot \rho^{1/3}\} \quad [8-12]$$

$$K = \{K_s^2 - K_s \cdot (K_s - K_a) \cdot \rho^{2/3}\} / \{K_s - (K_s - K_a) \cdot (\rho^{2/3} - \rho)\} \quad [8-13]$$

όπου

K	αγωγιμότητα του υλικού	[W/moK]
K _s	αγωγιμότητα στερεής φάσης	[W/moK]
K _a	αγωγιμότητα αέριας φάσης	[W/moK]
ρ	πορώδες	



Εικόνα 8-8 : Μοντέλα CSP και CPS

Από τα τρία προηγούμενα μοντέλα (Russell, CSP και CPS), επειδή το μοντέλο CSP υποτιμά την αγωγιμότητα ενώ το CPS την υπερεκτιμά, τα καλύτερα αποτελέσματα δίνει αυτό του Russell και αυτό θα χρησιμοποιηθεί.

Στην δεύτερη περίπτωση (τηγμένη τέφρα με ίδιο συντελεστή αγωγιμότητας στην φάση θέρμανσης και ψύξης) χρησιμοποιείται το μοντέλο Brailsford και Major (Brailsford & Major, 1964). Αυτό, εκτιμά τον συντελεστή αγωγιμότητας όταν έχουμε μία τυχαία κατανομή των φάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται εάν θεωρήσουμε τις δυο φάσεις ενσωματωμένες σε μια τρίτη φάση, η οποία είναι ένα μίγμα των δύο προηγούμενων και έχει συντελεστή αγωγιμότητας όση και η εξεταζόμενη τέφρα. Ο συντελεστής αγωγιμότητας προκύπτει από την εξίσωση:

$$K = (3 \cdot \rho' - 1) \cdot K1 + (3 \cdot \rho - 1) \cdot K2 + \frac{[(3 \cdot \rho' - 1) \cdot K1 + (3 \cdot \rho - 1) \cdot K2]^2 + 8 \cdot K1 \cdot K2}{2} \quad [8-14]$$

όπου

K	αγωγιμότητα του υλικού	[W/moK]
K1	αγωγιμότητα στερεής φάσης	[W/moK]
K2	αγωγιμότητα αέριας φάσης	[W/moK]
ρ	πορώδες	
ρ'	1- ρ	

Στον Πίνακα 7-2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα μοντέλα εκτίμησης του συντελεστού αγωγιμότητας

Πίνακας 8-2 : Μοντέλα Εκτίμησης του Συντελεστή Αγωγιμότητας μέσω του πορώδους

Μοντέλο εκτίμησης του συντελεστού αγωγιμότητας	Παρατηρήσεις
Rayleigh ¹	Ισχύουν για πορώδη μικρότερα του 0,52
Deissler & Eian ¹ Woodside ¹	
Russell ¹	Ισχύει για πορώδη από 0 έως 1
CSP	Υποτιμά τον συντελεστή αγωγιμότητας
CPS	Υπερεκτιμά τον συντελεστή αγωγιμότητας
Brailsford & Major	Εκτιμά τον συντελεστή αγωγιμότητας είτε είναι το στερεό η συνεχόμενη φάση είτε το αέριο
Baxter	Δίνει άνω και κάτω όρια του συντελεστού αγωγιμότητας αλλά χρησιμοποιεί σαν παράμετρο την ελλειπτικότητα

Σημείωση: Μοντέλα βασισμένα στην εξίσωση Rayleigh

8.7.3. Εκτίμηση του συντελεστού θερμικής αγωγιμότητας χρησιμοποιώντας μοντέλα ανεξάρτητα του πορώδους

Ως γνωστό, οι παράμετροι που επηρεάζουν την αγωγιμότητα των επικαθίσεων τέφρας είναι:

- Θερμοκρασία του στρώματος των επικαθίσεων
- Θερμοκρασία τήξης (εξαρτώμενη από τη χημική σύσταση)
- Χρόνος τήξης
- Πορώδες του στρώματος
- Διάμετρος κόκκων
- Χημική σύσταση των επικαθίσεων

Από αυτές τις παραμέτρους άλλες επηρεάζουν λιγότερο (π.χ. Χημική σύσταση) και άλλες περισσότερο (Πορώδες, θερμοκρασία) την θερμική αγωγιμότητα. Στην προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα μοντέλο το οποίο να προβλέπει την συμπεριφορά των επικαθίσεων, αναφορικά με την μετάδοση θερμότητας με αγωγή, έχουν

περιορισθεί οι παράγοντες στους δυο κυριότερους (θερμοκρασία και πορώδες). Από τους υπόλοιπους παράγοντες, άλλοι έμμεσα και άλλοι άμεσα, συνδέονται με αυτούς τους δύο.

Έτσι, το πρόβλημα καταλήγει στην δημιουργία ενός μοντέλου, το οποίο θα προβλέπει την θερμική αγωγιμότητα των επικαθίσεων τέφρας, με δεδομένα την θερμοκρασία και το πορώδες. Ενώ η θερμοκρασία είναι ένα μέγεθος εύκολα μετρούμενο (online) χωρίς ιδιαίτερο εργαστηριακό εξοπλισμό, δεν ισχύει το ίδιο και για το πορώδες. Έτσι γίνεται προσπάθεια το μοντέλο να παρακάμψει το πορώδες σαν δεδομένο εισόδου.

Για την επίτευξη του μοντέλου, δυο είναι οι βασικές κατευθύνσεις που ακολουθούνται. Πρώτη σκέψη είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου το οποίο θα δέχεται ως δεδομένα εισόδου την θερμοκρασία και το πορώδες, αλλά το τελευταίο θα το υπολογίζει έμμεσα από άλλα δεδομένα (π.χ. κατανομή μεγέθους σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας). Δεύτερη σκέψη είναι ο (θεωρητικός) διαχωρισμός του στρώματος σε δυο μέρη με διαφορετικές θερμικές ιδιότητες, το ένα εκ των οποίων θα θεωρείται τηγμένο ενώ το άλλο όχι.

8.7.3.1. Μοντέλο Εκτίμησης Αγωγιμότητας με Στρωματική Θεώρηση των Επικαθίσεων

Σε αυτό το μοντέλο, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 7-9, υπάρχουν δύο στρώματα επικαθίσεων. Το εσωτερικό στρώμα θεωρείται ότι αποτελείται από μη τηγμένη τέφρα (unsintered), ενώ το εξωτερικό από τηγμένη (sintered). Την θεώρηση αυτή έκανε πρώτος ο Baxter (Baxter, 2000). Σύμφωνα με τον Baxter, η θερμική αγωγιμότητα του μη τηγμένου στρώματος είναι $0.15 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$, ενώ του τηγμένου μεταβάλλεται από αυτή την τιμή έως $3 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$. Το πρόβλημα που μένει να επιλυθεί είναι ο καθορισμός του ορίου των δυο στρωμάτων. Η θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια είναι T_{outer} και στην εσωτερική T_{inner} . Η προσπάθεια συνίσταται στην εύρεση της θερμοκρασίας T_{fusion} ($T_{\text{outer}} > T_{\text{fusion}} > T_{\text{inner}}$), πέρα από την οποία θεωρείται τηγμένο το στρώμα.

Με δεδομένη αυτήν τη θερμοκρασία, η αγωγιμότητα του συνολικού στρώματος θα είναι:

$$k = \frac{1}{\frac{T_{fusion} - T_{inner}}{k_{unsin} \cdot (T_{outer} - T_{inner})} + \frac{T_{outer} - T_{fusion}}{k_{sin} \cdot (T_{outer} - T_{inner})}} \quad [8-15]$$

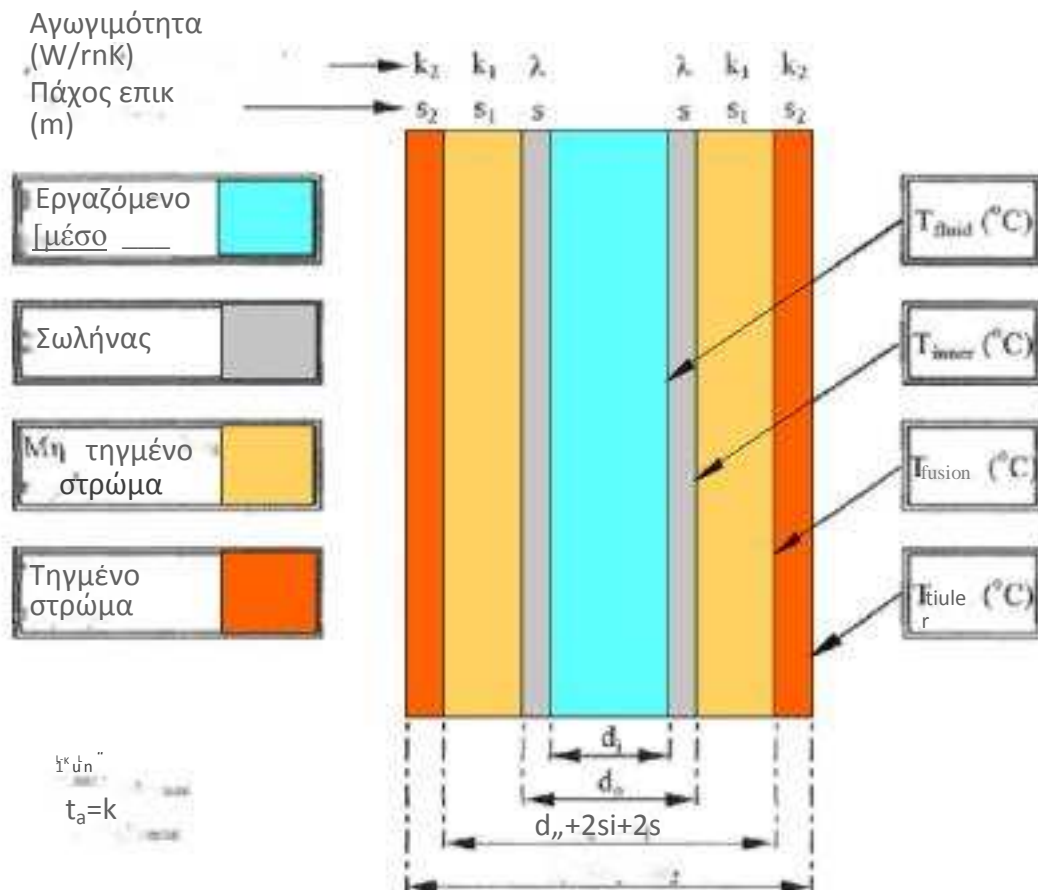
όπου

k_{unsin} Θερμική αγωγιμότητα εσωτερικού (μη τηγμένου) στρώματος [W/m²K]

k_{sin} Θερμική αγωγιμότητα εξωτερικού (τηγμένου) στρώματος [W/m²K]

Η ζητούμενη θερμοκρασία εξαρτάται από την χημική σύσταση της τέφρας και θα είναι αυτή η θερμοκρασία στην οποία αντιστοιχεί κάποιο συγκεκριμένο ιξώδες, πέραν από το οποίο η τέφρα μπορεί να θεωρείται τηγμένη. Έτσι, το κύριο πρόβλημα είναι ο καθορισμός αυτής της τιμής της συνεκτικότητας. Με δεδομένη αυτή την συνεκτικότητα είναι εύκολη η ανάστροφη διαδικασία και η αντιστοίχιση της σε μια θερμοκρασία.

Τελικά, αυτό που επιτυγχάνεται είναι, με δεδομένη την σύσταση της τέφρας και του επιθυμητού ιξώδους (και επομένως της συνεκτικότητας), η εύρεση με διάφορα μοντέλα της θερμοκρασίας T_{fusion} . Γνωρίζοντας αυτήν την θερμοκρασία, έχει πλέον βρεθεί η θερμική αγωγιμότητα του στρώματος και κατ' επέκταση και ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας. Για την εύρεση της συγκεκριμένης θερμοκρασίας, υπάρχουν στην βιβλιογραφία διάφορα μοντέλα που υπολογίζουν, για κάθε συνεκτικότητα, μέσω της σύστασης, την θερμοκρασία. Έτσι, μένει να καθορισθεί η κρίσιμη αυτή συνεκτικότητα.



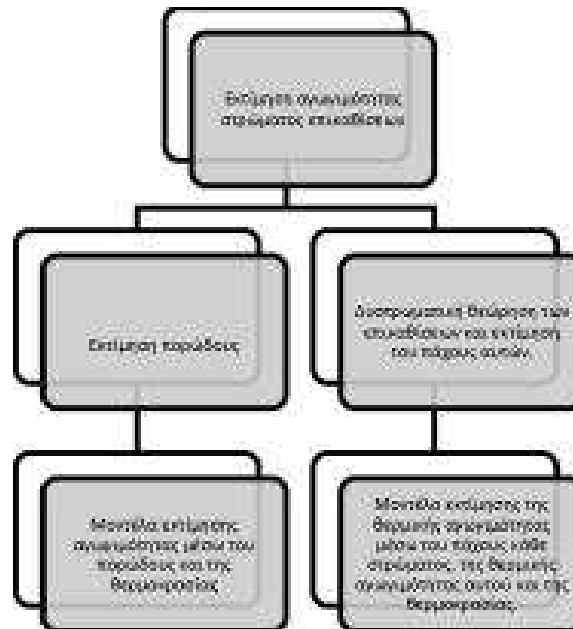
Εικόνα 8-9 : Στρώματα επικαθίσεων σε επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας

8.7.3.2. Μοντέλο Εκτίμησης Αγωγιμότητας μέσω εκτίμησης του πορώδους από την κατανομή των σωματιδίων που αποτελούν τις επικαθίσεις.

Μια από τις βασικές παραμέτρους (αν όχι η βασικότερη) που καθορίζουν την αγωγιμότητα των επικαθίσεων είναι το πορώδες. Αυτό είναι απολύτως λογικό αν αναλογιστούμε ότι, το πορώδες εκφράζει τον λόγο αέρα προς τον συνολικό όγκο. Με δεδομένο τον μικρότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του αέρα ($0,05564 \text{ W/m}^2\text{K}$ για θερμοκρασία $500 \text{ }^\circ\text{C}$), ο αέρας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την συμπεριφορά της τέφρας.

Τις επικαθίσεις αποτελούν σωματίδια τέφρας, τα οποία προσκρούουν στις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας και προσκολλούνται σε αυτές. Με δεδομένη την κατανομή μεγέθους των σωματιδίων (και με την θεώρηση ότι αυτή η ίδια κατανομή μεγέθους θα χαρακτηρίζει και το στρώμα των επικαθίσεων), είναι δυνατόν με διάφορα μοντέλα από την βιβλιογραφία, ο υπολογισμός του πορώδους. Με δεδομένο πλέον το πορώδες της επικαθίσης υπάρχουν πλείστα μοντέλα για την

εκτίμηση της συνολικής αγωγιμότητας (Ouchiyama & Tanaka, 1981). Μετά από μια πρώτη αξιολόγηση των μοντέλων εκτίμησης της θερμικής αγωγιμότητας μέσω του πορώδους, αυτό των Brailsford και Major δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.



Εικόνα 8-10 : Προσεγγίσεις για την εκτίμηση της Θερμικής Αγωγιμότητας στρώματος επικαθίσεων

Παρουσιάστηκαν δυο βασικές σκέψεις για την εύρεση της αγωγιμότητας. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται προσπάθεια παράκαμψης του πορώδους, ενώ στην δεύτερη, απόπειρα εκτίμησης του μέσω διαφόρων μοντέλων. Στην Εικόνα 7-10 παρουσιάζονται οι δυο αυτές προσεγγίσεις. Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο, ότι ενώ οι δυο προσεγγίσεις φαίνονται ανεξάρτητες, δεν είναι. Το πορώδες είναι η κοινή συνιστώσα, αφού και στην πρώτη προσέγγιση (στρωματική θεώρηση των επικαθίσεων) η θερμοκρασία έμμεσα καθορίζει το πορώδες, αφού με άνοδο αυτής, τήξη των επικαθίσεων λαμβάνει χώρα με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση του πορώδους.

Λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων, έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο πρόβλεψης της αγωγιμότητας μέσω της θερμοκρασίας και της σύστασης της τέφρας από πειραματικά δεδομένα άλλων ερευνητών (Rezaei και άλλοι). Τα πειραματικά αυτά δεδομένα, περιέχουν πειραματικά μετρημένες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας διαφόρων δειγμάτων τέφρας γνωστής σύστασης. Αυτά τα δείγματα χαρακτηρίζονται από μια θερμοκρασία μαλάκυνσης (σύμφωνα με τις μεθόδους της A.S.T.M.), η

οποία είναι συνάρτηση της σύστασης του δείγματος. Σε αυτή τη θερμοκρασία, το δείγμα έχει ένα συγκεκριμένο ιξώδες. Όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία μαλάκυνσης (Softening Temperature S.T.), τόσο πιο εύκολα επιτυγχάνεται το συγκεκριμένο ιξώδες και γρηγορότερα λειώνει το δείγμα και συμπεριφέρεται σαν τηγμένο με αποτέλεσμα να έχει υψηλό συντελεστή αγωγιμότητας. Έτσι, μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων, έγινε δυνατή η εξαγωγή μιας εξίσωσης που εκτιμά τον συντελεστή αγωγιμότητας σε συνάρτηση με την θερμοκρασία και με παράμετρο την πειραματικά μετρούμενη θερμοκρασία μαλάκυνσης (S.T.)

$$k = 0,0017 T + 0,97045 - 0,000445 \cdot (S.T.) \quad [8-16]$$

όπου:

k	Θερμική αγωγιμότητα δείγματος	[W/m²K]
T	Θερμοκρασία δείγματος	[°C]
S.T.	Θερμοκρασία μαλάκυνσης του δείγματος	[°C]

Η προηγούμενη μέθοδος που αναπτύχθηκε απαιτεί τον πειραματικό προσδιορισμό της θερμοκρασίας μαλάκυνσης. Για να αποφευχθεί αυτή η διαδικασία και εφόσον υπάρχουν στην βιβλιογραφία μέθοδοι χαρακτηρισμού της τέφρας από την σύσταση, έχει εξαχθεί και μια ακόμη εξίσωση που σαν παράμετρο έχει την θερμοκρασία T₂₅₀. Η θερμοκρασία αυτή, είναι μια θερμοκρασία που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο ιξώδες (250 poise) και υπολογίζεται μέσω της σύστασης του δείγματος.

$$k = 0.001833 \cdot T - 5 \cdot 10^{-7} T^2 + 1.0011 T_{250} - 0.0722 \quad [8-17]$$

όπου:

k	Θερμική αγωγιμότητα δείγματος	[W/m²K]
T	Θερμοκρασία δείγματος	[°C]
T²⁵⁰	Θερμοκρασία υπολογιζόμενη από την ακόλουθη εξίσωση σαν συνάρτηση της αναλογίας πυριτίου (Silica Ratio S.R.)	[°C]

9. ΔΙΑΒΡΩΣΗ

Η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Αμερική είχε σαν αποτέλεσμα ο θερμικός βαθμός απόδοσης από 28% να ανέβει στο 38% το 1948, με στόχο να φτάσει στο 40% το 1965. Προκειμένου να ικανοποιηθεί η απαίτηση για αυξημένο βαθμό απόδοσης, η θερμοκρασία του ατμού από τους 454 °C το 1948, ανέβηκε στους 565 °C το 1963. Τα υλικά κατασκευής των σωλήνων δεν ήταν πλέον χαλυβοσίδηρος (π.χ. 1% Cr- 1% Mo) αλλά 2% Cr- 1% Mo. Ο σχεδιασμός για την ατμοπαραγωγή είχε πλησιάσει στα κατασκευαστικά όρια για ορισμένα καύσιμα πλούσια σε νάτριο, χλώριο και θείο, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η λειτουργία ορισμένων μονάδων γινότανε εκτός των ορίων που έθεταν τέτοιοι παράμετροι.

Ο ρυθμός οξείδωσης των χαλύβων που χρησιμοποιούνται στις σωληνώσεις των λεβήτων καύσεις είναι υπό φυσιολογικές συνθήκες της τάξης των 100nm/h. Όμως οι ενώσεις που σχηματίζονται κατά την καύση μπορεί να οδηγήσουν σε ρυθμούς οξείδωσης πάνω από 600nm/h. Οι βασικές ενώσεις που προκαλούν διάβρωση είναι οι θεικές ενώσεις του σιδήρου και το υδροχλωρικό οξύ. Το αναγωγικό περιβάλλον μειώνει τη θερμοκρασία τήξης της τέφρας και αυξάνει τις εναποθέσεις μεταλλικών συστατικών, ευνοώντας τα προβλήματα διάβρωσης. Επιπλέον, οι τεχνικές που εφαρμόζονται για περιορισμό των NOx αυξάνουν την πιθανότητα διάβρωσης εξαιτίας των αναγωγικών συνθηκών που δημιουργούν.

9.1. Χημική διάβρωση

Η χημική διάβρωση που λαμβάνει χώρα στα διάφορα τμήματα του λέβητα είναι η οξείδωση των μετάλλων η οποία επηρεάζεται από τα αέρια, τα τηγμένα, καθώς και τα στερεά προϊόντα της καύσης των ανθράκων. Αυτή η μορφή διάβρωσης σχετίζεται κατά κανόνα με τις επικαθίσεις οι οποίες σχηματίζονται στις περιοχές συναλλαγής θερμότητας. Οι επικαθίσεις αυτές αποτελούνται από ενώσεις που σχηματίζονται από τον συνδυασμό των προϊόντων καύσης και των προϊόντων της χημικής διάβρωσης των μετάλλων των σωλήνων. Η σύσταση των επικαθίσεων εξαρτάται από την σύσταση του καυσίμου καθώς και από τις συνθήκες καύσης. Σε πολλές περιπτώσεις, τα χημικά στοιχεία τα οποία παρουσιάζονται σε σχετικά μικρές ποσότητες ή ακόμα και σε πολύ χαμηλές αναλογίες, συγκεντρώνονται στις επιφάνειες του λέβητα και συνιστούν την πλειοψηφία των διαβρωτικών επικαθίσεων.

Κατά την διάρκεια τα καύσης τα κύρια συστατικά των στερεών καυσίμων, ήτοι άνθρακας και υδρογόνο, μετατρέπονται σε διοξείδια του άνθρακα και ατμό. Ως εκ τούτου τα παραγόμενα καυσαέρια αποτελούνται κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα, ατμό, άζωτο (από τον αέρα καύσης) και περίπου 4% οξυγόνο (από την περίσσεια αέρα για την επίτευξη πλήρους καύσης).



Εικόνα 9-1 : Χημική διάβρωση σε Αυλό (1)



Εικόνα 9-2 : Χημική διάβρωση σε Αυλό (2)

Οι άνθρακες περιέχουν οργανικά και ανόργανα συστατικά. Το μεγαλύτερο μέρος των ακαθαρσιών του άνθρακα αποτελείται από πυριτικό αργίλιο το οποίο προκαλεί τον σχηματισμό της τέφρας. Μέρος αυτής της τέφρας που σχηματίζεται κατά την καύση, πέφτει στην τεφρολεκάνη του λέβητα ("υγρή" τέφρα) ενώ το μεγαλύτερο μέρος της περιέχεται στα καυσαέρια (ιπτάμενη τέφρα). Αυτή η ιπτάμενη τέφρα είναι που σχηματίζει τις επικαθίσεις.

Τα κύρια συστατικά των ανθράκων που σχετίζονται με τον μηχανισμό της χημικής διάβρωσης είναι:

- Θείο
- Νάτριο
- Κάλιο
- Χλώριο
- Κασσίτερος
- Ψευδάργυρος

Μέρος του περιεχόμενου θείου εμπεριέχεται στους άνθρακες ως συστατικό των οργανικών ενώσεων του και η υπόλοιπη ποσότητα εμφανίζεται στον σιδηροπυρίτη ο οποίος είναι πλήρως αναμειγμένος στον άνθρακα. Το νάτριο και το κάλιο εμφανίζονται κυρίως στο πυριτικό αργίλιο που περιέχεται στον άνθρακα.

Η εκτίμηση της ποσοστιαίας σύστασης του καιόμενου άνθρακα σε χλώριο αποτελεί μια πολύ καλή ένδειξη της ικανότητας του άνθρακα να προκαλέσει χημική διάβρωση. Κατά τα αρχικά στάδια της καύσης του κονιορτοποιημένου καυσίμου, απελευθερώνεται χλώριο με τη μορφή αέριου υδροχλωρίου. Η συγκέντρωση του υδροχλωρίου είναι ανάλογη της περιεκτικότητας του άνθρακα σε χλώριο και της ποσότητας περίσσειας αέρα. Ο ρόλος του στην χημική διάβρωση είναι πολύπλοκος και πιθανών όχι άμεσος. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι το χλώριο συμβάλει στην απελευθέρωση νατρίου και καλίου από τον άνθρακα και καθώς πάντοτε υπάρχει αρκετή ποσότητα χλωρίου, οι απελευθερωμένες ποσότητες του νατρίου και του χλωρίου μετατρέπονται σε εύτηκτα θειικά άλατα. Αυτά τα εύτηκτα θειικά άλατα είναι που προκαλούν εν τέλει την χημική διάβρωση.

Επιπλέον η απελευθέρωση αλκαλικών μετάλλων επηρεάζεται από την σύσταση της τέφρας. Η ποσότητα της τέφρας επιδρά στην κατανομή των αλκαλικών μετάλλων μεταξύ της υγρής και αέριας φάσης κατά τέτοιο τρόπο ώστε όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό τέφρας στον άνθρακα τόσο πιο αβλαβές καθίσταται το θειικό άλας των αλκαλικών μετάλλων που απελευθερώνονται κατά την καύση.

Οι επικαθίσεις τήκονται στις θερμοκρασίες που επικρατούν στον λέβητα κατά την κανονική λειτουργία αυτού. Καθώς τα θειικά άλατα παίζουν τον σημαντικότερο ρόλο στον μηχανισμό της χημικής διάβρωσης, όσο πιο χαμηλό είναι το σημείο τήξης τους τόσο εκτενέστερη είναι η περιοχή του λέβητα που επηρεάζεται από την χημική διάβρωση.

Παρακάτω συνοψίζεται ο ρόλος των διάφορων ενώσεων που συμμετέχουν στην καύση στο σχηματισμό χημικά διαβρωτικών επικαθίσεων:

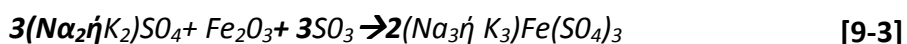
1. Κατά την καύση, ο σιδηροπυρίτης (FeS_2) και οι Θειούχες Οργανικές Ενώσεις αντιδρούν με το οξυγόνο



2. Στην υψηλή θερμοκρασία της φλόγας, το νάτριο και το κάλιο αντιδρούν σχηματίζοντας Na_2O και K_2O
3. Στη συνέχεια το Na_2O και το K_2O αντιδρούν με το SO_3 είτε εντός της ροής των καυσαερίων είτε εντός πάνω στις επικαθίσεις:

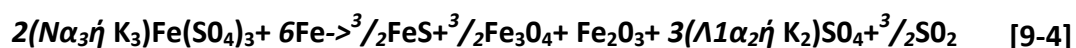


4. Τα αλκαλικά θειικά άλατα, το οξείδιο του σιδήρου και το SO_3 σχηματίζουν σύμπλεγμα θειικού άλατος:



Όταν οι επικαθίσεις στους σωλήνες περιέχουν μια αρκετά υψηλή αναλογία θειικών αλάτων του καλίου προς θειικά άλατα του νατρίου, σχηματίζονται πυροσουλφίδια. Το SO_3 αντιδρά άμεσα με το μίγμα των αλκαλικών θειικών αλάτων σχηματίζοντας πυροσουλφίδια ($\text{K}_{1,3}\text{Na}_{0,7}\text{S}_2\text{O}_7$), τα οποία στη συνέχεια προσβάλλουν το οξείδιο και σχηματίζεται σύμπλεγμα θειικού άλατος με ταχύτερο ρυθμό από την περίπτωση που η αντίδραση θα γινόταν σε ξηρή ατμόσφαιρα. Η θερμοκρασία τήξης του αλκαλικού πυροσουλφιδίου είναι 279°C όταν το SO_3 είναι πάνω από 7 ppm. Τα πυροσουλφίδια που τήκονται σε χαμηλή θερμοκρασία καθώς και το σύμπλεγμα θειικού άλατος είναι οι βασικοί συντελεστές της χημικής διάβρωσης στους υπερθέρμους.

Το σύμπλεγμα του θειικού άλατος, όταν είναι τηγμένο, αντιδρά με το μέταλλο του σωλήνα:



Η χημική διάβρωση των τοιχωμάτων του λέβητα των υπερθέρμων και των αναθέρμων επηρεάζεται από τις ακαθαρσίες του καυσίμου με διάφορους τρόπους. Ωστόσο και στις τρεις περιπτώσεις ο σχετικά ευσταθής και προστατευτικός φλοιός-σκουριά σιδηροσιδηρίτη (Fe_3O_4) ο οποίος μπορεί να σχηματιστεί κάτω από ιδανικές συνθήκες από την οξείδωση των μεταλλικών επιφανειών από το διοξείδιο του άνθρακα που περιέχεται στα καυσαέρια υπονομεύεται ή ακόμα και για την πρώτη περίπτωση αποτρέπεται.

Η προστατευτική ικανότητα αυτού του φλοιού εξαρτάται από τον ρυθμό μεταφοράς των στοιχείων στο εσωτερικό του, τις μηχανικές του ιδιότητες, και την συνάφεια του στη μεταλλική επιφάνεια.

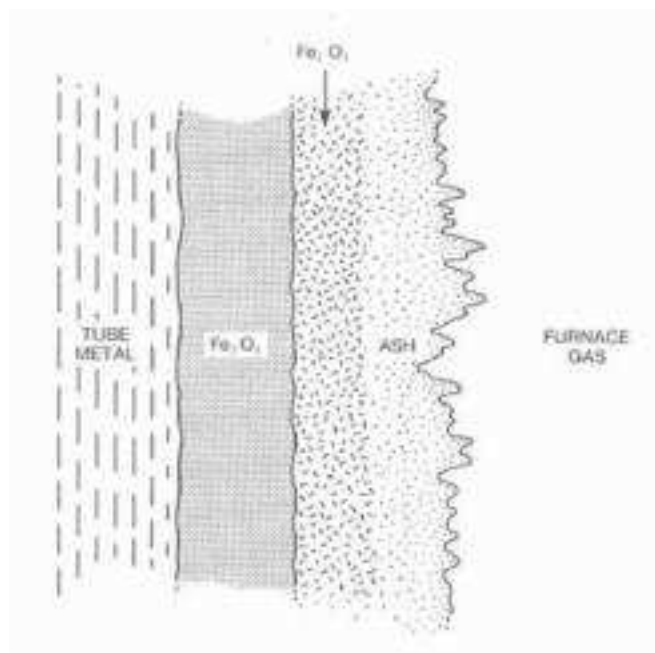
Κράματα τα οποία έχουν υψηλό ποσοστό χρωμίου στη σύστασή τους παράγουν ένα λεπτό και ιδιαίτερα προστατευτικό χρωμιούχο φλοιό. Η συνάφεια αυτών των φλοιών με το μεταλλικό υπόστρωμα είναι δυνατόν να βελτιωθεί με χρήση πρόσθετων όπως ύτριο και δημήτριο. Στην περίπτωση που η συνάφεια δεν είναι αρκετά ισχυρή, η διαφορετική θερμική διαστολή του φλοιού και του μετάλλου έχει σαν συνέπεια την αποκόλληση του φλοιού. Η τάση για δημιουργία κενού στην διεπαφή ή πίσω από αυτή επηρεάζει επίσης και την αντοχή συνάφειας.

Ενώ υπάρχουνε κάποια στοιχεία τα οποία δείχνουν ότι κράματα φερρίτη με υψηλό ποσοστό χρωμίου (πάνω από **20%**) έχουν μεγαλύτερη αντοχή στην χημική διάβρωση από τα κράματα με κρυσταλική δομή ωστενίτη, προτιμώνται τα τελευταία λόγω της υψηλής αντοχής τους κραμάτων στον ερπυσμό σε υψηλές θερμοκρασίας καθώς και λόγω της γενικότερης μηχανικής τους αρτιότητας, για την κατασκευή των αυλών. Επιπλέον δεν «πάσχουν» από ψαθυροποίηση όπως οι φερρίτες (service embrittlement) με υψηλό ποσοστό χρωμίου.

Παρά την συνεχή εξέλιξη των κραμάτων με υψηλή οξειδωτική αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, δεν έχει επιτευχθεί η αποτελεσματική αντιμετώπιση της χημικής διάβρωσης που προκαλούν τα θειικά άλατα που περιέχονται στις επικαθίσεις της τέφρας που έρχονται σε άμεση επαφή με την μεταλλική επιφάνεια.

9.1.1. Χημική διάβρωση υδροτοιχωμάτων

Η θερμοκρασία της επιφάνειας των μετάλλων των αυλών ανόδου με πίεση λειτουργίας στα 165 bar είναι περίπου 450 °C. Σε αυτή τη θερμοκρασία δημιουργείται ένας προστατευτικός φλοιός σιδηροσιδηρίτη εφόσον τα καυσαέρια που έρχονται σε επαφή με την επιφάνεια των αυλών ανόδου περιέχουν περίσσεια οξυγόνου (Εικόνα 6-3).



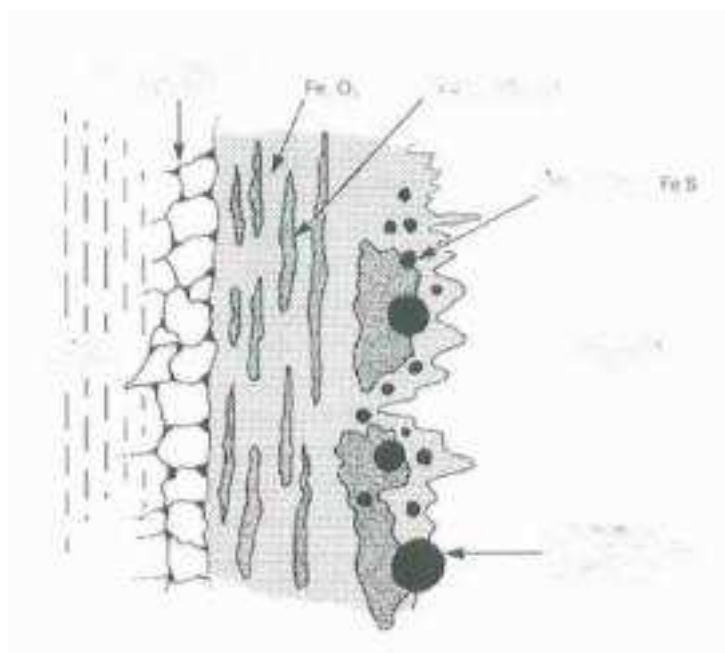
Εικόνα 9-3 : Σχηματισμός προστατευτικού φλοιού σε οξειδωτικές συνθήκες

Η καύση είναι μία δυναμική διεργασία και χαρακτηρίζεται από εκτενείς διαφοροποιήσεις που ενδεχομένως να οδηγήσουν σε αναγωγικές συνθήκες, όπως υψηλή συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα και χαμηλή συγκέντρωση οξυγόνου στην περιοχή όπου σχηματίζεται ο φλοιός. Οι αναγωγικές συνθήκες και άλλοι παράγοντες που συμβάλουν στην πρόκληση έντονης χημικής διάβρωσης μπορεί να δημιουργηθούν από:

- Κακή κατανομή αέρα και/ή καυσίμου
- Κακή λειτουργία των καυστήρων
- Ανεπαρκής αέρας καύσης
- Υψηλή συγκέντρωση χλωρίου στον άνθρακα
- Σύγκρουση άκαυστων στους αυλούς

Η σύνθετη αεριώδης αλληλεπίδραση μεταξύ του θείου, του χλωρίου, του άνθρακα και του οξυγόνου στην παρουσία τοπικά έντονων θερμικών φορτίων παράγει ένα μη προστατευτικό φλοιό που προκαλεί χημική διάβρωση. Η επισκωρίαση των υδροτοιχωμάτων είναι επίσης επιζήμια διότι παρεμποδίζει την διέλευση οξυγόνου προς τον προστατευτικό φλοιό με συνέπεια να εντείνονται οι αναγωγικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα των ανωμαλιών αυτών και των σύνθετων αντιδράσεων είναι ο σχηματισμός σιδηροπυρίτη ο οποίος καθιστά των φλοιό μη προστατευτικό και προκαλεί μηχανική παραμόρφωση λόγω του μεγάλου του βάρους. (Εικόνα 6-4)

Οι πιο έντονες αναγωγικές/επιθειώσης συνθήκες και κατ' επέκταση χημική διάβρωση εμφανίζονται όταν άκαυστα σωματίδια άνθρακα συγκρούονται και προσκολλούν στους αυλούς ανόδου. Η υψηλή συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα σε εκείνο το σημείο υποβοηθά τον σχηματισμό θειικών αλάτων και η παρουσία υδροχλωρίου στην περιοχή ενισχύει την χημική διάβρωση. Ο φλοιός που δημιουργείται αποτελείται από οξειδία και θειούχες ενώσεις με χλωριούχο υποσίδηρο.



Εικόνα 9-4 : Σχηματισμός μη-προστατευτικού φλοιού υπό αναγωγικές συνθήκες

Όσον αφορά τον ρόλο του χλωρίου, προηγουμένως αναφέρθηκε ότι το υδροχλώριο διαχέεται ταχέως στην επιφάνεια του μετάλλου όπου σχηματίστηκε ο πτητικός υποχλωριούχος σίδηρος (Volatile Iron Chloride). Της στη συνέχεια διαχέεται πίσω στην διεπαφή του φλοιού με τα καυσαέρια, διαλύεται και δίνει Fe_2O_4 , FeS και HCl .

Έως τώρα έχει παρατηρηθεί ότι όταν υπάρχει η υψηλή τάση για σχηματισμό θειικών αλάτων, για τον ρυθμό απώλειας μετάλλου που έχει παρατηρηθεί, δεν υπάρχει επαρκείς μεταφορά πτητικών.

Κατά μία άλλη προσέγγιση, στην παρουσία αναγωγικών συνθηκών, το πτητικό υδροχλωρικό οξύ ενισχύει το πορώδες του φλοιού των θειικών αλάτων αποδυναμώνοντας τον με αποτέλεσμα την θραύση αυτού σε πολύ μικρότερο πάχος απ' ότι θα συνέβαινε απουσία υδροχλωρίου.

Από τα προηγούμενα είναι ξεκάθαρο ότι η χημική διάβρωση των υδροτοιχωμάτων περιορίζεται τοπικά κυρίως της αυλούς ανόδου και στην περιοχή των καυστήρων. Στην εικόνα 8-5 φαίνεται η επίδραση της χημικής διάβρωσης των αυλών ανόδου των υδροτοιχωμάτων.



Εικόνα 9-5 : Χημική διάβρωση υδροτοιχωμάτων

Το φαινόμενο της χημικής διάβρωσης περιορίζεται σημαντικά στους λέβητες μεγάλου μεγέθους όπου:

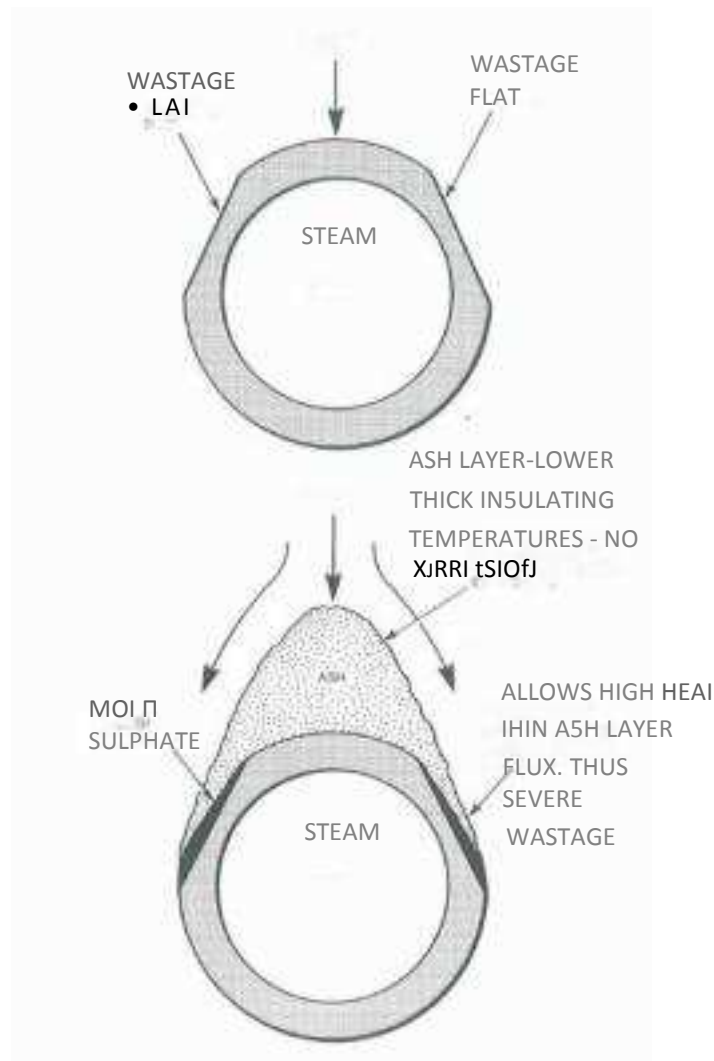
- οι συνθήκες καύσης ελέγχονται σωστά
- η προσκόλληση των σωματιδίων του κονιορτοποιημένου άνθρακα στα υδροτοιχώματα είναι ελάχιστη
- το ποσοστό σε χλώριο στον άνθρακα είναι χαμηλό
- η γεωμετρία και η αεροδυναμική του θαλάμου καύσης εμποδίζει τη δημιουργία αναγωγικών συνθηκών στην περιοχή των υδροτοιχωμάτων.

9.1.2. Χημική διάβρωση αναθέρμου και υπέρθερμου

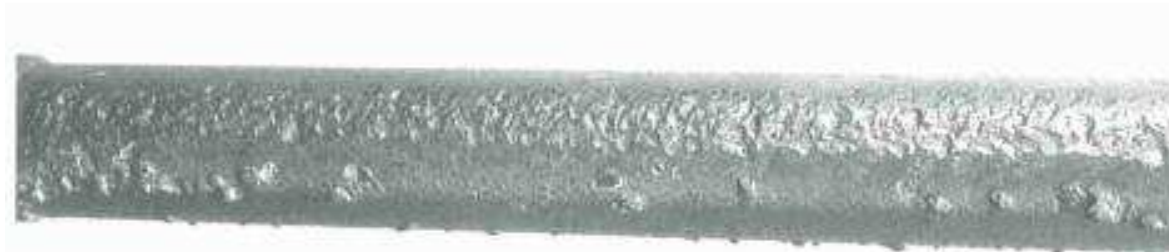
Η χημική διάβρωση των τμημάτων του υπερθέρμου και αναθέρμου υποδηλώνεται από:

- την δημιουργία δύο διακριτών επίπεδων επιφανειών στην θερμότερη επιφάνεια των σωλήνων (Εικόνα 8-6)
- την δημιουργία κυψελοειδούς κοιλότητας (Εικόνα 8-7)

Γεωμετρικά και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά όπως στηρίγματα, διαζώματα συγκολλήσεων, προεξέχουσες συγκολλήσεις σωλήνων έχουν μεγαλύτερη τάση να σχηματίσουν τοπικά απομονωμένες κοιλότητες.



Εικόνα 9-6 : Χημική διάβρωση από υπερθερμαντή



Εικόνα 9-7 : Σχηματισμός κυψελοειδούς κοιλότητας λόγω χημικής διάβρωσης

Η πιο έντονη χημική διάβρωση λαμβάνει χώρα στους αεροδυναμικά εκτεθειμένους σωλήνες, όπως οι σωλήνες που προηγούνται κατά την ροή των καυσαερίων. Ο ρυθμός χημικής διάβρωσης τείνει να ελαττώνεται στους σωλήνες που είναι λιγότερο εκτεθειμένοι. Οι υπερθερμαντές αντίθετης ροής όπου συνδυάζουν τα θερμότερα καυσαέρια με τον θερμότερο ατμό είναι περισσότερο ευάλωτοι στη χημική διάβρωση από αυτούς όπου είναι σχεδιασμένοι για παράλληλη ροή.

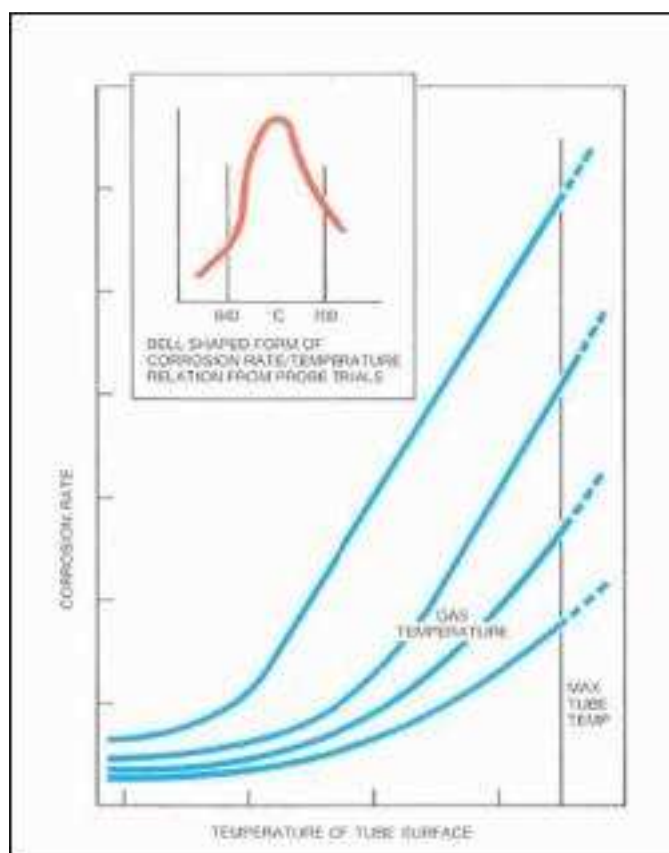
Η χημική διάβρωση των σωλήνων οφείλεται στις επικαθίσεις από θειικά άλατα νατρίου και κάλιου στις επιφάνειες των σωλήνων που κοιτούν προς τη ροή των καυσαερίων όπου το μέγεθος της επικαθίσης καθορίζει την μεταφορά θερμότητας.

Ο ρόλος του χλωρίου στην απελευθέρωση του νατρίου και του καλίου και τον σχηματισμό των θειικών αλάτων συζητήθηκε προηγουμένως. Αυτά τα άλατα των αλκαλικών μετάλλων που σχηματίστηκαν αρχικά, σταδιακά συσσωρεύονται και συμπυκνώνονται στη βάση της πορώδους επικαθίσεως της τέφρας. Οι επικαθίσεις αυτές τήκονται όταν η θερμοκρασία των μετάλλων των σωλήνων είναι περίπου 580°C και πάνω, σχηματίζοντας δίπλα στον προστατευτικό φλοιό ένα λεπτό υγρό στρώμα με έντονα διαβρωτικά χαρακτηριστικά. Το στρώμα αυτό περιέχει ελεύθερα τριοξείδια του θείου τα οποία έρχονται σε ισορροπία με το θειικά άλατα και φθείρουν τον προστατευτικό φλοιό σχηματίζοντας θειικά άλατα σιδήρου, χρωμίου και νικελίου.

Η σταθερότητα των θειικών αλάτων του σιδήρου και χρωμίου ελαττώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Επίσης η μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος της επικαθίσης έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της συγκέντρωσης των ιόντων των διαλυμένων μετάλλων. Η διαδικασία της διάλυσης του σιδήρου του χρωμίου και του νικελίου είναι συνεχής σε όλο το μήκος του τηγμένου στρώματος των επικαθίσεων. Στις θερμότερες επιφάνειες τα οξείδια του σιδήρου και του χρωμίου ανα-καθιζάνουν στο εσωτερικό της επικαθίσης της τέφρας αλλά δεν σχηματίζουν

πλέον προστατευτικό στρώμα. Αυτή η διαδικασία διάλυσης έχει σαν αποτέλεσμα έναν ρυθμό χημικής διάβρωσης ο οποίος μεταβάλλεται γραμμικά με τον χρόνο σε αντιδιαστολή με τον ρυθμό σχηματισμού του προστατευτικού φλοιού που το πάχος του αυξάνεται ασύμπτωτα με το χρόνο.

Ο ρυθμός της συνεχούς διαδικασίας μεταφοράς καθορίζει το ρυθμό χημικής διάβρωσης, η οποία εξαρτάται από την μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ των καυσαερίων και του μετάλλου των σωλήνων. Συνεπώς για μια δεδομένη θερμοκρασία μετάλλου παρατηρείται αυξημένος ρυθμός χημικής διάβρωσης σε αυξημένες θερμοκρασίες καυσαερίων. Καθώς η θερμοκρασία των μετάλλων αυξάνεται, αυξάνεται και ο ρυθμός αντίδρασης. Πάνω όμως από μία οριακή θερμοκρασία 650°C- 700°C το τηγμένο θειικό άλας που βρίσκεται σε διάλυση παρουσιάζει θερμοδυναμική αστάθεια. Αυτό έχει σαν συνέπεια ο ρυθμός αντίδρασης (χημικής διάβρωσης) να ελαττώνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και τελικά να οδηγεί σε κανονική οξείδωση/επιθείωση υψηλής θερμοκρασίας. Έτσι προκύπτει η καμπύλη με τη μορφή καμπάνας όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8-8.



Εικόνα 9-8 : Συσχέτιση μεταξύ ρυθμού χημικής διάβρωσης και θερμοκρασίας μετάλλου και αερίων σε αυλούς υπερθερμαντών και αναθερμαντών

Από μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν έχει παρατηρηθεί η αλληλεξάρτηση του χλωρίου που περιέχεται στον άνθρακα με τον ρυθμό της χημικής διάβρωσης των οστενιτικών σωλήνων των υπερθέρμων και αναθέρμων. Καθώς είναι γνωστό ότι το χλώριο ενισχύει την απελευθέρωση νατρίου και καλίου, έχοντας σαν στόχο τον προσδιορισμό της αλληλεπίδρασης με τον ρυθμό της χημικής διάβρωσης, αυτή η αλληλεπίδραση θεωρείται πιο αντιπροσωπευτική από την σχέση της απελευθέρωσης των αλκαλικών μετάλλων με το περιεχόμενο σε χλώριο που έχει προκύψει πειραματικά. Είναι συνεπώς πιθανών, ότι το χλώριο διαδραματίζει έναν επιπλέον άμεσο ρόλο στο μηχανισμό της χημικής διάβρωσης.

9.1.3. Ο ρόλος του χλωρίου στη χημική διάβρωση

Από έρευνες που έχουν γίνει έχει παρατηρηθεί αύξηση του ρυθμού διάβρωσης κατά 3,3 όταν ο άνθρακας καίγεται στην ακατέργαστη μορφή του. Από βαρυτικό διαχωρισμό έχει προκύψει ότι ακατέργαστος άνθρακας περιέχει 1,3% ενώσεις του χλωρίου, ενώ ο κατεργασμένος έχει περίπου 0,05%

Ο ρόλος των ενώσεων του χλωρίου στην αύξηση του ρυθμού διάβρωσης μπορεί να έχει πολλές πτυχές. Οι ενώσεις του χλωρίου στον άνθρακα εμφανίζονται ως ανόργανη ύλη και μπορούν να μεταφερθούν με την ιπτάμενη τέφρα ή να σχηματίσουν υδροχλώριο. Μπορούν επίσης να εξαερωθούν ως NaCl. Επιπρόσθετα τα χλωρίδια μπορούν να συγχωνευτούν σε οργανικούς ή ανόργανους σχηματισμούς. Οι ενώσεις του χλωρίου που προκύπτουν είναι συνήθως συγκεντρωμένες στις ψυχρότερες επιφάνειες των σωλήνων όπου μπορεί να συμβούν επιπλέον αντιδράσεις.

Η αύξηση της χημικής διάβρωσης λόγω της παρουσίας ενώσεων του χλωρίου οφείλεται σε δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος σχετίζεται με το σχηματισμό εύτηκτων ουσιών ή συμπλεγμάτων που ελαττώνουν τη θερμοκρασία τήξης των επικαθίσεων. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στα υδροτοιχώματα.

Ο δεύτερος μηχανισμός σχετίζεται με την αντίδραση του θειικού οξέος με τις ενώσεις του χλωρίου στις επικαθίσεις, απελευθερώνοντας υδροχλώριο. Αυτό έχει σαν συνέπεια το σχηματισμό φερριτικών χλωριδίων ή άλλες ενώσεις κραμάτων με χλωριούχα οξέα.

Η παρουσία ψευδάργυρου και κασσίτερου στις επικαθίσεις έχει σαν συνέπεια την ελάττωση του σημείου τήξης των επικαθίσεων, επιταχύνοντας τη χημική διάβρωση

Από αναλύσεις που έχουν γίνει σε δεδομένα λειτουργίας λεβήτων έχει προκύψει μία σχέση υπολογισμού του ρυθμού χημικής διάβρωσης για σωλήνες κατασκευασμένους από οστενίτη η οποία συσχετίζει το χλώριο του άνθρακα, το υλικό των σωλήνων, τη θερμοκρασία των καυσαερίων, τη θερμοκρασία στην επιφάνεια των σωλήνων και τη θέση των σωλήνων σε σχέση με τη ροή των καυσαερίων.

$$r = A \times B \left(\frac{T_g}{G} \right)^m \left(\frac{T_{m1} - C}{M} \right)^n (Cl - D) \quad [9-5]$$

Όπου

r = ρυθμός χημικής διάβρωσης σε νανόμετρα ανά ώρα

T_g = η θερμοκρασία των καυσαερίων[°C]

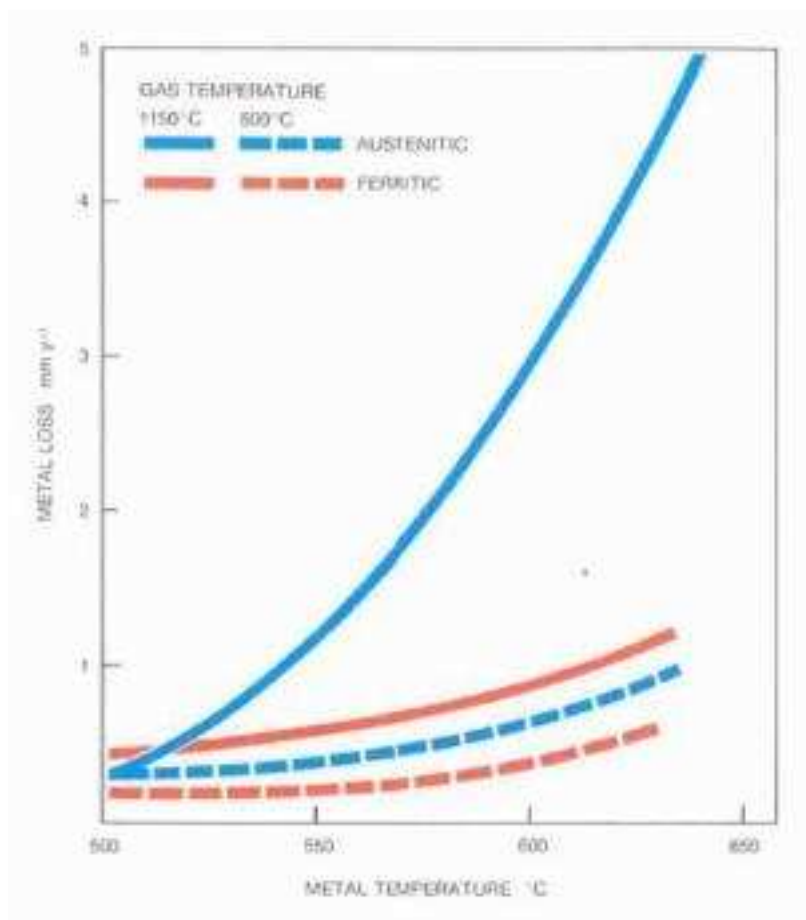
T_{m1} = η θερμοκρασία της επιφάνειας του μετάλλου[°C]

Cl = επί τις εκατό περιεχόμενο χλωρίου στον άνθρακα A = παράμετρος σχετική με τη θέση των σωλήνων [αδιάστατη]

B = παράμετρος υλικού [αδιάστατη]

G, M, D, m, n = σταθερές Η σχέση αυτή παράγει ένα σύνολο καμπυλών όπως φαίνεται στην Εικόνα 8-8

Στην Εικόνα 8-9 παρουσιάζεται μία σύγκριση του ρυθμού χημικής διάβρωσης φερριτικών και οστενιτικών χαλύβων.

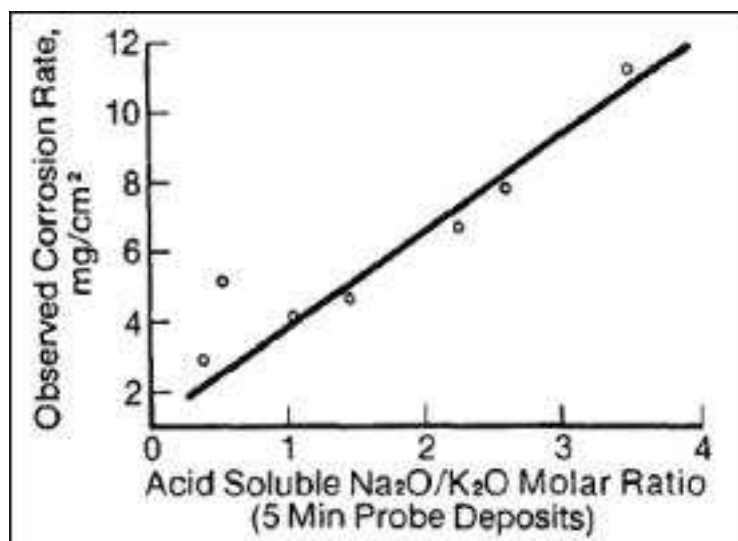


Εικόνα 9-9 : Συσχέτιση μεταξύ ρυθμού χημικής διάβρωσης και θερμοκρασίας μετάλλου φερριτικών και οστενιτικών χαλύβων

9.1.4. Πρόβλεψη χημικής διάβρωσης του άνθρακα

Από μελέτες που έχουν γίνει, έχουν προκύψει συσχετίσεις μεταξύ των συστατικών της τέφρας και της ικανότητάς της να προκαλεί χημική διάβρωση (Borio & Hensel, Coal-Ash Composition as Related to High-Temperature Fireside Corrosion and Sulfur Oxides Emission Control, 1972) (Borio, Control of High-Temperature Metal Wastage in Pulverized Coal-Fired Steam Generators). Τα αλκάλια, οι αλκαλικές γαίες, ο σίδηρος και το θείο είναι τα πιο βασικά στοιχεία σε σχέση με τη χημική διάβρωση που συμβαίνει σε υψηλές θερμοκρασίες. Η συγκέντρωση των απλών μορφών αλκαλίων έχει μεγαλύτερη επίδραση στο σχηματισμό θειικών αλάτων του σιδήρου που είναι υπεύθυνα για τη χημική διάβρωση των μετάλλων K_2SO_4 ή $Na_2Fe(SO_4)_2$. Επειδή τα αλκάλια είναι τα λιγότερα άφθονα από τα τέσσερα συστατικά που αναφέρθηκαν, αποτελούν

συνήθως τους πιο αντιπροσωπευτικού δείκτες χημικής διάβρωσης. Από μελέτες έχει προκύψει η συσχέτιση της χημικής διάβρωσης και της παρουσίας αλκαλίων.



Εικόνα 9-10 : Συσχέτιση χημικής διάβρωσης και ποσοστού αλκαλίων

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι η παρουσία αλκαλικών γαιών έχει σαν αποτέλεσμα την διατήρηση των αλκαλίων ως θειικά άλατα ή ως διπλά άλατα της μορφής $K_2Ca_2(SO_4)_3$ αποτρέποντας το σχηματισμό $K_3Fe(SO_4)_3$.

9.1.5. Λύσεις στο πρόβλημα της χημικής διάβρωσης

Η χημική διάβρωση των υδροτοιχωμάτων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, έως και να εξαλειφθεί εφαρμόζοντας μία ή περισσότερες από τις παρακάτω ενέργειες:

- Βελτίωση συστήματος καύσης
- Καύση άνθρακα με μικρή περιεκτικότητα σε χλώριο (0,2%)
- Χρήση σωλήνων μεγαλύτερου πάχους στην περιοχή όπου παρατηρείται έντονη χημική διάβρωση
- Χρήση υλικών υψηλής αντοχής στην χημική διάβρωση, όπως η διπλή διέλαση για τη κατασκευή σωλήνων και ο γαλβανισμός με χρώμιο

Στη περίπτωση των υπερθέρμων και των αναθέρμων υπάρχουν οι εξής διαθέσιμες ενέργειες:

- Καύση άνθρακα με μικρή περιεκτικότητα σε χλώριο η τεχνητή μείωση αυτού με διάφορες μεθόδους.

- Κατά τη διαχείριση θερμοκρασιακών ανωμαλιών να γίνεται συχνή χρήση των εκκαπνιστών και έλεγχος της καύσης προκειμένου να ελαττώνεται ρυθμός σχηματισμού των επικαθίσεων.
- Χρήση υλικών υψηλής αντοχής στην χημική διάβρωση, όπως η διπλή διέλαση για τη κατασκευή σωλήνων.

Στις υπάρχουσες μονάδες παραγωγής, μία από τις πιο αποτελεσματικές λύσεις σε σχέση με το κόστος, είναι η κατασκευή σωλήνων με διπλή διέλαση. Ο σωλήνας κατασκευάζεται από την διέλαση ενός σύνθετου τεμαχίου το οποίο αποτελείται από δύο κυλίνδρους σε επαφή διαφορετικού υλικού. Εξασφαλίζοντας ότι το κενό ανάμεσα στα δύο υλικά είναι καλά ελεγχόμενο και ότι οι επιφάνειες είναι καθαρές, κατά τη διάρκεια της διέλασης δημιουργείται μεταξύ των δύο υλικών ένας δυνατός μεταλλουργικός δεσμός. Το εσωτερικό μέταλλο επιλέγεται έτσι ώστε να είναι ανθεκτικό και συμβατό με το περιβάλλον του νερού-ατμού και το εξωτερικό μέταλλο επιλέγεται ώστε να αντιστέκεται στην χημική διάβρωση που προκαλεί η τέφρα. Η τεχνική της διπλής διέλασης στην κατασκευή σωλήνων έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για τη κατασκευή των υδροτοιχωμάτων καθώς και για τη κατασκευή των σωλήνων των υπερθέρμων και αναθέρμων (δεκαπλάσια αύξηση ζώης του σωλήνα). Ο πιο συνήθης συνδυασμός είναι:

- Υδροιτοιχώματα: εσωτερικά χαλυβοσίδηρος και εξωτερικά type 310 ή IN671 (50 Cr- 50 Ni)
- Υπερθερμαντές, αναθερμαντές: εσωτερικά Essete 1250 και εξωτερικά type 310

Στο σχεδιασμό νέων μονάδων δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στον σχεδιασμό της εστίας καύσης και του εξοπλισμού προκειμένου να αποφεύγονται αναγωγικές συνθήκες και θερμοκρασιακές ανωμαλίες. Οι μέγιστες θερμοκρασίες σχεδιασμού διατηρούνται όσο το δυνατόν χαμηλότερα στα πλαίσια σχεδιασμού του επιλεγμένου κύκλου νερού - ατμού. Επίσης κατά το σχεδιασμό των σωλήνων λαμβάνονται υπόψη οι επιτρεπτοί ρυθμοί χημικής διάβρωσης. Λέβητες οι οποίοι έχουν σχεδιαστεί με βάση τις παραπάνω προδιαγραφές και για χρόνο λειτουργίας πάνω από 35 χρόνια δεν παρουσίασαν προβλήματα έντονης χημικής διάβρωσης.

Η χημική διάβρωση δεν είναι κοινό χαρακτηριστικό όλων των ανθράκων. Μόνο ένα μικρό ποσοστό των μονάδων που καίνε άνθρακα αντιμετωπίζουν σημαντικά

προβλήματα χημικής διάβρωσης αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Παρόλο που το ποσοστό αυτό είναι μικρό, ο αριθμός των μονάδων που αντιμετωπίζουν προβλήματα χημικής διάβρωσης είναι ουσιαστικός, και το ενδιαφέρον και η προσοχή που δίνεται είναι δικαιολογημένη. Είναι όμως σημαντικό ότι πολλοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας λειτουργούν ουσιαστικά χωρίς φαινόμενα χημικής διάβρωσης ή με αποδεκτούς ρυθμούς.

Για τους άνθρακες που προκαλούν χημική διάβρωση, η θερμοκρασία των μετάλλων όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα, είναι σημαντικός παράγοντας του ρυθμού με τον οποίο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο αυτό. Καθώς οι θερμοκρασίες των μετάλλων πλησιάζουν τους 650 °C. Μία μονάδα που λειτουργεί με θερμοκρασίες ατμού στους 565 °C θα αντιμετωπίσει μεγαλύτερα προβλήματα από ένα σταθμό που λειτουργεί σε θερμοκρασίες ατμού 540 °C εάν ο άνθρακας είναι διαβρωτικός. Στη περίπτωση όμως που οι άνθρακες δεν χαρακτηρίζονται ως διαβρωτικοί, η θερμοκρασία δεν αποτελεί σημαντική μεταβλητή σε σχέση με τη χημική διάβρωση.

9.2. Μηχανική διάβρωση

Η μηχανική διάβρωση μπορεί να διακριθεί ανάλογα με την αιτία που την προκαλεί. Έτσι έως τώρα έχουν αναγνωρισθεί οι εξής περιπτώσεις:

Μηχανική διάβρωση λόγω:

1. εκκαπνισμών
2. ιπτάμενης τέφρας
3. σύγκρουσης άκαυστων σωματιδίων άνθρακα με τις επιφάνειες
4. πτώσης μεγάλων συσσωματώσεων σκωρίας

Ο θάλαμος καύσης και οι τομείς υπερθέρμου και αναθέρμου, στους σύγχρονους σταθμούς παραγωγής ρεύματος με καύση ανθράκων, συνήθως δεν παρουσιάζουν μηχανική διάβρωση λόγω της σύγκρουσης των σωματιδίων της τέφρας που περιέχεται στα καυσαέρια. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην πλαστική συμπεριφορά των δεσμών που συνιστούν την επισκωρίαση οι οποίοι απορροφούν την κινητική ενέργεια των σωματιδίων της τέφρας και εν μέρει την αυτή καθαυτή φύση των σωματιδίων. Στις περιοχές μεταφοράς θερμότητας των υπερθερμαντών και αναθερμαντών, όπου οι επικαθίσεις παύουν να αποτελούν πρόβλημα, η

σκληρότητα των σωματιδίων της τέφρας αυξάνεται καθώς ελαττώνεται η θερμοκρασία με συνέπεια να αυξάνεται η τάση για μηχανική διάβρωση.

Η πλειοψηφία των αστοχιών που οφείλονται σε φαινόμενα χημικής διάβρωσης, εμφανίζονται στις περιοχές του λέβητα όπου η θερμοκρασία είναι κάτω από 800 °C. Σε τέτοιες συνθήκες λειτουργίας, ο ρυθμός μηχανικής διάβρωσης μπορεί να συσχετιστεί με την περιεκτικότητα του άνθρακα σε τέφρα, την τραχύτητα της τέφρας, την ταχύτητα και τη θερμοκρασία των καυσαερίων. Η ταχύτητα των καυσαερίων καθώς αυτά διέρχονται διαμέσου των τμημάτων του υπερθέρμου και αναθέρμου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 15 m/s. Η ταχύτητα των καυσαερίων μπορεί να αυξηθεί όταν δημιουργούνται φράξεις στην διαδρομή τους λόγω των επικαθίσεων τέφρας με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός της μηχανικής διάβρωσης.



Εικόνα 9-11 : Μηχανική διάβρωση σε αυλό



Εικόνα 9-12 : Μηχανική διάβρωση σε αυλό

Ο ρυθμός της μηχανικής διάβρωσης των σωλήνων του λέβητα έχει εκφραστεί από τον Raask:

$$E = \frac{KI_{\alpha}R}{T_g}(A/C)V^n \quad [9-5]$$

Όπου

E = ρυθμός μηχανικής διάβρωσης σε νανόμετρα ανά ώρα (nm/h)

K = σταθερά η οποία εξαρτάται από το υλικό των σωλήνων

I_α = συντελεστής τραχύτητας των σωματιδίων της τέφρας

A/C = αναλογία τέφρας στον άνθρακα

V = ταχύτητα των καυσαερίων

η = δείκτης, λαμβάνεται ίσος με 3.3

T_g = απόλυτη θερμοκρασία καυσαερίων

Όπως προκύπτει από τη παραπάνω εξίσωση, ο πιο σημαντικός παράγοντας της μηχανικής διάβρωσης των σωλήνων, είναι η ταχύτητα των καυσαερίων. Ο συντελεστής τραχύτητας είναι επίσης σημαντικός παράγοντας, οπότε έχει μεγάλη σημασία να λαμβάνεται υπόψη η σύσταση της τέφρας και τα στοιχεία που προκαλούν την τραχύτητα της.

Το αργιλοπυριτικά άλατα συνιστούν το κύριο μέρος της τέφρας η οποία περιέχεται στους περισσότερους άνθρακες. Τα σωματίδια των αργιλοπυριτικών αλάτων, που έχουν μηδενικό συντελεστή τραχύτητας, υαλοποιούνται, συσσωρεύονται, και σφαιροποιούνται κατά την διαδικασία της καύσης σχηματίζοντας ένα υαλώδες υλικό το οποίο έχει αριθμό σκληρότητας Vickers περίπου 600, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τραχύτητά του.

Η μηχανική διάβρωση στα τμήματα διακίνησης του καυσίμου και στους μύλους, πριν την καύση, και το μεγαλύτερο μέρος της μηχανικής διάβρωσης των σωλήνων μετά την καύση οφείλονται στο διοξείδιο του πυριτίου (χαλαζίας) που περιέχονται στην τέφρα.

Ο χαλαζίας είναι ένα από τα πιο σκληρά συστατικά που περιέχονται στην τέφρα και στην πιο καθαρή του μορφή απαιτεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες (>2300 °C) προκειμένου να υαλοποιηθεί και σφαιροποιηθεί. Ωστόσο, στους λέβητες

κονιορτοποιημένου καυσίμου, τα σωματίδια του χαλαζία εκτίθενται σε θερμοκρασίες κατάλληλες για σφαιροποίηση για ελάχιστο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα να μην σφαιροποιούνται πλήρως. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα σωματίδια του χαλαζία να διατηρούνε το ακανόνιστο σχήμα τους συμβάλλοντας σημαντικά στην αύξηση της τραχύτητάς.

Προκειμένου ο ρυθμός απομάκρυνσης υλικού λόγω μηχανικής διάβρωσης να παραμείνει στα πλαίσια που καθορίζονται από τον σχεδιαστή θα πρέπει να εξασφαλίζεται η καθαρότητα των σωλήνων στους υπέρθερμους, στους ανάθερμους και στον οικονομητήρα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση των εκκαπνισμών καθώς και με την διασφάλιση ότι η διέλευση των καυσαερίων δεν φράσσεται, όπως για παράδειγμα από μετατοπισμένους σωλήνες. Το τελευταίο πλέον επιτυγχάνεται μέσω της βελτίωσης των συνδέσμων μεταξύ των σωλήνων.

Τέλος, οι σωλήνες οι οποίοι βρίσκονται κοντά στα ακροφύσια των εκκαπνιστών υπόκεινται έντονη μηχανική διάβρωση. Προκειμένου να μετριάζεται το φαινόμενο στα τμήματα αυτά του λέβητα πρέπει να εφαρμόζονται μέτρα πρόληψης όπως προστατευτικές κατασκευές.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Anderson, D. W., R., V., & Incropera, F. P. (1987). Effective thermal conductivity of coal ash deposit at moderate to high temperatures. (109: 215-221).
2. Barrett, E. P. (1945). The Fusion, Flow, and Clinkering of Coal Ash: A Survey of the Chemical Background. New York: John M. Tiley and Sons and London: Chapman and Hall. Ltd..
3. Baxter, L. L. (2000). Ash deposition formation and deposit properties,, . Sandia National Laboratories.
4. Beckering, W. (1970). Examination of Coal and Coal Ash by X-Ray Techniques. (Technology and Use of Lignite, Proceedings).
5. Bhattacharya, S. P. (2000). A theoretical investigation of the optical constants and particle size on the radiative properties and heat transfer involving clouds and deposits. (39: 471-483).
6. Bhattacharya, S. P. (1999). Apparent emittance of non-isothermal particulate deposits. (26: 771-780).
7. Bhattacharya, S. P., & Wall, T. F. (1999). Development of Emittance of Coal Particles During Devolatilisation and Burnoff. (78: 511-519).
8. Bhattacharya, S. P., Wall, T. F., & Arduini-Schuster, M. (1997). A study on the importance of dependent effects in determining the spectral and total emittance of particulate ash deposits in pulverised fuel fired furnaces. (36: 423-432).
9. Bhattacharya, S. P., Wall, T. F., & Gupta, R. P. (1996). An analysis of the angular scatter measurement to determine the optical constants of coal and ashy materials. (23:809821).
10. Borio, R. W. (n.d.). Control of High-Temperature Metal Wastage in Pulverized Coal-
11. Borio, R. W., & Hensel, R. P. (1972). Coal-Ash Composition as Related to High-Temperature Fireside Corrosion and Sulfur Oxides Emission Control. (94).

12. Brailsford, A. D., & Major, K. G. (1964). The thermal conductivity of aggregates of several phases, including porous materials. (15: 313-319).
13. Bryers, J. R. (1975). The Physical and Chemical Characteristics of Pyrites and Their Influence on Fireside Problems in Steam Generators.
14. Corey, R. W. (1964). Measurement and significance of the flow properties of coal ash slag. Bureau of Mines: Bulletin 618.
15. Estep, T. G., Seltz, H., & Osbor, W. J. (1937). Determination of the Effect of Oxides of Sodium, Calcium and Magnesium on the Ash Fusion Temperatures. Carnegie Institute of Technology, Mining and Metallurgical Advisory Boards, Bulletin 74,.
16. Goetz, G. J., Nsakala, N. Y., & Bono, R. W. (1979). Development of method for determining emissivities and absorptivities of coal ash deposits. (101: 607-614).
17. Hadley, G. R. (1986). Thermal conductivity of packed metal powder. (29: 909-920.).
18. Laubitz, M. J. (1959). Thermal conductivity of powders. 37: 798-808.
19. Leach, A. G. (1993). The thermal conductivity of foams. I: models for heat conduction. (26: 733-739).
20. O'Gorman, J. V., & Walker, P. L. (1971). Mineral Matter Characteristics of Some American Coals. (50).
21. O'Gorman, J. V., & Walker, P. L. (1973). Thermal Behavior of Mineral Fractions Separated from Selected American Coals. (52).
22. Ouchiyama, N., & Tanaka, T. (1981). Porosity of a mass of solid particles having a range of sizes. (20, 66-71).
23. Partington, J. R. (1950). Textbook of Inorganic Chemistry 6th Edition. London: MacMillan Co.
24. Payner, J. E., & Marskell, W. G. (1963). The Distribution of Mineral Matter in Pulverized Fuel and Solid Products of Combustion. London: Proceedings of

the International Conference held at the Marchwood Engineering Laboratories Marchwood.

25. Reid, T. W. (1971). External Corrosion and Deposits-Boilers and Gas Turbines,, New York: Elsevier.
26. Thiessin, G., Ball, G. C., &Grotts, E. P. (1936). Coal Ash and Coal Mineral Matter. Industrial and Engineering Chemistry, 28,335 - 361.
27. Wall, T. F., Bhattacharya, S. P., Zhang, D. K., Gupta, R. P., & He, X. (1993). The properties and thermal effects of ash deposits in coal-fired furnaces. (19: 487-504.).

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

11. ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΟΝΑΔΑΣ IV ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ

Ο ατμοηλεκτρικός σταθμός της Καρδιάς βρίσκεται σε λειτουργία εδώ και τριάντα χρόνια. Ο λιγνίτης της Πτολεμαΐδας που χρησιμοποιείται ως καύσιμο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- χαμηλή θερμογόνο δύναμη
- υψηλό ποσοστό τέφρας και υγρασίας
- υψηλό ποσοστό ασβεστίου

Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν σαν συνέπεια τη δυσχέρεια της λειτουργίας των λεβήτων των μονάδων λόγω των επικαθίσεων στους αυλούς ανόδου και στις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας.

Τα τελευταία χρόνια, πέρα από τις προβλεπόμενες δυσκολίες και προβλήματα στην ομαλή λειτουργία, ένα νέο φαινόμενο επιδείνωσε την λειτουργία του λέβητα στην μονάδα 4. Συγκεκριμένα, πτώσεις στερεού υλικού στον πυθμένα του λέβητα είχαν σαν συνέπεια την συχνή δημιουργία βλαβών και την ξαφνική παύση λειτουργίας της τεφρολεκάνης μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία και την διαθεσιμότητα της μονάδας. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του ρίσκου έκτακτης κράτησης της μονάδας.

Πέρα από τα βασικά προβλήματα αναφέρονται χαρακτηριστικά και οι εξής ανωμαλίες στη λειτουργία:

- Η έντονη ρύπανση του λέβητα έχει ως συνέπεια την αδυναμία των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας να απορροφήσουν τη θερμότητα των καυσαερίων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο του λέβητα, την αύξηση των ψεκασμών καθώς και τη συχνότερη χρήση εκκαπνισμών.
- Ο Υπέρθερμος SH1b λόγω της ρύπανσής του, απαιτεί συχνή χρήση εκκαπνισμών καθώς και κράτηση της μονάδας στο μεσοδιάστημα μεταξύ των προγραμματισμένων ημερομηνιών συντήρησης λόγω διαρροών και προκειμένου να απομακρυνθούν οι επικαθίσεις.

Μετά την ολοκλήρωση της τελευταίας συντήρησης, η τεφρολεκάνη παρουσίασε σοβαρές ζημιές, προκαλώντας λειτουργικές ανωμαλίες δημιουργώντας έτσι την

ανάγκη για άμεση αντικατάστασή της. Η συχνότητα βλαβών ελαττώθηκε μετά την προσθήκη κάθετων μεταλλικών πλακών για την ενίσχυση του σώματος της τεφρολεκάνης.

Η μονάδα 4 έχει τροποποιηθεί ώστε να αυξηθεί η ατμοπαραγωγή και σε συνδυασμό με την ανακατασκευή της τουρμπίνας έχει τη δυνατότητα απόδοσης 330 MW σε πλήρες φορτίο. Συγκεκριμένα για τη συνεχή ατμοπαραγωγή 950 t/h απαιτήθηκε αύξηση της εισερχόμενης θερμότητας στο θάλαμο καύσης. Αυτό πραγματοποιήθηκε με αύξηση της δυναμικότητας των μύλων αυξάνοντας την ταχύτητα στους άξονες από 450 rpm σε 485 - 490 rpm.

Προκειμένου να κατανοηθεί το φαινόμενο του σχηματισμού των επικαθίσεων μελετήθηκε το σύστημα των μύλων, οι καυστήρες και η διεργασία της καύσης.

Μετά από την αρχική εξέταση προέκυψε πως η πιο πιθανή αιτία της έντονης ρύπανσης είναι η γενικευμένη και η τοπική αλλοίωση των συστημάτων καύσης. Προκειμένου να καθοριστούν οι διορθωτικές ενέργειες για τη λύση του προβλήματος, καταρτίστηκε ένα λεπτομερές πρόγραμμα μελέτης της κατάστασης λειτουργίας το οποίο αποτελείται από πέντε διαδοχικά τμήματα:

1. Παρατήρηση λειτουργίας, επιθεώρηση λέβητα, συλλογή δεδομένων από το αρχείο. Προκαταρκτική μελέτη του συστήματος καύσης και του λέβητα.

Αυτή η ομάδα ενεργειών συμπεριλαμβάνει:

- Συλλογή δεδομένων για το λέβητα από τα όργανα του Control και από άλλες πηγές.
 - Επιθεώρηση λέβητα (κατάσταση dumper, αγωγών κονιορτοποιημένου λιγνίτη)
 - Μέτρηση θερμοκρασίας των καυσαερίων και θερμικής ακτινοβολίας (μέσα από τα υπάρχοντα ανοίγματα) στο μέσο των τοιχωμάτων του λέβητα (20,5 και 25 μέτρα ύψος)
 - Εντοπισμό μύλων με την μεγαλύτερη αλλοίωση στη λειτουργία προκειμένου να μελετηθούν εκτενέστερα στη συνέχεια.
2. Εγκατάσταση αυτοματοποιημένου συστήματος καταγραφής πρόσκρουσης των επικαθίσεων κατά τη λειτουργία της μονάδας και συσχέτιση του φαινομένου με τις συνθήκες λειτουργίας του λέβητα.

Η δεύτερη ομάδα ενεργειών συμπεριλαμβάνει εγκατάσταση αυτόματων συστημάτων καταγραφής (Automatic Acquisition Systems) συγκρούσεων με στόχο την εξασφάλιση ακριβέστερων περιγραφών για το φαινόμενο.

3. Καταγραφή δεδομένων σχετικά με την λειτουργία των μύλων, τη κατανομή του κονιορτοποιημένου λιγνίτη και του αέρα μέσα στο σύστημα των μύλων.

Αυτή η ομάδα ενεργειών συμπεριλαμβάνει:

- Καθορισμό της σχέσης μεταξύ ποσοστού λιγνίτη στον τροφοδότη (%) και της παροχής του (t/h), για διάφορα πάχη στρώματος του λιγνίτη, και πραγματικής παροχής για όλους τους τροφοδότες.
 - Προσδιορισμός λειτουργίας 3 επιλεγμένων μύλων. Προσδιορισμός ταχύτητας και εύρους θερμοκρασιών στους ταινιόδρομους του κονιορτοποιημένου λιγνίτη, προσδιορισμός σύστασης των αερίων που μεταφέρονται μαζί με τον λιγνίτη, κατανομή των αερίων και του κονιορτοποιημένου λιγνίτη στους διάφορους καυστήρες, προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του κονιορτοποιημένου λιγνίτη, προσδιορισμός της επίδρασης της θέσης των dumpregδιαχωρισμού στην απόδοση των μύλων, και προσδιορισμός του παρασιτικού αέρα.
 - Απλοποιημένος προσδιορισμός της λειτουργίας των υπόλοιπων μύλων. Από τις μετρήσεις αυτές θα προκύψουν σημαντικά στοιχεία για τη σύγκριση με αυτά που θα προκύψουν από τις ακριβείς μετρήσεις και για την εκτίμηση της ορθής λειτουργίας του συστήματος καύσης.
 - Για τον μύλο M41 θα γίνει προσδιορισμός με μέτρηση, της κατανομής της ροής του δευτερεύοντος αέρα στους καυστήρες και σε όλους τους αγωγούς αέρα.
4. Θερμική μελέτη για πλήρη χαρακτηρισμό του λέβητα:
 - Μετρήσεις σχετικές με την κατάσταση του λέβητα
 - Καθορισμός συνολικής ροής μάζας αέρα
 - Απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμού απόδοσης του λέβητα
 5. Οπτική επιθεώρηση στο εσωτερικό του λέβητα.

11.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης των θερμικών διεργασιών που προέκυψαν από τις ομάδες εργασιών.

Μύλοι και Σύστημα Καύσης

Οι μύλοι εξετάστηκαν σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο μελετήθηκε λεπτομερώς η λειτουργία των τριών μύλων που επιλέχθηκαν κατά την προκαταρκτική μελέτη και στο δεύτερο στάδιο προσδιορίστηκε η λειτουργία των υπόλοιπων μύλων κατά τη διάρκεια της αξιολόγησης της κατάστασης του λέβητα.

Προκειμένου να γίνει καλύτερη κατανόηση της μελέτης των μύλων, όλα τα αποτελέσματα από την προκαταρκτική και την τελική αξιολόγηση της κατάστασης του λέβητα παρουσιάζονται και αξιολογούνται ξεχωριστά. Κατ' αυτή τη προσέγγιση, η κατανόηση των αποτελεσμάτων γίνεται με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο.

Κύριοι Παράμετροι Ελέγχου Συστήματος Μύλων και Καύσης

Το πρώτο στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης έχει ως στόχο τον προσδιορισμό των λειτουργικών παραμέτρων των μύλων οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα τη λειτουργία του συστήματος καύσης. Η ακολουθία ελέγχων των μύλων έχει ως εξής:

1. Μύλος M41, πλήρης έλεγχος λειτουργίας καθώς και μέτρηση παροχής θερμού ρεύματος αέρα προς τους καυστήρες.
2. Μύλοι M42 και M44, πλήρης έλεγχος λειτουργίας χωρίς μέτρηση παροχής θερμού ρεύματος αέρα.

Παράλληλα με τις παραπάνω ενέργειες εξετάστηκε και η κατάσταση του λιγνίτη σε ακατέργαστη μορφή καθώς και κονιορτοποιημένος.

Η μελέτη των μύλων περιλαμβάνει τις εξής παραμέτρους:

- Προσδιορισμός δυναμικού μύλων με δύο μεθόδους (τροφοδότες ακατέργαστου λιγνίτη και συλλέκτες κονιορτοποιημένου λιγνίτη)
- Ροή αερίων διαμέσου των μύλων
- Θερμοκρασία μίγματος αερίων-λιγνίτη στην έξοδο των μύλων
- Συγκέντρωση κονιορτοποιημένου λιγνίτη στη ροή των αερίων στην έξοδο των μύλων

- Κατανομή θερμού αέρα και κονιορτοποιημένου λιγνίτη ανά αγωγό στην έξοδο των μύλων
- Ταχύτητα αερίων και κονιορτοποιημένου λιγνίτη ανά αγωγό στην έξοδο των μύλων
- Προσδιορισμός μεγέθους κονιορτοποίησης ακατέργαστου λιγνίτη (δείγμα παρμένο από τους τροφοδότες των υπό μελέτη μύλων)

Στο πλαίσιο της μελέτης της λειτουργίας των τροφοδοτών λιγνίτη και των χαρακτηριστικών του λιγνίτη έγιναν οι εξής ενέργειες:

- Σε κάθε τροφοδότη μετρήθηκε το πάχος του στρώματος λιγνίτη
- Προσδιορίστηκε η συσχέτιση μεταξύ πραγματικής δυναμικότητας τροφοδότη και καταγραφόμενης ταχύτητας στο Control
- Έγινε έλεγχος Κοκκομετρίας σε τυποποιημένα κόσκινα (40, 20, 10 και 5 mm τετραγωνικό άνοιγμα) και προσδιορισμός δείκτη Hardgrove.

Η μελέτη των μύλων έγινε σε δύο διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας οι οποίες προσδιορίζονται ως εξής:

- **Κατάσταση Λειτουργίας 1:** 7 μύλοι σε λειτουργία σε πλήρες (100 %) φορτίο μονάδας με μέση ποιότητα λιγνίτη (περίπου 5650 kJ/kg)
- **Κατάσταση Λειτουργίας 2 & 3:** 7 μύλοι σε λειτουργία σε πλήρες (100 %) φορτίο μονάδας με μέση ποιότητα λιγνίτη μετά από ρυθμίσεις στο σύστημα καύσης όπως αυτές προσδιορίστηκαν μετά από την ολοκλήρωση των τριών ομάδων ενεργειών και των μετρήσεων.

Και οι δύο καταστάσεις λειτουργίας εκτελέστηκαν σε σταθερές συνθήκες λειτουργίας. Ο λιγνίτης που χρησιμοποιήθηκε για τους ελέγχους είναι προσδιορισμένος εξ' αρχής με παραπλήσια χαρακτηριστικά ανά κατάσταση λειτουργίας.

11.1.1. Αποτελέσματα Μελέτης Συστήματος Μύλων

Προκειμένου να προκύψουν ακριβείς μετρήσεις για τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, τοποθετήθηκαν μετρητικά όργανα σε συγκεκριμένα σημεία των μύλων όπως αυτά παρουσιάζονται στις Εικόνες 2 και 3.

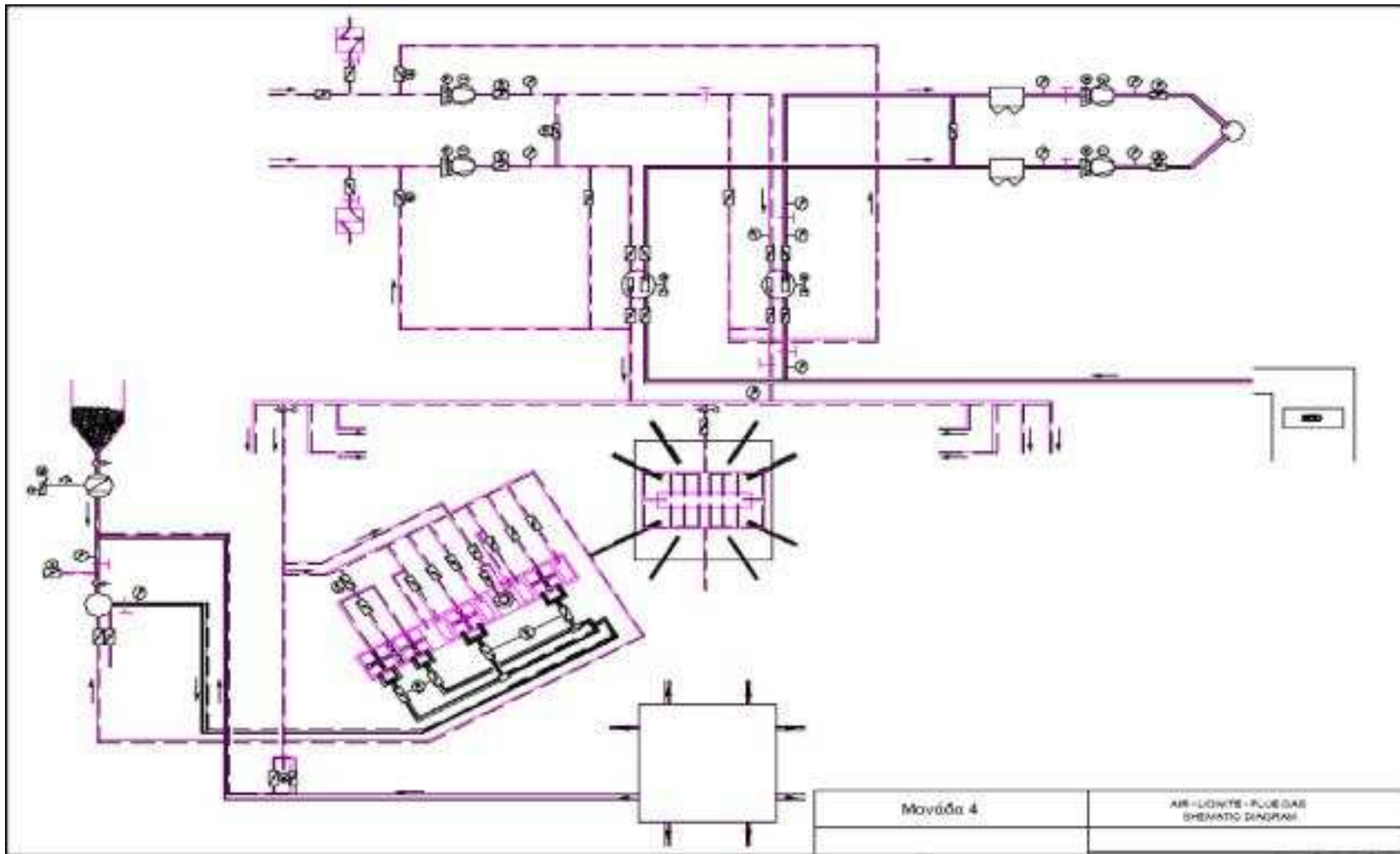
Κάθε μύλος ελέγχθηκε σε δύο ή τρεις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Ο πρώτος έλεγχος έγινε σε κατάσταση λειτουργίας «ως έχει»: θέση dumpregδιαχωρισμού, κατανομή κονιορτοποιημένου λιγνίτη και αέρα, θερμοκρασία μίγματος αερίων - κονιορτοποιημένου λιγνίτη, πάχος στρώματος λιγνίτη ώρες λειτουργίας.

Η δεύτερη και τρίτη κατάσταση λειτουργίας προσδιορίστηκε βάσει των αποτελεσμάτων της προκαταρκτικής εξέτασης λειτουργίας των μύλων και του λέβητα. Συγκεκριμένα οι μύλοι M41 και M42 ελέγχθηκαν σε δύο καταστάσεις λειτουργίας ενώ ο μύλος M44 σε μία κατάσταση λειτουργίας.

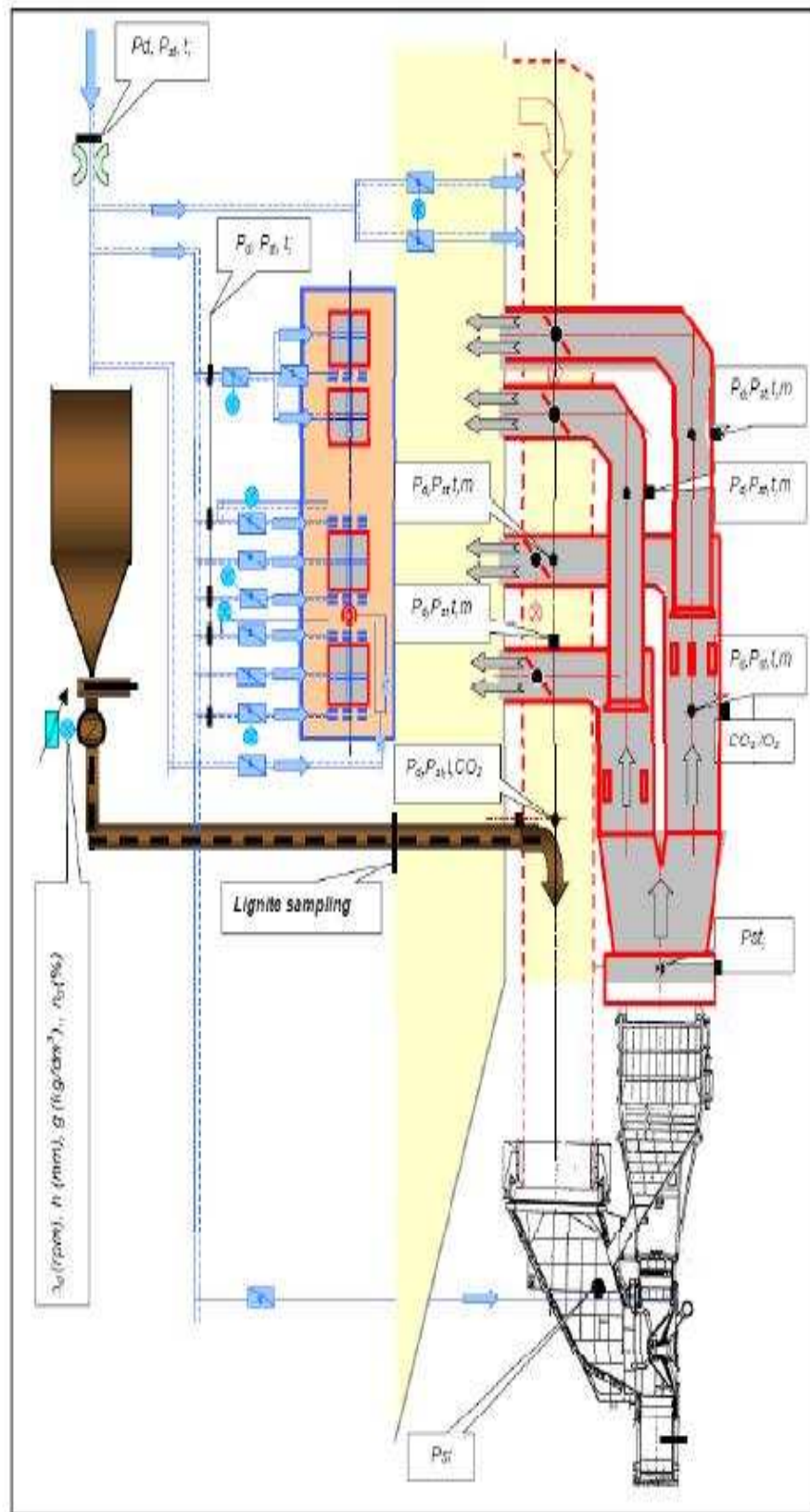
Πίνακας 11-1 : Αποτελέσματα μετρήσεων για το σύστημα των Μύλων

TAB-3.1.2.-1 MILLING SYSTEM TEST RESULTS (13-15.09.04.)													
	Classifier dampers position	Motor load	Gas- air mixture		flow (Ventilation)		(m3/ti)	Milling Capacity		from p.c.	izo-kynetic	sampl. (Eh)	Milling capac. (Hi)
		(A)	p.c.duct-1	p.c.duct-2	Vapor-1	Vapor-2	Mill	p.c.duct-1	p.c.duct-2	Vapor-1	Vapor-2	Mill-pulv.	fr.feeder capac.
Mlin41R1	277.5	90.00	50774	36427	41154	41079	169434	25,3	35.0	7.7	5,5	74	83,3
Mlin41R2	0/4	77.00	40209	27753	37076	35507	140545	29,2	32.2	5.3	5,7	73	71,7
Mlin42R1	4.5/5.5	97.00	37014	44552	42088	48300	172534	45,6	16.1	9.4	8,6	00	90,3
Mlin42R2	0/0	96,00	38333	50385	41059	54393	184170	39,8	13,2	6,2	10,0	69	88,5
Mlin44R1	1.0/5	83.00	42774	40681	53714	45906	183156	25,4	19.3	2.9	5,1	53	62,5
Concentration (kgim3)					Velocity of gas- air mixture (m/s)				Gas - air mill exit temperature by ducts (°C)				
p.c.duct-1	p.c.duct-2	Vapor-1	Vapor-2	Mill	p.c.duct-1	p.c.duct-2	Vapor-1	Vapor-2	p.c.duct-1	p.c.duct-2	Vapor-1	Vapor-2	Mill
0,52	0,97	0,17	0,12	0,67	23,42	16,64	19,34	19,34	162,00	158,00	172,00	172.	166,08
0.79	1,18	0.14	0.13	0.37	13,45	12.73	16,59	16,04	160, 00	160.00	150,00	154	156,60
1.28	0.35	0,16	0.15	0.35	17,10	21,10	19,61	23,04	163.33	174,00	168,00	173	169,58
1,08	0,26	0,13	0.16	0.71	13,31	23. 00	19,13	25,43	178.00	158,00	168,00	169	168,25
0.73	0,47	0,05	0.03	0.54	21,40	20.24	25,03	21,51	166,00	198,00	168,00	169	183,25

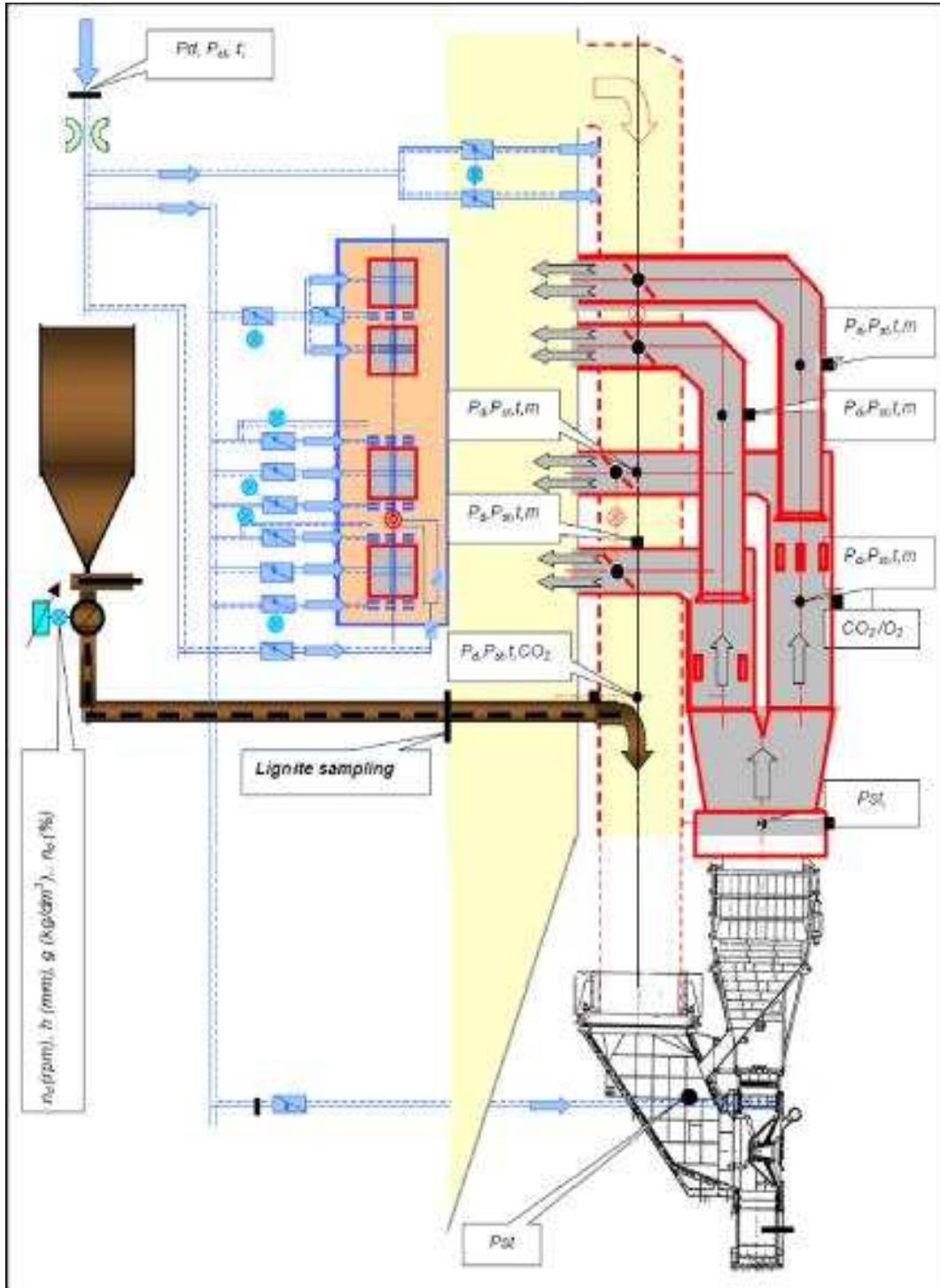
	Lower Heating Value	Rec-gas	Remaining moisture if pul. lignite			(%>	Operating	Remaining on sieve 1mm (R1000)					
	kJ/kg	°C	p.c.duct-1	p.c.duct-2	Vapor-1	Vapor-2	hours	p.c.duct-1	p.c.duct-2	Vapor-1	Vapor-2	Branche-2	Mill
Mlin41R1	1251	956.00	10,8	10.2	15.1	13.4	4375.0	0,19	0.26	0.37	0.08	0.15	0.23
Mlin41R2	1224	965.00	12,3	11,3	14.7	14,9	4385.0	0,12	0.23	0.35	0,30	0,06	0,23
Mlin42R1	1306	945,00	11,3	0,3	13,1	13,1	0406,0	0,13	0,23	0.20	0,36	0,20	0,18
Mlin42R2	1124	945,00	12,0	9.9	11,3	11,7	0406,0	0,12	0,55	0.16	0.00	0.09	0.19
Mlin44R1	1300	945,00	9.8	10.2	9,1	12.6	2363,0	1.17	0,96	0.30	0.10	0.00	0.64
		Mills tightness					Head	Remaining on sieve 0,090 mm (*90)					
	Date	λ' - before	λ'' - after	V-air intrusion (m3<h)			MmWG	p.c.duct-1	p.c.duct-2	Vapor-1	Vapor-2	Branche-2	Mill
Mlin41R1	14.09.04.	2,21	2,63	15830				34,25	48.02	17,03	12,01	37,89	37,31
Mlin41R2	14.09.04.	2,21	2.59	11404				46.57	44.64	26.12	13,51	35,53	41,53
Mlin42R1	15.09.04.	2,44	2,80	10225			100	37,30	45,48	20,94	11,49	33,78	34,24
Mlin42R2	15.09.04.	2,63	3.13	13270			115	39,19	47.30	16.40	9,62	32,42	34,46
Mlin44R1	13.09.04.	2,71	3.23	13134				38,06	32.17	12.70	9.40		31,73



Εικόνα 11-1 : Κύκλωμα Αέρα - Λιγνίτη - Καυσαερίων



Εικόνα 11-2 : Μετρήσεις και δειγματοληψία για το Μύλο M41



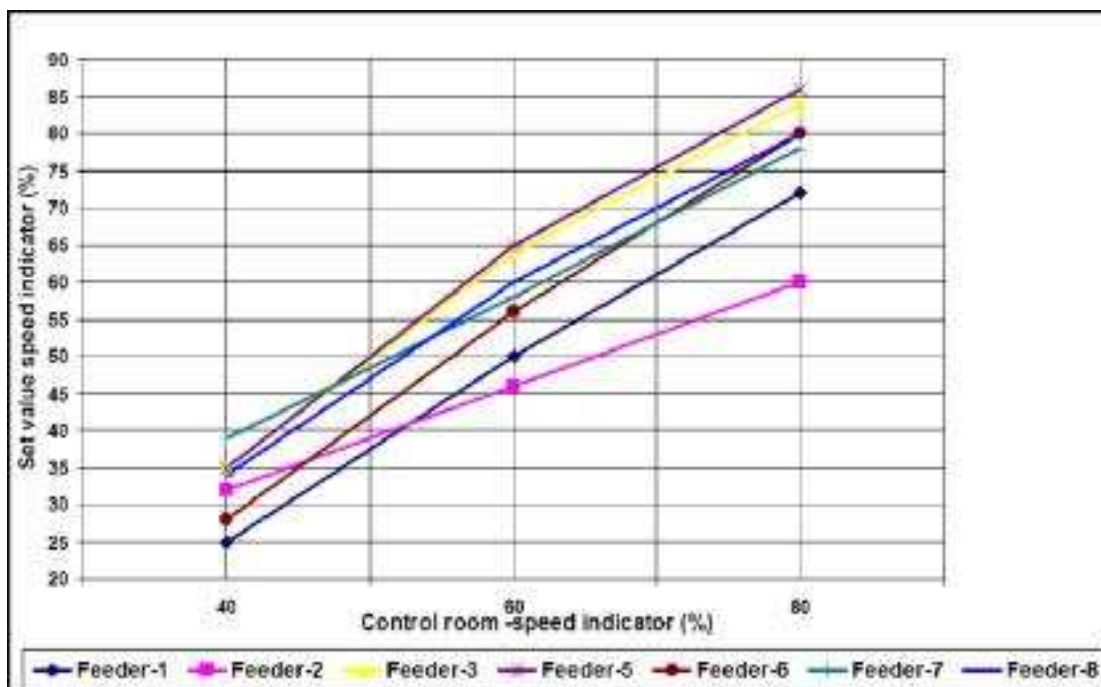
Εικόνα 11-3 : Μετρήσεις και δειγματοληψία για τους Μύλους M42 και M44

Οι συνθήκες λειτουργίας και τα αποτελέσματα των ελέγχων για τους τρεις μύλους παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-1.

Προκειμένου να δημιουργηθεί μία πλήρης εικόνα της διεργασίας, παράλληλα με τις παραπάνω μετρήσεις και ελέγχους, έγινε και συλλογή των ενδείξεων των καταγραφικών του Control των παραμέτρων των βασικότερων διεργασιών. Αυτές οι παράμετροι λειτουργίας της μονάδας και του λέβητα καταγράφονται σε ειδικά διαμορφωμένους πίνακες.

11.1.2. Χαρακτηριστικά Τροφοδοτών Λιγνίτη

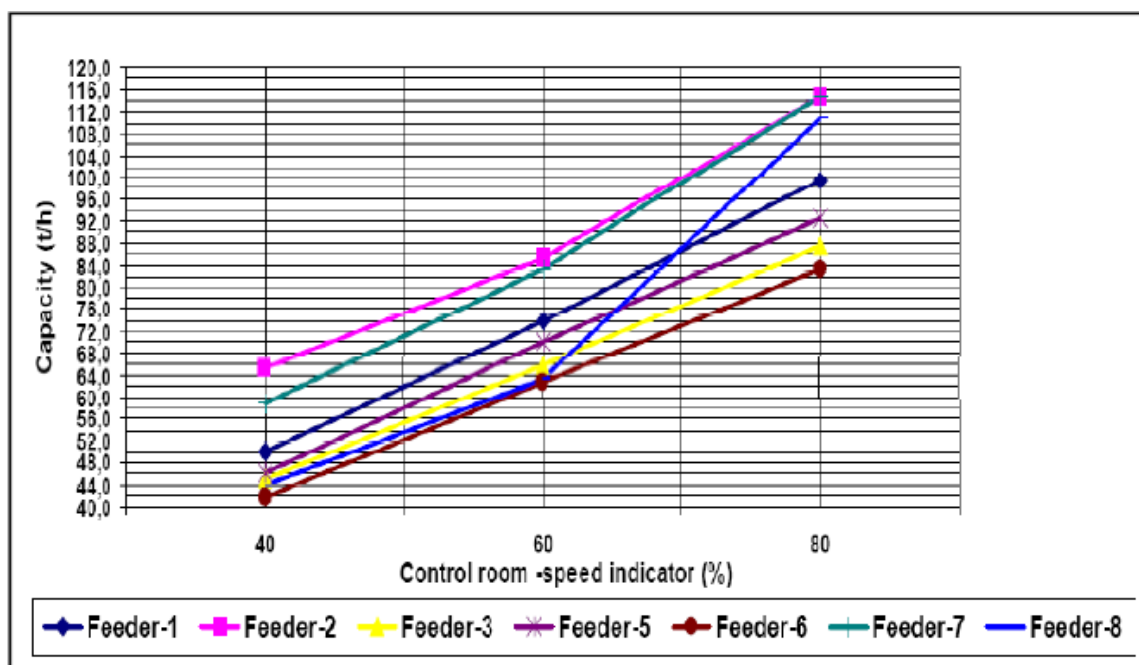
Κατά τη μελέτη λειτουργίας των τροφοδοτών λιγνίτη προσδιορίστηκαν τα διαγράμματα λειτουργίας τους 1 και 2 (% τροφοδοσία - παροχή t/h). Επίσης προσδιορίστηκε το ειδικό βάρος (πυκνότητα) του στρώματος λιγνίτη (γ - Kg/dm³) στο εσωτερικό των τροφοδοτών. Η τιμή του ειδικού βάρους υπολογίστηκε κατά μέσο όρο στο 0.70 kg/dm³. Η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της δυναμικότητας (παροχή) των μύλων μέσω των χαρακτηριστικών λειτουργίας των τροφοδοτών.



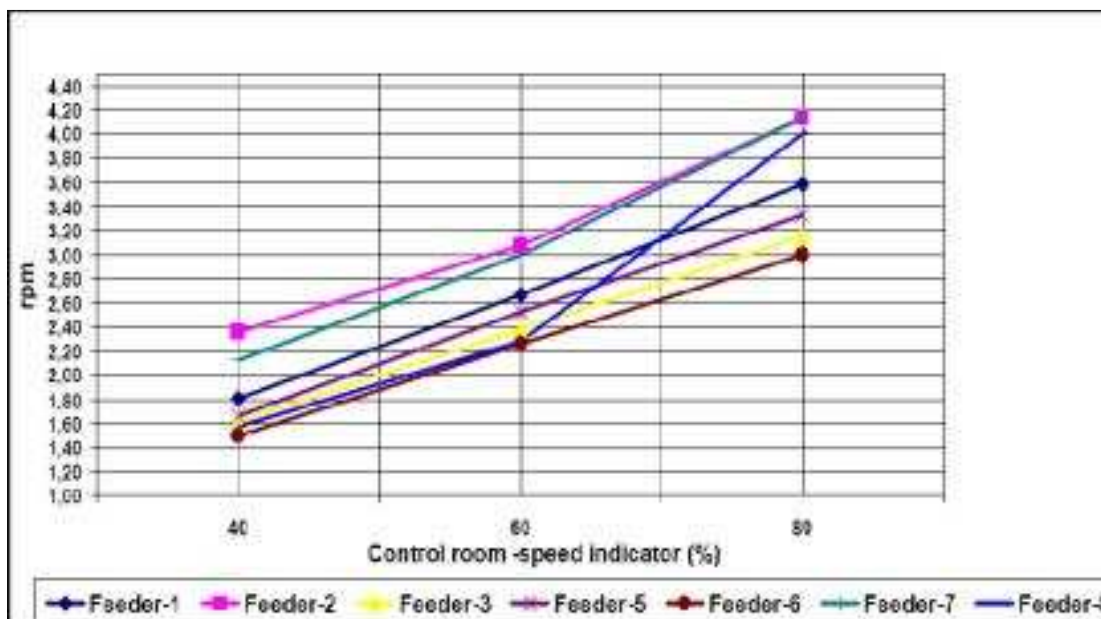
Διάγραμμα 11-1 : Λειτουργία τροφοδοτών (% τροφοδοσία - παροχή t/h)

Από το Διάγραμμα 9-1 παρατηρείται η διαφοροποίηση μεταξύ μετρούμενων και τυπικών ταχυτήτων των τροφοδοτών σε όλο το εύρος λειτουργίας. Καθώς η ταχύτητα μεταφοράς αυξάνεται, η διαφοροποίηση σε κάθε περίπτωση βρέθηκε να είναι επίσης αυξανόμενη. Όπως ήταν αναμενόμενο, αυτή η ιδιαιτερότητα στη λειτουργία ισχύει και στη σχέση μεταξύ της παροχής του τροφοδότη και της τυπικής ταχύτητας.

Στο Διάγραμμα 9-2 απεικονίζεται η διαφορά μεταξύ των χαρακτηριστικών λειτουργίας των τροφοδοτών λιγνίτη (% - t/h). Οι διαφοροποιήσεις που εντοπίστηκαν είναι κυρίως αποτέλεσμα των διαφορετικών παχών του στρώματος λιγνίτη μεταξύ των τροφοδοτών.



Διάγραμμα 11-2 : Λειτουργία τροφοδοτών (πάχος στρώματος λιγνίτη 360 mm)



Διάγραμμα 11-3 : Λειτουργία τροφοδοτών (ταχύτητες)

Οι διαφορές που εντοπίζονται στα χαρακτηριστικά λειτουργίας των τροφοδοτών έχουν ως συνέπεια τη δυσχέρεια της λειτουργίας των μύλων και του λέβητα. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι οι εξής:

Η απαίτηση για βέλτιστη λειτουργία των μύλων δεν μπορεί να εκπληρωθεί

Παρόλο που το σύστημα ελέγχου όλων των μύλων είναι πανομοιότυπο, δεν υπάρχει η αντίστοιχη ανταπόκριση

Υπάρχει διαφοροποίηση της λειτουργίας όπως αυτή δίνεται από το Control με την πραγματική λειτουργία

Προκειμένου να εξαλειφθούν αυτά τα προβλήματα στη λειτουργία των μύλων πρέπει να επιτευχθεί σταθερό πάχος του στρώματος του λιγνίτη και για τους οχτώ μύλους. Πρέπει να προσδιοριστεί η βέλτιστη τιμή για το πάχος του στρώματος. Από τις μετρήσεις που έγιναν προκύπτει πως η βέλτιστη τιμή είναι περίπου 0.3 m.

11.1.3. Παροχή Μύλων

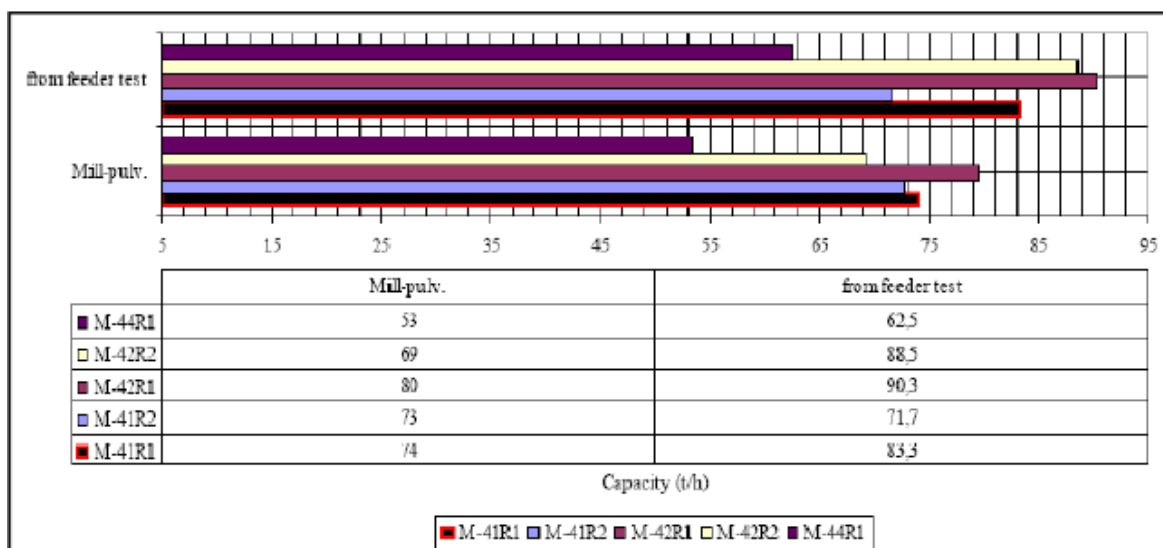
Κατά τη μελέτη της λειτουργίας των μύλων έγινε έλεγχος της επιρροής της θέσης των λεπίδων των dumperδιαχωρισμού στην απόδοση της λειτουργίας των μύλων και στα χαρακτηριστικά του κονιορτοποιημένου λιγνίτη. Κατά τη διάρκεια των

μετρήσεων η θέση των dumpers αέρα διατηρήθηκε σταθερή. Η παροχή των μύλων προσδιορίστηκε με δύο διαφορετικές μεθόδους.:

- Προσδιορισμός της παροχής των μύλων από τη ροή του ακατέργαστου λιγνίτη στους τροφοδότες (t/h)
- Προσδιορισμός της παροχής των μύλων από την ποσότητα κονιορτοποιημένου λιγνίτη όπως αυτός εισάγεται στους αγωγούς κονιορτοποιημένου λιγνίτη

Η μεθοδολογία προσδιορισμού των παραπάνω χαρακτηριστικών βασίζεται στα πρότυπα ελέγχου λειτουργίας μύλων λιγνίτη όπως αυτή εφαρμόζεται σε τέτοιες περιπτώσεις.

Η παροχή των μύλων, όπως αυτή προέκυψε από τις παραπάνω μετρήσεις, κυμαίνεται μεταξύ 62.5 t/h (M44K1) και 90.3 t/h (M42R1), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 9-1 και στο Διάγραμμα 9-4.



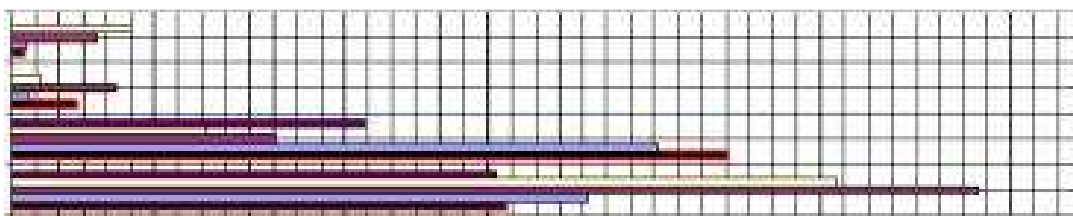
Διάγραμμα 11-4 : Μετρήσεις παροχής Μύλων

Η παροχή των μύλων, όπως αυτή προσδιορίστηκε από τα δεδομένα των τροφοδοτών λιγνίτη και από τις μετρήσεις παροχής κονιορτοποιημένου λιγνίτη στους αγωγούς κονιορτοποιημένου λιγνίτη είναι η ίδια. Βάσει της μεθοδολογίας που ακολουθείται, εφόσον η σύγκριση των δύο μεθοδολογιών εισάγει απόκλιση μικρότερη του 15 %, τα αποτελέσματα θεωρούνται έγκυρα και αξιοποιήσιμα για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων των ελέγχων που θα γίνουν στη συνέχεια. Μόνο στην

περίπτωση του μύλου M42, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα, παρατηρήθηκε μεγαλύτερη απόκλιση.

Στο Διάγραμμα 9-5 παρουσιάζεται η κατανομή του κονιορτοποιημένου λιγνίτη μεταξύ των καυστήρων για τους μύλους M41, M42 και M44. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των ελέγχων που έγιναν συμπεραίνονται τα εξής:

- Η θέση των dumpregδιαχωρισμού δεν επηρεάζει την κατανομή του κονιορτοποιημένου λιγνίτη μεταξύ των καυστήρων
- Η κατανομή κονιορτοποιημένου λιγνίτη μεταξύ των καυστήρων θεωρείται κατάλληλη βάσει των απαιτήσεων σχεδιασμού.



	Vapor-2 Vapor-1 p.c. duct-2 p.c. duct-1			
	p.c. duct-1	p.c. duct-2	Vapor-1	Vapor-2
■ M-44R1	25,4	19,8	2,9	5.1
□ M-42R2	39,8	13,2	6,2	10,0
■ M-42R1	45,6	16,1	9,4	8.6
M-41R2	29,2	32,2	5,8	5.7
■ M-41R1	25,8	35,0	7,7	5.5

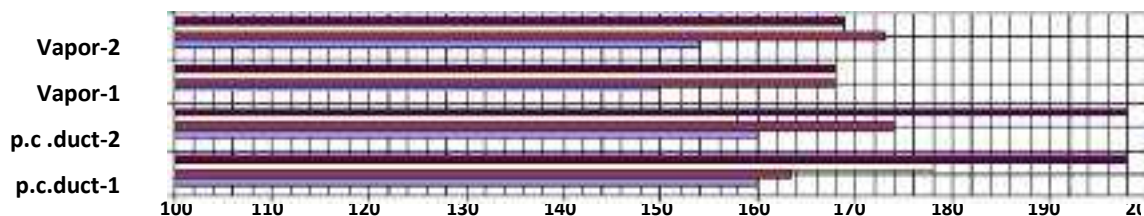
Capacity (r/h)

■ M-41R1 M-41R2 ■ M-42R1 □ M-42R2 ■ M-44R1

Διάγραμμα 11-5 : Κατανομή κονιορτοποιημένου λιγνίτη στους καυστήρες

11.1.4. Θερμοκρασία αερίων στην έξοδο των μύλων

Η θερμοκρασία των αερίων στην έξοδο των μύλων για κάθε αγωγό κονιορτοποιημένου λιγνίτη παρουσιάζεται στον Πίνακα 9-1 και στο Διάγραμμα 9-6.

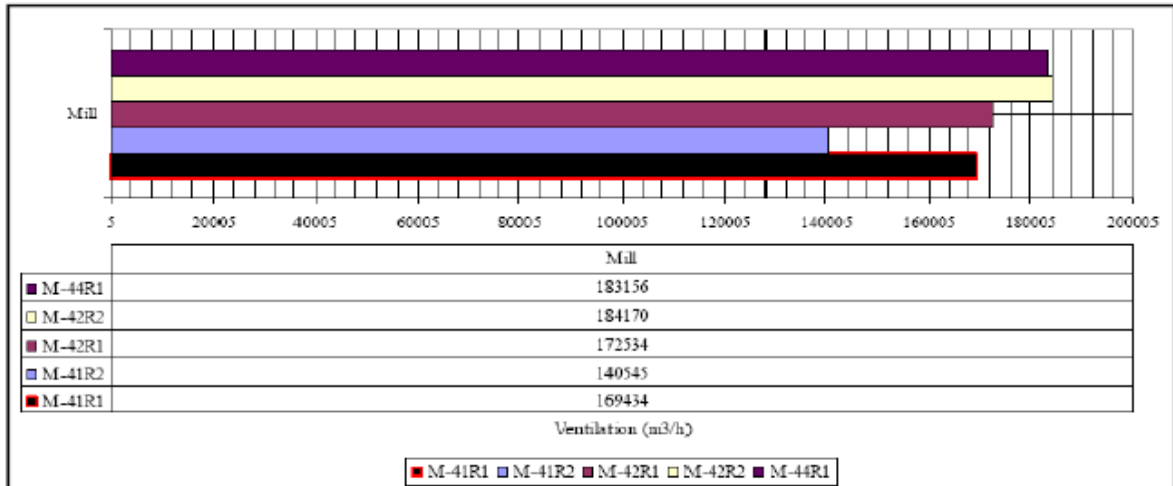


	p.c-duct-1	p.c.duct-2	Vapor-1	Vapor-2
■ M-44R1	198.00	198,00	168.00	169
□ M-42R2	178,00	158,00	168,00	169
■ M-42R1	163,33	174,00	168,00	173
□ M-41R2	160.00	160,00	150,00	154
■ M-41R1	0	0	0,0	ο

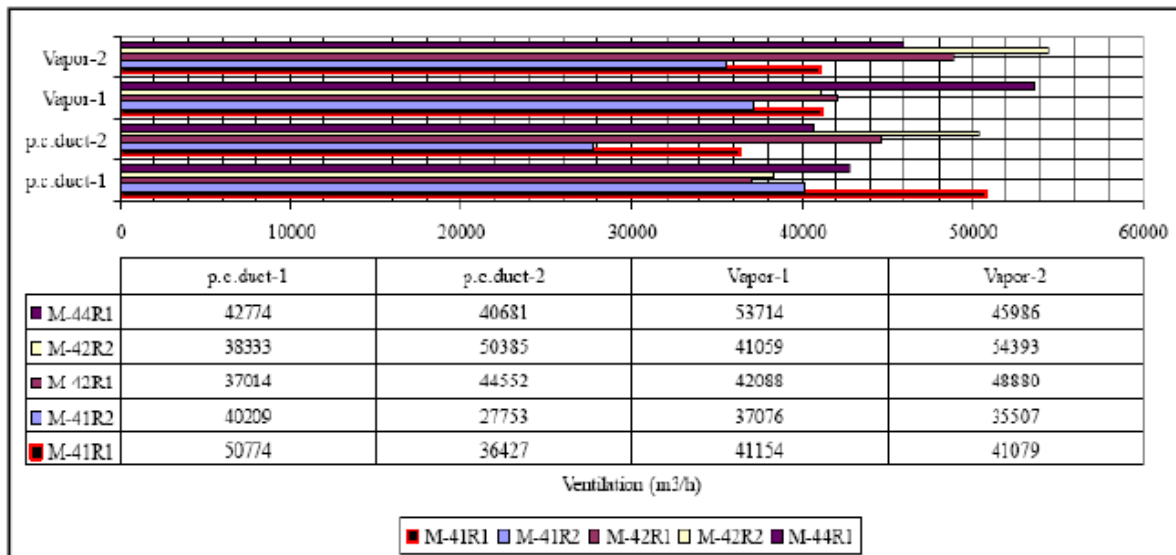
Διάγραμμα 11-6 : Θερμοκρασίες αερίων στην έξοδο των Μύλων

11.1.5. Ροή αερίων διαμέσου των μύλων

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν σχετικά με τη ροή του αέρα και των αερίων διαμέσου των μύλων παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-1 και στο Διάγραμμα 9-7.



Διάγραμμα 11-7 : Ροή μίγματος αερίων – αέρα στους αγωγούς των Μύλων



Διάγραμμα 11-8 : Συγκριτικά αποτελέσματα ροής μίγματος αερίων – αέρα στους αγωγούς των Μύλων

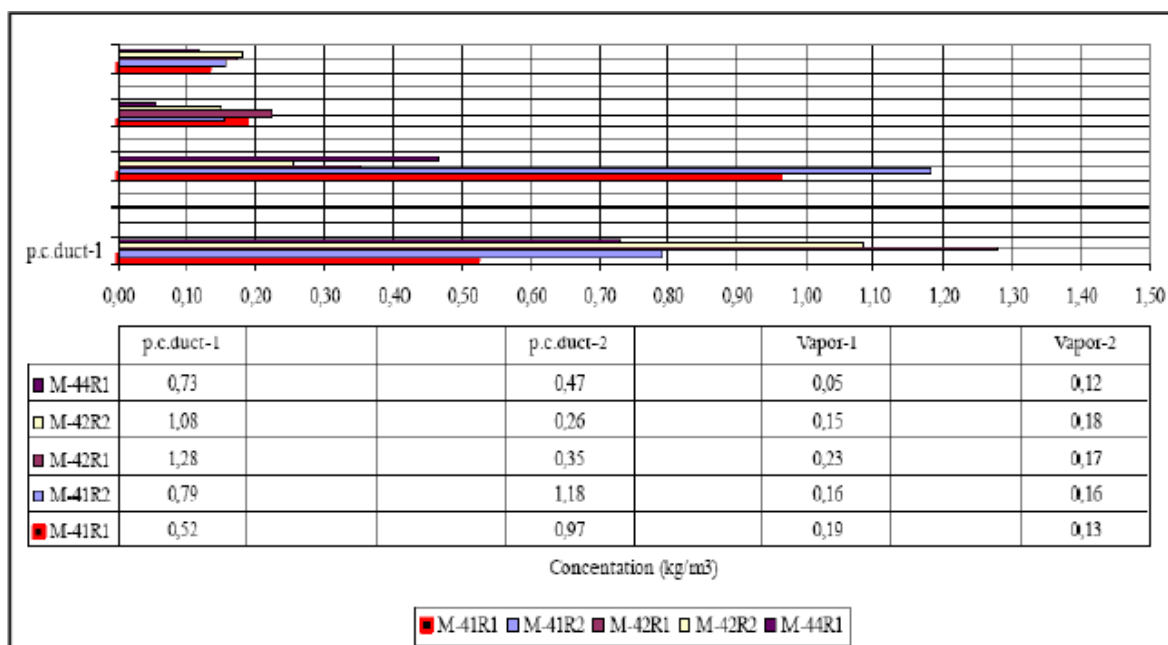
Η συνολική παροχή αερίων κυμαίνεται μεταξύ 169,400 m³/h(Μύλος M41R1) και m³/h(Μύλος M42R2). Στο Διάγραμμα 9-8 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τη ροή αέρα - αερίων στους αγωγούς των μύλων για όλους τους μύλους στους οποίους διενεργήθηκαν οι έλεγχοι. Από τις μετρήσεις σχετικά με τη ροή μίγματος αερίων - αέρα συμπεραίνονται τα εξής:

- Οι παροχές αερίων είναι ικανοποιητικές σε σχέση με τις παροχές των μύλων όπως αυτές προέκυψαν από τους ελέγχους
- Η κατανομή του μίγματος αέρα - αερίων στους καυστήρες είναι ομοιόμορφη.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι η κατανομή του αέρα εξαρτάται από τη διάταξη των καυστήρων, τη γεωμετρία τους, την πτώση πίεσης στους αγωγούς, τη θέση των εσωτερικών πτερυγίων των διαχωριστών των αερίων.

11.1.6. Συγκέντρωση κονιορτοποιημένου λιγνίτη στη ροή των αερίων

Η συγκέντρωση του κονιορτοποιημένου λιγνίτη στη ροή των αερίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 9-1 και στο Διάγραμμα 9-9.



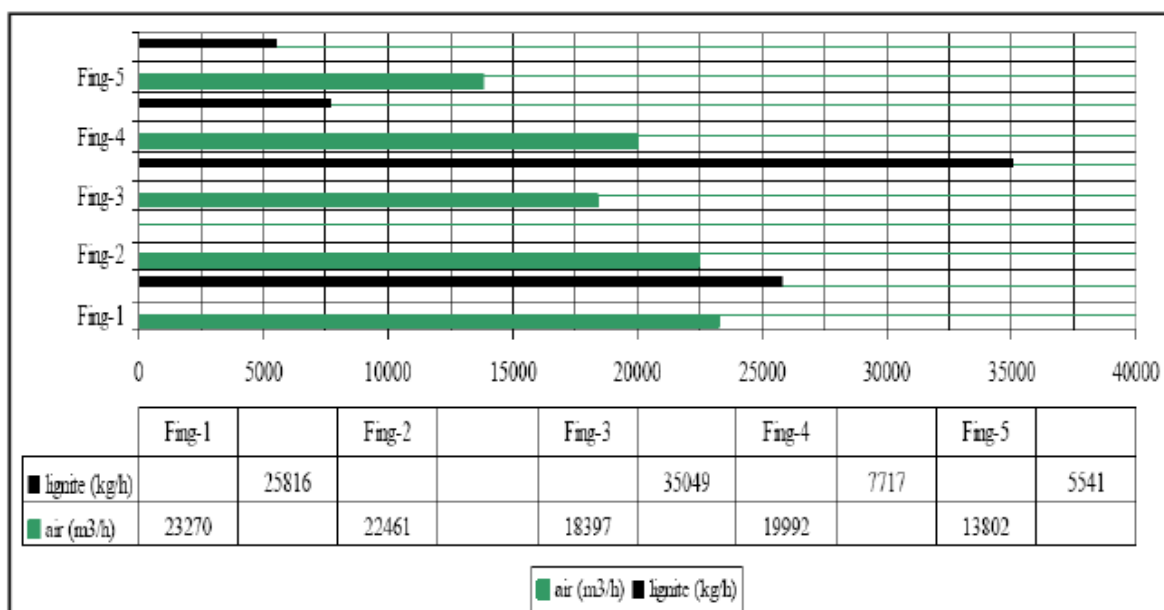
Διάγραμμα 11-9 : Συγκέντρωση κονιορτοποιημένου λιγνίτη στη ροή των αερίων

Από τις μετρήσεις που έγιναν σχετικά με τη συγκέντρωση του κονιορτοποιημένου λιγνίτη στη ροή των αερίων συμπεραίνονται τα εξής:

- Όπως ήταν αναμενόμενο, το μεγαλύτερο ποσοστό κονιορτοποιημένου λιγνίτη εντοπίζεται στους κύριους καυστήρες με τιμή 1.28 kg/m^3 για το μύλο M42R1 και για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας. Αντιθέτως για το μύλο M41 η μεγαλύτερη συγκέντρωση καταγράφηκε στον άνω κύριο καυστήρα. ($0.97 - 1.18 \text{ kg/m}^3$)
- Η συγκέντρωση του κονιορτοποιημένου λιγνίτη στους «ασθενείς» καυστήρες είναι πολύ χαμηλή και ομοιόμορφη ($0.05 - 0.23 \text{ kg/m}^3$)

11.1.7. Κατανομή κονιορτοποιημένου λιγνίτη και αέρα στο στόμιο των καυστήρων

Η κατανομή του κονιορτοποιημένου λιγνίτη και του αέρα στο στόμιο των καυστήρων μετρήθηκε μόνο για το μύλο M41 και σε δύο διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-1 και στο διάγραμμα 9-10.



Διάγραμμα 11-10 : Κατανομή κονιορτοποιημένου λιγνίτη και αέρα στο στόμιο των καυστήρων

Από τις μετρήσεις που έγιναν βρέθηκε ότι υπάρχει εσφαλμένη αναλογία μεταξύ κονιορτοποιημένου λιγνίτη και αέρα στο στόμιο των καυστήρων. Συγκεκριμένα, η ροή του κονιορτοποιημένου λιγνίτη και του αέρα που εισάγεται ήταν κατ'εξακολούθηση μη συσχετισμένη όπως θα έπρεπε.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό πως η παροχή του αέρα καθορίζεται χειροκίνητα από τα dumpραέρα τα οποία είναι συνήθως πλήρως ανοιχτά.

Από τις μετρήσεις που έγιναν σχετικά με την κατανομή του κονιορτοποιημένου λιγνίτη και του αέρα στο στόμιο των καυστήρων συμπεραίνονται τα εξής:

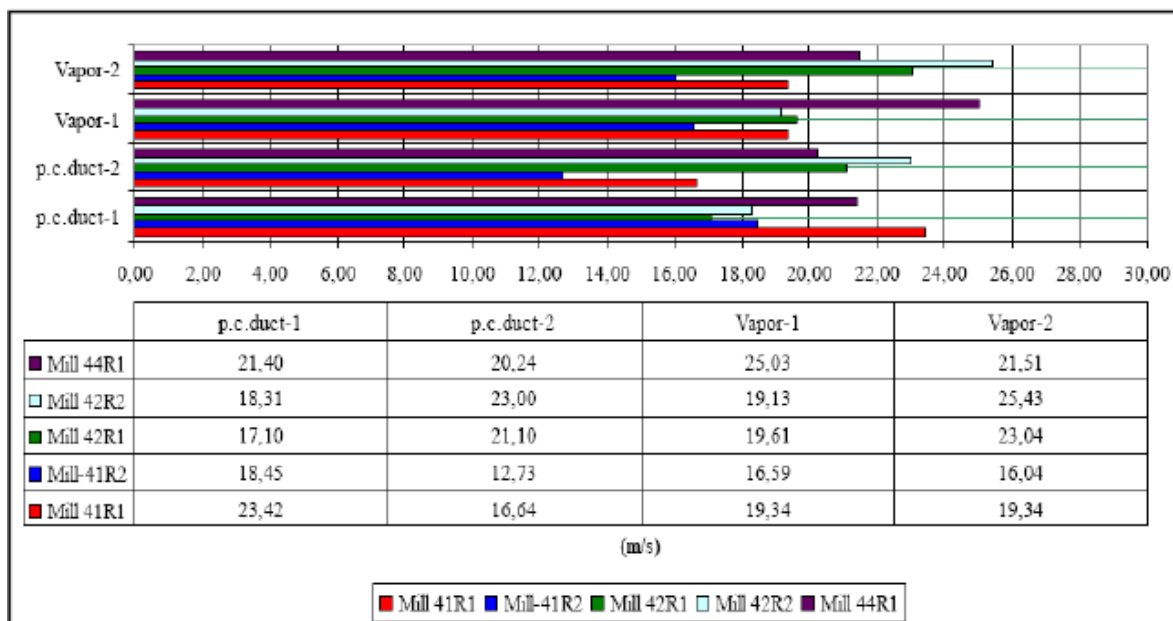
- Η εσφαλμένη κατανομή κονιορτοποιημένου λιγνίτη και αέρα έχει ως συνέπεια να μην επιτυγχάνονται οι βέλτιστες συνθήκες καύσης.

Η σωστή κατανομή αέρα σε κάθε καυστήρα αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες για τη σωστή οργάνωση της καύσης. Συγκεκριμένα η θέση της φλόγας, καθώς επηρεάζεται άμεσα από την κατανομή του αέρα, καθορίζει ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του θαλάμου καύσης και του λέβητα. Η σωστή κατανομή του αέρα στους αυλούς ανόδου, το θερμικό φορτίο του θαλάμου καύσης και η ισχύς του, η μεταφορά θερμότητας στα διάφορα τμήματα του λέβητα καθώς και οι ψεκασμοί εξαρτώνται κυρίως από τις συνθήκες καύσης. Η εσφαλμένη θέση της φλόγας στο θάλαμο καύσης μπορεί να προκαλέσει έντονα φαινόμενα ρύπανσης του λέβητα. Το ζήτημα αυτό θα μελετηθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.

11.1.8. Ταχύτητες κονιορτοποιημένου λιγνίτη και μίγματος αέρα

Οι ταχύτητες του κονιορτοποιημένου λιγνίτη και του μίγματος αέρα σε κάθε αγωγό καταγράφονται στον Πίνακα 9-1 και παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 9-11. Από τις μετρήσεις που έγιναν προέκυψαν τα εξής:

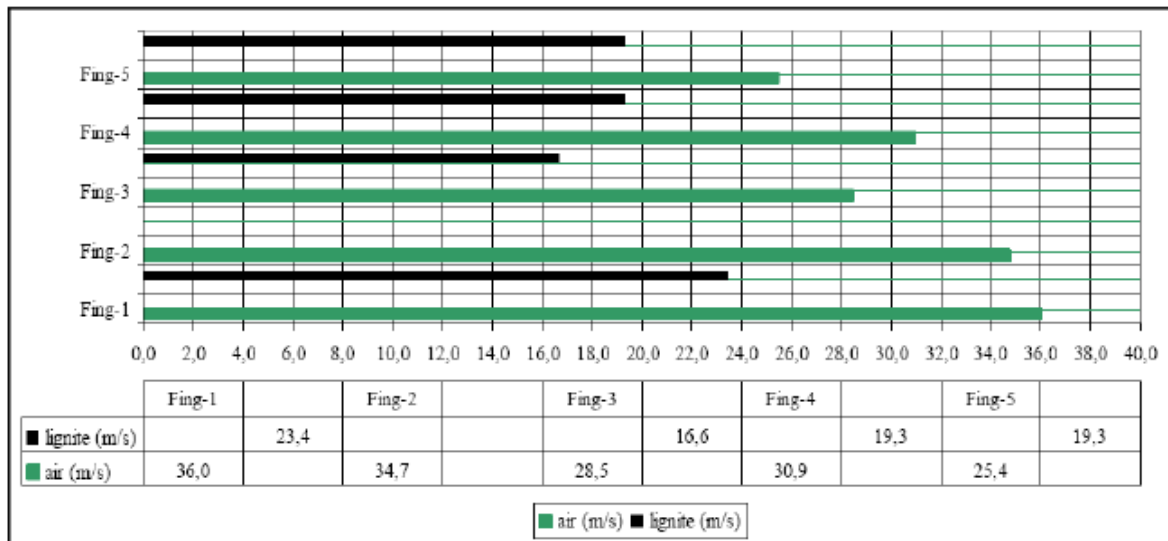
- Οι ταχύτητες του κονιορτοποιημένου λιγνίτη και του μίγματος αέρα κυμαίνονται μεταξύ 16 m/s και 25 m/s
- Η υψηλότερες ταχύτητες εντοπίζονται στους «ασθενείς καυστήρες»
- Μόνο κατά τη διάρκεια της κατάστασης λειτουργίας 2 εντοπίστηκε χαμηλή ταχύτητα στο μύλο M41 (12.7 m/s)



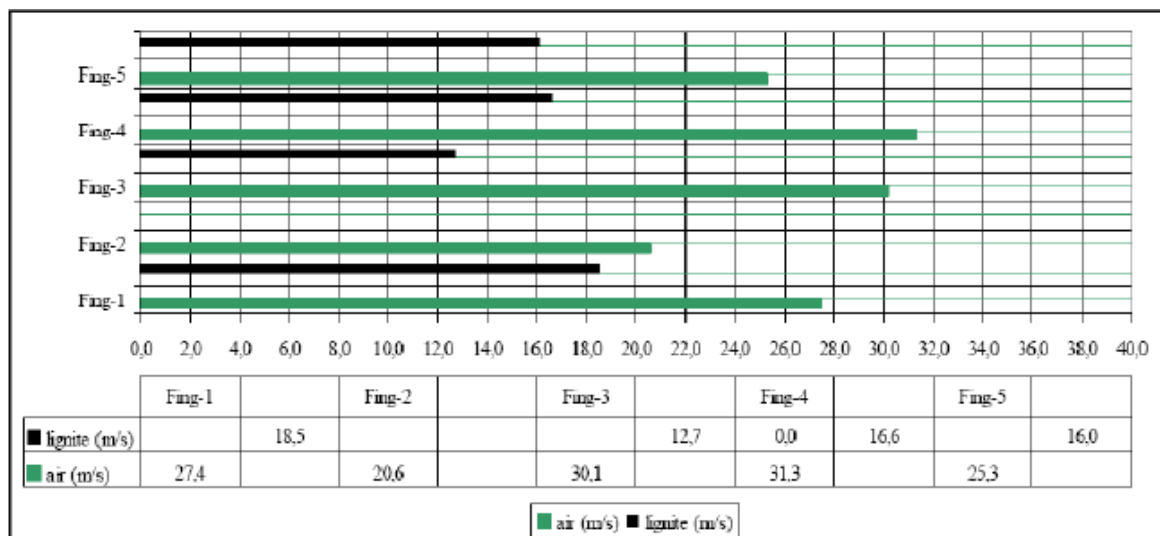
Διάγραμμα 11-11 : Ταχύτητες κονιορτοποιημένου λιγνίτη και μίγματος αέρα

Για το μύλο M41 έγιναν λεπτομερέστεροι έλεγχοι για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 9-12 και 9-13. Από τα διαγράμματα αυτά συμπεραίνονται τα εξής:

- Η αναλογία κονιορτοποιημένου λιγνίτη - μίγματος αέρα και των ταχυτήτων κυμαίνεται εντός των αποδεκτών ορίων.
- Η ταχύτητα του δευτερευόντως αέρα σε διάφορες περιοχές στο ύψος του καυστήρα μετρήθηκαν μεταξύ 25 m/s και 36 m/s. Αυτά τα επίπεδα ταχυτήτων δεν είναι αποδεκτά σε σχέση με την ορθή λειτουργία του λέβητα.
- Οι ταχύτητες του αέρα δεν είναι επαρκείς και ισορροπημένες μεταξύ τους καθώς και μη συσχετισμένες με τις ταχύτητες του προσκείμενου κονιορτοποιημένου λιγνίτη. Οι τιμές τους για τους κύριους καυστήρες μετρήθηκαν λίγο πιο κάτω από το κατώτατο όριο. Από τους δύο ελέγχους ο πιο κρίσιμος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η ανάγκη για μεγαλύτερη ταχύτητα του αέρα και ειδικότερα στους «ασθενείς» καυστήρες.



Διάγραμμα 11-12 : Ταχύτητες μίγματος αέρα - κονιορτοποιημένου λιγνίτη και δευτερεύοντος αέρα για το Μύλο M41 στην Κατάσταση Λειτουργίας 1 (Είσοδος θαλάμου καύσης)



Διάγραμμα 11-13 : Ταχύτητες μίγματος αέρα - κονιορτοποιημένου λιγνίτη και δευτερεύοντος αέρα για το Μύλο M41 στην Κατάσταση Λειτουργίας 1 (Είσοδος θαλάμου καύσης)

11.2. Εξέταση Μύλων

11.2.1. Στεγανότητα Συστήματος Μύλων

Για τους τρεις μύλους στους οποίους διενεργήθηκαν οι έλεγχοι, προσδιορίστηκε ο παρασιτικός αέρας. Τα μετρητικά όργανα τοποθετήθηκαν σε δύο θέσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9-1 και στην Εικόνα 9-2. Κατά τη διενέργεια των μετρήσεων εντοπίστηκαν ενδείξεις παρασιτικού αέρα πάνω από το σημείο εισαγωγής του λιγνίτη στον αγωγό θερμής ανακυκλοφορίας. Η καταγεγραμμένη εισβολή παρασιτικού αέρα προσδιορίστηκε μεταξύ 10000 m³/h και 16000 m³/h.

Ο συντελεστής περίσσειας αέρα πάνω από το σύστημα εισαγωγής του λιγνίτη υπολογίστηκε μεταξύ 2.2 και 2.7, εύρος τιμών το οποίο θεωρείται πολύ υψηλό. Η παρουσία τόσο υψηλής ποσότητας οξυγόνου στο μίγμα κονιορτοποιημένου λιγνίτη και αερίων - αέρα δημιουργεί προβλήματα προκαλώντας διαταραχή του ισοζυγίου του αέρα, υπερφόρτωση των ανεμιστήρων των καυσαερίων με συνέπεια την έκδηλη ανεπάρκεια παροχής δευτερεύοντος αέρα ο οποίος απαιτείται για την κατάλληλη καύση και τη μετατόπιση των υψηλής θερμοκρασίας αερίων από το θάλαμο καύσης προς το κέντρο του λέβητα.

11.2.2. Χαρακτηριστικά ακατέργαστου και κονιορτοποιημένου λιγνίτη

Προκειμένου να γίνει πλήρης εκτίμηση της απόδοσης των μύλων είναι απαραίτητο να γίνει προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του ακατέργαστου και του κονιορτοποιημένου λιγνίτη.

11.2.3. Ανάλυση Ακατέργαστου Λιγνίτη

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων των δειγμάτων τα οποία συλλέχθηκαν κατά την διενέργεια των προκαταρκτικών ελέγχων παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-2 και η ανάλυση από τον έλεγχο Κοκκομετρίας στον Πίνακα 9-3 και στην Διάγραμμα 9-14.

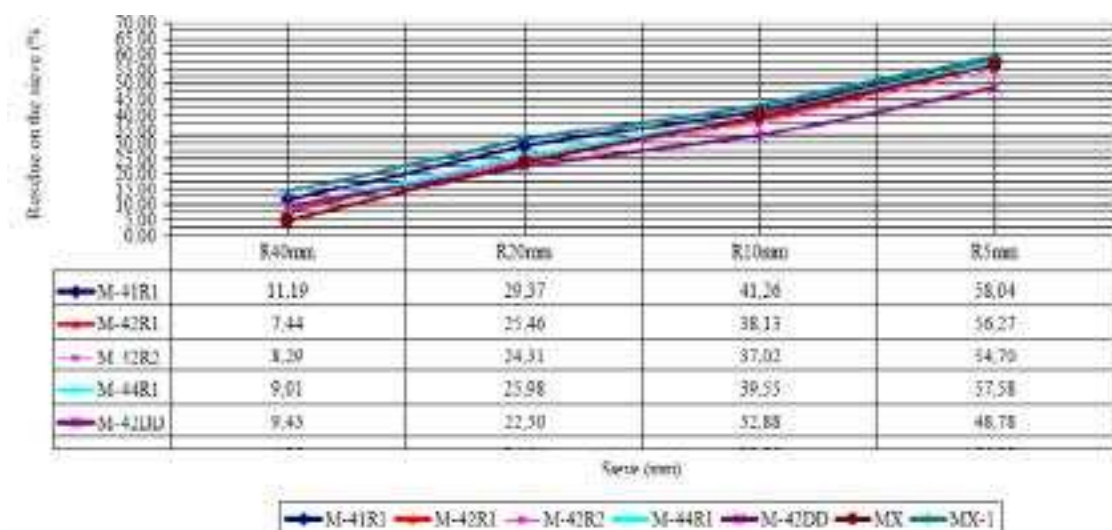
Πίνακας 11-2 : Ανάλυση ακατέργαστου λιγνίτη

Date		14.09.2004		15.09.2004		13.09.2004
Parameter	Unit	Mill 41		Mill 42		Mill 44
		M41R1	M41-R2	M42R1	M42R2	M44R1
Moisture	%	45,50	53,80	50,00	48,60	48,30
Ash	%	19,60	12,63	16,40	21,40	17,00
Combustible matter (not corrected on CO ₂ - carbonates)	%	34,90	33,57	33,60	30,00	34,70
Combustible matter	%	28,80	31,44	29,90	25,70	29,00
CO ₂ - carbonate	%	6,10	2,13	3,70	4,30	5,70
Higher heating value	kJ/kg (kcal/kg)	6.700	6.660	7.270	6.195	6.970
Lower heating value		1.600	1.590	1.760	1.480	1.665
	kJ/kg (kcal/kg)	5.235	5.130	5.820	4.710	5.445
		1.250	1.225	1.390	1.125	1.300

Πίνακας 11-3 : Ανάλυση από κόσκινο ακατέργαστου λιγνίτη

Sieve size (mm)	REMAINING ON THE SIEVE (%)				
	M-44R1	M 41R1	M 42R1	M 42R2	M 42DD
+40	9,01	11,19	11,19	8,29	9,43
-40 + 20	16,97	18,18	18,18	16,02	13,07
-20 + 10	13,57	11,89	11,89	12,71	10,38
-10 + 5	18,03	16,78	16,78	17,68	15,90
-5 + 0	42,42	41,95	41,95	45,30	51,22

- M44 - μύλος 44,
R1 - τεστ 1
R2 - τεστ 2
DD - πυκνότητα λιγνίτη



Διάγραμμα 11-14 : Έλεγχος κοκκομετρίας

Μια πλήρης εικόνα για τα ίδια δείγματα λιγνίτη παρουσιάζεται στο Παράρτημα 1 όπου και παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά:

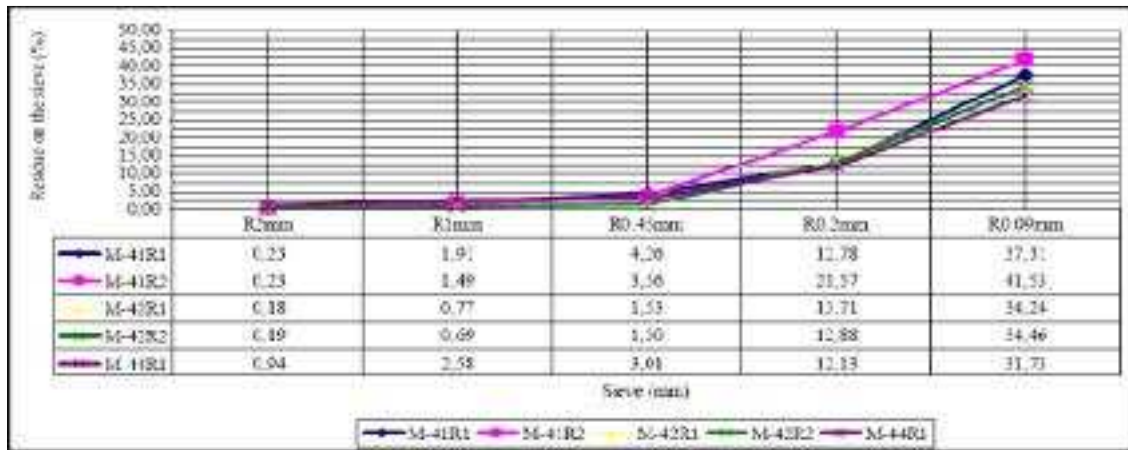
- Κατώτατο ποσοστό υγρασίας και ανώτατο ποσοστό τέφρας λόγω του ότι η δειγματοληψία έγινε το μήνα Σεπτέμβριο όπου η θερμοκρασία του αέρα ήταν υψηλή
- Η κατώτατη θερμογόνος δύναμη κυμάνθηκε μέσα σε ένα μεγάλο εύρος τιμών, μεταξύ 4710 kJ/kg και 5820 kJ/kg.
- Το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα ήταν υψηλό λόγω της διάσπασης υπαρχόντων ανθρακικών αλάτων. Το εύρος τιμών το οποίο καταγράφηκε κυμαινόταν μεταξύ 7.3 % και 11.10 %.
- Βάσει σχεδιασμού οι κόκκοι λιγνίτη μετά την κονιορτοποίησή του πρέπει να είναι κάτω από 40 mmx40 mm. Το ποσοστό λιγνίτη το οποίο κατακρατήθηκε από το κόσκινο 40 mmx40 mm καταγράφηκε σε χαμηλό ποσοστό 5 % με 14 % της μάζας του λιγνίτη. Οι μικρότεροι κόκκοι λιγνίτη μεγέθους κάτω από 10 mmx10 mm καταγράφηκαν σε ποσοστό μεταξύ 57 % και 67 % πιστοποιώντας την εξαιρετική ευθριπτότητα κυρίως λόγω της μαλακής δομής του λιγνίτη. Σε κάθε μύλο το εύρος των χαρακτηριστικών τιμών του λιγνίτη που χρησιμοποιήθηκε ήταν περιορισμένο εξασφαλίζοντας την ομοιομορφία των δειγμάτων (διαφορά κάτω από 10 %).

11.2.4. Ανάλυση κονιορτοποιημένου λιγνίτη

Ο κονιορτοποιημένος λιγνίτης ο οποίος συλλέχθηκε κατά τη διενέργεια των ελέγχων των μύλων M41 M42 και M44 παρουσίασε ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά. Η συνολική εικόνα που προέκυψε από τις αναλύσεις έχει ως εξής:

- Η ανάλυση Κοκκομετρίας του κονιορτοποιημένου λιγνίτη παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 9-15 έως 9-19. Τα αποτελέσματα δείχνουν αρκετά ικανοποιητική κονιορτοποίηση σε όλα τα δείγματα τα οποία συλλεχθήκαν. Το ποσοστό του παρακρατηθέντος κονιορτοποιημένου λιγνίτη στο κόσκινο 1 mmx1 mm ξεπέρασε το 1 % μόνο στον μύλο M41 (2 %) και στο μύλος M44 (2.6 %). Το ποσοστό των σωματιδίων κονιορτοποιημένου λιγνίτη μεγέθους πάνω από 90 microns (R90) κυμαίνεται μεταξύ 31 % και 41 %.

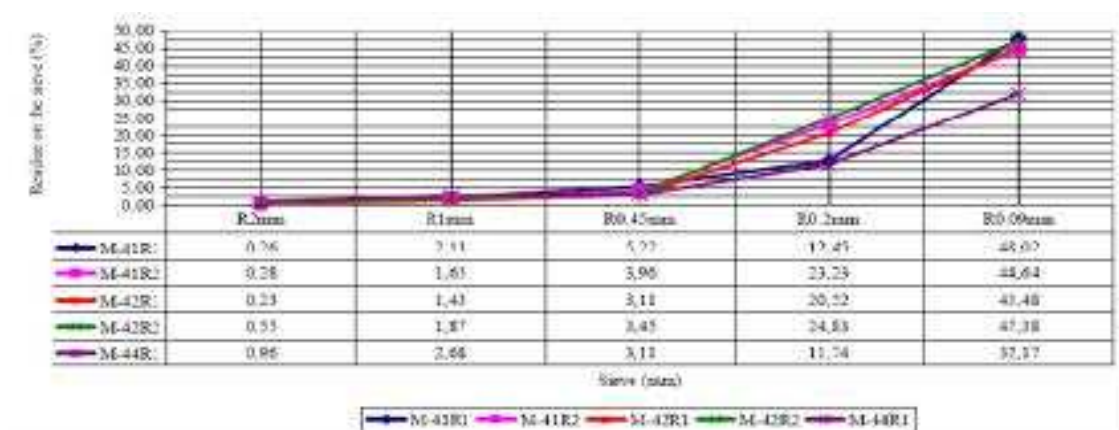
- Το ποσοστό του εναπομείναντος λιγνίτη στους αγωγούς των κύριων καυστήρων (ισχυρών) το οποίο κατακρατήθηκε από το κόσκινο 1 mmx1 mm ήταν μεταξύ
- 4 % και 3 %. Το ποσοστό του εναπομείναντος λιγνίτη στους αγωγούς των καυστήρων αερίων (ασθενών) το οποίο κατακρατήθηκε από το κόσκινο 1 mmx1 mm ήταν ακόμη μικρότερο μεταξύ 0.4 % και 3 %.
- Η τοποθέτηση των dampers διαχωρισμού σε οριζόντια θέση δεν επηρέασε αισθητά την κονιορτοποίηση του λιγνίτη. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του κονιορτοποιημένου λιγνίτη το οποίο προκύπτει από τη συμπεριφορά του λιγνιτικού υλικού κατά τη διέλευσή του από το σύστημα των μύλων. Επίσης αυτό επιβεβαιώνει τη χαμηλή τάση εσωτερικής ανακυκλοφορίας του λιγνίτη στο μύλο.
- Το ποσοστό της υπολειμματικής υγρασίας στους αγωγούς των κύριων καυστήρων καταγράφηκε μεταξύ 8 % και 12 %. Το ποσοστό της υπολειμματικής υγρασίας στους αγωγούς των ασθενών καυστήρων καταγράφηκε μεταξύ 9 % και 15 %. Τα ποσοστά υπολειμματικής υγρασίας για όλους τους μύλους οι οποίοι ελέγχθηκαν παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 20. Το μικρό αυτό ποσοστό υγρασίας που καταγράφηκε είναι ιδανικό για την έναυση και την καύση των σωματιδίων, εφόσον φυσικά πληρούνται και οι υπόλοιπες προαπαιτούμενες συνθήκες καύσης
- Το μικρό ποσοστό υπολειμματικής υγρασίας και ο πολύ λεπτόκοκκος λιγνίτης αποδεικνύουν την πολύ καλή λειτουργία του συστήματος ξήρανσης και των μύλων. Τέτοιες συνθήκες, κατά μία αρχική θεώρηση, είναι ιδανικές για μία μονάδα που χρησιμοποιεί τέτοιου είδους μύλους και σύστημα καύσης με διαχωρισμό αερίων.



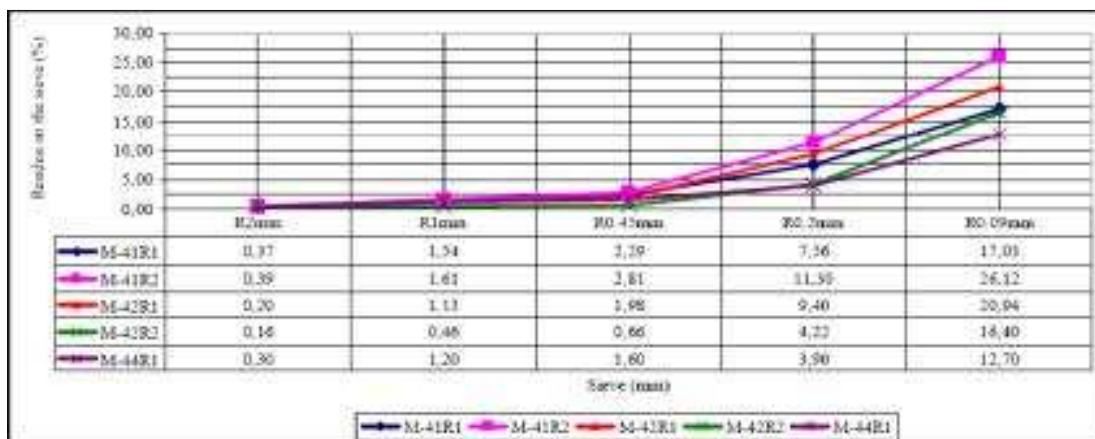
Διάγραμμα 11-15 : Ανάλυση κοκκομετρίας κονιοροποιημένου λιγνίτη



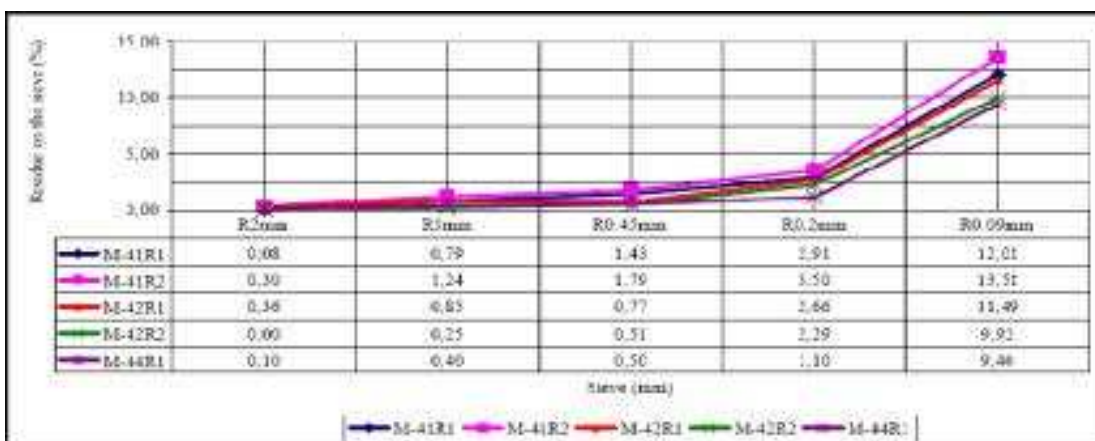
Διάγραμμα 11-16 : Ανάλυση κοκκομετρίας κονιοροποιημένου λιγνίτη (Κύριος - Κάτω καυστήρας)



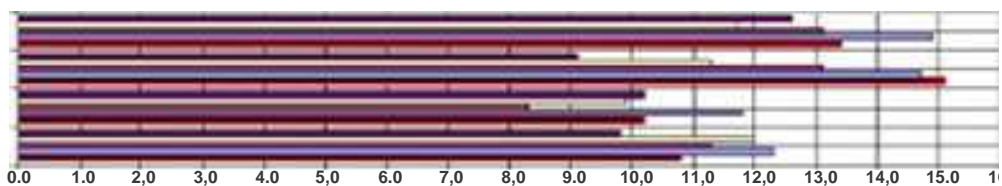
Διάγραμμα 11-17 : Ανάλυση κοκκομετρίας κονιοροποιημένου λιγνίτη (Κύριος - Άνω καυστήρας)



Διάγραμμα 11-18 : Ανάλυση κοκκομετρίας κονιορτοποιημένου λιγνίτη (Ασθενής - Κάτω καυστήρας)



Διάγραμμα 11-19 : Ανάλυση κοκκομετρίας κονιορτοποιημένου λιγνίτη (Ασθενής - Άνω καυστήρας)



	p.c.duct-1	p.c.duct-2	Vapor-1	Vapor-2
■ M-44R1	9,8	10,2	9,1	12,6
□ M-42R2	12,0	9,9	11,3	11,7
■ M-42R1	11,3	3,3	13,1	13,1
□ M-41R2	12,3	11,8	14,7	14,9
■ M-41R1	10,8	10,2	15,1	13,4

Moisture (%)

■ M-41R1 □ M-41R2 ■ M-42R1 □ M-42R2 ■ M-44R1

Διάγραμμα 11-20 : Υπολειμματική υγρασία κονιορτοποιημένου λιγνίτη ανά αγωγό

Λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την Κοκκομετρία και την υγρασία του λιγνίτη είναι διαθέσιμες στο Παράρτημα 1.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως μέγεθος κόκκων κονιορτοποιημένου λιγνίτη τόσο χαμηλό έχει και αρνητικές επιδράσεις κατά την καύση σε μεγάλους λέβητες όπως ο υπό εξέταση. Συγκεκριμένα, οι θάλαμοι καύσης τόσο μεγάλων λεβήτων όπως αυτός της μονάδας 4 έχουν τη δυνατότητα να κάψουν αποτελεσματικά πολύ πιο χονδρόκοκκα σωματίδια κονιορτοποιημένου λιγνίτη. Τα μειονεκτήματα τα οποία παρατηρήθηκαν σχετικά με το πολύ μικρό μέγεθος των κόκκων είναι τα εξής:

- Τα μικρόκοκκα σωματίδια λιγνίτη είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα στο να ενισχύσουν εντονότατα τη ρύπανση του λέβητα. Συγκεκριμένα, τα ψιλόκοκκα και ξηρά σωματίδια καίγονται στιγμιαία στο στόμιο του καυστήρα. Τα υπολείμματα αυτής της καύσης είναι μαλακά σωματίδια με τάση να προσκολληθούν στα υδροτοιχώματα με κάθε ανωμαλία στην αεροδυναμική της καύσης. Υπό τέτοιες συνθήκες, η προσκόλληση τέτοιων σωματιδίων στους υπέρθερμους και στους ανάθερμους είναι αναπόφευκτη.
- Το μέγεθος των κόκκων επηρεάζει σημαντικά τη φθορά των εσωτερικών μερών των μύλων, τη δυναμικότητα τους καθώς και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας τους. Υπό τις υπάρχουσες συνθήκες, η βελτίωση της λειτουργίας των μύλων βάσει της επιτρεπόμενης ρύθμισης του μεγέθους των κόκκων προς τα επάνω, μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας από το σύστημα των μύλων. Το βέλτιστο μέγεθος καθορίζεται από το συμβιβασμό μεταξύ του πόσο χονδρόκοκκα μπορεί να είναι τα σωματίδια και των αποδεκτών απωλειών ακαύστων.

Όπως ήταν αναμενόμενο τα πιο χονδρόκοκκα σωματίδια εντοπίστηκαν στους κύριους καυστήρες. Μια τέτοια κατανομή είναι απαραίτητη για επίτευξη στροβιλώδους ροής του καύσιμου μίγματος στο θάλαμο καύσης καθώς και για τη επίτευξη σωστής έναυσης και καύσης λιγνίτη με τόσο υψηλό ποσοστό άκαυστου υλικού.

Το υπάρχων σύστημα των μύλων και διαχωρισμού αερίων, παράλληλα με την οργανωμένη κατανομή του κονιορτοποιημένου λιγνίτη και τη μεταφορά της ροής των αερίων στα διάφορα επίπεδα των καυστήρων, δημιουργεί επίσης μία ανακατανομή των σωματιδίων δημιουργώντας μια διαφοροποίηση μεταξύ των χαρακτηριστικών του κονιορτοποιημένου λιγνίτη που κινείται στους κύριους

καυστήρες και αυτού που κινείται στους «ασθενείς» καυστήρες. Συγκεκριμένα, όπως προσδιορίζεται από τις βασικές αρχές του υπάρχοντος συστήματος καύσης, οι κύριοι καυστήρες εφοδιάζονται με κονιορτοποιημένο λιγνίτη υψηλότερης θερμογόνου δύναμης και χαμηλότερου ποσοστού τέφρας. Αντίστοιχα οι «αερίου» καυστήρες δέχονται κονιορτοποιημένο λιγνίτη χαμηλότερης θερμογόνου δύναμη με υψηλότερο ποσοστό τέφρας. Η διαφοροποίηση αυτή των τιμών είναι της τάξης 1 % με 5 %. Και οι δύο διαφοροποιήσεις οι οποίες προκύπτουν από τα συμπεράσματα σχετικά με το υπερβολικά χαμηλού μεγέθους κόκκων του κονιορτοποιημένου λιγνίτη δεν είναι πολύ μεγάλες. Φυσικά, ο διαχωρισμός αυτός των σωματιδίων, από το στροβιλισμό της συνολικής ροής του καύσιμου μίγματος, δεν είναι αποτέλεσμα μόνο της υπάρχουσας κατάστασης και του σχεδιασμού της συσκευής στροβιλισμού, αλλά εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά του λιγνίτη (ευθριπτότητα, περιεχόμενη τέφρα, ορυκτολογική και χημική ανάλυση, χαρακτηριστικά των οργανικών συστατικών).

11.2.5. Δείκτης Hardgrove

Κατά τη διάρκεια των εργασιών συλλέχτηκαν 5 δείγματα τα οποία εξετάστηκαν για την ευθριπτότητα τους βάσει του δείκτη Hardgrove (ISO5074).

Από την εργαστηριακή μελέτη και προσδιορισμό του δείκτη Hardgrove και βάσει όσων ισχύουν για στερεά καύσιμα και συγκεκριμένα το λιγνίτη, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η απώλεια βάρους του ακατέργαστου λιγνίτη με σταθερές συνθήκες υγρασίας όταν είναι εκτεθειμένος στον αέρα υπολογίστηκε μεταξύ 36.5 % και 38.5 %.
- Ο λιγνίτης ο οποίος κονιορτοποιήθηκε στο εργαστήριο περάστηκε από κόσκινο 4.75 mm x 4.75 mm το οποίο κατακράτησε το 5.9 % με 6.6 %. Οι ποσότητες αυτές του λιγνίτη που κατακρατήθηκαν στη συνέχεια προστέθηκαν στην κύρια μάζα του λιγνίτη που διαπέρασε το κόσκινο 4.75 mm x 4.75 mm.
- Τα πέντε δείγματα λιγνίτη πέρασαν από δύο κόσκινα 1.2 mm x 1.2 mm και 0.6 mm x 0.6 mm. Βάσει της τυποποιημένης μεθοδολογίας, η μάζα του λιγνίτη η οποία κονιορτοποιείται, αντιστοιχεί στα σωματίδια μεγέθους μεταξύ 1.2 mm και 0.6 mm. Η μάζα του λιγνίτη η οποία θα διαπεράσει το

κόσκινο 0.6 mm x 0.6 mm δεν χρειάζεται να αξιολογηθεί περαιτέρω. Εάν όμως η μάζα του λιγνίτη η οποία θα διαπεράσει το κόσκινο 0.6 mm x 0.6 mm είναι πάνω από το 50 % της συνολικής μάζας τότε τυποποιημένη μέθοδος προσδιορισμού του δείκτη Hardgrove δεν είναι εφαρμόσιμη. Δυστυχώς, από τα αποτελέσματα του κοσκινίσματος τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4, το 61.1 % με 65.1 % του κονιορτοποιημένου δείγματος λιγνίτη διαπέρασε το κόσκινο 0.6 mm x 0.6 mm. Από το γεγονός αυτό, το οποίο παρατηρήθηκε και στα πέντε δείγματα, είναι ξεκάθαρο πως η τυποποιημένη μέθοδος προσδιορισμού του δείκτη Hardgrove δεν είναι εφαρμόσιμη για τον υπάρχων λιγνίτη της Πτολεμαΐδας. Ο υπολογισμός του δείκτη Hardgrove σε αυτές τις μη αντιπροσωπευτικές συνθήκες (το εξεταζόμενο δείγμα αντιστοιχεί σε ποσοστό κάτω από 40 % της μάζας του λιγνίτη) παρουσιάζεται στον Πίνακα 9-5.

- Εξετάσθηκε μια τροποποιημένη μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη Hardgrove βασισμένη σε δύο πιο χαρακτηριστικά μεγέθη σωματιδίων (-1.2 mm+ 0.2 mm) και (-1.2 mm+ 0.075 mm). Και στις δύο περιπτώσεις η ποσότητα του λιγνίτη η οποία κατακρατήθηκε ήταν πάνω από 50 % ικανοποιώντας έτσι την προαπαίτηση που θέτει η μέθοδος. Η ανάλυση Κοκκομετρίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 9-4.
- Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 9-5, ο δείκτης Hardgrove (εξαρτάται από το εύρος τιμών του μεγέθους των σωματιδίων εκ των οποίων υπολογίστηκε κάθε φορά ο δείκτης) παίρνει τις εξής τιμές
 - ✓ $H_g = 45 - 54$, βάσει του δείγματος του λιγνίτη το οποίο καθορίζεται από την τυποποιημένη μέθοδο (μέγεθος κόκκων μεταξύ 0.6 mm και 1.2 mm)
 - ✓ $H_g^{200} = 59 - 69$, βάσει του δείγματος του λιγνίτη το οποίο καθορίζεται από την τροποποιημένη μέθοδο (μέγεθος κόκκων μεταξύ 0.2 mm και 1.2 mm)
 - ✓ $H_g^{75} = 82 - 91$, βάσει του δείγματος του λιγνίτη το οποίο καθορίζεται από την τροποποιημένη μέθοδο (μέγεθος κόκκων μεταξύ 0.075 mm και 1.2 mm)

Πίνακας 11-4 : Ανάλυση κοκκομετρίας για τον προσδιορισμό του δείκτη Hardgrove

Lignite Sample	Date of sampling	Standardized method Distribution of pulverized lignite, (%)		Modified method Distribution of pulverized lignite, (%)		Modified method Distribution pulverized of lignite, (%)	
		0,6<d<1,2mm	<0,6mm	0,2<d<1,2mm	<0,2mm	0,075<d<1,2 mm	<0,075mm
M44/R1	13.09.2004	36,9	61,1	68,7	31,3	82,7	17,3
M41/R1	14.09.2004	36,4	63,6	64,7	35,3	81,9	18,1
M42/R2	15.09,2004	38,3	61,7	69,8	30,2	84,8	15,2
MX	16.09.2004	37,8	62,2	68,9	31,1	85,0	15,0
MX1	17.09.2004	34,9	65,1	66,7	33,3	85,2	14,8

Πίνακας 11-5 : Τιμές δείκτη Hardgrove μέσω τυποποιημένης και τροποποιημένης μεθοδολογίας

Lignite Sample	Date of sampling	Standardized method	Modified method	Modified method
		Fraction 0,6<d<1,2mm	Fraction 0,2<d<1,2mm	Fraction 0,075<d<1,2mm
M44/R1	13.09.2004	48,5	63,2	83,8
M41/R1	14.09.2004	54,0	69,2	90,9
M42/R2	15.09.2004	50,5	61,2	82,5
MX	16.09.2004	45,1	59,2	90,8
MX1	17.09.2004	49,2	65,4	91,4

- Τα τελικά συμπεράσματα για το λιγνίτη της Πτολεμαΐδας είναι τα εξής:
 - ✓ Η τυποποιημένη μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη Hardgrove δεν είναι εφαρμόσιμη για το λιγνίτη της Πτολεμαΐδας. Από τον υπερβολικά κονιορτοποιημένο λιγνίτη που προέκυψε από τα πέντε δείγματα, επιβεβαιώνεται η καταλληλότητα του για κονιορτοποίηση με μύλο με στροφέιο.

11.3. Αποτελέσματα θερμικών ελέγχων σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας

Λόγω της σύνθετης δομής του υπό μελέτη φαινομένου και των επιβαρυμένων συνθηκών λειτουργίας του λέβητα, οι οποίες χαρακτηρίζονται από έντονα φαινόμενα ρύπανσης, απαιτήθηκε ένας μεγάλος αριθμός θερμικών ελέγχων. Στόχος είναι να προσδιοριστεί η ανταπόκριση του λέβητα σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

Τα κύρια δεδομένα και στοιχεία τα οποία σχετίζονται με τα αποτελέσματα των θερμικών ελέγχων στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-6.

Η κατάσταση λειτουργίας 1, διενεργήθηκε με τον μύλο M46 εκτός λειτουργίας.

11.3.1. Αποτελέσματα ισοζυγίου θερμότητας και αέρα του λέβητα συνοδευμένα με ελέγχους της κατάστασης του λέβητα και των υπόλοιπων μύλων

Εκτελέστηκαν συνολικά έλεγχοι σε πέντε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας και πάρθηκαν μετρήσεις σε διάφορα επίπεδα. Στους ελέγχους αυτούς συμπεριλαμβάνεται και μελέτη του συνθηκών λειτουργίας του λέβητα συμπεριλαμβανομένων και ισοζυγίων μάζας και ενέργειας.

Εκτός από τους μύλους οι οποίοι εξετάστηκαν αρχικά, προσδιορίστηκε και η λειτουργία των υπόλοιπων μύλων (M43, M45, M46, M47 και M48) βάσει απλοποιημένης μεθοδολογίας μετρήσεων και δειγματοληψίας.

Πίνακας 11-6 : Αποτελέσματα θερμικών ελέγχων σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας

No	Operation regime/ date	Unit load (MW)	Position of mill classifier dampers	Vacuum in the furnace (mmWG)	Air flow (control room instrum.) (m ³ /h)	Hot air pressure in the ring (mmWG)	Total parasitic air flow (m ³ /h)	Max. measured flue gas Temperature inside of SH2 Furnace exit (Left/ Right, °C)	Water flow injection in SH/RH (t/h)	Boiler Thermal Efficiency (%)	Remark
1.	"As found" operating conditions (16.09.2004)	305	As found (shown with mill test data)	- 10 to - 20	950.000/ 1.080.000	60	669.000	<u>1060/ 1090</u> 1.110- 1.140	<u>> 68</u> > 80	81.00	M42 out of operation
2.	Reduced furnace vacuum and max. increased air flow (16.09.2004)	300-308		- 5 to 0	1.050.000/ 1.150.000	80	n.a.	<u>1.090/ 1.075</u> 1.140- 1.130	<u>> 100</u> > 72	n.a.	M42 out of operation
3.	Reduced furnace vacuum and max. decreased air flow (16.09.2004)	308-313		- 5 to +2	900.000/ 1.000.000	40- 55	n.a.	<u>1.160/ 1.140</u> 1.210- 1.190	<u>> 97</u> > 80	n.a.	M42 out of operation
4.	Reduced furnace vacuum, adjusted thickness of lignite in all feeders, air flow as usual	320	0/3	- 5 to +0	980.000/ 1.080.000	70	535.000	<u>1.170/ 1.140</u> 1.220- 1.190	<u>> 70</u> > 80	83,2	M44 out of operation
5.	Reduced furnace vacuum, adjusted thickness of lignite in all feeders, closed primary air to hot rec. ducts, max. increased air flow	310	0/3	- 5 to 0	1.050.000/ 1.150.000	100	n.a.	<u>1.160/ 1.070</u> 1.210- 1.120	<u>> 67</u> > 80	n.a.	M44 out of operation

Εκτελέστηκε έλεγχος του ισοζυγίου μάζας και ενέργειας για τον προσδιορισμό της στεγανότητας των προθερμαντών αέρα και το θερμικό βαθμό απόδοσης του λέβητα καθώς και του ισοζυγίου αέρα συμπεριλαμβάνοντας προσδιορισμό των ποσοτήτων οργανωμένου αέρα και του παρασιτικού αέρα που εισβάλλει στα διάφορα στοιχεία του λέβητα.

Προκειμένου να γίνει πλήρης προσδιορισμός των συνθηκών λειτουργίας του λέβητα διενεργήθηκαν επιπλέον αναλύσεις λιγνίτη καθώς και αναλύσεις τέφρας η οποία συλλέχτηκε από τον πυθμένα και από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Τα βασικά δεδομένα λειτουργίας καταγραφόντουσαν σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Λόγω της έντονη ρύπανσης του λέβητα, κατά τη διάρκεια των ελέγχων απαιτούνταν συχνή χρήση των εκκαπνισμών γεγονός το οποίο καθόρισε τη διάρκεια και τη σειρά τους.

11.3.2. Χαρακτηριστικά λιγνίτη και στερεών προϊόντων κατά τη διενέργεια των θερμικών ελέγχων στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας

Τα χαρακτηριστικά του λιγνίτη ο οποίος συλλέχτηκε κατά τη διενέργεια των θερμικών ελέγχων στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας παρουσιάζονται στους Πίνακες 9-7 και 9-8 και η ανάλυση Κοκκομετρίας στον Πίνακα 9-9.

Τα χαρακτηριστικά των στερεών προϊόντων της καύσης, τα οποία συλλέχτηκαν κατά τη διενέργεια των θερμικών ελέγχων στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-10.

Κατά τη διενέργεια δύο επιλεγμένων ελέγχων έγινε χρήση λιγνίτη με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Λόγω της εποχής κατά την οποία έγινε η δειγματοληψία, η υγρασία των δειγμάτων ήταν κάτω από τη μέση τιμή του λιγνίτη Πτολεμαΐδας. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη κατώτερη θερμογόνο δύναμη των δύο δειγμάτων να είναι πάνω από την τιμή σχεδιασμού. Υψηλότερη θερμογόνο δύναμη μεταφράζεται σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες καυσαερίων στην έξοδο του λέβητα.

Πίνακας 11-7 : Ανάλυση δειγμάτων λιγνίτη κατά τη διενέργεια θερμικών ελέγχων στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας (Μέρος 1)

No	Parameter	Unit	Lignite sample R1/ MX (16.09.2004)			Lignite sample R4/ MX-1 (17.09.2004)		
			received	dry	maf.*	received	dry	maf.*
PROXIMATE								
1.	Moisture	%	50,90			52,70		
2.	Ash	%	13,50	27,50	-	14,10	29,70	-
3.	CO ₂ - carbonate	%	3,80	7,60	-	3,60	7,70	-
4.	Volatile matter**	%	17,70	36,10	55,70	17,10	36,10	57,70
5.	Fixed carbon	%	14,10	28,70	44,30	12,50	26,50	42,30
6.	Coke	%	27,60	56,20	-	26,60	56,20	-
ULTIMATE								
1.	Moisture	%	50,90			52,70		
2.	Ash	%	13,50	27,50	-	14,10	29,70	-
3.	CO ₂ - carbonate	%	3,80	7,60	-	3,60	7,70	-
4.	Carbon	%	20,84	42,41	65,40	19,21	40,60	64,90
5.	Hydrogen	%	1,64	3,34	5,15	1,47	3,10	4,96
6.	Nitrogen	%	0,57	1,17	1,18	0,53	1,12	1,79
7.	Sulfur	%	0,51	1,03	1,59	0,40	0,86	1,37
8.	Oxygen	%	8,29	16,87	26,02	7,99	16,88	26,98
HEATING VALUE								

Πίνακας 11-8 : Ανάλυση δειγμάτων λιγνίτη κατά τη διενέργεια θερμικών ελέγχων στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας (Μέρος 1)

1	High Heating Value	kJ/kg	7.940	16.150	24.920	7.360	15.555	24.865
			kcal/kg	1.896	3.858	5.952	1.758	3.715
2.	Lower Heating Value	kJ/kg	6.330	15.415	23.785	5.745	14.870	23.770
			kcal/kg	1.512	3.682	5.681	1.372	3.552
ASH ANALYSIS/ COMPOSF			ΓΙΟΝ					
1	SiO ₂	%	23,01			23,50		
2.	Fe ₂ O ₃	%	9,38			10,50		
3.	Al ₂ O ₃	%	12,73			10,60		
4.	TiO ₂	%	0,45			0,55		
5.	CaO	%	43,49			43,39		
6.	MgO	%	3,87			4,20		
7.	SO ₂	%	5,38			6,30		
	N ₂ O	%	0,30			0,28		
9.	K ₂ O	%	0,41			0,40		
10.	Free CaO	%	16,70			20,00		
FYSIBILITY TEMPERATURES								
1.	I.D.T.	°C	1.243			1.238		
2.	S.T.	°C	1.305			1.290		
3.	H.T.	°C	1.323			>1.500		
4.	FT.	°C	1.343			>1.500		

* - χωρίς υγρασία και τέφρα

** - χωρίς CO₂- ανθρακικό άλας

Πίνακας 11-9 : Ανάλυση δειγμάτων λιγνίτη κατά τη διενέργεια θερμικών ελέγχων στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας

Sieve size (mm)	Remaining on the sieve (%)	
	MX/16.09.2004	MX-1/17.09.2004
+40	4,80	14,45
-40 + 20	19,21	16,82
-20 + 10	15,28	11,59
-10 + 5	17,03	16,45
-5 + 0	43,68	40,69

MX-μίγμα λιγνίτη για τους μύλους 3, 5, 6, 7 και 8

MX - 1 -μίγμα λιγνίτη για όλους τους μύλους που βρίσκονται εν λειτουργία

Πίνακας 11-10 : Ανάλυση δειγμάτων λιγνίτη κατά τη διενέργεια θερμικών ελέγχων στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας

No	Parameter	Unit	Lignite sample R1/(16.09.2004)		Lignite sample R4/ (17.09.2004)	
			received	dry	received	dry
	SHORT PROXIMATE ANAL		YES OF BOTTOM ASH			
			Bottom	ash BA	BA1	
1.	Moisture	%	50,40		48,80	
2.	Ash	%	41,90	84,50	41,70	81,40
3.	CO ₂ - carbonate	%	1,94	3,92	1,81	3,53
4.	Combustible matter	%	7,70	11,58	17,10	36,10
5.	High Heating Value	kJ/kq kcal/kg	917	1.846	1.085	2.115
			219	441	259	505
6.	Lower Heating Value	kJ/kci kcal/kg	0	1.737	0	1.970
			0	415	0	471
	SHORT PROXIMATE ANAL ¹		TSES OF = LY ASH			
1.	Combustible matter I	%		0,28		0,28"
2.	CO ₂ carbonate	%		1.10		1,10

- Καταγράφηκε υπερβολικά μεγάλο ποσοστό Fe₂O₃ (πάνω από 10 % για το δείγμα MX - 1) και CaO (πάνω από 43 %). Το περιεχόμενο αυτό της τέφρας επιβεβαιώνει την έντονη τάση της τέφρας να σχηματίζει επικαθίσεις κατά την καύση.

11.3.3. Αποτελέσματα Θερμικών Ελέγχων και Προσδιορισμός Συνθηκών Λειτουργίας του Λέβητα

Η διενέργεια των θερμικών ελέγχων έγινε σε 5 διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους στις συνθήκες καύσης. Διενεργήθηκαν ορισμένες μετρήσεις πριν από την πρώτη ελεγχόμενη κατάσταση λειτουργίας. Οι μετρήσεις αυτές στις «ως έχει» συνθήκες παρουσιάζονται ως «zero test» και αποτελούν την κατάσταση λειτουργίας 1. Αρχικά έγινε προσδιορισμός των χαρακτηριστικών στην κατάσταση λειτουργίας 1 «ως έχει». Αυτό σημαίνει ότι το προσωπικό λειτούργησε τη μονάδα «ως συνήθως» χωρίς καμία τροποποίηση στους χειρισμούς ή στον εξοπλισμό του λέβητα. Τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της κατάστασης λειτουργίας 1 έχουν ως εξής:

Η πίεση στο λέβητα ήταν μεταξύ -15 mmWG και -20 mmWG

Το πάχος του στρώματος του λιγνίτη στο εσωτερικό των τροφοδοτών λιγνίτη ήταν διαφορετικό σε κάθε τροφοδότη. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα για την ίδια ταχύτητα κίνησης των τροφοδοτών να εισάγονται διαφορετικές ποσότητες λιγνίτη στο λέβητα. Έτσι έλεγχος λιγνίτη αέρα δεν γινότανε με σωστό τρόπο.

Τα damper διαχωρισμού των μύλων βρέθηκαν σε αρκετά διαφορετικές θέσεις επηρεάζοντας την απόδοση των μύλων και τα χαρακτηριστικά του κονιορτοποιημένου λιγνίτη με διαφορετικό τρόπο σε κάθε περίπτωση.

Η ροή θερμού αέρα καταγραφότανε από το Control στην τιμή των 950 m³/h.

Έχοντας υπόψη τις παραπάνω συνθήκες λειτουργίας, συστήθηκαν τροποποιήσεις για τις επόμενες καταστάσεις λειτουργίας. Συγκεκριμένα, οι τροποποιήσεις στη λειτουργία του λέβητα περιλαμβάνουν τα εξής:

Στην κατάσταση λειτουργίας 2, οι κύριες τροποποιήσεις στη λειτουργία είναι οι εξής:

- Το κενό στο εσωτερικό του λέβητα ελαττώθηκε μεταξύ -5 mmWG και 0 mmWG.
- Η πίεση του συστήματος θερμού αέρα αυξήθηκε στα 80 mmWG.
- Η ροή του θερμού αέρα αυξήθηκε στα 1,050,000 m³/h.

Στην κατάσταση λειτουργίας 3, οι κύριες τροποποιήσεις στη λειτουργία είναι οι εξής:

- Το κενό στο εσωτερικό του λέβητα διατηρήθηκε ίδιο με την κατάσταση λειτουργίας 2 (-5 mmWG έως 0 mmWG).
- Η πίεση του συστήματος θερμού αέρα μειώθηκε στα 40 mmWG με 55 mmWG.
- Η ροή του θερμού αέρα μειώθηκε στα 900,000 m³/h.

Στην κατάσταση λειτουργίας 4, οι κύριες τροποποιήσεις στη λειτουργία είναι οι εξής:

- Το κενό στο εσωτερικό του λέβητα διατηρήθηκε ίδιο με την κατάσταση λειτουργίας 2 και 3 (-5 mmWG έως 0 mmWG).
- Η ροή του θερμού αέρα ρυθμίστηκε στα 980,000 m³/h.
- Τα dumperδιαχωρισμού ρυθμίστηκαν σε οριζόντια θέση (στο σημείο 0 - άνω, 3 - κάτω) σε όσους μύλους ήταν δυνατόν λόγω περιορισμών από μηχανική έμφραξη.
- Το πάχος του στρώματος του λιγνίτη σε όλους τους τροφοδότες ρυθμίστηκε στα 35 cm.
- Ο κύριος αέρας για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας εξόδου των μύλων ρυθμίστηκε μεταξύ 20 % και 50 % ανάλογα με τη θερμοκρασία εξόδου των μύλων.

Στην κατάσταση λειτουργίας 5, οι κύριες τροποποιήσεις στη λειτουργία είναι οι εξής:

- Ο κύριος αέρας για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας εξόδου των μύλων διακόπηκε τελείως (0 %).
- Η πίεση του συστήματος θερμού αέρα αυξήθηκε στα 100 mmWG.
- Η ροή του θερμού αέρα αυξήθηκε στα 1,050,000 m³/h.
- Οι υπόλοιπες ρυθμίσεις (κενό λέβητα, dumperδιαχωρισμού, πάχος στρώματος λιγνίτη στους τροφοδότες κλπ.) διατηρήθηκε ίδιο με την κατάσταση λειτουργίας 4.

Για τις καταστάσεις λειτουργίας 1 και 4 έγιναν λεπτομερείς αναλύσεις των διεργασιών και των επιδράσεων των ρυθμίσεων. Στην κατάσταση λειτουργίας 1, η λειτουργία του λέβητα μελετήθηκε «ως έχει» ενώ στην κατάσταση λειτουργίας 4 η λειτουργία του λέβητα μελετήθηκε κάνοντας ρυθμίσεις με στόχο να ελαττωθούν οι

έντονες θερμικές φορτίσεις και το φαινόμενο της έντονης ρύπανσης και της πτώσεις λεβητολίθων στο πυθμένα του λέβητα. Οι απαραίτητες μετρήσεις και δειγματοληψίες για τον προσδιορισμό του ισοζυγίου αέρα και θερμότητας εκτελέστηκαν μόνο για τις δύο αυτές καταστάσεις λειτουργίας.

Παράλληλα με τις δειγματοληψίες και τις μετρήσεις των παραμέτρων των διεργασιών, έγιναν και οι εξής ενέργειες:

- Μετρήσεις και δειγματοληψίες κονιορτοποιημένου λιγνίτη και για τους υπόλοιπους μύλους (M43, M45, M46, M47 και M48).
- Μετρήσεις της πτώσης πίεσης κατά μήκος της περιοχής του λέβητα όπου κινούνται οι αέριες μάζες, από τον εξολκέα σκωρίας μέχρι τον αγωγό του ανεμιστήρα αναρρόφησης καυσαερίων.

Οι υπόλοιπες τρεις καταστάσεις λειτουργίας (2, 3 και 5) έγιναν με σκοπό να προσδιοριστεί η ανταπόκριση του λέβητα στις τροποποιήσεις των ρυθμίσεων των διεργασιών. Έχοντας υπόψη ότι ο λέβητας κατά τη διάρκεια των ελέγχων είχε έντονη ρύπανση στο εσωτερικό του, οι αναφερθείσες ρυθμίσεις δεν είχαν καμία θετική επίδραση στο υπό μελέτη φαινόμενο της πτώσης των λεβητολίθων στον πυθμένα του λέβητα. Κατά τη διάρκεια μάλιστα της κατάστασης λειτουργίας 3, όταν ελαττώθηκε η παροχή θερμού αέρα παρουσιάστηκαν ανωμαλίες στη θερμική κατάσταση του λέβητα.

11.3.4. Ισοζύγιο αέρα και Θερμότητας

Προκειμένου να προσδιοριστούνε τυχών απώλειες σχετικά με τη διεργασία της καύσης θερμότητας έγινε έλεγχος ισοζυγίου θερμότητας και μάζας. Ο προσδιορισμός του βαθμού απόδοσης του λέβητα έγινε βάσει του προτύπου DIN1942 υπολογίζοντας τον έμμεσα από τις απώλειες. Οι απαραίτητοι για τους υπολογισμούς παράμετροι του κυκλώματος νερού - ατμού συγκεντρώθηκαν από τα καταγραφικά όργανα του Control και οι υπόλοιπες τιμές συγκεντρώθηκαν με απευθείας μέτρηση.

Παράλληλα με τον προσδιορισμό του βαθμού απόδοσης του λέβητα έγιναν και όλοι οι απαραίτητοι έλεγχοι για τον προσδιορισμό του ισοζυγίου αέρα (σύσταση και θερμοκρασία καυσαερίων προ και μετά LUVΟ, περίσσεια αέρα και συνολική παροχή καυσαερίων). Στον Πίνακα 9-11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων

και των υπολογισμών για τον προσδιορισμό βαθμού απόδοσης του λέβητα και στον Πίνακα 9-12 και στις Εικόνες και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με το ισοζύγιο του αέρα.

Από τα αποτελέσματα προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Κατά τη διενέργεια των θερμικών ελέγχων χρησιμοποιήθηκε λιγνίτης υψηλότερης θερμογόνου δύναμης από αυτή του σχεδιασμού γεγονός που επηρέασε αυξητικά τη θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων.
- Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων (201°C για την κατάσταση λειτουργίας 1 και 199°C για την κατάσταση λειτουργίας 2) καταγράφηκε 45°C πάνω από τη θερμοκρασία σχεδιασμού μειώνοντας σημαντικά την απόδοση του λέβητα και των ηλεκτροστατικών φίλτρων. Ένας επιπλέον λόγος για τον οποίο αυξάνεται τόσο πολύ η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων εκτός από τις ακατάλληλες συνθήκες καύσης και τη ρύπανση του λέβητα, είναι και η μικρή ποσότητα φρέσκου αέρα που προέρχεται από τα LUVO. Συγκεκριμένα, η ποσότητα του αέρα που εισάγεται στο λέβητα (πρωτεύων και δευτερεύων) είναι στα επίπεδα του θεωρητικού αέρα που απαιτείται για την επίτευξη καύσης του λιγνίτη στην κατάσταση λειτουργίας 1 και πολύ πιο κάτω από την κρίσιμη ποσότητα αέρα για την κατάσταση λειτουργίας 4 (ο θεωρητικά απαιτούμενος αέρας υπολογισμένος βάσει των στοιχειομετρικών εξισώσεων είναι 1,123,000 m³/h).
- Στον Πίνακα 9-11 παρουσιάζεται η ροή αέρα για παροχή ατμού 950 t/h και λιγνίτη με τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού.
- Η μεγάλη ποσότητα οξυγόνου στα καυσαέρια πριν από το LUVO δηλώνει μεγάλες ποσότητες παρασιτικού αέρα (669,000 m³/h για την κατάσταση λειτουργίας 1 και 535 m³/h για την κατάσταση λειτουργίας 4)

Πίνακας 11-11 : Δεδομένα υπολογισμού βαθμού απόδοσης λέβητα

Item No.	Description	Unit	Test No. 1 16.09.2004	Test No. 4 17.09.2004
1.	Unit load at generator	MW	310	314
2.	Air temperature: before Ljungstrom	°C	<u>42</u>	<u>41</u>
	after Ljungstrom		324	324
3.	Flue gas temperature: before Ljungstrom	°C	339	<u>342</u>
	after Ljungstrom		201	199
4.	Lignite analysis:			
	- moisture content	%	52,70	50,90
	- ash content	%	14,10	13,50
	- volatile matter	%	17,10	17,70
	- Fix carbon- C _{fl>} :	%	12,50	14,10
	- CO ₂ - carbonate	%	3,60	3,80
	- Carbon- C	%	19,21	20,84
	- Hydrogen- H	%	1,47	1,64
	- Sulfur- S	%	0,40	0,51
	- Nitrogen- N	%	0,53	0,57
	- Oxygen- O	%	7,99	8,29
	- Upper Heating Value	kJ/kg	7.360	7.938
- Lower Heating Value	kJ/kg	5.744	6.330	
5.	Bottom ash:			
	- amount on wet bases	kg/h	7.840	10.920
	- amount on dry bases	kg/h	3.890	5.600
	- moisture content	%	50,40	48,80
	- ash content	%	41,90	41,70
	- combustible matter content	%	7,70	9,50
	- CO ₂	%	1,94	1,81
- Lower Heating Value (dry bases)	kJ/kg	1.738	1.972	
6.	Fly ash combustible matter content	%	0,28	0,28

Item No.	Description	Unit	Test No. 1 16.09.2004	Test No. 4 17.09.2004
7.	Flue gas composition O ₂ : before Ljungstrom	%	<u>7,6</u>	<u>5,4</u>
	after Ljungstrom		8,4	6,5
8.	Surplus of air coefficient: before Ljungstrom		1,57	1,35
	after Ljungstrom		1,67	1,45
9.	Heat losses due to:			
	- unburned in bottom ash	%	0,21	0,32
	- unburned in fly ash	%	0,98	0,88
	- physical heat of bottom and fly ash	%	0,59	0,53
	- physical heat of flue gas	%	16,99	14,81
	- radiation in the surrounding	%	0,30	0,30
10.	Total heat losses	%	19,07	16,84
11.	BOILER HEAT EFFICIENCY**	%	80,93	83,16

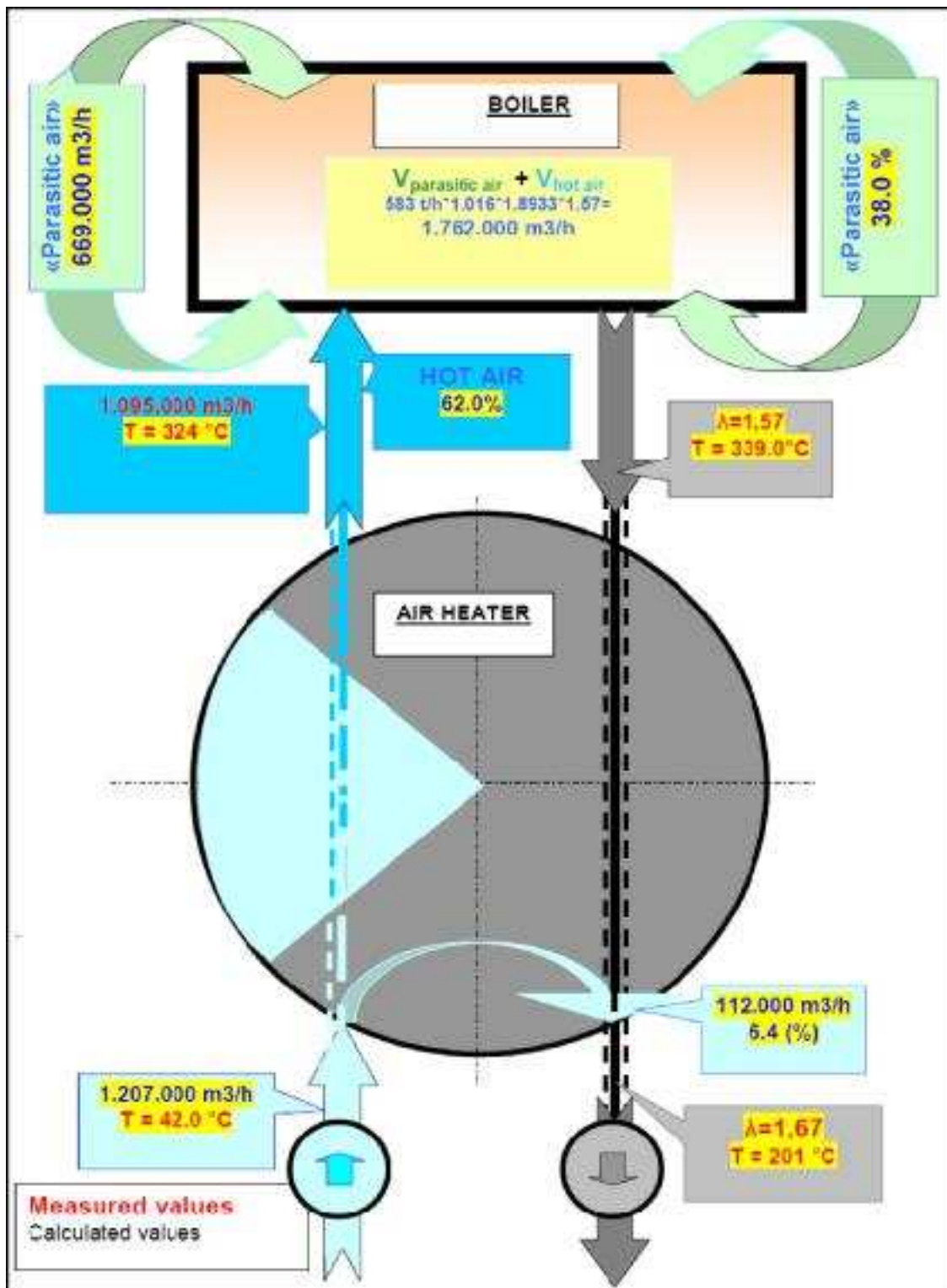
Πίνακας 11-12 : Δεδομένα υπολογισμού ισοζυγίου αέρα

Item No.	Description	Unit	Test No. 1 16.09.2004	Test No. 4 17.09.2004
1.	Lignite flow	t/h	583	541
2.	Theoretically needed air (stehiometric)	m ³ /kg	1,8933	2,0761
3.	Total theoretically needed air flow	m ³ /h	1.104.000	1.123.000
4.	Surplus of air coefficient: <u>before Ljungstrom</u>		<u>1,57</u>	<u>1,35</u>
	after Ljungstrom		1,67	1,45
5.	Air in the flue gases at Ljungstrom- inlet	m ³ /h	1 762 000	1 523 000
6.	Air flow at the Ljungstrom- inlet	m ³ /h	1.207.000	1.099.000
7.	Air leakage into flue gas at Ljungstrom	m ³ /h	112.000	111.000
8.	Hot air flow at the Ljungstrom- outlet	m ³ /h	1.095.000	988.000
9.	Parasitic air flow into the boiler gas tract	m ³ /h	669.000	535.000
10.	Hot or parasitic air flow into the boiler: <u>Controlled air</u>	%	<u>62</u>	<u>65</u>
	Parasitic (intrusion of) air	%	38	35
11.	Air heater un-tightness	%	6,4	7,4

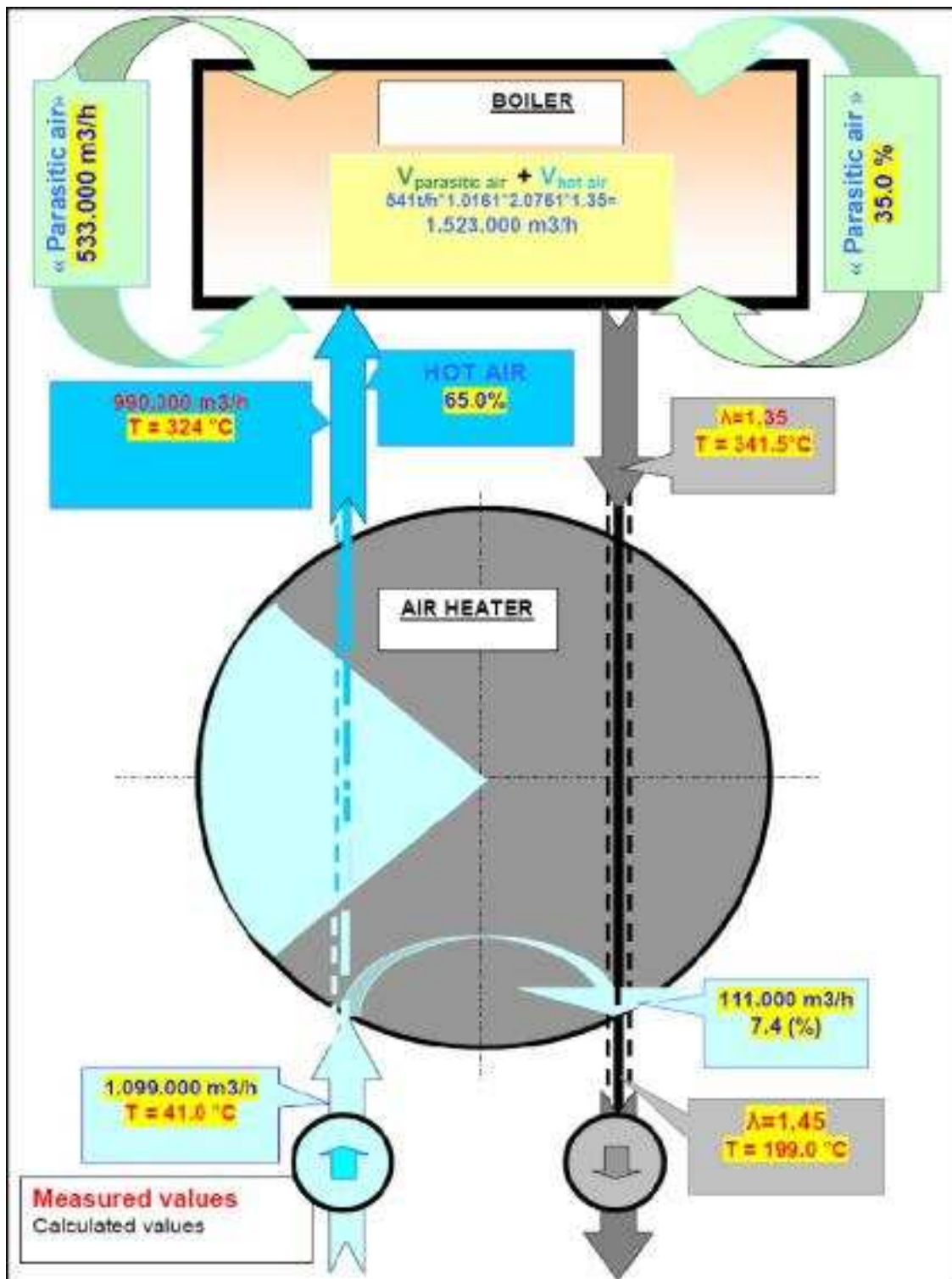
- Ο παρασιτικός αέρας στα καυσάερια, όπως έχει προβλέψει ο κατασκευαστής, δεν πρέπει να ξεπερνάει την τιμή των 90,000 m³/h. Κατά τις

μετρήσεις εντοπίστηκε διαρροή αέρα μεγέθους $110,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 22 % πάνω από την τιμή σχεδιασμού. Σε ορισμένες μετρήσεις η διαρροή αέρα στα καυσαέρια ήταν μικρότερη από αυτή του κατασκευαστή ($31,000 \text{ m}^3/\text{h}$). Από το γεγονός αυτό καθώς και από αντίστοιχες μετρήσεις που γίνανε και σε όμοια μονάδα, συμπεραίνεται πως υπάρχει αρκετά μεγάλο περιθώριο περιορισμού της διαρροής παρασιτικού αέρα στα καυσαέρια.

- Η ποσότητα της τέφρας στον πυθμένα, η οποία υπολογίστηκε με άμεση μέτρηση ($3,890 \text{ kg/h}$ και $5,600 \text{ kg/h}$), δεν είναι μεγάλη έχοντας πάντα υπόψη το μέγεθος του λέβητα και τα χαρακτηριστικά του λιγνίτη. Αυτό το γεγονός συνεπάγεται πως οι απώλειες θερμότητας λόγω ακαύστων στην υγρή τέφρα είναι σε πολύ καλά (χαμηλά) επίπεδα για λέβητα λιγνίτη.
- Η ποσότητα ακαύστων στην ιπτάμενη τέφρα είναι επίσης σε πολύ χαμηλά επίπεδα έχοντας έτσι μικρές απώλειες θερμότητας. Οι μικρές ποσότητες ακαύστων στην υγρή και στην ιπτάμενη τέφρα καθώς και οι μικρές απώλειες θερμότητας εξηγούνται από το γεγονός ότι ο λιγνίτης είναι πολύ καλά κονιορτοποιημένος και λόγω του ότι εντός του λέβητα επικρατούν πολύ υψηλές θερμοκρασίες.



Εικόνα 11-4 : Ισοζύγιο αέρα στην κατάσταση λειτουργίας 1



Εικόνα 11-5 : Ισοζύγιο αέρα στην κατάσταση λειτουργίας 4

- Συνολικά για την κατάσταση λειτουργίας 1 έχει παρατηρηθεί υψηλό ποσοστό παρασιτικού αέρα και πολύ μικρός βαθμός απόδοσης, στο 80.9 %. Για την κατάσταση λειτουργίας 4 ο βαθμός του λέβητα βελτιώθηκε λίγο πάνω από 83 %. Οι δύο τιμές είναι αρκετά κάτω από το βαθμό απόδοσης που δίνει ο κατασκευαστής (86.29 % για ατμοπαραγωγή 950 t/h).

Η ποσότητα του παρασιτικού που διεισδύει στο λέβητα, η οποία υπολογίστηκε μεταξύ 35 % και 38 % του συνολικού αέρα, είναι πολύ υψηλή ειδικά από τη στιγμή που το ποσοστό αυτό δεν περιλαμβάνει και τον παρασιτικό αέρα στα LUNO. Οι περιοχές οι οποίες έχουν τη μεγαλύτερη εισβολή παρασιτικού αέρα είναι οι εξής: οι ταινιόδρομοι των μύλων, ο πυθμένας του λέβητα και τα ανοίγματα ανακυκλοφορίας θερμών καυσαερίων.

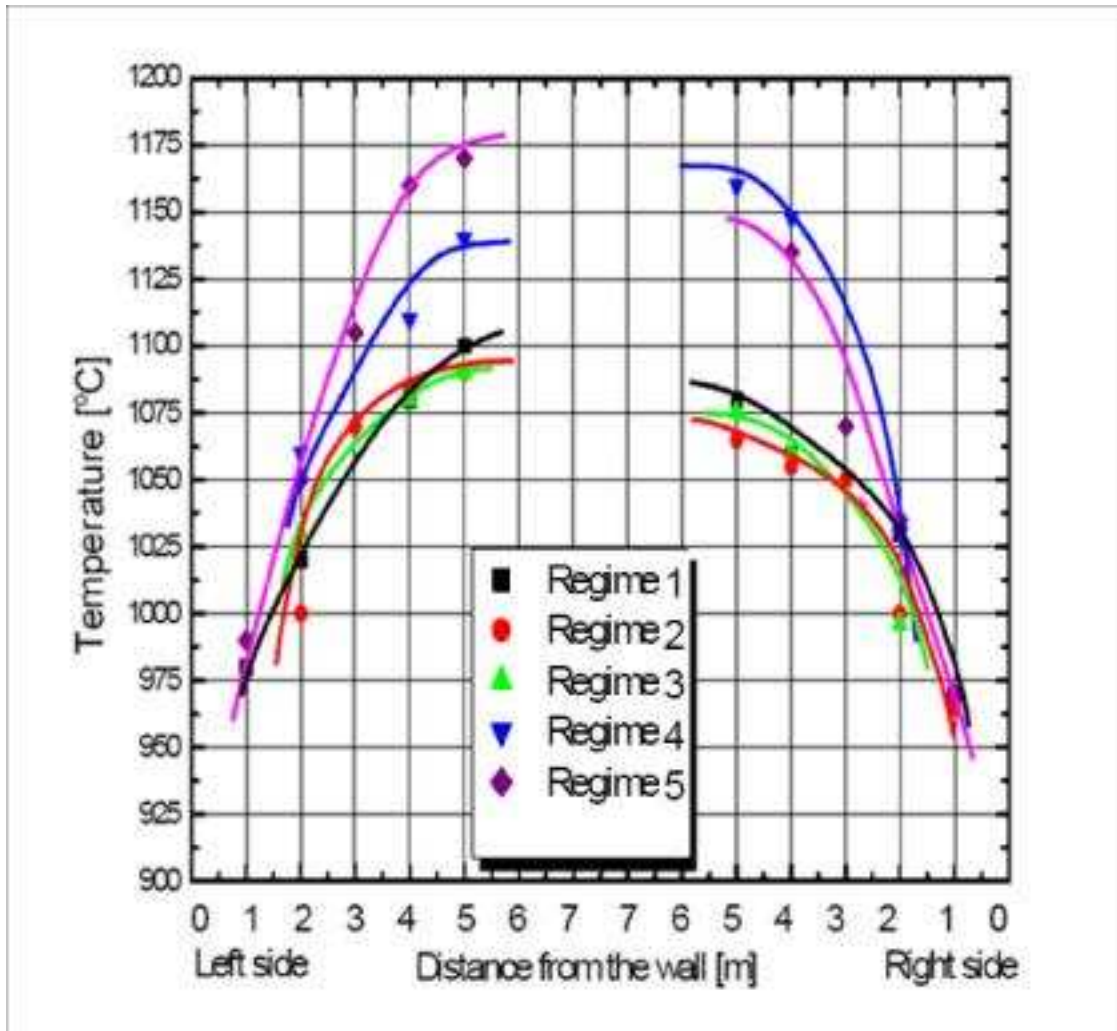
Οι θερμικοί έλεγχοι και στις δύο καταστάσεις λειτουργίας εκτελέστηκαν με διακυμάνσεις των ελεγχόμενων παραμέτρων. Οι διακυμάνσεις αυτές ήταν εντός των αποδεκτών ορίων προκειμένου να μπορούν να εξαχθούν τα απαραίτητα δεδομένα για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του λέβητα.

11.3.5. Θερμικοί έλεγχοι συνθηκών λειτουργίας του θαλάμου καύσης και των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας

Στόχος των θερμικών ελέγχων του θαλάμου καύσης είναι να προσδιοριστούν οι οριακές συνθήκες λειτουργίας. Σημειώνεται ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των καταστάσεων λειτουργίας. Για το λόγο αυτό οι συνθήκες αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά για κάθε κατάσταση λειτουργίας. Συγκεκριμένα, προκειμένου να γίνουν κατανοητά τα αποτελέσματα των ελέγχων σε κάθε κατάσταση λειτουργίας, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να ληφθεί υπόψη επαρκής αριθμός οριακών συνθηκών (ποσότητα κονιορτοποιημένου λιγνίτη, χαρακτηριστικά κονιορτοποιημένου λιγνίτη, ποσότητα και χαρακτηριστικά μίγματος αερίων, ποσότητα θερμού και παρασιτικού αέρα που εισάγεται στο θάλαμο καύσης).

Η μελέτη της λειτουργίας του θαλάμου καύσης προσανατολίστηκε στον προσδιορισμό των συνθηκών λειτουργίας του σε όλες τις καταστάσεις λειτουργίας. Συγκεκριμένα, κάνοντας χρήση εξελιγμένου εξοπλισμού και μετρητικών συσκευών, προσδιορίστηκαν οι εξής παράμετροι: θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης και εκπομπές θερμών καυσαερίων ήταν οι κύριες παράμετροι καθώς και η ποσότητα της καύσιμης ύλης.

Οι πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες ελέγχου και τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν παρουσιάζονται ξεχωριστά για κάθε κατάσταση λειτουργίας στους Πίνακες 9-13 έως 9-17 και συνολικά στο Διάγραμμα 9-21.



Διάγραμμα 11-21 : Θερμικοί έλεγχοι θαλάμου καύσης στις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας

Πίνακας 11-13 : Αποτελέσματα θερμικών ελέγχων – Κατάσταση λειτουργίας 1 «ως έχει» (950 t/h, 325 MWe, μύλος 46 εκτός λειτουργίας)

Level [m]	Opening ¹ [No.]	Flue gas temperatures [°C]						Emitted heat flux [W/cm ²]	Unburned and CO ₂ - carbonate in furn. fly ash [%]	
		Designed mean value ²	Measured with suction pyrometers at distances (from the inner boiler wall) [m]							Measured with optical ³ pyrometer
			1,0	2,0	3,0	4,0	5,0			
20,5	1f 1l 1b 1r	-								
25,0	2f 2l 2b 2r	-								
36,9	4f 4l 4b 4r	-					1170 1050 1100 1060	8,9 8,2 8,3 8,4		
43,5	5l 5r	-	980 970	1020 1030	- -	1080 1060	1100 1090	1060 1030		
47,045	6l 6r	866 SH2-SH3					970 - 1000 940 - 950			
49,075	7l 7r	812 SH3-RH2					890 - 920 860 - 890			
55,82	8l 8r	598 SH1b-RH1b					680 660			

- (1) βλέπε εικόνα λέβητα
 (2) βλέπε δεδομένα κατασκευαστή
 (3) η οπτική ορατότητα διαμέσου των καυσαερίων ξεπερνούσε τα 2.7 μέτρα

Οι θερμοκρασίες των αερίων ανακυκλοφορίας μετρήθηκαν με τη χρήση οπτικού πυρομέτρου [°C] σε ύψος 36.76 μέτρα (είσοδος καναλιού αερίων ανακυκλοφορίας): RG41 = 940, RG42 = 1020, RG43 = 1050, RG44 = 1040, RG45 = 1060, RG46 = 1070, RG47 = 970, RG48 = 940

Πίνακας 11-14 : Αποτελέσματα θερμικών ελέγχων – Κατάσταση λειτουργίας 1 (900 t/h, 305 MWe, μύλος 42 εκτός λειτουργίας)

Level [m]	Opening [No.]	Flue gas temperatures [°C]					Measured with optical ⁽¹⁾ pyrometer	Emitted heat flux [W.'cm ³]	Unburned and CO ₂ - carbonate in furn. fly ash [%]	
		Designed mean value [^]	Measured with suction pyrometers at distances (from the inner boiler wall) [m]							
			1.0	2.0	3.0	4.0				5.0
20.5	1f 11 1b 1r	-								
25.0	2f 2l 2b 2r	-								
36.&	41 4l 4b 4r	-								
43.5	5l 5r	-	965 -	1000 1000	1050 1070	1055 1035	1060 1090			
47.045	6l 6r	866 SH2-SH3								
4&.075	7l 7r	812 SH3-RH2								
55,S2	8l 8r	568 SH1b-RH1b								

(1) βλέπε εικόνα λέβητα

(2) βλέπε δεδομένα κατασκευαστή

(3) η οπτική ορατότητα διαμέσου των καυσαερίων ξεπερνούσε τα 2.7 μέτρα

Οι θερμοκρασίες των αερίων ανακυκλοφορίας μετρήθηκαν με τη χρήση οπτικού πυρομέτρου [°C] σε ύψος 36.76 μέτρα (είσοδος καναλιού αερίων ανακυκλοφορίας): RG41 = 940, RG42 = 1020, RG43 = 1050, RG44 = 1040, RG45 = 1060, RG46 = 1070, RG47 = 970, RG48 = 940

Πίνακας 11-15 : Αποτελέσματα θερμικών ελέγχων - Κατάσταση λειτουργίας 2 (916 t/h, 300 MWe, μύλος 42 εκτός λειτουργίας)

Level [m]	Opening [No.]	Flue gas temperatures [°C]					Measured with optical ³ pyrometer	Emitted heat flux [W/cm ²]	Unburned and CO ₂ - carbonate in furn. fly ash [%]	
		Designed mean value ²	Measured with suction pyrometers at distances (from the inner boiler wall) [m]							
			1,0	2,0	3,0	4,0				5,0
20,5	1f 1l 1b 1r	-								
25,0	2f 2l 2b 2r	-								
36,9	4f 4l 4b 4r	-					1070 - 1100 1040 1070 - 1130 1050	8,8 8,1 8,9 8,3		
43,5	5l 5r	-	-	1030 996	-	1080 1060	1090 1075			
47,045	6l 6r	866 SH2-SH3								
49,075	7l 7r	812 SH3-RH2								
55,82	8l 8r	588 SH1b-RH1b								

- (1) βλέπε εικόνα λέβητα
- (2) βλέπε δεδομένα κατασκευαστή
- (3) η οπτική ορατότητα διαμέσου των καυσαερίων ξεπερνούσε τα 2.7 μέτρα

Οι θερμοκρασίες των αερίων ανακυκλοφορίας μετρήθηκαν με τη χρήση οπτικού πυρομέτρου [°C] σε ύψος 36.76 μέτρα (είσοδος καναλιού αερίων ανακυκλοφορίας): RG41 = 940, RG42 = 1020, RG43 = 1050, RG44 = 1040, RG45 = 1060, RG46 = 1070, RG47 = 970, RG48 = 940

Πίνακας 11-16 : Αποτελέσματα θερμικών ελέγχων – Κατάσταση λειτουργίας 3 (925 t/h, 308 MWe, μύλος 44 εκτός λειτουργίας)

Level [Y1]	Opening [No.]	Flue gas temperatures [oC]					Measured with optical ¹ , pyrometer	Emitted heat flux [W/cm ²]	Unburned and CO ₂ - carbonate in furn. fly ash [%]	
		Designed mean value ²	Measured with suction pyrometers at distances (from the inner boiler wall) [m]							
			1,0	2.0	3.0	4,0				5.0
20,5	1f 11 1b 1 r	-								
25,0	2f 21 2b 2r	-								
36 ,5	4f 41 4b 4r	-								
4-3,5	51 5r	-	-	1030 10B0	-	1 150 1110	1160 1140			
47,045	61 Er	8G6 SH2-SH3								
45,075	71 7r	812 SH3-RH2								
□ 5.82	8l 8r	588 SH1b-RH1b								

(1) βλέπε εικόνα λέβητα

(2) βλέπε δεδομένα κατασκευαστή

(3) η οπτική ορατότητα διαμέσου των καυσαερίων ξεπερνούσε τα 2.7 μέτρα

Οι θερμοκρασίες των αερίων ανακυκλοφορίας μετρήθηκαν με τη χρήση οπτικού πυρομέτρου [°C] σε ύψος 36.76 μέτρα (είσοδος καναλιού αερίων ανακυκλοφορίας): RG41 = 940, RG42 = 1020, RG43 = 1050, RG44 = 1040, RG45 = 1060, RG46 = 1070, RG47 = 970, RG48 = 940

Πίνακας 11-17 : Αποτελέσματα θερμικών ελέγχων – Κατάσταση λειτουργίας 4 (905 t/h, 320 MWe, μύλος 44 εκτός λειτουργίας)

Level [m]	Opening 1 [No.]	Flue gas temperatures [°C]						Emitted heat flux [W/cm ²]	Unburned and CO ₂ - carbonate in furn. fly ash [%]	
		Designed mean value"	Measured with suction pyrometers at distances (from the inner boiler wall) [m]							Measured with optical pyrometer
			1,0	2,0	3,0	4,0	5,0			
20.5	1T	-						1140-1170	10.3	
	11							1200-1220	12.7	
	1b							1030-1100	9.7	
	1r							1010-1070	7.7	
25.0	2f	-								
	21									
	2b									
	2r									
36.9	4f	-						1110	3.6	
	41							1160	9.2	
	4b							1150	9.2	
	4r							1080	3.6	
43.5	51	-	990	1050	1105	1160	1170			14.7-15,6
	5r		970	1035	1070	1135	1140			16,9-17,2
47.045	61	866								
	6r	SH2-SH3								
49.075	71	812								
	7r	SH3-RH2								
55,82	81	588								
	8r	SH1b-RH1b								

(1) βλέπε εικόνα λέβητα

(2) βλέπε δεδομένα κατασκευαστή

(3) η οπτική ορατότητα διαμέσου των καυσαερίων ξεπερνούσε τα 2.7 μέτρα

Οι θερμοκρασίες των αερίων ανακυκλοφορίας μετρήθηκαν με τη χρήση οπτικού πυρομέτρου [°C] σε ύψος 36.76 μέτρα (είσοδος καναλιού αερίων ανακυκλοφορίας): RG41 = 940, RG42 = 1020, RG43 = 1050, RG44 = 1040, RG45 = 1060, RG46 = 1070, RG47 = 970, RG48 = 940

Από τη σύγκριση των συμβατικών χαρακτηριστικών λιγνίτη με αυτά του λιγνίτη που χρησιμοποιήθηκε (Πίνακας 9-18) κατά τη διενέργεια των θερμικών ελέγχων, παρατηρείται απόκλιση 4 % με 15 % πάνω. Επίσης η υγρασία αποκλίνει 4.3 % με 6.1 % προς τα κάτω ενώ το ποσοστό τέφρας είναι αυξημένο κατά 0.5 % με 1.1 %.

Πίνακας 11-18 : Χαρακτηριστικά λιγνίτη θερμικών ελέγχων θαλάμου καύσης

Lignite characteristics (as received)	Guaranteed values	Regime No. 1	Regime No. 4
Low Heating Value [kJ/kg]	5.530	5.744	6.330
Moisture [%]	57,0	52,70	50,90
Ash [%]	13,0	14,10	13,50
Combustible ¹ [%]	30,0	33,2	35,6

Σημείωση: συμπεριλαμβάνεται και το ποσοστό CO₂των ανθρακικών αλάτων

Η τιμή της θερμοκρασίας στην έξοδο του θαλάμου καύσης δεν ήταν δυνατόν να μετρηθεί άμεσα λόγω της απουσίας κατάλληλων ανοιγμάτων. Αντί αυτού, η θερμοκρασία εξόδου από το θάλαμο καύσης εκτιμήθηκε έμμεσα μετρώντας τη θερμοκρασία στα 43.5 μέτρα (στο κατακόρυφο μέσο του υπέρθερμου 2) προσθέσουμε σε αυτή το μισό της πτώσης θερμοκρασίας στον υπέρθερμο 2 (107/2 = 50). Από τα παραπάνω στοιχεία εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- **Κατάσταση Λειτουργίας 1**

- Στην κατάσταση λειτουργίας η μέγιστη θερμοκρασία που καταγράφηκε στη έξοδο του θαλάμου καύσης ήταν 1,110 °C- 1,140°C περίπου 140°C με 170°C πάνω από τη θερμοκρασία σχεδιασμού. Η τιμή αυτή της θερμοκρασίας εξόδου από το θάλαμο καύσης επιβεβαιώθηκε μετά από μέτρηση της θερμοκρασίας με οπτικό πυρόμετρο στα ανοίγματα αναρρόφησης των αγωγών ανακυκλοφορίας η οποία κυμαινόταν μεταξύ 1,050 °C- 1,170 °C.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις οι μετρούμενες θερμοκρασίες στα 43.5 μέτρα ήταν ακόμη υψηλότερες από τις αρχικές.
- Οι θερμοκρασίες των καυσαερίων που καταγράφηκαν με το οπτικό πυρόμετρο έχουν ως εξής:

- ✓ Μεταξύ SH1 και SH2 η μετρούμενη θερμοκρασία ήταν μεταξύ 940 °C και 1,000 °C (70 °C με 130 °C πάνω από τη θερμοκρασία κατασκευαστή δηλαδή τους 866 °C)
- ✓ Μεταξύ SH3 και RH2 η μετρούμενη θερμοκρασία ήταν μεταξύ 860 °C και 920 °C (50 °C με 100 °C πάνω από τη θερμοκρασία κατασκευαστή δηλαδή τους 812 °C)
- ✓ Μεταξύ SH 1b και RH 1b η μετρούμενη θερμοκρασία ήταν μεταξύ 660 °C και 680 °C (70 °C με 90 °C πάνω από τη θερμοκρασία κατασκευαστή δηλαδή τους 588 °C)

- **Κατάσταση Λειτουργίας 2**

- Κατά τη διάρκεια των ελέγχων στην κατάσταση λειτουργίας 2 έγινε προσπάθεια να ρυθμιστούν οι συνθήκες καύσης αυξάνοντας τη ροή του αέρα στη μέγιστη τιμή που μπορούσαν να υποστηρίξουν οι ανεμιστήρες καυσαερίων. Πέρα από τη μικρή πτώση των θερμοκρασιών σε κάποια σημεία πιο κάτω από την έξοδο του θαλάμου καύσης οι οποίες καταγράφηκαν στα ανοίγματα αναρρόφησης των αγωγών ανακυκλοφορίας στα 36.9 μέτρα (1,040 °C- 1,130°C), η θερμοκρασία εξόδου από το θάλαμο καύσης παρέμεινε ίδια με αυτή που καταγράφηκε στην κατάσταση λειτουργίας 1 (1,115 °C- 1,130 °C, δηλαδή περίπου 10 °C κάτω). Οι μετρήσεις αυτές έρχονται σε απόλυτη συμφωνία με τα εκπεμπόμενα θερμικά φορτία τα οποία καταγράφηκαν (8.45 W/cm² για την κατάσταση λειτουργίας 1 και 8.5 W/cm² για την κατάσταση λειτουργίας 2).

- **Κατάσταση Λειτουργίας 3**

- Όπως ήταν αναμενόμενο, μειώνοντας τη ροή αέρα αυξήθηκε η θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης. Συγκεκριμένα, στην έξοδο του θαλάμου καύσης η θερμοκρασία διακυμάνθηκε μεταξύ 1,190 °C και 1,220 °C επιβεβαιώνοντας έντονες ανωμαλίες στις συνθήκες μεταφοράς θερμότητας στο εσωτερικό του.

- **Κατάσταση Λειτουργίας 4**

- Στην κατάσταση λειτουργίας 4 εφαρμόστηκαν όλες οι δυνατές ρυθμίσεις για τη βελτίωση των θερμικών συνθηκών στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης, υπό τις συνήθεις συνθήκες ροής και για μέγιστο φορτίο μονάδας

(320 MW). Τονίζεται πως η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του λιγνίτη για την κατάσταση λειτουργίας 4 ήταν μεγαλύτερη κατά 10 % από αυτή της 3 (590 KJ/Kg). Παρά λοιπόν την εφαρμογή των βελτιωτικών ρυθμίσεων λειτουργίας η θερμοκρασία στην έξοδο του θαλάμου καύσης δε μεταβλήθηκε. Το γεγονός όμως αυτό οφείλεται ουσιαστικά στην αύξηση της θερμογόνου δύναμης του λιγνίτη η οποία κατέστειλε όλες τις βελτιωτικές επιδράσεις των νέων ρυθμίσεων.

- Στους κάτω - κύριους καυστήρες (άνοιγμα στα 20.5 μέτρα) οι θερμοκρασίες των καυσαερίων καταγράφηκαν μεταξύ 1,010 °C και 1,220 °C. Η μέγιστη θερμοκρασία καταγράφηκε στο άνοιγμα στο μέσω του αριστερού υδροτοιχώματος και η χαμηλότερη στον πίσω υδρότοιχο λόγω ουσιαστικά του ότι ο μύλος M44 ήταν εκτός λειτουργίας. Τα εκπεμπόμενα θερμικά φορτία κυμάνθηκαν μεταξύ 7.7 W/cm² και 12.7 W/cm² (με μέση τιμή τα 10 W/cm²). Όπως ήταν αναμενόμενο η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε στην αριστερή πλευρά του θαλάμου καύσης.
- Στα ανοίγματα αναρρόφησης των αγωγών ανακυκλοφορίας, στα 36.9 μέτρα, οι θερμοκρασίες των καυσαερίων καταγράφηκαν μεταξύ 1,080 °C και 1,160 °C (με μέση τιμή τους 1,125 °C). Οι υψηλότερες θερμοκρασίες καυσαερίων που κατέγραψε το οπτικό πυρόμετρο ήταν στο άνοιγμα στο κατακόρυφο μέσο του αριστερού υδρότοιχου και οι χαμηλότερες στην πίσω πλευρά στα 20.5 μέτρα. Οι εκπομπές θερμικών φορτίων καταγράφηκαν μεταξύ 8.6 W/cm² και 9.2 W/cm² (με μέση τιμή τα 9 W/cm²). Η αύξηση αυτή από την προηγούμενη κατάσταση λειτουργίας εκτιμάται ότι οφείλεται στο ότι η μονάδα λειτουργούσε σε πλήρες φορτίο (320 MW) και στον λιγνίτη υψηλότερης θερμογόνου δύναμης.
- Απροσδόκητα, όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης έφτασε στους 850°C, τα καταγραφικά εντόπισαν υψηλή απώλεια μάζας σωματιδίων από τον όγκο του θαλάμου καύσης. Οι τιμές απώλειας μάζας για την αριστερή πλευρά ήταν μεταξύ 14.7 % και 15.6 % και για τη δεξιά πλευρά μεταξύ 16.9 % και 17.2 %. Κατά μέσο όρο, οι απώλειες μάζας όπως αυτές προέκυψαν από τη δειγματοληψία, ήταν 16.1 % γεγονός που καταδεικνύει μεγάλες απώλειες ακαύστων (5 % - 10 % βάση της κατανομής η οποία έχει υπολογιστεί σε αντίστοιχη μονάδα).

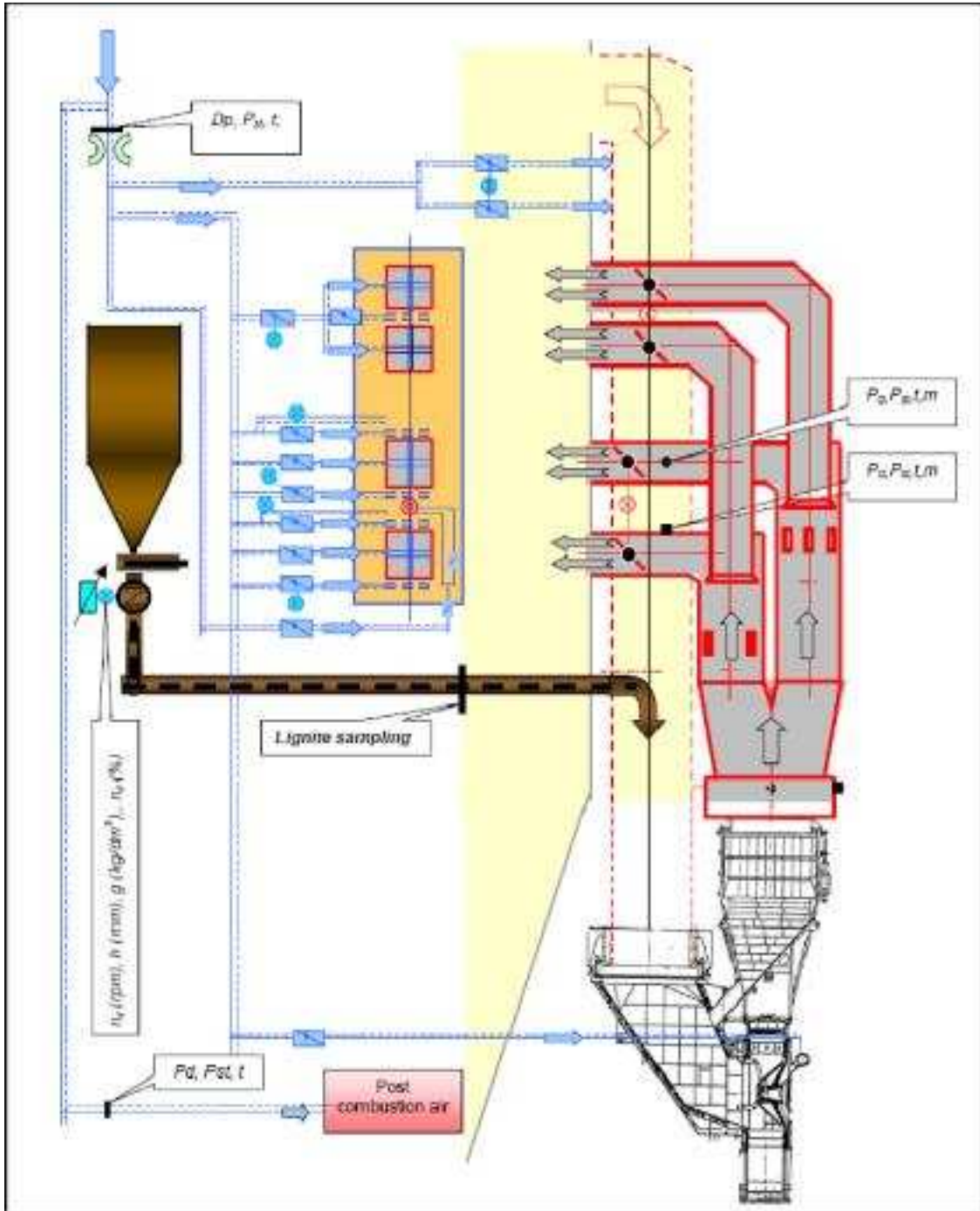
- **Κατάσταση Λειτουργίας 5**

- ο Κατά τις τελευταίες απόπειρες τροποποίησης των συνθηκών στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης, συμπληρωματικά με τις προηγούμενες ενέργειες (χαμηλό κενό στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης, ελεγχόμενο πάχος στρώματος λιγνίτη σε όλους τους τροφοδότες) ο κύριος αέρας ο οποίος εισαγότανε στους μύλους διακόπηκε και η ροή αέρα στους προς τους καυστήρες μεγιστοποιήθηκε. Αποτέλεσμα αυτών των ρυθμίσεων ήταν να μειωθούν ελάχιστα οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης.

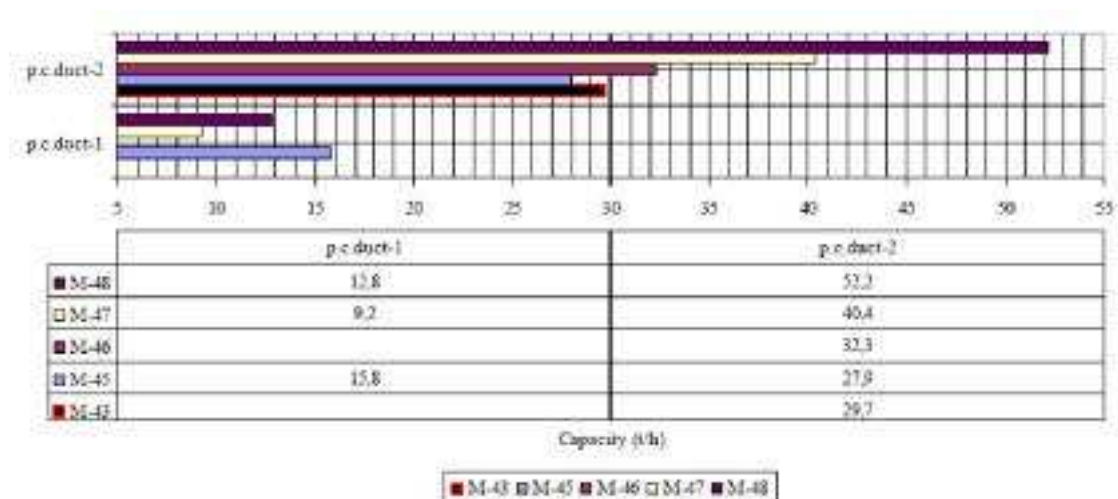
Όλες οι προσπάθειες μείωσης των υπερβολικά υψηλών θερμοκρασιών στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης με στόχο την καταστολή των φαινομένων ρύπανσης απέτυχαν. Ως εκ τούτου δεν υπήρξε μεταβολή στην κινητική του ταχέως σχηματισμού επικαθίσεων αλλά ούτε και στην ένταση και στη συχνότητα πτώσης λεβητολίθων στον πυθμένα του λέβητα.

11.3.6. Έλεγχος λειτουργίας μύλων στα πλαίσια των ελέγχων στην κατάσταση λειτουργίας 1

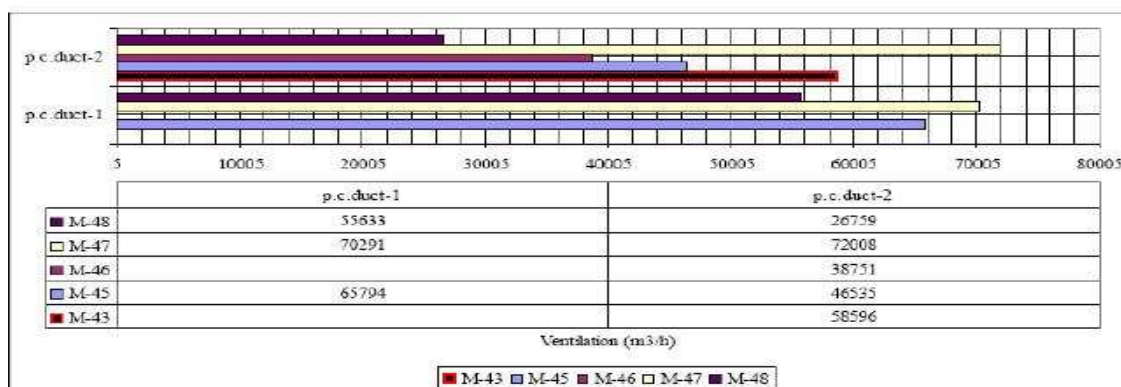
Κατά τη διενέργεια των Ελέγχων στην κατάσταση λειτουργίας 1, έγινε δειγματοληψία και μετρήσεις του κονιορτοποιημένου λιγνίτη των μύλων M43, M45, M46, M47 και M48. Σημειώνεται ότι υπάρχει πιθανότητα εισαγωγής αποκλίσεων των μετρήσεων λόγω της απλοποιημένης μεθοδολογίας (1 σημείο μέτρησης σε κάθε αγωγό - Εικόνα) δειγματοληψίας σε σύγκριση με αυτή των μύλων M41, M42, και M48. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 9- 22 με 9-27.



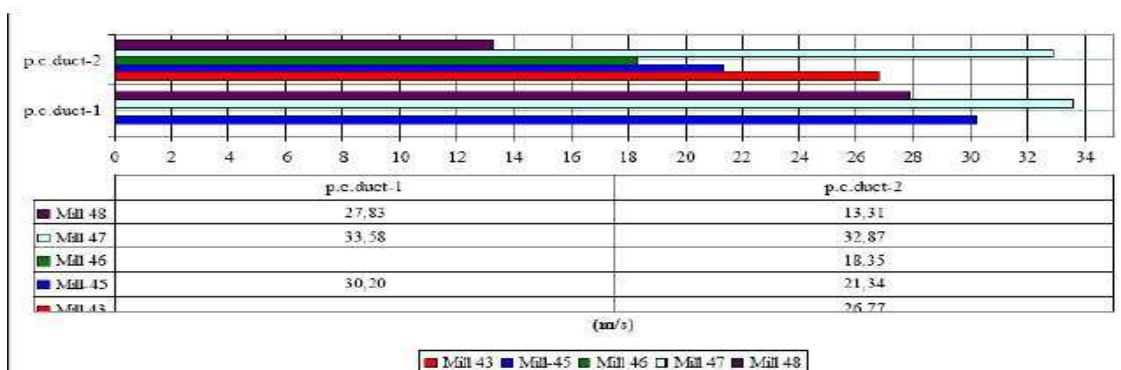
Εικόνα 11-6 : Σημεία μέτρησης κατά τον έλεγχο των Μύλων M43, M45, M46, M47 και M48



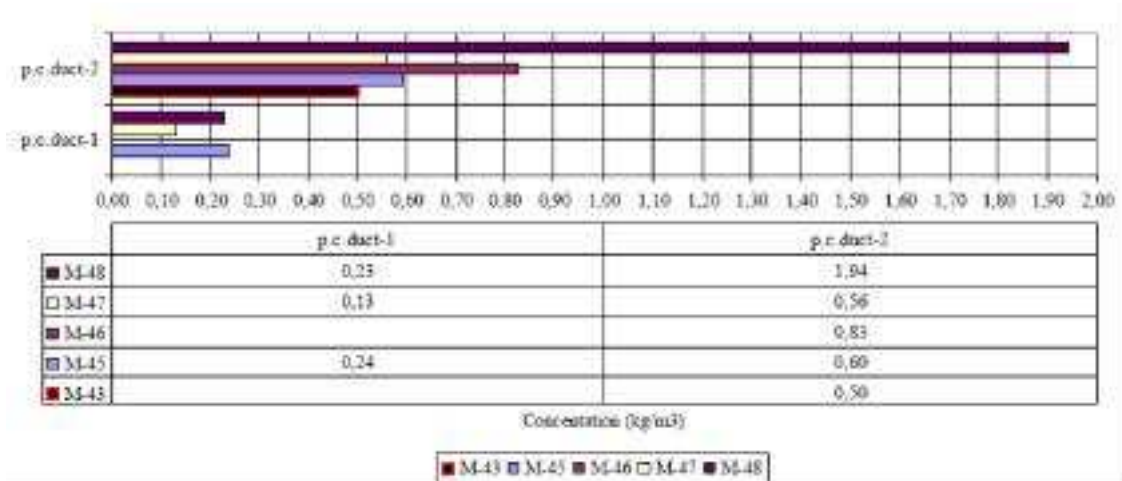
Διάγραμμα 11-22 : Παροχή λιγνίτη στους αγωγούς των Μύλων (Κατάσταση λειτουργίας 1)



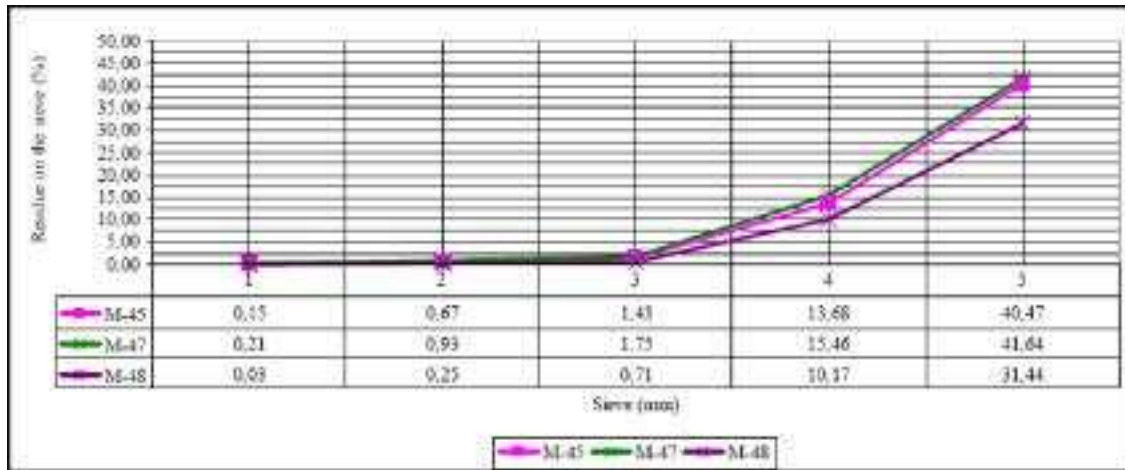
Διάγραμμα 11-23 : Ροή αέρα στους αγωγούς των Μύλων (Κατάσταση λειτουργίας 1)



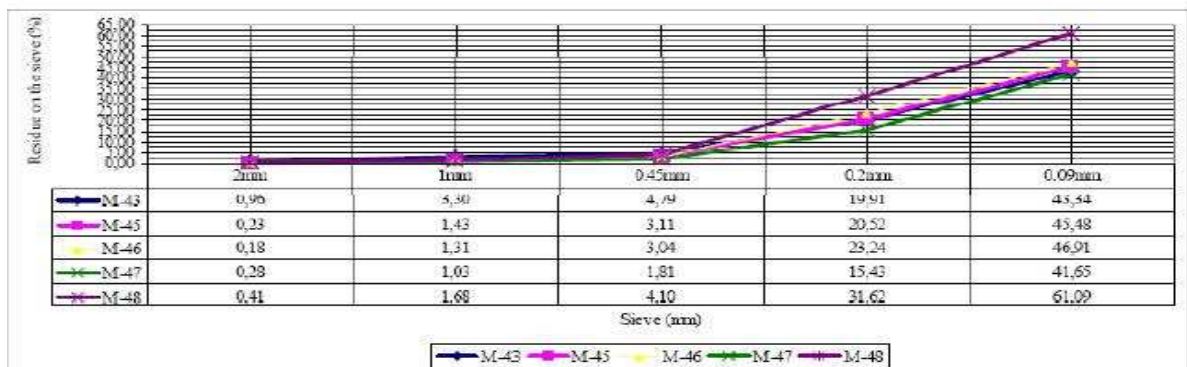
Διάγραμμα 11-24 : Ταχύτητες μίγματος κονιοροτοποιημένου λιγνίτη και αερίων στους Μύλους (Κατάσταση λειτουργίας 1)



Διάγραμμα 11-25 : Συγκέντρωση λιγνίτη στους αγωγούς των Μύλων (Κατάσταση λειτουργίας 1)



Διάγραμμα 11-26 : Ανάλυση κονιορτοποιημένου λιγνίτη στον αγωγό 1 των Μύλων (Κατάσταση λειτουργίας 1)



Διάγραμμα 11-27 : Ανάλυση κοκκομετρίας κονιορτοποιημένου λιγνίτη στην αγωγό 2 των Μύλων (Κατάσταση λειτουργίας 1)

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων συμπεραίνονται τα εξής:

- Λόγω της υψηλής συγκέντρωσης σκόνης πάνω από τον κάτω - κύριο καυστήρα στους μύλους M43 και M46 δεν ήταν δυνατόν να παρθούν μετρήσεις.
- Η παροχή των μύλων καθορίστηκε από το τρέχων φορτίο της μονάδας.
- Η ροή κονιορτοποιημένου λιγνίτη σε όλους τους μύλους ήταν μεγαλύτερη στους άνω - κύριους καυστήρες.
- Μόνο στο μύλο M47 η ροή αερίων στους δύο κύριους καυστήρες ήταν η ίδια. Αντιθέτως στο μύλος M48 η ροή αερίων στον κάτω κύριο καυστήρα ήταν διπλάσια από αυτή στον άνω κύριο καυστήρα. Στους άλλους τρεις μύλους (M43, M45, M46) η ροή αερίων στον άνω κύριο καυστήρα ήταν μικρότερη από αυτή του κάτω κύριου καυστήρα.
- Η συγκέντρωση των σωματιδίων κονιορτοποιημένου λιγνίτη στη ροή των αερίων καταγράφηκε εντός ενός μεγάλου εύρους τιμών (0.13 kg/m^3 έως 1.94 kg/m^3) η οποία οφείλεται στην έντονη διαφοροποίηση της κατανομής του λιγνίτη και των αερίων.
- Η θερμοκρασία του μίγματος αέρα - αερίων ήταν σχετικά σταθερή αλλά σε υψηλά επίπεδα για αυτού του τύπου μύλο. Οι υψηλές θερμοκρασίες επιβεβαιώνουν το μεγάλο περιθώριο αύξησης της παροχής των μύλων το οποίο ελαχιστοποιεί την πιθανότητα μπλοκαρίσματος.
- Η υπολειμματική υγρασία στον κονιορτοποιημένο λιγνίτη καταγράφηκε στα ίδια επίπεδα με τους μύλους M41, M42 και M44 μεταξύ 7.9 % και 13.8 %. Οι τιμές της υγρασίας ήταν σε χαμηλά επίπεδα αλλά σε καλή συσχέτιση με πολύ καλά κονιορτοποιημένα σωματίδια λιγνίτη.
- Τα σωματίδια του κονιορτοποιημένου λιγνίτη ήταν για όλα τα δείγματα υπερβολικά λεπτόκοκκα και μάλιστα σε μεγαλύτερο βαθμό από το αναμενόμενο.

11.3.7. Πτώση πίεσης κατά μήκος της ροής των καυσαερίων

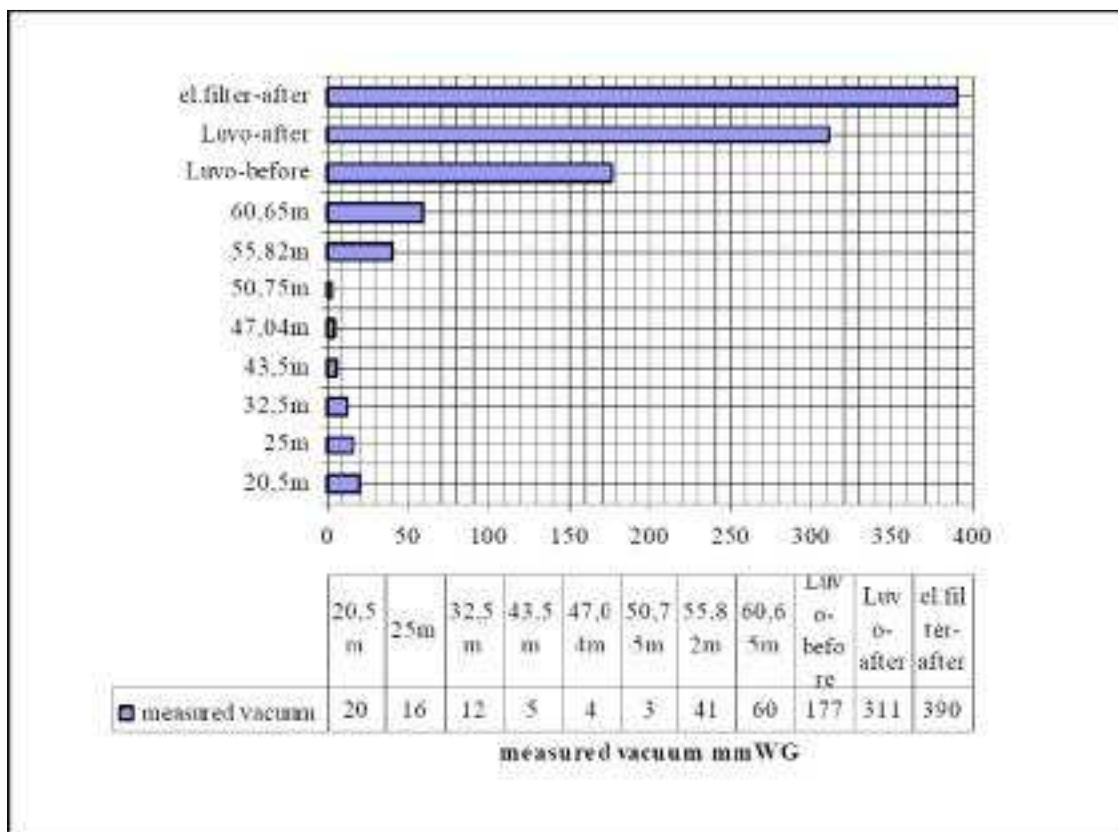
Μετά από ρύθμιση του κενού του θαλάμου καύσης μεταξύ -5 mmWG και 0 mmWG, έγιναν μετρήσεις της πτώσης πίεσης κατά μήκος της ροής των καυσαερίων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-19 σε αντιπαράθεση με τα δεδομένα του κατασκευαστή.

Πίνακας 11-19 : Πίεση λέβητα στη ροή των καυσαερίων (Σχεδιασμού – Μέτρησης)

Opening level (m) Position	Design value (mm WG)	Measured value At reception test (Unit 3/20.3.1981) (mm WG)	Measured value At Regime No. 2 (16.09.2004) (mm WG)
20,5 m Oil burners			- 19
25,0 Vapor burner			- 16
32,5 m Between burners and hot- rec. gas aspiration openings			- 12
43,5 m Inside of SH2 (near above furnace exit)	- 5	- 12,7	- 5
47,045 m Between SH2 and SH3			- 4
50,75 m Inside of RH2			- 3
55,817 m Between SH1b and RH1b			- 41
60,65 m Between SH1a and RH1a			- 60
63,54 m Between SH1a and Eco	- 47		
69,0 m After Eco	- 67		
In front of Ljungstrom	- 127***	- 154,6	- 177
After Ljungstrom	- 255	- 266,8	- 311
After electrical precipitator	- 265	- 343,9*	- 390**

- * - μέτρηση πριν από το πρώτο (παλαιό) ηλεκτροστατικό φίλτρο
- ** - μέτρηση πριν από δεύτερο (νέο) ηλεκτροστατικό φίλτρο
- *** - έχει προστεθεί η πίεση των αγωγών και των *dumpers*(60 mmWG)

Στο Διάγραμμα 9-28 παρουσιάζονται οι τιμές του κενού στο εσωτερικό του λέβητα για τα διάφορα στοιχεία του.



Διάγραμμα 11-28 : Κενό στο εσωτερικό του λέβητα

Οι αποδεκτές απώλειες πίεσης από το θάλαμο καύσης ως και την καμινάδα δεν πρέπει να ξεπερνούν τις 270 mmWG. Ακόμα όμως και σε ένα νέο λέβητα, μετά από 3,000 ώρες λειτουργίας και για ατμοπαραγωγή 950 t/hoι απώλειες πίεσης φτάνουν στις **343.9** mmWG. Για τις υπάρχουσες συνθήκες η συνολική πτώση πίεσης φτάνει τα 390 mmWG.

Οι τιμές του κατασκευαστή για τις απώλειες πίεσης κατά μήκος της ροής των καυσαερίων έχουν ως εξής.

- Θάλαμος Καύσης = 5 mm WG
- Υπέρθερμος = 22 mm WG
- Ανάθερμος = 20 mm WG
- Οικονομητήρας = 22 mm WG
- Προθερμαντής Αέρα = 128 mm WG
- Ηλεκτροστατικό Φίλτρο = 10 mm WG
- Dumper και αγωγοί = 60 mm WG
- Συνολικές απώλειες = 267 mm WG

Από τα παραπάνω συμπεραίνονται τα εξής:

Οι απώλειες πίεσης στον λέβητα κατά μήκος της ροής των καυσαερίων στην αρχή ήταν σε συμφωνία με τον σχεδιασμό. Οι απώλειες αυτές με τον καιρό αυξήθηκαν κατά την επιφόρτιση της μονάδας. Ως επεξήγηση των παραπάνω αναφέρονται τα εξής:

- Οι καταγεγραμμένες απώλειες πίεσης πέραν από αυτές του κατασκευαστή επιβεβαιώνουν έντονα φαινόμενα σχηματισμού επικαθίσεων και φραγής ειδικότερα στους αυλούς με εναλλασσόμενη διάταξη με μικρότερο κενό μεταξύ τους. Στην περιοχή αυτή η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι στην τιμή όπου ευνοείται ο σχηματισμός θειικών αλάτων από την τέφρα (820 °C-900 °C).
- Η συνολικές απώλειες πίεσης κατά μήκος της ροής των καυσαερίων μέχρι το LUVΟ έχει αυξηθεί κατά 23 mmWG ή 15 %.
- Η συνολικές απώλειες πίεσης κατά μήκος της ροής των καυσαερίων μέχρι τον ανεμιστήρα καυσαερίων έχει αυξηθεί κατά 46 mmWG ή 13 %.
- Οι απώλειες πίεσης στα LUVΟ για έναν καινούργιο λέβητα είναι 112 mmWG ενώ ο σχεδιαστής προβλέπει 128 mmWG. Η τελευταία καταγραφή απώλειας πίεσης στα LUVΟ είχε αυξηθεί σημαντικά στα 134 mmWG.
- Η μεγαλύτερη απόκλιση των απωλειών πίεσης εντοπίστηκε στα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Από την αρχή λειτουργίας της μονάδας οι απώλειες πίεσης ήταν 77 mmWG αντί 10 mmWG. Τελευταία λόγω της επιπλέον καταπόνησης της μονάδας καθώς και λόγω της εγκατάστασης του νέου ηλεκτροστατικού φίλτρου οι απώλειες πίεσης είναι 80 mmWG.

11.3.8. Εκτίμηση δυναμικού επιμόλυνσης καιόμενου λιγνίτη

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται το δυναμικό επιμόλυνσης του καιόμενου λιγνίτη κατά τη διάρκεια των θερμικών ελέγχων και των προηγούμενων ετών.

11.3.8.1. Εκτίμηση δυναμικού επιμόλυνσης λιγνίτη σχεδιασμού και πραγματικού

Στον Πίνακα 9-20 γίνεται μια συγκριτική αντιπαράθεση του πραγματικού λιγνίτη και αυτού που προβλέπει ο σχεδιασμός. Σημειώνεται ότι ο καίόμενος λιγνίτης είχε σχεδόν την ίδια χημική σύσταση κατά τον έλεγχο λειτουργίας του λέβητα

Όσον αφορά τη χημική σύσταση, η μεγαλύτερη διαφορά που παρουσιάζει ο λιγνίτης που χρησιμοποιήθηκε στους ελέγχους εντοπίζεται στο ποσοστό CaO (50 % διαφορά). Το συνολικό ποσοστό των άλλων στοιχείων τα οποία θεωρούνται άμεσα υπεύθυνα για το σχηματισμό των επικαθίσεων (Fe₂O₃, MgO, K₂O και Na₂O) κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι το ελεύθερο CaO, παρουσία Fe₂O₃ και Al₂O₃, ευνοεί το σχηματισμό στερεών επικαθίσεων στις επιφάνειες του λέβητα.

Πίνακας 11-20 : Σύγκριση χαρακτηριστικών λιγνίτη

Ash composition	Lignite	
	Design (%)	Actual (16.09.2004) (%)
SiO ₂	25,73	23,01
Al ₂ O ₃	13,85	12,73
Fe ₂ O ₃	7,69	9,38
TiO ₂	0,60	0,45
CaO	30,28	43,49
MgO	5,44	3,87
SO ₃	11,30	5,38
K ₂ O + Na ₂ O	1,49	0,41 + 0,30
P ₂ O ₅	0,39	-
MnO	0,05	-
Ash fusibility temperature (°C)		
IDT	1210	1305
ST	1330	1328
FT	1350	1343

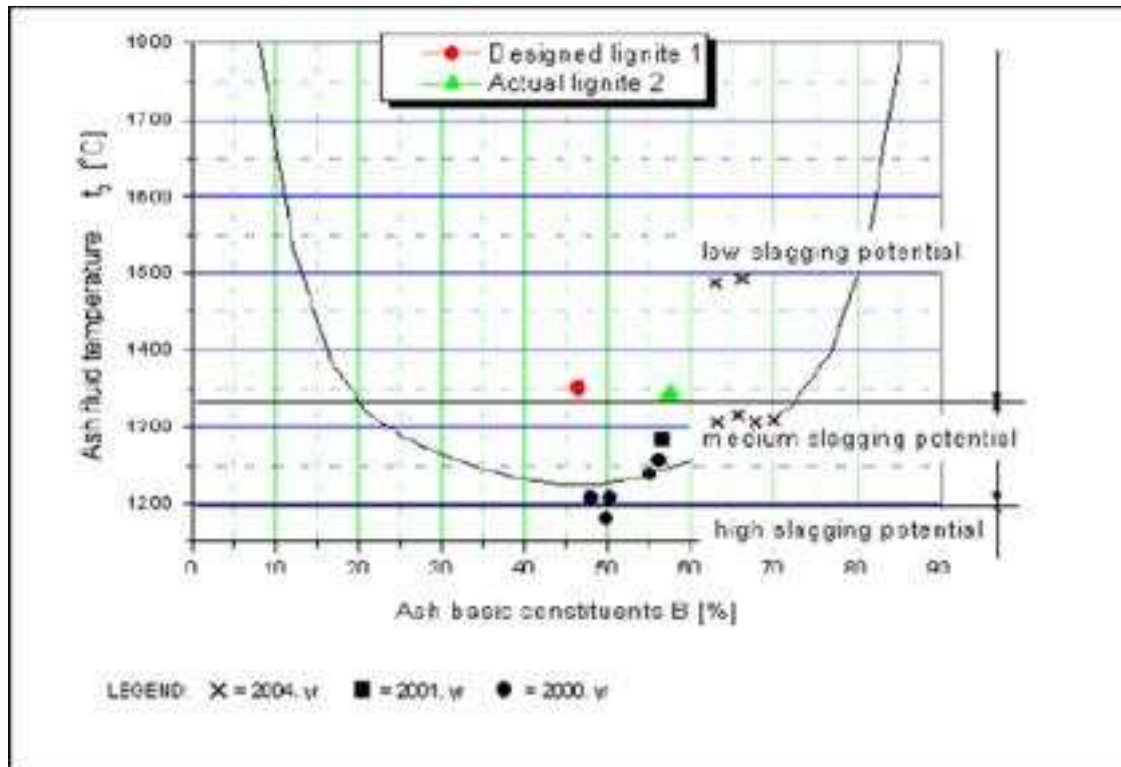
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 9-20, προκύπτει ότι η θερμοκρασία μαλάκυνσης (ST) και η θερμοκρασία ρευστού (FT) είναι ίδια για τους δύο λιγνίτες. Η θερμοκρασία αρχικής αλλοίωσης (IDT) του πραγματικού λιγνίτη είναι κατά 95 Cαπό αυτή του λιγνίτη σχεδιασμού. Στον Πίνακα 9-21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης του δυναμικού επιμόλυνσης όπως αυτό προκύπτει βάσει των δεικτών η οποίοι εφαρμόζονται στη περίπτωση του λιγνίτη.

Πίνακας 11-21 : Δείκτες επιμόλυνσης

Criterion	Design lignite	Actual lignite
1. Deposit creation index - IN1	IN1 = 1507=> Average potential for deposits creation	IN1 = 1582,6=> Average potential for deposits creation
2. Acid oxides ratio - RA1	RA1 = 1,110=> Lower to average potential for deposits creation	RA1 = 1,587=> Average potential for deposits creation
3. Ratio of silicium oxide and aluminum oxide - RA2	RA2 = 1,86=> Low deposit potential	RA2 = 1,81=> Low deposit potential
4. Ratio between iron and calcium oxides - RA3	RA3 = 0,250=> Low deposit potential	RA3 = 0,215=> Low deposit potential
5. Basic number - fluid ash temperature (FT)	Low deposit potential - See Figure 3.3.-1.	Low deposit potential - See Figure 3.3.-1.
6. Na ₂ O content in ash - CN1		CN1 = 0,30=> Low deposit potential
7. Total alkaline content in lignite - CN2	–	CN2 = 0,57%=> Average deposit potential
8. Index of deposit creation and removal - IN2	IN2 = 140=> Average potential for friable deposit creation - easy removal by steam blowing	IN2 = 38 => Low potential for molten deposit creation - difficult removal of deposit by steam blowing

Τα συγκριτικά αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων λιγνίτη, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 9-21, δείχνουν πως ο λιγνίτης της Πτολεμαΐδας έχει μικρό με μέσο δυναμικό επιμόλυνσης. Για το λιγνίτη σχεδιασμού, παρά το γεγονός ότι δύο από τους παραπάνω δείκτες δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστούν λόγω έλλειψης στοιχείων, εκτιμάται ότι έχει παρόμοιο δυναμικό επιμόλυνσης με τον πραγματικό λιγνίτη.

Σύμφωνα με το κριτήριο Νο 5 (αριθμός βάσεων - θερμοκρασία ρευστού), ο πραγματικός λιγνίτης παρουσιάζει ελάχιστα πιο έντονη τάση σχηματισμού επικαθίσεων (Διάγραμμα 9-29). Προκειμένου να παρουσιαστεί η συσχέτιση της θερμοκρασίας ρευστού και της σύστασης της τέφρας, στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζονται επιλεγμένα στοιχεία από την περίοδο 1998 - 2004.

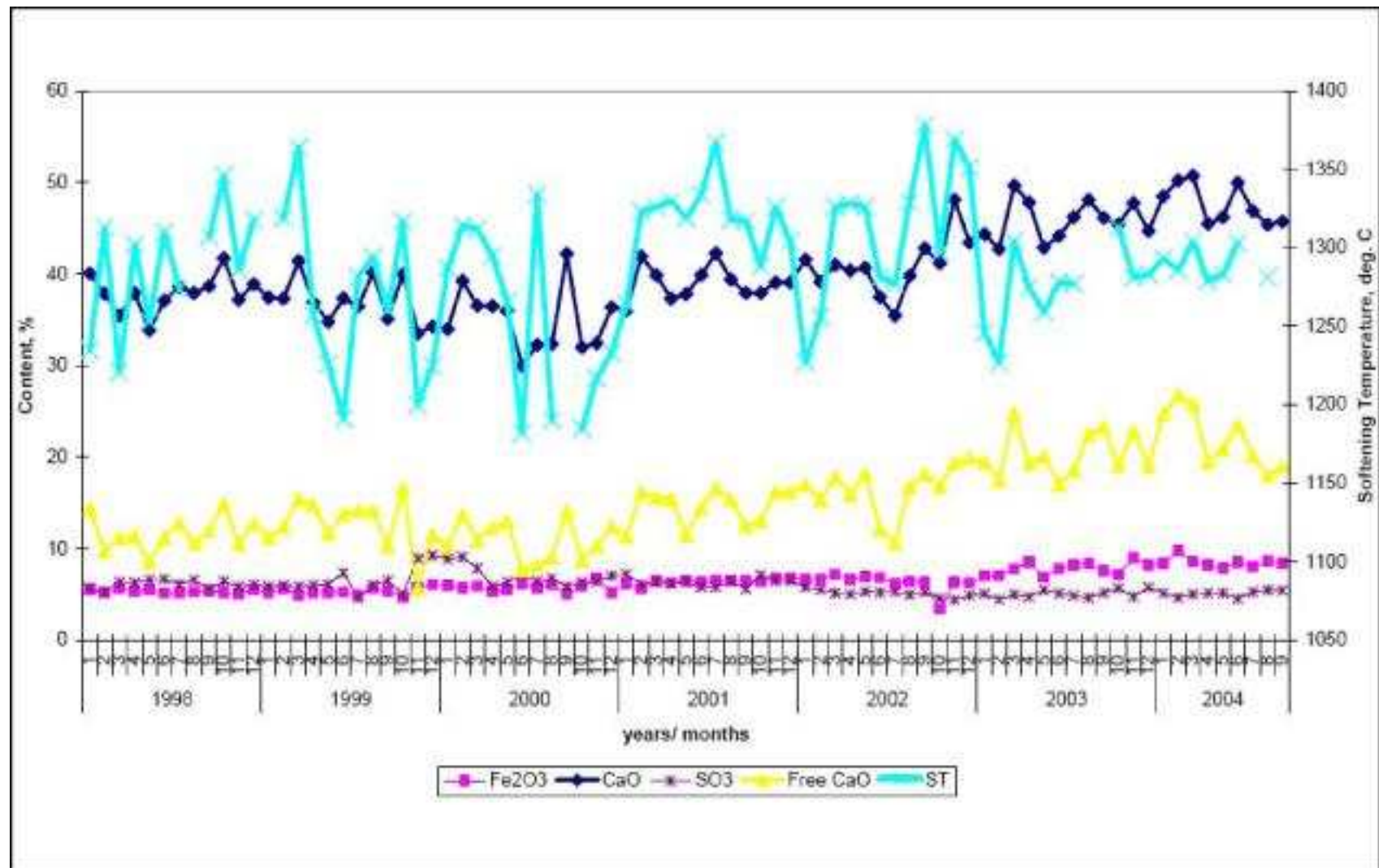


Διάγραμμα 11-29 : Κενό στο εσωτερικό του λέβητα

11.3.9. Εκτίμηση δυναμικού επιμόλυνσης λιγνίτη από το 1998 έως το 2004

Έχοντας υπόψη του φύση του υπό μελέτη φαινόμενου του γρήγορου σχηματισμού επικαθίσεων, γίνεται μια ανάλυση του ιστορικού των χαρακτηριστικών του λιγνίτη προκειμένου να αποκτηθεί μια πληρέστερη εικόνα. Παρακάτω αναλύονται οι βασικές παράμετροι που είναι άμεσα συσχετισμένες με το δυναμικό επιμόλυνσης.

- Χημική σύσταση της τέφρας (Fe_2O_3 , CaO, ελεύθερο CaO και SO_3)
- Θερμοκρασία Μαλάκυνσης



Διάγραμμα 11-30 : Χημική σύσταση λιγνίτη και θερμοκρασία μαλάκυνσης τέφρας (1998-2004)

Από τη μελέτη του Διαγράμματος 9-30 συμπεραίνονται τα εξής:

- Από τα μέσα του 2000 το ποσοστό Fe_2O_3 και CaO (ελεύθερο CaO) αυξάνεται συνεχώς. Συγκεκριμένα το ποσοστό του Fe_2O_3 παρουσιάζει αύξηση περίπου 60% (από 5.46 % σε 8.70 %). Το ποσοστό CaO αυξάνεται πιο έντονα κατά 70% (από 29.99 % σε 50.73 %). Μάλιστα το πιο ενεργό στοιχείο, το ελεύθερο CaO , αυξήθηκε δραματικά κατά 347 % (από 7.70 % σε 26.79 %)
- Η ανάλυση της θερμοκρασία μαλάκυνσης (ST) των δειγμάτων που λαμβάνονται κάθε μήνα έδειξε τα εξής:
 - ο Μετά τις αρχές του 2003 και για δύο συνεχόμενους μήνες, η θερμοκρασία μαλάκυνσης παρουσίασε εντονότερες διακυμάνσεις, οΓνωρίζοντας τη διαφορά της τυποποιημένης εργαστηριακής μεθοδολογίας υπολογισμού των θερμοκρασιών τήξης και το μεγάλο εύρος της σύστασης των σωματιδίων της τέφρας στο εσωτερικό του λέβητα, είναι ξεκάθαρο ότι ένα σημαντικό ποσοστό των σωματιδίων της τέφρας έχουν πολύ μικρότερη θερμοκρασία μαλάκυνσης από τη θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο του θαλάμου καύσης (1.110°C-1.140°C)

11.3.10.Οπτική Επιθεώρηση

Παρά τα αποτελέσματα της εκτίμησης των στοιχείων που προκύπτουν από την χημική σύσταση του λιγνίτη, οι δύο οπτικές επιθεωρήσεις που έγιναν στο εσωτερικό του λέβητα έδειξαν ότι η ρύπανση είναι σε υψηλά επίπεδα, γεγονός το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο εν λειτουργία καθαρισμός του λέβητα είναι ανεπαρκής.

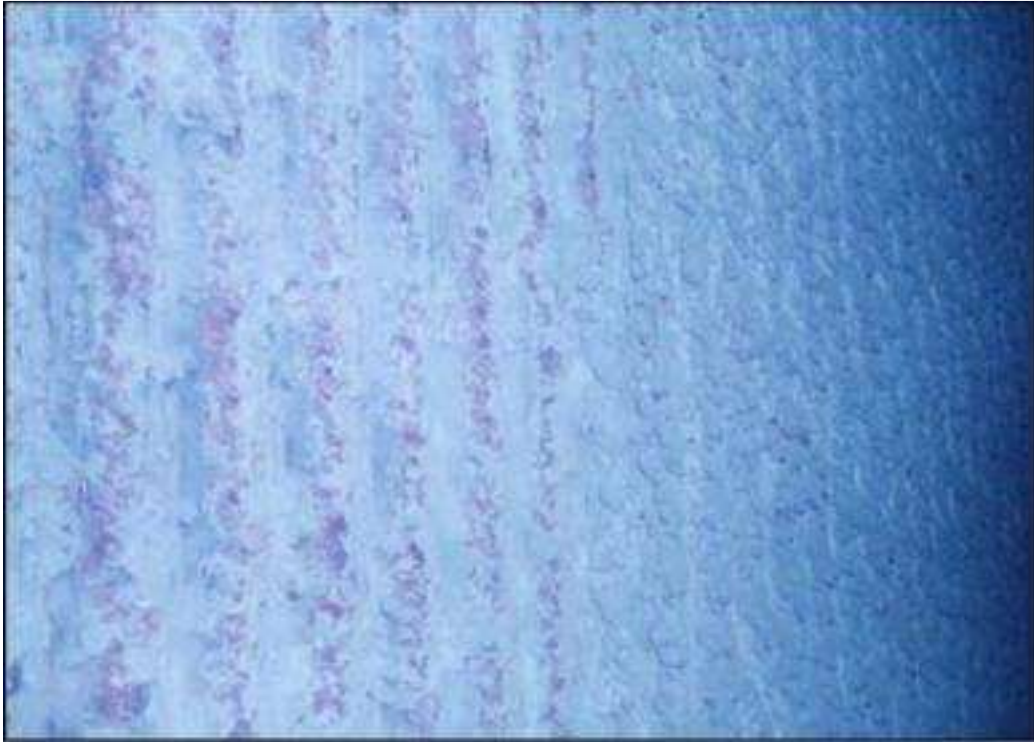
Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται μέρος των παραρτημάτων 2 και 3 ως μια απεικόνιση της τρέχουσας κατάστασης κατά τη διενέργεια των ελέγχων.



Εικόνα 11-7 : Εμπρόσθιος υδρότοιχος καθαρός (αριστερά) με επικάθιση (δεξιά).
Ύψος 26 Μέτρα



Εικόνα 11-8 : Μεγάλος όγκος επικάθισης. Ύψος 25 Μέτρα



Εικόνα 11-9 : Εμπρόσθιος υδρότοιχος καθαρός (αριστερά) με επικαθίση (δεξιά).
Ύψος 20 Μέτρα



Εικόνα 11-10 : Επικαθίσεις στον εμπρόσθιο υδρότοιχο μεταξύ των καυστήρων



Εικόνα 11-11 : Οικονομητήρας. Ύψος 66.420 Μέτρα



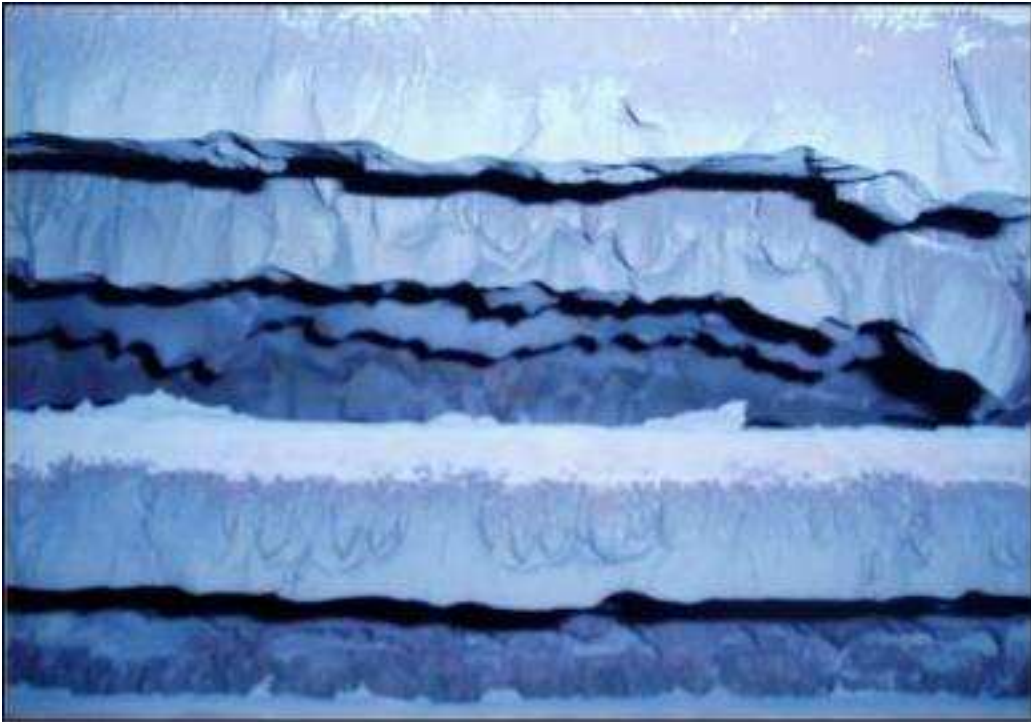
Εικόνα 11-12 : Υ/Θ 1α, κάτω σωλήνας. Ύψος 58.170 Μέτρα



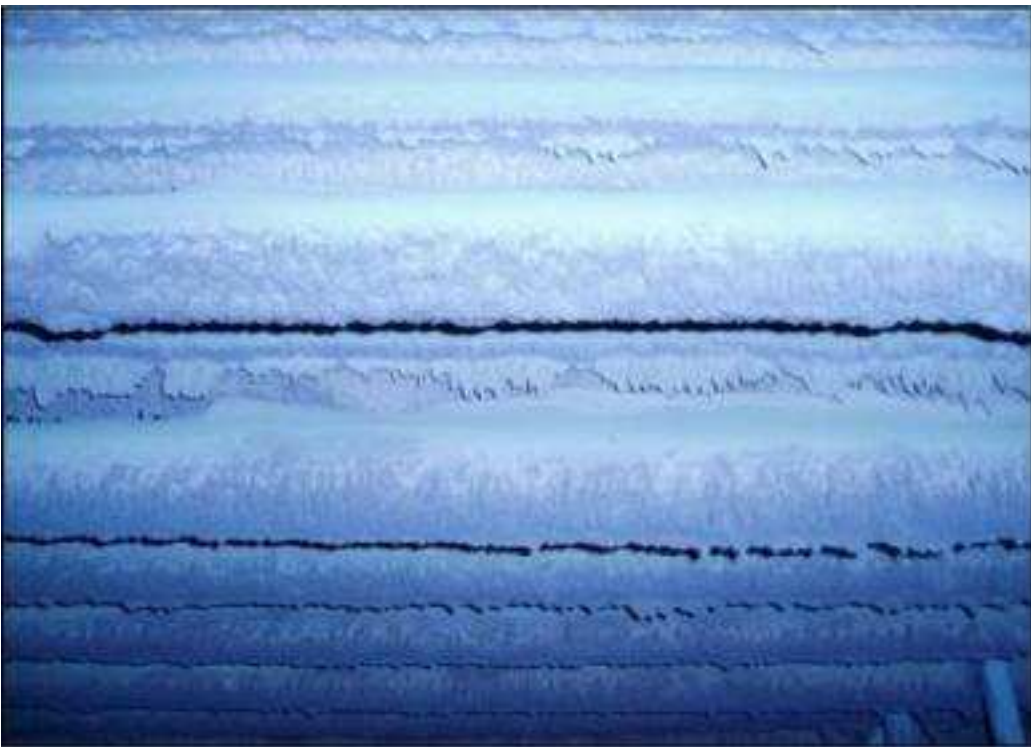
Εικόνα 11-13 : Λήψη μεταξύ Υ/Θ 1α (επάνω) και Α/Θ 1β (κάτω) με μεγάλες συσσωματώσεις που φτάνουν σε ύψος τα 80 εκατοστά. Ύψος 58.170 Μέτρα



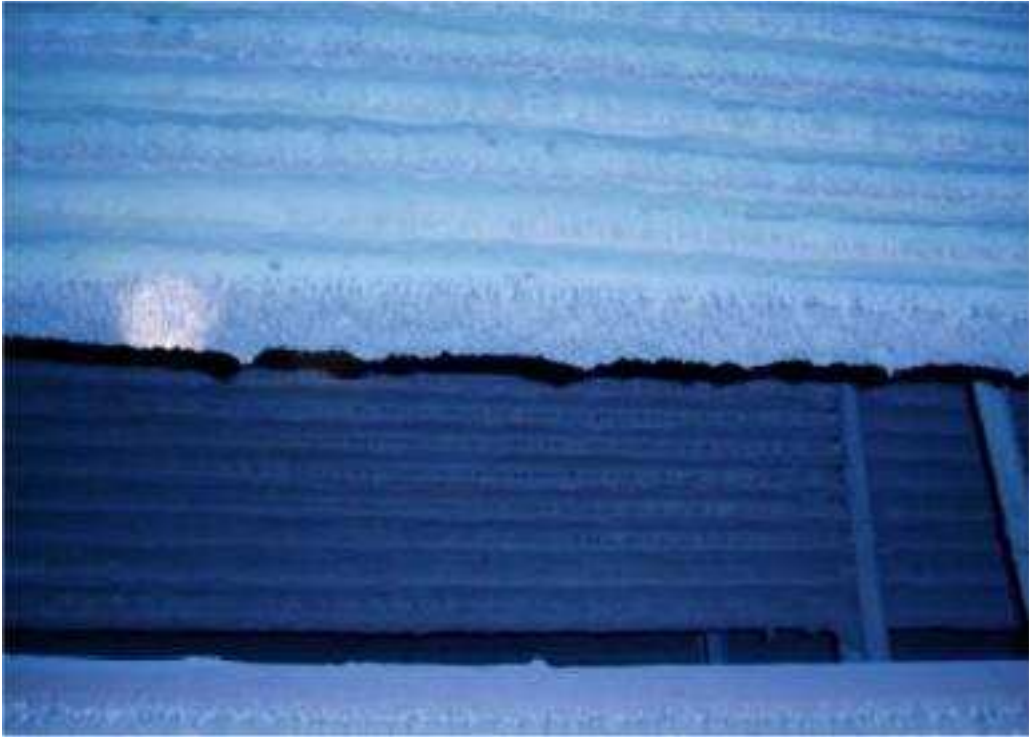
Εικόνα 11-14 : Υ/Θ 1α, κάτω σωλήνας με σκληρές επικαθίσεις. Ύψος 68.170 Μέτρα



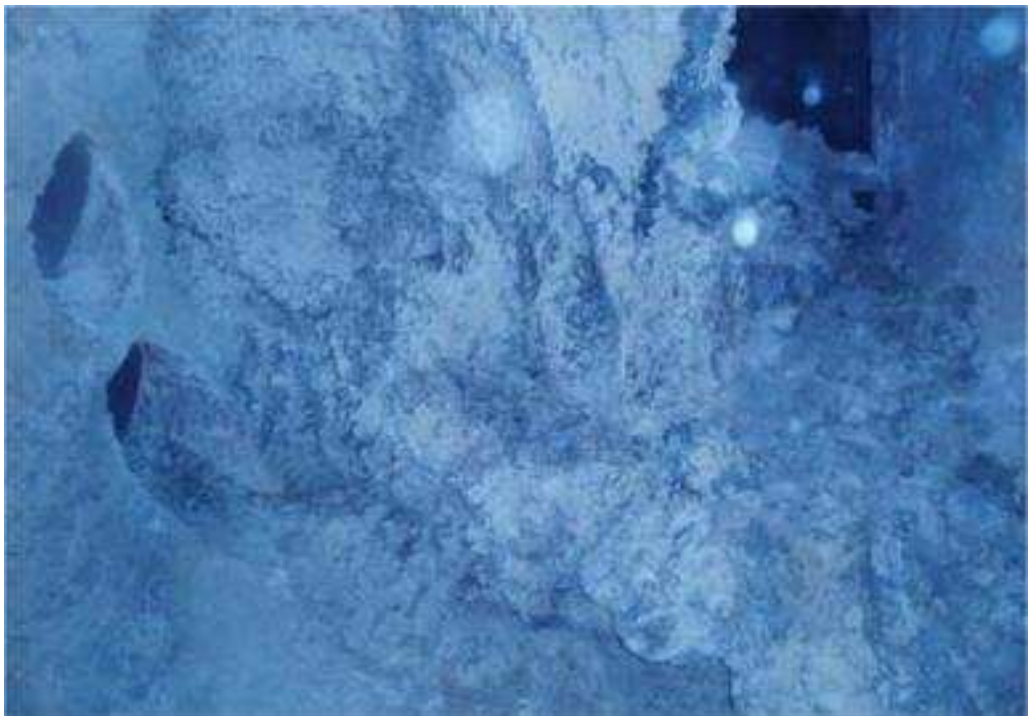
Εικόνα 11-15 : Λήψη επικαθίσεων στον Υ/Θ 1β. Ύψος 53.500 Μέτρα



Εικόνα 11-16 : Κάτω Τμήμα Α/Θ 2. Ύψος 49.075 Μέτρα



Εικόνα 11-17 : Πάνω Τμήμα Υ/Θ 2. Ύψος 43.500 Μέτρα



Εικόνα 11-18 : Κάτω Τμήμα Α/Θ 2. Ύψος 49.075 Μέτρα

Από τις φωτογραφίες αυτές αποκτάται μια εικόνα του τύπου και του βαθμού ρύπανσης στο εσωτερικό του λέβητα. Σημειώνεται ότι κατά την περίοδο ψύχρασης του εσωτερικού του λέβητα (μετά την κράτηση της μονάδας για ετήσια συντήρηση) πριν από την οπτική επιθεώρηση σημειώθηκαν πτώσεις εύθραυστων συσσωματώσεων επικαθίσεων (λεβητόλιθοι) στον πυθμένα του λέβητα. Για το λόγω αυτό αυτές οι οπτικές παρατηρήσεις αντιπροσωπεύουν ένα μόνο μέρος των επικαθίσεων που σχηματίστηκαν κατά τη λειτουργία του λέβητα.

Τα τοιχώματα του λέβητα ήταν τελείως καλυμμένα με επικαθίσεις διαφορετικού πάχους. Στην Εικόνα 8, παρουσιάζονται μεγάλες συσσωματώσεις επικαθίσεων οι οποίες ξεκινούν από στόμιο του καυστήρα πετρελαίου και εκτείνονται προς τα επάνω και προς το μέσο του υδροτοιχώματος. Οι τοπικές αυτές συσσωματώσεις είχαν πάχος περίπου 25 cm και μπορούσαν εύκολα να αποκολληθούν και να πέσουν στην τεφρολεκάνη. Το γεγονός ότι σχηματίζονται τόσο μεγάλες συσσωματώσεις στα υδροτοιχώματα αποτελεί ένδειξη ότι η διάταξη της καύσης έχει απορυθμιστεί. Αντί η φλόγα να εντοπίζεται στο μέσο του θαλάμου καύσης, αυτή προφανώς έχει μετατοπιστεί προς τα επάνω με αποτέλεσμα, στην περιοχή των υδροτοιχώματα, να δημιουργούνται αέρια υψηλής θερμοκρασίας και τηγμένα σωματίδια τέφρας.

Με βάση τα αποτελέσματα των οπτικών παρατηρήσεων του εσωτερικού του λέβητα πριν από τον καθαρισμό του καθώς της μελέτης των λεβητολίθων από τον πυθμένα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Οι συσσωματώσεις που επικάθονται με χαλαρούς δεσμούς στα υδροτοιχώματα και στους καυστήρες αποκολλώνται και πέφτουν στον πυθμένα του λέβητα. Η προέλευσή τους από εκείνα τα σημεία του λέβητα επιβεβαιώνεται και από το αποτύπωμα του προφίλ των υδροτοιχώματα στις επικαθίσεις αυτές. (Εικόνα 9-19 και Εικόνα 9-20).



Εικόνα 11-19 : Επικάθιση από υδρότοιχο με Αποτύπωμα Αυλού (1)



Εικόνα 11-20 : Επικάθιση από υδρότοιχο με Αποτύπωμα Αυλού (2)

- Τα τηγμένα και κολλώδη σωματίδια τέφρας τα οποία συμπαρασύρονται από τα υψηλής θερμοκρασίας καυσαέρια, συγκρούονται με τους αυλούς των υπέρθερμων και των ανάθερμων σχηματίζοντας επικαθίσεις με μεγάλη ταχύτητα. Αντίστοιχα το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτυπώματα που παρατηρούνται σε ορισμένους λεβητολίθους από τον πυθμένα του λέβητα (Εικόνα 9-21 και Εικόνα 9-22).



Εικόνα 11-21 : Επικάθιση από Α/Θ 2 με Αποτύπωμα Αυλού (1)



Εικόνα 11-22 : Υ/Θ Αριστερά 2 Α/Θ 2 Δεξιά

11.4. Πρόσκρουση λεβητολίθων στον πυθμένα του λέβητα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπό τις υπάρχουσες συνθήκες λειτουργίας, παρατηρήθηκε ταχεία δημιουργία επικαθίσεων. Το εξωτερικό υπόστρωμα των επικαθίσεων συγκεντρώνει εναποθέσεις ορυκτής ύλης. Αυτό παρατηρήθηκε στο άνω μέρος του θαλάμου καύσης και στις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας. Οι συνεκτικές δυνάμεις που κρατούν τις επικαθίσεις πάνω στους σωλήνες δεν είναι ισχυρές. Όταν το βάρος των επικαθίσεων αυξηθεί αρκετά και ξεπεράσει τις δυνάμεις συνοχής, αποκολλώνται και πέφτουν. Κατά τη διέλευσή τους μέσα από το λέβητα αναταράσσουν επικαθίσεις οι οποίες βρίσκονται στα πιο κάτω τμήματα του λέβητα τα οποία και αυτά με τη σειρά τους αποκολλώνται με αποτέλεσμα ο όγκος των επικαθίσεων φτάνει στον πυθμένα του λέβητα να είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αρχικό που ξεκίνησε το φαινόμενο.

Οι επικαθίσεις πέφτουν είτε στα τοιχώματα της τεφρολεκάνης ή στο σημείο εξαγωγής της υγρής τέφρας. Στην περίπτωση που η σύγκρουση είναι αρκετά ισχυρή,

σε συνδυασμό με την εκρηκτική εξάτμιση του νερού, τότε δημιουργούνται σημαντικά πλήγματα στη τεφρολεκάνη.

Τα τυχαία αυτά φαινόμενα θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια του προσωπικού και τη διαθεσιμότητα της μονάδας.

11.4.1. Σύστημα καταγραφής πρόσκρουσης επικαθίσεων

Προκειμένου να προσδιοριστούν πλήρως οι προσκρούσεις των επικαθίσεων στον πυθμένα του λέβητα, έγινε καταγραφή τριών βασικών παραμέτρων:

- Μεταβολές πίεσης στην τεφρολεκάνη
- Δονήσεις στην τεφρολεκάνη
- Ηχητικές διαταραχές στην περιοχή της τεφρολεκάνης

Από τα πειράματα τα οποία εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια των ελέγχων προέκυψε ότι μπορεί να γίνει αξιόπιστη καταγραφή των προσκρούσεων μέσω των ηχητικών διαταραχών. Οι καταγραφές της πίεσης απέτυχε διότι οι αισθητήρες λόγω της σκόνη φραζόντουσαν. Τέλος το σύστημα καταγραφής των δονήσεων δεν ανταποκρίθηκε κατάλληλα.

Οι ηχητικές διαταραχές μικρού μήκους και συγκεκριμένης έντασης ήταν τα στοιχεία βάσει των οποίων προσδιοριστήκαν οι προσκρούσεις.

11.4.2. Αξιολόγηση δεδομένων

Κατά τη διάρκεια των θερμικών ελέγχων διενεργήθηκε συνεχής καταγραφή των προσκρούσεων των επικαθίσεων (13 Σεπτεμβρίου 11:00 μμ. έως 18 Σεπτεμβρίου 07 μμ.).

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν την ύπαρξη ενός σταθερού βασικού θορύβου λειτουργίας του λέβητα. Ο ήχος στην περιοχή της τεφρολεκάνης ήταν περίπου στα 60 dB. Ακόμα και οι πιο μικρές προσκρούσεις προκαλούσαν μεταβολή 5 dB. Οι πιο δυνατές προσκρούσεις που καταγράφηκαν ήταν πάνω από 190 dB.

Αντίστοιχα με την ένταση της πρόσκρουσης και αντίστοιχα την ένταση του ήχου που προκαλείται, αναγνωρίστηκαν τρεις χαρακτηριστικές ομάδες:

- Συγκρούσεις μικρής έντασης, 80 dB

- Συγκρούσεις μεσαίας έντασης, έως 100 dB
- Συγκρούσεις μεγάλης έντασης, πάνω από 100 dB

Επίσης κατά την αξιολόγηση διακρίθηκαν και τρεις χαρακτηριστικές περιόδους:

1. Περίοδος με τη μικρότερη συχνότητα προσκρούσεων ακριβώς μετά το πέρας των εκκαπνισμών των Υ/Θ και για 1.5 ώρα μετά. Η περίοδος αυτή παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά.

- 15 με 20 προσκρούσεις μικρής έντασης κάθε μία ώρα (κατά μέσο όρο μία κάθε 3 με 4 λεπτά)
- 10 με 14 προσκρούσεις μέσης έντασης κάθε μία ώρα (κατά μέσο όρο μία κάθε 5 με 6 λεπτά)
- 6 με 7 προσκρούσεις μεγάλης έντασης κάθε μία ώρα (κατά μέσο όρο μία κάθε 8 με 10 λεπτά)

2. Περίοδος με μεσαία συχνότητα προσκρούσεων η οποία ξεκινάει 1.5 ώρα μετά την ολοκλήρωση των εκκαπνισμών και η οποία έχει διάρκεια 5 με 6 ώρες. Η περίοδος αυτή παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά.

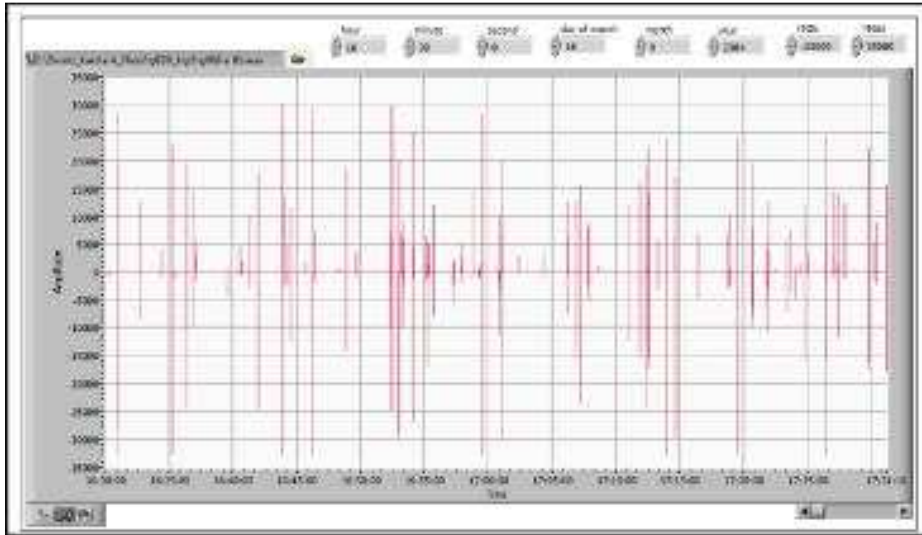
- Περίπου 30 προσκρούσεις την ώρα μικρής έντασης (1 κάθε 2 λεπτά κατά μέσο όρο)
- Περίπου 20 προσκρούσεις την ώρα μεσαίας και υψηλής έντασης

3. Περίοδος με την υψηλότερη συχνότητα προσκρούσεων η οποία ξεκινάει 8 με 9 ώρες μετά την ολοκλήρωση των εκκαπνισμών και συνεχίζεται έως την αρχική περίοδο των επόμενων εκκαπνισμών. Η περίοδος αυτή παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά.

- Περίπου 40 προσκρούσεις την ώρα μικρής έντασης (1 κάθε 1.5 λεπτό κατά μέσο όρο)
- Περίπου 40 προσκρούσεις την ώρα μεσαίας και υψηλής έντασης

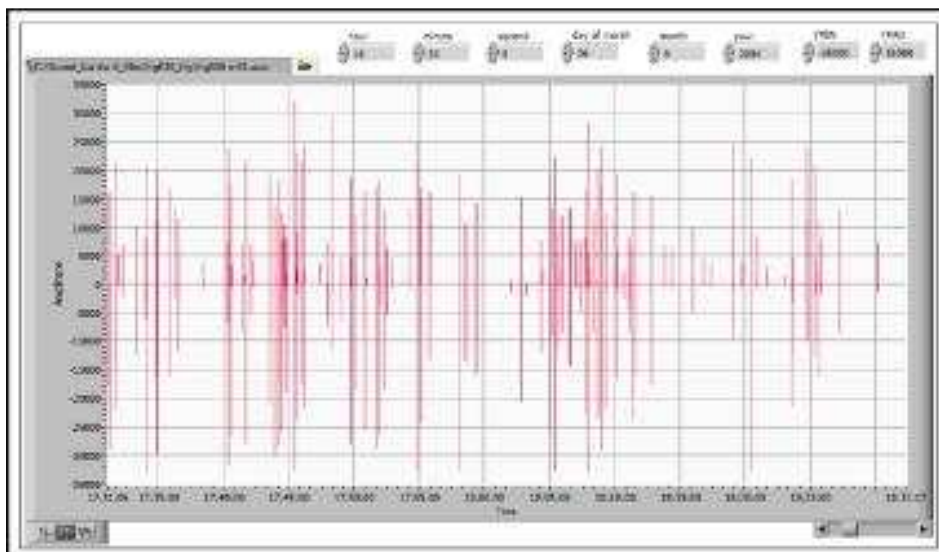
Παρακάτω παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση των παραπάνω περιόδων. Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η ατμοπαραγωγή ήταν μεταξύ 920 t/h και 935 t/h. Στα διαγράμματα ο άξονας Χ είναι ο χρόνος και ο άξονας Ψ είναι τα dB σε κλίμακα 1/1000 (1000 μονάδες αντιστοιχούν σε 1 dB).

Στο Διάγραμμα 9-31 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν στις 16/09/2004 μία ώρα πριν τον εκκαπνισμό των υπέρθερμων ή περίπου 9 ώρες μετά την ολοκλήρωση των προηγούμενων εκκαπνισμών. Η περίοδος αυτή (από τις 4:30 έως τις 5:30 πμ.) κατατάσσεται στο γκρουπ με τη μεσαία συχνότητα προσκρούσεων (37 μικρής έντασης, 13 μεσαίας έντασης και 18 υψηλής έντασης).



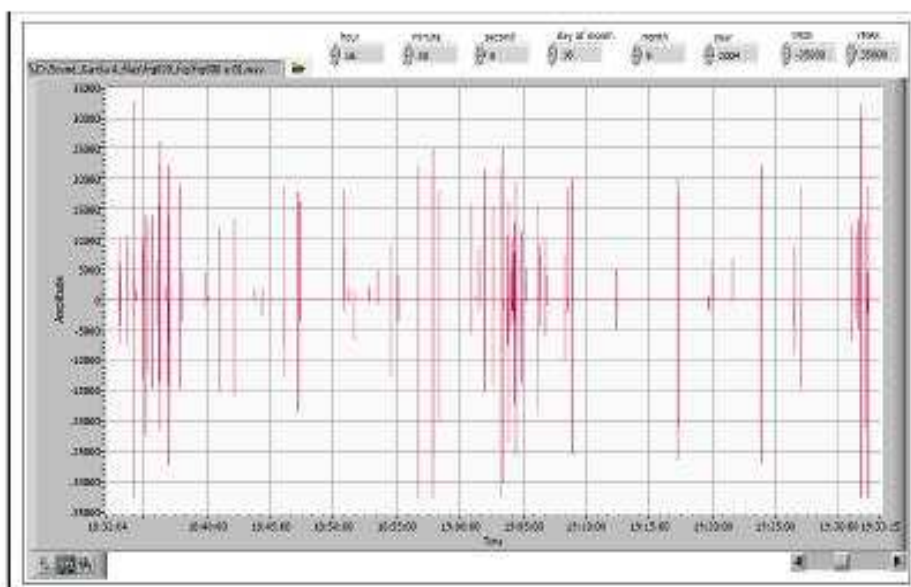
Διάγραμμα 11-31 : Ηχητική καταγραφή προσκρούσεων λεβητολίθων (Μέρος 1)

Στο διάγραμμα 9-32 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων την ίδια ημέρα μεταξύ 5:30 πμ. και 6:30 πμ.. Στις 5:42 πμ. ξεκίνησε ο εκκαπνισμός με αποτέλεσμα να προκληθεί αύξηση της συχνότητας των προσκρούσεων. Συγκεκριμένα κατά την περίοδο αυτή καταγράφηκαν τα εξής: 47 μικρής έντασης, 25 μεσαίας έντασης και 32 υψηλής έντασης.



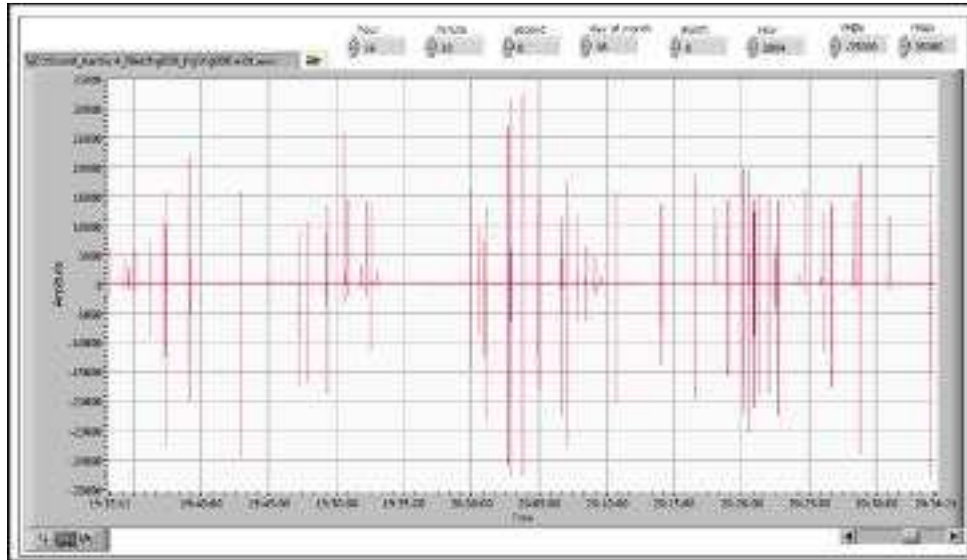
Διάγραμμα 11-32 : Ηχητική καταγραφή προσκρούσεων λεβητολίθων (Μέρος 2)

Στο Διάγραμμα 9-33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων την ίδια ημέρα μεταξύ 6:30 πμ. και 7:30 πμ. κατά τη διάρκεια των εκκαπνισμών. Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από αισθητή μείωση της συχνότητας των προσκρούσεων. Συγκεκριμένα κατά την περίοδο αυτή καταγράφηκαν τα εξής: 28 μικρής έντασης, 20 μεσαίας έντασης και 17 υψηλής έντασης.



Διάγραμμα 11-33 : Ηχητική καταγραφή προσκρούσεων λεβητολίθων (Μέρος 3)

Στο Διάγραμμα 9-34 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων την ίδια ημέρα μεταξύ 8:30 πμ. και 9:30 πμ.. Οι εκκαπνισμοί ολοκληρώθηκαν στις 9:05 πμ.. Η συχνότητα των προσκρούσεων ελαττώθηκε ακόμη περισσότερο ειδικά μετά το πέρας των εκκαπνισμών. κατά την περίοδο αυτή καταγράφηκαν τα εξής: 20 μικρής έντασης, 14 μεσαίας έντασης και 9 υψηλής έντασης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί η απουσία προσκρούσεων υψηλής έντασης τα πρώτα 30 λεπτά μετά την ολοκλήρωση των εκκαπνισμών.



Διάγραμμα 11-34 : Ηχητική καταγραφή προσκρούσεων λεβητολίθων (Μέρος 4)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο1
Εργαστηριακές Αναλύσεις και
πειραματικός εξοπλισμός

Πίνακας 11-22 : Εργαστηριακές αναλύσεις λιγνίτη (Μέρος 1ο)

		"AS RECEIVED"											
SAMPLE		12952004 M-44702/R1	12952004 M-44700/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1
MOISTURE	%	9,7	9,8	12,6	10,2	15,1	10,8	13,4	10,2	16,2	14,7	12,3	14,9
FUEL	%	55,8	55,9	52,2	55,2	52,1	54,8	53,9	55,8	52,4	53,1	55,1	53,5
ASH	%	35,1	35,3	35,2	34,6	32,8	34,4	32,7	33,8	31,6	32,6	31,6	31,6
H.C.V	Kcal/Kg	3.475	3.507	2.447	2.632	2.663	2.771	2.634	2.921	2.740	2.703	2.884	2.631
L.C.V	Kcal/Kg	3.385	3.311	2.373	2.484	2.445	2.576	2.421	2.729	2.514	2.483	2.671	2.409

		"DRY"											
SAMPLE		12952004 M-44702/R1	12952004 M-44700/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1	12952004 M-44703/R1
ASH	%	39,6	39,1	40,3	39,5	36,8	39,6	37,7	36,8	37,4	37,9	39,1	37,1
H.C.V	Kcal/Kg	3.427	3.566	2.534	2.687	3.137	3.107	3.042	3.264	3.276	3.169	3.354	3.091
L.C.V	Kcal/Kg	3.090	3.242	2.992	2.840	2.991	2.903	2.893	3.119	3.129	3.020	3.139	2.941

Πίνακας 11-23 : Εργαστηριακές αναλύσεις λιγνίτη (Μέρος 2ο)

"AS RECEIVED"

PARAMETER	SAMPLE	14/05/2004	14/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004
		M-4100490	M-4100490	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491
MOISTURE	%	11,8	13,4	13,1	13,3	13,5	8,3	11,2	11,3	12,0	11,7	8,9	11,4	13,8
FUEL	%	56,9	54,1	53,5	58,0	55,6	58,5	56,7	51,6	54,9	53,1	55,1	53,7	58,2
ASH	%	31,3	32,4	33,4	30,7	31,3	33,2	32,1	37,1	33,7	33,2	35,0	34,9	36,0
H.C.V	Kcal/Kg	2.966	2.778	2.705	3.131	2.877	3.120	2.985	2.579	2.862	2.846	2.842	2.779	3.138
L.C.V	Kcal/Kg	2.757	2.563	2.484	2.919	2.661	2.929	2.777	2.378	2.656	2.443	2.545	2.573	2.911

"DRY"

PARAMETER	SAMPLE	14/05/2004	14/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004	15/05/2004
		M-4100490	M-4100490	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491	M-4210491
ASH	%	35,9	37,5	36,5	34,6	36,0	36,2	36,2	41,9	38,5	39,9	36,8	39,4	33,5
H.C.V	Kcal/Kg	3.265	3.211	3.112	3.429	3.211	3.423	3.362	2.901	3.252	2.937	3.154	3.127	3.641
L.C.V	Kcal/Kg	3.212	3.062	2.966	3.372	3.158	3.250	3.209	2.769	3.105	2.854	3.085	2.992	3.478

Πίνακας 11-24 : Εργαστηριακές αναλύσεις λιγνίτη (Μέρος 3^ο)**"AS RECEIVED"**

SAMPLE PARAMETER	16/09/2004 M45/DG/R1	16/09/2004 M-45/GG/R1	16/09/2004 M 46/GG/R1	16/09/2004 M47/DG/R1	16/09/2004 M-47/GG/R1	16/09/2004 M-48/DG/R1	16/09/2004 M 48/GG/R1
MOISTURE %	10.9	10,4	8,9	13,1	7.9	11,3	11,7
FUEL %	58.4	60,4	59,8	57,4	61,5	53,0	59,7
ASH %	30.7	29,2	31,3	25,5	30,6	30,7	28,6
H.C.V Kj/Kg	3.161	3.358	3.361	3.129	3.369	3.221	3.337
L.C.V Kj/Kg	2.950	3.145	3.158	2.508	3.168	3.005	3.113

"DRY "

SAMPLE PARAMETER	16/09/2004 M45/DG/R1	16/09/2004 M-45/GG/R1	16/09/2004 M 46/GG/R1	16/09/2004 M47/DG/R1	16/09/2004 M-47/GG/R1	16/09/2004 M-48/DG/R1	16/09/2004 M 48/GG/R1
ASH %	34.5	32,6	34,4	34,0	33,2	34,6	32,4
H.C.V Kcal/Kg	3.547	3.743	3.689	3.601	3.658	3.631	3.779
L.C.V Kcal/Kg	3.390	3.535	3.531	3.442	3.498	3.474	3.616

"AS RECEIVED"

SAMPLE PARAMETER	13109/2004 M-44/R1	14/03/2004 M-41/R1	14/08/2004 M-41/R2	15/09/2004 M-42/R1	15/09/2004 M-42*R2	16/09/2004 M/HT	116/031200 4 MX
MOISTURE %	48,3	45,5	46,6	50.0	48.6	40.3	52,7
FUEL %	34,7	34,0	36,6	33.6	30.0	34.7	33,2
ASH %	17,0	13,6	16,8	16.4	21.4	16.0	14,1
CO2 %	5,7	6.1	4.6	3,7	4,3	3,3	3.6
H.C.V Kcal/Kg	1.667	1.602	1.587	1.761	1.480	1.783	1.757
L.C.V Kcal/Kg	1.300	1.251	1.224	1 386	1.124	1.416	1.368

"DRY"

SAMPLE PARAMETER	13/09/2004 M-44/R1	14/03/2004 M-41/R1	14/09/2004 M-41/R2	15/09/2004 M-42JR1	15/09/2004 MI-42H2	16/09/2004 MINT	16/09/2004 MX
ΘΕΙΟ %	0,69	0,74	0,74	0,76	0,73	0.75	0,76
CO2 %	11,1	11,1	8.6	7,3	8,3	7,6	7,7
H.C.V Kcal/Kg	3.224	2.339	2.371	3.521	2.880	3.529	3.715
L.C.V Kcal/Kg	3.062	2.786	2.806	3.359	2.741	3.364	3.545

Πίνακας 11-25 : Εργαστηριακές αναλύσεις λιγνίτη (Μέρος 4^ο) 16/09/2004

AS RECEIV			DRYON	FUEL	NOTES
PROXIMATE					
TOTAL MOISTURE	%	52.7			
AS H	%	14.1	29.7		
co:	%	3,6	7,7		
VOLATILES	%	17,1	36.1	57 ,7	
FIXED CA.RBCN	%	12,5	26.5	42,3	
TOTALS	%	100.0	100.0	100,0	
ULTIMATE					
TOTAL MOISTURE	%	52,69			
ASH	%	14,07	29,74		
co:	%	3,65	7,71		
CARBON	%	19,21	40,60	64.9	
HYDROGEN	%	1,47	3,10	4,96	
NITROGEN	%	0,53	1,12	1,79	
SULFUR	%	0,40	0,86	1,37	
OXYGEN	%	7,99	16,88	25.98	
TOTALS	%	100,00	100.00	100.00	
H.C.V	Kcal/Kg	1.758	3.715	5.939	
L.C.V	Kcal/Kg	1.372	3.552	5.678	
LABORATORY ASH ANALYSIS					
SiO ₂	%	23,50	I.D.T	°C	1.238
Fe ₂ O ₅	%	10,50	S.T	°C	1.290
Al ₂ O ₃	%	10,60	H.T	°C	>1,500
Tic:	%	0,55	FT	°C	>1,500
CaO	%	43.39			
MgO	%	4,20			
sc;	%	6,30			
Na ₂ O	%	0,28			
K:G	%	0,40			
Free CaO	%	20.00			

Πίνακας 11-26 : Εργαστηριακές αναλύσεις λιγνίτη (Μέρος 4^ο) 17/09/2004

		AS RECEIV	DRY	ON FUEL	NOTES
PROXIMATE					
TOTAL MOISTURE	%	50,9			
ASH	%	13.5	27,5		
CO ₂	%	3,8	7,6		
VOLATILES	%	17,7	36,1	55.7	
FIXED CARBON	%	14.1	28,7	44.3	
TOTALS	%	100,0	100,0	100,0	
ULTIMATE					
TOTAL MOISTURE	%	50,87			
ASH	%	13,53	27,53		
co:	%	3,76	7,55		
CARBON	%	20,84	42,41	65,4	
HYDROGEN	%	1,64	3,34	5,15	
NITROGEN	%	0,57	1,17	1,80	
SULFUR	%	0,51	1,03	1,59	
OXYGEN	%	8,29	16,67	26,02	
TOTALS	%	100.00	100,00	100,00	
H.C.V	Kcal/Kg	1,896	3,358	5,952	
L.C.V	Kcal/Kg	1,512	3,662	5,681	
LABORATORY ASH ANALYSIS					
Si O ₂	%	23,01	I.D.T	o C	1.243
Fe:O ₅	%	9,38	S.T	o C	1.305
Al ₂ O ₃	%	12,73	H.T	o C	1.328
Tic:	%	0,45	FT	o C	1.343
CaC	%	43,49			
MgO	%	3,87			
SC ₅	%	5,38			
Na:C	%	0,30			
K:C	%	0,41			
Free CaO	%	15,70			

Πίνακας 11-27 : Ανάλυση τέφρας πυθμένα

AS RECEIVED

SAMPLE/PARAMETER	16/09/2004 B/A	17/09/2004 B/A1
MOISTURE %	50,4	48,8
FUEL %	7,7	9,5
ASH %	41,9	41,7
CO ₂ %	1,94	1,81
H.C.V Kcal/Kg	219	259
L.C.V Kcal/Kg	0	0

REMAIN IN THS SIEVES

Sieve No	16/09/2004	17/09/2004
Loss %	49,5	47,2
2,00	8,4	9,6
1,00	12,6	17,6
0,45	10,0	13,1
Remain	70,3	59,6
Sum	101,3	99,9

DRY

SAMPLE/PARAMETER	16/09/2004 B/A	17/09/2004 B/A1
ASH %	84,5	81,4
CO ₂ %	3,92	3,53
H.C.V Kcal/Kg	441	505
L.C.V Kcal/Kg	415	471

Πίνακας 11-28 : Ανάλυση ιπτάμενης τέφρας

AS RECEIVED

SAMPLE/PARAMETER	16/09/2004 F/A
MOISTURE %	0,16
FUEL %	0.28
ASH %	98.46
CO2 %	1.10

DRY

SAMPLE/PARAMETER	17/09/2004
ASH %	98,62
CO2 %	1,10

Πίνακας 11-29 : Ανάλυση κοκκομετρίας

Sieve No	13/05/2004 M-44/DD/R1	14/05/2004 M-44/DG/R1	13/05/2004 M-44/GG/R1	13/05/2004 M-44/GG/R1	14/05/2004 41/DD/R1	M	14/05/2004 41/DG/R1	M	14/05/2004 41/GG/R1	M	14/05/2004 M-41/GG/R1	14/05/2004 41/GG/R1	M	14/05/2004 M-41/DD/R2	14/05/2004 41/DG/R2	M	14/05/2004 41/GG/R2	M	14/05/2004 M-41/GG/R2
Loss %	4,30	5,10	7,78	5,88	11,57		7,49		10,06		6,90	20,83		9,38	8,60		8,77		8,13
2,00	0,30	1,17	0,10	0,96	0,37		0,19		0,08		0,26	0,15		0,39	0,12		0,30		0,28
1,00	0,90	1,92	0,30	1,72	1,17		1,78		0,71		1,87	1,44		1,22	1,21		0,94		1,37
0,45	0,70	1,66	0,20	1,39	1,12		2,38		0,72		3,35	2,22		1,59	2,41		0,85		2,59
0,20	3,20	13,91	0,90	10,35	6,44		14,53		2,19		9,10	16,38		9,71	22,86		2,65		20,64
0,09	9,50	24,15	8,50	21,82	10,59		19,72		9,82		38,92	21,51		16,41	23,71		10,86		24,00
Remain	64,50	57,19	89,60	63,89	80,45		61,21		86,68		48,50	58,75		70,53	48,68		84,82		50,79
Sum	99,10	100,02	99,60	100,13	100,14		99,81		100,20		100,00	100,45		99,85	98,99		100,42		99,67

Sieve No	15/05/2004 M-42/DD/R1	15/05/2004 M-42/DG/R1	15/05/2004 M-42/GG/R1	15/05/2004 M-42/GG/R1	15/05/2004 M42/GG/R1	15/05/2004 M42/DD/R2	15/05/2004 M42/DG/R2	15/05/2004 M42/GG/R2	15/05/2004 M42/GG/R2	15/05/2004 M42/GG/R2	15/05/2004 M42/GG/R2	M	16/05/2004 43/GG/R1	16/05/2004 M43/DG/R1	16/05/2004 M-45/GG/R1
Loss %	6,70	4,70	7,30	2,50	5,30	6,90	7,10	6,50	5,30	6,70	8,20		8,20	6,00	5,20
2,00	0,20	0,13	0,36	0,23	0,20	0,18	0,12	0,00	0,55	0,09	0,96		0,96	0,15	0,13
1,00	0,93	0,31	0,49	1,20	0,69	0,30	0,32	0,25	1,32	0,97	2,34		2,34	0,52	0,62
0,45	1,05	0,72	0,28	1,91	0,90	0,36	0,57	0,26	2,13	1,41	2,45		2,45	0,91	1,01
0,20	8,35	13,55	2,38	18,61	11,96	3,86	12,38	2,03	22,70	13,68	17,46		17,46	12,77	13,36
0,09	12,59	23,75	9,11	26,87	21,74	12,54	26,81	7,89	24,68	18,74	25,88		25,88	27,70	28,92
Remain	76,42	61,76	86,84	50,89	64,94	82,60	59,36	88,85	49,23	64,76	51,86		51,86	58,14	56,41
Sum	99,54	100,22	99,46	99,71	100,43	99,82	99,56	99,28	100,61	99,55	100,95		100,95	100,19	100,45

Πειραματικός εξοπλισμός

Για τον προσδιορισμό των συνθηκών λειτουργίας του θαλάμου καύσης, χρησιμοποιήθηκε ειδικά σχεδιασμένος εξοπλισμός:

Οπτικό πυρόμετρο (Optical Pyrometer). Οπτικό πυρόμετρο χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των υψηλότερων θερμοκρασιών στο εσωτερικό του λέβητα. Ο εξοπλισμός αυτός δε μπορεί να προσδιορίσει την απόσταση μεταξύ του σημείου στο οποίο έχει τοποθετηθεί και του σημείου στο οποίο εκδηλώνονται οι υψηλότερες θερμοκρασίες.

Universal Probe.

- Καταγραφή τοπικών θερμοκρασιών καυσαερίων
- Δειγματοληψία ιπτάμενης τέφρας και καυσαερίων

Η αναρρόφηση καυσαερίων από το καθορισμένο σημείο του θαλάμου καύσης και η εισαγωγή τους στο θερμοστοιχείο έγινε βάσει της μεθόδου η οποία χρησιμοποιείται για την μέτρηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Το ενεργό μήκος των ακροσωληνίων είναι περίπου 5.5 μέτρα ανάλογα με το πάχος του ανοίγματος.

Νερό ψύξης: 3.5m³/h, 4bar

Βοηθητικός αέρας: 3Nm³/h, 4bar

AC: 220V, 15A

Φορητός Μετρητής Θερμικών Φορτίων. Η συσκευή αυτή χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των θερμικών φορτίων που εκπέμπονται από την εστία στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης. Η λειτουργία του μετρητή δεν απαιτεί νερό αέρα ή ρεύμα.

Διάφορες συσκευές μέτρησης θερμοκρασίας. Συσκευές σχεδιασμένες για ειδικούς σκοπούς ως σταθεροί, χωρίς ψύξη μετρητές βασισμένοι σε υψηλής ποιότητας θερμοστοιχεία.

Αναλυτές Καυσαερίων. Orsat ή IMR3000P ή αντίστοιχες συσκευές χρησιμοποιήθηκαν για ανάλυση O₂, CO, CO₂.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο2
Επιφάνειες Συναλλαγής Θερμότητας και Αγωγοί
Ανακυκλοφορίας Θερμού Αέρα



Εικόνα 11-23 : Οικονομητήρας, Πάνω Μέρος (Ύψος 60,00 m)



Εικόνα 11-24 : Οικονομητήρας, Πάνω Μέρος (Ύψος 60,00 m)



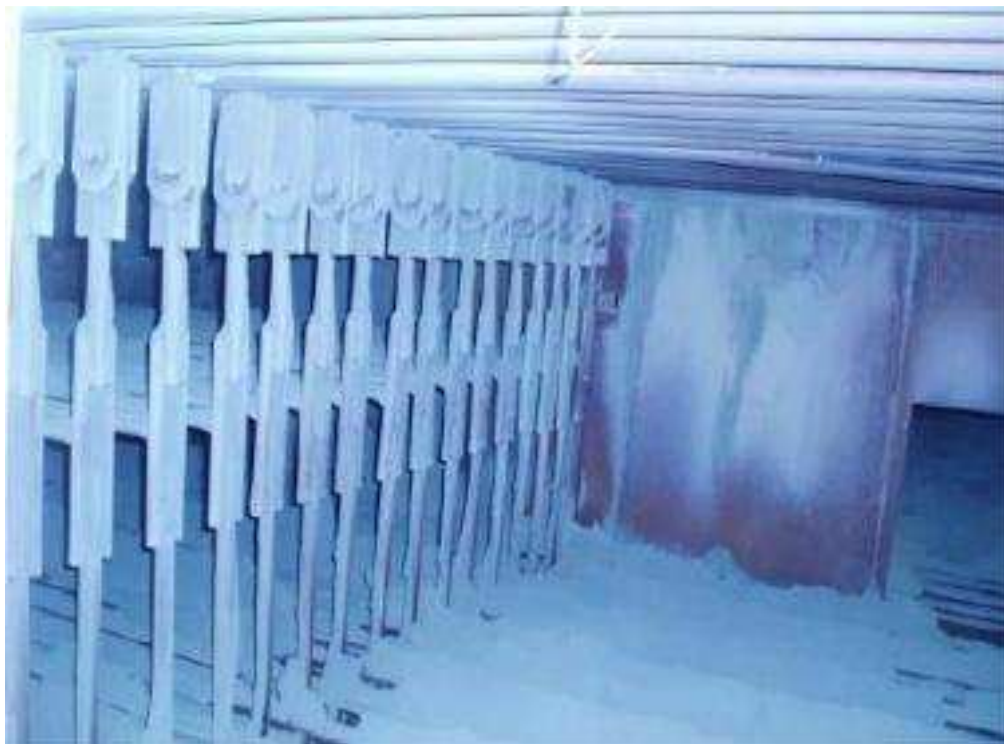
Εικόνα 11-25 : Οικονομητήρας, Ενδιάμεσα Άνω και Κάτω Αυλών (Ύψος 66,420 m)



Εικόνα 11-26 : Οικονομητήρας, Ενδιάμεσα Άνω και Κάτω Αυλών (Ύψος 66,420 m)



Εικόνα 11-27 : RH1a, Άνω Αυλοί (Ύψος 63,540 m)



Εικόνα 11-28 : Οικονομητήρας (Πάνω) και RH1a (Κάτω) (Ύψος 63,540 m)



Εικόνα 11-29 : Οικονομητήρας (Πάνω) και RH1a (Κάτω) (Ύψος 63,540 m)



Εικόνα 11-30 : Όψη μεταξύ RH1a (Πάνω) και SH1a (Κάτω) (Ύψος 60,650 m)



Εικόνα 11-31 : RH1a, Κάτω Αυλοί (Ύψος 60,650 m)



Εικόνα 11-32 : SH1a (Κάτω) (Ύψος 60,650 m)



Εικόνα 11-33 : SH1a (Κάτω Τμήμα) (Ύψος 58,170 m)



Εικόνα 11-34 : SH1a (Κάτω Τμήμα) (Ύψος 58,170 m)



Εικόνα 11-35 : SH1a (Κάτω Τμήμα) (Ύψος 58,170 m)



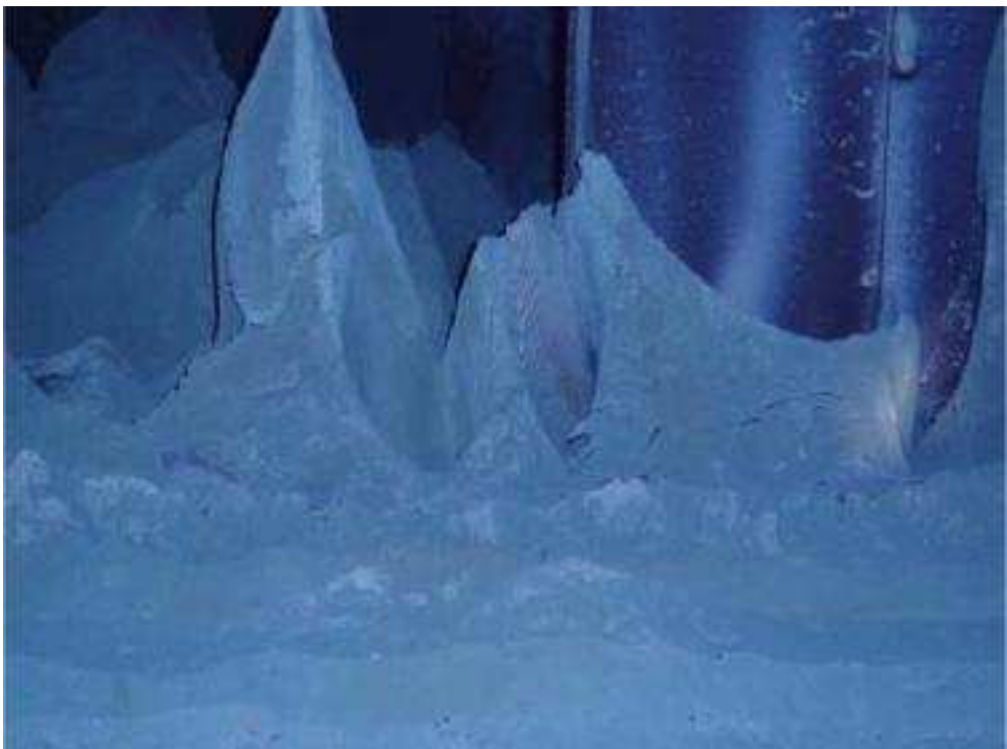
Εικόνα 11-36 : Όψη μεταξύ SH1a (Πάνω) και RH1b (Κάτω) (Ύψος 58,170 m)



Εικόνα 11-37 : Όψη μεταξύ SH1a (Πάνω) και RH1b (Κάτω) (Ύψος 58,170 m)



Εικόνα 11-38 : RH1b, Άνω Αυλοί (Ύψος 58,170 m)



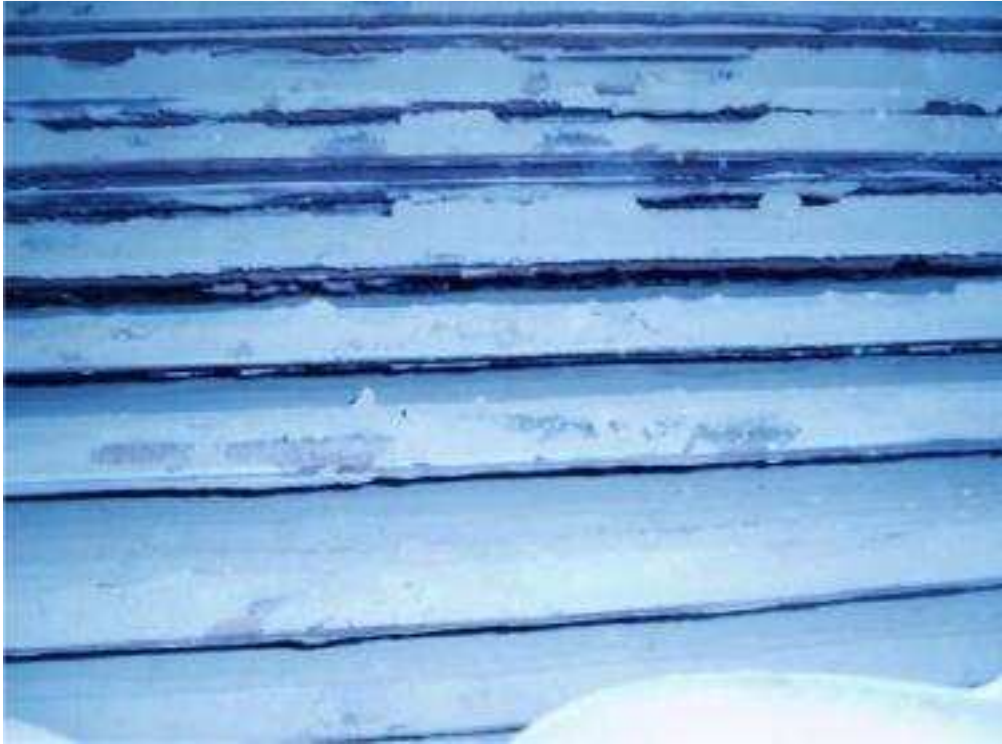
Εικόνα 11-39 : Κοντινή λήψη επικαθίσεων στο Πάνω Τμήμα του RH1b (Ύψος 58,170 m)



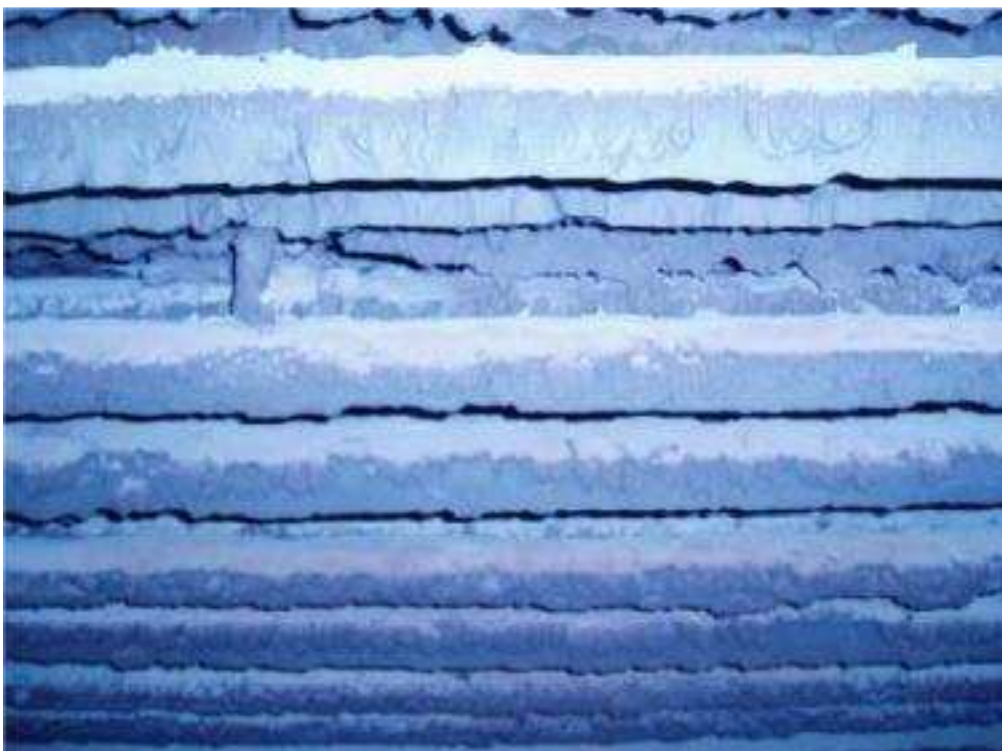
Εικόνα 11-40 : RH1b, Κάτω Αυλοί (Ύψος 55,820 m)



Εικόνα 11-41 : SH1b, Πάνω Τμήμα (Ύψος 55,820 m)



Εικόνα 11-42 : SH1b, Πάνω Τμήμα (Ύψος 55,820 m)



Εικόνα 11-43 : SH1b, Πάνω Τμήμα καλυμμένο με σκληρές επικαθίσεις (Ύψος 55,820 m)



Εικόνα 11-44 : Όψη μεταξύ SH1b (Πάνω) και RH2 (Κάτω) (Ύψος 53,500 m)



Εικόνα 11-45 : SH1b, Κάτω Τμήμα (Ύψος 53,500 m)



Εικόνα 11-46 : Επικαθίσεις στους Αυλούς στο Κάτω Μέρος του SH1b (Ύψος 53,500 m)



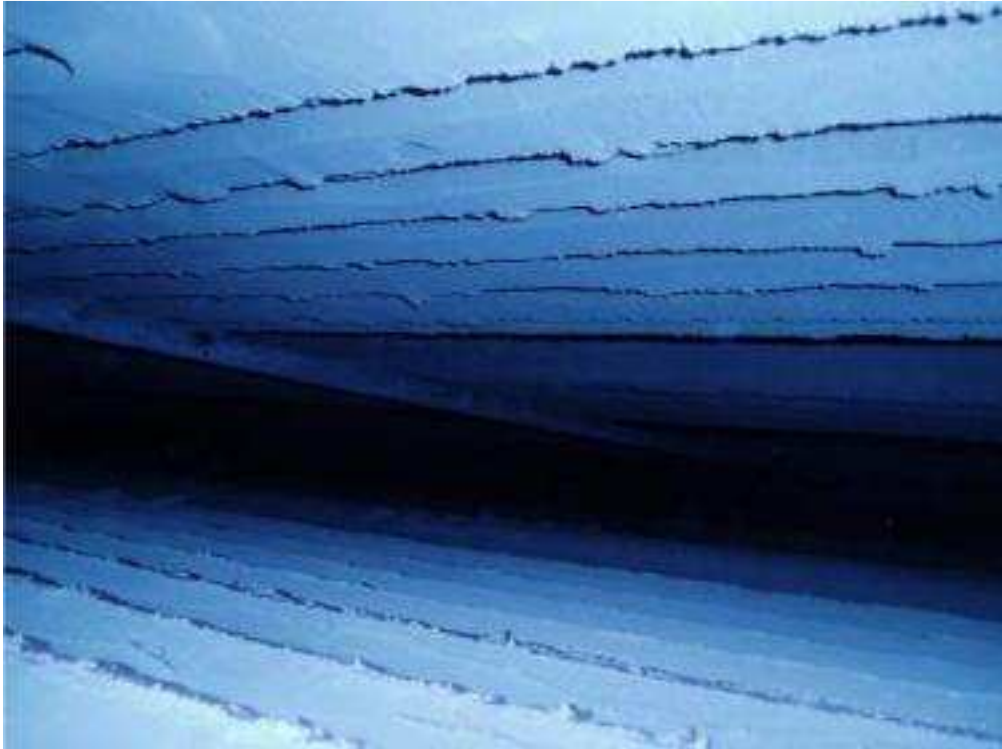
Εικόνα 11-47 : Επικαθίσεις στο Άνω Τμήμα του RH2 (Ύψος 53,500 m)



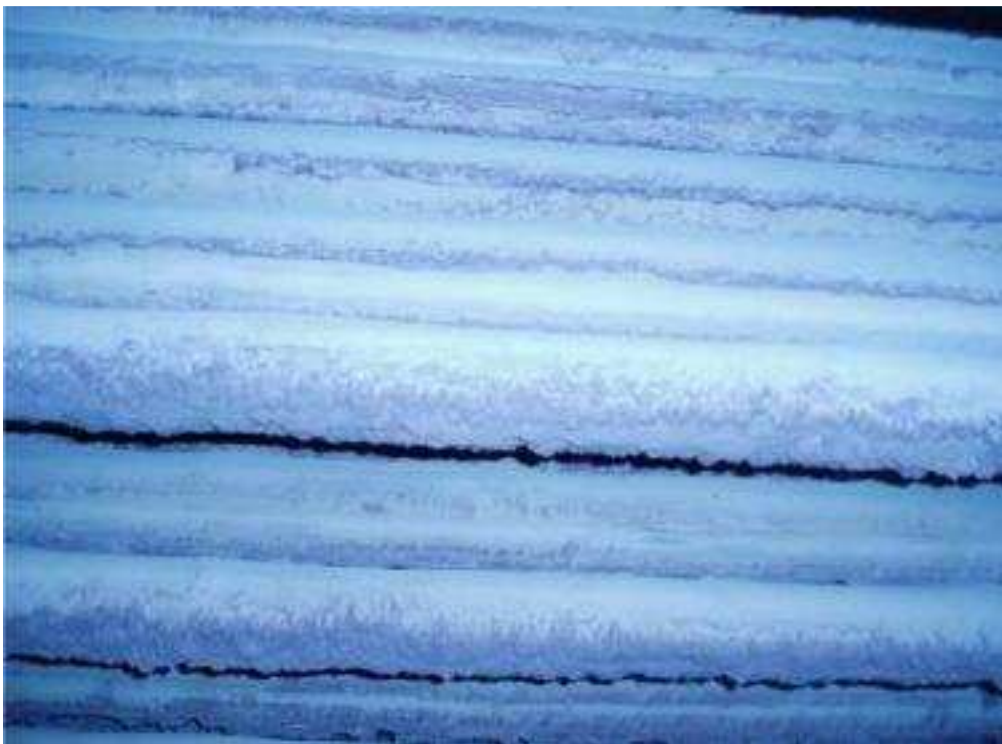
Εικόνα 11-48 : Επικαθίσεις μεταξύ SH1b (Πάνω) και RH2 (Κάτω) (Ύψος 53,500 m)



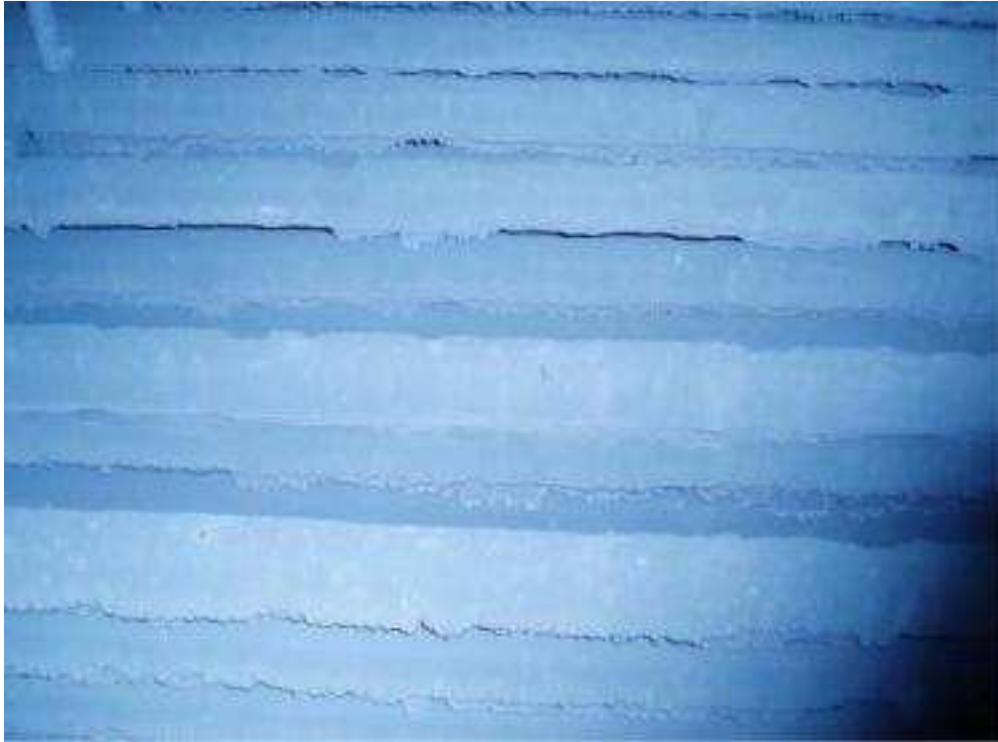
Εικόνα 11-49 : Όψη μεταξύ SH1b (Πάνω) και RH2 (Κάτω) (Ύψος 53,500 m)



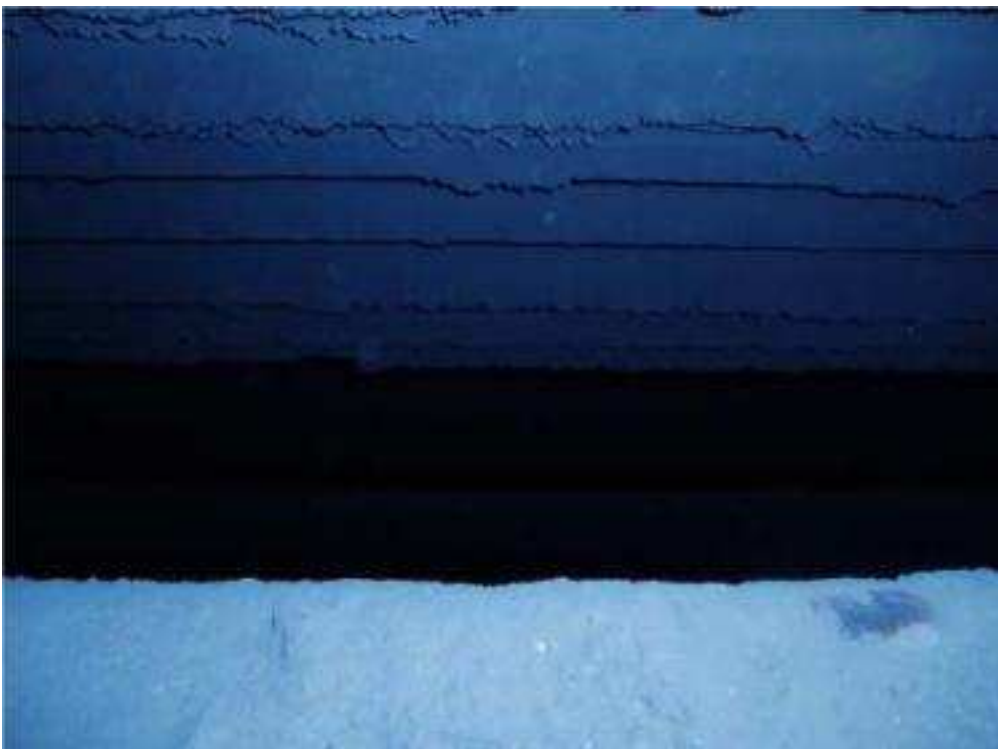
Εικόνα 11-50 : Εσωτερικό RH2 (Ύψος 53,500 m)



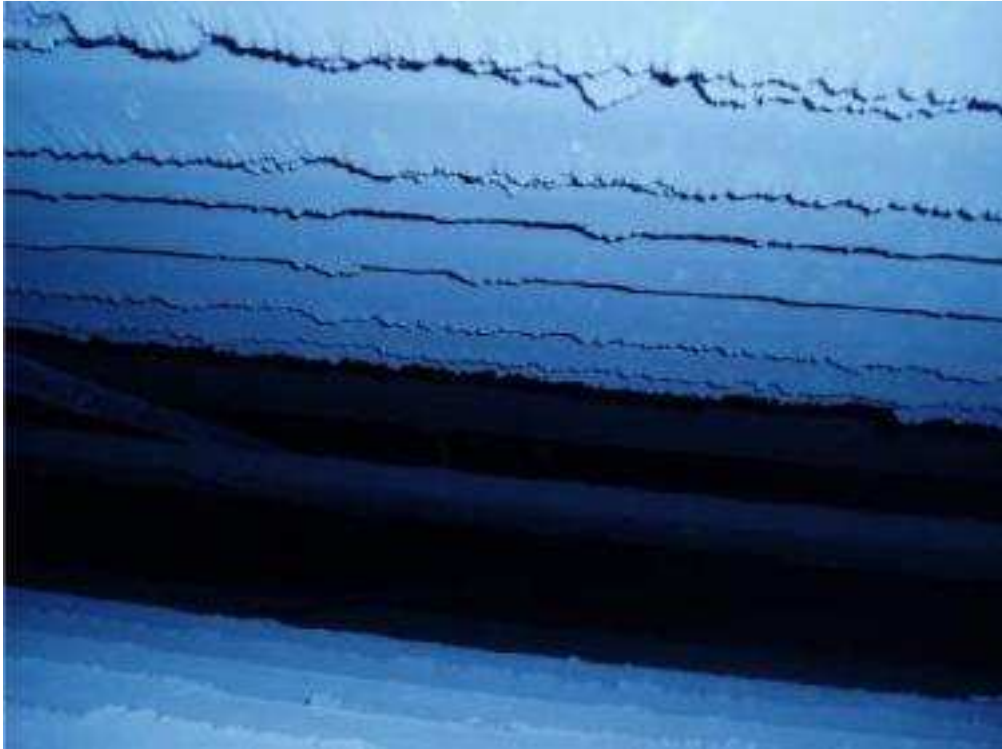
Εικόνα 11-51 : Επικαθίσεις στο Άνω Τμήμα του RH2 (Ύψος 53,500 m)



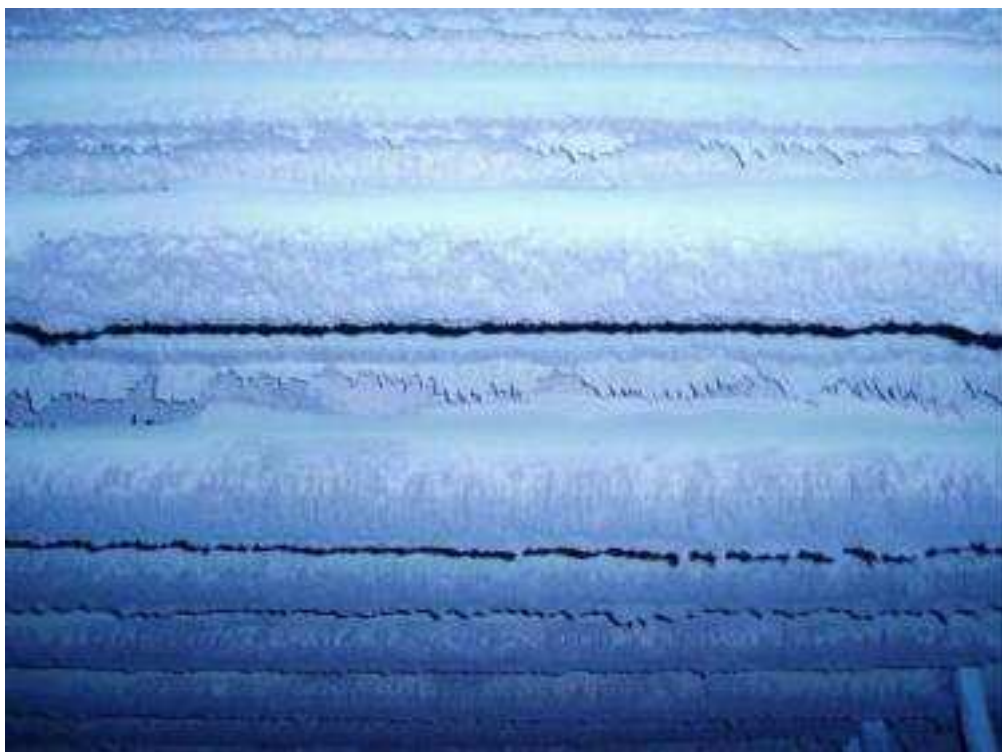
Εικόνα 11-52 : Επικαθίσεις στο Κάτω Τμήμα του RH2 (Ύψος 53,500 m)



Εικόνα 11-53 : Επικαθίσεις στο Κάτω Τμήμα του RH2 (Ύψος 50,750 m)



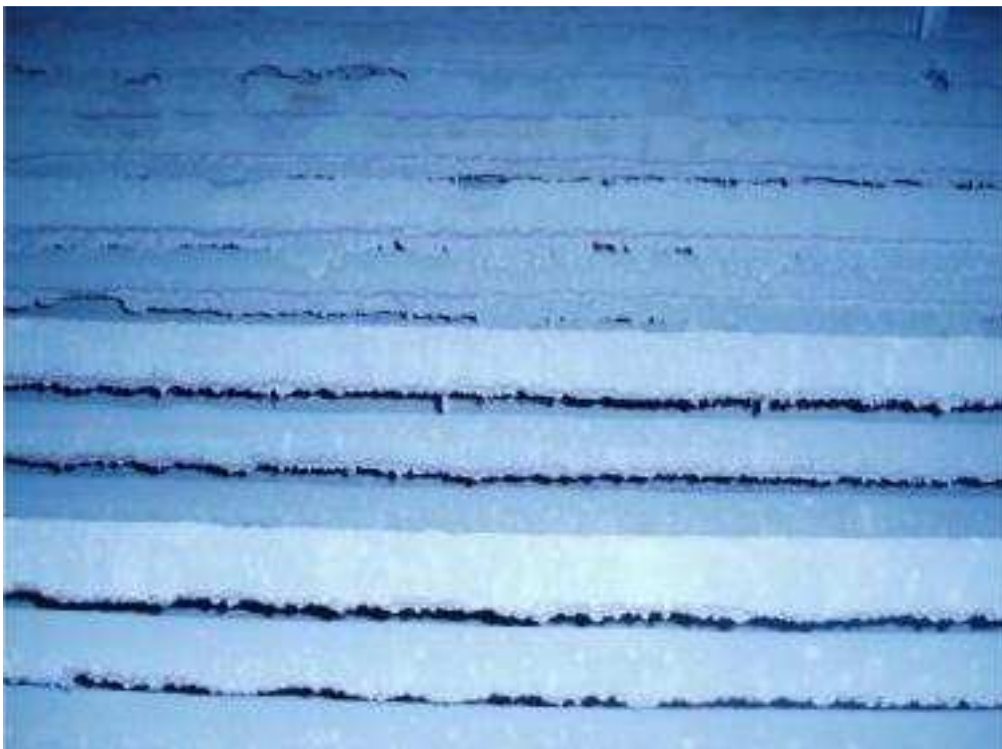
Εικόνα 11-54 : Επικαθίσεις στο Κάτω Τμήμα του RH2 (Ύψος 50,750 m)



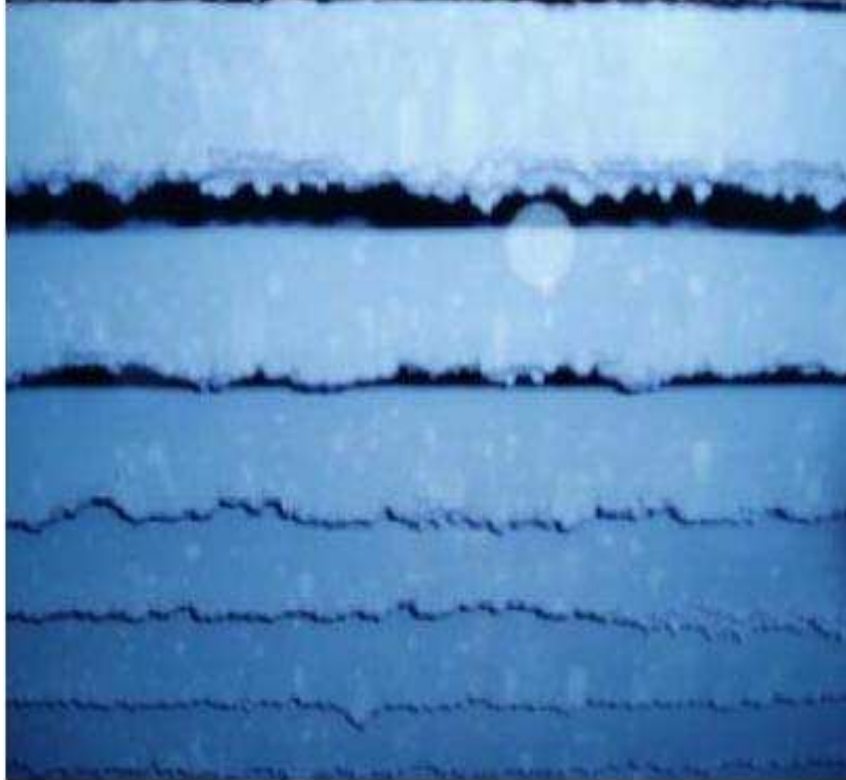
Εικόνα 11-55 : Επικαθίσεις στο Κάτω Τμήμα του RH2 (Ύψος 50,750 m)



Εικόνα 11-56 : Όψη μεταξύ RH2 (Πάνω) και SH3 (Κάτω) (Ύψος 49,075 m)



Εικόνα 11-57 : SH3, Άνω Τμήμα (Ύψος 49,075 m)



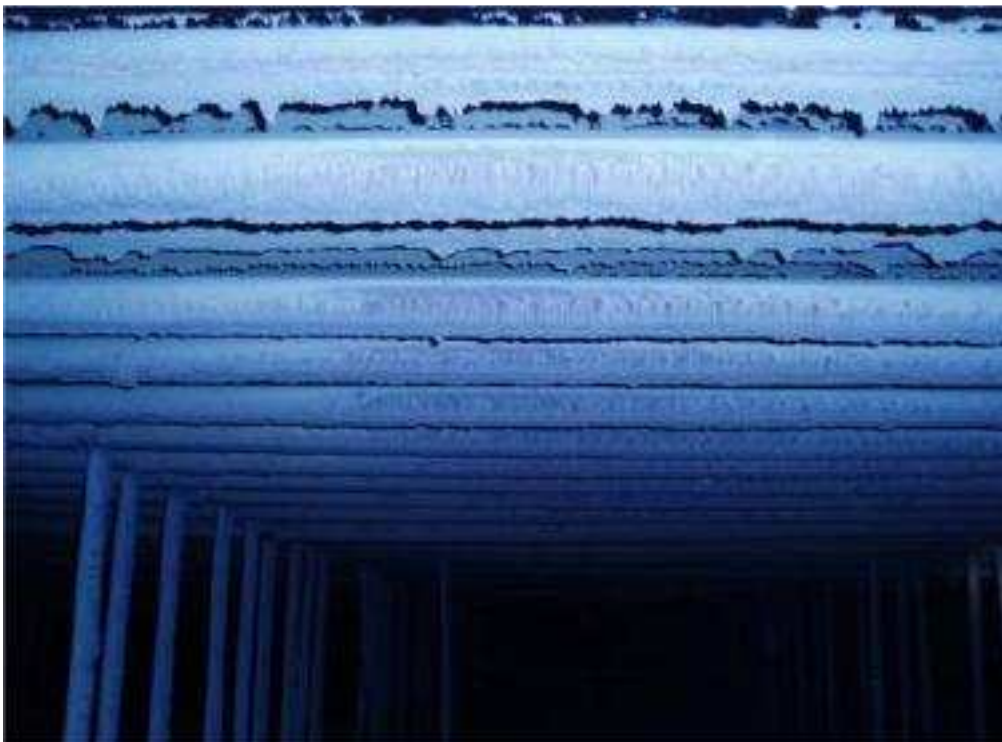
Εικόνα 11-58 : Επικαθίσεις στο Άνω Τμήμα του SH3 (Ύψος 49,075 m)



Εικόνα 11-59 : Όψη μεταξύ SH3 (Πάνω) και SH2 (Κάτω) (Ύψος 49,075 m)



Εικόνα 11-60 : Επικαθίσεις στο Κάτω Μέρος του SH3 (Ύψος 47,045 m)



Εικόνα 11-61 : Επικαθίσεις στο Κάτω Μέρος του SH3 (Ύψος 47,045 m)



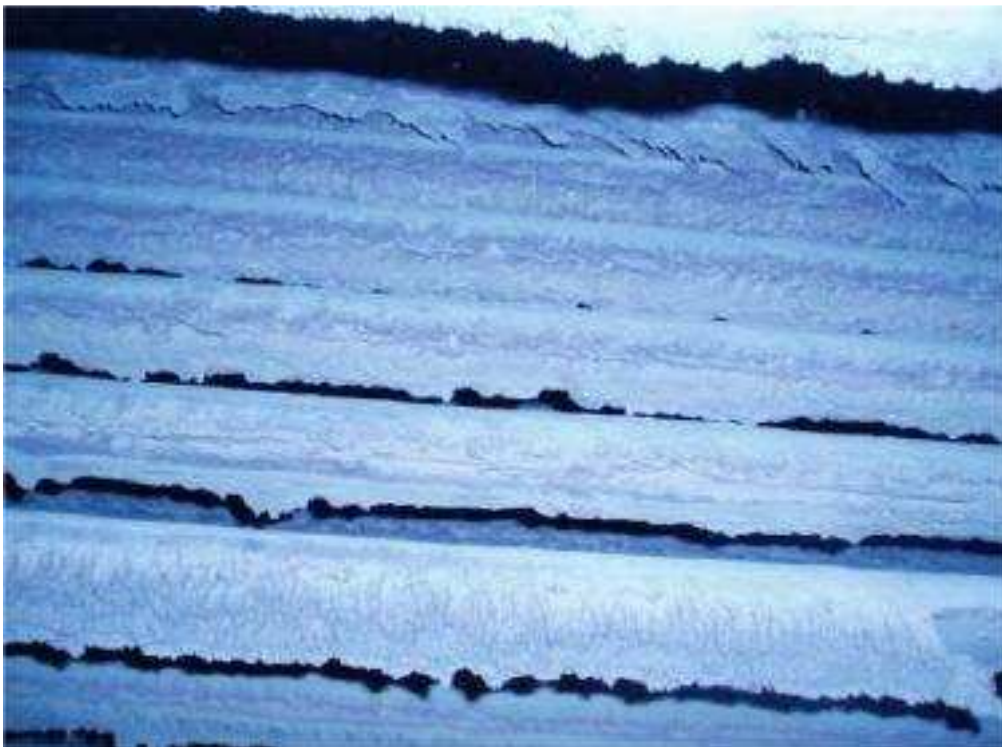
Εικόνα 11-62 : Παραμορφωμένοι σωλήνες στήριξης μεταξύ SH3 (Πάνω) και SH2 (Κάτω) (Ύψος 47,045 m)



Εικόνα 11-63 : SH2, Άνω Τμήμα (Ύψος 47,045 m)



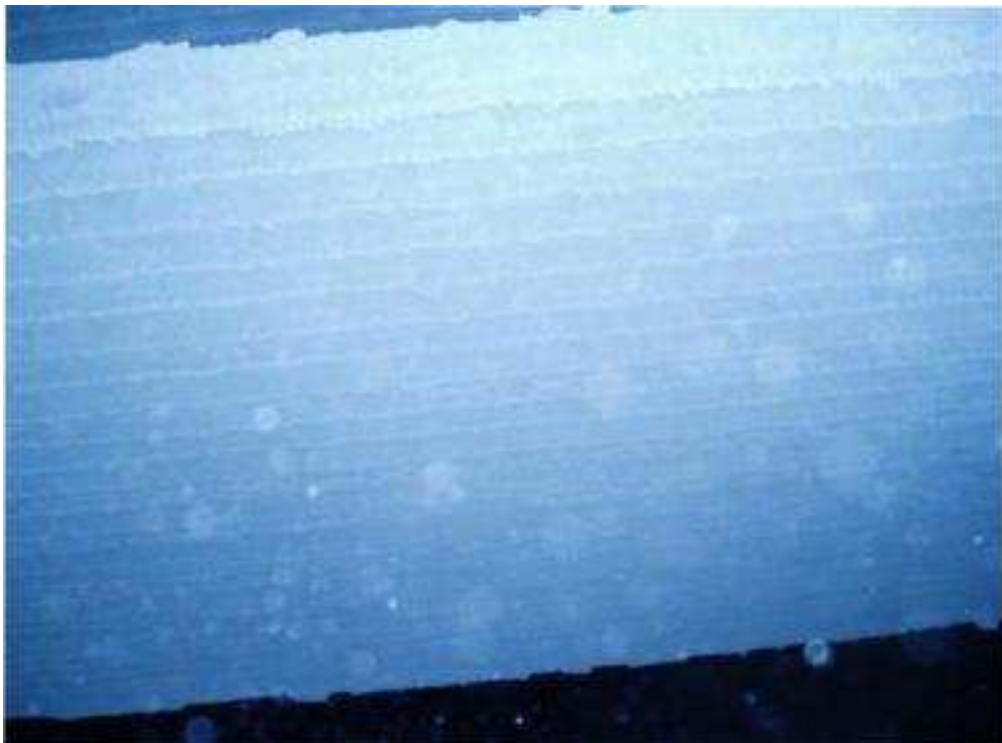
Εικόνα 11-64 : Επικαθίσεις στο Κάτω Μέρος του SH3 (Ύψος 47,045 m)



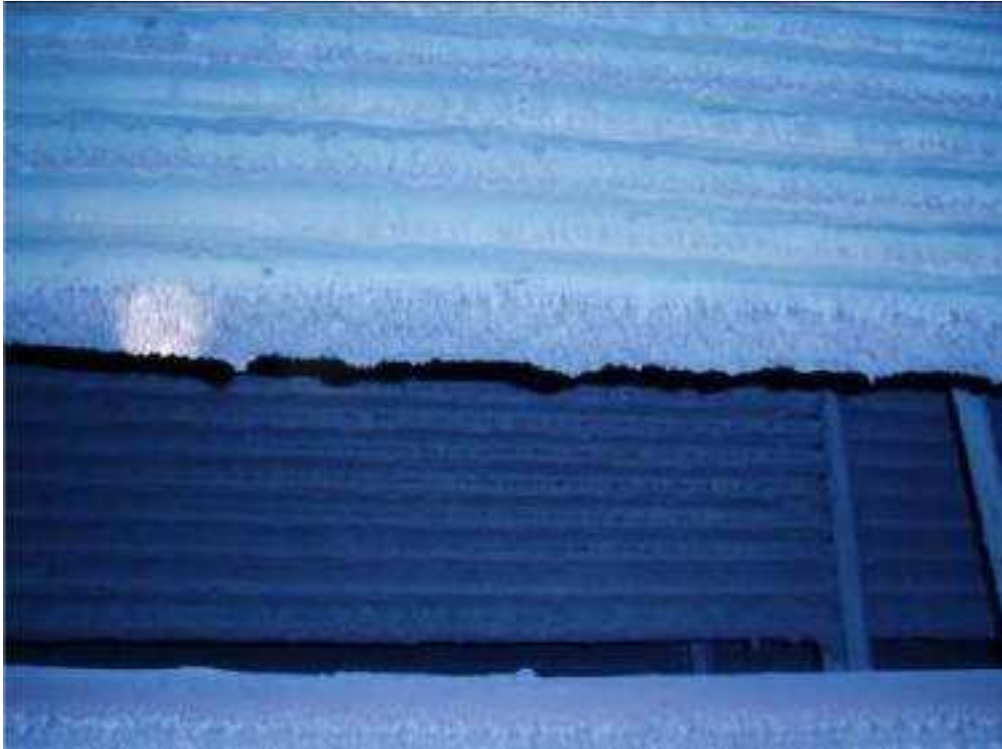
Εικόνα 11-65 : Άνω Τμήμα SH2 (Ύψος 43,500 m)



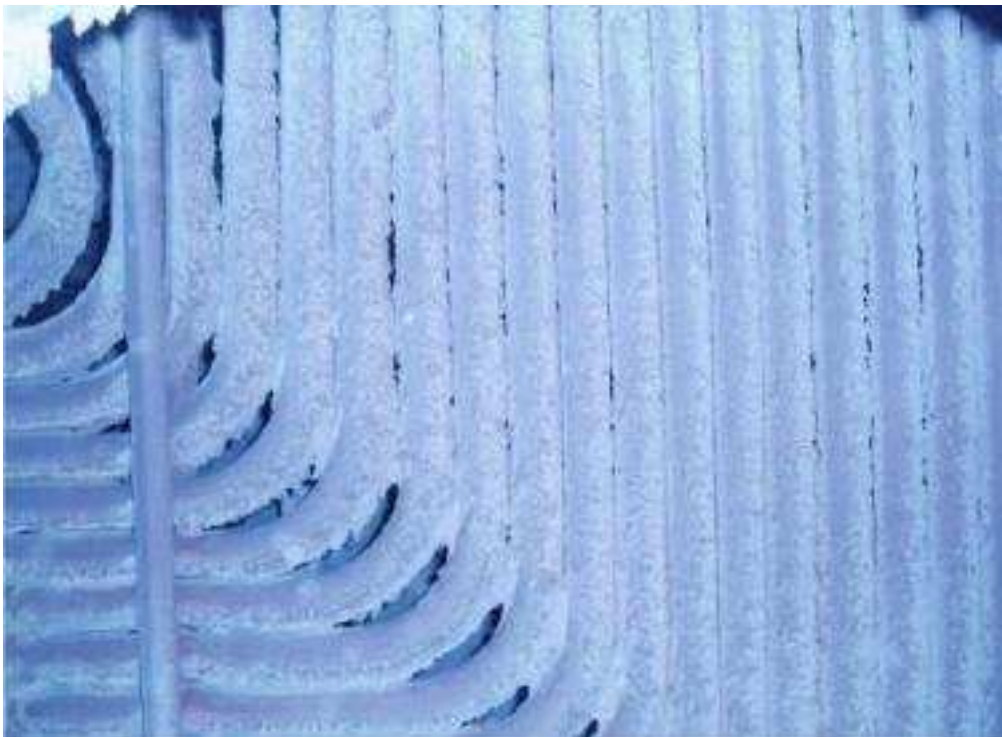
Εικόνα 11-66 : Κάτω Τμήμα SH2 (Ύψος 43,500 m)



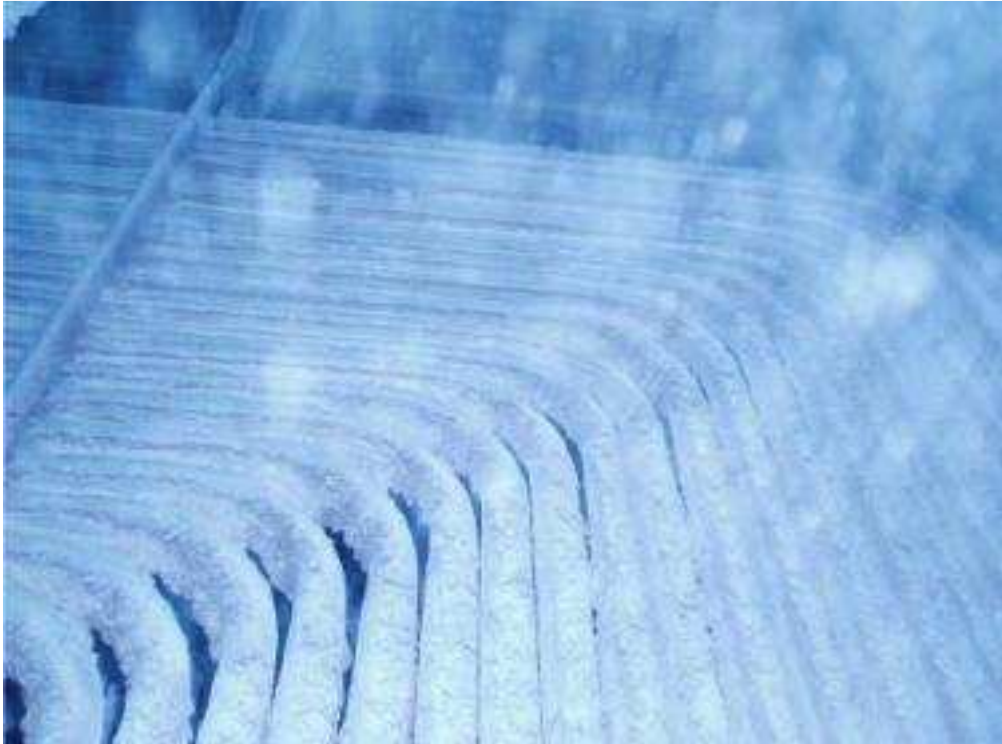
Εικόνα 11-67 : Κάτω Τμήμα SH2 (Ύψος 43,500 m)



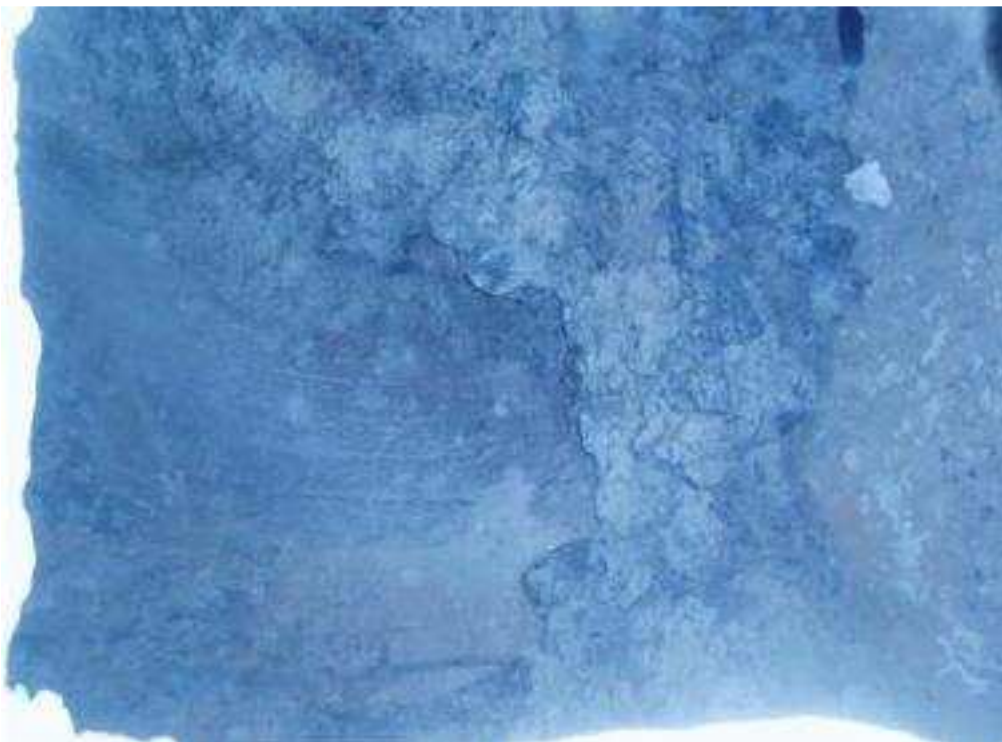
Εικόνα 11-68 : Άνω Τμήμα SH2 (Ύψος 43,500 m)



Εικόνα 11-69 : Γωνία σωλήνων στο Κάτω Τμήμα του SH2 (Ύψος 43,500 m)



Εικόνα 11-70 : Γωνία σωλήνων στο Κάτω Τμήμα SH2 (Ύψος 43,500 m)



Εικόνα 11-71 : Επικαθίσεις στους Αγωγούς Ανακυκλοφορίας του Μύλου M44



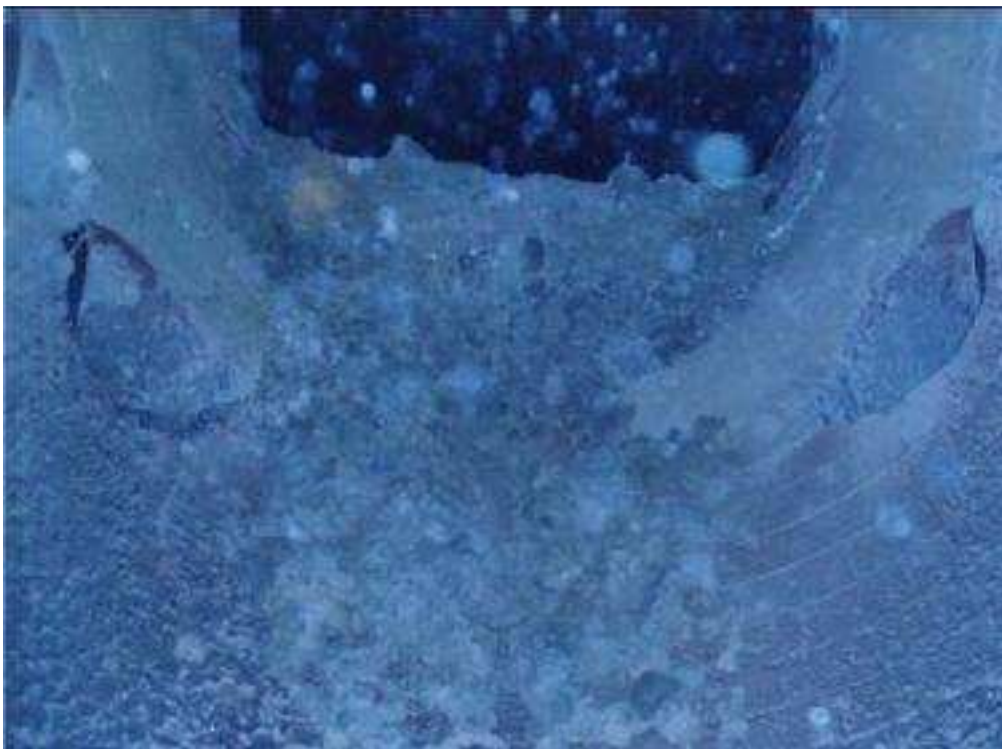
Εικόνα 11-72 : Επικαθίσεις στους Αγωγούς Ανακυκλοφορίας του Μύλου Μ44



Εικόνα 11-73 : Επικαθίσεις στους Αγωγούς Ανακυκλοφορίας του Μύλου Μ44



Εικόνα 11-74 : Επικαθίσεις στο Μέσο των Αγωγών Ανακυκλοφορίας του Μύλου Μ44



Εικόνα 11-75 : Επικαθίσεις στο Μέσο των Αγωγών Ανακυκλοφορίας του Μύλου Μ45

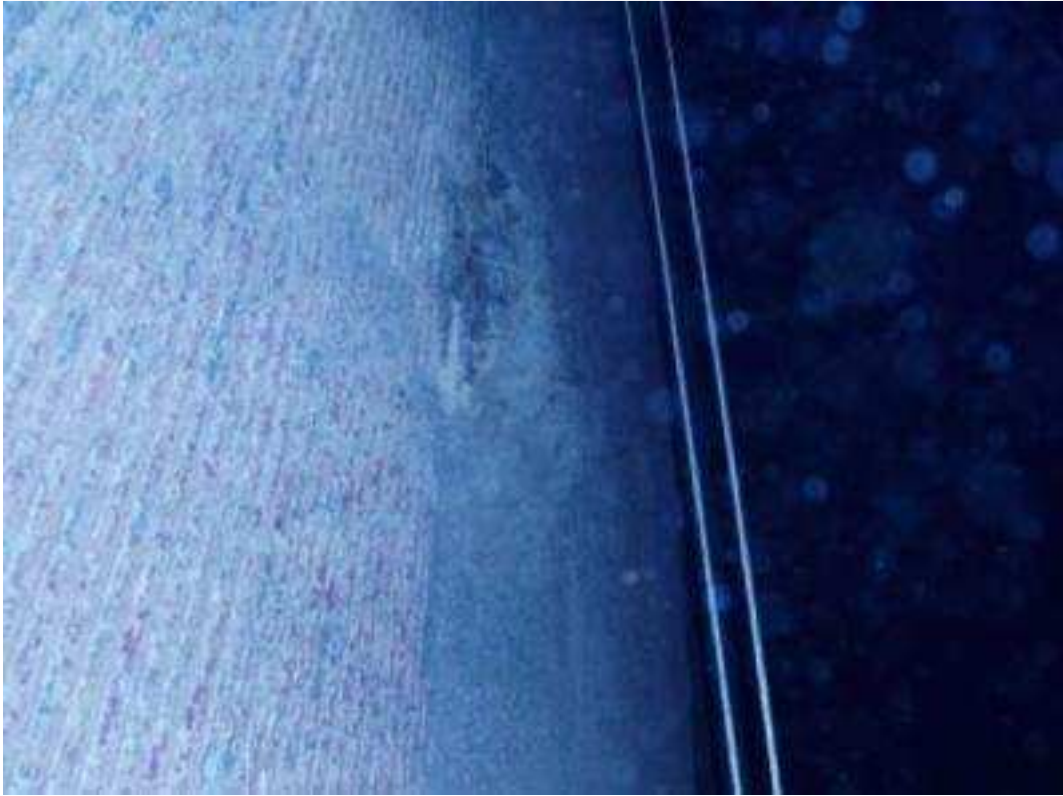


Εικόνα 11-76 : Επικαθίσεις στο Μέσο των Αγωγών Ανακυκλοφορίας του Μύλου Μ45



Εικόνα 11-77 : Επικαθίσεις στο Μέσο των Αγωγών Ανακυκλοφορίας του Μύλου M43

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Νο3
Θάλαμος Καύσης



**Εικόνα 11-78 : Εμπρόσθιος υδρότοιχος, καθαρός αριστερά, με επικαθίσεις δεξιά
(Ύψος 20m)**



Εικόνα 11-79 : Ογκώδης επικαθιση στον εμπρόσθιο υδρότοιχο (Ύψος 25m)



Εικόνα 11-80 : Πάνω τμήμα επικάλυψης στον εμπρόσθιο υδρότοιχο (Ύψος 26m)



Εικόνα 11-81 : Εμπρόσθιος υδρότοιχος, αριστερά από τον καυστήρα (Ύψος 19m)



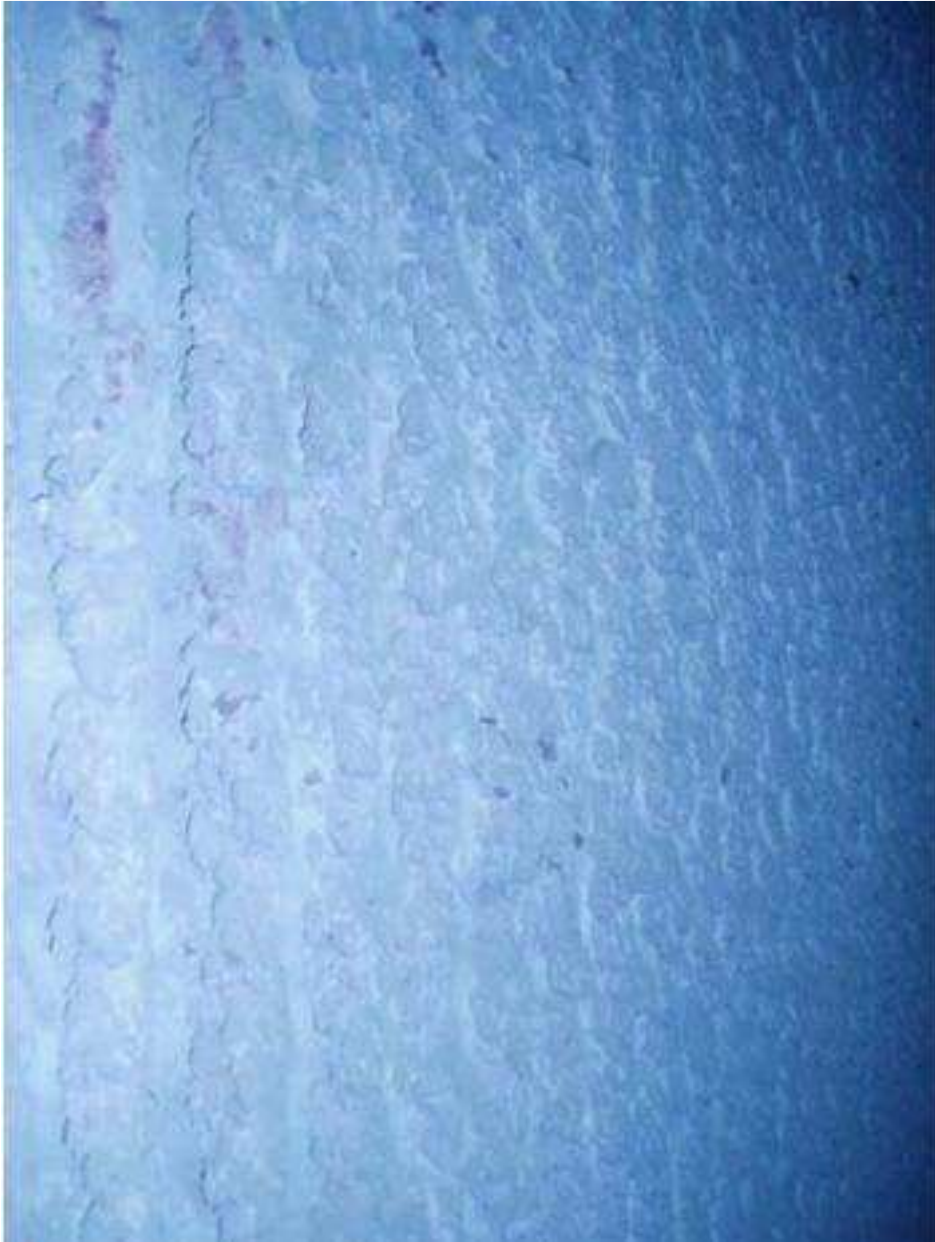
Εικόνα 11-82 : Κατεστραμμένο τμήμα κάτω κύριου καυστήρα 5 (Ύψος 20m)



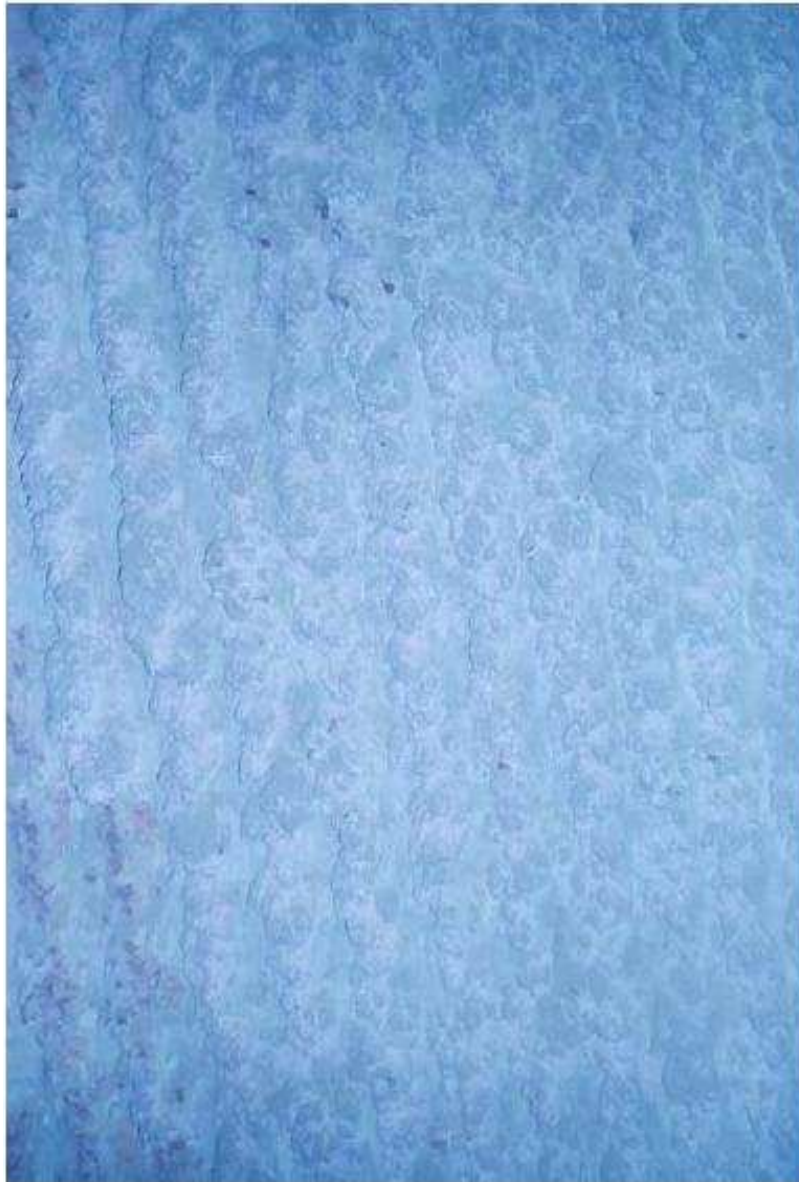
Εικόνα 11-83 : Κατεστραμμένο τμήμα κάτω κύριου καυστήρα 5 (Ύψος 20m)



Εικόνα 11-84 : Κατεστραμμένο τμήμα κάτω κύριου καυστήρα 5 (Ύψος 20m)



Εικόνα 11-85 : Επικαθίσεις στον εμπρόσθιο υδρότοιχο μεταξύ των καυστήρων



Εικόνα 11-86 : Επικαθίσεις στον εμπρόσθιο υδρότοιχο μεταξύ των καυστήρων



Εικόνα 11-87 : Άνω Τμήμα Καυστήρα 6

12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Complex thermal tests of furnace and flue gas tract operating conditions at boiler no. 3 TPP "KARDIA", Report for PPC/ Kardia , InterkontaktEnergobelgrade, report, contract no. DEP- 15900958, April- June 2001, Belgrade
2. Complex thermal tests of furnace and flue gas tract operational conditions at boiler No. 3 TPP KARDIA (Detailed program), InterkontaktEnergobelgrade, December 2000.
3. Investigation on fouling and Slagging mechanism occurring at boiler No. 3 TPP KARDIA (Detailed program), Interkontakt Energy Beograd, December 2000.
4. Preliminary Instructions for a EVT forced Circulation Boiler (Sulzer System) with EVT Lignite Firing Equipment, PPC/ Kardia Unit III/IV, Greece, Stuttgart, April 10, 1980
5. Acceptance of the unit/ Appendix to Technical Specification, EVTStuttgart,1981
6. Graphical documentation, TPP "Kardia" unit III/IV
7. M.F.R. Mulcahy, J. Boow, P.R.C. Goard : Fireside Deposits and their Effect on Heat Transfer in a Pulverized-fuel-fired Boiler, Part I: The Radiant Emittance and Effective Thermal Conductance of the Deposits, J. of the Inst. of Fuel, vol. 39, pp. 385-394, 1966
8. J. Boow, P.R.C. Goard: Fireside Deposits and their Effect on Heat Transfer in a Pulverized-fuel-fired Boiler, Part III: The Influence of the Physical Characteristics of the Deposit on its Radiant Emittance and Effective Thermal Conductance, J. of the Inst. of Fuel, Vol. 346, pp. 412-419, 1969.
9. I.R. Mikh, H.A. Kiaar, T.V. Tiykma: Eksperimentalno issledovaniene khorozhnikh termofizicheskikh karakteristikov zolovikhotlozhenia, Vleni mineralnoj chasti energeticheskikh toplivnauslovyv raborotaparogeneratov, III Vsesozhznakonferencia, Talin, SSSR, 1980

10. A.K. Mehta, N.S. Harding: Proceedings of the Second International Conference on Effects of Coal Quality on Power Plants, EPRI PA, Saint Luis, Miss., USA, July 1991.
11. J.D.R.S. Pinheiro: Fouling of Heat Transfer Surfaces, from: Heat Exchanger Source- book, editor J.W. Palen, Hemisphere Publishing Corp., New York, 1986
12. S.V. Djekic, Investigation of the mechanism of mineral deposit formation in stean boilers burning Kosovo lignite, Doctoral thesis, University of Zagreb- Faculty of Mechanical and ship engineering, 1986
13. R.D. Litt: Slag Monitoring Techniques for Utility Boilers, Third EPRI Incipient-Failure Detection Conference, pp. 10.43-10.67, Phil., PA, USA, 10-12 March, 1987
14. S.V. Djekic, Behavior of Mineral Matter in the Coal of Kosovo during the Utility Boiler Combustion Process, Engineering Foundation conference "Mineral Matter and Ash Deposition form Coal", February
15. 22- 26, 1988, Santa Barbara, California, Library Congress Catalog Card No.: 89-82293, ISBN 0-939204-40-1
16. A. A. Ots: Processy v parogeneratorakhprishiganiislancev I Kansko-Achinskiugolei, Energiya, Moskva, 1977.
17. 1.1 A. Zalkind, V.S. Vdovchenko, E.P. Dik: Zola ishlaki v kotelnykhtopkakh, Energo-atomizdat, Moskva, 1988.
18. Loehden et al.: Fly Ash Generation and Deposition in Pulverized Coal Combustion, Engineering Foundation Conference on Mineral Matter and Ash Deposition from Coal, pp. 279-307, Santa Barbara, CA, February 1988.
19. Harding: Proceedings of the Second International Conference on Effects of Coal Quality on Power Plants, A.K. Mehta, N.S., EPRI PA, Saint Luis, Miss., USA, July 1991.
20. A.N. Alehnovich: Mineralnaiachasttopliva, shlakovanie, zagriaznenieiochistkakotlov, Sborniktezisovdokladovnauchnotehnicheskoikonferencii, 15-17 sent. 1992 g., g. Cheliabinsk, Russia

21. Afgan, P.M. Radovanovi}, A.G. Blokh: An Expert System for Boiler Surface Fouling Assessment, from: Expert Systems and Computer Simulation in Energy Engineering, edited by: K. Hanjalii, and J.H. Kim, pp. 219-224, Begel House, Inc.,New York-Wallingford (UK), 1995
22. S.Djekic, Z.Micevic, Slagging temperature when burnigPlevlja lignite, International Power Conferewnce CNE'96, Constanca, Romania
23. P.M. Radovanovic: A Contribution to the Investigation of Influence of Ash

ΜΕΡΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

13. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

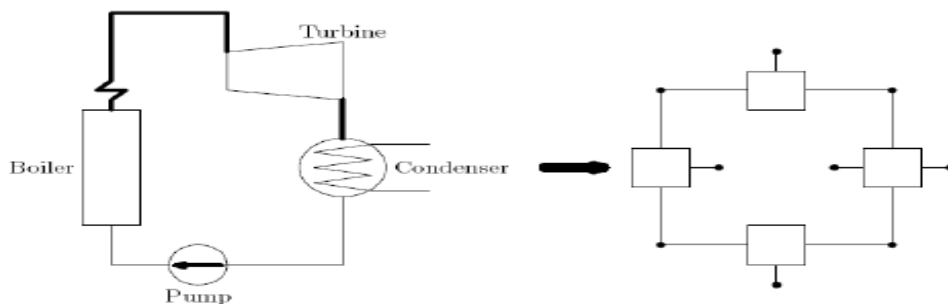
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία της μελέτης του φαινομένου των επικαθίσεων με προσομοίωση με το λογισμικό DNA. Βασικός στόχος ήταν η δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο θα αποτυπώνει την επίδραση του φαινομένου. Αφού γίνεται σύντομη ανάλυση της θεωρίας η οποία διέπει το προσομοιωτικό εργαλείο του οποίου χρησιμοποιήθηκε, καθώς και της μεθοδολογίας σύνταξης του μοντέλου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαφόρων σεναρίων. Σε κάθε περίπτωση γίνεται σχολιασμός για το βαθμό στον οποίο προσεγγίζεται η πραγματική επίδραση του φαινομένου των επικαθίσεων. Η μελέτη αυτή έχει τους εξής στόχους:

- Μοντελοποίηση του ατμοπαραγωγού και της επίδρασης των επικαθίσεων σε αυτόν.
- Έλεγχος ορθής συμπεριφοράς των μοντέλων σε συνθήκες ρύπανσης.
- Καταγραφή επίδρασης ρύπανσης στα διάφορα στοιχεία του ατμοπαραγωγού.

14. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

14.1. Περιγραφή του προγράμματος DNA

Μια γενική περιγραφή της φιλοσοφίας του προγράμματος μπορεί να δοθεί από την Εικόνα 11-1 όπου παρουσιάζεται ένας απλός κύκλος Rankine, που αφορά εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με κύκλωμα νερού-ατμού, και το αντίστοιχο μοντέλο όπως το αντιλαμβάνεται το πρόγραμμα. Συγκεκριμένα το πρόγραμμα αντιλαμβάνεται ένα κλειστό σύστημα με κόμβους και κλάδους πάνω στα οποία κάνει υπολογισμούς. Κάθε συσκευή αντιπροσωπεύεται από μία ρουτίνα η οποία προσομοιώνει τη λειτουργία της.



Εικόνα 14-1: Μεταφορά ενός απλού ενεργειακού συστήματος στη μορφή δικτύου

Το DNA εφαρμόζει μια πινακοειδή αντιπροσώπευση του συστήματος. Η τελική μορφή των εξισώσεων που επιλύει το πρόγραμμα είναι ουσιαστικά ένα σύστημα n εξισώσεων με n αγνώστους το οποίο μπορεί να αναπαρασταθεί μαθηματικά με τη μορφή πινάκων της μορφής $A\underline{x} = \underline{b}$. Πρέπει να παρατηρηθεί, ότι η κατεύθυνση των ροών μέσα στους κλάδους δεν ορίζεται κατά τη σύνταξη του μοντέλου. Αυτό επιτυγχάνεται κατά τη προσομοίωση, όπου μέσα από την επίλυση του μοντέλου, τα επιμέρους στοιχεία (ρουτίνες) υπολογίζουν την κατεύθυνση της ροής.

Η προσέγγιση που κάνει το DNA σε ένα κύκλωμα είναι ανάλογη με αυτήν των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, είναι απαραίτητο να καθοριστούν τα ρεύματα και οι τάσεις. Η διαφορά τάσης από ένα στοιχείου είναι η κατευθυντήρια δύναμη για τον καθορισμό του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του στοιχείου.

Τα ρεύματα περνούν από τα στοιχεία και συνδέονται με τους κλάδους, ενώ οι τάσεις συνδέονται με κόμβους. Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, οι δύο νόμοι του

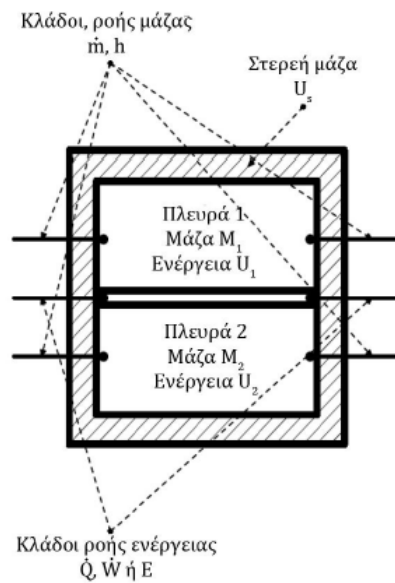
Kirchhoff εφαρμόζονται με μαθηματικό μοντέλο. Βάσει του νόμου του Kirchhoff, το άθροισμα των ρευμάτων σε έναν κόμβο είναι ίσο με το μηδέν. Ο νόμος τάσης του Kirchhoff λέει, ότι οι αλλαγές τάσης σε ένα κλειστό κύκλωμα είναι μηδέν.

Στην περίπτωση του DNA τα δύο χαρακτηριστικά μεγέθη δεν είναι πλέον η τάση και το ρεύμα αλλά οι ροές μάζας και οι ενεργειακές ροές που προσδιορίζουν την κατάσταση στον κλάδο. Στους κόμβους η πίεση είναι η μεταβλητή και οι διαφορές πίεσης είναι οι κατευθυντήριες δυνάμεις για τη ροή μέσω των συστατικών.

Ο πρώτος νόμος Kirchhoff διατυπώνει ουσιαστικά μια εξίσωση συνέχειας για κάθε μία από τις μεταβλητές του κλάδου, όπως η εξίσωση συνέχειας για τις ροές μάζας και ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής για τις ενεργειακές ροές. Αναλογικά λοιπόν στο DNA τα πάντα είναι ορισμένα σε κάθε κόμβο και κλάδο με δεδομένα, τη ροή μάζας, τις ενθαλπίες και τις πιέσεις.

Στις σχέσεις των συστατικών, οι ιδιότητες των ρευστών μπορούν συχνά να έχουν επιρροές. Αυτό σημαίνει ότι οι θερμοδυναμικές ιδιότητες είναι θεμελιώδους σημασίας στα ενεργειακά μοντέλα συστημάτων.

Η ανωτέρω περιγραφή των ενεργειακών συστημάτων έχει καθορίσει μερικές από τις βασικές μεταβλητές ενός ενεργειακού συστήματος. Δεν είναι μόνο οι ροές μάζας που εφαρμόζονται ως μέσα για την ανταλλαγή της ενέργειας σε ένα μοντέλο, αλλά και η ροή θερμότητας και οι διαφορές πίεσης. Στο μοντέλο πρέπει να προσδιορίζονται οι κλάδοι που μεταφέρουν τις ροές μάζας και ενέργειας. Το συστατικό μοντέλο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2 είναι μια αντιπροσώπευση ενός βασικού προτύπου που εφαρμόζεται στο DNA σε διαδικασίες προσομοίωσης σταθερής κατάστασης ή δυναμικές.



Εικόνα 14-2 : Γενικευμένο μοντέλο DNA

Η μάζα και η ενέργεια που περιλαμβάνονται μπορούν να υπολογιστούν ως δυναμικές μεταβλητές. Οι εξισώσεις ισορροπίας για το γενικό συστατικό διατυπώνονται ως εξής:

$$\sum_{\text{κλάδων}} \dot{m} = \frac{dM}{d\tau} \quad [14-1]$$

Για τα μοντέλα σταθερής κατάστασης και για τους κόμβους η εξίσωση συνέχειας απλοποιείται:

$$\sum_{\text{κλάδων}} \dot{m} = 0 \quad [14-2]$$

Η ισορροπία ενέργειας για ένα συστατικό στοιχείο στη γενικευμένη του μορφή εκφράζεται ως εξής:

$$\sum_{\text{κλάδων ροής μάζας}} \dot{m} h + \sum_{\text{κλάδων ροής θερμότητας}} \dot{Q} + \sum_{\text{κλάδων ενέργειας}} P = \sum_{\text{ρευστών}} \frac{U}{d\tau} + \frac{U_s}{d\tau} \quad [14-3]$$

Για συστήματα όπου δεν λαμβάνεται υπόψη η δυναμική τους συμπεριφορά, η σχέση απλοποιείται:

$$\sum_{\text{κλάδων ροής μάζας}} \dot{m} h + \sum_{\text{κλάδων ροής θερμότητας}} \dot{Q} + \sum_{\text{κλάδων ενέργειας}} P = 0 \quad [14-4]$$

Σε έναν κόμβο, παρουσιάζεται μόνο ένας τύπος και έτσι η ενεργειακή ισορροπία θα εκφράζεται με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

$$\begin{aligned} \sum_{\text{κλάδων ροής μάζας}} \dot{m} h &= 0 \\ \sum_{\text{κλάδων ροής θερμότητας}} \dot{Q} &= 0 \\ \sum_{\text{κλάδων ενέργειας}} P &= 0 \end{aligned} \quad [14-5]$$

Σύμφωνα με τη παραπάνω διατύπωση, καμία κατεύθυνση ροής δεν εφαρμόζεται. Για να γίνεται λοιπόν αντιληπτή η φορά, θα πρέπει οι ροές εισόδου και εξόδου να έχουν αντίθετα πρόσημα με τις ροές εξόδου να ορίζονται ως αρνητικές.

14.2. Υπολογιστική Μέθοδος

Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα του προγράμματος είναι η μεθοδολογία που εφαρμόζεται κατά επίλυση συστημάτων των μη γραμμικών εξισώσεων. Ένα χαρακτηριστικό που παρατηρείται στα μοντέλα ενεργειακών συστημάτων είναι, ότι αυτά συχνά περιέχουν κυκλικές διαδικασίες πράγμα που σημαίνει ότι, οι μη-επαναληπτικές μέθοδοι, δεν είναι κατάλληλες. Η μεθοδολογία επίλυσης πάνω στην οποία έχει δομηθεί το DNA είναι η Newton-Raphson.

14.2.1. Μαθηματική διατύπωση της μεθόδου Newton-Raphson

Η μέθοδος Newton-Raphson εφαρμόζεται ευρέως λόγω της ταχείας σύγκλισης της στην τελική λύση. Πρόκειται δηλαδή για μία επαναληπτική μέθοδο, μέσω της οποίας η λύση της εξίσωσης $F(x) = 0$ προσεγγίζεται με την εφαρμογή της σχέσεως:

$$x_{m+1} = x_m - \frac{F(x_m)}{F'(x_m)} \quad [14-6]$$

όπου με x_m παριστάνεται η τιμή του x (για την οποία : $F(x) = 0$) στην m επανάληψη και με x_{m+1} , η νέα προσέγγιση του x που προκύπτει για την $(m+1)$ επανάληψη. Η προσεγγιστική αυτή σχέση προκύπτει από το ανάπτυγμα Taylor της $F(x)$:

$$0 = F(x) = F(x_m) + (x - x_m)F'(x_m) + (x - x_m)^2 F''(\xi)/2 \quad [14-7]$$

στην οποία το ξ κείται μεταξύ του x και του x_m .

Από την περιγραφή της μεθόδου γίνεται φανερό ότι η μέθοδος αυτή απαιτεί την ύπαρξη μιας αρχικής λύσης.

Η μέθοδος Newton-Raphson, επεκτείνεται και για την επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων αντικαθιστώντας το x με το διάνυσμα, την συνάρτηση F με το διάνυσμα και τον όρο $1/(dF/dx)$ με το αντίστροφο της Ιακωβιανής. Έτσι, εάν επιλύεται το σύστημα των εξισώσεων που έχει ως αγνώστους τις μεταβλητές H_i , των κόμβων, με $i=1, j$, το διάνυσμα και η Ιακωβιανή D (ο πίνακας των μερικών παραγώγων, στον οποίο η γραμμή και η στήλη που αντιστοιχεί σε γνωστή τιμή της μεταβλητής H έχει παραληφθεί) έχουν τις ακόλουθες συνιστώσες:

$$\vec{H} = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial F_1/\partial H_1 & \partial F_1/\partial H_2 & \cdots & \partial F_1/\partial H_j \\ \partial F_2/\partial H_1 & \partial F_2/\partial H_2 & \cdots & \partial F_2/\partial H_j \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial F_j/\partial H_1 & \partial F_j/\partial H_2 & \cdots & \partial F_j/\partial H_j \end{bmatrix} \quad [14-8]$$

Η αρχική εξίσωση γράφεται πλέον:

$$\vec{x}_{m+1} = \vec{x}_m - D^{-1} \vec{F}(\vec{x}_m) \quad [14-9]$$

Ορίζοντας το διάνυσμα \vec{z} έτσι ώστε $D \cdot \vec{z} = \vec{F}$, η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$\vec{x}_{m+1} = \vec{x}_m - \vec{z} \quad [14-10]$$

όπου \vec{x} το διάνυσμα των αγνώστων και το \vec{z} προκύπτει από την επίλυση του γραμμικού συστήματος $D \cdot \vec{z} = \vec{F}$, αποφεύγοντας έτσι την αντιστροφή του πίνακα D που είναι δύσκολη από υπολογιστικής πλευράς. Με την μέθοδο Newton-Raphson επιτυγχάνεται η επίλυση ενός μη γραμμικού συστήματος εξισώσεων μέσω της επαναληπτικής επίλυσης ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων. Παρουσιάζει δηλαδή αντιστοιχία με την μέθοδο της γραμμικοποίησης, έχοντας όμως το

πλεονέκτημα ότι ο πίνακας D είναι συμμετρικός, γεγονός που βελτιώνει την αποτελεσματικότητά του.

14.2.2. Η τροποποιημένη μέθοδος Newton

Για ένα μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων που δίνονται στην μορφή:

$$\underline{f}(\underline{x}) = \underline{0} \quad [14-11]$$

μια επαναληπτική λύση λαμβάνεται από τον προσδιορισμό των κατάλληλων μετατοπίσεων από τις μεταβλητές στο σύστημα σε κάθε βήμα επανάληψης:

$$\underline{x}_{i+1} = \underline{x}_i + \Delta \underline{x}_{i+1}, \text{ για } i=1,2,3,\dots \quad [14-12]$$

Προκειμένου να αρχίσει η μέθοδος, οι μεταβλητές χρειάζονται αρχικές τιμές πριν επαναληφθούν. Η μέθοδος ολοκληρώνεται επιτυχώς όταν το υπόλοιπο και οι μετατοπίσεις έχουν συγκλίνει σε μια τιμή, κοντά στο μηδέν όπως απαιτείται από το χρήστη. Εάν η σύγκλιση δεν λαμβάνεται μέσα σε έναν μέγιστο αριθμό επαναλήψεων ή λόγω άλλων προβλημάτων, η μέθοδος είναι αδιάφορη και ολοκληρώνεται χωρίς να βρεθεί μια λύση. Για τη σαφή μέθοδο Newton οι μετατοπίσεις των μεταβλητών σε μια επανάληψη βρίσκεται από:

$$J_i \cdot \Delta \underline{x}_{i+1} = -\underline{f}_i \quad [14-13]$$

όπου J_i καλείται ο Ιακωβιανός πίνακας. Τα στοιχεία του υπολογίζονται από τη σχέση:

$$J_{i,j,k} = \frac{\partial f_{i,j}}{\partial x_{i,k}} \text{ για } j=1,n \text{ και } k=1,n \quad [14-14]$$

Το τελικό ποσοστό σύγκλισης της μεθόδου Newton λαμβάνεται γρήγορα. Από την άλλη πλευρά όμως, η μέθοδος δεν είναι ικανοποιητική, ακριβώς επειδή θα αποκλίνει, αν στο σύστημα δεν παρέχουμε αρκετά καλές αρχικές τιμές.

Μια άλλη κοινή τροποποίηση της μεθόδου είναι να διατηρηθεί ο ίδιος Ιακωβιανός πίνακας για διάφορες επαναλήψεις. Αυτό βελτιώνει την ταχύτητα της μεθόδου, επειδή ο υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα είναι χρονοβόρος.

14.3. Μοντελοποίηση θαλάμου καύσης

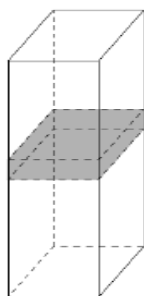
Η μεταφορά θερμότητας από τη φλόγα προς το εργαζόμενο μέσο (νερό-ατμός), γίνεται κυρίως με ακτινοβολία. Η ακτινοβολία μπορεί να διαχωριστεί σε ακτινοβολία μέλανος σώματος από τη φλόγα και ακτινοβολία αερίων από τα προϊόντα της καύσης. Οι δύο μορφές ακτινοβολίας διακρίνονται ανάλογα με τη μορφή της φλόγας η οποία προέρχεται από τη καύση ενός δεδομένου καυσίμου. Η φλόγα συμπεριφέρεται σαν ένα σώμα, δηλαδή απορροφά, εκπέμπει και ανακλά ακτινοβολία αλλά δεν τη μεταδίδει. Κατά τη καύση καυσίμων παρουσία φλόγας, αυτή εμπεριέχει σύνθετα μόρια, διότι τα καύσιμα αυτά σχηματίζουν αιθάλη και ενδεχομένως να αποτελούνται και από στερεά σωματίδια. Η ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος σε μία επιφάνεια μπορεί να αναλυθεί ως εξής. Η συνολική ακτινοβολία η οποία μεταφέρεται σε ένα τοίχο i , εντός ενός όγκου με N επιφάνειες περιγράφεται από την εξής εξίσωση:

$$\dot{Q}_i = A_i \sigma \left(\sum_{j=1}^N F_{ij} \epsilon_j T_j^4 + F_{if} \epsilon_f T_f^4 \right) \quad [14-15]$$

Το φυσικό αέριο, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, παρουσιάζει μικρή τάση να σχηματίσει αιθάλη. Κατά την καύση αερίων, η φλόγα δε συμπεριφέρεται σα σώμα, αλλά σαν μείγμα θερμών αερίων τα οποία απορροφούν, εκπέμπουν και μεταδίδουν ακτινοβολία, αλλά δεν την ανακλούν. Στη περίπτωση αυτή, η συνολική ακτινοβολία η οποία μεταφέρεται σε ένα τοίχο i , εντός ενός όγκου με N επιφάνειες περιγράφεται από την εξής εξίσωση:

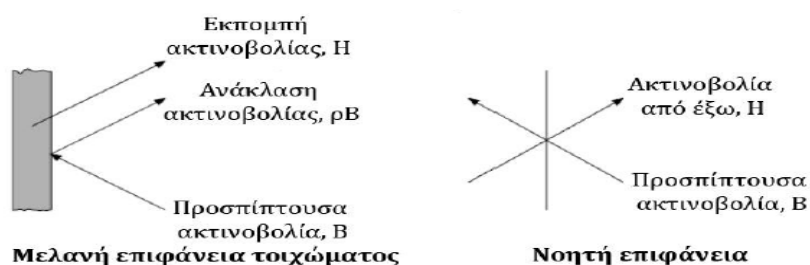
$$\dot{Q}_i = A_i \sigma \left(\sum_{j=1}^N \tau_{ji} F_{ij} \epsilon_j T_j^4 + \epsilon_g T_g^4 \right) \quad [14-16]$$

Οι αυλοί ανόδου οι οποίοι περικλείουν το θάλαμο καύσης, για την ανάλυση της ακτινοβολίας, θα συμπεριφέρονται ως μελανές επιφάνειες. Προκειμένου να δομηθεί ένα γενικό μοντέλο, η λογική είναι να διαχωριστεί ο θάλαμος καύσης σε μικρότερους τομείς. Τα σύνορα των τομέων αυτών θα οριοθετούνται από τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης καθώς και από νοητά επίπεδα. Λόγω της συμμετρίας, η διάτμηση του θαλάμου καύσης μπορεί να γίνει ευκολότερη με κατάλληλη επιλογή του πλήθους των τομέων. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 14-3: Διαχωρισμός του θαλάμου καύσης σε τομείς

Η ανάλυση ακτινοβολίας για τους δύο τύπους τοιχωμάτων σε κάθε τομέα παρουσιάζεται στην Εικόνα 11-4.



Εικόνα 14-4: Ανάλυση της ακτινοβολίας στα τοιχώματα για το μοντέλο του θαλάμου καύσης

Η θερμότητα η οποία απορροφάται από θάλαμο καύσης, μεταφέρεται διαμέσου των αυλών ανόδου. Η μεταφορά θερμότητας γίνεται με αγωγή και περιγράφεται από τη σχέση Fourier, όπου για τη περίπτωση κυλινδρικού αυλού δίνεται ως εξής:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda 2\pi l (T_o - T_i)}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \quad [14-17]$$

Στο εσωτερικό των αυλών ανόδου ρέει νερό υπό πίεση, το οποίο ψύχει το υλικό των αυλών με συναγωγή. Η μεταφορά θερμότητας στη περίπτωση αυτή περιγράφεται από τη σχέση Newton:

$$\dot{Q} = aA (T_s - T_w) \quad [14-18]$$

όπου το α υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Nu = \frac{al}{\lambda} = \frac{\frac{f}{8} (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{f}{8}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad [14-19]$$

Όπου f είναι ο συντελεστής τριβής ο οποίος για λείους αυλούς δίνεται από τη σχέση:

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad [14-20]$$

Ο αδιάστατος αριθμός Nusselt, Nu , στη περίπτωση της εξαναγκασμένης συναγωγής υπολογίζεται από τον εμπειρικό τύπο:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad [14-21]$$

Οι αριθμοί Reynolds, Re , και Prandtl, Pr ορίζονται ως εξής:

$$Re = \frac{wl}{\nu} \quad [14-22]$$

$$Pr = \frac{nc_p}{\lambda} \quad [14-23]$$

Το μοντέλο του θαλάμου καύσης θα πρέπει να περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας από τα προϊόντα της καύσης προς τους αυλούς ανόδου και προς το νερό το οποίο ρέει στο εσωτερικό τους. Στο (Hadvig, 1986) περιγράφεται μία μεθοδολογία μοντελοποίησης στιγμιαίας μεταφοράς θερμότητας με διάφορους μηχανισμούς, εκφράζοντας μία συνολική μεταφορά θερμότητας, U_{tot} , κάνοντας χρήση της σχέσης:

$$\dot{Q} = U_{tot} A \Delta T_{lm}$$

Ο συντελεστής συνολικής μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται από τη σχέση (Elmegaard, 1990):

$$U_{tot} = \frac{1}{r_A} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_g r_o} + \frac{1}{\lambda_w} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{\alpha_{st} r_i}} \quad [14-24]$$

όπου r_A είναι η ακτίνα στην οποία υπολογίζεται η επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.

Οι τρεις όροι στο παρονομαστή είναι η θερμική αντίσταση των καυσαερίων, των αυλών και του ατμού αντίστοιχα. Οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των ρευστών πρέπει επίσης να οριστούν με σχέσεις.

Οι αυλοί θερμαίνονται μόνο από τη πλευρά η οποία είναι στο εσωτερικό του θαλάμου καύσης. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά το προσδιορισμό της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Λόγω της αγωγής στο εσωτερικό του υλικού των αυλών, η επιφάνεια μεταφοράς δε θα είναι η ίδια για κάθε όρο της συνολικής μεταφοράς θερμότητας. Στην εξωτερική επιφάνεια των αυλών, η επιφάνεια μεταφοράς θα ισοδυναμεί περίπου με το μισό της εξωτερικής επιφάνειας των αυλών. Στο εσωτερικό των αυλών, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με συναγωγή εξαρτάται από την μη-ομοιομορφία του προφίλ μεταφοράς (Elmegaard, 1990). Η μη-ομοιομορφία της επιφάνειας μπορεί να συσχετιστεί με μία ημιτονοειδή καμπύλη από την οποία ο μέσος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας προσεγγιστικά υπολογίζεται ότι βρίσκεται μεταξύ 80% και 100% της επιφάνειας για τη περίπτωση που είχαμε περιφερειακά συμμετρική θέρμανση των αυλών. Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, λαμβάνοντας υπόψη τη συνολικό εσωτερικό επιφανειακό εμβαδόν δίνεται από τη σχέση:

$$U_{tot,i} = \frac{1}{r_i} \cdot \frac{1}{\frac{1}{0.5\alpha_g r_o} + \frac{1}{0.75\lambda_w} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{0.9a_{st} r_i}} \quad [14-25]$$

Σε αυτό το προφίλ για αγωγή θεωρείται ότι είναι ακόμα περισσότερο μη-συμμετρικό από τη περίπτωση της συναγωγής.

Σχετικά με τη μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, η μεταφορά θερμότητας σε ένα τμήμα του θαλάμου καύσης θα είναι (Hadvig, 1986):

$$\dot{Q}_i = A_i (H_i - B_i) \quad [14-26]$$

\dot{Q}_i είναι η συνολική εισερχόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια i εμβαδού A_i . H_i και B_i είναι η ακτινοβολία και η εκπεμπημότητα από την επιφάνεια αντίστοιχα. Η εκπεμπημότητα μίας επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$B_i = \varepsilon \sigma T_{w,i}^4 + \rho_i H_i \quad [14-27]$$

Το άθροισμα της εκπεμπημότητας και της ανακλασιμότητας για σώματα μηδενικής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ισούται με τη μονάδα.

Η συνολική ακτινοβολία υπολογίζεται ως το άθροισμα της ακτινοβολίας από τα αέρια και της ακτινοβολίας από κάθε επιφάνεια στο εσωτερικό του υπό μελέτη τομέα:

$$H_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} \tau_{ji} B_j + \varepsilon_{gi} \sigma T_g^4 \quad [14-28]$$

όπου F_{ij} είναι ο συντελεστής όψης από την επιφάνεια i στη j . Εκφράζει το ποσοστό του ημισφαιρίου πάνω από την επιφάνεια i το οποίο καλύπτεται από την επιφάνεια j . Όπου τ_{ij} είναι η μεταδοτικότητα ακτινοβολίας του αερίου από την επιφάνεια i στην j και ισούται με $1 - \alpha_{ij}$.

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη και η πτώση πίεσης του ρευστού λόγω τριβών, βαρύτητας και επιτάχυνσης. Η σχέση η οποία περιγράφει τη πτώση πίεσης του ρευστού στο εσωτερικό των αυλών ανόδου είναι η εξής:

$$\Delta p = \Delta p_f \Delta p_g \Delta p_a \quad [14-29]$$

Η πτώση πίεσης λόγω τριβών δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta p_f = 4f \frac{l \rho w^2}{d} \quad [14-30]$$

Για τυρβώδη ροή, δηλαδή $Re > 2300$, ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f = (0.79 \ln Re + 1.64)^{-2} \quad [14-31]$$

Η πτώση πίεσης λόγω της βαρύτητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta p_g = \rho g \Delta H \quad [14-32]$$

Η πτώση πίεσης λόγω της μεταβολής της ταχύτητας του ρευστού δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta p_a = \rho_i w_i^2 - \rho_o w_o^2 \quad [14-33]$$

Στο μοντέλο του θαλάμου καύσης, τυχών επιπλέον πτώσεις πίεσης στους αυλούς εισάγονται με τη προσθήκη ισοδύναμων μηκών αυλών.

14.4. Περιγραφή Μοντέλου Θαλάμου Καύσης του DNA

Προκειμένου να γίνει προσομοίωση του θαλάμου καύσης του Α.Η.Σ Καρδιάς χρησιμοποιήθηκε η ρουτίνα FURNACE2 η οποία αντιστοιχεί σε προσομοίωση θαλάμου καύσης σε σταθερή κατάσταση με δυνατότητα διαχωρισμού σε επιμέρους τομείς.

Πρόκειται για ένα μοντέλο το οποίο υπολογίζει τη μεταφορά θερμότητας από τα προϊόντα της καύσης στους αυλούς ανόδου και στο εργαζόμενο μέσο. Η θερμότητα ακτινοβολίας στους τομείς υπερθέρμανσης μεταφέρεται ως θερμική ενέργεια. Γίνεται επίσης επιπρόσθετη χρήση μεταβλητών για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των τοιχωμάτων και της πίεσης, θερμοκρασίας και ενθαλπίας του εργαζόμενου μέσου και των καυσαερίων. Επίσης μέσω επιπρόσθετων μεταβλητών υπολογίζεται και η πυκνότητα θερμοροής από ακτινοβολία στα όρια κάθε τομέα. Ο Πίνακας 11-1 παρουσιάζει τις παραμέτρους οι οποίες εισάγονται από το χρήστη. Επιπλέον παρουσιάζονται και οι εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο.

Πίνακας 14-1: Παράμετροι μοντέλου θαλάμου καύσης

Παράμετρος	Περιγραφή
1	Ύψος θαλάμου καύσης
2	Πλάτος θαλάμου καύσης
3	Βάθος θαλάμου καύσης
4	Ύψος τεφρολεκάνης
5	Ύψος κυρίως καυστήρα
6	Επιπρόσθετο ύψος για υπολογισμό πίεσης
7	Πρόσθετη αντίσταση τριβής
8	Εξωτερική διάμετρος αυλών
9	Εσωτερική διάμετρος αυλών

Παράμετρος	Περιγραφή
10	Πλήθος αυλών
11	Εκπεψιμότητα αυλών
12	Θερμική αγωγιμότητα αυλών
13	Συντελεστής ρύπανσης
14	Κλάσμα μάζας σωματιδίων
15	Μέση διάμετρος σωματιδίων
16	Πυκνότητα σωματιδίων

Διατήρηση της μάζας:

$$\sum \dot{m}_i = 0 \quad [14-34]$$

Διατήρηση της ενέργειας:

$$\dot{m}_i h_i = 0 \quad [14-35]$$

Μεταβολή πίεσης στον ατμό:

$$\Delta p_{w,i} = \frac{lg}{\bar{v}} + \frac{flw^2}{2\bar{v}d_i} + \frac{w^2 \Delta v}{\bar{v}} \quad [14-36]$$

Μεταβολή πίεσης στα καυσαέρια:

$$\Delta p_{g,i} = \frac{lg}{\bar{v}} \quad [14-37]$$

Μεταφορά ακτινοβολίας στα άνω και κάτω όρια κάθε τομέα:

$$B_{btm} = \varepsilon \sigma T_g^4 + (1 - \alpha_g) (F_{side,btm} B_{side} + F_{top,btm} B_{top}) \quad [14-38]$$

$$B_{top} = \varepsilon \sigma T_g^4 + (1 - \alpha_g) (F_{side,top} B_{side} + F_{btm,top} B_{btm}) \quad [14-39]$$

Μεταφορά ακτινοβολίας από και προς τα τοιχώματα:

$$H_{side} = \varepsilon \sigma T_g^4 + (1 - \alpha_g) (F_{top,side} B_{top} + F_{btm,side} B_{btm}) \quad [14-40]$$

$$B_{side} = \rho H_{side} + \varepsilon \sigma T^4 \quad [14-41]$$

Εναλλαγή θερμότητας μεταξύ νοητών ορίων:

$$H_{top,i} = B_{btm,i+1} \quad [14-42]$$

$$H_{btm,i} = B_{top,i-1} \quad [14-43]$$

Ενεργειακό ισοζύγιο για έναν τομέα του θαλάμου καύσης:

$$\begin{aligned} m_g h_{g,i} + m_{g,input} h_i - m_{g,o} h_{g,o} \\ = A_{side} (H_{side} - B_{side}) + A_{top} (H_{top} - B_{top}) + A_{btm} (H_{btm} - B_{btm}) \end{aligned} \quad [14-44]$$

Μεταφορά θερμότητας στον ατμό:

$$\dot{m}_w (h_{w,o} - h_{w,i}) = UA \frac{t_{w,o} - t_{w,i}}{\ln \frac{t_{wall} - t_{w,i}}{t_{wall} - t_{w,o}}} \quad [14-45]$$

όπου UA

$$UA = \frac{\pi l N}{\frac{1}{\alpha_i r_i} + \frac{1}{\lambda_{wall}} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{R_{foul}}{r_o}} \quad [14-46]$$

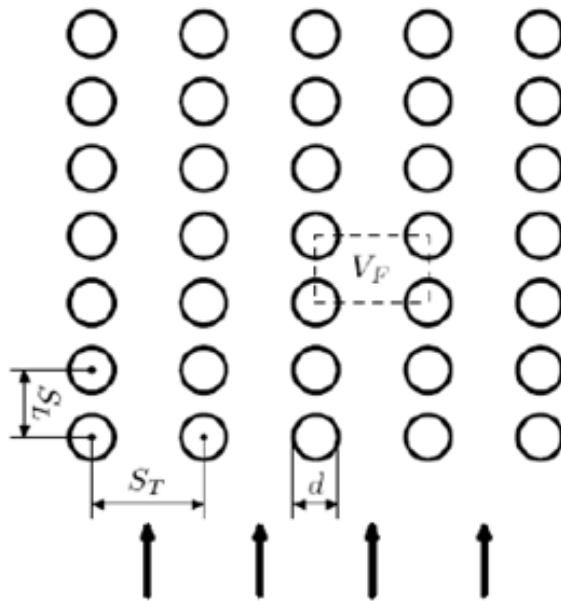
14.5. Μοντελοποίηση υπέρθερμων

Το μοντέλο το οποίο υποστηρίζεται από το DNA είναι έγκυρο μόνο για εναλλάκτες θερμότητας σταυρωτής ροής όπως ακριβώς αυτοί του υπό μελέτη ατμοπαραγωγού. Τα θερμά καυσαέρια ρέουν διαμέσου των αυλών του εναλλάκτη θερμότητας, στο εσωτερικό των οποίων υπερθερμαίνεται ο ατμός. Ανάλογα με τα επίπεδα θερμοκρασίας και τις αποστάσεις μεταξύ των αυλών σε έναν υπέρθερμο, η μεταφορά θερμότητας προς τον ατμό γίνεται με συναγωγή και με ακτινοβολία. Η μοντελοποίηση έχει γίνει ώστε η απόσταση μεταξύ των αυλών να γίνεται αντιληπτή από το πρόγραμμα ως ένα ορθογώνιο του οποίου το προφίλ παρουσιάζεται στην Εικόνα 11-5. Στο προφίλ αυτό παρουσιάζονται επίσης και οι παράμετροι διαστασιολόγησης S_L και S_T οι οποίες αποτελούν το βήμα στη κάθετη και οριζόντια διεύθυνση αντίστοιχα καθώς και η διάμετρος d των αυλών. Η διεύθυνση των καυσαερίων είναι κάθετη στο οριζόντιο βήμα και παράλληλη στο κάθετο βήμα. Το πλήθος των αυλών σε έναν υπέρθερμο είναι πολύ μεγαλύτερο και στις δύο

κατευθύνσεις. Στο εσωτερικό του ορθογωνίου VF προσδιορίζονται οι παράγοντες όψης. Λόγω των παραδοχών με βάση τις οποίες έχει δομηθεί το μοντέλο η πιο κατάλληλη έκφραση υπολογισμού της μεταφερόμενης θερμότητας είναι η εξής:

$$\dot{Q} = F_{cf} U A \Delta T_{lm} \quad [14-47]$$

$$\text{όπου } U = \frac{1}{r_A} \cdot \frac{1}{\frac{1}{(\alpha_r + \alpha_g)r_o} + \frac{1}{\lambda_w} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{\alpha_{st}r_i}}$$



Εικόνα 14-5: Προφίλ υπέρθερμου

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας υπολογίζεται ως ένας συντελεστής ο οποίος συνδυάζει τη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία και με συναγωγή στη πλευρά των καυσαερίων. Ο παράγοντας διαμόρφωσης F_f (configuration factor) για σταυρωτή ροή έχει εκφραστεί στη βιβλιογραφία για εναλλάκτες θερμότητας μίας διέλευσης (Kern., 1965). Επειδή στη προκειμένη περίπτωση των υπέρθερμων οι αυλοί είναι κατασκευασμένοι ώστε ο ατμός να διέρχεται περισσότερες από μία φορές, η μοντελοποίηση έγινε με τη παραδοχή ότι έχουμε πολλαπλούς εναλλάκτες θερμότητας μίας διέλευσης.

Η θερμότητα λοιπόν μεταφέρεται από τη πλευρά των καυσαερίων με συνδυασμό ακτινοβολίας και συναγωγής. Η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία είναι εντονότερη για υψηλές θερμοκρασίες και για μεγάλα μήκη ακτίνας (beam length). Το μέσο μήκος κύματος ακτινοβολίας δίνεται από τη σχέση:

$$L = 3.5 \frac{V}{A} \quad [14-48]$$

Σχετικά με τον υπολογισμό της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, ο υπολογισμός του αριθμού Nusselt γίνεται από τη σχέση (Kakac, et al., 1987):

$$Nu = C_1 C_2 Re_d^m Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25} \quad [14-49]$$

$$\text{Όπου } Re_d = \frac{\rho w_{max} d}{\nu}, 10^3 \leq Re_d \leq 2 \cdot 10^6 \wedge 0.7 \leq Pr \leq 500$$

Ο υπολογισμός της μέγιστης ταχύτητας γίνεται στο κέντρο του αυλού. Οι παράγοντες C και m εξαρτώνται από τον αριθμό Reynolds, ενώ ο παράγοντας C_2 είναι μικρότερος της μονάδας για συστοιχίες αυλών με λιγότερες από 20 σειρές.

Προκειμένου να προσδιοριστεί η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία στους αυλούς, γίνεται παρόμοια προσέγγιση με αυτή του θαλάμου καύσης. Ο συνολικός όγκος των αυλών διαιρείται σε ορθογώνιους όγκους ελέγχου όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Το κάθε τμήμα που δημιουργείται, οριοθετείται από τα τέσσερα τεταρτημόρια των αυλών και από τα νοητά όρια απ' όπου εκπέμπεται ακτινοβολία. Γίνεται η υπόθεση πως όλοι οι αυλοί έχουν την ίδια θερμοκρασία, όπως επίσης τα καυσαέρια έχουν την ίδια θερμοκρασία σε εσωτερικό κάθε τμήμα που ορίζεται από το ορθογώνιο V_F . Έτσι οι αυλοί αντιμετωπίζονται ως μία επιφάνεια, ενώ τα νοητά όρια ως μία άλλη. Η συνολική λοιπόν ακτινοβολία στην επιφάνεια των αυλών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_1 = (1 - a_g)(F_{11}B_1 + F_{21}B_2) + \varepsilon_g \sigma T_g^4 \quad [14-50]$$

Η εκπομπή ακτινοβολίας από τους αυλούς δίνεται από τη σχέση:

$$B_1 = \varepsilon_w \sigma T_w^4 + \rho_w H_1 \quad [14-51]$$

Οι επιφάνειες οι οποίες ορίζονται από τα νοητά όρια θα εκπέμπουν την ίδια θερμότητα και στις δύο πλευρές, λόγω της υπόθεσης που έγινε ότι το καυσαέριο έχει την ίδια θερμοκρασία:

$$B_2 = (1 - a_g)(F_{12}B_1 + F_{22}B_2) + \varepsilon_g \sigma T_g^4 \quad [14-52]$$

Η συνολική μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία υπολογίζεται τελικά από τη σχέση:

$$\dot{Q}_1 = A_1 (H_1 - B_1) \quad [14-53]$$

Τέλος η πτώση πίεσης κατά μήκος μίας συστοιχίας αυλών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_g \quad [14-54]$$

Η πτώση πίεσης λόγω τριβών δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta p_f = \xi N_R \frac{\rho W_{max}}{2} \quad [14-55]$$

Ο συντελεστής τριβής δίνεται από τη σχέση:

$$\xi = \xi_{lam} + \xi_{tur} = \frac{f_{lam}}{Re} + \frac{f_{tur}}{Re^{0.1b/a}} \quad [14-56]$$

$$\text{όπου } f_{lam} = f_{lam}(a, b), f_{tur} = f_{tur}(a, b), a = \frac{S_L}{d}, b = \frac{S_T}{d}$$

Κάθε συντελεστής τριβής είναι διορθωμένος για διάφορες φυσικές ιδιότητες κατά μήκος της διεύθυνσης της ροής από ένα παράγοντα της μορφής $\left(\frac{\mu_w}{\mu}\right)^r$, όπου r είναι μια σταθερά για τυρβώδη ροή και είναι συνάρτηση της γεωμετρίας, του αριθμού Reynolds και του πλήθους των σειρών του υπέρθερμου για στρωτή ροή.

14.5.1. Περιγραφή Μοντέλου Υπέρθερμου του DNA

Προκειμένου να γίνει προσομοίωση των υπέρθερμων και των ανάθερμων του Α.Η.Σ Καρδιάς χρησιμοποιήθηκε η ρουτίνα XHEATEX2 η οποία αντιστοιχεί σε προσομοίωση υπέρθερμου σταυρωτής ροής σε σταθερή κατάσταση. Στον παρουσιάζονται οι παράμετροι οι οποίοι εισάγονται από το χρήστη. Τέλος δίνονται οι σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα για τον υπολογισμό των διάφορων μεταβλητών

Πίνακας 14-2: Παράμετροι μοντέλου υπερθέρμου

Παράμετρος	Περιγραφή
1	Εξωτερική διάμετρος αυλών
2	Εσωτερική διάμετρος αυλών
3	Βήμα στην οριζόντια διεύθυνση
4	Βήμα στη κάθετη διεύθυνση
5	Πλήθος σειρών
6	Πλήθος αυλών σε κάθε σειρά
7	Πλάτος καναλιού
8	Βάθος καναλιού
9	Εκπεμφιμότητα αυλών
10	Θερμική αγωγιμότητα αυλών
11	Συντελεστής ρύπανσης
12	Κλάσμα μάζας σωματιδίων στα καυσαέρια
13	Μέση διάμετρος σωματιδίων στα καυσαέρια
14	Πυκνότητα σωματιδίων στα καυσαέρια
15	Διάταξη ροής
16	Επιπρόσθετη πτώση πίεσης λόγω τριβών

Διατήρηση μάζας:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 0 \text{ Καυσαέρια} \quad [14-57]$$

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_4 = 0 \text{ Ατμός}$$

Ισοζύγιο ενέργειας:

$$\sum \dot{m}_i h_i + \dot{Q}_5 = 0$$

Μεταφορά θερμότητα στο ένα πέρασμα:

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \begin{cases} F_T U A \frac{(T_1 - T_4) - (T_2 - T_3)}{\ln \frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_3}}, \text{ για } \dot{m}_I c_{p,I} \neq \dot{m}_{II} c_{p,II} \\ F_T U A (T_1 - T_4), \text{ για } \dot{m}_I c_{p,I} = \dot{m}_{II} c_{p,II} \end{cases} \quad [14-58]$$

Η μεταφορά θερμότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$UA = \frac{\pi l N}{\frac{1}{\alpha_i r_i} + \frac{1}{\lambda_{wall}} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{R_{foul}}{r_o} + \frac{1}{(\alpha_{rad} + \alpha_o) r_o}} \quad [14-59]$$

Η πτώση πίεσης για ένα πέρασμα δίνεται από τις σχέσεις:

$$\text{Καυσαέρια: } \Delta p = N_R \frac{g S_L + f w^2 S_T^2 \bar{v}}{2 (S_T - d_o)} \quad [14-60]$$

$$\text{Ατμός: } \Delta p = \frac{f l w^2}{2 \bar{v} d_i} + \frac{w^2 \Delta v}{\bar{v}} \quad [14-61]$$

14.6. Σύνταξη Μοντέλου Ατμοπαραγωγού

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η μεθοδολογία σύνταξης του μοντέλου του ατμοπαραγωγού καθώς και οι ρουτίνες του DNA που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης γίνεται αναφορά στις διάφορες παραδοχές οι οποίες έγιναν.

Οι ρουτίνες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνταξη του μοντέλου είναι οι εξής:

- FUNRACE2 :Θάλαμος καύσης
- XHEATEX2 Υπέρθερμοι και ανάθερμοι
- HEATSNK0 Υποβιβασμός θερμικού περιεχομένου εργαζόμενου μέσου
- SIMBOIL :Απλοποιημένη μορφή ατμοπαραγωγού
- ATTEMP_1 :Ψεκασμός
- TURBIN_2 :Ατμοστρόβιλος με ισεντροπικό βαθμό απόδοσης και σταθερά στροβίλου
- SPLITTER :Διαχωρισμός της ροής σε δύο ροές (περιγραφή απομαστεύσεων)

Το μοντέλο περιλαμβάνει το θάλαμο καύσης, τους κλάδους του υπέρθερμου και ανάθερμου ατμού, τους ψεκασμούς και τον ατμοστρόβιλο υψηλής πίεσης.

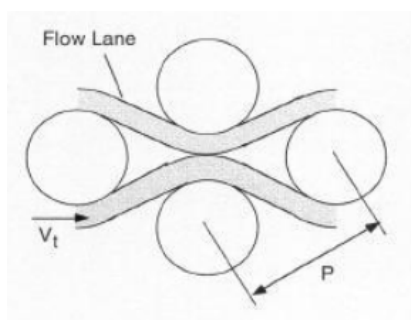
Σημειώνεται πως οι ρουτίνες του υπέρθερμου και του θαλάμου καύσης δεν ήταν προσαρτημένες στον αρχικό κώδικα. Υπήρχαν ωστόσο διαθέσιμες στο αρχείο usercomp2.for και χρειάστηκε να εισαχθούν στο πρόγραμμα. Για τη διαδικασία αυτή εισήχθη το παραπάνω αρχείο στο makefile αρχείο του προγράμματος καθώς και ο κώδικας της κάθε ρουτίνας στο αρχείο user.for απ' όπου και καλούνται από το πρόγραμμα. Τελικά το πρόγραμμα έγινε recompile για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν οι παραπάνω ρουτίνες.

14.6.1. Απλοποιήσεις και παραδοχές

Από το μοντέλο έχει παραληφθεί ο διαχωριστής μαζί με το κύκλωμα του αναμίκτη και της τροφοδοτικής αντλίας, όπου γίνεται η ανακυκλοφορία του εργαζόμενου μέσου, ενώ επιπρόσθετα θεωρείται ότι η έξοδος του θαλάμου καύσης είναι η είσοδος των υπέρθερμων, με ποιότητα του ατμού ίση με 1 ($x=1$). Στην πραγματικότητα, στην έξοδο του διαχωριστή προς τους υπέρθερμους, όπου ο ατμός είναι κορεσμένος, μέχρι και την είσοδο του υπέρθερμου 1a, λαμβάνει χώρα μία πτώση πίεσης 1-2 bar, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη πτώση της ποιότητας του ατμού από 1 σε 0.98. Επίσης έχει αντικατασταθεί ο υπέρθερμος Y/K1a με τη ρουτίνα SIM_BOIL η οποία απλώς προσδίδει προκαθορισμένη ενέργεια στο ρευστό. Οι δύο αυτές παραδοχές έγιναν διότι η ρουτίνα του υπέρθερμου δεν έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται διφασικές ροές. Οι σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα για την περιγραφή της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή δεν ισχύουν στην περίπτωση διφασικών ροών. Αντίστοιχα με τη ρουτίνα HEATNSKO υποβιβάστηκε το θερμικό περιεχόμενο των καυσαερίων προκειμένου να εισαχθούν με τα σωστά χαρακτηριστικά στην επόμενη ρουτίνα υπέρθερμου. Διευκρινίζεται ότι παρά την παραδοχή που έγινε για μονοφασική ροή στην είσοδο του Y01a, δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η ρουτίνα του υπέρθερμου διότι σε εκείνο το σημείο η διαστασιολόγηση του υπέρθερμου προβλέπει αυτό το ποσοστό υγρασίας. Γι' αυτό εξάλλου αν παρατηρήσει κανείς τα δεδομένα θα δει ότι η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου κατά τη διέλευση από αυτόν τον υπέρθερμο αυξάνει μόνο 8 °C (Σημειώνεται πως ο Y01b έχει ακριβώς την ίδια δομή η θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου κατά τη διέλευση του μέσα από αυτόν ανεβαίνει 73 °C).

Προκειμένου λοιπόν να συμπεριληφθεί η ρουτίνα του υπέρθερμου στο σημείο αυτό θα έπρεπε να υπολογιστούν εκ νέου οι διαστάσεις του υπέρθερμου.

Ένα ακόμα πρόβλημα το οποίο παρουσιάστηκε και χρειάστηκε να γίνει παραδοχή σχετίζεται με τη διάταξη των αυλών του υπέρθερμου 1b. Οι αυλοί σε αυτόν τον υπέρθερμο δεν είναι διατεταγμένοι σε σειρά όπως στην Εικόνα 11-5, αλλά σε εναλλασσόμενη διάταξη (Εικόνα 11-6). Η ρουτίνα όπως έχει προγραμματιστεί, δεν προβλέπει μία τέτοια διάταξη. Εναλλακτικά ζητήθηκε από το πρόγραμμα να υπολογιστούν ισοδύναμες διαστάσεις για έναν εναλλάκτη, όπου οι αυλοί είναι σε σειρά και ο οποίος θα έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει το ίδιο ποσό ενέργειας στον ατμό με αυτό που μεταφέρεται στην πραγματικότητα. Αυτό ουσιαστικά επετεύχθη με μεταβολή του πλάτους και του βάθους του καναλιού μεταβάλλοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το μέσο μήκος κύματος L και αυξάνοντας ουσιαστικά το ποσό θερμότητας το οποίο μεταφέρεται με ακτινοβολία. Επίσης οι απώλειες ορίστηκαν να είναι μηδενικές.



Εικόνα 14-6 : Διάταξη αυλών στον υπέρθερμο 1b

Στα τμήματα των υπέρθερμων και των ανάθερμων δεν λαμβάνεται υπόψη η μεταφορά θερμότητας προς τους αυλούς ανόδου, καθώς κάτι τέτοιο προϋποθέτει την ύπαρξη τριών ροών σε μία ρουτίνα, το οποίο δεν υποστηρίζεται από το πρόγραμμα.

Μία ακόμα απλοποίηση η οποία έγινε στα πλαίσια της μοντελοποίησης σχετίζεται με τη θερμική αγωγιμότητα των αυλών. Κάθε υπέρθερμος αποτελείται από δύο έως τρία διαφορετικά υλικά. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί από το πρόγραμμα. Οι τιμές λοιπόν της θερμικής αγωγιμότητας επιλέχθηκαν προσεγγιστικά, εντός του εύρους τιμών που ισχύουν για κάθε υλικό.

Όσο αφορά στις συνθήκες ρύπανσης του ατμοπαραγωγού, έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές. Καταρχήν τα μοντέλα του υπέρθερμου και του ανάθερμου

διαχειρίζονται την αύξηση της ρύπανσης ακτινικά, ομοιόμορφα και σε όλο το μήκος των αυλών. Επίσης δε λαμβάνεται υπόψη η υπερθέρμανση λόγω της ανακυκλοφορίας των καυσαερίων στο εσωτερικό των υπέρθερμων, η οποία λαμβάνει χώρα σε συνθήκες έντονης ρύπανσης. Τέλος δεν λαμβάνεται υπόψη η αύξηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων λόγω της ακτινοβολούμενης θερμότητας από τον εξοπλισμό του ατμοπαραγωγού.

Σημειώνεται πως η σύσταση και η θερμοκρασία των καυσαερίων υπολογίστηκαν με τη χρήση της ρουτίνας SOLIDBURNER η οποία προσομοιώνει τη λειτουργία των καυστήρων στερεών καυσίμων. Τα αποτελέσματα τα οποία έδινε η ρουτίνα αυτή σε σχέση με αυτά των μετρήσεων του σταθμού παρουσιάζουν αποδεκτή απόκλιση της τάξης του 2%, οπότε και θεωρήθηκαν έγκυρα για χρήση. Η ρουτίνα SOLIDBURNER, στο σενάριο προσομοίωσης σταθερής κατάστασης λειτουργίας και με βάση τις παραμέτρους σχεδιασμού της μονάδας, δεν παρουσίαζε πρόβλημα. Εντούτοις η ρουτίνα αυτή σε συνεργασία με το υπόλοιπο μοντέλο δημιούργησε προβλήματα όταν επιχειρήθηκε να συμπεριληφθούν συνθήκες ρύπανσης. Συγκεκριμένα, προκειμένου να περατωθεί η μοντελοποίηση έπρεπε να υπάρχει δέσμευση ορισμένων μεταβλητών δίνοντας προκαθορισμένες τιμές. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, κατά την εισαγωγή της παραμέτρου ρύπανσης, οι μεταβλητές αυτές να παραμένανε αμετάβλητες εις βάρος άλλων μεταβλητών ή παραμέτρων. Από τη διερεύνηση που έγινε μέχρι στιγμής, εκτιμάται πως αυτή η συμπεριφορά του προγράμματος οφείλεται στο ότι το τελικό σύστημα των εξισώσεων που δημιουργούταν ήταν δυσεπίλυτο λόγω της πεπλεγμένης σχέσης μεταξύ των εξισώσεων της ρουτίνας SOLIDBURNER και των υπόλοιπων εξισώσεων, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατος ο υπολογισμός του αντίστροφου μητρώου στο τελικό σύστημα γραμμικών εξισώσεων που προέκυπτε. Η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος θα απαιτούσε παρέμβαση στον κώδικα του προγράμματος, κάτι το οποίο δεν είναι στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο εν τέλει, η ρουτίνα συμπεριλήφθηκε στη μοντελοποίηση με τον εξής τρόπο. Τα τελικά αποτελέσματα της ρουτίνας SOLIDBURNER χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδο στο υπόλοιπο μοντέλο, χωρίς έτσι να επηρεάζεται το τελικό σύστημα εξισώσεων και η φυσική συμπεριφορά του μοντέλου.

Τέλος για όλα τα σενάρια τα οποία προσομοιώθηκαν, η παροχή του καυσίμου θεωρήθηκε σταθερή.

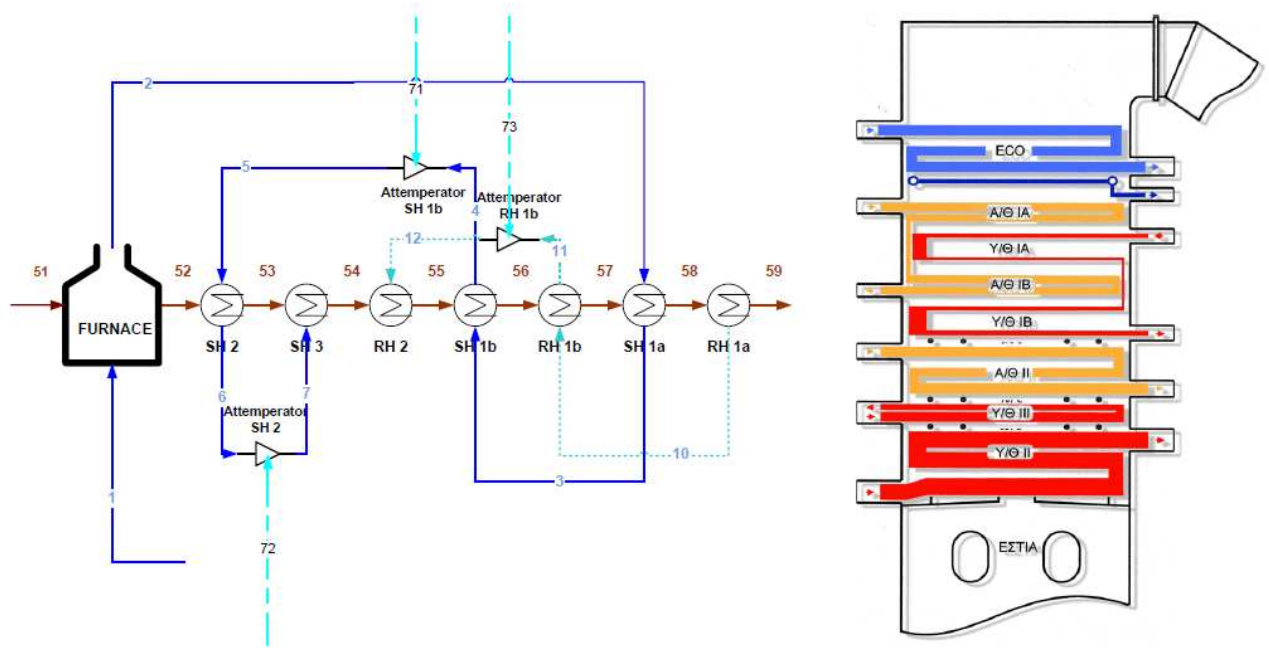
14.6.2. Παρουσίαση μοντέλου ατμοπαραγωγού

Στο παράρτημα παρουσιάζεται ο κώδικας εισόδου όπως συντάχθηκε στην τελική του μορφή με βάση τις παραδοχές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής που αντιπροσωπεύει τη διαδικασία μοντελοποίησης του ατμοπαραγωγού στο DNA, καθώς και το μимικό διάγραμμά του. Οι ροές οι οποίες αριθμούνται με 5X (51,52,...) αντιστοιχούν στη ροή των καυσαερίων. Οι ροές οι οποίες αριθμούνται από 1 έως 12 αντιστοιχούν στη ροή του νερού - ατμού από το θάλαμο καύσης έως και την έξοδο του κλάδου του ανάθερμου. Τέλος οι ροές 71, 72, 73 αντιστοιχούν στους ψεκασμούς.

Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 3) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που δίνει το DNA. Οι ονομασίες SH (Superheater) και RH (Reheater) αντιπροσωπεύουν τους υπέρθερμους και τους ανάθερμους αντίστοιχα. Οι ονομασία ATMP_ (Attemperator) αντιστοιχεί στους ψεκασμούς. Η ονομασία HP_TURBINE (High pressure turbine) αντιστοιχεί στον ατμοστρόβιλο. Η ονομασία EXTRACT_ (Extraction) αντιστοιχεί στην απομάστευση ατμού από τον ατμοστρόβιλο.

Η ροή του εργαζόμενου μέσου ορίζεται ως "STEAM" ενώ η ροή των καυσαερίων ως "flue_gas". Η ονομασία MECH_POWER αντιστοιχεί στο παραγόμενο μηχανικό έργο του ατμοστρόβιλου υψηλής πίεσης.

Σημειώνεται πως οι αρνητικές τιμές στις παροχές δηλώνουν έξοδο ροής από ένα στοιχείο του σταθμού. Για τους υπέρθερμους η τιμή HEAT αντιπροσωπεύει τις απώλειες, όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά το στάδιο της προσομοίωσης από το DNA και λαμβάνεται αρνητικό (-) καθώς αποβάλλεται από το σύστημα. Στο στάδιο εκείνο οι απώλειες αποτελούσαν μεταβλητή, υπολογιζόμενη από το DNA, έχοντας σα δεδομένο το ενεργειακό περιεχόμενο του ατμού στην έξοδο των υπέρθερμων. Οι αρχικοί υπολογισμοί ωστόσο οδηγούσαν σε σχετικά μικρότερες απώλειες, γεγονός το οποίο αποδίδεται στο ότι δεν λήφθηκε υπόψη η θερμότητα η οποία απορροφάται από τους αυλούς ανόδου του ατμοπαραγωγού.



Εικόνα 14-7: Διάγραμμα ροής DNA και μιμικό διάγραμμα για τον ατμοπαραγωγό του Α.Η.Σ. Καρδιάς

Πίνακας 14-3: Δεδομένα εξόδου D.N.A. για τη μοντελοποίηση του ατμοπαραγωγού του Α.Η.Σ. Καρδιάς

Κλάδος	Στοιχείο	Μέσο	M	T	P	H	ENERGY	X	S	V	U
			[kg/s]	[C]	[bar]	[kJ/kg]	[kJ/s]		[kJ/kg K]	[m3 /kg]	[kJ/kg]
51	Furnace	flue_gas	574.96	1197.1	1.07	-2669.5	-	9.5072	4.2113	-3120.2	
52	Furnace	flue_gas	-574.96	973.11	1.069	-3001.6	-	9.2625	3.5721	-3383.5	
1	Furnace	STEAM	248.06	320.01	196	1445.9	-	3.4014	0.0014	1417.6	
2	Furnace	STEAM	-248.06	360.74	189.483	2133.2	-	4.4917	0.0039	2054.9	
302	Furnace	HEAT					-2.04E+04				
2	SH1a	STEAM	248.06	360.74	189.483	2133.2	-	4.4917	0.0039	2054.9	
3	SH1a	STEAM	-248.06	369.99	186.7	2640.1	-	5.302	0.0086	2478.9	
303	SH1a	HEAT					1.26E+05				
57	SH1a_FG	flue_gas	574.96	520	1.045	-3631.9	-	8.6434	2.3265	-3875	
58	SH1a_FG	flue_gas	-574.96	442	1.043	-3733.6	-	8.509	2.1021	-3952.8	
304	SH1a FG	HEAT					-5.85E+04				
55	SH1b	flue_gas	574.96	728	1.049	-3350.4	-	8.9571	2.926	-3657.2	
56	SH1b	flue_gas	-574.96	590.01	1.047	-3538.8	-	8.7552	2.5267	-3803.3	
3	SH1b	STEAM	248.06	369.99	186.7	2640.1	-	5.302	0.0086	2478.9	

Μεθοδολογία μοντελοποίησης και προσομοίωσης

Κλάδος	Στοιχείο	Μέσο	M	T	P	H	ENERGY	X	S	V	U
			[kg/s]	[C]	[bar]	[kJ/kg]	[kJ/s]	[kJ/kg K]	[m3 /kg]	[kJ/kg]	
4	SH1b	STEAM	-248.06	445.13	183.348	3076.7		-	5.956	0.0141	2818.7
305	SH1b	HEAT					0.00E+00				
4	ATMP_SH1b	STEAM	248.06	445.13	183.348	3076.7		-	5.956	0.0141	2818.7
71	ATMP_SH1b	STEAM	9.61	152.63	183.348	654.6		-	1.8491	0.0011	634.8
5	ATMP_SH1b	STEAM	-257.67	422.95	183.348	2986.3		-	5.8281	0.0129	2749.1
52	SH2	flue_gas	574.96	973.11	1.069	-3001.6		-	9.2625	3.5721	-3383.5
53	SH2	flue_gas	-574.96	866.44	1.062	-3155.5		-	9.1355	3.2885	-3504.7
5	SH2	STEAM	257.67	422.95	183.348	2986.3		-	5.8281	0.0129	2749.1
6	SH2	STEAM	-257.67	509.99	177.9	3303.3		-	6.27	0.0174	2993
306	SH2	HEAT					-6.80E+03				
6	ATMP_SH2	STEAM	257.67	509.99	177.9	3303.3		-	6.27	0.0174	2993
72	ATMP_SH2	STEAM	6.22	275.05	177.9	1207.2		-	2.9874	0.0013	1184.2
7	ATMP_SH2	STEAM	-263.89	494	177.9	3253.9		-	6.2063	0.0168	2954.9
53	SH3	flue_gas	574.96	866.44	1.062	-3155.5		-	9.1355	3.2885	-3504.7
54	SH3	flue_gas	-574.96	811.88	1.053	-3233		-	9.0686	3.1593	-3565.5
7	SH3	STEAM	263.89	494	177.9	3253.9		-	6.2063	0.0168	2954.9
8	SH3	STEAM	-263.89	540	172.5	3398.1		-	6.4012	0.0192	3066
307	SH3	HEAT					-6.52E+03				
8	HP_TURBINE	STEAM	263.89	540	172.5	3398.1		-	6.4012	0.0192	3066
9	HP_TURBINE	STEAM	-263.89	349.32	44.754	3080.3		-	6.5157	0.0587	2817.7
101	HP_TURBINE	MECH_POWER					-8.39E+04				
9	EXTRACT_R7	STEAM	263.89	349.32	44.754	3080.3		-	6.5157	0.0587	2817.7
10	EXTRACT_R7	STEAM	-232.22	349.32	44.754	3080.3		-	6.5157	0.0587	2817.7
67	EXTRACT_R7	STEAM	-31.67	349.32	44.754	3080.3		-	6.5157	0.0587	2817.7
58	RH1a	flue_gas	574.96	442	1.043	-3733.6		-	8.509	2.1021	-3952.8
59	RH1a	flue_gas	-574.96	416.89	0.94	-3765.9		-	8.4949	2.2504	-3977.4
10	RH1a	STEAM	232.22	349.32	44.754	3080.3		-	6.5157	0.0587	2817.7
11	RH1a	STEAM	-232.22	376	44.5	3148		-	6.6247	0.0625	2869.7
308	RH1a	HEAT					-2.84E+03				
56	RH1b	flue_gas	574.96	590.01	1.047	-3538.8		-	8.7552	2.5267	-3803.3
57	RH1b	flue_gas	-574.96	520	1.045	-3631.9		-	8.6434	2.3265	-3875
11	RH1b	STEAM	232.22	376	44.5	3148		-	6.6247	0.0625	2869.7
12	RH1b	STEAM	-232.22	471.19	44	3372		-	6.9523	0.075	3041.8
309	RH1b	HEAT					-1.53E+03				
12	ATMP_RH2	STEAM	232.22	471.19	44	3372		-	6.9523	0.075	3041.8
73	ATMP_RH2	STEAM	7.78	132.61	44	560.3		-	1.6581	0.0011	555.6
13	ATMP_RH2	STEAM	-240	432.79	44	3280.9		-	6.8266	0.0705	2970.7

Κλάδος	Στοιχείο	Μέσο	M	T	P	H	ENERGY	X	S	V	U
			[kg/s]	[C]	[bar]	[kJ/kg]	[kJ/s]		[kJ/kg K]	[m3 /kg]	[kJ/kg]
54	RH2	flue_gas	574.96	811.88	1.053	-3233	-		9.0686	3.1593	-3565.5
55	RH2	flue_gas	-574.96	728	1.049	-3350.4	-		8.9571	2.926	-3657.2
13	RH2	STEAM	240	432.79	44	3280.9	-		6.8266	0.0705	2970.7
14	RH2	STEAM	-240	539.74	42.6	3533.1	-		7.1739	0.0857	3167.9
310	RH2	HEAT					-6.98E+03				

Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης παρουσιάζουν ικανοποιητική ακρίβεια σε σχέση με τα δεδομένα τα οποία προέρχονται από το σταθμό. Η μικρότερη απόκλιση παρατηρήθηκε στα χαρακτηριστικά της ροής του εργαζόμενου. Αυτό οφείλεται όμως στο γεγονός ότι υπάρχουν τρία σημεία ελέγχου (ψεκασμοί) των χαρακτηριστικών του εργαζόμενου μέσου κατά τη διέλευσή του από τον ατμοπαραγωγό. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρήθηκε στα χαρακτηριστικά των καυσαερίων στην έξοδο του Ανάθερμου 1a, η οποία ήταν της τάξης του 2%.

14.7. Συλλογή δεδομένων

Τα περισσότερα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση αποκτήθηκαν από τα αρχεία του Α.Η.Σ. Καρδιάς. Σε πολλές περιπτώσεις ορισμένα στοιχεία προέκυπταν από συνεντεύξεις με τους μηχανικούς του σταθμού. Στο Παράρτημα Α είναι διαθέσιμα τα εξής στοιχεία:

- Χαρακτηριστικά κυκλώματος νερού ατμού (θερμοκρασίες, πιέσεις, παροχές)
- Χαρακτηριστικά κυκλώματος καυσαερίων (θερμοκρασίες, πιέσεις, παροχές)
- Διαστάσεις θαλάμου καύσης, υπέρθερμων και ανάθερμων (τα στοιχεία αυτά προήλθαν από τον τομέα της συντήρησης όπου και ήταν διαθέσιμα τα μηχανολογικά σχέδια
- Το κλάσμα μάζας των σωματιδίων, η μέση διάμετρος τους και η πυκνότητα προήλθαν από στοιχεία του χημείου από μετρήσεις οι οποίες είχαν γίνει στο παρελθόν για λογαριασμό του σταθμού.
- Η θερμοκρασία μαλάκυνσης της τέφρας για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας της επικάθισης προήλθε από τις μετρήσεις του χημείου οι οποίες γίνονται με βάση το πρότυπο ASTM D1857 (βλέπε παράγραφο 3.4.1).

- Η εκπεμψιμότητα των αυλών υπολογίστηκε εσωτερικά από το πρόγραμμα μεταξύ 0.5 και 0.8. Οι τιμές αυτές μπορούν να θεωρηθούν ρεαλιστικές ειδικά εάν ληφθούν υπόψη και οι διάφορες παραδοχές.
- Η θερμική αγωγιμότητα των υλικών προήλθε από το πρόγραμμα Stahlschlusel 2004 (Key to Steel 2004)

14.7.1. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης σε Συνθήκες Ρύπανσης

14.7.1.1. Εκτίμηση συντελεστή ρύπανσης R_{foul}

Προκειμένου να προσομοιωθεί η λειτουργία του ατμοπαραγωγού σε συνθήκες ρύπανσης, έγινε προσδιορισμός συντελεστή ρύπανσης R_{foul} . Ο συντελεστής ρύπανσης ορίζεται ως (Serth, 2007):

$$R_{foul} = \frac{\text{πάχος επικάθισης [m]}}{\text{θερμική αγωγιμότητα επικάθισης } \left[\frac{kW}{mK}\right]} \quad [kW/K] \quad [14-62]$$

Η θερμική αγωγιμότητα της επικάθισης μπορεί να υπολογιστεί από την εμπειρική σχέση (Wall, και συν., 1993):

$$k = (0.0017 \cdot T + 0.97045 - 0.000445 \cdot ST) \cdot 10^{-3} \quad [kW/mK] \quad [14-63]$$

Όπου T: θερμοκρασία δείγματος [°C]

ST: θερμοκρασία μαλάκυνσης τέφρας [°C]

Με βάση τη σχέση αυτή και για θερμοκρασία μαλάκυνσης της τέφρας τους 1300 °C (Η συχνότερα εμφανιζόμενη τιμή με βάση τις μετρήσεις του χημείου του Α.Η.Σ. Καρδιάς), υπολογίστηκαν οι συντελεστές ρύπανσης των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας για τιμές πάχους 1 - 10 mm (Πίνακας 11-4 και Πίνακας 11-5). Ως θερμοκρασία δείγματος θεωρήθηκε η μέση θερμοκρασία των καυσαερίων στην είσοδο και την έξοδο των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας.

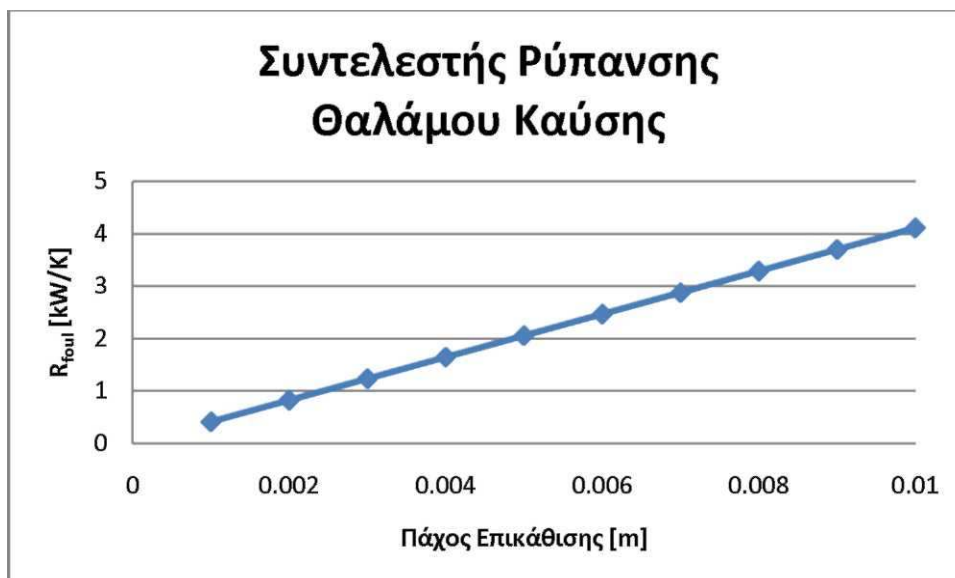
Πίνακας 14-4 : Θερμική αγωγιμότητα επικάθισης [kW/mK]

	T _{mean} [°C]	k [kW/Mk]
Furnace	1200	0.002432
SH1a	481	0.00121
SH1b	659	0.001512
SH2	919.5	0.001955
SH3	838.5	0.001817
RH1a	429.5	0.001122
RH1b	555	0.001335
RH2	770	0.001701

Πίνακας 14-5 : Συντελεστές ρύπανσης επιφανειών συναλλαγής θερμότητας R_{foul}
[kW/K]

Πάχος	Furnace	SH1a	SH1b	SH2	SH3	RH1a	RH1b	RH2
0.001	0.411192664	0.826685405	0.661266325	0.511483	0.550237	0.891186169	0.748811262	0.587906758
0.002	0.822385329	1.65337081	1.32253265	1.022966	1.100473	1.782372338	1.497622524	1.175813516
0.003	1.233577993	2.480056215	1.983798975	1.534448	1.65071	2.673558506	2.246433786	1.763720274
0.004	1.644770657	3.306741619	2.6450653	2.045931	2.200946	3.564744675	2.995245048	2.351627032
0.005	2.055963322	4.133427024	3.306331625	2.557414	2.751183	4.455930844	3.744056311	2.93953379
0.006	2.467155986	4.960112429	3.96759795	3.068897	3.30142	5.347117013	4.492867573	3.527440548
0.007	2.87834865	5.786797834	4.628864275	3.58038	3.851656	6.238303182	5.241678835	4.115347306
0.008	3.289541315	6.613483239	5.2901306	4.091862	4.401893	7.12948935	5.990490097	4.703254064
0.009	3.700733979	7.440168644	5.951396925	4.603345	4.952129	8.020675519	6.739301359	5.291160822
0.01	4.111926643	8.266854049	6.61266325	5.114828	5.502366	8.911861688	7.488112621	5.87906758

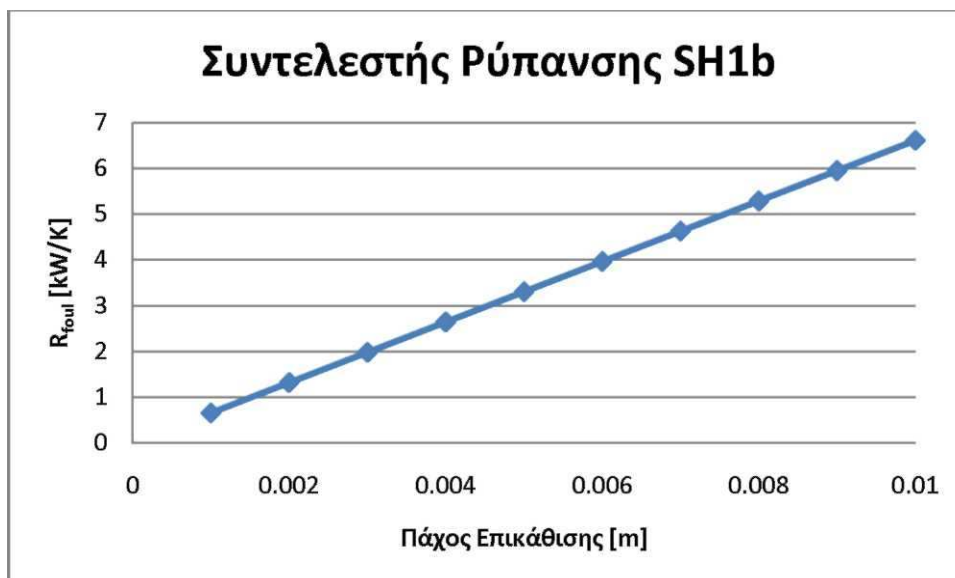
Στα επόμενα διαγράμματα (Διάγραμμα 11-1 έως Διάγραμμα 11-8) παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή ρύπανσης καθώς μεταβάλλεται το πάχος της επικάθισης. Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, ο συντελεστής ρύπανσης αυξάνεται με την αύξηση του πάχους. Επίσης, ο συντελεστής ρύπανσης είναι αντιστρόφως ανάλογος της θερμικής αγωγιμότητας της επικάθισης.



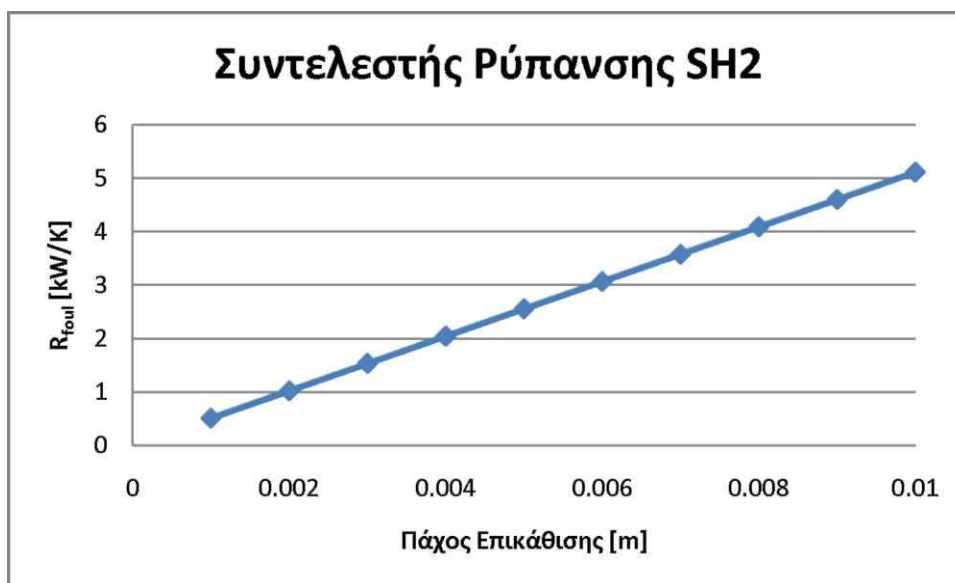
Διάγραμμα 14-1: Συντελεστής ρύπανσης θαλάμου καύσης



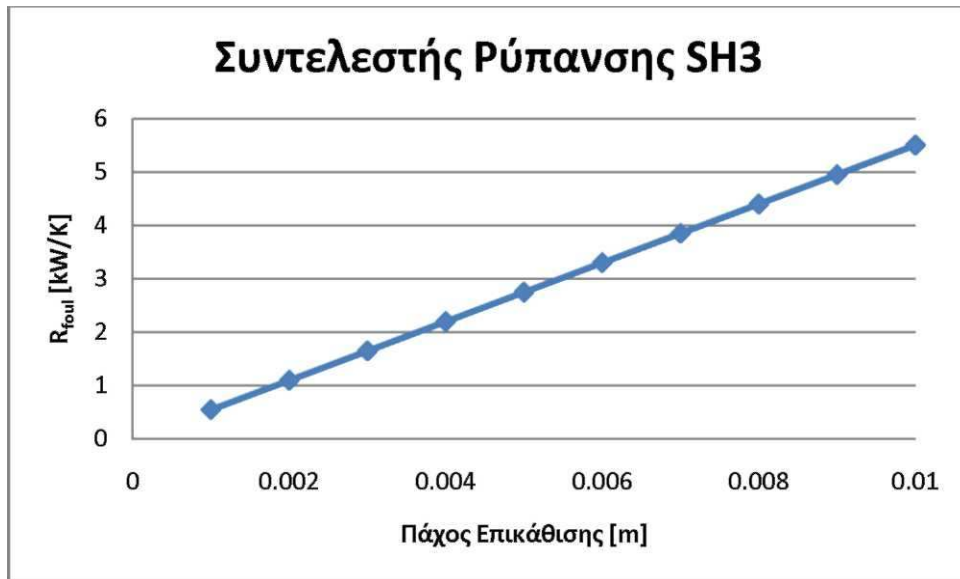
Διάγραμμα 14-2: Συντελεστής ρύπανσης SH1a



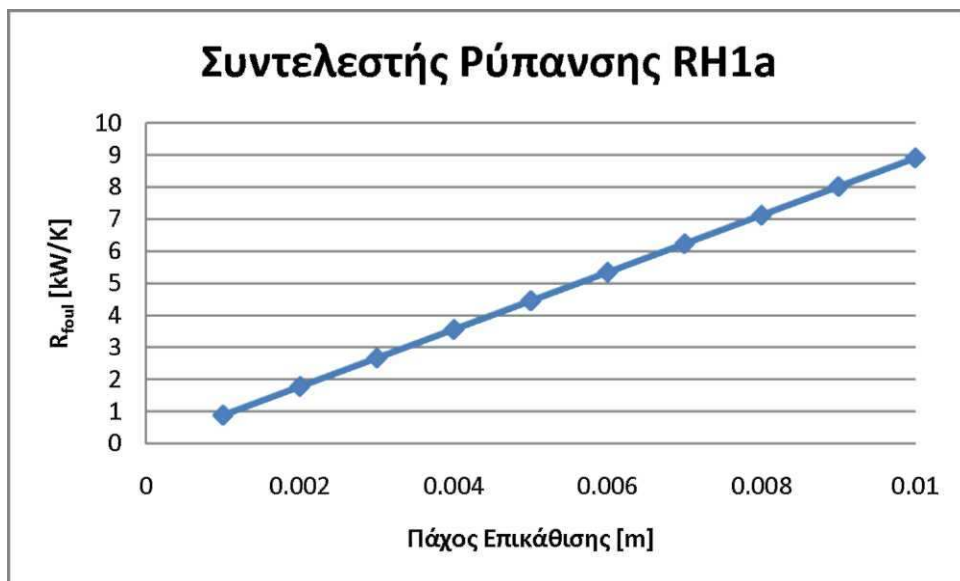
Διάγραμμα 14-3: Συντελεστής ρύπανσης SH1b



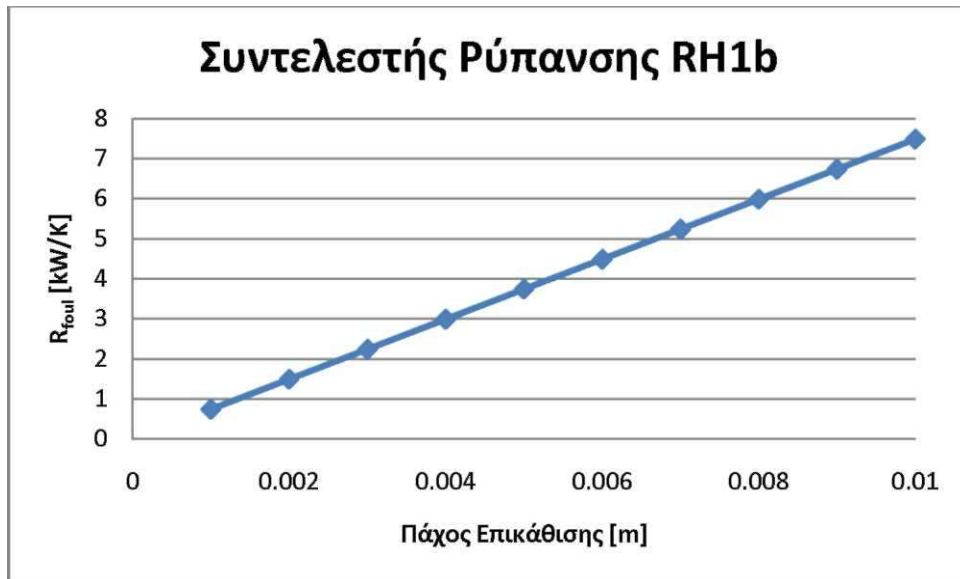
Διάγραμμα 14-4: Συντελεστής ρύπανσης SH2



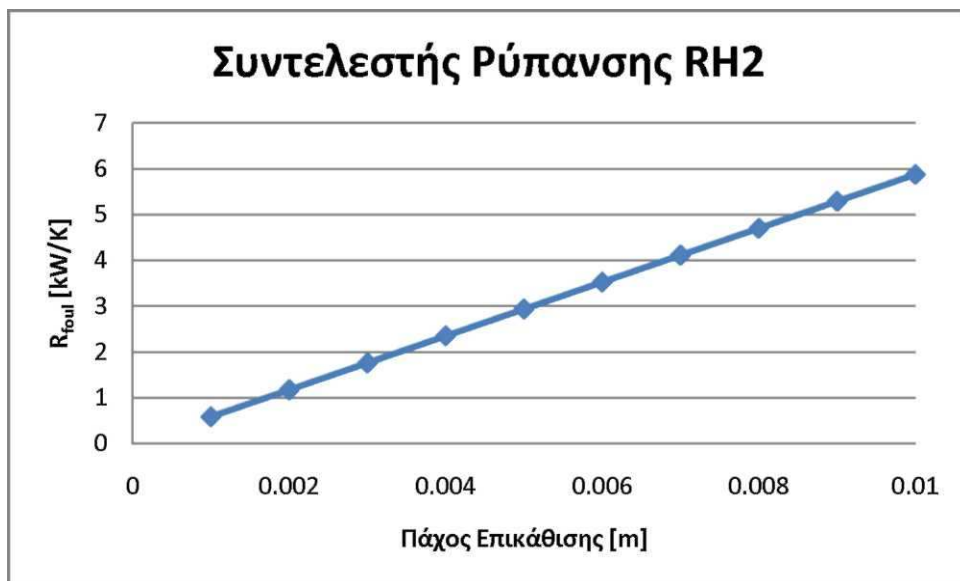
Διάγραμμα 14-5: Συντελεστής ρύπανσης SH3



Διάγραμμα 14-6: Συντελεστής ρύπανσης RH1a



Διάγραμμα 14-7: Σ συντελεστής ρύπανσης RH1b



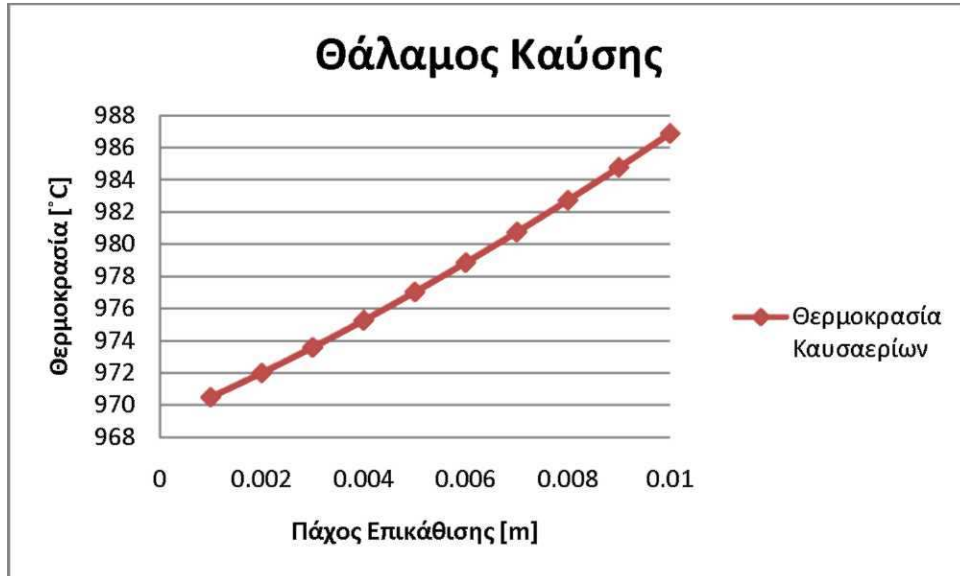
Διάγραμμα 14-8: Συντελεστής ρύπανσης RH2

14.8. Αποτελέσματα Προσομοίωσης

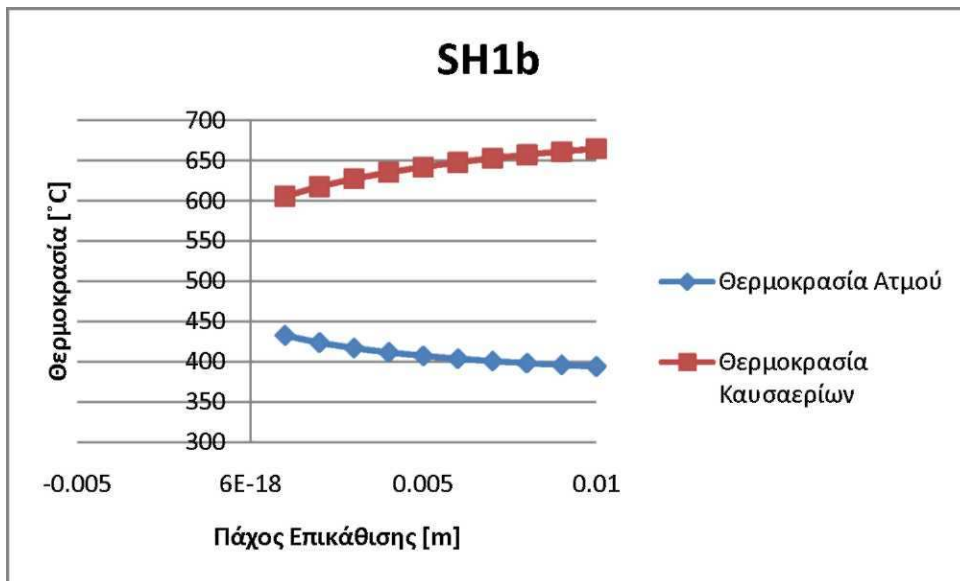
Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαφόρων σεναρίων ρύπανσης με παράμετρος το πάχος της επικάλυψης και το συντελεστή ρύπανσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή διαγραμμάτων, ανά περίπτωση και συγκεντρωτικά (απόλυτη ποσοστιαία και ποσοστιαία μεταβολή) ενώ ταυτόχρονα γίνεται και σχολιασμός τους.

14.8.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης σε συνθήκες ρύπανσης για κάθε εναλλάκτη

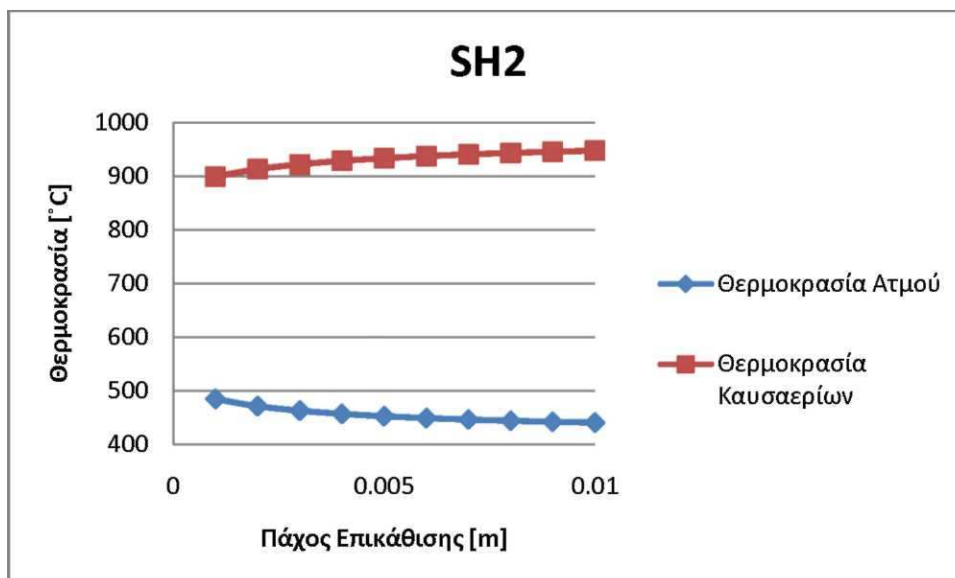
Σε πρώτη φάση, προσομοιώθηκαν σενάρια ρύπανσης για κάθε εναλλάκτη ξεχωριστά ώστε αφενός να επιβεβαιωθεί η συνέπεια των μοντέλων και αφετέρου να παρατηρηθεί το ποσοστό επίδρασης της ρύπανσης σε κάθε περιοχή μεμονωμένα. Η προσομοίωση έγινε για συντελεστές ρύπανσης οι οποίοι αντιστοιχούν σε πάχος επικάλυψης από 1 έως 10 mm, εκτός από την περίπτωση του RH1a, όπου η προσομοίωση έγινε για πάχος επικάλυψης από 1 έως 3 mm λόγω των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του (μικρή απόσταση μεταξύ των αυλών). Στα επόμενα διαγράμματα (Διάγραμμα 11-9 έως Διάγραμμα 11-15) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό, ότι η προσομοίωση δεν περιλαμβάνει τον υπέρθερμο 1a καθώς αυτός έχει αντικατασταθεί από μία απλουστευμένη ρουτίνα (βλέπε ενότητα 2.5.1). Διευκρινίζεται επίσης ότι εφόσον στην έξοδο του θαλάμου καύσης ο ατμός είναι κορεσμένος, κατά την εισαγωγή συνθηκών ρύπανσης, θερμοκρασία του στην έξοδο δε μεταβάλλεται. Λόγω της αδυναμίας του προγράμματος να διαχειριστεί τη συμπεριφορά του εργαζόμενου μέσου για διφασική ροή, η επίδραση των επικαθίσεων σε αυτό το σημείο, δεν παρουσιάστηκε όπως αναμενότανε (μεταβολή ποιότητας ατμού και ενθαλπίας). Η μεταβολή όμως των χαρακτηριστικών των καυσαερίων θεωρείται σωστή, οπότε και παρουσιάζεται.



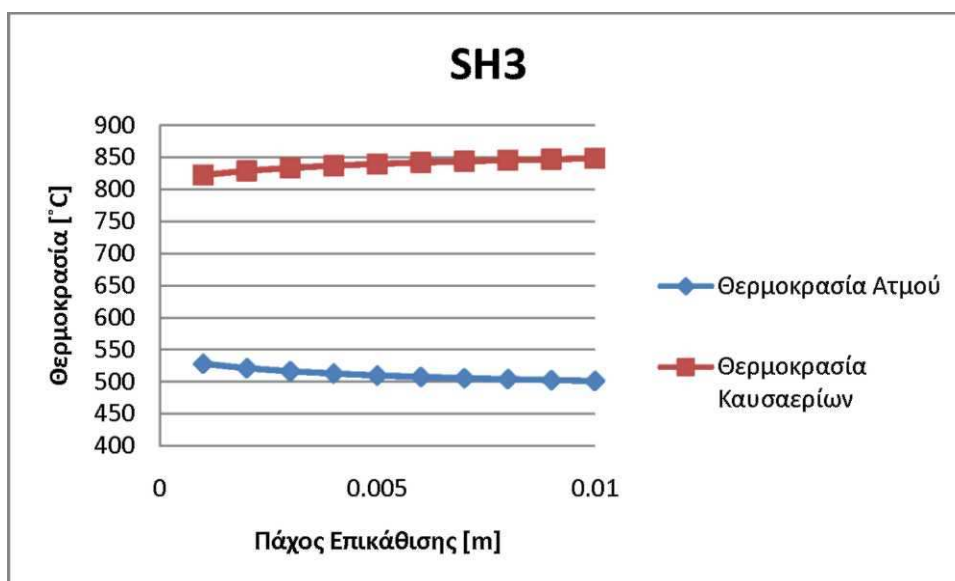
Διάγραμμα 14-9: Θερμοκρασία καυσαερίων στην έξοδο του θαλάμου καύσης σε συνθήκες ρύπανσης, πάχος επικάθισης [0 - 1mm]



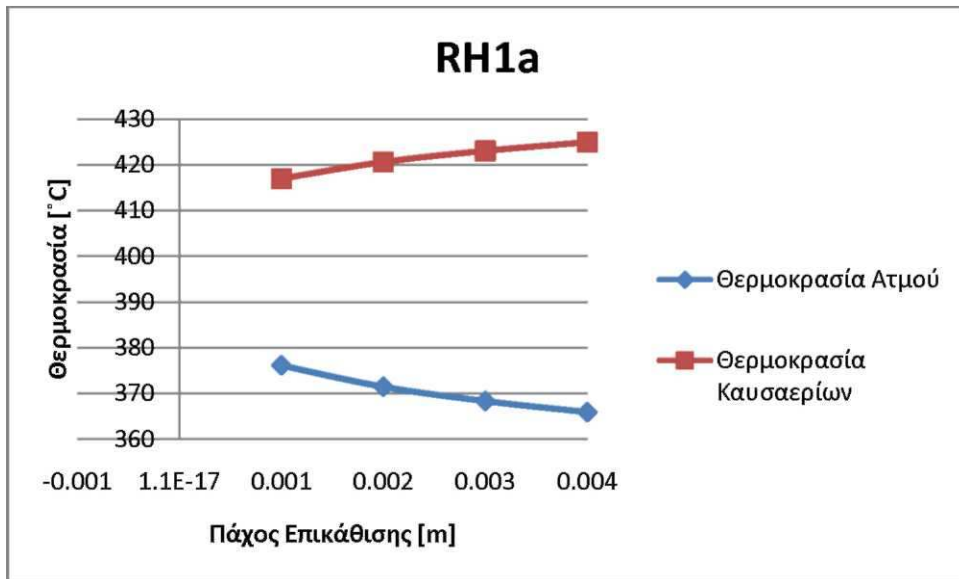
Διάγραμμα 14-10: Θερμοκρασία ατμού και καυσαερίων στην έξοδο του SH1b, πάχος επικάθισης [0-1 mm]



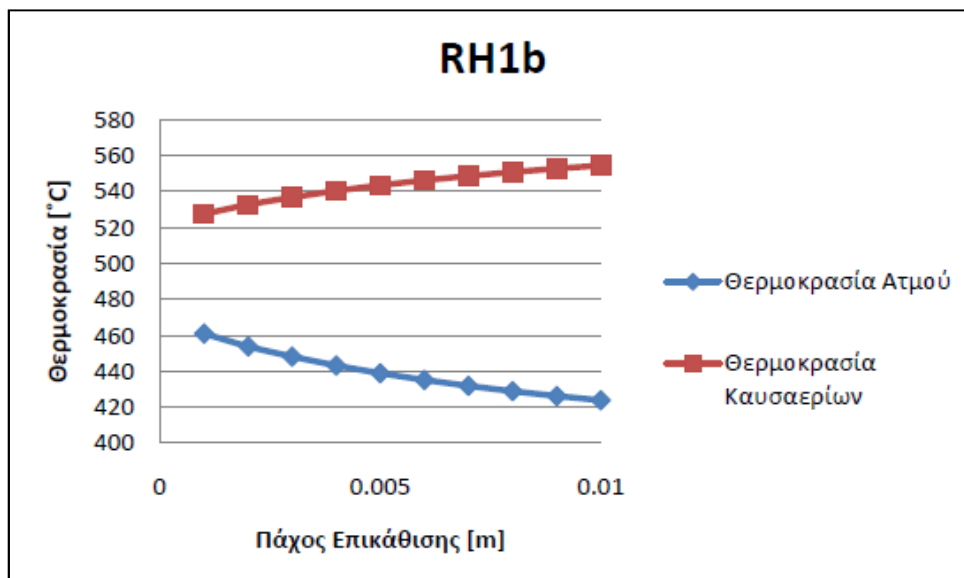
Διάγραμμα 14-11: Θερμοκρασία ατμού και καυσαερίων στην έξοδο του SH2, πάχος επικάθισης [0 - 1 mm]



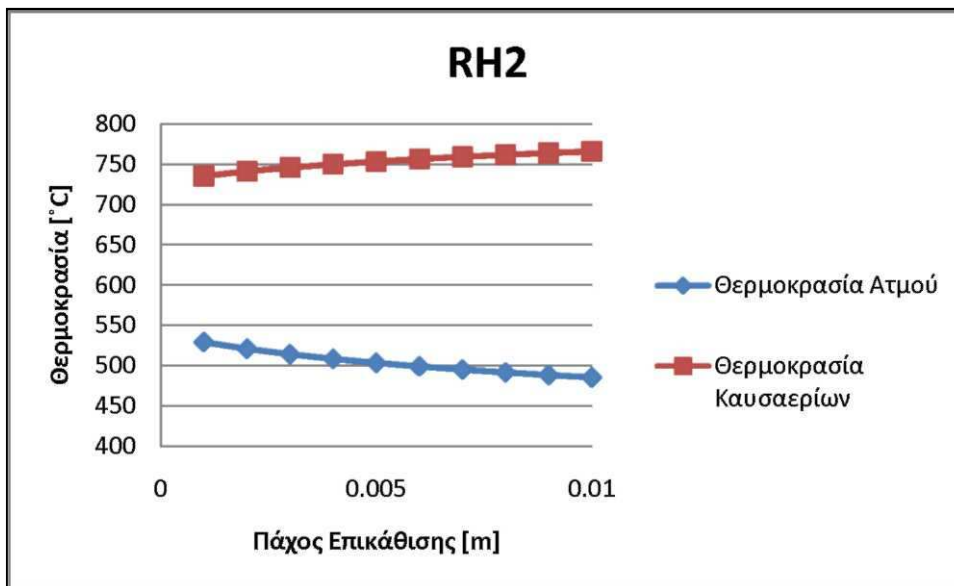
Διάγραμμα 14-12: Θερμοκρασία ατμού και καυσαερίων στην έξοδο του SH3, πάχος επικάθισης [0 - 1 mm]



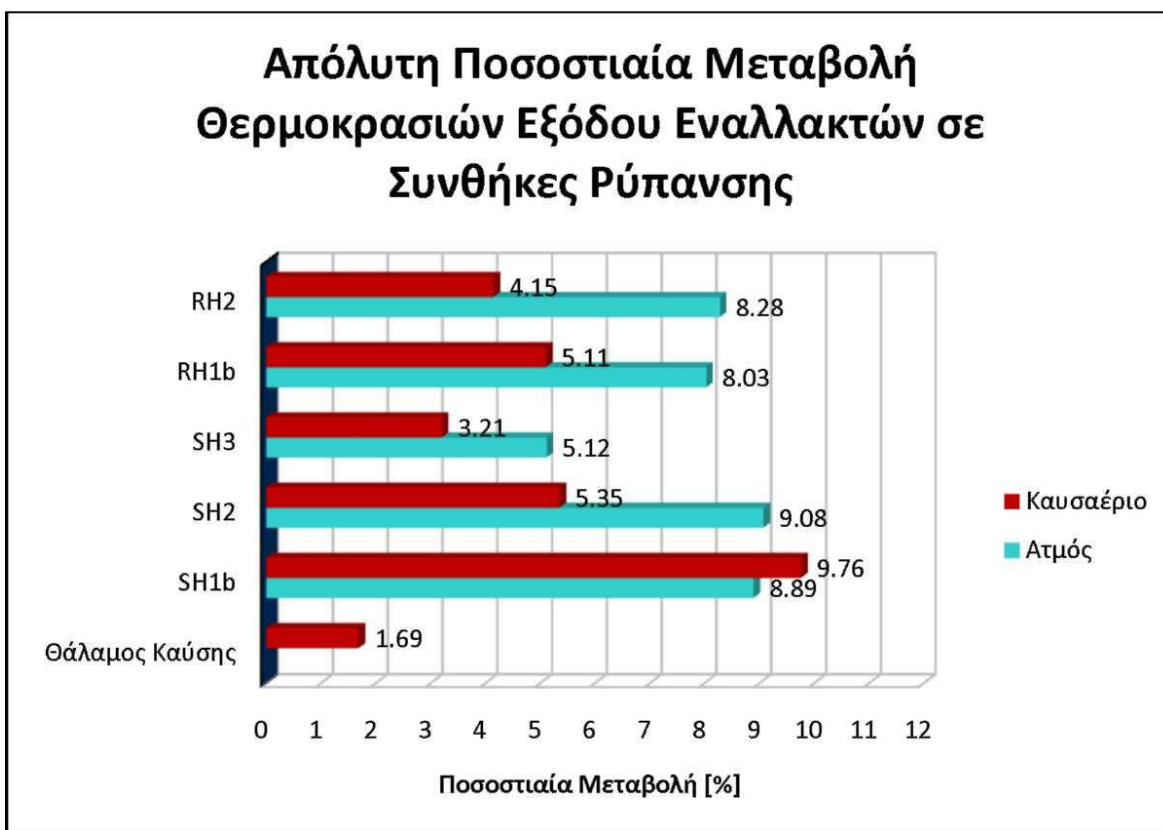
Διάγραμμα 14-13: Θερμοκρασία ατμού και καυσαερίων στην έξοδο του RH1a, πάχος επικάθισης [0-1 mm]



Διάγραμμα 14-14: Θερμοκρασία ατμού και καυσαερίων στην έξοδο του RH1a, πάχος επικάθισης [0-1 mm]



Διάγραμμα 14-15: Θερμοκρασία ατμού και καυσαερίων στην έξοδο του RH2, πάχος επικάθισης [0-1 mm]



Διάγραμμα 14-16: Απόλυτη ποσοστιαία μεταβολή θερμοκρασιών εξόδου του ατμού και των καυσαερίων σε κάθε εναλλάκτη

Στο Διάγραμμα 11-16 παρουσιάζεται η απόλυτη ποσοστιαία μεταβολή των θερμοκρασιών εξόδου του ατμού και των καυσαερίων σε κάθε εναλλάκτη. Σημειώνεται ότι στο διάγραμμα αυτό δεν παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του RH1a, καθώς οι συνθήκες ρύπανσης για τις οποίες προσομοιώθηκε δεν ήταν αντίστοιχες με αυτές των υπόλοιπων εναλλακτών (λόγω κατασκευαστικών χαρακτηριστικών). Επίσης στο διάγραμμα δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα για τον SH1a, καθώς το στοιχείο αυτό αντικαταστάθηκε από μία απλοποιημένη ρουτίνα.

Από το διάγραμμα αυτό, εντονότερη επίδραση των επικαθίσεων όσον αφορά στον ατμό, παρατηρείται στην έξοδο του υπέρθερμου 2 και 1b, ενώ αναφορικά με τη θερμοκρασία των καυσαερίων, η μεγαλύτερη επίδραση παρατηρείται στην έξοδο του υπέρθερμου 1b. Αντίστοιχα, η μικρότερη επίδραση των επικαθίσεων όσον αφορά στον ατμό παρατηρείται στην έξοδο του SH3, ενώ αναφορικά με τη θερμοκρασία των καυσαερίων, η μικρότερη επίδραση παρατηρείται για την έξοδο του θαλάμου καύσης.

14.8.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης σε συνθήκες ρύπανσης για τον ατμοπαραγωγό

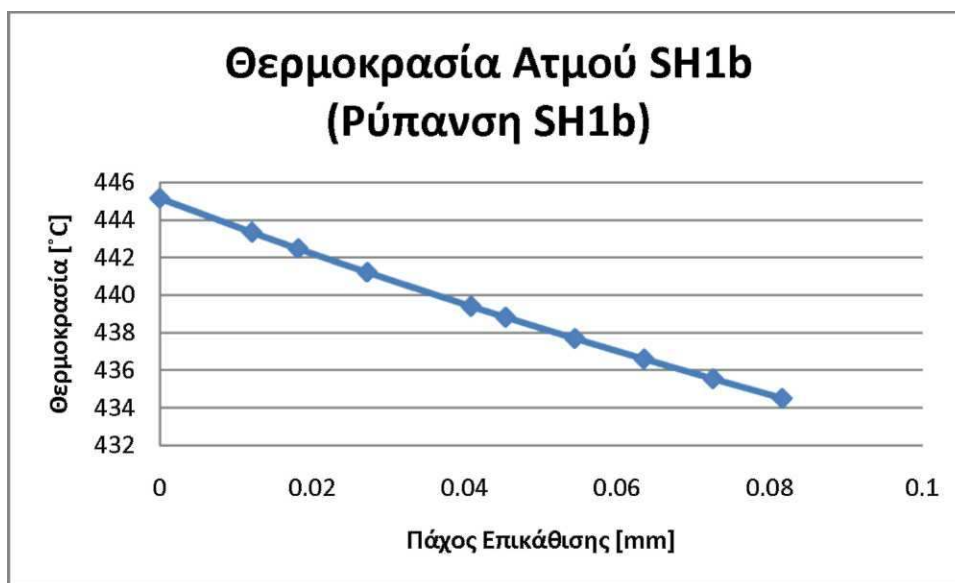
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για σενάρια ρύπανσης ενός εναλλάκτη κάθε φορά καθώς και η επίδραση που έχει η ρύπανση στα υπόλοιπα στοιχεία του λέβητα αναφορικά με τις θερμοκρασίες εξόδου κάθε στοιχείου και επιπλέον αναφορικά με τις παροχές των ψεκασμών. Σημειώνεται πως οι ψεκασμοί αποτελούν έναν εμπειρικό δείκτη για το βαθμό ρύπανσης του ατμοπαραγωγού. Τα σενάρια τα οποία εξετάστηκαν για τον κλάδο του υπέρθερμου (SH1b, SH2 και SH3), έγιναν για το μέγιστο συντελεστή ρύπανσης R_{foul} ο οποίος μπορεί να δοθεί για κάθε εναλλάκτη με βάση τον περιορισμό που τίθεται από τους ψεκασμούς (οι ψεκασμοί πρέπει να είναι πάνω από μηδέν kg/s). Για τον κλάδο του ανάθερμου (RH1a, RH1b και RH2), επιλέχθηκε ένας κοινός συντελεστής ρύπανσης από 0 έως 3 kW/K.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα θερμοκρασίας εξόδου για τα διάφορα στοιχεία του λέβητα, καθώς και τα διαγράμματα παροχών των ψεκασμών. Παραλείπονται τα διαγράμματα για τις περιπτώσεις στις οποίες η επίδραση είναι αμελητέα όπως αυτή του θαλάμου καύσης.

1. Σενάριο ρύπανσης SH1b για R_{foul} [0 - 0.54], πάχος επικάλυψης [0 - 0.08 mm]



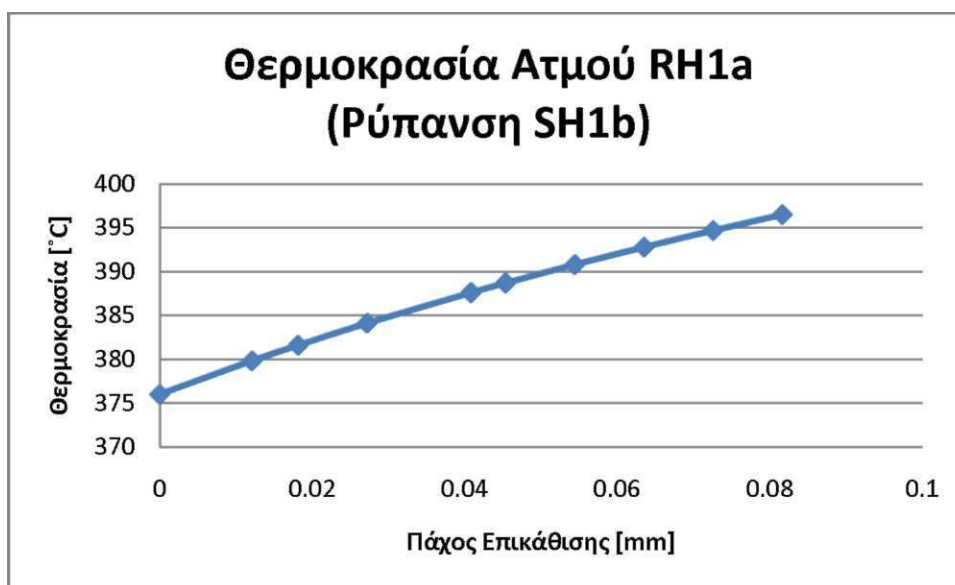
Διάγραμμα 14-17: Επίδραση ρύπανσης του SH1b στον SH1a (Καυσαέρια)



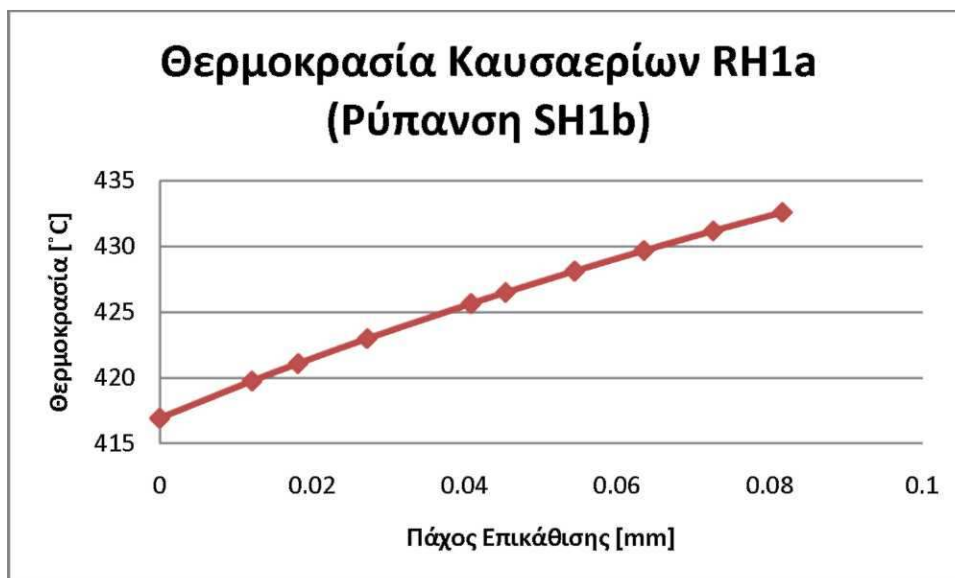
Διάγραμμα 14-18: Επίδραση ρύπανσης του SH1b στον SH1b (Ατμός)



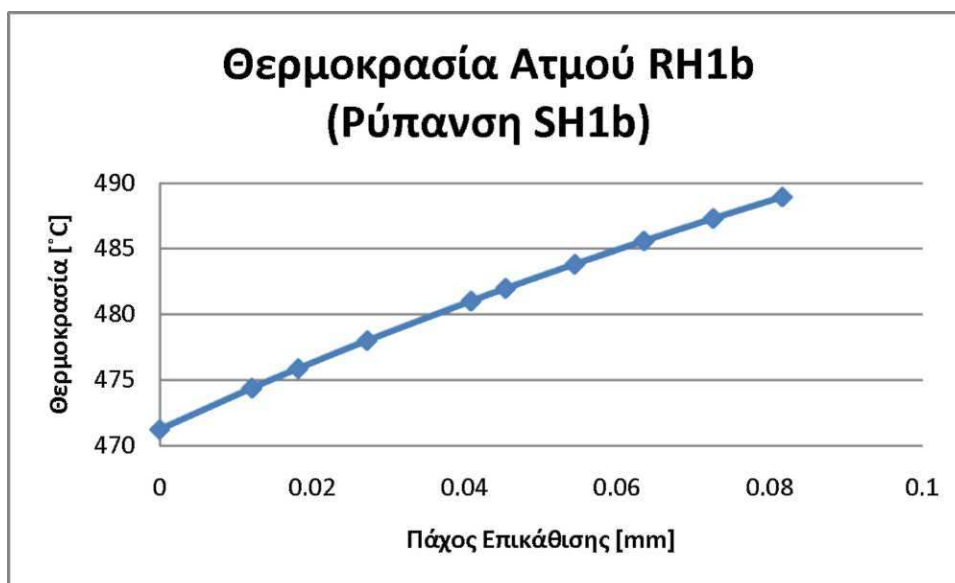
Διάγραμμα 14-19: Επίδραση ρύπανσης του SH1b στον SH1b (Καυσαέρια)



Διάγραμμα 14-20: Επίδραση ρύπανσης του SH1b στον RH1a (Ατμός)



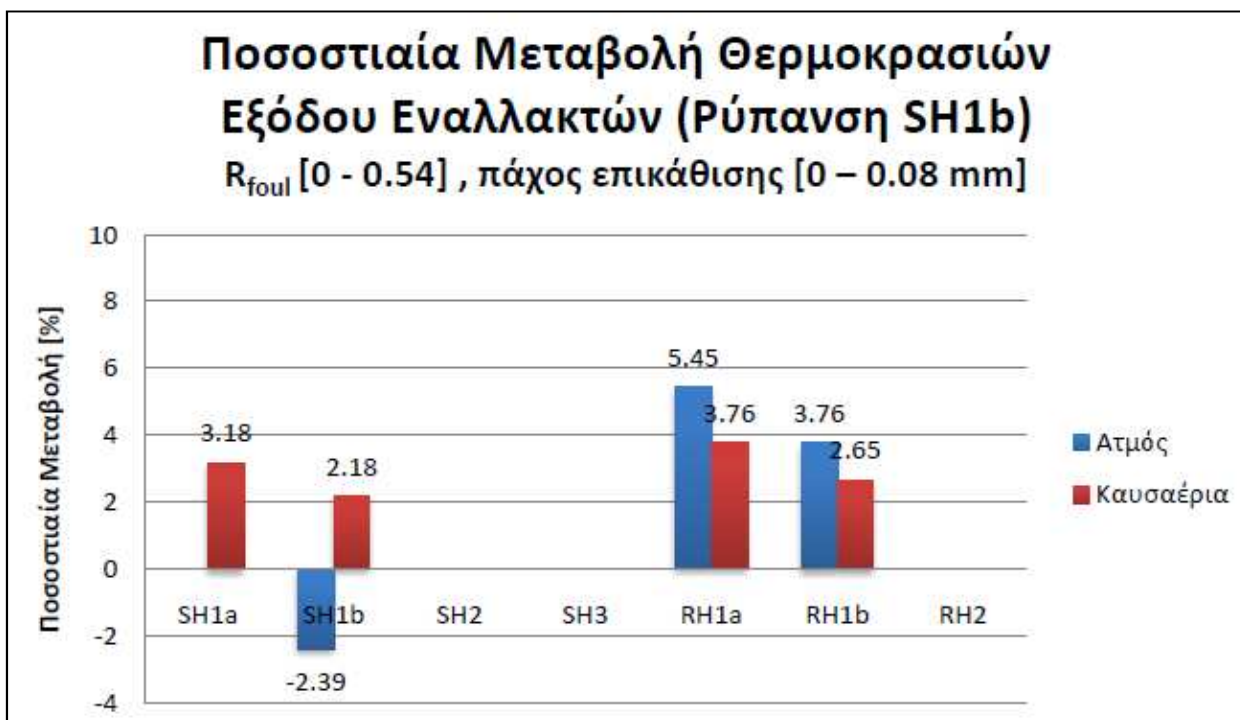
Διάγραμμα 14-21: Επίδραση ρύπανσης του SH1b στον RH1a (Καυσαέρια)



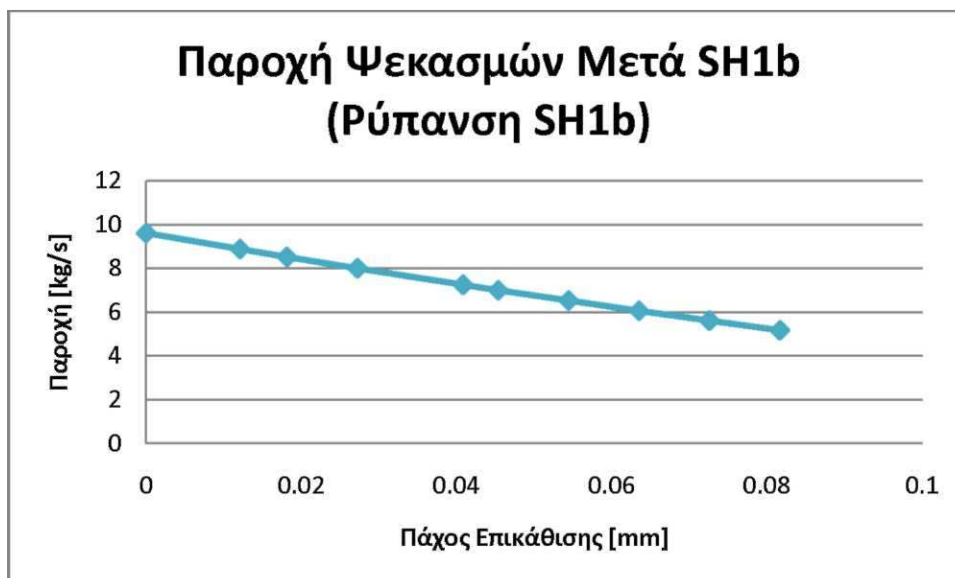
Διάγραμμα 14-22: Επίδραση ρύπανσης του SH1b στον RH1b (Ατμός)



Διάγραμμα 14-23: Επίδραση ρύπανσης του SH1b στον RH1b (Καυσαέρια)



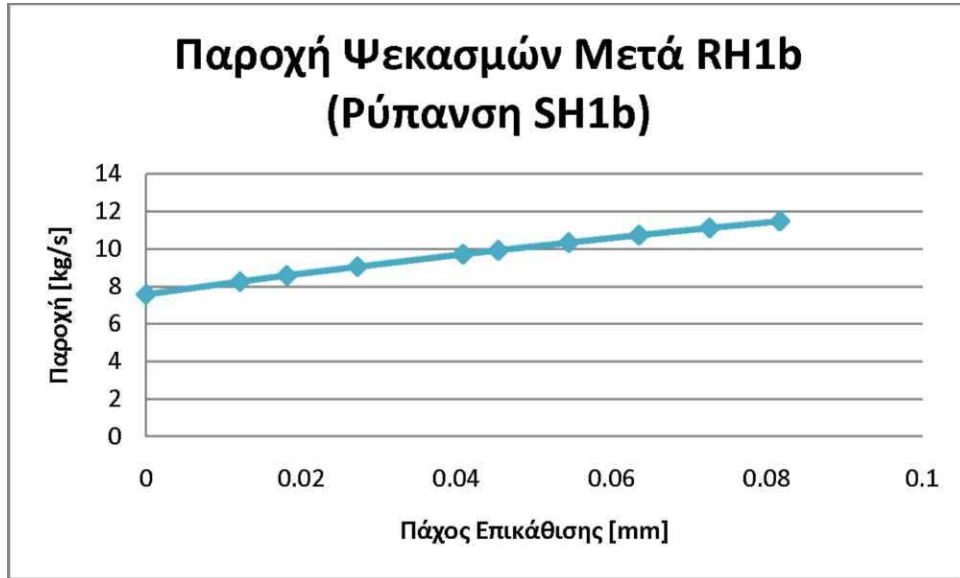
Διάγραμμα 14-24: Ποσοστιαία μεταβολή θερμοκρασιών εξόδου του ατμού και των καυσαερίων σε κάθε εναλλάκτη για ρύπανση στον SH1b για R_{foul} [0 - 0.54], πάχος επικάθισης [0 - 0.08 mm]



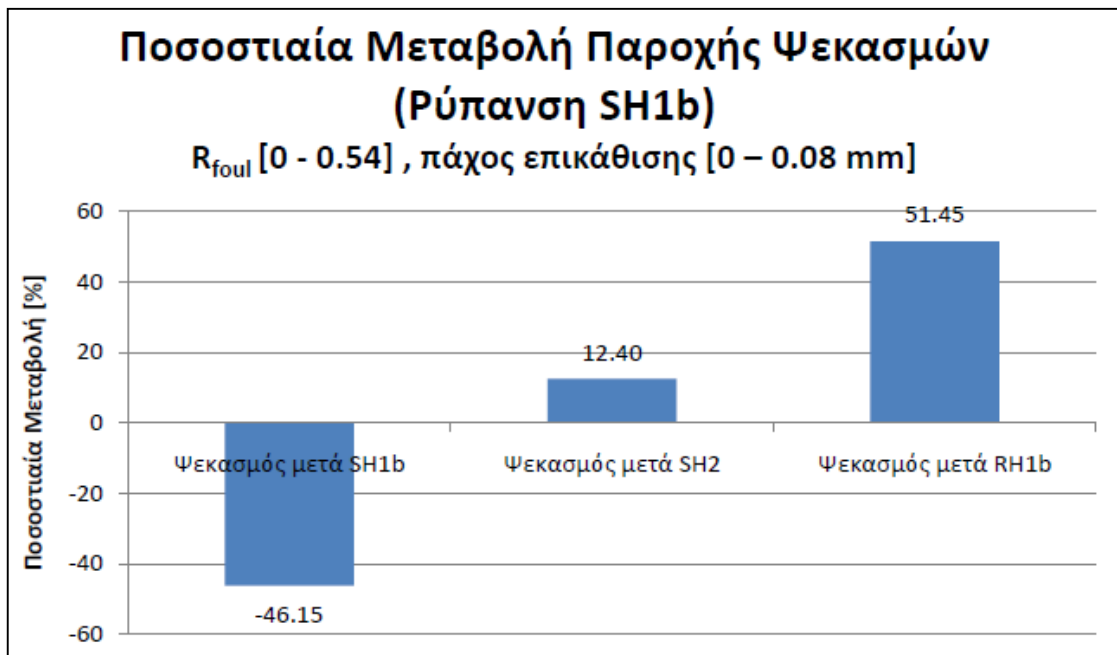
Διάγραμμα 14-25: Επίδραση ρύπανσης του SH1b στην παροχή ψεκασμών μετά SH1b



Διάγραμμα 14-26: Επίδραση ρύπανσης του SH1b στην παροχή ψεκασμών μετά SH2



Διάγραμμα 14-27: Επίδραση ρύπανσης του SH1b στην παροχή ψεκασμών μετά RH1b



Διάγραμμα 14-28: Ποσοστιαία μεταβολή παροχής ψεκασμών για ρύπανση στον SH1b για R_{foul} [0 - 0.54], πάχος επικάθισης [0- 0.08 mm]

Για το σενάριο αυτό της προσομοίωσης, η εντονότερη επίδραση η οποία παρατηρείται, εντοπίζεται στον κλάδο του ανάθερμου RH1a και RH1b, εκτός από τον RH2 καθότι αυτός εντοπίζεται σε χαμηλότερο σημείο του ατμοπαραγωγού συγκριτικά με τον SH1b, οπότε και δεν επηρεάζονται τα

χαρακτηριστικά των καυσαερίων που διέρχονται από αυτόν. Επιπλέον ο RH2 δε δέχεται επίδραση στα χαρακτηριστικά του ατμού, διότι προηγείται ψεκασμός.

Στον κλάδο του υπέρθερμου, μετά τον SH1b, δεν παρατηρείται επίδραση καθότι ακολουθεί ψεκασμός. Ωστόσο στην περίπτωση που είχε συμπεριληφθεί στην προσομοίωση και το στοιχείο του SH1a, θα υπήρχε μεταβολή σε όλο τον κλάδο του υπέρθερμου, από τη στιγμή που καταγράφεται τόσο έντονη επίδραση στη θερμοκρασία των καυσαερίων που διατρέχουν τον SH1a.

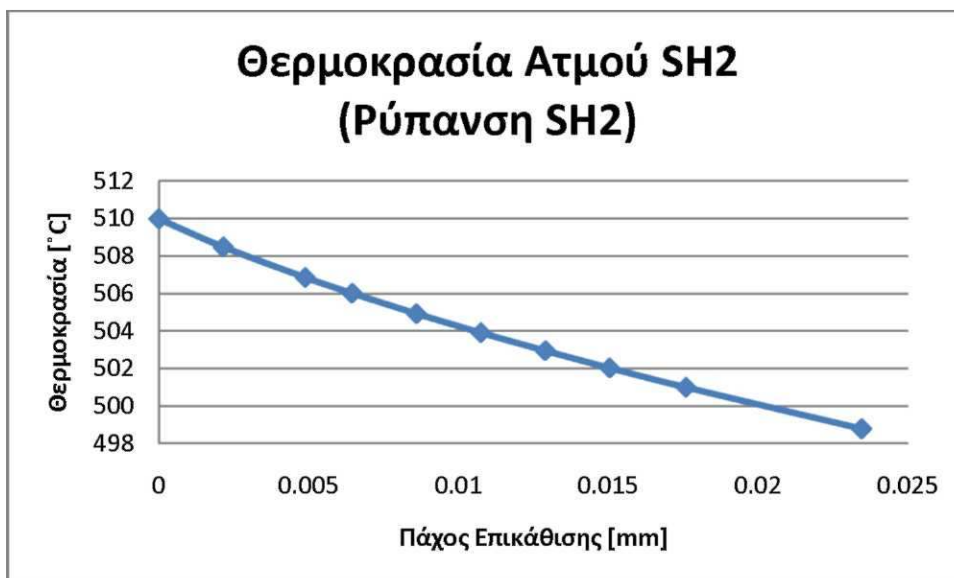
Οι ψεκασμοί του κλάδου του υπέρθερμου ελαττώνονται καθώς η θερμότητα η οποία περνάει στο εργαζόμενο μέσο είναι μειωμένη. Σημειώνεται μάλιστα πως η μεταβολή αυτή είναι ιδιαίτερα υψηλή. Αντίστοιχα στον κλάδο του ανάθερμου, οι παροχές των ψεκασμών είναι αυξημένες, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας των καυσαερίων που διατρέχουν τους ανάθερμους.

Από πλευράς σχεδιασμού, ο SH1a είναι πανομοιότυπος με τον SH1b, οπότε εκτιμάται πως η επίδραση των επικαθίσεων θα είχε αντίστοιχα αποτελέσματα αναφορικά με τα χαρακτηριστικά του ατμού.

2. Σενάριο ρύπανσης SH2 για Rfoul [0 - 0.12], πάχος επικάθισης [0 - 0.023mm]



Διάγραμμα 14-29: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στον SH1b (Καυσαέρια)



Διάγραμμα 14-30: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στον SH2 (Ατμός)



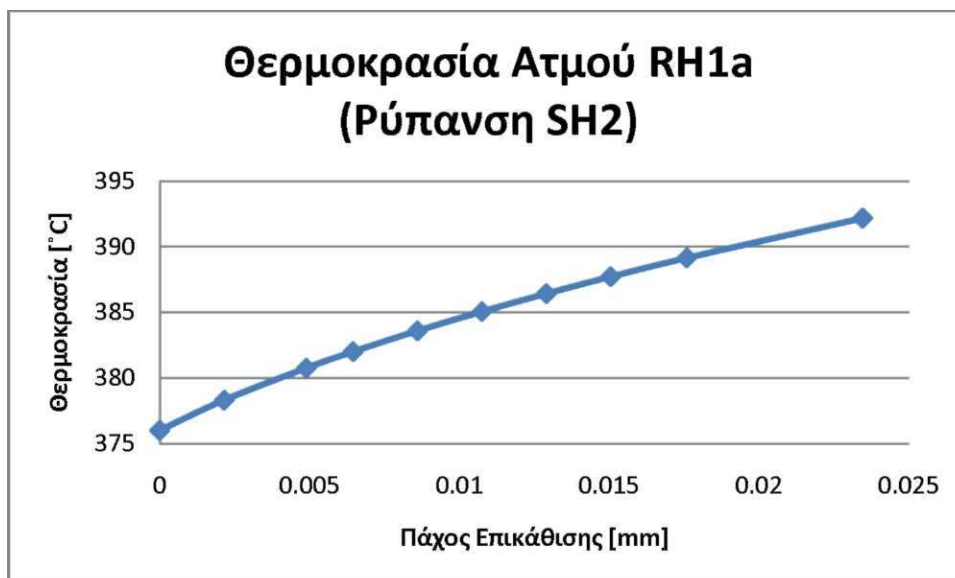
Διάγραμμα 14-31: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στον SH2 (Καυσαέρια)



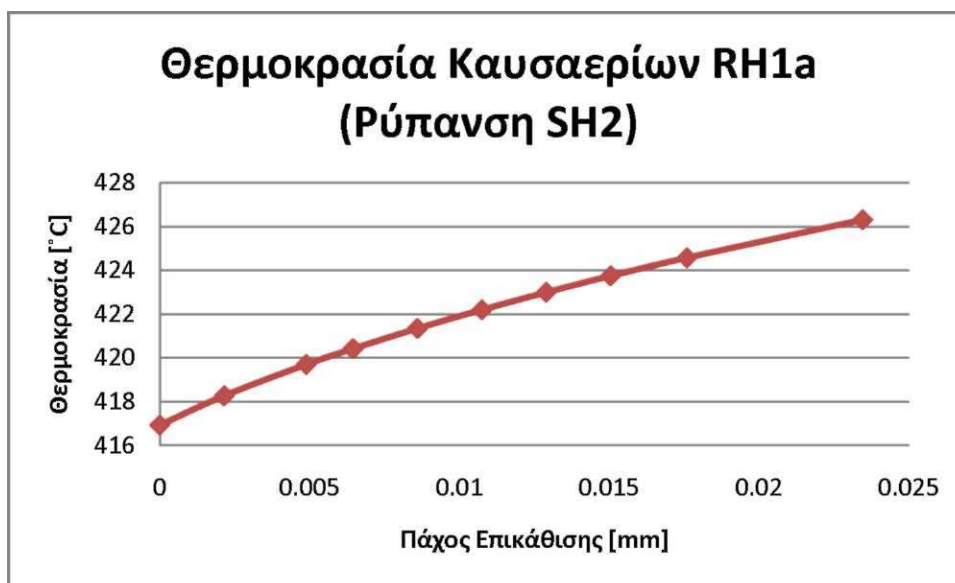
Διάγραμμα 14-32: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στον SH3 (Ατμός)



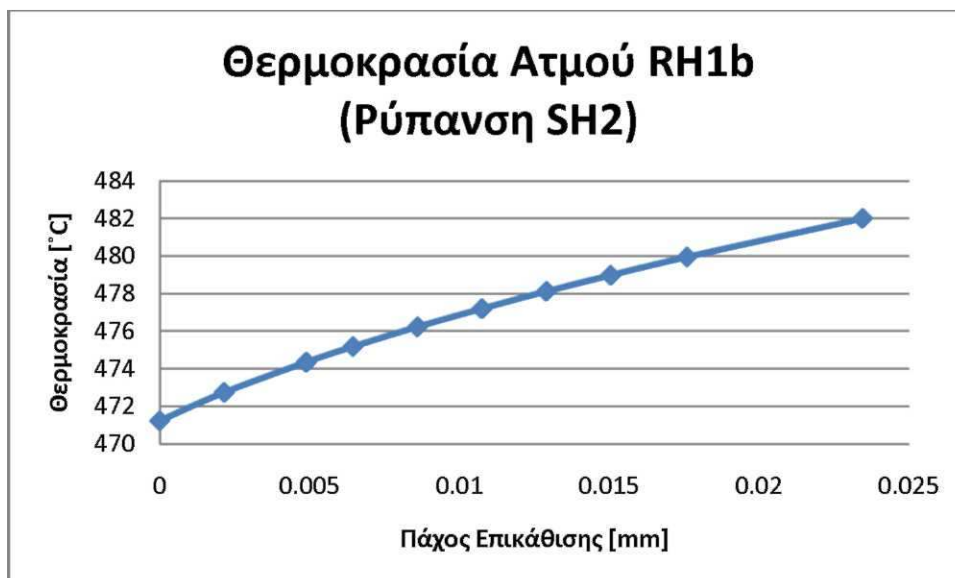
Διάγραμμα 14-33: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στον SH3 (Καυσαέρια)



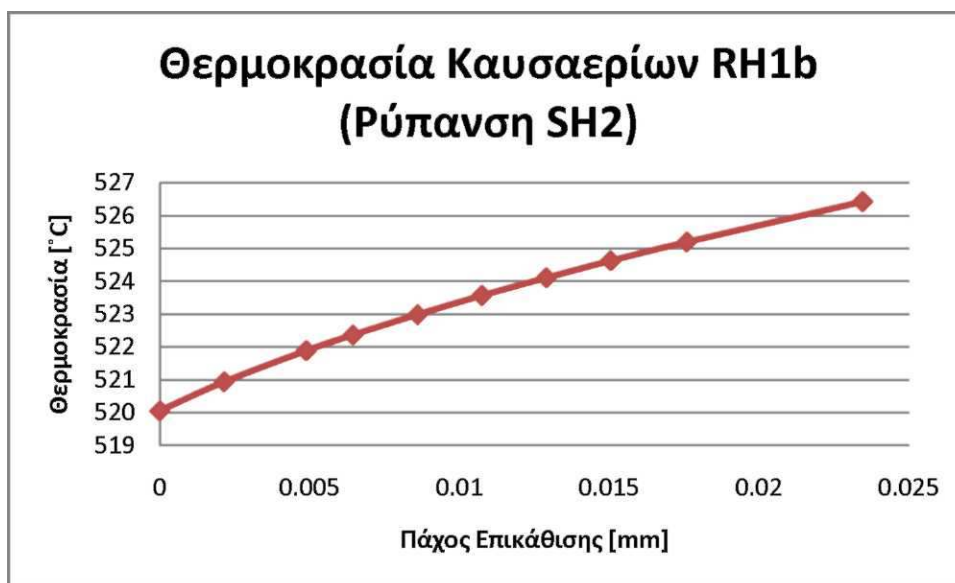
Διάγραμμα 14-34: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στον RH1a (Ατμός)



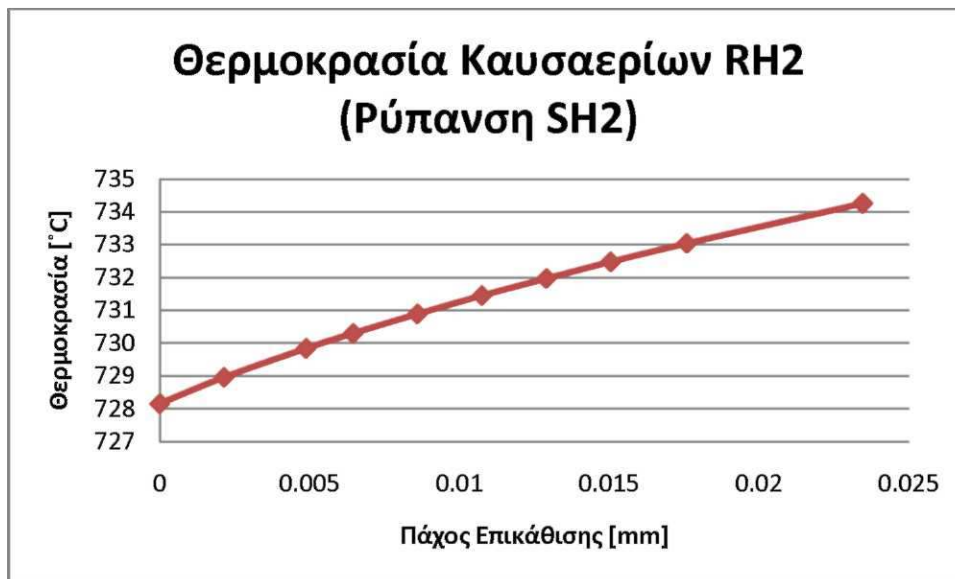
Διάγραμμα 14-35: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στον RH1a (Καυσαέρια)



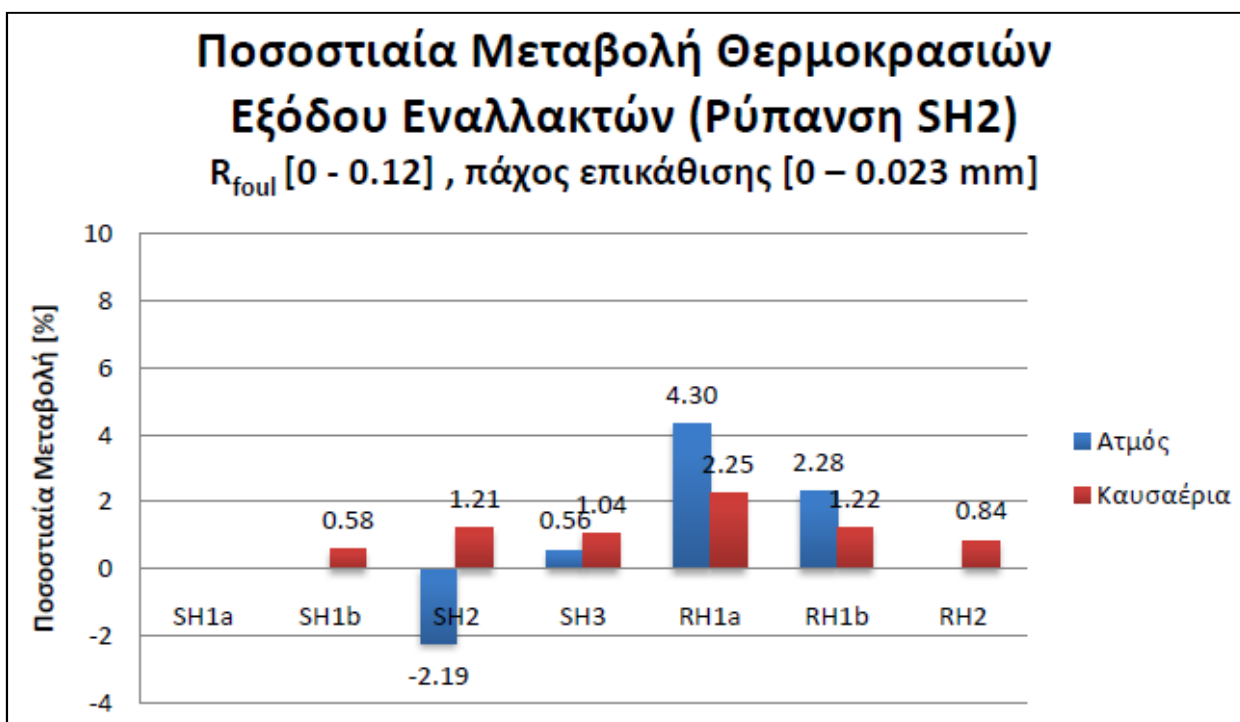
Διάγραμμα 14-36: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στον RH1b (Ατμός)



Διάγραμμα 14-37: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στον RH1b (Καυσαέρια)



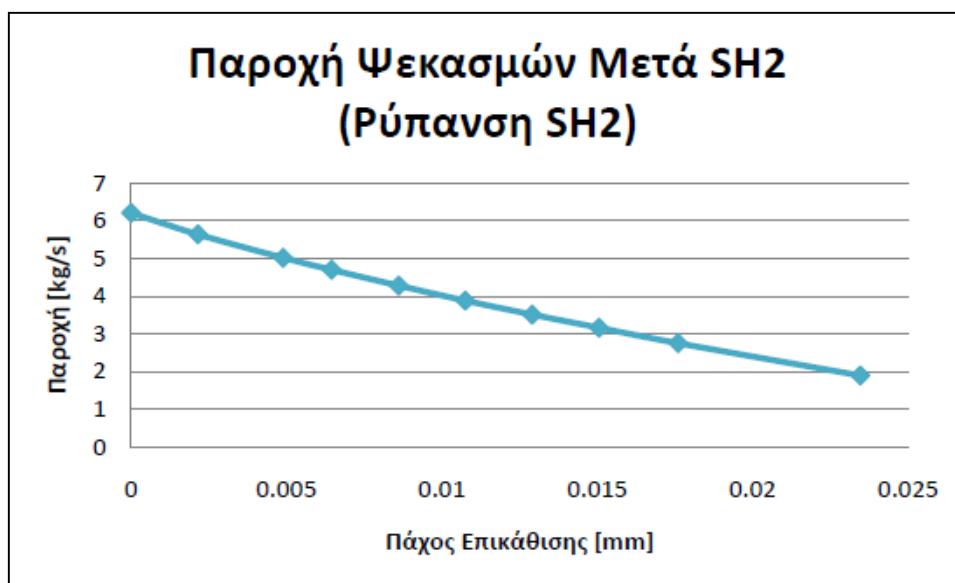
Διάγραμμα 14-38: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στον RH2 (Καυσαέρια)



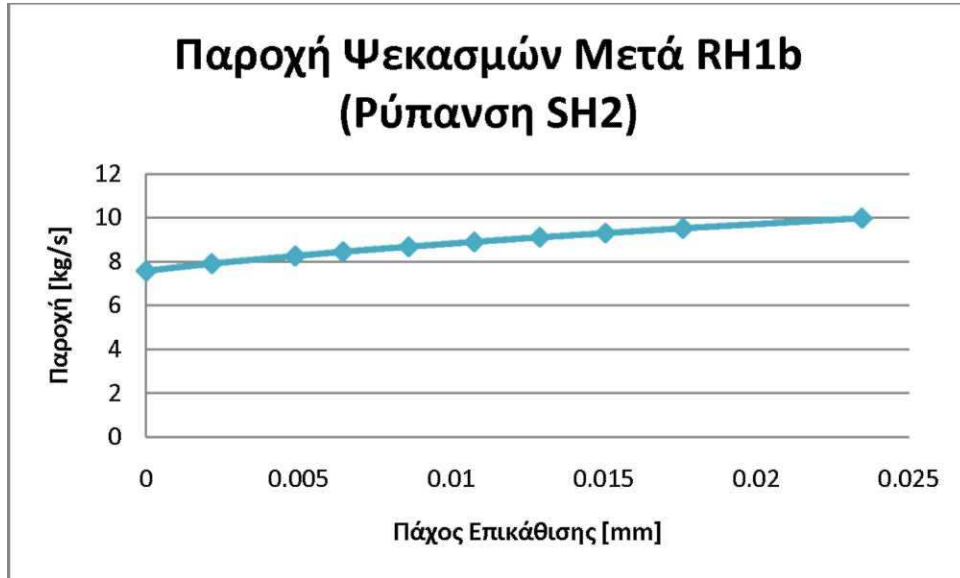
Διάγραμμα 14-39: Ποσοστιαία μεταβολή θερμοκρασιών εξόδου του ατμού και των καυσαερίων σε κάθε εναλλάκτη για ρύπανση στον SH2 για R_{foul} [0 - 0.12], πάχος επικάθισης [0 - 0.023 mm]



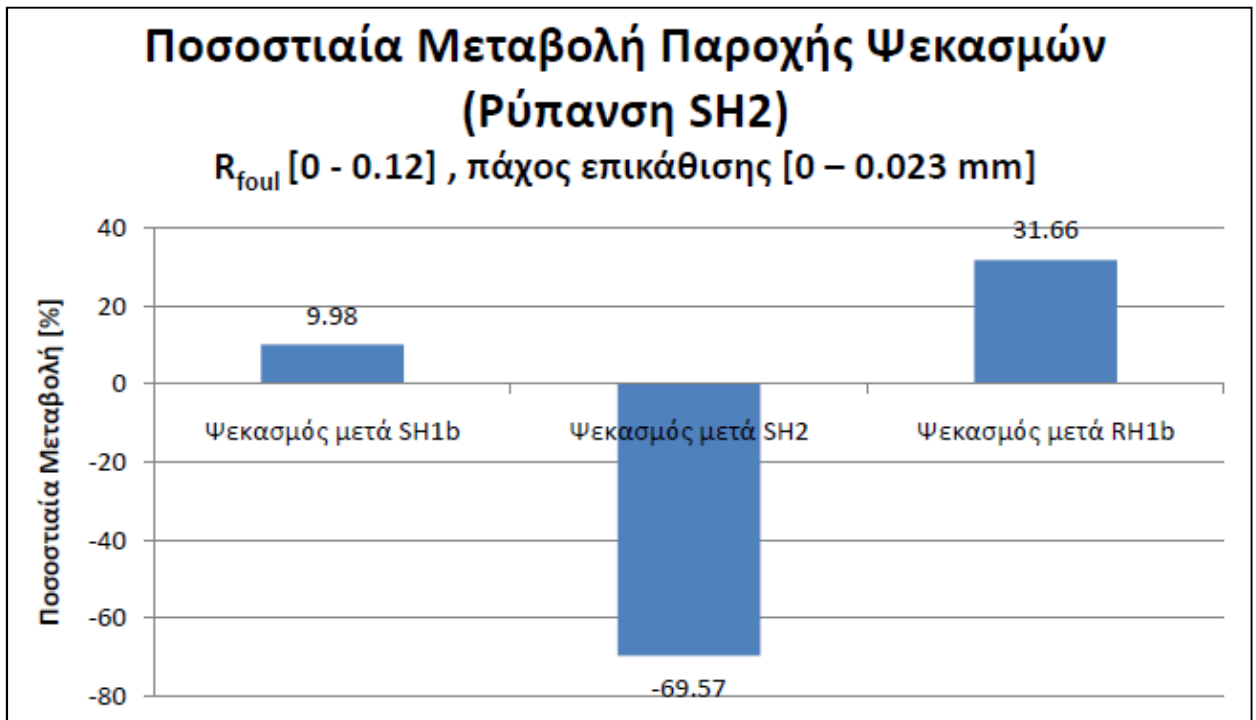
Διάγραμμα 14-40: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στην παροχή ψεκασμών μετά SH1b



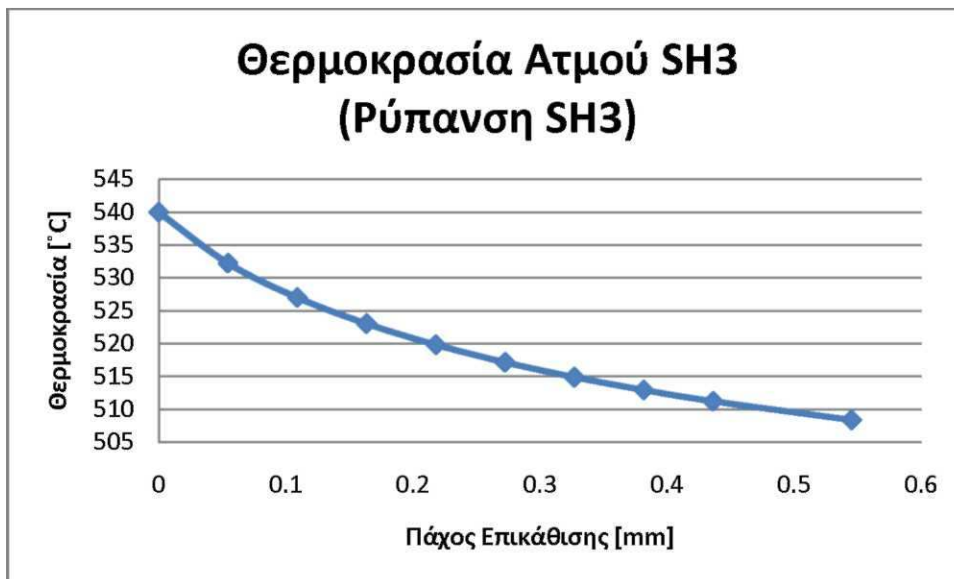
Διάγραμμα 14-41: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στην παροχή ψεκασμών μετά SH2



Διάγραμμα 14-42: Επίδραση ρύπανσης του SH2 στην παροχή ψεκασμών μετά RH1b



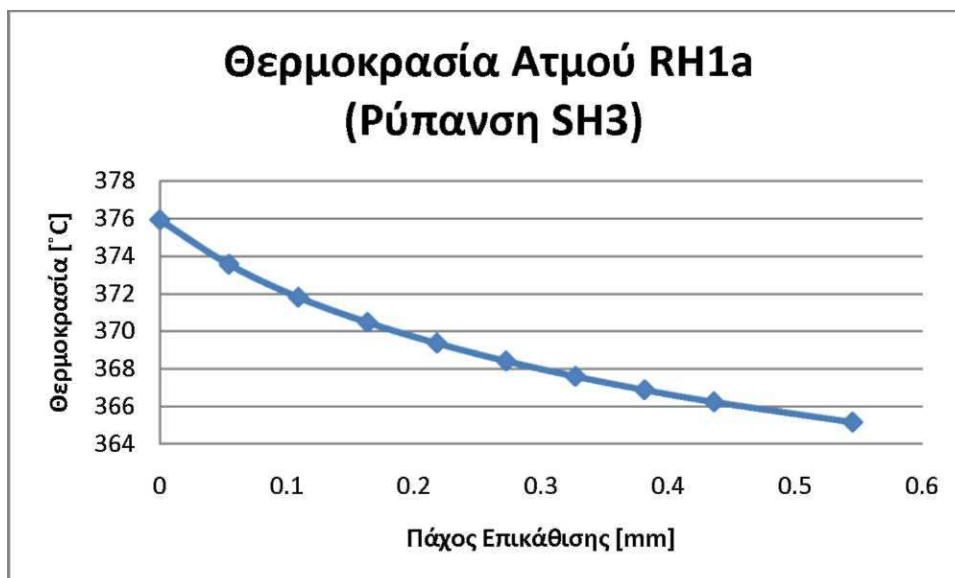
Διάγραμμα 14-43: Ποσοστιαία μεταβολή παροχής ψεκασμών για ρύπανση στον SH2 για $R_{foul} [0 - 0.12]$, πάχος επικάθισης [0 – 0.023 mm]



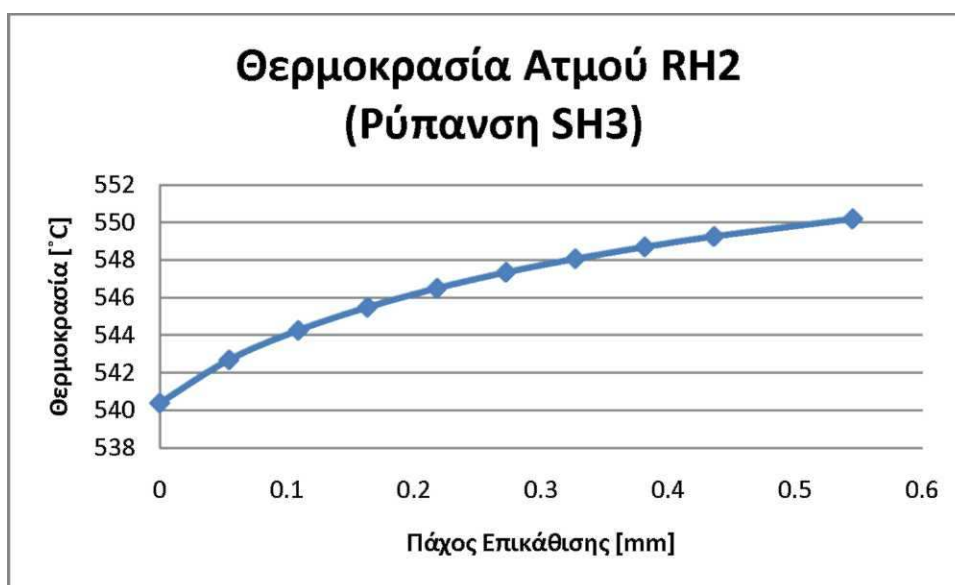
Διάγραμμα 14-44: Επίδραση ρύπανσης του SH3 στον SH3 (Ατμός)



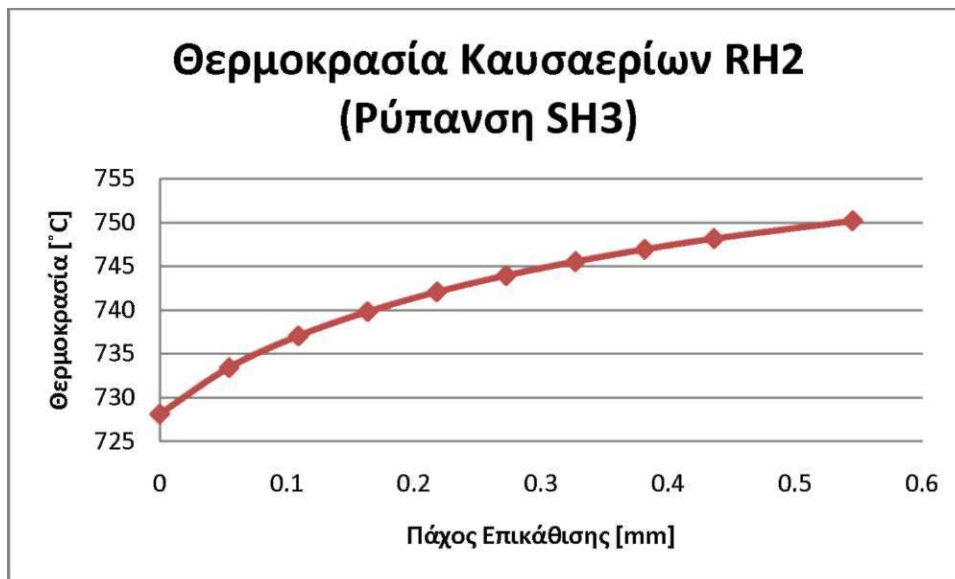
Διάγραμμα 14-45: Επίδραση ρύπανσης του SH3 στον SH3 (Καυσαέρια)



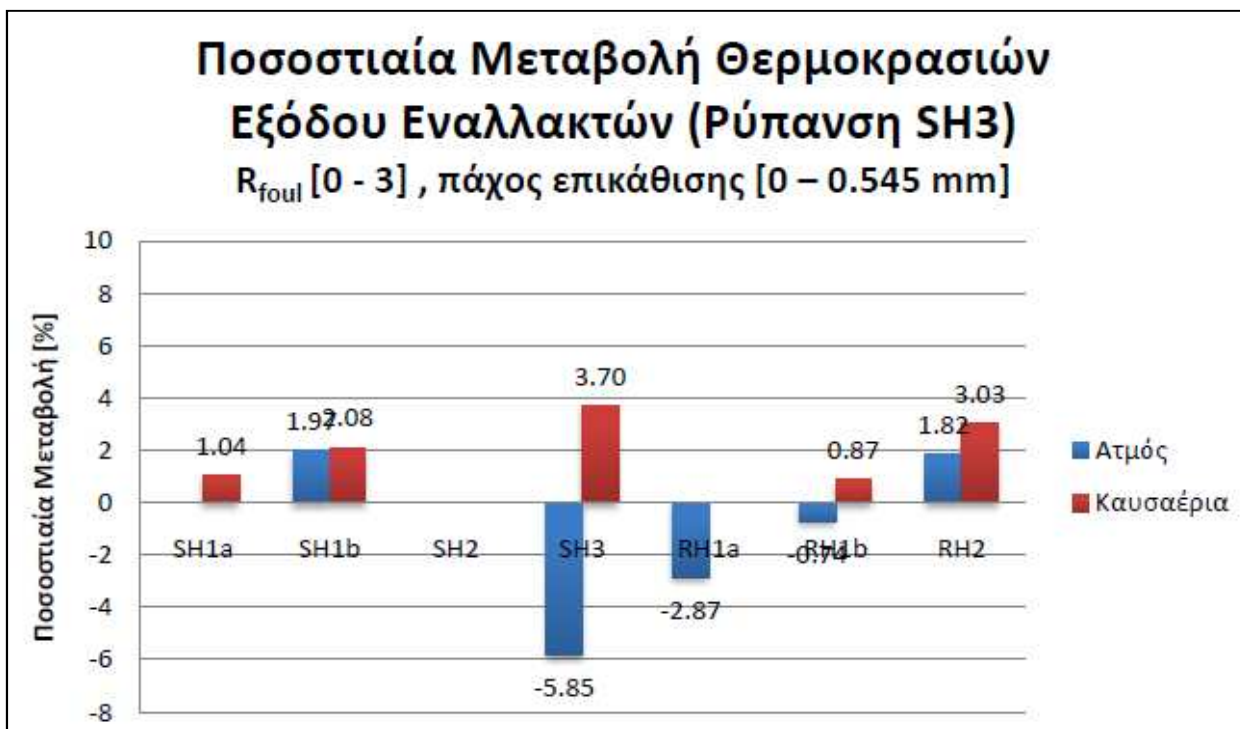
Διάγραμμα 14-46: Επίδραση ρύπανσης του SH3 στον RH1a (Ατμός)



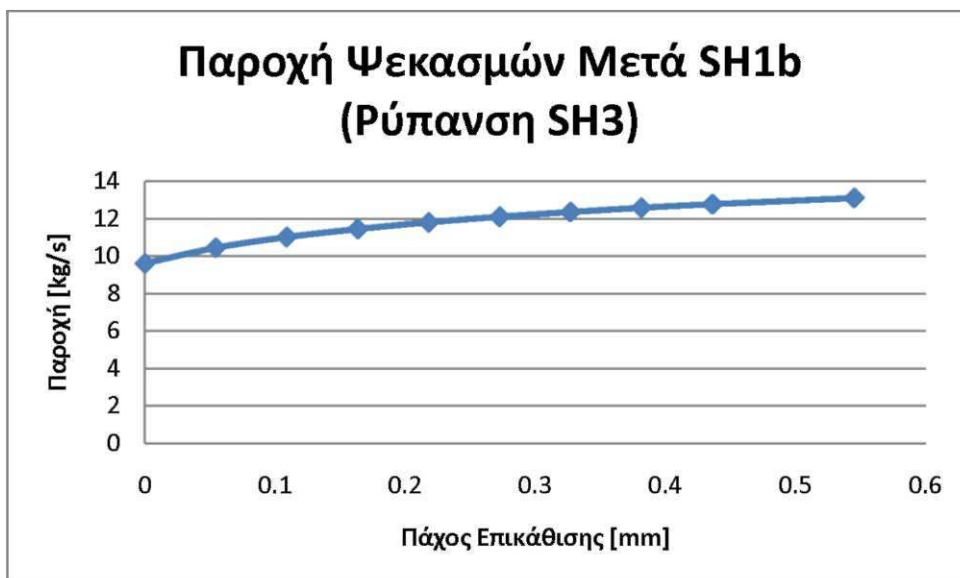
Διάγραμμα 14-47: Επίδραση ρύπανσης του SH3 στον RH2 (Ατμός)



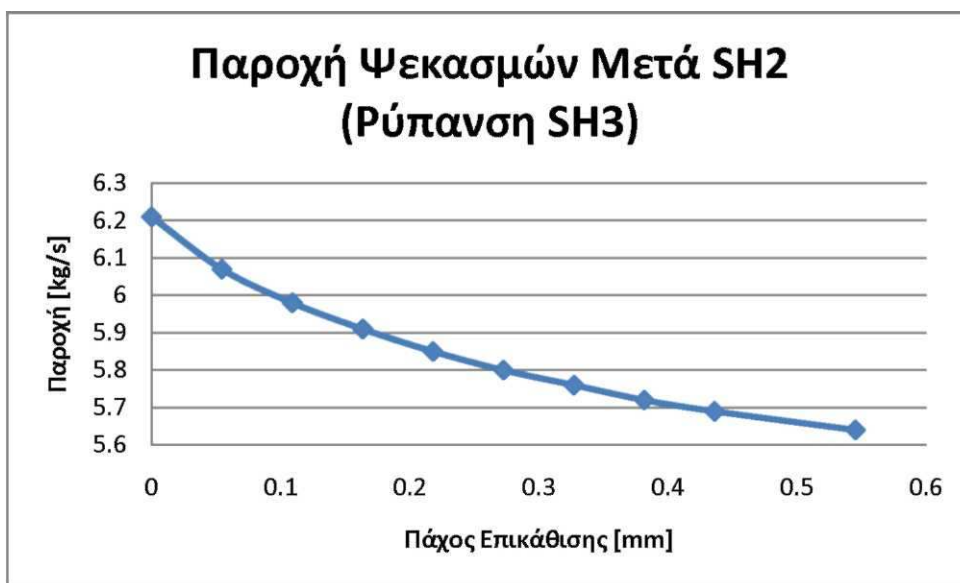
Διάγραμμα 14-48: Επίδραση ρύπανσης του SH3 στον RH2 (καυσαέρια)



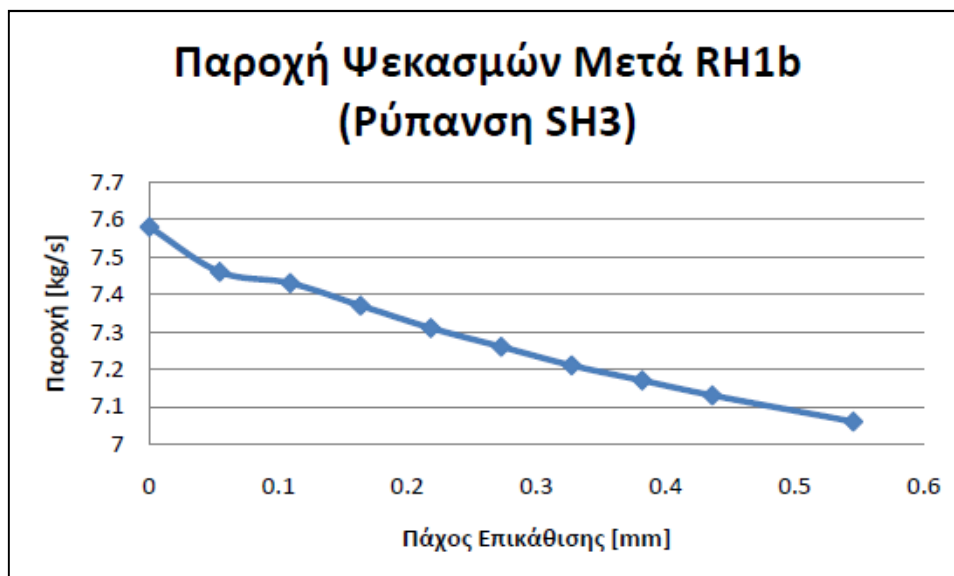
Διάγραμμα 14-49: Ποσοστιαία μεταβολή θερμοκρασιών εξόδου του ατμού και των καυσαερίων σε κάθε εναλλάκτη για ρύπανση στον SH3 για $R_{foul} [0 - 3]$, πάχος επικάθισης [0 - 0.545 mm]



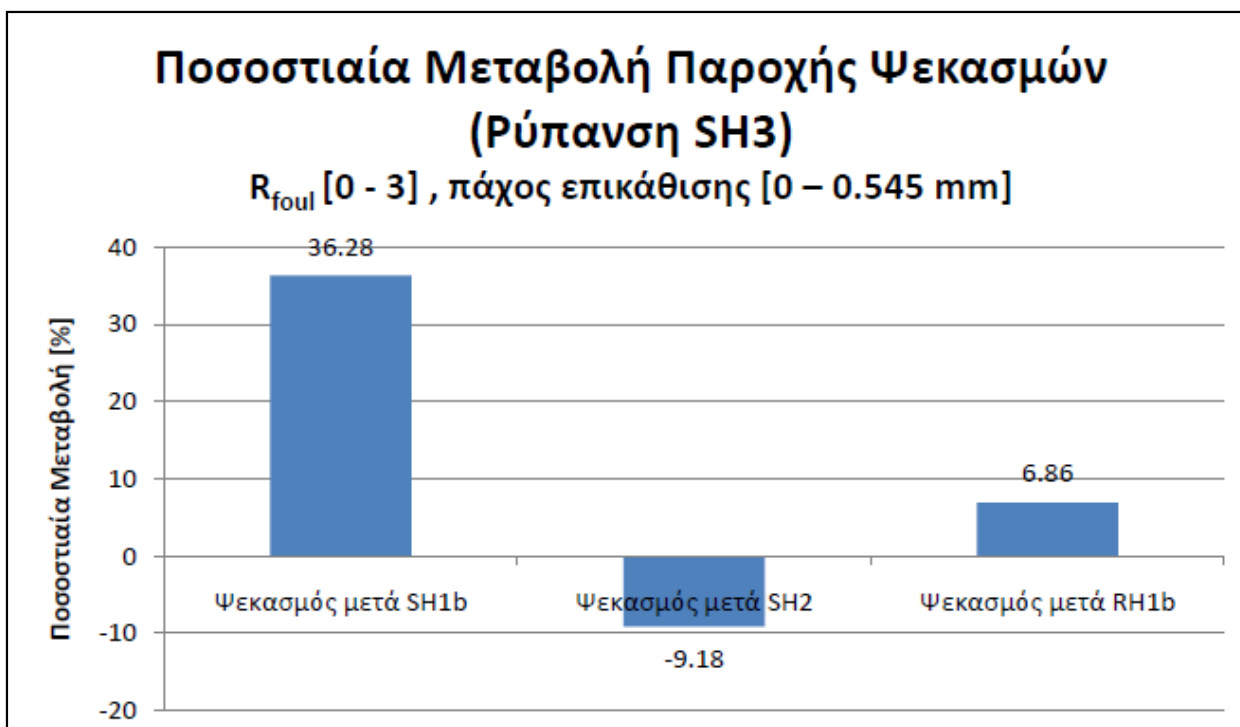
Διάγραμμα 14-50: Επίδραση ρύπανσης του SH3 στην παροχή ψεκασμών μετά SH1b



Διάγραμμα 14-51: Επίδραση ρύπανσης του SH3 στην παροχή ψεκασμών μετά SH2



Διάγραμμα 14-52: Επίδραση ρύπανσης του SH3 στην παροχή ψεκασμών μετά RH1b



Διάγραμμα 14-53: Ποσοστιαία μεταβολή παροχής ψεκασμών για ρύπανση στον SH3 για R_{foul} [0 - 3], πάχος επικάθισης [0 - 0.545 mm]

Η προσομοίωση για αυτό το σενάριο ρύπανσης, κατέδειξε επιδράσεις κυρίως στον κλάδο του υπέρθερμου. Αυτό που πρέπει να επισημανθεί στην περίπτωση αυτή είναι η μεταβολή στις θερμοκρασίες του RH1a, καθώς αυτός παραλαμβάνει το εργαζόμενο μέσο με υποβιβασμένο θερμικό περιεχόμενο,

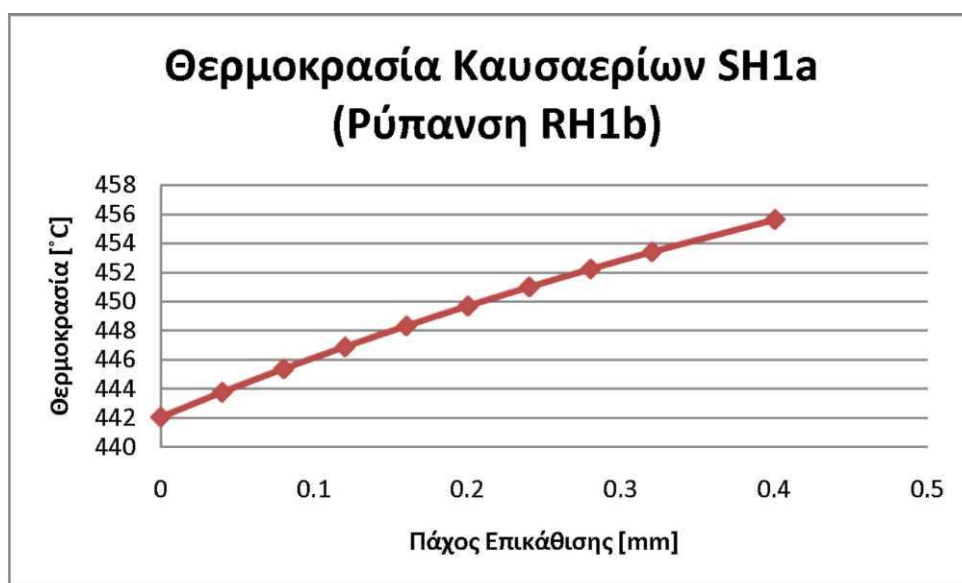
ακριβώς μετά τον ατμοστρόβιλο υψηλής πίεσης. Η επίδραση αυτή τελικά στην έξοδο του RH2 αλλάζει φορά, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας των καυσαερίων που διέρχονται από τον κλάδο του ανάθερμου.

Από τους ψεκασμούς από την άλλη, αν και η επίδραση της ρύπανσης δεν είναι τόσο έντονη, παρατηρείται αρκετά υψηλή μεταβολή στους ψεκασμούς μετά τον SH1b. Γίνεται αντιληπτό πως μεταβολές στις θερμοκρασίες του ατμού από 1 % έως 2%, επιδρούν στους ψεκασμούς έως και 50 %.

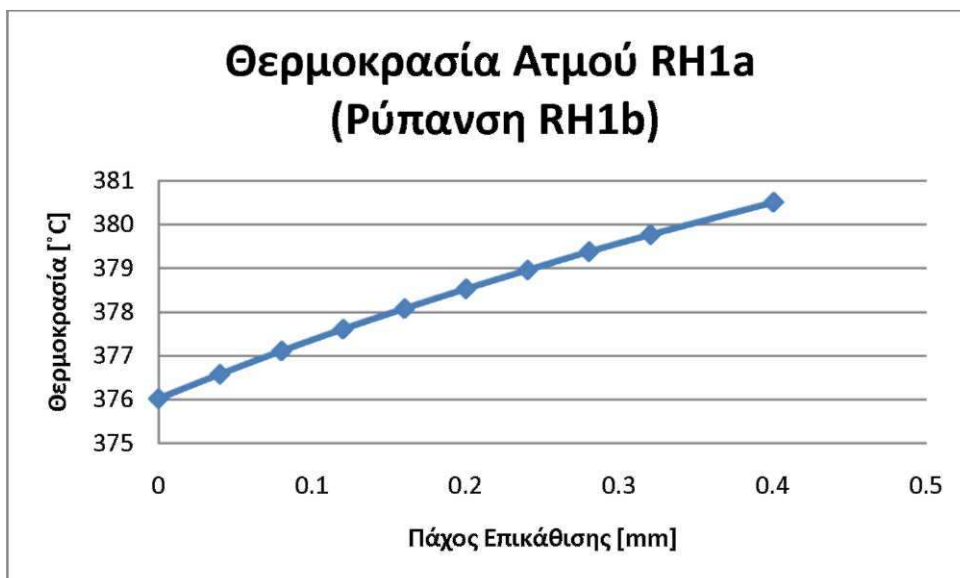
3. Σενάριο ρύπανσης RH1a για R_{foul} [0 - 0.89], πάχος επικάλυψης [0 - 0.1 mm]

Η προσομοίωση αυτού του σεναρίου παρουσίασε αμελητέες μεταβολές στα χαρακτηριστικά του ατμού και των καυσαερίων (μικρότερες του 1%) και κατ' επέκταση στις παροχές των ψεκασμών. Αυτό το γεγονός αναμενόμενο, καθότι ο RH1a βρίσκεται στο ανώτερο σημείο του ατμοπαραγωγού (βλέπε Εικόνα 8).

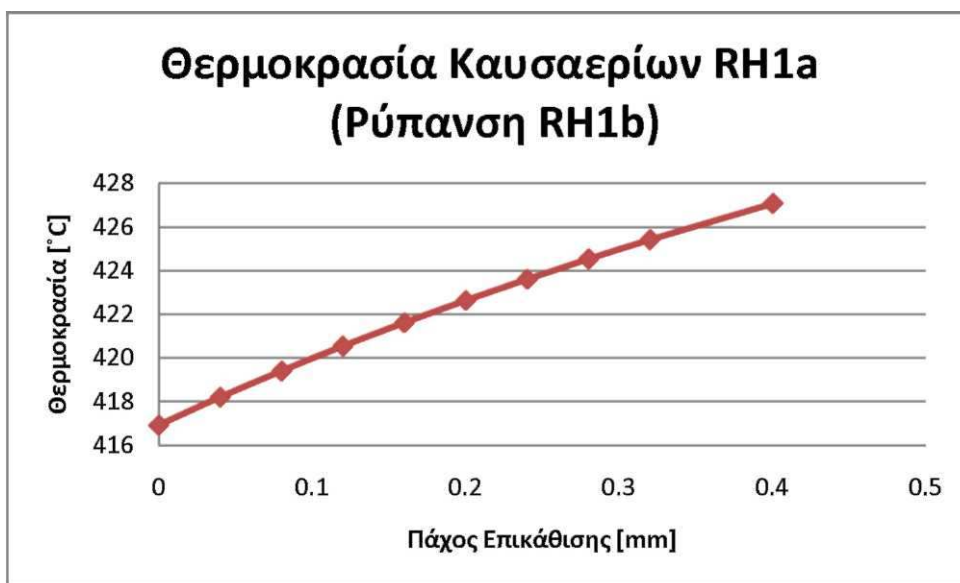
4. Σενάριο ρύπανσης RH1b για R_{foul} [0 - 3], πάχος επικάλυψης [0 - 0.4 mm]



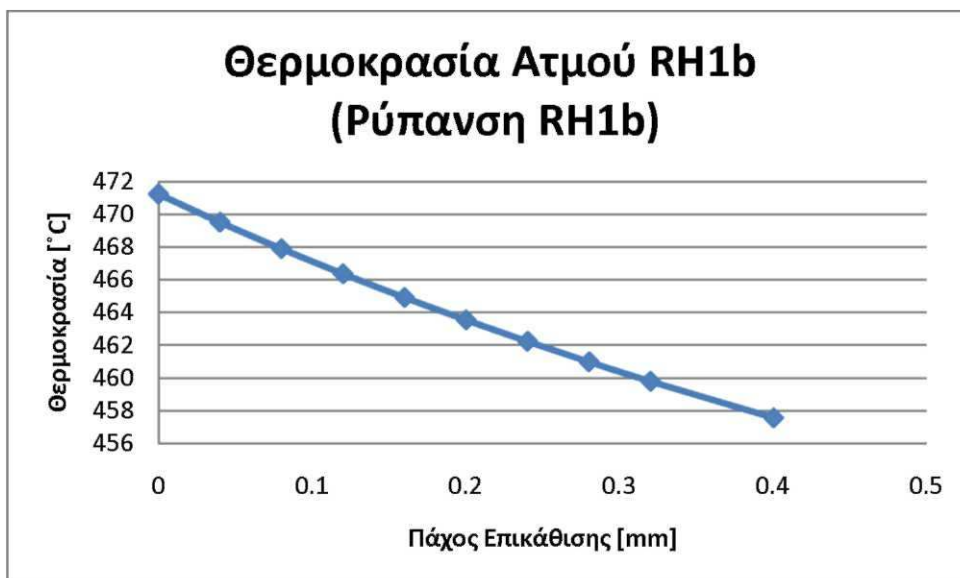
Διάγραμμα 14-54: Επίδραση ρύπανσης του RH1b στον SH1a (Καυσαέρια)



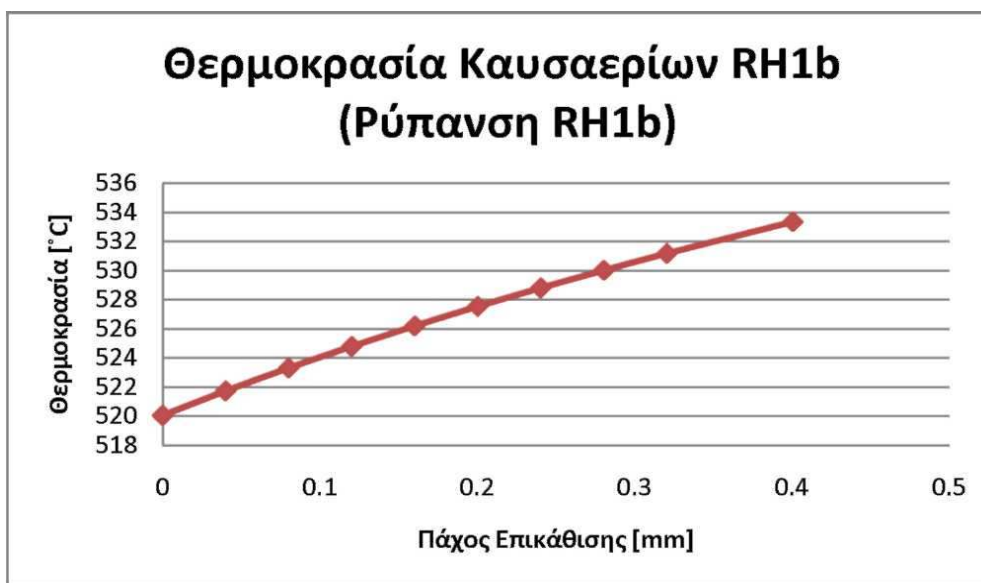
Διάγραμμα 14-55: Επίδραση ρύπανσης του RH1b στον RH1a (Ατμός)



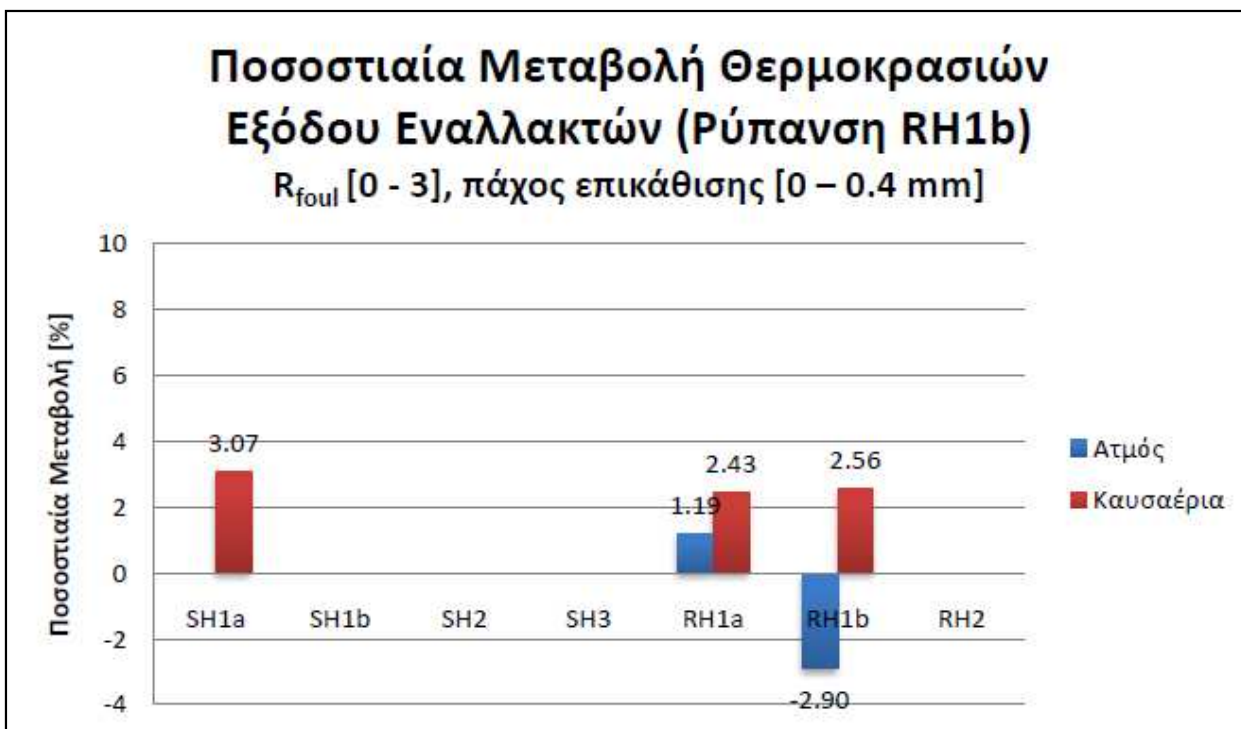
Διάγραμμα 14-56: Επίδραση ρύπανσης του RH1b στον RH1a (Καυσαέρια)



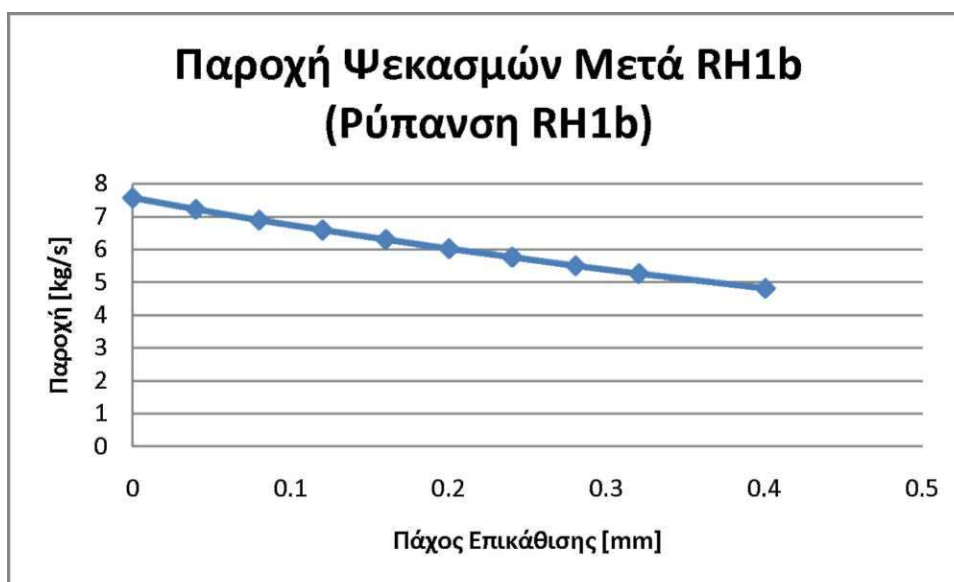
Διάγραμμα 14-57: Επίδραση ρύπανσης του RH1b στον RH1b (Ατμός)



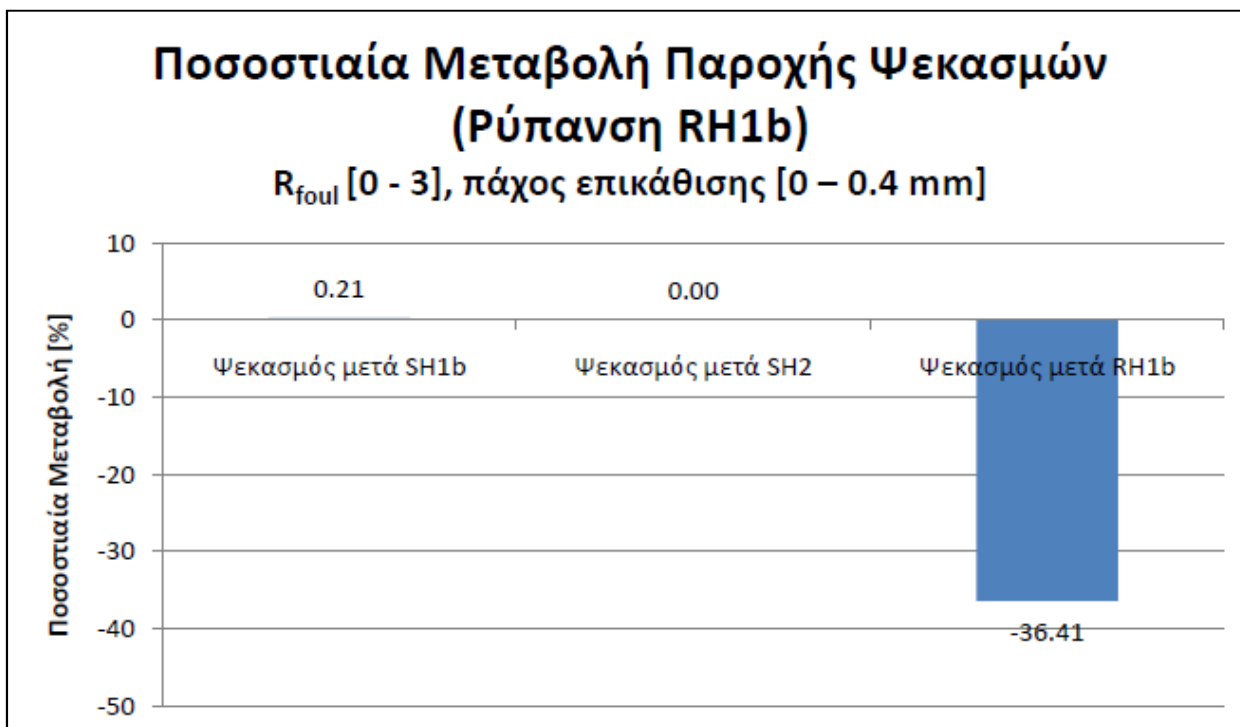
Διάγραμμα 14-58: Επίδραση ρύπανσης του RH1b στον RH1b (Καυσαέρια)



Διάγραμμα 14-59: Ποσοστιαία μεταβολή θερμοκρασιών εξόδου του ατμού και των καυσαερίων σε κάθε εναλλάκτη για ρύπανση στον RH1b για R_{foul} [0 - 3], πάχος ρυπάνσης [0 - 0.4 mm]



Διάγραμμα 14-60: Επίδραση ρύπανσης του RH1b στην παροχή ψεκασμών μετά RH1b

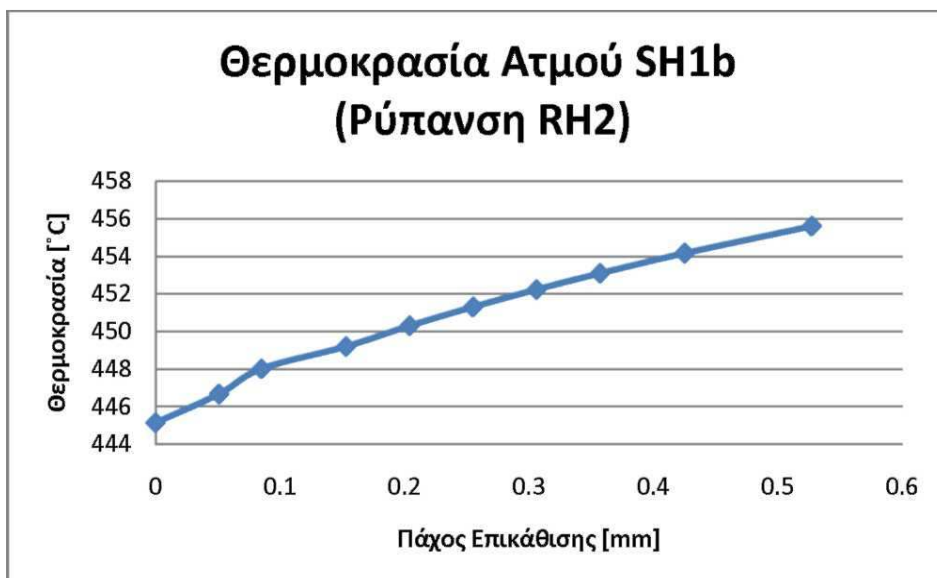


Διάγραμμα 14-61: Ποσοστιαία μεταβολή παροχής ψεκασμών για ρύπανση στον RH1b για R_{foul} [0 - 3], πάχος επικάλυψης [0 - 0.4 mm]

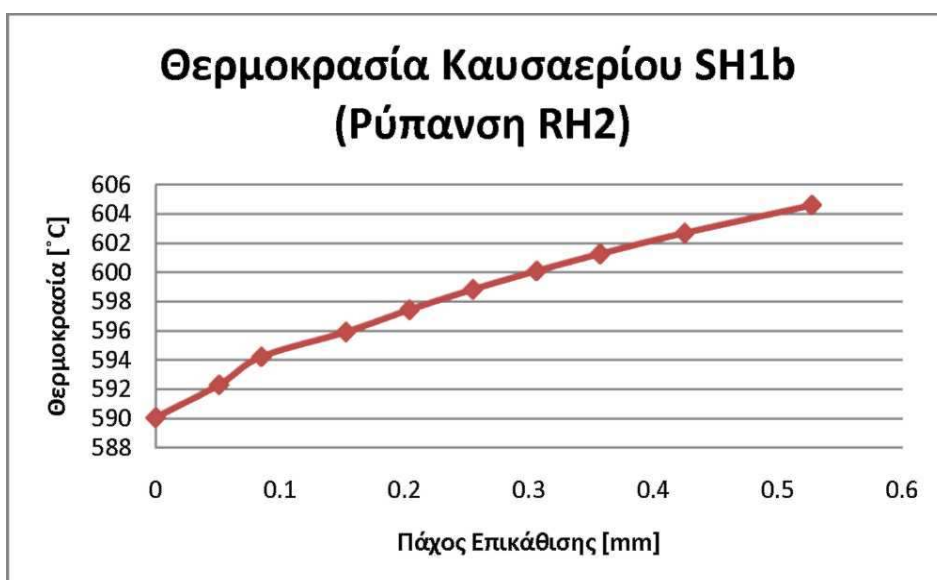
Στην περίπτωση αυτή δεν εμφανίζεται επίδραση στον ατμό στον κλάδο του υπέρθερμου καθώς ο SH1a παραλείπεται. Η επίδραση είναι κυρίως εμφανής στις θερμοκρασίες (εργαζόμενο μέσο και καυσαέρια) του RH1a ο οποίος ακολουθεί μετά τον RH1b. Η μεταβολή η οποία προκαλείται στα χαρακτηριστικά του ατμού στην έξοδο του RH1a, εξαλείφεται από τους ψεκασμούς του SH1b. Έτσι, αφού ο RH2 βρίσκεται εκατέρωθεν του SH1b, δεν δέχεται επίδραση στα δύο ρεύματα τα οποία τον διατρέχουν.

Οι ψεκασμοί, όπως σχολιάστηκε και προηγουμένων, μεταβάλλονται μόνο στον κλάδο του ανάθερμου προκειμένου να ελέγξουν τη μεταβολή στη θερμοκρασία του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο του RH1a.

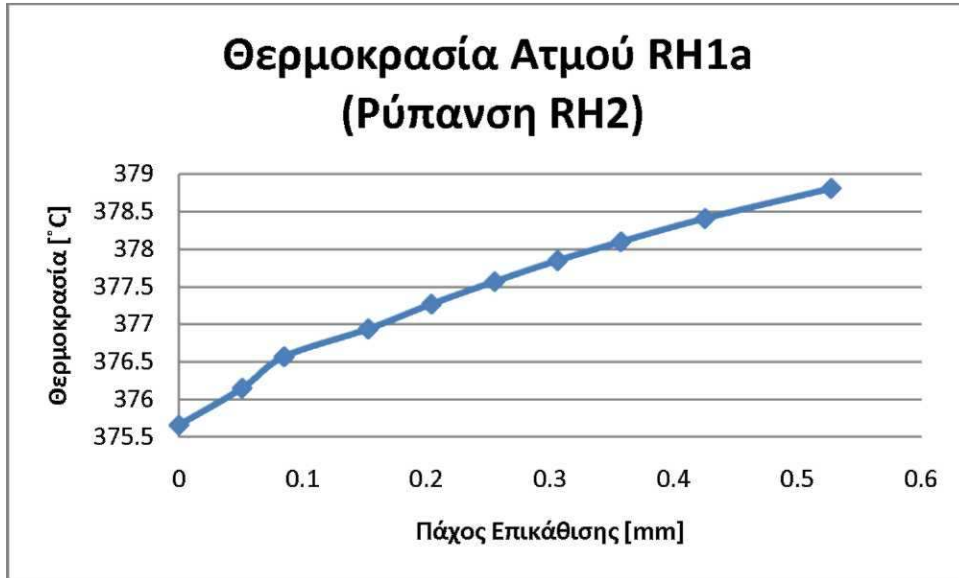
5. Σενάριο ρύπανσης RH2 για R_{foul} [0 - 3], πάχος επικάλυψης [0 - 0.53]



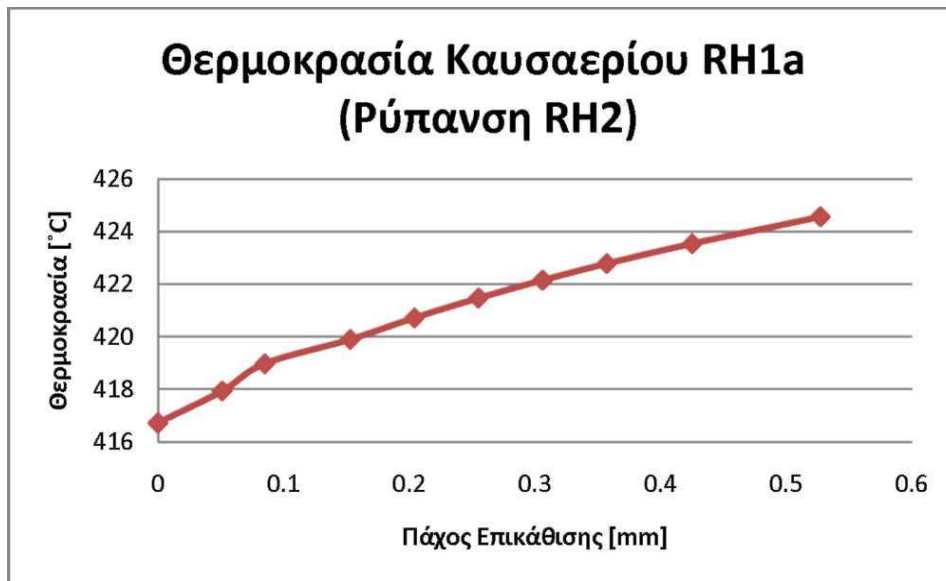
Διάγραμμα 14-62: Επίδραση ρύπανσης του RH2 στον SH1b (Ατμός)



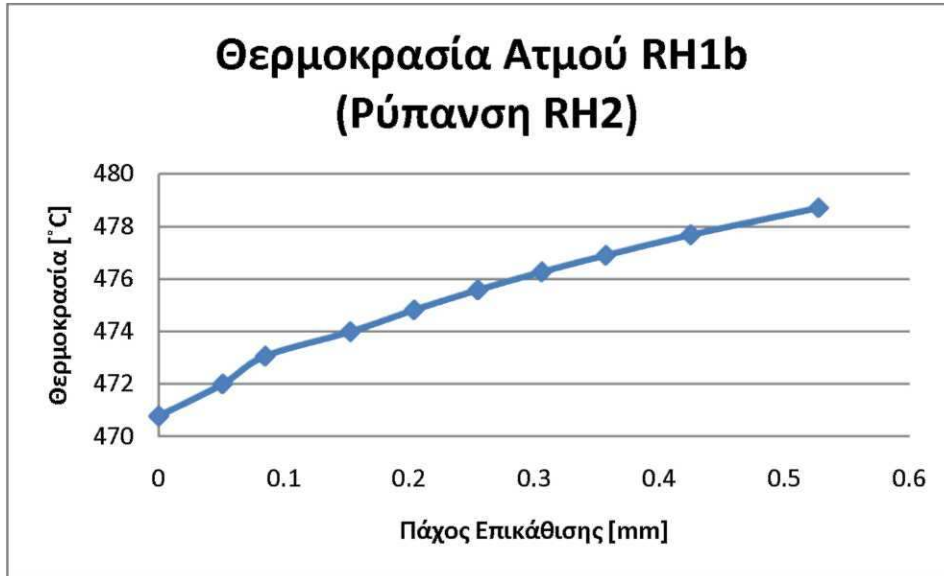
Διάγραμμα 14-63: Επίδραση ρύπανσης του RH2 στον SH1b (Καυσαέρια)



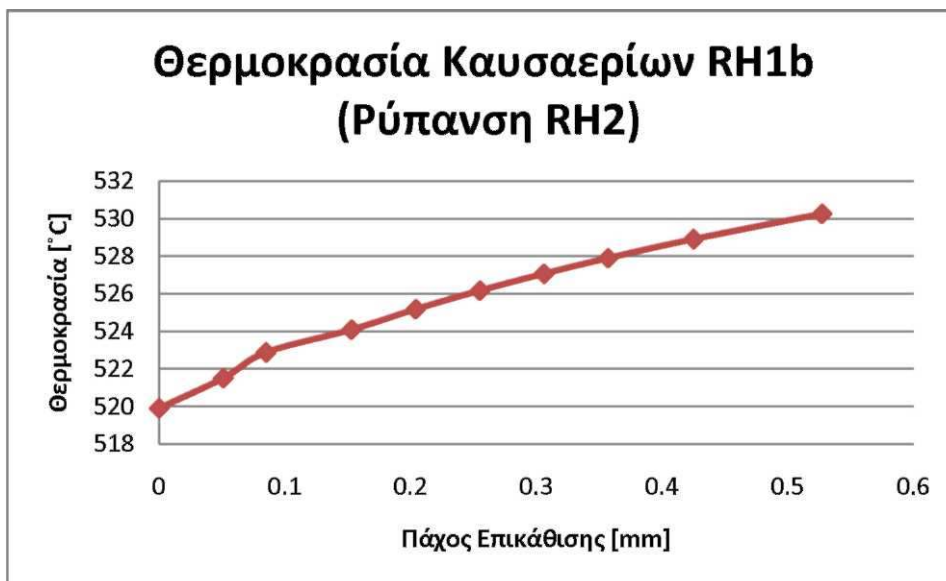
Διάγραμμα 14-64: Επίδραση ρύπανσης του RH2 στον RH1a (Ατμός)



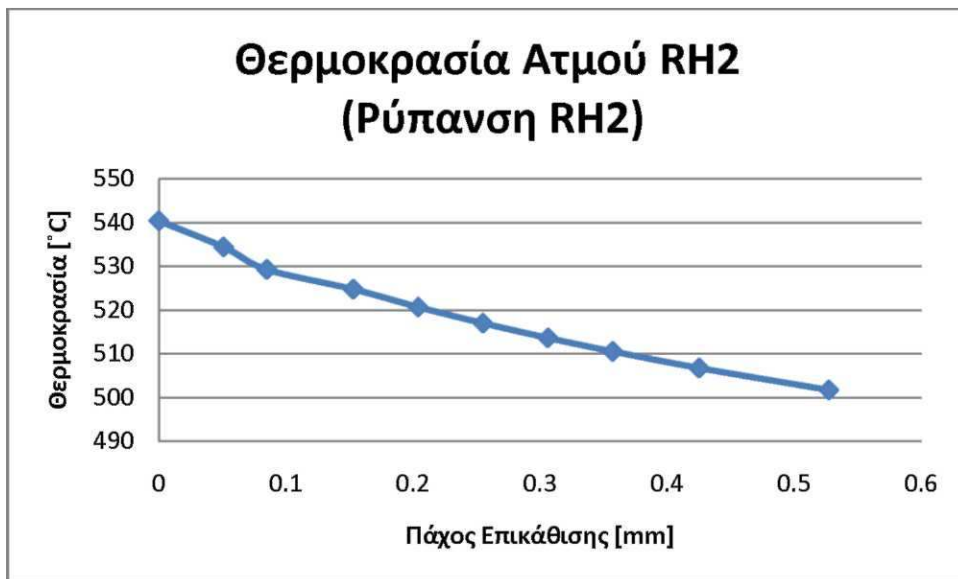
Διάγραμμα 14-65: Επίδραση ρύπανσης του RH2 στον RH1a (Καυσαέρια)



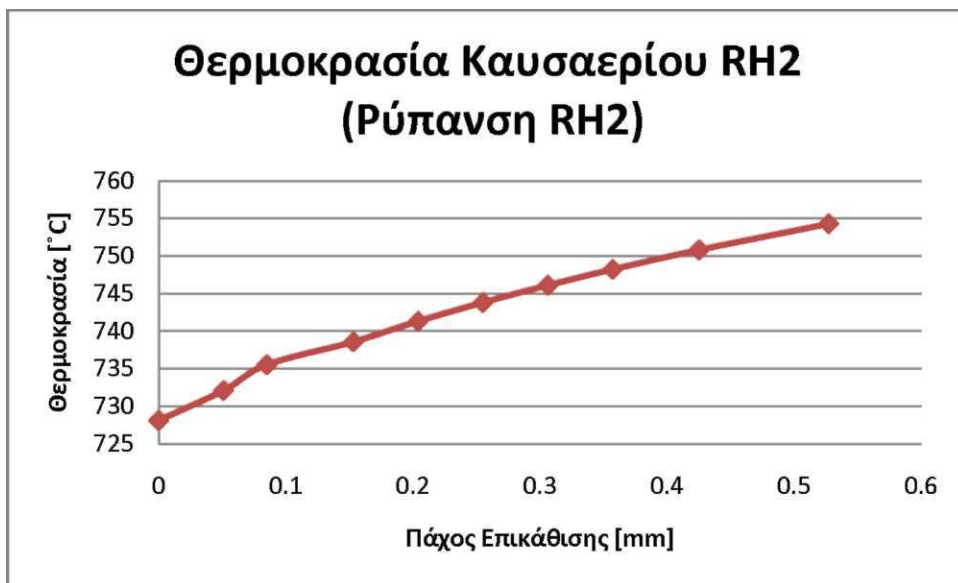
Διάγραμμα 14-66: Επίδραση ρύπανσης του RH2 στον RH1b (Ατμός)



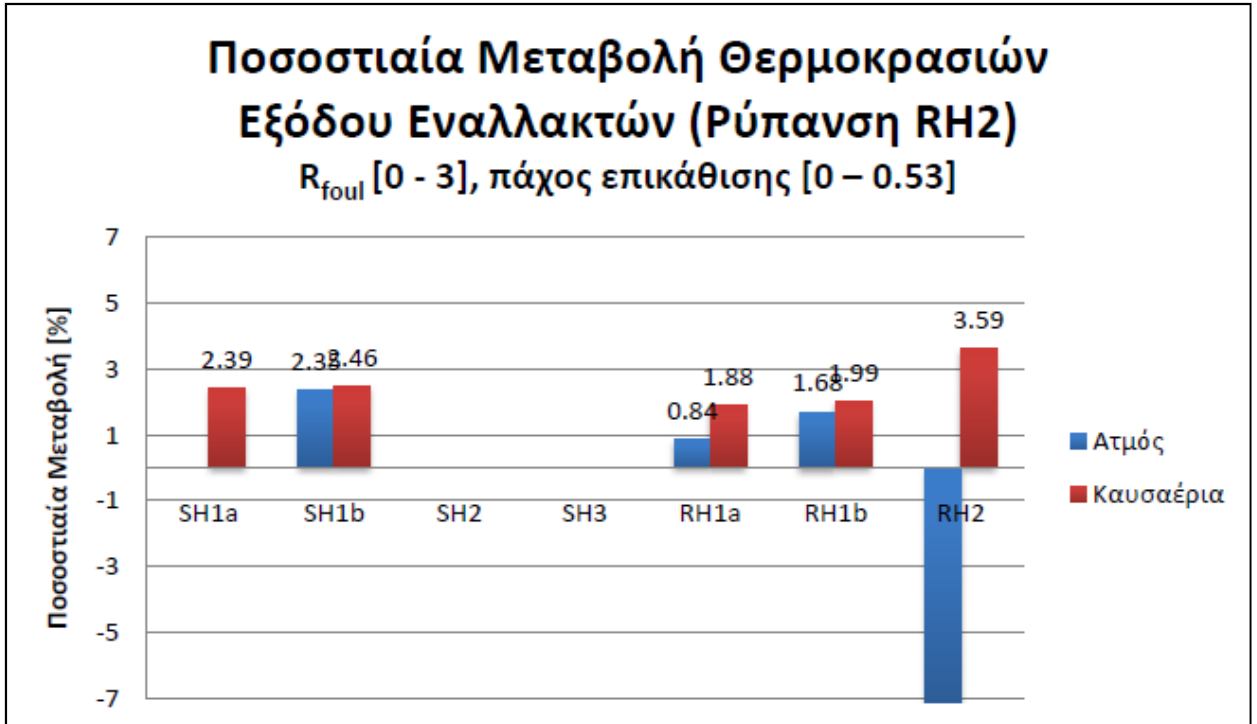
Διάγραμμα 14-67: Επίδραση ρύπανσης του RH2 στον RH1b (Καυσαέρια)



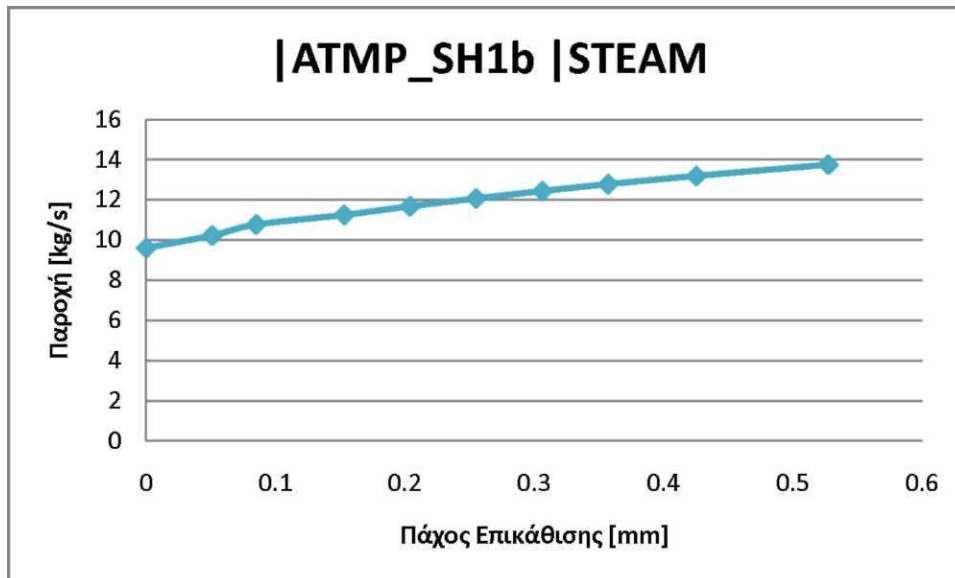
Διάγραμμα 14-68: Επίδραση ρύπανσης του RH2 στον RH2 (Ατμός)



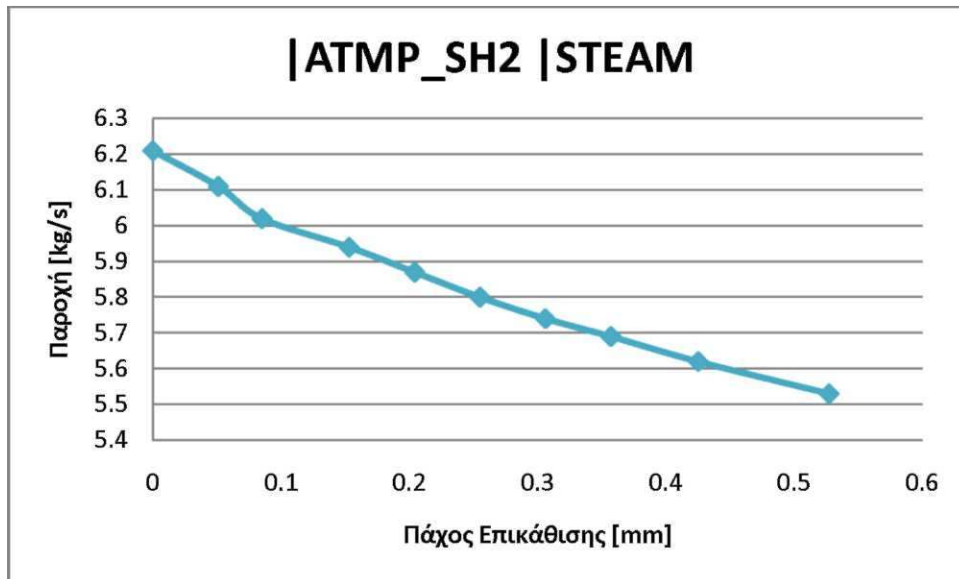
Διάγραμμα 14-69: Επίδραση ρύπανσης του RH2 στον RH2 (Καυσαέρια)



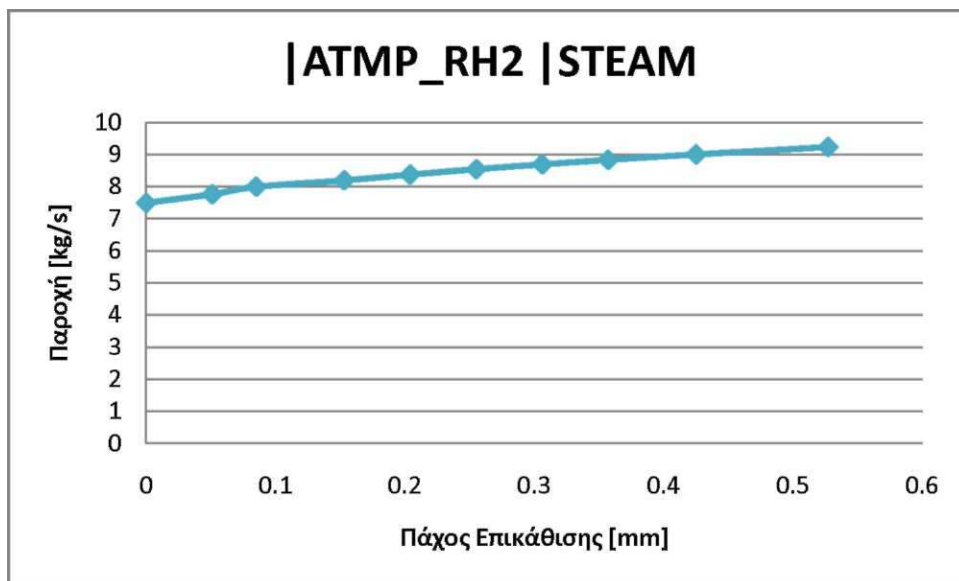
Διάγραμμα 14-70: Ποσοστιαία μεταβολή θερμοκρασιών εξόδου του ατμού και των καυσαερίων σε κάθε εναλλάκτη για ρύπανση στον RH2 για R_{foul} [0 - 3], πάχος επικάθισης [0 - 0.53]



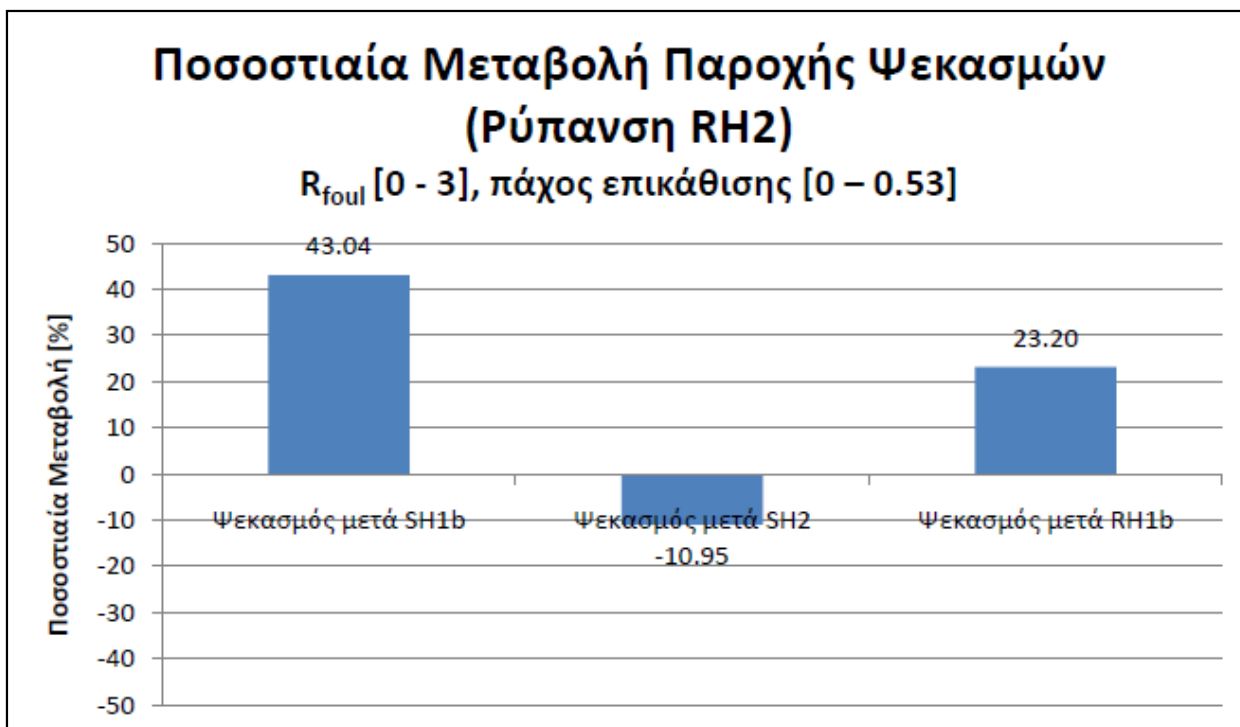
Διάγραμμα 14-71: Επίδραση ρύπανσης του RH2 στην παροχή ψεκασμών μετά SH1b



Διάγραμμα 14-72: Επίδραση ρύπανσης του RH2 στην παροχή ψεκασμών μετά SH2



Διάγραμμα 14-73: Επίδραση ρύπανσης του RH2 στην παροχή ψεκασμών μετά RH2



Διάγραμμα 14-74: Ποσοστιαία μεταβολή παροχής ψεκασμών για ρύπανση στον RH2 για $R_{foul} [0 - 3]$, πάχος επικάλυψης [0 - 0.53]

Η επίδραση της ρύπανσης του RH2 αποτυπώνεται κυρίως στις θερμοκρασίες του ατμού του SH1b RH1a και RH1b όπου έχουμε άνοδο, διότι ακολουθούν κατά μήκος των καυσαερίων. Η επίδραση όμως αυτή αποσβένεται μετά τους δύο αυτούς υπέρθερμους καθότι ακολουθεί ψεκασμός. Οι SH2 και SH3 δεν επηρεάζονται, αφενός διότι τα χαρακτηριστικά του ατμού ελέγχονται πριν από αυτούς με ψεκασμό και αφετέρου διότι τα χαρακτηριστικά των καυσαερίων δεν επηρεάζονται καθότι εντοπίζονται εκατέρωθεν του RH2.

Οι ψεκασμοί όπως φαίνεται, αυξάνονται μετά τον SH1b και τον RH1b προκειμένου να ελαττώσουν την αύξηση της θερμοκρασίας του ατμού.

15. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Deposit Formation on Furnace Thermal Efficiency Related to Development of Corresponding Expert System, PhD thesis, Faculty of Mechanical Engineering of B. Luka University, 1997
2. ABB Combustion "Fossil Power" [Book]. - Windsor, Connecticut : Combustion Engineering, Inc., 1991. - ISBN 0-9605974-0-9.
3. Anderson D. W., R. Viskanta και Incropera F. P. Effective thermal conductivity of coal ash deposit at moderate to high temperatures [Report]. - [s.l.] : J. Eng. Gas Turbines Power, 1987. - 109: 215-221.
4. Barrett Elliott P. The Fusion, Flow, and Clinkering of Coal Ash: A Survey of the Chemical Background [Book]. - New York : John MTiley and Sons and London: Chapman and Hall. Ltd., 1945. - σσ. 496 - 571.
5. Baxter L. L. Ash deposition formation and deposit properties, , . [Εργασία]. - [s.l.] : Sandia National Laboratories, 2000.
6. Bayers Richard W. Fireside Slagging, Fouling and High-Temperature Corrosion [Report] // Progress in Energy and Combustion Science. - Livingstone, USA : Pergamon Press, 1996. - Σόμ. 22. - ςς. 29 - 120.
7. Beckering W. Examination of Coal and Coal Ash by X-Ray Techniques [Report]. - Washington : U.S. Bureau of Mines, 1970. - Technology and Use of Lignite, Proceedings.
8. Bhattacharya S. P. A theoretical investigation of the optical constants and particle size on the radiative properties and heat transfer involving clouds and deposits [Report]. - [s.l.] : Chemical Engineering and Processing, 2000. - 39: 471-483.
9. Bhattacharya S. P. Apparent emittance of non-isothermal particulate deposits [Report]. - [s.l.] : Int. Comm. Heat Mass Transfer, 1999. - 26: 771-780.
10. Bhattacharya S. P. και Wall T. F. Development of Emittance of Coal Particles During Devolatilisation and Burnof [Report]. - [s.l.] : Fuel, 1999. - 78: 511-519.

11. Bhattacharya S. P., Wall T. F. και Arduini-Schuster M. A study on the importance of dependent effects in determining the spectral and total emittance of particulate ash deposits in pulverized fuel fired furnaces [Report]. - [s.l.] : Chemical Engineering and Processing, 1997. - 36: 423-432.
12. Bhattacharya S. P., Wall T. F. και Gupta R. P. An analysis of the angular scatter measurement to determine the optical constants of coal and ashy materials [Report]. - [s.l.] : Int. Comm. Heat Mass Transfer, 1996. - 23:809-821.
13. Borio R. W. Control of High-Temperature Metal Wastage in Pulverized Coal-Fired Steam Generators [Report]. - [s.l.] : Combustion Engineering publication.
14. Borio R. W. και Hensel R. P. Coal-Ash Composition as Related to High-Temperature Fireside Corrosion and Sulfur Oxides Emission Control [Report]. - New York : Transactions of the ASME Journal of Engineering for Power, 1972. - 94.
15. Brailsford A. D. και Major K. G. The thermal conductivity of aggregates of several phases, including porous materials [Report]. - [s.l.] : Brit. J. Appl Phys., 1964. - 15: 313-319.
16. British Electricity International Modern Power Station Practice "Boilers and Ancillary Plant" [Book]. - London : Pergamon Press, 1991. - Τόμ. Β. - ISBN 0-08-040512-6.
17. British Electricity International Modern Power Station Practice "Station Planning and Design" [Book]. - London : Pergamon Press, 1991. - Τόμ. Α. - ISBN 0-08-040511-8,.
18. Bryers , R. W. The Physical and Chemical Characteristics of Pyrites and Their Influence on Fireside Problems in Steam Generators [Report]. - New York : ASME Paper No 75, American Society of Mechanical Engineers, 1975.
19. Corey R. W., Measurement and significance of the flow properties of coal ash slag [Εργασία]+. - [s.l.] : Bureau of Mines: Bulletin 618, 1964.
20. Elmgaard Brian Simulation of Boiler Dynamics [Book]. - Vedbæk : Technical University of Denmark, Department of Energy Engineering, 1990.
21. Estep Thomas G., Seltz Harry και Osbor William J. Determination of the Effect of Oxides of Sodium, Calcium and Magnesium on the Ash Fusion Temperatures

- [Εργασ. ία]. - [s.l.] : Carnegie Institute of Technology, Mining and Metallurgical Advisory Boards, Bulletin 74,, 1937.
22. Goetz G. J., Nsakala N. Y. και Bono R. W. Development of method for determining emissivities and absorptivities of coal ash deposits [Report]. - [s.l.] : Journal of Engineering for Power, 1979. - 101: 607-614.
 23. Gupta R. P., Wall T. F. και Baxter L. Impact of Mineral Impurities in Solid Fuel Combustion [Book]. - New York : Kluwer Academic Publishers, 2002. - ISBN 0-306-46126-9.
 24. Hadley G. R. Thermal conductivity of packed metal powder [Report]. - [s.l.] : Int. J. Heat Mass Transfer, 1986. - 29: 909-920..
 25. Hadvig S. Thermal Radiation for Engineers [Book]. - [s.l.] : Polyteknisk Forlag, 1986.
 26. Inter Kontakt - Energo Thermal Processes Investigation and Corrective Measures at Boiler No 4 TPP Kardia [Εργασία]. - Belgrade : Power Public Corporation, 2004.
 27. Juniper L Applicability of ash slagging Indices Revisited [Report] // Combustion News. - [s.l.] : Australian Combustion Technology Centre, 1995. - σσ. 1-4.
 28. Kakac S., Shah R. K. και Aung W. Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer [Book]. - Poulso, USA : John Wiley & Sons, 1987. - ISBN 0471817023 .
 29. Kern. D. Q. Process Heat Transfer [Book]. - [s.l.] : McGraw – Hill International Editions, 1965. - ISBN 9780070341906 .
 30. Laubitz M. J. Thermal conductivity of powders [Report]. - [s.l.] : Can. J. Phys., 1959. - Τόμ. 37: 798-808.
 31. Leach A. G. The thermal conductivity of foams. I: models for heat conduction [Report]. - [s.l.] : J. Phys D: Appl. Phys., 1993. - 26: 733-739.
 32. O'Gorman James V. και Walker Philip L. Mineral Matter Characteristics of Some American Coals [Report]. - [s.l.] : Fuel, 1971. - 50.
 33. O'Gorman James V. και Walker Philip L. Thermal Behavior of Mineral Fractions Separated from Selected American Coals [Report]. - [s.l.] : Fuel, 1973. - 52.

34. Ouchiyama N. και Tanaka T. Porosity of a mass of solid particles having a range of sizes [Report]. - [s.l.] : Ind. Eng. Chem. Fundam, 1981. - 20, 66-71.
35. Partington J. R. Textbook of Inorganic Chemistry 6th Edition [Book]. - London : MacMillan Co., 1950.
36. Payner J. E. και Marskell W. G. The Distribution of Mineral Matter in Pulverized Fuel and Solid Products of Combustion [Συνέδριο]. - London : Proceedings of the International Conference held at the Marchwood Engineering Laboratories Marchwood, 1963.
37. Reid T. W. External Corrosion and Deposits-Boilers and Gas Turbines, [Book]. - New York : Elsevier, 1971.
38. Serth R. W. Process Heat Transfer [Book]. - Oxford : Elsevier Science & Technology Books, 2007. - ISBN 9780123735881 .
39. Thiessin G., Ball G. C. και Grotts E. P. Coal Ash and Coal Mineral Matter [Report] // Industrial and Engineering Chemistry, 28. - 1936. - σσ. 335 - 361.
40. Wall T. F. [και συν.] The properties and thermal effects of ash deposits in coal-fired furnaces [Report]. - [s.l.] : Prog. Energy Combust. Sci., 1993. - 19: 487-504..
41. Δ.Ε.Η. Α.Η.Σ. ΚΑΡΔΙΑΣ. ΛΕΒΗΤΕΣ Α.Η.Σ. ΚΑΡΔΙΑΣ. [Διδακτικές σημειώσεις]. Κοζάνη, Κοζάνη, Ελλάδα : ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ Δ.Ε.Η. Α.Η.Σ. ΚΑΡΔΙΑΣ, 1987.

ΜΕΡΟΣ ΠΕΜΠΤΟ
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

16. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι πειραματικές διαδικασίες, οι εφαρμοσμένες μέθοδοι καθώς και οι αναλύσεις και οι εκτιμήσεις είχαν σαν αποτέλεσμα την εκπόνηση έγκυρων αποτελεσμάτων, το σαφή προσδιορισμό των λειτουργικών ανωμαλιών και τη δημιουργία συμπερασμάτων και προτάσεων σχετικά με το υπό μελέτη φαινόμενο του σχηματισμού επικαθίσεων.

Τα περισσότερα συμπεράσματα αναφέρθηκαν κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των ελέγχων. Τα κυριότερα ευρήματα τα οποία επηρεάζουν άμεσα το υπό μελέτη φαινόμενο τονίζονται λεπτομερώς και συσχετίζονται εντός των παρακάτω συμπερασμάτων.

16.1. Συμπεράσματα σχετικά με το υπό μελέτη φαινόμενο

Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το υπό μελέτη φαινόμενο του σχηματισμού των επικαθίσεων συνοψίζονται είναι οι εξής:

- Χαρακτηριστικά λιγνίτη
- Σχεδιασμός συστήματος καύσης
- Οργάνωση καύσης

Τα κύρια χαρακτηριστικά του λιγνίτη της Πτολεμαΐδας που επηρεάζουν το φαινόμενο είναι τα εξής:

- Υψηλός βαθμός ευθριπτότητας για το υπάρχων σύστημα μύλων
- Χαμηλό με μεσαίο δυναμικό επιμόλυνσης
- Από τα μέσα του 2000 παρατηρείται συνεχής αύξηση του ποσοστού σιδήρου και ασβεστίου στην τέφρα
- Μετά τις αρχές του 2003 καταγράφονται χαμηλές τιμές θερμοκρασίας μαλάκυνσης τέφρας μεταξύ 1,259 °C και 1,313 °C
- Οι επικαθίσεις οι οποίες βρέθηκαν χαρακτηρίζονται από υψηλή σκληρότητα καθιστώντας δύσκολο το μηχανικό καθαρισμό του λέβητα κατά την ετήσια συντήρηση γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει τη σύνθετη φύση και τον σύνθετο μηχανισμό σχηματισμού τους.

Το γεγονός ότι παρουσιάζονται έντονα φαινόμενα ρύπανσης κατά την καύση λιγνίτη χαμηλού και μεσαίου δυναμικού επιμόλυνσης καταδεικνύει:

1. Ακατάλληλο σχεδιασμό λέβητα για καύση των υπαρχόντων στερεών καυσίμων
2. και / ή μη ορθή οργάνωση του συστήματος καύσης

Τελικώς το πρόβλημα σχηματισμού επικαθίσεων και της πτώσης λεβητολίθων είναι απόρροια του συνδυασμού των επιδράσεων των παρακάτω:

- Τα πολύ μικρόκκοκα και ξηρά σωματίδια κονιορτοποιημένου λιγνίτη, καθώς εισάγονται στο θάλαμο καύσης και καίγονται, δημιουργούν καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας στην περιοχή των υδροτοιχωμάτων
- Τα στερεά προϊόντα της καύσης του λιγνίτη σχηματίζουν πολύ μικρά σωματίδια τέφρας. Τα τηγμένα ή στερεά σωματίδια τέφρας προσκρούουν στις θερμές επιφάνειες των επικαθίσεων των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας. Τα σωματίδια αυτά στην περιοχή των αυλών ανόδου κυρίως στην περιοχή των καυστήρων είναι τηγμένα ενώ στην περιοχή κοντά στην έξοδο του θαλάμου καύσης και στους υπέρθερμους και στους ανάθερμους είναι ημιτετηγμένα. Η κατάσταση που χαρακτηρίζει τον υπό μελέτη λέβητα αποτελεί κλασσική περίπτωση υπερβολικής κονιορτοποίησης λιγνίτη.
- Γενικά, η εφαιπτομενικής μορφής καύση δεν ενδείκνυται για τον λιγνίτη της Πτολεμαΐδας χωρίς τη χρήση αντίμετρων. Συγκεκριμένα, ο στροβιλισμός των αερίων του θαλάμου καύσης και η ροή των σωματιδίων δημιουργεί φυγόκεντρες δυνάμεις η οποίες ευθύνονται για την πρόσκρουση των στερεών προϊόντων της καύσης στα υδροτοιχώματα. Μόνο με κατάλληλη οργάνωση της καύσης επιτυγχάνεται η δημιουργία οριακού στρώματος αερίων στα υδροτοιχώματα με επαρκές πάχος ώστε τα σωματίδια της τέφρας να ψύχονται κάτω από τη θερμοκρασία μαλάκυνσης πριν έρθουν σε επαφή με τα υδροτοιχώματα.
- Η εσφαλμένη κατανομή κονιορτοποιημένου λιγνίτη μεταξύ άνω και κάτω κύριων καυστήρων με το μεγαλύτερο ποσοστό να εισάγεται στο θάλαμο καύσης από τον άνω κύριο καυστήρα, όπως αυτή παρατηρήθηκε σε έξι από τους οκτώ μύλους, έρχεται σε ασυμφωνία με τους κανόνες καύσης κονιορτοποιημένου λιγνίτη. Το γεγονός ότι η μεγαλύτερη ποσότητα λιγνίτη διέρχεται από τους άνω κύριους καυστήρες έχει σαν συνέπεια να

μεταβάλλεται η θέση της εστίας καύσης προς την έξοδο του θαλάμου καύσης καθιστώντας μη επαρκώς αξιοποιημένο το κάτω μέρος των υδροτοιχωμάτων.

- Για τα δύο ισοζύγια ροής θερμού αέρα που διενεργήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι η ροή θερμού αέρα στο στόμιο των καυστήρων ήταν κάτω του στοιχειομετρικού. Ωστόσο οι συνθήκες καύσης σχετικά με την ανάμειξη των σωματιδίων του κονιορτοποιημένου λιγνίτη με το θερμό αέρα καύσης χαρακτηρίστηκε ως ικανοποιητική. Συγκεκριμένα από τις διαθέσιμες ροές αέρα σε διάφορα επίπεδα του καυστήρα καθορίζεται η κινητική της έναυσης και της καύσης. Τα υπόλοιπα σωματίδια λιγνίτη τα οποία δεν αναμειγνύονται με τον αέρα στην περιοχή του θαλάμου καύσης υποβάλλονται σε έναυση και καύση στο ύψος του θαλάμου καύσης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από το υψηλό ποσοστό ακαύστων στην τέφρα η οποία προήρθε από δειγματοληψία στην έξοδο του θαλάμου καύσης.
- Η αξιοσημείωτη αύξηση της συχνότητας προσκρούσεων υψηλής έντασης λεβητολίθων (έως και 30 της ώρα με ένταση πάνω 100 dB) καθώς η κατάσταση του λέβητα περνούσε από την «καθαρή» κατάσταση στη «ρυπασμένη», οι λεβητόλιθοι προέρχονταν από το θάλαμο καύσης, τους καυστήρες, τους υπέρθερμους και τους ανάθερμους. Για την υπόλοιπη περίοδο, μετά την ολοκλήρωση των εκκαπνισμών, όπου η συχνότητα και η ένταση των προσκρούσεων ελαχιστοποιήθηκαν, οι λεβητόλιθοι προερχόντουσαν από τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης και τους καυστήρες.

Το γεγονός ότι οι ψεκασμοί βρισκόντουσαν σε μόνιμη κατάσταση πάνω από 200 t/h, πέρα από την αρνητική επίδραση στο βαθμό απόδοσης, αντικατοπτριζόταν και στα εξής:

- Ελαττωμένη παροχή νερού τροφοδοσίας
- Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των καυσαερίων στην περιοχή του οικονομητήρα, η μερική εξάτμιση στους αυλούς εξόδου του ήταν πάνω από το όριο αυξάνοντας τον κίνδυνο υπερθέρμανσής τους.
- Η εξάτμιση μεγάλων ποσοτήτων νερού ψεκασμού στο εσωτερικό των υπέρθερμων και των ανάθερμων μπορεί να προκαλέσει αυξημένη συγκέντρωση αλκαλικών αλάτων τα οποία προέρχονται από το νερό ψεκασμού ελαττώνοντας έτσι την απόδοση τους.

17. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Προκειμένου να ελεγχθούν τα φαινόμενα ρύπανσης, απαιτείται η βελτίωση των θερμικών συνθηκών του θαλάμου καύσης.

- Εξάλειψη καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας από τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης και εξασφάλιση οριακού στρώματος ροής.
- Ελάττωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων στην έξοδο του λέβητα
- Μεταβολή της θέσης της εστίας προς τον πυθμένα του θαλάμου καύσης
- Βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας των αυλών ανόδου

Πρακτικά, όλες οι προτεινόμενες ενέργειες βελτίωσης μπορούν να καταταχθούν σε τρεις ομάδες:

- Τροποποίηση κατάστασης λειτουργίας
- Ενέργειες συντήρησης κατά τη διάρκεια κράτησης της μονάδας
- Διαμόρφωση οργάνωσης και λειτουργίας του συστήματος καύσης σύμφωνα με όσα έχουν παρατηρηθεί και επισημανθεί κατά τη διενέργεια των θερμικών ελέγχων

Ομάδα Α

Λόγω του ότι ο προγραμματισμός λειτουργίας του σταθμού δεν προβλέπει κράτηση της υπό μελέτης μονάδας για συντήρηση, οι κύριες γραμμές δράσης οι οποίες προτείνονται για το διάστημα που ακολουθεί είναι οι εξής:

- Ελάττωση του κενού του θαλάμου καύσης στην ελάχιστη δυνατή τιμή
- Διατήρηση της θέσης των damper διαχωρισμού των μύλων στο 100 % ανοικτά
- Ελάττωση του πρωτεύοντος αέρα στις κεφαλές των αγωγών ανακυκλοφορίας στο ελάχιστο
- Συχνή χρήση των εκκαπνισμών στην περιοχή του Ανάθερμου 2
- Μεγιστοποίηση της ροής θερμού αέρα
- Αποκατάσταση μετρητικών οργάνων καταγραφής επιπέδων οξυγόνου

Ομάδα Β

Οι ενέργειες συντήρησης κατά τη διάρκεια της ετήσιας συντήρησης θα πρέπει να περιλαμβάνουν τα εξής:

- Εκτενή καθαρισμό των επιφανειών συναλλαγής θερμότητας
- Επιθεώρηση στεγανότητας του λέβητα και αποκατάσταση των σημείων από όπου εισάγεται παρασιτικός αέρας στο εσωτερικό του.
- Επιθεώρηση και αποκατάσταση του συστήματος μεταξύ των διαχωριστών των μύλων και το θάλαμο καύσης

Ομάδα Γ

Οι ενέργειες ρύθμισης της λειτουργίας του συστήματος καύσης θα πρέπει να περιλαμβάνουν τα εξής:

- Προσδιορισμός λεπτομερειών σχεδιασμού που διαφοροποιούν τη λειτουργία του συστήματος του μύλου M42 από τους υπόλοιπους και κυρίως από τους μύλους M47 και M48.
- Προσδιορισμός των απαραίτητων ρυθμίσεων του συστήματος μύλων προκειμένου να αυξηθεί το μέγεθος των σωματιδίων του κονιορτοποιημένου λιγνίτη
- Προσδιορισμός λεπτομερειών σχεδιασμού οι οποίοι επηρεάζουν την κατανομή λιγνίτη μεταξύ άνω και κάτω κύριων καυστήρων. Η ανακατασκευή θα πρέπει να γίνει με βάση τα εξής:
 - Λεπτομερής ανασκόπηση τεχνικών οδηγιών σχετικά με το σύστημα καύσης
 - Λεπτομερής οπτική επιθεώρηση και καταγραφή τυχών αποκλίσεων του συστήματος από το σχεδιασμό
 - Βελτιστοποίηση κατανομής λιγνίτη μεταξύ των καυστήρων
 - Μετά από τη ρύθμιση της κατανομής λιγνίτη θα πρέπει να επαναπροσδιοριστεί η παροχή δευτερευόντως αέρα σύμφωνα με τις νέες συνθήκες λειτουργίας

Λόγω του εμφανούς πλεονεκτήματος που παρουσιάζουν οι μονάδες I και II σχετικά με το σύστημα καύσης, προτείνεται η διενέργεια συγκριτικής αξιολόγησης με τα συστήματα αυτά με στόχο να εντοπιστούν τυχόν βελτιωτικές ενέργειες οι οποίες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και στην υπό μελέτη μονάδα.

- Η μόνη εναλλακτική λύση σε όσα προτάθηκαν παραπάνω είναι η πλήρης ανακατασκευή του συστήματος καύσης (π.χ. διατήρηση μόνος ενός κύριου καυστήρα αντί για τους άνω και κάτω κύριους καυστήρες που έχει τώρα η μονάδα).

18. ΔΡΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

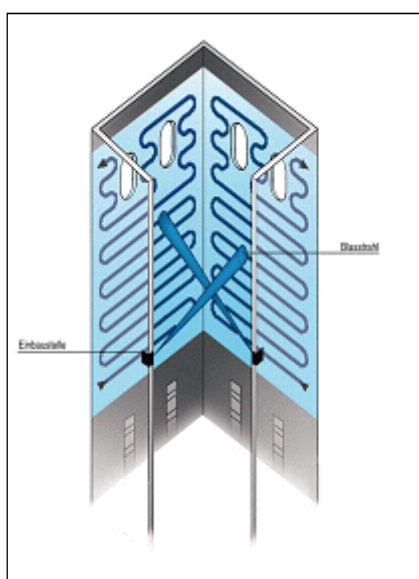
Μετά τη μελέτη και τη παρατήρηση του φαινομένου των επικαθίσεων, αποφασίστηκαν και υλοποιήθηκαν εν ευθέτω χρόνο οι παρακάτω δράσεις με θετικά αποτελέσματα όσο αφορά την εξέλιξη του φαινομένου.

Αντικατάσταση εναλλάκτη Υπερθέρμου Ιb, από σταυροειδούς διάταξης σε παράλληλη διάταξη.

Διασύνδεση Ορυχείου Πεδίου Καρδιάς με το Ορυχείο Νοτίου Πεδίου.

Εγκατάσταση συστήματος υδροτοιχωμάτων εστίας (Water Cannons).

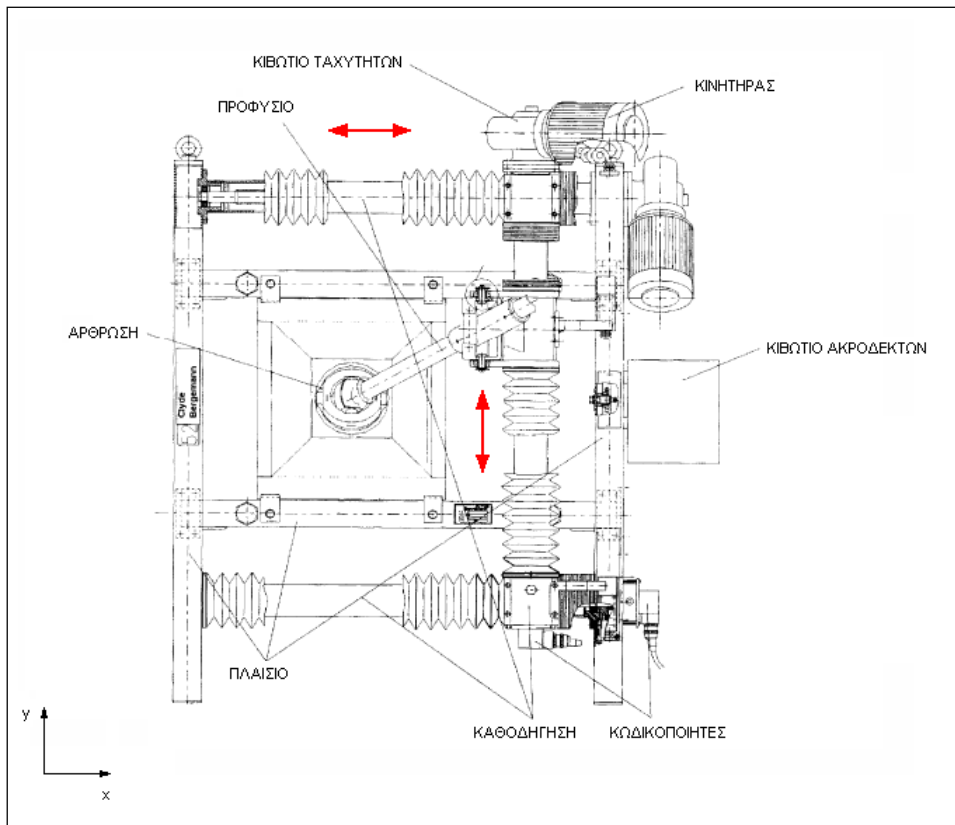
Τα water cannons ψεκάζουν μια στοχευόμενη, με ακρίβεια ελεγχόμενη δέσμη νερού από ένα άνοιγμα του τοιχώματος της εστίας προς το απέναντι τοίχωμα. Ο έλεγχος της κίνησης γίνεται μέσω ρομποτικού μηχανισμού για να επιτευχθεί πολύ υψηλή ακρίβεια καθαρισμού. Στο παρακάτω σχέδιο απεικονίζεται η διαδικασία καθαρισμού με ένα σύστημα water cannons.



Εικόνα 18-1 : Σχηματική αναπαράσταση καθαριστικής λειτουργίας συστήματος watercannons

Στις περισσότερες εγκαταστάσεις ένα water cannon μπορεί να καθαρίσει όλη την εμφανή περιφέρεια, κάθε αυλού, από τη μια πλευρά του τοιχώματος ως την άλλη. Έτσι τέσσερις συσκευές water cannons, μια σε κάθε τοίχωμα, μπορούν να καθαρίσουν ολόκληρη την εστία. Μια δέσμη νερού jet συγκεκριμένης πυκνότητας,

ταχύτητας παράγεται από ειδικό ακροφύσιο διασχίζει το εσωτερικό του λέβητα και συγκρούεται στη ρυπασμένη επιφάνεια του τοιχώματος. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση μιας συσκευής water cannon καθώς και οι κινήσεις που εκτελούν οι οδηγητικοί μηχανισμοί.



Εικόνα 18-2 : Σχηματική αναπαράσταση συσκευής watercannon

Τα water cannons προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς εκκαπνιστές και τα water lances. Χρησιμοποιούν φιλτραρισμένο νερό και έτσι έχουμε μια φανερή μείωση στο κόστος (λειτουργίας και συντήρησης). Η χρήση ατμού, αέρα ή υψηλής καθαρότητας νερού ως καθαριστικό μέσο έχει ως αποτέλεσμα υψηλά κόστη λειτουργίας. Ο μεγάλος αριθμός εκκαπνιστών ή/και water lances που χρειάζονται για τον πλήρη καθαρισμό, απαιτεί αρκετά μεγάλο κόστος συντήρησης.

Επίσης, επιτρέπουν καθαρισμό και σε περιοχές που δεν μπορούν να εξοπλιστούν με εκκαπνιστές και water lances ή που είναι δύσκολο να φτάσουν τα συγκεκριμένα συστήματα.

Τα συστήματα watercannons καθαρίζουν ακόμη και να διπλάσια περιοχή από ότι οι συμβατικοί εκκαπνιστές και τα waterlances. Όταν ο ατμοπαραγωγός έχει μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας, η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων μειώνεται. Αυτό σημαίνει αύξηση της θερμότητας που απορροφούν οι εναλλάκτες του λέβητα ως εκ τούτου η απόδοση της μονάδας βελτιώνεται. Η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να αυξηθεί αφού η μείωση θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων επιτρέπει μεγαλύτερη αξιοποίηση του καυσίμου.



Εικόνα 18-3 : Επιφάνεια υδρότοιχου καθαρισμένη με watercannon

Τα waterlances και οι εκκαπνιστές είναι ικανά να καθαρίσουν μόνο μια μικρή περιοχή του τοιχώματος και έτσι η μετάδοση θερμότητας αναγκαστικά θα πρέπει να γίνει μέσω αυτών των μικρών περιοχών. Έτσι καθαρίζοντας μεγαλύτερες περιοχές, η μετάδοση θερμότητας γίνεται πιο ομοιόμορφα, από περιοχές που πριν ήταν καλυμμένες από επικαθίσεις.

Ένα ακόμα όφελος είναι η μείωση των παραγόμενων NOx. Μείωση 38°C στα εξερχόμενα καυσαέρια μπορεί να προκαλέσει μείωση στα παραγόμενα NOx ακόμα και περισσότερο από 10%.