



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Δ.Π.Μ.Σ. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάκτηση θερμότητας για παραγωγή
ηλεκτρικής ενέργειας από την εγκατάσταση
αποτέφρωσης επικίνδυνων ιατρικών
αποβλήτων του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Α. ΦΑΦΑΛΗΣ

ΔΙΠΛ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΣ & ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Δρ. ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΚΑΠΕΤΑΝΙΟΣ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

Ευάγγελος Καπετάνιος

Μαρία Φούντη

Ιωάννης Αντωνιάδης

Δρ. Χημικός Μηχανικός

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στο πρώτο μέρος της εργασίας γίνεται γνωριμία με το πρόβλημα που προκαλείται από την παραγωγή Επικίνδυνων Ιατρικών Αποβλήτων (Ε.Ι.Α.) από υγειονομικές μονάδες και τονίζεται η αναγκαιότητα αντιμετώπισής του, μέσω συντονισμένου προγραμματισμού. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή της κατάστασης που επικρατεί στην Ελλάδα και παρουσιάζεται το νομοθετικό πλαίσιο αντιμετώπισης, εθνικό και κοινοτικό-ευρωπαϊκό. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι κυριότερες διαθέσιμες τεχνικές για την αντιμετώπιση των ιατρικών αποβλήτων -ενδονοσοκομειακά και εξωνοσοκομειακά- καθώς και η αναδυόμενη τεχνολογία πλάσματος. Έμφαση δίνεται στην αποτέφρωση, η οποία είναι και η επικρατέστερη και χαρακτηριζόμενη ως βέλτιστη διαθέσιμη τεχνική -ΒΑΤ- από την ευρωπαϊκή ένωση. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στα γενικά χαρακτηριστικά της αποτέφρωσης σε περιστρεφόμενο κλίβανο, που ενδείκνυται για την αντιμετώπιση ιατρικών αποβλήτων. Λόγω της ευρείας εφαρμογής της αποτέφρωσης, συμπληρωματικά στο πρώτο μέρος αυτής της εργασίας παρουσιάζονται εν συντομία και οι τεχνολογίες αντιρρύπανσης για την αντιμετώπιση των παραγόμενων ρύπων από τη διεργασία της καύσης. Μια τέτοια περίπτωση είναι η εγκατάσταση αποτέφρωσης Ε.Ι.Α του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α, στην Αττική.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας μελετάται η ανάκτηση θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από εγκαταστάσεις θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων, «Ενέργεια-από-Απόβλητα -Energy-form-Waste (EfW)», όπως ορίζεται στην οδηγία 2008/98/EC. Ως περίπτωση μελέτης επιλέχθηκε η εγκατάσταση αποτέφρωσης Ε.Ι.Α. του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. Στην εγκατάσταση αυτή, που είναι τεχνολογίας περιστρεφόμενου κλιβάνου και δυναμικότητας 30 τόνοι/24ωρο, αποτεφρώνονται τα Ε.Ι.Α. της Αττικής, αλλά και από άλλες περιοχές της χώρας. Από τη λειτουργία της εγκατάστασης, και ειδικότερα μετά το στάδιο της μετάκαυσης, προκύπτουν θερμά απαέρια θερμοκρασίας περίπου 900 - 1100 °C τα οποία σήμερα αφού ψυχθούν και καθαρισθούν καταλήγουν σε κάμινο και τελικά στην ατμόσφαιρα. Στην ανά χειράς εργασία μελετάται η ανάκτηση θερμότητας από αυτά για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό περιγράφονται εν συντομία, η σημερινή διάταξη της εγκατάστασης αποτέφρωσης Ε.Ι.Α. του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α, και η γραμμή παραγωγής. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των κύριων στοιχείων που θα συνθέτουν το σύστημα ανάκτησης θερμότητας (Σ.Α.Θ.) όπως είναι ο ατμοπαραγωγός, ο ατμοστρόβιλος, ο συμπυκνωτής, η ηλεκτρογεννήτρια, και τα βοηθητικά

τους συστήματα. Παρατίθενται βασικές έννοιες και ορισμοί της θερμοδυναμικής του ατμού, αναλύεται ο θερμοδυναμικός κύκλος Clausius-Rankine, ο οποίος αποτελεί τη βάση για την υλοποίηση του Σ.Α.Θ., και παρουσιάζονται τεχνικοί τρόποι βελτίωσης του βαθμού θερμικής απόδοσης του κύκλου. Στο τελευταίο κεφάλαιο εφαρμόζονται οι θερμοδυναμικές έννοιες και αρχές των προηγούμενων κεφαλαίων στην περίπτωση του αποτεφρωτήρα Ε.Ι.Α. του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. Μελετήκαν πέντε εναλλακτικά σενάρια για ανάκτηση της θερμότητας. Στα δύο πρώτα σενάρια μελετήθηκε η περίπτωση κορεσμένου ατμού σε πίεση 20 και 40 bar. Στο τρίτο και τέταρτο σενάριο μελετήθηκε η περίπτωση υπέρθερμου ατμού 400 °C σε πίεση 20 και 40 bar αντίστοιχα. Τέλος στο πέμπτο σενάριο μελετήθηκε η περίπτωση υπέρθερμου ατμού με ένα στάδιο αναθέρμανσης. Από τα αποτελέσματα της θερμοδυναμικής ανάλυσης και τις τιμές του δείκτη ενεργειακής απόδοσης R1 της οδηγίας 2008/98/EC, συμπεραίνεται ότι δεν είναι δυνατή η αναβάθμιση της εν λόγω εγκατάστασης σε σταθμό παραγωγής «Ενέργειας-από-Απόβλητα».

Abstract

Medical waste production and treatment is the main subject of the first part of this thesis. National and European legislation define the problem and the necessity to establish the framework for a responsible medical waste treatment planning. National legislation is presented in short. The main available technologies for the treatment and disposal of medical waste are described in short. Emphasis is laid on incineration, the most commonly used technique, also characterized by IPPC as Best Available Technique (BAT). Rotary kiln incinerator is considered the most appropriate for medical waste destruction, thus its technical operation is described in short. Waste incineration is not considered apart from flue gas cleaning systems, so state-of-the-art advances are presented. The first part ends with a short reference on plasma technology and its utilization on medical waste treatment.

The second part of this thesis is oriented to heat recovery from the thermal treatment of waste. According to directive 2008/98/EC, waste incineration plants ought to upgrade in the hierarchy of waste management from disposal to recovery -Energy-from-Waste (EfW) or Waste-to-Energy (WTE). As a case study the medical waste incineration plant (M.W.I) of E.S.D.K.N.A was selected. The capacity of this plant is designed for 30 tonnes/day, and medical waste produced all around the region of Attica, are incinerated in rotary-kiln incinerators. The temperature of the flue-gases exiting the after-burner chamber is between 900-1100 °C. Today, these flue-gases are treated chemically - quenching and cleaning- and disposed to the atmosphere. This project investigates the possibility to recover heat from these flue-gases in order to produce electric power. To this end, the current layout and production line of the plant, and the operation of the main parts of a Heat Recovery System to be integrated, are described in short. The necessary knowledge on steam thermodynamics and Clausius-Rankine cycle is also presented, along with technical possibilities for efficiency increase. The last chapter contains the thermodynamic analysis of the heat recovery system, for the case of the M.W.I plant of E.S.D.K.N.A. Five alternative scenarios were analyzed. The first two considered saturated steam cycle at 20 bar and 40 bar. The third and fourth scenarios considered superheated steam cycles, 20bar/400 °C and 40bar/400 °C respectively. The last scenario considered a superheated cycle with one stage of reheating. The conclusion is that the energy efficiency according to formula R1 of the directive 2008/98/EC is not

fulfilled. Thus the waste incineration plant of E.S.D.K.N.A. can not be upgraded from disposal to recovery.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα επιστημονικό υπεύθυνο της εργασίας μου, κο Ευάγγελο Καπετάνιο. Η ακούραστη συνεργασία, οι κριτικές αλλά διδακτικές συμβουλές, και η πλούσια και μοναδική επαγγελματική του εμπειρία στη διαχείριση των αποβλήτων, συνέφεραν τα μέγιστα για την υλοποίηση της ανά χείρας εργασίας.

Πολλές ευχαριστίες οφείλω επίσης στα στελέχη της αναδόχου Κοινοπραξίας λειτουργίας της εγκατάστασης αποτέφρωσης του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α, κ.κ Αντώνιο Κατσούλη, Σπύρο Κουλουμούνδρα και Γεώργιο Μπούμπουκα για τη συνεργασία και τα δεδομένα που μου παρείχαν σχετικά με τη λειτουργία της εγκατάστασης του αποτεφρωτήρα του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.

Θα ήταν λάθος να μην αναφέρω τον διευθυντή του ΔΠΜΣ καθηγητή κο Παπαδόπουλο Ευάγγελο για το ζήλο που επιδεικνύει για τη διατήρηση του υψηλού επιπέδου επιστημονικής κατάρτισης του μεταπτυχιακού προγράμματος, καθώς και την κα Κανάραχου Ελισάβετ για τη φιλότιμη και καθ' όλα ευγενική γραμματειακή υποστήριξη.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, την καθηγήτρια κα Φούντη Μαρία και τον αν. καθηγητή κο Αντωνιάδη Ιωάννη, για την προσεκτική και αντικειμενική κριτική της εργασίας μου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	5
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
Περιεχόμενα.....	7
A ΜΕΡΟΣ.....	13
1. Η ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	15
1.1. Το πρόβλημα και η ανάγκη αντιμετώπισής του	15
1.2. Η κατάσταση στην Ελλάδα.....	17
1.3. Συντονισμένος σχεδιασμός διαχείρισης ΙΑ.....	22
1.3.1. Φάσεις εφαρμογής προγράμματος διαχείρισης ΙΑ	24
1.3.2. Ενδονοσοκομειακή αντιμετώπιση	24
1.3.3. Εξωνοσοκομειακή αντιμετώπιση.....	25
1.4. Θερμική επεξεργασία με ανάκτηση ενέργειας.....	25
1.5. Ανακύκλιση ιατρικών αποβλήτων.....	27
2. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	29
2.1. Εθνική Νομοθεσία.....	29
2.2. Ευρωπαϊκή Νομοθεσία	30
2.3. Πρότυπα ΕΛΟΤ	31
2.4. Κατηγοριοποίηση Ιατρικών Αποβλήτων	32
2.4.1. Ιατρικά Απόβλητα Αστικού Χαρακτήρα (ΙΑ-ΑΧ)	34
2.4.2. Επικίνδυνα Ιατρικά Απόβλητα αμιγώς μολυσματικού χαρακτήρα (ΕΙΑ-MX).....	35
2.4.3. Επικίνδυνα Ιατρικά Απόβλητα που έχουν ταυτόχρονα Μολυσματικό και Τοξικό Χαρακτήρα (ΕΙΑ-MTX)	37
2.4.4. Επικίνδυνα Ιατρικά Απόβλητα αμιγώς τοξικού χαρακτήρα (ΕΙΑ-TX).....	37
3. ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	39
3.1. Εφαρμοσμένες τεχνικές διαχείρισης ΙΑ	39
3.2. Μη-αποτεφρωτικές μέθοδοι	42
3.2.1. Μικροβιακή αδρανοποίηση	42
3.2.2. Αποστείρωση ατμού ή αυτοκλίβανος (autoclaving)	42
3.2.3. Χημική απολύμανση	43
3.2.4. Ακτινοβολία μικροκυμάτων	44

3.3.	Αποτέφρωση Επικίνδυνων Ιατρικών Αποβλήτων	44
3.3.1.	Απαιτούμενα χαρακτηριστικά αποβλήτων.....	46
3.3.2.	Αξιολόγηση παραμέτρων σχεδιασμού αποτεφρωτήρων ιατρικών αποβλήτων	47
3.4.	Τύποι αποτεφρωτήρων ιατρικών αποβλήτων	49
3.4.1.	Περιστρεφόμενοι κλίβανοι	49
3.4.2.	Τύποι περιστρεφόμενων κλιβάνων κατάλληλοι για ΙΑ.....	52
	<i>Αντίρροπης ροής</i>	53
	<i>Ομόρροπης ροής</i>	53
	<i>Σύγκριση των δύο τύπων</i>	54
3.4.3.	Πολυθαλάμιοι αποτεφρωτήρες.....	55
3.4.4.	Αποτεφρωτήρες ελεγχόμενου αέρα.....	55
3.4.5.	Παράμετροι λειτουργίας αποτεφρωτήρων.....	56
3.4.6.	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αποτέφρωσης	57
3.5.	Εκπομπές ρύπων αποτεφρωτήρων.....	58
3.5.1.	Αέριες εκπομπές.....	58
3.5.2.	Παράγοντες εκπομπών διοξινών και ΠΑΥ.....	59
3.5.3.	Τοξικά και καρκινογενή μέταλλα	60
3.5.4.	Παθογόνα	60
3.5.5.	Κυτταροτοξικές συνθέσεις	61
3.5.6.	Τοξικά αέρια.....	61
3.5.7.	Υγρά και στερεά απόβλητα αποτέφρωσης.....	61
3.6.	Νέες αντιρρυπαντικές τεχνολογίες.....	64
3.6.1.	Εξοπλισμός ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης - Air pollution control equipment (APCE)	65
3.6.2.	Απομάκρυνση διοξινών.....	65
3.6.3.	Υγρός τριβέας - Wet scrubber (absorber)	67
3.6.4.	Επεξεργασία αέριων αποβλήτων και καθαρισμός off-gas	68
3.6.5.	Άλλες καινοτόμες διατάξεις ελέγχου και μείωσης εκπομπών	69
4.	ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ.....	73
4.1.	Η τεχνολογία πλάσματος	73
4.1.1.	Τι είναι πλάσμα	73
4.1.2.	Κατηγορίες τεχνολογίας πλάσματος	73
4.1.3.	Παραγωγή θερμικού πλάσματος.....	75

4.2.	Διαχείριση ΙΑ με τεχνολογία Πλάσματος.....	75
4.2.1.	Πιλοτικά ερευνητικά προγράμματα.....	75
4.2.2.	Πυρόλυση με θερμικό πλάσμα.....	77
4.2.3.	Τεχνολογία τήξης/ αεριοποίησης με πλάσμα (PGM).....	79
	Βιβλιογραφία 1 ^{ου} μέρους.....	83
	Β ΜΕΡΟΣ.....	89
5.	ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	91
5.1.	Γενικά περί της φιλοσοφίας «Ενέργεια-από-Απόβλητα»	91
5.2.	Απόδοση συστημάτων παραγωγής «Ενέργεια-από-Απόβλητα».....	92
5.3.	Σταθμοί παραγωγής «Ενέργεια-από-Απόβλητα»	96
5.4.	Η φόρμουλα R1 και η οδηγία 2008/98/ΕC	99
6.	Η ΜΟΝΑΔΑ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ Ε.Ι.Α. ΤΟΥ Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α	103
6.1.	Γενικά για τη μονάδα	103
6.2.	Τεχνική περιγραφή της εγκατάστασης	105
6.2.1.	Μονάδα ζύγισης.....	106
6.2.2.	Μονάδα προσωρινής αποθήκευσης.....	106
6.2.3.	Μονάδα καύσης	107
6.2.3.1.	Τροφοδότης.....	107
6.2.3.2.	Κλίβανος καύσης.....	108
6.2.3.3.	Θάλαμος τέφρας	109
6.2.3.4.	Θάλαμος μετάκαυσης	109
6.2.4.	Μονάδα ψύξης καυσαερίων.....	110
6.2.4.1.	Εναλλάκτης θερμότητας.....	110
6.2.4.2.	Ο πύργος ψύξης	111
6.2.5.	Μονάδα καθαρισμού καυσαερίων	111
6.2.5.1.	Ο αντιδραστήρας.....	112
6.2.5.2.	Σύστημα ξηρής υδρασβέστου	113
6.2.5.3.	Σύστημα ενεργού άνθρακα	113
6.2.5.4.	Το σακκόφιλτρο.....	113
6.2.6.	Μονάδα απόρριψης καυσαερίων	114
6.2.6.1.	Ανεμιστήρας απόρριψης.....	114
6.2.6.2.	Καπνοδόχος.....	115
6.2.7.	Μονάδα εξαγωγής, μεταφοράς και αποθήκευσης τέφρας	115

6.2.8.	Μονάδα ελέγχου αέριων εκπομπών.....	115
6.2.9.	Μονάδα ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου SCADA	116
6.2.10.	Βοηθητικός εξοπλισμός εγκατάστασης.....	116
6.3.	Η αναβάθμιση σε σταθμό παραγωγής "Ενέργεια-από-Απόβλητα"	120
7.	ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....	123
7.1.	Ατμοπαραγωγοί ανάκτησης θερμότητας - ΑΠ.Α.Θ.....	123
7.1.1.	Η λειτουργία του λέβητα	124
7.1.2.	Τύποι ατμοπαραγωγών ανάκτησης θερμότητας	125
7.1.2.1.	ΑΠ.Α.Θ. καπνοσωλήνων.....	125
7.1.2.2.	ΑΠ.Α.Θ. υδραυλών	126
7.1.2.3.	ΑΠ.Α.Θ. Εξαναγκασμένης Ροής (Once-through HRSG)	128
7.1.2.4.	ΑΠ.Α.Θ. Συμπληρωματικής και εφεδρικής καύσης	129
7.1.3.	Διατάξεις ατμοπαραγωγών	130
7.1.4.	Κυκλοφορία εργαζόμενου μέσου	131
7.1.4.1.	Φυσική κυκλοφορία.....	132
7.1.4.2.	Τεχνητή κυκλοφορία	133
7.1.4.3.	Εξαναγκασμένης ροής.....	134
7.2.	Ατμοστρόβιλος (Steam Turbine - ST)	135
7.2.1.	Γενικά.....	135
7.2.2.	Κατηγορίες ατμοστροβίλων	135
7.2.2.1.	Το πλήθος των βαθμίδων : μονοβάθμιες και πολυβάθμιες.....	136
7.2.2.2.	Ο τύπος των πτερυγώσεων	137
7.2.2.3.	Οι συνθήκες τροφοδοσίας και εξόδου του ατμού.....	139
7.2.2.4.	Η διάταξη του άξονα και του κελύφους	141
7.2.2.5.	Πίεση ατμού τροφοδοσίας και ταχύτητα περιστροφής	142
7.2.3.	Απώλειες ατμοστροβίλων.....	142
7.2.3.1.	Εσωτερικές απώλειες.....	142
7.2.3.2.	Εξωτερικές απώλειες.....	144
7.2.4.	Ατμοστρόβιλος υγρού ατμού.....	145
7.3.	Συμπυκνωτής και πύργος ψύξης.....	145
7.3.1.	Γενικά.....	145
7.3.2.	Άμεσης επαφής ή ανοιχτού τύπου	146
7.3.3.	Κλειστού τύπου	146

7.3.4.	Αερόψυκτοι συμπυκνωτές.....	148
7.4.	Ηλεκτρογεννήτρια – σύνδεση με δίκτυο	149
7.4.1.	Γενικά.....	149
7.4.2.	Σύγχρονες γεννήτριες.....	150
7.4.2.1.	Αρχή λειτουργίας	150
7.4.2.2.	Συχνότητα και πόλοι.....	151
7.4.2.3.	Παραγωγή ισχύος και σύνδεση στο δίκτυο	153
7.4.2.4.	Απώλειες και συντελεστής απόδοσης γεννήτριας.....	153
8.	Η ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΟΥ ΑΤΜΟΥ	155
8.1.	Γενικά	155
8.2.	Χρήσιμοι θερμοδυναμικοί ορισμοί.....	155
8.3.	Χρήσιμες θερμοδυναμικές ιδιότητες ατμού.....	157
8.4.	Πίνακες και διαγράμματα ιδιοτήτων νερού και ατμού	159
9.	Ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ.....	165
9.1.	Ο ιδανικός κύκλος Clausius-Rankine	165
9.2.	Βαθμός απόδοσης ιδανικού κύκλου Clausius-Rankine	167
9.3.	Ο πραγματικός κύκλος Clausius-Rankine	167
9.3.1.	Εσωτερικές μη-αντιστρεψιμότητες	167
9.3.2.	Εξωτερικές μη-αντιστρεψιμότητες και αναγέννηση ατμού	170
9.4.	Τεχνικές βελτίωσης βαθμού απόδοσης.....	171
9.4.1.	Αύξηση θερμικής απόδοσης κύκλου	172
9.4.1.1.	Παράμετροι ενεργού ατμού (live steam conditions).....	172
9.4.1.2.	Αναθέρμανση	174
9.4.1.3.	Προθέρμανση νερού τροφοδοσίας	176
9.4.1.4.	Βελτιστοποίηση του «κρύου άκρου».....	180
9.4.2.	Ελαχιστοποίηση απωλειών	181
9.4.2.1.	Εσωτερική απόδοση ατμοστρόβιλου.....	181
9.4.2.2.	Απώλειες ατμοπαραγωγού	181
9.4.2.3.	Άλλες απώλειες (δίκτυο σωληνώσεων, ηλεκτρογεννήτρια, Μ/Σ)	182
9.4.3.	Μείωση κατανάλωσης βοηθητικής ισχύος.....	182
9.4.4.	Απώλειες κατά την εκκίνηση ή παύση του σταθμού.....	183
9.4.5.	Απώλειες λόγω μειωμένης δυναμικότητας	183
10.	ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ Ε.Ι.Α. ΤΟΥ Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.....	185

10.1.	Ο στόχος της μελέτης εφαρμογής.....	185
10.2.	Ο θερμοδυναμικός σχεδιασμός - μεθοδολογία	185
10.3.	Διάγραμμα ροής.....	186
10.4.	Καθορισμός παραμέτρων	187
10.4.1.	Το θερμικό περιεχόμενο των καυσαερίων	187
10.4.2.	Συνθήκες λειτουργίας ενεργού ατμού	188
10.4.3.	Συνθήκες κρύου άκρου - συμπύκνωσης	190
10.4.4.	Βαθμοί απόδοσης σταθμού.....	190
10.4.5.	Το κριτήριο R1 της οδηγίας 2008/98/EC.....	194
10.5.	Θερμοδυναμικά σενάρια	195
10.5.1.	1 ^ο σενάριο : Κύκλος κορεσμένου ατμού 20 bar.....	197
10.5.2.	2 ^ο σενάριο : Κύκλος κορεσμένου ατμού 40 bar.....	199
10.5.3.	3 ^ο σενάριο : Κύκλος υπέρθερμου ατμού 20 bar / 400 °C	201
10.5.4.	4 ^ο σενάριο : Κύκλος υπέρθερμου ατμού 40 bar / 400 °C	203
10.5.5.	5 ^ο σενάριο : Κύκλος υπέρθερμου ατμού με αναθέρμανση 40/400/400.....	205
10.6.	Συζήτηση αποτελεσμάτων	213
10.6.1.	Ενθαλπία ενεργού ατμού	214
10.6.2.	Παροχή ενεργού ατμού	215
10.6.3.	Θερμικός βαθμός απόδοσης.....	215
10.6.4.	Ποιότητα ατμού εκροής	216
10.6.5.	Ειδικές καταναλώσεις ατμού.....	216
10.6.6.	Παραγόμενη ισχύς και συνολικός βαθμός απόδοσης.....	217
10.6.7.	Το κριτήριο R1	218
10.6.8.	Σύγκριση με βιβλιογραφία.....	219
10.6.9.	Η βέλτιστη επιλογή.....	222
10.7.	Συμπεράσματα	224
10.7.1.	Συμπεράσματα 1 ^{ου} μέρους	224
10.7.2.	Συμπεράσματα 2 ^{ου} μέρους	225
	Βιβλιογραφία 2 ^{ου} μέρους.....	227

Α ΜΕΡΟΣ

Επικίνδυνα Ιατρικά Απόβλητα

ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ

1. Η ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

1.1. Το πρόβλημα και η ανάγκη αντιμετώπισής του

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες, οι αλλαγές στον τρόπο ζωής, και οι καταναλωτικές συνήθειες έχουν αυξήσει το ρυθμό παραγωγής στερεών αποβλήτων. Κατά συνέπεια, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας εστιάζεται στην αντιμετώπιση προβλημάτων μόλυνσης που προκαλούνται από την παραγωγή αποβλήτων. Στον τομέα της υγείας έχει παρατηρηθεί σημαντικότερη βελτίωση τις τελευταίες δεκαετίες, σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η ικανότητα μιας υγειονομικής μονάδας να βελτιώνει την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών της και να παρέχει ένα αξιόπιστο επίπεδο ιατρικής φροντίδας δεν αναφέρεται μόνο στις ιατρικές και νοσοκομειακές υπηρεσίες, αλλά επεκτείνεται σε δραστηριότητες παράλληλες ή επακόλουθες της κύριας. Μία από αυτές τις παράπλευρες ή προκύπτουσες δραστηριότητες, με μεγάλο αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, είναι η διαχείριση των Ιατρικών Αποβλήτων (Ι.Α.), που παράγονται από τις δραστηριότητες περίθαλψης των νοσοκομείων. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ.), το 80% των παραγόμενων αποβλήτων σε Υγειονομικές Μονάδες (Υ.Μ.) μπορεί να συγκριθεί με τα αστικά στερεά απόβλητα (Α.Σ.Α.) (WHO, 2000). Το υπόλοιπο 20% χαρακτηρίζεται ως επικίνδυνο, φέροντας ιδιότητες όπως μολυσματικότητα, τοξικότητα, καρκινογένεση, μεταλλαξιγένεση, τερατογένεση, ραδιενέργεια, απαιτώντας ειδική μεταχείριση.

Η μεταχείριση αποβλήτων από ΥΜ δε γνώρισε την ίδια δέουσα προσοχή, εν συγκρίσει με άλλα απόβλητα, ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες χώρες. Απόβλητα τα οποία παράγονται σε νοσοκομεία, κλινικές, βιολογικά και ιατρικά εργαστήρια, κλινικές περίθαλψης ζώων, είναι ανάγκη να απορριφθούν με κάποιο τρόπο. Αν λάβουμε υπόψη ότι το ένα μεγάλο μέρος των αποβλήτων αυτών είναι μολυσματικό, καθιστώντας αυτά εν δυνάμει κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία, αντιλαμβανόμαστε το βαθμό υπευθυνότητας με τον οποίο πρέπει να γίνει η διαχείρισή τους.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ασφαλής μεταχείριση και διάθεση των επικίνδυνων Ιατρικών Αποβλήτων (Ε.Ι.Α.) αποτελεί μείζον πρόβλημα του τομέα υγείας παγκοσμίως, και απασχολεί όχι μόνο τους κυβερνητικούς μηχανισμούς και τις διοικήσεις των ΥΜ, αλλά και την κοινωνία ως σύνολο. Η τελευταία μάλιστα αποφασιστικά επηρεάζει την απαίτηση για ποιοτικές και αποτελεσματικές υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης. Το πρόβλημα επιδεινώνεται από την εμφάνιση νέων μολυσματικών ασθενειών και την έλλειψη κατάλληλης υποδομής για την ασφαλή μεταχείριση των επικίνδυνων ΙΑ. Ο κίνδυνος, λοιπόν, για την υγεία και η υποβάθμιση του περιβάλλοντος είναι οι άμεσες αρνητικές συνέπειες της απελευθέρωσης ρυπαντικών ουσιών λόγω μη-ασφαλών πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων. Από την άλλη, η σωστή διαχείριση των ΙΑ ασκεί σημαντική

οικονομική πίεση στις διοικήσεις των Υ.Μ., με αποτέλεσμα να μη δίδεται η δέουσα προτεραιότητα για την αντιμετώπιση του θέματος.

Η διαχείριση ΙΑ είναι μείζονος σημασίας θέμα και η κρισιμότητά του μεγιστοποιείται από την έλλειψη εκπαίδευσης, γνώσεων και χρηματοδότησης για την υποστήριξη των διαθέσιμων λύσεων. Η συλλογή και διάθεση Ι.Α. ενέχει άμεσους κινδύνους τόσο στο ανθρώπινο κοινό όσο και στο περιβάλλον. Η κοινή γνώμη έχει ευαισθητοποιηθεί σε θέματα που αφορούν την παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά, επεξεργασία και τελική διάθεση των ΙΑ, τα οποία εμπεριέχουν επιβλαβή και τοξικά υλικά. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι διάθεσης και επεξεργασίας με σκοπό την ελαχιστοποίηση, γιατί όχι και εκμηδενισμό, των αρνητικών συνεπειών των Ι.Α.

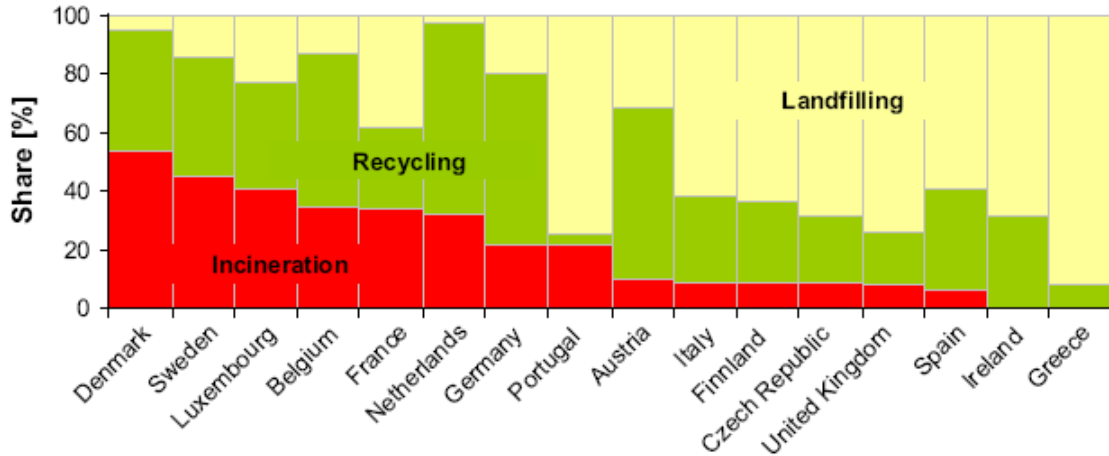
Το επόμενο Σχήμα 1-1, απεικονίζει τη διευρυμένη ιεράρχηση των τεχνικών διαχείρισης αποβλήτων, γενικά. Γίνεται ένας διαχωρισμός μεταξύ των «**βέλτιστων τεχνικών υγειονομικής ταφής**», δηλαδή εκείνων που με στοχευμένη προσπάθεια συλλέγουν για διάφορες χρήσεις το φυσικό αέριο των ΧΥΤΑ (προς τη βάση της πυραμίδας), και των «**χειρίστων τεχνικών**», οι οποίες συνεισφέρουν αρνητικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου μέσω εκπομπών μεθανίου στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1-1: Η διευρυμένη ιεράρχηση των τεχνικών διαχείρισης αποβλήτων [1]

Η παραγωγή Α.Σ.Α. στην Ευρώπη υπολογίστηκε στους 259 εκατομμύρια τόνους για το έτος 2004, [2,84]. Το 40% διατέθηκε σε Χ.Υ.Τ.Α., το 20% υπέστη θερμική επεξεργασία και το υπόλοιπο επαναχρησιμοποιήθηκε ή αντιμετωπίστηκε με άλλες τεχνικές. Όπως δείχνει το Σχήμα 1-2, [2], εντοπίζονται σημαντικές διαφορές μεταξύ των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης ως προς τον τρόπο διαχείρισης των αποβλήτων. Η υγειονομική ταφή

φαίνεται να κυριαρχεί σε αρκετές χώρες, με την πρωτιά να κατέχεται από την Ελλάδα. Η Ευρωπαϊκή Νομοθεσία όμως, [3], επιβάλλει τη σταδιακή μείωση των βιοαποδομήσιμων υλικών στο 75% μέχρι το 2010, στο 50% μέχρι το 2013 και στο 35% μέχρι το 2020, εν συγκρίσει με τα επίπεδα του 1995.



Σχήμα 1-2: Διαχείριση ΑΣΑ σε χώρες-μέλη της ΕΕ. [2]

1.2. Η κατάσταση στην Ελλάδα

Οι υγειονομικές μονάδες στην Ελλάδα παράγουν καθημερινά σημαντικές ποσότητες μολυσματικών αποβλήτων, μεγάλο ποσοστό των οποίων δεν διαχειρίζεται σωστά. Τεχνικές προδιαγραφές για υγιείς και περιβαλλοντικά φιλικές πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων θεσμίστηκαν νομοθετικά με την ΚΥΑ 37591/2031 «Μέτρα και όροι για τη διαχείριση ιατρικών αποβλήτων από υγειονομικές μονάδες», [32]. Η απόφαση αυτή ήταν το πρώτο βήμα για την αύξηση του ενδιαφέροντος, τη μόρφωση συμπεριφοράς και την προώθηση σχημάτων σχετικά με τη κρισιμότητα της αντιμετώπισης υγειονομικών αποβλήτων. Περαιτέρω βήματα απαιτούνται για τη βελτίωση της νομοθεσίας και τη συμμόρφωση προς τους ελεγκτικούς μηχανισμούς. Παράλληλα, περαιτέρω προσπάθεια χρειάζεται για την ενθάρρυνση της ασφαλούς μεταχείρισης και τελικής απόθεσης των κλινικών αποβλήτων, ούτως ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι που αφορούν την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων σε υγειονομικές μονάδες, των ασθενών, των συλλεκτών αποβλήτων και ολόκληρης της κοινωνίας.

Από τους 333.155 τόνους επικίνδυνων αποβλήτων, που παράγονται κάθε χρόνο στην Ελλάδα, (στοιχεία 2004 [32β]) το 4.4% (14.600 τόνοι) παράγεται στα νοσοκομεία, το μεγαλύτερο ποσοστό των οποίων θεωρείται μολυσματικό. Σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία, ως μολυσματικό θεωρείται εκείνο το απόβλητο το οποίο έχει έλθει σε επαφή με αίμα ή βιολογικά υγρά, και περιλαμβάνει έτσι, όλα τα απόβλητα τα οποία είτε είναι όντως μολυσματικά είτε είναι εν δυνάμει μολυσματικά. Επιπλέον, σύμφωνα με τη διεθνή νομοθεσία, μολυσματικά θεωρούνται εκείνα τα απόβλητα τα οποία θέτουν σε κίνδυνο την

ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, όταν αποθηκεύονται, μεταφέρονται, διαχειρίζονται, ή μεταχειρίζονται με οποιονδήποτε άλλο τρόπο, ο οποίος δεν είναι ασφαλής και τεχνικά αποδεκτός. Η διαχείριση των νοσοκομειακών αποβλήτων αποκτά ολοένα και περισσότερο ενδιαφέρον, και οι διοικήσεις των νοσοκομείων έρχονται αντιμέτωπες με πλήθος προβλημάτων, καθώς προσπαθούν να αποφύγουν περασμένες και λαθεμένες τακτικές, όπως η υγειονομική ταφή, μέρους ή όλων των μολυσματικών αποβλήτων χωρίς προεπεξεργασία, και η ανάμειξή τους με αστικά απόβλητα. Κατά το παρελθόν, χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος της αποτέφρωσης, χωρίς βέβαια ενεργειακή ανάκτηση, η οποία ενώ αρχικά στόχευε στην αντιμετώπιση των μολυσματικών αποβλήτων, στη συνέχεια αποτεφρωνόταν σχεδόν όλα τα νοσοκομειακά απόβλητα χωρίς προηγούμενο διαχωρισμό, καταλήγοντας σε ατελή αποτέφρωση, με όποιες συνέπειες συνεπάγεται αυτό. Με την ψήφιση της προηγούμενης ΚΥΑ, οι διοικήσεις των νοσοκομείων της χώρας υποχρεώθηκαν να κλείσουν τους αποτεφρωτήρες που λειτουργούσαν στα νοσοκομεία. Παρομοίως, στον Καναδά αντίστοιχη νομοθεσία υποχρέωσε σε διακοπή της λειτουργίας των νοσοκομειακών αποτεφρωτήρων. Τη μεγαλύτερη μείωση στις νοσοκομειακές εγκαταστάσεις αποτέφρωσης γνώρισαν οι ΗΠΑ με 6,000 μονάδες να διακόπτουν τη λειτουργία τους τα τελευταία 20 χρόνια.

Σύμφωνα με την Εθνική Στατιστική Υπηρεσία (2006), στην Ελλάδα λειτουργούν 317 νοσοκομεία, με 53,701 κλίνες, μη συμπεριλαμβανομένων των στρατιωτικών νοσοκομείων. Εξ αυτών, τα 141 είναι δημόσια, η πλειονότητα των οποίων (133 από τα 141) εποπτεύεται από το Υπουργείο Υγείας και Πρόνοιας, μέσω των Περιφερειών.

Ο σημερινός τρόπος διαχείρισης των Ι.Α. στην Ελλάδα μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ιδιαίτερα προβληματικός για την δημόσια υγεία και το περιβάλλον, καθώς η υπάρχουσα υποδομή στην χώρα μας δεν δίνει την δυνατότητα αποτελεσματικής διαχείρισής τους, [7,9].

Εκτός από τα νοσοκομεία που διαθέτουν αποτεφρωτικούς κλιβάνους, η αποτέφρωση (επί πληρωμή) στον πυρολυτικό κλίβανο που λειτουργεί στο ΧΥΤΑ Ανω Λιοσίων, δεν μπορεί να εξυπηρετήσει το σύνολο των παραγομένων μολυσματικών απορριμμάτων, ιδίως εάν οι ΥΜ της Αττικής αρχίσουν πραγματικά να συλλέγουν χωριστά ολόκληρο τον όγκο των παραγόμενων απορριμμάτων της κατηγορίας αυτής. Επίσης δεν υπάρχουν προς το παρόν υπηρεσίες μεταφοράς των Ι.Α., με αποτέλεσμα αυτά να πρέπει να μεταφέρονται με ευθύνη και κόστος του δημιουργού τους στον κλίβανο της χωματερής για αποτέφρωση επί πληρωμή ή σε κλίβανο κάποιου νοσοκομείου για τελική διάθεση. Ετσι παρατηρείται το φαινόμενο της μεταφοράς μολυσματικών απορριμμάτων από το ένα νοσοκομείο στο άλλο ή της προσωρινής αποθήκευσης και συσσώρευσής τους σε δρόμους, προαύλια νοσοκομείων και άλλους κοινόχρηστους χώρους, υπό συνθήκες που θέτουν σε άμεσο κίνδυνο την δημόσια υγεία. Επίσης με δεδομένες τις δυσκολίες διάθεσης των ΙΑ, παρατηρείται το φαινόμενο της αυθαίρετης μείωσης της χωριστής συλλογής των

μολυσματικών σε σάκκους με κατάλληλη σήμανση, με αποτέλεσμα ένα μεγάλο μέρος των απορριμμάτων αυτών να καταλήγει στις χωματερές μαζί με τα οικιακά απορρίμματα.

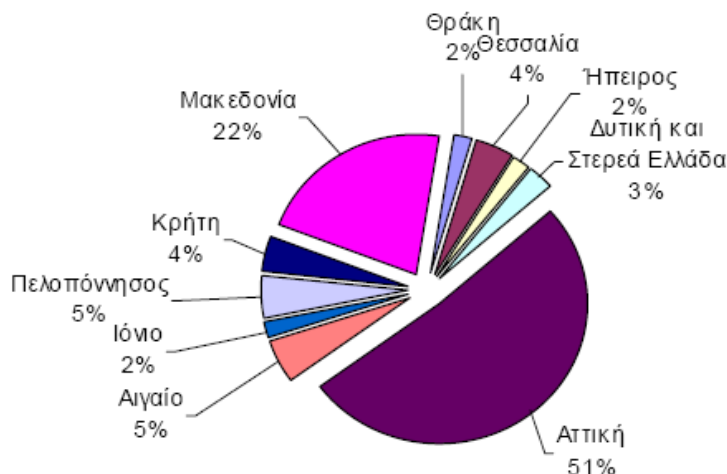
Γεγονός όμως είναι, ότι λόγω εναρμόνισης της νομοθεσίας μας με την Ευρωπαϊκή, το πρόβλημα έχει νομοθετικά τακτοποιηθεί. Στην πράξη όμως παρατηρείται έλλειψη στην εφαρμογή μιας στρατηγικής στον τομέα της διαχείρισης των νοσοκομειακών αποβλήτων. Συνηθισμένη πρακτική λόγω ουσιαστικής ανυπαρξίας ελέγχου, πολλά νοσηλευτικά ιδρύματα (σχεδόν όλες οι μικρές κλινικές και τα περισσότερα νοσοκομεία) να μην διαθέτουν καμμία πρόβλεψη για την διαχείριση των μολυσματικών τους αποβλήτων, με συνέπεια αυτά να καταλήγουν στον κοινό κάδο των απορριμμάτων μαζί με τα οικιακά απορρίμματα. Αυτό έχει σαν επακόλουθο την έκθεση σε κίνδυνο μόλυνσης από ασθένειες, όχι μόνο του νοσηλευτικού προσωπικού της εκάστοτε μονάδας και του προσωπικού των απορριματοφόρων, αλλά και όσων έρχονται σε επαφή με τα μολυσματικά απορρίμματα. Π.χ. αν αυτά καταλήξουν στην χωματερή, υπάρχει κίνδυνος μετάδοσης ασθενειών στους εκεί εργαζομένους, αλλά και σε ανύποπτους πολίτες μέσω των αδέσποτων ζώων που κυκλοφορούν.

Η αύξηση του αριθμού των νοσηλευτικών ιδρυμάτων λοιπόν και η παράλληλη αύξηση των αποβλήτων που αντιστοιχούν σε κάθε ασθενή (λόγω της υιοθέτησης, εντός των νοσοκομείων, προϊόντων μιας χρήσης) έχουν οδηγήσει αναπόφευκτα στην συνολική αύξηση των παραγόμενων νοσοκομειακών αποβλήτων στη χώρα ετησίως. Η ετήσια παραγόμενη ποσότητα (στοιχεία 1999), στην ελληνική επικράτεια, προσδιορίζεται σε 15.000 τόνους, εκ των οποίων το 15% παράγεται στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης και το 53% στην περιοχή της Αττικής [8,85].

Η ημερήσια ποσότητα παραγωγής νοσοκομειακών αποβλήτων (1999) ανά περιοχή της Ελλάδας παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήμα 1-3. Η μέση ημερήσια ποσότητα νοσοκομειακών απορριμμάτων που παράγεται στα νοσηλευτικά ιδρύματα της Ελλάδας λαμβάνεται ίση με 2 kg / κλίνη, εκ των οποίων τα 0,3 kg / κλίνη αντιστοιχούν στα μολυσματικά και τα υπόλοιπα 1,7 kg / κλίνη στα οικιακού τύπου απορρίμματα [8].

Η επεξεργασία των νοσοκομειακών αποβλήτων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και εφαρμογή ειδικών τεχνικών διαχείρισης, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα μόλυνσης και ατυχημάτων. Από στατιστική έρευνα του 1998, φαίνεται ότι μόνο το 37% των νοσηλευτικών ιδρυμάτων της χώρας διαθέτει κλιβάνους αποτέφρωσης νοσοκομειακών αποβλήτων, ενώ τα απόβλητα του 63% των νοσηλευτικών ιδρυμάτων καταλήγουν στις χωματερές χωρίς να υποβληθούν σε επεξεργασία και χωρίς να λαμβάνεται κανένα μέτρο προστασίας. Στις περιπτώσεις ύπαρξης αποτεφρωτήρα, παρουσιάζονται προβλήματα, καθώς οι περισσότεροι κλιβανοί είναι παλαιάς τεχνολογίας και δεν διαθέτουν αντιρρυπαντική τεχνολογία [8]. Έτσι δεν είναι λίγες οι φορές που, για παράδειγμα, κατά τη συλλογή των απορριμμάτων παρατηρείται το φαινόμενο της ανάμειξης απορριμμάτων

οικιακού τύπου με μολυσματικά. Επίσης ελάχιστα είναι τα νοσοκομεία που διαθέτουν κατάλληλο χώρο προσωρινής αποθήκευσης των μολυσματικών απορριμμάτων.



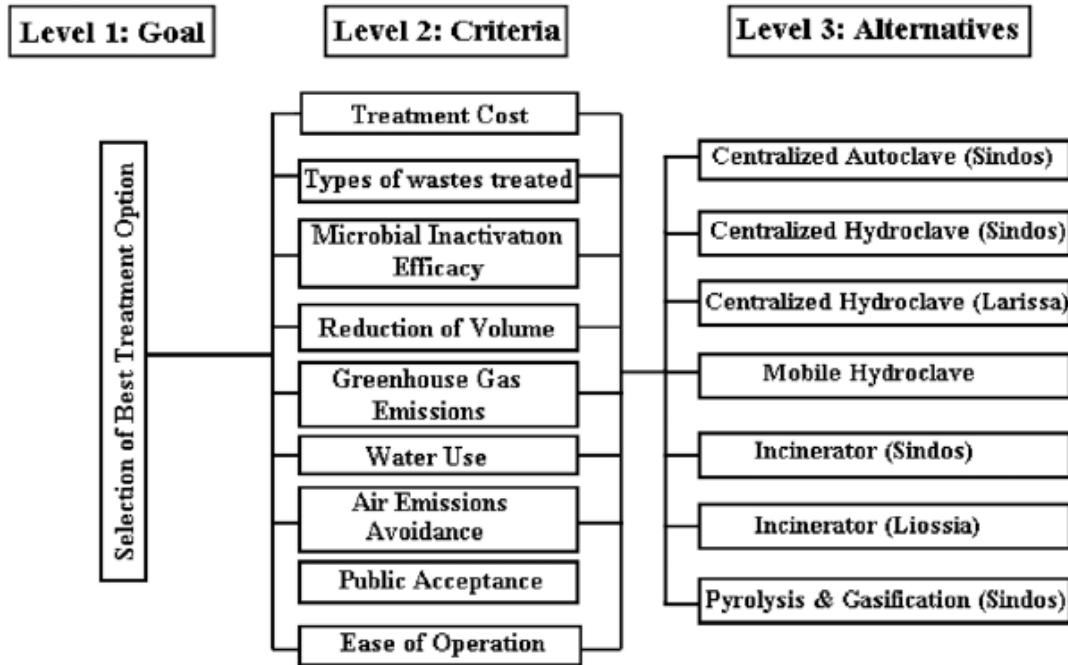
Σχήμα 1-3: Ημερήσια ποσότητα παραγωγής νοσοκομειακών αποβλήτων ανά περιοχή της Ελλάδας. [8]

Η Αττική, εξαιτίας κυρίως του μητροπολιτικού χαρακτήρα της, αντιμετωπίζει και το μεγαλύτερο πρόβλημα σχετικά με τη διαχείριση των νοσοκομειακών αποβλήτων. Πρόσφατα, το 2002, κατασκευάστηκε στην περιοχή των Άνω Λιοσίων Αττικής μονάδα αποτέφρωσης νοσοκομειακών αποβλήτων δυναμικότητας 30 τόνων / ημέρα. Η μονάδα διαθέτει ηλεκτρονικό σύστημα συνεχούς παρακολούθησης της εκπομπής αέριων ρύπων από τις καπνοδόχους, ενώ έχει κατάλληλο αντιρρυπαντικό εξοπλισμό για τη δέσμευση των ρύπων. Ωστόσο είναι γεγονός ότι δεν μεταφέρουν όλα τα νοσοκομεία της Αττικής εκεί τα απορρίμματά τους. Είναι χαρακτηριστικό ότι η μονάδα δέχεται καθημερινά μόλις 3 τόνους αποβλήτων, τη στιγμή που η χωρητικότητά της αγγίζει τους 30 τόνους, με αποτέλεσμα το λειτουργικό της κόστος να μην καλύπτεται, μια και θα απαιτούνταν κατ' ελάχιστο 13 τόνοι ημερησίως προκειμένου να συμβεί κάτι τέτοιο [9]. Έτσι παρατηρείται το φαινόμενο μεγάλα νοσοκομεία της Αττικής να διαχειρίζονται μόνα τους τα απόβλητα είτε σε πεπαλαιωμένους αποτεφρωτήρες, είτε διαθέτοντάς τα απευθείας σε χώρους ταφής ή ανεξέλεγκτες χωματερές.

Στην περιοχή της Θεσσαλονίκης η κατάσταση δεν είναι πολύ καλύτερη. Σύμφωνα με στοιχεία σχετικής έρευνας, μέχρι πριν από λίγα χρόνια (τέλη δεκαετίας '90) το 65% των νοσηλευτικών ιδρυμάτων επεξεργάζονταν τα μολυσματικά απόβλητα πριν την τελική τους διάθεση. Από αυτά, το 58% χρησιμοποιούσε τη μέθοδο της αποτέφρωσης, το 24% τη μέθοδο της πυρόλυσης και το 18% τη μέθοδο της αποστείρωσης. Τα τελευταία χρόνια, ειδικότερα από το 2002 και μετά, άρχισε να εφαρμόζεται στα περισσότερα νοσηλευτικά ιδρύματα της Θεσσαλονίκης επεξεργασία των μολυσματικών νοσοκομειακών αποβλήτων με τη μέθοδο της αποστείρωσης διαμέσου κινητής μονάδας [8].

Στην εργασία των [10], παρουσιάζονται οι σήμερα εφαρμοζόμενες καθώς και μελλοντικές τεχνικές διαχείρισης ιατρικών αποβλήτων στην Κεντρική Μακεδονία.

Επιπλέον, αξιολογούνται οι διαθέσιμες θερμικές διεργασίες για την διαχείριση των μολυσματικών ιατρικών αποβλήτων με τη βοήθεια μιας πολυκριτηριακής μεθόδου λήψης αποφάσεων, της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η διαχείριση των μολυσματικών ιατρικών αποβλήτων ιεραρχείται σε τρία επίπεδα, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα παρακάτω Σχήμα 1-4 :

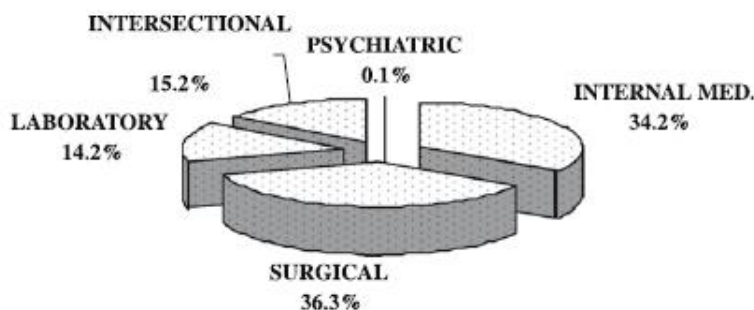


Σχήμα 1-4: Ιεραρχική δομή για την επιλογή και αξιολόγηση εναλλακτικών επιλογών διαχείρισης ΕΙΑ. [10]

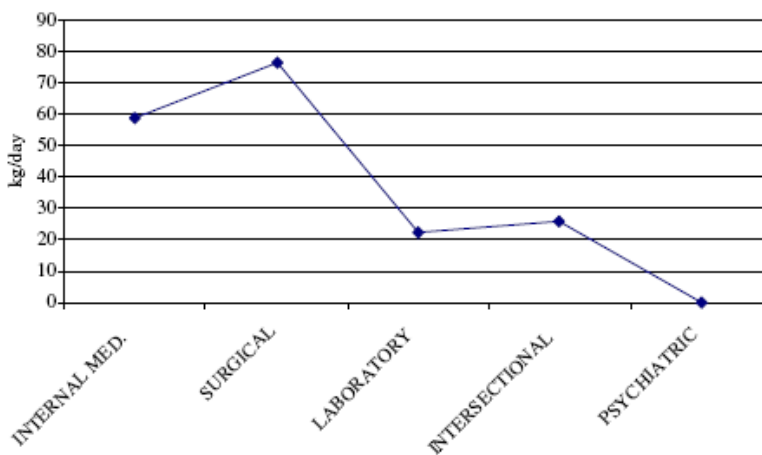
Το πρώτο επίπεδο, ο σκοπός, αφορά την επιλογή της βέλτιστης τεχνικής, το δεύτερο αποτελείται από τα κριτήρια τα οποία πρέπει να πληρούνται για την επίτευξη του σκοπού, και το τρίτο υποδεικνύει τις εναλλακτικές λύσεις για την εφαρμογή. Πολλαπλά κριτήρια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών, οικονομικών, και κοινωνικών επιπτώσεων της διαχείρισης ιατρικών αποβλήτων στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας [12]. Η εκτιμώμενη ποσότητα και η σύνθεση των ΕΙΑ χρησιμοποιούνται ως είσοδοι για την πρόβλεψη αυτών των αντίκτυπων. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι ποσοτικά και ποιοτικά, και παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα 1-1.

Πίνακας 1-1: Ποσοτικά και ποιοτικά κριτήρια επιλογής και αξιολόγησης τεχνικών διαχείρισης ΕΙΑ.			
Ποσοτικά	Ποσοτικά	Κοινωνική αποδοχή	Ποιοτικά
	Διαχείριση κόστους	Ευκολία λειτουργίας	
	Μείωση όγκου αποβλήτων	Αποτροπή εκπομπών στον αέρα	
	Εκπομπές Θερμοκηπίου	Μικροβιακή αδρανοποίηση	
	Χρήση νερού	Τύποι αποβλήτων	

Στα επιστημονικά περιοδικά δημοσιεύονται και εργασίες που αφορούν την ανάλυση των συστατικών των ΙΑ από ΥΜ στην Ελληνική Επικράτεια, όπως η εργασία των [11], για μία μικρή ΥΜ στη Ξάνθη και η εργασία των [12] για την Υγειονομική Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας (στοιχεία 2008). Τα δεδομένα τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της παραγωγής και της σύστασης των ΙΑ γενικά στην Ελλάδα. Στο επόμενο Σχήμα 1-5, παρουσιάζεται η % αναλογία των παραγόμενων Ε.Ι.Α. ανά κλινική στα νοσοκομεία της Κεντρικής Μακεδονίας. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα αυτό το 36,3% των Ε.Ι.Α. της περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας παράγεται στη χειρουργική κλινική. Το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί σε 76,4 kg/day, επόμενο Σχήμα 1-6.



Σχήμα 1-5 : Παραγωγή Ε.Ι.Α. ανά κλινική, σε νοσοκομεία της Κεντρικής Μακεδονίας, [12].



Σχήμα 1-6: Μέση ημερήσια παραγωγή Ε.Ι.Α. ανά κλινική, σε νοσοκομεία της Κεντρικής Μακεδονίας, [12].

1.3. Συντονισμένος σχεδιασμός διαχείρισης ΙΑ

Από τα προηγούμενα γίνεται απόλυτα κατανοητή η επιτακτική ανάγκη συντονισμένης διαχείρισης των ιατρικών αποβλήτων. Προς τούτο, κρίνεται απαραίτητη η διαμόρφωση εθνικού σχεδιασμού με συνεμπλοκή των αρμόδιων κρατικών κεντρικών φορέων υγείας και των κρατικών και ιδιωτικών υγειονομικών μονάδων που λειτουργούν

σε όλη την ελληνική επικράτεια. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας ορίζει το πλαίσιο γύρω από το οποίο είναι δυνατό να καθιερωθεί ένα σχέδιο δράσης για την αντιμετώπιση των ΙΑ σε εθνικό επίπεδο. Συγκεκριμένα καθορίζονται τα τα επόμενα βήματα :

Βήμα 1^ο: Καθιέρωση πολιτικής δέσμευσης και υπευθυνότητας ως προς τη διαχείριση των ΙΑ

Βήμα 2^ο: Διερεύνηση όλων των πρακτικών διαχείρισης ΙΑ σε εθνικό επίπεδο

Βήμα 3^ο: Ανάπτυξη εθνικών κατευθυντήριων γραμμών

Βήμα 4^ο: Ανάπτυξη πολιτικής διαχείρισης ΙΑ σε τοπικό επίπεδο σε συνεργασία με άλλες υγειονομικές μονάδες και βιομηχανίες

Βήμα 5^ο: Νομοθέτηση κανονισμών και προτύπων σχετικά με τη διαχείριση των ΙΑ

Βήμα 6^ο: Καθιέρωση εθνικού προγράμματος εκπαίδευσης

Βήμα 7^ο: Απολογισμός και αξιολόγηση του προγράμματος κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του

Αναλυτικότερα για κάθε ένα από αυτά τα βήματα αναφέρονται στο [35: WHO (1999)], ενώ τα πρώτα βήματα για την υλοποίηση ενός εθνικού σχεδιασμού διαχείρισης ΙΑ στην Ελλάδα τέθηκαν στην [32: ΚΥΑ 37591/2031/2003].

Σύμφωνα με την ΚΥΑ 37591/2031/2003, κάθε υγειονομική μονάδα έχει την υποχρέωση να καταρτίζει έναν «Εσωτερικό Κανονισμό Διαχείρισης Επικίνδυνων ΙΑ», ο οποίος θα εγκρίνεται από το αρμόδιο Περιφερειακό Σύστημα Υγείας (ΠΕΣΥ).

Ο κανονισμός αυτός αναφέρεται:

- στη λήψη συγκεκριμένων ενεργειών, μέτρων, όρων και περιορισμών, συμπεριλαμβανομένου και σχεδίου έκτακτης ανάγκης και άλλων μέτρων ασφαλείας
- στις αρμοδιότητες και ευθύνες με τις οποίες είναι επιφορτισμένα διοικητικά πρόσωπα για την εποπτεία και τήρηση των εν λόγω μέτρων, όρων και περιορισμών

Τα πρόσωπα αυτά θα πρέπει να έχουν εξειδικευμένες γνώσεις και εμπειρία σε θέματα διαχείρισης ΕΙΑ και είναι :

- ο υπεύθυνος διοικητής της υγειονομικής μονάδας
- ο διοικητικός διευθυντής
- ο πρόεδρος επιτροπής νοσοκομειακών λοιμώξεων
- ο διευθυντής ακτινολογικού
- ο διευθυντής νοσηλευτικής υπηρεσίας
- ο διευθυντής φαρμακείου
- ο προϊστάμενος τεχνικής υπηρεσίας
- ο προϊστάμενος γραφείου προμηθειών
- ο προϊστάμενος γραφείου επιστασίας

Στη συνέχεια θα επιμείνουμε μόνο στο 3^ο βήμα, αναφορικά με τις πολιτικές διαχείρισης ΙΑ. Το αρμόδιο υπουργείο καλείται να αναζητήσει πόρους, οι οποίοι θα αξιολογούν ένα εθνικό δίκτυο υπηρεσιών διάθεσης ΙΑ, προσιτό από όλες τις υγειονομικές μονάδες. Προς τούτο αναγνωρίζονται τρεις εναλλακτικές επιλογές –η πρώτη ενδονοσοκομειακή, οι άλλες εξωνοσοκομειακές- οι οποίες αναλυτικότερα παρουσιάζονται στις επόμενες υποπαραγράφους:

1^η επιλογή: μονάδες ενδονοσοκομειακής αντιμετώπισης ΙΑ

2^η επιλογή: τοπικές ή συνεργασιακές μονάδες αντιμετώπισης ΙΑ, υποβοηθούμενες από ατομικές μονάδες για απομακρυσμένα νοσοκομεία

3^η επιλογή: αντιμετώπιση των ΙΑ σε βιομηχανίες ή δημοτικές μονάδες διαχείρισης αποβλήτων

1.3.1. Φάσεις εφαρμογής προγράμματος διαχείρισης ΙΑ

Η διαχείριση των ΙΑ ακολουθεί κάποια στάδια, από τη στιγμή παραγωγής τους μέχρι την τελική καταστροφή :

- Σωστός διαχωρισμός ΙΑ στον τόπο παραγωγής τους ανά κατηγορία : αστικά, μολυσματικά, τοξικά, ραδιενεργά, κλπ.
- Προσεκτική συλλογή των ΙΑ και τοποθέτηση σε κατάλληλους για κάθε κατηγορία υποδοχείς.
- Μεταφορά των ΙΑ από τους χώρους παραγωγής και προσωρινή αποθήκευση εντός της υγειονομικής μονάδας
- Μεταφορά των ΙΑ από το χώρο προσωρινής αποθήκευσης στις ενδονοσοκομειακές ή εξωνοσοκομειακές εγκαταστάσεις επεξεργασίας.
- Σε περίπτωση που ακολουθείται πολιτική εξωνοσοκομειακής αντιμετώπισης των ΙΑ, ακολουθεί το στάδιο της προσωρινής αποθήκευσης στο χώρο της μονάδας επεξεργασίας.
- Επεξεργασία των ΙΑ εντός και εκτός των υγειονομικών μονάδων.
- Τελική διάθεση των υπολειμμάτων των επεξεργασμένων ΙΑ σε χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων ή επικίνδυνων αποβλήτων (ΧΥΤΑ ή ΧΥΤΕΑ αντίστοιχα).

Σε επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται συνοπτικά, αλλά εμπειριστατωμένα, εφαρμοσμένες και αναδυόμενες τεχνολογίες για την αντιμετώπιση των ΙΑ, με έμφαση τη Βέλτιστη Διαθέσιμη Τεχνική της αποτέφρωσης, εφόσον το δεύτερο μέρος της εργασίας αφιερώνεται στην ενεργειακή αναβάθμιση της υπάρχουσας αποτεφρωτικής μονάδας ΙΑ του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.

1.3.2. Ενδονοσοκομειακή αντιμετώπιση

Τα πλεονεκτήματα από την ύπαρξη μίας μονάδα αντιμετώπισης ΙΑ σε κάθε υγειονομική μονάδα είναι η ευκολία διαχείρισης των ΙΑ και η ελαχιστοποίηση του κινδύνου

προσβολής της υγείας και ρύπανσης του περιβάλλοντος, καθώς τα ΙΑ παραμένουν εντός των ορίων της υγειονομικής μονάδας. Είναι κατάλληλη επιλογή όταν τα νοσοκομεία είναι αρκετά απομακρυσμένα μεταξύ τους και το οδικό δίκτυο δυσπρόσιτο.

Ωστόσο, μειωνεκτεί ως προς τα παρακάτω σημεία :

- Το κόστος επένδυσης και λειτουργίας αυτόνομων μονάδων διαχείρισης ΙΑ σε κάθε υγειονομική μονάδα καθίσταται απαγορευτικό, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν αρκετά νοσοκομεία στο εθνικό σύστημα υγείας.
- Ίσως είναι δύσκολο για τις αρμόδιες αρχές να εποπτεύσουν και ελέγξουν την απόδοση τέτοιων μικρών μονάδων. Η αδυναμία αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μη-συμμόρφωση, από μέρους των τοπικών διαχειριστών, ως προς τους κανονισμούς λειτουργίας και την προστασία του περιβάλλοντος.

1.3.3. Εξωνοσοκομειακή αντιμετώπιση

Οι άλλες δύο εναλλακτικές επιλογές, ως προς την πολιτική αντιμετώπισης των ΙΑ, εντάσσονται στη γενικότερη κατηγορία της εξωνοσοκομειακής αντιμετώπισης, η οποία μπορεί να είναι κεντρική ή αποκεντρωμένη.

Οι κεντρικές μονάδες αντιμετώπισης ΙΑ προσφέρουν τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

- Μεγαλύτερος λόγος κόστος-προς-αποδοτικότητα, λόγω οικονομιών κλίμακας
- Η εφεδρική δυναμικότητα είναι οικονομικότερη
- Μελλοντικές τροποποιήσεις ή επεκτάσεις (για παράδειγμα ενσωμάτωση νέων αντιρρυπαντικών τεχνολογιών ή ενσωμάτωση σε σύστημα ανάκτησης ενέργειας) είναι λιγότερο δαπανηρές
- Διασφάλιση αποδοτικότερης λειτουργίας σε σύγκριση με τα αποκεντρωμένα, λόγω των άμεσα διαθέσιμων ειδικευμένων τεχνικών
- Αποτελεσματικότερη τήρηση των κανονισμών αντιμετώπισης ρύπανσης και ευκολότερη συμμόρφωση με τις ελάχιστες τιμές.
- Τα νοσοκομεία δεν χρειάζεται να διαθέτουν εγκαταστάσεις και προσωπικό για την αντιμετώπιση των ΙΑ

Ως κεντρική χαρακτηρίζεται η αποτεφρωτική μονάδα ΙΑ του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α., την οποία θα δούμε αναλυτικότερα στο δεύτερο μέρος της εργασίας, υπό το πρίσμα της ενεργειακής της αναβάθμισης με δυνατότητα παραγωγής θερμότητας ή/και ηλεκτρισμού. Για το σκοπό αυτό, ακολουθεί μία εισαγωγική παράγραφος για τη φιλοσοφία της παραγωγής ενέργειας από απόβλητα.

1.4. Θερμική επεξεργασία με ανάκτηση ενέργειας

Η θερμική επεξεργασία αποβλήτων με ανάκτηση ενέργειας -Energy-from-Waste (EfW) ή Waste-to-Energy (WTE)- προτιμάται όλο και περισσότερο λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει. Είναι απολύτως φυσικό, η κοινή αποδοχή της αυξημένης

εφαρμογής της τεχνικής της αποτέφρωσης να συνοδεύεται από την απαίτηση για αποτελεσματική μείωση ή/και εκμηδενισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Έτσι, οι κανονισμοί που ορίζουν την ποιότητα των παράπλευρων προϊόντων της αποτέφρωσης (καυσαέρια, μολυσμένα ύδατα, στερεά υπολείματα) γίνονται όλο και πιο αυστηροί.

Αρχικά, οι απλοί αποτεφρωτήρες μετατρέπονταν σε πιο σύνθετες διεργασίες. Για να μπορέσουν να εναρμονιστούν με τα αυστηρά όρια εκπομπών που θέτει η νομοθεσία, κάθε νέα γενιά σταθμών αποτέφρωσης υιοθετεί νεώτερες και αποδοτικότερες λύσεις. Οι εκπομπές ρυπαντών σε σταθμούς τεχνολογίας αιχμής είναι πλέον σε πολύ χαμηλά επίπεδα, συμπεριλαμβανομένων και των διοξινών. Εάν συγκρίνουμε, [4,5] τα όρια εκπομπών για αποτεφρωτήρες αποβλήτων με εκείνα άλλων μεγάλων σταθμών καύσης, όπως ορυκτών, αέριων, υγρών και βιολογικών καυσίμων, μπορούμε να δηλώνουμε ότι τα συστήματα WTE είναι από τις καθαρότερες και πλέον αξιόπιστες πηγές ενέργειας, υπό τη μορφή της θερμότητας και της ηλεκτρικής ισχύος.

Όσον αφορά τα Αστικά Στερεά Απόβλητα (Α.Σ.Α.), η φιλοσοφία Waste-To-Energy (WTE) στοχεύει στην ικανοποίηση των παγκόσμιων προτύπων. Στην Ευρώπη η βέλτιστη λύση για το κλάσμα των Α.Σ.Α. που δεν ανακυκλώνεται ή δεν επαναχρησιμοποιείται, είναι η αποτέφρωση σε σταθμούς WTE, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και ανάκτησης ατμού, μετάλλων και άλλων φυσικών πόρων. Ο τελικός όγκος της στάχτης που διατίθεται σε υγειονομική ταφή περιορίζεται, έτσι, στο ένα δέκατο του αρχικού.

Στην ίδια φιλοσοφία μπορούν να ενταχθούν και τα επικίνδυνα ΙΑ, τα οποία σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να ανακυκλωθούν ή να επαναχρησιμοποιηθούν. Η βέλτιστη τεχνική διαχείρισής τους είναι η αποτέφρωση, καθώς με τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται, καταστρέφονται όλοι οι παθογόνοι οργανισμοί, επικίνδυνοι για τη δημόσια υγεία.

Παρόλο που μεγάλη προσοχή έχει δοθεί τις τελευταίες δεκαετίες στην αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αποτέφρωσης, το μέλλον εστιάζεται στην απόδοση των συστημάτων θερμικής επεξεργασίας. Όπως αναφέρεται και στην εργασία των [6], η μέση καθαρή απόδοση ηλεκτρικής ισχύος σε σταθμούς WTE προσεγγίζει το 18%, ενώ η αντίστοιχη θερμική απόδοση ανέρχεται στο 63%. Σε περίπτωση συμπαραγωγής, η απόδοση πλησιάζει το 43%.

Οι εγκαταστάσεις WTE είναι κάπως λιγότερο αποδοτικές από τους συμβατικούς ηλεκτροπαραγωγούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων. Αυτό οφείλεται εν μέρει στις προδιαγραφές του ειδικού εξοπλισμού για την αποτέφρωση αποβλήτων. Για παράδειγμα, μία τέτοια προδιαγραφή είναι η μέγιστη πίεση εξόδου του ατμού για την αποφυγή διάβρωσης. Επιπλέον, εξαιτίας των αυξημένων περιβαλλοντικών προδιαγραφών, απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός ελέγχου της ρύπανσης. Όσο πιο πολύπλοκα και αποτελεσματικά είναι αυτά τα συστήματα καθαρισμού και ελέγχου των ρύπων, τόσο υψηλότερες θα είναι οι ενεργειακές ανάγκες για τις ηλεκτρικές συσκευές του συστήματος,

αλλά και για τη διατήρηση της βέλτιστης λειτουργικής περιοχής της εγκατάστασης αποτέφρωσης.

Στο πρώτο αυτό μέρος της παρούσας εργασίας γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των τεχνικών που εφαρμόζονται ανά τον κόσμο, και κυρίως στην Ευρωπαϊκή Ένωση, για τη θερμική επεξεργασία με ανάκτηση ενέργειας (WTE) από Επικίνδυνα Ιατρικά Απόβλητα.

1.5. Ανακύκλιση ιατρικών αποβλήτων

Στη συνέχεια, γίνεται μία σύντομη ανασκόπηση πάνω στη διαχείριση των ΙΑ ανά τον κόσμο, κυρίως μέσα από αναφορές σε δημοσιεύσεις διεθνών επιστημονικών περιοδικών.

Αρκετοί παράγοντες του συστήματος διαχείρισης νοσοκομειακών αποβλήτων συνδέονται μεταξύ τους, και απαιτείται μία εμπειριστατωμένη ανάλυση, προκειμένου να διαπιστωθεί ο ρόλος κάθε παράγοντα μέσα στο σύστημα. Ένα τέτοιο μοντέλο, βασισμένο στη δυναμική των συστημάτων, παρουσιάζεται στην εργασία των [13].

Η δυνατότητα ανακύκλωσης πλαστικών αποβλήτων, τα οποία παράγονται από υγειονομικές μονάδες διερευνάται από τους [14], και συνοψίζεται στο επόμενο διάγραμμα ροής, Σχήμα 1-7.

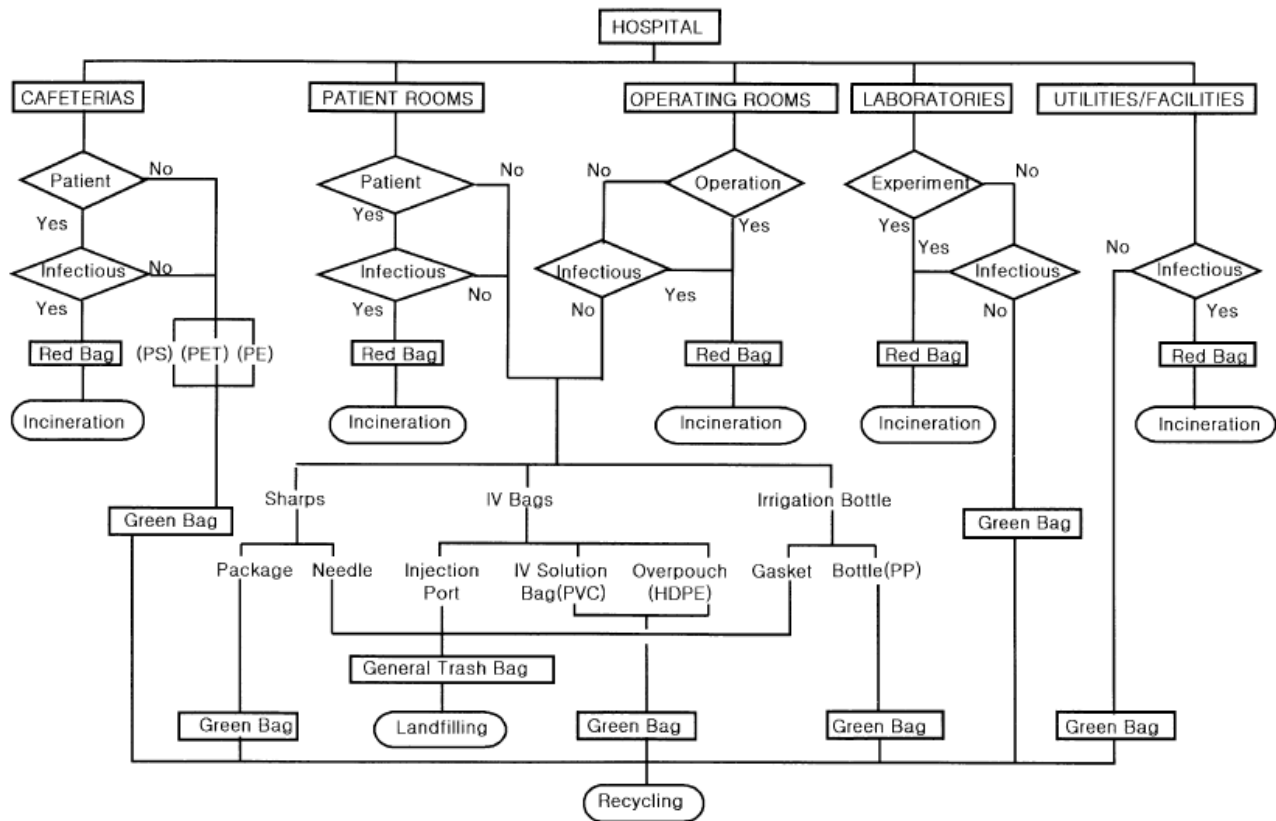
Εγκαταστάσεις, εργαστήρια, χειρουργία, δωμάτια επειγόντων περιστατικών και κυλικεία, αναγνωρίστηκαν ως οι κύριες πηγές πλαστικών αποβλήτων στα νοσοκομεία. Την πρωτιά στη δυνατότητα ανακύκλισης των πλαστικών αποβλήτων έχουν τα κυλικεία, κυρίως λόγω της περιορισμένης μόλυνσης και των απλοποιημένων διαδικασιών αγοράς πλαστικών υλικών.

Παρόλο που τα πλαστικά απόβλητα που παράγονται από τα χειρουργία και τα εργαστήρια θεωρούνται μη-ανακυκλίσιμα, κατατάσσονται στις κατηγορίες των επικίνδυνων και μολυσματικών, ορισμένα από αυτά, κυρίως όσα παράγονται στα δωμάτια εντατικής και στις υπηρεσίες των ασθενοφόρων, μπορούν να θεωρηθούν ως ανακυκλίσιμα. Η συνολική σύσταση σε πλαστικό αυτών των αποβλήτων ήταν πάνω από 30%. Συγκεκριμένα, τα πλαστικά απόβλητα από υπηρεσίες ασθενοφόρων ήταν περίπου 49%.

Η ανακύκλιση, βέβαια, πλαστικών ιατρικών αποβλήτων ίσως έχει αρνητική αποδοχή στην ελληνική κοινωνία. Αν δεχθούμε ότι τα ποσοστά που αναφέρονται στην ως άνω εργασία είναι ενδεικτικά και των ΙΑ που παράγονται στη χώρα μας, τότε με σωστή συλλογή και διαχωρισμό των πλαστικών ΙΑ είναι δυνατή η ανάκτηση σημαντικού ποσού ενέργειας, μέσω της θερμικής επεξεργασίας τους.

Η γνώση της ποσότητας και των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των υλικών είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός σχεδίου διαχείρισης στερεών αποβλήτων, πολύ περισσότερο δε όταν πρόκειται για επικίνδυνα ιατρικά απόβλητα. Η εργασία των [15], παρέχει πληροφορίες για τις ποσότητες και τις ιδιότητες των ΙΑ διαφόρων

υγειονομικών μονάδων σε αναπτυσσόμενες αλλά και βιομηχανοποιημένες χώρες. Τα χαρακτηριστικά των συστατικών των ΙΑ, όπως η πυκνότητα και η θερμογόνος δύναμη, παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα, η οποία οφείλεται κυρίως στο διαφορετικό ποσοστό υγρασίας και τις διακυμάνσεις των αποβλήτων ως προς το μέγεθος. Η μεταβλητότητα αυτή υποχρεώνει σε μετρήσεις των χαρακτηριστικών των ΙΑ, όταν σχεδιάζεται μία μονάδα επεξεργασίας ΙΑ.



Σχήμα 1-7: Διάγραμμα ροής για την ανακύκλιση πλαστικών ΙΑ. [14]

Συνεχείς είναι οι δημοσιεύσεις μελετών περιπτώσεων [16-29], πάνω στη διαχείριση ΙΑ, ιδιαίτερα από αναπτυσσόμενες χώρες. Παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον τόσο υπό τη σκοπιά της κοινωνικο-οικονομικής και περιβαλλοντικής πλευράς, ενδεικτικής της ανάπτυξης και της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου των χωρών αυτών, όσο και υπό το πρίσμα της τεχνολογικής ανάπτυξης, καθότι δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις στις οποίες προτείνονται βελτιώσεις στις ήδη υπάρχουσες τεχνικές (βλέπε για παράδειγμα [30,31]).

2. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

2.1. Εθνική Νομοθεσία

Οι νομοθετικές ρυθμίσεις που αφορούν τη διευθέτηση, διαχείριση και επεξεργασία Ιατρικών Αποβλήτων εμπεριέχονται σε νόμους και αποφάσεις, στον επόμενο Πίνακα 2-1:

Πίνακας 2-1: Σημαντικότερη Εθνική Νομοθεσία περί επικίνδυνων και ιατρικών αποβλήτων

ΥΑ ΗΠ 37591/2031/2003 - ΦΕΚ 1419/Β/1.10.2003 : "Μέτρα και όροι για τη διαχείριση ιατρικών αποβλήτων από υγειονομικές μονάδες"

ΥΑ ΗΠ 8668/2007 - ΦΕΚ 287/Β/02.03.2007 : " Έγκριση Εθνικού Σχεδιασμού Διαχείρισης Επικίνδυνων Αποβλήτων (ΕΣΔΕΑ)".

ΥΑ ΗΠ 13588/725/2006 - ΦΕΚ 383/Β/28.3.2006 : "Μέτρα όροι και περιορισμοί για την διαχείριση επικινδύνων αποβλήτων σε συμμόρφωση με τις διατάξεις της οδηγίας 91/689/ΕΟΚ «για τα επικίνδυνα απόβλητα» του Συμβουλίου της 12ης Δεκεμβρίου 1991. Αντικατάσταση της υπ' αριθμ. 19396/1546/1997 κοινή υπουργική απόφαση «Μέτρα και όροι για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων» (Β'604)"

ΥΑ 22912/1117/2005 - ΦΕΚ 759/Β/6. 6.2005 : "Μέτρα και όροι για την πρόληψη και τον περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος από την αποτέφρωση των αποβλήτων"

Υ.Α. Η.Π. 24944/1159/2006 - ΦΕΚ 791/Β/30.6.2006) : Έγκριση Γενικών Τεχνικών Προδιαγραφών για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων σύμφωνα με το άρθρο 5 (παρ. Β) της υπ αριθμ. 13588/725 κοινή υπουργική απόφαση «Μέτρα όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων κ.λπ» (383 Β) και σε συμμόρφωση με τις διατάξεις του άρθρου 7 (παρ. 1) της οδηγίας 91/156/ΕΚ του Συμβουλίου της 18ης Μαρτίου 1991»"

Υ.Α. 8668/2007 - ΦΕΚ 287/Β/2.3.2007) "Έγκριση Εθνικού Σχεδιασμού Επικίνδυνων Αποβλήτων (ΕΣΔΕΑ), σύμφωνα με το άρθρο 5 (παρ. Α) της υπ αριθμ. 13588/725 κοινή υπουργική απόφαση «Μέτρα, όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων κ.λπ.» (Β 383) και σε συμμόρφωση με τις διατάξεις του άρθρου 7 (παρ. 1) της υπ αριθμ. 91/156/ΕΚ οδηγίας του Συμβουλίου της 18ης Μαρτίου 1991. Τροποποίηση της υπ αριθμ. 13588/725/2006 κοινή υπουργική απόφαση «Μέτρα, όροι και περιορισμοί για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων κ.λπ.» (Β 383) και της υο αριθμ. 24944/1159/2006 κοινή υπουργική απόφαση «Έγκριση Γενικών Τεχνικών Προδιαγραφών για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων....κ.λπ» (Β 791)"

ΠΡΟΕΔΡΙΚΟ ΔΙΑΤΑΓΜΑ: 329/83 - ΦΕΚ 118/Α/8.9.1983 : "Ταξινόμηση, συσκευασία και επισήμανση των επικίνδυνων ουσιών σε συμμόρφωση με τις Οδηγίες του Συμβουλίου των Ε.Κ. 67/548/ΕΟΚ, 69/81/ΕΟΚ, 70/189/ΕΟΚ, 71/141/ΕΟΚ, 23/146/ΕΟΚ, 75/409/ΕΟΚ, 79/831/ΕΟΚ και της Επιτροπής των Ε.Κ. 76/907/ΕΟΚ, 79/370/ΕΟΚ"

Ν. 3835/2010 - ΦΕΚ 43/Β/16.3.2010 : "Κύρωση της τροποποίησης της Σύμβασης της Βασιλείας για τον έλεγχο των διασυνοριακών κινήσεων επικίνδυνων αποβλήτων και της επεξεργασίας τους"

2.2. Ευρωπαϊκή Νομοθεσία

Στον επόμενο Πίνακα 2-2 συνοψίζεται η σημαντικότερη Ευρωπαϊκή Νομοθεσία περί επικίνδυνων αποβλήτων :

Πίνακας 2-2: Σημαντικότερη Ευρωπαϊκή Νομοθεσία περί επικίνδυνων και ιατρικών αποβλήτων
Οδηγία 91/689/ΕΟΚ : για τα επικίνδυνα απόβλητα
Απόφαση 93/98/ΕΟΚ του Συμβουλίου : σχετικά με την σύναψη, εξ ονόματος της Κοινότητας, της σύμβασης για τον έλεγχο της διασυνοριακής διακίνησης επικίνδυνων αποβλήτων και τη διάθεσή τους (Σύμβαση της Βασιλείας)
Οδηγία 2000/76/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου : για την αποτέφρωση των αποβλήτων
Απόφαση 2001/118/ΕΚ της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων : για την τροποποίηση της Απόφασης 2000/532/ΕΚ όσον αφορά τον κατάλογο αποβλήτων (περιέχει και τα επικίνδυνα απόβλητα)
Απόφαση 2000/532/ΕΚ της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων : αφορά τον κατάλογο αποβλήτων (περιέχει και τα επικίνδυνα απόβλητα)
Απόφαση 2001/573/ΕΚ της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων : για την τροποποίηση της Απόφασης 2000/532/ΕΚ όσον αφορά τον κατάλογο αποβλήτων (περιέχει και τα επικίνδυνα απόβλητα)
Απόφαση 2006/76/ΕΚ της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων : αφορά ερωτηματολόγιο για την υλοποίηση της οδηγίας 2000/76/ΕΚ, σχετικά με την αποτέφρωση αποβλήτων
Οδηγία 2008/98/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου : για την τα απόβλητα και την ακύρωση των οδηγιών 75/439/ΕΟΚ, 91/689/ΕΟΚ και 2006/12/ΕΚ από τις 12/Δεκ/2010

Ιδιαίτερα δε, στην **Οδηγία 2008/98/ΕΚ**, εμπεριέχεται και η Φόρμουλα **R-1**, η οποία κατευθύνει πλέον τη διαχείριση των αποβλήτων κυρίως προς την χρησιμοποίησή τους ως καύσιμων ή άλλων μέσων για την παραγωγή ενέργειας. Περισσότερα επί του κριτηρίου της φόρμουλας R1 παρατίθενται σε επόμενη παράγραφο 5.4 παρακάτω, στη σελίδα 99.

Η Φόρμουλα **R-1** συνιστάται να εφαρμόζεται σε συνδυασμό με το κείμενο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής / IPPC σχετικά με τις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για την Αποτέφρωση Αποβλήτων.

2.3. Πρότυπα ΕΛΟΤ

Συμπληρωματικά προς την εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία λειτουργούν τα πρότυπα του ΕΛΟΤ, αναφερόμενα σε διαδικασίες συναφείς με τη διαχείριση ΙΑ. Τα σχετικά πρότυπα συνοψίζονται στον επόμενο Πίνακα 2-3 :

Πίνακας 2-3: Πρότυπα ΕΛΟΤ για διεργασίες που αφορούν τη διαχείριση αποβλήτων.
ΕΛΟΤ 866/97 : Βιολογικά συστήματα για τον έλεγχο αποστειρωτών και διαδικασιών αποστείρωσης
ΕΛΟΤ 1234/98 : Βιοτεχνολογία-Κριτήρια απόδοσης για αποστειρωτές ατμού και αυτόκαυστα
ΕΛΟΤ 12128/98 : Βιοτεχνολογία-Εργαστήρια για έρευνα, ανάπτυξη και αναλύσεις-Επίπεδα ασφάλειας μικροβιολογικών εργαστηρίων, περιοχές κινδύνου, κατασκευαστικές και φυσικές απαιτήσεις ασφαλείας
ΕΛΟΤ 12740/00 : Βιοτεχνολογία-Εργαστήρια για έρευνα, ανάπτυξη και αναλύσεις-Καθοδήγηση για διαχείριση, απενεργοποίηση και έλεγχο αποβλήτων

2.4. Κατηγοριοποίηση Ιατρικών Αποβλήτων

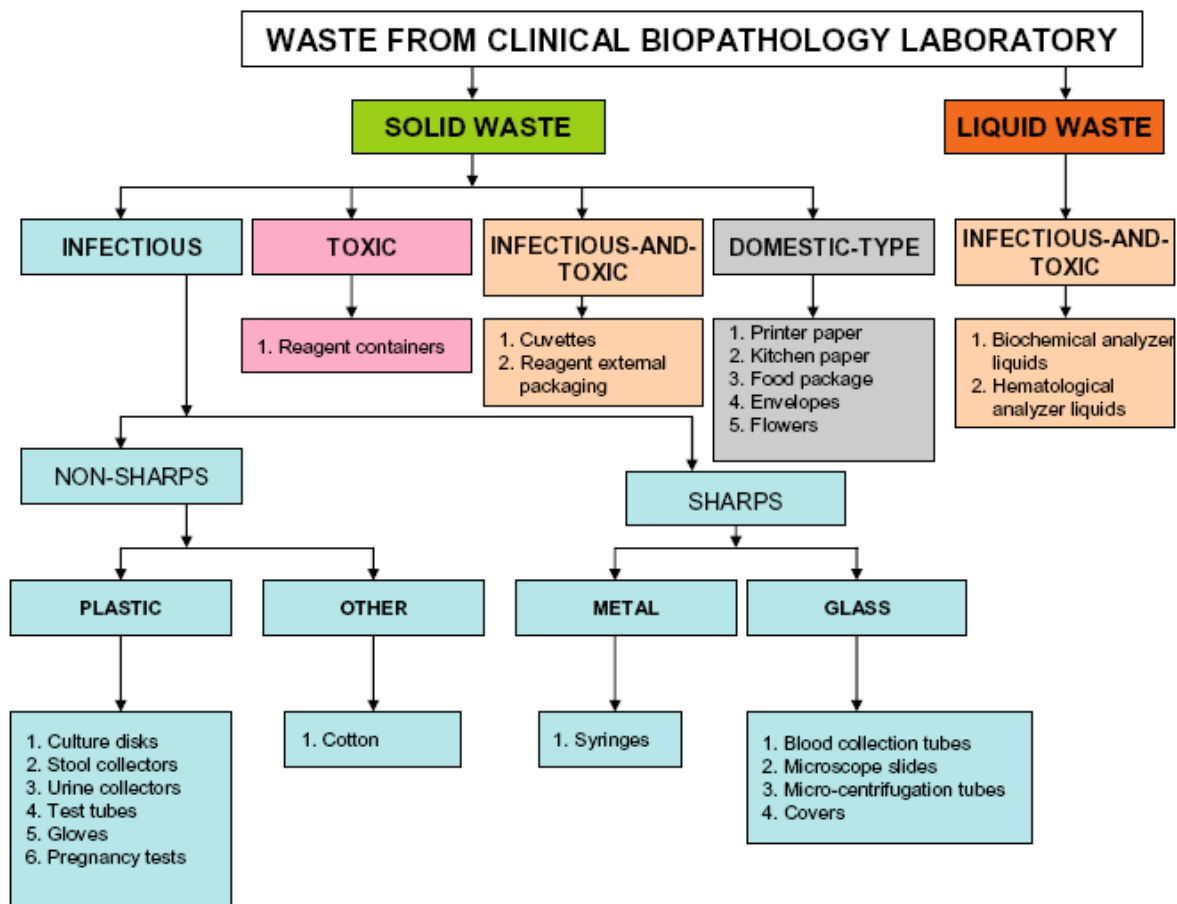
Σύμφωνα με την ΚΥΑ 37591/2031/2003 «Μέτρα και όροι για την διαχείριση ιατρικών αποβλήτων από υγειονομικές μονάδες» [32], τα ΙΑ περιλαμβάνουν τις ακόλουθες κατηγορίες:

Ως Ιατρικά Απόβλητα (ΙΑ) νοούνται εκείνα τα οποία παράγονται από Υγειονομικές Μονάδες (ΥΜ) και αναφέρονται στον κατάλογο αποβλήτων του Παραρτήματος της Απόφασης 2001/118/ΕΚ του Συμβουλίου της 16ης Ιανουαρίου 2001 των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων (ΕΕΛ 47/2001), [34]. Ο επόμενος Πίνακας 2-4 έχει ληφθεί από το εν λόγω παράρτημα :

Πίνακας 2-4: Κατάλογος κωδικών επικίνδυνων ιατρικών αποβλήτων. [34]	
18	Απόβλητα από την υγειονομική περίθαλψη ανθρώπων ή ζώων ή/και από σχετικές έρευνες (αξαιρούνται απόβλητα κουζίνας και εστιατορίων που δεν προκύπτουν άμεσα από το σύστημα υγείας)
18 01	Απόβλητα από την περιγεννητική φροντίδα, τη διάγνωση, τη θεραπεία ή την πρόληψη ασθενειών σε ανθρώπους
18 01 01	Κοπτερά εργαλεία (εκτός από το σημείο 18 01 03)
18 01 02	Μέρη και όργανα του σώματος περιλαμβανομένων σάκων αίματος και διατηρημένο αίμα (εκτός από το σημείο 18 01 03)
18 01 03*	Απόβλητα των οποίων η συλλογή και διάθεση υπόκεινται σε ειδικές απαιτήσεις σε σχέση με την πρόληψη μόλυνσης
18 01 04	Απόβλητα των οποίων η συλλογή και διάθεση δεν υπόκειται σε ειδικές απαιτήσεις σε σχέση με την πρόληψη μόλυνσης (π.χ. επίδεσμοι, γύψινα εκμαγεία, σεντόνια, πετσέτες, ρουχισμός μιας χρήσης, απορροφητικές πάνες)
18 01 06*	Χημικές ουσίες που αποτελούνται από ή περιέχουν επικίνδυνες ουσίες
18 01 07	Χημικές ουσίες άλλες από τις αναφερόμενες στο σημείο 18 01 06
18 01 08*	Κυτταροτοξικές και κυτταροστατικές φαρμακευτικές ουσίες
19 01 09	Φαρμακευτικές ουσίες άλλες από τις αναφερόμενες στο σημείο 18 01 08
18 01 10*	Αμάλαμα οδοντιατρικής
18 02	Απόβλητα από την έρευνα, διάγνωση, θεραπεία ή πρόληψη των ασθενειών που εμφανίζονται σε ζώα
18 02 01	Κοπτερά εργαλεία (εκτός από το σημείο 18 02 02)
18 02 02*	Απόβλητα των οποίων η συλλογή και διάθεση υπόκεινται σε ειδικές απαιτήσεις σε σχέση με την πρόληψη μόλυνσης

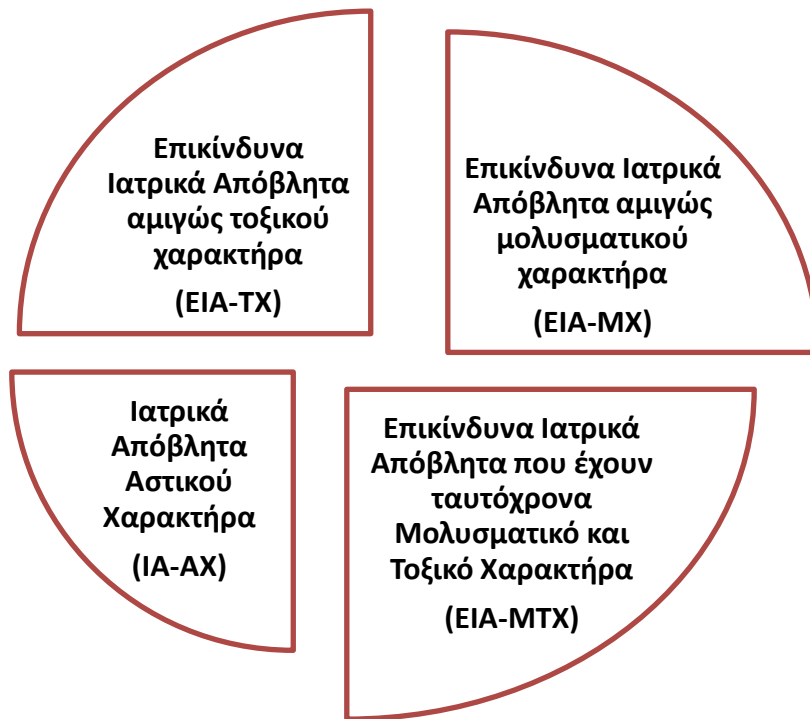
18 02 03	Άλλα απόβλητα των οποίων η συλλογή και διάθεση δεν υπόκεινται σε ειδικές απαιτήσεις σε σχέση με την πρόληψη μόλυνσης
18 02 05*	Χημικές ουσίες που αποτελούνται από ή περιέχουν επικίνδυνες ουσίες
18 02 06	Χημικές ουσίες άλλες από τις αναφερόμενες στο σημείο 18 02 05
18 02 07*	Κυτταροτοξικές και κυτταροστατικές φαρμακευτικές ουσίες
19 02 08	φαρμακευτικές ουσίες άλλες από τις αναφερόμενες στο σημείο 18 02 07

Στο επόμενο Σχήμα 2-1, αναλύονται σε διάφορες κατηγορίες τα κλινικά απόβλητα προερχόμενα από εργαστήρια κλινικής παθολογίας.



Σχήμα 2-1: Κατάταξη αποβλήτων εργαστηρίων κλινικής παθολογίας. [11].

Τα Ι.Α. κατατάσσονται με βάση τις παρακάτω κατηγορίες Σχήμα 2-2 :



Σχήμα 2-2: Γενική κατηγοριοποίηση Επικίνδυνων Ιατρικών Αποβλήτων. [32,33,34]

2.4.1. Ιατρικά Απόβλητα Αστικού Χαρακτήρα (IA-AX)

Πρόκειται για απόβλητα που προσομοιάζουν με τα οικιακά αφού προέρχονται κυρίως από τις διοικητικές και τις οικιακού τύπου εργασίες (καθαριότητα, παρασκευή φαγητού, κτλ) καθώς και από τις εργασίες συντήρησης των εγκαταστάσεων και των κτιριακών υποδομών. Ενδεικτικά αναφέρουμε :

1. Απόβλητα από την παρασκευή φαγητών, προερχόμενα από τις κουζίνες των ΥΜ
2. Απόβλητα από δραστηριότητες εστίασης και τα υπολείμματα των τροφίμων, προερχόμενα από τα τμήματα νοσηλείας των ΥΜ, εκτός από εκείνα που προέρχονται από ασθενείς, για τους οποίους ο θεράπων ιατρός έχει διαγνώσει ότι πάσχουν από ασθένεια μεταδιδόμενη με αυτά τα υπολείμματα
3. Γυαλί, χαρτί, χαρτόνι, πλαστικό, μέταλλα, υλικά συσκευασίας γενικά, ογκώδη υλικά, καθώς και μη επικίνδυνα απόβλητα, τα οποία λόγω της ποιότητάς τους εξομοιώνονται με τα οικιακά.
4. Απόβλητα παραγόμενα κατά τις εργασίες καθαρισμού κοινόχρηστων χώρων
5. Απόβλητα από ρουχισμό μιας χρήσεως εκτός αν εμπίπτουν στις περιγραφόμενες κατηγορίες των EIA-MX

6. Απόβλητα που προέρχονται από κηπουρικές εργασίες, εκτελούμενες στο περιβάλλον των ΥΜ
7. Ορθοπεδικοί γύψοι, σερβιέτες, βρεφικές πάνες και πάνες ενηλίκων, εκτός αν εμπίπτουν στις κατηγορίες των ΕΙΑ-MX
8. ΕΙΑ αμιγώς μολυσματικού χαρακτήρα, τα οποία έχουν υποστεί επιτυχώς και πλήρως τη διαδικασία της αποστείρωσης

2.4.2. Επικίνδυνα Ιατρικά Απόβλητα αμιγώς μολυσματικού χαρακτήρα (ΕΙΑ-MX)

Πρόκειται για απόβλητα των οποίων η συλλογή και η διάθεση υπόκεινται σε ειδικές απαιτήσεις σε σχέση με την πρόληψη μόλυνσης. Τα απόβλητα αυτά περιέχουν πιθανώς παθογόνους οργανισμούς (βακτήρια, ιούς, παράσιτα ή μύκητες) σε συγκεντρώσεις ή ποσότητες ικανές να προκαλέσουν ασθένειες. Γενικά, πρόκειται για απόβλητα που έχουν έρθει σε επαφή με αίμα, εκκρίσεις ή άλλα βιολογικά υγρά και μπορούν να μεταδώσουν λοιμώδη νοσήματα. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα ακόλουθα :

1. Ιστοί και όργανα ανθρώπινου σώματος
2. Όλα τα απόβλητα που προέρχονται από περιβάλλοντα, στα οποία υφίσταται κίνδυνος βιολογικής μετάδοσης διά του αέρος, καθώς και από περιβάλλοντα απομόνωσης, στα οποία βρίσκονται ασθενείς πάσχοντες από μεταδοτικό νόσημα και έχουν μολυνθεί από :
 - a. Αίμα ή άλλα βιολογικά υγρά που περιέχουν αίμα σε ποσότητα τέτοια, ώστε αυτό να είναι ορατό
 - b. Κόπρανα και ούρα στην περίπτωση συγκεκριμένου ασθενούς, στον οποίο έχει αναγνωρισθεί κλινικά από τον θεράποντα ιατρό μία νόσος που μπορεί να μεταδοθεί με αυτά τα απεκκρίματα
 - c. Σπέρμα, κολπικές εκκρίσεις, εγκεφαλονωτιαίο υγρό, αρθρικό υγρό, πλευριτικό υγρό, περιτοναϊκό υγρό, περικάρδιο υγρό ή αμνιακό υγρό

Ενδεικτικά αναφέρονται :

- Βελόνες, σύριγγες, λάμες, χειρουργικά νυστέρια
- Εργαλεία για κολποσκόπηση και τεστ-παπ
- Οφθαλμικές ράβδοι μη αποστειρωμένες
- Οφθαλμικές ράβδοι από TNT
- Σωλήνες παροχετεύσεων και διασωληνώσεων
- Καθετήρες (κύστης, φλεβών, αρτηριών, για πλευριτικές παροχετεύσεις κλπ), συνδέσεις
- Κυκλώματα για εξωσωματική κυκλοφορία

- Λεκανίτσες μιας χρήσεως για λήψη υλικού βιοψίας ενδομήτριου
- Σετ μετάγγισης
- Μολυσμένα εργαλεία από ενδοφλέβια χορήγηση ορού
- Φίλτρα διύλισης
- Γάντια μιας χρήσεως
- Υλικό μιας χρήσεως : σταγονόμετρα, δοκιμαστικοί σωλήνες, προστατευτικός ρουχισμός και μάσκες, γυαλιά, πανιά, σεντόνια, μπότες, γαλότσες, πουκαμίσες
- Ιατρικά υλικά (γάζες, ταμπόν, επίδεσμοι, τσιρότα, σωληνοειδή ράμματα)
- Σακούλες (για μεταγγίσεις, για ούρα, για παρεντερική διατροφή)
- Σετ για εγχύσεις
- Ορθοσκόπια και γαστροσκόπια
- Σωλήνες μύτης για βρογχοαναρρόφηση, για οξυγονοθεραπεία, κλπ.
- Ψήκτρες, καθετήρες για κυτταρολογική λήψη
- Ρινοσκόπια μιας χρήσεως
- Μητροσκόπια
- Δόντια και μέρη σώματος μικρού μεγέθους μη αναγνωρίσιμα
- Μικρές κλίνες για πειραματόζωα
- Κενά δοχεία εμβολίων ζωντανού αντιγόνου
- Υπολείμματα φαγητού από το δίσκο του ασθενούς

3. Επιπλέον ΕΙΑ-MX θεωρούνται τα απόβλητα που προέρχονται από κτηνιατρικές δραστηριότητες, δηλαδή από την έρευνα, διάγνωση, θεραπεία ή πρόληψη των ασθενειών που εμφανίζονται σε ζώα και των οποίων η συλλογή και διάθεση υπόκεινται σε ειδικές απαιτήσεις σε σχέση με την πρόληψη μόλυνσης. Αναφερόμαστε σε απόβλητα τα οποία :

- a. Έχουν μολυνθεί από παθογόνους για τον άνθρωπο και τα ζώα παράγοντες, όπως βελόνες, σύριγγες.
- b. Έχουν έρθει σε επαφή με οποιοδήποτε βιολογικό υγρό που εκκρίνεται ή απεκκρίνεται και γαι τα οποία υγρά έχει διαπιστωθεί κλινικά, από τον υπεύθυνο κτηνίατρο, κίνδυνος μετάδοσης νόσου, όπως αίμα, κόπρανα, ούρα
- c. Είναι σώματα νεκρών ζώων ή μέρη σώματος ζώων, ιστοί ή όργανα ζώων

2.4.3. Επικίνδυνα Ιατρικά Απόβλητα που έχουν ταυτόχρονα Μολυσματικό και Τοξικό Χαρακτήρα (ΕΙΑ-MTX)

Πρόκειται για απόβλητα που προέρχονται από Παθολογο-ανατομικά Εργαστήρια, και Τμήματα όπου γίνονται χημειοθεραπείες. Πιο συγκεκριμένα:

Πίνακας 2-5: Απόβλητα νοσοκομειακών εργαστηρίων
<p>Απόβλητα από την ανάπτυξη ερευνητικών δραστηριοτήτων και μικροβιολογικών – βιοχημικών εξετάσεων</p> <p>πλάκες, τριβλία καλλιέργειας και άλλα μέσα που χρησιμοποιούνται στη μικροβιολογία και που έχουν μολυνθεί από παθογόνους</p>
<p>Ανατομικά απόβλητα, από παθολογοανατομικά εργαστήρια</p> <p>Ιστοί, όργανα και μέρη σώματος μη αναγνωρίσιμα, πειραματόζωα</p>
<p>Απόβλητα, από παθολογικά και άλλα τμήματα όπου γίνονται χημειοθεραπείες</p> <p>χρησιμοποιούμενες συσκευασίες ορών με κυτταροστατικά φάρμακα από ασθενείς στους οποίους εφαρμόζεται χημειοθεραπεία</p>

2.4.4. Επικίνδυνα Ιατρικά Απόβλητα αμιγώς τοξικού χαρακτήρα (ΕΙΑ-TX)

Πρόκειται για τα ΙΑ που χαρακτηρίζονται με τους κωδικούς αριθμούς 18.01.06*, 18.01.08*, 18.01.10*, 18.02.05* και 18.02.07* του Ευρωπαϊκού Καταλόγου Αποβλήτων [33,34], και είναι :

Πίνακας 2-6: Επικίνδυνα Ιατρικά Απόβλητα αμιγώς τοξικού χαρακτήρα
απόβλητα που περιέχουν υδράργυρο, άλλα βαρέα μέταλλα, απικίνδυνες οργανικές ενώσεις, κλπ.
ληγμένα φάρμακα ή φάρμακα που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, συμπεριλαμβανομένων των κυτταροστατικών φαρμάκων
εξαντλημένα προσροφητικά υλικά, φίλτρα
έλαια εκροής από αντλίες κενού
μονωτικά υλικά που περιέχουν αμίαντο

ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ

3. ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

3.1. Εφαρμοσμένες τεχνικές διαχείρισης ΙΑ

Υπάρχει ένα πλήθος μεθόδων για την αντιμετώπιση και τελική διάθεση ΙΑ, η επιλογή των οποίων βασίζεται στις αρχικές χημικές και φυσικές ιδιότητες των ΙΑ, τη νομοθεσία, τη κοινή αποδοχή και το κόστος εφαρμογής. Η αποτέφρωση και η αποστείρωση αποτελούν τελευταία τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες για την καταστροφή μικροβιολογικών προϊόντων. Για χρόνια, η αποτέφρωση αποτελεί την πρώτη επιλογή διότι υλοποιείται σε χώρους εκτός των υγειονομικών μονάδων, και το τελικό προς διάθεση προϊόν της είναι η καθιζάνουσα τέφρα. Άλλες μέθοδοι, λιγότερο χρησιμοποιούμενες, αριθμούν τη χημική απολύμανση, την κονιορτοποίηση με χημική απολύμανση, την αδρανοποίηση με μικροκύματα, την αποστείρωση με ατμό, και την ιοντική ακτινοβολία. Υπάρχει τέλος, και η μέθοδος της υγειονομικής ταφής σε συνδυασμό με μία από τις προαναφερθείσες, [39].

Οι διάφοροι μέθοδοι επεξεργασίας μπορούν αποτελεσματικά να μειώσουν την επικινδυνότητα στα μολυσματικά απόβλητα της υγειονομικής περίθαλψης αλλά, συγχρόνως, προκαλούν άλλους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Παραδείγματος χάριν, η αποτέφρωση ορισμένων τύπων ΕΙΑ, ιδιαίτερα εκείνων που περιέχουν χλώριο ή βαρέα μέταλλα, μπορούν κάτω από ορισμένες συνθήκες (όπως οι ανεπαρκώς υψηλές θερμοκρασίες αποτέφρωσης και ο ανεπαρκής έλεγχος ρύπων) να απελευθερώσουν τοξικές ουσίες στην ατμόσφαιρα. Η διάθεση στο έδαφος μπορεί να οδηγήσει στη ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα, εάν ο χώρος απόθεσης είναι ανεπαρκώς σχεδιασμένος και/ή μη λειτουργικός. Στην επιλογή μιας επεξεργασίας ή μεθόδου διάθεσης για τα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης, ιδιαίτερα εάν υπάρχει κίνδυνος τοξικών εκπομπών ή άλλων επικίνδυνων συνεπειών, οι σχετικοί κίνδυνοι, όπως και η ένταξη στο γενικό πλαίσιο της στρατηγικής των αποβλήτων, πρέπει να αξιολογηθεί προσεκτικά λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές ιδιαιτερότητες.

Οι τεχνολογίες επεξεργασίας και διάθεσης ιατρικών αποβλήτων, μαζί με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 3-1 [35] :

Πίνακας 3-1: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα μεθόδων επεξεργασίας και διάθεσης

Επεξεργασία / μέθοδος διάθεσης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Περιστρεφόμενος κλίβανος	Επαρκής για όλα τα μολυσματικά απόβλητα, τα περισσότερα χημικά και φαρμακευτικά απόβλητα.	Μεγάλο κόστος επένδυσης και υψηλές λειτουργικές δαπάνες.

Πυρολυτική επεξεργασία	Απολύμανση πολύ υψηλής αποδοτικότητας. Επαρκής για όλα τα μολυσματικά απόβλητα και τα περισσότερα φαρμακευτικά και χημικά.	Ελλιπής καταστροφή των κυτοτοξικών. Σχετικά μεγάλο κόστος επένδυσης και υψηλές λειτουργικές δαπάνες.
Αποτέφρωση ενός θαλάμου	Απολύμανση καλής αποδοτικότητας. Δραστική μείωση του βάρους και όγκου των αποβλήτων. Τα υπολείμματα μπορούν να απορριφθούν σε ΧΥΤΑ. Δεν απαιτούνται ιδιαίτερα εκπαιδευμένοι χειριστές. Σχετικά χαμηλό κόστος επένδυσης και λειτουργικών δαπανών.	Σημαντικές εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων. Ανάγκη αφαίρεσης της σκουριάς και της αιθάλης. Ανεπάρκεια καταστροφής θερμικά ανθεκτικών χημικών ουσιών και φαρμάκων, όπως τα κυτοτοξικά.
Αποτεφρωτήρας τυμπάνων	Δραστική μείωση του βάρους και όγκου των αποβλήτων. Πολύ χαμηλό κόστος επένδυσης και λειτουργικών δαπανών.	Καταστρέφει μόνο 99% των μικροοργανισμών. Δεν καταστρέφει πολλές χημικές ουσίες και φαρμακευτικά είδη. Υψηλές εκπομπές καπναερίων, ιπτάμενης τέφρας, τοξικού αερίου και οσμών.
Χημική απολύμανση	Ιδιαίτερα αποδοτική απολύμανση υπό καλές συνθήκες λειτουργίας. Μερικά χημικά απολυμαντικά είναι σχετικά φτηνά. Δραστική μείωση του όγκου αποβλήτων.	Απαιτεί ιδιαίτερα καταρτισμένους τεχνικούς για τη λειτουργία της διαδικασίας. Χρησιμοποιεί επικίνδυνες ουσίες που απαιτούν σημαντικά μέτρα ασφάλειας. Ανεπαρκής για φαρμακευτικά είδη, χημικές ουσίες και μερικούς τύπους μολυσματικών αποβλήτων.
Υγρή θερμική επεξεργασία	Περιβαλλοντικά υγιής Δραστική μείωση του όγκου αποβλήτων. Σχετικά χαμηλό κόστος επένδυσης και λειτουργικών δαπανών	Οι τεμαχιστές παθαίνουν συχνές βλάβες και η λειτουργία τους είναι ανεπαρκής. Απαιτεί καταρτισμένους τεχνικούς. Ανεπαρκής για τα ανατομικά, φαρμακευτικά, και χημικά απόβλητα και τα απόβλητα που δεν είναι εύκολα ατμοπερατά.
Ακτινοβολία μικροκυμάτων	Καλή αποδοτικότητα απολύμανσης υπό καλές συνθήκες λειτουργίας. Δραστική μείωση του όγκου αποβλήτων. Περιβαλλοντικά υγιής.	Σχετικά υψηλό κόστος επένδυσης και λειτουργικών δαπανών. Πιθανά προβλήματα λειτουργίας και συντήρησης.
Ενθυλάκωση	Απλή, χαμηλού κόστους, και ασφαλής. Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στα φαρμακευτικά είδη.	Δεν συνιστάται για τα μη-αιχμηρά μολυσματικά απόβλητα.
Ασφαλής ταφή	Χαμηλό κόστος. Σχετικά ασφαλής εάν η πρόσβαση στην περιοχή είναι περιορισμένη και η φυσική διήθηση περιορισμένη.	Είναι ασφαλής μόνο εάν η πρόσβαση στην περιοχή είναι περιορισμένη και λαμβάνονται ορισμένες προφυλάξεις.

Αδρανοποίηση	Σχετικά ανέξοδη.	Μη εφαρμόσιμη στα μολυσματικά απόβλητα.
---------------------	------------------	---

Ενώ στον επόμενο Πίνακα 3-2 παρουσιάζεται η καταλληλότητα των διαφόρων μεθόδων ανά κατηγορία ιατρικών αποβλήτων

Πίνακας 3-2: Επισκόπηση των μεθόδων διάθεσης και επεξεργασίας κατάλληλων για διάφορες κατηγορίες αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης							
Τεχνολογία ή μέθοδος	Μολυσματικά απόβλητα	Ανατομικά απόβλητα	Βελόνες	Φαρμακευτικά απόβλητα	Κυτταροτοξικά απόβλητα	Χημικά απόβλητα	Ραδιενεργά απόβλητα
Περιστροφικός κλίβανος	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Χαμηλού επιπέδου μολυσματικά απόβλητα
Αποτεφρωτήρες πυρόλυσης	Ναι	Ναι	Ναι	Μικρές ποσότητες	Όχι	Μικρές ποσότητες	Χαμηλού επιπέδου μολυσμ. απ.
Αποτεφρωτήρας ενός θαλάμου	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Χαμηλού επιπέδου μολυσμ. απ.
Αποτεφρωτήρες τυμπάνων ή τούβλου	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Χημική απολύμανση	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Υγρή θερμική επεξεργασία	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Ακτινοβολία μικροκυμάτων	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Ενθυλάκωση	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι	Μικρές ποσότητες	Μικρές ποσότητες	Όχι
Ασφαλής ενταφιασμός στις εγκαταστάσεις νοσοκομείων	Ναι	Ναι	Ναι	Μικρές ποσότητες	Όχι	Μικρές ποσότητες	Όχι
Υγειονομική ταφή απορριμμάτων	Ναι	Όχι	Όχι	Μικρές ποσότητες	Όχι	Όχι	Όχι
Διάθεση στον υπόνομο	Όχι	Όχι	Όχι	Μικρές ποσότητες	Όχι	Όχι	Χαμηλού επιπέδου υγρά απόβλητα
Αδρανοποίηση	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι
Άλλες μέθοδοι				Επιστροφή ληγμένων φαρμάκων σε προμηθευτή	Επιστροφή ληγμένων φαρμάκων σε προμηθευτή	Επιστροφή αχρησιμοποίητων χημικών ουσιών σε προμηθευτή	Αποσύνθεση από την αποθήκευσή

Μία αναλυτική μελέτη πάνω στη διαχείριση και αποτέφρωση ΙΑ αποτελεί η εργασία των [43], στην οποία γίνεται μία ανασκόπηση της μέχρι τότε τεχνολογίας και διαπιστώνονται τρεις κρίσιμοι παράγοντες για την επιτυχή και περιβαλλοντικά ασφαλή αποτέφρωση των ΙΑ:

- Εγκατάσταση αποτεφρωτήρων προηγμένης τεχνολογίας,
- Σύγχρονος εξοπλισμός ελέγχου αέριων ρύπων, και
- Κατάλληλη εκπαίδευση των χειριστών των αποτεφρωτήρων.

3.2. Μη-αποτεφρωτικές μέθοδοι

3.2.1. Μικροβιακή αδρανοποίηση

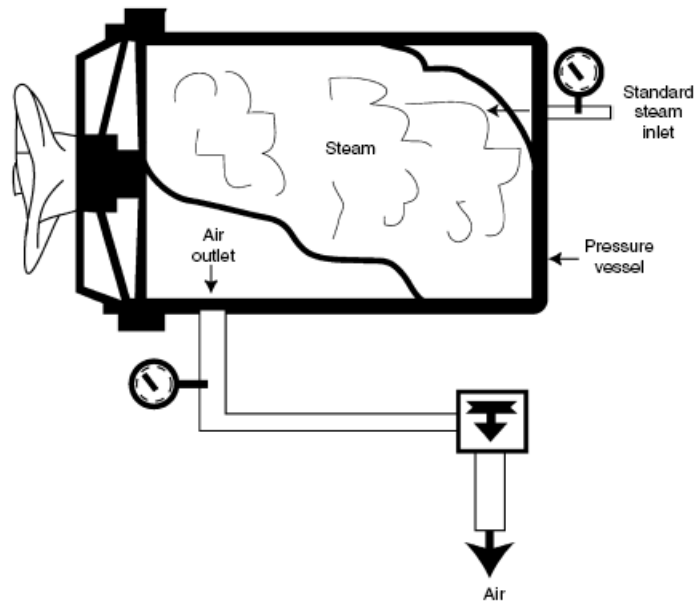
Η μικροβιακή αδρανοποίηση αναφέρεται σε εκείνες τις φυσικές ή χημικές διεργασίες, με τις οποίες οι μικροοργανισμοί καθίστανται αδύνατοι να πολλαπλασιαστούν. Τέτοιες διεργασίες είτε σκοτώνουν του παθογόνους οργανισμούς είτε τους τραυματίζουν σε τέτοι βαθμό ώστε να είναι αδύνατη η ανάρρωσή τους και συνεπώς η αύξησή τους. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυτής σε διάφορους τύπους ΙΑ με μολυσματικούς παράγοντες και παθογόνους μικροοργανισμούς έχει διερευνηθεί από την υπηρεσία ΕΡΑ των ΗΠΑ, και περισσότερες λεπτομέρειες είναι δυνατό να βρεθούν και στο βιβλίο [39].

3.2.2. Αποστείρωση ατμού ή αυτοκλίβανος (autoclaving)

Η αντιμετώπιση με αυτοκλίβανο χρησιμοποιεί την υγρασία, τη θερμότητα και την πίεση για την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών. Η αποστείρωση ατμού αναπτύχθηκε αρχικά για την αποστείρωση εξοπλισμού, όπως υαλικών φυαλών. Πλέον, αποτελεί μία μέθοδο αντιμετώπισης ΙΑ, όπως αίμα και παράγωγα του αίματος, παθολογικά απόβλητα, βελόνες, απόβλητα ζώων, ακόμη και μέσα στις υγειονομικές μονάδες, ανεξαρτήτου μεγέθους. Δεν ενδείκνυται για μέλη ανθρώπινου σώματος ή πτώματα ζώων, διότι η πυκνότητα αυτών των αποβλήτων δεν επιτρέπει επαρκή διείσδυση του ατμού αποστείρωση. Επίσης, απαγορευτική είναι η χρήση της μεθόδου για ραδιενεργά ή κυτοτοξικά απόβλητα. Αναλυτικότερα για τη μέθοδο αυτή μπορούν να αναζητηθούν στο βιβλίο [39].

Κατά την αποστείρωση ΙΑ, τα μολυσματικά απόβλητα τοποθετούνται εντός ερμητικά κλεισμένου θαλάμου, όπου εκτίθενται σε ατμό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας, για χρονικό διάστημα ικανό ώστε να καταστούν μη-μολυσματικά. Για να μπορέσει ο ατμός να εισχωρήσει στα απόβλητα, είναι απαραίτητη η πλήρης αφαίρεση του αέρα από τον θάλαμο. Η αποστείρωση προκαλείται κυρίως από τη διείσδυση του ατμού, ενώ η θερμότητα με αγωγή αποτελεί δευτερεύοντα μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι αυτοκλιβάνων : βαρυτικά συστήματα, συστήματα κενού και συστήματα απόσταξης. Στο επόμενο σχήμα εικονίζεται ένα βαρυτικό σύστημα αυτοκλιβάνου [39]:



Σχήμα 3-1: Αυτοκλιβανός βαρυτικού τύπου

Οι παρακάτω παράγοντες επηρεάζουν τη λειτουργία του αυτοκλιβάνου με ατμό, αναφορικά με την αντιμετώπιση ΙΑ :

- Η θερμοκρασία και η πίεση που επιτυγχάνεται στον αυτοκλιβάνο
- Η διείσδυση του ατμού στα απόβλητα
- Το μέγεθος του φορτίου
- Η σύνθεση του φορτίου
- Ο προσανατολισμός των αποβλήτων μέσα στον αυτοκλιβάνο

3.2.3. Χημική απολύμανση

Με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται ένας χημικός παράγοντας ικανός να καταστρέφει παθογόνους οργανισμούς. Η μέθοδος συνήθως συνδυάζεται με διαδικασίες μηχανικής καταστροφής (π.χ. τεμαχισμός) για τη μείωση των αποβλήτων σε μικρά κομμάτια και την αύξηση της επιφάνειας επαφής με τον χημικό παράγοντα. Τέτοια συστήματα είναι διαθέσιμα για μικρές δυναμικότητες, όπως σε ένα εργαστήριο, αλλά και για μεγάλες, όπως στα νοσοκομεία.

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου της χημικής απολύμανσης είναι συνάρτηση των παρακάτω παραγόντων :

- Τα χαρακτηριστικά του απολυμαντή
- Τη συγκέντρωση της δραστικής ουσίας
- Τον τύπο των μικροοργανισμών που εμπεριέχεται στα απόβλητα
- Το βαθμό της μόλυνσης
- Τα γενικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων
- Το χρόνο επαφής μεταξύ απολυμαντή και αποβλήτων

Άλλοι παράγοντες, όπως το pH, η παρουσία ηλεκτρολυτών, η απορρόφηση του απολυμαντή από μικρά μόρια ή ιόντα, μακρομόρια ή και χόμα, επιπλέον θα επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα ενός συγκεκριμένου απολυμαντή. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα διαφόρων απολυμαντών, καθώς και η καταλληλότητά τους για διάφορους μικροοργανισμούς είναι δυνατό να αναζητηθεί στο βιβλίο [39].

Γενικά, η μέθοδος της χημικής απολύμανσης είναι απλή, αν επιπλέον συνδυαστεί με τεμαχισμό των αποβλήτων, οπότε έχουμε και μείωση του όγκου τους. Βασικό μειονέκτημα είναι το σχετικά υψηλό κόστος επένδυσης και τα αυξημένα λειτουργικά έξοδα. Προβλήματα μπορούν επίσης να προκύψουν από τη μόλυνση του αριάνι (slurry), συγκέντρωση του απολυμαντή στο χώρο εργασίας (με ερεθισμό της μύτης, των ματιών και των πνευμόνων), τα επίπεδα θορύβου και βιοαέριες (bioaerosol) εκπομπές. Επιπροσθέτως, κάποια μικρόβια μπορεί να καταστούν ανθεκτικά σε συγκεκριμένους απολυμαντές, και τέλος, τα συστήματα χημικής απολύμανσης δεν παρέχουν αποστείρωση.

3.2.4. Ακτινοβολία μικροκυμάτων

Τα μικροκύματα είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα με συχνότητες μεταξύ των υπέρυθρων και των ραδιοκυμάτων. Οι περισσότεροι μικροοργανισμοί καταστρέφονται όταν εκτεθούν σε ακτινοβολία συχνότητας 2,450MHz και μήκους κύματος 12.24cm. Η υγρασία που εμπεριέχεται στα απόβλητα θερμαίνεται ταχύτατα από την ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται οι πρωτεΐνες των κυττάρων του μικροβίου και να επέρχεται τελικά η καταστροφή και αδρανοποίησή του. Η θερμοκρασία σε μία τέτοια μονάδα ξεπερνά τους 90°C. Ανάμεσα στους παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην αντιμετώπιση ΙΑ, αριθμούνται η συχνότητα και το μήκος κυματος της ακτινοβολίας, η διάρκεια έκθεσης στην ακτινοβολία, το ποσοστό υγρασίας των αποβλήτων, η θερμοκρασία της διαδικασίας και η ανάμειξη των αποβλήτων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας [39,35].

Η ακτινοβολία μικροκυμάτων αντιμετωπίζει τα περισσότερα ΙΑ, με εξαίρεση τα κυτταροτοξικά και τα ραδιενεργά. Μολυσμένα πτώματα ζώων, μέλη και όργανα ανθρώπινου σώματος, επίσης αποκλείονται από τη μέθοδο για αισθητικούς λόγους.

3.3. Αποτέφρωση Επικίνδυνων Ιατρικών Αποβλήτων

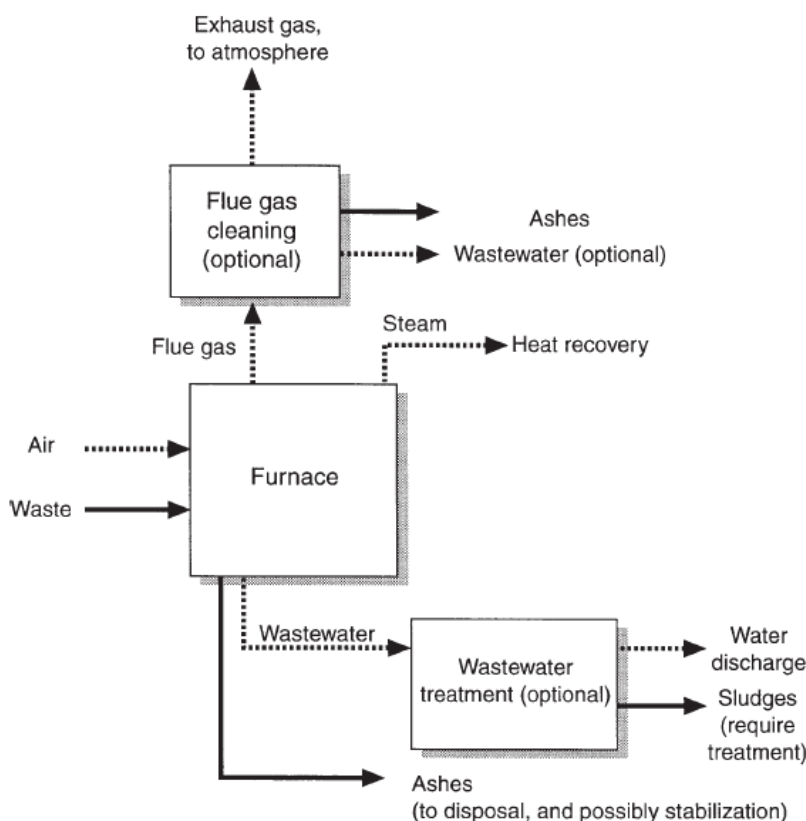
Αρκετές είναι οι μονογραφίες στις οποίες περιγράφονται αναλυτικά τόσο η επεξεργασία αποβλήτων με τη μέθοδο της αποτέφρωσης, όσο και οι τεχνικές παράμετροι που συμβάλλουν στη βέλτιστη της λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα έργα των [36], ως μία εισαγωγή στην αποτέφρωση επικίνδυνων αποβλήτων, του Niessen [37], μία εμπεριστατωμένη μελέτη για τις διεργασίες καύσης και αποτέφρωσης, του Brunner [38] το εγχειρίδιο συστημάτων αποτέφρωσης, του Pichtel [39] γενικά για πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων παντός τύπου, των Rester και Harrison [40] στοχευμένο στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αποτέφρωσης, κ.α.

Ίσως, ο πληρέστερος οδηγός πάνω στην τεχνολογία της αποτέφρωσης των αποβλήτων είναι ο IPPC BAT Waste Incineration, υπό την εποπτεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Σε αυτόν περιγράφονται αναλυτικά όλες οι τεχνικές αποτέφρωσης για κάθε είδους απόβλητα, οι διαθέσιμες τεχνολογίες για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης συστημάτων αποτέφρωσης, για την αντιμετώπιση των εκπεμπόμενων ρύπων και στερεών υπολειμμάτων, την ανάκτηση ενέργειας και εκμετάλλευσής της, παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για το βέλτιστο σχεδιασμό μιας μονάδας αποτέφρωσης αποβλήτων, καθώς και παραδείγματα εφαρμογών.

Η αποτέφρωση είναι μια ξηρή διαδικασία οξειδωσης που λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες, και έχει ως αποτέλεσμα, με την υποβίβαση οργανικών και εύφλεκτων αποβλήτων σε ανόργανα και μη-εύφλεκτα, τη σημαντική μείωση του όγκου και του βάρους των αποβλήτων. Η μείωση όγκου μπορεί να φτάσει και το 95%, ανάλογα με τη σύνθεση και το βαθμό επανάκτησης των υλικών από την τέφρα. Η αποτέφρωση μετατρέπει τα απόβλητα σε καθιζάνουσα τέφρα, σε παραγόμενα αέρια, σε απομονωμένα σωματίδια, εκλύοντας ταυτόχρονα θερμότητα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η διαδικασία επιλέγεται συνήθως για την επεξεργασία αποβλήτων, τα οποία δεν μπορούν να ανακυκλωθούν, επαναχρησιμοποιηθούν ή διατεθούν σε χωματερές. Τέτοια είναι τα επικίνδυνα κλινικά απόβλητα, τα οποία περιέχουν παθογόνα σωματίδια και τοξίνες, και μπορούν να καταστραφούν μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες. Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής της επεξεργασίας αποτέφρωσης απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 3-2.

Η καύση των οργανικών ενώσεων παράγει κυρίως αέριες εκπομπές, όπως ατμό, διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια αζώτου καθώς και ορισμένες τοξικές ουσίες (π.χ. μέταλλα, αλογονούχα οξέα), αλλά και σωματίδια σκόνης και στερεά υπολείμματα σε μορφή τέφρας. Σε περίπτωση που ο έλεγχος των συνθηκών καύσης δεν είναι επαρκής, είναι δυνατό να παραχθούν τοξικά μονοξίδια του άνθρακα. Τοξικές ουσίες εμπεριέχονται επίσης και στην τέφρα και τα υγρά απόβλητα που παράγονται, και τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν για να αποφευχθούν δυσμενή αποτελέσματα για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία.

Οι περισσότεροι σύγχρονοι μεγάλης κλίμακας αποτεφρωτήρες περιλαμβάνουν εγκαταστάσεις ανάκτησης ενέργειας. Σε χώρες με κρύο κλίμα, η παραγωγή ατμού ή/και ζεστού νερού από την ανάκτηση θερμότητας σε αποτεφρωτήρες χρησιμοποιείται για τις ανάγκες τηλεθέρμανσης αστικών περιοχών. Σε θερμότερες χώρες, ο παραγόμενος ατμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η θερμότητα που ανακτάται από μικρούς αποτεφρωτήρες νοσοκομείων χρησιμοποιείται συνήθως για την προθέρμανση των αποβλήτων που πρόκειται να αποτεφρωθούν.



Σχήμα 3-2: Διάγραμμα ροής διεργασίας αποτέφρωσης. [35]

3.3.1. Απαιτούμενα χαρακτηριστικά αποβλήτων

Για να είναι εφικτή η αποτέφρωση των αποβλήτων θα πρέπει η θερμική τους αξία να φθάνει τουλάχιστον τα 2,000 kcal/kg (8,370 kJ/kg). Για παράδειγμα, η θερμική αξία των μολυσματικών αποβλήτων υπερβαίνει τις 4,000 kcal/kg. Τα χαρακτηριστικά εκείνα που καθιστούν τα απόβλητα κατάλληλα για αποτέφρωση, καθώς και υλικά ακατάλληλα, παρατίθεται στον επόμενο Πίνακα 3-3 [35]

Πίνακας 3-3: Απόβλητα κατάλληλα και μη για αποτέφρωση

Χαρακτηριστικά αποβλήτων κατάλληλων προς αποτέφρωση
<ul style="list-style-type: none"> • Κατώτερη θερμογόνος δύναμη: πάνω από 2,000 kcal/kg (8,370 kJ/kg) για μονοβάθμιους αποτεφρωτήρες, και πάνω από 3,500 kcal/kg (14,640 kJ/kg) για πυρολιτικούς δι-βάθμιους αποτεφρωτήρες • Περιεκτικότητα του καύσιμου υλικού πάνω από 60%, • Περιεκτικότητα άφλεκτων στερεών κάτω από 5%, • Περιεκτικότητα των άφλεκτων υπολοίπων κάτω από 20%, • Σχετική υγρασία κάτω από 30%

Απόβλητα ακατάλληλα για αποτέφρωση

- Δοχεία αερίων υπό πίεση.
- Χημικά αντιδραστήρια .
- Φωτογραφικά ή ακτινογραφικά απόβλητα.
- Αλογονημένα πλαστικά, όπως το πολυβινυλικό χλωρίδιο (PVC).
- Απόβλητα με υδράργυρο ή κάδμιο, όπως τα σπασμένα θερμομέτρα και οι χρησιμοποιημένες μπαταρίες.
- Σφραγισμένα φιαλίδια ή φιαλίδια που περιέχουν βαρέα μέταλλα.

3.3.2. Αξιολόγηση παραμέτρων σχεδιασμού αποτεφρωτήρων ιατρικών αποβλήτων

Κατά την επιλογή της τεχνολογίας αποτέφρωσης, μία σειρά από παραμέτρους θα πρέπει να συνεκτιμηθούν, Πίνακες 3-4, 3-5 [41]. Η λεπτομερής ανάλυση των συστατικών των αποβλήτων είναι ουσιαστική ώστε να τηρηθούν οι προδιαγραφές της νομοθεσίας και ο σχεδιασμός να είναι αποδεκτός. Οι πληροφορίες που απαιτούνται, πέρα από τις εκτιμήσεις παραγωγής ΙΑ στο μέλλον, αφορούν τον επικείμενο κίνδυνο, το θερμικό περιεχόμενο, τις εκπομπές και τα στερεά υπόλοιπα.

Πρωταρχικής σημασίας είναι ο προσδιορισμός των επιπέδων επικινδυνότητας των αποβλήτων. Τα οργανικά υλικά καταστρέφονται καλύτερα μέσω διεργασιών καύσης, σχηματίζοντας διοξείδιο του άνθρακα, νερό και κάποια τοξικά αέρια. Τα ανόργανα, συμπεριλαμβανομένων των τοξικών αερίων, απομακρύνονται με τη βοήθεια συσκευών ελέγχου ρυπαντικών ουσιών και καταλήγουν στα υπολείμματα της τέφρας. Ο βαθμός επικινδυνότητας των αποβλήτων είναι αυτός που καθορίζει το σχεδιασμό του αποτεφρωτήρα και τον απαιτούμενο εξοπλισμό ελέγχου ρυπαντικών ουσιών για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων. Όλα τα υλικά τα οποία εγκαταλείπουν το θάλαμο καύσης μπορούν να ελεγχθούν και περιοριστούν σε αποδεκτά όρια μέσω εξοπλισμού ελέγχου ρύπων τοποθετημένου στην κατάντη της όλης διάταξης.

Πίνακας 3-4. Παράγοντες που αφορούν την παραγωγή ΙΑ

σημερινή δυναμική παραγωγής αποβλήτων
τύπος κλινικών αποβλήτων
εκτιμώμενη παραγωγή αποβλήτων στο μέλλον
ημερήσια παραγωγή καύσιμων αποβλήτων
οι παράμετροι καταλληλότητας των αποβλήτων προς αποτέφρωση

Πίνακας 3-5. Κρίσιμοι παράγοντες που αφορούν την επιλογή της αποτέφρωσης των ΙΑ

αναγνώριση των εκπεμπόμενων ρύπων, ώστε να τηρούνται οι προδιαγραφές που θέτει η νομοθεσία
το θερμικό περιεχόμενο των αποβλήτων και τα φυσικά χαρακτηριστικά αυτών
διακρίβωση των χαρακτηριστικών των προϊόντων της καύσης, για την επιλογή κατάλληλου συστήματος ελέγχου ρύπων

Το θερμικό περιεχόμενο των αποβλήτων είναι ένα άλλο θέμα προς συζήτηση. Μετράται σε BTUs ή Joules (J), και σχετίζεται με το ποσό θερμότητας που απελευθερώνουν τα απόβλητα κατά την καύση τους. Η σύσταση των αποβλήτων επηρεάζει τη θερμική αξία : απόβλητα με περισσότερο χαρτί και πλαστικό έχουν υψηλότερη θερμική αξία από εκείνα με περισσότερο γυαλί και μέταλλα. Η θερμική αξία επηρεάζει το σχεδιασμό του αποτεφρωτήρα στον προσδιορισμό της ποσότητας συμπληρωματικού καυσίμου και οξυγόνου, προκειμένου να επιτευχθούν οι σωστές θερμοκρασίες καύσης, καθώς και στον καθορισμό του μεγέθους των θαλάμων καύσης. Το νερό έχει αρνητική επίδραση στο θερμικό περιεχόμενο των αποβλήτων.

Με γνωστή πλέον, τη σύσταση των αποβλήτων, είναι εφικτός ο υπολογισμός των εκπομπών της αποτέφρωσης, και κατά συνέπεια, μπορούν να ληφθούν αποφάσεις για τον τύπο και το μέγεθος τόσο του εξοπλισμού ελέγχου ρύπων όσο και των θαλάμων καύσης. Σημαντική για τη σύσταση των αποβλήτων είναι η γνώση της αναλογίας στερεών και υγρών στη μάζα των αποβλήτων, διότι επηρεάζει το σύστημα τροφοδοσίας του αποτεφρωτήρα. Απόβλητα με μεγάλη συμμετοχή στερεών υλικών μεταχειρίζονται σε συνεχή βάση, ενώ η παρουσία αρκετών υγρών απαιτεί την ατμοποίησή τους και συμπληρωματικό καύσιμο.

Ο ρυθμός τροφοδοσίας είναι ακόμη μία παράμετρος, η οποία επιδρά στο χρόνο παραμονής και έκθεσης των αποβλήτων στις υψηλές θερμοκρασίες του αποτεφρωτήρα. Επαρκής χρόνος παραμονής θεωρείται κρίσιμος για την καταστροφή παθογόνων και άλλων οργανικών ουσιών. Ο ρυθμός τροφοδοσίας προσαρμόζεται ανάλογα με τη θερμική αξία των αποβλήτων, ώστε να διασφαλίζονται οι σωστές θερμοκρασίες καύσης και τελικά καθαρότερες εκπομπές.

Η θερμοκρασία καύσης είναι συνάρτηση του ρυθμού τροφοδοσίας αποβλήτων και της θερμικής αξίας αυτών. Για την καταστροφή των παθογόνων ουσιών απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες. Σε υψηλές θερμοκρασίες, όμως, η τέφρα γίνεται μαλακή και ελαφριά και μετακινείται προς τα κρύα μέρη του αποτεφρωτήρα, όπου σκληραίνει σχηματίζοντας υαλώδες έλκυσμα. Αυτό το έλκυσμα συχνά φράσσει τις εισόδους αέρα, με ότι αυτό συνεπάγεται. Μία τεχνολογία, λοιπόν, αποτέφρωσης θα πρέπει να αποτρέπει την εμφάνιση

αυτού του φαινομένου με απομόνωση των υπομονάδων, όπου συγκεντρώνεται η τέφρα, από εκείνες με υψηλές θερμοκρασίες.

3.4. Τύποι αποτεφρωτήρων ιατρικών αποβλήτων

Οι αποτεφρωτήρες ποικίλουν από εξαιρετικά περίπλοκες εγκαταστάσεις, που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, έως πολύ βασικές μονάδες καύσης που λειτουργούν σε πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες. Όλοι οι τύποι αποτεφρωτήρων, εφόσον χρησιμοποιούνται σωστά, εξαλείφουν τα παθογόνα από τα απόβλητα και υποβιβάζουν τα απόβλητα σε τέφρα. Εντούτοις, ορισμένοι τύποι αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης, π.χ. φαρμακευτικά είδη ή διάφορες χημικές ουσίες, απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες για την πλήρη καταστροφή. Οι λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες και ο καθαρισμός των αερίων εξάτμισης περιορίζουν την ατμοσφαιρική ρύπανση και τις μυρωδιές που παράγονται από τη διαδικασία της αποτέφρωσης.

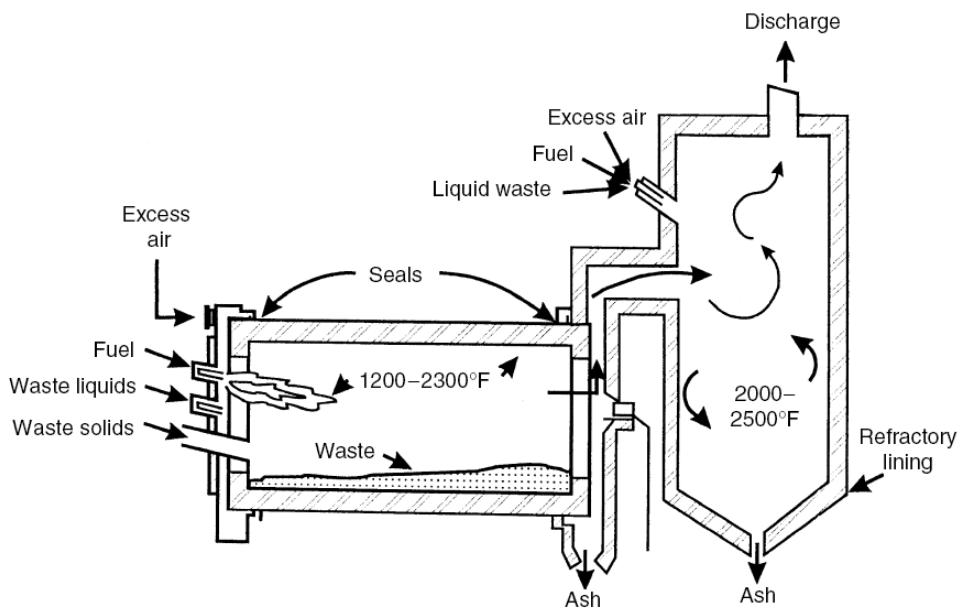
Οι αποτεφρωτήρες που είναι σχεδιασμένοι ειδικά για την επεξεργασία των αποβλήτων υγειονομικής περίθαλψης διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, Πίνακας 3-6, [39] :

Πίνακας 3-6. Καταλληλότεροι αποτεφρωτήρες για ΙΑ
Περιστρεφόμενοι κλίβανοι
Πολυθαλάμιοι αποτεφρωτήρες
Αποτεφρωτήρες ελεγχόμενου αέρα

Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 900 C⁰ και 1200 C⁰. Χαμηλού κόστους και υψηλής θερμοκρασίας αποτεφρωτήρες είναι αυτήν την περίοδο υπό ανάπτυξη.

3.4.1. Περιστρεφόμενοι κλίβανοι

Ένας περιστρεφόμενος κλίβανος, Σχήμα 3-3, [39], κατασκευάζεται με περιστρεφόμενο θάλαμο καύσης και έναν προ-θάλαμο ανάφλεξης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένα για την αποτέφρωση χημικών αποβλήτων, αλλά και ως τοπικός αποτεφρωτήρας κλινικών αποβλήτων. Η περιστροφική κίνηση προσδίδει κινητικότητα στα απόβλητα ώστε να αναμιγνύονται ευκολότερα με τον αέρα κατά τη διάρκεια της καύσης.



Σχήμα 3-3: Αποτεφρωτήρας περιστρεφόμενης κλιβάνου. [39]

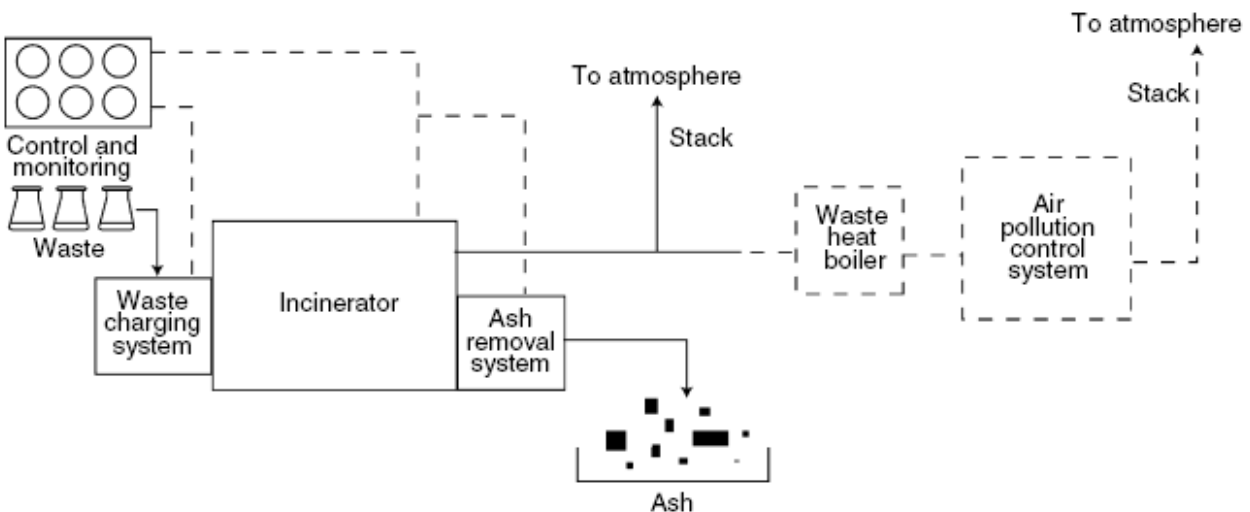
Τα κύρια χαρακτηριστικά των περιστρεφόμενων κλιβάνων συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 3-7, [35].

Πίνακας 3-7: Χαρακτηριστικά περιστρεφόμενων κλιβάνων.

<p>Επαρκής για τις ακόλουθες κατηγορίες αποβλήτων</p> <ul style="list-style-type: none"> • Μολυσματικά (συμπεριλαμβανομένων των αιχμηρών) και παθολογικά απόβλητα. • Όλα τα χημικά και φαρμακευτικά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των κυτταροτοξικών αποβλήτων
<p>Ανεπαρκής για τα ακόλουθα απόβλητα</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ακίνδυνα απόβλητα υγειονομικής περίθαλψης • Ραδιενεργά απόβλητα • η επεξεργασία δεν επηρεάζει τις ραδιενεργές ιδιότητες και ενέχει κίνδυνο διασποράς
<p>Απόβλητα που δεν πρέπει να αποτεφρωθούν</p> <ul style="list-style-type: none"> • φιαλίδια υπό πίεση • μπορεί να εκραγούν κατά τη διάρκεια της αποτέφρωσης και να προκαλέσουν ζημιά στον εξοπλισμό. • Απόβλητα με υψηλή περιεκτικότητα σε βαρέα μέταλλα - • η αποτέφρωση θα προκαλέσει την εκπομπή των τοξικών μετάλλων (π.χ. μόλυβδος, κάδμιο, υδράργυρος) στην ατμόσφαιρα
<p>Θερμοκρασία αποτέφρωσης:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1200 °C – 1600 °C, η οποία επιτρέπει την αποσύνθεση σε πολύ επίμονες χημικές ουσίες όπως PCBs

<p>Δυναμικότητα αποτεφρωτήρων:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Διαθέσιμο εύρος χωρητικότητας : 0,5 - 3 τόνους/ώρα
<p>Εξοπλισμός καθαρισμού καυσαερίων και επεξεργασίας τέφρας:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Απαραίτητος, καθώς η αποτέφρωση των χημικών αποβλήτων παράγει αέρια και τέφρες οι οποίες μπορεί να είναι επιβαρυνμένες με τοξικές χημικές ουσίες.
<p>Πρόσθετες παρατηρήσεις:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Οι δαπάνες εξοπλισμού και λειτουργίας είναι υψηλές, καθώς και η κατανάλωση ενέργειας. Τα απόβλητα και τα υποπροϊόντα αποτέφρωσης είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά, και η πυρίμαχη ύλη της επένδυσης του κλιβάνου πρέπει συχνά να επισκευάζεται ή να αντικαθίσταται. Επιβάλλεται να υπάρχει κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό.

Ο άξονας ενός περιστρεφόμενου κλιβάνου είναι υπό κλίση κατά μία μικρή γωνία ως προς την κατακόρυφο (3-5% κλίση). Ο κλιβανος περιστρέφεται με 2 έως 5 στροφές ανά λεπτό και εφοδιάζεται με απόβλητα από την κορυφή. Οι τέφρες εκκενώνονται στο κατώτατο μέρος του κλιβάνου. Τα αέρια που παράγονται στον κλιβανο θερμαίνονται σε υψηλές θερμοκρασίες για να καούν οι οργανικές ενώσεις στον προ-θάλαμο ανάφλεξης, και έχουν χαρακτηριστικό χρόνο παραμονής 2 δευτερολέπτων.



Σχήμα 3-4: Κύρια μέρη συστήματος αποτέφρωσης ΙΑ. [39]

Λόγω της περιστροφικής κίνησης επιτυγχάνεται τυρβώδης ροή και τέλεια ανάμειξη των αποβλήτων, επιτρέποντας τη συνεχή λειτουργία των περιστρεφόμενων κλιβάνων. Επιπλέον, είναι προσαρμόσιμοι σε μεγάλη ποικιλία συσκευών φόρτωσης. Στους επόμενους Πίνακες 3-8, 3-9, [39], συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των περιστρεφόμενων κλιβάνων :

Πίνακας 3-8: Πλεονεκτήματα περιστρεφόμενων κλιβάνων

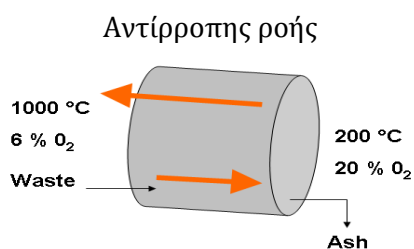
Κατάλληλος για πολλούς τύπους αποβλήτων (υγρά, ασβεστοειδή, λύματα, στερεά)
Αποτελεσματική ανάμιξη αποβλήτων προς καύση
Πλήθος διαθέσιμων τεχνικών τροφοδοσίας
Ελεγχόμενος χρόνος παραμονής κατά την καύση εντός του κλιβάνου
Ελάχιστη προεργασία αποβλήτων

Πίνακας 3-9. Μειονεκτήματα περιστρεφόμενων κλιβάνων

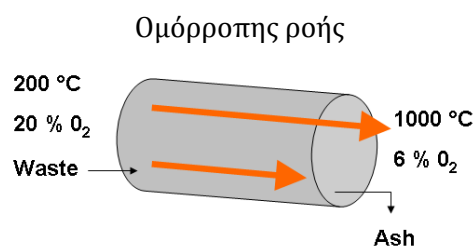
Υψηλό κόστος επένδυσης
Σημαντικά κόστη συντήρησης
Απαιτείται θάλαμος μετάκαυσης για την καταστροφή των πτητικών συστατικών
Καταστροφή επενδυτικού υλικού λόγω φθοράς με στερεά αντικείμενα
Καταστροφή των παρεμβυσμάτων του κλιβάνου
Υψηλό ποσοστό σωματιδίων μεταφέρεται στο θάλαμο μετάκαυσης
Δύσκολος ο έλεγχος των συνθηκών κατά μήκος του κλιβάνου
Σημαντική παραγωγή τέφρας

3.4.2. Τύποι περιστρεφόμενων κλιβάνων κατάλληλοι για ΙΑ

Διακρίνουμε δύο κύριους τύπους περιστρεφόμενων κλιβάνων για αποτέφρωση ΙΑ, ανάλογα με τη φορά ροής του αέρα και τη φορά κίνησης των αποβλήτων [http://www.winderickx.pl/en/rotary_kiln_incinerator.php]:



Σχήμα 3-5: Περιστρεφόμενος κλιβανός αντίρροπης ροής



Σχήμα 3-6: Περιστρεφόμενος κλιβανός ομόρροπης ροής

Αντίρροπης ροής

Τα καυσαέρια ρέουν προς την αντίθετη κατεύθυνση από εκείνη της ροής των αποβλήτων. Τα στερεά εξαιτίας της βαρύτητας και της περιστροφικής κίνησης κινούνται από το ψηλότερο στο χαμηλότερο άκρο της κλιβάνου. Ο εισερχόμενος αέρας είναι ψυχρός και περιέχει το μέγιστο ποσοστό οξυγόνου (21%). Καθώς, λοιπόν, ρέει προς το εμπρόσθιο μέρος της κλιβάνου, θερμαίνεται και σταδιακά χάνει οξυγόνο, κατά την καύση των αποβλήτων. Τα καυσαέρια που εξέρχονται της κλιβάνου έχουν θερμοκρασία 1,000°C και περιέχουν λιγιστό οξυγόνο (6%).

Τα εισερχόμενα απόβλητα είναι ψυχρά και όταν έρχονται σε επαφή με τα εξερχόμενα καυσαέρια υφίστανται αρχικά αφύγρανση της περιεχόμενης σε αυτά υγρασίας και στη συνέχεια τήξη των συστατικών τους. Ακολουθώντας, ο νέος αέρας, πλούσιος σε οξυγόνο, βοηθά δραστικά στην καύση των αποβλήτων ανεβάζοντας τη θερμοκρασία στους 1,200°C. Οι τέφρες που απομένουν από την καύση ψύχονται από τον νεοεισερχόμενο αέρα.

Αυτός ο τύπος περιστρεφόμενης κλιβάνου επιτρέπει καλύτερη ανάμειξη των αποβλήτων με τον αέρα, λόγω της έντονης τύρβης που επιτυγχάνει. Προκειμένου να είναι ομοιόμορφος ο χρόνος παραμονής των αποβλήτων εντός της κλιβάνου, η κλίβανος περιστρέφεται πιο αργά από τον τύπο της ομόρροπης ροής, με αποτέλεσμα να παράγεται λιγότερη ποσότητα ιπτάμενης τέφρας.

Ομόρροπης ροής

Ο εισερχόμενος αέρας και τα καυσαέρια ρέουν κατά την αυτή φορά με τη διεύθυνση ροής των αποβλήτων. Τα στερεά εξαιτίας της βαρύτητας και της περιστροφικής κίνησης κινούνται από το ψηλότερο στο χαμηλότερο άκρο της κλιβάνου. Ο εισερχόμενος αέρας είναι κρύος και έχει τη μέγιστη περιεκτικότητα σε οξυγόνο (21%). Καθώς ρέει προς το πίσω μέρος της κλιβάνου, ο αέρας θερμαίνεται και σταδιακά μειώνεται η περισσεια οξυγόνου λόγω της καύσης με τα απόβλητα. Τα εξερχόμενα καυσαέρια περιέχουν λιγιστό οξυγόνο (6%) και έχουν θερμοκρασία περί τους 1,000°C.


Τα εισερχόμενα απόβλητα είναι κρύα και συναντώνται με τον αέρα χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η ενίσχυση της καύσης με πρόσθετο καύσιμο. Στο πίσω (χαμηλότερο) μέρος της κλιβάνου τα στερεά δεν περιέχουν πλέον ρευστές ουσίες και τα αέρια που οδηγούνται τώρα στη ζώνη μετάκαυσης χρειάζεται να θερμανθούν στους 1,200°C με ενισχυμένη καύση.

Οι εξερχόμενες τέφρες δεν ψύχονται από τον εισερχόμενο αέρα, όπως συμβαίνει στην αντίρροπης ροής περιστρεφόμενη κλίβανο, και ο χαμηλής περιεκτικότητας σε οξυγόνο αέρας δεν βοηθά την τέλεια καύση τους. Η υψηλή θερμοκρασία που επικρατεί στη ζώνη απομάκρυνσης της τέφρας (1,000°C) μπορεί να προκαλέσει υαλωποίηση της τέφρας και δυσκολεύει την απομάκρυνσή της.

Λόγω της ομόρροπης ροής αποβλήτων και αέρα, η τύρβη που επιτυγχάνεται είναι χαμηλή και έτσι, απαιτείται μεγαλύτερο μήκος κλιβάνου για την επιτυχέστερη επαφή των παραγόντων της καύσης. Επιπλέον, για να διατηρείται άσβεστη η καύση, η κλίβανος πρέπει να περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα από τον αντίστοιχο τύπο αντίρροπης ροής, με αποτέλεσμα να παράγεται μεγαλύτερη ποσότητα ιπτάμενης τέφρας.

Σύγκριση των δύο τύπων

Στον επόμενο Πίνακα 3-10 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των δύο τύπων περιστρεφόμενης κλιβάνου :

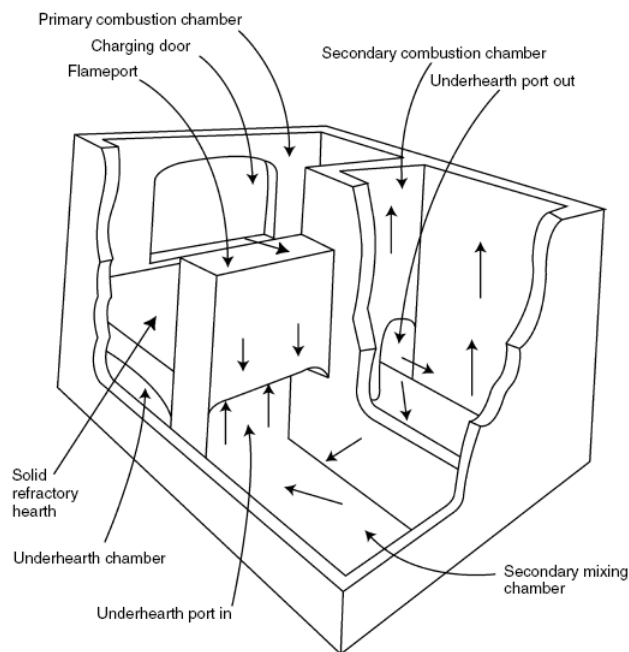
Πίνακας 3-10: Χαρακτηριστικά τύπων περιστρεφόμενου κλιβάνου		
Χαρακτηριστικά	Αντίρροπης ροής	Ομόρροπης ροής
Δυναμικότητα	1000 kg/h	1000 kg/h
Θερμοκρασία εισόδου αποβλήτων	1000 °C	200 °C
Ποσοστό οξυγόνου κατά την είσοδο των αποβλήτων	6%	20%
Χρόνος παραμονής αποβλήτων	>2h	>2h
Κατωτέρα τέφρα		
Ποσοστό άκαυστου άνθρακα στην κατωτέρα τέφρα	<0.5%	>2%
Θερμοκρασία κατωτέρας τέφρας	200 C	1000 C
Μείωση μάζας (%)	>85%	>75%
Κατανάλωση ορυκτών καυσίμων για ενίσχυση του σταδίου μετάκαυσης	0 kg/h	>100 kg/h
Ποσότητα παραγόμενης ιπτάμενης τέφρας	750 mg/Nm ³	1500 mg/Nm ³

Από τα δεδομένα του πίνακα και το κείμενο που προηγήθηκε γίνεται φανερό η υπεροχή της περιστρεφόμενης κλιβάνου αντίρροπης ροής έναντι της ομόρροπης ροής. Πάραυτα, κατασκευαστικές δυσκολίες, οι οποίες σχετίζονται με το σχεδιασμό της πυράντοχης θύρας εισόδου της κλιβάνου, η οποία δέχεται έντονες θερμοκρασιακές

βαθμίδες, έχουν δώσει μεγαλύτερη ώθηση στην κυκλοφορία της ομόροπης περιστρεφόμενης κλιβάνου.

3.4.3. Πολυθαλάμιοι αποτεφρωτήρες

Έχουν χρησιμοποιηθεί για δεκαετίες από υγειονομικές μονάδες για την καταστροφή μολυσματικών αποβλήτων. Υπάρχουν δύο βασικές διατάξεις, (α) γραμμής και (β) αποστακτήρα, όπως δείχνει το επόμενο Σχήμα 3-7, [39]. Στους αποτεφρωτήρες γραμμής τα καυσαέρια ρέουν ευθύγραμμα, ακολουθώντας μόνο κάθετη στροφή. Στη διάταξη αποστακτήρα, τα καυσαέρια ρέουν οριζόντια και κατακόρυφα. Οι πολυθαλάμιοι αποτεφρωτήρες τύπου αποστακτήρα είναι περισσότερο στιβαροί και αποδοτικοί από τους αποτεφρωτήρες γραμμής, για μικρές ποσότητες αποτέφρωσης ΙΑ. Προκειμένου να ελεγχθεί η καύση και να περιοριστούν οι εκπομπές, τα πολυθαλάμια συστήματα ενσωματώνονται με θαλάμους έναρξης σχεδιασμένους να λειτουργούν σε υψηλά επίπεδα περίσσειας αέρα. Η παραγωγή των εκπεμπόμενων αερίων και σωματιδίων είναι μεγάλη σε τέτοια συστήματα, και δεν χρησιμοποιούνται τελευταία.



Σχήμα 3-7: Διατάξεις γραμμής και αποστακτήρα. [39]

3.4.4. Αποτεφρωτήρες ελεγχόμενου αέρα

Οι αποτεφρωτήρες ελεγχόμενου αέρα, Σχήμα 3-8, χρησιμοποιούν δύο ή περισσότερους ξεχωριστούς θαλάμους καύσης για την αποτέφρωση των αποβλήτων, [39]. Ο πρώτος θάλαμος λειτουργεί υπό συνθήκες έλλειψης αέρα προκειμένου να ρευστοποιηθεί η υγρασία, να αεριοποιηθεί το ρευστό κλάσμα και να καεί ο σταθερός άνθρακας των αποβλήτων. Στη συνέχεια, τα καυσαέρια εισέρχονται στο δεύτερο θάλαμο, όπου με περίσσεια τώρα αέρα ολοκληρώνεται η καύση των τηγμάτων και άλλων

υδρογονανθράκων που παρήχθησαν από τον κύριο θάλαμο καύσης. Τυρβώδης ροή προκαλείται για την ανάμιξη του αέρα και των καυσαερίων, και το μίγμα καίεται σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες.

Τα **πλεονεκτήματα** έναντι των πολυθαλάμιων αποτεφρωτήρων είναι :

Πίνακας 3-11: Πλεονεκτήματα πολυβάθμιων αποτεφρωτήρων.

η έλλειψη επαρκούς αέρα στον κύριο θάλαμο καύσης οδηγεί σε αργή, ατύρβωτη καύση, εμποδίζοντας τα σωματίδια να ενσωματωθούν με τα καυσαέρια και να εξέλθουν στην ατμόσφαιρα

οι χαμηλότερες θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται στον θάλαμο αυτό είναι μικρότερες από τις θερμοκρασίες τήξης και σύντηξης των περισσότερων μετάλλων, γυαλιού και άλλων μη-καύσιμων υλικών, ελαχιστοποιώντας το σχηματισμό ελκυσματος και υαλοποιημένης τέφρας

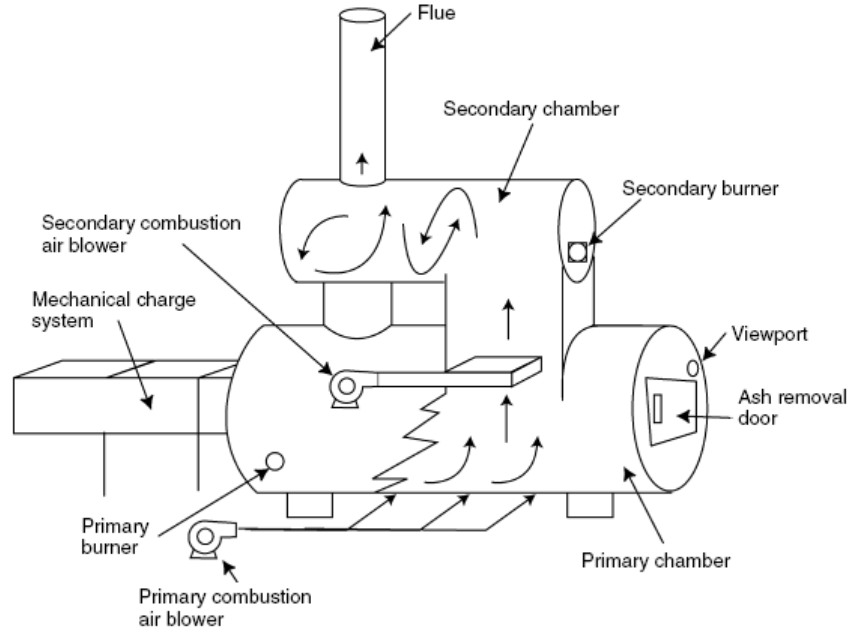
οι υψηλές θερμοκρασίες και η περίσσεια αέρα στο δεύτερο θάλαμο καύσης διασφαλίζει την πλήρη καύση των πτητικών αερίων, μειώνοντας, έτσι, τις εκπομπές υδρογονανθράκων

είναι χαμηλού κόστους

3.4.5. Παράμετροι λειτουργίας αποτεφρωτήρων

Η επίδραση των παραμέτρων λειτουργίας ενός αποτεφρωτήρα στην καύση ΙΑ διερευνάται από τους [42]. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν τη θερμοκρασία προθέρμανσης του κύριου θαλάμου καύσης και την ποσότητα της δόσης της τροφοδοσίας αποβλήτων. Σκοπός της εργασίας είναι ο προσδιορισμός μιας ποιοτικής σχέσης μεταξύ των κύριων δεικτών απόδοσης του αποτεφρωτήρα και των δύο αυτών παραμέτρων, ούτως ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες προθέρμανσης του αποτεφρωτήρα. Ως δείκτης απόδοσης θεωρήθηκε η παραγόμενη ποσότητα εκπομπών CO. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία προθέρμανσης του κύριου θαλάμου καύσης και η ποσότητα των αποβλήτων επηρεάζει σημαντικά την παραγωγή CO και την μετατροπή του σε CO₂. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες προθέρμανσης ο διαθέσιμος χρόνος ρευστοποίησης των αποβλήτων μειώνεται. Μεγαλύτερο βάρος φουρνιάς αποβλήτων χρειάζεται περισσότερο χρόνο ρευστοποίησης. Όταν επαρκής χρόνος δεν είναι διαθέσιμος, η διεργασία της καύσης ολοκληρώνεται στο δεύτερο θάλαμο καύσης, με αποτέλεσμα μεγαλύτερες συγκεντρώσεις CO στα καυσαέρια. Επιβραδύνσεις/μποτιλιάρισμα στη θερμική επεξεργασία των αποβλήτων παρατηρείται όταν τροφοδοτούνται μεγάλες ποσότητες/δόσεις αποβλήτων σε συνδυασμό με υψηλές θερμοκρασίες προθέρμανσης του κύριου θαλάμου. Τα

αποτελέσματα της έρευνας είναι χρήσιμα για τη διερεύνηση της επίδρασης της τροφοδοσίας αέρα κατά τη λειτουργία του δεύτερου θαλάμου καύσης.



Σχήμα 3-8: Αποτέφρωτής ελεγχόμενου αέρα. [39]

3.4.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αποτέφρωσης

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της αποτέφρωσης ΙΑ είναι η μείωση του οργανικού φορτίου κατά 95%, σε σχέση με τον αρχικό όγκο. Συνεπώς, πολύ μικρότερη είναι η ποσότητα αποβλήτων που πρέπει κατόπιν να διατεθεί σε μονάδες υγειονομικής ταφής. Επιπλέον, με την αποτέφρωση επιτυγχάνεται αποτοξίνωση των βιολογικών συστατικών των αποβλήτων. Οι παράγοντες αυτοί είναι σημαντικοί για τη διατήρηση του λειτουργικού κόστους χαμηλά, αλλά και για μελλοντικές νομικές ευθύνες. Ήδη, όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο 0, η αποτέφρωση αποτελεί την πλέον αποδεκτή λύση για την αντιμετώπιση των ΙΑ, σε συνδυασμό με την ανάκτηση ενέργειας.

Το βασικότερο, ίσως, πρόβλημα της αποτέφρωσης είναι τα προϊόντα που παράγονται, δηλ. τα στερεά υπολείμματα τέφρας, χημικές αέριες εκπομπές και σωματίδια. Σημαντικό είναι και το θέμα της απελευθέρωσης βαρέων μετάλλων, όπως είναι υδράργυρος, αλλά και ο σχηματισμός διοξινών (PCDDs), φουρανών (PCDFs) τετραχλωροδιβενζο-διοξινών (TCDD), ύποπτες για την εμφάνιση καρκίνου, τερατογενέσεων, και άλλων προβλημάτων υγείας. Όλα αυτά είναι δυνατό να βλάψουν την ανθρώπινη υγεία, αλλά και το φυσικό περιβάλλον, εφόσον δεν ληφθούν μέτρα για την αντιμετώπισή τους. Τα μέτρα αυτά αναλύονται εν συντόμω στην επόμενη παράγραφο.

3.5. Εκπομπές ρύπων αποτεφρωτήρων

3.5.1. Αέριες εκπομπές

Από τους αποτεφρωτήρες ΙΑ παράγονται τοξικοί αέριοι ρύποι, όπως :

Μικρά σωματίδια

Τοξικά αέρια

Μεταλλικά ιχνοστοιχεία

Προϊόντα ατελούς καύσης

Οργανική πολυπυρηνική ύλη (διοξίνες, φουράνια, PCDD, PCDF, PAH)

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις διοξίνες και τα φουράνια, με πρώτες έρευνες να διεξάγονται στις ΗΠΑ και τον Καναδά [43]. Στην έρευνα αυτή διαπιστώνεται η συσχέτιση των τοξικών εκπομπών με την είσοδο μικρο-σωματιδίων από τους θαλάμους καύσης στα καυσαέρια, καθιστώντας έτσι απαραίτητη τη χρήση εξοπλισμού παρεμπόδισης τους. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκπομπή διοξινών και φουρανίων από την αποτέφρωση ΙΑ, Πίνακας 3-12 :

Πίνακας 3-12: Παράγοντες που επηρεάζουν την εκπομπή διοξινών και φουρανίων

Κύριες ζώνες ταχύτητας αερίων, (επιδρούν στην είσοδο των σωματιδίων)
Κύρια ζώνη ροής αέρα καύσης, (προσδιορίζει την ταχύτητα των αερίων και τη στοιχειομετρία)
Δευτερεύουσα θερμοκρασιακή ζώνη, (προσδιορίζει το επίπεδο καταστροφής οργανικών ουσιών)
Ομοιομορφία θερμοκρασίας στη δευτερεύουσα ζώνη (χωρική και χρονική)
Παρακράτηση σωματιδίων σε θερμοκρασίες που ευνοούν το σχηματισμό PCDD/PCDF (480-660°F)
Η θερμοκρασία της συσκευής ελέγχου σωματιδίων (προσδιορίζει τη συμπύκνωση των PCDD/PCDF στα σωματίδια)
Επιτυχής έλεγχος σωματιδίων, (προσδιορίζει το ποσοστό των PCDD/PCDF που προσκολλώνται στα σωματίδια, τα οποία απομακρύνονται με τα καυσαέρια)

3.5.2. Παράγοντες εκπομπών διοξινών και ΠΑΥ

Ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματα της αποτέφρωσης αποβλήτων είναι οι εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα είτε ως σωματίδια είτε ως αέρια. Οι εκπομπές των αποτεφρωτήρων ΙΑ εξαρτώνται σημαντικά από τις μεθόδους διαχωρισμού των αποβλήτων, τις συνθήκες αποτέφρωσης και τον τύπο/κλάση των αποβλήτων.

Η ποσότητα των ατμοσφαιρικών ρύπων που εκπέμπονται από την αποτέφρωση ΙΑ μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας παράγοντες εκπομπών (ΠΕ). Η πρώτη προσπάθεια καθορισμού παραγόντων εκπομπής (ΠΕ) για τα CO, SO₂, NO_x, HCl, σχετικοί με την αποτέφρωση ΙΑ έγινε από τους [44]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι ΠΕ επηρεάζονται σημαντικά από τη σύνθεση των προς αποτέφρωση αποβλήτων, η οποία συνδέεται άμεσα από τον τύπο των αποβλήτων, την ταξινόμησή τους, τη τεχνική διαχωρισμού και τη μεθοδολογία διαχείρισης.

Σε μεταγενέστερη εργασία των ιδίων [45], επιχειρείται ο καθορισμός ΠΕ με βάση τώρα το διαχωρισμό των ΙΑ. Στόχοι της εργασίας τους είναι:

- η εκτίμηση ΠΕ για σωματίδια, διοξίνες, βαρέα μέταλλα και αέριους ρυπαντές, σύμφωνα με τον τύπο των προς αποτέφρωση αποβλήτων,
- η εκτίμηση της ποιότητας των ατμοσφαιρικών εκπομπών, και
- ο καθορισμός μίας μεθοδολογίας για τη διαχείριση των ατμοσφαιρικών εκπομπών, εκτιμώντας την επίδραση του τύπου των αποβλήτων και της μεθόδου διαχωρισμού στις εκπεμπόμενες ποσότητες.

Η έρευνά τους διεξήχθη στην Πορτογαλία σε διάφορους νοσοκομειακούς αποτεφρωτήρες και διαπιστώθηκε ότι :

- όταν οι ΠΕ δεν σχετίζονται με τον τύπο του προς αποτέφρωση μίγματος, η χρησιμότητα των ΠΕ είναι αμφίβολη,
- με απουσία κατάλληλου εξοπλισμού για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, οι εκπομπές του αποτεφρωτήρα υπερβαίνουν τα νόμιμα όρια. Τα όρια τηρούνται μόνο για τα NO_x, ενώ για τις άλλες εκπομπές οι συγκεντρώσεις είναι υψηλότερες από τις επιτρεπόμενες.
 - Για παράδειγμα, οι εκπομπές διοξινών υπερβαίνουν τα όρια κατά 93-710 φορές, του Hg κατά 1.3-226 φορές, του CO κατά 2-5 φορές και του HCl κατά 9-200 φορές.
- αυστηρές μεθοδολογίες διαχωρισμού των αποβλήτων πρέπει να χρησιμοποιούνται ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ατμοσφαιρικές εκπομπές, και να αποτεφρώνονται μόνο εκείνα τα απόβλητα που προβλέπει η νομοθεσία.

Με τις αναδυόμενες τεχνολογίες πλάσματος τα προβλήματα υπέρβασης των ορίων εκπομπών παύουν να υφίστανται.

Οι πρώτοι παράγοντες εκπομπής διοξινών (ΠΕΔ) καθορίζονται στην εργασία των [46]. Οι ΠΕΔ εξαρτώνται από τη σύνθεση των προς αποτέφρωση αποβλήτων και απηραάζονται από τον τύπο των αποβλήτων, την ταξινόμηση των αποβλήτων, τη τεχνική διαχωρισμού και τη μέθοδο διαχείρισης. Συνεπώς, όταν οι ΠΕΔ δεν συσχετίζονται με τη σύνθεση του προς αποτέφρωση μίγματος, η χρησιμότητά τους είναι αμφίβολη. Οι συγκεντρώσεις διοξινών που μετρήθηκαν στα καυσαέρια της αποτέφρωσης ήταν 93 έως 710 φορές πάνω από τα επιτρεπτά όρια, ανάλογα με τη σύνθεση των αποβλήτων. Τα αποτελέσματα αυτά καθιστούν επιτακτική την ανάγκη χρησιμοποίησης κατάλληλου εξοπλισμού για τον έλεγχο των ατμοσφαιρικών ρύπων των αποτεφρωτήρων.

Οι ΡΑΗ είναι περιβαλλοντικές ρυπαντικές ουσίες που προκύπτουν από την ατελή καύση ανθρωπογενών και φυσικών πηγών. Ο σχηματισμός των ΡΑΗ κατά την καύση εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία και την ποσότητα οξυγόνου. Οι εκπομπές πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων –ΠΑΥ ή ΡΑΗ-από αποτεφρωτήρες ΙΑ έχει μελετηθεί και στις εργασίες των [47-49].

Εργασίες σχετικά με τις εκπομπές επικίνδυνων ουσιών, ως αποτέλεσμα της αποτέφρωσης ΙΑ, συνεχίζουν να δημοσιεύονται με αμείωτο ρυθμό, σε παγκόσμιο επίπεδο. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις εργασίες των [50], για την εκπομπή διοξινών σε αποτεφρωτήρες στην Κίνα, και των [51], για την Κολομβία.

3.5.3. Τοξικά και καρκινογενή μέταλλα

Ανάμεσα στις εκπομπές των αποτεφρωτήρων ΙΑ δεσπόζουσα θέση κατέχουν το αρσενικό, ο μόλυβδος, το κάδμιο και το χρώμιο. Γενικά, η ανεξέλεγκτη εκπομπή αυτών των μετάλλων είναι μικρότερη σε αποτεφρωτήρες ΙΑ σε σύγκριση με συστήματα επεξεργασίας αστικών στερεών αποβλήτων. Αυτό οφείλεται στη χαμηλότερη συγκέντρωση αυτών των μετάλλων σε ΙΑ. Στις συνθήκες που επικρατούν στην πρώτη ζώνη των συστημάτων με έλλειψη αέρα, το αρσενικό, το κάδμιο και ο μόλυβδος τήκονται, ενώ το χρώμιο παραμένει ως στερεό. Οι συνθέσεις αυτές εισέρχονται στον αέρα ατμοποιημένες ή κολλημένες πάνω σε μικρά στερεά σωματίδια, και μεταφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις, πριν καταλήξουν στη γη με τη βροχή ή την απόθεση των σωματιδίων. Η συγκέντρωση τοξικών βαρέων μετάλλων στη τέφρα των αποτεφρωτήρων ΙΑ, μπορεί να αποφευχθεί μέσω διαχωρισμού των αποβλήτων πριν την αποτέφρωση. Η καλύτερη τεχνική για να καταστεί λιγότερο τοξική η τέφρα, η οποία περιέχει τοξικά μέταλλα μετά τη στερεοποίηση-σταθεροποίησή της, είναι η απόθεσή της με τσιμέντο, [52].

3.5.4. Παθογόνα

Τα παθογόνα σε μολυσματικά απόβλητα είναι πολύπλοκα μίγματα βακτηρίων, μυκητοβακτηρίων, παρασίτων, ιών, και μυκήτων. Κάτω από τις σφοδρές συνθήκες που επικρατούν σε έναν αποτεφρωτήρα, οι παθογενείς οργανισμοί είναι αρκετά ευάλλωτοι και καταστρέφονται εύκολα. Από έρευνες σε σύγχρονους αποτεφρωτήρες διαπιστώθηκε ότι

δεν επιβιώνουν πάνω από τους 1,100 οF. Παρόλα αυτά, παθογόνα που κυκλοφορούν γύρω από τον αποτεφρωτήρα είναι δυνατό να εισέλθουν στην καμινάδα, προσπερνώντας έτσι τη ζώνη καύσης, με αποτέλεσμα να επιβιώνουν. Τα παθογόνα αυτά πιθανώς να απελευθερώνονται στον αέρα κατά την προεπεξεργασία των αποβλήτων γύρω από τον αποτεφρωτήρα. Ο έλεγχος των παθογόνων εκπομπών είναι παρόμοιος με εκείνον για την ελαχιστοποίηση των οργανικών εκπομπών. Επιπροσθέτως δε, πρέπει να διασφαλίζεται ότι όλα τα διαφυγόντα αέρια εισέρχονται στο σύστημα αποτέφρωσης και διέρχονται τη ζώνη καύσης.

3.5.5. Κυτταροτοξικές συνθέσεις

Πρόκειται για ουσίες, οι οποίες γενικά χρησιμοποιούνται στη χημειοθεραπεία και είναι ιδιαίτερα τοξικές για τα κύτταρα. Εξαιτίας των ιδιαίτερα δριμύων κινδύνων που σχετίζονται με αυτές τις ουσίες, σκοπός της αποτέφρωσης είναι η πλήρης καταστροφή τους. Εφόσον πρόκειται για οργανικές συνθέσεις, οι τεχνικές ελέγχου είναι ίδιες με εκείνες για τα λοιπά οργανικά και τα παθογόνα. Για την αποτελεσματική καταστροφή των κυτταροτοξικών ουσιών απαιτούνται θερμοκρασίες της τάξης των 1.650 οF.

3.5.6. Τοξικά αέρια

Ως τοξικά θεωρούνται τα αέρια των : νιτρικών οξειδίων, θειικών οξειδίων και το υδροχλώριο. Τα ΙΑ περιέχουν τυπικά 0.2% θείο, 4% χλώριο, και 0.5% νάτριο. Σημαντικές ποσότητες θείου και χλωρίου μετατρέπονται σε SO₂ και HCl, αντίστοιχα, χωρίς κάποια εξάρτηση από τις συνθήκες καύσης. Για τον περιορισμό παραγωγής αυτών των οξέων είναι σημαντικό να απομακρύνονται πριν την καύση υλικά εμποτισμένα με θείο ή χλώριο. Ο σχηματισμός οξειδίων NO_x εξαρτάται από τη μέγιστη θερμοκρασία καύσης, το μίγμα καυσίμου-αέρα και τη στοιχειομετρία της κύριας ζώνης.

3.5.7. Υγρά και στερεά απόβλητα αποτέφρωσης

Τα στερεά απόβλητα αποτελούνται κυρίως από την τέφρα του θαλάμου καύσης του αποτεφρωτήρα. Εάν το σύστημα είναι εξοπλισμένο με εξοπλισμό καθαρισμού αερίων τότε ιπτάμενη τέφρα και υγρά απόβλητα μπορεί επίσης να περιέχονται. Τόσο τα στερεά όσο και τα υγρά απόβλητα ενδέχεται να περιέχουν επικίνδυνα υλικά για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον. Τέτοια επικίνδυνα υλικά είναι:

οργανικά	ανόργανα
PCDD/PCDF	τοξικά και καρκινογενή μέταλλα
παθογόνα	ραδιενεργά υλικά
κυτταροτοξικά υλικά	ανόργανα άλατα

Υψηλή είναι η συγκέντρωση των PCDD/PCDF στην τέφρα. Παθογόνα δεν παρατηρούνται γενικά στην τέφρα των αποτεφρωτήρων που λειτουργούν πάνω από τους 1,100 οF. Τα ανόργανα υλικά δεν καταστρέφονται κατά τη διεργασία της αποτέφρωσης, για το λόγο αυτό εφαρμόζονται τεχνικές ώστε να συγκρατηθούν τα τοξικά και καρκινογενή μέταλλα στην τέφρα. Αυτό επιτυγχάνεται διατηρώντας τις ελάχιστες θερμοκρασίες στον πρωταρχικό θάλαμο καύσης. Από την άλλη πλευρά, τα περισσότερα ραδιενεργά υλικά είναι εύτηκτα και αεριοποιούνται κατά την αποτέφρωση. Διαλύονται από τον αέρα της καύσης και εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, αν δεν απομακρυνθούν αποτελεσματικά.

Στην εργασία των [53], αναφέρεται μία κατηγοριοποίηση των παραγόμενων τεφρών από ποικίλες μονάδες αποτέφρωσης ιατρικών, αλλά και αστικών αποβλήτων, και παρουσιάζεται στον επόμενο Πίνακα 3-13.

Αποτελέσματα αναλύσεων για τη σύνθεση και τις χημικές ιδιότητες των τεφρών - στερεών και ιπταμένων- που παράγονται από την αποτέφρωση ΙΑ, συνεχίζουν να δημοσιεύονται σε επιστημονικά περιοδικά. Στην εργασία των [54: Lijuan Zhao, et al., (2008)_a], μετρήθηκαν σημαντικές ποσότητες μεταλλικών αλάτων των στοιχείων Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, καθώς και υψηλές συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων Ag, As, Ba, Bi, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Ti, Sb, Sn, Sr, Zn, τα τελευταία κυρίως στην ιπτάμενη τέφρα, σε τέφρες νοσοκομειακών αποτεφρωτήρων στην Κίνα.

Τα χαρακτηριστικά και ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των σπάνιων χερσαίων υλικών (ΣΧΥ) εξετάζονται από τους [55], πάλι σε περιπτώσεις αποτεφρωτήρων στην Κίνα. Μεγαλύτερη συγκέντρωση παρατηρήθηκε στην κατωτέρα τέφρα από ότι στην ιπτάμενη. Η συγκέντρωση των ΣΧΥ ακολουθεί τη σειρά : Ce>La>Nd>Y>Gd>Pr>Sm>Dy>Er>Yb>Ho>Eu>Tb>Lu>Tm.

Για τις αναλύσεις των συστατικών των τεφρών χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Στην εργασία των [56: Lijuan Zhao, et al., (2010)], αναλύεται η κατωτέρα τέφρα ΙΑ, και εξετάζονται βαρέα μέταλλα και πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες (PAHs). Με τη μέθοδο της φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων-X (X-ray fluorescence spectroscopy), βρήκαν ότι τα CaO, SiO₂ και Al₂O₃ ήταν τα κύρια συστατικά της κατωτέρας τέφρας. Η μέθοδος της φασματοσκοπίας εμπομπής, επαγωγικά συζευγμένου πλάσματος (Inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy) έδειξε ότι η τέφρα περιείχε μεγάλες ποσότητες βαρέων μετάλλων, όπως Zn, Ti, Ba, Cu, Pb, Mn, Cr, Ni, Sn. Τα περισσότερα μέταλλα ήταν σε κλάσμα του υπολοίπου, ενώ τα Mn, Pb, Zn, σε κλάσμα οξειδίων, και ο Cu, σε οργανικό κλάσμα. Η εργασία τους παρέχει βασικές πληροφορίες για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού κινδύνου της κατωτέρας τέφρας ΙΑ.

Πίνακας 3-13: Κατηγοριοποίηση παραγομένων τεφρών από μονάδες αποτέφρωσης αποβλήτων

Incineration activity		Incineration residues	
	Description	Code	Description
MSWI	MSW from seaside activities area incineration	MI-1	Fly-ash (grey, particulate)
	MSW from seaside activities area incineration	MI-2	Fly-ash (grey, particulate)
	MSW from industrial area incineration	MI-3	Fly-ash (black, particulate)
	MSW from industrial area incineration	MI-4	Fly-ash (black, particulate)
	MSW from rural area incineration	MI-5	Bottom-ash (grey, particulate)
	MSW from rural area incineration	MI-6	Bottom-ash (grey, particulate)
	Wastewater treatment sludge incineration	MI-7	Fly-ash (brown, clear)
	Wastewater treatment sludge incineration	MI-8	Fly-ash (brown, clear)
	MSW from industrial area incineration	MI-9	Bottom-ash (black)
	MSW from industrial area incineration	MI-10	Bottom-ash (black)
	MSW from seaside activities area incineration	MI-11	APC residue (grey)
	MSW from seaside activities area incineration	MI-12	APC residue (grey)
HMWI	General hospital, gas combustion furnace	HI-1	Bottom-ash (dark grey, unburned)
	General hospital, gas combustion furnace	HI-2	Bottom-ash (dark grey, unburned)
	Long stay and repose hospital, fuel comb. furnace	HI-3	Bottom ash (grey, unburned)
	Long stay and repose hospital, fuel comb. furnace	HI-4	Bottom-ash (grey, unburned)
	General hospital, gas combustion furnace	HI-5	Bottom-ash (brown-grey, unburned)
	General hospital, gas combustion furnace	HI-6	Bottom-ash (grey, unburned)
	Long stay and repose hospital, fuel comb. furnace	HI-7	Fly-ash (brown- grey)
	Long stay and repose hospital, fuel comb. furnace	HI-8	Fly-ash (grey)
	General hospital, gas combustion furnace	HI-9	Fly-ash (brown- grey)
	General hospital, gas combustion furnace	HI-10	Fly ash (brown- grey)
	General hospital, gas combustion furnace	HI-11	Fly-ash (brown)
	General hospital, gas combustion furnace	HI-12	Fly-ash (brown)

Σε μία άλλη δημοσίευση, [57], χρησιμοποιήθηκε η Φασμοτοσκοπία ατομικής απορρόφησης ιονισμού φλόγας- flame atomic absorption spectrometer- για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των βαρέων μετάλλων.

Η διαπερατότητα των μετάλλων στην ιπτάμενη τέφρα ΙΑ ως προς το μέγεθος των σωματιδίων, διερευνάται από τους [58], σε μελέτη που διεξήχθη στην Ιαπωνία. Για την ποσοτικοποίηση του ποσοστού διαπερατότητας των μετάλλων, σε κάθε κατηγοριοποιημένο μέγεθος, χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος της διαδοχικής εξαγωγής - sequential extraction- και η διαδικασία τοξικού χαρακτηρισμού διαπερατότητας - Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). Η πρώτη έδειξε αυξημένη συγκέντρωση ενώσεων χρωμίου σε μεγαλύτερα σωματίδια. Παρομοίως, συγκεντρώσεις αρσενικού και κασσίτερου είχαν τη τάση να είναι υψηλές σε μεγαλύτερα σωματίδια. Αντιθέτως, κάδμιο και βάριο παρουσιάστηκαν σε υψηλές συγκεντρώσεις σε μικρού μεγέθους σωματίδια.

3.6. Νέες αντιρρυπαντικές τεχνολογίες

Στον επόμενο Πίνακα 3-14 συνοψίζονται τυπικές παράμετροι ελέγχου και παρακολούθησης για διάφορους τύπους αποτεφρωτήρων, σκράμπερς, και σακκόφιλτρων.

Πίνακας 3-14: Παράμετροι ελέγχου συστημάτων αποτεφρωτήρων

Table 7

Monitor and control parameters for incinerators

Monitored/controlled parameter	Purpose	Incinerator functions controlled (when possible)
Temperatures of primary and secondary combustion chambers	Indicator of temperature operating range; control parameter	Combustion air; auxiliary burners
Draft	Indicator of pressure in chamber; control parameter	Barometric damper; ID-fan damper
Oxygen	Indicates excess air level	Combustion air
Carbon monoxide	Indicator of combustion efficiency	
Opacity	Indicator of emissions	
Charge rate	Indicator of heat input	Automatic feed; system interlock

Table 8

Monitor and control parameters for scrubbers

Monitored parameter	Scrubber functions controlled (when applicable)
Pressure and pressure drop	Venturi throat; ID fan
Scrubber liquid flow rate or pressure	Liquid flow control valve
Scrubber liquid pH	Caustic flow control valve
Inlet temperature	Emergency quench/dilution air; bypass stack prequench

Table 9

Monitor and control parameters for fabric filters

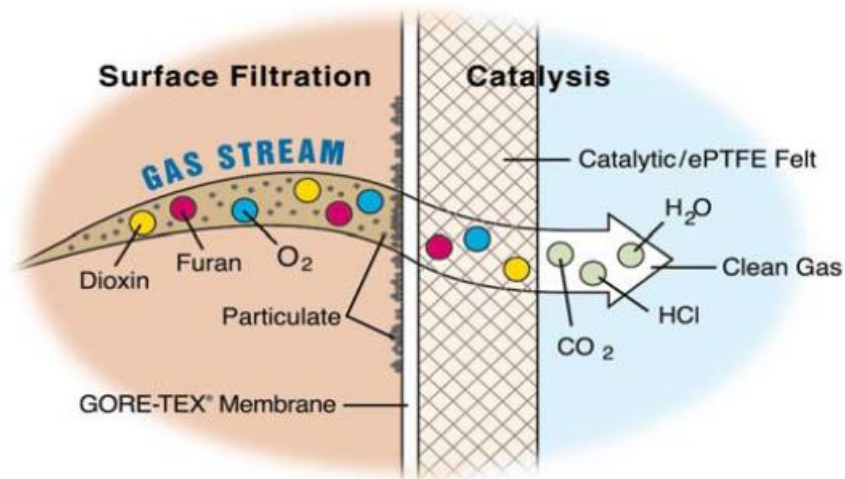
Monitored parameter	Fabric filter operating functions controlled
Pressure drop	Cleaning cycle
Inlet gas temperature	Emergency bypass stack

3.6.1. Εξοπλισμός ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης - Air pollution control equipment (APCE)

Ο καθαρισμός των καυσαερίων που παράγονται από διεργασίες αποτέφρωσης αποτελεί μία ακόμη σημαντική περιοχή ενδιαφέροντος της σύγχρονης έρευνας. Τα τελευταία επιτεύγματα συνοψίζονται στη συνέχεια [2].

3.6.2. Απομάκρυνση διοξινών

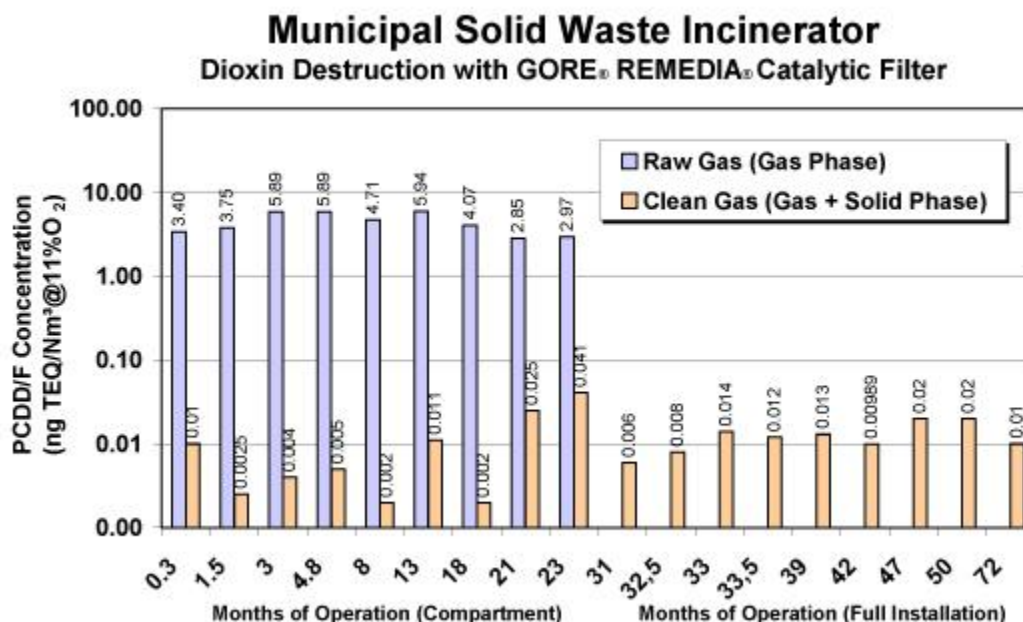
Οι διοξίνες (σύντομη ονομασία για ενώσεις όπως πολυχλωριωμένες-διβενζο-πιδιοξίνες και δεβενζοφουράνια) είναι από τις πλέον επικίνδυνες ρυπαντικές ουσίες, και η ελαχιστοποίησή τους από τα παράγωγα της αποτέφρωσης επιβάλλεται αυστηρά από τη νομοθεσία. Για παράδειγμα στην Ευρωπαϊκή Ένωση το όριο για τις εκπομπές διοξινών είναι 0.1 ng TEQ/m³N. Έτσι, είναι πολύ σημαντικό να εφαρμόζονται τεχνολογίες, οι οποίες να καταστρέφουν τις διοξίνες παρά να τις συλλέγουν μόνο. Το τελευταίο τεχνολογικό επίτευγμα στην περιοχή αυτή είναι η καταλυτική διήθηση (catalytic filtration) REMEDIATM της εταιρίας W.L. Gore & Associates Inc., στην οποία συνδυάζονται διήθηση υφάσματος (fabric filtration) για τη συλλογή των σωματιδίων, με καταλυτική καταστροφή των διοξινών [59]. Η αρχή λειτουργίας της κατάλυσης και της επιφανειακής διήθησης απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα 3-9, [60]:



Σχήμα 3-9: Καταλυτικό φίλτρο απομάκρυνσης σωματιδίων και καταστροφής αέριων διοξινών/φουρανίων. [59,60]

Σε μετρήσεις που έγιναν σε πραγματικές εγκαταστάσεις, η εφαρμογή αυτής της μεθόδου έδειξε επίπεδα εκπομπών της τάξης των 0.012 έως 0.65 ng TEQ/m³N, πολύ χαμηλότερα από το όριο της ΕΕ. Επιπλέον, αναλύσεις διοξινών που διεξήχθησαν στην ιπτάμενη τέφρα έδειξαν σημαντικά χαμηλότερες τιμές από εκείνες τις οποίες πετυχαίνει ένα σύστημα σκόνης ενεργού άνθρακα (powder activated carbon - PAC). Το σύστημα διήθησης REMEDIATM έχει εφαρμοστεί σε αρκετούς σταθμούς επεξεργασίας αποβλήτων - αστικών και ιατρικών- στην Ευρώπη, όπως για παράδειγμα στο Βέλγιο, στις ΗΠΑ και την

Ιαπωνία [61]. Αποτελεί μέχρι σήμερα την πιο οικονομική τεχνική, με ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης, και μεγάλη διάρκεια ζωής. Στο διάγραμμα του επόμενου Σχήμα 3-10, παρουσιάζονται οι εκπομπές διοξινών από έναν σταθμό αποτέφρωσης αστικών αποβλήτων. Με μπλε χρώμα εκφράζονται οι τιμές των ακατέργαστων καυσαερίων και με κόκκινο τα «καθαρά» ύστερα από εφαρμογή του REMEDIATM.

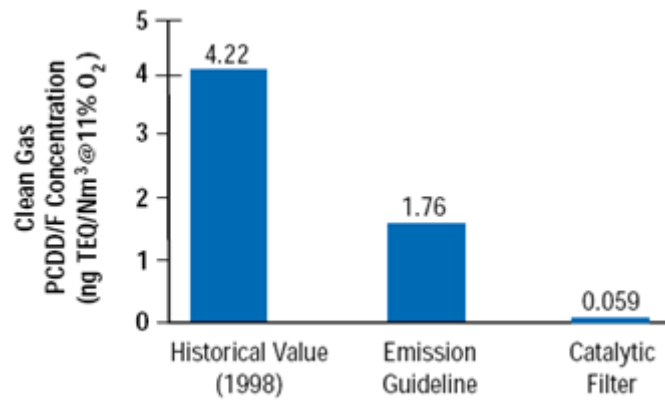


Σχήμα 3-10: Μείωση εκπομπών διοξινών ύστερα από εφαρμογή καταλυτικού φίλτρου. [59,61]

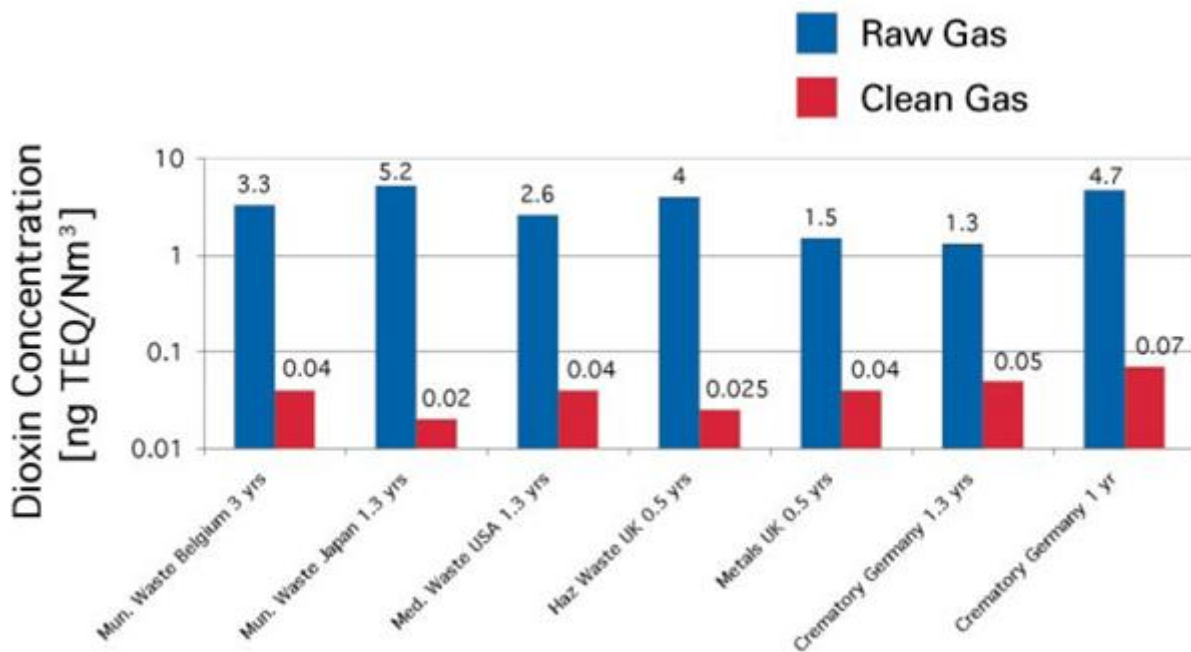
Στο επόμενο διάγραμμα, Σχήμα 3-11, παρουσιάζονται οι εκπομπές διοξινών από έναν αποτεφρωτήρα ιατρικών αποβλήτων στη Βαλτιμόρη των ΗΠΑ, [62]. Παρόλο που η αντίστοιχη υπηρεσία περιβάλλοντος των ΗΠΑ έχει θεσπίσει ως ανώτερο όριο εκπομπών για τις διοξίνες την τιμή 1.76 ng TEQ/m³N, η χρήση του REMEDIATM, έχει υπερκαλύψει ακόμη και τις ευρωπαϊκές προδιαγραφές.

Ένα συγκριτικό διάγραμμα για τη μείωση εκπομπών διοξινών με χρήση του REMEDIATM σε διάφορες βιομηχανίες ανά τον κόσμο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-12:

Διάφορες εναλλακτικές τεχνικές μηχανο-χημικής αντιμετώπισης για την υποβάθμιση των PCDD/Fs που περιέχονται στην ιπτάμενη τέφρα των ΙΑ διερευνώνται στην εργασία [63].



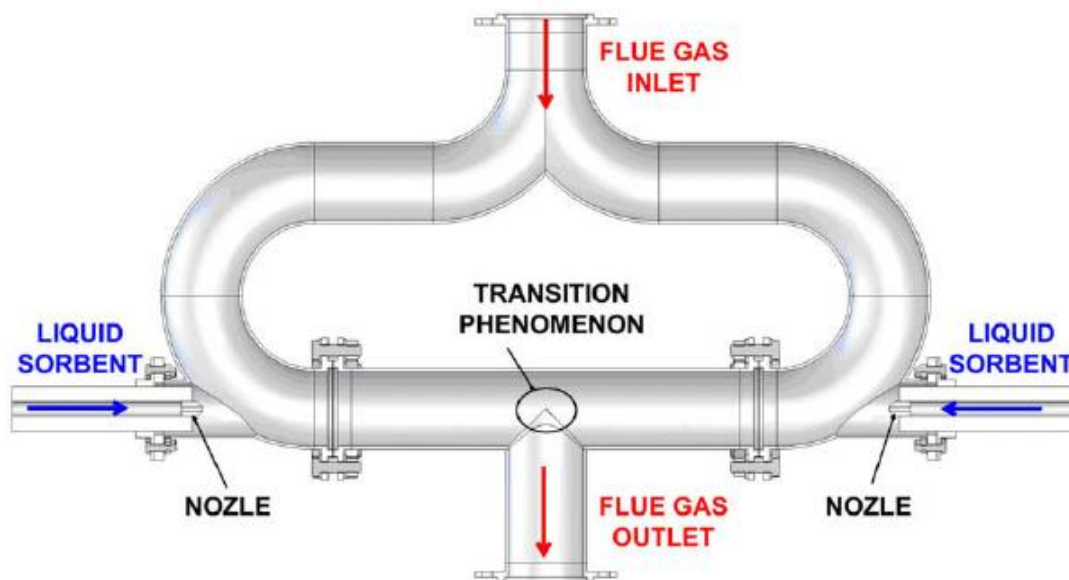
Σχήμα 3-11: Μείωση εκπομπών διοξινών/φουρανίων ύστερα από εφαρμογή καταλυτικού φίλτρου. [59,62]



Σχήμα 3-12: Μείωση εκπομπών διοξινών/φουρανίων ύστερα από εφαρμογή καταλυτικού φίλτρου σε εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο. [59,62]

3.6.3. Υγρός τριβέας - Wet scrubber (absorber)

Στα συστήματα υγρών τριβέων, τα καυσαέρια ψεκάζονται με μία υγρή απορροφητική ουσία, συνήθως ένα αλκαλικό διάλυμα ασβεστίου ή NaOH, το οποίο αντιδρά με τις διαλυόμενες στο υγρό ρυπαντικές ουσίες. Η μεταβατική περιοχή είναι η πλέον σημαντική για τη διασφάλιση του πλήρους καθαρισμού. Συνήθως, αυτός ο εξοπλισμός αποτελείται από δύο στάδια. Το πρώτο συνίσταται από έναν ομογενοποιητή τύπου “Venturi” ή “O-element”, ενώ το δεύτερο από μία πληρωμένη στήλη (packed column). Ο ομογενοποιητής “O-element” απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα 3-13, [2]:



Σχήμα 3-13: Εξοπλισμός υγρού καθαρισμού καυσαερίων. [2]

3.6.4. Επεξεργασία αέριων αποβλήτων και καθαρισμός off-gas

Μέσα στο πλαίσιο της έρευνας σχετικά με τον καθαρισμό απαερίων μολυσμένων με διάφορες χημικές συνθέσεις, αναγνωρίζονται τα εξής :

- CO, πτητικές οργανικές ενώσεις (volatile organic compounds - VOCs) και αλογονωμένες οργανικές ενώσεις (Halogenated organic compounds - HOC)
- NO_x , SO_2 , HCl, HF
- Σωματίδια (ιπτάμενη τέφρα) και PCDD/F (διοξίνες και φουράνια)

Για την επεξεργασία των μολυσμένων απαερίων με αυτές τις τρεις κατηγορίες ουσιών, έχουν αναπτυχθεί τρεις νέες μέθοδοι, όπως δείχνει το επόμενο Σχήμα 3-14, [2], και επιγραμματικά σχολιάζονται στον Πίνακα 3-15, στη συνέχεια.

Πίνακας 3-15: Τρεις νέες διατάξεις επεξεργασίας των καυσαερίων αποτέφρωσης, [2].

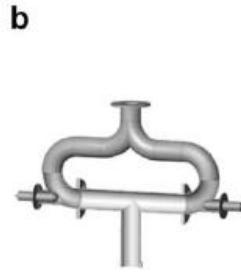
Εξοπλισμός για θερμική και καταλυτική επεξεργασία των αέριων αποβλήτων, μολυσμένων με VOCs και CO (εναλλακτικά NO_x). [64]

Εξοπλισμός για υγρό καθαίρισμα καυσαερίων μολυσμένων με SO_2 , HCl, HF. Χρήση ομογενοποιητή "O-element". [65]

Συνδυασμένος πειραματικός εξοπλισμός για τον καθαρισμό αέριων αποβλήτων μολυσμένων με στερεά σωματίδια, SO_2 , HCl, HF και βαρέα μέταλλα (εναλλακτικά NO_x και PCDD/F). [66]



Equipment for thermal and catalytic treatment of waste gases polluted by carbon monoxide, VOC and NO_x



Equipment for cleaning off-gases with high concentration of SO_2 , HCl, HF



Equipment for cleaning off-gases containing solid particulates, SO_2 , HCl, HF and heavy metals and alternatively NO_x , or PCDD/F

Σχήμα 3-14: Πρόοδος στην επεξεργασία των αέριων αποβλήτων. [2]

3.6.5. Άλλες καινοτόμες διατάξεις ελέγχου και μείωσης εκπομπών

Μία καινοτομική διάταξη αποτεφρωτήρα ΙΑ παρουσιάζεται στην εργασία των [30: Rong Xie, et al., (2009)], στην πόλη Xiangfan της Κίνας. Η αρχή του προέρχεται από συνδυασμό σε μία μοναδική μονάδα των υπομονάδων τροφοδοσίας, περιστρεφόμενης εσχάρας, κυλινδρικού αεριοποιητή και ενός ομοαξονικού δευτεροβάθμιου θαλάμου καύσης. Ο αποτεφρωτήρας είναι εφοδιασμένος με συσκευές ελέγχου ατμοσφαιρικής ρύπανσης (APCD) και μετρώνται οι τιμές διαφόρων εκπεμπόμενων ρύπων, όπως PM, CO, NO_2 , O_2 , βαρέων μετάλλων και PCCD/Fs. Οι συγκεντρώσεις των ρύπων ήταν αρκετά χαμηλότερες των προδιαγραφών της Κίνας και του EPA των ΗΠΑ, και η νέα αυτή τεχνολογία αποτεφρωτήρα επιβεβαιώθηκε ότι είναι κατάλληλη για ουδετεροποίηση των ΙΑ και καθαρισμό των καυσαερίων.

Μία νέα πρόταση αποτεφρωτήρα συνδυασμένου με επεξεργασία των καυσαερίων για τη διαχείριση των ΙΑ στην Αίγυπτο παρουσιάζεται στην εργασία των [31: A.F. Shaaban, (2007)]. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από :

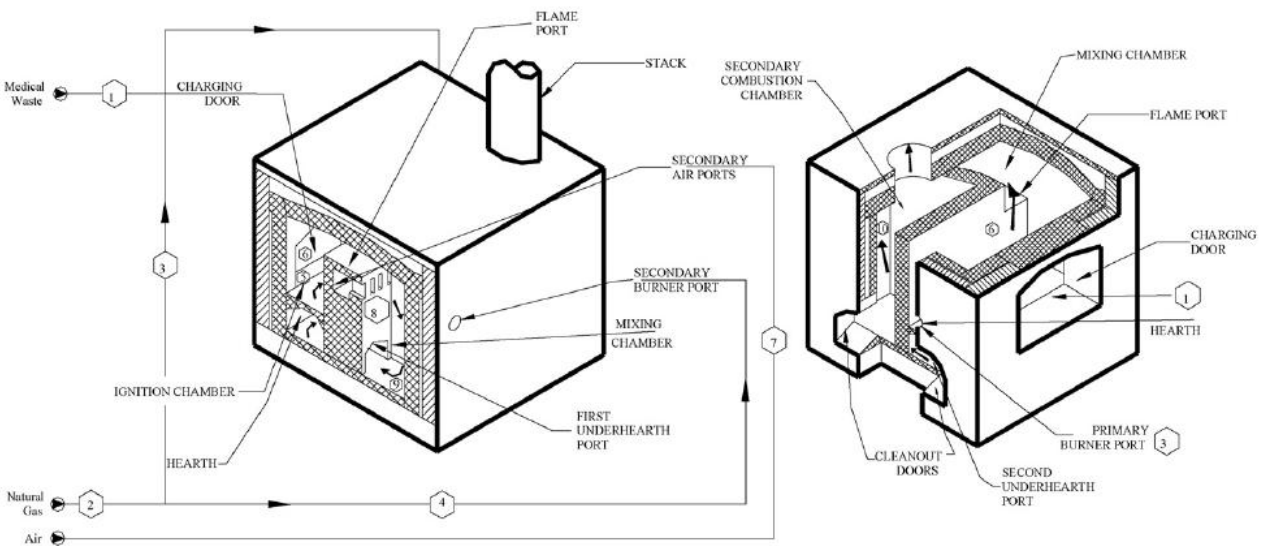
- Μία μονάδα αποτέφρωσης με θερμοκρασία λειτουργίας τους $1,100\text{ }^\circ\text{C}$ με 300% περίσσεια οξυγόνου,
- Ψύκτη καυσαερίων με παραγωγή $35\text{m}^3/\text{h}$ ζεστού νερού στους $75\text{ }^\circ\text{C}$,
- Φίλτρο σκόνης με ικανότητα απομείωσης σωματιδίων σε $10\text{-}20\text{ mg}/\text{Nm}^3$,
- Πλυντήριο καυσαερίων για την απομάκρυνση των τοξικών αερίων,
- Έναν καταλυτικό μετατροπέα πολυσωλήνιας σταθεροποιημένης κλίνης (multi-tube fixed bed catalytic converter) για τη διατήρηση των διοξινών και των φουρανίων κάτω από τα επιτρεπτά όρια, και
- Έναν ανεμιστήρα αναρρόφησης με δυνατότητα $6,500\text{ Nm}^3/\text{h}$ στους $250\text{ }^\circ\text{C}$.

Ο χρόνος παραμονής των καυσαερίων στους θαλάμους ανάφλεξης, ανάμιξης και καύσης υπολογίστηκε στα 2, 0.25 και 0.75 δευτερόλεπτα, αντίστοιχα, διασφαλίζοντας παντελή ομογενοποίηση των καυσαερίων και πλήρη καταστροφή των επιβλαβών συστατικών των ΙΑ. Η συγκεκριμένη μονάδα αποδείχθηκε αρκετά αποδοτική όσον αφορά τα επίπεδα των εκπεμπόμενων ρύπων, καθότι αυτά ήταν σε συμφωνία με τα μέγιστα επιτρεπτά όρια που θέτουν τα Ευρωπαϊκά πρότυπα και το Υπουργείο Περιβάλλοντος της Αιγύπτου.

Ο αποτεφρωτήρας είναι πολυθάμιος/πολυθαλάμιος και ο αποδοτικός σχεδιασμός του έγκειται στην επιστροφή των καυσαερίων χάρη στην διάταξη "U" των θαλάμων. Η διέλευση των καυτών αερίων κάτω από τα ΙΑ μεγιστοποιεί την εκμετάλευση της θερμότητας που μεταφέρουν. Η διάταξη αυτή απεικονίζεται στο επόμενο Σχήμα 3-15 :

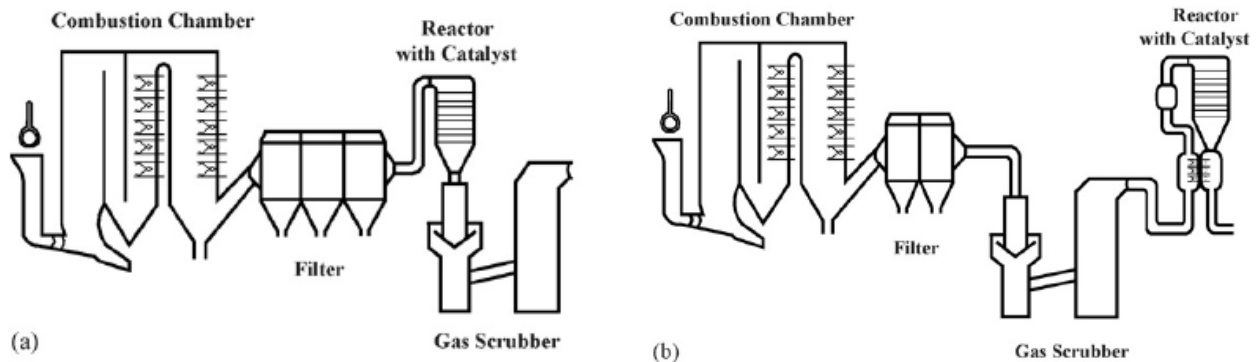
Τα πλεονεκτήματα της διάταξης είναι :

- Αποδοτική κατανομή του αέρα,
- Πλήρης καταστροφή επιβλαβών παθογόνων συστατικών,
- Στενή επαφή ΙΑ και καυσαερίων,
- Ευκολία στην κυκλοφορία των καυσαερίων,
- Αποδοτική μετάδοση θερμότητας, και
- Ευκολία στην απομάκρυνση της τέφρας



Σχήμα 3-15: Πολυθαλάμιος αποτεφρωτήρας ΙΑ. [31]

Όσον αφορά την επεξεργασία των καυσαερίων, προτείνονται δύο διατάξεις, οι οποίες απεικονίζονται στο επόμενο Σχήμα 3-16 :



Σχήμα 3-16: Διατάξεις Flue gas (a) και Purified gas (b). [31]

Στην πρώτη διάταξη, των μη-καθάρων καυσαερίων, οι καταλύτες συνδέονται απευθείας και κατάντη με το σακκόφιλτρο, ενώ η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι αρκετή για την καταλυτική αντίδραση χωρίς ανάγκη για περαιτέρω θέρμανση. Τα πλυντήρια αερίων τοποθετούνται κατάντη με τον αντιδραστήρα. Στη δεύτερη διάταξη, των κεκαθαρμένων αερίων, οι καταλύτες τοποθετούνται στην κατάντη του σακκόφιλτρου και του πλυντηρίου αερίων. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι γενικά χαμηλότερη από ότι στην πρώτη διάταξη, και χρειάζεται αναθέρμανση μέσω εναλλακτών θερμότητας. Η απουσία, όμως, βαρέων μετάλλων επιμηκύνει τη ζωή των καταλυτών. Με τη δεύτερη αυτή διάταξη είναι δυνατή και η καταστροφή διοξινών PCDD/Fs και η μείωση NOx με ψεκασμό αμμωνίας.

ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ

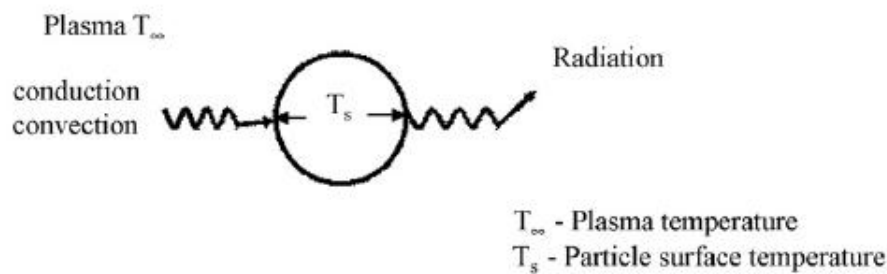
4. ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΙΑΤΡΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

4.1. Η τεχνολογία πλάσματος

4.1.1. Τι είναι πλάσμα

Το πλάσμα θεωρείται η τέταρτη φάση της ύλης. Η τεχνολογία πλάσματος στηρίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρικής κατάρρευσης κατά την οποία δημιουργείται ένα ηλεκτρικό τόξο, κατά τη διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος διά μέσου ενός αερίου. Ως βαθμός ιονισμού του πλάσματος ορίζεται το ποσοστό των ατόμων που έχουν χάσει (ή κερδίσει) ηλεκτρόνια, και στην περίπτωση του θερμικού πλάσματος, αυτό ελέγχεται κυρίως από τη θερμοκρασία. Το πλάσμα, λοιπόν, αποτελείται από ένα μίγμα ηλεκτρονίων, ιόντων και ουδέτερων ηλεκτρικά σωματιδίων. Ως σύνολο το πλάσμα είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Στους 2,000°C τα μόρια του αέρα διαχωρίζονται σε άτομα και όταν η θερμοκρασία ανέλθει στους 3,000°C, τα μόρια χάνουν ηλεκτρόνια και μετατρέπονται σε ιόντα. Στην κατάσταση αυτή, το ιξώδες του αέρα προσεγγίζει εκείνο ενός υγρού σε ατμοσφαιρική πίεση και τα ελεύθερα ηλεκτρικά φορτία χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, συγκρινόμενη με εκείνη των μετάλλων [67].

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται ο βασικός μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας σε ένα σωματίδιο σε επαφή με πλάσμα [68].



Σχήμα 4-1: Μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας κατά τη θέρμανση και τήξη ενός σωματιδίου

4.1.2. Κατηγορίες τεχνολογίας πλάσματος

Διακρίνουμε δύο κύριους τύπους τεχνολογίας πλάσματος [69] :

- υψηλής θερμοκρασίας ή πλάσμα σύντηξης, και
- χαμηλής θερμοκρασίας ή εκκένωσης αερίου

Στο υψηλής θερμοκρασίας πλάσμα όλα τα συστατικά του βρίσκονται σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Το χαμηλής θερμοκρασίας πλάσμα διακρίνεται περαιτέρω σε θερμικό πλάσμα, ή αλλιώς πλάσμα σε ψευδο-ισορροπία, το οποίο βρίσκεται σε κατάσταση τοπικής θερμικής ισορροπίας, και στο μη-θερμικό πλάσμα, ή αλλιώς ψυχρό πλάσμα ή πλάσμα μη-ισορροπίας.

Χαρακτηριστικό του θερμικού πλάσματος είναι η πυκνότητα υψηλής ενέργειας και η ισότητα των θερμοκρασιών των «βαρέων» σωματιδίων (άτομα, μόρια και ιόντα) και των ηλεκτρονίων. Εξαιτίας της αυξημένης κινητικότητάς τους, η προσδιδόμενη στο πλάσμα ενέργεια συλλαμβάνεται από τα ηλεκτρόνια και μεταφέρεται στα «βαρέα» σωματίδια μέσω ελαστικών συγκρούσεων. Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού ηλεκτρονίων η συχνότητα των ελαστικών συγκρούσεων είναι πολύ υψηλή με αποτέλεσμα να επέρχεται γρήγορα θερμική ισορροπία.

Το ψυχρό πλάσμα, συγκρινόμενο με το θερμικό, έχει χαμηλότερο βαθμό ιονισμού και χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας και μεγάλη διαφορά στις θερμοκρασίες των ηλεκτρονίων και των «βαρέων» σωματιδίων. Το ψυχρό πλάσμα βρίσκει εφαρμογές στη χημεία χαμηλής θερμοκρασίας, στη διαμόρφωση επιφανειών, σε διεργασίες με θερμικά ευαίσθητα υλικά, όπως τα πολυμερή και οι βιολογικοί ιστοί.

Το θερμικό πλάσμα παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως :

- Υψηλή θερμοκρασία
- Υψηλή ένταση
- Μη-ιονιζόμενη ακτινοβολία, και
- Υψηλής ενέργειας πυκνότητα

Η ανώτατη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί με την καύση ορυκτών καυσίμων είναι 2,000°C, ενώ με το θερμικό πλάσμα ξεπερνά τους 20,000°C. Επιπλέον, οι αντιδραστήρες θερμικού πλάσματος προσφέρουν εύρος πλεονεκτημάτων, όπως :

1. Υψηλή απόδοση με συμβατές γεωμετρίες αντιδραστήρα
2. Υψηλοί ρυθμοί κατάσβεσης ($>10^6\text{K/s}$) επιτρέποντας το σχηματισμό συγκεκριμένων αέριων και στερεών συνθέσεων
3. Χαμηλοί ρυθμοί ροής αέρα, εν συγκρίσει με την καύση ορυκτών καυσίμων, μειώνοντας έτσι, τις απαιτήσεις αντιμετώπισης των απαερίων.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα, κυρίως από οικονομικής πλευράς, είναι η χρήση του ηλεκτρισμού ως πηγή ενέργειας [70]. Παρόλα αυτά, μία συνολική συγκριτική ανάλυση κόστους συνήθως υποστηρίζει την οικονομική βιωσιμότητα τεχνολογιών πλάσματος.

Οι τεχνολογίες επεξεργασίας θερμικού πλάσματος χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως [71] :

1. Σε τεχνικές επιχρίσματος, όπως ψεκασμός πλάσματος (plasma spraying), ψεκασμός τόξου σύρματος (wire arc spraying) και thermal plasma chemical vapor deposition (TPCVD),
2. Στη σύνθεση ψιλού κονιώματος στην κλίμακα του νανόμετρου.
3. Στη μεταλλουργία,
4. Στην εξωρυκτική μεταλλουργία,
5. Στην καταστροφή και αντιμετώπιση επικίνδυνων υλικών και αποβλήτων.

Για την αντιμετώπιση απορριμάτων και ιατρικών αποβλήτων (ΙΑ) εφαρμόζονται τεχνολογίες θερμικού πλάσματος, και για το λόγο αυτό στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε σε αυτή την κατηγορία.

4.1.3. Παραγωγή θερμικού πλάσματος

Το θερμικό πλάσμα παράγεται από διάφορες μεθόδους, όπως [68,74,72]:

- Ηλεκτρική εκκένωση συνεχούς ρεύματος (DC), με εντάσεις έως $1 \times 10^5 \text{A}$,
- Εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) ή μεταβατικά τόξα (lamps, circuit-breakers or pulsed arcs),
- Εκκενώσεις μικροκυμάτων ή ραδιοσυχνοτήτων (RF), σε πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική και πλάσμα laser.

Για την αντιμετώπιση επικίνδυνων αποβλήτων χρησιμοποιούνται τεχνολογίες πλάσματος DC και RF [73]. Με τις τεχνολογίες DC μεταξύ δύο ηλεκτροδίων υπό την παρουσία εξαιρετικά υψηλής ροής αέρα παράγεται πλάσμα υψηλής ενέργειας και υψηλής θερμοκρασίας. Το πλάσμα εμφανίζεται κάτω από ένα από τα ηλεκτρόδια στη μορφή πίδακα υψηλής ενθαλπίας :



Σχήμα 4-2: Πυρός πλάσματος

Χαρακτηριστικό της τεχνολογίας πλάσματος RF είναι η απουσία ηλεκτροδίων, αποτρέποντας έτσι, τη μόλυνση του πλάσματος από μεταλλικούς ατμούς. Οι πυρσίδες πλάσματος RF χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στο πεδίο της επεξεργασίας υλικών και για την καταστροφή επικίνδυνων αποβλήτων.

Τα χαρακτηριστικά του θερμικού πλάσματος περιγράφονται με λεπτομέρειες στις εργασίες των [72,75].

4.2. Διαχείριση ΙΑ με τεχνολογία Πλάσματος

4.2.1. Πιλοτικά ερευνητικά προγράμματα

Όπως εκτενώς παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.4, τα ΙΑ αποτελούνται από ανατομικά απόβλητα, όπως ιστοί και όργανα, αίμα και αιματικά υγρά, παθογόνα και εξαιρετικά μολυσματικά απόβλητα, καθώς και πεταμένα φάρμακα. Οι υψηλές θερμοκρασίες και η υπεριώδης ακτινοβολία του θερμικού πλάσματος μπορούν να καταστρέψουν όλα τα βακτήρια και τους μικροοργανισμούς. Μπορούν επίσης, να καταστρέψουν τις χημικές δομές των φαρμάκων, τα δραστικά συστατικά των οποίων

αποτελούν ένα μικρό κλάσμα της πραγματικής μάζας των φαρμάκων, όπως τα κυταροστατικά και κυταροτοξικά φάρμακα, [76].

Αρκετά ενδιαφέρουσες εργασίες δημοσιεύονται στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικές με τη δυνατότητα αντιμετώπισης ΙΑ με τεχνολογία πλάσματος, επικεντρωμένες στη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος γενικά, στην καταγραφή των χαρακτηριστικών των παραγόμενων προϊόντων, στη διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής σε συγκεκριμένα απόβλητα, στην οικονομική εφικτότητα και βιωσιμότητα μονάδων τεχνολογίας πλάσματος, κ.α. Οι περισσότερες από τις εργασίες αυτές υποστηρίζονται οικονομικά από διάφορους κρατικούς οργανισμούς (πανεπιστήμια, υπουργεία), δηλώνοντας την υπευθυνότητα με την οποία αντιμετωπίζουν οι κυβερνήσεις το πρόβλημα διαχείρισης επικίνδυνων αποβλήτων.

Στο Ισραήλ, ο οργανισμός EER (Environmental Energy Resources) ανέπτυξε μία καινοτόμο τεχνολογία τήξης/αεριοποίησης με πλάσμα, γνωστή ως PGM, η οποία συνδυάζει αεριοποίηση και υαλοποίηση των αποβλήτων σε έναν μοναδικό αντιδραστήρα, ενώ πετυχαίνει την υψηλότερη μείωση μολυσματικού φορτίου [78]. Συγκεκριμένα, τεστ έδειξαν ότι η μικροβιολογική δραστηριότητα μειώνεται σε ποσοστό που ξεπερνά το 99.999%. Ο EER έχει ήδη κατασκευάσει ένα σταθμό αντιμετώπισης αστικών στερεών αποβλήτων, ο οποίος έχει πιλοτικά δοκιμαστεί για ΙΑ. Μετρήσεις από ανεξάρτητες εταιρίες έδειξαν ότι τα επίπεδα των κύριων μολυντών όπως NO_x, SO_x, CO, βαρέα μέταλλα και διοξίνες, ήταν δύο τάξεις μεγέθους χαμηλότερα από τα επιτρεπτά της οδηγίας EU 2000/76.

Ένα άλλο πιλοτικό πρόγραμμα ελέγχου ενός συστήματος με πλάσμα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC plasma) κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Αντιμετώπισης Αποβλήτων του Ινστιτούτου Μηχανικής της Κινεζικής Ακαδημίας Επιστημών (CAS-IMECH) και δημοσιεύεται στην εργασία των [79].

Η αποδοτικότητα συστημάτων πλάσματος για την αντιμετώπιση ΙΑ μελετάται στην εργασία των [80], χρησιμοποιώντας ως μοντέλα ΙΑ αρκετά υποκατάστατα μίγματα. Για το σκοπό αυτό έγιναν μετρήσεις πάνω στη δυναμική της καύσης των αποβλήτων και στη θερμική κατάσταση του κλιβάνου, λαμβάνοντας δείγματα αερίων από την έξοδο, και μετρώντας με θερμοζεύγη τις θερμοκρασίες τους. Στη βάση των πειραματικών δεδομένων προτάθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο για την πρόβλεψη της δυναμικότητας της μονάδας. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε από το Πανεπιστήμιο Incheon της Νότιας Κορέας.

Συγκριτική μελέτη μεταξύ τεχνολογιών πλάσματος και συμβατικών (αποτεφρωτήρων), όσον αφορά την αντιμετώπιση ΙΑ, παρουσιάζεται στην εργασία των [76]. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα μίγμα προσομοίωσης ΙΑ αποτελούμενο από βαμβάκι και πλαστικό σε αναλογίες 2:1. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα αέρια της πυρόλυσης ήταν πλούσια σε υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα, με συμμετοχή υδρογονανθράκων χαμηλού μοριακού βάρους. Το μίγμα αυτό μπορούσε να χρησιμοποιηθεί

για ανάκτηση ενέργειας. Με χρήση και δεύτερου θάλαμου καύσης, και περίσσεια ποσότητα αέρα, μετρήθηκαν πολύ μικρές ποσότητες τοξικών αερίων. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι βακτήρια όπως *B. Subtilis* και *B. Stearothermophilus* καταστράφηκαν πλήρως, μέσα στο περιβάλλον πλάσματος. Το πρόγραμμα υλοποιήθηκε στο Ινστιτούτο Έρευνας Πλάσματος στην πόλη Gandhinagar της Ινδίας

Η έρευνα συνεχίζεται με την αντιμετώπιση ιπτάμενης και καθιζάνουσας τέφρας από την αποτέφρωση EIA με τεχνολογία θερμικού πλάσματος DC στο πολυτεχνείο του Lodz στην Πολωνία [81], όπου παρατηρήθηκε ότι η κύρια κρυσταλλική φάση των στερεών υπολοίπων ήταν CaSiO_3 (wollastonite).

Στο πανεπιστήμιο Martin-Luther-University της Γερμανίας διεξήχθηκε μία μελέτη πάνω στην καταστροφή ΙΑ με αντιδραστήρα πλάσματος DC. Πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου μοντέλου υπολογιστικής δυναμικής ρευστών CFD, με σκοπό τη βαθύτερη κατανόηση της διαδικασίας θερμικής καταστροφής των ΙΑ και τον εντοπισμό σημείων βελτίωσής της. Έτσι, καταγράφηκαν οι κατανομές μεγεθών όπως θερμοκρασία, ταχύτητα, χρόνος παραμονής, τροφοδοσία αέρα, για την κατανόηση της επίδρασής τους στη ροή της διαδικασίας, το ρυθμό μετατροπής των ΙΑ σε παράγωγα προϊόντα και τη χρησιμοποίηση υψηλής ενθαλπίας αερίου πλάσματος [70].

4.2.2. Πυρόλυση με θερμικό πλάσμα

Η πυρόλυση με θερμικό πλάσμα είναι η τεχνολογία αιχμής για την ασφαλή διάθεση ΙΑ. Πρόκειται για μία τεχνολογία φιλική προς το περιβάλλον, με την οποία οργανικά απόβλητα μετατρέπονται σε χρήσιμα εμπορικά υπο-προϊόντα. Πρόκειται στην ουσία για συνδυασμό των θερμο-χημικών ιδιοτήτων του πλάσματος με τη διαδικασία της πυρόλυσης [76]. Μπορεί να περιγραφεί ως η διαδικασία χημικής αντίδρασης υδρογονανθράκων με περιορισμένες ποσότητες οξυγόνου υπό υψηλές θερμοκρασίες, κατά την οποία παράγονται αέρια και στερεά προϊόντα. Στην εξαιρετικά δραστική ζώνη του πλάσματος, υπάρχει μεγάλη ποσότητα ηλεκτρονίων, ιόντων και διεγερμένων μορίων, μαζί με ακτινοβολία υψηλής ενέργειας. Όταν ανθρακούχος ύλη, όπως κυρίως είναι τα ΙΑ, εγχύεται μέσα στο πλάσμα, αυτή θερμαίνεται ταχύτατα και διασπάται απελευθερώνοντας υδρογόνο και ελαφρούς υδρογονάνθρακες, όπως το μεθάνιο και η ακετυλίνη. Από τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η μείωση του όγκου της οργανικής ύλης, η οποία ξεπερνά το 99%, η πλήρης καταστροφή των παθογόνων οργανισμών, η σχεδόν μηδαμινή πααγωγή τοξικών αποβλήτων και η δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας.

Οι αντιδραστήρες θερμικού πλάσματος προσφέρουν τα παρακάτω μοναδικά πλεονεκτήματα, όσον αφορά την καταστροφή επικίνδυνων αποβλήτων [71,69] :

1. Η πυκνότητα υψηλής ενέργειας και οι υψηλές θερμοκρασίες, σε συνδυασμό με τους ταχύτατους χρόνους αντίδρασης, αυξάνουν τη δυναμική απόδοσης ως προς τον όγκο διαχείρισης και το μέγεθος της εγκατάστασης, εν συγκρίσει με συμβατικές θερμικές τεχνικές.
2. Οι αντιδραστήρες θερμικού πλάσματος χαρακτηρίζονται από απότομες θερμικές βαθμίδες, επιτρέποντας έτσι την κατάσβεση των εξερχόμενων συστατικών σε πολύ γρήγορους ρυθμούς. Τοιουτοτρόπως, ελαχιστοποιείται ο σχηματισμός επίμονων οργανικών μολυντών POPs (Persistent organic pollutants).
3. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση ευρείας γκάμας αποβλήτων, υγρών, στερεών και αερίων.
4. Η υψηλή πυκνότητα θερμικής ροής προς τα τοιχώματα του αντιδραστήρα οδηγεί γρήγορα σε κατάσταση σταθερών συνθηκών. Έτσι, μειώνονται δραστικά οι χρόνοι εκκίνησης και παύσης, χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η απόδοση του συστήματος, εν συγκρίσει με άλλες τεχνικές θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων, όπως είναι η αποτέφρωση.
5. Οι ταχύτητες αντίδρασης είναι αρκετά υψηλές, μειώνοντας έτσι το χρόνο επαφής των αποβλήτων.
6. Για τη δημιουργία πηγής θερμότητας δεν απαιτούνται οξειδωτικά μέσα, καθώς δεν καίγεται κάποιο καύσιμο. Έτσι, η παραγωγή απαερίων είναι πολύ μικρότερη από τις συμβατικές διεργασίες καύσης, και συνεπώς, η διαχείρισή του γίνεται ευκολότερα και οικονομικότερα.
7. Ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών που προαναφέρθηκαν επιτρέπει την ενσωμάτωση της τεχνολογίας αντιμετώπισης αποβλήτων με θερμικό πλάσμα σε διεργασίες ρυπογόνες. Με τον τρόπο αυτό έχουμε καταστροφή αποβλήτων στον τόπο δημιουργία τους.

Οι αντιδραστήρες πλάσματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τήξη, ή με κατάλληλη προσθήκη υαλοποιητών, την υαλοποίηση αποβλήτων, ώστε να σχηματισθεί ένα ευσταθές, αδρανές, αδιαπέραστο, υαλώδες προϊόν, στο πλέγμα του οποίου εγκλωβίζονται οι επικίνδυνες ουσίες. Το υαλώδες αυτό προϊόν είναι δυνατό να επαναχρησιμοποιηθεί, και άλλα προϊόντα με υψηλή προστιθέμενη αξία, όπως είναι τα παλαιοσιδηρικά, να ανακτούνται με ασφάλεια. Επιπλέον, το πλάσμα μπορεί να αποδομήσει θερμικά επικίνδυνες οργανικές ουσίες σε απλούστερες και καλοήθεις. Εναλλακτικά, σε συνδυασμό με την πυρόλυση και την αεριοποίηση, το οργανικό κλάσμα των αποβλήτων μετατρέπεται σε συνθετικό αέριο, το γνωστό syngas, το οποίο υποκαθιστά τα ορυκτά καύσιμα. Στο επόμενο σχήμα 4-3 απεικονίζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα για τη διαδικασία αεριοποίησης/υαλοποίησης επικίνδυνων αποβλήτων με πλάσμα, το οποίο με περισσότερες λεπτομέρειες αναλύεται στην εργασία των [82].

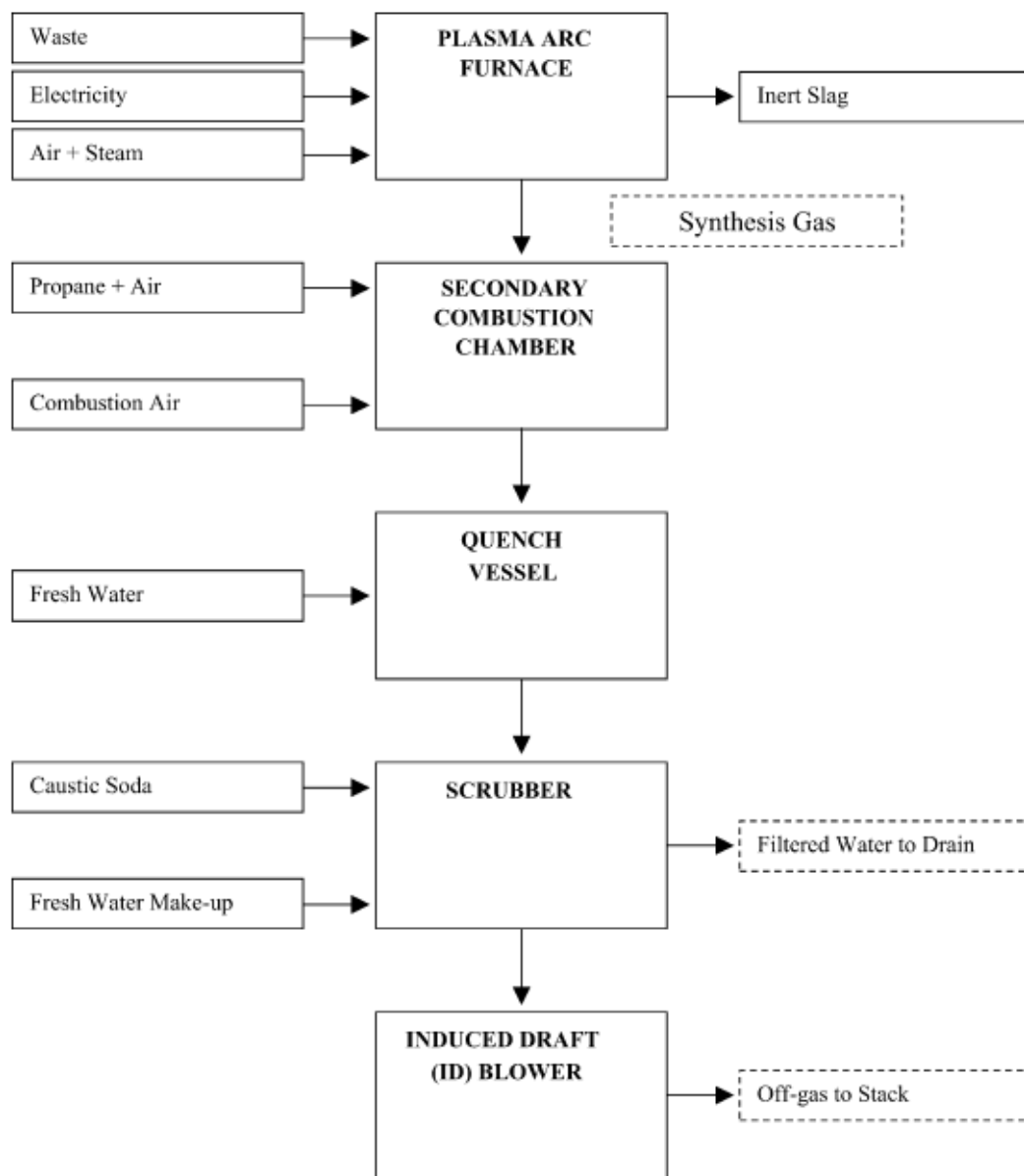
4.2.3. Τεχνολογία τήξης/ αεριοποίησης με πλάσμα (PGM)

Η τεχνολογία τήξης/αεριοποίησης με πλάσμα PGM (Plasma-Gasification-Melting) αναπτύχθηκε για τη μετατροπή των αποβλήτων σε συνθετικό αέριο (syngas) και σε προϊόντα κατάλληλα ως δομικά υλικά. Η βασική ιδέα της τεχνολογίας αναπτύχθηκε στο ινστιτούτο Kurchatov της Ρωσίας, όπου και χρησιμοποιείται για περισσότερο από μία δεκαετία για την αντιμετώπιση ραδιενεργών αποβλήτων χαμηλής και μεσαίας ακτινοβολίας. Είναι, όμως, εφαρμόσιμη και σε αστικά στερεά απόβλητα, σε λυμματολάσπη, βιομηχανικά αλλά και ιατρικά απόβλητα [83].

Η τεχνολογία PGM αναπτύχθηκε για να ισοσκελίσει το απαγορευτικό κόστος των τεχνολογιών αντιμετώπισης αποβλήτων με πλάσμα, με την παραγωγή εμπορικής αξίας syngas από αεριοποίηση. Με άλλα λόγια, η τεχνολογία PGM συνδυάζει την υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα της διαδικασίας αεριοποίησης, κατά την οποία πλέον του 90% της εσωτερικής ενέργειας των αποβλήτων μετατρέπεται σε syngas, με τα πλεονεκτήματα της παραγωγής αδρανών υλικών και της καταστροφής μολυσματικών παραγόντων. Επιπροσθέτως, το ρυπαντικό φορτίο της τεχνολογίας PGM είναι σημαντικά μικρότερο από τις τελευταία επικρατούσες τεχνολογίες της αποτέφρωσης. Αυτό επιτυγχάνεται χάριν στο μοναδικό σχεδιασμό του αντιδραστήρα PGM και στη χαμηλή θερμοκρασία του εξαγόμενου syngas. Στο συνδυασμό των δύο αυτών χαρακτηριστικών οφείλεται η μείωση του κόστους επένδυσης και των λειτουργικών εξόδων [83].

Μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις ζώνες αντίδρασης, καθ' όλη τη διαδικασία [78,69]:

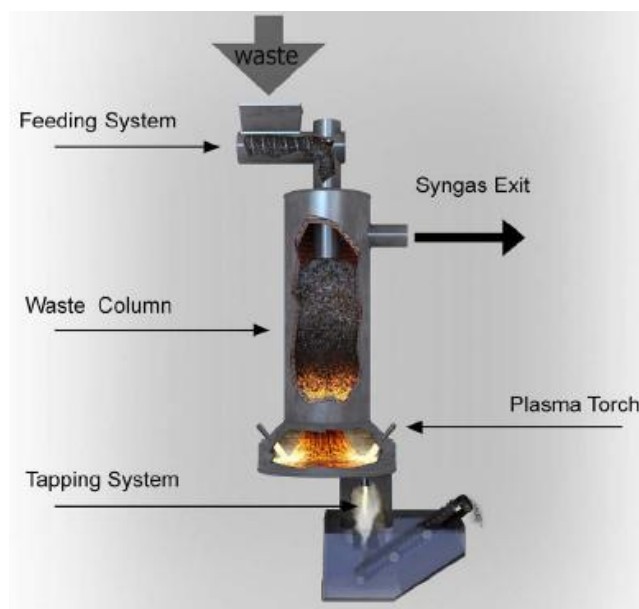
1. Ζώνη αφύγρανσης, κατά την οποία έχουμε εξάτμιση της υγρασίας που περιέχεται στα απόβλητα,
2. Ζώνη πυρόλυσης. Τα ανθρακούχα συστατικά μετατρέπονται σε πυρολυτικό αέριο, το οποίο μαζί με τα προϊόντα αεριοποίησης, σχηματίζουν το syngas.
3. Ζώνη αεριοποίησης. Με την εισαγωγή οξειδωτικών μέσων επέρχεται αεριοποίηση του άνθρακα, παράγοντας κυρίως CO και H₂, εμπλουτίζοντας τα πυρολυτικά αέρια και αυξάνοντας τη συνολική θερμογόνο δύναμη.
4. Ζώνη τήξης. Βρίσκεται στο κατώτατο σημείο του αντιδραστήρα



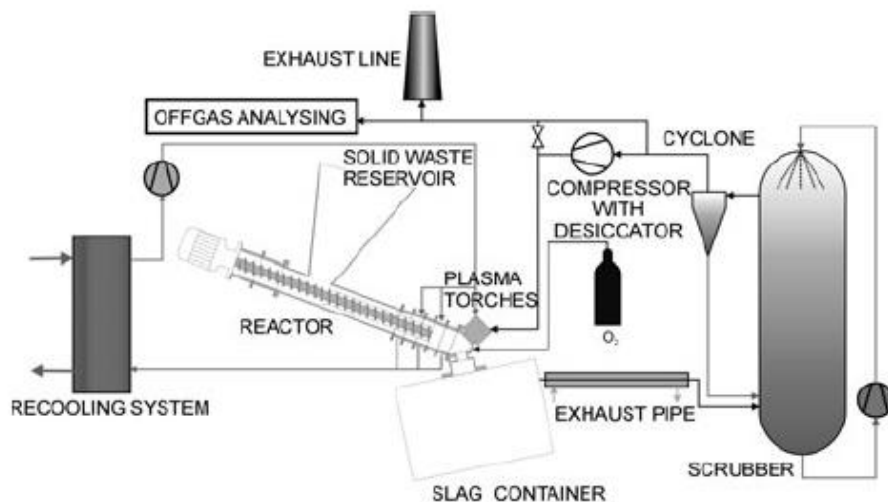
Σχήμα 4-3: Αεριοποίηση/υαλοποίηση επικίνδυνων αποβλήτων με πλάσμα : διάγραμμα ροής, [82].

Στο Σχήμα 4-4, που ακολουθεί απεικονίζεται ένας αντιδραστήρας PGM [83].

Ενώ, στο επόμενο Σχήμα 4-5, απεικονίζεται η διάταξη ενός σταθμού διαχείρισης ΙΑ με τεχνολογία θερμικού πλάσματος [70] :



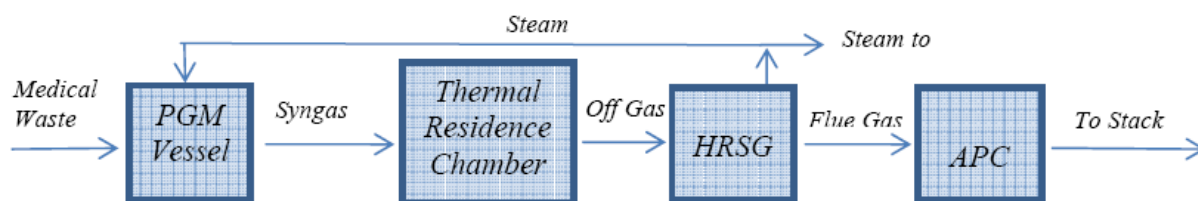
Σχήμα 4-4: Αντιδραστήρας PGM, [83].



Σχήμα 4-5: Διάταξη σταθμού διαχείρισης ΙΑ με πλάσμα, [70].

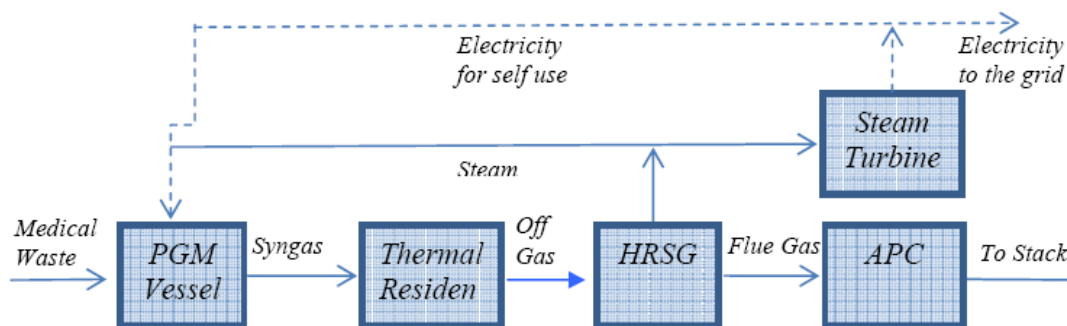
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η τεχνολογία PGM δίνει τη δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας, λόγω της υψηλής θερμογόνου αξίας του παραγόμενου syngas. Προς τούτο υπάρχουν δύο δυνατότητες [83]:

1. Παραγωγή ατμού ή θερμότητας



Σχήμα 4-6: Διάγραμμα ροής για παραγωγή ατμού ή θερμότητας, [83].

2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 4-7: Διάγραμμα ροής για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, [83].

Και στις δύο περιπτώσεις, το syngas παράγεται στον αντιδραστήρα PGM, από όπου μεταφέρεται σε ειδικό θάλαμο για να καταστραφούν οι διοξίνες και ό,τι άλλο τοξικό και επικίνδυνο έχει παραχθεί. Στον θάλαμο αυτό διατηρείται για δύο (2) τουλάχιστον δευτερόλεπτα σε θερμοκρασία 1,100°C. Εξαιτίας της υψηλής θερμογόνου αξίας του syngas απαιτούνται ελάχιστες ποσότητες ορυκτών καυσίμων για την έναυση του syngas. Τα απαέρια στη συνέχεια εισέρχονται στη ατμογεννήτρια ανάκτησης θερμότητας HRSG (Heat Recovery Steam Generator) για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού. Τα καυσαέρια τελικά διέρχονται από το σύστημα καθαρισμού καυσαερίων APC (Air Pollution Control System), για να τηρηθούν οι προδιαγραφές των κανονισμών ελέγχου ρύπανσης. Στην περίπτωση που απαιτείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ο ατμός που εξέρχεται της HRSG εισέρχεται σε ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Βιβλιογραφία 1^{ου} μέρους

- 1 Marco J. Castaldi, Nickolas J. Themelis, “The Case for Increasing the Global Capacity for Waste to Energy (WTE)”, *Waste Biomass Valor* (2010) 1:91–105.
- 2 Petr Stehlik, “Contribution to advances in waste-to-energy technologies”, *Journal of Cleaner Production* 17 (2009) 919–931.
- 3 Council Directive 1999/31/EC of the European parliament and of the council of 26 April 1999 on the landfilling of waste. *Official Journal of the European Communities* 1999; L182:1–19.
- 4 Grosso M, Cernuschi S, Giugliano M, Lonati G, Rigamonti L. Environmental release and mass flux partitioning of PCDD/Fs during normal and transient operation of full scale waste to energy plants. *Chemosphere* 2007; 67:118–24.
- 5 Parizek T, Bebar L, Stehlik P. A persistent pollutants emission abatement in waste-to-energy systems. *Clean Technology and Environmental Policy* 2008; 10(2):147–53.
- 6 Reimann DO. CEWEP energy report (status 2001–2004). Result of specific data for energy, efficiency rates and coefficients, plant efficiency factors and NCV of 97 European W-t-E plants and determination of the main energy results; Updated July 2006. Bamberg, Germany.
- 7 Αραβώσης, Κ. (1999) “Σχεδιασμός και εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων και τεχνολογιών για τη διαχείριση των μολυσματικών νοσοκομειακών αποβλήτων” στα πρακτικά της HELECO '99, Αθήνα.
- 8 Ξηρογιαννοπούλου, Α. (2000) Διαχείριση Στερεών Νοσοκομειακών Αποβλήτων, Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- 9 Σοφία Μπακοπούλου, et, al., (2005). “Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης Νοσοκομειακών Αποβλήτων Ως Μέσο Προσδιορισμού Των Απαιτούμενων Επενδύσεων: Η Περίπτωση Της Περιφέρειας Θεσσαλίας”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Planning & Development*, 12- 14/09/05, Bologna, Italy.
- 10 A, Karagiannidis, A. Papageorgiou, G. Perkoulidis, G. Sanida, P. Samaras, A multi-criteria assessment of scenarios on thermal processing of infectious hospital wastes: A case study for Central Macedonia, *Waste Management* 30 (2010) 251–262
- 11 Graikos, A., et al. Composition and production rate of medical waste from a small producer in Greece. *Waste Management* (2010), doi:10.1016/j.wasman.2010.01.025
- 12 G. Sanida et al, “Assessing generated quantities of infectious medical wastes: A case study for a health region administration in Central Macedonia, Greece”, *Waste Management* 30 (2010) 532–538
- 13 Mochammad Chaerul, Masaru Tanaka, Ashok V. Shekdar, “A system dynamics approach for hospital waste management”, *Waste Management* 28 (2008) 442–449
- 14 Byeong-Kyu Lee, Michael J. Ellenbeckerb, Rafael Moure-Eraso, “Analyses of the recycling potential of medical plastic wastes”, *Waste Management* 22 (2002) 461–470
- 15 L.F. Diaz, L.L. Eggerth, Sh. Enkhtsetseg, G.M. Savage, “Characteristics of healthcare wastes”, *Waste Management* 28 (2008) 1219–1226
- 16 Hassan Taghipoura, Mohammad Mosaferi, “Characterization of medical waste from hospitals in Tabriz, Iran”, *Science of the total environment* 407 (2009) 1527 – 1535

- 17 Magda Magdy Abd El-Salam, "Hospital waste management in El-Beheira Governorate, Egypt", *Journal of Environmental Management* 91 (2010) 618–629
 - 18 M. Sawalem, E. Selic, J.-D. Herbell, "Hospital waste management in Libya: A case study", *Waste Management* 29 (2009) 1370–1375
 - 19 Natalija Marinkovic, "Management of hazardous medical waste in Croatia", *Waste Management* 28 (2008) 1049–1056
 - 20 Zhang Yong et al., "Medical waste management in China: A case study of Nanjing", *Waste Management* 29 (2009) 1376–1382
 - 21 Yong-Chul Jang et al., "Medical waste management in Korea", *Journal of Environmental Management* 80 (2006) 107–115
 - 22 Mehmet Emin Birpınar et al., "Medical waste management in Turkey: A case study of Istanbul", *Waste Management* 29 (2009) 445–448
 - 23 Masum A. Patwary et al., "Quantitative assessment of medical waste generation in the capital city of Bangladesh", *Waste Management* 29 (2009) 2392–2397
 - 24 Fayez Abdulla, et al., "Site investigation on medical waste management practices in northern Jordan", *Waste Management* 28 (2008) 450–458
 - 25 Motonobu Miyazaki, Takuya Imatoh, Hiroshi Une, "The treatment of infectious waste arising from home health and medical care services: Present situation in Japan", *Waste Management* 27 (2007) 130–134
 - 26 Martha Cobo et al., "Characterization of fly ash from a hazardous waste incinerator in Medellin, Colombia", *Journal of Hazardous Materials* 168 (2009) 1223–1232.
 - 27 Lijuan Zhao et al., "Chemical properties of heavy metals in typical hospital waste incinerator ashes in China", *Waste Management* 29 (2008) 1114–1121
 - 28 Lijuan Zhao et al., "Chemical properties of rare earth elements in typical medical waste incinerator ashes in China", *Journal of Hazardous Materials* 158 (2008) 465–470
 - 29 M. Coutinho et al., "Impact of medical waste incineration in the atmospheric PCDD/F levels of Porto, Portugal", *Science of the Total Environment* 362 (2006) 157–165
 - 30 Rong Xie, et al. "Emissions investigation for a novel medical waste incinerator", *Journal of Hazardous Materials* 166 (2009) 365–371
 - 31 A.F. Shaaban, Process engineering design of pathological waste incinerator with an integrated combustion gases treatment unit, *Journal of Hazardous Materials* 145 (2007) 195–202
 - 32 ΥΑ ΗΠ 37591/2031/2003 - ΦΕΚ 1419/Β/1.10.2003 : "Μέτρα και όροι για τη διαχείριση ιατρικών αποβλήτων από υγειονομικές μονάδες".
 - 32β ΥΑ ΗΠ 8668/2007 ΦΕΚ 287/Β/02.03.2007 : " Έγκριση Εθνικού Σχεδιασμού Διαχείρισης Επικίνδυνων Αποβλήτων (ΕΣΔΕΑ)".
 - 33 Απόφαση 2001/118/ΕΚ της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων : για την τροποποίηση της Απόφασης 2000/532/ΕΚ όσον αφορά τον κατάλογο αποβλήτων
 - 34 Απόφαση 2000/532/ΕΚ της Επιτροπής των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων : αφορά τον κατάλογο αποβλήτων
-

-
- 35 Safe management of wastes from health-care activities, 1999, World Health Organization
 - 36 Santoleri JJ, Reynolds J, Theodore L (2000), "Introduction to hazardous waste incineration", 2nd ed. Wiley, New York
 - 37 Niessen WR (1995), "Combustion and incineration processes", Marcel Dekker Inc, New York
 - 38 Brunner CR (1996), "Incineration Systems handbook", Incinerators Consultants Incorporated, Reston
 - 39 John Pichtel (2005) "Waste management practices: municipal, hazardous, and industrial", Taylor & Francis Group, LLC
 - 40 R. E. Rester, R. M. Harrison, (1994), "Waste Incineration and the Environment", The Royal Society of Chemistry
 - 41 Charles O. Velzy, J. Feldman and M. Trichon, "Incineration technology for managing biomedical wastes", Waste Management & Research (1990) 8, 293-298
 - 42 W. Jangsawang, B. Fungtammasan, S. Kerdsuwan, "Effects of operating parameters on the combustion of medical waste in a controlled air incinerator", Energy Conversion and Management 46 (2005) 3137–3149
 - 43 C.C. Lee, G.L. Huffman, "Review : Medical waste management/incineration", Journal of Hazardous Materials 48 (1996) 1-30
 - 44 M.C.M. Alvim-Ferraz, S.A.V. Afonso, "Incineration of different types of medical wastes: emission factors for gaseous emissions", Atmospheric Environment 37 (2003) 5415–5422
 - 45 M.C.M. Alvim-Ferraz, S.A.V. Afonso, "Incineration of healthcare wastes: management of atmospheric emissions through waste segregation", Waste Management 25 (2005) 638–648
 - 46 M. C. M. Alvim Ferraz, S. A. V. Afonso, "Dioxin Emission Factors for the Incineration of Different Medical Waste Types", Arch. Environ. Contam. Toxicol. 44, 460–466 (2003)
 - 47 Wen-Jhy Lee, Ming-Chu Liow, Perng-Jy Tsai, Lien-Te Hsieh, "Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from medical waste incinerators", Atmospheric Environment 36 (2002) 781–790
 - 48 Mmg-Chu Ltow et al., "Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the medical waste incinerators", J. Aerosol Sci. Vol. 28, Suppl. 1, pp. 549-550, 1997
 - 49 S. Sadhra, A.D. Wheatley, "Polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from clinical waste incineration", Chemosphere 66 (2007) 2177–2184
 - 50 Tong Chen et al., "Polychlorinated biphenyls emission from a medical waste incinerator in China", Journal of Hazardous Materials 172 (2009) 1339–1343
 - 51 A, Hoyos, M. Cobo, B. Aristizábal, F. Córdoba, C. Montes de Correa, "Total suspended particulate (TSP), polychlorinated dibenzodioxin (PCDD) and polychlorinated dibenzofuran (PCDF) emissions from medical waste incinerators in Antioquia, Colombia", Chemosphere 73 (2008) S137–S142
 - 52 Satnam Singh & Vinit Prakash, "Toxic Environmental Releases from Medical Waste Incineration: A Review", Environ Monit Assess (2007) 132:67–81
 - 53 R. Ibáñez, A. Andrés, J.R. Viguri, I. Ortiz, J.A. Irabien, "Characterisation and management of incinerator wastes", Journal of Hazardous Materials A79 (2000) 215–227
-

- 54 Lijuan Zhao, Fu-Shen Zhang, Kaisheng Wang, Jianxin Zhu, "Chemical properties of heavy metals in typical hospital waste incinerator ashes in China", *Waste Management* 29 (2008) 1114–1121
- 55 Lijuan Zhao, Fu-Shen Zhang, Jingxin Zhang, "Chemical properties of rare earth elements in typical medical waste incinerator ashes in China", *Journal of Hazardous Materials* 158 (2008) 465–470
- 56 Lijuan Zhao, et al. "Typical pollutants in bottom ashes from a typical medical waste incinerator", *Journal of Hazardous Materials* 173 (2010) 181–185
- 57 Sabiha-Javied et al., "Heavy metal pollution from medical waste incineration at Islamabad and Rawalpindi, Pakistan", *Microchemical Journal* 90 (2008) 77–81
- 58 Sukandar Sukandar et al., "Metals leachability from medical waste incinerator fly ash: A case study on particle size comparison", *Environmental Pollution* 144 (2006) 726e735
- 59 http://www.gore.com/en_xx/products/filtration/catalytic/index.html
- 60 Catalytic Destruction of PCDD/F in a Fabric Filter, at a municipal waste incinerator in Roeselare, Belgium, GORE Inc
- 61 Catalytic Filtration: Experience in Batch & Continuous MWI, at municipal waste incinerators in Japan, GORE Inc
- 62 Catalytic Destruction of PCDD/F - Lab Test & Medical Waste Incinerator Performance, GORE Inc.
- 63 J.H. Yan, et al., "Degradation of PCDD/Fs by mechanochemical treatment of fly ash from medical waste incineration", *Journal of Hazardous Materials* 147 (2007) 652–657
- 64 Stulir R, Stehlik P, Oral J., "Efficient equipment with special heat exchanger for thermal treatment of polluted air – experiments, computations, applications", *Heat Transfer Engineering* 2003; 24:60–9
- 65 Filip M, Buchta J, Bebar L, Stehlik P. "New design in off-gas cleaning systems supported by experimental and computational approach". In: Klemesˇ J, editor. *Proceedings of eighth conference on process integration, modelling and optimisation for energy saving – PRES'05. Chemical engineering transactions*, vol. 7; 2005. p. 375–80
- 66 Dvorak R, Chlapek P, Stehlik P, Oral J. Novel integrated unit for flue gas cleaning. In: *Proceedings of the CHISA 2008. PRES2008 and system engineering*, J5.1, vol. 4; 2008. p. 1141. Prague
- 67 O. Auciello, D.L. Flamm, *Plasma Diagnostics, Plasma-materials Interactions*, vol. 1, Academic Press, Boston, [Mass.], 1989.
- 68 M.I. Boulos, *Thermal plasma processing*, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 19 (1991) 1078–1089.
- 69 Huang H., Tang L., "Treatment of organic waste using thermal plasma Pyrolysis technology", *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 1331:1337.
- 70 J. Fiedler, E. Lietz, D. Bendix, D. Hebecker, Experimental and numerical investigation of a plasma reactor for the thermal destruction of medical waste using a model substance, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37 (2004) 1031–1040.
- 71 Gomez, E., Rani, D.A., Cheeseman, C.R., Deegan, D., Wise, M., Boccaccini, A.R., Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review, *Journal of Hazardous Materials* 161 (2-3), (2009) pp. 614-626.
- 72 G. Bonizzoni, E. Vassallo, *Plasma physics and technology; industrial applications*, *Vacuum* 64 (2002) 327–336.

-
- 73** A. Gleizes, J.J. Gonzalez, P. Freton, Thermal plasma modelling, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38 (2005) R153–R183.
- 74** M.I. Boulos, New frontiers in thermal plasma processing, *Pure Appl. Chem.* 68 (1996) 1007–1010.
- 75** Zhao HQ. Plasma chemistry and technique. Hefei: University of Science and Technology of China Press; 1993.
- 76** S.K. Nema, K.S. Ganeshprasad, Plasma pyrolysis of medical waste, *Curr. Sci.* 83 (2002) 271–278.
- 77** J.P. Chu, I.J. Hwang, C.C. Tzeng, Y.Y. Kuo, Y.J. Yu, Characterization of vitrified slag from mixed medical waste surrogates treated by a thermal plasma system, *J. Hazard. Mater.* 58 (1998) 179–194.
- 78** Dor L., “Plasma gasification and melting technology, a novel solution for medical waste treatment”, Joint Conference: International Thermal Treatment Technologies (IT3) and Hazardous Waste Combustors (HWC), Volume 183 CP, (2009), Page 70.
- 79** [Sheng H., Wang R., Xu Y, Tian J., “AC plasma arc system for Pyrolysis of medical waste and POPs”, 27th Annual International Conference on Thermal Treatment Technologies 2008, paper#77]
- 80** H.S. Park, B.J. Lee, S.J. Kim, Medical waste treatment using plasma, *J. Ind. Eng. Chem.* 11 (2005) 353–360.
- 81** K. Cedzynska, Z. Kolacinski, M. Izydorczyk, W. Sroczynski, Plasma vitrification of waste incinerator ashes, in: International Ash Utilization Symposium, Centre for Applied Energy Research, University of Kentucky, 1999.
- 82** K. Moustakas, D. Fatta, S. Malamis, K. Haralambous, M. Loizidou, Demonstration plasma gasification/vitrification system for effective hazardous waste treatment, *J. Hazard. Mater.* 123 (2005) 120–126.
- 83** Dor L., Bartocci A.C., Environmentally friendly medical waste recycling using plasma-gasification-melting (PGM) and wet scrubbing technology, <http://www.envitechinc.com/air-pollution-control-innovations/>
- 84** Eurostat. Statistical office of the European communities, key indicators on EU policy – structural indicators – environment – municipal waste (generated, landfilled and incinerated). on-line database available from, <epp.eurostat.ec.europa.eu>. update from 20 December 2007 [last accessed 24.11.08].
- 85** Γκέκας, Β., Φραντζεσκάκη, Ν., Κατσιβελα, Ε. (2002) Τεχνολογίες Επεξεργασίας Τοξικών - Επικίνδυνων Αποβλήτων, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
-

ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ

Β ΜΕΡΟΣ

Ενέργεια-από-Απόβλητα

ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ

5. ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

5.1. Γενικά περί της φιλοσοφίας «Ενέργεια-από-Απόβλητα»

Στο πεδίο της προστασίας του περιβάλλοντος ευαισθητοποιημένοι πολίτες και φορείς έρχονται αντιμέτωποι με πολλές προκλήσεις, οι οποίες φαίνονται αξεπέραστες. Οι προκλήσεις αυτές αφορούν την αναγνώριση και υλοποίηση μακροχρόνιων λύσεων πάνω στη διαχείριση αποβλήτων, λύσεις οι οποίες είναι περιβαλλοντικά ασφαλείς, κοινωνικά αποδεκτές και οικονομικά βιώσιμες. Απόβλητα παράγονται ως δευτερεύοντα προϊόντα των βιομηχανικών διεργασιών ή και ως αποτέλεσμα του αυξημένου βιωτικού επιπέδου των σύγχρονων κοινωνιών. Ο καλύτερος και οικονομικότερος τρόπος αντιμετώπισης των αποβλήτων είναι η μείωση της παραγωγής τους. Ωστόσο, εφόσον τα απόβλητα παράγονται δεν μπορούν να καταστραφούν/εξαφανιστούν και κρίνεται απαραίτητη η επεξεργασία τους. Μία ευρέως διαδεδομένη τεχνική είναι η αποτέφρωση, η οποία εν συγκρίσει με άλλες τεχνικές, όπως η υγειονομική ταφή, συνοδεύεται από μια σειρά σημαντικών πλεονεκτημάτων, Πίνακας 5-1, [1] :

Πίνακας 5-1. Πλεονεκτήματα αποτέφρωσης
Ταχύτητα διεργασίας (στην περίπτωση της υγειονομικής ταφής, τα απόβλητα αποδομούνται για δεκαετίες)
Δυνατότητα επεξεργασίας ιδιαιτέρως επικίνδυνων αποβλήτων (όπως ιατρικά, κ.α.)
Δυνατότητα προσαρμογής εξοπλισμού καθαρισμού αερίων και στερεών υπολοίπων
Δυνατότητα αποδοτικής εκμετάλλευσης της παραγώμενης θερμικής ενέργειας (απόβλητα προς ενέργεια)

Η θερμική επεξεργασία των αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των αστικών, βιομηχανικών, ιατρικών και άλλων επικίνδυνων, περιγράφεται εκτενέστατα σε αρκετές μονογραφίες, [2-7]. Εντούτοις, το κυριότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι σχεδιαστές νέων μονάδων θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων, είναι οι ολοένα και αυστηρότερες νομοθεσίες περί προστασίας του περιβάλλοντος. Αν συγκρίνουμε τις αλλαγές στις προδιαγραφές ποιότητας των παρα-προϊόντων της καύσης (Οδηγίες 94/67/ΕΚ, 2000/76/ΕΚ) θα διαπιστώσουμε ότι η νομοθεσία είναι η κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη νέου εξοπλισμού υψηλής αποδοτικότητας, ο οποίος πρέπει να ενσωματώνεται στις τεχνολογίες θερμικής επεξεργασίας.

Παρόλο που η κύρια λειτουργία των μονάδων θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων είναι προφανής, οι αποτεφρωτήρες δεν πρέπει να θεωρούνται μόνο ως εγκαταστάσεις επεξεργασίας αποβλήτων. Οι αποτεφρωτήρες αποβλήτων μπορούν επιπλέον να θεωρηθούν ως μονάδες ανακυκλούμενης ενέργειας, η οποία εμπεριέχεται στα υλικά, και η οποία θεωρούμε ότι καταναλώθηκε για την παραγωγή τους. Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε στην τεχνολογία παραγωγής Ενέργειας-από-Απόβλητα (Energy-from-Waste -EfW ή Waste-to-Energy WTE). Η έννοια EfW αναφέρεται επίσης και ως θερμική επεξεργασία αποβλήτων με εκμετάλευση της παραγόμενης ενέργειας. Με άλλα λόγια, δεν σημαίνει απλά την καύση διαφόρων τύπων αποβλήτων λόγω της σημαντικής μείωσης του όγκου τους, αλλά, επιπλέον, τα συστήματα EfW ή WTE έχουν τη δυνατότητα να μας εφοδιάζουν με καθαρή και αξιόπιστη ενέργεια τόσο με τη μορφή θερμότητας όσο και με τη μορφή του ηλεκτρισμού. Σε αρκετές ευρωπαϊκές χώρες η ενέργεια από συστήματα WTE θεωρείται ανανεώσιμη και τιμολογείται με τον ίδιο τρόπο όπως, για παράδειγμα η ενέργεια από βιομάζα, η οποία χαίρει σημαντικής υποστήριξης μέσα στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Οδηγία 2001/77/ΕΚ).

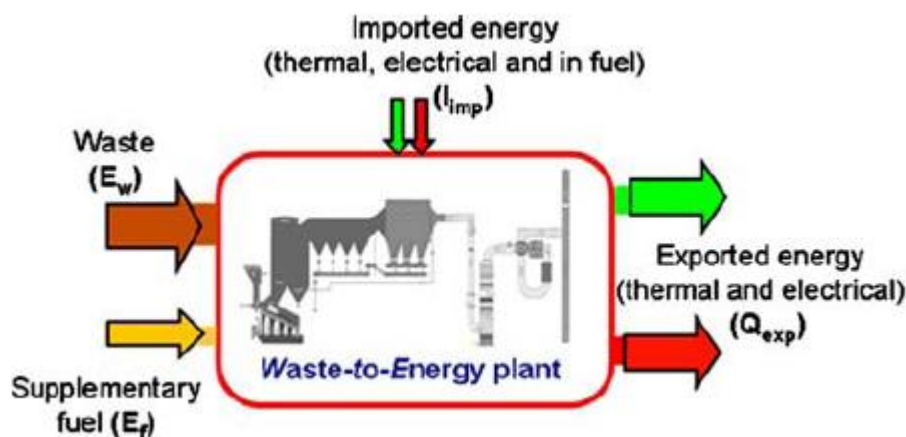
Υπό αυτό το πρίσμα, τα απόβλητα δεν θεωρούνται πλέον ως πρόβλημα, ενώ την ίδια στιγμή, αποτελούν πηγή ενέργειας, η οποία συνεισφέρει στην επίλυση μιας άλλης παγκόσμιας πρόκλησης : τη βιώσιμη και ασφαλή μεταφορά ενέργειας, καθώς και τη μείωση των εκπομπών που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Σε κάποιο βαθμό, οι σταθμοί WTE μπορούν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας μέσω ορυκτών καυσίμων. Συγκρινόμενοι με άλλες τεχνικές, οι σύγχρονες μονάδες αποτέφρωσης αποβλήτων αντιπροσωπεύουν βέλτιστες τεχνολογίες αξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Επιπλέον, εύκολα ενσωματώνονται σε υπάρχοντες σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και διανομής θερμότητας (τηλεθέρμανση, χημικές βιομηχανίες, κ.α.), όπως περιγράφονται στους [7a,8,9].

5.2. Απόδοση συστημάτων παραγωγής «Ενέργεια-από-Απόβλητα»

Όπως κάθε διεργασία, έτσι και η θερμική επεξεργασία αποβλήτων καταναλώνει ενέργεια και βοηθητικά μέσα, και μαζί με την παραγωγή ενέργειας, παράγει και απόβλητα (επιβλαβή προϊόντα καύσης, στερεά υπολείμματα, κ.α.), όπως στο επόμενο Σχήμα 5-1.

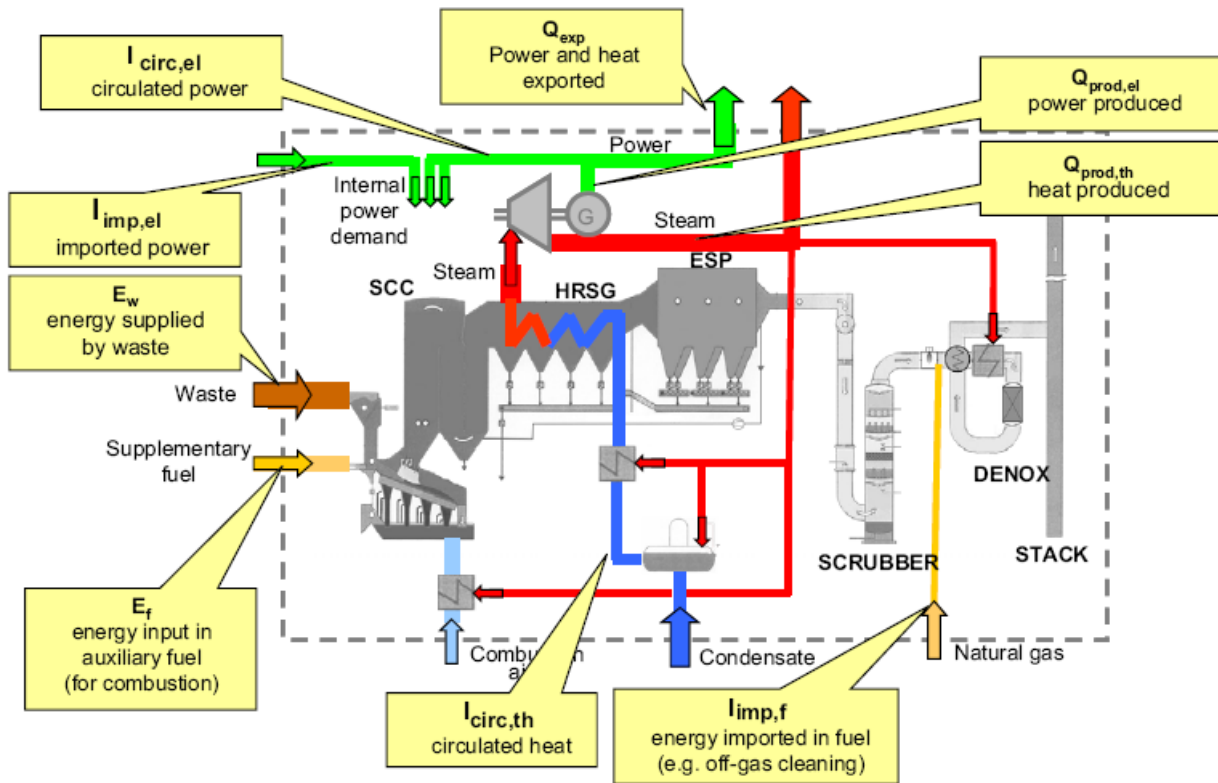
Η δυνατότητα εξοικονόμησης πρωταρχικής ενέργειας εκτιμάται από τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας που παράγεται και της ενέργειας που καταναλώνεται. Οι κυριότερες ροές ενέργειας για μία τυπική μονάδα αποτέφρωσης αστικών αποβλήτων φαίνονται στο επόμενο Σχήμα 5-2. Αντίστοιχα, για μία μονάδα αποτέφρωσης επικίνδυνων ιατρικών αποβλήτων, οι ροές ενέργειας και μάζας συνοψίζονται στο επόμενο Σχήμα 5-3.



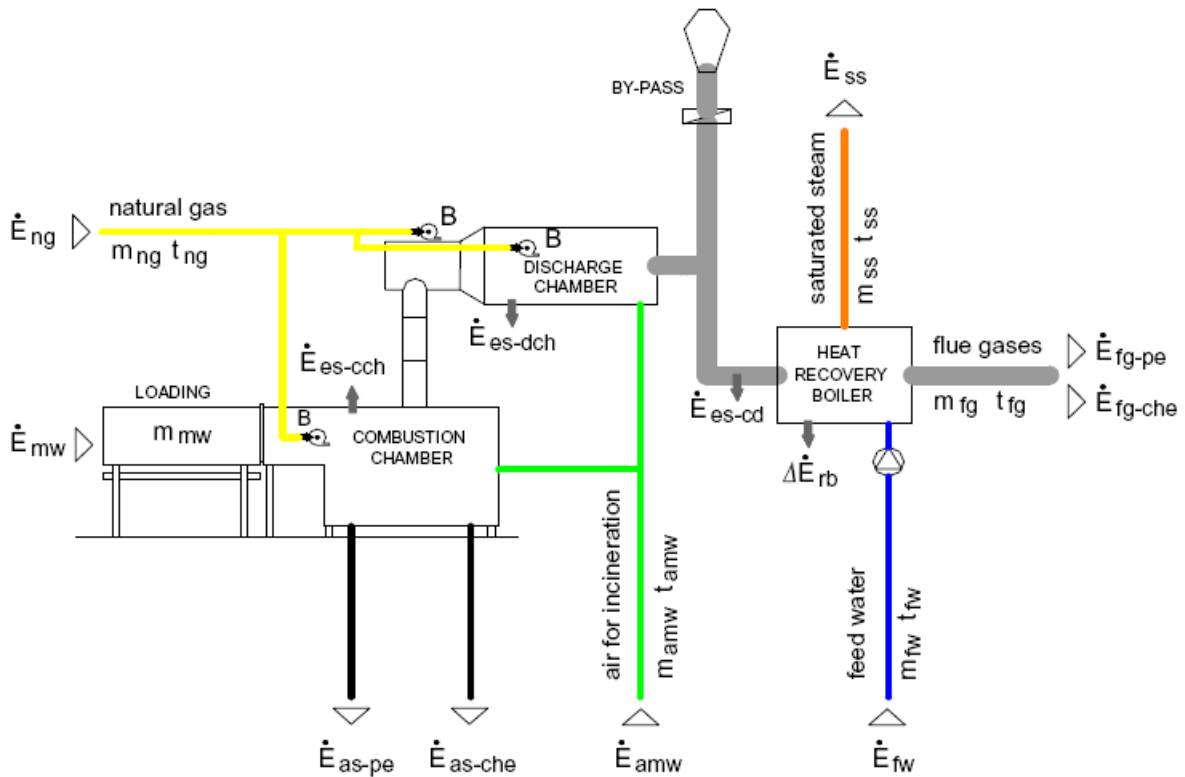
Σχήμα 5-1: Θερμική επεξεργασία αποβλήτων και ροές ενέργειας, [1].

Μία σειρά από κριτήρια για τη σύγκριση της αποδοτικότητας των μονάδων αποτέφρωσης ως προς την ανάκτηση ενέργειας παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα. Κοινό τους χαρακτηριστικό είναι η προσπάθεια να περιγράψουν τη σχέση μεταξύ της ενέργειας εξόδου (παραγόμενη ή εξαγόμενη) από τη μία, και των ενεργειακών απαιτήσεων για τη λειτουργία του σταθμού, από την άλλη. Τα κριτήρια αυτά καταγράφονται σε ένα σχέδιο/συζήτηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη μετάβαση από την κατάσταση «διάθεσης αποβλήτων» στην κατάσταση «ανάκτησης ενέργεια» από τα απόβλητα [10], στον επόμενο Πίνακα 5-2 :

Πίνακας 5-2. Σύγκριση κριτηρίων απόδοσης ενεργειακής ανάκτησης. [1]			
Προτεινόμενο από	Κριτήριο	Εξίσωση	WtE
The Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP 2004)	Plant efficiency factor	$Pl_{ef} = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{E_f + I_{imp} + I_{circ}}$	$Pl_{ef} > 1$
	Energy utilization rate	$\eta = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{f_B \cdot (E_w + E_f)}$	$\eta > 0,5$
Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration (European IPPC Bureau 2005)	Plant efficiency	$Pl_{ef} = \frac{Q_{exp} - (E_f + I_{imp})}{E_f + I_{imp} + I_{circ}}$	
Proposal for a Directive on waste (Proposal for a Directive on waste 2005)	Energy efficiency	$\eta_e = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{f_B \cdot (E_w + E_f)}$	$\eta > 0,6$ $\eta < 0,65^a$
^a Για αδειοδότηση εγκαταστάσεων μετά την 31 ^η Δεκεμβρίου 2008			



Σχήμα 5-2: Κύριες ροές ενέργειας σε σταθμό αποτέφρωσης ΑΣΑ. [1,11]



Σχήμα 5-3: Κύριες ροές ενέργειας και μάζας σε αποτεφρωτήρα με λέβητα ανάκτησης θερμότητας. [12]

Η σημασία των συμβόλων είναι εμφανής από τα προηγούμενα σχήματα, και συνοψίζεται στον επόμενο Πίνακα 5-3 :

Πίνακας 5-3. Σημασία συμβόλων

Q_{prod} : συνολική ποσότητα παραγόμενης ενέργειας (θερμικής και ηλεκτρικής)

Q_{exp} : συνολική ποσότητα εξαγόμενης ενέργειας (θερμικής και ηλεκτρικής)

I_{imp} : εισερχόμενη ενέργεια, όχι για παραγωγή θερμότητας

- (π.χ. καταναλισκόμενο φυσικό αέριο στην υπομονάδα καθαρισμού αερίων)

E_{ef} : εισερχόμενη ενέργεια στη διεργασία της καύσης

- (π.χ. συμπληρωματικό καύσιμο)

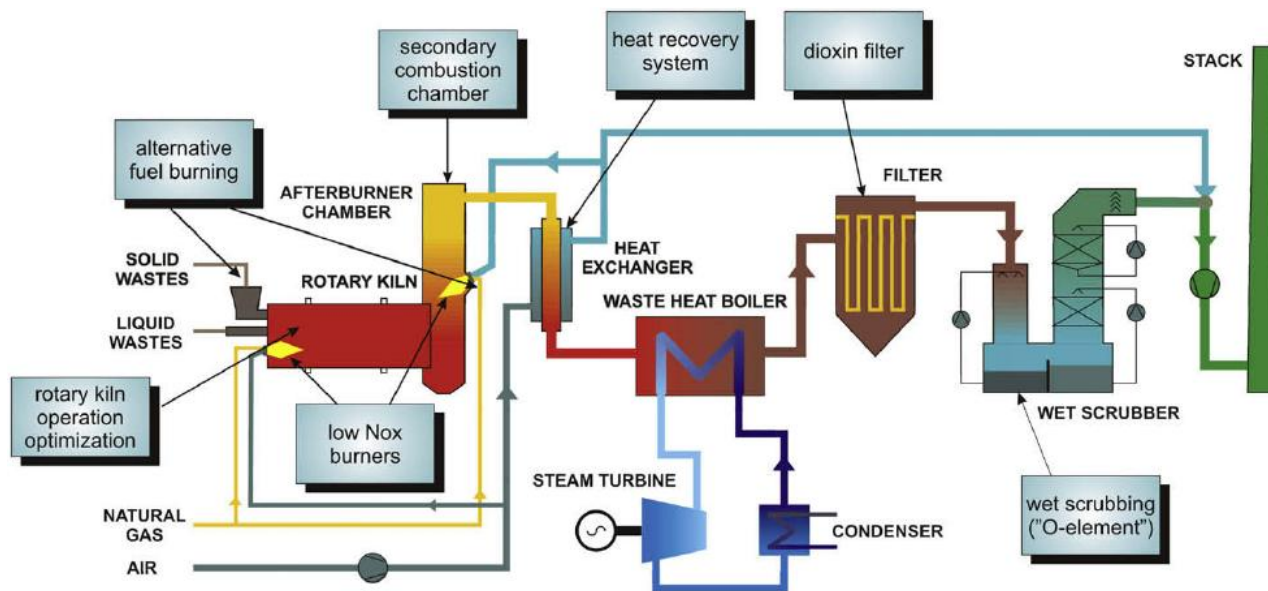
I_{circ} : ανακυκλοφορούμενη ενέργεια (θερμική και ηλεκτρική) απαραίτητη για τη διεργασία

- (ενέργεια για τους ανεμιστήρες και τις αντλίες, τη προθέρμανση του αέρα καύσης, τη προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας, κ.α.)

E_{w} : ενέργεια απελευθερούμενη από τις διεργασίες καύσης αποβλήτων

f_{B} : παράγοντας απωλειών ενέργειας από την κατώτερα τέφρα και την ακτινοβολία

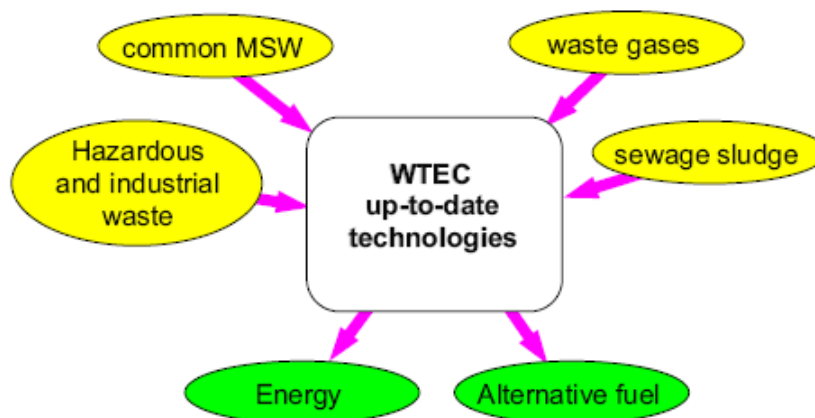
Η πρόοδος στο πεδίο της θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων εξαρτάται σημαντικά από τον αποδοτικό συντονισμό της πανεπιστημιακής έρευνας και της τεχνολογικής ανάπτυξης. Ο συντονισμός συνίσταται στον κατάλληλο και έγκαιρο συνδυασμό των θεωρητικών προσεγγίσεων και εξειδικευμένων μεθόδων, των πειραματικών προσεγγίσεων και των εμπειριών από τις δοκιμές της βιομηχανίας. Τα αποτελέσματα της έρευνας και ανάπτυξης υλοποιούνται άμεσα σε βιομηχανικές εφαρμογές. Στο επομένο Σχήμα 5-4, απεικονίζεται μία μονάδα αποτέφρωσης και τα σημεία στα οποία εστιάζεται το επιστημονικό ενδιαφέρον και η έρευνα:



Σχήμα 5-4: Πεδία έρευνας στις μονάδες αποτέφρωσης. [11]

5.3. Σταθμοί παραγωγής «Ενέργεια-από-Απόβλητα»

Οι θερμικές διεργασίες αποβλήτων δεν θα πρέπει να θεωρούνται μόνο ως λύσεις προσωρινής διάθεσης ή επεξεργασίας αυτών. Θα πρέπει να θεωρούνται πλέον, οποτεδήποτε και οπουδήποτε αυτό είναι εφικτό, ως διεργασίες ανάκτησης και εξοικονόμησης. Στην επιστημονική κοινότητα κυκλοφορούν τελευταία οι όροι "Energy-from-Waste Plants" (EfW) και "Waste-to-Energy Centres" (WTEC) [1,13]. Στα κέντρα WTEC επεξεργάζονται αποδοτικά και με ασφάλεια διάφοροι τύποι αποβλήτων, με σκοπό την παραγωγή ενέργειας και εναλλακτικών καυσίμων, Σχήμα 5-5:



Σχήμα 5-5: Κατηγορίες αποβλήτων που επεξεργάζονται σε WTE κέντρα. [11].

Τα σύγχρονα κέντρα WTE παράγουν ρύπους σε σημαντικά χαμηλότερα επίπεδα από εκείνα που ορίζουν οι κανονισμοί, και χαμηλότερα εν συγκρίσει με τους θερμικούς

σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή τους χώρους ταφής απεξεργαστων αποβλήτων. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει τα αυστηρότερα όρια εκπομπών στον κόσμο. Στον επόμενο πίνακα [1] συγκρίνονται οι μέσες εκπομπές δέκα σταθμών WTE με τα στάνταρντς της ΕΕ και των ΗΠΑ. Είναι φανερό ότι οι τιμές των εκπομπών είναι πολύ μικρότερες από τα όρια της ΕΕ σε κάθε περίπτωση.

Επιπροσθέτως, οι WTE συνεισφέρουν στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Υπολογισμοί έδειξαν ότι για κάθε τόνο αστικών στερεών αποβλήτων που επεξεργάζεται σε σταθμούς WTE αντιστοιχεί μείωση 1.3 τόνων διοξειδίου του άνθρακα [85]. Αυτό σημαίνει ότι ένας σταθμός WTE δυναμικότητας 1,000 τόνων ημερησίως παράγει 400,000 τόνους ισοδύναμων μονάδων διοξειδίου του άνθρακα ετησίως, από την επεξεργασία αστικών στερεών αποβλήτων.

Ο πίνακας 5-4 παρουσιάζει τα βασικά υποσυστήματα/μονάδες από τα οποία θα πρέπει να αποτελείται ο εξοπλισμός ενός κέντρου WTE. Στον επόμενο Πίνακα 5-5 συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα των κέντρων WTE, ενώ στον Πίνακα 5-6 οι περιορισμοί και οι κοινές αρχές που θα πρέπει να συμψηφιστούν.

Πίνακας 5-4. Εξοπλισμός ενός κέντρου WTEC. [11]

μία μονάδα θερμικής επεξεργασίας επικίνδυνων βιομηχανικών αποβλήτων
μία μονάδα θερμικής επεξεργασίας κοινών αστικών αποβλήτων
ένα ειδικό αποτεφρωτήρα για τη θερμική επεξεργασία αποβλήτων αστικών υπονόμων
ένα σύστημα διαχωρισμού και διαλογής αποβλήτων, συνδεδεμένο με ένα σύστημα παραγωγής εναλλακτικών καυσίμων
ένα σύστημα αξιοποίησης της κατωτέρας και ιπτάμενης τέφρας, ως δευτερεύοντα οικοδομικά υλικά
μία μονάδα συμπαραγωγής (συνδυασμένο σύστημα θερμότητας και ηλεκτρισμού)

Πίνακας 5-5. Πλεονεκτήματα των κέντρων WTEC. [11]

Συνεισφέρουν ουσιαστικά στην προστασία του περιβάλλοντος
Εξοικονομούνται φυσικές πρώτες ύλες και ενεργειακές πηγές
Διασφαλίζουν εποδοτική εκμετάλευση της ενέργειας
Αύξηση τοπικής απασχόλησης
Αποτελούν πηγή οικονομικών εσόδων

Πίνακας 5-6. Περιορισμοί για τα κέντρα WTE. [11]

Καταλληλότητα αποβλήτων
Αξιοποίηση όλων των γνωστών διεργασιών διαχείρισης βιοδιασπώμενων αποβλήτων
Προσπάθεια για βέλτιστη ανακύκλωση αποβλήτων
Θεσμοθέτηση υγιούς και αποτελεσματικής περιβαλλοντικής νομοθεσίας
Κατάλληλη εκπαίδευση (σχετικά με το πεδίο αυτό) όλων των ανθρώπων, από τη νεαρή ηλικία, με την υποστήριξη των ΜΜΕ και του κράτους.

Προκειμένου να σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και λειτουργήσει ένα τέτοιο σύστημα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ανάγκες της αγοράς : «τι χρειάζεται η αγορά (βιομηχανία, νοικοκυριά);» και «τι μπορούμε να προσφέρουμε;». Τέλος, είναι απαραίτητο να προσαρμοστεί το κέντρο WTEC με τις τοπικές συνθήκες και τον τοπικό χαρακτήρα της περιοχής στην οποία φιλοξενείται, όπως για παράδειγμα, εάν είναι βιομηχανική ή αγροτική περιοχή.

Στην εργασία των [13], παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο παράδειγμα εποδοτικής εκμετάλλευσης των ωφελειών από τη λειτουργία ενός ειδικού αποτεφρωτήρα αστικών λυμάτων και αποβλήτων, εγκατεστημένου σε ένα κέντρο WTEC, το οποίο εξυπηρετεί μία πόλη ενός εκατομμυρίου ανθρώπων.

Η θερμική επεξεργασία αποβλήτων συνοδεύεται από την απελευθέρωση σημαντικής ποσότητας θερμότητας, η οποία εξαρτάται από τη θερμογόνο δύναμη των αποβλήτων. Ένα κρίσιμο θέμα κατά το σχεδιασμό τεχνολογιών διεργασιών είναι η αποτελεσματική αξιοποίηση της θερμικής αξίας των προϊόντων της αποτέφρωσης, ώστε να αντισταθμιστεί το κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Η εργασία [7a] αναφέρεται στον σχεδιασμό ενός συστήματος πυρόλυσης για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, εκμεταλλεζόμενο τη θερμότητα των απαερίων ή τη θερμότητα του ατμού συμπύκνωσης κατά τη ξήρανση RDF. Η εγκατάσταση συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας είναι η καλύτερη από τις όλες τις διαδικασίες WTE. Στο [14], αναφέρονται διάφορες τεχνικές λύσεις πάνω στο θέμα αυτό.

Η τεράστια ανάπτυξη των τεχνολογιών ελέγχου αέριων εκπομπών και ανάκτησης ενέργειας, έχει ως αποτέλεσμα η αποτέφρωση αποβλήτων να μην θεωρείται μία μέθοδος διάθεσης και επεξεργασίας αποβλήτων μόνο. Είναι πλέον δυνατή η διαχείριση των σταθμών αποτέφρωσης ως κέντρων παραγωγής ενέργειας. Από σταθμούς εκπομπής

ρύπων προς το περιβάλλον μετατρέπονται σε σταθμούς ανάκτησης ενέργειας. Η ιστορική αυτή εξέλιξη παρουσιάζεται εμπειριστατωμένα στην εργασία των [15].

5.4. Η φόρμουλα R1 και η οδηγία 2008/98/EC

Μέχρι το τέλος του 2008 οι σταθμοί αποτέφρωσης αποβλήτων χαρακτηρίζονταν από την οδηγία 2006/12/EC ως μέθοδοι απόθεσης, παρά την ανάκτηση ενέργειας την οποία αρκετοί από αυτούς είχαν ενσωματώσει στη λειτουργία τους. Από το Νοέμβριο του 2008 η νέα οδηγία 2008/98/EC του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της Ευρώπης [16], για τα απόβλητα δίνει προτεραιότητα στην ανάκτηση ενέργειας. Έτσι, οι σταθμοί αποτέφρωσης αποβλήτων αναβαθμίζονται στην ιεράρχηση της διαχείρισης των αποβλήτων, ενώ στο χαμηλότερο επίπεδο αυτής βρίσκεται πλέον η υγειονομική ταφή και η αποτέφρωση χαμηλής απόδοση, Σχήμα 5-6.



Σχήμα 5-6: Ιεράρχηση διαχείρισης αποβλήτων, [17].

Σύμφωνα με τη νέα αυτή ιεράρχηση, η αποτέφρωση κατατάσσεται ως μέθοδος ανάκτησης ενέργειας παρά ως απόθεση, όταν η απόδοση της ανακτηθείσας ενέργειας είναι υψηλότερη από ένα προκαθορισμένο κατώτατο όριο.

Η αποδοση της ανακτηθείσας ενέργειας υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση, γνωστή και ως "**φόρμουλα R1**":

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)}$$

όπου E_p (GJ/y), είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια σε ετήσια βάση. Υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την ηλεκτρική ενέργεια επί 2,6 και τη θερμική για εμπορική χρήση επί 1,1, σύμφωνα με τη σχέση :

$$E_p = 1,1 \cdot E_{th} + 2,6 \cdot E_{el}$$

το E_f (GJ/y), αναφέρεται η επιπρόσθετη ενέργεια σε ετήσια βάση, που προσδίδεται για την παραγωγή ενεργού ατμού με καύση συμβατικών καυσίμων, όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο, υγραέριο. Υπολογίζεται μέσω της σχέσης :

$$E_f = \sum m_{fuel,i} \cdot NCV_{fuel,i}$$

το E_w (GJ/y), είναι η περιεχόμενη στα απόβλητα ενέργεια σε διάστημα ενός έτους :

$$E_w = m_{waste} \cdot NCV_{waste}$$

το E_i (GJ/y), αναφέρεται στην ενέργεια που εισάγεται στον σταθμό και καταναλώνεται από τις διεργασίες διαχείρισης των αποβλήτων.

Ο συντελεστής 0,97 στον παρονομαστή αντανακλά τις ενεργειακές απώλειες λόγω ακτινοβολίας, καθώς και από την καθιζάνουσα τέφρα.

Προκειμένου να χαρακτηρισθεί ένας σταθμός ως ανάκτησης ενέργειας “EfW”, η οδηγία 2008/98/EC ορίζει ως κατώτατο όριο για το κριτήριο R1 τις εξής τιμές :

Ελάχιστο όριο τιμών φόρμουλας R1	
Για σταθμούς με άδεια λειτουργίας πριν την 1η Ιανουαρίου 2009	0,60
Για σταθμούς με άδεια λειτουργίας μετά την 31 Δεκεμβρίου 2008	0,65

Οι συντελεστές 2,6 και 1,1 είναι οι αντίστροφοι των μέσων βαθμών απόδοσης σε ηλεκτρισμό και θερμότητα αντίστοιχα των συμβατικών σταθμών παραγωγής ισχύος. Συνεπώς, η φόρμουλα R1 εκφράζει το λόγο του βαθμού απόδοσης ανάκτησης ενέργειας σε ένα σταθμό αποτέφρωσης προς το βαθμό απόδοσης ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού. Για παράδειγμα, το κατώτατο όριο R1=0,60 σημαίνει ότι ο σταθμός παραγωγής “Ενέργειας-από-Απόβλητα” (Energy-from-Waste plant) λειτουργεί στο 60% της ενεργητικής αποδοσης ενός μέσου συμβατικού σταθμού. Βεβαίως υπάρχει και η περίπτωση η φόρμουλα R1 να υπερβεί τη μονάδα, όταν η αποδοτικότητα παραγωγής

ηλεκτρισμού ή/και θερμότητας είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη ενός μέσου συμβατικού σταθμού.

Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι η φόρμουλα R1 δε λαμβάνει υπόψη το μέγεθος του σταθμού και το κλίμα της περιοχής στην οποία είναι εγκαταστημένος ο σταθμός. Οι δύο αυτές παράμετροι έχουν επηρεάζουν σημαντικά την τιμή της φόρμουλας R1, όπως θα δούμε στα συμπεράσματα που θα προκύψουν από τη μελέτη εφαρμογής στο κεφάλαιο 10 παρακάτω.

Η εργασία [18] είναι η πρώτη που επιχειρεί μία αξιολόγηση της εφαρμογής της φόρμουλας R1 βασισμένη σε στοιχεία των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα στοιχεία αυτής της εργασίας θα αποτελέσουν τη βάση για τη σύγκριση με τα αποτελέσματα της μελέτης περίπτωσης της ανά χείρας εργασίας στο κεφάλαιο 10 παρακάτω.

ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ

6. Η ΜΟΝΑΔΑ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ Ε.Ι.Α. ΤΟΥ Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α

6.1. Γενικά για τη μονάδα

Η εγκατάσταση του αποτεφρωτήρα Επικίνδυνων Ιατρικών Αποβλήτων (Ε.Ι.Α.) του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α στα Άνω Λιόσια καταστρέφει θερμικά τα Ε.Ι.Α. τα οποία παράγονται από υγειονομικές μονάδες εγκατεστημένες στην περιφέρεια Αττικής, Εικόνα 6-1.

Είναι η μοναδική στην Ελλάδα, η οποία εφαρμόζει ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης Ε.Ι.Α από τη συγκομιδή και μεταφορά τους από τις υγειονομικές μονάδες, μέχρι την προσωρινή αποθήκευσή τους, την καταστροφή μέσω της διεργασίας της καύσης, και της τελικής αντιμετώπισης των παραγόμενων προϊόντων, δηλ. των καυσαερίων και των στερεών υπολειμμάτων. Το σύστημα που ακολουθείται είναι σύμφωνο με τις νομοθετικές διατάξεις της ΚΥΑ 37591/2031/2003 [19], όπως αναλυτικά παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2.

Η δυναμικότητα και ο εξοπλισμός της εγκατάστασης, ο οποίος είναι τελευταίας τεχνολογίας, επιλέχθηκαν με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- τη μέση ημερήσια παραγωγή Ε.Ι.Α. από τις υγειονομικές μονάδες της Αττικής,
- την ολοκληρωτική καταστροφή των Ε.Ι.Α.
- την προστασία του περιβάλλοντος από τις ρυπογόνες εκπομπές, και
- την ασφάλεια και προστασία του εργαζόμενου προσωπικού.



Εικόνα 6-1: Η εγκατάσταση αποτέφρωσης ΕΙΑ του ΕΣΔΚΝΑ στα Άνω Λιόσια Αττικής [20].

Η εγκατάσταση αποτελείται από δύο αναξάρτητες πανομοιότυπες γραμμές παραγωγής δυναμικότητας 15 τόνων/ημέρα έκαστη (ή 625 kg/h), ενώ η συνολική παραγωγή φθάνει τους 9.000 τόνους ετησίως. Για τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης έχει επίσης ληφθεί υπόψη υπερφόρτωση 10%. Η καρδιά κάθε γραμμής παραγωγής είναι ο

αποτεφρωτήρας, τύπου περιστρεφόμενης κλιβάνου, με ονομαστική θερμική ισχύ 2.000.000 kcal/h ή 8.373.600 kJ/h (2.326 kWh).

Η σύσταση των Ε.Ι.Α. παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, ενώ ο καθορισμός της δεν είναι καθόλου εύκολος. Για το σχεδιασμό της μονάδας χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη χημική σύσταση της μάζας των Ε.Ι.Α., βασισμένη στην εμπειρία συγγενών εγκαταστάσεων στην Ευρώπη, Πίνακας 6-1 :

Πίνακας 6-1: Χημική σύσταση μάζας Ε.Ι.Α.		
Φυσικό στοιχείο	Σύσταση ως έχει (%)	Σύσταση επί ξηρού (%)
C	36,5	46,79
H	4,5	5,77
S	0,5	0,64
H₂O	22	-
Cl	2	2,56
O	21	26,92
Αδρανή	13,5	17,32
Σύνολο	100	100

Η Κατώτερα Θερμογόνος Δύναμη (Κ.Θ.Δ.) -Low Calorific Value (LCV)- των Ε.Ι.Α με την ανωτέρω σύσταση λαμβάνεται ίση με 3.100 kcal/kg ή 12.980 kJ/kg, και είναι η τιμή που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό της εγκατάστασης.

Από νεώτερες αναλύσεις που έγιναν υπ' ευθύνη της διοίκησης της εγκατάστασης, προέκυψε ότι η Κ.Θ.Δ. των Ε.Ι.Α. κυμαίνεται στο διάστημα [3.200, 4.100] kcal/kg με μέση τιμή τα 3.650 kcal/kg ή 15.281,82 kJ/kg. Επιπλέον, οι αποτεφρωτήρες τροφοδοτούνται πλέον κατά μέσο όρο με 550 kg/h έκαστος, ενώ η μέση παραγωγή καυσαερίων στην έξοδο είναι 7.000 Nm³/h. Οι επικαιροποιημένες αυτές τιμές αυτές θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς του κεφαλαίου 10 παρακάτω, για τη διερεύνηση της αξιοποίησης του θερμικού περιεχομένου των καυσαερίων.

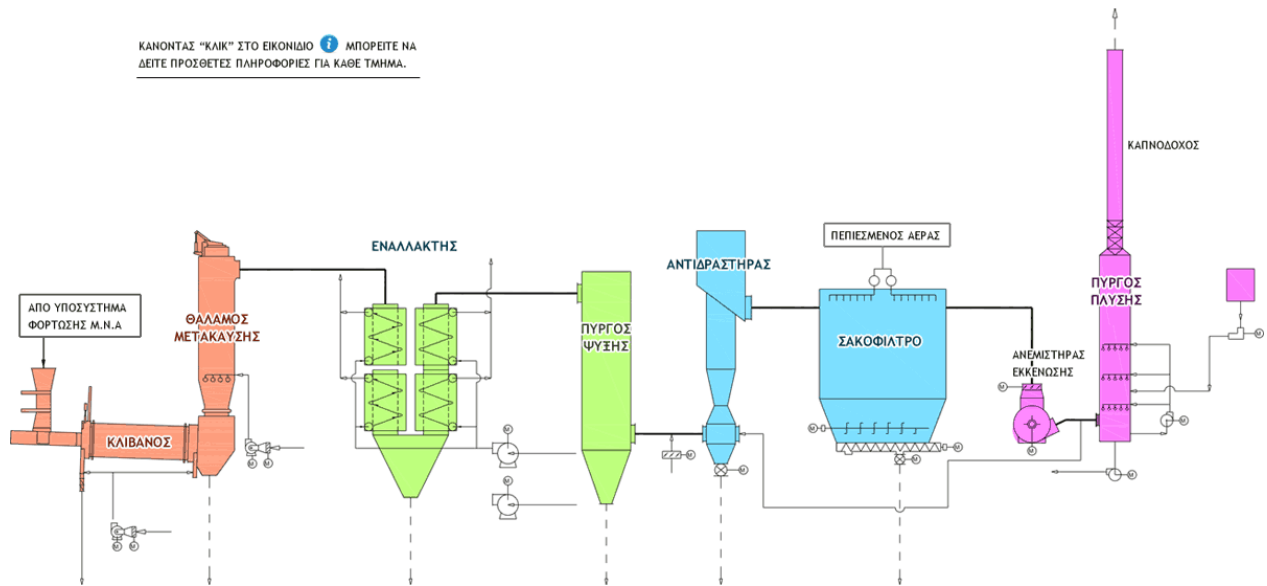
6.2. Τεχνική περιγραφή της εγκατάστασης

Η εγκατάσταση αποτέφρωσης (Ε.Ι.Α.) αποτελείται από μονάδες/υποσυστήματα, τα οποία με τη σειρά τους αποτελούνται από επιμέρους υπομονάδες :

- ❖ μονάδα ζύγισης και ελέγχου ραδιενέργειας,
- ❖ μονάδα προσωρινής αποθήκευσης,
- ❖ μονάδα καύσης
 - τροφοδότης
 - κλίβανος καύσης
 - θάλαμος τέφρας
 - θάλαμος μεταύκασης
- ❖ μονάδα ψύξης των καυσαερίων,
 - εναλλάκτης
 - πύργος ψύξης
- ❖ μονάδα καθαρισμού των καυσαερίων,
 - αντιδραστήρας
 - σύστημα ξηρής υδρασβέστου
 - σύστημα ενεργού άνθρακα
 - σακκόφιλτρο
- ❖ μονάδα τελικού καθαρισμού και απόρριψης των καυσαερίων,
 - ανεμιστήρας απόρριψης
 - πύργος πλύσης
 - καπνοδόχος
- ❖ μονάδα εξαγωγής, μεταφοράς και αποθήκευσης τέφρας
- ❖ μονάδα ελέγχου αέριων εκπομπών
- ❖ μονάδα ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου
- ❖ βοηθητικός εξοπλισμός

Η αρμονική λειτουργία και συνεργασία μεταξύ των ανωτέρω μονάδων είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή και αποδοτική λειτουργία της όλης εγκατάστασης. Ο απαραίτητος συντονισμός μεταξύ των μονάδων επιτελείται από τη μονάδα ηλεκτρονικού συστήματος εποπτείας και ελέγχου (SCADA).

Το επόμενο Σχήμα 6-1, απεικονίζει σχηματικά τη διάταξη της γραμμής παραγωγής της εγκατάστασης αποτέφρωσης επικίνδυνων ιατρικών αποβλήτων.



Σχήμα 6-1: Η γραμμή παραγωγής της μονάδας αποτέφρωσης του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. [20].

Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφονται συνοπτικά οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε κάθε μία από τις μονάδες της εγκατάστασης.

6.2.1. Μονάδα ζύγισης

Τα οχήματα μεταφοράς των απορριμμάτων ζυγίζονται σε ηλεκτρονική γεφυροπλάστιγγα, η οποία βρίσκεται στην είσοδο της μονάδας. Τα νοσοκομειακά απόβλητα φθάνουν στην εγκατάσταση σε διπλούς πλαστικούς σάκους ερμητικά κλειστούς, ώστε να αποφεύγεται οποιαδήποτε ενδεχόμενη διαρροή του περιεχομένου τους. Οι σάκοι αυτοί είναι τοποθετημένοι σε ανθεκτικά πλαστικά ή χάρτινα κιβώτια που αποτεφρώνονται μαζί με το περιεχόμενό τους. Κατά την αποτέφρωση, τα κιβώτια θεωρούνται ως ακέραιο τμήμα των απορριμμάτων που περιέχουν.

6.2.2. Μονάδα προσωρινής αποθήκευσης

Τα ζυγισμένα οχήματα κατευθύνονται στο χώρο προσωρινής αποθήκευσης των απορριμμάτων, ο οποίος στεγάζεται στο κτίριο των αποτεφρωτήρων. Για την αποθήκευση των νοσοκομειακών απορριμμάτων διατίθενται 6 ψυκτικοί θάλαμοι, επόμενη Εικόνα 6-2, συνολικής χωρητικότητας 25 τόνων. Η θερμοκρασία των ψυκτικών θαλάμων κυμαίνεται μεταξύ 4-6 °C.

Η προώθηση των κιβωτίων εντός των ψυκτικών θαλάμων γίνεται μέσω κινητών εξέδρων, οι οποίες βρίσκονται στη βάση των θαλάμων. Οι κινητές εξέδρες τροφοδοτούν δύο εγκάρσιους ταινιόδρους, οι οποίοι απορρίπτουν το περιεχόμενό τους στο διαμήκη ανυψωτικό ταινιόδρομο και εν συνεχεία στον αντιστρεπτό ταινιόδρομο. Τέλος, ο αντιστρεπτός ταινιόδρομος τροφοδοτεί εναλλάξ τις χοάνες των κλιβάνων.



Εικόνα 6-2: Ψυκτικοί θάλαμοι προσωρινής αποθήκευσης [20].

Οι θάλαμοι αποθήκευσης και οι ταινιόδρομοι μεταφοράς απολυμαίνονται περιοδικά. Στον ίδιο χώρο πλένονται εσωτερικά και τα οχήματα μεταφοράς. Ο καθαρισμός γίνεται με νερό και απολυμαντικό. Τα υγρά της πλύσης συλλέγονται σε ειδική δεξαμενή και μεταφέρονται μέσω ενός δικτύου στον κλίβανο, όπου και αποτεφρώνονται.

6.2.3. Μονάδα καύσης

Η μονάδα καύσης στεγάζεται στο κτίριο των αποτεφρωτήρων. Η εγκατάσταση αποτελείται από δύο όμοιες και ανεξάρτητες γραμμές αποτέφρωσης δυναμικότητας 15 tn/ημέρα έκαστη. Οι αποτεφρωτήρες έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί από την ANSALDO TECNITALIA και είναι τύπου ομόρρου περιστρεφόμενου κλιβάνου, παράγραφος 3.4.2 παραπάνω, εξασφαλίζοντας υψηλή ποιότητα καύσης. Σε συνδυασμό με την υψηλή μέση τιμή της Κ.Θ.Δ. των απορριμμάτων (περίπου 3.100 Kcal/Kg) η καύση συντηρείται χωρίς προθέρμανση του αέρα, ενώ η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται στην έξοδο του θάλαμου μετάκαυσης κυμαίνεται στους 900-1200 °C. Επιπλέον, ο περιστρεφόμενος κλιβάνος παρουσιάζει το πλεονέκτημα της απευθείας τροφοδότησης του θάλαμου καύσης ακόμη και με απόβλητα υψηλής περιεκτικότητας υγρών, καθώς εξασφαλίζει απόλυτη στεγανότητα έναντι διαρροών. Η μονάδα καύσης αποτελείται από επιμέρους συστήματα συνεργαζόμενα μεταξύ τους :

6.2.3.1. Τροφοδότης

Ο τροφοδότης φέρει χοάνη διοχέτευσης του υλικού στο θάλαμο συσσώρευσης, ο οποίος αποτελείται από το θάλαμο πλήρωσης, μορφής τετραγωνικής πυραμίδας και από το πλαίσιο κύλισης του εμβόλου τροφοδοσίας. Η αποφυγή εισόδου αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον προς τον κλίβανο διασφαλίζεται από δύο σύρτες στεγανοποίησης, οι οποίοι ενεργοποιούνται από ένα ελαιοδυναμικό έμβολο κινούνται οριζοντίως απομονώνοντας το θάλαμο. Το επόμενο τμήμα του τροφοδότη είναι ο αγωγός τροφοδοσίας μέσα στον οποίο τοποθετείται ο προωθητήρας, ο οποίος ενεργοποιείται από ένα αμφίδρομο ελαιοδυναμικό έμβολο. Η αμφίδρομη κίνηση του προωθητήρα προκαλεί τη δοσομετρική πτώση του

υλικού στον κλίβανο και κατά τη διάρκεια της επιστροφής, την πτώση του υλικού από το θάλαμο πλήρωσης στο εσωτερικό του αγωγού τροφοδοσίας. Ο διαχωρισμός του τμήματος φόρτωσης από τον κύλινδρο καύσης γίνεται μέσω ενός κατακόρυφου σύρτη. Με τον σύρτη αυτό αποφεύγονται διαρροές του αέρα από το τμήμα φόρτωσης προς τον κλίβανο και προστατεύεται το τμήμα φόρτωσης από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο τμήμα καύσης.

6.2.3.2. Κλίβανος καύσης

Ο κλίβανος, επόμενη Εικόνα 6-3, αποτελείται από την κεφαλή και τον κύλινδρο καύσης:

Η κεφαλή του κλιβάνου φέρει ανοίγματα για την τοποθέτηση του καυστήρα, του ακροφυσίου υγρών αποβλήτων και του συστήματος πρωτογενούς αέρα καύσης. Ο καυστήρας είναι πολυκαύσιμος και τροφοδοτείται συνήθως με φυσικό αέριο. Χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της φάσης εκκίνησης του κλιβάνου ή για την υποστήριξη της καύσης, όταν αποτεφρώνονται απορρίμματα με χαμηλή θερμογόνο δύναμη.

Ο κύλινδρος καύσης έχει σχεδιασθεί με την τεχνολογία της περιστροφικής καμίνου (Rotary kiln) και είναι τοποθετημένος με κεκλιμένο τον άξονά του κατά -25° ως προς τον οριζόντιο, επιτρέποντας έτσι στα απορρίμματα να κατέρχονται προς το θάλαμο τέφρας που βρίσκεται στο οπίσθιο τμήμα του κυλίνδρου. Κατά την καύση των αποβλήτων επιτυγχάνονται υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 1100°C).



Εικόνα 6-3: Ο κεκλιμένος ομόρου τύπου περιστρεφόμενος κλίβανος [20].

Με την περιστροφή εξασφαλίζεται :

- συνεχής επαφή μεταξύ των απορριμμάτων, του αέρα καύσης και της φλόγας, και
- εμποδίζεται η προσκόλληση της τέφρας στα τοιχώματα, μειώνοντας έτσι, στο ελάχιστο τις εργασίες συντήρησης και καθαρισμού.

Η μέση ταχύτητα περιστροφής είναι 1,093 rpm. Ο κύλινδρος είναι επενδεδυμένος από πυρρίμαχα και μονωτικά υλικά, ικανά να αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες της καύσης. Η εσωτερική επένδυση του κλιβάνου γίνεται με έγχυση πυρίμαχου αμμοκονιάματος. Το σύστημα αυτό, χάρη στο κυλινδρικό σχήμα του θαλάμου καύσης, το οποίο καθιστά αυτοσυγκρατούμενη την έγχυση, συντελεί στην επίτευξη μιας μονολιθικής επίστρωσης μεγάλης αντοχής, χωρίς να υπάρχει τριβή μεταξύ των διαφόρων συστατικών υλικών, όπως συμβαίνει με τα συστήματα πυρίμαχων τούβλων (με συνέπεια την καθίζηση των τοιχωμάτων και επομένως συχνές επεμβάσεις συντήρησης).

Ο αέρας καύσης διοχετεύεται απευθείας στον κύλινδρο καύσης μέσω ενός πλευρικού ανοίγματος, το οποίο βρίσκεται στην κεφαλή του κλιβάνου. Ένα άλλο μέρος του αέρα διοχετεύεται στο τελικό τμήμα του κύλινδρου καύσης από τον ίδιο ανεμιστήρα. Ο κύλινδρος καύσης έχει σταθερή διατομή σε όλο το μήκος του και το τελικό τμήμα του καταλήγει στο θάλαμο τέφρας, στον οποίο πραγματοποιείται η εκφόρτωση του άκαυστου υλικού.

6.2.3.3. Θάλαμος τέφρας

Ο θάλαμος τέφρας (Ash extruder) είναι το συνδεδεμένο στοιχείο μεταξύ του κύλινδρου καύσης και του θαλάμου μετάκαυσης. Το εσωτερικό μέρος του θαλάμου τέφρας είναι επενδεδυμένο από πυρίμαχο και μονωτικό υλικό. Στο δάπεδο του θαλάμου τέφρας ένα άνοιγμα επιτρέπει τη πτώση της τέφρας σε ένα μεταφορέα εκκένωσης. Στο εμπρόσθιο τμήμα του θαλάμου τέφρας είναι εγκατεστημένη κάμερα, η οποία επιτρέπει το συνεχή έλεγχο του εσωτερικού του θαλάμου καύσης από την αίθουσα ελέγχου. Η ποσότητα της τέφρας που ελευθερώνεται σε κάθε γραμμή από τον κλίβανο και τον θάλαμο μετάκαυσης είναι περίπου 71 Kg/h. Η τέφρα αποτελείται κυρίως από αδρανή υλικά (τα οποία δεν συμμετέχουν στην καύση) και περιέχονται στο εισερχόμενο υλικό.

6.2.3.4. Θάλαμος μετάκαυσης

Σκοπός του θαλάμου μετάκαυσης είναι η εξασφάλιση της ολοκλήρωσης της καύσης. Στόχος είναι η επίτευξη θερμοκρασίας τουλάχιστον 850 °C για τα αέρια της καύσης με ελάχιστο χρόνο παραμονής 2 sec για την σχεδόν ολοκληρωτική θερμοκαταστροφή όλων των οργανικών συστατικών του κλιβάνου και ιδιαίτερα των χλωριούχων οργανικών ουσιών και ρύπων (διοξίνες/PCDD και φουράνες/PCDFs).

Ο θάλαμος μετάκαυσης διαθέτει δύο πολυκαύσιμους καυστήρες, ο ένας εκ των οποίων είναι βαθμωτός και τοποθετημένος στο υψηλότερο σημείο του θαλάμου μετάκαυσης. Οι καυστήρες χρησιμοποιούνται :

- κατά τη φάση εκκίνησης λειτουργίας της μονάδας καύσης για την προθέρμανση του θαλάμου, και
- για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας των καυσαερίων.

Για τη δεύτερη εργασία τίθεται σε λειτουργία αυτόματα ο βαθμωτός καυστήρας που βρίσκεται κοντά στην έξοδο των καυσαερίων.

Μία βαλβίδα ασφαλείας για την εκκένωση των καυσαερίων είναι τοποθετημένη στο πάνω του θάλαμου μετάκαυσης. Η βαλβίδα ανοίγει μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις αύξησης της πίεσης των καυσαερίων για τη διαφύλαξη ολόκληρης της εγκατάστασης ή σε περιπτώσεις υψηλής θερμοκρασίας στο σακκόφιλτρο. Σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, συμπεριλαμβανόμενων των εκκινήσεων και των σβέσεων της εγκατάστασης, η βαλβίδα ασφαλείας παραμένει κλειστή.

Στο σύστημα καύσης περιλαμβάνεται επίσης ο ανεμιστήρας ψύξης της θερμής κεφαλής του κλιβάνου, στο κάτω άκρο αυτού.

6.2.4. Μονάδα ψύξης καυσαερίων

Στεγάζεται στο χώρο καύσης του κτιρίου αποτεφρωτήρα. Το σύστημα ψύξης καυσαερίων τοποθετείται μετά τον θάλαμο μετάκαυσης και αποτελείται από έναν εναλλάκτη θερμότητας με ακτινοβολία τεσσάρων στοιχείων, και από έναν πύργο ψύξης (quencher). Σκοπός του πύργου ψύξης είναι η μείωση της θερμοκρασίας των καυσαερίων σε αποδεκτά επίπεδα (από περίπου 900-1000 °C στους 200 °C) για την γραμμή καθαρισμού που ακολουθεί, εισάγοντας ελάχιστη, και επομένως αποδεκτή, ποσότητα υγρασίας στα καυσαέρια.

6.2.4.1. Εναλλάκτης θερμότητας

Το σύστημα του εναλλάκτη υποδιαιτείται στα ακόλουθα μέρη:

1. μηχάνημα
2. ανεμιστήρες και αγωγός αέρα στην καπνοδόχο
3. αγωγός σύνδεσης θαλάμου μετάκαυσης – εναλλάκτη, και
4. αγωγός σύνδεσης εναλλάκτη – πύργου ψύξης.

Ο εναλλάκτης θερμότητας αποτελείται από 4 στοιχεία τοποθετημένα σε μια σειρά δύο στηλών (η κάθε στήλη περιέχει δύο στοιχεία) και ψύχει τα καυσαέρια από τους 980-1000 °C μέχρι περίπου τους 650 °C στην έξοδό του. Η θερμότητα των καυσαερίων που εξέρχονται από τον θάλαμο μετάκαυσης παρέχεται μέσω ακτινοβολίας στον αέρα ψύξης των στοιχείων του εναλλάκτη. Μέρος αυτού του θερμού αέρα, σε θερμοκρασία περίπου 140 °C, διοχετεύεται στην καπνοδόχο, όπου επιτυγχάνεται η αναθέρμανση των κορεσμένων καυσαερίων στην έξοδο του πύργου πλύσης πριν διοχετευθούν στην ατμόσφαιρα. Η ανάμειξη αυτή γίνεται :

- για τον περιορισμό της ορατότητας των καυσαερίων στην έξοδο της καπνοδόχου, που οφείλεται στην συμπύκνωση μέρους της υγρασίας που περιέχεται στα καυσαέρια, και

- για να ευνοήσει την ανύψωση των ίδιων των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα.

6.2.4.2. Ο πύργος ψύξης

Ο πύργος ψύξης (Quencher), επόμενη Εικόνα 6-4, αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

1. μηχανήμα
2. ακροφύσια
3. δεξαμενή νερού και
4. αντλίες παροχής νερού στα ακροφύσια.



Εικόνα 6-4: Πύργος ψύξης [20].

Η λειτουργία του είναι να ψύχει σε μικρό χρονικό διάστημα τα καυσαέρια χωρίς την παρέμβαση ψυχρών τοιχωμάτων που ευνοούν την εμφάνιση διαβρωτικών φαινομένων. Η ψύξη των καυσαερίων επιτρέπει τη χρήση αγωγών μικρότερης διατομής, την επίτευξη ιδεώδους θερμοκρασίας για τις αντιδράσεις του σχηματισμού των αλάτων μεταξύ ασβέστου και ρύπων, ευνοεί την απορρόφηση των ρύπων, εκ μέρους του ενεργού άνθρακα και την επεξεργασία της ροής σε χαμηλή θερμοκρασία χρησιμοποιώντας μηχανήματα που βρίσκονται μετά από αυτόν με υλικά μικρότερου κόστους. Η ψύξη γίνεται μέσω της ανάμειξης των καυσαερίων με νερό βιομηχανικής χρήσης. Δεδομένου ότι πρέπει να γίνει πλήρης εξάτμιση του εισερχόμενου νερού έτσι ώστε ο πυθμένας να είναι στεγνός, το νερό θα πρέπει να εξατμιστεί μέσα σε ελάχιστο χρονικό διάστημα γι' αυτό ψεκάζεται, μέσω κατάλληλων ακροφυσίων με την βοήθεια πεπιεσμένου αέρα που το μετατρέπει σε πολύ μικρά σταγονίδια.

6.2.5. Μονάδα καθαρισμού καυσαερίων

Το τμήμα καθαρισμού των καυσαερίων αποτελείται από :

1. τον **αντιδραστήρα**
2. το **σακκόφιλτρο**, και
3. τα **συστήματα ενεργού άνθρακα** και **ξηρής ασβέστου**, τα οποία επεμβαίνουν στα ρυπογόνα στοιχεία που περιέχονται στα καυσαέρια, καθαρίζοντάς τα πριν την απόρριψή τους στο περιβάλλον.

Σε αυτό το τμήμα πραγματοποιείται κατακρήμνιση των ρύπων μέχρι σε όρια πολύ κατώτερα από τα προβλεπόμενα από τις ισχύουσες διατάξεις. Επίσης, προβλέπεται η θέρμανση των καυσαερίων κατά την έξοδο από τον πύργο πλύσης για την αποφυγή σχηματισμού πολύ εμφανούς νέφους.

6.2.5.1. Ο αντιδραστήρας

Ο αντιδραστήρας αποτελείται από τρία βασικά τμήματα:

1. τμήμα εισόδου
2. διασκορπιστής (κεντρικό τμήμα), και
3. περίβλημα.

Ο αντιδραστήρας είναι ένα στατικό μηχάνημα εν ξηρώ με σκοπό την εξουδετέρωση των ρύπων που υπάρχουν στα προϊόντα καύσης μέσω της ανάμιξης με ένα ρεύμα που περιέχει χημικά αντιδρώντα στοιχεία. Τα αντιδρώντα στοιχεία (ξηρή άσβεστος και ενεργός άνθρακας) εγχύονται σε μορφή σκόνης μέσα στον κυλινδρικό θάλαμο του αντιδραστήρα. Τα προϊόντα αντίδρασης μεταφέρονται από το ρεύμα των καυσαερίων, μαζί με τη περίσσεια που δεν αντέδρασε, στο επόμενο στάδιο του καθαρισμού, το οποίο λαμβάνει χώρα στο σακκόφιλτρο.

Στον αντιδραστήρα εξουδετερώνονται χημικά τα όξινα σωματίδια που περιέχονται στα καυσαέρια. Για να γίνει η εξουδετέρωση, είναι απαραίτητο να επικρατούν στο εσωτερικό του αντιδραστήρα οι εξής συνθήκες :

1. μέγιστη διάχυση των αντιδρώντων στα καυσαέρια, και
2. επαρκής χρόνος επαφής για τη διεξαγωγή της αντίδρασης.

Η πρώτη συνθήκη ικανοποιείται εισάγοντας την ξηρή άσβεστο και τον ενεργό άνθρακα στη στένωση Venturi του αντιδραστήρα. Η δεύτερη συνθήκη ικανοποιείται λόγω του σχήματος της κατασκευής του ίδιου του αντιδραστήρα που επιτρέπει έναν ελάχιστο χρόνο 2 sec παραμονής των καυσαερίων και των αντιδρώντων.

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στον αντιδραστήρα οφείλονται στη δράση της ξηρής ασβέστου με τα όξινα αέρια όπως HCl, HBr, HF, SO₂ που περιέχονται στα καυσαέρια. Η έγχυση ενεργού άνθρακα συμβάλει στην απορρόφηση των στοιχείων εκείνων που συμπυκνώνονται υπό την επίδραση της μείωσης της θερμοκρασίας καθώς και των οργανικών παραγώγων χλωρίου.

6.2.5.2. Σύστημα ξηρής υδρασβέστου

Για κάθε μία γραμμή παραγωγής χρησιμοποιείται ένα σύστημα αποθήκευσης-έγχυσης ξηρής υδρασβέστου για την εξουδετέρωση των όξινων συστατικών, το οποίο αποτελείται από :

1. σιλό αποθήκευσης της ξηρής ασβέστου
2. κοχλία εξαγωγής της ξηρής ασβέστου
3. σύστημα αναμόχλευσης με πεπιεσμένο αέρα στη χοάνη του σιλό, και
4. δοσομετρητή.

6.2.5.3. Σύστημα ενεργού άνθρακα

Ο ενεργός άνθρακας προσροφά διοξίνες και βαρέα μέταλλα. Το σύστημα αποθήκευσης του ενεργού άνθρακα είναι κοινό και για τις δύο γραμμές αποτέφρωσης, με δύο ανεξάρτητες γραμμές έγχυσης και δοσομέτρησης. Το σύστημα αποθήκευσης – έγχυσης του ενεργού άνθρακα αποτελείται από :

1. ένα σιλό αποθήκευσης του ενεργού άνθρακα
2. δύο δοσομετρητές
3. δύο αεροφράκτες αερομεταφοράς στην έξοδο του κάθε δοσομετρητή
4. δύο ανεμιστήρες αερομεταφοράς
5. τις σωληνώσεις αερομεταφοράς από το σιλό προς τους αντιδραστήρες, και
6. δύο ενδιάμεσα δοχεία.

6.2.5.4. Το σακκόφιλτρο

Το σακκόφιλτρο, επόμενη Εικόνα 6-5, είναι ένας από τους βασικότερους εξοπλισμούς εξουδετέρωσης των ρύπων. Κατακρατεί το μεγαλύτερο μέρος της τέφρας, ακόμη και με τις πιο λεπτές κοκκομετρίες. Επίσης, στο σακκόφιλτρο πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις που δεν έλαβαν χώρα στον αντιδραστήρα.

Η αρχή λειτουργίας του σακκόφιλτρου είναι η μηχανική σύλληψη της τέφρας, που παρασύρεται με τα καυσαέρια, μέσω της παρεμβολής ενός υφάσματος με πολύ λεπτή ύφανση, κατάλληλο για να αντέχει στις θερμοκρασίες των καυσαερίων και στην επαφή με όξινες ουσίες. Τα σωματίδια που συλλαμβάνονται συνεισφέρουν με τη σειρά τους στη σύλληψη άλλων σωματιδίων. Για την καλή λειτουργία του θα πρέπει η ταχύτητα διέλευσης από τους σάκους να είναι της τάξης των μέτρων ανά λεπτό, πράγμα που επιτρέπει τη μείωση απωλειών φορτίου, και την αύξηση ζωής των σακκόφιλτρων.

Βασικό στοιχείο του σακκόφιλτρου είναι ο κυλινδρικός σάκος διαμέσου του οποίου διέρχονται τα καυσαέρια. Τα καυσαέρια φιλτράρονται από το εσωτερικό προς το εξωτερικό των σάκων, στην επιφάνεια των οποίων γίνεται η εναπόθεση της τέφρας και των παραγώγων των αντιδράσεων. Το σακκόφιλτρο αποτελείται από συστοιχίες σάκων

τοποθετημένων σε παράλληλες σειρές. Οι σάκοι του φίλτρου αποτελούνται από ένα υφασμάτινο κυλινδρικό περίβλημα το οποίο συγκρατείται στη θέση του εσωτερικά από μεταλλικό πλέγμα.



Εικόνα 6-5: Σακκόφιλτρο [20].

Το κάτω τμήμα του σακκόφιλτρου καταλήγει σε μια χοάνη στην οποία συγκεντρώνεται η τέφρα. Στο εσωτερικό της χοάνης υπάρχουν δύο κοχλίες με τους οποίους απορρίπτεται η τέφρα και η ξηρή άσβεστος που δεν αντέδρασε στην προηγούμενη διαδικασία και ένας αναδευτήρας με τον οποίον θρυμματίζονται τυχόν εναποθέσεις ή συσσωρεύσεις τέφρας που ενδέχεται να σχηματιστούν. Η χοάνη του σακκόφιλτρου φέρει αντιστάσεις θέρμανσης που σκοπό έχουν την αποφυγή σχηματισμού συμπυκνωμάτων από την υγρασία που περιέχουν τα καυσαέρια, η οποία ερχόμενη σε επαφή με τα τοιχώματα της χοάνης είναι δυνατόν να επικαθίσει δημιουργώντας προβλήματα διάβρωσης.

6.2.6. Μονάδα απόρριψης καυσαερίων

Το σύστημα απόρριψης καυσαερίων περιλαμβάνει τον ανεμιστήρα απόρριψης και την καπνοδόχο. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην αρχική της μορφή η εγκατάσταση περιλάμβανε στη βάση της καπνοδόχου έναν πύργο πλύσης, όπου γινόταν η ανάμειξη των καυσαερίων με διάλυμα καυστικού νατρίου. Ο χώρος του πύργου πλύσης έχει πλέον καταργηθεί και αποτελεί απλώς ένα επιπλέον τμήμα της καπνοδόχου, χωρίς να γίνεται η ανάμειξη των καυσαερίων με NaOH.

6.2.6.1. Ανεμιστήρας απόρριψης

Ο ανεμιστήρας απόρριψης χρησιμοποιείται για την απορρόφηση των καυσαερίων από όλους τους μηχανισμούς της γραμμής που βρίσκονται πριν τον ανεμιστήρα, την προώθησή τους διαμέσου της καπνοδόχου και την απόρριψή τους στην ατμόσφαιρα. Ο ανεμιστήρας είναι ένα δυναμικό μηχάνημα στο οποίο το επεξεργασμένο ρευστό αποκτά

ενέργεια μέσω των περιστρεφόμενων οργάνων. Στον ανεμιστήρα το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι μια μικρή αύξηση της πίεσης του ρευστού, απαραίτητη για την εξασφάλιση της αναρρόφησης σε όλα τα σημεία του κυκλώματος των καυσαερίων. Στην πραγματικότητα, στη διαμόρφωση της αναρρόφησης ο ανεμιστήρας που τοποθετείται στο τέλος της εγκατάστασης, δημιουργεί μια υποπίεση η οποία είναι απαραίτητη για την παρεμπόδιση της μετάδοσης της κακοσμίας στον περιβάλλοντα χώρο, και αναρροφά τα καυσαέρια στο χαμηλότερο σημείο της καπνοδόχου.

6.2.6.2. Καπνοδόχος

Η λειτουργία της καπνοδόχου είναι να απορρίπτει τα καυσαέρια σε ικανοποιητικό ύψος (20 m) με ταχύτητα περίπου 16 m/sec. Για τη διασφάλιση της βέλτιστης αυτής λειτουργίας, η καπνοδόχος είναι θερμικά μονωμένη και έχει προβλεφθεί ανάμιξη των καυσαερίων με θερμό αέρα που προέρχεται από τη ψύξη των καυσαερίων στον εναλλάκτη. Η καπνοδόχος διαθέτει στόμια για το σύστημα παρακολούθησης των εκπομπών, το όργανο μέτρησης της θερμοκρασίας και τον αναλυτή οξυγόνου. Ο διασκορπισμός των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα εξασφαλίζεται ως αποτέλεσμα δύο παράλληλων ωθήσεων:

- της ώθησης που οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας, και επομένως και πυκνότητας, με τον περιβάλλοντα αέρα, και
- της κινητικής ώθησης, που οφείλεται στην ταχύτητα που προσδίδεται στα καυσαέρια από τον μηχανικό ελκυσμό.

6.2.7. Μονάδα εξαγωγής, μεταφοράς και αποθήκευσης τέφρας

Η μονάδα αυτή περιλαμβάνει τρία συστήματα εξαγωγής, μεταφοράς και αποθήκευσης τέφρας σε κάθε ένα από τα παρακάτω τμήματα :

1. στη μονάδα καύσης
2. στη μονάδα ψύξης, και
3. στο τμήμα επεξεργασίας καυσαερίων.

6.2.8. Μονάδα ελέγχου αέριων εκπομπών

Η μονάδα ελέγχου αέριων εκπομπών στεγάζεται σε καμπίνα εξωτερικά του κτιρίου των αποτεφρωτήρων. Το σύστημα εφαρμόζεται και στις δύο γραμμές αποτέφρωσης και αποτελείται από δύο ξεχωριστά τμήματα:

Το σύστημα παρακολούθησης στην έξοδο του θάλαμου μετάκαυσης μετρά τη θερμοκρασία των καυσαερίων και τις τιμές των ρυπογόνων ουσιών στην είσοδο του συστήματος επεξεργασίας των καυσαερίων, όπως :

Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	Οξείδια του αζώτου (NO _X)
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	Διοξείδιο του θείου (SO ₂)
Οξυγόνο(O ₂)	Υδροχλωρικού οξύ (HCl)

Το σύστημα παρακολούθησης στην έξοδο της εγκατάστασης μετρά τις τιμές των ρυπογόνων ουσιών μετά το σύστημα επεξεργασίας των καυσαερίων:

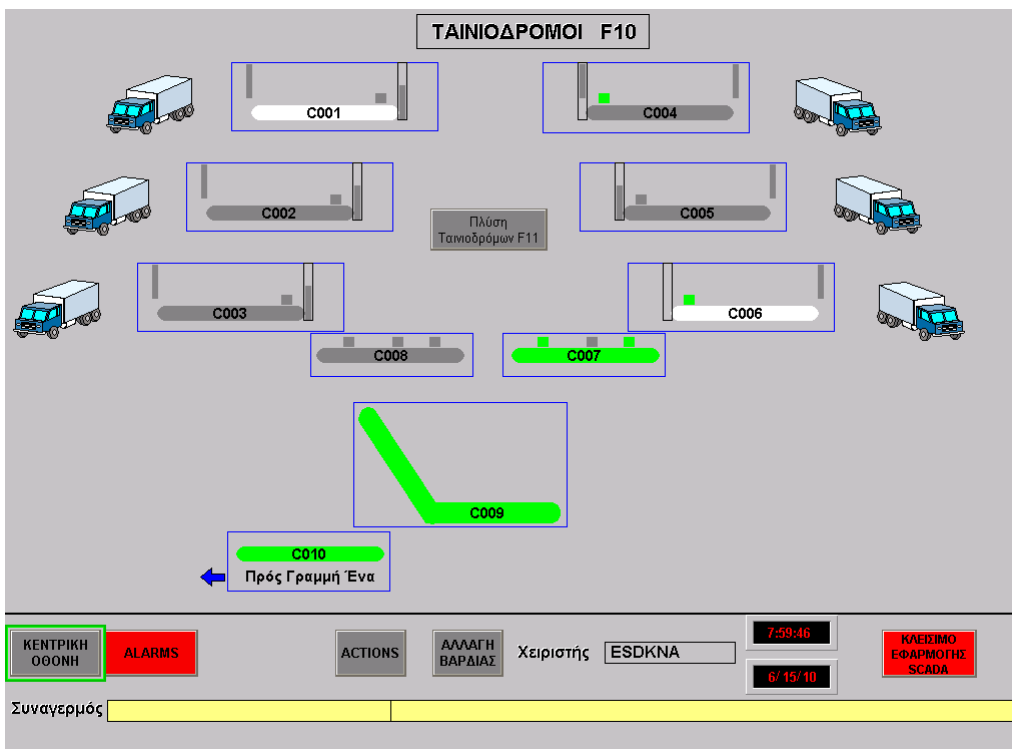
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	Διοξείδιο του θείου (SO ₂)
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	Υδροχλωρικού οξύ (HCl)
Οξυγόνο(O ₂)	Οξείδια του αζώτου (NO _X)
Παροχή και θερμοκρασία καυσαερίων	Τέφρα

6.2.9. Μονάδα ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου SCADA

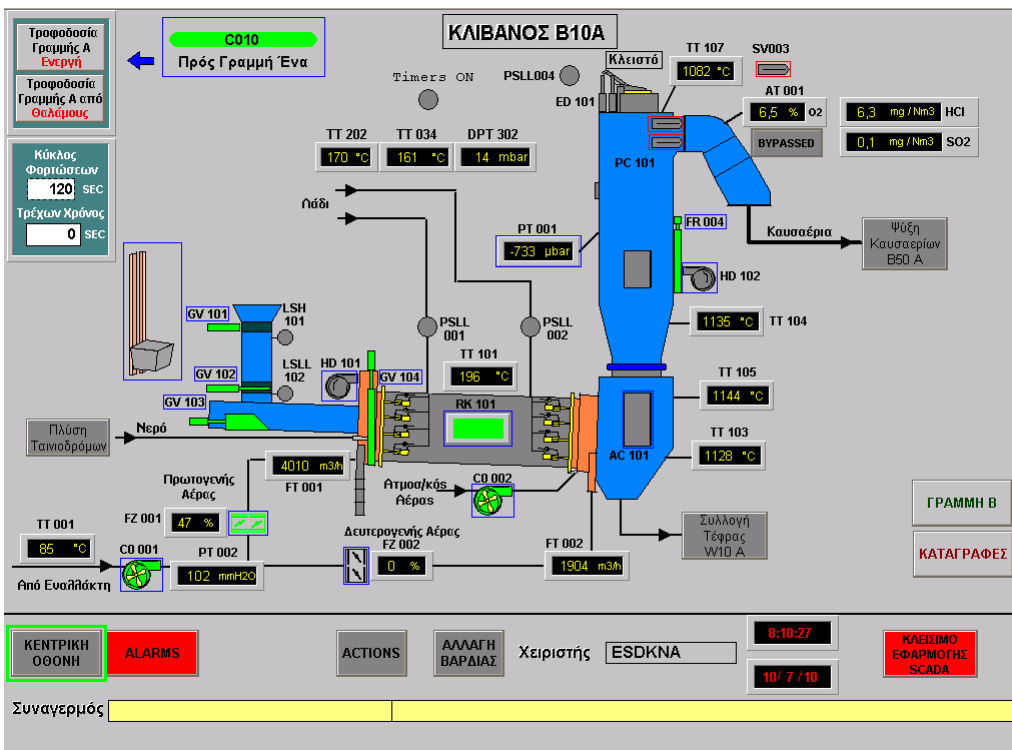
Η μονάδα ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου στεγάζεται σε διώροφο κτίριο σε επαφή με τη βόρεια πλευρά του κτιρίου των αποτεφρωτήρων. Το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου κατασκευάστηκε για να εκτελεί εργασίες επίβλεψης, ρύθμισης, τηλεχειρισμού, προστασίας, συναγερμού και αρχειοθέτησης στοιχείων κατά τη λειτουργία της εγκατάστασης. Η εγκατάσταση είναι πλήρως αυτοματοποιημένη. Υπάρχει όμως και η δυνατότητα χειροκίνητης λειτουργίας, επιτρέποντας έτσι την εκτέλεση εργασιών συντήρησης. Στη συνέχεια παρατίθενται οι οθόνες μέσα από τις οποίες γίνεται ο εποπτικός έλεγχος όλης της εγκατάστασης [Σχήμα 6-2, Σχήμα 6-3, Σχήμα 6-4, Σχήμα 6-5, Σχήμα 6-6, Σχήμα 6-7].

6.2.10. Βοηθητικός εξοπλισμός εγκατάστασης

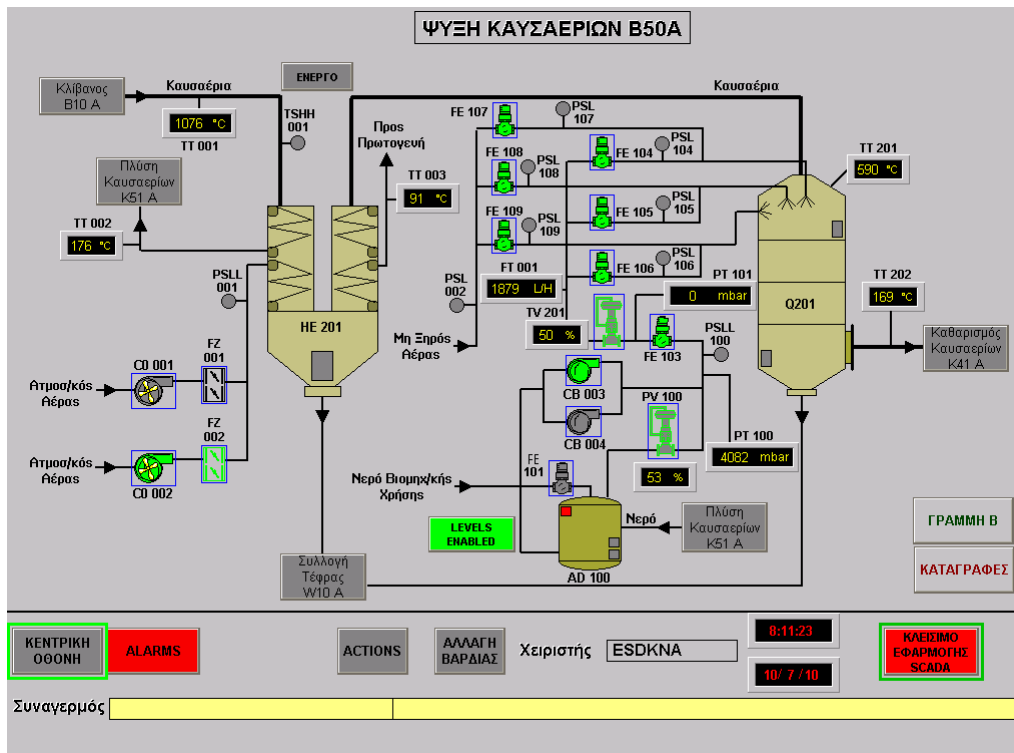
Ο βοηθητικός εξοπλισμός της εγκατάστασης περιλαμβάνει : αεροσυμπιεστές, ξηραντήρα, φίλτρα, πετρελαιοκινητήρα ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (η/ζ), γεννήτρια η/ζ, μηχανολογικό τόρνο, πριονοκορδέλα, δίδυμο τροχό, φρεζοδράπανο, δράπανο κολονάτο, υδραυλικό γερανό , δισκοπρίονο σε βάση, ηλεκτρικό κουρμαδόρο, αντλία θερμότητας αέρα-νερού, τηλεφωνικό κέντρο, πλυντήριο κάδων, όχημα, χημικό εργαστήριο.



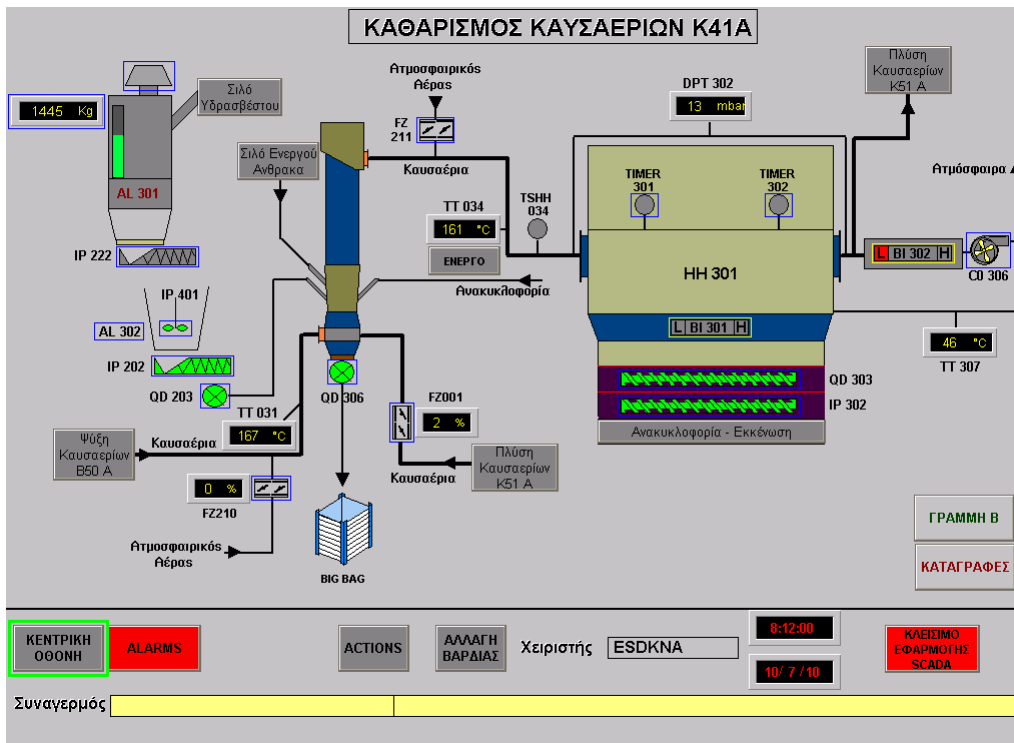
Σχήμα 6-2: Οθόνη ελέγχου μονάδων ζύγισης και προσωρινής αποθήκευσης [20].



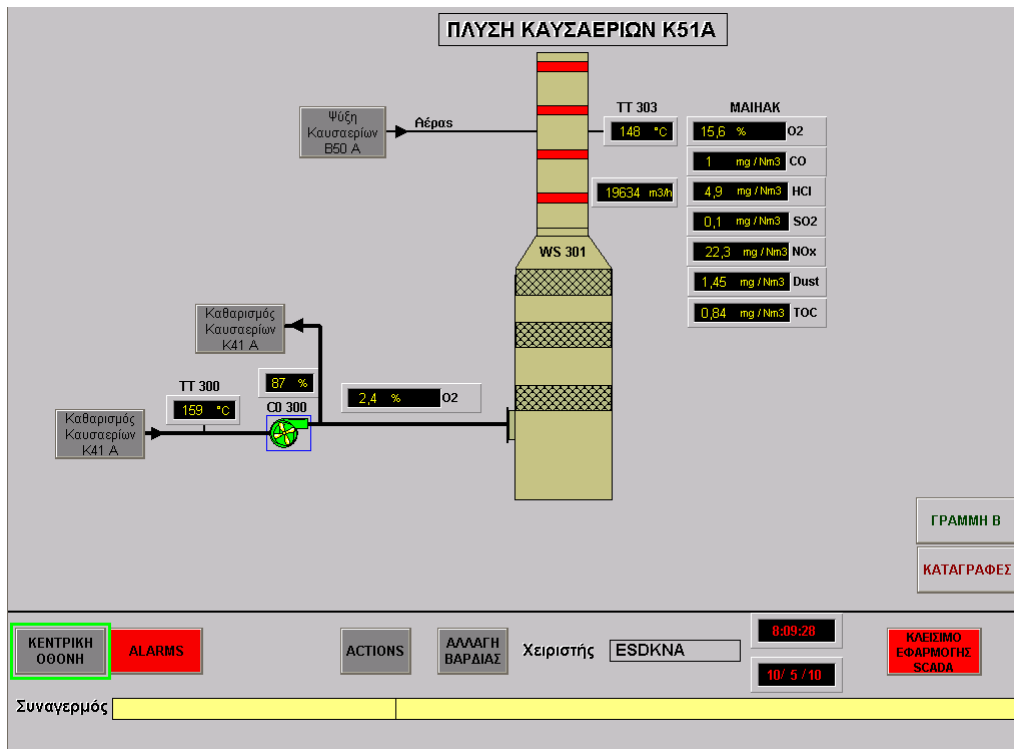
Σχήμα 6-3: Μονάδα καύσης πρώτης γραμμής παραγωγής [20].



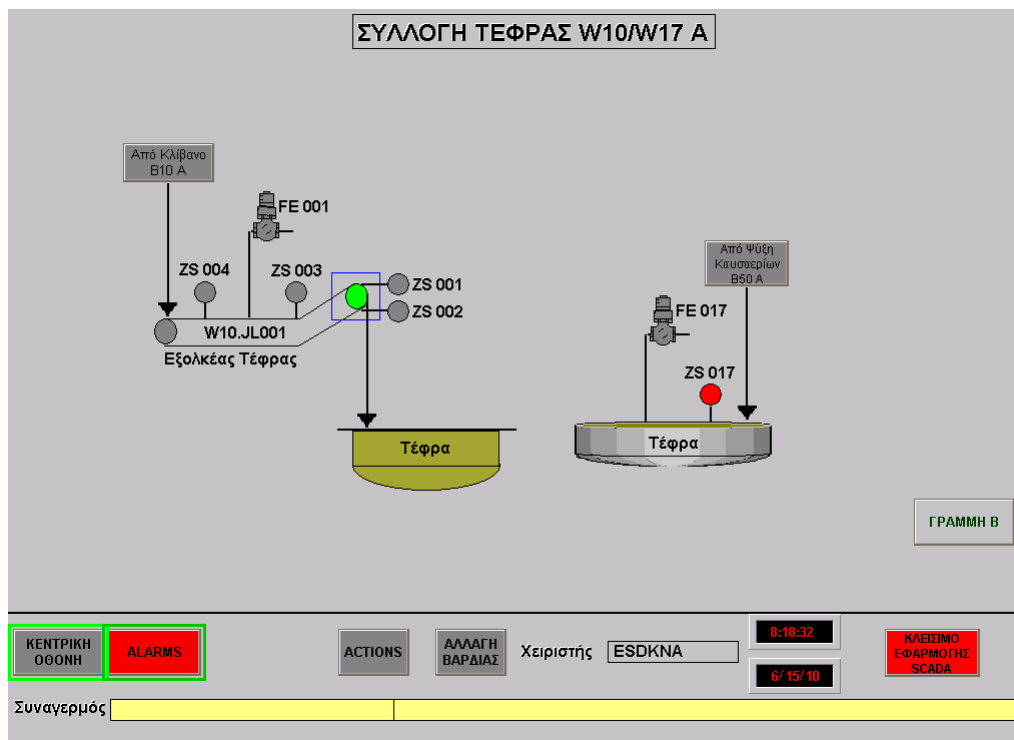
Σχήμα 6-4: Μονάδα ψύξης καυσαερίων [20].



Σχήμα 6-5: Μονάδα καθαρισμού καυσαερίων [20].



Σχήμα 6-6: Μονάδα απόρριψης καυσαερίων [20].



Σχήμα 6-7: Μονάδα εξαγωγής, μεταφοράς και αποθήκευσης τέφρας [20].

6.3. Η αναβάθμιση σε σταθμό παραγωγής "Ενέργεια-από-Απόβλητα"

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, ο πρωταρχικός σκοπός λειτουργίας του αποτεφρωτήρα Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. στα Άνω Λιόσια είναι η καταστροφή των Ε.Ι.Α. μέσω της θερμοδυναμικής διεργασίας της καύσης. Από την καύση των Ε.Ι.Α. παράγονται καυσαέρια θερμοκρασίας 1.000-1.100 °C, τα οποία μέσω εξελιγμένων διεργασιών ψύξης και καθαρισμού, απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα σε θερμοκρασία 150-170 °C.

Το ανά χείρας πόνημα επιχειρεί μια ποσοτική διερεύνηση της δυνατότητας ανάκτησης του θερμικού περιεχόμενου των παραγόμενων καυσαερίων. Από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα δοθεί απάντηση στο ερώτημα εάν είναι δυνατή ή όχι η αναβάθμιση του χαρακτήρα της υπάρχουσας εγκατάστασης από "θερμικής καταστροφής" σε σταθμό παραγωγής "Ενέργειας-από-Απόβλητα", όπως επιτάσσει η οδηγία 2008/98/EC [16], και όπως εν συντομία παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο 5.4.

Η νέα διάταξη του σταθμού, εκτός των μονάδων που περιγράφηκαν στην παράγραφο 6.2 παραπάνω, θα περιλαμβάνει επιπλέον μία μονάδα ανάκτησης θερμότητας, αποτελούμενη από τον εξής κύριο εξοπλισμό, Πίνακας 6-2 :

Πίνακας 6-2 : Υποσυστήματα μονάδας ανάκτησης θερμότητας
αμοπααραγωγός
αμοστρόβιλος
ηλεκτρογεννήτρια
συμπυκνωτής
πύργος ψύξης
αντλίες τροφοδοσίας
ηλεκτρονικός έλεγχος
βοηθητικά συστήματα

Η νέα αυτή μονάδα δεν καταργεί τη μονάδα ψύξης των καυσαερίων (παράγραφος 6.2.4 παραπάνω), η οποία θα τίθεται σε λειτουργία όταν εκτελούνται εργασίες συντήρησης στη μονάδα ανάκτησης θερμότητας ή για οποιονδήποτε λόγο αυτή είναι εκτός λειτουργίας. Τεχνικά αυτό επιτυγχάνεται με διατάξεις bypass, με τις οποίες τα παραγόμενα καυσαέρια :

- είτε θα ακολουθούν τη συνήθη γραμμή παραγωγής, χωρίς ανάκτηση θερμότητας
- είτε θα παρακάμπτουν τη μονάδα ψύξης διερχόμενα από τη μονάδα ανάκτησης θερμότητας και οδηγούμενα εν συνεχεία στις μονάδες καθαρισμού και απόρριψης

Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ο πρωταρχικός σκοπός λειτουργίας της εγκατάστασης αποτέφρωσης Ε.Ι.Α.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές αρχές λειτουργίας και κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού της μονάδας ανάκτησης θερμότητας, Πίνακας 6-2, τα οποία είναι χρήσιμα για το θερμοδυναμικό σχεδιασμό της μελέτης περίπτωσης του αποτεφρωτήρα Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.

ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ

7. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

7.1. Ατμοπαραγωγοί ανάκτησης θερμότητας - ΑΠ.Α.Θ.

Οι ατμοπαραγωγοί ανάκτησης θερμότητας -ΑΠ.Α.Θ. (Heat Recovery Steam Generators – HRSG) χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ζεστού νερού ή ατμού από τη θερμότητα των διερχόμενων καυσαερίων. Ο HRSG είναι ουσιαστικά ένας εναλλάκτης θερμότητας αντίρροπης ροής, αποτελούμενος από βαθμίδες/σειρές υπερθερμαντήρων, λεβήτων/ατμοποιητών, και οικονομητήρων, τοποθετούμενων από την είσοδο έως την έξοδο των καυσαερίων με σκοπό τη μεγιστοποίηση της ανακτώμενης θερμότητας, καθώς και της παροχής του ατμού στην επιθυμητή θερμοκρασία και πίεση. Σε ορισμένες περιπτώσεις η μονάδα HRSG μπορεί να συνοδεύεται από απαερωτήρα ή/και προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας, [27]. Εναλλακτικές διατάξεις HRSG περιλαμβάνουν τους λέβητες καπνοσωλήνων και τους λέβητες υδραυλών με φυσική, τεχνητή ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία (βλ. παρακάτω).

Η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την αποτέφρωση των ΕΙΑ ανακτάται μέσω ενός ατμοπαραγωγού, όπου παράγεται ατμός, η ενθαλπία του οποίου μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια κατά την εκτόνωσή του στον ατμοστρόβιλο, και αυτή στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας. Τα καυσαέρια θερμοκρασίας μεταξύ 1.000 °C και 1.200 °C ψύχονται στον λέβητα σε θερμοκρασίες από 140 °C έως 300 °C. Αυτό το θερμοκρασιακό εύρος κρίνεται απαραίτητο για την μετέπειτα επεξεργασία καθαρισμού των καυσαερίων.

Ο σχεδιασμός τέτοιων ατμοπαραγωγών εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των καυσαερίων, τα οποία με τη σειρά τους εξαρτώνται από τη σύνθεση των Ε.Ι.Α. Η ειδικότερα τοξική σύνθεση των καυσαερίων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, καθώς είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση ανεπιθύμητων καταστάσεων όπως διάβρωση, καθαλάτωση και ρύπανση των επιφανειών των στοιχείων του ατμοπαραγωγού, [30]. Για παράδειγμα, η υψηλή συγκέντρωση χλωριδίων στα απόβλητα περιορίζει τις δυνατές τεχνικές λύσεις ανάκτησης ενέργειας. Ειδικότερα στους λέβητες, τέτοιες χημικές ενώσεις προκαλούν σημαντική διάβρωση με αποτέλεσμα να πρέπει να μειωθεί σημαντικά η πίεση του παραγόμενου ατμού, με ότι αυτό συνεπάγεται για τον ολικό βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.

Για τους λόγους αυτούς, χρειάζεται να γίνει κάποιος συμβιβασμός ως προς τις παραμέτρους λειτουργίας του ατμού. Υψηλές τιμές μπορεί να οδηγήσουν σε έντονα διαβρωτικά προβλήματα, κυρίως στις επιφάνειες ατμοποίησης και υπερθέρμανσης (βλ. παρακάτω). Σε σταθμούς «Ενέργεια-από-Απόβλητα» για ηλεκτροπαραγωγή συνηθισμένες τιμές είναι τα 40 bar και οι 400 °C. Υψηλότερες τιμές είναι δυνατό να επιτευχθούν, 60 bar και οι 520 °C, κυρίως όταν υπάρχουν κίνητρα για παραγωγή ανανεώσιμης ισχύος, εφόσον

ληφθούν ιδιαίτερα μέτρα για την αποφυγή της διάβρωσης. Συγκρινόμενες με τις τιμές των παραμέτρων ατμού σε θερμικούς σταθμούς άνθρακα/λιγνίτη, οι ανωτέρω τιμές είναι αρκετά χαμηλές, και για το λόγο αυτό επιλέγονται ατμοπαραγωγοί με φυσική κυκλοφορία [30] (βλ. παρακάτω).

7.1.1. Η λειτουργία του λέβητα

Ως λέβητας νοείται στο σύνολό του ένας ορμαθός αυλών/σωλήνων πληρωμένων με νερό, μέσα στους οποίους με προσφορά θερμότητας μετατρέπεται το νερό σε ατμό. Κατά αυτή την έννοια, ο οικονομητήρας, ο θερμαντήρας αέρα, ο υπερθερμαντήρας και ο αναθερμαντήρας, δεν είναι τμήματα του λέβητα, αλλά του ατμοπαραγωγού γενικότερα, [29].

Ως γνωστόν, το νερό αποτελεί το εργαζόμενο μέσο του λέβητα, καθώς και το προϊόν της λειτουργίας του. Η διαδρομή της ροής του νερού στον λέβητα είναι γενικά ένα ανοιχτό σύστημα. Μία ρυθμιστική βαλβίδα χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της απαραίτητης στάθμης νερού στο λέβητα και για τον έλεγχο της εισόδου του νερού τροφοδοσίας. Με την προσθήκη θερμότητας η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται με μικρή αύξηση του όγκου του. Στη θερμοκρασία βρασμού το νερό αρχίζει να βράζει ισοθερμικά, ενώ ο όγκος του αυξάνει σημαντικά. Πρόκειται για την έναρξη του φαινομένου της **ατμοποίησης**. Τελικά, μετά την ατμοποίηση ολόκληρης της ποσότητας του νερού, ο όγκος του ατμού –η αέρια φάση του νερού- συνεχίζει να αυξάνει με ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας του. Το φαινόμενο αυτό λέγεται **υπερθέρμανση**.

Οι επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας ενός τυπικού ατμοπαραγωγού διακρίνονται σε τρία λειτουργικά στοιχεία :

- Τον **οικονομητήρα**, ο οποίος χρησιμοποιεί την ανακτώμενη ενέργεια για τη θέρμανση του νερού τροφοδοσίας κοντά στο σημείο βρασμού,
- Τον **ατμοποιητή** ή λέβητα, και
- Τον **υπερθερμαντήρα**.

Είναι δυνατό σε πολύ μεγάλους ατμοπαραγωγούς να χρησιμοποιούνται πολλές βαθμίδες/στάδια από υπερθερμαντήρες, ατμοποιητές και οικονομητήρες, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της θερμικής απόδοσης της μονάδας και της παραγωγής ισχύος.

Ο κορεσμένος ή υπέθερμος ατμός που εξέρχεται του ατμοπαραγωγού εισέρχεται σε μία κεντρική κεφαλή ατμού και κατόπιν μεταφέρεται στο σύστημα διανομής. Η πίεση του ατμού μπορεί να μειωθεί, ανάλογα με τις ανάγκες, στους τοπικούς σταθμούς μείωση πίεσης. Στο σημείο χρήσης ο ατμός συμπυκνώνεται σε υγρό νερό με αποβολή θερμότητας στο καθορισμένο φορτίο. Το **συμπύκνωμα** επιστρέφει στον λέβητα διαμέσου του απαερωτήρα, και η διεργασία ατμοποίησης επαναλαμβάνεται.

Η τροφοδοσία του λέβητα μπορεί να αποτελείται από επιστρεφόμενο συμπύκνωμα, φρέσκο νερό ή μίγμα των δύο. Οι ακαθαρσίες του φρέσκου νερού τροφοδοσίας, υπεύθυνες για την **καθαλάτωση** (δημιουργία λεβητόλιθου/πουρί) και τη **ρύπανση** των επιφανειών μετάδοσης θερμότητας, θα πρέπει να απομακρύνονται με κατάλληλη προ-επεξεργασία του νερού, καθώς και μέσω της διεργασίας της αποστράγγισης (**blowdown process**).

Η **προ-επεξεργασία του νερού τροφοδοσίας** περιλαμβάνει :

- τη διήθηση (φιλτράρισμα) για την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων, και
- τη χημική επεξεργασία για την απομάκρυνση της σκληρότητας ή των διαλυμένων μεταλλικών αλάτων ασβεστίου, μαγνησίου, πυριτίου, κ.α

Κατά τη **διεργασία αποστράγγισης** (blowdown process), μέσω τεχνητής διαρροής απομακρύνεται ένα μικρό ποσοστό του νερού τροφοδοσίας του λέβητα, συνήθως ακριβώς πριν το τμήμα του ατμοποιητή. Με τον τρόπο παρεμποδίζεται η συγκέντρωση σε επικίνδυνο βαθμό των ακαθαρσιών του φρέσκου νερού.

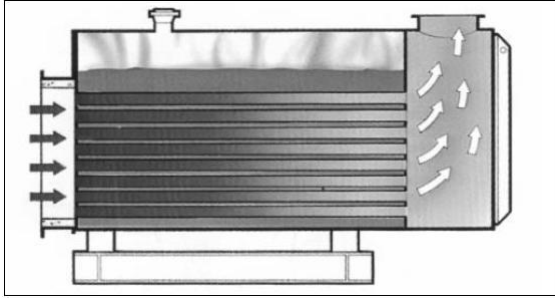
Το φρέσκο επεξεργασμένο νερό προστίθεται πριν το νερό τροφοδοσίας εισέλθει στον **απαερωτήρα**. Στον απαερωτήρα χρησιμοποιείται ατμός για την αφαίρεση του διαλυμένου οξυγόνου από το νερό τροφοδοσίας, σε θερμοκρασίες 107 °C και πάνω. Στην εκροή του απαερωτήρα αντλίες τροφοδοσία αυξάνουν την πίεση του νερού τροφοδοσίας μέχρι την πίεση λειτουργίας του λέβητα, [27].

7.1.2. Τύποι ατμοπαραγωγών ανάκτησης θερμότητας

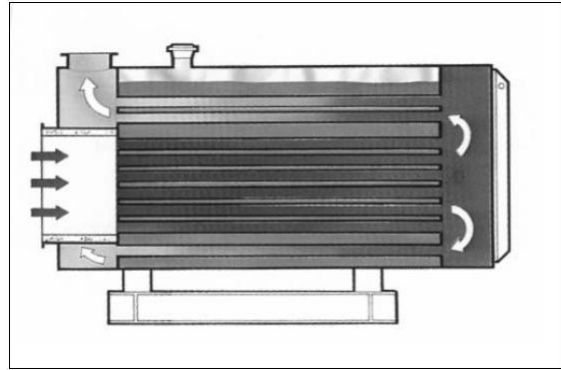
7.1.2.1. ΑΠ.Α.Θ. καπνοσωλήνων

Στους HRSG καπνοσωλήνων (smoke-tube) τα καυσαέρια διέρχονται μέσα από ένα σύμπλεγμα σωλήνων εμβαπτισμένο σε ένα δοχείο νερού.. Η δυναμικότητά τους είναι περιορισμένη σε λιγότερο από 23,000 kg/h και λειτουργούν σε πιέσεις που δεν ξεπερνούν τα 18 bar_g. Έτσι, δεν είναι κατάλληλοι για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού, και η χρήση τους περιορίζεται σε τεχνολογικές εφαρμογές. Συνήθως δεν συνοδεύονται από υπερθερμαντήρα και οικονομητήρα. Με τη χρήση όμως οικονομητήρα είναι δυνατό να βελτιωθεί η απόδοσή τους. Στα επόμενα σχήματα, Σχήμα 7-1 και Σχήμα 7-2, απεικονίζονται HRSG καπνοσωλήνων μίας και δύο διαδρομών, [27].

Εκτός από τον περιορισμό στα χαρακτηριστικά του παραγόμενου ατμού (μόνο κορεσμένος) σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί και η δυσκολία στον καθαρισμό του εσωτερικού των σωλήνων, με ορατό τον κίνδυνο της διάβρωσης. Συνεπώς, δεν είναι κατάλληλοι για εφαρμογές όπου τα καυσαέρια έχουν υψηλή συγκέντρωση τέφρας.



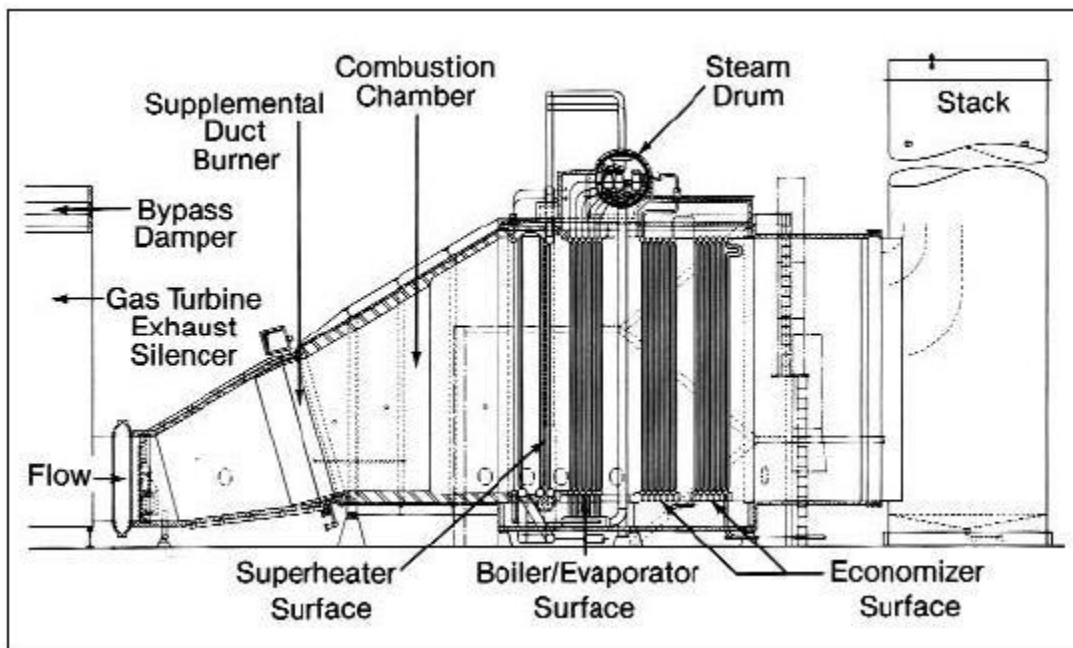
Σχήμα 7-1: Μονής διαδρομής HRSG-καπνοσωλήνων [27].



Σχήμα 7-2: Διπλής διαδρομής HRSG-καπνοσωλήνων [27].

7.1.2.2. ΑΠ.Α.Θ. υδραυλών

Στους HRSG υδραυλών τα καυσαέρια ρέουν γύρω από σωλήνες που περιέχουν νερό. Στο επόμενο Σχήμα 7-3, απεικονίζεται η πλάγια όψη μίας μεγάλης μονάδας HRSG υδραυλών, με σύστημα συμπληρωματικής καύσης (βλ. παρακάτω).



Σχήμα 7-3: Ατμοπαραγωγός Ανάκτησης Θερμότητας με υδραυλούς, οριζόντιας διάταξης [27].

Οι HRSG υδραυλών χρησιμοποιούν ξεχωριστά τύμπανα νερού και ατμού και μέσω ενός συμπλέγματος διασυνδεδεμένων σωλήνων επιτυγχάνεται η κυκλοφορία του νερού. Τα βασικότερα στοιχεία ενός HRSG υδραυλών είναι [27]:

Το **τύμπανο ατμού**. Πρόκειται για το δοχείο στο οποίο διαχωρίζεται ο κορεσμένος ατμός από το μίγμα νερού-ατμού και στο οποίο εισέρχεται το νερό τροφοδοσίας. Το νερό που διαχωρίζεται από το μίγμα επανακυκλοφορεί πίσω στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας.

Ο **υπερθερμαντήρας**, είναι εκείνο το στοιχείο στο οποίο θερμαίνεται επιπλέον ο κορεσμένος ατμός του τυμπάνου ατμού. Συνήθως τοποθετείται στο εμπρόσθιο μέρος του HRSG υδραυλών, όπου οι θερμοκρασία των καυσαερίων είναι ακόμη αρκετά υψηλή και η μετάδοση θερμότητας δι' ακτινοβολίας είναι ακόμη σημαντική. Ο υπερθερμαντήρας είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας μονής-φάσης, στον οποίο ο ατμός ρέει εντός των σωλήνων και τα καυσαέρια εκτός αυτών, [27].

Ο **αναθερμαντήρας**, όπως δηλώνει και το όνομά του, αναθερμαίνει τον ατμό που έχει εκτονωθεί μερικώς σε κάποιον ατμοστρόβιλο, και χρησιμοποιείται με πολύ μεγάλους λέβητες παραγωγής για παραγωγή ηλεκτρισμού.

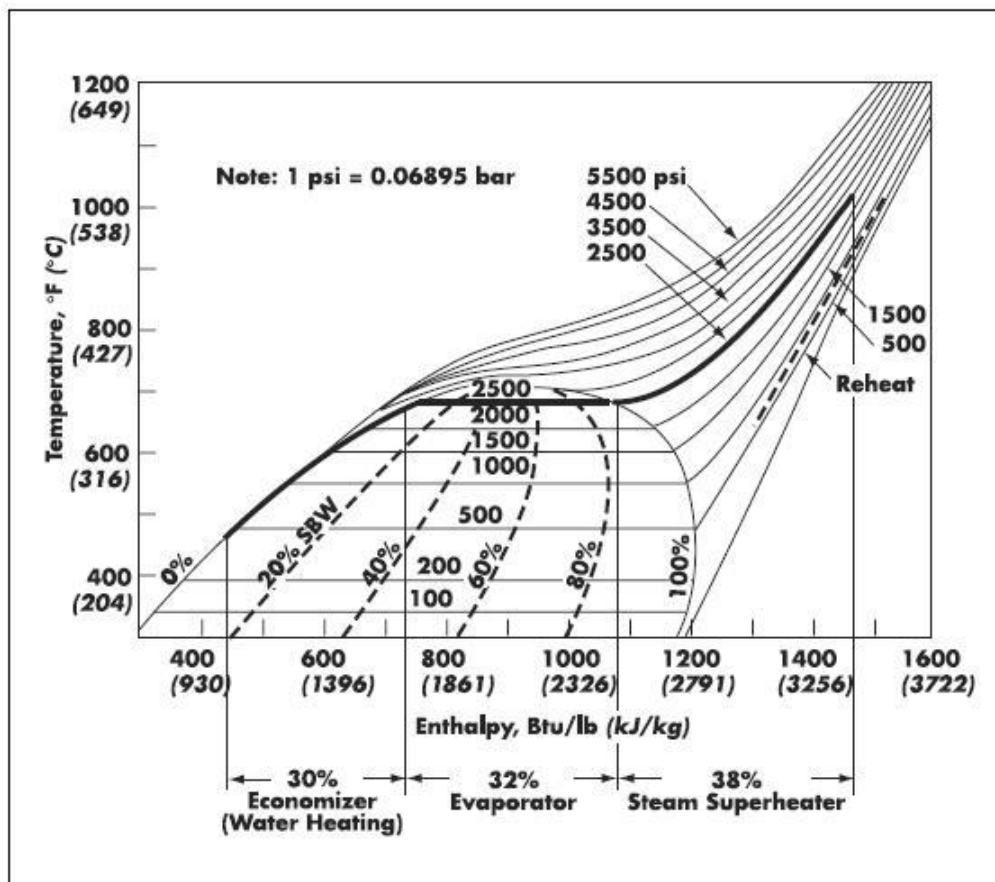
Ο **λέβητας**, η κύρια επιφάνεια συναγωγής, τοποθετείται γενικά μετά τον τομέα υπερθέρμανσης, όπου εκτίθεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Αποτελεί ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής επιφάνειας μετάδοσης θερμότητας του HRSG.

Ο **οικονομητήρας** χρησιμοποιείται για την ανάκτηση χαμηλού επιπέδου θερμότητας των καυσαερίων κατά την έξοδό τους από τον HRSG για τη θέρμανση του νερού τροφοδοσίας. Ένα μικρό ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του HRSG αντιστοιχεί στον οικονομητήρα (περίπου 10%) και ένα ακόμη μικρότερο ποσοστό της συνολικά ανακτώμενης ενέργειας απορροφάται από αυτόν. Εντούτοις, η ύπαρξή του είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του HRSG. Οι σωλήνες του οικονομητήρα μπορεί να είναι γυμνοί ή ενισχυμένοι με πτερύγια, με την πρώτη περίπτωση να εφαρμόζεται όταν το καύσιμο είναι «βρώμικο».

Ο **θερμαντήρας αέρα**, χρησιμοποιείται κατάντι του οικονομητήρα για επιπλέον ανάκτηση θερμότητας από τα καυσαέρια, πριν αυτά οδηγηθούν στην καμινάδα. Απαιτεί πολύ μεγάλη επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας του ρεύματος των καυσαερίων και του χαμηλού ρυθμού μεταφοράς θερμότητας από αέριο-σε-αέριο. Γενικά, χρησιμοποιούνται σε μεγάλους λέβητες στερεών καυσίμων για την εξάτμιση της υγρασίας, επιτρέποντας έτσι, γρήγορη και αποδοτική καύση.

Ο **αποθερμαντήρας** (desuperheater), ψύχει τον υπέρθερμο ατμό ψεκάζοντας νερό μέσα στους αγωγούς πριν ή μετά τον υπερθερμαντήρα (ή τον αναθερμαντήρα). Χρησιμοποιείται όταν κατά τη λειτουργία υπό μερικό φορτίο ο υπερθερμαντήρας παράγει ατμό υψηλότερης θερμοκρασίας από τη σχεδιασμένη υπό πλήρες φορτίο.

Στο επόμενο Σχήμα 7-4, απεικονίζεται ένα διάγραμμα θερμοκρασίας-ενθαλπίας (T-h) για έναν υποκρίσιμο HRSG παραγωγής ηλεκτρισμού. Στο ίδιο διάγραμμα αντιστοιχίζεται σε κάθε κύριο στοιχείο του HRSG το ποσοστό της ανακτώμενης θερμότητας. Η απορροφούμενη θερμότητα είναι 30% για προθέρμανση, 32% για ατμοποίηση και 38% για υπερθέρμανση.

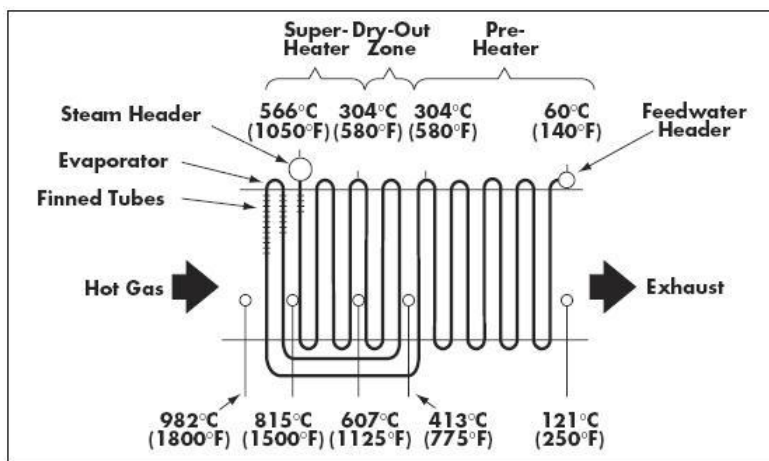


Σχήμα 7-4: Αντιστοίχιση απορροφούμενης θερμότητας σε κάθε κύριο στοιχείο ενός HRSG, Διάγραμμα T-h [27].

7.1.2.3. ΑΠ.Α.Θ. Εξαναγκασμένης Ροής (Once-through HRSG)

Πρόκειται για τεχνολογία αιχμής. Οι HRSG αυτού του τύπου αποτελούνται από μία ή πολλές παράλληλες σερπαντίνες σωλήνων διαμέσου των οποίων εισέρχεται το νερό τροφοδοσίας και εξέρχεται ως κορεσμένος ή υπέρθερμος ατμός. Οι σερπαντίνες σωλήνων περιλαμβάνουν διασυνδεδεμένα τμήματα οικονομητήρων, ατμοποιητών και υπερθερμαντήρων. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφεται η ανάγκη χρήσης τυμπάνων ατμού, ελέγχου στάθμης νερού, τεχνητής διαρροής, συστημάτων ανακυκλοφορίας και ενεργητικής επεξεργασίας νερού. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που απαιτούν πιέσεις υψηλότερες του κρίσιμου σημείου, πάνω από το οποίο το υγρό νερό ατμοποιείται χωρίς βρασμό, [27].

Στο επόμενο Σχήμα 7-5, απεικονίζεται το διάγραμμα ροής ενός HRSG εξαναγκασμένης ροής με τις θερμοκρασίες των καυσαερίων και του εργαζόμενου μέσου (νερό-ατμός) καθώς διέρχονται από τη μονάδα. Το νερό και ο ατμός ρέουν διαμέσου συνεχών κυκλωμάτων σωλήνων, σε αντίρροπη ροή ως προς τα θερμά καυσαέρια, [27].



Σχήμα 7-5: Διάγραμμα ροής HRSG εξαναγκασμένης ροής, [27].

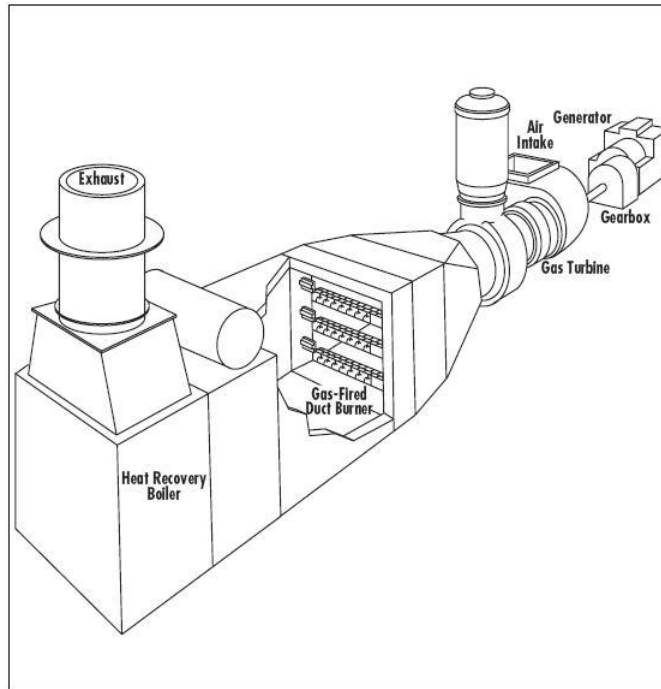
Οι πιο γνωστοί ατμοπαραγωγοί αυτού του τύπου είναι οι Benson και Sulzer.

7.1.2.4. ΑΠΑ.Θ. Συμπληρωματικής και εφεδρικής καύσης

Γενικά, όπως είδαμε και στις προηγούμενες παραγράφους, οι διάφοροι τύποι HRSG δεν περιέχουν φούρνο μέσα στον οποίο να πραγματοποιείται καύση. Η λειτουργία τους είναι να εκμεταλλεύονται την αισθητή θερμότητα των καυσαερίων που παράγονται σε διαφορετικό θάλαμο καύσης. Παρόλα αυτά, είναι δυνατό να συνοδεύονται από **συμπληρωματική κάυση** με σκοπό την αύξηση της θερμοκρασίας του εισερχόμενου ρεύματος καυσαερίων και την αυξημένη παραγωγή ατμού υψηλότερης θερμοκρασίας και πίεσης. Οι καυστήρες τοποθετούνται στα πλάγια του αγωγού διοχέτευσης των καυσαερίων στον ατμοπαραγωγό, ενώ το συνηθέστερο καύσιμο είναι το φυσικό αέριο. Η διάταξη αυτή είναι συνηθέστερη σε εφαρμογές με αεριοστρόβιλους, διότι η περίσσεια οξυγόνου 15-18% στα καυσαέρια είναι επαρκής για τη βοηθητική καύση, [27].

Στο επόμενο Σχήμα 7-6, απεικονίζεται η θέση του καυστήρα συμπληρωματικής καύσης μεταξύ της εξόδου του αεριοστρόβιλου και του HRSG. Ο βαθμός απόδοσης είναι μεγαλύτερος σε τέτοια συστήματα διότι σχεδόν κάθε kJ καυσίμου (φυσικού αερίου) μετατρέπεται σε χρήσιμη θερμική ενέργεια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ροή και η τελική θερμοκρασία των καυσαερίων παραμένουν σχεδόν σταθερά, όσο διαρκεί η συμπληρωματική καύση. Η διευρυμένη θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος του HRSG έχει ως αποτέλεσμα να ανακτάται περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα μάζας καυσαερίων.

Η θερμοκρασία των καυσαερίων μπορεί να ανέλθει έως και 1,650 °C. Για την αξιοποίησή της χρησιμοποιείται ένας εναλλάκτης ακτινοβολίας, ο οποίος μεταφέρει ενέργεια από τη φλόγα του καυστήρα στο νερό της μεμβράνης των εξωτερικών τοιχωμάτων του αγωγού. Έτσι, επιτυγχάνεται ατμός υψηλής θερμοκρασίας αυξάνοντας παράλληλα την απόδοση του θερμοδυναμικού κύκλου.



Σχήμα 7-6: Θέση καυσήρα συμπληρωματικής καύσης σε HRSG, [27].

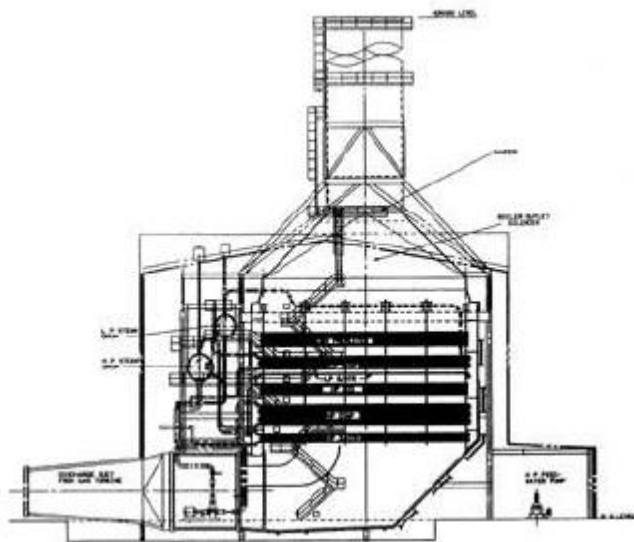
Μία ειδική περίπτωση της συμπληρωματικής καύσης σε HRSG είναι η **βοηθητική ή εφεδρική καύση**, σύμφωνα με την οποία, ο HRSG μπορεί να συνεχίσει να παράγει ατμό ακόμη και όταν η κύρια μονάδα παραγωγής καυσαερίων, στην περίπτωση μας ο αποτεφρωτήρας E.I.A., είναι εκτός λειτουργίας. Χαρακτηριστικό λοιπόν, πλεονέκτημα αυτής της λειτουργίας είναι η ευελιξία, με την οποία επιτρέπεται να εκτελούνται εργασίες συντήρησης στον αποτεφρωτήρα χωρίς να διακόπτεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Μειονέκτημα της λειτουργίας εφεδρικής καύσης είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής, σε σχέση με εκείνη της λειτουργίας συμπληρωματικής καύσης, όπου η θερμοκρασία του αέρα ισούται με τη θερμοκρασία των καυσαερίων της κύριας μονάδας. Συνεπώς, το καύσιμο που απαιτείται για την παραγωγή του ατμού πλήρους φορτίου είναι περισσότερο όταν η κύρια μονάδα είναι εκτός λειτουργίας.

7.1.3. Διατάξεις ατμοπαραγωγών

Ανάλογα με τη διαδρομή των καυσαερίων, οι ατμοπαραγωγοί διακρίνονται σε οριζόντιους και κατακόρυφους. Στην πρώτη περίπτωση, Σχήμα 7-3, τα καυσαέρια μετά την έξοδό τους από τη μονάδα δημιουργίας τους (στην περίπτωση μας ο θάλαμος μετάκαυσης), διέρχονται διαμέσου οριζόντιου αγωγού, ο οποίος συνδέεται με το περίβλημα του ατμοπαραγωγού, πριν αλλάξουν στην κατακόρυφη διεύθυνση της καμινάδας. Οι αυλοί ατμοποίησης τοποθετούνται κατακόρυφα επιτρέποντας έτσι, την κυκλοφορία του νερού με φυσική συναγωγή, χωρίς τη χρήση κυκλοφορητή. Αντιθέτως, οι αυλοί του

υπερθερμαντήρα και του οικονομητήρα τοποθετούνται οριζόντια ή κατακόρυφα, ανάλογα με το ποια λύση προσφέρει τη βέλτιστη αποστράγγιση.



Σχήμα 7-7: HRSG κατακόρυφης ροής, τεχνητής κυκλοφορίας, [www].

Όταν η ροή των καυσαερίων είναι κατακόρυφη, οι αυλοί του ατμοποιητή/λέβητα είναι οριζόντιοι, οπότε για να διασφαλιστεί η απρόσκοπτη ροή του νερού χρησιμοποιείται αντλία κυκλοφορίας. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι ατμοπαραγωγοί κατασκευάζονται για κατακόρυφη ροή καυσαερίων με οριζόντιες θερμαντικές επιφάνειες, χρησιμοποιώντας δε, ανυψωμένα τύμπανα ώστε να διασφαλίζεται επαρκής φυσική κυκλοφορία. Σημαντικό κριτήριο επιλογής αποτελεί το μέγιστο ύψος κάθε διάταξης, το οποίο ίσως θέτει χωροθετικούς περιορισμούς σε κάποιες μονάδες εν λειτουργία.

7.1.4. Κυκλοφορία εργαζόμενου μέσου

Προκειμένου η παραγωγή ατμού να είναι συνεχής και απρόσκοπτη, είναι απαραίτητο το νερό να κυκλοφορεί μέσα στους αυλούς ατμοποίησης. Διακρίνουμε λοιπόν, τους ατμοπαραγωγούς ανάλογα με το μηχανισμό κυκλοφορίας του νερού σε τρεις κατηγορίες :

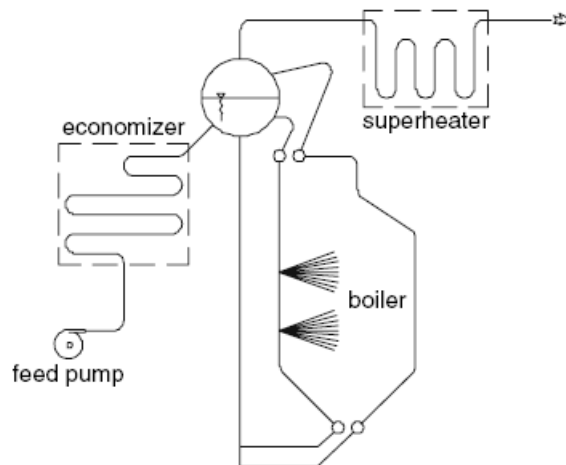
- φυσικής κυκλοφορίας (natural circulation)
- τεχνητής κυκλοφορίας (forced circulation)
- εξαναγκασμένης ροής (once-through systems)

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται συνοπτικά οι τρεις αυτές κατηγορίες. Για μια πιο λεπτομερή εμβάθυνση μπορεί κανείς να ανατρέξει στις μονογραφίες [21,27,28,29,30].

7.1.4.1. Φυσική κυκλοφορία

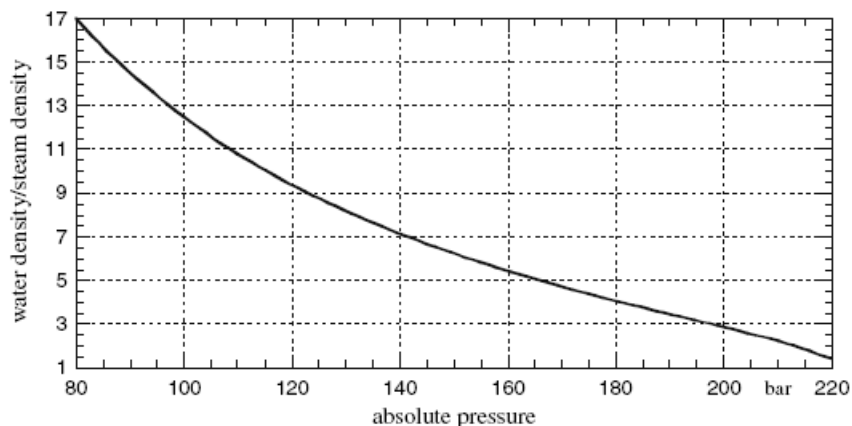
Οι ατμοπαραγωγοί φυσικής κυκλοφορίας αποτελούνται τυπικά από οικονομητήρες και έναν ατμοποιητή, τα οποία συνθέτουν τις θερμαινόμενες επιφάνειες, ένα τύμπανο για το διαχωρισμό του νερού από τον ατμό, καθώς και μη-θερμαινόμενους αυλούς και υπερθερμαντήρες. Ο λέβητας είναι ένα κλειστό κύκλωμα συνδεδεμένο με το τύμπανο στην υψηλότερη θέση. Οι αυλοί σύνδεσης του οικονομητήρα, διαμέσου των οποίων θερμαίνεται το νερό τροφοδοσίας, επίσης συνδέονται με τον οικονομητήρα. Επιπλέον, οι σωλήνες που μεταφέρουν τον κορεσμένο ατμό στον υπερθερμαντήρα ξεκινούν επίσης από το τύμπανο, Σχήμα 7-8.

Στους ατμοπαραγωγούς φυσικής κυκλοφορίας εξασφαλίζεται αδιάκοπη κίνηση του νερού μέσα στους αυλούς ατμοποίησης χωρίς τη βοήθεια τεχνητού μέσου παρά μόνο με την εκμετάλλευση φυσικών αιτιών [21]. Το φυσικό αίτιο είναι η διαφορά της πυκνότητας του θερμού νερού που εγκαταλείπει το τύμπανο για να τροφοδοτήσει τις κεφαλές εισόδου (inlet headers) του λέβητα και της πυκνότητα του μίγματος νερού-ατμού που επιστρέφει στο τύμπανο διαμέσου των αυλών ατμοποίησης και των κεφαλών εξόδου του λέβητα [29].



Σχήμα 7-8: Ατμοπαραγωγός φυσικής κυκλοφορίας [29].

Οι ατμοπαραγωγοί φυσικής κυκλοφορίας λειτουργούν αποδοτικά όταν η διαφορά στις ανωτέρω πυκνότητες είναι μεγάλη. Ο μηχανισμός φυσικής κυκλοφορίας περιορίζεται από τον **λόγο κυκλοφορίας**, ο οποίος μειώνεται με τις υψηλές πιέσεις λειτουργίας και την υψηλή ποιότητα ατμού. Όταν η πίεση στο τύμπανο υπερβεί τα 185 bar -πίεση που αντιστοιχεί σε 170-180 bar πριν τον ατμοστρόβιλο- δεν εξασφαλίζεται πλέον η ψύξη, [30]. Το ανώτατο όριο λειτουργίας του τυμπάνου είναι η πίεση κρίσιμου σημείου, καθώς από το σημείο αυτό και έπειτα παύει να υφίσταται διφασικό μίγμα νερού-ατμού. Μετά το κρίσιμο σημείο ο λόγος κυκλοφορίας τείνει προς τη μονάδα, Σχήμα 7-9.

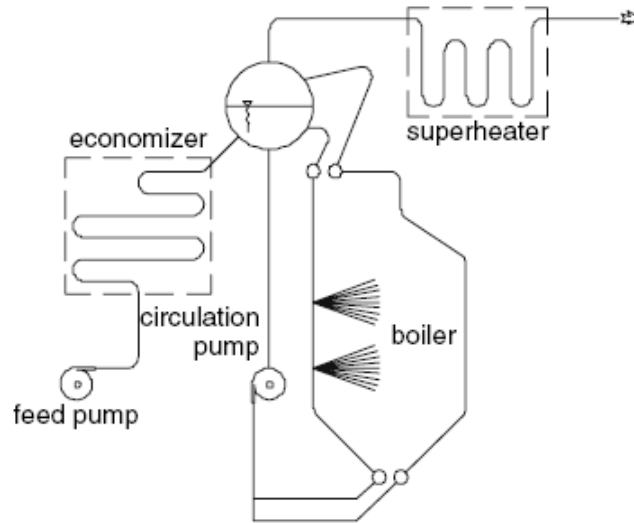


Σχήμα 7-9: Επίδραση πίεσης λέβητα στο λόγο κυκλοφορίας [29].

Στα πλεονεκτήματα της φυσικής κυκλοφορίας συγκαταλέγονται η απλή κατασκευή και η χαμηλή απαίτηση σε ισχύ για την αντλία τροφοδοσίας. Επιπλέον, οι απαιτήσεις καθαρότητας του νερού τροφοδοσίας είναι μειωμένες σε σχέση με την εξαναγκασμένη ροή, διότι οι ακαθαρσίες συγκεντρώνονται στο τύμπανο, από όπου μπορούν να απομακρυνθούν. Μειωνεκτεί ως προς το πάχος των τοιχωμάτων του τυμπάνου, το οποίο περιορίζει το επιτρεπτό ρυθμό μεταβολής φορτίου, καθώς και ως προς την ολική πίεση του συστήματος, [30].

7.1.4.2. Τεχνητή κυκλοφορία

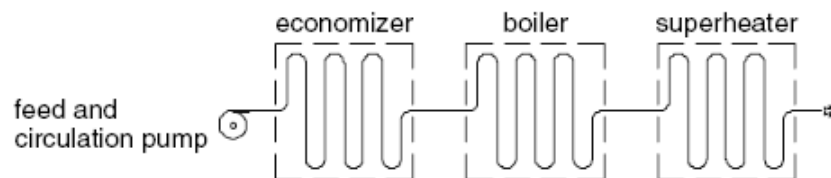
Τα συστήματα τεχνητής κυκλοφορίας δεν διαφέρουν από τα προηγούμενα, παρά μόνο στο ότι η κυκλοφορία του νερού ή του μίγματος νερού-ατμού δεν προκύπτει φυσικά αλλά υποστηρίζεται από αντλία κυκλοφορίας, τοποθετούμενη στο χαμηλότερο σημείο, όπου η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη, Σχήμα 7-10. Ακόμη και στην περίπτωση αυτή, ο λέβητας αποτελεί ένα κλειστό κύκλωμα. Η παρεμβολή της αντλίας μεταξύ του τυμπάνου και των κεφαλών εισόδου του λέβητα, δεν διευκολύνει μόνο την κυκλοφορία του νερού και του μίγματος νερού-ατμού στο κύκλωμα, αλλά επιπλέον, έχει ως αποτέλεσμα τη σωστή λειτουργία του λέβητα, ακόμη και όταν η διαφορά πυκνοτήτων ατμού και νερού είναι μικρή [29]. Για να εξασφαλίζεται επαρκής διαχωρισμός νερού-ατμού στο τύμπανο, η πίεση λειτουργίας περιορίζεται γύρω στα 200 bar, [30].



Σχήμα 7-10: Ατμοπαραγωγός τεχνητής κυκλοφορίας [29].

7.1.4.3. Εξαναγκασμένης ροής

Στα συστήματα εξαναγκασμένης ροής δεν πραγματοποιείται ανακυκλοφορία του νερού στο σύστημα ατμοποίησης, αλλά το εργαζόμενο μέσο εξαναγκάζεται με την αντλία τροφοδοσίας να κινηθεί από την είσοδο του ατμοπαραγωγού μέχρι την έξοδό του. Έτσι, στο πλήρες φορτίο του ατμοπαραγωγού η ροή στους σωλήνες της επιφάνειας ατμοποίησης είναι σχεδόν ίση με το ροή του υπέρθερμου ατμού στην έξοδο του υπερθερμαντήρα, [21]. Το νερό τροφοδοσίας εισέρχεται στο σύστημα θερμό. Στη συνέχεια η ατμοποίηση του ατμού, καθώς και ένα μέρος της υπερθέρμανσής του, λαμβάνουν χώρα σε ένα στάδιο εντός του αυλού ατμοποίησης. Ο λέβητας, ως ανοικτό τώρα κύκλωμα, παρεμβάλλεται μεταξύ του οικονομητήρα και του υπερθερμαντήρα, Σχήμα 7-11. Χαρακτηριστική είναι η απουσία του τυμπάνου. Η αντλία τροφοδοσίας, σε αντίθεση με τα προηγούμενα συστήματα, εκτελεί και τη λειτουργία της κυκλοφορίας εισάγοντας το νερό, το οποίο μετατρέπεται σε υπέρθερμο ατμό διαμέσου του οικονομητήρα, του λέβητα και του υπερθερμαντήρα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της εγκατάστασης.



Σχήμα 7-11: Ατμοπαραγωγός εξαναγκασμένης ροής (once-through) [29].

7.2. Ατμοστρόβιλος (Steam Turbine - ST)

7.2.1. Γενικά

Ο ατμοστρόβιλος είναι μία θερμική μηχανή στην οποία η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική. Οι εφαρμογές των ατμοστρόβιλων στη βιομηχανία διακρίνονται σε δύο γενικές κατηγορίες :

- παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά την περιστροφή ηλεκτρικής γεννήτριας,
- μετάδοση κίνησης σε κινητήριες μηχανές, όπως αντλίες, ανεμιστήρες και συμπυκνωτές

Οι ιδιότητες του ατμού λειτουργίας του ατμοστρόβιλου προσδιορίζονται κάθε φορά από την προς εκτέλεση διεργασία.

Η λειτουργία του ατμοστρόβιλου βασίζεται στην υψηλή ταχύτητα που αποκτά ο ατμός καθώς διέρχεται από ένα μικρό άνοιγμα. Η ταχύτητα που επιτυγχάνεται κατά την εκτόνωση εξαρτάται από τις αρχικές και τελικές τιμές του θερμικού περιεχόμενου του ατμού. Η διαφορά στο θερμικό περιεχόμενο αντιστοιχεί στη θερμική ενέργεια που μετατρέπεται σε κινητική κατά τη διαδικασία.

Σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η ονομαστική ισχύς των ατμοστρόβιλων κυμαίνεται από 100 MW έως 1.300 MW. Ωστόσο, η ολοένα και αυξανόμενη εμφάνιση ανεξάρτητων παραγωγών ενέργειας, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως καύσιμο υλικό διαφόρων ειδών απόβλητα, και κυρίως στερεά αστικά απόβλητα, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη σταθμών παραγωγής ενέργειας μικρότερης ισχύος από 10 MW έως 80 MW, [32].

Η ταχύτητα περιστροφής των ατμοστρόβιλων σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 3.000 rpm για συχνότητα 50 Hz και 3.600 rpm για 60 Hz.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη υγρασία στους ατμοστρόβιλους περιορίζεται μεταξύ 10% και 15% κατά βάρος. Η ύπαρξη υγρασίας στον ατμό είναι εξαιρετικά διαβρωτική, ιδιαίτερα κατά τις υψηλές ταχύτητες περιστροφής του ατμοστρόβιλου. Για την ελαχιστοποίηση των αρνητικών συνεπειών διάβρωσης χρησιμοποιούνται για τα πτερύγια ειδικά υλικά και μήκη.

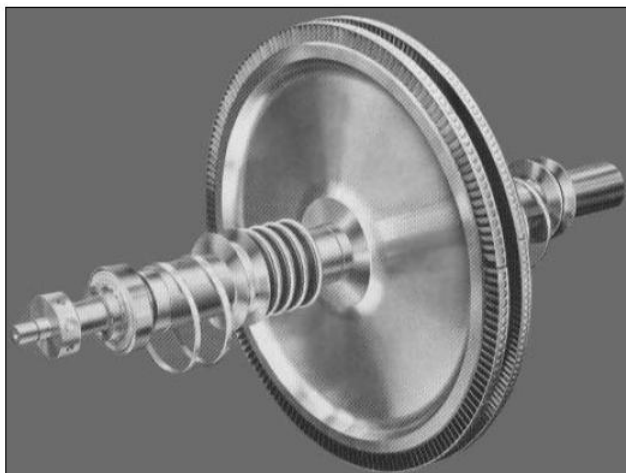
7.2.2. Κατηγορίες ατμοστρόβιλων

Οι ατμοστρόβιλοι χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τις βασικές αρχές λειτουργίας τους, μερικές από τις οποίες είναι [27,22,32] : το πλήθος των βαθμίδων, το πλήθος των βαλβίδων, ο τύπος των πτερυγώσεων, οι ιδιότητες του ενεργού ατμού (κορεσμένου ή υπέρθερμου), οι συνθήκες εξόδου ατμού, η γενική διάταξη του κελύφους και του άξονα, η κατεύθυνση της ροής του ατμού (αξονικής, ακτινικής, εφαπτομενικής) και το πλήθος των παράλληλων βαθμίδων εξόδου (διπλής ή τριπλής ροής). Στη συνέχεια αναλύονται συνοπτικά οι σημαντικότερες από αυτές. Περισσότερα για το σχεδιασμό, την

κατασκευή, τη λειτουργία και συντήρηση των ατμοστρόβιλων μπορούν να αναζητηθούν σε μονογραφίες ειδικά αφιερωμένες στους ατμοστρόβιλους [33,34].

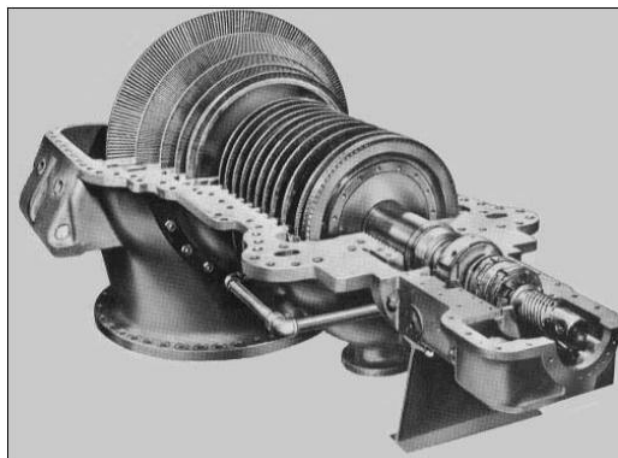
7.2.2.1. Το πλήθος των βαθμίδων : μονοβάθμιες και πολυβάθμιες

Στις **μονοβάθμιες**, Εικόνα 7-1, ο ατμός επιταχύνεται διά μέσου ακροφυσίων και οδηγείται στα περιστρεφόμενα πτερύγια για την παραγωγή ισχύος. Από την είσοδο στα ακροφύσια μέχρι την έξοδο του ατμού από τα πτερύγια έχουμε μία μοναδική πτώση πίεσης. Οι μονοβάθμιοι ατμοστρόβιλοι είναι μικροί σχετικά σε μέγεθος και η ισχύς εξόδου τους περιορίζεται σε μερικές χιλιάδες kW. Η μηχανική τους απόδοση κυμαίνεται από 30% έως 60%. Κατά το σχεδιασμό των μονοβάθμιων ατμοστρόβιλων έμφαση δίνεται στην απλότητα, την αξιοπιστία και το χαμηλό αρχικό κόστος.



Εικόνα 7-1: Ρότορας μονοβάθμιου ατμοστρόβιλου, [27].

Ένας **πολυβάθμιος**, Εικόνα 7-2, ατμοστρόβιλος περιλαμβάνει δύο ή περισσότερες βαθμίδες σε ένα μόνο κέλυφος, και κάθε βαθμίδα παρέχει ένα μέρος της συνολικής πτώσης πίεσης. Στους πολυβάθμιους ατμοστρόβιλους γίνεται συνδυασμός μίας πρώτης βαθμίδας τύπου Curtis ή Rateau (βλ. παρακάτω) ακολουθούμενης από μία ή περισσότερες βαθμίδες τύπου Rateau. Οι πολυβάθμιοι ατμοστρόβιλοι είναι περισσότερο αποδοτικοί από τους μονοβάθμιους και η μηχανική τους απόδοση κυμαίνεται από 50% έως 80%. Είναι δε πιο σύνθετοι και ακριβοί και το αρχικό κόστος μπορεί να είναι πολλαπλάσιο μιας μονοβάθμιας μονάδας, ανάλογα με το πλήθος των βαθμίδων.



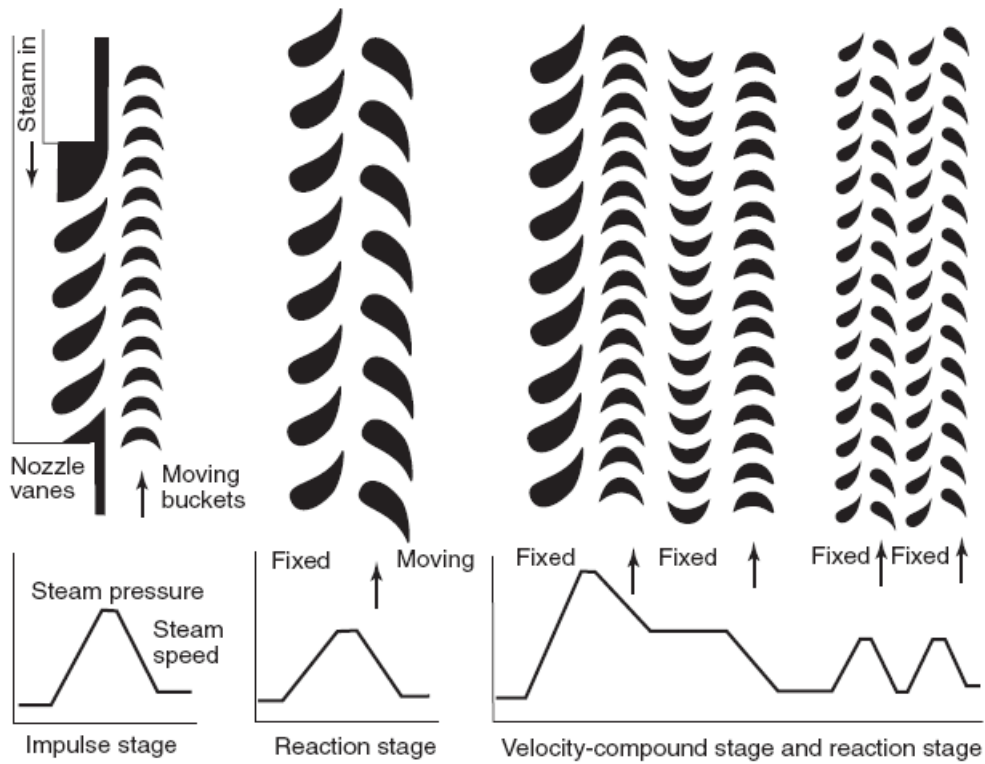
Εικόνα 7-2: 15-βάθμιος ατμοστρόβιλος ισχύος 11 MW, [27].

7.2.2.2. Ο τύπος των πτερυγώσεων

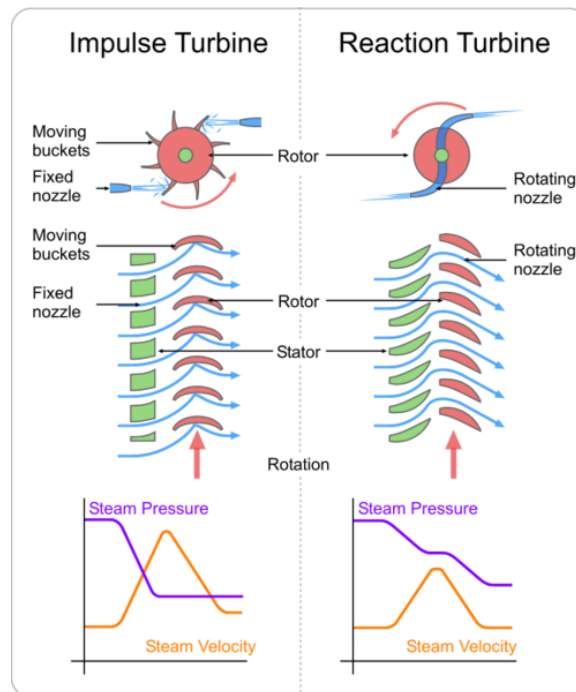
Το σχήμα και η διάταξη των ακροφυσίων (στατικά πτερύγια) και των κινούμενων πτερυγίων είναι το σημαντικότερο στοιχείο κατά το σχεδιασμό του ατμοστρόβιλου. Το σχήμα των πτερυγίων επιδρά στη μορφή της ροής που ακολουθεί ο ατμός και στην ενέργεια που μεταφέρεται από τον ατμό στο ρότορα. Από την άλλη, ένας ικανός αριθμός πτερυγίων απαιτείται για την εξασφάλιση της βέλτιστης ροής, ενώ όσο περισσότερα πτερύγια προστίθενται τόσο αυξάνει η αντίσταση ροής. Συνεπώς, η διάταξη της ροής αντανακλάται στο κατασκευαστικό κόστος και τις απαιτήσεις συντήρησης, οπότε είναι ανάγκη να επέλθει κάποια ισορροπία μεταξύ της λειτουργικής απόδοσης και του κόστους.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες σχεδιασμού πτερυγώσεων : δράσης και αντίδρασης, Εικόνα 7-3 και Σχήμα 7-12, ενώ στην πράξη συναντώνται συνδυασμοί των δύο.

Στους **ατμοστρόβιλους δράσης** (impulse turbine) [27], η πτώση πίεσης μιας ολόκληρης βαθμίδας πραγματοποιείται στα στάσιμα ακροφύσια, τα οποία κατευθύνουν τον ατμό ώστε να ρέει σε μορφή πιδάκων υψηλής ταχύτητας. Η πτώση πίεσης επιταχύνει τον ατμό, η ταχύτητα του οποίου σχετίζεται με την τετραγωνική ρίζα της διαφοράς ενθαλπίας. Οι πίδακες προσκρούουν στα κινούμενα πτερύγια και η κινητική ενέργεια του ατμού μετατρέπεται σε μηχανική περιστρέφοντας τον άξονα του ατμοστρόβιλου. Δεν πραγματοποιείται πτώση πίεσης στον ατμό καθώς αυτός διέρχεται από τα κινούμενα πτερύγια. Συνεπώς, στους ατμοστρόβιλους δράσης η μετατροπή της ενθαλπίας του ατμού, μέσω της πτώσης πίεσης, σε κινητική ενέργεια λαμβάνει χώρα στα στατικά πτερύγια, ενώ η μετατροπή της κινητικής σε μηχανική λαμβάνει χώρα στα κινούμενα πτερύγια.



Εικόνα 7-3: Σχηματικά διαγράμματα βαθμίδων δράσης, αντίδρασης και συνδυασμού, [32].



Σχήμα 7-12: Σύγκριση στροβίλων δράσης και αντίδρασης, [www].

Οι ατμοστροβίλοι δράσης διακρίνονται επιπλέον σε βαθμίδες πίεσης (Rateau) και ταχύτητας (Curtis). Στην πρώτη περίπτωση, χρησιμοποιείται μόνο μία σειρά κινούμενων πτερυγίων ανά βαθμίδα. Οι βαθμίδες Curtis αποτελούνται από δύο γραμμές κινούμενων πτερυγίων. Τα στατικά ακροφύσια κατευθύνουν τον ατμό στην πρώτη γραμμή, και στη

συνέχεια αντιστρέφοντας τη ροή, τον κατευθύνουν στη δεύτερη γραμμή. Τα στατικά πτερύγια δεν απορροφούν ενέργεια και αντιστρέφουν τη δέσμη ατμού κατά 180ο, οπότε ο ατμός εισέρχεται στη δεύτερη γραμμή κινούμενων πτερυγίων με διπλάσια ταχύτητα. Ο ρόλος της δεύτερης γραμμής κινούμενων πτερυγίων είναι να απορροφούν την κινητική ενέργεια που έχει απομείνει στη δέσμη ατμού, έτσι ώστε η τελική ταχύτητα του ατμού να είναι σχεδόν μηδενική, κατά την έξοδο του από τα πτερύγια.

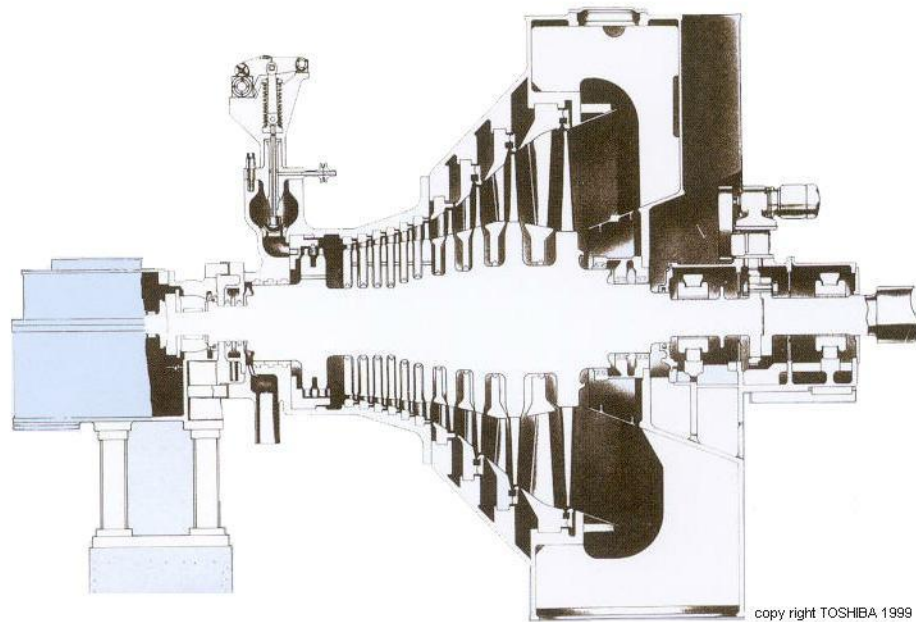
Στους **ατμοστροβίλους αντίδρασης** (reaction turbine) [27,32], αξιοποιείται η δύναμη αντίδρασης, η οποία δημιουργείται καθώς ο ατμός επιταχύνεται διά μέσου των ακροφυσίων. Τα ακροφύσια σχηματίζονται από τα πτερύγια, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, Εικόνα 7-3. Κάθε βαθμίδα συντίθεται από μία γραμμή στατικών και μία γραμμή κινούμενων βαθμίδων. Ο ατμός εκτονώνεται και στις δύο γραμμές. Μέσω των στατικών πτερυγίων αυξάνεται η ταχύτητα του ατμού, οποίος κατευθύνεται προς τα κινούμενα πτερύγια. Τα πτερύγια των ατμοστροβίλων αντίδρασης σχεδιάζονται έτσι ώστε η επιφάνεια μεταξύ δύο γειτονικών πτερυγίων της ίδιας γραμμής να σχηματίζουν ένα συγκλίνον ακροφύσιο. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται πτώση πίεσης, και κατά συνέπεια, αύξηση της σχετικής ταχύτητας διά μέσου κάθε γραμμής. Η πτώση πίεσης στα κινούμενα πτερύγια παράγει δύναμη αντίδρασης, η οποία συνεισφέρει επιπλέον στην ορμή του ατμού.

7.2.2.3. Οι συνθήκες τροφοδοσίας και εξόδου του ατμού

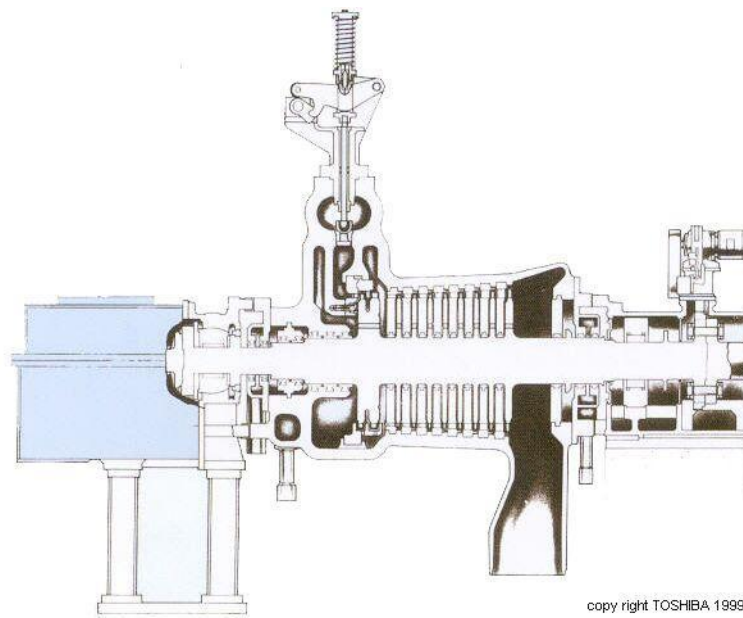
Με βάση τις συνθήκες τροφοδοσίας και εξόδου του ατμού οι ατμοστροβίλοι διακρίνονται σε ατμοστροβικούς συμπύκνωσης, αντίθλιψης, αναθέρμανσης-συμπύκνωσης και απομάστευσης.

Ατμοστροβίλοι συμπύκνωσης. Ο τύπος αυτός ατμοστροβίλων χρησιμοποιείται κυρίως για την περιστροφή ηλεκτρικών γεννητριών σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η έξοδος του ατμοστροβίλου γίνεται στο συμπυκνωτή, η πίεση του οποίου είναι χαμηλότερη της ατμοσφαιρικής. Στο συμπυκνωτή επίσης υγροποιείται ο ατμός. Οι ατμοστροβίλοι συμπύκνωσης μπορεί να είναι απλής ροής ή αντιροής, ενώ το γεγονός ότι αρκετή από την ενθαλπία του ατμού απορρίπτεται στο περιβάλλον, καθιστά απαραίτητο το σχεδιασμό τους ως πολυβάθμιους για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης, Εικόνα 7-4.

Ατμοστροβίλοι αντίθλιψης. Ο τύπος αυτός ατμοστροβίλων χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικές διεργασίες, αλλά και σε συστήματα τηλεθέρμανσης. Η πίεση του ατμού εξόδου μπορεί να είναι ίση ή μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και ρυθμίζεται από έναν σταθμό ελέγχου ώστε να διατηρείται σταθερή ανάλογα με τη διεργασία που τον χρησιμοποιεί. Οι ατμοστροβίλοι αντίθλιψης μπορεί να είναι μονοβάθμιοι ή πολυβάθμιοι, Εικόνα 7-5.

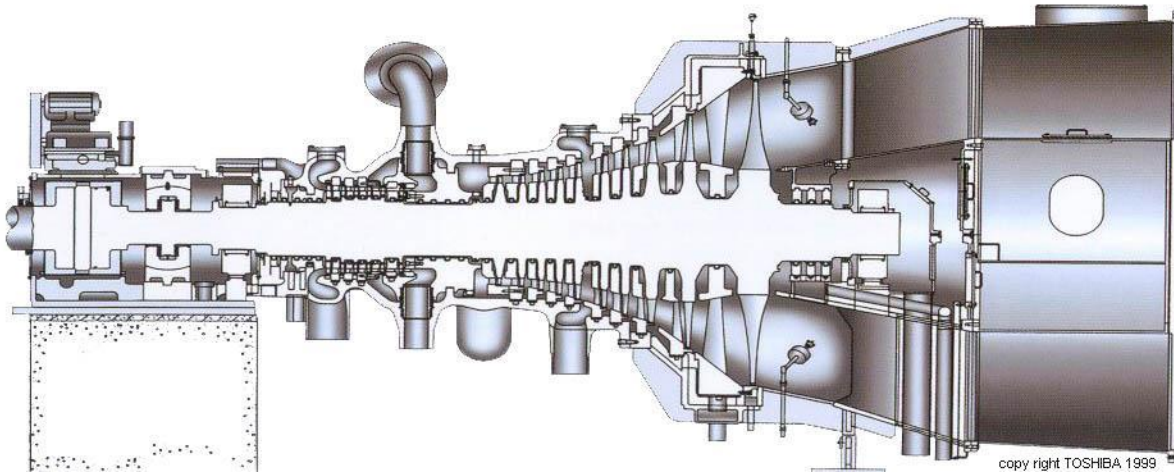


Εικόνα 7-4: Ατμοστρόβιλος συμπίκνωσης 38 MW, [37].



Εικόνα 7-5: Ατμοστρόβιλος αντίθλιψης 25 MW, [37].

Ατμοστρόβιλοι αναθέρμανσης-συμπύκνωσης. Ο τύπος αυτός ατμοστρόβιλων χρησιμοποιείται κυρίως σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ατμός παράγεται από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης του ατμοστρόβιλου και επιστρέφεται στον ατμοπαραγωγό, όπου αναθερμαίνεται. Ο ατμός τώρα είναι χαμηλότερης πίεσης, αλλά συνήθως ίδιας θερμοκρασίας με τον αρχικό υπέρθερμο ατμό, και τροφοδοτεί στη συνέχεια τις βαθμίδες μεσαίας ή χαμηλής πίεσης για επιπλέον εκτόνωση, Εικόνα 7-6.



Εικόνα 7-6: Ατμοστρόβιλος αναθέρμανσης-συμπύκνωσης 200 MW απλής ροής, [37].

Ατμοστρόβιλοι απομάστευσης και εισαγωγής. Ο τύπος αυτός ατμοστρόβιλων επίσης συναντάται σε βιομηχανικές διεργασίες. Οι ατμοστρόβιλοι απομάστευσης είναι πολυβάθμιοι και φέρουν ανοίγματα ώστε να απάγεται ατμός διαφορετικών πιέσεων για χρήση σε διεργασίες. Στους ατμοστρόβιλους εισαγωγής ατμός χαμηλής πίεσης, προερχόμενος από βιομηχανικές διεργασίες, τροφοδοτείται σε ενδιάμεσες βαθμίδες για την παραγωγή επιπλέον ισχύος. Υπάρχει και η δυνατότητα συνδυασμού των δύο, οπότε προκύπτει ο ατμοστρόβιλος απομάστευσης-εισαγωγής.

7.2.2.4. Η διάταξη του άξονα και του κελύφους

Με βάση τη διάταξη του άξονα και του κελύφους οι ατμοστρόβιλοι διακρίνονται σε απλούς, και διασταυρούμενους.

Απλή διάταξη - single casing. Είναι η βασική διάταξη των μικρών μονάδων, στις οποίες υπάρχει ένα κέλυφος και όλα τα κινούμενα πτερύγια προσαρμόζονται πάνω σε έναν άξονα. Ο ατμός κινείται σε μία κατεύθυνση.

Διάταξη αφ' ενός ζυγού - tandem-compound casing. Δύο ή περισσότερα κελύφη προσαρμοσμένα πάνω σε έναν άξονα. Χρησιμοποιείται σε πολύ μεγάλες μονάδες. Ο ατμός εισερχόμενος στο πρώτο τμήμα υψηλής πίεσης εκτονώνεται σε ενδιάμεση πίεση και μεταφέρεται μέσω αγωγών στο τμήμα χαμηλής πίεσης. Τα δύο τμήματα -υψηλής και χαμηλής πίεσης- βρίσκονται πάνω στον ίδιο άξονα.

Διασταυρούμενη διάταξη - cross-compound casing. Ομοιάζουν με τις μονάδες διάταξης αφ' ενός ζυγού με τη διαφορά ότι οι βαθμίδες υψηλής και χαμηλής πίεσης δεν βρίσκονται στον ίδιο άξονα. Αποτελούνται από ξεχωριστά στοιχεία υψηλής, ενδιάμεσης και χαμηλής πίεσης τοποθετημένα σε ξεχωριστά κελύφη. Όταν η διάταξη αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κάθε άκρο συνήθως συνδέεται

σε ξεχωριστή γεννήτρια. Όταν χρησιμοποιείται ως κινητήρια μηχανή, δύο διαφορετικά άκρα μπορούν να συνδέονται στον ίδιο άξονα μέσω μειωτήρων.

7.2.2.5. Πίεση ατμού τροφοδοσίας και ταχύτητα περιστροφής

Ανάλογα με την πίεση του ατμού τροφοδοσίας διακρίνουμε τους αμοστρόβιλους σε [22]:

- χαμηλής πίεσης, για πιέσεις τροφοδοσίας μέχρι 20 bar,
- μέσης πίεσης, για πιέσεις τροφοδοσίας μέχρι 40 bar,
- υψηλής πίεσης, για πιέσεις τροφοδοσίας μέχρι 20 bar,
- υπερ-υψηλής πίεσης, για πιέσεις πάνω από 170 bar, και
- υπερκρίσιμης πίεσης για πιέσεις πάνω από 225 bar.

Ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής διακρίνουμε τους αμοστρόβιλους σε [22]:

- σταθερής ταχύτητας, σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας,
- κανονικής ταχύτητας, για ταχύτητες 3.000 rpm,
- χαμηλής ταχύτητας, για ταχύτητες μικρότερες των 3.000 rpm, πχ για κίνηση τετραπολικής γεννήτριας,
- υψηλής ταχύτητας, για ταχύτητες μεγαλύτερες των 3.000 rpm, και
- μεταβλητής ταχύτητας, για κίνηση αντλιών, ανεμιστήρων, συμπιεστών, πλοίων κ.α

7.2.3. Απώλειες αμοστροβίλων

Η περιεχόμενη ενθαλπία του ατμού που εισέρχεται στον αμοστρόβιλο μετατρέπεται μόνο εν μέρει σε ωφέλιμο μηχανικό έργο εξαιτίας των απωλειών. Οι απώλειες αυτές διακρίνονται σε εσωτερικές και εξωτερικές και στις περισσότερες των περιπτώσεων υπολογίζονται μέσω εμπειρικών σχέσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται επιγραμματικά οι σημαντικότερες από αυτές παρακάμπτοντας τους τύπους υπολογισμών τους, καθώς αφορούν πλέον τους κατασκευαστές αμοστροβίλων. Για λεπτομερέστερη ανάγνωση αναφέρουμε τα έργα των [22,23,24].

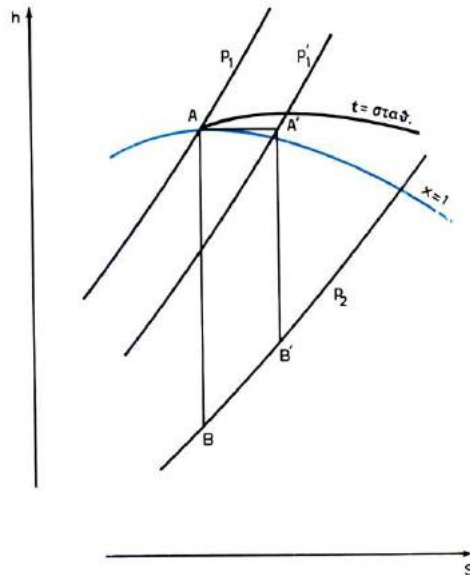
Σε επόμενο κεφάλαιο, ενταγμένο στη θερμοδυναμική ανάλυση του σταθμού μετατροπής της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων σε ηλεκτρική, θα ασχοληθούμε με τον υπολογισμό των βαθμών απόδοσης του αμοστρόβιλου

7.2.3.1. Εσωτερικές απώλειες

Οι εσωτερικές απώλειες οδηγούν σε μετατροπή ενέργειας στο εσωτερικό του ρευστού. Έχουμε δηλαδή αύξηση της θερμοκρασίας του ρευστού από τη μετατροπή κινητικής ενέργειας σε θερμότητα, χωρίς να μεταβάλλεται η ολική ενθαλπία του [22]. Στις εσωτερικές απώλειες αριθμούνται οι εξής :

Απώλειες στραγγαλισμού. Ο στραγγαλισμός είναι μία ισενθαλπική μεταβολή της κατάστασης του ατμού και έχει ως αποτέλεσμα σημαντική ελάττωση της ενθαλπικής

πτώσης κατά την εκτόνωση του ατμού [16]. Όπως φαίνεται και στο επόμενο Σχήμα 7-13: Ισενθαλπική διεργασία στραγγαλισμού, [24], από το αρχικό σημείο A πίεσης p_1 μεταβαίνουμε μέσω στραγγαλισμού στο σημείο A' πίεσης p_1' . Ενώ λοιπόν η παραγωγή έργου κατά την εκτόνωση στο σημείο B πίεσης p_2 θα ήταν η διαφορά ενθαλπίας AB, μετά το στραγγαλισμό το έργο είναι $A'B' < AB$. Ο στραγγαλισμός χρησιμοποιείται ως μέθοδος για τη ρύθμιση του φορτίου των ατμοστροβίλων.



Σχήμα 7-13: Ισενθαλπική διεργασία στραγγαλισμού, [24]

Απώλειες ακροφυσίων. Αυτές διακρίνονται σε [24]:

- απώλειες από διαφυγή θερμότητας από τα τοιχώματα,
- απώλειες από τριβές της μάζας του ατμού στις παρειές του ακροφυσίου,
- απώλειες λόγω καμπυλότητας του άξονα ροής,
- απώλειες λόγω στροβιλισμού και ηχητικών κραδασμών, και
- απώλειες από την εκτροπή της φλέβας ατμού κατά την εκροή του από το ακροφύσιο.

Απώλειες τριβών και ανεμισμού. Είναι συνέπεια δύο χαρακτηριστικών μηχανικών φαινομένων [24]:

- της τριβής μεταξύ των περιστρεφόμενων μερών του ατμοστροβίλου και της μάζας του ατμού, και
- του ανεμισμού ή στροβιλισμών του ατμού λόγω της περιστροφής των πτερυγώσεων, οι οποίες λειτουργούν ως ανεμιστήρες.

Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από την περιφερειακή ταχύτητα, τον ειδικό όγκο του ατμού και τις διαστάσεις του τροχού και των πτερυγίων. Οι εμπειρικοί τύπου υπολογισμού

τους είναι αρκετά πολύπλοκοι [23,24]. Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι απώλειες αυτές δεν δημιουργούνται μέσα στην κύρια διαδρομή του ατμού διά της οποίας γίνεται η αποτόνωσή του και παράγεται μηχανικό έργο. Ενδεικτικά αναφέρουμε το χώρο μεταξύ των στρεφόμενων δίσκων, πάνω στους οποίους είναι προσαρτημένα τα κινητά πτερύγια, και των ακίνητων διαφραγμάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ τους [22].

Απώλειες πτερυγίων. Οφείλονται στην τριβή του ατμού κατά τη διέλευσή του από την αύλακα των πτερυγίων, καθώς και στο στροβιλισμό, την εκτροπή της φλέβας ατμού και την κρούση της στις ακμές των πτερυγίων, [24].

Απώλειες εκροής ατμού. Οι απώλειες αυτές είναι συνώνυμες με τη απώλειες κινητικής ενέργειας, η οποία δεν αποδίδεται στον ατμοστρόβιλο εξαιτίας της μη-μηδενικής ταχύτητας του ατμού κατά την τελική εκροή του από αυτόν. Ως εκ τούτου είναι αναπόφευκτες διότι απαιτείται κάποια ελάχιστη ταχύτητα ώστε να εκρέυσει ο ατμός από τον ατμοστρόβιλο [23,24].

Απώλειες διακένων ή διαφυγών. Χαρακτηρίζονται οι απώλειες που οφείλονται στη διέλευση ατμού μέσα από διάκενα που σχηματίζονται μεταξύ κινητών και σταθερών τμημάτων. Τα διάκενα διακρίνονται σε ακτινικά και αξονικά. Τα αξονικά διάκενα τείνουν να παρεκτρέπουν τη δέσμη του ατμού, ενώ στα ακτινικά ο διαφυγών ατμός δημιουργεί επιπλέον απώλειες κατά την ανάμιξή του με την κύρια ροή.

Απώλειες υγροποίησης. Κατά τη διεργασία της εκτόνωσης του ατμού μέρος της εκτόνωσης πραγματοποιείται στην περιοχή του υγρού ατμού (διαγράμματα Molier και T-s). Τα σταγονίδια του μίγματος κινούνται με χαμηλότερη ταχύτητα από τον ατμό με αποτέλεσμα η σχετική τους ταχύτητα ως προς τα πτερύγια να δημιουργεί μία πέδηση στα πτερύγια και συνεπώς απώλεια ισχύος [24].

Απώλειες ψύξης και ακτινοβολίας. Τα τοιχώματα του ατμοστρόβιλου δεν είναι αδιαβατικά και αποβάλλουν θερμότητα προς το περιβάλλον είτε με συναγωγή είτε με ακτινοβολία. Η θερμότητα αυτή αφαιρείται από τον ατμό μειώνοντας έτσι, την ενθαλπική πτώση και την παραγωγή έργου. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του ατμοστρόβιλου, από τη συνολική επιφάνεια του κελύφους, και από τη θερμοπερατότητα και το συντελεστή ακτινοβολίας, τα οποία εξαρτώνται από τη μόνωση του κελύφους. Το μέγεθος των απωλειών αυτών είναι πολύ μικρό και ενσωματώνεται στο μηχανικό βαθμό απόδοσης [22,24].

7.2.3.2. Εξωτερικές απώλειες

Οι εξωτερικές απώλειες οδηγούν σε μεταφορά ενέργειας από το ρευστό προς το εξωτερικό περιβάλλον του ατμοστρόβιλου, και πρόκειται στην ουσία για τις :

Μηχανικές απώλειες, οι οποίες υποδιαιρούνται σε τέσσερις κατηγορίες :

- απώλειες τριβής εδράνων,

- απώλειες τριβής ατμού και ανεμισμού, και
- απώλειες λόγω μετάδοσης έργου σε μηχανισμούς προσαρτημένους στον ατμοστρόβιλο, όπως είναι τα στροφόμετρα, η αντλία λίπανσης, διάφοροι ρυθμιστές, κα.

Οι μηχανικές απώλειες χαρακτηρίζονται και ως «**απώλειες λειτουργίας εν κενώ**» γιατί η ισχύς που καταναλώνουν είναι ανεξάρτητη του φορτίου του ατμοστρόβιλου και σχετίζεται μόνο με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής [22]. Ανέρχονται δε σε 2%-6% της ισχύος και υπολογίζονται με εμπειρικούς τύπους [24].

7.2.4. Ατμοστρόβιλος υγρού ατμού

Η ύπαρξη υγρασίας στον ατμό δημιουργεί δύο σοβαρά προβλήματα : σοβαρή μηχανική διάβρωση των πτερυγίων και αύξηση των απωλειών [22]. Τα προβλήματα διάβρωσης δεν εμφανίζονται μόνο στις τελευταίες βαθμίδες του ατμοστρόβιλου. Όταν ο ενεργός ατμός τροφοδοσίας είναι κορεσμένος ή ελαφρά υπέρθερμος, τότε από τις πρώτες κιόλας βαθμίδες υψηλής πίεσης του ατμοστρόβιλου η ποιότητα του ατμού είναι μικρότερη της μονάδας, με αποτέλεσμα κατά την εκτόνωση στις επόμενες βαθμίδες να μειώνεται σε απαγορευτικά επίπεδα. Η ύπαρξη, λοιπόν, διαχωριστών ατμού- υγρού νερού κρίνεται απαραίτητη σε διατάξεις κορεσμένου ή ελαφρώς υπέρθερμου κύκλου. Έτσι, με την αφαίρεση της υγρασίας μειώνεται η υγρότητα, η ποιότητα του ατμού αυξάνεται και συνεπώς στο διάγραμμα Mollier μετακινούμαστε δεξιότερα. Η διεργασία του διαχωρισμού είναι αδιαβατική χωρίς συναλλαγή έργου και συνεπώς σταθερής ενθαλπίας.

Για τη διαμόρφωση της διατομής του ατμοστρόβιλου υγρού ατμού λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι μέρος του ατμού υγροποιείται και απάγεται από την κυρίως ροή. Η συλλογή και απαγωγή του νερού γίνεται με διόδους κατάλληλης διατομής. Το υγρό αυτό επανεισάγεται σε αναθερμαντήρες ελαχιστοποιώντας με αυτό τον τρόπο τις σχετικές απώλειες [22].

7.3. Συμπυκνωτής και πύργος ψύξης

7.3.1. Γενικά

Ο συμπυκνωτής αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Ο εκτονωθείς ατμός, προερχόμενος από την τελευταία βαθμίδα του ατμοστρόβιλου, συμπυκνώνεται στην υγρή φάση του νερού και επαναχρησιμοποιείται ως νερό τροφοδοσίας στον ατμοπαραγωγό για να ακολουθήσει νέος θερμοδυναμικός κύκλος.

Κατά τη συμπύκνωση του ατμού δημιουργείται κενό, το οποίο μειώνει την αντίθλιψη του ατμοστρόβιλου με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόδοσή του. Το ψυκτικό νερό απορροφά την περιεχόμενη στον ατμό θερμότητα, ενώ κατά τη συμπύκνωση ο όγκος του ατμού μειώνεται σημαντικά. Το νερό της συμπύκνωσης καταλαμβάνει ένα πολύ μικρό

τμήμα του όγκου και έτσι δημιουργείται το κενό. Η συνεχιζόμενη συμπύκνωση του ατμού εκτόνωσης μειώνει την πίεση σε επίπεδα κάτω της ατμοσφαιρικής.

Οι συμπυκνωτές χρειάζονται μεγάλες ποσότητες νερού για να απορρίψουν τη θερμότητα που απελευθερώνεται κατά τη συμπύκνωση του ατμού. Για το λόγο αυτό, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας πρέπει είτε να τοποθετούνται σε περιοχές με σημαντική επάρκεια σε υδάτινα αποθέματα είτε να χρησιμοποιούν πύργους ψύξης ή αερόψυκτους συμπυκνωτές.

Η θερμοκρασία του νερού ψύξης επηρεάζει σημαντικά την πίεση αντίθλιψης του ατμοστρόβιλου. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία αυτή τόσο υψηλότερη είναι η αντίθλιψη και συνεπώς μικρότερος ο βαθμός θερμικής απόδοσης με αντίστοιχη μείωση στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Για παράδειγμα, νερό ψύξης θερμοκρασίας 13 °C αντιστοιχεί σε αντίθλιψη 1.5'' Hg ενώ θερμοκρασία 13 °C αντιστοιχεί σε 3.5'' Hg, [32].

Διακρίνουμε δύο βασικούς κατασκευαστικούς τύπους συμπυκνωτών : **άμεσης επαφής ή ανοιχτού τύπου** – (direct contact) και **κλειστού τύπου** – (surface condenser).

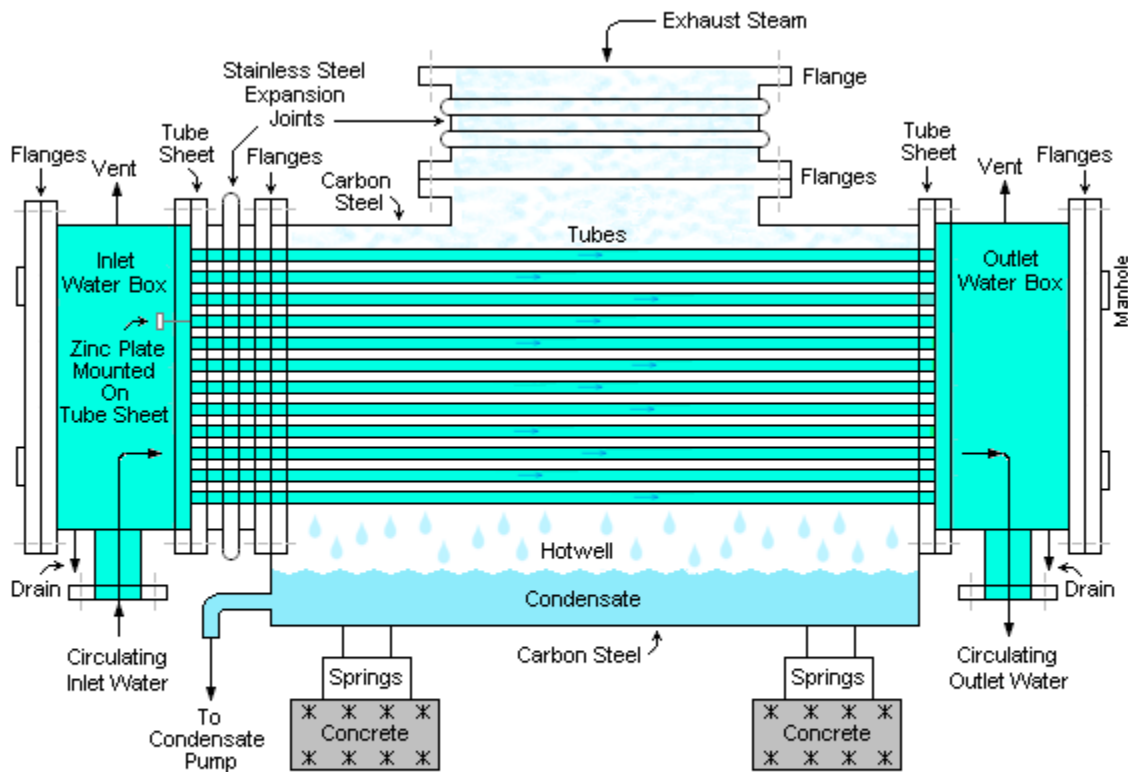
7.3.2. Άμεσης επαφής ή ανοιχτού τύπου

Σε ανοιχτού τύπου συμπυκνωτές ο ατμός εκτόνωσης και το νερό ψύξης έρχονται σε άμεση επαφή. Η θερμοκρασίες του νερού ψύξης και του συμπυκνώματος είναι ίδιες μετά την έξοδο από το συμπυκνωτή.

Ένας συμπυκνωτής ανοικτού τύπου αποτελείται από ακροφύσια ψεκασμού, την είσοδο του ατμού, θαλάμους ανάμιξης ομορροής ή αντιρροής, και θερμές δεξαμενές [35]. Χρησιμοποιούνται όταν έχουμε ξηρούς πύργους ψύξης σε γεωθερμικές εγκαταστάσεις [22].

7.3.3. Κλειστού τύπου

Ο κλειστού τύπου συμπυκνωτής μοιάζει με έναν εναλλάκτη θερμότητας και αποτελείται από ένα κλειστό δοχείο στο οποίο έχουν προσαρμοστεί κατάλληλα πολλοί αυλοί μικρής διαμέτρου, [22,32,35]. Το νερό ψύξης ρέει μέσα στους αυλούς, ενώ ο ατμός εκτόνωσης κυκλοφορεί έξω από αυτούς στον υπόλοιπο χώρο του δοχείου, όπως φαίνεται στο επόμενο Σχήμα 7-14. Το νερό τροφοδοσίας είναι εντελώς χωριστό από το νερό τροφοδοσίας του ατμοπαραγωγού και μπορεί να κυκλοφορεί σε κλειστό κύκλωμα ή να προέρχεται από φυσική δεξαμενή, όπως λίμνες, ποτάμια, θάλασσες. Επίσης, το νερό ψύξης μπορεί να εκτελεί μία ή περισσότερες διαδρομές εντός του συμπυκνωτή μέχρι να απορριφθεί στο περιβάλλον. Το συμπύκνωμα συλλέγεται στο κάτω μέρος του συμπυκνωτή, το θερμό πηγάδι ή *hot well*, και στη συνέχεια μέσω αντλίας τροφοδοτείται στους προθερμαντήρες του νερού τροφοδοσίας.



Note: Tubes are brass, cupro nickel, titanium or stainless steel. The tubes are expanded or rolled and bell mouthed at the ends in the tubesheets.

Typical Power Plant Condenser

Σχήμα 7-14: Τυπική διάταξη συμπυκνωτή κλειστού τύπου, [38]

Τα πλεονεκτήματα των συμπυκνωτών κλειστού τύπου αριθμούν τα εξής [32,35]:

- Παρέχουν χαμηλή αντίθλιψη στην έξοδο του αμοστρόβιλου, ένα χαρακτηριστικό το οποίο μεγιστοποιεί τη θερμική απόδοση και μειώνει το ρυθμό παρεχόμενης θερμότητας, με αποτέλεσμα να μειώνεται το λειτουργικό κόστος του σταθμού.
- Επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση νερού υψηλής καθαρότητας στον αμοπαγωγό και τον αμοστρόβιλο, με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση του κόστους προεπεξεργασίας νερού.
- Γίνεται απαέρωση των μη-συμπυκνόμενων αερίων, όπως οξυγόνου και υδρογόνου, η ύπαρξη των οποίων μειώνει τη μετάδοση θερμότητας από τον ατμό στο νερό ψύξης. Επιπλέον, η αύξηση της περιεκτικότητας του νερού σε οξυγόνο το καθιστά ιδιαίτερα διαβρωτικό για τον αμοπαγωγό.
- Λειτουργεί ως συλλεκτική δεξαμενή για όλες τις συμπυκνούμενες διαρροές.

Στα μειονεκτήματα των συμπυκνωτών κλειστού τύπου, εν συγκρίσει με του ανοικτού τύπου, συγκαταλέγονται :

- Το αυξημένο κόστος επένδυσης,
- Τα υψηλότερα κόστη λειτουργίας και συντήρησης, και
- Ο μεγαλύτερος όγκος.

Ένας αποδοτικός συμπυκνωτής είναι πολύ σημαντικός για την αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας. Οι διαρροές αέρα ή νερού ψύξης έχουν ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση ιζημάτων και την επιτάχυνση της διάβρωσης του ατμοπαραγωγού. Επιπροσθέτως, η χαμηλή απόδοση ενός συμπυκνωτή αυξάνει τις πιέσεις αντίθλιψης, με αποτέλεσμα την ελάττωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος και την αύξηση του λειτουργικού κόστους.

7.3.4. Αερόψυκτοι συμπυκνωτές

Οι αερόψυκτοι συμπυκνωτές χρησιμοποιούνται όταν [32]:

- υπάρχει μειωμένη διαθεσιμότητα νερού, όπως σε άνυδρες περιοχές,
- απαγορεύεται η απόρριψη θερμού νερού σε φυσικούς ταμιευτήρες, και
- απαιτείται μείωση της ορατότητας στηλών ατμού από πύργους ψύξης.

Η χρησιμοποίηση αερόψυκτων συμπυκνωτών απλοποιεί το σχεδιασμό και την κατασκευή των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Ωστόσο, ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος εν συγκρίσει με σταθμούς κλειστών συμπυκνωτών, με αποτέλεσμα τα λειτουργικά κόστη να είναι υψηλότερα.

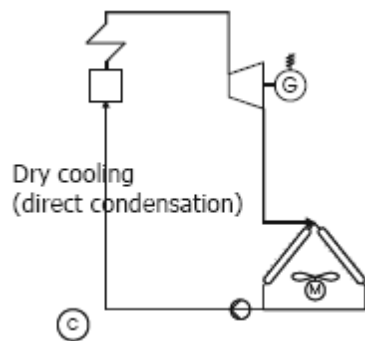
Οι ξηρού τύπου αερόψυκτοι συμπυκνωτές είναι εκείνοι που έχουν επικρατήσει και διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους [30,32]:

Άμεσης συμπύκνωσης, Σχήμα 7-15. Ο ατμός εκτόνωσης ρέει μέσα σε αυλούς με πτερύγια, ενώ ο αέρας περιβάλλοντος εμφυσάται μεταξύ των αυλών απάγοντας τη θερμότητα του ατμού. Το συμπύκνωμα συγκεντρώνεται σε μια δεξαμενή, από την οποία με αντλίες τροφοδοτείται στους προθερμαντήρες και εν συνεχεία στον ατμοπαραγωγό για την έναρξη νέου κύκλου.

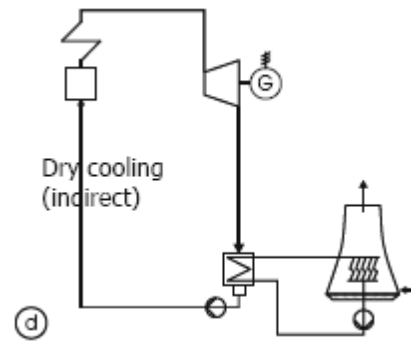
Έμμεσης συμπύκνωσης, Σχήμα 7-16. Ο ατμός εκτόνωσης συμπυκνώνεται από ένα κλειστό κύκλωμα νερού ψύξης ενός συνηθισμένου κλειστού συμπυκνωτή. Η θερμότητα την οποία έχει απορροφήσει το νερό ψύξης από τον ατμό, απορρίπτεται στην ατμόσφαιρα μέσω ενός πύργου ξηράς ψύξης, στον οποίο έχουν προσαρμοστεί πτερυγωτοί αυλοί γύρω από τους οποίους αμφυσάται αέρας.

Λόγω του χαμηλού συντελεστή μετάδοσης θερμότητας του αέρα απαιτούνται μεγάλες επιφάνειες εναλλακτών με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος επίτευξης της βέλτιστης θερμοκρασίας του νερού ψύξης. Στους ξηρού τύπου συμπυκνωτές η εναλλαγή θερμότητας γίνεται μόνο με συναγωγή με συνέπεια να απαιτείται τέσσερις φορές μεγαλύτερη ροή αέρα από ότι στους συμπυκνωτές υγρού τύπου (ανοιχτού ή κλειστού), [30]. Οι παράγοντες αυτοί έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένες θερμοκρασίες ατμού εκτόνωσης και συνεπώς, υψηλότερη μέση θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας, και τελικά μειωμένο βαθμό απόδοσης. Το κόστος επένδυσης για έναν συμπυκνωτή ξηρού τύπου έμμεσης συμπύκνωσης είναι τρεις φορές περισσότερο από τα αντίστοιχα συστήματα

υγρού τύπου [30]. Οι συμπυκνωτές ξηρού τύπου άμεσης συμπύκνωσης είναι οι συχνότερα χρησιμοποιούμενοι [32].



Σχήμα 7-15: Συμπυκνωτής ξηρού τύπου άμεσης συμπύκνωσης, [30].



Σχήμα 7-16: Συμπυκνωτής ξηρού τύπου έμμεσης συμπύκνωσης, [30].

7.4. Ηλεκτρογεννήτρια - σύνδεση με δίκτυο

7.4.1. Γενικά

Το έργο που παράγεται από τον ατμοστρόβιλο χρησιμοποιείται για την περιστροφή γεννήτριας ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν δύο τύποι γεννητριών για την παραγωγή τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος : οι ασύγχρονες και οι σύγχρονες [27].

Οι ασύγχρονες χρησιμοποιούνται εν παραλλήλω με υπάρχουσα πηγή ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος και οι ισχείς τους κυμαίνονται από λίγα kW έως 1MW. Η σύνδεσή τους με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά απλή. Επίσης, η λειτουργία και ο έλεγχος των ασύγχρονων γεννητριών είναι απλούστερος σε σχέση με τις σύγχρονες [27].

Από την άλλη, **οι σύγχρονες γεννήτριες** μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα. Πρόκειται για τις πλέον χρησιμοποιούμενες γεννήτριες σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανεξαρτήτου μεγέθους. Η διασύνδεση με άλλη πηγή ενέργειας απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και συνεχή έλεγχο για τη διασφάλιση του συγχρονισμού τους [27]. Στη συνέχεια περιγράφονται τα βασικότερα στοιχεία των σύγχρονων γεννητριών.

7.4.2. Σύγχρονες γεννήτριες

7.4.2.1. Αρχή λειτουργίας

Οι τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες αποτελούν την κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως με ισχείς που κυμαίνονται από μερικές εκατοντάδες watts έως και 2.000 MW [25,36].

Όλες οι σύγχρονες γεννήτριες λειτουργούν ως συσκευές μετατροπής μαγνητικής ενέργειας, μετατρέποντας μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική μέσω μαγνητικών πεδίων. Η ροπή εισόδου που παρέχεται από κινητήριες μηχανές, όπως θερμικές (ατμοστρόβιλος ή αεριοστρόβιλος), υδραυλικές ή αιολικές, έρχεται σε ισορροπία με τη μαγνητική ροπή που δημιουργείται μεταξύ του στάτη και του ρότορα της γεννήτριας [36].

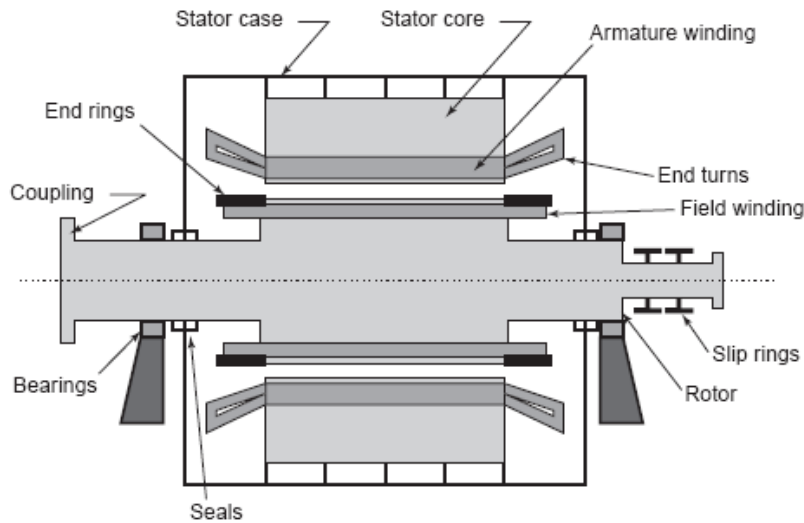
Απαντώνται αρκετές τεχνικές προσεγγίσεις για την μετατροπή αυτή της ισχύος. Σε μεγάλες σύγχρονες γεννήτριες τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται από:

- ηλεκτρικά εναλλασσόμενα ρεύματα (ac), τα οποία κυκλοφορούν σε στατικά τυλίγματα, και
- ηλεκτρικά συνεχή ρεύματα (dc), τα οποία κυκλοφορούν σε περιστρεφόμενα τυλίγματα.

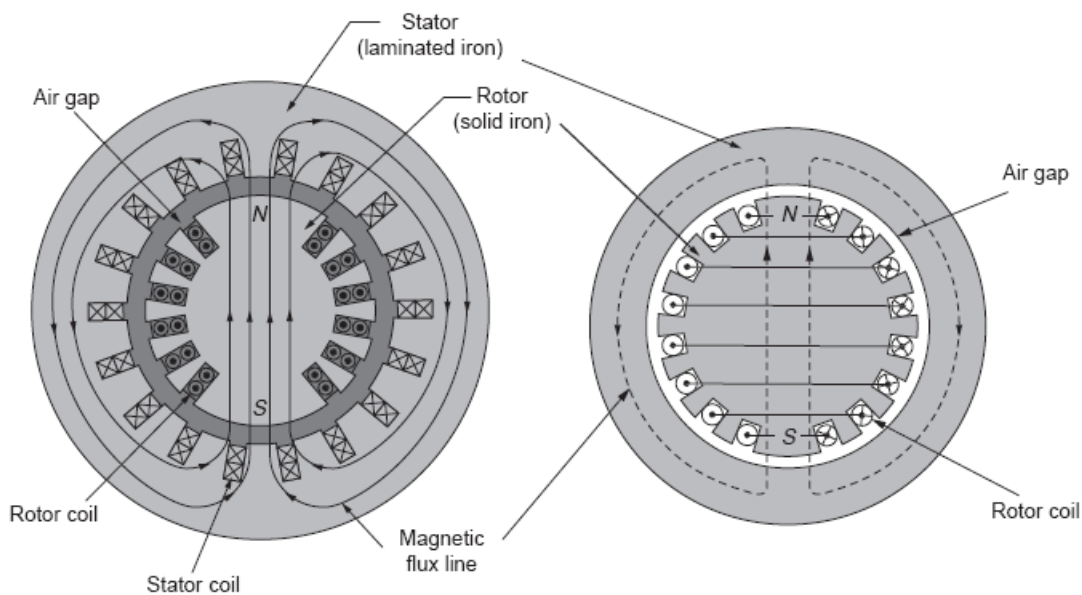
Σε μία τέτοια γεννήτρια τα τυλίγματα ac συνδέονται ηλεκτρικά με το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος και προσαρμόζονται στον στάτη –stator- της γεννήτριας, ενώ τα τυλίγματα dc συνδέονται ηλεκτρικά με μία πηγή συνεχούς ρεύματος και προσαρμόζονται στο δρομέα –rotor- της γεννήτριας.

Οι μεγάλες σύγχρονες γεννήτριες αποτελούνται από τυλίγματα τυμπάνου ac (ac armature winding), τοποθετημένα στο στάτη, και τυλίγματα πεδίου dc (dc field winding), τοποθετημένα στο δρομέα. Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο αυτών τυλιγμάτων αποτελεί το βασικό μηχανισμό για την παραγωγή εναλλασσόμενης ισχύος. Σε ορισμένες από τις μικρότερες σύγχρονες γεννήτριες, με ισχείς κάτω του 1 MW, το μαγνητικό πεδίο των τυλιγμάτων πεδίου δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες. Σε όλες τις μεγάλες σύγχρονες γεννήτριες τα τυλίγματα πεδίου είναι εκείνα που δημιουργούν το dc πεδί [36].

Στο επόμενο Σχήμα 7-17, και Σχήμα 7-18, απεικονίζονται τα βασικά στοιχεία μιας σύγχρονης γεννήτριας.



Σχήμα 7-17: Βασικά στοιχεία γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος, [36].



Σχήμα 7-18: Γεννήτρια δύο πόλων, [36].

7.4.2.2. Συχνότητα και πόλοι

Το πλήθος των πόλων του δρομέα και του στάτη σε μια σύγχρονη γεννήτρια πρέπει να είναι ίσο, διότι η μαγνητική αλληλεπίδραση προκύπτει ως αποτέλεσμα της διαδοχής των πόλων των μαγνητικών πεδίων. Η σχέση που συνδέει την ηλεκτρική συχνότητα f_e με τη μηχανική ταχύτητα N της κινητήριας μηχανής και το πλήθος των πόλων p είναι [25,36]:

$$f_e = p \frac{N}{120}$$

όπου η ηλεκτρική συχνότητα f_e μετράται σε Hz και το N σε στροφές ανά λεπτό (rpm).

Για τις ανάγκες μετατροπής του σταθμού αποτέφρωσης Ε.Ι.Α. στα Άνω Λιόσια σε σταθμό παραγωγής Ενέργειας-από-Απόβλητα (EfW plant) είναι απαραίτητη η σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο είναι εναλλασσόμενης τάσης και ορισμένης συχνότητας. Στη χώρα μας η συχνότητα αυτή είναι 50Hz και πρέπει να διατηρείται σταθερή χωρίς διακυμάνσεις για την αποφυγή ανεπιθύμητων δυσλειτουργιών πολλών εγκαταστάσεων [25].

Κριτήριο για την επιλογή του πλήθους των πόλων μιας γεννήτριας είναι οι σύγχρονες στροφές N_s να βρίσκονται κοντά στην περιοχή αποδοτικής λειτουργίας της κινητήριας μηχανής, στην περίπτωση μας του ατμοστρόβιλου. Ο ατμοστρόβιλος που θα στρέφει τη γεννήτρια σχεδιάζεται ώστε να μπορεί να στρέφεται στις σύγχρονες στροφές ακριβώς. Από την προηγούμενη σχέση υπολογίζουμε το πλήθος των πόλων για συχνότητα 50Hz :

$$p = \frac{120}{N_s} f_e = \frac{6000}{N_s}$$

Στον επόμενο πίνακα δίνονται ενδεικτικά οι αριθμοί των πόλων μιας σύγχρονης γεννήτριας και οι σύγχρονες στροφές με τις οποίες πρέπει να κινείται ο ατμοστρόβιλος για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 50Hz:

Αριθμός πόλων και σύγχρονες στροφές για συχνότητα 50Hz	
<i>Αριθμός πόλων p</i>	<i>Σύγχρονες στροφές N_s (rpm)</i>
2	3.000
4	1.500
30	200

Τετραπολικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται συνήθως σε πυρηνικούς σταθμούς, στους οποίους οι ατμοστρόβιλοι περιστρέφονται με χαμηλότερες στροφές, 1.500rpm. Σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς της Ελλάδας οι στροφές των υδροστρόβιλων κυμαίνονται από 180-240 rpm, οπότε επιλέγονται γεννήτριες 30-πόλων. Τότε, η ταχύτητα περιστροφής του υδροστρόβιλου ρυθμίζεται στις 200 rpm.

Ακόμη μία χρήσιμη εξίσωση είναι η σχέση μεταξύ μηχανικής ταχύτητας περιστροφής και κυκλικής συχνότητας ρεύματος :

$$\omega_s = \frac{\pi N_s}{30} = \omega_{\mu\eta\chi} = \frac{2}{p} \omega_{\eta\lambda} = \frac{2}{p} 2\pi f$$

7.4.2.3. Παραγωγή ισχύος και σύνδεση στο δίκτυο

Η αλληλεπίδραση μεταξύ της μαγνητικής ροής που παράγεται από το δρομέα και του ρεύματος που διαρρέει το στάτη έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ροπής. Η ροπή αυτή T είναι υπεύθυνη για τη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σύμφωνα με τη σχέση :

$$P = \omega_{\text{μηχ}} T = 2\pi \frac{f}{p} T = 2\pi \frac{N_s}{60} T$$

$$T = 2\pi R^2 l \sigma$$

όπου : R η εσωτερική διάμετρος του στάτη, l το ενεργό μήκος, και σ η μέση τιμή της διατμητικής τάσης του κενού αέρα

$$\sigma \approx \frac{1}{\sqrt{2}} B_1 K_z$$

με B_1 τη μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής στον στάτη και K_z το δραστικό επιφανειακό ρεύμα rms του τυμπάνου.

Προκειμένου να συνδεθεί μία γεννήτρια στο άπειρο δίκτυο ή ζυγό ενός εθνικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητο να συντρέχουν οι εξής συνθήκες [36]:

- η συχνότητα της γεννήτριας να ισούται με τη συχνότητα του δικτύου (50 Hz),
- η τάση της γεννήτριας να ισούται με την τάση του δικτύου,
- η φάση της τάσης της γεννήτριας να ισούται με τη φάση της τάσης του δικτύου,
- η διαδοχή φάσεων της γεννήτριας να είναι ίδια με εκείνη του δικτύου.

7.4.2.4. Απώλειες και συντελεστής απόδοσης γεννήτριας

Διακρίνουμε τρεις κατηγορίες απωλειών [25]:

Ηλεκτρικές απώλειες ή απώλειες χαλκού. Πρόκειται για ωμικές απώλειες του τύπου I^2R , και περιλαμβάνουν απώλειες τυλιγμάτων τυμπάνου και πεδίου, καθώς και ψηκτρών και δακτυλίων.

Μαγνητικές απώλειες. Οφείλονται στα δινορρεύματα και την υστέρηση λόγω του υλικού του πυρήνα και ονομάζονται αλλιώς απώλειες πυρήνα. Με τη σειρά τους διακρίνονται σε απώλειες φορτίου, οφειλόμενες στο ρεύμα του τυμπάνου και τη μαγνητική ροή που παράγει, απώλειες υστέρησης και απώλειες δινορρευμάτων, αμφότερες οφειλόμενες στο στρεφόμενο πεδίο.

Μηχανικές απώλειες. Οφείλονται στις τριβές των εδράνων του τυμπάνου και στον ανεμισμό της γεννήτριας.

Ο συντελεστής αποδοσης μιας γεννήτριας ισούται με το λόγο της ισχύος που προσδίδεται στη γεννήτρια μέσω της κινητήριας μηχανής (ατμοστρόβιλου) προς την ηλεκτρική ισχύ που παράγεται :

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}^{\text{el}}}{P_{\text{in}}^{\text{mech}}}$$

Τυπικές τιμές για το συντελεστή απόδοσης σύγχρονων γεννητριών κυμαίνονται από 92% έως 97% [27].

8. Η ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΟΥ ΑΤΜΟΥ

8.1. Γενικά

Πριν την ανάλυση μιας θερμοδυναμικής διεργασίας ή κύκλου προηγείται η μελέτη των ιδιοτήτων του εργαζόμενου μέσου. Στην περίπτωση των ατμοστροβίλων το εργαζόμενο μέσο είναι ο ατμός, ο οποίος είναι η αέρια φάση του νερού. Η παραγωγή του ατμού είναι η διεργασία μετατροπής του νερού από την υγρή στην αέρια φάση με προσθήκη θερμότητας. Διακρίνεται σε κορεσμένο και ακόρεστο, υγρό ή ξηρό. Η κατάσταση του ατμού, το ενεργειακό του επίπεδο, ο ειδικός όγκος και η ικανότητα να παράγει έργο είναι ιδιότητες που εξαρτώνται από την πίεση, τη θερμοκρασία και την ποιότητα του ατμού.

Οι φυσικές ιδιότητες του ατμού έχουν προσδιοριστεί και συμφωνηθεί από διαπιστευμένους διεθνείς οργανισμούς και έχουν καταχωρηθεί σε ειδικούς πίνακες και διαγράμματα. Στην ανά χείρας εργασία χρησιμοποιούνται οι πίνακες και τα διαγράμματα της έκδοσης IAPWS-IF97 του Διεθνούς Οργανισμού για τις Ιδιότητες του Νερού και του Ατμού (International Association for the Properties of Water and Steam - IAPWS), και παρατίθενται ενδεικτικά αποσπάσματα [26].

Για την περίπτωση ατμοηλεκτρικών σταθμών, ειδική περίπτωση των οποίων αποτελεί η παρούσα μελέτη, οι σημαντικότερες ιδιότητες του ατμού είναι η ενθαλπία, η εντροπία και ο ειδικός όγκος.

Στις επόμενες παραγράφους δίνονται ορισμοί χαρακτηριστικών θερμοδυναμικών μεγεθών και ιδιοτήτων του ατμού, χρήσιμων για την περαιτέρω ανάλυση του θερμοδυναμικού κύκλου, [27,28].

8.2. Χρήσιμοι θερμοδυναμικοί ορισμοί

Η **θερμοκρασία** ενός συστήματος (**T**) είναι ένας δείκτης της κινητικής ενέργειας των μορίων των ουσιών του συστήματος. Η θερμοκρασία βρασμού του νερού υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση στο επίπεδο της θάλασσα, είναι στους 100 °C. Σε πιέσεις μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής το **σημείο βρασμού** θα είναι υψηλότερο των 100 °C, ενώ σε πιέσεις μικρότερες της ατμοσφαιρικής το σημείο βρασμού θα είναι χαμηλότερο των 100 °C. Συχνά, σε διεργασίες ατμού χρησιμοποιείται η απόλυτη θερμοκρασιακή κλίμακα Kelvin, σύμφωνα με την οποία το απόλυτο μηδέν, υποδεικνύον την απόλυτη ακινησία των μορίων, αντιστοιχεί στους -273.15 °C, και το σημείο βρασμού υπό ατμοσφαιρική πίεση στους 373.15 °C.

Η **πίεση ατμού (p)** ορίζεται ως η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που ασκείται από τον ατμό στα τοιχώματα του κλειστού ατμο-δοχείου. Η πίεση του ατμού μετράται είτε ως απόλυτη είτε ως οργάνου. Η **απόλυτη πίεση**, η οποία χρησιμοποιείται στους πίνακες ιδιοτήτων του ατμού, είναι η πραγματική εσωτερική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που

ασκείται στα τοιχώματα του ατμοδοχείου, και μετράται σε bar ή MPa. Η **πίεση οργάνου** είναι η διαφορά της απόλυτης πίεσης ατμού και της πίεσης περιβάλλοντος, η οποία συνήθως λαμβάνεται ίση με την ατμοσφαιρική. Η απόλυτη πίεση και η πίεση οργάνου υποδηλώνονται με τους δείκτες a και g στο σύμβολο της πίεσης, αντίστοιχα, δηλαδή (p_a) για την απόλυτη και (p_g) για την πίεση οργάνου.

Η **πίεση κενού** (ή αρνητική πίεση οργάνου) είναι η πίεση υπό την ατμοσφαιρική, και δεν θα πρέπει να συγχέεται με την απόλυτη πίεση, η οποία δείχνει την πίεση πάνω από το απόλυτο μηδέν.

Ο **ειδικός όγκος ατμού (v)** είναι το μέρος του χώρου που καταλαμβάνεται ανά μονάδα μάζας ατμού και εκφράζεται ως m^3/kg .

Η **εσωτερική ενέργεια (u)**, ως θερμοδυναμική ιδιότητα, εμπεριέχει όλες τις μορφές ενέργειας ενός σύστημα, εξαιρουμένης της κινητικής και της δυναμικής του συστήματος ως συνόλου, όπως η ταχύτητα ή η ανύψωση σε βαρυτικό πεδίο του κέντρου μάζας του συστήματος. Σχετίζεται, δηλαδή, με τις ατομικές και μοριακές πηγές ενέργειας του συστήματος.

Η **ενθαλπία ατμού (h ή H)**, είναι μία θερμοδυναμική ιδιότητα του ατμού υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ισούται με το άθροισμα $u+pv$, και εκφράζεται σε kJ/kg (ή Btu/lbm στο αγγλοσαξωνικό σύστημα). Η ενθαλπία αποτελεί μία χρήσιμη παράμετρο για τη μελέτη των ενεργειακών μεταβολών που λαμβάνουν χώρα σε ένα σύστημα, καθώς αυτό υφίσταται θερμικές, μηχανικές ή άλλες ενεργειακές διεργασίες. Η μεταβολή της ενθαλπίας μπορεί να περιλαμβάνει :

- τη **λανθάνουσα θερμότητα**, δηλ. θερμότητα που απορροφάται ή εκλύεται κατά τη διεργασία αλλαγής κατάστασης, και
- την **αισθητή θερμότητα**, δηλ. θερμότητα που απορροφάται ή εκλύεται κατά την αλλαγή στη θερμοκρασία χωρίς μεταβολή στην κατάσταση.

Η **εντροπία ατμού (s)**, είναι μία θερμοδυναμική ιδιότητα του ατμού η οποία παραμένει αμετάβλητη κατά τις αντιστρεπτές αδιαβατικές διεργασίες. Είναι ένα μέτρο του θερμοδυναμικού δυναμικού του συστήματος και εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδες μάζας και απόλυτης θερμοκρασίας, $kJ/(kg K)$. Η εντροπία αποτελεί μία χρήσιμη παράμετρο για τη μελέτη :

- των ενεργειακών μετατροπών, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή έργου
- της ενέργειας που δεν μπορεί να διατεθεί για παραγωγή έργου, όπως είναι οι απώλειες θερμότητας από το σύστημα και οι απώλειες λόγω αναντίστρεπτων εσωτερικών διεργασιών.

8.3. Χρήσιμες θερμοδυναμικές ιδιότητες ατμού

Κατά τη θέρμανση νερού και ατμού υπό σταθερή πίεση σε έναν λέβητα, είναι δυνατό να υπάρχουν μία από τις επόμενες πέντε συνθήκες :

1. μόνο νερό
2. νερό και ατμός
3. μόνο κορεσμένος ατμός
4. υπέρθερμος ατμός
5. υπερκρίσιμος ατμός

Όταν προστίθεται θερμότητα στο νερό ενός λέβητα υπό σταθερή πίεση, τότε η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται. Περαιτέρω προσθήκη θερμότητας προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας έως ότου η πίεση του ατμού που παράγεται γίνει ίση με την πίεση του λέβητα.

Το **σημείο βρασμού** είναι η θερμοκρασία κατά την οποία το νερό αρχίζει να βράζει, και είναι συνάρτηση της πίεσης : το σημείο βρασμού αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης. Μετά το σημείο βρασμού, καθώς περισσότερη θερμότητα προστίθεται υπό σταθερή πίεση, το υγρό νερό αρχίζει να εξατμίζεται. Το ζέον υγρό καλείται **κορεσμένο υγρό** και ο ατμός που παράγεται καλείται **κορεσμένος ατμός**. Η ενθαλπία του κορεσμένου υγρού αντιστοιχεί στην **αισθητή θερμότητα** που απαιτείται για την ανύψωση της θερμοκρασίας 1 kg νερού θερμοκρασίας 0 °C στη θερμοκρασία κορεσμού, στην περίπτωση μας, στο σημείο βρασμού. Η θερμότητα που απαιτείται για την αλλαγή φάσης 1 kg νερού από την υγρή στην αέρια καλείται **λανθάνουσα θερμότητα** ή **θερμότητα ατμοποίησης ατμού**.

Η **θερμοκρασία κορεσμού** είναι η θερμοκρασία κατά την οποία συνυπάρχουν νερό και ατμός σε θερμοδυναμική ισορροπία. Εφόσον υπάρχει νερό σε υγρή φάση, με προσθήκη θερμότητας συνεχίζεται η εξάτμιση του δι-φασικού μίγματος νερού-ατμού υπό σταθερή θερμοκρασία κορεσμού. Ενώ υπό ατμοσφαιρική πίεση η θερμοκρασία κορεσμού είναι 100 °C, στα 20 bar, επί παραδείγματι, η θερμοκρασία κορεσμού είναι 212.385 °C.

Ο **υγρός ατμός** είναι ένα μίγμα νερού και ατμού και πρόκειται για μία κατάσταση μεταξύ των καταστάσεων κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού. Η θερμότητα που προσφέρθηκε δεν ήταν αρκετή για την εξάτμιση ολόκληρης της ποσότητας του νερού. Ενώσω υπάρχει νερό το μίγμα λέγεται υγρό. Μετά την εξάτμιση ολόκληρης της ποσότητας του υγρού νερού, ο ατμός λέγεται **ξηρός κορεσμένος ατμός**. Η ενθαλπία του κορεσμένου ατμού ισούται με το άθροισμα της ενθαλπίας του κορεσμένου υγρού νερού και την θερμότητας ατμοποίησης. Αυτό είναι και το συνολικό ποσό θερμότητας το οποίο πρέπει να δωθεί ώστε να μετατραπεί υγρό νερό θερμοκρασίας 0 °C σε ατμό 100%. Ο ξηρός κορεσμένος ατμός είναι κορεσμένος ως προς τη θερμότητα διότι επιπλέον θερμότητα αυξάνει τη θερμοκρασία πάνω από το σημείο βρασμού, ενώ αφαίρεση θερμότητας έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό υγρασίας.

Η θερμοδυναμική κατάσταση του ατμού στην περιοχή κορεσμού απαιτεί τη γνώση δύο ανεξάρτητων μεταβλητών. Η πίεση και η θερμοκρασία δεν είναι ανεξάρτητες στην περιοχή κορεσμού. Για τον προσδιορισμό, λοιπόν, των συνθηκών κατάστασης του κορεσμένου μίγματος νερού-ατμού απαιτούνται η ποιότητα του ατμού και η πίεση ή η θερμοκρασία.

Η **ποιότητα ατμού (x)**, είναι ένα μέτρο της ποσότητας του ατμού στο διφασικό μίγμα νερού -ατμού, και ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του ατμού προς τη συνολική μάζα του μίγματος :

$$\text{Ποιότητα} \equiv x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{vapor}} + m_{\text{liquid}}}$$

Ιδιότητες όπως η ενθαλπία, η εντροπία και ο ειδικός όγκος για ένα διφασικό μίγμα νερού-ατμού ποιότητας x, ορίζονται όπως στις επόμενες σχέσεις :

$$h_x = h_f + xh_{fg}$$

$$s_x = s_f + xs_{fg}$$

$$v_x = v_f + xv_{fg}$$

όπου :

$$\begin{aligned} f & : && \text{υγρό} \\ g & : && \text{αέριο} \\ fg \text{ ιδιότητα} & : && \text{τιμή } g \text{ μείον τιμή } f \end{aligned}$$

Επιπλέον προσθήκη θερμότητας στον ξηρό κορεσμένο ατμό υπό σταθερή πίεση προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του αέριου νερού. Στην κατάσταση αυτή ο ατμός καλείται **υπέρθερμος** και η ποιότητα του ατμού παραμένει σταθερή στο 100%. Από την άλλη, εάν το υγρό κορεσμένο νερό ψυχθεί κάτω από τη θερμοκρασία κορεσμού, τότε αναφερόμαστε στο **υπόψυκτο ή συμπιεσμένο νερό**.

Συνεπώς, ο **υπέρθερμος ατμός** είναι ατμός θερμανθείς σε κατάσταση όπου η ενθαλπία είναι υψηλότερη σε σχέση με εκείνη στη θερμοκρασία κορεσμού, για την ίδια πίεση. Σε αντίθεση με τον κορεσμένο ατμό, για τον οποίο υπάρχει μόνο μία θερμοκρασία για κάθε πίεση, ο υπέρθερμος ατμός μπορεί να υπάρξει σε οποιαδήποτε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία κορεσμού. Στην κατάσταση υπέρθερμου ατμού η πίεση και η θερμοκρασία είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, και ο προσδιορισμός τους ορίζει μονοσήμαντα τη θερμοδυναμική κατάσταση του ατμού. Για το λόγο αυτό οι ιδιότητες του υπέρθερμου ατμού ταξινομούνται σε πίνακες συναρτήσεων της πίεσης και της θερμοκρασίας.

Ιδιότητες όπως η ενθαλπία, η εντροπία και ο ειδικός όγκος είναι μονοσήμαντες συναρτήσεις της θερμοκρασίας και της πίεσης.

Το **κρίσιμο σημείο** είναι το σημείο όπου το νερό ατμοποιείται άμεσα χωρίς να περάσει τη διεργασία του βρασμού. Αυτό συμβαίνει στα 22.064 MPa και στους 647.096 K (373.946 °C). Καθώς η πίεση και η θερμοκρασία του νερού πλησιάζουν το κρίσιμο σημείο, η τιμή της θερμότητας ατμοποίησης μειώνεται και μηδενίζεται στο κρίσιμο σημείο.

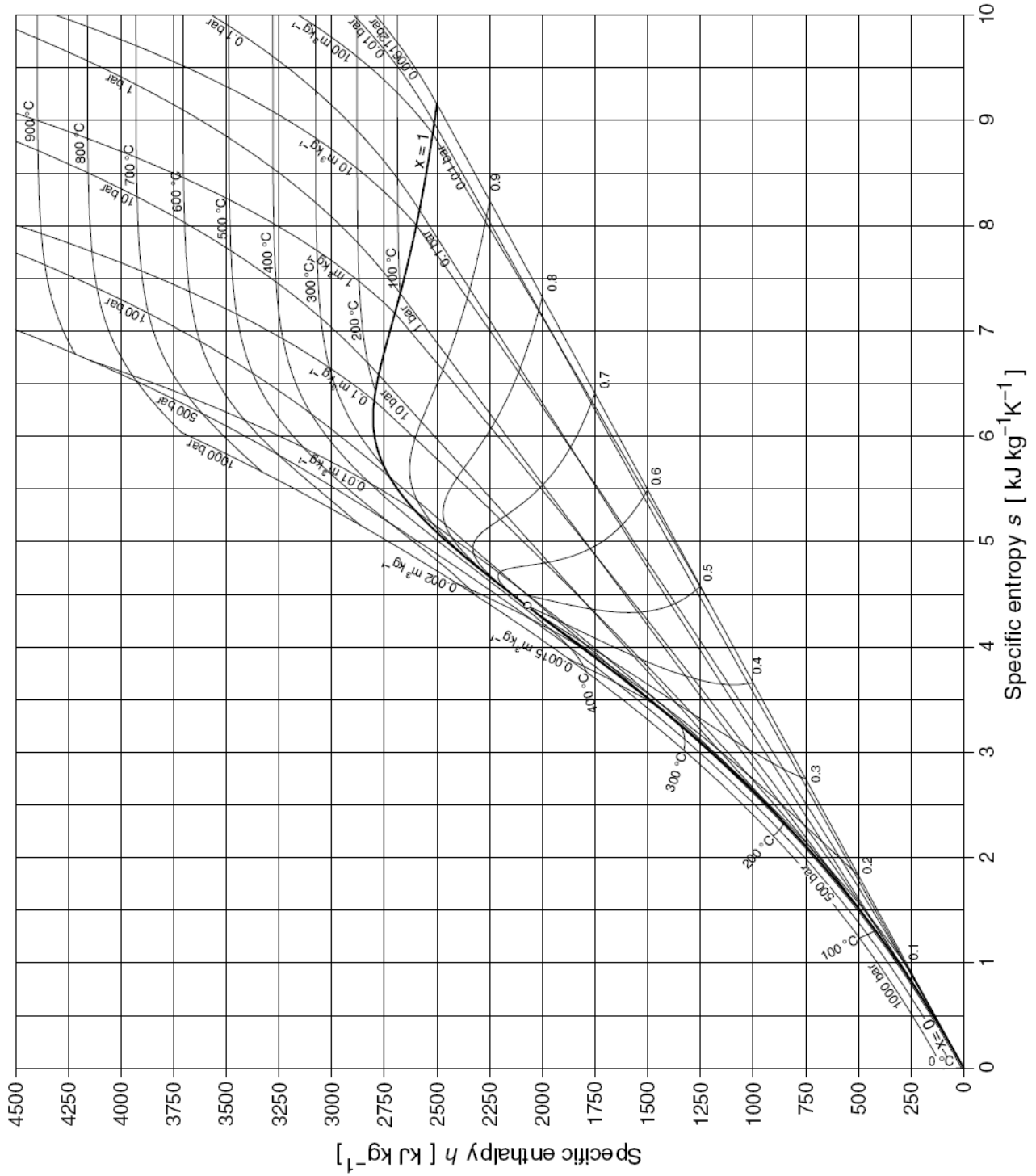
8.4. Πίνακες και διαγράμματα ιδιοτήτων νερού και ατμού

Τα σημαντικότερα διαγράμματα τα οποία χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού, και γενικά για το σχεδιασμό διεργασιών με εργαζόμενο μέσο τον ατμό, παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα, και είναι [26]:

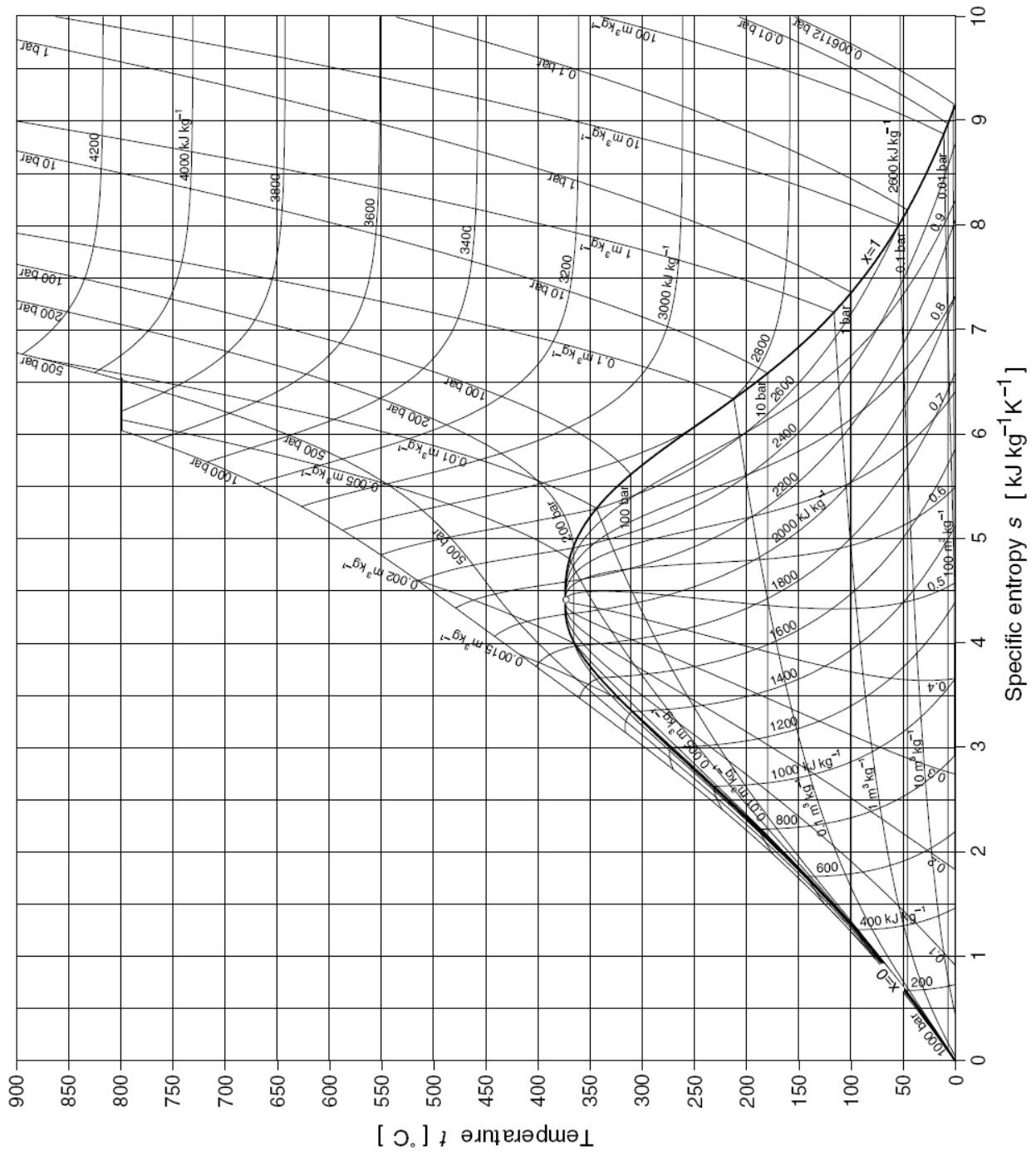
1. διάγραμμα ενθαλπίας-εντροπίας ή **διάγραμμα Mollier $h-s$** , Σχήμα 8-1
2. διάγραμμα θερμοκρασίας-εντροπίας ή **$T-s$** , Σχήμα 8-2
3. διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας ή **$\log(p)-h$** , Σχήμα 8-3

Δίνονται επίσης, ενδεικτικά αποσπάσματα από πίνακες ιδιοτήτων νερού και ατμού :

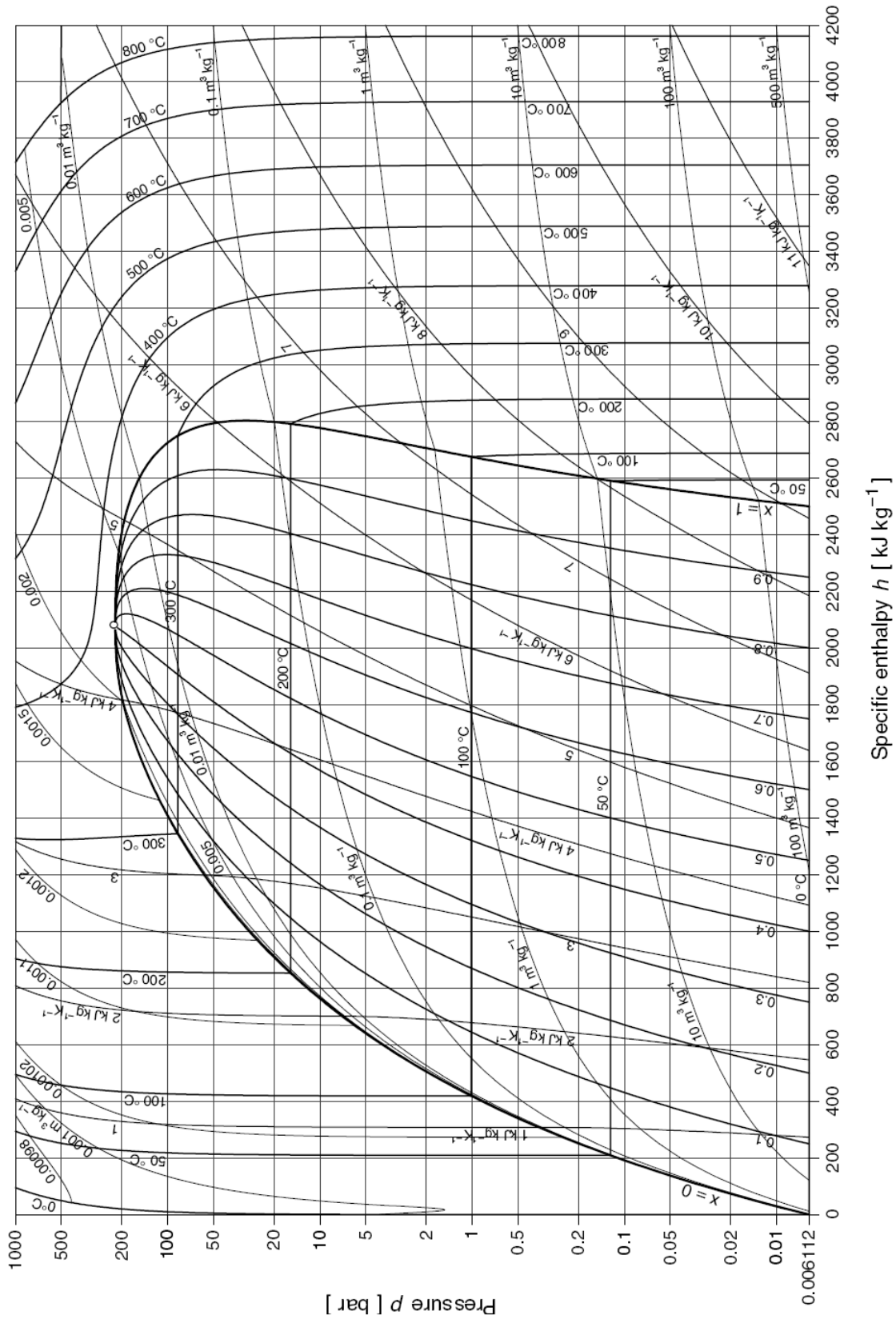
1. Κατάσταση κορεσμού – πίνακας θερμοκρασίας, Σχήμα 8-4
2. Κατάσταση κορεσμού – πίνακας πίεσης, Σχήμα 8-5
3. Περιοχή μιας φάσης (υπέρθερμος ατμός ή υπόψυκτο νερό), Σχήμα 8-6



Σχήμα 8-1 : Διάγραμμα Mollier $h-s$, με καμπύλες σταθερής πίεσης, θερμοκρασίας και ειδικού όγκου, [26].



Σχήμα 8-2 : Διάγραμμα ιδιοτήτων ατμού-νερού T-s, με καμπύλες σταθερής πίεσης, ειδικής ενθαλπίας και ειδικού όγκου, [26].



Σχήμα 8-3 : Λογαριθμικό διάγραμμα p - h , με καμπύλες σταθερής ειδικής εντροπίας, θερμοκρασίας και ειδικού όγκου, [26].

Table 1 Saturation state – Continued
(Temperature table)

t [°C]	T [K]	p_s [bar]	v' [m ³ kg ⁻¹]	v'' [m ³ kg ⁻¹]	h' [kJ kg ⁻¹]	h'' [kJ kg ⁻¹]	Δh_v [kJ kg ⁻¹]	s' [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	s'' [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]
260	533.15	46.9207	0.00127613	0.0421755	1134.83	2796.64	1661.82	2.8847	6.0017
262	535.15	48.4640	0.00128129	0.0407660	1144.78	2795.47	1650.68	2.9030	5.9875
264	537.15	50.0457	0.00128656	0.0394082	1154.79	2794.19	1639.40	2.9213	5.9733
266	539.15	51.6666	0.00129193	0.0380997	1164.84	2792.80	1627.96	2.9396	5.9590
268	541.15	53.3273	0.00129741	0.0368385	1174.94	2791.30	1616.36	2.9579	5.9448
270	543.15	55.0284	0.00130301	0.0356224	1185.09	2789.69	1604.60	2.9762	5.9304
272	545.15	56.7706	0.00130872	0.0344496	1195.30	2787.96	1592.66	2.9945	5.9160
274	547.15	58.5547	0.00131455	0.0333180	1205.55	2786.11	1580.56	3.0129	5.9016
276	549.15	60.3812	0.00132052	0.0322260	1215.87	2784.14	1568.28	3.0312	5.8871
278	551.15	62.2510	0.00132661	0.0311719	1226.24	2782.05	1555.81	3.0496	5.8725

Σχήμα 8-4: Ιδιότητες κορεσμένου νερού και κορεσμένου ατμού, Πίνακας Θερμοκρασίας [IST], [26].

Table 2 Saturation state – Continued
(Pressure table)

p [bar]	t_s [°C]	v' [m ³ kg ⁻¹]	v'' [m ³ kg ⁻¹]	h' [kJ kg ⁻¹]	h'' [kJ kg ⁻¹]	Δh_v [kJ kg ⁻¹]	s' [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	s'' [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	Δs_v [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]
20.0	212.385	0.00117675	0.0995805	908.622	2798.38	1889.76	2.4470	6.3392	3.8921
20.5	213.637	0.00117890	0.0972026	914.355	2798.89	1884.53	2.4587	6.3301	3.8714
21.0	214.865	0.00118103	0.0949339	919.989	2799.36	1879.37	2.4701	6.3212	3.8511
21.5	216.071	0.00118314	0.0927671	925.530	2799.80	1874.27	2.4814	6.3125	3.8311
22.0	217.256	0.00118524	0.0906953	930.981	2800.20	1869.22	2.4924	6.3040	3.8116
22.5	218.420	0.00118731	0.0887123	936.345	2800.58	1864.23	2.5032	6.2956	3.7924
23.0	219.564	0.00118937	0.0868125	941.626	2800.92	1859.30	2.5138	6.2874	3.7736
23.5	220.689	0.00119141	0.0849906	946.827	2801.24	1854.42	2.5242	6.2793	3.7551
24.0	221.795	0.00119343	0.0832421	951.952	2801.54	1849.58	2.5344	6.2714	3.7370
24.5	222.885	0.00119544	0.0815623	957.003	2801.80	1844.80	2.5445	6.2636	3.7191

Σχήμα 8-5: κορεσμένου νερού και κορεσμένου ατμού, Πίνακας Πίεσης [IST], [26].

Table 3 Single-phase region – Continued
(0 °C to 800 °C)

t [°C]	$p = 20 \text{ bar}$								
	v [m ³ kg ⁻¹]	h [kJ kg ⁻¹]	s [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	c_p [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	w [m s ⁻¹]	κ [–]	η [10 ⁻⁶ Pa s]	λ [10 ⁻³ W m ⁻¹ K ⁻¹]	
250	0.111484	2903.23	6.5474	2.5602	536.96	1.2931	17.85	42.22	
260	0.114400	2928.47	6.5952	2.4909	544.07	1.2938	18.30	42.80	
270	0.117251	2953.09	6.6410	2.4349	550.89	1.2941	18.75	43.48	
280	0.120046	2977.21	6.6850	2.3890	557.44	1.2943	19.20	44.25	
290	0.122794	3000.90	6.7274	2.3512	563.78	1.2942	19.65	45.07	
300	0.125501	3024.25	6.7685	2.3201	569.91	1.2940	20.09	45.95	
310	0.128174	3047.32	6.8084	2.2944	575.87	1.2937	20.53	46.87	
320	0.130816	3070.16	6.8472	2.2733	581.67	1.2932	20.97	47.83	
330	0.133431	3092.80	6.8851	2.2559	587.33	1.2926	21.41	48.82	
340	0.136023	3115.28	6.9221	2.2417	592.86	1.2920	21.84	49.83	

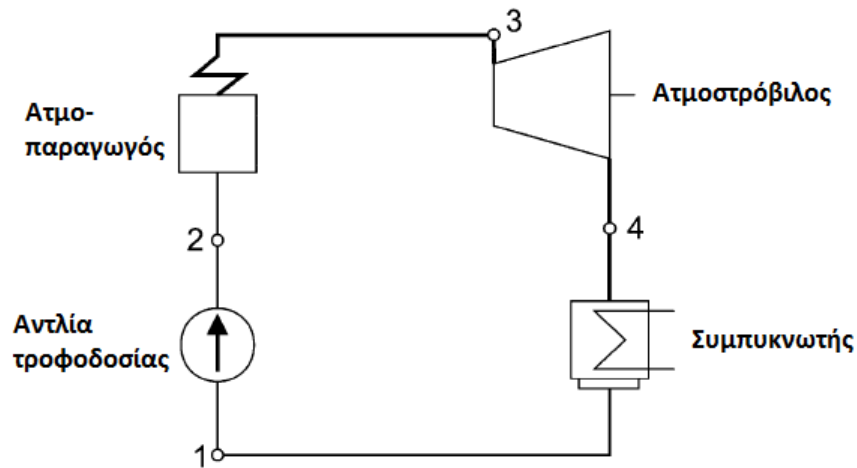
Σχήμα 8-6: Ιδιότητες υπέρθεμου ατμού και υπόψυκτου νερού, [IST], [26].

ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ

9. Ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΑΤΜΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ

9.1. Ο ιδανικός κύκλος Clausius-Rankine

Ο θερμοδυναμικός κύκλος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο κύκλος των *Clausius-Rankine*, με εργαζόμενο μέσο τον ατμό. Η σχηματική διάταξη ενός απλού κύκλου ατμοηλεκτρικού σταθμού φαίνεται στο επόμενο Σχήμα 9-1



Σχήμα 9-1: Σχηματική διάταξη απλουστευμένου ατμοηλεκτρικού σταθμού, [30]

Η αλλαγή φάσης από υγρό σε αέριο πραγματοποιείται στον ατμοπαραγωγό, ενώ η αλλαγή φάσης από αέριο σε υγρό συμβαίνει στον συμπυκνωτή. Η αντλία τροφοδοσίας μεταφέρει το νερό εντός του ατμοπαραγωγού, όπου προθερμαίνεται, ατμοποιείται και υπερθερμαίνεται. Στη συνέχεια, ο ατμός οδηγείται στον ατμοστρόβιλο όπου εκτονώνεται ισεντροπικά παράγοντας μηχανικό έργο. Στον συμπυκνωτή αφαιρείται θερμότητα και ο ατμός υφίσταται συμπίκνωση. Ο συμπυκνωμένος ατμός οδηγείται κατόπιν στην αντλία τροφοδοσίας.

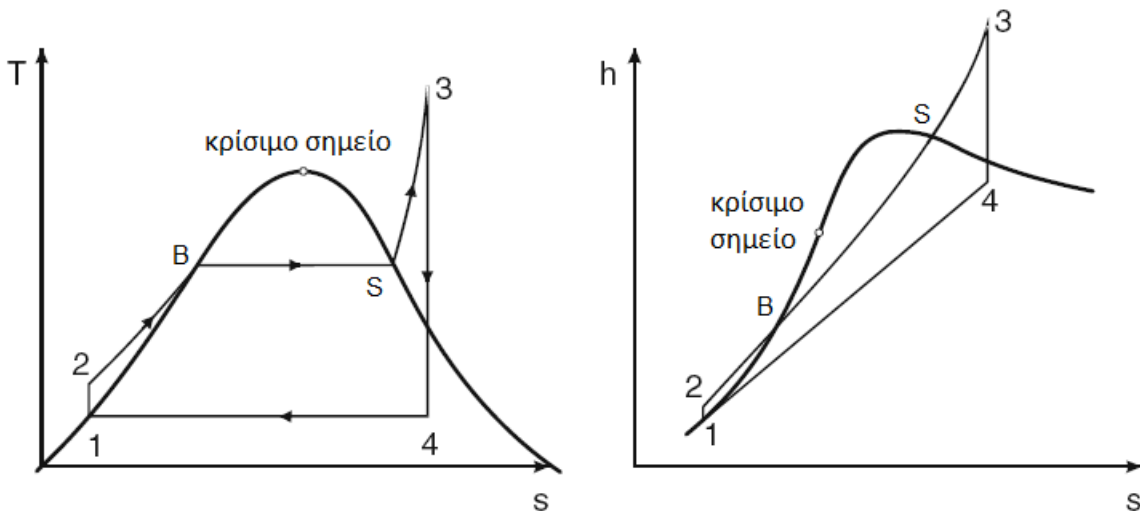
Στο επόμενο Σχήμα 9-2, απεικονίζεται ο αντιστρεπτός κύκλος *Clausius-Rankine*, σε διαγράμματα T-s και h-s. Ο κύκλος αυτός θεωρείται ως πρότυπη θερμοδυναμική διεργασία (θ.δ.) για τις διεργασίες ατμοπαραγωγής. Ο αντιστρεπτός κύκλος *Clausius-Rankine* ακολουθεί τα επόμενα βήματα :

1-2 : ισεντροπική συμπίεση στην αντλία τροφοδοσίας με προσδιδόμενο έργο w_{12}

2-3 : ισοβαρής προσθήκη θερμότητας στον ατμοπαραγωγό $q_{23}=q_{in}$ (προθέρμανση, ατμοποίηση, υπερθέρμανση)

3-4 : ισεντροπική εκτόνωση στον ατμοστρόβιλο με παραγωγή έργου w_{34}

4-1 : ισοβαρής έκλυση θερμότητας στον συμπυκνωτή $q_{41}=q_{out}$



Σχήμα 9-2: Ιδανικός κύκλος Clausius-Rankine σε διαγράμματα T-s (αριστερά) και h-s (δεξιά), [30].

Αξίζει να διευκρινίσουμε τα εξής :

Στη θ.δ. 1-2, το κορεσμένο νερό πίεσης συμπίκνωσης (σημείο 1) συμπιέζεται αδιαβατικά και αντιστρέψιμα μέσω της αντλίας τροφοδοσίας, σε υπόψυκτο νερό πίεσης ατμοπαραγωγού (σημείο 2). Η καμπύλη 1-2 είναι κάθετη στον άξονα της εντροπίας -s και των δύο διαγραμμάτων T-s και h-s, διότι το υγρό νερό είναι ουσιαστικά ασυμπίεστο και η αντλία θεωρείται ότι λειτουργεί αδιαβατικά αντιστρέψιμα.

Στη θ.δ. 2-3, το τμήμα 2-B αντιστοιχεί στη θέρμανση του υπόψυκτου υγρού (σημείο 2) σε κορεσμένο υγρό (σημείο B). Στον ατμοπαραγωγό το τμήμα 2-B αντιστοιχεί στον οικονομητήρα (economizer). Το τμήμα B-S αντιστοιχεί στη θέρμανση του κορεσμένου υγρού και τη μετατροπή του σε κορεσμένο ατμό, υπό σταθερή πίεση και σταθερή θερμοκρασία. Μεταξύ των σημείων B και S το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται σε δι-φασική κατάσταση νερού-ατμού. Στον ατμοπαραγωγό το τμήμα B-S αντιστοιχεί στον ατμοποιητή (evaporator). Το τμήμα S-3 αντιστοιχεί στην υπερθέρμανση του κορεσμένου ατμού από το σημείο S στο σημείο 3. Στον ατμοπαραγωγό το τμήμα S-3 αντιστοιχεί στον υπερθεμαντήρα (superheater).

Στη θ.δ. 3-4, ο ατμός εξόδου (σημείο 4) βρίσκεται συνήθως στη διφασική περιοχή νερού-ατμού, γεγονός που θέτει κάποιους κατασκευαστικούς περιορισμούς στον ατμοστρόβιλο. Περισσότερα θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Στη θ.δ. 4-1, δεδομένου ότι ο ατμός που εξάγεται από τον ατμοστρόβιλο είναι υγρός, η αποβολή θερμότητας στον συμπυκνωτή γίνεται υπό σταθερή πίεση και σταθερή θερμοκρασία.

9.2. Βαθμός απόδοσης ιδανικού κύκλου Clausius-Rankine

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται συνοπτικά η θερμοδυναμική ανάλυση του ανωτέρω κύκλου για μία μονάδα μάζας ατμού.

Πίνακας 10.1. Θερμοδυναμική ανάλυση μίας μονάδας μάζας ατμού	
Προσδιδόμενη θερμότητα	$q_{in} = h_3 - h_2$
Παραγόμενο έργο ατμοστρόβιλου	$w_T = h_3 - h_4$
Απορριφθείσα θερμότητα	$ q_{out} = h_4 - h_1$
Έργο αντλίας τροφοδοσίας	$ w_p = h_2 - h_1$

Στον ατμοστρόβιλο ένα μέρος της θερμικής ενέργειας του ατμού μετατρέπεται σε μηχανικό έργο, ενώ για την ανύψωση της πίεσης του νερού τροφοδοσίας, απαιτείται η προσφορά έργου. Έτσι, το κέρδος σε μηχανικό έργο δίνεται από

$$w_{net} = w_T - w_p = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

Τότε, ο **θερμικός βαθμός απόδοσης** του ιδανικού κύκλου *Clausius-Rankine*, θα είναι

$$\eta_{th} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

9.3. Ο πραγματικός κύκλος Clausius-Rankine

Όπως συμβαίνει σε κάθε τεχνική εφαρμογή, έτσι και σε έναν ατμοηλεκτρικό σταθμό οποιασδήποτε κλίμακας, η ύπαρξη απωλειών καθιστά αδύνατη την αντιστρεπτή λειτουργία του κύκλου Clausius-Rankine. Διακρίνουμε δύο είδη μη-αντιστρέψιμων διεργασιών :

- εσωτερικές μη-αντιστρεψιμότητες, και
- εξωτερικές μη-αντιστρεψιμότητες.

9.3.1. Εσωτερικές μη-αντιστρεψιμότητες

Οι **εσωτερικές μη-αντιστρεψιμότητες** οφείλονται κυρίως στις τριβές των ρευστών, το στραγγαλισμό και την ανάμιξη, και οι σημαντικότερες εμφανίζονται στον ατμοστρόβιλο και τις αντλίες. Σχετίζονται δε, με :

- **απώλειες πίεσης** λόγω τριβής, τυρβώδους ροής και ανάμιξης, στον ατμοστρόβιλο, στους εναλλάκτες θερμότητας, τους αγωγούς, τις βαλβίδες, και σε άλλα εξαρτήματα του κύκλου,
- **απώλειες μετάδοσης θερμότητας** σε διεργασίες με πεπερασμένες θερμοκρασιακές διαφορές, όπως στις επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας.

Στον ατμοστρόβιλο και τις αντλίες η υπόθεση της αδιαβατικής ροής μπορεί ακόμη να θεωρηθεί ότι ισχύει, εφόσον οι απώλειες θερμότητας ανά μονάδα μάζας είναι αμελητέες. Ωστόσο, η διεργασία δεν είναι αντιστρεπτή. Στην αντλία τροφοδοσίας η διεργασία είναι αδιαβατική αλλά μη-αντιστρέψιμη. Η θερμοκρασία και η ενθαλπία κατά την πραγματική διεργασία αυξάνονται περισσότερο από ότι στην ιδανική, και συνεπώς, η αντλία απορροφά περισσότερο έργο, [Power Generation Handbook].

Αποτέλεσμα των εσωτερικών μη-αντιστρεπτών διεργασιών είναι η αύξηση στην εντροπία, όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στο επόμενο Σχήμα 9-3. Συγκεκριμένα, στον ατμοστρόβιλο η αύξηση της εντροπίας εμπεριέχεται στο **βαθμό ισεντροπικής απόδοσης** του ατμοστρόβιλου, [30] :

$$\eta_{i,T} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,id}}$$

όπου $h_{4,id}$ η ενθαλπία του ατμού στο τέλος της αδιαβατικής εκτόνωσης 3-4 της αντιστρεπτής διεργασίας του ιδανικού κύκλου, ενώ h_4 η πραγματική ενθαλπία του ατμού στον πραγματικό κύκλο. Το πραγματικό σημείο εκτόνωσης του ατμού είναι μετατοπισμένο δεξιά σε σχέση με το αντίστοιχο ιδανικό.

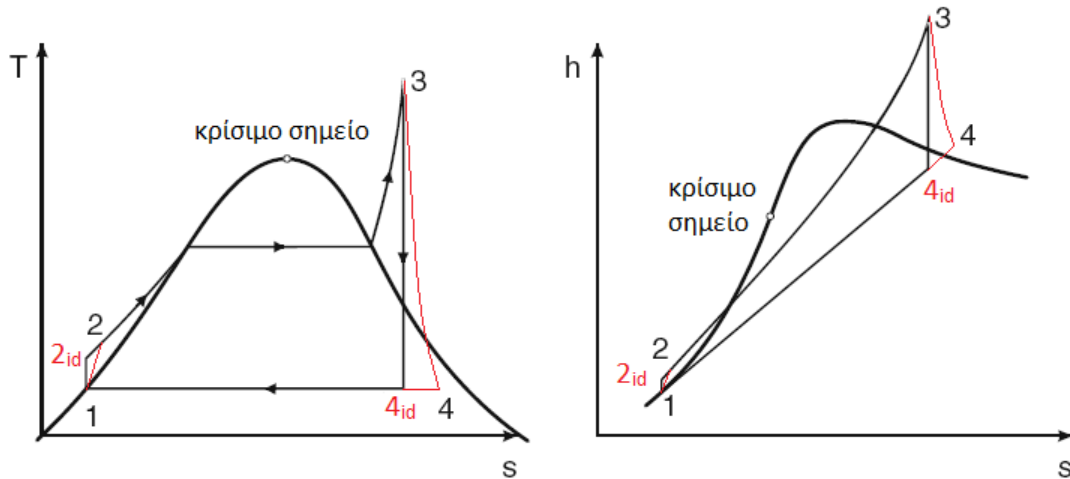
Ο βαθμός ισεντροπικής απόδοσης λέγεται επίσης αδιαβατικός ή πολυτροπικός. Άριστα σχεδιασμένοι ατμοστρόβιλοι χαρακτηρίζονται από υψηλούς πολυτροπικούς βαθμούς απόδοσης και είναι της τάξης του 90%. Η παρουσία υγρασίας στον ατμοστρόβιλο μειώνει τον $\eta_{i,T}$.

Αντίστοιχα, για τον πολυτροπικό βαθμό απόδοσης της αντλίας ισχύει

$$\eta_{i,p} = \frac{h_{2,id} - h_1}{h_2 - h_1}$$

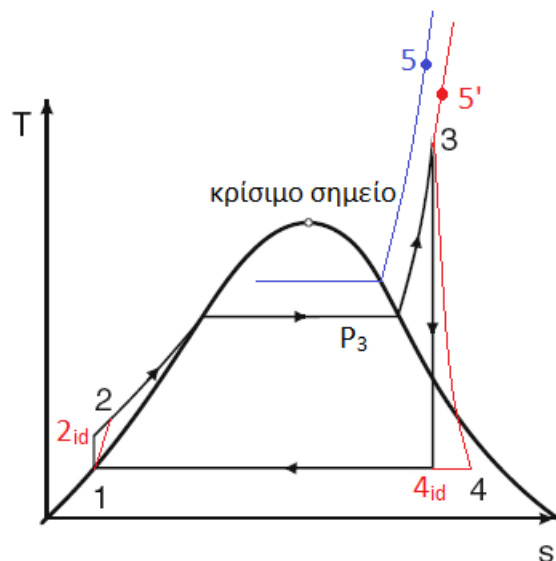
και αντίστοιχα, το πραγματικό έργο της αντλίας

$$|w_p| = \frac{h_{2,id} - h_1}{\eta_{i,p}} \approx \frac{v_1 (p_2 - p_1)}{\eta_{i,p}}$$



Σχήμα 9-3: Πραγματικός κύκλος Clausius-Rankine σε διαγράμματα T-s (αριστερά) και h-s (δεξιά), [30,31].

Η πίεση του νερού κατά την έξοδό του από τη αντλία τροφοδοσίας είναι υψηλότερη από την πίεση με την οποία ο ατμός εισέρχεται στον αμοστρόβιλο, εξαιτίας των τριβών καθ' όλη τη διαδρομή μέσα στο σύστημα. Επίσης, υψηλότερη είναι η πίεση του ατμού που εξέρχεται του αμοπαγωγού (σημείο 5) από εκείνη με την οποία εισέρχεται στον αμοστρόβιλο (σημείο 3). Η πτώση πίεσης μεταξύ των σημείων 5 και 3 είναι το συνδυασμένο αποτέλεσμα τριβής και απωλειών θερμότητας. Το σημείο 5' προκύπτει από τις τριβές στις σωληνώσεις που συνδέουν τον αμοπαγωγό με τον αμοστρόβιλο, συμπεριλαμβάνοντας την βαλβίδα στραγγαλισμού. Οι απώλειες θερμότητας μειώνουν την εντροπία στο σημείο 3, [30]. Τα ανωτέρω απεικονίζονται στο επόμενο Σχήμα 9-4.



Σχήμα 9-4: Διάγραμμα T-s πραγματικού και εσωτερικά μη-αντιστρεπτού κύκλου Clausius-Rankine, [30,31].

9.3.2. Εξωτερικές μη-αντιστρεψιμότητες και αναγέννηση ατμού

Οι εξωτερικές μη-αντιστρεψιμότητες οφείλονται στις θερμοκρασιακές διαφορές :

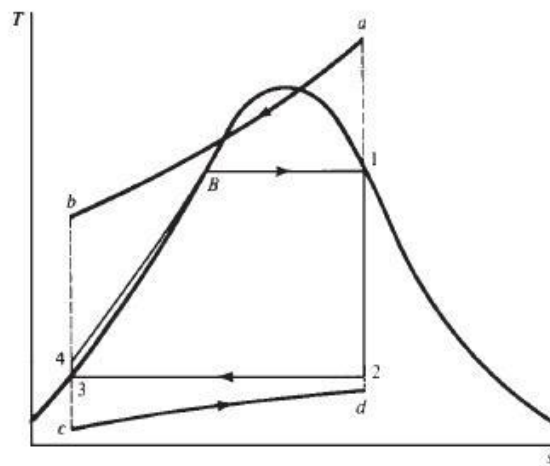
- μεταξύ της κύριας πηγής θερμότητας, τα καυσαέρια στην περίπτωση μας, και του εργαζόμενου μέσου, και
- μεταξύ του συμπυκνώματος και του μέσου απορρόφησης της θερμότητας συμπύκνωσης.

Στο επόμενο Σχήμα 9-5, η γραμμή $a-b$, αντιστοιχεί καυσαέρια που εισέρχονται σε έναν αντίρροπης ροής ατμοπαραγωγό, ενώ η γραμμή $c-d$, εκφράζει το μέσο απορρόφησης της θερμότητας συμπύκνωσης σε έναν αντίρροπης ροής εναλλάκτη. Όταν η γραμμή $a-b$, είναι πλησίον της γραμμής $4-B-1$, η θερμοκρασία των καυσαερίων είναι περίπου ίση με εκείνη του εργαζόμενου μέσου. Έτσι, οι μη-αντιστρεψιμότητες λόγω απωλειών θερμότητας από τα καυσαέρια είναι μικρές, αλλά για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται μεγάλος και ακριβός ατμοπαραγωγός.

Το αντίθετο συμβαίνει όταν η γραμμή $a-b$, είναι αρκετά υψηλότερα της γραμμής $4-B-1$. Όταν δηλαδή, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ καυσαερίων και εργαζόμενου μέσου είναι σημαντική, οπότε, σημαντικές είναι και οι μη-αντιστρεψιμότητες και κατά συνέπεια μειωμένη η απόδοση του κύκλου. Στην περίπτωση αυτή ο ατμοπαραγωγός είναι μικρότερου μεγέθους και οικονομικότερος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι σημαντικότερες εξωτερικές μη-αντιστρεψιμότητες συμβαίνουν κυρίως στον οικονομητήρα του ατμοπαραγωγού, όπου μεταξύ των δύο γραμμών $a-b$ και $4-B$ εμφανίζεται η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή απόκλιση, [31].

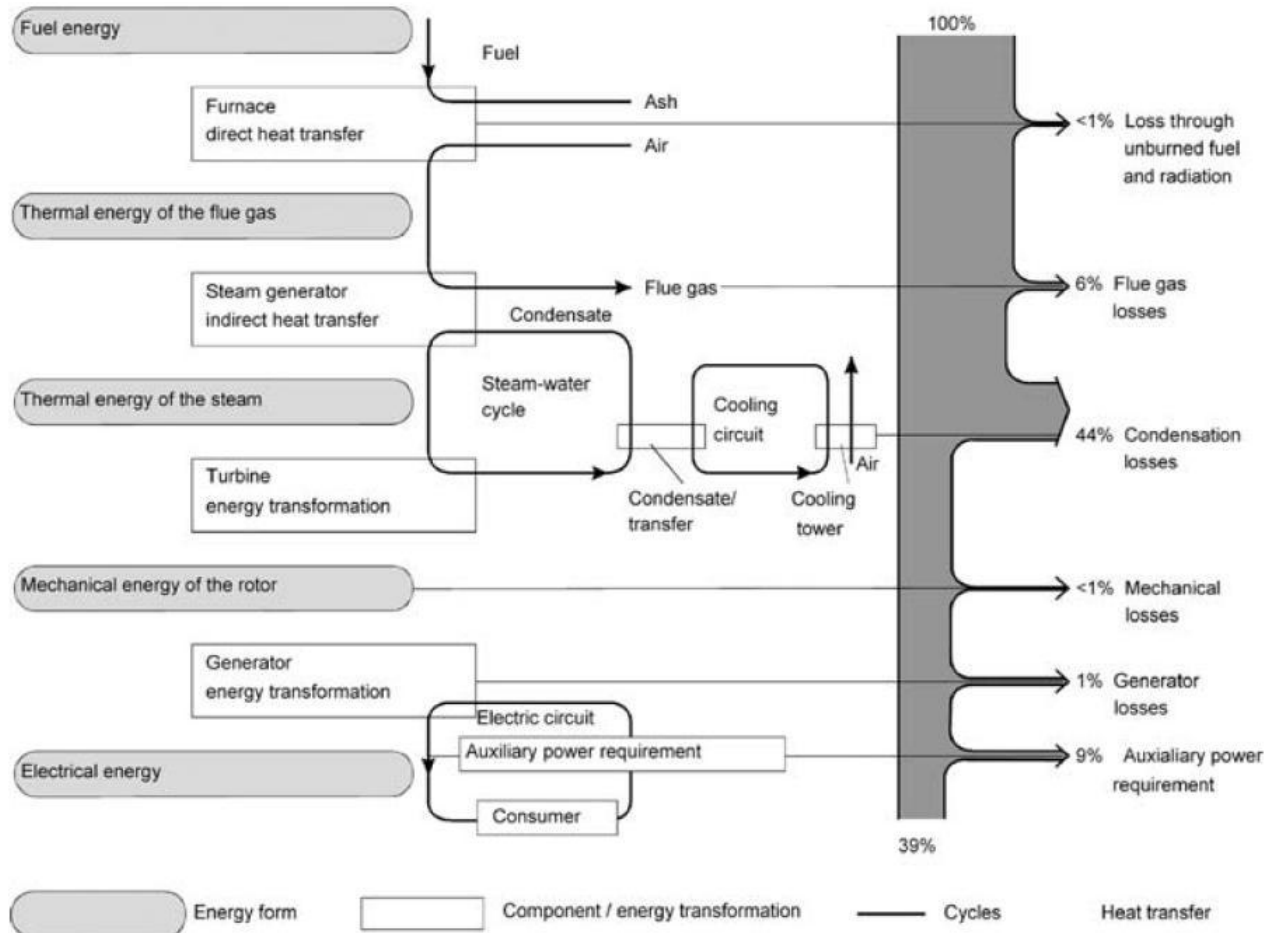
Σε επόμενη παράγραφο θα δούμε ότι ένας τρόπος ελαχιστοποίησης αυτών των μη-αντιστρεψιμοτήτων είναι η προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας στη θερμοκρασία του σημείου B . Η διεργασία αυτή λέγεται **αναγεννητική προθέρμανση**.



Σχήμα 9-5: Εξωτερικές μη-αντιστρεψιμότητες στον κύκλο Clausius-Rankine, [31].

9.4. Τεχνικές βελτίωσης βαθμού απόδοσης

Η θερμική ενέργεια του ατμού μετατρέπεται μέσω του ατμοστρόβιλου σε μηχανική, και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω της ηλεκτρογεννήτριας. Οι ενεργειακές αυτές μετατροπές δε γίνονται χωρίς απώλειες. Έτσι, ένα μεγάλο ποσοστό, έως και 50%, της εισερχόμενης από το καύσιμο ενέργειας χάνεται κατά τη θερμοδυναμική διεργασία της εκτόνωσης που λαμβάνει χώρα στον ατμοστρόβιλο. Οι απώλειες αυτές ερμηνεύονται στον θερμοδυναμικό κύκλο του ατμού μέσω της αποβολής θερμότητας από τον συμπυκνωτή. Σημαντικές είναι επίσης οι απώλειες κατά τη λειτουργία του ατμοπαραγωγού, οι οποίες εμφανίζονται κυρίως ως απώλειες καυσαερίων, και κυμαίνονται γύρω στο 6%. Τέλος, δεν θα πρέπει να μας διαφεύγουν οι απαιτήσεις ισχύος για τη λειτουργία των κύριων και βοηθητικών συστημάτων της εγκατάστασης, και οι οποίες αθροιζόμενες αντιστοιχούν στο 9% της εισερχόμενης ενέργειας, [30]. Στο επόμενο Σχήμα 9-6, αντιστοιχίζονται οι διάφορες διεργασίες του θερμοδυναμικού κύκλου με τις απώλειες που τους αναλογούν [30].



Σχήμα 9-6: Ενεργειακές μετατροπές, κυκλοφορία εργαζόμενου μέσου και αποδόσεις διεργασιών, [30].

Ο βαθμός απόδοσης ενός θερμοηλεκτρικού σταθμού μπορεί να βελτιωθεί με την εφαρμογή μίας σειράς τεχνολογικών παρεμβάσεων, οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε τρεις κύριες ομάδες [30] :

- Αύξηση της θερμικής απόδοσης του κύκλου
- Μέτρα για την ελαχιστοποίηση των απωλειών
- Μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης ισχύος των κύριων και βοηθητικών συστημάτων

Οι επεμβάσεις αυτές αποτελούν το καταστάλαγμα της τεχνογνωσίας που αποκτήθηκε κατά τη μακροχρόνια πορεία ανάπτυξης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από στερεά καύσιμα, και με άρτια οργανωμένο τρόπο είναι συγκεντρωμένες στη μονογραφία [30]. Χρήσιμες, λοιπόν, θα φανούν και στην ανά χείρας μελέτη για τη βελτιστοποίηση της σχεδιαζόμενης μονάδας ανάκτησης θερμότητας από την αποτέφρωση Ε.Ι.Α.

9.4.1. Αύξηση θερμικής απόδοσης κύκλου

Τα μέτρα που λαμβάνονται για τη βελτίωση του θερμικού κύκλου εστιάζουν στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της προσφερόμενης θερμότητας και στη μείωση της μέσης θερμοκρασίας της θερμότητας αποβολής. Υψηλές μέσες θερμοκρασίες προσφερόμενης θερμότητας επιτυγχάνονται μέσω :

- ανύψωσης των παραμέτρων του ενεργού ατμού –live steam- δηλ. της πίεσης και της θερμοκρασίας,
- απλής ή διπλής αναθέρμανσης,
- αναθέρμανσης του νερού τροφοδοσίας,
- μείωσης της μέσης θερμοκρασίας της θερμότητας αποβολής, και
- χαμηλής θερμοκρασίας ατμού στο συμπυκνωτή.

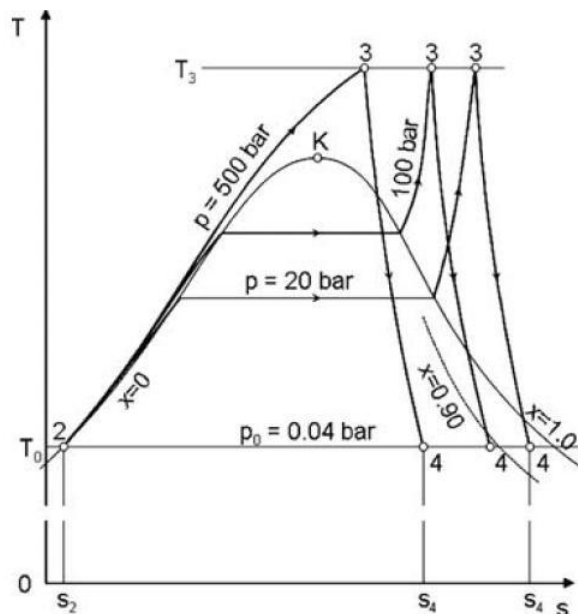
9.4.1.1. Παράμετροι ενεργού ατμού (live steam conditions)

Όσο υψηλότερη είναι η μέση θερμοκρασία της προσδιδόμενης θερμότητας τόσο μεγαλύτερος είναι ο θερμικός βαθμός απόδοσης. Υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επιτευχθούν μέσω :

- υψηλής πίεσης σε αμοπαραγωγούς υψηλής πίεσης,
- υψηλής θερμοκρασίας ενεργού ατμού,
- αναθέρμανσης νερού τροφοδοσίας, και
- αναθέρμανσης σε υψηλές θερμοκρασίες.

Ενεργός ατμός υψηλής πίεσης αντιστοιχεί σε υψηλές θερμοκρασίες βρασμού, άρα και σε μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας, και με αμετάβλητη τη θερμοκρασία εξόδου έχουμε αύξηση της θερμικής απόδοσης. Αντίθετα, με ενεργό ατμό χαμηλότερης πίεσης, και συνεπώς χαμηλότερου σημείου βρασμού, παρατηρείται μείωση της μέσης θερμοκρασίας προσδιδόμενης θερμότητας, και κατά συνέπεια μείωση της απόδοσης. Ωστόσο, υψηλές πιέσεις ατμοπαραγωγών απαιτούν περισσότερη ισχύ για τη λειτουργία της αντλίας τροφοδοσίας, και θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω η αντιστάθμιση που προκύπτει τόσο οικονομικά όσο και θερμοδυναμικά. Επιπλέον, η αντοχή των διαθέσιμων υλικών για την κατασκευή ατμοπαραγωγών αποτελεί το βασικότερο περιοριστικό παράγοντα για την επίτευξη ατμού υψηλής πίεσης και υψηλής θερμοκρασίας.

Οι υψηλές πιέσεις του ενεργού ατμού επηρεάζουν και τις παραμέτρους του **ατμού εκτόνωσης**, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα στο επόμενο Σχήμα 9-7. Για το ίδιο επίπεδο θερμοκρασίας ενεργού ατμού η εντροπία μειώνεται σημαντικά όσο αυξάνεται η πίεση. Αντίστοιχα, ο ατμός εκτόνωσης μετατοπίζεται αριστερά σε περιοχές μειωμένης ποιότητας ατμού, δηλ. με μεγάλη συγκέντρωση υγρασίας. Για τεχνικούς λόγους, όμως, **η υγρασία εκτόνωσης** ($1-x_4$), δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 0.1, διότι ο σχηματισμός σταγονιδίων στις τελευταίες βαθμίδες του ατμοστρόβιλου μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση των πτερυγίων. Η συγκεκριμένη τιμή για την υγρασία εκτόνωσης περιορίζει τις παραμέτρους σχεδιασμού του ενεργού ατμού, και καθιστά απαραίτητη την αναθέρμανση, με την οποία ο ατμός εκτόνωσης εμπεριέχει μεγαλύτερη εντροπία, είναι καλύτερης ποιότητας και μειώνει τον προαναφερθέντα κίνδυνο διάβρωσης.

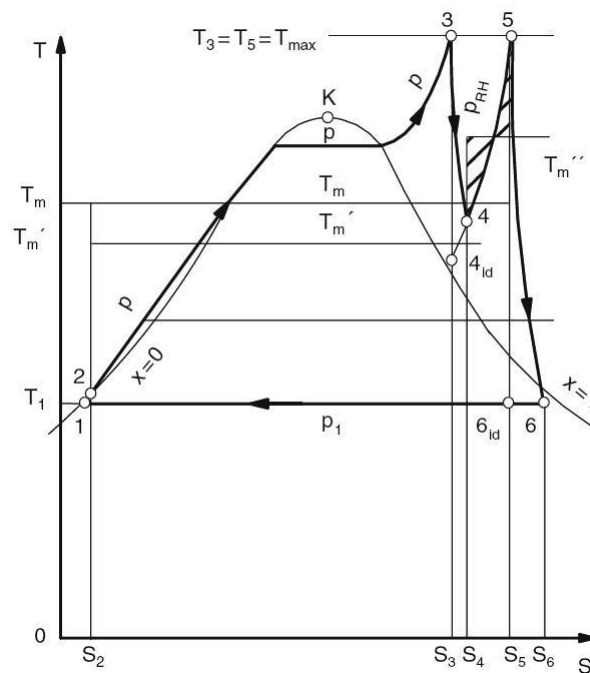


Σχήμα 9-7: Επίδραση της πίεσης στις παραμέτρους του ατμού εκτόνωσης, [30].

9.4.1.2. Αναθέρμανση

Η αναθέρμανση ανυψώνει τη μέση θερμοκρασία της προσδιδόμενης θερμότητας T_m , εφόσον η μέση θερμοκρασία αναθέρμανσης T_m'' είναι υψηλότερη από εκείνη του απλού κύκλου T_m' , Σχήμα 9-8.

Στον κύκλο που απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 9-8, ο ατμός υπερθερμαίνεται μέχρι το σημείο 3 και εκτονώνεται στον ατμοστρόβιλο υψηλής πίεσης μέχρι το σημείο 4. Στη συνέχεια, ο ατμός επιστρέφει στον ατμοπαραγωγό, όπου αναθερμαίνεται ισοβαρώς σε θερμοκρασία $T_5 \approx T_3$. Τέλος, ο αναθερμανθείς ατμός εισέρχεται στον ατμοστρόβιλο χαμηλής πίεσης, όπου και εκτονώνεται στην πίεση συμπύκνωσης. Η ροή αυτής της διαδικασίας παραστατικά απεικονίζεται στο επόμενο Σχήμα 9-9.



Σχήμα 9-8: Κύκλος με αναθέρμανση, [30].

Στον κύκλο αναθέρμανσης έχουμε δύο φορές προσθήκη θερμότητας, μία κατά τη διεργασία 2-3 και άλλη μία κατά τη διεργασία 4-5. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η μέση θερμοκρασία της προσδιδόμενης θερμότητας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, και παράγεται ξηρότερος ατμός κατά την εκτόνωση (το σημείο 6 είναι δεξιότερα στο διάγραμμα).

Σε αρκετούς σταθμούς η διεργασία της αναθέρμανσης επιτελείται σε ξεχωριστό εναλλάκτη αναθέρμανσης και όχι σε εσωτερικό τμήμα του ατμοπαραγωγού. Στην περίπτωση αυτή, ένα μέρος του ατμού κατάστασης 1 χρησιμοποιείται για την αναθέρμανση του ατμού κατάστασης 4. Το συμπύκνωμα επιστρέφεται στις αντλίες τροφοδοσίας, [31].

Ο βαθμός θερμικής απόδοσης του κύκλου αναθέρμανσης υπολογίζεται ως εξής :

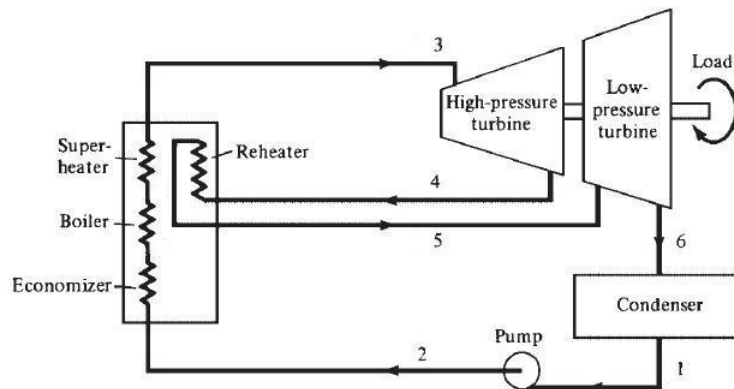
$$\eta_{th} = \frac{\Delta W_{net}}{q_A}$$

$$\Delta W_{net} = W_T - |W_p|$$

$$W_T = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$$

$$|W_p| = h_2 - h_1$$

$$q_A = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)$$



Σχήμα 9-9: Κύκλος Clausius-Rankine με υπερθέρμανση και αναθέρμανση, [31].

Ο βαθμός θερμικής απόδοσης επηρεάζεται και από την πίεση αναθέρμανσης P_4 , η βέλτιστη τιμή της οποίας εξαρτάται από την πίεση του ενεργού ατμού P_3 . Βέλτιστες τιμές για τον θερμικό βαθμό απόδοσης επιτυγχάνονται όταν ο λόγος των πιέσεων P_3/P_4 , είναι μεταξύ 5 και 6. Όταν η θερμοκρασία αναθέρμανσης T_4 , βρίσκεται στο επίπεδο της μέσης θερμοκρασίας προσδιδόμενης θερμότητας T_m στον υψηλής πίεσης ατμοστρόβιλο, τότε έχουμε μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης. Στην περίπτωση αυτή αυξάνεται η μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας. Αντιθέτως, όταν η T_4 , είναι χαμηλότερη, μέρος της προσδιδόμενης θερμότητας κατά την αναθέρμανση καταλήγει σε χαμηλότερη απόδοση. Επιπλέον, χαμηλές πιέσεις αναθέρμανσης P_4 , έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας θερμότητας αποβολής, λόγω παρουσίας υπέρθερμου ατμού στην έξοδο του ατμοστρόβιλου, [30].

Εάν η πίεση αναθέρμανσης είναι συγκρίσιμη με την αρχική πίεση P_3 , η αύξηση στην απόδοση είναι ελάχιστη, καθότι σε υψηλές θερμοκρασίες πολύ μικρό ποσοστό θερμότητας μπορεί να απορροφηθεί από τον ατμό. Από την άλλη, μεγάλη πτώση της P_4 , οδηγεί σε μείωση της απόδοσης, καθώς μειώνεται σημαντικά η μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας, [31].

Στα πλεονεκτήματα του κύκλου αναθέρμανσης συγκαταλέγονται [22]:

- η αύξηση της ποιότητας του ατμού εξόδου,

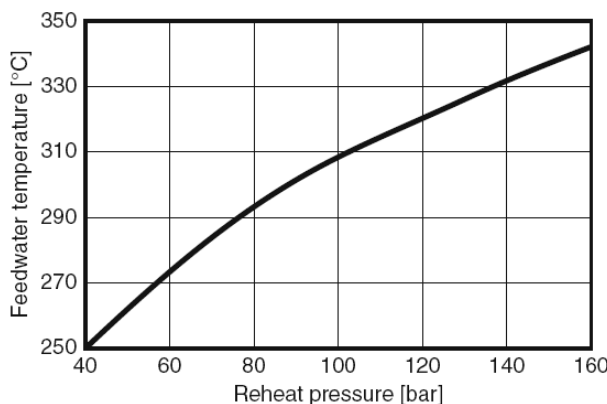
- η μείωση του κινδύνου διάβρωσης των πτερυγίων του ατμοστρόβιλου,
- η αύξηση του ειδικού έργου ή ειδικής κατανάλωσης ατμού, με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερη παροχή ατμού για την ίδια ισχύ, και συνεπώς ατμοπαραγωγός, σωληνώσεις και βοηθητικά συστήματα μικρότερου μεγέθους.

Το κύριο μειονέκτημα εντοπίζεται στην αύξηση της πολυπλοκότητας της εγκατάστασης, με συνακόλουθη επίπτωση στο κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Το προηγούμενο πλεονέκτημα έχει επίδραση και στο μέγεθος του ατμοπαραγωγού, των σωληνώσεων και των βοηθητικών συστημάτων, τα οποία μειώνονται

9.4.1.3. Προθέρμανση νερού τροφοδοσίας

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, ένας τρόπος για τη μείωση της επίδρασης των εξωτερικών μη-αντιστρεψιμοτήτων στη βελτίωση του βαθμού απόδοσης του θερμικού κύκλου είναι η προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας με αναγέννηση ατμού, ή απλά, **αναγεννητική προθέρμανση**, [22]. Αυτό επιτυγχάνεται με απομάστευση ατμού από διάφορες βαθμίδες του ατμοστρόβιλου για τη θέρμανση του νερού τροφοδοσίας, καθώς αυτό μεταφέρεται μέσω των αντλιών τροφοδοσίας από το συμπυκνωτή προς τον οικονομητήρα του ατμοπαραγωγού, [28]. Η διαδικασία προθέρμανσης μπορεί να επιτελεστεί σε αρκετά στάδια, και στους σύγχρονους σταθμούς συναντάμε μέχρι και εννέα στάδια, ενώ η τελική θερμοκρασία του προθερμαμένου νερού κυμαίνεται μεταξύ 250-300 °C, [30].

Η προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας αυξάνει τη μέση θερμοκρασία της προσδιδόμενης θερμότητας, όταν διατηρούνται σταθερές η πίεση και η θερμοκρασία του ενεργού ατμού. Επιπλέον, η πίεση αναθέρμανσης είναι καθοριστική για την τελική θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας. Η σχέση τους έχει προκύψει ύστερα από βελτιστοποίηση ολόκληρου του κύκλου και απεικονίζεται στο επόμενο Σχήμα 9-10.



Σχήμα 9-10: Επίδραση της πίεσης αναθέρμανσης στην θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας, [30].

Η ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας περιορίζεται από παράγοντες που σχετίζονται με το σχεδιασμό του ατμοπαραγωγού. Για την αποτροπή ανωμαλιών στη

ροή του εργαζόμενου μέσου και τη διασφάλιση σταθερής φόρτισης των αυλών ατμοποίησης, θα πρέπει να αποφεύγεται το σημείο βρασμού στον οικονομητήρα. Έτσι, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας τόσο μικρότερος θα πρέπει να σχεδιάζεται ο οικονομητήρας. Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού που εισέρχεται στον ατμοπαραγωγό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μεταφερόμενης θερμότητας στον οικονομητήρα, η οποία μπορεί τότε να χρησιμοποιηθεί μόνο για τη προθέρμανση του αέρα καύσης, [30].

Διακρίνουμε τρεις τύπους προθερμαντήρων νερού τροφοδοσίας [31]:

- ανοικτού τύπου ή άμεσης επαφής, (*open or direct-contact*)
- κλειστού τύπου με προς τα πίσω διακίνηση των συμπυκνωμάτων, (*closed type with drains cascaded backward*) και
- κλειστού τύπου με προς τα εμπρός διακίνηση των συμπυκνωμάτων (*closed type with drains cascaded forward*).

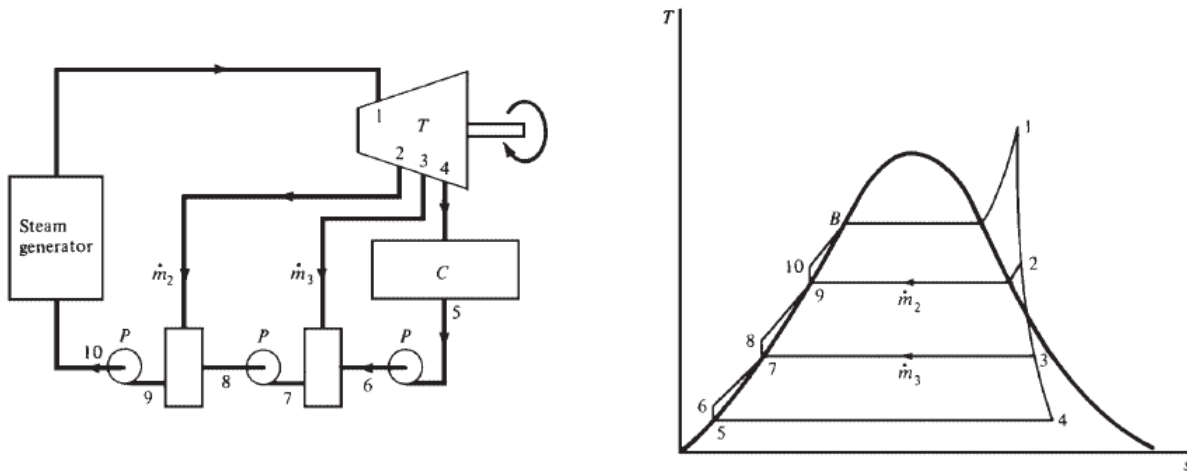
Προθερμαντήρες ανοικτού τύπου.

Στην πρώτη περίπτωση, ο ατμός αναμιγνύεται απευθείας με το εισερχόμενο υπόψυκτο νερό τροφοδοσίας. Το μίγμα μετατρέπεται σε κορεσμένο νερό με πίεση αυτή του **ατμού απομάστευσης**. Για την επίτευξη αυτού του επιπέδου πίεσης απαιτείται η χρήση αντλίας σε κάθε προθερμαντήρα, καθιστώντας, έτσι, την γενική διάταξη πολύπλοκη και ακριβή, παρόλο που ως κατασκευή είναι απλή με πολύ καλή απόδοση προθέρμανσης, [30]. Για το λόγο αυτό οι ανοικτού τύπου προθερμαντήρες χρησιμοποιούνται μόνο ως **απαερωτήρες**, στους οποίους το νερό διασπάται σε σταγονίδια κατά την ανάμιξή του με τον ατμό, απελευθερώνοντας διαλελυμένα αέρια. Ο καθαρισμός του νερού από αέρια όπως το οξυγόνο, το άζωτο, το υδρογόνο, το διοξείδιο του άνθρακα, κ.α. μειώνει τον κίνδυνο διάβρωσης του ατμοπαραγωγού, [22,31].

Το Σχήμα 9-11, απεικονίζει τα διαγράμματα ροής και T-s για έναν κύκλο με δύο θερμαντήρες νερού τροφοδοσίας, έναν υπό χαμηλή πίεση και έναν υπό υψηλή πίεση.

Το κορεσμένο νερό -συμπύκνωμα- μετά το σημείο 5 στον συμπυκνωτή C, μέσω αντλίας συμπιέζεται στο σημείο 6 σε πίεση ίση με την πίεση του ατμού απομάστευσης στο σημείο 3. Στον χαμηλής πίεσης προθερμαντήρα γίνεται ανάμιξη του υπόψυκτου νερού (σημείο 6) με τον υγρό ατμό (σημείο 3) και παράγεται κορεσμένο νερό (σημείο 7). Η ροή υγρού ατμού \dot{m}_3 πρέπει να είναι τέτοια ώστε το υπόψυκτο νερό του σημείου 6 να μετατραπεί σε κορεσμένο μετά την έξοδό του από τον προθερμαντήρα. Εάν η ροή \dot{m}_3 είναι μεγαλύτερη, τότε το μίγμα στο σημείο 7 είναι διφασικό και δυσχεραίνεται η άντλησή του. Αν από την άλλη, η ροή \dot{m}_3 είναι μεγαλύτερη της κανονικής, τότε η θερμοκρασία του σημείου 6 θα ήταν μικρότερη από την επιθυμητή. Η πίεση της ισοβαρούς γραμμής 6-7 δεν

μπορεί να είναι υψηλότερη από την πίεση εξαγωγής ατμού στο σημείο 3, διαφορετικά, συμπύκνωμα θα εισέρεε στον ατμοστρόβιλο διαμέσου του σημείου 3.



Σχήμα 9-11: Διαγράμματα ροής (αριστερά) και T-s (δεξιά) κύκλου με δύο προθερμαντήρες, [22,31].

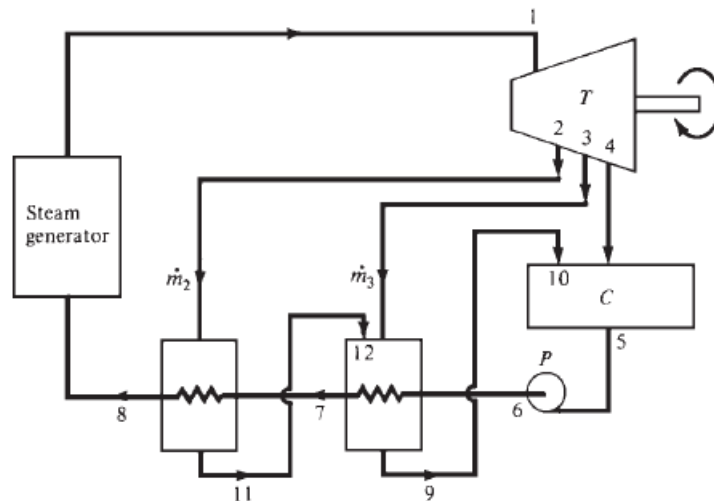
Η δεύτερη αντλία είναι απαραίτητη για τη συμπίεση του κορεσμένου νερού από το σημείο 7 στο σημείο 8, όπου γίνεται υπόψυκτο. Η πίεση τότε, αντιστοιχεί στον ατμό απομάστευσης του σημείου 2. Στο σημείο 10 εισέρχεται το νερό τροφοδοσίας στον ατμοπαραγωγό και στην πίεση λειτουργίας του.

Προθερμαντήρες κλειστού τύπου.

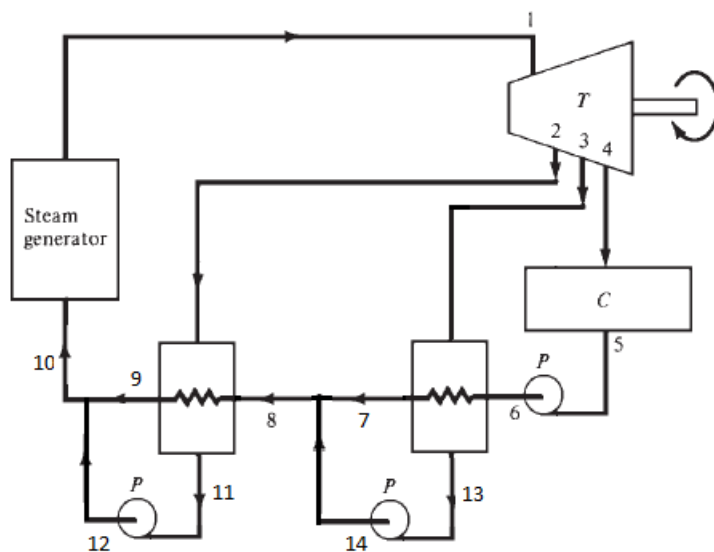
Οι προθερμαντήρες κλειστού τύπου με προς τα πίσω διακίνηση των συμπυκνωμάτων είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενοι στους σύγχρονους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς. Προσομοιάζουν στη λειτουργία τους συμπυκνωτές, με τη διαφορά ότι λειτουργούν σε υψηλότερες πιέσεις. Κατασκευαστικά πρόκειται για εναλλάκτες θερμότητας τύπου shell-and-tube, στους οποίους ο απομαστευόμενος ατμός ρέει σε χωριστούς σωλήνες από το συμπύκνωμα, [30,31].

Το επόμενο Σχήμα 9-12, απεικονίζει τα διαγράμματα ροής και T-s για έναν κύκλο με δύο προθερμαντήρες νερού τροφοδοσίας κλειστού τύπου. Στη συγκεκριμένη διάταξη είναι απαραίτητη μόνο μία αντλία. Ο ατμός απομάστευσης συμπυκνώνεται σε κάθε έναν από τους προθερμαντήρες, και το συμπύκνωμα τροφοδοτεί αντίρροπα τον επόμενο προθερμαντήρα χαμηλής πίεσης. Ρέει δηλαδή, από τους υψηλής πίεσης προς τους χαμηλής πίεσης προθερμαντήρες, [31]. Σε κάθε προθερμαντήρα έχουμε ψύξη και συμπύκνωση του ατμού απομάστευσης και μπορεί να επιτελεστεί ένας συνδυασμός διεργασιών [22]:

- ψύξη υπέρθερμου ατμού,
- συμπύκνωση κορεσμένου ατμού, και
- ψύξη συμπυκνώματος.



Σχήμα 9-12: Διάγραμμα ροής κύκλου με κλειστού τύπου προθερμαντήρες με προς τα πίσω διακίνηση των συμπυκνωμάτων, [31].



Σχήμα 9-13: Διάγραμμα ροής κύκλου με κλειστού τύπου προθερμαντήρες με προς τα εμπρός διακίνηση των συμπυκνωμάτων, [22].

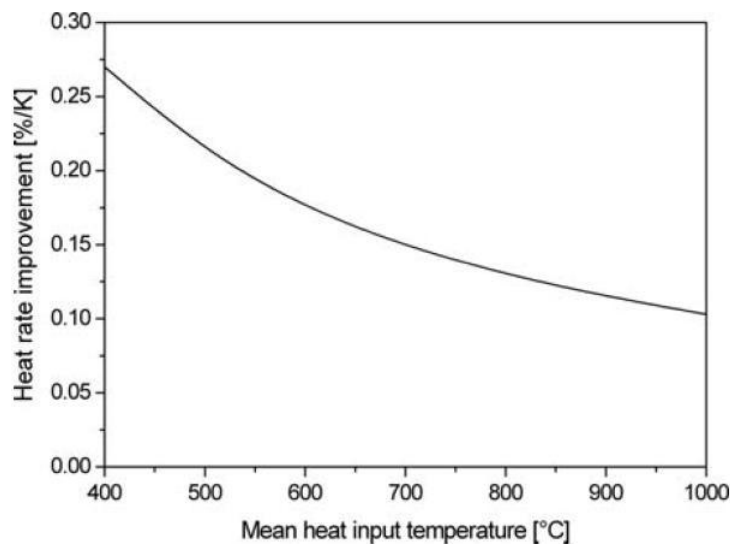
Στους προθερμαντήρες κλειστού τύπου με προς τα εμπρός διακίνηση των συμπυκνωμάτων, Σχήμα 9-13, το νερό από το συμπύκνωμα του ατμού απομάστευσης αναμιγνύεται, μετά την έξοδό του από τον προθερμαντήρα, με τη κύρια ροή του νερού τροφοδοσίας. Για την ανύψωση της πίεσης του συμπυκνώματος στο επίπεδο του νερού τροφοδοσίας χρησιμοποιείται μία αντλία. Η αντλία αυτή δεν αυξάνει την πολυπλοκότητα της διάταξης, όπως συμβαίνει στους ανοικτού τύπου προθερμαντήρες, διότι διαχειρίζονται μόνο το συμπύκνωμα του ατμού απομάστευσης και όχι ολόκληρη την ποσότητα του νερού τροφοδοσίας, [22].

9.4.1.4. Βελτιστοποίηση του «κρύου άκρου»

Το ποσοστό της προσδιδόμενης θερμικής ενέργειας των καυσαερίων το οποίο δεν μετατρέπεται σε μηχανικό έργο παραμένει στον ατμό εκτόνωσης ως θερμότητα συμπύκνωσης και αποβάλλεται στο περιβάλλον. Η θερμοκρασία του ατμού εκτόνωσης είναι γύρω στους 30 °C. Στη θερμοκρασία αυτή δεν είναι δυνατή η περαιτέρω ανάκτηση θερμότητας λόγω έλλειψης θερμικής καταβόθρας (heat sink), [30].

Η μέση θερμοκρασία θερμότητας αποβολής είναι ακόμη ένας παράγοντας για την απόδοση του κύκλου. Για τη μεγιστοποίηση του ολικού βαθμού απόδοσης είναι αναγκαίο η θερμοκρασία αυτή να επιλέγεται όσο γίνεται χαμηλότερα. Χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις για τον ατμό εκτόνωσης στον συμπυκνωτή είναι δυνατό να επιτευχθούν με ρύθμιση της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου σε χαμηλά επίπεδα.

Η θετική επίδραση της θερμοκρασίας θερμότητας αποβολής στο βαθμό απόδοσης είναι ιδιαίτερα αισθητή σε σταθμούς με μικρότερη μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας, όπως φαίνεται και στο επόμενο Σχήμα 9-14. Για παράδειγμα, σε σταθμό με μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας τους 376 °C η μείωση της θερμοκρασίας συμπύκνωσης κατά 1 K επιφέρει μείωση του ρυθμού θερμότητας κατά 0.29% στον ιδανικό κύκλο, [30].



Σχήμα 9-14: Επίδραση της μείωσης της θερμοκρασίας θερμότητας αποβολής κατά 1 K. Αντιστοιχεί σε 30 °C μέση θερμοκρασία θερμότητα αποβολής, [30].

9.4.2. Ελαχιστοποίηση απωλειών

9.4.2.1. Εσωτερική απόδοση ατμοστρόβιλου

Κατά την εκτόνωση του ατμού στον ατμοστρόβιλο, ο ατμός επιταχύνεται και η κινητική του ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανικό έργο μέσω της ορμής που μεταφέρεται στα περιστρεφόμενα πτερύγια. Ένα μέτρο για την ποσοτικοποίηση της αποδοτικότητας της μετατροπής σε μηχανικό έργο είναι η **εσωτερική απόδοση του ατμοστρόβιλου** $\eta_{i,T}$, η οποία δείχνει τη διαφορά μεταξύ πραγματικής και ιδανικής ισεντροπικής εκτόνωσης. Η πραγματική θερμική απόδοση του κύκλου ορίζεται ως [30]:

$$\eta_{th} = \eta_{th,0} \cdot \eta_{i,T}$$

όπου, με $\eta_{th,0}$ δηλώνεται η θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου.

Περίπου τα δύο τρίτα των συνολικών απωλειών προκύπτουν στις βαθμίδες υψηλής πίεσης, κατά κύριο λόγο, καθώς και στις βαθμίδες χαμηλής πίεσης του ατμοστρόβιλου. Οι απώλειες αυτές οφείλονται :

- στην τριβή του ατμού με τα τοιχώματα των καναλιών και τα πτερύγια,
- σε διαρροές του ατμού διαμέσου των περιστρεφόμενων και σταθερών στοιχείων,
- στην υγρασία του ατμού στις τελευταίες βαθμίδες του ατμοστρόβιλου.

Οι **απώλειες εκροής** αντιστοιχούν σε ένα σεβαστό ποσοστό των συνολικών απωλειών, και κυμαίνονται από το ένα δέκατο έως το ένα τρίτο αυτών. Οφείλονται δε, στην κινητική ενέργεια του ατμού εκτόνωσης. Επιπλέον απώλειες οφείλονται στις εσωτερικές βαλβίδες και τις διασυνδεμένες σωληνώσεις του ατμοστρόβιλου.

Σήμερα, η βελτίωση της εσωτερικής απόδοσης των ατμοστρόβιλων, πάνω από 96%, συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση του ολικού βαθμού απόδοσης των σταθμών παραγωγής ενέργειας, [30].

9.4.2.2. Απώλειες ατμοπαραγωγού

Η απόδοση του ατμοπαραγωγού ταυτίζεται με την απόδοση της μετατροπής της θερμικής ενέργειας των καυσαερίων σε ενθαλπία στον ατμό. Σε έναν ατμοπαραγωγό ανάκτησης θερμότητας (ΑΠ.Α.Θ.) οι απώλειες οφείλονται :

- στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία, επαγωγή και συναγωγή από το σώμα του ΑΠ.Α.Θ. προς το περιβάλλον, και
- στην αδυναμία ψύξης των καυσαερίων στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στην πρώτη περίπτωση οι απώλειες συνιστούν λιγότερο από 1% της θερμότητας των εισερχομένων καυσαερίων, και μειώνεται με την αύξηση της δυναμικότητας του ΑΠ.Α.Θ. Σε

έναν σταθμό παραγωγής ηλεκτρισμού η δεύτερη περίπτωση αποτελεί την κυριότερη πηγή απωλειών, μετά τις απώλειες θερμότητας αποβολής, [30].

Οι προσπάθειες, λοιπόν, βελτίωσης της απόδοσης του ατμοπαραγωγού επικεντρώνονται στη μείωση των απωλειών θερμότητας καυσαερίων. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται :

- από τη θερμοκρασία των καυσαερίων κατά την έξοδό τους από τον ατμοπαραγωγό, και
- από τη ροή των καυσαερίων.

Η **θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων** περιορίζεται από τη συμπύκνωση του θειϊκού οξέως, και δεν θα πρέπει να πέφτει κάτω από το σημείο δρόσου του θειϊκού οξέως για την αποφυγή διάβρωσης και ρύπανσης.

9.4.2.3. Άλλες απώλειες (δίκτυο σωληνώσεων, ηλεκτρογεννήτρια, Μ/Σ)

Άλλες απώλειες σχετίζονται με [30]:

- απώλειες στο δίκτυο αγωγών μεταφοράς ατμού στα διάφορα στοιχεία του σταθμού,
- απώλειες στην ηλεκτρογεννήτρια, κατά τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική,
- απώλειες στον κύριο μετασχηματιστή, κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής τάσης από την έξοδο του σταθμού στο δίκτυο.

9.4.3. Μείωση κατανάλωσης βοηθητικής ισχύος

Οι απαιτήσεις βοηθητικής ισχύος είναι το άθροισμα της μηχανικής και ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία δευτερευόντων και βοηθητικών συστημάτων. Η βοηθητική ηλεκτρική ισχύς $P_{aux,el}$ χρησιμοποιείται για τη λειτουργία ηλεκτροκίνητων μηχανών, όπως ανεμιστήρες, αντλίες, μύλοι, καθώς και ηλεκτρικών συσκευών και εξοπλισμού, όπως τα συστήματα καθαρισμού καυσαερίων και απομάκρυνσης τέφρας. Η μηχανική ισχύς αναφέρεται όταν η αντλία τροφοδοσίας κινείται μέσω του ατμοστρόβιλου και όχι ηλεκτρικά. Έχουμε συνολικά [30]:

$$P_{aux} = P_{aux,el} + P_{aux,m}$$

Η απόδοση της βοηθητικής ισχύος υπολογίζεται μέσω της ισχύος εξόδου του ατμοστρόβιλου :

$$\eta_{aux} = \frac{P_{aux}}{P_{Gen}^*} = \frac{P_{aux}}{P_{Gen} + P_{aux,m}}$$

Η βοηθητική ισχύς αντιστοιχεί περίπου στο 6-10% της χονδρικής ηλεκτρικής ισχύος, οπότε η ανωτέρω απόδοση κυμαίνεται στο 90-94%.

9.4.4. Απώλειες κατά την εκκίνηση ή παύση του σταθμού

Η ενέργεια που προσφέρεται κατά την εκκίνηση είτε χάνεται διά μέσου της καμινάδας και του συμπυκνωτή είτε χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του ατμοπαραγωγού. Οι απώλειες εκκίνησης αυξάνονται μέχρις ότου ο σταθμός συνδεθεί παράλληλα με το ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε και μειώνονται ανάλογα με τις παραμέτρους του ενεργού ατμού. Από την άλλη, κατά τη διακοπή της λειτουργίας η αποθηκευμένη στον ατμοπαραγωγό θερμική ενέργεια χάνεται, εκτός και εάν λειτουργεί ως αναμονή για την επόμενη εκκίνηση, .

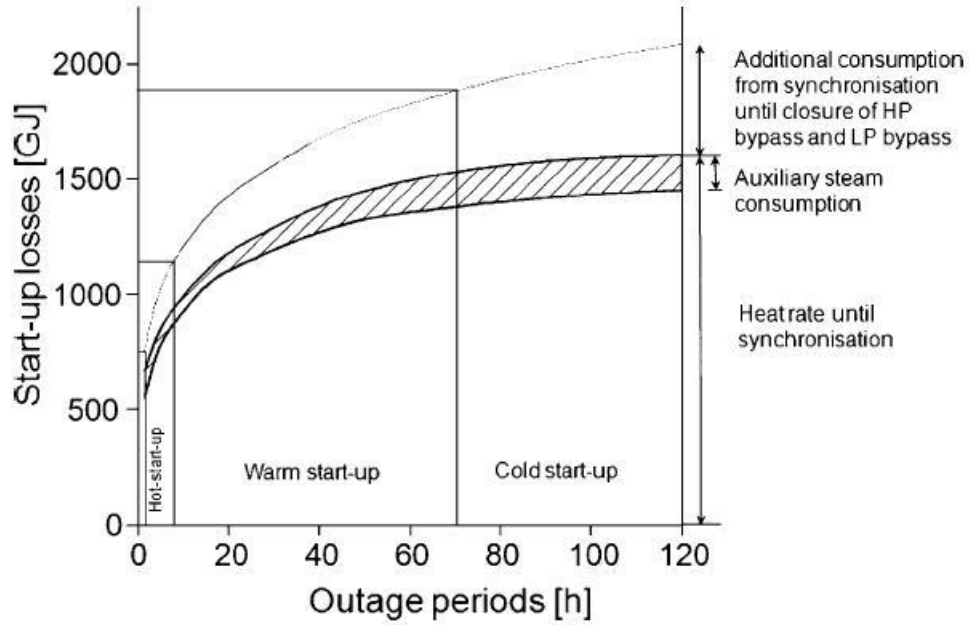
Οι απώλειες που προκύπτουν κατά την εκκίνηση και διακοπή λειτουργίας εξαρτώνται από [30]:

- τη δυναμικότητα της μονάδας,
- τον κατασκευαστικό τύπο του ατμοπαραγωγού, και
- την περίοδο των προηγούμενων διακοπών ηλεκτροδότησης.

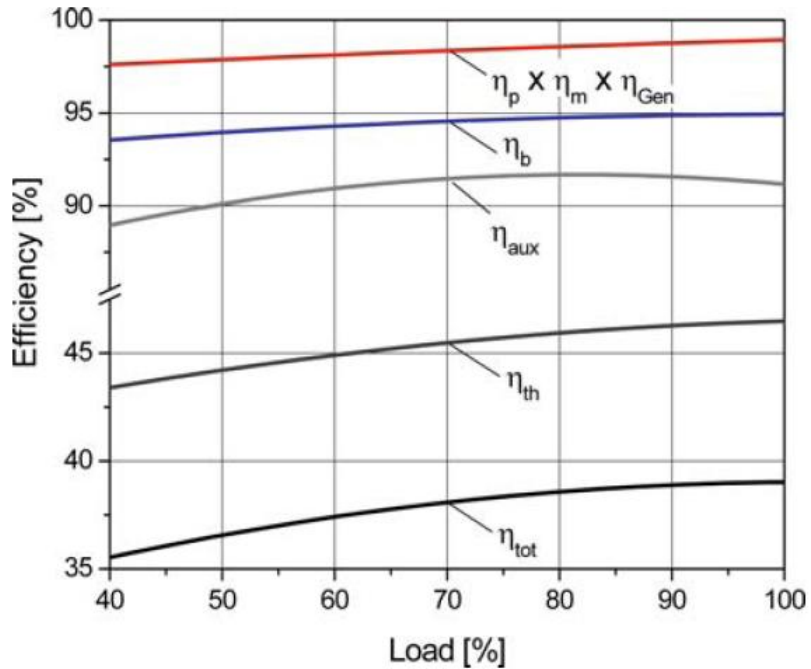
Ιδιαίτερα οι απώλειες εκκίνησης μειώνονται με την αύξηση της δυναμικότητας. Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια της ηλεκτροδότησης τόσο περισσότερες είναι οι απώλειες της επόμενης εκκίνησης, όπως φαίνεται στο επόμενο Σχήμα 9-15, για έναν μεγάλο ατμοηλεκτρικό σταθμό 700 MW.

9.4.5. Απώλειες λόγω μειωμένης δυναμικότητας

Κατά τη λειτουργία ενός σταθμού υπό μερικό φορτίο παρατηρείται μείωση του ολικού βαθμού απόδοσης εξαιτίας της μεταβολής των επιμέρους βαθμών απόδοσης του συστήματος. Ενδεικτικά για έναν μεγάλο ατμοηλεκτρικό σταθμό καθαρής παραγόμενης ισχύος 690 MW και απόδοσης 39%, με συνθήκες λειτουργίας ενεργού ατμού 190/530/530, σχεδιάστηκε το παρακάτω διάγραμμα μεταβολής των βαθμών απόδοσης συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας Σχήμα 9-16. Αξιοσημείωτη είναι η μείωση της θερμικής απόδοσης, και κατά συνέπεια της συνολικής. Στο παράδειγμα αυτό η συνολική απόδοση μειώνεται από 38,8% υπό πλήρες φορτίου σε 35,5% υπό το 40% του πλήρους φορτίου.



Σχήμα 9-15: Απώλειες εκκίνησης ως συνάρτηση των περιόδων διακοπής λειτουργίας, [30].



Σχήμα 9-16: Βαθμοί απόδοσης συναρτήσει του φορτίου λειτουργίας, [30].

10. ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΣΤΗΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ Ε.Ι.Α. ΤΟΥ Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α

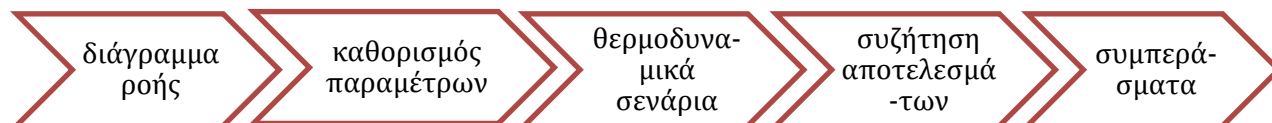
10.1. Ο στόχος της μελέτης εφαρμογής

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 6.3 παραπάνω, ο πρωταρχικός σκοπός λειτουργίας του αποτεφρωτήρα Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. στα Άνω Λιόσια είναι η καταστροφή των Ε.Ι.Α. μέσω της θερμοδυναμικής διεργασίας της καύσης. Από την καύση των Ε.Ι.Α. παράγονται καυσαέρια θερμοκρασίας 1.000-1.100 °C, τα οποία μέσω εξελιγμένων διεργασιών ψύξης και καθαρισμού, απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα σε θερμοκρασία 150-170 °C, (κεφ. 6.2 παραπάνω).

Το ανά χείρας πόνημα επιχειρεί μια ποσοτική διερεύνηση της δυνατότητας ανάκτησης του θερμικού περιεχόμενου των παραγόμενων καυσαερίων. Από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα δοθεί απάντηση στο ερώτημα εάν είναι δυνατή ή όχι η αναβάθμιση του χαρακτήρα της υπάρχουσας εγκατάστασης από "θερμικής καταστροφής" σε σταθμό παραγωγής "Ενέργειας-από-Απόβλητα", όπως επιτάσσει η οδηγία 2008/98/EC [16], και όπως εν συντομία παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο 5.4 παραπάνω.

10.2. Ο θερμοδυναμικός σχεδιασμός - μεθοδολογία

Η μεθοδολογία -ταυτόχρονα και η δομή του παρόντος κεφαλαίου- που ακολουθείται προκειμένου να αποφανθούμε στο ερώτημα που θέτει η εργασία είναι επιγραμματικά η εξής :



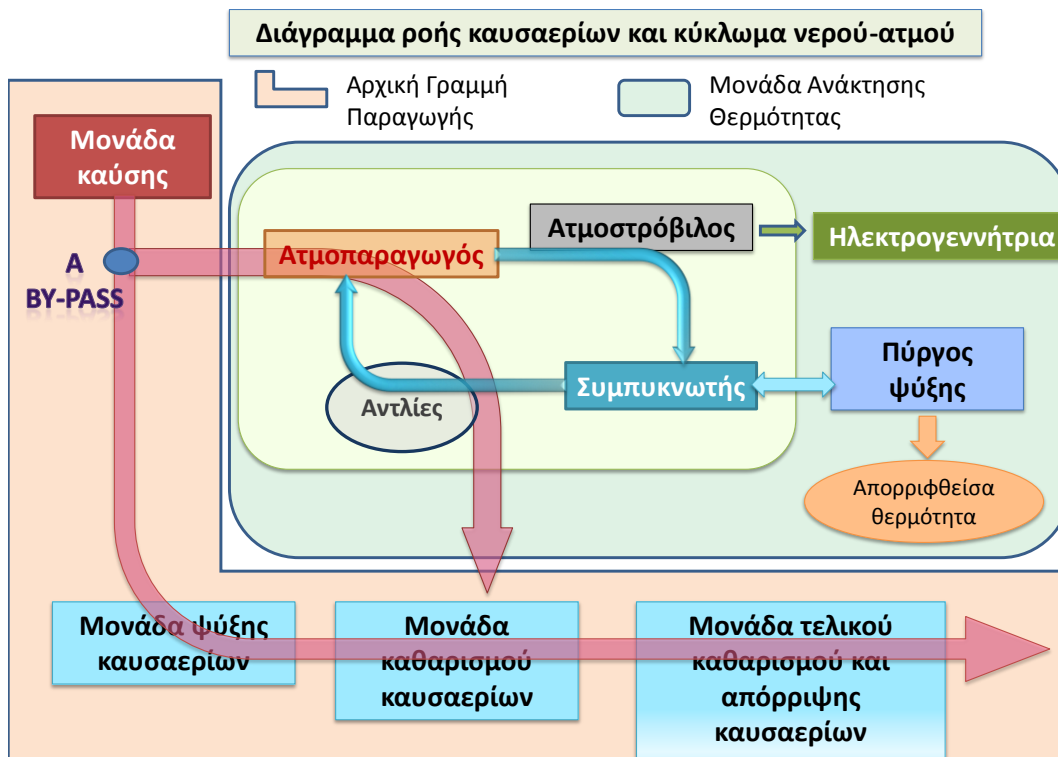
Αρχικά επιλέγεται η διάταξη των επιμέρους συστημάτων του σταθμού και σχηματίζεται το διάγραμμα ροής του εργαζόμενου μέσου (νερό/ατμός) και των καυσαερίων. Στη συνέχεια καθορίζονται οι βασικές παράμετροι για το θερμοδυναμικό σχεδιασμό που ακολουθεί. Οι παράμετροι αυτές αφορούν τη ροή και το θερμικό περιεχόμενο των καυσαερίων, τη ροή και τις συνθήκες λειτουργίας του ενεργού ατμού και του νερού τροφοδοσίας, τις συνθήκες συμπύκνωσης, τους βαθμούς απόδοσης του σταθμού και το κριτήριο R1.

Ακολούθως, προτείνονται πέντε εναλλακτικά θερμοδυναμικά σενάρια βασισμένα στον κύκλο των *Clausius-Rankine*, τα οποία αξιολογούνται με βάση λογικά κριτήρια και συγκρίνονται με ευρωπαϊκές αναφορές, [14,18].

Στο τέλος, παρατίθενται ανακεφαλαιωτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν και η τελική απάντηση στη δυνατότητα εκπλήρωσης ή όχι του στόχου που θέτει η εργασία.

10.3. Διάγραμμα ροής

Η νέα διάταξη της εγκατάστασης αποτέφρωσης Ε.Ι.Α. περιλαμβάνει επιπλέον τη μονάδα ανάκτησης θερμότητας, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.3 και όπως επιγραμματικά περιγράφηκαν τα στοιχεία της στο κεφάλαιο **Error! Reference source not found.** Στο επόμενο Σχήμα 10-1, απεικονίζεται το διάγραμμα ροής των καυσαερίων και του εργαζόμενου μέσου (νερού/ατμού) :



Σχήμα 10-1: Διάγραμμα ροής καυσαερίων και εργαζόμενου μέσου (νερού/ατμού) .

Στο σημείο Α, μετά την έξοδο από το θάλαμο μετάκαυσης της μονάδας καύσης, υπάρχει διάταξη by-pass η οποία επιτρέπει την επιλεκτική διαδρομή των καυσαερίων :

- Όταν κρίνεται ότι τα τροφοδοτούμενα Ε.Ι.Α. δεν επαρκούν για παραγωγή ενέργειας ή όταν συντρέχουν λόγοι συντήρησης ή βλάβης της μονάδας ανάκτησης ενέργειας, τότε τα καυσαέρια ακολουθούν τη προδιαγεγραμμένη αρχική γραμμή παραγωγής.
- Όταν το θερμικό φορτίο των Ε.Ι.Α. είναι αρκετό για την παραγωγή ικανής ποσότητας ισχύος, τότε τα καυσαέρια μετά την έξοδό τους από το θάλαμο μετάκαυσης οδηγούνται στον ατμοπαραγωγό, παρακάμπτοντας τη μονάδα ψύξης

καυσαερίων. Μετά τον ατμοπαραγωγό οδηγούνται στη μονάδα καθαρισμού της αρχικής γραμμής παραγωγής, και ακολουθούν τη προδιαγεγραμμένη πορεία τους.

Από την άλλη, το εργαζόμενο μέσο νερό/ατμός, ακολουθεί την εξής πορεία : το νερό τροφοδοσίας εισερχόμενο στον ατμοπαραγωγό, απορροφά τη θερμότητα των καυσαερίων μετατρέπόμενο σε ατμό, κορεσμένο ή υπέρθερμο, ανάλογα αν υπάρχει υπερθερμαντήρας ή όχι. Στη συνέχεια, διά μέσου αγωγών διοχετεύεται στον ατμοστρόβιλο, στον οποίο εκτονώνεται και μετατρέπεται η κινητική του ενέργεια σε μηχανικό έργο στα περιστρεφόμενα πτερύγια, παράγραφος 7.2 παραπάνω. Ο ατμός εκροής συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή απορρίπτοντας την ενθαλπία του στο μέσο ψύξης, νερό ή αέρας. Τέλος, το συμπύκνωμα μαζί με την απαραίτητη φρέσκια ποσότητα νερού οδηγείται διά μέσου αντλιών προθέρμανσης και τροφοδοσίας στον ατμοπαραγωγό για έναν νέο κύκλο.

10.4. Καθορισμός παραμέτρων

10.4.1. Το θερμικό περιεχόμενο των καυσαερίων

Αρχικά προσδιορίζεται το διαθέσιμο θερμικό περιεχόμενο των παραγόμενων καυσαερίων, με βάση το οποίο θα καθοριστεί η θερμική ισχύς του ατμοπαραγωγού. Δεδομένα όπως είναι η ροή των καυσαερίων, η θερμοκρασία εξόδου από το θάλαμο μετάκαυσης, η πυκνότητά τους και η ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση, λαμβάνονται από τη μελέτη σχεδιασμού του αποτεφρωτήρα, αλλά και από τη διοίκηση της εγκατάστασης. Τα δεδομένα αυτά συνοψίζονται στον επόμενο Πίνακα 10-1 :

Πίνακας 10-1: Ιδιότητες καυσαερίων αποτεφρωτήρα (πηγή :ΑΠΟΤΕΦΡΩΤΗΡΑΣ Α.Ε. [20])	
Θερμοκρασία από έξοδο θαλάμου μετάκαυσης	$T_1 = 1050^\circ\text{C}$
Ροή καυσαερίων κατ' όγκο	$\dot{m}_g = 14000 \text{ Nm}^3/\text{h}$
Ροή καυσαερίων κατά μάζα	$\dot{m}_g = 17640 \text{ kg/h}$
Πυκνότητα καυσαερίων	$\rho_g = 1,26 \text{ kg/m}^3$
Ειδική θερμότητα καυσαερίων υπό σταθερή πίεση	$c_p = 1,161 \text{ kJ/(kgK)}$

Με βάση τις παραπάνω τιμές μπορεί να υπολογιστεί η δυναμικότητα του ατμοπαραγωγού και κατά συνέπεια, το μέγιστο ποσό ανακτώμενης θερμότητας. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον ατμοπαραγωγό. Έχοντας υπόψη ότι η θερμοκρασία των καυσαερίων για το επόμενο στάδιο του καθαρισμού τους δεν πρέπει να είναι μικρότερη των 200°C , (παράγραφος 6.2.4

παραπάνω) επιλέγεται αυτή η τιμή για τους υπολογισμούς της δυναμικότητας του ατμοπαραγωγού, οι οποίοι συνοψίζονται στον επόμενο Πίνακα 10-2 :

Πίνακας 10-2: Δυναμικότητα ατμοπαραγωγού	
Επιθυμητή θερμοκρασία εξόδου	$T_2 = 200^\circ C$
Δυναμικότητα σε kJ/h	$\dot{Q}_{FG} = \dot{m}_g c_p (T_1 - T_2) = 17,408 \cdot 10^6 kJ/h$
Δυναμικότητα σε kW	$\dot{Q}_{FG} / 3600 = 4,8 MW$
Βαθμός απόδοσης ατμοπαραγωγού	$\eta_B = 0,90$

Η τιμή του βαθμού απόδοσης του ατμοπαραγωγού λαμβάνεται από τη βιβλιογραφία [30,14]. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η απόδοση ατμοπαραγωγών ανάκτησης θερμότητας (ΑΠ.Α.Θ) είναι άμεση συνάρτηση της καθαρότητας των αυλών και των επιφανειών εναλλαγής θερμότητας. Καθαροί αυλοί και επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας έχουν ως αποτέλεσμα την αποδοτικότερη εναλλαγή θερμότητας, και κατά συνέπεια το 80-90% της θερμότητας των καυσαερίων να ανακτάται στον ατμοπαραγωγό. Τα ανωτέρω επίσης προκαλούν μείωση του κίνδυνου επανασχηματισμού των διοξινών μέσα στον ατμοπαραγωγό.

10.4.2. Συνθήκες λειτουργίας ενεργού ατμού

Από τις σημαντικότερες παραμέτρους του θερμοδυναμικού σχεδιασμού αποτελούν οι συνθήκες του ενεργού ατμού -Live Steam Conditions (LSC)- δηλαδή, η πίεση και η θερμοκρασία του παραγόμενου από τον ατμοπαραγωγό ατμό. Η ενθαλπία του ενεργού ατμού είναι ένας από τους δύο παράγοντες που συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό στην ποσότητα του παραγόμενου έργου και την απόδοση του συστήματος εν γένει. Ο δεύτερος είναι η ενθαλπία του ατμού εκροής.

Αυξημένες LSC αυξάνουν την απόδοση του ατμοστρόβιλου και την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανά τόνο αποτεφρωθέντων αποβλήτων. Εξαιτίας, όμως, της διαβρωτικής φύσης των καυσαερίων, οι εγκαταστάσεις αποτέφρωσης με παραγωγή "Ενέργειας-από-Απόβλητα" δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις ίδιες πιέσεις και θερμοκρασίες με τους κοινούς θερμικούς σταθμούς, δηλ. 100-130 bar και 620 °C.

Έτσι, σε σταθμούς αποτέφρωσης αστικών στερεών αποβλήτων -Municipal Solid Waste Incineration (MSWI)- οι LSC περιορίζονται σε 40-45 bar και 380-400 °C, [30,14]. Οι τιμές αυτές ισχύουν και για σταθμούς αποτέφρωσης Ε.Ι.Α. Πάνω από αυτές τις τιμές είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί το αντιστάθμισμα μεταξύ [14] :

- του κόστους εφαρμογής ειδικών μέτρων, όπως ειδικά υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση,
- του κόστους απώλειας διαθεσιμότητας, λόγω αυξημένων απαιτήσεων συντήρησης, και
- της αξίας της επιπλέον παραγόμενης ισχύος.

Η επίδραση της πίεσης του ενεργού ατμού στην παραγόμενη ισχύ, και κατά συνέπεια στα κέρδη του σταθμού φαίνεται από τα στοιχεία του επόμενου πίνακα, για έναν σύγχρονο σταθμό συμπαραγωγής MSWI στη Δανία δυναμικότητας 34t/h, Πίνακας 10-3 :

Πίνακας 10-3: Επίδραση πίεσης ενεργού ατμού στην παραγόμενη ισχύ και τα κέρδη, [14]

Steam value	bar	50	40	30
Generator output	MW	19.6	18.6	17.3
Heat production	MJ/s	71.2	72.2	73.5
Change in electricity output	MW	0	-1	-2.3
Change in heat output	MJ/s	0	1	2.3
Economy				
Availability	hr/yr.	8000	8000	8000
Electricity price	EUR/MWh	47	47	47
Heat price	EUR/MWh	18	18	18
Annual income change	million EUR/yr	0.0	-0.25	-0.54

Παρατηρούμε ότι αύξηση της πίεσης από τα 40 στα 50 bar οδηγεί σε αύξηση των κερδών κατά 250.000 ευρώ ετησίως.

Στον επόμενο Πίνακα 10-4, παρατίθενται διάφοροι σταθμοί "Ενέργεια-από-Απόβλητα" στην Ευρώπη με τις συνθήκες ενεργού ατμού :

Πίνακας 10-4: Παραδείγματα σταθμών EfW εν λειτουργία και LSC, [14]

Σταθμός "Ενέργεια-από-Απόβλητα"	Συνθήκες ενεργού ατμού (LSC)
RMVA Köln - Γερμανία	40 bar / 400 °C - υπέρθερμος ατμός
Rennes plant (Retrofit) - Γαλλία	26 bar / 228 °C - κορεσμένος ατμός
Odense - Δανία	50 bar / 400 °C - υπέρθερμος ατμός

Ivry - Γαλλία	75 bar / 475 °C - υπέρθερμος ατμός
Mataró - Ισπανία	60 bar / 380 °C - υπέρθερμος ατμός
Lasse Sivert Est Anjou - Γαλλία	60 bar / 400 °C - υπέρθερμος ατμός

Οι LSC για το θερμοδυναμικό σχεδιασμό της μελέτης περίπτωσης είναι 20 και 40 bar για την πίεση, και 400 °C για τη θερμοκρασία.

10.4.3. Συνθήκες κρούς άκρου - συμπύκνωσης

Η πίεση του ατμού εκροής στο συμπυκνωτή είναι, όπως ειπώθηκε προηγουμένως, ο δεύτερος παράγοντας βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης ενός σταθμού. Σε σταθμούς οι οποίοι παράγουν αποκλειστικά ηλεκτρική ενέργεια (στην περίπτωση αυτή υπάγεται η μελέτη περίπτωσης που εξετάζεται για τον αποτεφρωτήρα του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α.) η πίεση εκτόνωσης είναι υπό το κενό, και μάλιστα μέχρι 200 mbar, [14]. Βεβαίως, σε μεγάλους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς της Ευρώπης η υποπίεση συμπύκνωσης φτάνει μέχρι και τα 20 mbar [30]. Για το σχεδιασμό της μελέτης περίπτωσης της ανά χείρας εργασίας επιλέγεται η υποπίεση των **150 mbar**, με βάση την εμπειρία που είναι καταγεγραμμένη στα [30,14].

10.4.4. Βαθμοί απόδοσης σταθμού

Η ενεργειακή απόδοση η , ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που παράγεται από μία διεργασία προς την ισχύ που εισάγεται σε αυτή. Η ηλεκτρική δυναμικότητα του σταθμού μπορεί να περιγραφεί είτε ως μικτή είτε ως καθαρή. Η μικτή δυναμικότητα P_{gr} αναφέρεται στην ισχύ που μετράται στη γεννήτρια, ενώ η καθαρή P_{ne} , αναφέρεται στην ισχύ που μεταφέρεται στο δίκτυο. Η διαφορά μεταξύ των δύο καλείται δευτερεύουσα ηλεκτρική ισχύς $P_{aux,el}$, και είναι εκείνη που απαιτείται για την ηλεκτροδότηση του ηλεκτρικού βοηθητικού εξοπλισμού, όπως είναι η αντλία νερού τροφοδοσίας, οι ανεμιστήρες αέρα καύσης και καυσαερίων, κ.α. Καλύπτει επίσης τις απώλειες του μετασχηματιστή του σταθμού, και δίνεται από τη σχέση [30]:

$$P_{ne} = P_{gr} - P_{aux,el}$$

Η ολική ή καθαρή απόδοση ενός σταθμού που παράγει μόνο ηλεκτρική ισχύ δίνεται από το λόγο της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου προς την ενέργεια του καυσίμου τροφοδοσίας :

$$\eta_{ne} = \frac{P_{ne}}{\dot{m}_F \cdot LHV}$$

Η απόδοση ενός τέτοιου σταθμού συντίθεται από διάφορες επιμέρους αποδόσεις, οι οποίες πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους :

$$\eta_{ne} = \eta_B \cdot \eta_{th} \cdot \eta_m \cdot \eta_{Gen} \cdot \eta_{aux} \cdot \eta_{sf}$$

όπου οι επιμέρους βαθμοί απόδοσης αντανακλούν :	
η_B	την απόδοση του ατμοπαραγωγού
η_{th}	το θερμικό βαθμό απόδοσης
η_m	τις μηχανικές απώλειες του ατμοστρόβιλου
η_{Gen}	τις ηλεκτρικές και μηχανικές απώλειες της ηλεκτρογεννήτριας
η_{aux}	τις βοηθητικές απαιτήσεις ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος
η_{sf}	Βαθμός ασφάλειας για απρόβλεπτους παράγοντες και απώλειες που δεν έχουν ληφθεί υπόψη (π.χ. απώλειες θερμότητας των σωληνώσεων μεταφοράς του ενεργού ατμού από τον ατμοπαραγωγό στον ατμοστρόβιλο, απώλειες προθερμάνσεων, έργο άντλησης, κλπ.)

Στη συνέχεια δίνονται οι σχέσεις προσδιορισμού των βαθμών αυτών.

Ο βαθμός απόδοσης ενός ατμοπαραγωγού αποβλήτων είναι :

$$\eta_B = \frac{\sum \dot{m}_{s,j} \cdot \Delta h_j}{\dot{m}_F \cdot LHV}$$

όπου $\dot{m}_{s,j}$ είναι οι ροές μάζας του εργαζόμενου μέσου (νερό/ατμός), και οι οποίες δέχονται τη θερμότητα από την καύση των Ε.Ι.Α. Ο όρος Δh_j αναφέρεται στην αύξηση της ενθαλπίας που υφίσταται κάθε ροή μάζας. Για τον απλό κύκλο που απεικονίζεται στο Σχήμα 9-1, ο ανωτέρω τύπος γράφεται :

$$\eta_B = \frac{\dot{m}_S \cdot (h_3 - h_2)}{\dot{m}_F \cdot LHV}$$

Ωστόσο, η απόδοση του ατμοπαραγωγού προσδιορίζεται κυρίως έμμεσα από τις απώλειές του :

- απώλειες λόγω άκαυστου καύσιμου (κ_U),
- απώλειες λόγω αισθητής θερμότητας της τέφρας (κ_S),
- απώλειες καυσαερίων (κ_{FG}), και
- απώλειες ακτινοβολίας και συναγωγής από το κέλυφος του ατμοπαραγωγού (κ_{RC}).

Έτσι, ο βαθμός απόδοσης του ατμοπαραγωγού δίνεται εναλλακτικά :

$$\eta_B = 1 - \kappa_U - \kappa_S - \kappa_{FG} - \kappa_{RC}$$

Στην περίπτωση μας, η ανάκτηση της θερμότητας των καυσαερίων της αποτέφρωσης γίνεται από ατμοπαραγωγό ανάκτησης θερμότητας -ΑΠ.Α.Θ. (Heat Recovery Steam Generator - HRSG)- οπότε, οι ως άνω σχέσεις αντικαθίστανται από τις :

$$\eta_B = \frac{\dot{Q}_{LS}}{\dot{Q}_{FG}} = \frac{\sum \dot{m}_{S,j} \cdot \Delta h_j}{\dot{m}_{FG} \cdot c_p \cdot \Delta T}$$

$$\eta_B = 1 - \kappa_{RC}$$

όπου, \dot{m}_{FG} η ροή των παραγόμενων καυσαερίων, ΔT η θερμοκρασιακή διαφορά των καυσαερίων κατά την είσοδο και έξοδό τους από τον ατμοπαραγωγό, και c_p η μέση ειδική θερμότητα καυσαερίων υπό σταθερή πίεση για το εύρος ΔT .

Για το βαθμό θερμικής απόδοσης του πραγματικού κύκλου, ο οποίος εκφράζει το λόγο της εσωτερικής ισχύος του ατμοστρόβιλου P_i , (πρόκειται για την παραγόμενη ισχύ του ατμοστρόβιλου χωρίς τις μηχανικές απώλειες) προς την ενέργεια του ενεργού ατμού :

$$\eta_{th} = \frac{P_i}{\sum \dot{m}_{S,j} \cdot \Delta h_j}$$

Για τον απλό κύκλο στο Σχήμα 9-1, προκύπτει :

$$\eta_{th} = \frac{P_i}{\dot{m}_S \cdot (h_3 - h_2)}$$

Ο βαθμός αυτός είναι μειωμένος σε σχέση με τον αντίστοιχο $\eta_{th,0}$, λόγω των απωλειών τριβής κατά την εκτόνωση στον ατμοστρόβιλο. Οι απώλειες αυτές αντανακλούνται στον ισεντροπικό βαθμό απόδοσης του ατμοστρόβιλου $\eta_{i,T}$:

$$\eta_{i,T} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,0}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4,id}}$$

Με τη βοήθεια των ανωτέρω σχέσεων μπορούμε να εκτιμήσουμε, κατά το στάδιο σχεδιασμού του σταθμού ανάκτησης θερμότητας υποθέτοντας τιμές στους διάφορους συντελεστές, την εσωτερική ισχύ του ατμοστρόβιλου P_i , ως εξής :

$$P_i = \eta_{th} \cdot \dot{Q}_{LS} = \eta_{th,0} \cdot \eta_{i,T} \cdot \eta_B \cdot \dot{Q}_{FG}$$

Ο μηχανικός βαθμός απόδοσης ορίζεται από το λόγο της εσωτερικής ισχύος P_i , προς τη μηχανική έξοδο στον άξονα του ατμοστρόβιλου P_{shaft} :

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_i}$$

ενώ για την απόδοση της ηλεκτρογεννήτριας έχουμε :

$$\eta_{Gen} = \frac{P_{Gen}}{P_m}$$

και για το βαθμό απόδοσης της βοηθητικής ισχύος :

$$\eta_{aux} = \frac{P_{ne}}{P_{Gen}}$$

Με βάση όσα έχουν γραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια για τη λειτουργία, τις απώλειες και τις αποδόσεις των κύριων στοιχείων του εξοπλισμού του σταθμού ανάκτησης θερμότητας, επιλέγονται οι παρακάτω τιμές για τους βαθμούς απόδοσης, Πίνακας 10-5 :

Πίνακας 10-5: Επιλογή τιμών βαθμών απόδοσης		
Απόδοση ατμοπαραγωγού	η_B	0,90
Ισεντροπικός θερμικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{th,0}$	προς υπολογισμό
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης ατμοστρόβιλου	$\eta_{i,T}$	0,85
Μηχανικός βαθμός απόδοσης	η_m	0,95

Απόδοση ηλεκτρογεννήτριας	η_{Gen}	0,92
Απόδοση βοηθητικής ισχύος	η_{aux}	0,90
Βαθμός ασφάλειας	η_{sf}	0,90

10.4.5. Το κριτήριο R1 της οδηγίας 2008/98/EC

Όπως τονίστηκε στην αρχή του κεφαλαίου, στην περίπτωση του αποτεφρωτήρα του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. στα Άνω Λιόσια, η ανακτώμενη θερμότητα θα χρησιμοποιηθεί εξ' ολοκλήρου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, δεν θα χρησιμοποιηθούν συμβατικά καύσιμα για την παραγωγή ατμού. Τότε, η σχέση υπολογισμού της φόρμουλας R1, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4 παραπάνω, γράφεται ως εξής :

$$R1 = \frac{2,6 \cdot E_{ne}}{0,97 \cdot E_w}$$

όπου το E_{el} αντικατεστάθη από το E_{ne} , το οποίο εκφράζει το καθαρό παραγόμενο ποσό ισχύος, όπως ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο 10.4.4, και όπως θα υπολογιστεί σε κάθε ένα από τα θερμοδυναμικά σενάρια, επόμενη παράγραφος 10.5.

Η περιεχόμενη στα απόβλητα ενέργεια υπολογίζεται μέσω της σχέσης :

$$E_w = m_{waste} \cdot NCV_{waste}$$

Από τη διοίκηση της εγκατάστασης του αποτεφρωτήρα του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. ελήφθησαν οι παρακάτω τιμές για την παροχή των Ε.Ι.Α. και την Κ.Θ.Δ., Πίνακας 10-6 :

Πίνακας 10-6: Παροχή και Κ.Θ.Δ. των Ε.Ι.Α του αποτεφρωτήρα του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α., [20]			
	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή
Παροχή τροφοδοσίας \dot{m}_w (kg/h)	500	550	600
Κ.Θ.Δ. (kcal/kg)	3.350	3.650	4000
Κ.Θ.Δ. (kJ/kg)	14.016,40	15.271,60	16.736,00

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην τελευταία σχέση προκύπτει για την περιεχόμενη στα Ε.Ι.Α. ενέργεια :

Πίνακας 10-7: Περιεχόμενη ενέργεια στα Ε.Ι.Α. E_w (GJ / h) (2 γραμμές παραγωγής)

Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή	Μέγιστη τιμή
14,016	16,80	20,08

Η παροχή των καυσαερίων και η περιεχόμενη σε αυτά θερμότητα, όπως υπολογίστηκε στον Πίνακα 10-1 αντιστοιχούν σε Ε.Ι.Α με Κ.Θ.Δ. 3650 (kcal/kg) ή 15,271 (MJ/kg). Με βάση την τιμή που θα προκύψει από τη φόρμουλα R1 θα κριθεί η δυνατότητα κατάταξης του αποτεφρωτήρα Ε.Ι.Α ως σταθμού παραγωγής Ενέργειας-από-Απόβλητα.

10.5. Θερμοδυναμικά σενάρια

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο 10.4.2, οι συνθήκες του ενεργού ατμού είναι καθοριστικές για την παραγωγή έργου και το βαθμό απόδοσης του σταθμού. Επίσης, με βάση τη βιβλιογραφία οι συνηθέστερες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας είναι 40-45 bar και 380-400 °C. Λόγω του μικρού μεγέθους της εγκατάστασης του αποτεφρωτήρα του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. προτείνεται η αξιολόγηση πέντε εναλλακτικών θερμοδυναμικών σεναρίων (θ.σ.) με τα εξής χαρακτηριστικά, Πίνακας 10-8 :

Πίνακας 10-8: Θερμοδυναμικά σενάρια ανάκτησης θερμότητας καυσαερίων αποτέφρωσης

1^ο σενάριο	Κύκλος κορεσμένου ατμού 20 bar (Διάγραμμα – I)*
2^ο σενάριο	Κύκλος κορεσμένου ατμού 40 bar (Διάγραμμα – II)*
3^ο σενάριο	Κύκλος υπέρθερμου ατμού 20 bar / 400 °C (Διάγραμμα – I)*
4^ο σενάριο	Κύκλος υπέρθερμου ατμού 40 bar / 400 °C (Διάγραμμα – II)*
5^ο σενάριο	Κύκλος υπέρθερμου ατμού 40 bar / 400 °C / 400 °C με αναθέρμανση (Διάγραμμα – III)*
	* Στις παρενθέσεις αναφέρεται το διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται το εν λόγω θερμοδυναμικό σενάριο. Τα διαγράμματα βρίσκονται στο τέλος της παρούσας παραγράφου.

Η αξιολόγηση των θ.σ. με βάση κάποια λογικά κριτήρια θα μας οδηγήσει τελικά στην επιλογή του βέλτιστου εξ αυτών, ώστε να μετατραπεί ο αποτεφρωτήρας του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. σε σταθμό παραγωγής "Ενέργειας-από-Απόβλητα". Τα κριτήρια αυτά είναι :

- η διατήρηση του χαρακτήρα της εγκατάστασης ως σταθμού παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμους πόρους (Ενέργεια-από-Απόβλητα)
- η στενότητα χώρου, και κατά συνέπεια την αδυναμία επέκτασης της υπάρχουσας εγκατάστασης
- οι υπάρχουσες τεχνολογίες
- η οικονομική βιωσιμότητα.

Σε όλα τα θ.σ. που παρουσιάζονται, η αδιαβατική εκτόνωση επιλέγεται να πραγματοποιείται σε υποπίεση 0,150 bar_a, η οποία αντιστοιχεί σε θερμοκρασία κορεσμού 53,97 °C. Έτσι, και η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας θα είναι περίπου 54 °C. Επιπλέον, για τους λόγους που εξηγήθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο επιλέγεται 5% blowdown. Στον επόμενο Πίνακα 10-9, δίνονται οι ιδιότητες του κορεσμένου ατμού και του υπόψυκτου νερού τροφοδοσίας :

Πίνακας 10-9: Ιδιότητες νερού τροφοδοσίας		
Πίεση	0,150	bar a
Θερμοκρασία Κορεσμού	53,97	°C
Υγρό νερό		
Ενθαλπία	225,9	kJ/kg
Πυκνότητα	986,16	kg/m ³
Εντροπία	0,75	kJ/kgK
Ατμός		
Ενθαλπία	2598,3	kJ/kg
Πυκνότητα	0,10	kg/m ³
Εντροπία	8,01	kJ/kgK
Θερμότητα ατμοποίησης	2372,4	kJ/kg

10.5.1. 1^ο σενάριο : Κύκλος κορεσμένου ατμού 20 bar

Ως πρώτο θερμοδυναμικό σενάριο θεωρείται ένας απλός κορεσμένο κύκλος στα 20 bar. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του κορεσμένου ατμού πίεσης 20 bar, και οι ιδιότητες του μίγματος ατμού-νερού μετά την εκτόνωση στο συμπυκνωτή. Στο Διάγραμμα-I απεικονίζεται από τον κύκλο 0-A-B1-B2-0.

Ιδιότητες κορεσμένου ατμού (σημείο B1)			Νερό τροφοδοσίας (σημείο 0)		Ιδιότητες μίγματος εκτόνωσης			
					σημείο B2		σημείο B2'	
Πίεση	20,00	bar a	0,15	bar a	Πίεση	0,15	bar a	0.15
Θερμοκρασία Κορεσμού	212,38	°C	53,97	°C	Ενθαλπία	2052,00	kJ/kg	2163.96
Υγρό νερό					Θερμοκρασία	54,0	°C	54.0
Ενθαλπία	908,6	kJ/kg	225,9	kJ/kg	Πυκνότητα	0,13	kg/m ³	0.12
Πυκνότητα	849,80	kg/m ³	986,16	kg/m ³	Εντροπία	6,34	kJ/kgK	6.68
Εντροπία	2,45	kJ/kgK	0,75	kJ/kgK	Ποιότητα ατμού	76,97226	%	81.6916
Ατμός					Περιοχή IF97	4		4
Ενθαλπία	2798,4	kJ/kg	2598,3	kJ/kg	Φάση	Μίγμα		Μίγμα
Πυκνότητα	10,04	kg/m ³	0,10	kg/m ³				
Εντροπία	6,34	kJ/kgK	8,01	kJ/kgK				
Θερμότητα ατμοποίησης	1889,8	kJ/kg	2372,4	kJ/kg				

Με βάση τις παραπάνω τιμές η ενθαλπία που προσδίδεται στο νερό τροφοδοσίας 54 °C ώστε να μετατραπεί σε κορεσμένο ατμό 20 bar ισούται με

$$\Delta h^{(20\text{bar})} = (h_g^{(20\text{bar})} - h_{fw}) + 0,05(h_f^{(20\text{bar})} - h_{fw}) \Leftrightarrow$$

$$\Delta h^{(20\text{bar})} = (2798,4 - 225,9) + 0,05(908,6 - 225,9) = 2606,635 \text{ kJ/kg}$$

η ποσότητα ατμού που παράγεται υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$\dot{m}_{LS} = \frac{\eta_B \cdot \dot{Q}_{FG}}{\Delta h^{(20\text{bar})}} = \frac{0,90 \cdot 17,408 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}}{2606,635 \text{ kJ/kg}} = 0,90 \cdot 6,68 = 6,012 \frac{\text{tn}}{\text{h}}$$

Η αντίστοιχη μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας υπολογίζεται ως :

$$T_{m.in}^{(20bar)} = \frac{h_{B1} - h_O}{s_{B1} - s_O} = \frac{2606,635 \frac{kJ}{kg}}{(6,34 - 0,75) \frac{kJ}{kgK}} = 466,3K \quad \text{ή} \quad T_{m.in}^{(20bar)} = 193,14^\circ C$$

Ο ισεντροπικός θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι

$$\eta_{th,0} = \frac{h_3 - h_{4,id}}{h_3 - h_2} = \frac{h_{B1} - h_{B2}}{h_{B1} - h_O} = \frac{h_g^{(20bar)} - h_c^{x=0,77}}{\Delta h^{(20bar)}} = \frac{(2798,4 - 2052,0) \frac{kJ}{kg}}{2606,635 \frac{kJ}{kg}} = 0,2863$$

Και ο πραγματικός θερμικός βαθμός απόδοσης, θεωρώντας $\eta_{i,T} = 0,85$ για τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης του ατμοστρόβιλου,

$$\eta_{th} = \eta_{th,0} \cdot \eta_{i,T} = 0,2863 \cdot 0,85 = 0,2434$$

Η πραγματική ενθαλπική πτώση κατά την εκτόνωση είναι

$$h_3 - h_4 = \eta_{i,T} \cdot (h_3 - h_{4,id}) = 0,85 \cdot 746,4 = 634,44 \frac{kJ}{kg}$$

Και το πραγματικό σημείο εκτόνωσης

$$h_{B2'} \equiv h_4 = h_3 - \eta_{i,T} \cdot (h_3 - h_{4,id}) = (2798,4 - 634,44) \frac{kJ}{kg} = 2163,96 \frac{kJ}{kg}$$

Με βάση αυτά τα στοιχεία η εσωτερική ισχύς του ατμοστρόβιλου (χωρίς τις μηχανικές απώλειες) είναι

$$P_i = \left\{ \begin{array}{l} \eta_{th} \cdot \dot{Q}_{LS}^{(20bar)} \\ \text{ή} \\ \eta_{th} \cdot \eta_B \cdot \dot{Q}_{FG} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 0,2434 \cdot 6012 \text{ kg/h} \cdot 2606,635 \text{ kJ/kg} \\ \text{ή} \\ 0,2434 \cdot 0,90 \cdot 17,408 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \end{array} \right\} = 3,813 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \quad \text{ή} \quad \frac{P_i}{3600} = 1,059 \text{ MW}$$

Η μηχανική ισχύς στον άξονα του ατμοστρόβιλου, η ηλεκτρική ισχύς που εξάγεται από την ηλεκτρογεννήτρια και η ηλεκτρική ισχύς που μεταφέρεται στο δίκτυο δίνονται στον συγκεντρωτικό πίνακα της επόμενης παραγράφου 10.6.

10.5.2. 2^ο σενάριο : Κύκλος κορεσμένου ατμού 40 bar

Το δεύτερο θερμοδυναμικό σενάριο αποτελείται από έναν απλό κορεσμένο κύκλο στα 40 bar. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του κορεσμένου ατμού πίεσης 40 bar, και οι ιδιότητες του μίγματος ατμού-νερού μετά την εκτόνωση στο συμπυκνωτή. Στο Διάγραμμα-II απεικονίζεται από τον κύκλο 0-A-B1-B2-0.

Ιδιότητες κορεσμένου ατμού (σημείο B1)		Νερού τροφοδοσίας (σημείο 0)		Ιδιότητες μίγματος εκτόνωσης		
				σημείο B2		σημείο B2'
Πίεση	40,00 bar a	0,15 bar a	0,15 bar a	Πίεση	0,15 bar a	0,15
Θερμοκρασία Κορεσμού	250,36 °C	53,97 °C		Ενθαλπία	1965,00 kJ/kg	2090,39
Υγρό νερό				Θερμοκρασία	54,0 °C	54,0
Ενθαλπία	1087,4 kJ/kg	225,9 kJ/kg		Πυκνότητα	0,14 kg/m ³	0,13
Πυκνότητα	798,36 kg/m ³	986,16 kg/m ³		Εντροπία	6,07 kJ/kgK	6,45
Εντροπία	2,80 kJ/kgK	0,75 kJ/kgK		Ποιότητα ατμού	73,305038	%
Ατμός				Περιοχή IF97	4	4
Ενθαλπία	2800,9 kJ/kg	2598,3 kJ/kg		Φάση	Μίγμα	Μίγμα
Πυκνότητα	20,09 kg/m ³	0,10 kg/m ³				
Εντροπία	6,07 kJ/kgK	8,01 kJ/kgK				
Θερμότητα ατμοποίησης	1713,5 kJ/kg	2372,4 kJ/kg				

Με βάση τις παραπάνω τιμές η ενθαλπία που προσδίδεται στο νερό τροφοδοσίας 54 °C ώστε να μετατραπεί σε κορεσμένο ατμό 20 bar ισούται με

$$\Delta h^{(40\text{bar})} = (h_g^{(40\text{bar})} - h_{fw}) + 0,05(h_f^{(40\text{bar})} - h_{fw}) =$$

$$(2800,9 - 225,9) + 0,05(1087,4 - 225,9) = 2618,075 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

η ποσότητα ατμού που παράγεται υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$\dot{m}_{LS} = \frac{\eta_B \cdot \dot{Q}_{FG}}{\Delta h^{(40\text{bar})}} = \frac{0,90 \cdot 17,408 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}}{2618,075 \text{ kJ/kg}} = 0,90 \cdot 6,65 = 5,985 \frac{\text{tn}}{\text{h}}$$

Η αντίστοιχη μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας υπολογίζεται ως :

$$T_{m,in}^{(40bar)} = \frac{h_{B1} - h_O}{s_{B1} - s_O} = \frac{2618,075 \frac{kJ}{kg}}{(6,07 - 0,75) \frac{kJ}{kgK}} = 492,12K \quad \text{ή} \quad T_{m,in}^{(40bar)} = 218,96^\circ C$$

Ο ισεντροπικός θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι

$$\eta_{th,0} = \frac{h_3 - h_{4,id}}{h_3 - h_2} = \frac{h_{B1} - h_{B2}}{h_{B1} - h_O} = \frac{h_g^{(40bar)} - h_c^{x=0.733}}{\Delta h^{(40bar)}} = \frac{(2800,9 - 1965,0) \frac{kJ}{kg}}{2618,075 \frac{kJ}{kg}} = 0,3193$$

Και ο πραγματικός θερμικός βαθμός απόδοσης, θεωρώντας $\eta_{i,T} = 0,85$ για τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης του ατμοστρόβιλου,

$$\eta_{th} = \eta_{th,0} \cdot \eta_{i,T} = 0,3193 \cdot 0,85 = 0,2714$$

Η πραγματική ενθαλπική πτώση κατά την εκτόνωση είναι

$$h_3 - h_4 = \eta_{i,T} \cdot (h_3 - h_{4,id}) = 0,85 \cdot 835,9 = 710,52 \frac{kJ}{kg}$$

Και το πραγματικό σημείο εκτόνωσης

$$h_{B2'} \equiv h_4 = h_3 - \eta_{i,T} \cdot (h_3 - h_{4,id}) = (2800,9 - 710,52) \frac{kJ}{kg} = 2090,385 \frac{kJ}{kg}$$

Με βάση αυτά τα στοιχεία η εσωτερική ισχύς του ατμοστρόβιλου (χωρίς τις μηχανικές απώλειες) είναι

$$P_i = \left\{ \begin{array}{l} \eta_{th} \cdot \dot{Q}_{LS}^{(20bar)} \\ \text{ή} \\ \eta_{th} \cdot \eta_B \cdot \dot{Q}_{FG} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 0,2714 \cdot 5985 \text{ kg/h} \cdot 2618,075 \text{ kJ/kg} \\ \text{ή} \\ 0,2714 \cdot 0,90 \cdot 17,408 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \end{array} \right\} = 4,25 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \quad \text{ή} \quad \frac{P_i}{3600} = 1,18 \text{ MW}$$

Η μηχανική ισχύς στον άξονα του ατμοστρόβιλου, η ηλεκτρική ισχύς που εξάγεται από την ηλεκτρογεννήτρια και η ηλεκτρική ισχύς που μεταφέρεται στο δίκτυο δίνονται στον συγκεντρωτικό πίνακα της επόμενης παραγράφου 10.6.

10.5.3. 3^ο σενάριο : Κύκλος υπέρθερμου ατμού 20 bar / 400 °C

Το τρίτο θερμοδυναμικό σενάριο αποτελείται από έναν κύκλο υπέρθερμου ατμού στα 20 bar / 400 °C. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του ατμού 20 bar/ 400 °C, και οι ιδιότητες του μίγματος ατμού-νερού μετά την εκτόνωση στο συμπυκνωτή. Στο Διάγραμμα-Ι απεικονίζεται από τον κύκλο 0-A-B1-C1-C3-0.

Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού 20 bar / 400 °C (σημείο C1)		Ιδιότητες μίγματος εκτόνωσης		
		σημείο C3		σημείο C3'
Πίεση	20,00 bar a	Πίεση	0,15 bar a	0,15
Θερμοκρασία	400,00 °C	Ενθαλπία	2310,00 kJ/kg	2450,73
Ενθαλπία	3248,2 kJ/kg	Θερμοκρασία	54,0 °C	54,0
Πυκνότητα	6,61 kg/m ³	Πυκνότητα	0,11 kg/m ³	0,11
Εντροπία	7,13 kJ/kgK	Εντροπία	7,13 kJ/kgK	7,56
Ποιότητα ατμού	100 %	Ποιότητα ατμού	87,847473 %	93,77952
Περιοχή IF97	2	Περιοχή IF97	4	4
Φάση	Ατμός	Φάση	Μίγμα	Μίγμα

Με βάση τις παραπάνω τιμές η ενθαλπία που προσδίδεται στο νερό τροφοδοσίας 54 °C ώστε να μετατραπεί σε υπέρθερμο ατμό 20 bar / 400 °C ισούται με

$$\Delta h_{(20/400)} = (h_g^{(20/400)} - h_{fw}) + 0,05(h_f^{(20\text{bar})} - h_{fw}) =$$

$$(3248,2 - 225,9) + 0,05(908,6 - 225,9) = 3056,435 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

η ποσότητα ατμού που παράγεται υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$\dot{m}_{LS} = \frac{\eta_B \cdot \dot{Q}_{FG}}{\Delta h_{(20/400)}} = \frac{0,90 \cdot 17,408 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}}{3056,435 \text{ kJ/kg}} = 0,90 \cdot 5,695 = 5,1255 \frac{\text{tn}}{\text{h}}$$

Η αντίστοιχη μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας υπολογίζεται ως :

$$T_{m,in}^{(20/400)} = \frac{h_{C1} - h_O}{s_{C1} - s_O} = \frac{3056,435 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(7,13 - 0,75) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 479,06\text{K} \quad \text{ή} \quad T_{m,in}^{(20/400)} = 205,91^\circ\text{C}$$

Ο ισεντροπικός θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι

$$\eta_{th,0} = \frac{h_3 - h_{4,id}}{h_3 - h_2} = \frac{h_{C1} - h_{C3}}{h_{C1} - h_O} = \frac{h_g^{(20/400)} - h_c^{x=0,88}}{\Delta h_{(20/400)}} = \frac{(3248,2 - 2310,0) \frac{kJ}{kg}}{3056,435 \frac{kJ}{kg}} = 0,307$$

Και ο πραγματικός θερμικός βαθμός απόδοσης, θεωρώντας $\eta_{i,T} = 0,85$ για τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης του ατμοστρόβιλου,

$$\eta_{th} = \eta_{th,0} \cdot \eta_{i,T} = 0,307 \cdot 0,85 = 0,261$$

Η πραγματική ενθαλπική πτώση κατά την εκτόνωση είναι

$$h_3 - h_4 = \eta_{i,T} \cdot (h_3 - h_{4,id}) = 0,85 \cdot 938,2 = 797,47 \frac{kJ}{kg}$$

Και το πραγματικό σημείο εκτόνωσης

$$h_{C3'} \equiv h_4 = h_3 - \eta_{i,T} \cdot (h_3 - h_{4,id}) = (3248,2 - 797,47) \frac{kJ}{kg} = 2450,73 \frac{kJ}{kg}$$

Με βάση αυτά τα στοιχεία η εσωτερική ισχύς του ατμοστρόβιλου (χωρίς τις μηχανικές απώλειες) είναι

$$P_i = \left\{ \begin{array}{l} \eta_{th} \cdot \dot{Q}_{LS}^{(20bar)} \\ \dot{Q} \\ \eta_{th} \cdot \eta_B \cdot \dot{Q}_{FG} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 0,261 \cdot 5125,5 \text{ kg/h} \cdot 3056,435 \text{ kJ/kg} \\ \dot{Q} \\ 0,261 \cdot 0,90 \cdot 17,408 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \end{array} \right\} = 4,089 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \quad \dot{\eta} \quad \frac{P_i}{3600} = 1,136 \text{ MW}$$

Η μηχανική ισχύς στον άξονα του ατμοστρόβιλου, η ηλεκτρική ισχύς που εξάγεται από την ηλεκτρογεννήτρια και η ηλεκτρική ισχύς που μεταφέρεται στο δίκτυο δίνονται στον συγκεντρωτικό πίνακα της επόμενης παραγράφου 10.6.

10.5.4. 4^ο σενάριο : Κύκλος υπέρθερμου ατμού 40 bar / 400 °C

Το τέταρτο θερμοδυναμικό σενάριο αποτελείται από έναν κύκλο υπέρθερμου ατμού στα 40 bar / 400 °C. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του ατμού 40 bar/ 400 °C, και οι ιδιότητες του μίγματος ατμού-νερού μετά την εκτόνωση στο συμπυκνωτή. Στο Διάγραμμα-Ι απεικονίζεται από τον κύκλο Ο-Α-Β1-С1-С3-Ο.

Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού 40 bar / 400 °C (σημείο C1)		Ιδιότητες μίγματος εκτόνωσης σημείο C3			σημείο C3'
Πίεση	40,00 bar a	Πίεση	0,15 bar a	0,15	
Θερμοκρασία	400,00 °C	Ενθαλπία	2195,00 kJ/kg	2347,91	
Ενθαλπία	3214,4 kJ/kg	Θερμοκρασία	54,0 °C	54,0	
Πυκνότητα	13,62 kg/m ³	Πυκνότητα	0,12 kg/m ³	0,11	
Εντροπία	6,77 kJ/kgK	Εντροπία	6,77 kJ/kgK	7,24	
Ποιότητα ατμού	100 %	Ποιότητα ατμού	82,999994 %	89,44545	
Περιοχή IF97	2	Περιοχή IF97	4	4	
Φάση	Ατμός	Φάση	Μίγμα	Μίγμα	

Με βάση τις παραπάνω τιμές η ενθαλπία που προσδίδεται στο νερό τροφοδοσίας 54 °C ώστε να μετατραπεί σε υπέρθερμο ατμό 40 bar / 400 °C ισούται με

$$\Delta h_{(40/400)} = (h_g^{(40/400)} - h_{fw}) + 0,05(h_f^{(40\text{bar})} - h_{fw}) =$$

$$(3214,4 - 225,9) + 0,05(1087,4 - 225,9) = 3031,575 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

η ποσότητα ατμού που παράγεται υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$\dot{m}_{LS} = \frac{\eta_B \cdot \dot{Q}_{FG}}{\Delta h_{(40/400)}} = \frac{0,90 \cdot 17,408 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}}{3031,575 \text{ kJ/kg}} = 0,90 \cdot 5,74 = 5,166 \frac{\text{tn}}{\text{h}}$$

Η αντίστοιχη μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας υπολογίζεται ως :

$$T_{m,in}^{(40/400)} = \frac{h_{C1} - h_O}{s_{C1} - s_O} = \frac{3031,575 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{(6,77 - 0,75) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} = 503,58\text{K} \quad \text{ή} \quad T_{m,in}^{(40/400)} = 230,42^\circ\text{C}$$

Ο ισεντροπικός θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι

$$\eta_{th,0} = \frac{h_3 - h_{4,id}}{h_3 - h_2} = \frac{h_{C1} - h_{C3}}{h_{C1} - h_O} = \frac{h_g^{(40/400)} - h_c^{x=0.83}}{\Delta h_{(40/400)}} = \frac{(3214,4 - 2195,0) \frac{kJ}{kg}}{3031,575 \frac{kJ}{kg}} = 0,3362$$

Και ο πραγματικός θερμικός βαθμός απόδοσης, θεωρώντας $\eta_{i,T} = 0,85$ για τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης του ατμοστρόβιλου,

$$\eta_{th} = \eta_{th,0} \cdot \eta_{i,T} = 0,3362 \cdot 0,85 = 0,2856$$

Η πραγματική ενθαλπική πτώση κατά την εκτόνωση είναι

$$h_3 - h_4 = \eta_{i,T} \cdot (h_3 - h_{4,id}) = 0,85 \cdot 1019,4 = 866,49 \frac{kJ}{kg}$$

Και το πραγματικό σημείο εκτόνωσης

$$h_{C3'} \equiv h_4 = h_3 - \eta_{i,T} \cdot (h_3 - h_{4,id}) = (3214,4 - 866,49) \frac{kJ}{kg} = 2347,91 \frac{kJ}{kg}$$

Με βάση αυτά τα στοιχεία η εσωτερική ισχύς του ατμοστρόβιλου (χωρίς τις μηχανικές απώλειες) είναι

$$P_i = \left\{ \begin{array}{c} \eta_{th} \cdot \dot{Q}_{LS}^{(20\text{bar})} \\ \dot{Q} \\ \eta_{th} \cdot \eta_B \cdot \dot{Q}_{FG} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 0,2856 \cdot 5166 \text{ kg/h} \cdot 3031,575 \text{ kJ/kg} \\ \dot{Q} \\ 0,2856 \cdot 0,90 \cdot 17,408 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \end{array} \right\} = 4,47 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \quad \dot{Q} \quad \frac{P_i}{3600} = 1,242 \text{ MW}$$

Η μηχανική ισχύς στον άξονα του ατμοστρόβιλου, η ηλεκτρική ισχύς που εξάγεται από την ηλεκτρογεννήτρια και η ηλεκτρική ισχύς που μεταφέρεται στο δίκτυο δίνονται στον συγκεντρωτικό πίνακα της επόμενης παραγράφου 10.6.

10.5.5. 5^ο σενάριο : Κύκλος υπέρθερμου ατμού με αναθέρμανση 40/400/400

Το πέμπτο θερμοδυναμικό σενάριο δεν είναι δυνατό να υλοποιηθεί στην εγκατάσταση του αποτεφρωτήρα του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α., διότι οι κύκλοι αναθέρμανσης είναι οικονομικά βιώσιμοι μόνο σε πολύ μεγάλους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Παρουσιάζεται στη συνέχεια για εκπαιδευτικούς λόγους και για να αποδειχθεί ότι η συνεισφορά στην παραγόμενη ισχύ είναι πολύ μικρή σε σχέση με εκείνη του 4^{ου} θερμοδυναμικού σεναρίου. Κατά συνέπεια το κόστος όχι μόνο της επένδυσης αλλά και της λειτουργίας και συντήρησης ενός τέτοιου σταθμού θα ήταν οικονομικά ασύμφορο. Το σενάριο αυτό αποτελείται από έναν κύκλο υπέρθερμου ατμού στα 40 bar / 400 °C με αναθέρμανση από τα 10 bar στους 400 °C. Στο Διάγραμμα-III απεικονίζεται από τον κύκλο O-A-B1-C1-C2-D1-D2-O. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του υπέρθερμου ατμού 40 bar/ 400 °C (σημείο C1), και οι ιδιότητες του υπέρθερμου ατμού 1^{ης} εκτόνωσης στα 10 bar (σημείο C2).

Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού 40 bar / 400 °C (σημείο C1)			Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού 1 ^{ης} εκτόνωσης σημείο C2			σημείο C2'		
Πίεση	40,00	bar a	Πίεση	10,00	bar a	10,00		
Θερμοκρασία	400,00	°C	Ενθαλπία	2865,00	kJ/kg	2917,41		
Ενθαλπία	3214,4	kJ/kg	Θερμοκρασία	215,5	°C	238,4		
Πυκνότητα	13,62	kg/m ³	Πυκνότητα	4,66	kg/m ³	4,41		
Εντροπία	6,77	kJ/kgK	Εντροπία	6,77	kJ/kgK	6,88		
Ποιότητα ατμού	100	%	Ποιότητα ατμού	100	%	100		
Περιοχή IF97	2		Περιοχή IF97	2		2		
Φάση	Ατμός		Φάση	Ατμός		Ατμός		

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι ιδιότητες του υπέρθερμου ατμού αναθέρμανσης 10 bar / 400 °C, και του μίγματος ατμού-νερού μετά τη 2^η εκτόνωση στο συμπυκνωτή

Ιδιότητες υπέρθερμου ατμού 10 bar / 400 °C (σημείο D1)			Ιδιότητες μίγματος εκτόνωσης σημείο D2			σημείο D2'		
Πίεση	10,00	bar a	Πίεση	0,15	bar a	0,15		
Θερμοκρασία	400,00	°C	Ενθαλπία	2422,00	kJ/kg	2548,36		
Ενθαλπία	3264,4	kJ/kg	Θερμοκρασία	54,0	°C	54,0		
Πυκνότητα	3,26	kg/m ³	Πυκνότητα	0,11	kg/m ³	0,10		
Εντροπία	7,47	kJ/kgK	Εντροπία	7,47	kJ/kgK	7,85		
Ποιότητα ατμού	100	%	Ποιότητα ατμού	92,56849	%	97,89482		
Περιοχή IF97	2		Περιοχή IF97	4		4		

Φάση	Ατμός	Φάση	Μίγμα	Μίγμα
------	-------	------	-------	-------

Με βάση τις παραπάνω τιμές η ενθαλπία που προσδίδεται στο νερό τροφοδοσίας 54 °C ώστε να μετατραπεί σε υπέρθερμο ατμό 40 bar / 400 °C, και μετά την πρώτη εκτόνωση σε υπέρθερμο ατμό αναθέρμανσης 10 bar / 400 °C ισούται με

$$\Delta h_{(40/400/400)} = \Delta h_{(40/400)} + (h_g^{(10/400)} - h_g^{(10/215.5)}) =$$

$$3031,575 + (3264,4 - 2865,0) = 3430,975 \frac{kJ}{kg}$$

η ποσότητα ατμού που παράγεται υπολογίζεται μέσω της σχέσης

$$\dot{m}_{LS} = \frac{\eta_B \cdot \dot{Q}_{FG}}{\Delta h_{(40/400/400)}} = \frac{0,90 \cdot 17,408 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}}{3430,975 \text{ kJ/kg}} = 0,90 \cdot 5,074 = 4,566 \frac{tn}{h}$$

Η αντίστοιχη μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας υπολογίζεται ως :

$$T_{m,in}^{(40/400/400)} = \frac{(h_{C1} - h_O) + (h_{D1} - h_{C2})}{(s_{C1} - s_O) + (s_{D1} - s_{C2})} = \frac{3430,975 \frac{kJ}{kg}}{(7,47 - 0,75) \frac{kJ}{kgK}} = 510,56K \quad \text{ή} \quad T_{m,in}^{(40/40/400)} = 237,40^\circ C$$

Ο ισεντροπικός θερμικός βαθμός απόδοσης του κύκλου είναι

$$\eta_{th,0} = \frac{(h_{C1} - h_{C2}) + (h_{D1} - h_{D2})}{(h_{C1} - h_O) + (h_{D1} - h_{C2})} = \frac{(h_g^{(40/400)} - h_g^{(10/215.5)}) + (h_g^{(10/400)} - h_c^{x=0.925})}{\Delta h_{(40/400/400)}} \Leftrightarrow$$

$$\eta_{th,0} = \frac{\overbrace{(3214,4 - 2865,0)}^{349,4} \frac{kJ}{kg} + \overbrace{(3264,4 - 2422,0)}^{842,4} \frac{kJ}{kg}}{3430,975 \frac{kJ}{kg}} = 0,3474$$

Και ο πραγματικός θερμικός βαθμός απόδοσης, θεωρώντας $\eta_{i,T} = 0,85$ για τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης του ατμοστρόβιλου,

$$\eta_{th} = \eta_{th,0} \cdot \eta_{i,T} = 0,3474 \cdot 0,85 = 0,2953$$

Η πραγματική ενθαλπική πτώση κατά την 1^η εκτόνωση είναι

$$h_{C1} - h_{C2'} = \eta_{i,T} \cdot (h_{C1} - h_{C2}) = 0,85 \cdot 349,4 = 296,99 \frac{kJ}{kg}$$

Και το πραγματικό σημείο 1^{ης} εκτόνωσης

$$h_{C2'} = h_{C1} - \eta_{i,T} \cdot (h_{C1} - h_{C2}) = (3214,4 - 296,99) \frac{kJ}{kg} = 2917,41 \frac{kJ}{kg}$$

Η πραγματική ενθαλπική πτώση κατά την 2^η εκτόνωση είναι

$$h_{D1} - h_{D2'} = \eta_{i,T} \cdot (h_{D1} - h_{D2}) = 0,85 \cdot 842,4 = 716,04 \frac{kJ}{kg}$$

Και το πραγματικό σημείο 2^{ης} εκτόνωσης

$$h_{D2'} = h_{D1} - \eta_{i,T} \cdot (h_{D1} - h_{D2}) = (3264,4 - 716,04) \frac{kJ}{kg} = 2548,36 \frac{kJ}{kg}$$

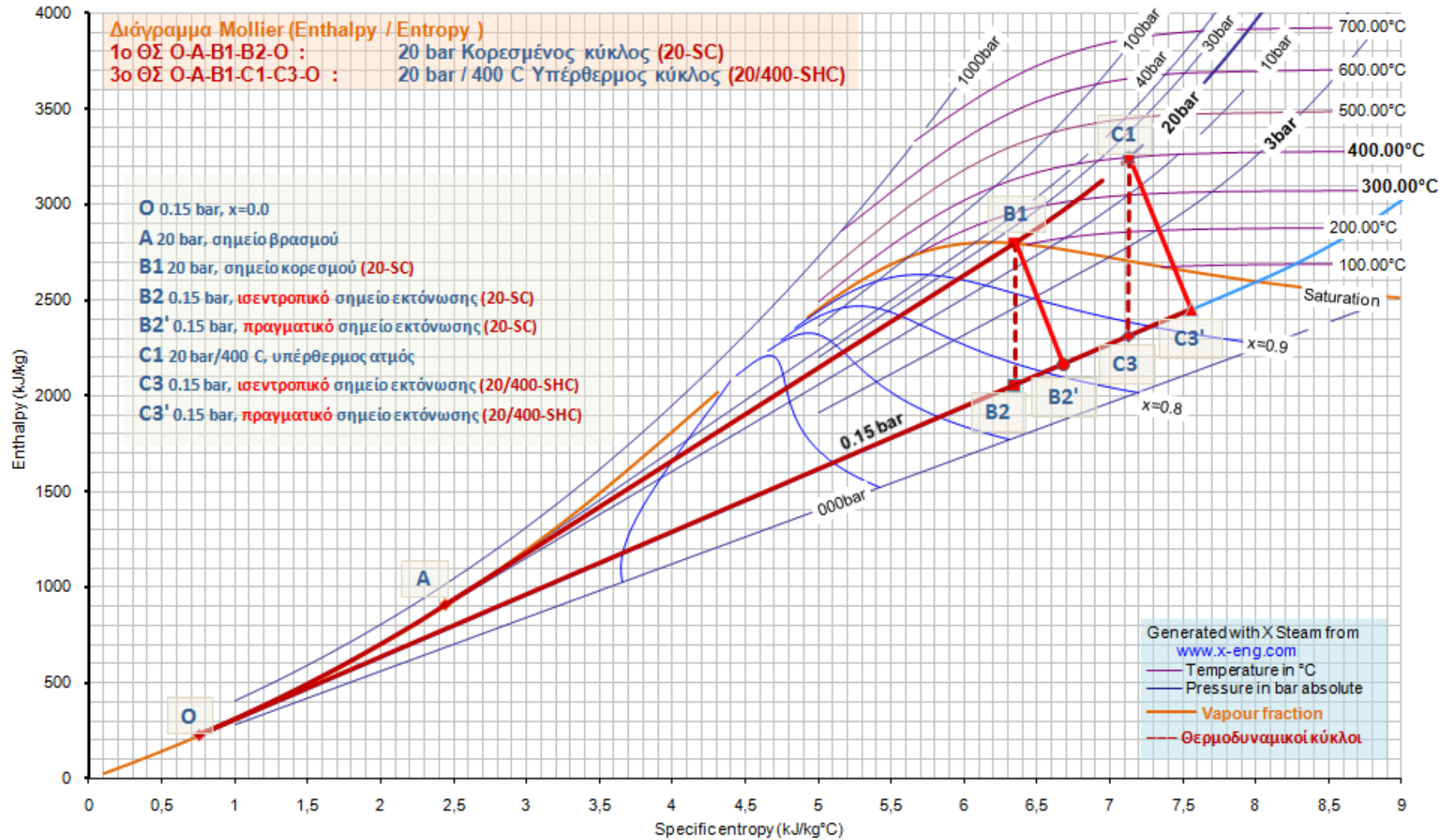
Με βάση αυτά τα στοιχεία η εσωτερική ισχύς του ατμοστρόβιλου (χωρίς τις μηχανικές απώλειες) είναι

$$P_i = \left\{ \begin{array}{c} \eta_{th} \cdot \dot{Q}_{LS}^{(20bar)} \\ \dot{q} \\ \eta_{th} \cdot \eta_B \cdot \dot{Q}_{FG} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} 0,2953 \cdot 4566 \text{ kg/h} \cdot 3430,975 \text{ kJ/kg} \\ \dot{q} \\ 0,2953 \cdot 0,90 \cdot 17,408 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \end{array} \right\} = 4,63 \cdot 10^6 \text{ kJ/h} \quad \dot{\eta} \quad \frac{P_i}{3600} = 1,285 \text{ MW}$$

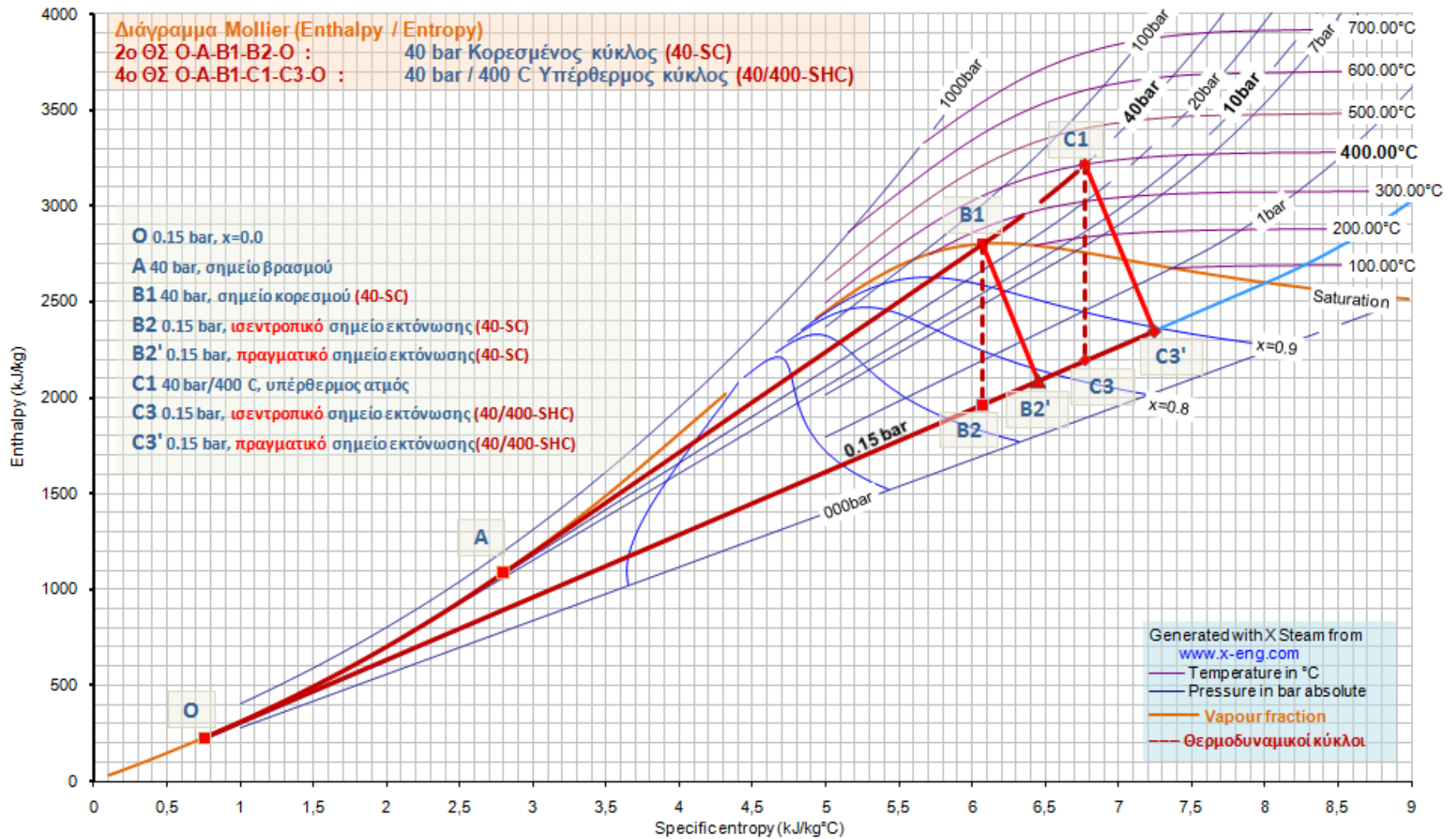
Η μηχανική ισχύς στον άξονα του ατμοστρόβιλου, η ηλεκτρική ισχύς που εξάγεται από την ηλεκτρογεννήτρια και η ηλεκτρική ισχύς που μεταφέρεται στο δίκτυο δίνονται στον συγκεντρωτικό πίνακα της επόμενης παραγράφου 10.6.

ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ

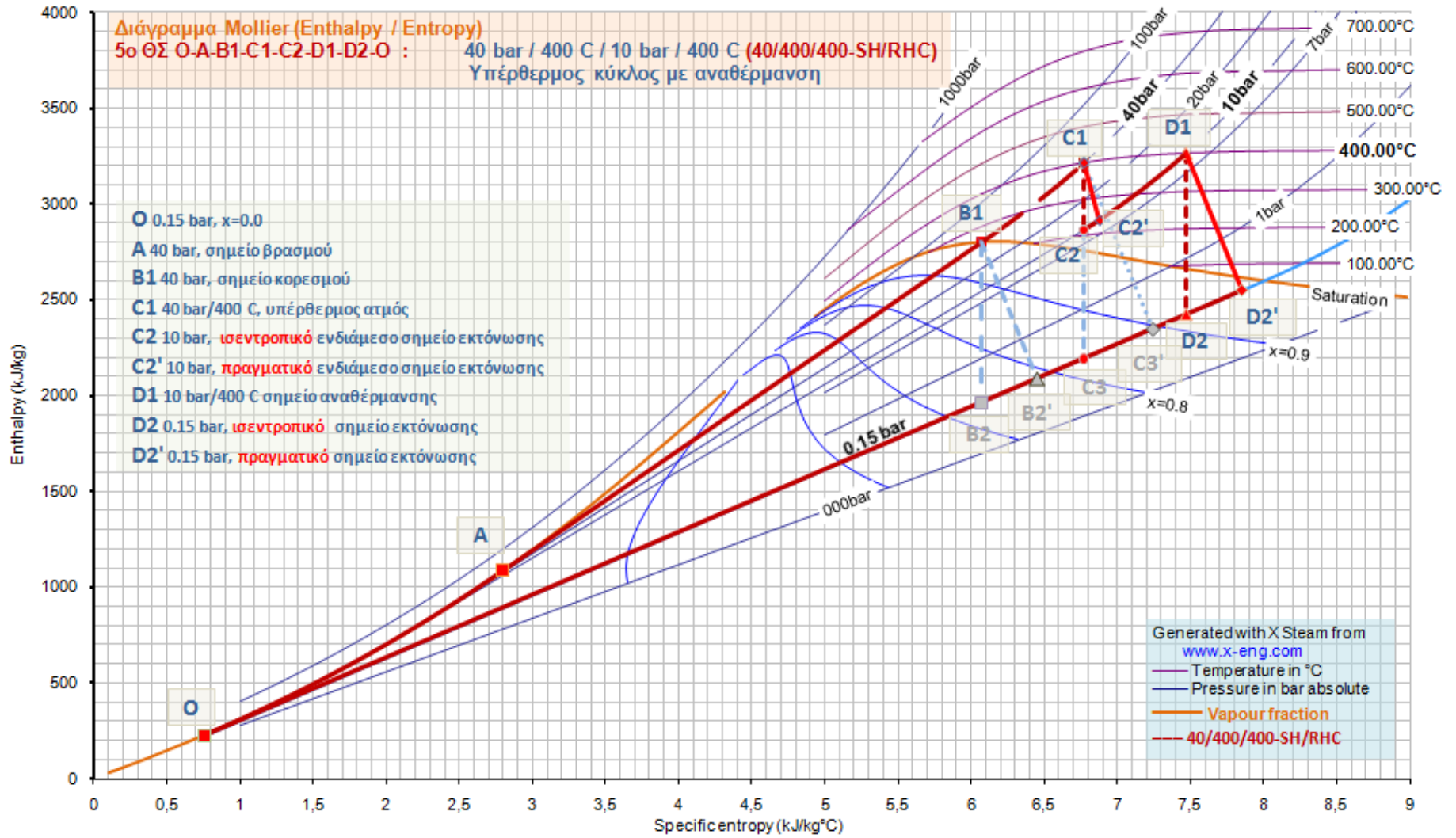
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ - I



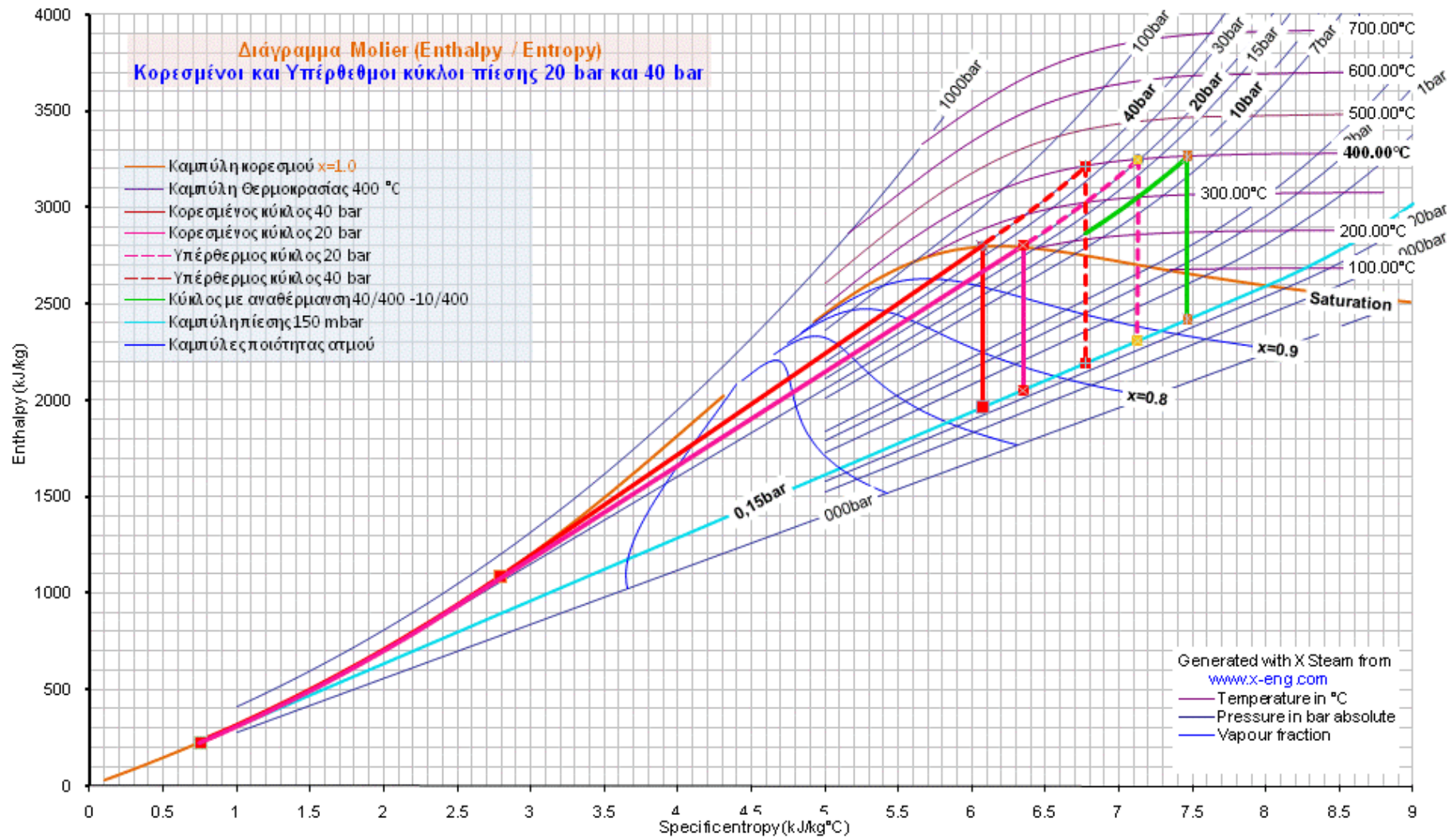
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ - II



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ - III



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ - IV



10.6. Συζήτηση αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα-Α που ακολουθεί συνοψίζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα από τη θερμοδυναμική ανάλυση των εναλλακτικών σεναρίων που προηγήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο 10.5. Στη συνέχεια σχολιάζεται η εγκυρότητά τους σε επιμέρους παραγράφους.

Πίνακας 10-Α: Συγκριτικός πίνακας θερμοδυναμικών δεδομένων των 5 θ.σ.						
Θερμοδυναμικά δεδομένα		1° θ.σ.	2° θ.σ.	3° θ.σ.	4° θ.σ.	5° θ.σ.
		20 bar sat	40 bar sat	20/400	40/400	40/400/400
Ενθαλπία ενεργού ατμού	$\Delta h_{LS} \left(\frac{kJ}{kg} \right)$	2606,635	2618,075	3056,435	3031,575	3430,975
Μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας	$T_{m,in} = \frac{\Delta h_{LS}}{\Delta s_{LS}} (^{\circ}C)$	193,14	218,96	205,91	230,42	237,40
Παροχή ενεργού ατμού	$\dot{m}_{LS} \left(\frac{kg}{h} \right)$	6012	5985	5126	5166	4566
Θεωρητική ειδική κατανάλωση ατμού	$TSR = \frac{3600}{\Delta h_{exp}} \left(\frac{kg}{kWh} \right)$	4,82	4,31	3,84	3,53	3,02
Πραγματική ειδική κατανάλωση ατμού	$ASR = \frac{TSR}{\eta_{i,T}} \left(\frac{kg}{kWh} \right)$	5,67	5,07	4,52	4,15	3,55
Ισεντροπικός θερμικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{th,0} = \frac{h_3 - h_{4,id}}{h_3 - h_2}$	28,63	31,93	30,70	33,62	34,74
Πραγματικός θερμικός βαθμός απόδοσης	$\eta_{th} = \eta_{th,0} \cdot \eta_{i,T}$	24,34	27,14	26,10	28,56	29,53
Ποιότητα ατμού εκροής	$x(\%)$	81,69	78,59	93,78	89,44	97,89

10.6.1. Ενθαλπία ενεργού ατμού

Σύγκριση των δύο κύκλων κορεσμένου ατμού στα 20 και στα 40 bar :

Αυξανόμενη της πίεσης μειώνεται η θερμότητα ατμοποίησης, αλλά αυξάνεται η ενθαλπία του υπόψυκτου νερού. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η αύξηση της προσδιδόμενης ενθαλπίας στον ενεργό ατμό :

$$\Delta h_{LS}^{(20bar)} < \Delta h_{LS}^{(40bar)}$$

Σύγκριση κορεσμένου και υπέρθερμου κύκλου της αυτής πίεσης :

Κάθε υπέρθερμος κύκλος συγκεκριμένης πίεσης διαφέρει από τον αντίστοιχο του κορεσμένο ως προς τη θερμότητα υπερθέρμανσης, η οποία προστίθεται στην ενθαλπία του κορεσμένου ατμού :

$$\Delta h_{LS}^{(20bar)} < \Delta h_{LS}^{(20/400)} \quad \text{και} \quad \Delta h_{LS}^{(40bar)} < \Delta h_{LS}^{(40/400)}$$

Σύγκριση των δύο κύκλων υπέρθερμου ατμού 20/400 και 40/400 :

Η σύγκριση μεταξύ δύο κύκλων υπέρθερμου ατμού είναι αντικειμενική όταν μία τουλάχιστον παράμετρος είναι κοινή και στους δύο κύκλους. Στην περίπτωσή μας, η κοινή παράμετρος είναι η θερμοκρασία υπερθέρμανσης, 400 °C. Δύο είναι οι παράγοντες που καθορίζουν την τελική ενθαλπία του ενεργού ατμού :

- η θερμότητα υπερθέρμανσης, η οποία, για δεδομένη θερμοκρασία, είναι μικρότερη για μεγαλύτερες πιέσεις, δηλ. :

$$\Delta h_{SH}^{p_1} < \Delta h_{SH}^{p_2} \quad \text{όταν} \quad p_1 > p_2$$

- η θερμότητα ατμοποίησης, η οποία είναι μεγαλύτερη για μικρότερες πιέσεις, δηλ. :

$$\Delta h_V^{p_1} < \Delta h_V^{p_2} \quad \text{όταν} \quad p_1 > p_2$$

Η συνεισφορά των δύο αντανακλάται στην τελική προσδιδόμενη ενθαλπία του ενεργού ατμού, οπότε στην περίπτωσή μας προκύπτει :

$$\Delta h_{LS}^{(20/400)} > \Delta h_{LS}^{(40/400)}$$

Ο υπέρθερμος κύκλος με αναθέρμανση :

Η αναθέρμανση αυξάνει τη μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας, καθώς η μέση θερμοκρασία αναθέρμανσης είναι υψηλότερη από του απλού κύκλου, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο 9.4.1.2. Σε κάθε περίπτωση η αναθέρμανση προσθέτει επιπλέον θερμότητα στον ενεργό ατμό αυξάνοντας την ενθαλπία του. Συνεπώς, όπως ήταν αναμενόμενο, η ενθαλπία του ενεργού ατμού στον κύκλο με αναθέρμανση είναι η μεγαλύτερη μεταξύ όλων των θερμοδυναμικών σεναρίων που εξετάστηκαν.

10.6.2. Παροχή ενεργού ατμού

Η παροχή του ενεργού ατμού ακολουθεί αντίστροφα τη μεταβολή της περιεχόμενης σε αυτόν ενθαλπίας, όταν το προς ανάκτηση θερμικό περιεχόμενο των καυσαερίων παραμένει σταθερό. Έτσι, για την ανάκτηση του αυτού ποσού θερμότητας των καυσαερίων, η ποσότητα του παραγόμενου ατμού είναι περισσότερη (λιγότερη) για χαμηλής (υψηλής) ενθαλπίας ενεργό ατμό.

10.6.3. Θερμικός βαθμός απόδοσης

Ο θερμικός βαθμός απόδοσης του ιδανικού κύκλου $\eta_{th,0}$:

Όπως είναι γνωστό, πρόκειται για το λόγο του έργου άνευ απωλειών, που παράγεται κατά την εκτόνωση του ενεργού ατμού στον ατμοστρόβιλο, προς την περιεχόμενη ενθαλπία. Υπενθυμίζεται ότι σε όλα τα θ.σ. έχει επιλεγεί ως «κρύο σημείο» η εκτόνωση στα 150 mbar. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο $\eta_{th,0}$ των υπέρθερμων κύκλων είναι μεγαλύτερος των κορεσμένων της αυτής πίεσης, καθώς επίσης και :

1. Μεταξύ δύο κορεσμένων κύκλων διαφορετικής πίεσης, μεγαλύτερο $\eta_{th,0}$ εμφανίζει ο κύκλος με την υψηλότερη πίεση. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται τόσο στην υψηλότερη μέση θερμοκρασία προσδιδόμενης θερμότητας, η οποία αυξάνει την ενθαλπία του ενεργού ατμού, όσο και στην υψηλότερη ενθαλπική πτώση κατά την εκτόνωση στην ίδια υποπίεση, έτσι :

$$\eta_{th,0}^{(20bar)} < \eta_{th,0}^{(40bar)}$$

2. Μεταξύ δύο κύκλων υπέρθερμου ατμού διαφορετικής πίεσης, αλλά ίδιας θερμοκρασίας, μεγαλύτερο $\eta_{th,0}$ εμφανίζει εκείνος με την υψηλότερη πίεση. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορά στο έργο εκτόνωσης υπερिशύει της διαφοράς της προσδιδόμενης ενθαλπίας, παρόλο που η ενθαλπία του ενεργού ατμού είναι υψηλότερη για μικρότερες πιέσεις, έτσι :

$$\eta_{th,0}^{(20/400)} < \eta_{th,0}^{(40/400)}$$

3. Ο $\eta_{th,0}^{(40/400/400)}$ του κύκλου με αναθέρμανση είναι μεγαλύτερος σε κάθε περίπτωση, για τους ίδιους λόγους όπως στην περίπτωση 1.

Ο πραγματικός θερμικός βαθμός απόδοσης η_{th} :

Έχοντας δεχθεί ως ισεντροπικό βαθμό απόδοσης $\eta_{i,T} = 0,85$ για όλα τα θ.σ., ο πραγματικός θερμικός β.α. ακολουθεί την τάση του $\eta_{th,0}$ του ιδανικού κύκλου.

10.6.4. Ποιότητα ατμού εκροής

Συγκρίνοντας τους κορεσμένους κύκλους διαπιστώνεται το αναμενόμενο από τη θεωρία, ότι αυξανόμενη της πίεσης λειτουργίας του κύκλου μειώνεται η ποιότητα του ατμού. Το αυτό συμπέρασμα ισχύει και για τους κύκλους υπέρθερμου ατμού. Στο Διάγραμμα-III παρακάτω απεικονίζονται οι ιδανικοί και οι πραγματικοί κύκλοι των πέντε θ.σ. Λόγω μη-αδιαβατικής εκτόνωσης ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης $\eta_{i,T}$ μετατοπίζει το σημείο εκροής δεξιότερα στον άξονα των ειδικών εντροπιών αυξάνοντας την ποιότητα του ατμού υπό το κόστος του μειωμένου παραγόμενου έργου.

Μεταξύ ενός κορεσμένου και ενός υπέρθερμου κύκλου της αυτής πίεσης λειτουργίας, τη μεγαλύτερη υγρασία στον ατμό (χαμηλή ποιότητα) εμφανίζει ο κορεσμένος. Η υπερθέρμανση δηλ. λειτουργεί ως εμπόδιο στην πρόωρη υγραποίηση του ατμού.

$$\begin{aligned} x^{(20bar)} > x^{(40bar)} & \quad \text{και} \quad x^{(20/400)} > x^{(40/400)} \\ x^{(20bar)} < x^{(20/400)} & \quad \text{και} \quad x^{(40bar)} < x^{(40/400)} \end{aligned}$$

Η προσθήκη ενός σταδίου αναθέρμανσης βελτιώνει ακόμη θετικότερα την ποιότητα του ατμού, και πράγματι, ο ατμός εκροής του 5^{ου} θ.σ. είναι ποιότητας $x=97,89$ %.

Στους κορεσμένους κύκλους η διεργασία της εκτόνωσης λαμβάνει χώρα εξ' ολοκλήρου στη δι-φασική περιοχή των θερμοδυναμικών διαγραμμάτων (Mollier ή T-s). Υπαρξη υγρασίας από τις πρώτες κιόλας βαθμίδες του ατμοστρόβιλου έχει ως αποτέλεσμα τη μηχανική διάβρωσή τους, η οποία γίνεται εντονότερη στις τελευταίες βαθμίδες. Επίσης, τα σταγονίδια που δημιουργούνται δεν αποδίδουν έργο. Μάλιστα δε, προκαλούν πέδηση στα πτερύγια και πρόσθετες απώλειες ισχύος, (παράγραφοι 7.2.4 και 9.3.1 παραπάνω).

10.6.5. Ειδικές καταναλώσεις ατμού

Η θεωρητική ειδική κατανάλωση ατμού (TSR) εκφράζει την ποσότητα του ατμού που απαιτείται από τον ατμοστρόβιλο, υπό συνθήκες ισεντροπικής εκτόνωσης, για την παραγωγή μιας δεδομένης μονάδας έργου, συνήθως 1 kWh. Η πραγματική ειδική κατανάλωση ατμού (ASR) υπολογίζεται διαιρώντας την θεωρητική με το συντελεστή $\eta_{i,T}$:

$$TSR = \frac{3600}{\Delta h_{\text{exp}}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right) \quad \text{και} \quad ASR = \frac{TSR}{\eta_{i,T}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right)$$

Όσο μεγαλύτερη είναι η ενθαλπική πτώση κατά την εκτόνωση στον ατμοστρόβιλο τόσο μικρότερη ποσότητα ατμού απαιτείται για την παραγωγή 1 kWh. Το συμπέρασμα αυτό είναι προφανές από τις τιμές του Πίνακα-Α.

10.6.6. Παραγόμενη ισχύς και συνολικός βαθμός απόδοσης

Στον επόμενο Πίνακα 10-Β παρουσιάζονται για κάθε ένα θ.σ. η παραγόμενη ισχύς του θερμοδυναμικού κύκλου καθώς και οι ισχείς που λαμβάνονται στον άξονα του ατμοστρόβιλου, στην ηλεκτρογεννήτρια, και τέλος η ισχύς που μεταφέρεται στο δίκτυο. Οι τιμές των διαφόρων βαθμών απόδοσης του συστήματος δόθηκαν στον προηγούμενο Πίνακα 10-5.

Πίνακας 10-Β: Συγκριτικός πίνακας παραγόμενης ισχύος για τα 5 θ.σ.						
Είδος Ισχύος	Σχέση υπολογισμού (MW)	1 ^ο θ.σ.	2 ^ο θ.σ.	3 ^ο θ.σ.	4 ^ο θ.σ.	5 ^ο θ.σ.
		20 bar sat	40 bar sat	20/400	40/400	40/400/400
Εσωτ. ισχύς ατμοστρ/λου	$P_i = \eta_{th} \cdot \dot{Q}_{LS}$	1,059	1,18	1,136	1,242	1,285
Ισχύς στον άξονα του ατμοστρ/λου	$P_m = \eta_m \cdot P_i$	1,006	1,121	1,079	1,180	1,221
Ισχύς ηλεκτρογεννήτριας	$P_{Gen} = \eta_{Gen} \cdot P_m$	0,926	1,031	0,993	1,086	1,123
Ισχύς στο δίκτυο	$P_{ne} = \eta_{aux} \cdot P_{Gen}$	0,833	0,928	0,894	0,977	1,011
Ισχύς ανά τόνο Ε.Ι.Α.	$\bar{P}_{ne} = \frac{P_{ne}}{\dot{m}_w} \text{ (MWh)}$	0.757	0.844	0.812	0.888	0.919
$\eta_{ne} = \eta_B \cdot \eta_{th} \cdot \eta_m \cdot \eta_{Gen} \cdot \eta_{aux} \cdot \eta_{sf}$ Συνολικός βαθμός απόδοσης σταθμού		15.51	17.29	16.63	18.20	18.81

Η σχέση της παραγόμενης ισχύος ως προς τις συνθήκες του ενεργού ατμού δεν θα μπορούσε να είναι διαφορετική από τη συμπεριφορά των χαρακτηριστικών μεγεθών που εξετάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Έτσι, αυξανόμενου του θερμικού βαθμού απόδοσης αυξάνεται το τελικό παραγόμενο έργο. Αξίζει να παρατηρήσουμε τα εξής :

- Μεταξύ δύο κύκλων κορεσμένου ατμού, ο κύκλος της υψηλότερης πίεσης εμφανίζει το μεγαλύτερο συνολικό βαθμό απόδοσης και τη μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ,
- Μεταξύ δύο κύκλων υπέρθερμου ατμού ίδιας θερμοκρασίας υπερθέρμανσης, αποδοτικότερος είναι εκείνος με την υψηλότερη πίεση,
- Ένας υπέρθερμος κύκλος είναι αποδοτικότερος του κορεσμένου της αυτής πίεσης λειτουργίας, και
- Η απόδοση ενός κύκλου με αναθέρμανση είναι βελτιωμένη σε κάθε περίπτωση.

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{ne}^{(20bar)} < \eta_{ne}^{(40bar)} \\ P_{ne}^{(20bar)} < P_{ne}^{(40bar)} \end{array} \right\} \text{ και } \left\{ \begin{array}{l} \eta_{ne}^{(20/400)} < \eta_{ne}^{(40/400)} \\ P_{ne}^{(20/400)} < P_{ne}^{(40/400)} \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{ne}^{(20bar)} < \eta_{ne}^{(20/400)} \\ P_{ne}^{(20bar)} < P_{ne}^{(20/400)} \end{array} \right\} \text{ και } \left\{ \begin{array}{l} \eta_{ne}^{(40bar)} < \eta_{ne}^{(40/400)} \\ P_{ne}^{(40bar)} < P_{ne}^{(40/400)} \end{array} \right\}$$

10.6.7. Το κριτήριο R1

Ο επόμενος Πίνακας 10-Γ συνοψίζει για τα πέντε θ.σ. τους δείκτες της φόρμουλας R1, (παράγραφοι 5.4 και 10.4.5 παραπάνω). Η τιμή της περιεχόμενης στα Ε.Ι.Α λαμβάνεται από τον Πίνακα 10-7, ενώ η καθαρή παραγόμενη ισχύς είναι $E_{ne} = \eta_{sf} P_{ne}$, όπου P_{ne} (GJ/y) η ισχύς του Πίνακα 10-B, και αντιστοιχεί στην ισχύ που παρέχεται από τον σταθμό στο εθνικό δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Πίνακας 10-Γ: Συγκριτικός πίνακας φόρμουλας R1 για τα 5 θ.σ.					
	1 ^ο σενάριο	2 ^ο σενάριο	3 ^ο σενάριο	4 ^ο σενάριο	5 ^ο σενάριο
$R1 = \frac{2,6 \cdot E_{ne}}{0,97 \cdot E_w}$	0.43	0.48	0.46	0.50	0.52

Όπως είναι φανερό, η φόρμουλα R1 είναι ανάλογη της καθαρής παραγόμενης ισχύος E_{ne} και αντιστρόφως ανάλογη του ενεργειακού περιεχόμενου των αποβλήτων E_w . Όσο περισσότερη ισχύς παράγεται από την ίδια ποιότητα αποβλήτων τόσο υψηλότερος είναι ο δείκτης της φόρμουλας R1.

Σύμφωνα με την οδηγία 2008/98/EC για τα απόβλητα, για να χαρακτηριστεί μία εγκατάσταση αποτέφρωσης αποβλήτων ως σταθμός ανάκτησης «Ενέργειας-από-Απόβλητα» θα πρέπει ο δείκτης της φόρμουλας R1 να παίρνει τις ελάχιστες τιμές 0,60 για σταθμούς που λειτουργούν και αδειοδοτήθηκαν πριν την 1^η Ιανουαρίου 2009, και 0,65 για σταθμούς που λειτουργούν και αδειοδοτήθηκαν μετά την 31^η Δεκεμβρίου 2008, όπως ειπώθηκε σε προηγούμενη παράγραφο 5.4. Η εγκατάσταση αποτέφρωσης Ε.Ι.Α. του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. στα Άνω Λιόσια αποτελεί μία ιδιαίζουσα περίπτωση, καθώς, ναι μεν έχει αδειοδοτηθεί πριν την 1^η Ιανουαρίου 2009, από την άλλη δε, η γραμμή παραγωγής της σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και λειτουργεί με μοναδικό σκοπό την καταστροφή των Ε.Ι.Α. με θερμικές διεργασίες. Ως τέτοια, δεν φέρει εγκαταστάσεις ανάκτησης θερμότητας. Η μελλοντική αναβάθμιση της εγκατάστασης με ενσωμάτωση μονάδας ανάκτησης θερμότητας και παραγωγής ισχύος, ίσως την κατέταττε στη δεύτερη κατηγορία των νεο-αδειοδοτούμενων σταθμών μετά την 31^η Δεκεμβρίου 2008. Σε κάθε περίπτωση, από τις τιμές του Πίνακα-Γ γίνεται φανερό ότι επ' ουδενί δεν μπορεί να συμβεί η αναβάθμιση του χαρακτήρα της παρούσας εγκατάστασης στην ιεράρχηση της διαχείρισης των αποβλήτων, Σχήμα 5-6.

Ο αποκλεισμός αυτός αφορά τα αποτελέσματα των ανωτέρω πέντε θ.σ. για παραγωγή αποκλειστικά ηλεκτρικής ισχύος. Η περίπτωση της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για βιομηχανική χρήση ή τηλεθέρμανση, ίσως ανέτρεπε το ανωτέρω πόρισμα. Εξαιτίας, όμως απουσίας υποδομών και πελατών -βιομηχανικών μονάδων και συνοικισμών- στη γύρω περιοχή, η περίπτωση αυτή δεν κρίθηκε σκόπιμο να εξεταστεί.

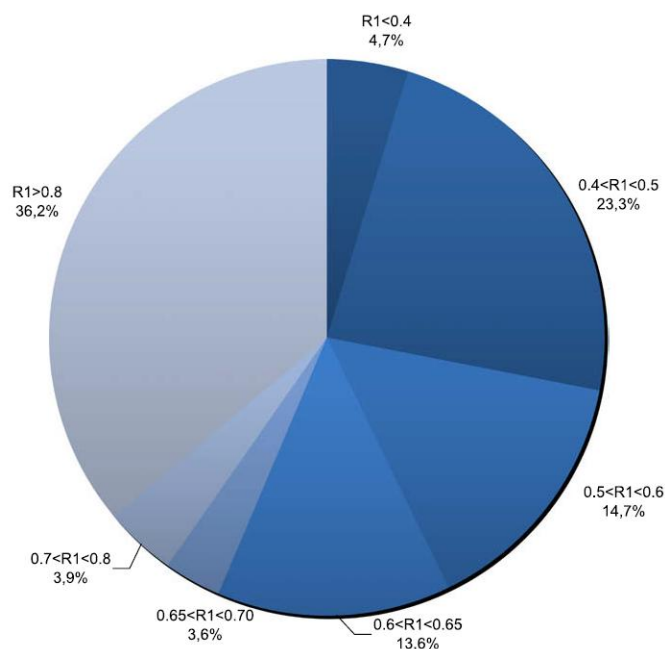
Στη συνέχεια συγκρίνονται οι συνολικοί βαθμοί απόδοσης του Πίνακα 10-B και οι δείκτες της φόρμουλας R1 του Πίνακα 10-Γ, με τις αντίστοιχες τιμές παρόμοιων σταθμών ανάκτησης «Ενέργειας-από-Απόβλητα» ανά την Ευρώπη.

10.6.8. Σύγκριση με βιβλιογραφία

Ο μέσος όρος συνολικής απόδοσης για παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ισχύος από σταθμούς EfW –κυρίως αστικά στερεά απόβλητα- στην Ευρώπη είναι 13%, [14,30], και είναι συγκρίσιμη με τις τιμές η_{ne} του Πίνακα 10-B για τα πέντε θ.σ. που εξετάστηκαν προηγουμένως. Επίσης, από την ίδια πηγή [14] γνωρίζουμε ότι η παραγόμενη ισχύς ανά τόνο στερεών αστικών αποβλήτων κυμαίνεται μεταξύ 0,3 MWh και 0,7 MWh, ανάλογα με την ποσότητα του ενεργού ατμού, την Κ.Θ.Δ. των αποβλήτων (8-12 MJ/kg), τις συνθήκες του ενεργού ατμού και την απόδοση των επιμέρους συστημάτων. Στην περίπτωσή μας, με μέση Κ.Θ.Δ. των Ε.Ι.Α. τα 15 MJ/kg, Πίνακας 10-6, η παραγόμενη ισχύς ανά τόνο αποτεφρωθέντων Ε.Ι.Α. κυμαίνεται μεταξύ 0,757-0,919 MWh/t.

Η ενεργειακή απόδοση σύμφωνα με τη φόρμουλα R1 υπολογίστηκε στην εργασία των [18], η οποία βασίστηκε σε στοιχεία ευρωπαϊκών σταθμών EfW δυναμικότητας άνω των 15 t/day ή 10.000 t/y. Όλα τα δεδομένα αφορούν το έτος 2004 με εξαίρεση τη Γερμανία (2005). Συνεπώς, το κατώφλι του δείκτη της φόρμουλας R1 είναι η τιμή 0,60.

Στο επόμενο Σχήμα 10-2, επεικονίζεται η κατάταξη των ευρωπαϊκών σταθμών αποτέφρωσης αποβλήτων EfW ανάλογα με την τιμή του δείκτη R1. Σχεδόν το 60% αυτών υπερβαίνει το κατώφλι 0,60 και μπορούν να χαρακτηριστούν ως σταθμοί «ανάκτησης». Οι υπόλοιποι δεν ικανοποιούν την οδηγία 2008/98/EC, καθώς ο δείκτης R1 παίρνει τιμές 0,40-0,50, και συνεπώς κατατάσσονται ως σταθμοί «απόθεσης». Ένα σημαντικό ποσοστό (36%) έχει δείκτη R1 πάνω από 0,80 και χαρακτηρίζονται ως υψηλής απόδοσης. Πρόκειται για σταθμούς συμπαραγωγής, με μεγάλη δυναμικότητα διαχείρισης αποβλήτων -οπότε επωφελούνται των οικονομιών κλίμακας. Οι σταθμοί αυτοί είναι εγκατεστημένοι στη Βόρεια Ευρώπη. Από την άλλη, τον χαρακτηρισμό «απόθεσης» λαμβάνουν σταθμοί EfW οι οποίοι παράγουν αποκλειστικά ηλεκτρική ισχύ, ή σταθμοί συμπαραγωγής με δυναμικότητα κάτω των 200.000 t/y. Οι περισσότεροι από αυτούς τους σταθμούς βρίσκονται στη Νότια Ευρώπη.



Σχήμα 10-2: Κατάταξη ευρωπαϊκών σταθμών EfW σύμφωνα με τον δείκτη R1, [18].

Ως παραδείγματα σταθμών EfW στη Βόρεια Ευρώπη με υψηλούς δείκτες R1 αναφέρουμε το σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος από στερεά αστικά απόβλητα του Amsterdam με $R1=0,91$ και $\eta_{ne} = 34\%$, και το σταθμό συμπαραγωγής του Gothenburg με $R1=1,42$, $\eta_{ne} = 17\%$ για ηλεκτρισμό και $\eta_{nth} \approx 85\%$ για θερμότητα χρήσης, [30]. Στην ίδια

αναφορά [30] ένας τυπικός σταθμός EfW ηλεκτρικής ισχύος, με συνθήκες ενεργού ατμού 40 bar / 380 °C, ο δείκτης R1 υπολογίστηκε $R1=0,64$ με απόδοση $\eta_{ne} = 20,6\%$

Ο επόμενος Πίνακας 10-Δ κατατάσσει την απόδοση κατά R1 των σταθμών EfW ανάλογα με τον τύπο τους. Η συμπαραγωγή φαίνεται πως είναι η μόνη επιλογή που επιτρέπει την επίτευξη υψηλών τιμών του δείκτη R1, και μάλιστα για δυναμικότητες άνω των 250.000 t/y.

Πίνακας 10-Δ. Μέση τιμή δείκτη R1 κατά τύπο σταθμού EfW, [18].		
Τύπος σταθμού EfW	Μέση τιμή δείκτη R1	Μέση δυναμικότητα (t/y)
Συμπαραγωγής (CHP)	0,71	230.000
Ηλεκτρικής ισχύος	0,49	150.000
Θερμότητας	0,64	90.000

Η διαφορά στον δείκτη R1 μεταξύ σταθμών EfW τη Βόρειας και της Νότιας Ευρώπης φαίνεται στον επόμενο Πίνακα 10-Ε. Όπως γίνεται φανερό, η Νότια Ευρώπη εμφανίζει το χαμηλότερο δείκτη R1. Αυτό οφείλεται σε δύο κυρίως παράγοντες :

1. Οι μικροί σταθμοί υπερτερούν σε αριθμό τους μεγάλους, οπότε δεν επωφελούνται των οικονομιών κλίμακας, της καλύτερης απόδοσης των μεγάλων ατμοστρόβιλων εν συγκρίσει με τους μικρούς, και των σχετικά μειωμένων ενεργειακών απαιτήσεων για τον βοηθητικό εξοπλισμό του σταθμού (η_{aux}).
2. Οι κλιματικές συνθήκες του Νότου καθιστούν την εναλλακτική χρήση της θερμότητας για βιομηχανική χρήση ή τηλεθέρμανση οικισμών λιγότερο ελκυστική. Έτσι, η πλειοψηφία των σταθμών EfW της Νότιας Ευρώπης παράγει αποκλειστικά ηλεκτρισμό.

Πίνακας 10-Ε. Μέση τιμή δείκτη R1 ανά ευρωπαϊκή περιοχή, [18].	
Περιοχή	Μέση τιμή δείκτη R1
Βόρεια Ευρώπη	0,86
Κεντρική Ευρώπη	0,57
Νότια Ευρώπη	0,45

Από τα παραπάνω, για την περίπτωση του αποτεφρωτήρα Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. έχοντας υπόψη :

- τη μικρή δυναμικότητα της σημερινής εγκατάστασης, 9.000 t/y,
- την αδυναμία επέκτασης της ως άνω δυναμικότητας, λόγω έλλειψης χώρου,
- το θερμό κλίμα της Αττικής,
- την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, αποκλειστικά,
- την έλλειψη υποδομών και πελατών για την πώληση θερμού ατμού βιομηχανικής χρήσης και τηλεθέρμανσης οικισμών,

οι τιμές του δείκτη R1 (Πίνακας 10-Γ) για τα πέντε θ.σ. είναι εφικτές και δικαιολογούνται πλήρως.

10.6.9. Η βέλτιστη επιλογή

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται αξιολόγηση των πέντε θ.σ. με σκοπό την επιλογή του βέλτιστου εξ αυτών, σε περίπτωση πραγματοποίησης της νέας μονάδας ανάκτησης θερμότητας. Όπως προέκυψε από τη συζήτηση της προηγούμενη παράγραφο 10.6.7 για το δείκτη R1, η εγκατάσταση αποτέφρωσης Ε.Ι.Α. του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. δεν μπορεί να αναβαθμιστεί στην ιεράρχηση της διαχείρισης αποβλήτων και να χαρακτηριστεί ως «ανάκτησης». Ακόμη και αν αποφασιστεί από τη διοίκηση του συνδέσμου η υλοποίηση της μονάδας ανάκτησης θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρισμού, ο χαρακτηρισμός του νέου σταθμού θα διατηρηθεί ως «απόθεσης».

Η βέλτιστη επιλογή είναι σκόπιμο να βασίζεται σε ορισμένα λογικά κριτήρια, ποιοτικά και ποσοτικά, τα οποία στην περίπτωση του αποτεφρωτήρα Ε.Ι.Α. του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. είναι :

1. Η καθαρή παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς και ο συνολικός βαθμός απόδοσης,
2. Το κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης,
3. Η έλλειψη χώρου για ευρεία επέκταση της εγκατάστασης.

Με βάση το πρώτο κριτήριο, η βέλτιστη επιλογή είναι ασφαλώς το 5^ο θ.σ. με τον υπέθερμο κύκλο μίας αναθέρμανσης 40/400/400, (βλ. απόσπασμα του Πίνακα 10-B παρακάτω). Όπως, όμως, τονίστηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, το σενάριο αυτό δεν είναι ρεαλιστικό για την περίπτωση της εγκατάστασης αποτέφρωσης Ε.Ι.Α. του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. λόγω της πολύ μικρής δυναμικότητας διαχείρισης Ε.Ι.Α. Η επιλογή αυτή καθιστά απαγορευτικό και μη-βιώσιμο το κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης, και απαιτεί πολύ περισσότερο χώρο από τις άλλες εναλλακτικές λύσεις.

Μεταξύ των θ.σ. κορεσμένου και υπέρθερμου ατμού υπό πιέσεις 20 bar και 40 bar, μεγαλύτερους συνολικούς βαθμούς απόδοσης και περισσότερη καθαρή παραγόμενη ισχύ εμφανίζουν οι κύκλοι των 40 bar, (βλ. απόσπασμα του Πίνακα 10-B παρακάτω).

Απόσπασμα Πίνακα 10-B					
Είδος Ισχύος	1 ^ο θ.σ. (20 bar sat)	2 ^ο θ.σ. (40 bar sat)	3 ^ο θ.σ. (20/400)	4 ^ο θ.σ. (40/400)	5 ^ο θ.σ. (40/400/400)
Ισχύς στο δίκτυο (MW)	0,833	0,928	0,894	0,977	1,011
Ισχύς ανά τόνο Ε.Ι.Α. (MWh)	0.757	0.844	0.812	0.888	0.919
Συνολικός βαθμός απόδοσης σταθμού (%)	15.51	17.29	16.63	18.20	18.81

Η διαφορά μεταξύ των θ.σ. 2-(40 bar sat) και 4-(40 bar/400°C) είναι αρκετά μικρή (44 kW στην ισχύ και 0,91% στο β.α.) ώστε η επιλογή μεταξύ των δύο να κρίνεται αποκλειστικά και μόνο από το ανωτέρω οικονομικό κριτήριο 2. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να αντισταθμιστούν το κόστος επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης :

- του απλού ατμοπαραγωγού για το θ.σ. 40 sat έναντι του ατμοπαραγωγού με διάταξη υπερθερμαντήρα για το θ.σ. 40/400, και
- του ατμοστρόβιλου υγρού ατμού για το θ.σ. 40 sat έναντι ενός ατμοστρόβιλου λιγότερο αυστηρών απαιτήσεων (όσον αφορά την υγρότητα του ατμού) για το θ.σ. 40/400.

Αντίστοιχα ισχύουν και για τα θ.σ. των κύκλων υπό πίεση 20 bar. Επιπλέον, θα πρέπει να εξεταστεί η διαφορά στο κόστος των ατμοπαραγωγών 20 και 40 bar.

10.7. Συμπεράσματα

10.7.1. Συμπεράσματα 1^{ου} μέρους

Τα συμπεράσματα του 1^{ου} μέρους συνοψίζονται στη συνέχεια :

1. Η διαχείριση των Ε.Ι.Α. είναι ένα θέμα μείζονος σημασίας με επιπτώσεις στην κοινωνία, το περιβάλλον και την οικονομία. Η επιτακτική ανάγκη αντιμετώπισής του ανά την υφήλιο, και ιδιαιτέρως στην Ευρωπαϊκή Ένωση, έχει κινητοποιήσει όλους τους εμπλεκόμενους φορείς για την εύρεση βέλτιστων λύσεων και τη θέσπιση κανονισμών συμμόρφωσης :
 - a. Οδηγίες και Αποφάσεις του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, και
 - b. έγγραφα αναφοράς του γραφείου IPPC για βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές (BAT).
 2. Με την ΚΥΑ 2031/2003 θεσπίστηκε το νομικό πλαίσιο για την υπεύθυνη και συντονισμένη διαχείριση των Ε.Ι.Α. στην Ελλάδα :
 - a. Τα ιατρικά απόβλητα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη φύση και το βαθμό επικινδυνότητάς τους.
 - b. Κάθε υγειονομική μονάδα υποχρεούται στην κατάρτιση Εσωτερικού Κανονισμού Διαχείρισης Ε.Ι.Α., ο οποίος αναφέρεται στη λήψη συγκεκριμένων ενεργειών, μέτρων ασφαλείας και περιορισμών.
 - c. Καθορίζονται οι φάσεις του προγράμματος διαχείρισης Ε.Ι.Α., από την παραγωγή και συλλογή τους μέχρι την καταστροφή και τελική διάθεση.
 3. Υπάρχει μια ποικιλία εφαρμοσμένων τεχνολογιών για την επεξεργασία και διάθεση των Ε.Ι.Α., όπως αποτέφρωση, αποστείρωση, χημική απολύμανση, ακτινοβολία μικροκυμάτων, μικροβιακή αδρανοποίηση.
 4. Η αποτέφρωση είναι η πλέον εφαρμοσμένη μέθοδος μείωσης του όγκου και επιτυχούς καταστροφής των Ε.Ι.Α.
 5. Ο περιστρεφόμενος κλίβανος είναι η αποτελεσματικότερη «μηχανή» θερμικής καταστροφής των Ε.Ι.Α., εξαιρουμένων των ραδιενεργών.
 6. Νέες τεχνικές βασισμένες στην τεχνολογία πλάσματος, όπως η πυρόλυση με θερμικό πλάσμα και η τήξη-αεριοποίηση με πλάσμα, υπόσχονται ακόμη καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την αντιμετώπιση των Ε.Ι.Α., καθώς η καταστροφή παθογόνων οργανισμών και τοξικών ουσιών είναι ολοκληρωτική. Μειονεκτούν ακόμη στο θέμα του ελέγχου και της ασφάλειας, καθώς μπορούν να καταστούν ασταθείς.
 7. Τα προϊόντα της αποτέφρωσης, όπως στερεά υπολείμματα τέφρας, χημικές αέρειες εκπομπές και σωματίδια, και η μη-ελεγχόμενη διάθεσή τους στο περιβάλλον ήταν ο σημαντικότερος λόγος για την απόρριψη της μεθόδου.
 8. Η αντιρρυπαντική τεχνολογία, ωστόσο, έχει σημειώσει θεαματική πρόοδο ως προς την απομάκρυνση επικίνδυνων ουσιών, όπως είναι οι PCDD/PCDF, τα βαρέα μέταλλα, κ.α.,
-

καθιστώντας τις συμβατικές μεθόδους αποτέφρωσης αποδεκτές από την κοινωνία, τις περιβαλλοντικές οργανώσεις και το κράτος.

10.7.2. Συμπεράσματα 2^{ου} μέρους

Τα συμπεράσματα του 2^{ου} μέρους συνοψίζονται στη συνέχεια :

1. Με την οδηγία 2008/98/ΕC του Ευρωπαϊού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, τέθηκαν οι βάσεις για μία νέα πολιτική διαχείρισης των αποβλήτων, την ανάκτηση ενέργειας από την αποτέφρωση αποβλήτων –Energy-from-Waste (EfW) ή Waste-to-Energy (WTE). Ο δείκτης της φόρμουλας R1 συγκρίνει ως προς την παραγόμενη ισχύ – ηλεκτρική, θερμική ή συμπαραγωγή- τους σταθμούς EfW με συμβατικούς θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Το κατώφλι για την αναβάθμιση του χαρακτήρα των εγκαταστάσεων αποτέφρωσης αποβλήτων από «απόθεσης» σε «σταθμούς EfW» είναι οι τιμές 0,60 (αδειοδότηση προ 1/1/2009) και 0,65 (αδειοδότηση μετά 31/12/2008).
2. Οι τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν τον προηγούμενο αιώνα για την ανάκτηση του θερμικού περιεχόμενου των καυσαερίων–Heat Recovery Steam Generator (HRSG)- που παράγονται από την καύση ορυκτών καυσίμων, εφαρμόζονται πλέον και σε εγκαταστάσεις θερμικής επεξεργασίας αποβλήτων (αποτέφρωση).
3. Λόγω, όμως, της επικίνδυνα διαβρωτικής φύσης των καυσαερίων της αποτέφρωσης, οι συνθήκες λειτουργίας της μονάδας ανάκτησης θερμότητας είναι αρκετά πιο χαμηλές από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς ορυκτών καυσίμων. Έτσι, οι συνηθέστερες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας για τον ενεργό ατμό είναι 40-45 bar και 380-400 °C.
4. Ο αποτεφρωτήρας Ε.Ι.Α. του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. στα Άνω Λιόσια αποτέλεσε αντικείμενο διερεύνησης της δυνατότητας αναβάθμισής του σε σταθμό EfW, όπως ορίζει η οδηγία 2008/98/ΕC. Επιλέχτηκε να μελετηθεί η αποκλειστική παραγωγή ηλεκτρισμού λόγω απουσίας υποδομών και πελατών για ζήτηση θερμού ατμού βιομηχανικής χρήσης ή τηλεθέρμανσης.
5. Μελετήθηκαν πέντε εναλλακτικά θερμοδυναμικά σενάρια : δύο κορεσμένου ατμού στα 20 και 40 bar, δύο υπέρθερμου ατμού 20/400 και 40/400 και ένας υπέρθερμου ατμού με ένα στάδιο αναθέρμανσης 40/400/400.
6. Το καθαρό ποσό ηλεκτρικής ενέργειας, κατόπιν συντηρητικής προσέγγισης, είναι λιγότερο από 1MWh/t Ε.Ι.Α., για όλες τις περιπτώσεις.
7. Ο κορεσμένο κύκλος 40 bar και ο υπέρθερμος κύκλος 40/400 αποτελούν τις καλύτερες λύσεις. Η βέλτιστη εκ των δύο θα προκύψει ύστερα από τεchnοοικονομική μελέτη, ώστε να συνυπολογισθεί το αντιστάθμισμα από τις διαφορετικές απαιτήσεις εξοπλισμού.
8. Οι τιμές του κριτηρίου R1 κυμαίνονται από 0,43-0,52 και είναι ασφαλώς εκτός του κατωφλίου που θέτει η οδηγία 2008/98/ΕC. Συνεπώς, η εγκατάσταση του αποτεφρωτήρα Ε.Ι.Α. του Ε.Σ.Δ.Κ.Ν.Α. δεν μπορεί να αναβαθμιστεί σε σταθμό EfW.

Βιβλιογραφία 2^{ου} μέρους

- 1 Martin Pavlas , Michal Tous, “Efficient waste-to-energy system as a contribution to clean technologies”, *Clean Techn Environ Policy* (2009) 11:19–29
- 2 Safe management of wastes from health-care activities, 1999, World Health Organization
- 3 Santoleri JJ, Reynolds J, Theodore L (2000), “Introduction to hazardous waste incineration”, 2nd ed. Wiley, New York
- 4 Niessen WR (1995), “Combustion and incineration processes”, Marcel Dekker Inc, New York
- 5 Brunner CR (1996), “Incineration Systems handbook”, Incinerators Consultants Incorporated, Reston
- 6 John Pichtel (2005) “Waste management practices: municipal, hazardous, and industrial”, Taylor & Francis Group, LLC
- 7 Καπετάνιος Γ. Ευάγγελος (2010), «Διεργασίες και Τεχνικές Αντιρρύπανσης – Πρόγνωση, Έλεγχος & Αντιμετώπιση της Ρύπανσης», ΕΜΠ 2010.
- 7a Kapetanios, E., Kontominas, I., Malamis, D. (2008), " Design of a pyrolysis system for electricity generation by employing either heat from exhaust gasses or heat from steam condensation for RDF drying", *2nd international Symposium on energy from biomass and waste*, Venice 2008.
- 8 Perry S, Klemes̄ J, Bulatov I (2008) “Integrating waste and renewable energy to reduce the carbon footprint of locally integrated energy sectors”, *Energy*. doi: 10.1016/j.energy.2008.03.008
- 9 Pavlas M, Stehlik P, Oral J, Sikula J (2006) “Integrating renewable sources of energy into an existing combined heat and power system”, *Energy* 31:2163–2175
- 10 Discussion paper on criteria for energy recovery in waste incineration plants. Brussels, www.cewep.com/storage/med/media/statements/31_criteria.pdf; 20 April 2004 [last accessed on 24.05.2010
- 11 Petr Stehlik, “Contribution to advances in waste-to-energy technologies”, *Journal of Cleaner Production* 17 (2009) 919–931.
- 12 J. Bujak, “Experimental study of the energy efficiency of an incinerator for medical waste”, *Applied Energy* 86 (2009) 2386–2393
- 13 Pavlas M, Boran J, Bebar L, Stehlik P. Effective processing of different wastes in waste-to-energy centres – a concrete example. Montreal: The 2008 International Conference on Thermal Treatment Technologies (IT3); 2008.
- 14 EIPPCB(2005). Integrated pollution prevention and control. Reference document on the best available techniques for waste incineration (BREF). Brussels, available on, <eippcb.jrc.es> 2005 [last accessed on 24.11.08].

-
- 15 Anders Damgaard, et al., "Life-cycle-assessment of the historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration", *Waste Management* 30 (2010) 1244–1250
 - 16 Οδηγία 2008/98/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τα απόβλητα.
 - 17 Marco J. Castaldi, Nickolas J. Themelis, "The Case for Increasing the Global Capacity for Waste to Energy (WTE)", *Waste Biomass Valor* (2010) 1:91–105.
 - 18 Grosso, M., et al. "Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive", *Waste Management* 30 (2010) 1238–1243.
 - 19 ΥΑ ΗΠ 37591/2031/2003 - ΦΕΚ 1419/Β/1.10.2003 : "Μέτρα και όροι για τη διαχείριση ιατρικών αποβλήτων από υγειονομικές μονάδες"
 - 20 <http://www.apotefrotiras.gr/>
 - 21 "Ατμοπαραγωγοί Ι, Γενικές αρχές", Ν., Γ., Παπαγεωργίου, Αθήνα (1987).
 - 22 "Λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων", Κ., Μαθιουδάκης, Αθήνα (1997).
 - 23 "Ατμοστρόβιλοι και αεριοστρόβιλοι", Α. Μιχόπουλου, ΑΘΗΝΑΙ (1951).
 - 24 "Ατμομηχανές", Γ.Φ.Δανιήλ & Κ.Η. Μιμηκόπουλου, Ίδρυμα Ευγενίδου (1984).
 - 25 "Ηλεκτρομηχανικά συστήματα μετατροπής ενέργειας", Ε. Παπαδόπουλος, ΕΜΠ (2000).
 - 26 "International Steam Tables", Wolfgang Wagner and Hans-Joachim Kretzschmar, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1998 and 2008).
 - 27 "Combined heating, cooling & power handbook, Technologies and Applications", Neil Petchers, The Fairmont Press (2003).
 - 28 "Steam: its generation and use", 41st ed., The Babcock & Wilcox Company (2005).
 - 29 "Steam Generators Description and Design", D. Annaratone, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2008).
 - 30 "Power Generation from Solid Fuels", H., Spliethoff, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2010).
 - 31 "Power Generation Handbook", Ph., Kiameh, McGraw-Hill Professional (2002).
 - 32 "Steam Plant Operation", 8th ed., Everett B. Woodruff & Thomas F. Lammers, McGraw-Hill Professional (2004).
 - 33 " Steam Turbines for modern Power plants", A. S. Leyzerovich, CRC Press (2008).
 - 34 " Steam Turbines, Design, Applications and Re-Rating", 2nd ed., H. P. Bloch & M. P. Singh, The McGraw-Hill Companies (2009).
 - 35 "Power Plant Engineering", A.K. Raja, A.M. Srivastava, M. Dwivedi, New Age International (P) Ltd., Publishers (2006).
 - 36 "Standard Handbook for Electrical Engineers", The McGraw-Hill Companies (2006).
-

-
- 37 <http://www.tic.toshiba.com.au/>
 - 38 http://en.wikipedia.org/wiki/Surface_condenser
 - 39 <http://www.x-eng.com/>
-