ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ & ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΣΑ

ΠΑΛΟΓΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΠΑΛΑΙΟΛΟΓΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ (ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ-ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΤΣΟΥΤΣΟΣ ΘΕΟΧΑΡΗΣ (ΕΠ.ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΧΑΝΙΑ 2010

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα Διπλωματική Εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα καθηγητή κ Ευάγγελο Παλαιολόγο, Αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης για τη βοήθεια του καθώς και τους κυρίους Αλέξανδρο Οικονομόπουλο καθηγητή και Τσούτσο Θεοχάρη επίκουρο Καθηγητή του τμήματος αμφότερους καθηγητές του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Η εργασία είναι αφιερωμένη στους γονείς μου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... 3
1.1 Εισαγωγικές πληροφορίες για την Αποτέφρωση 4
1.2 Σκοπός της μεταπτυχιακής διατριβής..... 8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ 10
2.1 Κατηγορίες Τεχνολογιών Αποτέφρωσης 11
2.1.1 Μαζική Αποτέφρωση (Mass Burning)..... 11
2.1.2 Αποτέφρωση του Επεξεργασμένου κλάσματος των ΑΣΑ, Refused Derived Fuel (RDF)..... 23
2.2 Ανάκτηση Ενέργειας 26
2.2.1 Γενικά 26
2.2.2 Απόδοση Ανακτώμενης Ενέργειας (Efficiency) 28
2.3 Ρύποι..... 31
2.3.1 Αέρια Ρύπανση 31
2.3.2 Ρύπανση Εδαφών 39
2.3.3 Ρύπανση Υδάτων..... 39
2.4 Σύστημα Ελέγχου Αερίων Εκπομπών 40
2.4.1 Διαχείριση αέριας και σωματιδιακής Ρύπανσης 41
2.4.2 Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων 50
2.4.3 Διαχείριση Στερεών Υπολειμμάτων..... 50
2.4.4 Απόδοση Συστημάτων Επεξεργασίας Απαερίων σε Μονάδες Αποτέφρωσης..... 51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ 54
3.1 Εισαγωγή 55
3.2 Κόστος Επένδυσης 57
3.3 Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης 58
3.4 Εκτίμηση Κόστους μονάδας Αποτέφρωσης ΑΣΑ (δεδομένα ΕΕ)..... 60
3.4.1 Εκτίμησης Κόστους Αποτεφρωτήρα..... 60
3.4.2 Εκτίμηση Κόστους Ανάκτησης Ενέργειας..... 61
3.4.3 Εκτίμηση Κόστους Συστήματος Απορρύπανσης..... 68
3.4.4 Εκτίμηση Ολικού Κόστους Μονάδας Αποτέφρωσης 71
3.4.5 Εκτίμηση Ολικού Κόστους Μονάδας Αποτέφρωσης RDF 74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ ΑΣΑ..... 77
4.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Λήψης Αποφάσεων 78
4.1.1 Βασικές Έννοιες 78
4.1.2 Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων 78
4.2 Εφαρμογή της Θεωρίας Λήψης Αποφάσεων του Bayes για Ρύπανση από Μονάδες Αποτέφρωσης ΑΣΑ. 79
4.2.1 Εισαγωγή 79
4.2.2 Ατμοσφαιρική Ρύπανση από Μονάδες Αποτέφρωσης ΑΣΑ 80
4.2.3 Μαθηματική Ανάλυση για Γεγονότα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης 81
4.2.4 Συνάρτηση Επικινδυνότητας..... 83
4.2.5 Ανάλυση Bayes 84
4.3 Ανάλυση Bayes για κλιμακωτά αυξανόμενη συνάρτηση απωλείας 90
4.4 Συμπεράσματα..... 93
4.5 Παράρτημα: υπολογισμοί παραγράφου 4.3 95
5.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγικές πληροφορίες για την Αποτέφρωση

Η αποτέφρωση (Incineration) αποτελεί μια από τις διάφορες τεχνολογίες θερμικής επεξεργασίας των απορριμμάτων μαζί με την αεριοποίηση (Gasification) και την πυρόλυση (pyrolysis) [1,3,7,10]. Η αποτέφρωση ορίζεται ως η ελεγχόμενη καύση των απορριμμάτων που λαμβάνει χώρα με οξείδωση των επιμέρους στοιχείων αυτών, δηλαδή την ένωση τους με περίσσεια O_2 σε ένα εύρος υψηλών θερμοκρασιών (760-1370°C). Επιτυγχάνεται έτσι η καταστροφή των οργανικών ουσιών στα απορρίμματα [1,7,10]. Από τις εγκαταστάσεις καύσης και ανάλογα με την ποιότητα των απορριμμάτων, παράγονται εκτός από τα τυπικά προϊόντα της καύσης (ατμός, διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου, οξείδια του αζώτου, σωματίδια) και μια σειρά άλλων τοξικών ενώσεων όπως υδροχλώριο, υδροφθόριο, διοξίνες, φουράνια, πολυκυκλικοί αρωματικοί υδρογονάνθρακες, βαρέα μέταλλα κτλ. Οι ρύποι αυτοί απατώνται στην έξοδο των καυσαερίων (απαέρια) από την καμινάδα της εγκατάστασης [1,10,14].

Η αποτέφρωση αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μεθόδους επεξεργασίας των στερεών αστικών απορριμμάτων. Είναι παλιά μέθοδος, ξεκίνησε το 19^0 αιώνα στις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες της Ευρώπης όπως η Αγγλία και η Γερμανία, αλλά και στις ΗΠΑ [1,5,20]. Ο στόχος των πρώτων μονάδων αποτέφρωσης ήταν η μείωση του όγκου των απορριμμάτων που παράγονταν χωρίς να υπάρχουν σκέψεις για την εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμότητας ή ενδιαφέρον για τις εκπομπές των καυσαερίων και τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον [1].

Τα τελευταία 50 χρόνια του $20^{ου}$ αιώνα σημειώθηκε μια σημαντική αύξηση στην κατασκευή μονάδων αποτέφρωσης. Η δυσκολία εύρεσης χώρων εδαφικής διάθεσης κοντά στα αστικά κέντρα, εξαιτίας της μεγάλης οικιστικής ανάπτυξης αλλά και των τεράστιων χωροταξικών προβλημάτων για την επιλογή κατασκευής σε τοποθεσίες όπου δεν θα μπορούσαν να προκληθούν προβλήματα των υπόγειων υδροφορέων από τις διαρροές τους [28], έδωσε μία ώθηση στην επιλογή άλλων μεθόδων επεξεργασίας των απορριμμάτων όπως η ανακύκλωση, η κομποστοποίηση και η αποτέφρωση [5].

Τα τελευταία 20 χρόνια ιδιαίτερα μετά το ατύχημα που συνέβη στη πόλη Sevezo της Ιταλίας το 1976, όπου έγιναν γνωστές οι επιπτώσεις ρύπων όπως οι διοξίνες στην ανθρώπινη υγεία και στο φυσικό περιβάλλον, άρχισε να γίνεται έντονο το ενδιαφέρον για τις εκπομπές επικίνδυνων αέριων ρύπων, τόσο από περιβαλλοντικές οργανώσεις και οργανισμούς, αλλά και από τους ίδιους τους κατοίκους [15,20].

Αν και η νομοθεσία, μετά το ατύχημα του Sevezo, έγινε αυστηρότερη για τον τρόπο λειτουργίας των βιομηχανιών μονάδων (οδηγίες 82/501/ΕΟΚ και 96/82/ΕΚ), έχουν σημειωθεί αρκετά γεγονότα ρύπανσης από μονάδες αποτέφρωσης απορριμμάτων. Παρά την ισχύ των παραπάνω νόμων έχουν γίνει μελέτες που αποδεικνύουν την ύπαρξη προβλημάτων σχετικών με τη λειτουργία βιομηχανικών μονάδων αλλά και μονάδων αποτέφρωσης. Πολλά περιστατικά προβλημάτων υγείας, έχουν περιγραφεί σε ανθρώπους που μένουν κοντά σε μονάδες καύσης αλλά και στους ίδιους τους εργαζομένους των μονάδων αποτέφρωσης [23]. Για παράδειγμα στη Σουηδία το 1989 μελετήθηκε η συσχέτιση της θνησιμότητας των εργαζομένων στις μονάδες αυτές από το 1920 έως το 1985 λόγω καρκίνου του πνεύμονα και αποδείχθηκε ότι η λειτουργία της μονάδας αύξησε την πιθανότητα των ανθρώπων να προσβληθούν από καρκίνο, ιδιαίτερα σε εργαζόμενους με θητεία στη μονάδα πάνω από 40 χρόνια. Παρίες μελέτες συσχέτισης προβλημάτων υγείας εξαιτίας μονάδων αποτέφρωσης έχουν γίνει στη Ιταλία (1997) με περίοδο μελέτης το διάστημα 1962-1992, στην Ιαπωνία (2000) για την περίοδο 1987-1997 και στις ΗΠΑ (1992).

Με τις ενδεχόμενες επιπτώσεις της ρύπανσης τόσο στο περιβάλλον όσο και την ανθρώπινη υγεία, οι σύγχρονες μονάδες αποτέφρωσης αναγκάστηκαν να βελτιωθούν από τεχνολογικής άποψης μέσα στην τελευταία δεκαπενταετία [14]. Ήταν επιτακτικό να θεσπιστούν αυστηρότερα νομοθετικά πλαίσια που να καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας τους και τα ανώτατα όρια των συγκεντρώσεων των ρύπων που βρίσκονται στα απαέρια της καύσης.

Στη βάση αυτή της απαίτησης για τη λειτουργία κινείται η κοινοτική οδηγία 2000/76/ΕC της Ευρωπαϊκής ένωσης που αφορά τις μονάδες αποτέφρωσης και συναποτέφρωσης (αποτέφρωση απορριμμάτων μαζί συμπληρωματικά καύσιμα) αποβλήτων. Σκοπός της οδηγίας είναι η πρόληψη ή ο περιορισμός, όσο είναι εφικτός, των αρνητικών επιδράσεων της αποτέφρωσης και της συναποτέφρωσης αποβλήτων στο περιβάλλον, ειδικότερα δε, της ρύπανσης δια των εκπομπών στον ατμοσφαιρικό αέρα, το έδαφος και τα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα, καθώς και των συνακόλουθων κινδύνων για την υγεία του ανθρώπου. Για την επίτευξη της οδηγίας ορίζονται αυστηρές συνθήκες λειτουργίας, τεχνικές απαιτήσεις και οριακές τιμές εκπομπών. Η οδηγία κατάργησε παλιότερες οδηγίες που ήταν σε ισχύ για την αποτέφρωση απορριμμάτων, τις οδηγίες 89/369/ΕΟΚ, 89/429/ΕΟ και 94/67/ΕΚ. [12]. Αντίστοιχη νομοθεσία για την λειτουργία και τις εκπομπές μονάδων καύσης απορριμμάτων έχει εκδοθεί και από την Αμερικανική υπηρεσία περιβάλλοντος, Environmental Protection Agency (EPA) η οποία θέτει όρια συγκεντρώσεων των εκπομπών των αέριων ρύπων για μονάδες

αποτέφρωσης απορριμμάτων που βρίσκονται ήδη σε λειτουργία αλλά και για νέες μονάδες [21].

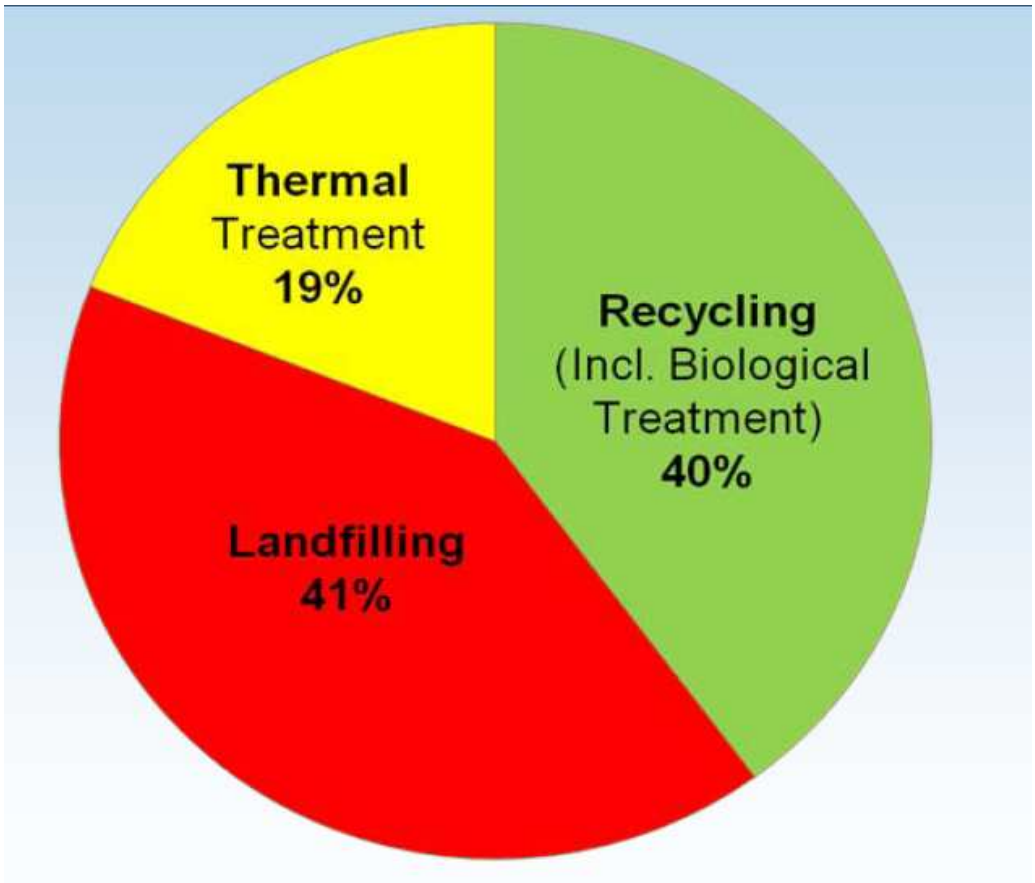
Σήμερα λειτουργούν στην Ευρώπη περισσότερες από 400 μονάδες αποτέφρωσης απορριμμάτων, όπως φαίνεται στον πίνακα 1, ενώ το ποσοστό συμμετοχής της αποτέφρωσης στην διαχείριση των απορριμμάτων ποικίλει από χώρα σε χώρα στην Ευρωπαϊκή Ένωση (0-62% του συνολικού όγκου των απορριμμάτων προς επεξεργασία). Η συνολική ετήσια ποσότητα των ΑΣΑ που επεξεργάζονται με την αποτέφρωση είναι 52 εκατομμύρια τόνοι [14].

Η αποτέφρωση ως μέθοδος επεξεργασίας αποβλήτων εκτός από τα ΑΣΑ, χρησιμοποιεί και σε άλλες κατηγορίες όπως νοσοκομειακά, τοξικά και επικίνδυνα απόβλητα [1]. Συνήθως δεν αποτελεί ανεξάρτητη μέθοδο, αλλά μέρος ενός ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης των ΑΣΑ, σε συνδυασμό με την μείωση στη πηγή, την ανακύκλωση με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση (διαχωρισμός των ΑΣΑ), τη κομποστοποίηση και την εδαφική διάθεση των υπολειμμάτων [1,2,10].

Η ταφή αποτελεί την κύρια μέθοδο στο τομέα διαχείρισης των απορριμμάτων. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ελάττωση στο ποσοστό των ΑΣΑ που οδηγούνται προς ταφή στην Ευρωπαϊκή Ένωση, με ταυτόχρονη αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης. Η ταφή απορριμμάτων έχει μειωθεί από 67% των συλλεγομένων το 1995, σε 57% το 1999 και σε 49% το 2006. Η αποτέφρωση γίνεται σε ποσοστό 18%, η ανακύκλωση-κομποστοποίηση στο 33%. Παρατηρείται δηλαδή σαφής υποχώρηση της ταφής και σημαντική αύξηση της ανακύκλωσης-κομποστοποίησης. Η καύση με παραγωγή ενέργειας είναι μια σημαντική μέθοδος διαχείρισης των ΑΣΑ. Στη δυτική Ευρώπη ένα ποσοστό 17% εξ αυτών οδηγήθηκε σε εγκαταστάσεις καύσης το 1995, με αύξηση στο 18% το 1999 [10]. Η εικόνα 1 δείχνει τη κατανομή των διαφόρων μεθόδων διαχείρισης των συλλεγόμενων ΑΣΑ στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2006 (400 μονάδες σε όλη την Ευρώπη). Οι τεχνολογίες της αποτέφρωσης (με ανάκτηση ενέργειας και της ανακύκλωσης-κομποστοποίησης έχουν αυξηθεί, ενώ η ταφή συνεχίζει να ελαττώνει το ποσοστό της ως πρώτη επιλογή για ένα σύστημα διαχείρισης.

Τα πλεονεκτήματα της αποτέφρωσης ως μεθόδου επεξεργασίας των απορριμμάτων είναι η ελάττωση του όγκου των ΑΣΑ ο οποίος καταλήγει προς εδαφική διάθεση (έως 90%) [6,11,20], η εκμετάλλευση από τη μετατροπή του θερμικού περιεχομένου των απορριμμάτων σε χρήσιμες μορφές (θέρμανση, παραγωγή ατμού και ηλεκτρισμός) για την κάλυψη βιομηχανικών ή οικιακών αναγκών, αλλά και η ενδεχόμενη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη μείωση της χρήσης συμβατικών ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) [1,4,5,29].

Το κόστος της διεργασίας και η διάθεση του υπολείμματος αποτελούν το μεγάλο μειονέκτημα της σε σχέση με άλλες μεθόδους. Το ενδεικτικό κόστος ενός χώρου υγειονομικής ταφής στην Ελλάδα μπορεί να φτάσει τα 20€/tn ΑΣΑ προς επεξεργασία [1], το ελάχιστο κόστος μιας μονάδας αποτέφρωσης στην Ευρώπη είναι περίπου 50€/tn ΑΣΑ (χωρίς να προσθέσουμε το εκτιμώμενο κόστος διάθεσης της υπολειμματικής τέφρας). Το μέγιστο κόστος για την κατασκευή ενός ΧΥΤΑ είναι σχεδόν 3 φορές μικρότερο από το ελάχιστο κόστος κατασκευής μιας μονάδας αποτέφρωσης ΑΣΑ [1]. Η διάθεση της υπολειμματικής τέφρας απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία ή διάθεση σε χώρους διάθεσης υπολειμμάτων και αυξάνει κατά πολύ το κόστος της επεξεργασίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της διάθεσης των στερών υπολειμμάτων της αποτέφρωσης είναι η αναζήτηση φορέα διαχείρισης της τέφρας από τον αποτεφρωτήρα νοσοκομειακών αποβλήτων στα Α. Λιόσια [http://www.enet.gr/?i=news.el.article&id=81985] [1,8,10].



Εικόνα 1: Μέθοδοι διαχείρισης των ΑΣΑ στην Ευρώπη το 2006 [www.cewep.eu,2009]

Πίνακας 1: μονάδες αποτέφρωσης ΑΣΑ στην Ευρώπη [29]

	Number of WTE plants	Treated waste (million tonnes)
France	123	11.25
Spain	11	1.86
Portugal	3	1
UK	15	3.17
Belgium	17	1.64
Netherlands	12	5.18
Luxembourg	1	0.12
Switzerland	29	2.97
Italy	49	3.47
Austria	5	0.88
Germany	58	13.18
Czech Republic	3	0.4
Poland	1	0.04
Hungary	1	0.19
Denmark	31	3.28
Norway	21	0.79
Sweden	28	3.13
Finland	1	0.15

1.2 Σκοπός της μεταπτυχιακής διατριβής

Ο σκοπός της μεταπτυχιακή διατριβής είναι η ανάλυση επικινδυνότητας για τον ενδεχόμενο κίνδυνο από ένα γεγονός ρύπανσης σε μια μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ. Η ανάλυση επικινδυνότητας μεταφράζεται σε μια διαδικασία λήψης απόφασης για την μονάδα όσον αφορά την επιλογή του συστήματος επεξεργασίας των απαερίων συναρτήσει του κόστους αγοράς, της απόδοσης του συστήματος και της προγενέστερης πληροφορίας για την λειτουργία και απόδοση παρόμοιων συστημάτων από αντίστοιχες μονάδες αποτέφρωσης.

Η εργασία χωρίζεται σε 4 κεφάλαια. Στο 2^{ο} κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή των τεχνολογιών μιας διεργασίας αποτέφρωσης των απορριμμάτων. Περιγράφονται αναλυτικά οι υφιστάμενες τεχνολογίες αποτέφρωσης, γίνεται περιγραφή των πιθανών ρύπων που εκπέμπουν οι μονάδες αυτές και των τεχνολογιών απορρύπανσης ενώ δίνονται και τα στοιχεία για τα όρια εκπομπών όπως αυτά ορίζονται από την κοινοτική νομοθεσία και την ΕΡΑ. Γίνεται περιγραφή των διάφορων μορφών με τις οποίες εκμεταλλευόμαστε το θερμικό περιεχόμενο των ΑΣΑ. Στο 3^{ο} κεφάλαιο γίνεται οικονομική προσέγγιση της διαδικασίας της αποτέφρωσης.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται περιγραφή της διαδικασίας λήψης αποφάσεων γενικά και σε περιβαλλοντικά έργα ειδικά. Η διαδικασία της λήψης αποφάσεων γίνεται

χρησιμοποιώντας ως εργαλεία την διωνυμική κατανομή, την συνάρτηση απώλειας, τη συνάρτηση επικινδυνότητας και σε τελικό στάδιο την ανάλυση του Bayes για την λήψη μιας απόφασης με χρήση της προηγούμενης πληροφορίας, με την αντίστοιχη συνάρτηση επικινδυνότητας κατά τον Bayes (Risk function). Δίνεται το παράδειγμα για το ενδεχόμενο οικονομικό κόστος αγοράς από μια μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ, ενός συστήματος επεξεργασίας των απαερίων με βάση το κίνδυνο να υπάρξει πιθανό γεγονός ρύπανσης εξαιτίας της αστοχίας του συστήματος απορρύπανσης. Το περιβαλλοντικό κόστος μεταφράζεται ως πρόστιμο το οποίο επιβάλουν οι αρμόδιες αρχές στην μονάδα. Η εργασία αυτή ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ

2.1 Κατηγορίες Τεχνολογιών Αποτέφρωσης

Η μέθοδος της αποτέφρωσης των ΑΣΑ χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τη μαζική αποτέφρωση των απορριμμάτων (Mass burning) και την αποτέφρωση του ομογενοποιημένου κλάσματος των απορριμμάτων που προέρχεται από τη προ-επεξεργασία ΑΣΑ μέσω της τεχνικής του διαχωρισμού (για την ανάκτηση των χρήσιμων υλικών) και του τεμαχισμού (για την ομογενοποίηση του) [4,5,30]. Το κλάσμα αυτό των ΑΣΑ ορίζεται ως Refused Derived Fuel (RDF) [5]. Η βασική διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις κατηγορίες, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω, είναι ο βαθμός προ-επεξεργασίας των ΑΣΑ πριν την αποτέφρωση τους στην μονάδα ο οποίος επηρεάζει τους διάφορους παράγοντες, σημαντικούς για την διαδικασία της αποτέφρωσης, όπως: η θερμογόνος δύναμη και η ομοιογένεια του καύσιμου υλικού, η ευκολία στην αποθήκευση, διαχείριση και μεταφορά. αλλά και οι συνθήκες καύσης [2,4,5,30].

2.1.1 Μαζική Αποτέφρωση (Mass Burning)

Στην αποτέφρωση των σύμμεικτων απορριμμάτων, τα ΑΣΑ δεν χρήζουν ειδικής προ-επεξεργασίας διαχωρισμού και τεμαχισμού (sorting and shredding) πριν την τελική αποτέφρωση [4]. Ουσιαστικά η μοναδική επεξεργασία η οποία λαμβάνει χώρα, είναι η απομάκρυνση των ογκωδών αντικειμένων (έπιπλα, ηλεκτρικές συσκευές) και των δυνητικά επικίνδυνων απορριμμάτων με ενδεχόμενο κίνδυνο έκρηξης [5]

Η μαζική αποτέφρωση χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες, ανάλογα με την δυναμικότητα των ΑΣΑ που τροφοδοτούνται προς αποτέφρωση. Οι υποκατηγορίες είναι: α) μονάδες αποτέφρωσης, οι οποίες κατασκευάζονται επί τόπου (τύπου Field erected incineration plants) με δυνατότητα επεξεργασίας 300-3,000 tn ΑΣΑ ημερησίως και β) μονάδες αποτέφρωσης των οποίων τα διάφορα τμήματα είναι προκατασκευασμένα (αποτεφρωτές τύπου modular) και οι οποίες διαχειρίζονται μικρότερες των 300 *tn* ΑΣΑ ημέρα. Τα τελευταία χρόνια όμως γίνεται κατασκευή μονάδων τύπου Modular με μεγαλύτερες ετήσιες δυναμικότητες [2].

Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται μια τυπική μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ τύπου Mass Burning και τα διάφορα μέρη της: ο χώρος στάθμευσης των απορριμματοφόρων οχημάτων και της προ-επεξεργασίας (1) τους, ο χώρος όπου καταλήγουν τα απορρίμματα προς επεξεργασία (2), το σύστημα μεταφοράς των ΑΣΑ στον αποτεφρωτήρα (3 και 4), ο αποτεφρωτήρας, (5) το σύστημα παροχής του αέρα καύσης (6), το σύστημα ανάκτησης της θερμότητας και παραγωγής ενέργειας (7,8, 9 και 11) και

τα υπόλοιπα μέρη όπως το σύστημα απομάκρυνσης των υπολειμμάτων (10), το σύστημα επεξεργασίας των καυσαερίων (13,15,17) και των υγρών αποβλήτων (18) και η καμινάδα (19).

- **Μαζική Αποτέφρωση Τύπου Field Erected**

Η μαζική αποτέφρωση τύπου Field erected αποτελεί το πιο συνηθισμένο τύπο μονάδας θερμικής επεξεργασίας ΑΣΑ. Οι μονάδες αποτέφρωσης αυτού του τύπου επεξεργάζονται δυναμικότητες απορριμμάτων προς αποτέφρωση που φτάνουν χιλιάδων τόνων ετησίως. Μια μονάδα αποτέφρωσης αυτού του τύπου διακρίνεται σε 3 κύρια τμήματα: το τμήμα της αποτέφρωσης των απορριμμάτων, το τμήμα της ανάκτησης/εκμετάλλευσης της θερμότητας που παράγεται και το τμήμα της επεξεργασίας των ρύπων που παράγονται στα καυσαέρια. Η αποτέφρωση αυτού του τύπου περιλαμβάνει δύο κύριες υποκατηγορίες συστημάτων θαλάμου αποτέφρωσης-λεβήτων: Συστήματα με πυρίμαχα τοιχώματα (refractory-lined system combustors) και συστήματα με πυρίμαχα τοιχώματα και με σωλήνες νερού (refractory-lined water wall system combustors) [5, 13].

- **Συστήματα τύπου Refractory-Lined**

Τα συστήματα αυτού του τύπου αποτελούνται από έναν αποτεφρωτήρα πυρίμαχου μεταλλικού υλικού και έναν ξεχωριστό λέβητα κατάντη του συστήματος αποτέφρωσης, ο οποίος και χρησιμοποιείται για την εκμετάλλευση της θερμότητας των καυσαερίων που παράγονται. Ο αποτεφρωτήρας είναι επικαλυμμένος με πυρίμαχο υλικό όπως SiC, για την προστασία των επιφανειών του από διαβρωτικά αέρια. Τα συστήματα αυτού του τύπου μπορούν να διαχειριστούν χαμηλής ποιότητας απόβλητα-καύσιμα σε συνθήκες ατελούς καύσης (κατά την ατελή καύση παράγεται επιπλέον αέριο CO, το οποίο είναι επικίνδυνος ρύπος [1]). Ωστόσο η ανάκτηση της θερμότητας από αποτεφρωτήρες τέτοιου τύπου γίνεται σε μικρό βαθμό εξαιτίας του υλικού επικάλυψης που περιορίζει τη δυνατότητα ανάκτησης της θερμότητας [2].

- **Συστήματα Τύπου Water-Wall**

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από έναν αποτεφρωτήρα αποτεφρωτήρα πυρίμαχου μεταλλικού υλικού και έναν λέβητα. Χαλύβδινοι σωλήνες με νερό, είναι τοποθετημένοι κατά μήκος του αποτεφρωτή. Έτσι η θερμότητα που παράγεται από την αποτέφρωση μεταφέρεται στο νερό των σωλήνων, παράγεται ατμός ο οποίος μεταφέρεται σε τουρμπίνες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή για άλλους σκοπούς (θέρμανση).

Τα συστήματα τύπου water wall είναι αυτά που λειτουργούν ευρέως, ενώ μονάδες αποτέφρωσης με συστήματα αποτεφρωτηρών τύπου refractory-lined, έχουν κλείσει ή

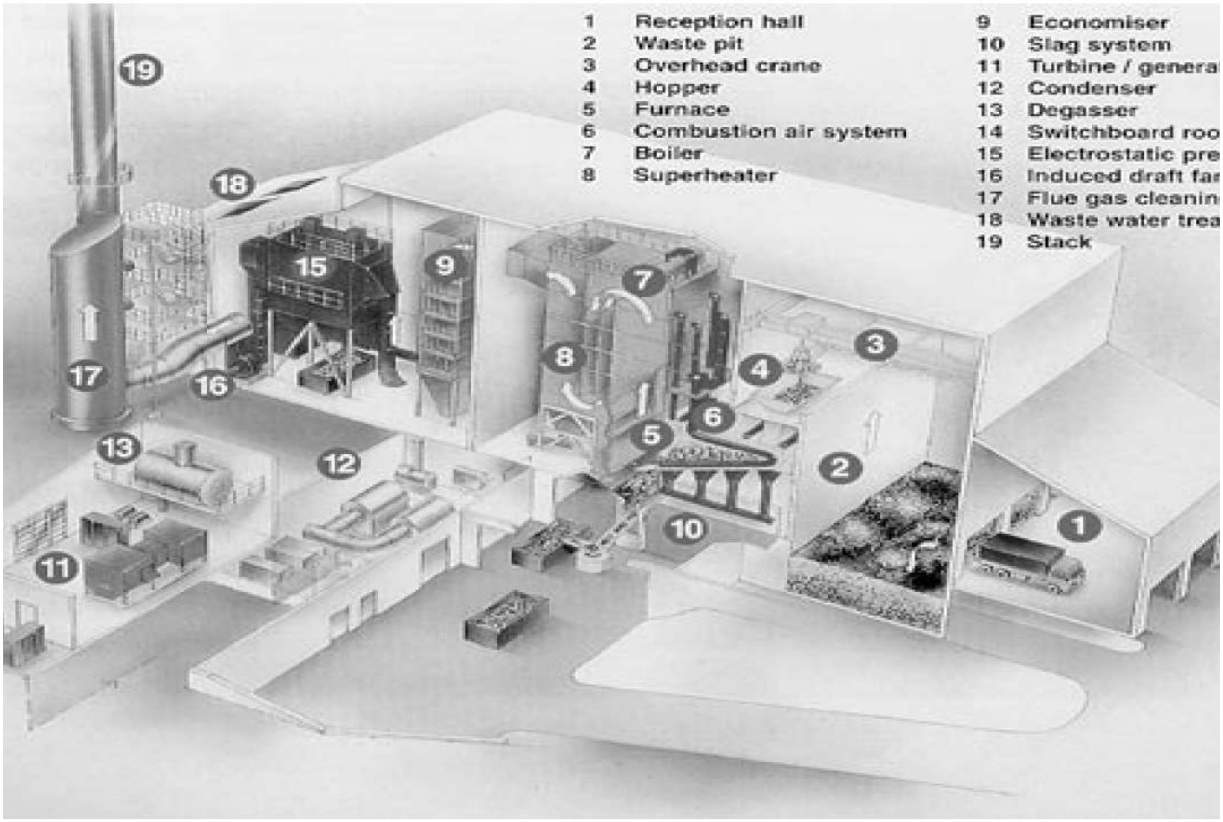
έχουν αλλάξει τον τύπο λειτουργίας τους. Η ειδοποιός διαφορά τους είναι η δυνατότητα ανάκτησης της θερμότητας, που φτάνει να είναι 3-10% παραπάνω για τα συστήματα water wall σε σχέση με τα συστήματα refractory-lined [2] .

1. Τεχνολογίες Εστιών Μαζικής Αποτέφρωσης

Οι βασικές τεχνολογίες εστιών που χρησιμοποιούνται για την μαζική αποτέφρωση των ΑΣΑ, είναι: α)η τεχνολογία των κινούμενων εσχαρών (moving grates), β)η τεχνολογία του περιστρεφόμενου κλιβάνου (rotary kiln) [1,3,4,5,14,20]. Η τεχνολογία των κινούμενων εσχαρών αποτελεί την πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία αποτέφρωσης των σύμμεικτων απορριμμάτων. Στην Ευρώπη το 50-87% των μονάδων αποτέφρωσης χρησιμοποιούν εσχάρες [20].

Τα ΑΣΑ μεταφέρονται από την πηγή προς τους χώρους αποθήκευσης (pit) με απορριμματοφόρα οχήματα ή άλλα μέσα (τραίνα). Οι χώροι αποθήκευσης είναι σχεδιασμένοι για χρόνους παραμονής απορριμμάτων μερικών ημερών (συνήθως έως 5) [3].

Τα απορρίμματα μεταφέρονται από τους αποθηκευτικούς χώρους προς τις χοάνες φόρτωσης (hoppers) του αποτεφρωτήρα μέσω γερανών, οι οποίοι προκαλούν μερική ανάμειξη – ομογενοποίηση των αποβλήτων. Σπάνια χρησιμοποιούνται μηχανήματα τεμαχισμού των απορριμμάτων (shredding) [2,3,4,5].



Εικόνα 2: μονάδα αποτέφρωσης απορριμμάτων τύπου mass burning και τα διάφορα μέρη της [6]

Α) Κινούμενες Εσχάρες (Moving Grates)

Μια τυπική εσχάρα αποτέφρωσης είναι κατασκευασμένη από διάφορα κεκλιμένα τμήματα. Τα ΑΣΑ μεταφέρονται πάνω στις εσχάρες, διαμέσου του θαλάμου του αποτεφρωτήρα, χάρη στη κίνηση των εσχάρων και τη βαρύτητα (εικόνα 3,σημεία 3-4). Συχνά κατά μήκος των εσχαρών χρησιμοποιούνται βαθμίδες, έτσι τα ΑΣΑ μεταφέρονται από βαθμίδα σε βαθμίδα και τεμαχίζονται σε μικρότερα τμήματα, προσφέροντας έτσι επιφάνειες καύσιμου υλικού κατάλληλες για πιο αποτελεσματική καύση. Τα διάφορα τμήματα των εσχαρών έχουν σύστημα παροχής αέρα, που είναι ανεξάρτητο για κάθε τμήμα.

Τα βασικά στάδια της αποτέφρωσης είναι:

- Ξήρανση (Drying): Τα απορρίμματα δέχονται ακτινοβολία από την φλόγα σε συνδυασμό με προθερμασμένο αέρα (preheated air), με αποτέλεσμα την εξάτμιση της υγρασίας αλλά και μερικών πτητικών συστατικών στα ΑΣΑ (θερμοκρασίες έως 100°C).
- Πυρόλυση (Pyrolysis): Αύξηση της θερμοκρασίας και εξάτμιση των περισσότερων πτητικών συστατικών (θερμοκρασίες έως 700°C).
- Ανάφλεξη (ignition): Μέσα στο θάλαμο αποτέφρωσης δημιουργείται η ανάφλεξη των ΑΣΑ μέσω της φλόγας και των θερμαινόμενων τοιχωμάτων.
- Αεριοποίηση και καύση (gasification-combustion): Η πλήρης ανάφλεξη των απορριμμάτων, προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας και την αεριοποίηση μιας

σειράς συστατικών των ΑΣΑ. Ολοκληρώνεται η καύση του εναπομείναντα άνθρακα, και στο δευτερεύοντα θάλαμο (φλογοθάλαμος) γίνεται η συνέχεια της καύσης των απαερίων που παράχθηκαν στις προηγούμενες φάσεις της πυρόλυσης και της αεριοποίησης (θερμοκρασίες 700-1000°C).

- Ολοκλήρωση της καύσης: στο τέλος της εσχάρας αποδίδεται το στερεό ανόργανο υπόλειμμα της διαδικασίας, το οποίο πηγαίνει προς εδαφική διάθεση [1,2,3,14].

Τα κύρια τμήματα της τεχνολογίας των κινούμενων εσχαρών, αποτελούν και τα κριτήρια για τον πλήρη σχεδιασμό ενός συστήματος μαζικής καύσης με κινούμενες εσχάρες. Έτσι κατά την σχεδίαση της μονάδας λαμβάνονται υπόψη παράγοντες που αφορούν: α) τις εσχάρες (τρόπος κίνησης της εσχάρας, διαστασιολόγηση, β)την παροχή αέρα καύσης για την διασφάλιση της βέλτιστης απόδοσης του συστήματος καύσης, γ) το σύστημα καύσης (αποτεφρωτήρας, δευτερογενής θάλαμος καύσης), δ) τη ζώνη μετάκαυσης και ε) την πιθανή επανακυκλοφορία των απαερίων στον θάλαμο καύσης [3,4

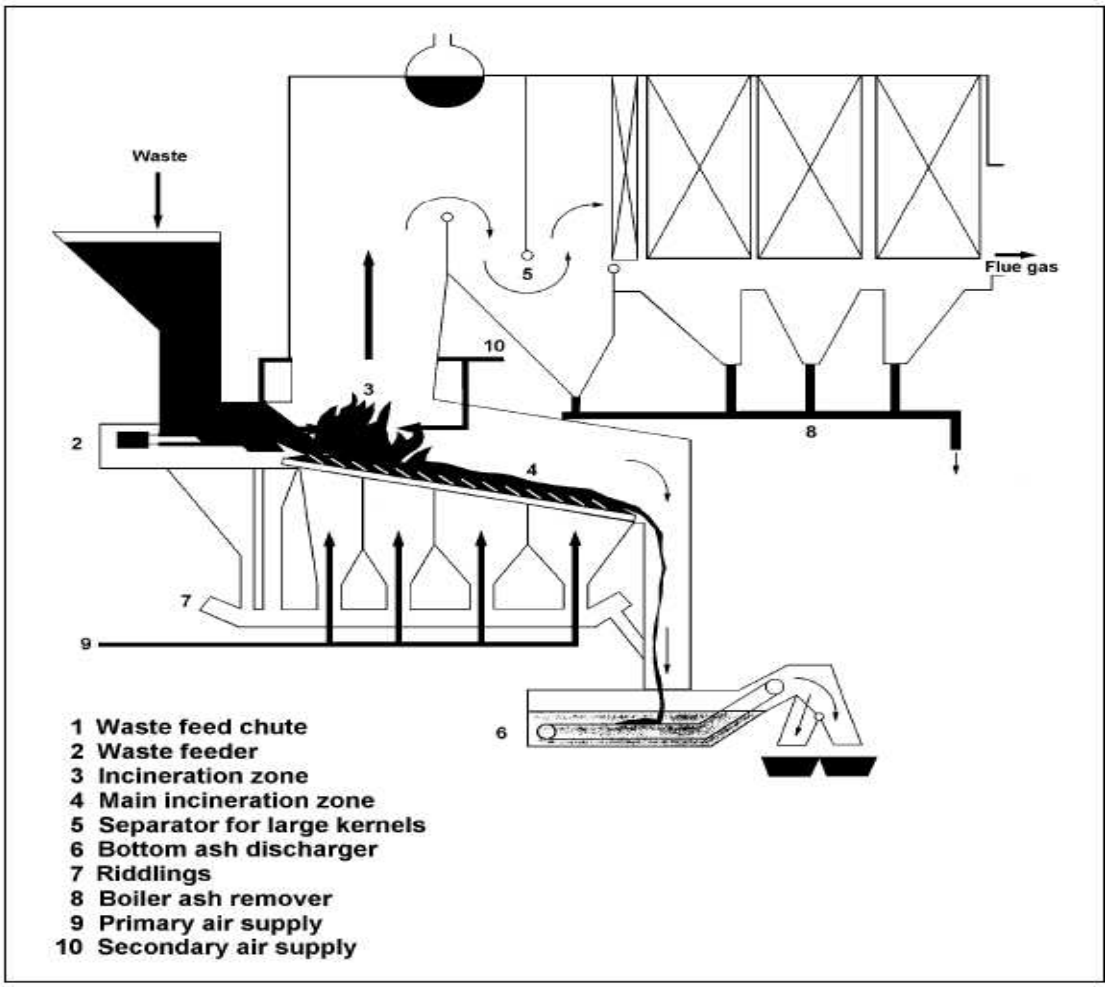
Η τεχνολογία των εσχαρών επιτρέπει: α) την μεταφορά, ανάμειξη, ομογενοποίηση των απορριμμάτων και την δημιουργία μιας ικανής επιφάνειας προς καύση και β) την παροχή και διανομή αέρα πρωτογενούς καύσης (primary combustion air) στο στρώμα των απορριμμάτων [4].

Διάφοροι τύποι εσχαρών χρησιμοποιούνται για την αποτέφρωση: εσχάρες εμπρόσθιας κίνησης (forward grate), οπίσθιας κίνησης (backward grate), παλινδρομικής κίνησης (reciprocating grate), κτλ [3,4,6,14]. Σημαντικές παράμετροι στο σχεδιασμό των εσχαρών είναι η διαστασιολόγηση τους και η διαίρεση τους σε περισσότερα τμήματα (τεχνικά προτείνονται 4-6 τμήματα). Οι σχεδιαστικές παράμετροι πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τη δυναμικότητα της μονάδας, το εύρος της ποικιλότητας της θερμογόνου δύναμης των απορριμμάτων, τη σύνθεση των ΑΣΑ, το είδος των εσχάρων που θα επιλεγούν και τις συνθήκες ελάχιστης και μέγιστης λειτουργίας της μονάδας. Το σύστημα πρέπει να σχεδιαστεί, από το σημείο τροφοδοσίας έως το τελευταίο σημείο της καύσης, για την αποφυγή υπερφόρτωσης ή ελλιπούς τροφοδοσίας [4].

Ο σχεδιασμός του συστήματος παροχής και διανομής του βασικού αέρα καύσης παίζει σημαντικό ρόλο γιατί επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της καύσης και τον τα στάδια της ξήρανσης και της πρωτογενούς αποτέφρωσης (πυρόλυση, ανάφλεξη, αεριοποίηση). Για παράδειγμα οι ζώνες της ξήρανσης και καύσης πρέπει να καταλαμβάνουν το 65-70% του συνολικού μήκους των εσχαρών. Η παρεχομένη ποσότητα και οι θέσεις των σημείων παροχής του αέρα σχεδιάζονται για να επιτευχθεί ο σκοπός αυτός, ενώ η

συνολική ζώνη παροχής δεν πρέπει να υπερβαίνει το 2% της συνολικής επιφάνειας των εσχαρών [4]. Σύμφωνα με την εικόνα 3 (σημείο 9) ο αέρας διοχετεύεται κάτω από το στρώμα των απορριμμάτων διαμέσου των διάκενων των εσχαρών και απαιτείται ένας αριθμός ζωνών παροχής αέρα για να επιτευχθεί η βέλτιστη επεξεργασία στα διάφορα στάδια της αποτέφρωσης.. Οι ταχύτητες μεταφοράς των εσχαρών και οι παροχές αέρα πρέπει να είναι ρυθμιζόμενες [2,4].

Το σύστημα αποτέφρωσης, αποτελείται από τον αποτεφρωτήρα, το δευτερογενής θάλαμο και τη ζώνη μετάκαυσης (εικόνα 3, σημείο 3). Το σύστημα πρέπει να σχεδιάζεται για να παρέχει το μεγαλύτερο δυνατό χρόνο παραμονής και αντίδρασης των απαερίων (flue gases) σε υψηλές θερμοκρασίες. Ο αποτεφρωτήρας είναι ο θάλαμος μέσα στον οποίο γίνεται η μεταφορά των απορριμμάτων πάνω στις εσχάρες και ουσιαστικά αποτελεί το πρώτο στάδιο της καύσης των απορριμμάτων. Ο δευτερεύον θάλαμος βρίσκεται ακριβώς από πάνω από τον αποτεφρωτήρα. Στον δευτερεύοντα θάλαμο συνεχίζεται περεταίρω η καύση των αερίων που παράχθηκαν στο πρώτο στάδιο της καύσης (εικόνα 3).



Εικόνα 3: κινούμενες εσχάρες Moving grates [14]

Ο σχεδιασμός του θαλάμου δευτερογενούς αποτέφρωσης παίζει σημαντικό ρόλο. Η θερμική ενέργεια που παράγεται μέσα στο θάλαμο αυτό περνά στα τοιχώματα του λέβητα. Έτσι ο δευτερογενής θάλαμος πρέπει να σχεδιάζεται με μεγάλη χωρητικότητα ούτως ώστε όλες οι αντιδράσεις της καύσης των καυσαερίων να λάβουν χώρα σε αυτόν πριν προλάβουν να φτάσουν στα σχετικά απροστάτευτα τοιχώματα του λέβητα. Ένας σημαντικός παράγοντας, είναι αυτός του σχεδιασμού του θαλάμου πρωτογενούς αποτέφρωσης, όπου πρέπει να πληρεί προϋποθέσεις ώστε να μην συσσωρεύονται τέφρα και υπόλειμμα της αποτέφρωσης στα τοιχώματα του με αποτέλεσμα να έχουμε ανεπαρκές θερμικό φορτίο. Η ταχύτητα παροχής των απαερίων μέσα στον θάλαμο πρέπει να είναι <3-4m/sec) [4].

Στα τεχνικά κριτήρια του σχεδιασμού του αποτεφρωτήρα δευτερογενούς αποτέφρωσης, είναι η επίτευξη θερμοκρασίας 850 ^{0}C στα τοιχώματα του και ο χρόνος παραμονής των αερίων να είναι ίσος με τ =2sec με περιεκτικότητα σε O_2, 11 %. Οι συνθήκες καύσης αυτές είναι οι απαιτούμενες από τη νομοθεσία για την μείωση των παραγόμενων διοξινών [1,3,4]. Στον δευτερεύοντα θάλαμο καύσης γίνεται η εισαγωγή δευτερογενούς αέρα έτσι ώστε να γίνει επιπλέον καύση των επικίνδυνων αέριων ενώσεων (πτητικές οργανικές ενώσεις, διοξίνες, φουράνια) που παράγονται στο πρωτογενή θάλαμο αποτέφρωσης. Η δευτερογενής παροχή αέρα γίνεται μέσω ακροφυσίων, στο σημείο εισόδου του δεύτερου θαλάμου αποτέφρωσης (εικόνα 2).

Μερικές φορές οι μονάδες σχεδιάζονται ώστε να υπάρχει ένα ρεύμα ανακύκλωσης ενός τμήματος (20-30 %) των απαερίων της αποτέφρωσης. Σύμφωνα με το σχεδιασμό αυτό τα απαέρια αφότου έχουν περάσει από το σύστημα συλλογής της σκόνης, διοχετεύονται μέσω ακροφύσιων είτε στον αποτεφρωτήρα είτε στο θάλαμο δευτερογενούς αποτέφρωσης [3,4].

Με την ανακύκλωση αυξάνεται η απόδοση ανάκτησης της θερμότητας (1-3%) λόγω της σημαντικής μείωσης της περίσσειας οξυγόνου, μειώνονται οι εκπομπές των NO_x σε σημαντικό ποσοστό (20-40%) και έτσι αποτελεί και μέτρο πρωτογενούς απομάκρυνσης των NO_x, μειώνεται η παραγωγή διοξινών (εξαιτίας της μειωμένης συγκέντρωσης του οξυγόνου), σταθεροποιεί τις συνθήκες διαταραχής της ροής των καυσαερίων και μειώνεται ο όγκος των καυσαερίων και το μέγεθος του συστήματος επεξεργασίας απαεριών (APC system) [4,14].

Η παροχή τόσο του πρωτογενούς όσο και του δευτερογενούς ρεύματος αέρα θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτονται απαιτήσεις αποφυγής της ατελούς καύσης, δημιουργίας διαβρωτικής ατμόσφαιρας και άλλων σχετικών προβλημάτων. Το ρεύμα του πρωτογενούς αέρα καύσης αντλείται από την ατμόσφαιρα και κατά ένα

μέρος από το χώρο αποθήκευσης των απορριμμάτων (μείωση οσμών λόγω δημιουργίας αρνητικής πίεσης στο χώρο) και διοχετεύεται κάτω από τις εσχάρες. Ο δευτερογενής αέρας καύσης απορροφάται με τον ίδιο τρόπο και εισέρχεται μέσω ακροφυσίων. Πολλές φορές είναι αναγκαίο ο πρωτογενής αέρας καύσης να προθερμαίνεται με ειδικούς σωλήνες σε θερμοκρασίες γύρω στους 145 ^{0}C ανάλογα με την χημική σύνθεση ή το εύρος της θερμογόνου δύναμης των ΑΣΑ [4]

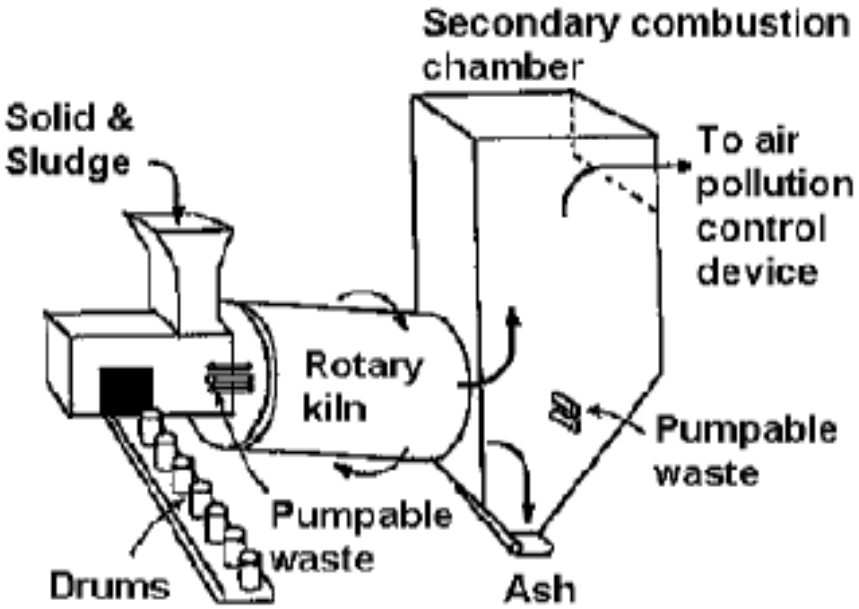
Β) περιστρεφόμενος Κλίβανος (Rotary Kiln)

Η μαζική αποτέφρωση απορριμμάτων με την τεχνολογία του περιστρεφόμενου κλιβάνου βασίζεται στην καύση των ΑΣΑ μέσα σε έναν κεκλιμένο περιστρεφόμενο κυλινδρικό θάλαμο. Τα ΑΣΑ μεταφέρονται διαμέσου του κυλίνδρου, ο οποίος αποτελεί τον αποτεφρωτήρα εξαιτίας της περιστροφικής κίνησης. Η κίνηση αυτή διευκολύνει την πλήρη αποτέφρωση των ΑΣΑ, λόγω της δημιουργίας μικρών επιφανειών που προκύπτουν από τη διάσπασης τους με συνέπεια την εντατική τους ανάμειξη με πρωτογενή αέρα καύσης [2,4].

Από πλευράς σχεδιασμού ο περιστρεφόμενος κλίβανος είναι συνήθως τύπου refractory-lined ενώ υπάρχουν και κλίβανοι τύπου water wall. Στις σχεδιαστικές παραμέτρους, η διάμετρος των κυλίνδρων εκτείνεται από 1-5 m και το μήκος του κυλίνδρου από 1-5 m. Η ημερήσια χωρητικότητα των κυλίνδρων είναι 2.4-480 tn [4]. Οι θάλαμοι λειτουργούν με περίσσεια αέρα (παροχή αέρα καύσης με συγκέντρωση μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται στοιχειομετρικά). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μικρότερη θερμική απόδοση σε σχέση με τις κινούμενες εσχάρες (περίπου 80%), γιατί τα απαέρια που παράγονται έχουν μεγαλύτερο όγκο και χάνονται έτσι μεγάλα ποσά θερμότητας [4].

Εξαιτίας της μικρής παραμονής των απαερίων στον κλίβανο, δεν είναι δυνατή η πλήρης αποτέφρωση τους. Για να επιτευχθεί αυτό ο κλίβανος συνδέεται με έναν δεύτερο θάλαμο, το μετακαυστήρα, ο οποίος μπορεί να αποτελεί και το πρώτο τμήμα του λέβητα για την ανάκτηση της θερμότητας [1,2,3,4]. Τα απαέρια διέρχονται προς τον δεύτερο θάλαμο όπου καίγονται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και με τη σειρά τους περνούν προς το σύστημα επεξεργασίας απερίων (εικόνα 4).

Σημαντικές παράμετροι λειτουργίας του περιστρεφόμενου κλιβάνου, είναι: α) η θερμοκρασία 850-1200 ^{0}C στην έξοδο του κλίβανου και του μεταλλακτήρα, η οποία πρέπει να είναι τέτοια ώστε να διευκολύνει την πλήρη καύση ανάλογα με το είδος του καυσίμου, β) η πίεση στο κλίβανο να είναι αρνητική ώστε να εμποδίζεται η διαφυγή των αέριων και σωματιδιακών ρύπων και γ) ο βαθμός ανάμειξης του αέρα καύσης με τα ΑΣΑ ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματική ανάμειξη [4].



Εικόνα 4: περιστρεφόμενος κύλινδρος [14]

Στα υπέρ τόσο της τεχνολογίας των κινούμενων εσχαρών όσο και αυτής του περιστρεφόμενου κλιβάνου, είναι η έλλειψη προ-επεξεργασίας (διαχωρισμός ή τεμαχισμός) που αυξάνει σημαντικά το κόστος της αποτέφρωσης. Η τεχνολογία των εσχαρών είναι μια ευρέως διαδεδομένη και δοκιμασμένη, μπορεί να επεξεργαστεί διαφορετικής σύνθεσης και θερμογόνου αξίας ΑΣΑ, επιτρέπει μια θερμική απόδοση ανάκτησης που ανέρχεται σε περίπου 85% και μπορεί να διαχειριστεί ημερήσιες δυναμικότητες 1200 tn. Τα ίδια πλεονεκτήματα για το είδος των απορριμμάτων προς επεξεργασία έχει περίπου και η τεχνολογία του περιστρεφόμενου κλιβάνου. Ωστόσο ο περιστρεφόμενος κλίβανος δεν αποτελεί την πλέον συνηθισμένη επιλογή λόγω της μικρής χωρητικότητας σε σχέση με αυτήν των εσχαρών. Κοινό μειονέκτημα των δύο τεχνολογιών είναι το μεγάλο κόστος επένδυσης και λειτουργίας [4].

- **Αποτέφρωση Τύπου Modular**

➢ **Αποθήκευση-Τροφοδοσία**

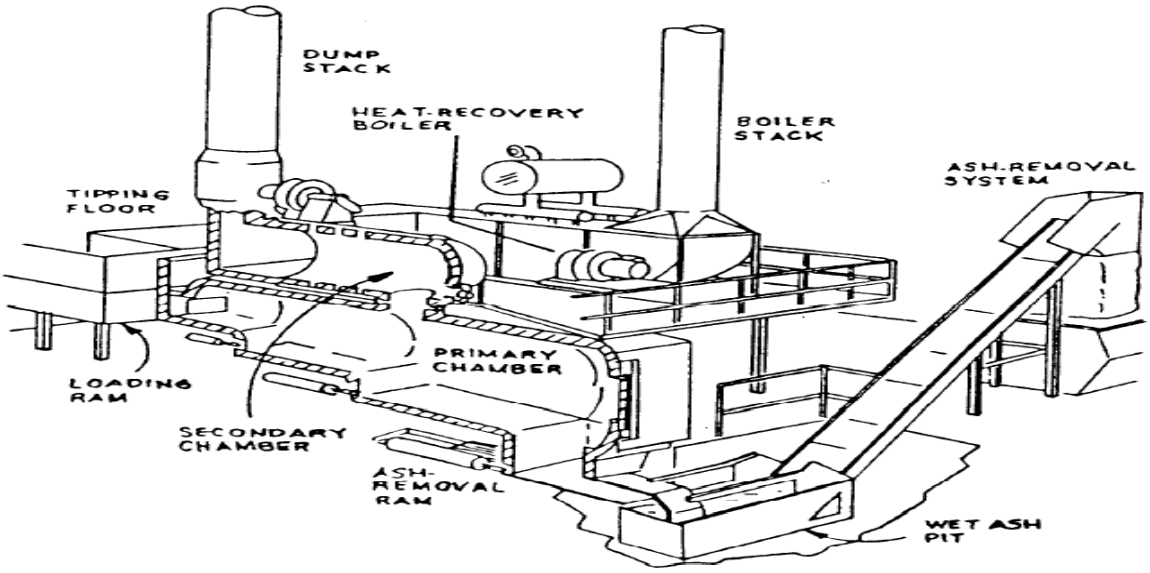
Ο τύπος αυτός των μονάδων αρχικά κατασκευάσθηκε για την εξυπηρέτηση εμπορικών κέντρων, νοσοκομείων, απομακρυσμένων περιοχών (νησιά) κ.α. με μικρή παραγωγή απορριμμάτων, αλλά τα τελευταία χρόνια κατασκευάζονται μονάδες τύπου modular με μεγαλύτερη δυναμικότητα, κάνοντας έτσι πιο δυσδιάκριτο τον διαχωρισμό τους από τις υπόλοιπες μονάδες [2,20].

Τα απορρίμματα αφού συλλεχτούν από την πηγή, μεταφέρονται στους χώρους αποθήκευσης πριν την αποτέφρωση τους στην μονάδα. Οι χώροι αυτοί μπορεί να είναι

χώροι μεγάλης επιφάνειας όπου τα ΑΣΑ απλώνονται, διαχωρίζονται και φορτώνονται από ειδικούς τροχοφόρους φορτωτές στο επίπεδο αποθήκευσης (tipping floor) όπως φαίνεται στο αριστερό τμήμα της εικόνας 5 ή χρησιμοποιούνται όπως και στις μονάδες τύπου field erected μεγάλοι λάκκοι αποθήκευσης με γερανούς μεταφοράς και τροφοδοσίας (pit and crane). Η πρώτη μέθοδος απαιτεί απλούστερο σχεδιασμό σε σχέση με την δεύτερη, όμως απαιτεί μεγαλύτερη έκταση [2] .

Οι μονάδες τύπου modular αποτελούνται από δύο θαλάμους καύσης: το κύριο θάλαμο και τον δευτερεύοντα θάλαμο. Τα ΑΣΑ τροφοδοτούνται με έμβολο στον κύριο θάλαμο όπου καίγονται, στη συνέχεια τα παραγόμενα απαέρια και τα σωματίδια τέφρας, μεταφέρονται στον δευτερεύοντα θάλαμο όπου καίγονται περαιτέρω σε θερμοκρασία καύσης που είναι συνήθως υψηλότερη από αυτήν του κύριου θαλάμου (κεντρικό τμήμα της εικόνας 5). Η τροφοδοσία των ΑΣΑ προς αποτέφρωση αποτελείται από συστήματα τροφοδοσίας συνεχούς ροής (continuous) ή συστήματα τροφοδοσίας τύπου batch. Το υπόλειμμα της αποτέφρωσης απομακρύνεται είτε χειρωνακτικά ή αυτόματα (σε μονάδες τύπου συνεχούς τροφοδοσίας), με χρήση ταινίας ή εμβόλου (Ash removal System, εικόνα 5). Η τροφοδοσία των μονάδων όταν η ημερήσια δυναμικότητα των μονάδων είναι μικρότερη από 5.44tn γίνεται σε μη τακτά χρονικά διαστήματα με χειρωνακτικό τρόπο. Αντίθετα η φόρτωση απαιτείται να γίνεται αυτόματα, όταν η ημερήσια τροφοδοσία ξεπερνά τα 5.44tn και οι συνθήκες φόρτισης είναι ελεγχόμενες [2].

Συνήθως απορρίμματα αποτεφρώνονται μετά το πέρας ενός χρονικού διαστήματος μετά την τροφοδότηση τους. Για το λόγο αυτό αρκετοί αποτεφρωτήρες, διαθέτουν χώρους προσωρινής διάθεσης των καυσαερίων (dump stacks) με σκοπό την παρεμπόδιση ζημιών στα διάφορα τμήματα της μονάδας (αποτεφρωτήρας, σύστημα ανάκτησης θερμότητας, σύστημα ελέγχου αερίων). Η χρήση αυτού του τμήματος της μονάδας βοηθά και στην παρεμπόδιση συσσώρευσης επικίνδυνων αερίων κοντά στους θερμούς θαλάμους. Λειτουργεί αυτόματα, όταν κάποια μη επιθυμητή βλάβη λάβει χώρα, σε κάποιο τμήμα της μονάδας. Ωστόσο μερικά συστήματα είναι συνδεδεμένα με το σύστημα διαχείρισης απαερίων. Το γεγονός αυτό όμως προκαλεί την διαφυγή ποσότητες ανεπεξέργαστων καυσαερίων από έξοδο της μονάδας [2].



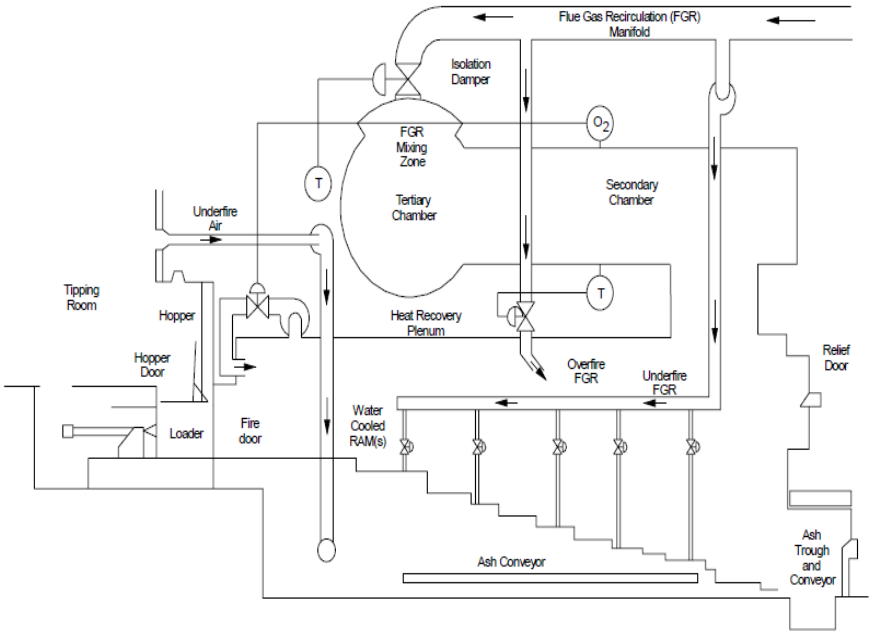
Εικόνα 5: μονάδα μονάδας αποτέφρωσης απορριμμάτων τύπου modular [2]

- **Τύποι αποτέφρωσης**

Δύο είναι οι κύριοι τύποι των συστημάτων modular και διακρίνονται ανάλογα με την παροχή του αέρα καύσης κατά την διαδικασία της αποτέφρωσης: α) τα συστήματα περίσσειας αέρα (excess air system) και β) αυτά του ελεγχόμενου αέρα (starved or controlled air system).

Α)Συστήματα Περίσσειας αέρα (Excess Air Systems)

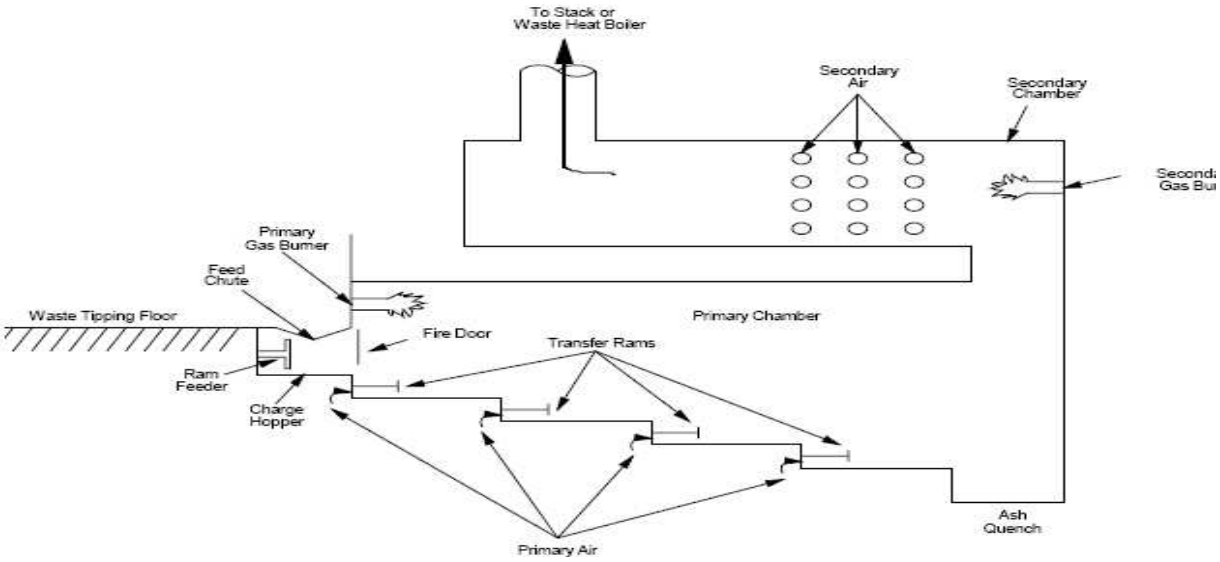
Σε αυτό το τύπο τόσο ο πρωτεύον όσο και ο δευτερεύον θάλαμος λειτουργούν σε συνθήκες παροχής αέρα που υπερβαίνουν τις στοιχειομετρικές απαιτήσεις (περίσσεια αέρα 100-250 %). Ο στόχος της τεχνολογίας αυτής είναι να παρέχει επιπλέον αέρα ώστε να μεγιστοποιηθεί η αποτέφρωση. Τα ΑΣΑ τροφοδοτούνται στον πρωτεύοντα θάλαμο και η τέφρα απομακρύνεται συνεχώς. Η μεγάλη όμως ποσότητα του αέρα διαπερνά τον λέβητα, και το σύστημα επεξεργασίας των απαερίων (Air Pollution Control-APC) και φεύγει διαμέσου της καμινάδας προκαλώντας θερμικές απώλειες. [2,6].



Εικόνα 6: excess air system [6]

Β) Συστήματα Ελεγχόμενου Αέρα (Starved Air Systems)

Στα συστήματα αυτού του τύπου, χρησιμοποιούνται υποστοιχειομετρικές (ελεγχόμενες) συνθήκες στον κύριο θάλαμο και συνθήκες περίσσειας αέρα στο δευτερεύοντα θάλαμο. Στόχος του συστήματος αυτού είναι να επιτύχει ατελή καύση στο πρώτο θάλαμο ώστε να μειώσει την παραγωγή ρύπων όπως οι διοξίνες και να μειώσει τις απαιτήσεις του συστήματος APC για αυξημένη απόδοση στη κατακράτηση τους. Τα προϊόντα της ατελούς καύσης περνούν στο δευτερεύοντα θάλαμο όπου σε συνθήκες περίσσειας αέρα (140-170%) και υψηλών θερμοκρασιών (μεγαλύτερων από αυτές του πρωτεύοντος θαλάμου) αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις προσθήκης προσθετικού καυσίμου (φυσικό αέριο), λαμβάνει χώρα πλήρης καύση σε συνθήκες υψηλής διαταραχής του μείγματος αερίων. Τα απαέρια μετά διέρχονται από τον δευτερεύοντα θάλαμο προς τον λέβητα και το σύστημα επεξεργασίας των απαερίων (εικόνα 7) [2,6]



Εικόνα 7: starved air system [6]

2.1.2 Αποτέφρωση του Επεξεργασμένου κλάσματος των ΑΣΑ, Refused Derived Fuel (RDF)

- **Γενικά**

Η δεύτερη κατηγορία αποτέφρωσης αφορά την καύση ενός ομογενοποιημένου κλάσματος των απορριμμάτων, τα οποία έχουν υποστεί προ-επεξεργασία σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με την επεξεργασία των ΑΣΑ που καταλήγουν προς αποτέφρωση τύπου Mass Burning. [1,2,4,6,10,14] Τα ΑΣΑ προς αποτέφρωση υπόκεινται περεταίρω επεξεργασία. Η επεξεργασία αυτή είναι βιολογική (κομποστοποίηση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ) και μηχανική επεξεργασία με κοσκίνισμα, τεμαχισμό και μείωση μεγέθους τους, ταξινόμηση, διαχωρισμό, ξήρανση και πύκνωση [4,5,10,30], με σκοπό να απομακρυνθούν κλάσματα των απορριμμάτων με υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και να αυξηθεί η θερμογόνος δύναμη του καύσιμου υλικού [1]. Το μείγμα του νέου ομογενοποιημένου καύσιμου υλικού αποτελείται από χαρτί, δέρμα, ύφασμα, ελαστικά, κα. Το προϊόν αυτό αναφέρεται ως Refuse Derived Fuel (RDF) [1,3,4,5,6,8,10].

Το επεξεργασμένο κλάσμα των απορριμμάτων διακρίνεται σε 7 κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία, RDF-1, ουσιαστικά αποτελεί τα ανεπεξέργαστα απορρίμματα (σύμμεικτα απορρίμματα). Η δεύτερη κατηγορία (RDF-2 ή Coarse RDF) είναι το κλάσμα που έχει υποστεί τεμαχισμό και μαγνητικό διαχωρισμό για την ανάκτηση μετάλλων (το 95% του βάρους διαχωρίζεται σε κόσκινο με διάκενα 6in).). Η τρίτη κατηγορία (RDF-3 ή fluff RDF) είναι το κλάσμα που έχει υποστεί τεμαχισμό και μαγνητικό διαχωρισμό για την ανάκτηση μετάλλων, γυαλιού και άλλων ανόργανων υλικών (το 95% του βάρους

διαχωρίζεται σε κόσκινο με διάκενα 2in). Η τέταρτη κατηγορία (RDF-4 ή p-RDF) αποτελεί το καύσιμο υλικό των ΑΣΑ που έχει επεξεργαστεί σε κονιορτό. Η πέμπτη κατηγορία (RDF-5 ή d-RDF) αποτελεί το καύσιμο υλικό των ΑΣΑ που έχει επεξεργαστεί σε μορφή κονιορτού με πυκνότητα μεγαλύτερη από 600 kg/m³. Τα δύο τελευταία κλάσματα (RDF-6 και RDF-7) είναι σε υγρή ή αέρια μορφή αντίστοιχα [30]. Στην Ευρώπη οι κατηγορίες RDF με περεταίρω επεξεργασία είναι οι RDF-4 και RDF-5 [10].

Πριν την καύση του το υλικό αυτό θα πρέπει να πληρεί κάποιες προϋποθέσεις κυρίως ως προς τη θερμογόνο δύναμη του, η οποία θα πρέπει να είναι σχετικά υψηλότερη από αυτή των σύμμεικτων απορριμμάτων. Οι απαιτούμενες προϋποθέσεις όπως ορίζει η νομοθεσία είναι:

- ✓ Κατώτερη θερμογόνος δύναμη: 4.000kcal/gr (16.744MJ/kg),
- ✓ Περιεκτικότητα σε υγρασία του καύσιμου υλικού μικρότερη από 20% και
- ✓ Ποσοστό χαρτιού και πλαστικού στο μίγμα μεγαλύτερο από 95% επί του ξηρού βάρους [1].

Η συνήθης διαδικασία προ-επεξεργασίας περιλαμβάνει τα στάδια του τεμαχισμού, του μαγνητικού διαχωρισμού ή του διαχωρισμού με αέρα, κοσκίνισμα [2,4,6,10]. Πολλές φορές το καύσιμο κλάσμα, επεξεργάζεται περεταίρω για την ανάκτηση μετάλλων και γυαλιού [1,10].

- **Τεχνολογία Αποτέφρωσης ρευστοποιημένης Κλίνης (Fluidized Bed)**

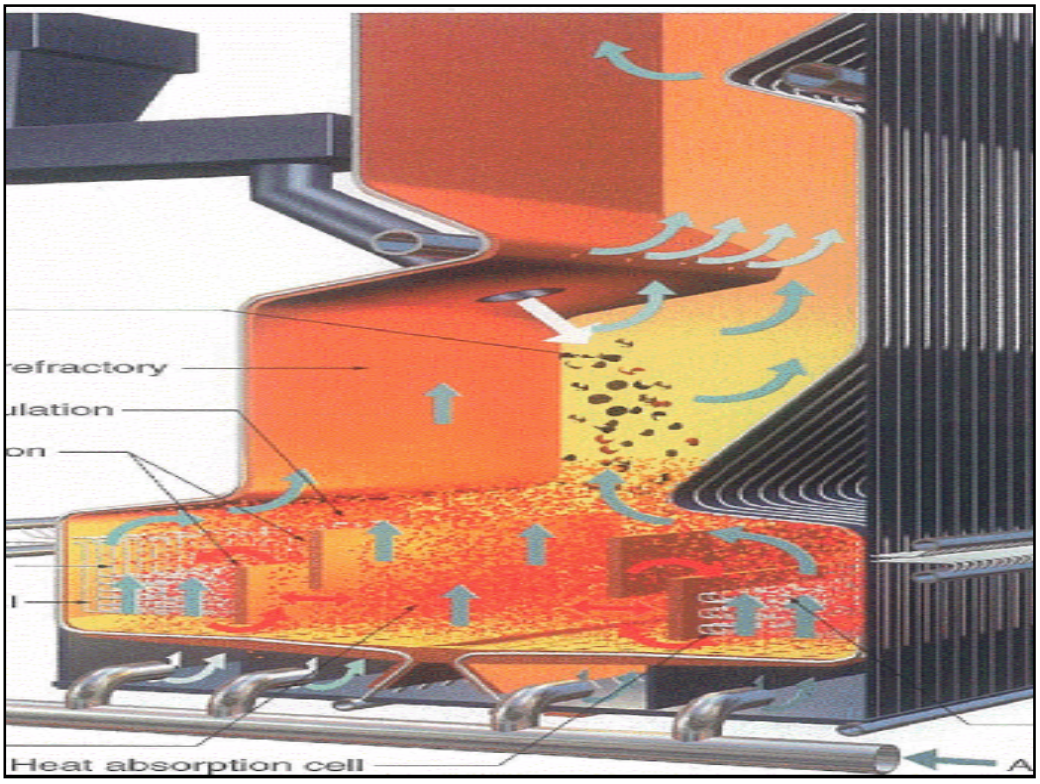
Η τεχνολογία που εφαρμόζεται για καύση του κλάσματος RDF, είναι αυτή της ρευστοποιημένης κλίνης [2,3,6,14]. Η αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας βασίζεται στην ανάμειξη του αιωρούμενου μείγματος στερεών κόκκων με τα τεμαχισμένα ΑΣΑ μέσα σε κλίνη με τη βοήθεια του αέρα καύσης [1,2,3,4,6,14].

Ο αποτεφρωτήρας αποτελείται από ένα κάθετο δοχείο τύπου refractory-lined (συνήθως από χάλυβα). Μέσα στον θάλαμο είναι τοποθετημένη μια κλίνη με στρώμα κοκκώδους υλικού (άμμος, χαλαζίας, ασβέστης ή ασβεστόλιθος) [1,2,3,4,6,14]. Τα ΑΣΑ εισάγονται όπως φαίνεται και στην εικόνα 8 στον αποτεφρωτή είτε από την πάνω πλευρά (ή και από την κάτω μαζί με το κοκκώδες υλικό). Πριν από την εισαγωγή του καυσίμου αποβλήτου, έχουμε προθέρμανση του λέβητα με βοηθητικό καύσιμο για να επιτευχθεί κατάλληλη θερμοκρασία ανάφλεξης. Πρωτογενής αέρας καύσης εισάγεται από ακροφύσια κάτω από το στρώμα και αναγκάζει το μείγμα κόκκων-απορριμμάτων να αιωρηθεί και να αποτεφρωθεί. Ο ρόλος του κοκκώδους υλικού είναι πολύ σημαντικός καθώς με την αιώρηση επιτρέπει την ομογενοποίηση της θερμοκρασίας μέσα στο

θάλαμο και την καλή ανάμειξη του μείγματος. Επιπλέον ένα δευτερεύον ρεύμα αέρα εισέρχεται στο πάνω μέρος του αποτεφρωτήρα για την ολοκλήρωση της αποτέφρωσης [1,4,14]. Οι συνθήκες μεταφοράς μάζας και ομογενοποίησης, ευνοούν μικρότερη θερμοκρασία σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες αποτέφρωσης [1].

Το κοκκώδες υλικό απομακρύνεται μαζί με τα απαέρια της καύσης και μαζί με το υπόλοιπο σωματιδιακό υλικό (ιπτάμενη τέφρα) και διέρχονται από κυκλώνα όπου διαχωρίζονται και επιστρέφουν στην κλίνη. Τα βαρύτερα σωματίδια κατακάθονται μαζί με το κοκκώδες υλικό (καθιζάμενη τέφρα) και μπορούν να απομακρυνθούν σε στερεή μορφή όπως οι κόκκοι της κλίνης.

Στα θετικά της τεχνολογίας αυτής είναι η σημαντική μείωση ρύπων όπως το SO_2 το οποίο για παράδειγμα αντιδρά με το κοκκώδες υλικό (ασβέστης, ασβεστόλιθος) [3] επιπλέον οι υψηλές θερμοκρασίες που μέσα στο θάλαμο της κλίνης (850-950°C) επιτρέπουν τη καταστροφή των διοξινών [14] η υψηλή ανάκτηση θερμότητας (περίπου 90 %) και το χαμηλό κόστος επένδυσης [4]. Οι απαιτήσεις όμως σε επεξεργασμένο και υψηλής θερμογόνου δύναμης υλικό, αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα. Σημαντικό ρόλο παίζει το οικονομικό κόστος λόγω της προ-επεξεργασίας .



Εικόνα 8: μονάδα μονάδας αποτέφρωσης ρευστοποιημένης κλίνης (fluidized bed) [7]

- **Κατηγορίες Αποτεφρωτήρων Ρευστοποιημένης Κλίνης**

Δύο είναι οι βασικοί τύποι σχεδιασμού της τεχνολογίας αποτέφρωσης ρευστοποιημένης κλίνης. Η ρευστοποιημένη κλίνη κυκλοφορίας (circulating fluidized bed) και η στατική ρευστοποιημένη κλίνη (stationary fluidized bed) [3,4,6,14].

Η πρώτη κατηγορία αποτελείται από: το θάλαμο αποτέφρωσης, έναν κυκλώνα έναν θάλαμο μετάκαυσης και σύστημα ανακυκλοφορίας του υλικού της κλίνης με ψύκτη κλίνης. Μετά τη διαδικασία της αποτέφρωσης των ΑΣΑ στο θάλαμο της ρευστοποιημένης κλίνης τα αιωρούμενα κοκκώδη σωματίδια της κλίνης μεταφέρονται με τα καυσαέρια στον κυκλώνα. Αφού διαχωριστούν στη συσκευή αυτή, επιστρέφουν μέσω σιφωνίων και ψύχονται προς εκμετάλλευση της θερμότητας (για ατμό ή προθέρμανση του θαλάμου αποτέφρωσης) και επιστρέφουν στη κλίνη [3,4,6,14]. Τα απαέρια διοχετεύονται στον μετακαυστήρα για επιπλέον καύση. Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από έναν θάλαμο καύσης με βαλβίδα, από αδιαβατικής κατασκευής υλικό το οποίο δεν επιτρέπει ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον ώστε να μειώνεται η θερμοκρασία στο θάλαμο, μια στατική ρευστοποιημένη κλίνη και έναν θάλαμο μετάκαυσης. Εδώ δεν έχουμε το σύστημα ανακυκλοφορίας [3].

2.2 Ανάκτηση Ενέργειας

2.2.1 Γενικά

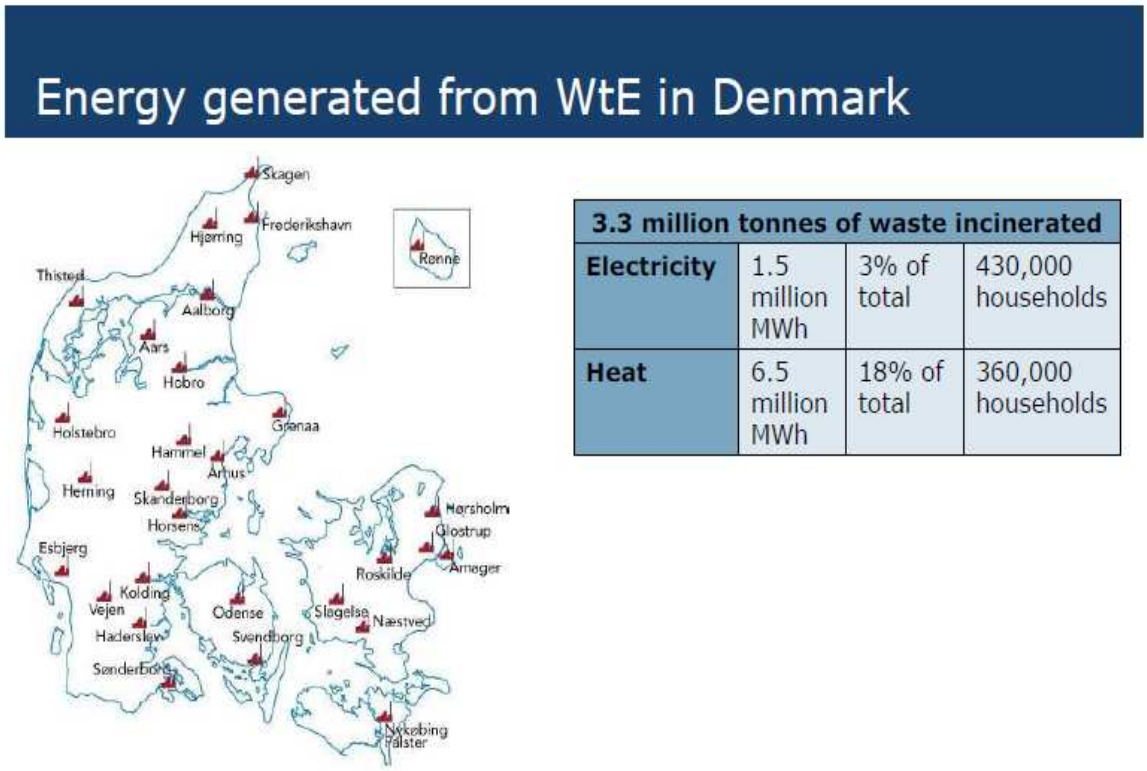
Το όφελος από την καύση των απορριμμάτων είναι βασικά η μείωση του όγκου των ΑΣΑ προς υγειονομική ταφή ταυτόχρονα με την εκμετάλλευση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας. Μειώνονται οι απαιτήσεις σε συμβατικά καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [14]. Η εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας αποτελεί και το κυριότερο πλεονέκτημα των μονάδων αποτέφρωσης [11]. Η παραγωγή ενέργειας γίνεται με την αξιοποίηση της θερμογόνου δύναμης των ΑΣΑ, μέσω της ανάκτησης της θερμότητας που παράγεται από την αποτέφρωση τους.

Για την αξιοποίηση της παραγόμενης θερμότητας και την ανάκτηση της ενέργειας, οι σύγχρονες μονάδες αποτέφρωσης διαθέτουν ειδικούς λέβητες, με τη βοήθεια των οποίων η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Η θερμότητα διοχετεύεται μέσω των απαερίων (flue gases) στο λέβητα (boiler). Τα απαέρια ψύχονται στο λέβητα πριν περάσουν στο σύστημα APC. Ο λέβητας αποτελεί τη συσκευή ανάκτησης της ενέργειας [3,4]. Ο τύπος του λέβητα που θα τοποθετηθεί στη μονάδα αποτέφρωσης εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας, αν θα χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ζεστού νερού και

παραγωγή ατμού για θέρμανση, τροφοδοσία σε διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες και παραγωγή ενέργειας ή απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [4,14]. Με βάση το τρόπο εκμετάλλευσης της θερμότητας της καύσης των απορριμμάτων, υπάρχουν τρία είδη λεβήτων: 1) Ο λέβητας θερμού νερού, 2) ο λέβητας χαμηλής πίεσης (low pressure boiler) για παραγωγή ατμού και 3) ο λέβητας παραγωγής ατμού-ενέργειας, ο οποίος παράγει ενέργεια ή συνδυασμό ισχύος με ατμό ή ζεστό νερό. Σε γενικές γραμμές το ενεργειακό προϊόν προκύπτει από τη διαφορά θερμοκρασίας των απαερίων κατάντη και ανάντη του λέβητα [4].

Παράμετροι σχεδιασμού που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι συνθήκες αγοράς ενέργειας στην περιοχή που θα κατασκευαστεί η μονάδα, η ύπαρξη δικτύων διανομής της ενέργειας (ηλεκτρικό δίκτυο ή δίκτυο θέρμανσης), η ετήσια ζήτηση και οι εποχιακές διακυμάνσεις (ενεργειακές ανάγκες για το χειμώνα/καλοκαίρι) για τις ανάγκες σε ενέργεια (οι μονάδες αποτέφρωσης έχουν μια σταθερή παραγωγή ενέργειας), το κλίμα σε κάθε περιοχή επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο θα αξιοποιηθεί η παραγόμενη ενέργεια (σε περιοχές με ψυχρά κλίματα, η παραγωγή ενέργειας για θέρμανση θεωρείται η βέλτιστη λύση), η διαθεσιμότητα πρώτης ύλης για καύση είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την επιλογή της περιοχής όπου θα εγκατασταθεί η μονάδα (κατάλληλο δίκτυο μεταφοράς και πρόχειρης αποθήκευσης των ΑΣΑ), η πολιτική που ακολουθείται στον τομέα πώλησης της ενέργειας. Γενικά η απόφαση για το τύπο που θα έχει το ενεργειακό προϊόν, θα πρέπει να λαμβάνεται πριν την κατασκευή της μονάδας με τη σύμπραξη κατάλληλων συμφωνιών [4,14].

Η ενέργεια που παράγεται από την αποτέφρωση των ΑΣΑ χρησιμοποιείται για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες της περιοχής που λειτουργεί. Στη Δανία για παράδειγμα, αποτεφρώνονται ετησίως 3.3 εκατομμύρια τόνοι ΑΣΑ με ταυτόχρονη παραγωγή 1.5 εκατομμυρίου MWh ηλεκτρικής ενέργειας (αποτελεί το 3% των αναγκών της χώρας σε ηλεκτρική ενέργεια και καλύπτει τις ανάγκες 430.000 νοικοκυριών) και 6.5 εκατομμυρίων MWh θερμικής ενέργειας (αποτελεί το 18% των αναγκών της χώρας για θέρμανση και καλύπτει τις ανάγκες 360.000 νοικοκυριών) .
[http://www.ambwashington.um.dk/NR/rdonlyres/C47EF405-66C2-41CD-9F38-6D43A26DC232/0/EnergyEfficiency4Ramboell.pdf]



Εικόνα 9: μονάδες αποτέφρωσης ΑΣΑ στη Δανία με παραγωγή ηλεκτρικής & θερμικής ενέργειας [http://www.ambwashington.um.dk/NR/rdonlyres/C47EF405-66C2-41CD-9F38-6D43A26DC232/0/EnergyEfficiency4Ramboell.pdf]

2.2.2 Απόδοση Ανακτώμενης Ενέργειας (Efficiency)

Η θερμική απόδοση είναι ο λόγος της ανακτώμενης θερμότητας προς εκμετάλλευση προς τη θερμική ενέργεια των καυσαερίων όταν εισέρχονται από το σύστημα αποτέφρωσης. Η απόδοση εξαρτάται από την παροχή και από την θερμοκρασία των εξερχόμενων καυσαερίων. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η θερμική απόδοση διάφορων κατηγοριών λεβήτων [4]

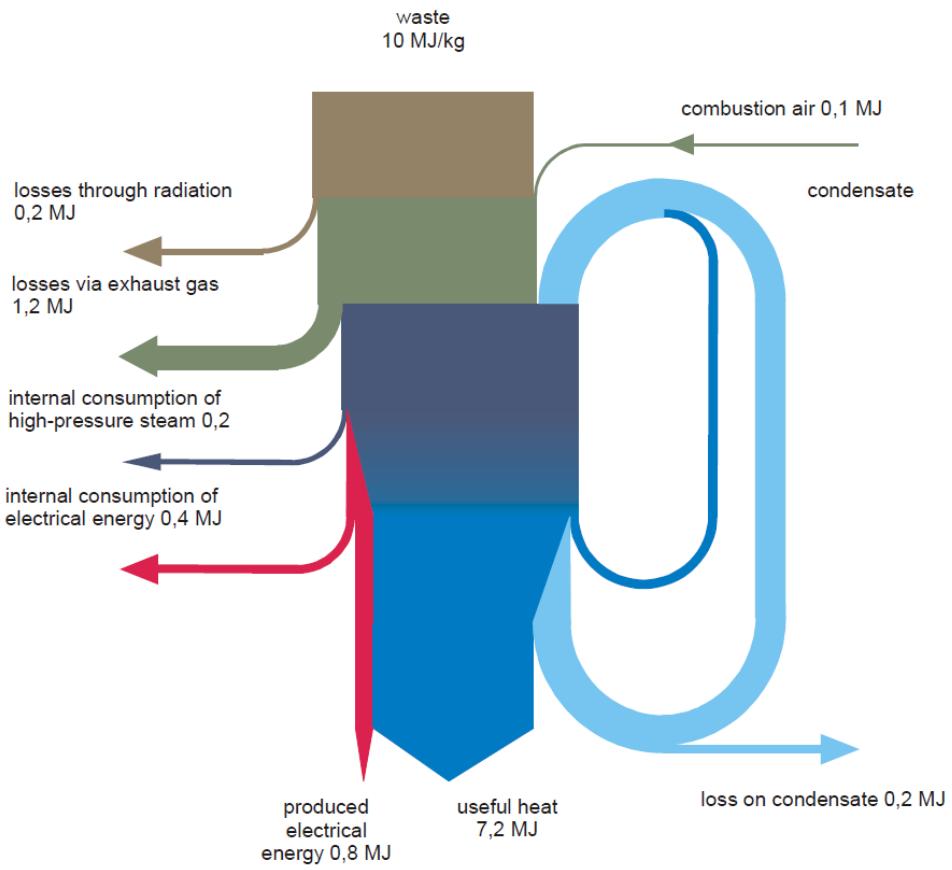
πίνακας 2: ενεργειακές αποδόσεις για διάφορε μορφές ανάκτησης ενέργειας [4]

Παραγωγή Ενέργειας	Ενεργειακό προϊόν	Απόδοση ανάκτησης (%)	Μέση απόδοση ανάκτησης (%)
Θερμότητα	Θερμότητα	80	80
Ατμός	Ατμός	80	80
Ηλεκτρισμός	Ηλεκτρισμός	25	25
Συνδυασμός Ατμού-Ηλεκτρισμού	Ατμός	0-75	25-75
	Ηλεκτρισμός	0-25	
Συνδυασμός Θερμότητας - ηλεκτρισμού	Θερμότητα	60-65	75
	Ηλεκτρισμός	20-25	

Σύμφωνα με τον πίνακα 2, οι αποδόσεις της παραγόμενης ενέργειας από την αποτέφρωση των ΑΣΑ ποικίλουν ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο αυτή ανακτάται. Όταν χρησιμοποιείται μόνο για την παραγωγή ατμού ή ζεστού νερού για θέρμανση η απόδοση ανάκτησης είναι 80%. Όταν παράγεται ηλεκτρισμός, η απόδοση ανάκτησης είναι 25%. Όταν παράγεται ατμός σε συνδυασμό με ηλεκτρισμό, η απόδοση ανάκτησης κυμαίνεται από 25-75%. Η βέλτιστη επιλογή από είναι ο συνδυασμός παραγόμενης θερμότητας και ηλεκτρισμού, η μέση απόδοση ανάκτησης είναι 75% [4]. Στη Δανία είναι χαρακτηριστικό ότι το 84% των μονάδων αποτέφρωσης παράγουν ενέργεια με συνδυασμό θερμότητας και ηλεκτρισμού και μόνο το 16% παράγει μόνο ζεστό νερό για θέρμανση. Από μελέτες που έχουν γίνει προέκυψε το συμπέρασμα ότι η καύση ενός τόνου απορριμμάτων ισοδυναμεί με την παραγωγή προς πώληση 1MWh ενέργειας για θέρμανση και 660kWh ηλεκτρικής ενέργειας.

[http://www.ambwashington.um.dk/NR/rdonlyres/C47EF405-66C2-41CD-9F38-6D43A26DC232/0/EnergyEfficiency4Ramboell.pdf]

Στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 10) παρουσιάζεται το ενεργειακό ισοζύγιο για μια μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ η οποία παράγει θερμότητα και ηλεκτρισμό σε κανονικές συνθήκες ατμού. Η παραγόμενη ποσότητα ενέργειας για Θέρμανση αποτελεί το 75% της Συνολικής θερμικής ενέργειας (72% προς εκμετάλλευση και 3% προς χρήση της ίδιας της μονάδας). Η παραγόμενη ενέργεια ηλεκτρισμού αποτελεί το 12% (8% προς εκμετάλλευση και 4% προς χρήση της ίδιας της μονάδας) ενώ οι απώλειες από τη διαφυγή της θερμότητας στα τοιχώματα των θαλάμων αποτέφρωσης, τη θερμική ενέργεια που χάνεται λόγω διαφυγής των απαερίων και την ενέργεια λόγω των υδρατμών είναι συνολικά 13%. Η γενική απόδοση της ανακτώμενης ενέργειας προς εκμετάλλευση φτάνει το 80% [3].



Εικόνα 10: Συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης σε κανονικές συνθήκες ατμού [3]

Ανάλογα ισοζύγια γίνονται και σε άλλες περιπτώσεις: Όταν έχουμε Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας με ατμό αυξημένης πίεσης, τότε η παραγόμενη ποσότητα ενέργειας για θερμότητα αποτελεί το 69% της Συνολικής θερμότητας (67% προς εκμετάλλευση και 2% προς χρήση της ίδιας της μονάδας). Ο παραγόμενος Ηλεκτρισμός αποτελεί το 17% (13% προς εκμετάλλευση και 4% προς χρήση της ίδιας της μονάδας) ενώ οι απώλειες 14%. Η γενική απόδοση της ανακτώμενης ενέργειας προς εκμετάλλευση φτάνει το 80%.

Για μονάδες αποτέφρωσης ΑΣΑ η οποίες παράγουν ηλεκτρισμό σε κανονικές συνθήκες πίεσης ατμού, από το ενεργειακό ισοζύγιο προκύπτει ότι το 22% της συνολικής θερμότητας μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και μάλιστα το 4%, χρησιμοποιείται από την ίδια την μονάδα για εσωτερική κατανάλωση. Η παραγωγή του θερμότητας φτάνει στα 54%, με μόλις το 2% να καταναλώνεται για εσωτερική χρήση. Η συνολική απόδοση ανάκτησης φτάνει στο 70%.

Για μονάδες αποτέφρωσης ΑΣΑ η οποίες παράγουν ηλεκτρισμό σε συνθήκες ατμού αυξημένης πίεσης, από το ενεργειακό ισοζύγιο προκύπτει ότι το 26% της συνολικής θερμότητας μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό και μάλιστα το 4%, χρησιμοποιείται από την ίδια την μονάδα για εσωτερική κατανάλωση. Η παραγωγή του θερμότητας φτάνει στα 60%, με μόλις το 2% να καταναλώνεται για εσωτερική χρήση. Η συνολική απόδοση ανάκτησης φτάνει στο 80%.

Παρατηρούμε ότι ένα μικρό μέρος του συνολικού παραγόμενου ηλεκτρισμού (περίπου 6%) χρησιμοποιείται για να καλύψει τις ανάγκες των αντλιών παροχής του αέρα καύσης, των σωλήνων παροχής νερού ή των σωλήνων ανακυκλοφορίας στο σύστημα υγρής επεξεργασίας. Από πραγματικά στοιχεία (παράδειγμα της μονάδας αποτέφρωσης Spittelau, Αυστρία), προκύπτει ότι η συνολική κατανάλωση ηλεκτρισμού ξεπερνά, σε ορισμένες περιπτώσεις το 50% της συνολικής παραγόμενης [3]. Κάνοντας μάλιστα μια πρόχειρη οικονομική προσέγγιση από τα δεδομένα της μονάδας προκύπτει το εξής: Το κόστος της μονάδας είναι περίπου 57,76€/tn ΑΣΑ. Η μονάδα, από την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, έχει κέρδος (χωρίς τους φόρους) 65.98€/tn ΑΣΑ καλύπτοντας παράλληλα τις ίδιες ανάγκες της [3].

πίνακας 3: Ενεργειακό ισοζύγιο της μονάδας αποτέφρωσης Spittelau [3]

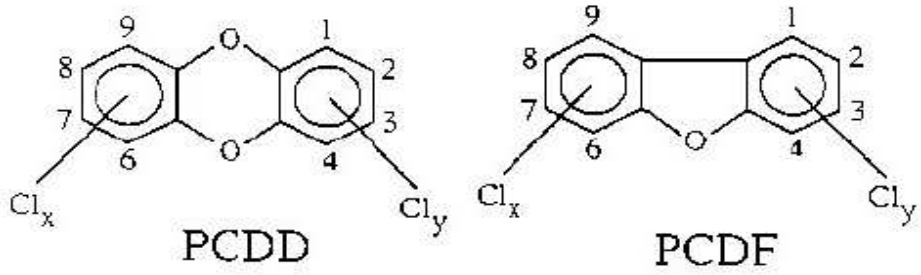
Input related to 1 t waste		Output related to 1 t waste	
Heat	27.6 kWh	Heat	1,857 kWh
Electricity	78.5 kWh	Electricity	150 kWh
Natural gas	20.1 m³	Steam (p= 32 bar; T = 240 °C)	2.6 t
Fresh water	730 l	Slag	207 kg
Lime	2.9 kg	Metal scrap	22 kg
Sodium hydroxide, 30 %	2.25 kg	Fly ash	19 kg
Ammonia, 25 %	2.9 kg	Filter cake (15 – 20 % H_2O)	1 kg
Precipitating agents	0.17 kg	Cleaned waste water	415 l
		Cleaned flue gas (dry)	4.545 Nm³

2.3 Ρύποι

2.3.1 Αέρια Ρύπανση

- Διοξίνες/Φουράνια

Οι διοξίνες και η αποτέφρωση είναι δύο άρρηκτα συνδεδεμένες έννοιες τα τελευταία 20 χρόνια. Κοντά στα μέσα της δεκαετίας του 90, οι αποτεφρωτήρες απορριμμάτων και οι φούρνοι χάλυβα αποτελούσαν τις κύριες πηγές παραγωγής διοξινών και φουρανίων στην Ευρωπαϊκή Ένωση [20]. Από χημικής πλευράς, οι διοξίνες και τα φουράνια αποτελούνται από μια κατηγορία 210 οργανικών χλωριωμένων ενώσεων (75 για τις διοξίνες και 135 για τα φουράνια), οι οποίες έχουν τις χημικές ονομασίες πολυχλωριωμένων p-διβενζοδιοξινών (PCDDs) και πολυχλωριωμένων διβενζοφουρανίων (PCDFs) [1,18,19,22].



Εικόνα 11: Χημική δομή των PCDD/Fs [24]

Έχουν γίνει πολλές μελέτες για το τρόπο με τον οποίο σχηματίζονται τα PCDD/Fs κατά τη διαδικασία της αποτέφρωσης των ΑΣΑ [18,19,22]. Ο σχηματισμός των διοξινών και των φουρανίων βασίζεται σε τρία κύρια στάδια κατά την αποτέφρωση:

(α) Την πυροσύνθεση, (β) Εκ νέου σχηματισμός από χημικά μη συγγενείς ενώσεις και (γ) Μηχανισμοί παραγωγής από συγγενείς πρόδρομες ενώσεις (χλωριωμένα βενζένια, χλωριωμένες φαινόλες, PCBs,κλπ.) [1,17,18].

Το στάδιο της πυροσύνθεσης λαμβάνει χώρα κυρίως στον δευτερεύοντα θάλαμο της αποτέφρωσης σε ένα εύρος θερμοκρασιών 500-800°C με μέγιστο ρυθμό παραγωγής των διοξινών να γίνεται στη θερμοκρασία των 700°C [17]. Το δεύτερο στάδιο της εκ νέου σύνθεσης γίνεται με την πυρόλυση χημικά μη συγγενών ενώσεων (PVC,πολυστυρένιο,κελουλόζη) παρουσία C,Cl και O_2 σε ένα θερμοκρασιακό εύρος 250-450°C [1,17,19]. Για παράδειγμα η παραγωγή PCDD από φαινόλες παρουσία HCl γίνεται σε θερμοκρασία 400°C, ενώ η παραγωγή από χλωροφαινόλες γίνεται σε θερμοκρασία 450°C [1,17]. Ο μηχανισμός από πρόδρομες χημικά συγγενικές ενώσεις λαμβάνει χώρα σε ένα εύρος 300-600 ^{o}C, αφορά το σχηματισμό από τις περισσότερες χλωριωμένες αρωματικές ενώσεις (χλωροβενζένια, PCBs) [1,17].

Οι αντιδράσεις παραγωγής των διοξινών είναι είτε ομογενείς, οι ενώσεις δηλαδή που αντιδρούν βρίσκονται στην αέρια φάση είτε ετερογενείς, κατά τις ετερογενείς αντιδράσεις ο σχηματισμός των PCDD/Fs γίνεται στις επιφάνειες των σωματιδίων ιπτάμενης τέφρας και των βαρειών μετάλλων (και ειδικά του χαλκού) που λειτουργούν σαν καταλύτες σχηματισμού τους. Παράγοντες όπως η παροχή αέρα αποτέφρωση, η θερμοκρασία στο θάλαμο, ο χρόνος παραμονής στον αποτεφρωτήρα (λόγω κινητικής αντιδράσεων παραγωγής) και οι συγκεντρώσεις διάφορων χημικών ουσιών και καταλυτών παίζουν ρόλο στην παραγωγή των διοξινών και η συγκέντρωση του αέρα στα απαέρια [17,18,19].

Οι μονάδες αποτέφρωσης αποβλήτων κυρίως (40-80%) και υπόλοιπες βιομηχανικές δραστηριότητες (χημική βιομηχανία) αποτελούν τις πηγές προέλευσης εκπομπών των

διοξινών στο φυσικό περιβάλλον και στον άνθρωπο. Κάποιες από τις διοξίνες διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα μέσω των απαερίων, ενώ όσες συγκρατούνται από τα συστήματα απορρύπανσης, καταλήγουν αναπόφευκτα στα υγρά και στερεά απόβλητα της καύσης και από εκεί στο έδαφος και στους υδάτινους αποδέκτες, όπου .Οι διοξίνες δεν διαλύονται στο νερό, αλλά είναι λιποδιαλυτές, συσσωρεύονται στους λιπώδεις ιστούς των ζωντανών οργανισμών και στη βλάστηση και, μέσω της τροφικής αλυσίδας, λαμβάνεται από τους υπόλοιπους οργανισμούς και τον άνθρωπο. Για παράδειγμα μέσω της βλάστησης που αποτελεί τροφή για της αγελάδες οι διοξίνες βιοσυσσωρεύονται στο γάλα που αποτελεί βασικό προϊόν ανθρώπινης κατανάλωσης [1,23].

Ο άνθρωπος τις λαμβάνει κυρίως διαμέσου της τροφής του, όπου αποθηκεύονται στο ήπαρ και στους λιπαρούς ιστούς, οι διοξίνες ακόμα είναι υπεύθυνες για καρκίνο του ήπατος και του εντέρου, προβλήματα αναπαραγωγής, αναπτυξιακά προβλήματα, προβλήματα του ανοσοποιητικού συστήματος, κτλ [23,25].

Οι PCDD/Fs αποτελούν ομάδα χημικών ενώσεων άρα κατά την παραγωγή τους στα διάφορα στάδια της μονάδας αποτέφρωσης παράγεται μίγμα χημικών ενώσεων της ομάδας αυτής. Η πιο επικίνδυνη και ευρέως μελετημένη ένωση της ομάδας αυτής είναι η 2,3,7,8-τετραχλωροδιβενζοδιοξίνη (2,3,7,8-TCDD), η οποία είναι γνωστή και ως διοξίνη Seveso. Η ένωση αυτή απελευθερώθηκε στην ατμόσφαιρα μετά από ένα ατύχημα που συνέβη στις 10 Ιουλίου του 1976 στη πόλη Seveso της Ιταλίας, μετά από έκρηξη ενός χημικού αντιδραστήρα. 37,000 κάτοικοι εκτέθηκαν στην επικίνδυνη τοξική ένωση, ενώ το 4% των οικότροφων ζώων πέθαναν ή θανατώθηκαν για να μην μεταφέρουν την ένωση αυτή μέσω της τροφικής αλυσίδας.

Μετά το ατύχημα αυτό εκδόθηκε από την ΕΟΚ η οδηγία 82/501/ΕΟΚ (Seveso I) η οποία αναφέρεται σε προστασία από κινδύνους που ενυπάρχουν σε ορισμένες βιομηχανικές δραστηριότητες. Με τη νέα οδηγία 96/82/ΕΚ (Seveso II) σκοπός είναι η γενικότερη πρόληψη μεγάλων ατυχημάτων σχετιζομένων με επικίνδυνες ουσίες και ο περιορισμός των συνεπειών τους στον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Όταν θέλουμε να εκφράσουμε την έκθεση μας στη διοξίνη αναφερόμαστε στη τοξικότητα που αυτή προκαλεί στον οργανισμό. Η συγκέντρωση της διοξίνης στην οποία εκτίθεται ο οργανισμός είναι το άθροισμα των συγκεντρώσεων των ενώσεων που ανήκουν στην ομάδα των διοξινών. Οι τοξικότητα κάθε ένωσης εκφράζεται ως ισοδύναμη της τοξικότητας της διοξίνης 2,3,7,8-TCDD όταν πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο της συντελεστή τοξικότητας. Οι συντελεστές τοξικότητας για κάθε ένωση που ανήκει στην ομάδα των PCDD/Fs παρουσιάζονται στον πίνακα 4.

Τόσο η Ευρωπαϊκή Ένωση όσο και η Αμερικανική υπηρεσία περιβάλλοντος (EPA) έχουν θεσπίσει μέτρα για τις εκπεμπόμενες συγκεντρώσεις των PCDD/Fs στο περιβάλλον. Σύμφωνα με την οδηγία Οδηγία 2000/76/ΕΚ για τις μονάδες αποτέφρωσης και συναποτέφρωσης απορριμμάτων το ανώτατο όριο εκπεμπόμενων PCDD/Fs πρέπει να είναι 0,1ng/m^3 και για τις συνθήκες λειτουργίας θα πρέπει όλες οι μονάδες αποτέφρωσης σχεδιάζονται, κατασκευάζονται, εξοπλίζονται, και λειτουργούν κατά τρόπον ώστε, μετά την τελευταία διοχέτευση αέρα καύσης, η θερμοκρασία των αερίων που εκλύονται κατά τη διεργασία να αυξάνεται, με ελεγχόμενο και ομοιογενή τρόπο και ακόμη και υπό τις δυσμενέστερες συνθήκες, στους 850 °C, μετρούμενη στο εσωτερικό τοίχωμα ή σε άλλο αντιπροσωπευτικό σημείο του θαλάμου καύσης όπως επιτρέπει η αρμόδια αρχή ή χρόνο παραμονής των απαερίων στον δευτερρευόντα θάλαμο για 2sec [12]. Η EPA έχει καθορίσει ως όριο συγκέντρωσης, τα 13ng/m^3για νέες μονάδες αποτέφρωσης, ενώ για τις μονάδες που βρίσκονται ήδη σε λειτουργία τα όρια συγκεντρώσεων των διοξινών είναι 30ng/m^3 για μονάδες με Ηλεκτροστατικά φίλτρα και 35ng/m^3 για μονάδες χωρίς ηλεκτροστατικά φίλτρα [21].

πίνακας 4: συντελεστές ισοδύναμης συγκέντρωσης [12]

Toxic equivalent factors (I-TEFs)

Congener	I-TEFs	WHO TEFs
2,3,7,8-TCDD	1	1
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	1
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	0.1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	0.1
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	0.01
OCDD	0.001	0.0001
2,3,7,8-TCDF	0.1	0.1
2,3,4,7,8-PeCDF	0.5	0.5
1,2,3,7,8-PeCDF	0.05	0.05
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1	0.1
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1	0.1
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1	0.1
2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01	0.01
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01	0.01
OCDF	0.001	0.0001

- Βαρέα μέταλλα

Με τον όρο βαρέα μέταλλα εννοούμε εκείνα τα χημικά στοιχεία που έχουν ειδικό βάρος μεγαλύτερο του σιδήρου (Fe) και κυρίως τον μόλυβδο (Pb), τον υδράργυρο (Hg), τον χαλκό (Cu), το κάδμιο (Cd), το χρώμιο (Cr) κλπ.

Η πηγή προέλευσης των βαρέων μετάλλων στη διαδικασία της αποτέφρωσης είναι τα ίδια τα απορρίμματα [1]. Τα βαρέα μέταλλα δε καταστρέφονται κατά τη διαδικασία της

καύσης και καταλήγουν στα υπολείμματα της διαδικασίας ή εξατμίζονται και καταλήγουν στα απαέρια. Η πτητικότητα και η διηθησιμότητα των βαρέων μετάλλων εξαρτάται από τις ιδιότητες τους (τάση ατμών) και τις συνθήκες θερμοκρασίας της αποτέφρωσης. Μέταλλα όπως Fe, Cu, Ni, Pb, Zn σε θερμοκρασίες 1300°C αποκτούν αέρια μορφή ενώ κατά την ψύξη των καυσαερίων συμπυκνώνονται στις επιφάνειες άλλων μορίων στην ιπτάμενη τέφρα. Τα βαρέα μέταλλα που παραμένουν στην στερεά μορφή αποτελούν μέρος της σωματιδιακής ρύπανσης και απομακρύνονται με την καθιζάμενη τέφρα (ash).

Από άποψη τοξικότητας μπορούμε να τα διακρίνουμε σε βαρέα μέταλλα υψηλής τοξικότητας όπως ο Hg, Cd, Cr και Pb και στα χαμηλής τοξικότητας όπως Cu, Cb, Al και Fe. Τα τελευταία λειτουργούν ως καταλύτες για την δημιουργία επικίνδυνων οργανικών ενώσεων στην αέρια φάση (Διοξίνες-Φουράνια) [20].

Οι επιπτώσεις των βαρέων μετάλλων στην υγεία ποικίλουν. Τα βαρέα μέταλλά διατίθενται στο περιβάλλον (αέρας, νερό, έδαφος) μέσω των εκπομπών της αποτέφρωσης, υπάρχουν είτε στα καυσαέρια σε αέρια μορφή είτε στα υγρά απόβλητα από τα συστήματα επεξεργασίας και την υπολειμματική τέφρα που προκύπτει από την αποτέφρωση [23], εισέρχονται στους οργανισμούς μέσω της αναπνοής και κυρίως μέσω της τροφικής αλυσίδας όταν εναποτίθενται στη βλάστηση και το πλαγκτόν των υδάτινων συστημάτων. Μέσω των καυσαερίων και της ιπτάμενης τέφρας μπορούν να μεταφερθούν σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από το αρχικό σημείο έκλυσής τους [15,23].

Τα βαρέα μέταλλα έχουν διάφορες επιπτώσεις στους οργανισμούς και τον άνθρωπο, ανάλογα με το είδος κάθε μετάλλου. Ο μόλυβδος (Pb) μεταξύ άλλων προκαλεί διαταραχές του νευρικού συστήματος, ζημιές στους πνεύμονες και τα νεφρά, αναιμία, μειωμένη σύνθεση της αιμοβιγλίνης στο αίμα, μαθησιακά προβλήματα στα παιδιά, καρδιαγγειακές ασθένειες και αναταραχές στο μεταβολισμό των οστών . Το κάδμιο (Cb) είναι υπεύθυνο για ζημιές στα νεφρά, διαταραχές στους πνεύμονες, ενώ οι υψηλές δόσεις καταστρέφουν τελείως τους πνεύμονες και μπορεί να επιφέρουν ακόμη και το θάνατο. Ο Hg είναι υπερβολικά τοξικός και προκαλεί ναυτία, διάρροια, αύξηση καρδιακής πίεσης, προβλήματα στο δέρμα, ερεθισμό των οφθαλμών. Το Ar Καταστρέφει πολλούς ιστούς περιλαμβανομένων των νεύρων, του στομάχου, των εντέρων και του δέρματος, προκαλεί μειωμένη παραγωγή ερυθρών και λευκών αιμοσφαιρίων και καρδιακή αρρυθμία. [15,23,25,31].

Τόσο η Ευρωπαϊκή Ένωση όσο και η Αμερικανική υπηρεσία περιβάλλοντος έχουν θεσπίσει μέτρα για τις εκπεμπόμενες συγκεντρώσεις των βαρέων στο περιβάλλον. Τα

ανώτατα όρια των εκπομπών των βαρέων μετάλλων σύμφωνα με την Οδηγία 2000/76/ΕΚ παρουσιάζονται στον πίνακα 5 [12].

πίνακας 5: όρια συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων μονάδων αποτέφρωσης σε mg/Nm^3 [12]

Pollutant	C
Cd + Tl	0,05
Hg	0,05
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V	0,5

Η EPA έχει ορίσει ως ανώτατο όριο εκπομπών για τον μόλυβδο τα 0.4mg/m^3 για τις μονάδες αποτέφρωση που βρίσκονται σε λειτουργία και τα 0.14mg/m^3 για τις νέες μονάδες. Ενώ το ανώτατο όριο εκπομπών για τον υδράργυρο είναι και στις 2 περιπτώσεις τα 0.05mg/m^3 [21].

Για την μείωση των εκπομπών των συγκεντρώσεων των βαρέων μετάλλων 2 προτείνονται επιλογές:

(1) Απομάκρυνση από τα απορρίμματα να γίνεται πριν τη διαδικασία της καύσης

(2) Μείωση της διάθεσης τους σε βιολογικά ενεργές μορφές (για παράδειγμα μέρος του Cd γίνεται σε χλωριωμένα και θειικά άλατα, το Cr μετατρέπεται σε Cr^{6+}) αυτό επιτυγχάνεται με μείωση των αέριων εκπομπών των πτητικών βαρέων μετάλλων και τη χημική σταθεροποίηση των βαρέων μετάλλων σε στερεή μορφή [20].

Για την απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων χρησιμοποιούνται τόσο συσκευές ηλεκτροστατικών φίλτρων (Electrostatic Precipitators-ESP) και σακόφιλτρων (Fabric Filters), κυρίως για βαρέα μέταλλα σε στερεή μορφή (καθιζάμενη τέφρα). Η απομάκρυνση του Hg γίνεται σε μορφή Hg_2Cl_2 (l) σε υγρές πλυντηρίδες (wet scrubbers) [3,4,14,16].

- NO_x, SO_2, HCl και HF

Τα NO_x υπάρχουν σε διάφορες μορφές στα καυσαέρια της αποτέφρωσης (NO, NO_2, NO_3). Για το σχηματισμό του NO, τρείς είναι οι υπεύθυνοι μηχανισμοί κατά τη διαδικασία της αποτέφρωσης: (α) Οξείδωση του N που υπάρχει μέσα στα ίδια τα απορρίμματα τα απορρίμματα, (β) Η οξείδωση του ατμοσφαιρικού N που βρίσκεται στον αέρα καύσης σε θερμοκρασία1300^{o}C (θερμικός σχηματισμός) και (γ) ο

σχηματισμός από ταχεία οξείδωση του ατμοσφαιρικού N που βρίσκεται στον αέρα καύσης μέσω ενδιάμεσων προϊόντων όπως HCN (ακαριαίος σχηματισμός) [1,3].

Η παρουσία των στοιχείων του Cl, S, F στα απορρίμματα ευνοεί τον σχηματισμό των όξινων αυτών ενώσεων στα απαέρια των μονάδων αποτέφρωσης όπως τα SO_2, HCl και HF [20], με το υδροχλωρικό οξύ να αποτελεί το κύριο συστατικό των όξινων αερίων [24]. Από τα παραπάνω αέρια τα SO_2, NO_2 έχουν μελετηθεί εντατικά λόγω των συνεπειών τους στο αναπνευστικό σύστημα. Τα όξινα αέρια NO_x και SO_x είναι υπεύθυνα για τον σχηματισμό της όξινης βροχής. Η Όξινη βροχή (acid rain) ονομάζεται το φαινόμενο των αφύσικα όξινων μετεωρολογικών κατακρημνισμάτων και σχηματίζεται όταν τα NO_x και SO_x αντιδράσουν με τα σταγονίδια της βροχής (υδρόλυση) σχηματίζοντας νιτρικό και θειικό οξύ. Αυτό προκαλεί την πτώση του pH των σταγονιδίων της ατμόσφαιρας και έχει συνέπιες στα φυτά, τα εδάφη και τους οργανισμούς όταν αυτά φτάσουν στην επιφάνεια με τη μορφή κατακρημνίσεων [31]. Το HCl αποτελεί και πηγή για την παραγωγή των διοξινών [17].

Οι οριακές τιμές για τις όξινες αέριες εκπομπές (ημερήσιες τιμές) είναι, σύμφωνα με την Οδηγία 2000/76/ΕΚ, 200mg/m^3 για τα NO_x, 50mg/m^3 για το SO_2 , 10mg/m^3 για το HCl και1mg/m^3 για το HF [12]. Αντίστοιχα τα όρια που ορίζει η EPA είναι 29ppm για τις μονάδες σε λειτουργία και 20ppm για τις νέες μονάδες για το HCl, για το SO_2 τα όρια είναι 29ppm για τις μονάδες σε λειτουργία και 30 ppm για τις νέες μονάδες, τέλος για τα NO_x διαφέρει ανάλογα με το είδος του αποτεφρωτήρα για τις μονάδες σε λειτουργία και 180 ppm για τις νέες μονάδες (150 ppm μετά τη πρώτη χρονιά λειτουργίας) [21].

Για την απομάκρυνση των όξινων αερίων χρησιμοποιούνται διάφορα μέσα (υγροί, ξηροί, ημίξηροι συλλέκτες) Ακόμα χρησιμοποιούνται πλυντηρίδες. Για την απομάκρυνση των NO_x χρησιμοποιούνται τόσο καταλυτικές οξειδωτικές διαδικασίες (Selective Catalytic Reductions-SCR) όσο και μη καταλυτικές οξειδωτικές διαδικασίες (Selective Non Catalytic Reductions-SNCR), ενεργός άνθρακας, και αντιδραστικό μέσο όπως NH_3 [2,4]. Για την μείωση του NOx παίρνονται και πρωτογενή μέτρα που αφορούν τις συνθήκες καύσης, όπως μείωση της περίσσειας O_2 στην φλόγα κατά και συγκέντρωση O2 κατώτερη των στοιχειομετρικών αναλογιών την πρώτη ζώνη καύσης.

- ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗ ΡΥΠΑΝΣΗ

Η ιπτάμενη τέφρα, τα σωματίδια σκόνης άκαυστα μέρη των απορριμμάτων και βαρέα μέταλλα αποτελούν το σύνολο της σωματιδιακής ρύπανσης στα απαέρια των μονάδων αποτέφρωσης [3]. Τα σωματίδια αυτά έχουν τέτοιο μέγεθος [26] ώστε να διαπερνούν σε ορισμένες περιπτώσεις τα συστήματα επεξεργασίας των ρύπων στη μονάδα αποτέφρωσης και να διαφεύγουν από την καμινάδα.

Οι επιπτώσεις της σωματιδιακής ρύπανσης στην υγεία είναι αρκετές. Τα μικροσωματίδια είναι ίσως ο πιο παρεξηγημένος και παραμελημένος ρύπος. Δεκάδες έρευνες σε όλο τον κόσμο ενοχοποιούν τα μικροσωματίδια όχι μόνο για αύξηση της θνησιμότητας, αλλά και για σημαντικές μακροχρόνιες βλάβες στην υγεία. Οι έρευνες ενοχοποιούν κυρίως τα αιωρούμενα ατμοσφαιρικά σωματίδια μικρής διαμέτρου (γνωστά και ως PM10, PM2.5 και PM1), που εισχωρούν βαθύτερα στο αναπνευστικό σύστημα [15,23,31]. Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον αφορούν τη μείωση της ορατότητας ενώ μαζί με τα οχήματα αποτελούν τις σημαντικότερες εστίες σωματιδιακής ρύπανσης στις πόλεις [15,31]. Η σωματιδιακή ρύπανση έχει τη δυνατότητα να μεταφέρεται μέσω των ρευμάτων του αέρα σε μεγάλες αποστάσεις και να ευθύνεται για γεγονότα γενικής ρύπανσης, αφού μεταφέρει μαζί της όλες τις τοξικές ενώσεις οι οποίες προσκολλώνται πάνω στα σωματίδια της [23]. Τα σωματίδια αυτά με την επίδραση της βαρύτητας καταλήγουν στην επιφάνεια λόγω της βαρύτητας ή λόγω της βροχής [31].

Η ιπτάμενη τέφρα που διαφεύγει περιέχει σημαντικά ποσοστά σε βαρέα μέταλλα. Το 37% του Cu, το 28% του Pb, και το 75% του Cd των απορριμμάτων καταλήγουν στην ιπτάμενη τέφρα [1]. Το 3.6% του Hg των απορριμμάτων καταλήγει στην ιπτάμενη τέφρα [16], η ύπαρξη των βαρέων μετάλλων τη καθιστά ιδιαίτερα τοξική. Στη διαδικασία της αποτέφρωσης λειτουργούν ως καταλυτές αντιδράσεων για τη παραγωγή διοξινών .

Όσο αφορά τα περιβαλλοντικά επιτρεπτά όρια, στην οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης οι ημερήσιες οριακές τιμές για την σωματιδιακή ρύπανση είναι 10 mg/m^3. Η EPA απαιτεί οι οριακές συγκεντρώσεις του σωματιδιακού υλικού της ιπτάμενης τέφρας να είναι 25 mg/m^3 για τις μονάδες σε λειτουργία και 25 mg/m^3 για τις υπό κατασκευή μονάδες [21].

Η απομάκρυνση των σωματιδίων γίνεται με συσκευές κατακράτησης σωματιδίων όπως τα ηλεκτροστατικά φίλτρα (ESP), τα σακόφιλτρα, πλυντηρίδες, ενώ σαν προεπεξεργασία για την κατακράτηση των μεγαλύτερων σωματιδίων, χρησιμοποιούνται κυκλώνες [2,4,16].

- ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΚΑΥΣΗΣ

Τα προϊόντα της καύσης όπως είναι γνωστό είναι το CO και το CO_2. Η δημιουργία τους βασίζεται στην στοιχειομετρική αντίδραση της καύσης των απορριμμάτων. Τα αέρια αυτά ανήκουν στη κατηγορία των αερίων του θερμοκηπίου που είναι υπεύθυνα για την αλλαγή του κλίματος. Το CO είναι αέριο τοξικό για την ανθρώπινη υγεία.. Ημερήσια οριακή τιμή για τη συγκέντρωση του CO, σύμφωνα με την Οδηγία 2000/76/ΕΚ, είναι 50

mg/m^3 ενώ σύμφωνα με την EPA οι οριακές τιμές για το CO ποικίλουν ανάλογα με τη τεχνολογία της αποτέφρωσης όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

πίνακας 6: όρια συγκεντρώσεων CO διάφορων τύπων αποτέφρωσης σύμφωνα με την EPA [21]

Τεχνολογία αποτέφρωσης	Οριακή τιμή CO (ppm)
Μαζική αποτέφρωση τύπου Refractory Lined/ WaterWall	100
Μαζική αποτέφρωση περιστρεφόμενου κυλίνδρου Refractory	100
Μαζική αποτέφρωση περιστρεφόμενου κυλίνδρου WaterWall	250
Αποτέφρωση Τύπου Modular (περίσσεια αέρα)/ (ελεγχόμενος αέρας)	50
Ρευστοποιημένη κλίνη	100

Για τις υπόλοιπες οργανικές ενώσεις στα καυσαέρια η Οδηγία 2000/76/ΕΚ καθορίζει τις συγκεντρώσεις τους σαν ολικό οργανικό άνθρακα (TOC) με ανώτατο όριο 10 mg/m^3.

2.3.2 Ρύπανση Εδαφών

Η καθήμενη τέφρα στα διάφορα στάδια της αποτέφρωσης (θάλαμος αποτέφρωσης, λέβητας, σύστημα επεξεργασίας αέριας ρύπανσης) είναι το στερεό υπόλειμμα της διαδικασίας της αποτέφρωσης [1,3,4,16]. Περιέχει τους ίδιους ρύπους με αυτούς των αέριων εκπομπών (οργανικές ενώσεις, βαρέα μέταλλα) που την καθιστούν ιδιαίτερα τοξική. Η τέφρα αυτή συλλέγεται και συνήθως οδηγείται προς εδαφική διάθεση σε χώρους ταφής επικίνδυνων αποβλήτων. Η τέφρα πριν τη διάθεση της χρίζει περαιτέρω επεξεργασίας ώστε να αποφθεχθεί η πιθανότητα ρύπανσης των υδροφορέων [1,2,4].

2.3.3 Ρύπανση Υδάτων

Η ρύπανση των υδάτων προκύπτει από την επεξεργασία των υγρών μεθόδων απομάκρυνσης των όξινων αερίων (wet scrubbers). Τα ύδατα από το σύστημα ελέγχου της αέριας ρύπανσης καταλήγουν προς ειδική επεξεργασία σε βιολογικούς καθαρισμούς (waste water treatment plants) [3]. Η οδηγία Οδηγία 2000/76/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης ορίζει ότι θα πρέπει να ισχύουν οριακές τιμές εκπομπών για τις απορρίψεις

λυμάτων προερχόμενων από τον καθαρισμό των καυσαερίων οι οποίες και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

πίνακας 7: επιτρεπτά όρια συγκεντρώσεων λυμάτων προερχόμενων από τον καθαρισμό των καυσαερίων [12]

Ρυπαντικές ουσίες	Οριακές τιμές εκπομπών εκφρασμένες ως συγκεντρώσεις κατά μάζα για αδιήθητα δείγματα	
1. Ολικά αιωρούμενα στερεά, όπως ορίζονται στην οδηγία 91/271/ΕΟΚ	95 % / 30 mg/l	100 % / 45 mg/l
2. Υδράργυρος και οι ενώσεις του, ως υδράργυρος (Hg)	0,03 mg/l	
3. Κάδμιο και οι ενώσεις του, ως κάδμιο (Cd)	0,05 mg/l	
4. Θάλλιο και οι ενώσεις του, ως θάλλιο (Tl)	0,05 mg/l	
5. Αρσενικό και οι ενώσεις του, ως αρσενικό (As)	0,15 mg/l	
6. Μόλυβδος και οι ενώσεις του, ως μόλυβδος (Pb)	0,2 mg/l	
7. Χρώμιο και οι ενώσεις του, ως χρώμιο (Cr)	0,5 mg/l	
8. Χαλκός και οι ενώσεις του, ως χαλκός (Cu)	0,5 mg/l	
9. Νικέλιο και οι ενώσεις του, ως νικέλιο (Ni)	0,5 mg/l	
10. Ψευδάργυρος και οι ενώσεις του, ως ψευδάργυρος (Zn)	1,5 mg/l	
11. Διοξίνες και φουράνια, οριζόμενα ως το άθροισμα των επί μέρους διοξινών και φουρανίων αποτιμώμενων σύμφωνα με το παράρτημα Ι	0,3 ng/l	

2.4 Σύστημα Ελέγχου Αερίων Εκπομπών

Κατά την διαδικασία της αποτέφρωσης των ΑΣΑ εκτός από τη μείωση του όγκου των απορριμμάτων και την παραγωγή ενέργειας παράγονται διάφορα απόβλητα είτε σε αέρια μορφή, όπως όξινα αέρια (HCl, HF, SO_2), NOx, πτητικές οργανικές ενώσεις, διοξίνες φουράνια (PCDD/Fs) και αέρια προϊόντα της καύσης όπως CO, CO_2. Παράγονται υγρά λύματα από τις συσκευές απορρύπανσης που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των απαερίων (πλυντηρίδες) και στερεά απόβλητα όπως το στερεό υπόλειμμα από την διαδικασία της αποτέφρωσης αλλά και η τέφρα που συλλέγεται από τις διάφορες συσκευές συλλογής της ιπτάμενης τέφρας.

2.4.1 Διαχείριση αέριας και σωματιδιακής Ρύπανσης

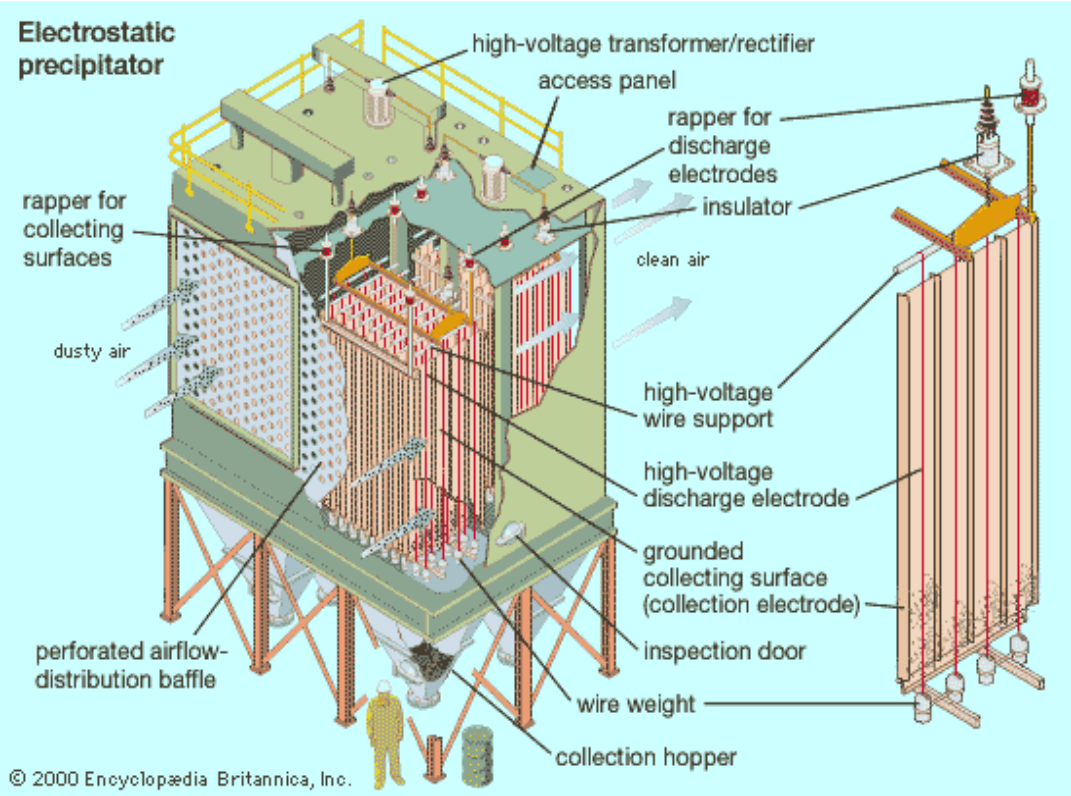
Η κατηγορία των αέριων ρύπων συμπεριλαμβάνει την ιπταμένη τέφρα και τα μη πτητικά βαρέα μέταλλα, τα όξινα αέρια, τα οξείδια του αζώτου και φυσικά τις διοξίνες, τα φουράνια και τις οργανικές ενώσεις.

- ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΚΑΙ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Για την απομάκρυνση των ρύπων αυτών χρησιμοποιούνται μια σειρά από συσκευές, όπως ηλεκτροστατικά φίλτρα (Electrostatic precipitators), σακόφιλτρα (fabric filters), και πλυντηρίδες (fine wet scrubbers). Απομάκρυνση των σωματιδίων τέφρας με μεγαλύτερο μέγεθος γίνεται σε μεγάλη απόδοση από κυκλώνες, οι οποίοι είναι παλαιότερη τεχνολογία καθαρισμού.

ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

Ένα τυπικό ηλεκτροστατικό φίλτρο αποτελείται από μεταλλικές πλάκες (ηλεκτρόδια συλλογής) και ηλεκτρόδια εκφόρτωσης. Η διαδικασία του διαχωρισμού με ένα ESP, περιλαμβάνει την διέλευση των απαερίων διαμέσου ηλεκτροδίων εκφόρτωσης, με αποτέλεσμα τα απαέρια να ιονιστούν. Τα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας και τα βαρέα μέταλλα συλλέγονται στις αντίθετα φορτισμένες μεταλλικές πλάκες και απομακρύνονται από αυτές. Το υλικό που συλλέχθηκε στις πλάκες είτε απομακρύνεται με τίναγμα των πλακών είτε με ξέπλυμα και καταλήγει στη βάση του ESP όπου πηγαίνει προς περαιτέρω επεξεργασία ή εδαφική διάθεση. Η απομάκρυνση της ιπτάμενης τέφρας στα Ηλεκτροστατικά φίλτρα μπορεί να φτάσει στο 99% [19,32] . Μια τυπική διάταξη ESP παρουσιάζεται στην εικόνα 12.

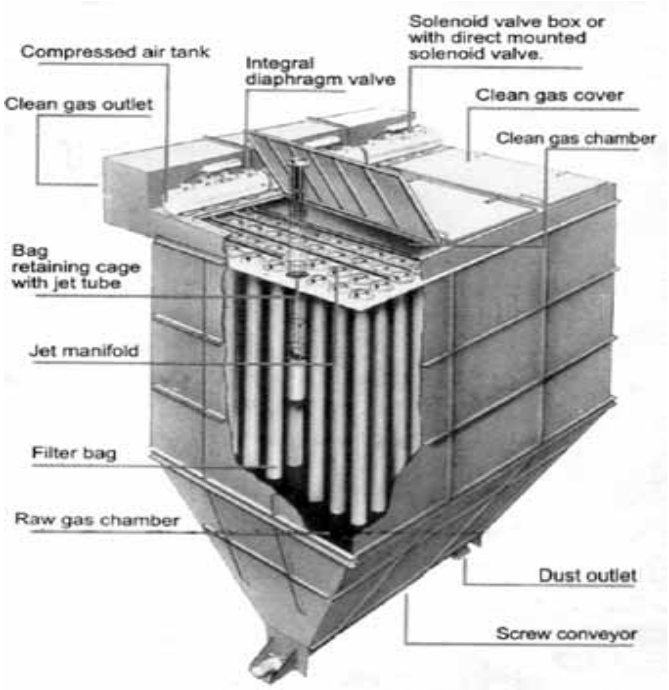


Εικόνα 12: ESP

ΣΑΚΟΦΙΛΤΡΑ

Στα σακόφιλτρα το ρεύμα των απαερίων περνά διαμέσου ενός αριθμού παράλληλα τοποθετημένων υφασμάτινων κυλινδρικών σάκων (εικόνα 13). Η σκόνη συγκρατείται πάνω στις επιφάνειες των σάκων. Σημαντικό ρόλο στην αύξηση της απόδοσης του σακόφιλτρου παίζει το στρώμα σκόνης το οποίο συγκεντρώνεται πάνω στο ύφασμα, από την αρχή της λειτουργίας του, καθώς φιλτράρει αποτελεσματικά τα μικρά σωματίδια.

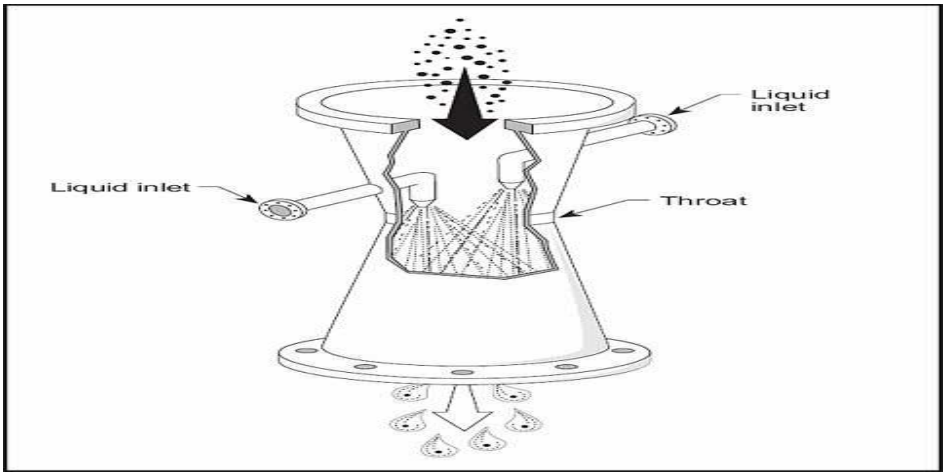
Τα σακόφιλτρα ποικίλουν ανάλογα με το μέγεθος των υφασμάτων, τον τρόπο ύφανσης και τον τρόπο με τον οποίο το ρεύμα του αέρα διέρχεται διαμέσου των σάκων. Οι τύποι των σακόφιλτρων είναι ταξινομημένοι ανάλογα με τον τρόπο καθαρισμού τους έτσι έχουμε τα σακόφιλτρα αντίθετου ροής (reverse air), τα σακόφιλτρα με μηχανική δόνηση (shaker) και τα σακόφιλτρα δόνησης με αέρα υπό πίεση (pulse jet). Η εκτεταμένη λειτουργία των σακόφιλτρων απαιτεί συχνό καθαρισμό τους. Ο προσδοκώμενος χρόνος ζωής για ένα σακόφιλτρο είναι περίπου 5 έτη. Η αντίσταση στα όξινα ή αλκαλικά αέρια και σε εύρη θερμοκρασιών, εξαρτάται από το υλικό του υφάσματος [32]. Η κατακράτηση ενός σακόφιλτρου μπορεί να ξεπεράσει το 99% [3, 4,19].



Εικόνα 13: σακόφιλτρο

ΠΛΥΝΤΗΡΙΔΕΣ

Οι συσκευές που λειτουργούν για την απομάκρυνση των σωματιδίων, είναι οι πλυντηρίδες τύπου Venturi (Venturi scrubbers). Οι συσκευές αποτελούνται από τρία τμήματα: το τμήμα σύγκλισης (converging section), τον λαιμό (throat) και το τμήμα απόκλισης (diverging section). Το ρεύμα των απαερίων εισάγεται από το τμήμα σύγκλισης μέσω ακροφυσίων ψεκασμού. Καθώς η διατομή του τμήματος σύγκλισης μειώνεται, το ρεύμα τείνει να αυξήσει την ταχύτητα του. Το νερό της επεξεργασίας εισάγεται είτε στο λαιμό είτε στο τμήμα σύγκλισης. Στο τμήμα του λαιμού τα απαέρια έχουν αποκτήσει υψηλές ταχύτητες και προκαλούν τη μετατροπή του νερού σε έναν μεγάλο νέφος σταγονιδίων. Τα σωματίδια της τέφρας απομακρύνονται από τα απαέρια λόγω της προσκόλλησης τους με το σύννεφο των σταγονιδίων. Το μίγμα αυτό απομακρύνεται από τον θάλαμο διαμέσου του τμήματος απόκλισης λόγω της βαρύτητας [3,4,32]. Η απόδοση για την απομάκρυνση της ιπτάμενης τέφρας με χρήση των συσκευών αυτών φτάνει στο 95% (www.Wikipedia.org/wiki/Wet_scrubber).



Εικόνα 14: διάταξη πλυντηρίδας

- ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΟΞΙΝΩΝ ΑΕΡΙΩΝ HCl, HF, SO_2 ΚΑΙ Hg

Για την απομάκρυνση των όξινων αερίων και του υδράργυρου σε αέρια μορφή, χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές (scrubbers) με έγχυση κατάλληλου προσροφητικού μέσου. Υπάρχουν δύο κύριες διαδικασίες απορρόφησης των αερίων: 1) Η απομάκρυνση των αερίων στη συσκευή με χρήση του προσροφητικού μέσου το οποίο βρίσκεται σε στερεά μορφή (dry, semi-dry scrubbing), 2) η απομάκρυνση των αερίων με χρήση υδατικού διαλύματος (wet flue gas cleaning).

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΞΗΡΗΣ ΗΜΙ-ΞΗΡΗΣ ΜΟΡΦΗΣ

Οι διαδικασίες ξηρής-ημίξηρης απομάκρυνσης περιλαμβάνουν αντιδράσεις των όξινων αερίων με προσροφητικά μέσα τα οποία βρίσκονται σε στερεά ή λασπώδη μορφή (semi-dry process). Το προσροφητικό μέσο διαφέρει ανάλογα με την περίπτωση. Έχουμε προσροφητικά μέσα όπως $Ca(OH)_2$ και ενεργό άνθρακα. Τα στάδια της διαδικασίας είναι η απομάκρυνση του SO_2, η προσρόφηση των HCl, HF και η προσρόφηση των βαρέων μετάλλων σε αέρια μορφή (πχ.Hg).

Όταν η συσκευή της ξηρής απομάκρυνσης είναι τοποθετημένη αμέσως μετά την έξοδο του λέβητα, η θερμοκρασία των απαερίων πρέπει να ρυθμίζεται μειώνεται. Αυτό γίνεται με εναλλαγή θερμότητας η οποία επιτυγχάνεται με παροχή ψυχρού αέρα (σχήμα 15) ή με ψεκασμό νερού. Η χρησιμότητα του νερού έγκειται στο γεγονός ότι χρησιμοποιείται για την ρύθμιση της θερμοκρασίας των απαερίων και παράλληλα ευνοεί τις αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στη συσκευή. Δεδομένου ότι το προϊόν, της αντίδρασης του HCl με $Ca(OH)_2$, $CaCl_2$ είναι εξαιρετικά υδροσκοπικό (προσροφάται στο νερό), η θερμοκρασία των απαερίων δεν μπορεί, να μειωθεί λιγότερο από 130-140°C, για να μην προκύψουν δυσκολίες στο χειρισμό του υπολείμματος. Σε αυτήν την θερμοκρασία, η

προσθήκη περίσσειας ασβέστη είναι απαραίτητη για τον καθαρισμό των απαερίων [3,4]. Η περίσσεια ασβέστη καταλήγει στα υπολείμματα της διαδικασίας. Ο υπολειμματικός ασβέστης της διαδικασίας της εξουδετέρωσης των όξινων αερίων ανακυκλώνεται με στόχο την επαναχρησιμοποίηση του [4].

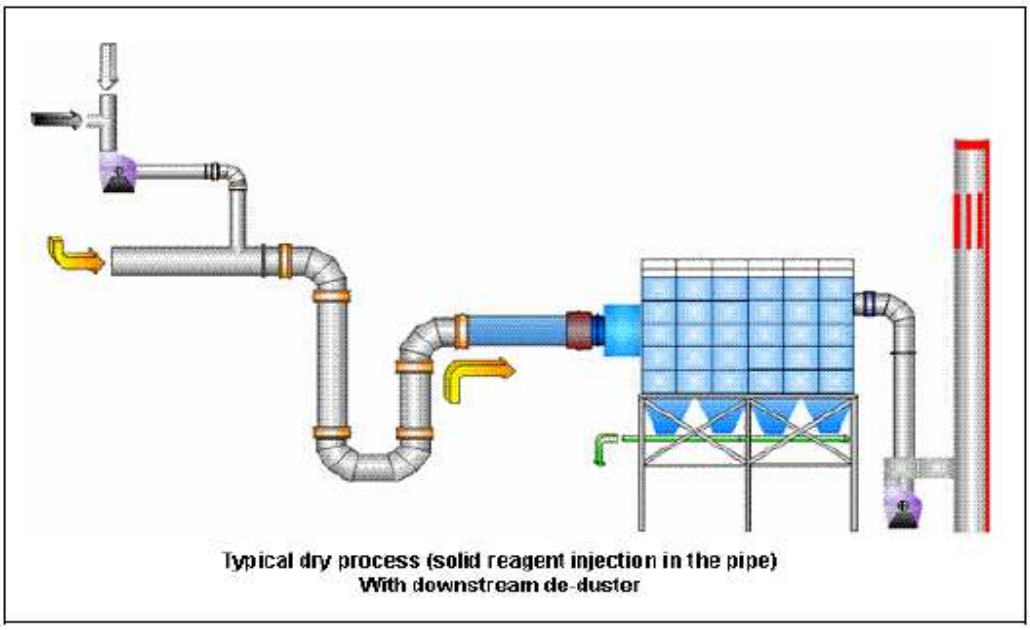
Αν η συσκευή είναι τοποθετημένη μετά τη συσκευή κατακράτησης των σωματιδίων, τα απαέρια πρέπει να αναθερμανθούν, αυτό γίνεται με θέρμανση των στερεών προσροφητικών μέσων ($Ca(OH)_2$, άνθρακας και ασβεστόλιθος).

Στις ημί-ξηρές διαδικασίες, χρησιμοποιείται CaO ως προσροφητικό μέσο, επειδή έχει μικρό κόστος και περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα ενεργού ασβέστη (Ca). Ωστόσο η κατηγορία αυτή επεξεργασίας, είναι ακριβότερη σε σχέση με τη ξηρή διαδικασία απομάκρυνσης.

Τα προϊόντα της παραπάνω επεξεργασίας είναι στερεές ουσίες όπως $CaSO_2$, $CaSO_3$, $CaCl_2$ και CaF_2, τέφρα και υπολειμματικό προσροφητικό μέσο, τα οποία συσσωρεύονται ως απόβλητα. Η παρουσία της τέφρας δεν επηρεάζει αρνητικά τις αντιδράσεις των όξινων αερίων με τα προσροφητικά μέσα συνεπώς αμέσως μετά την συσκευή της ξηρής απομάκρυνσης, ακολουθεί διάταξη σακόφιλτρου για τη συλλογή των προϊόντων της διαδικασίας και της τέφρας [3,4,5].

Η απομάκρυνση του SO_2 με χρήση ξηρών διεργασιών απομάκρυνσης κυμαίνεται σε ένα εύρος αποδόσεων 93-97%(www.iea-coal.co.uk/site/ieacoal/databases/ccts/dry-scrubbers).

Ενώ παρατηρούνται και χαμηλότερες αποδόσεις περίπου 85% [4]. Η απομάκρυνση του HCl κυμαίνεται σε αποδόσεις περίπου 95%, ενώ το εύρος για την απομάκρυνση του HF κυμαίνεται σε ένα εύρος 43-99,3% (www.icoc.com) , [3]. Η απομάκρυνση του Hg φτάνει σε αποδόσεις 93,34% [3], ενώ με τη χρήση συσκευών ενεργού άνθρακα φτάνει στα 99%.



Εικόνα 15: διάταξη Dry scrubber [14]

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΓΡΗΣ ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗΣ

Η διαδικασία αυτή βασίζεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο λαμβάνει χώρα η απομάκρυνση των όξινων αερίων και του Hg, ενώ στο δεύτερο έχουμε την απομάκρυνση του SO_2. Κατά το πρώτο στάδιο έχουμε την διαδικασία του κορεσμού των απαερίων, με ψύξη τους σε θερμοκρασία κορεσμού και τελικά την διαδικασία της απομάκρυνσης των HCl,HF και SO_3.

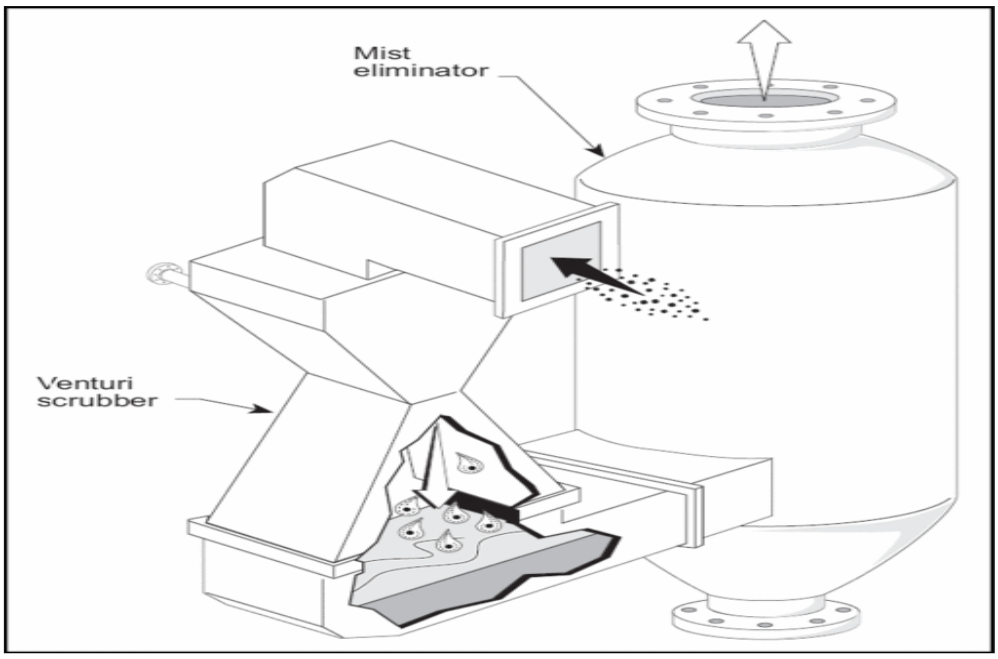
Η ψύξη των απαερίων λαμβάνει χώρα στη ζώνη ενυδάτωσης. Όταν τα απαέρια έρχονται σε επαφή με το νερό μέσω ακροφυσίων. Η απομάκρυνση των HCl,HF Hg και SO_3 γίνεται στην περιοχή της κατακράτησης (scrubbing zone). Νερό διοχετεύεται από τους εγχυτήρες, σχεδιασμένους με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε ομογενή διανομή των σταγονιδίων του νερού. Το μεγαλύτερο μέρος των σταγονιδίων κατευθύνεται προς τον πυθμένα της συσκευής και το υπόλοιπο διαχωρίζεται από τα απαέρια με ειδική συσκευή. Το νερό που προκύπτει από το διαχωρισμό σταγονιδίων με τα απόκρια επανακυκλοφορεί στη συσκευή για να συνεχιστεί η διαδικασία.

Τα όξινα αέρια προσροφώνται από την επαφή τους με τα σταγονίδια και μετατρέπονται σε υδατική μορφή. Ένα μέρος από αυτά τα ιόντα των όξινων υδατικών διαλυμάτων αντιδρά με την προσθήκη $Ca(OH)_2$ και μετατρέπεται σε μορφή διαλύματος άλατος $CaCl_2$(l) και CaF_2(l).Ο Hg μπορεί να προσροφηθεί σαν $HgCl_2$, Hg_2Cl_2και HgO. Ειδικά η πρώτη μορφή συμβαίνει σε θερμοκρασίες στον αποτεφρωτήρα στους 850°C.

Η παρουσία του SO_2 οδηγεί σε δυσαναλογία του $HgCl_2$ αποτέλεσμα την παραγωγή μεταλλικού Hg, ο οποίος μπορεί να εξατμιστεί κατά τη διάρκεια του ψεκασμού. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με διατήρηση χαμηλών τιμών του pH και συνεχή απομάκρυνση του διαχωρισμένου Hg.

Στο δεύτερο στάδιο έχουμε την απομάκρυνση του SO_2, τα προσροφητικά μέσα είναι το NaOH, το $Ca(OH)_2$ και γύψος.

Στην περίπτωση της απομάκρυνσης του SO_2, ισχύει η ίδια διαδικασία όπου νερό ανακυκλοφορίας υπό μορφή σταγονιδίων, ψεκάζει τα απαέρια και τα σταγονίδια αυτά καταλήγουν στο πυθμένα της συσκευής. Η τιμή του pH ρυθμίζεται με προσθήκη *NaOH* .Πολλές φορές σε μια διαδικασία απομάκρυνσης του SO_2, υπάρχουν ποσότητες στο νερό υπό μορφή H_2SO_4, αυτή αντιδρά με προσθήκη $Ca(OH)_2$ και καθιζάνει σαν γύψος. Το μεγαλύτερο μέρος του προϊόντος επανακυκλοφορεί στην συσκευή και το υπόλοιπο απομακρύνεται. Η τελευταία διαδικασία της προσθήκης αποτελεί και από μόνη της ξεχωριστό στάδιο. Η απομάκρυνση του SO_2 με χρήση υγρών διεργασιών απομάκρυνσης κυμαίνεται σε ένα εύρος αποδόσεων 96-99% (www.iea-coal.co.uk/site/ieacoal/databases/ccts/dry-scrubbers), [3]. Η απομάκρυνση του HCl κυμαίνεται σε αποδόσεις περίπου 87-94%, ενώ το εύρος για την απομάκρυνση του HF κυμαίνεται σε ένα εύρος 43-99,3% (www.icoc.com), [3]. Στην εικόνα 16 παρουσιάζεται μια διάταξη υγρής διαδικασίας.



Εικόνα 16: διάταξη wet scrubber

- ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ NO_X

Για την απομάκρυνση του οξειδίων του αζώτου λαμβάνουν χώρα τόσο πρωτογενή όσο και δευτερογενή μέτρα επεξεργασίας [3].

- ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΜΕΤΡΑ

Στα πρωτογενή μέτρα γίνεται προσπάθεια για να παρεμποδιστεί η δημιουργία των NO_x, κατά τη διεργασία της καύσης. Ο ρυθμός παραγωγής των NO_X μειώνεται με αντίστοιχη μείωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στη φλόγα. Παροχή αέρα καύσης κάτω από υποστοιχειομετρίες συνθήκες, στα πρώτα στάδια της καύσης, παίζει σημαντικό ρόλο στην μείωση της παραγωγής των NO_X. Η ανακυκλοφορία του ρεύματος των απαερίων στον θάλαμο καύσης αποτελεί επιπρόσθετο παράγοντα μείωσης της συγκέντρωσης των NO_X στο ρεύμα των απαερίων[3] .

- ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗ ΜΕΤΡΑ

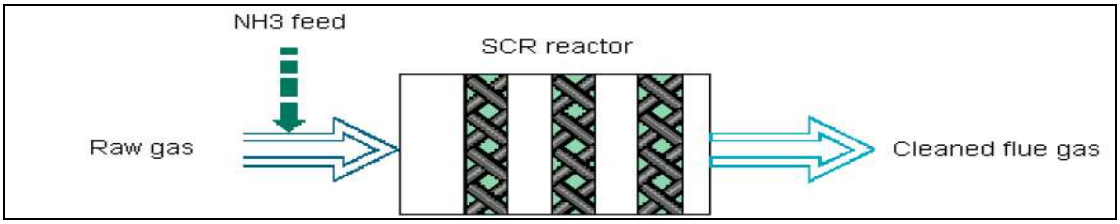
Το δεύτερο στάδιο απομάκρυνσης των NO_X περιλαμβάνει τη μείωση μέσω της αντίδρασης με αμμωνία (NH_3), η οποία δρα επιλεκτικά στην απομάκρυνση τους, και παραγωγή N_2 και H_2O [2,3,4,13,16]. Το θερμοκρασιακό εύρος που απαιτείται για την επίτευξη της αντίδρασης είναι 800-1000^{0}C. Η καλή ανάμιξη μεταξύ των απαερίων και του δραστικού μέσου (αμμωνία) είναι σημαντική παράμετρος [3]. Η μέθοδος αυτή καλείται επιλεκτική μη καταλυτική αντίδραση (selective non catalytic reaction-SNCR) [3,4]. Η διαδικασία αυτή όταν λαμβάνει χώρα σε μικρότερες θερμοκρασίες καλείται επιλεκτική καταλυτική αντίδραση (selective catalytic reaction-SCR).

Κατά την μέθοδο SNCR προστίθεται NH_3 (ή άλλο αντιδρών μέσο που μπορεί να δώσει ως προϊόν την αμμωνία όταν έρχεται σε επαφή με τα απαέρια) σε θερμοκρασία 1000^{0}C. Χωρίς την παρουσία καταλύτη η NH_3 αντιδρά με τα NO_X δίνοντας N_2και H_2O. Η απόδοση της διαδικασίας επιτυγχάνει τη μείωση των NO_X κατά 50-60% [3]. Η μέθοδος SNCR απαιτεί δόση δραστικού μέσου σε συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν τη στοιχειομετρική ώστε να μην παράγεται επιπλέον NO_X από την καύση της αμμωνίας .

Σε χαμηλές θερμοκρασίες η συγκέντρωση των NO_X και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1200^{0}C αμμωνία καίγεται και δημιουργεί οξείδια του αζώτου. Σημαντικό ρόλο για την αποτελεσματική μείωση παίζει η διανομή του δραστικού μέσου και η καλή ανάμειξη με τα απαέρια καθώς και ο πολύ μικρός χρόνος παραμονής των απαερίων στον καταλύτη. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στο θάλαμο μετάκαυσης [3].

Στη μέθοδο SCR ο καταλύτης παίζει σημαντικό ρόλο. Σύμφωνα με το σχήμα της εικόνας 17, το θερμό ρεύμα των απερίων διαπερνά τον καταλύτη παρουσία του

μειωτικού παράγοντα σε θερμοκρασία περίπου 250^0C. Στον καταλύτη τα NO_X μετατρέπονται σε N_2 και H_2O. Η απόδοση της διαδικασίας επιτυγχάνει μείωση των ρύπων κατά 70-90% [3]. Ανεπαρκής αντίδραση της αμμωνίας και η οξείδωση του SO_2 SO_3 μέσα στον καταλύτη μπορούν να οδηγήσουν στη παραγωγή ενώσεων όπως $(NH_4)_2SO_3$ και NH_4HSO_4 τα οποία εναποτίθενται στην επιφάνεια του καταλύτη μειώνοντας την απόδοση του. Ανάλογα με τη συγκέντρωση του SO_3, ορίζεται και η θερμοκρασία λειτουργίας του καταλύτη. Η εγκατάσταση μιας καταλυτικής τεχνολογίας γίνεται μετά τις συσκευές υγρής απομάκρυνσης ή μετά τα φίλτρα απομάκρυνσης των PCDD/Fs σε μία διαδικασία υγρής απομάκρυνσης, ενώ σε συστήματα ξηρής απομάκρυνσης τοποθετείται μετά τα σακκόφιλτρα και τις συσκευές ξηρής απομάκρυνσης [3].



Εικόνα 17: διάταξη SCR

- ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΔΙΟΞΙΝΩΝ

Όπως και με την περίπτωση των NO_X, έτσι και για τη μείωση των διοξινών χρησιμοποιούνται τόσο πρωτογενή όσο και δευτερογενή μέτρα.

- ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΜΕΤΡΑ

Τα πρωτογενή μέτρα που απαιτούνται για τη μείωση των διοξινών λαμβάνονται κατά τη διαδικασία της αποτέφρωσης ώστε να αποτραπεί η παραγωγή τους. Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν ταχύ πέρασμα από το εύρος των θερμοκρασιών όπου ευνοείται η παραγωγή των διοξινών, μείωση της περίσσειας του αέρα καύσης, διαδικασία προκαθίζησης της ιπτάμενης τέφρας (η οποία δρα ως καταλύτης δημιουργίας των διοξινών) και συχνός καθαρισμός των σημείων διέλευσης των απαερίων όπου λαμβάνουν χώρα θερμοκρασίες που ευνοούν τη παραγωγή διοξινών [3].

Οι συνθήκες καύσης πρέπει να είναι σε θερμοκρασία 850^0C, ο ελάχιστος χρόνος παραμονής των απαερίων στο θάλαμο καύσης είναι τα 2 δευτερόλεπτα ενώ απαιτείται επαρκής συγκέντρωση οξυγόνου ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος παραγωγής CO και άλλων οργανικών ενώσεων [12]. Επιπλέον πρέπει να μειώνεται αποτελεσματικά η

ιπτάμενη τέφρα και τα βαρέα μέταλλα, αλλά και το Cl που περιέχεται στα απορρίμματα προς επεξεργασία.

- ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗ ΜΕΤΡΑ

Στα δευτερογενή μέτρα που λαμβάνονται υπόψη είναι η απομάκρυνση των σωματιδίων, η χρήση ενεργού άνθρακα και καταλυτικές διαδικασίες. Η αποτελεσματική απομάκρυνση της τέφρας από τα απαέρια μειώνει την δυνατότητα παραγωγής διοξινών γιατί τα σωματίδια της τέφρας όπως αναφέρθηκε αποτελούν καταλύτες παραγωγής διοξινών. Στην τεχνική απομάκρυνσης με ενεργό άνθρακα, τα απαέρια διοχετεύονται σε μια κλίνη ενεργού άνθρακα σε θερμοκρασίες 100-130^{0}C, στην κλίνη επέρχεται διαχωρισμός της υπολειμματικής σκόνης, και των αέριων ρύπων.

Συνήθως ο κορεσμένος, με διοξίνες, άνθρακας καίγεται και οι αέριοι ρύποι καταστρέφονται σε μεγάλο βαθμό. Η καταλυτική οξείδωση χρησιμοποιείται κανονικά για την απομάκρυνση-μείωση των NO_X, αλλά εφαρμόζεται το ίδιο αποτελεσματικά και για τα PCDD/Fs. Τα αέρια προς επεξεργασία πρέπει να είναι ήδη καθαρισμένα από ιπτάμενη τέφρα και βαρέα μέταλλά, για την αποφυγή δηλητηρίασης του καταλύτη, η αποτελεσματικότητα της καταλυτικής διεργασίας φτάνει το 90-95% [1,3,5]. Η χρήση μονάδας ενεργού άνθρακα επιτυγχάνει αποδόσεις απομάκρυνσης των διοξινών κατά 99% [4].

2.4.2 Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα μιας μονάδας είναι τα προϊόντα από τα διάφορα στάδια των συσκευών υγρού διαχωρισμού (πλυτηρίδες, wet scrubbing process) και το υδατώδες διάλυμα από την ενυδάτωση του υπολείμματος της διαδικασίας της αποτέφρωσης.

Η επεξεργασία χωρίζεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο έχουμε τις διεργασίες του βαρυντικού διαχωρισμού (gravity separation), την ουδετεροποίηση (neutralization), την κροκίδωση (precipitation), τη συσσωμάτωση (flocculation) και την επίπλευση (flotation), ενώ στο δεύτερο λαμβάνουν χώρα διεργασίες φίλτρανσης (filtration), ιοντοεναλλαγής (ion exchanger) και φίλτρανσης σε ενεργό άνθρακα (activated coke filter) [3].

2.4.3 Διαχείριση Στερεών Υπολειμμάτων

Στα στερεά απόβλητα της καύσης είναι κάθε στερεό υλικό όπως τέφρα πυθμένα και σκωρίες, ιπτάμενη τέφρα κα κονιορτός από τους λέβητες, στερεά προϊόντα αντίδρασης

από την επεξεργασία των αερίων, βιολογική ιλύς από την επεξεργασία των λυμάτων, αναλωμένοι καταλύτες και αναλωμένος ενεργός άνθρακας). Συνήθως είναι το 10-15% του συνολικού όγκου των ΑΣΑ που αποτεφρώνονται. Μερικές φορές το στερεό υπόλειμμα ενυδατώνεται και κατευθύνεται προς το ρεύμα επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, με τη χρήση μεγάλης ποσότητας νερού, έχουμε και απομάκρυνση αλάτων. Το υπόλειμμα αυτό χρήζει εδαφικής διάθεσης σε ειδικά σχεδιασμένο χώρο ταφής. Αρκετές φορές γίνεται κάποια προεπεξεργασία ώστε (διαχωρισμός, μαγνητικός διαχωρισμός για ανάκτηση μετάλλων) ώστε να μειωθεί ακόμα περισσότερο το στερεό προς ταφή ενώ έχουμε και παραγωγή κοκκώδους υλικού προς επαναχρησιμοποίηση ως κατασκευαστικό υλικό [1,6].

Ακόμα ειδικής επεξεργασίας χρήζει τόσο η καθιζάμενη τέφρα όσο κι η ιπτάμενη τέφρα που συλλέγεται από τις διάφορες συσκευές (ESP, σακόφιλτρα). Τα σωματίδια που μεταφέρονται μαζί με τα απαέρια της καύσης και κατακάθονται στις επιφάνειες του λέβητα απομακρύνονται μέσω ειδικών χοανών. Κατά τη ψύξη των απαερίων πολλά πτητικά βαρέα μέταλλα και οργανικές ενώσεις προσκολλώνται πάνω στα σωματίδια, ενώ τα μικρότερα κατευθύνονται προς το σύστημα επεξεργασίας απαερίων [3].

Τα σωματίδια της ιπτάμενης τέφρας που συλλέγοντα από το λέβητα και από τις συσκευές κατακράτησης απομακρύνονται και καταλήγουν προς εδαφική διάθεση. Επειδή τα υπολείμματα της τέφρας περιέχουν επικίνδυνες ενώσεις όπως διοξίνες ή βαρέα μέταλλα η διαδικασία που απαιτείται για τη διάθεσης τους πρέπει να είναι αυστηρά ελεγχόμενη. Για την επεξεργασία των υπολειμμάτων χρησιμοποιούνται καταλυτικές μέθοδοι επεξεργασίας της τέφρας, απομάκρυνση των βαρέων μετάλλων και περαιτέρω αποτέφρωση της τέφρας, υαλοποίηση και αδρανοποίηση της [6].

2.4.4 Απόδοση Συστημάτων Επεξεργασίας Απαερίων σε Μονάδες Αποτέφρωσης

Ένα μεγάλο εύρος συνδυασμών συσκευών απορρύπανσης χρησιμοποιούνται για τη μείωση των ρύπων στις εκπομπές των μονάδων αποτέφρωσης. Οι συνδυασμοί ποικίλουν από μονάδα σε μονάδα. Οι συνδυασμοί αυτοί είναι γνωστοί ως συστήματα επεξεργασίας αέριας ρύπανσης (Air Pollution Control System-APC) [2,3,4,5,6,13,14,16].

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των συγκεντρώσεων των διάφορων ρύπων που πρέπει να υπόκεινται σε επεξεργασία πριν από την έξοδο της μονάδας αλλά και οι απαιτήσεις της νομοθεσίας σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία 2000/76/EC [12].

Πίνακας 8: επιτρεπτά όρια απαερίων [16].

	raw gas concentration [mg/Nm³ tr.]	emission limit [mg/Nm³ tr.]	precipitating rate [%]
fly ash	2000 - 10000	10	99,9
HCl	400 - 1500	10	> 99
HF	2 - 20	1	95
SO2	200 - 800	50	94
NO_X (as NO_2)	200 - 400	200	50
Hg	0,3 - 0,8	0,05	88
Cd, Tl	3 - 12	0,05	> 99,5
dioxins /furans	< 1 - 5 ng TEQ/m³	0,1 ng TEQ/m³	98

Για να εκτιμήσουμε τη συνολική απόδοση απομάκρυνσης ενός συστήματος APC πρέπει να εκτιμήσουμε τη δυνατότητα του συστήματος να απομακρύνει αποτελεσματικά όλους τους αέριους ρύπους που παράγονται κατά τη διαδικασία της αποτέφρωσης. Η συνολικά απόδοση απομάκρυνσης του συστήματος είναι ο συνδυασμός των αποδόσεων απομάκρυνσης κάθε ρύπου ξεχωριστά που επεξεργάζεται η αντίστοιχη συσκευή του συστήματος APC.

Για την εκτίμηση της ολικής απόδοσης απομάκρυνσης μπορούμε να κάνουμε την εξής υπόθεση: Κάθε συσκευή απορρύπανσης που βρίσκεται στο σύστημα APC χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση ενός συγκεκριμένου ρύπου ή μιας ομάδας ρύπων (με την αντίστοιχη απόδοση). Υποθέτουμε λοιπόν ότι η απόδοση απομάκρυνσης για κάθε ρύπο δεν επηρεάζεται από τη λειτουργία των άλλων συσκευών ή την παρουσία των υπόλοιπων ρύπων στα απαέρια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η δράση του συστήματος για την απομάκρυνση ενός ρύπου να είναι ανεξάρτητη από τη δράση του ίδιου συστήματος για τους υπόλοιπους ρύπους.

Η συνολική απόδοση του συστήματος ορίζεται ως η ικανότητα να κατακρατήσει όλους τους ρύπους (βάση της απόδοσης απομάκρυνσης κάθε ρύπου. Αυτό μπορεί να περιγραφεί με το παρακάτω σκεπτικό.

$$P_{ef,total} = P_{ef}(NO_x) \cap P_{ef}(HCl) \cap P_{ef}(HF) \cap P_{ef}(SO_2) \cap P_{ef}(Hg) \cap P_{ef}(F.ash) \cap P_{ef}(PCDD/Fs) \quad (2.1)$$

Επειδή υποθέσαμε ότι κάθε απόδοση είναι ανεξάρτητη των υπολοίπων μπορούμε να οδηγηθούμε στην εξής έκφραση της σχέσης (2.1)

$$P_{ef,total} = P_{ef}(NO_x) \cdot P_{ef}(HCl) \cdot P_{ef}(HF) \cdot P_{ef}(SO_2) \cdot P_{ef}(Hg) \cdot P_{ef}(F.ash) \cdot P_{ef}(PCDD/F) \quad (2.2)$$

Χρησιμοποιώντας τώρα κάποιες θεωρητικές τιμές για την απομάκρυνση κάθε ρύπου μπορούμε να οδηγηθούμε στον εξής πίνακα αποδόσεων για κάθε έναν από τους συνδυασμούς των συστημάτων APC.

Πίνακας 9: θεωρητικές αποδόσεις συστημάτων APC .

	pollutants separation efficiencies							
APC system combination	fly ash	HCl	HF	SO2	NOx	PCDD/Fs	Hg	Total efficiency (%)
ESP/2 stage wet scrubber/wet dedusting system/SCR	0,996	0,97	0,97	0,98	0,9	0,98	0,85	68,85
Fabric Filter (lime stone, activated carbon)/2 stage wet scrubber/SCR	0,99	0,97	0,97	0,98	0,9	0,997	0,99	81,09
ESP/2 stage wet scrubber (NaOH)/Fabric Filter (lime stone, activated carbon)/SCR	0,9889	0,97	0,97	0,98	0,9	0,997	0,99	81,00
ESP/2 stage wet scrubber (NaOH)/activated carbon/SCR	0,999	0,97	0,97	0,98	0,9	0,997	0,99	81,83
ESP/2 stage wet scrubber (NaOH)/wet removal/activated carbon	0,996	0,97	0,97	0,98	0,9	0,98	0,99	80,19

Αν και το γεγονός ότι εκφράζουμε τη συνολική απόδοση χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.1) η οποία χρησιμοποιείται για ανεξάρτητα γεγονότα (γεγονότα που δεν επηρεάζονται μεταξύ τους), αν και αυτό δε συμβαίνει στη διαδικασία της καύσης, η υπόθεση αυτή αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο στο να εκτιμήσουμε τη συνολική απόδοση.

Με βάση έρευνες για τις εκπομπές ορισμένων μονάδων αποτέφρωσης έχει προκύψει το εξής συμπέρασμα: Το 23.94 % των γραμμών αποτέφρωσης έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για το HCl, το 13.94% των γραμμών αποτέφρωσης έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για το SO_2, το 8.33 % έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για την τέφρα, το 52.8 % έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για το NO_x, το 21 % έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για τα PCDD/Fs και το 4.25 % έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για τον υδράργυρο [14].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

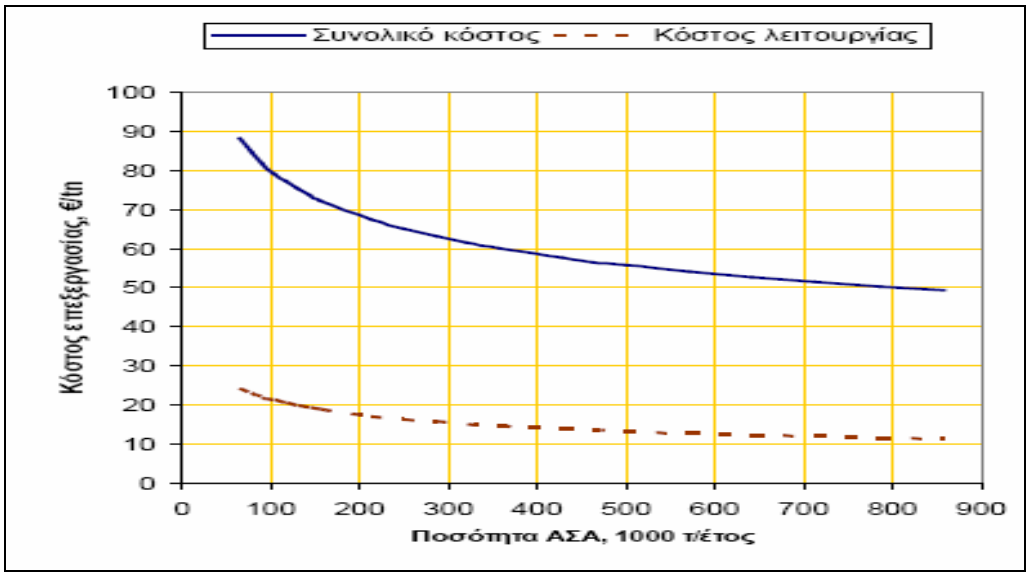
Σε όλα τα υπό κατασκευή έργα λαμβάνονται υπόψη όλες οι πιθανές παράμετροι που θα καθορίσουν τη λήψη της τελεσίδικης απόφασης για την κατασκευή τους. Το νομικό καθεστώς που ισχύει για την εγκατάσταση και λειτουργία παρόμοιων έργων, η εκτίμηση του συνολικού κόστους του έργου είναι σημαντικοί παράγοντες που εξετάζονται. Στην οικονομική μελέτη ενός έργου σημαντικό ρόλο παίζουν το κόστος επένδυσης (investment cost), το κόστος λειτουργίας και συντήρησης (operation and maintenance cost) και τα πιθανά οικονομικά οφέλη από την εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας ή την ανάκτηση κάποιων υλικών από τα υπολείμματα της διεργασίας της αποτέφρωσης [2,4,8].

Τα ίδια κριτήρια λαμβάνονται υπόψη και για την μελέτη κατασκευής μιας μονάδας αποτέφρωσης. Γενικά η αποτέφρωση είναι μια δαπανηρή διαδικασία με κόστη που μπορεί να φτάσουν το τριπλάσιο του κόστους της εδαφικής διάθεσης [1]. Στον πίνακα 10 παρουσιάζονται τα κόστη αποτέφρωσης των ΑΣΑ και διαχείρισης των υπολειμμάτων της διεργασίας της αποτέφρωσης (καταλήγουν προς ταφή) σε διάφορες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης [15].

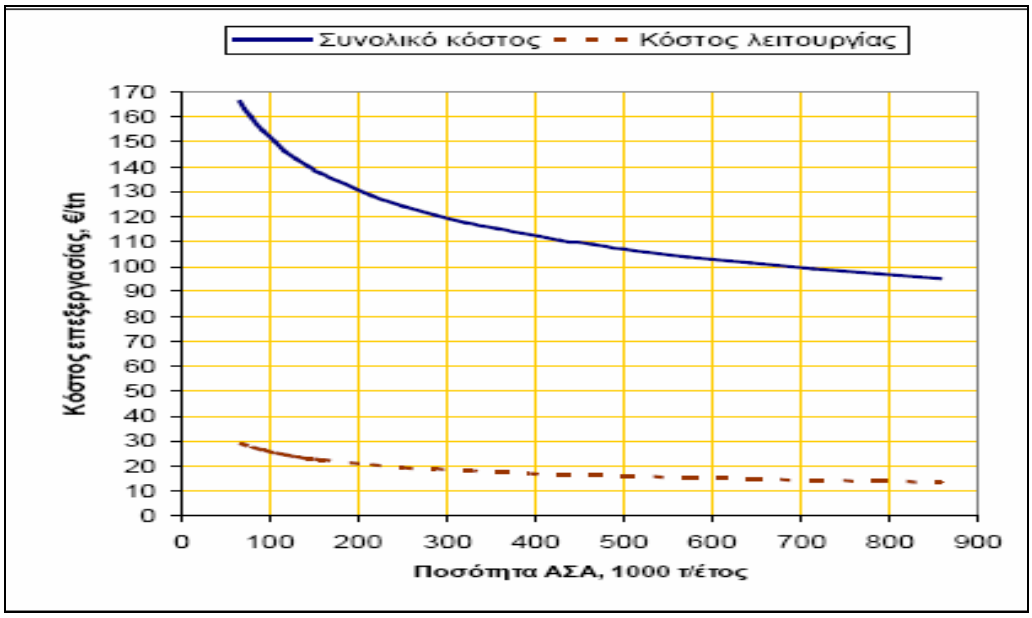
Πίνακας 10: κόστη αποτέφρωσης στην ΕΕ [15].

Συγκριτικά κόστη για καύση απορριμμάτων σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες		
Χώρα	**Κόστος καύσης (προ φόρων) σε ευρώ/τόνο**	**Κόστος διαχείρισης τεφρών**
Αυστρία	97-332	Τέφρα βάσης 63 €/τόνο Υπολείμματα συστημάτων αντιρρύπανσης 363 €/τόνο
Βέλγιο	62-83	-
Βρετανία	65-86	Ιπτάμενη τέφρα 100 €/τόνο
Γαλλία	67-129	13-18 €/τόνο
Γερμανία	65-250	Τέφρα βάσης 28,1 €/τόνο Ιπτάμενη τέφρα και υπολείμματα συστημάτων αντιρρύπανσης 255,6 €/τόνο
Δανία	43	Τέφρα βάσης και υπολείμματα συστημάτων αντιρρύπανσης 34 €/τόνο
Ελβετία	21-53	-
Ιρλανδία	46	-
Ισπανία	34-56	-
Ιταλία	41,3-93	Τέφρα βάσης 75 €/τόνο Ιπτάμενη τέφρα και υπολείμματα συστημάτων αντιρρύπανσης 129 €/τόνο
Λουξεμβούργο	97	Τέφρα βάσης 16 €/τόνο Υπολείμματα συστημάτων αντιρρύπανσης 8 €/τόνο
Ολλανδία	71-110	-

Το κόστος της αποτέφρωσης ποικίλει και ανάλογα με το φορέα που τα διαχειρίζεται. Στα γραφήματα των εικόνων 18 και 19 παρουσιάζονται τα κόστη ανάλογα με το φορέα διαχείρισης μιας μονάδας αποτέφρωσης. Η εικόνα 18 παρουσιάζει το κόστος αποτέφρωσης ανά τόνο ΑΣΑ προς επεξεργασία όταν ο φορέας διαχείρισης είναι το δημόσιο ενώ Η εικόνα 19 παρουσιάζει το αντίστοιχο κόστος όταν ο φορέας διαχείρισης είναι κάποιος ιδιώτης. Παρατηρούμε ότι το κόστος για κάποιον ιδιώτη που θέλει να επενδύσει σε μια μονάδα αποτέφρωσης είναι σχεδόν διπλάσιο σε σύγκριση με μια δημόσια επένδυση. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω διαφορετικής φορολογικής πολιτικής [10].



Εικόνα 18: κόστος αποτέφρωσης για μονάδα με διαχειριστή το δημόσιο [10].



Εικόνα 19: κόστος αποτέφρωσης για μονάδα με διαχειριστή ιδιώτες [10].

3.2 Κόστος Επένδυσης

Μια σειρά από παράγοντες επηρεάζει το συνολικό κόστος επένδυσης μια μονάδας αποτέφρωσης. Το σημαντικότερο ρόλο παίζουν η δυναμικότητα της μονάδας, δηλαδή η ποσότητα των ΑΣΑ που καταλήγει προς θερμική επεξεργασία στη, το είδος των ΑΣΑ που πρόκειται να επεξεργαστούν (ενδεχόμενη προ-επεξεργασία) και η κατώτερη θερμογόνος δύναμη των απορριμμάτων. Σύμφωνα με την δυναμικότητα γίνεται ο σχεδιασμός των χώρων αποθήκευσης και το είδος του αποτεφρωτήρα ή ακόμα ο τύπο μονάδας που θα κατασκευαστεί [4].

Ο τρόπος με τον οποίο θα εκμεταλλευτεί την παραγόμενη θερμότητα (ηλεκτρική ενέργεια, νερό θέρμανσης, ατμός), καθορίζεται από τις συνθήκες που ισχύουν στην αγορά ενέργειας της χώρας, στην οποία θα εγκατασταθεί και βέβαια οι υποδομές σε τυχόν δίκτυα διανομής ζεστού νερού για θέρμανση και δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ή βιομηχανίες για εκμετάλλευση του παραγόμενου ατμού. Έτσι γίνεται και εκτίμηση για το είδος και το κόστος του λέβητα που θα εγκατασταθεί [4].

Το νομικό καθεστώς που ακολουθεί η χώρα που είναι εγκαταστημένη η μονάδα για τις συνθήκες λειτουργίας και την διαχείριση των εκπομπών-αποβλήτων της μονάδας καθορίζουν και το κόστος εγκατάστασης του συστήματος επεξεργασίας των απείρων. Η επιλογή της ποιότητας επεξεργασίας των απαερίων ρυθμίζει επίσης το κόστος επένδυσης [4].

3.3 Κόστος Λειτουργίας και Συντήρησης

Για την εκτίμηση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης υπολογίζονται το κόστος για την εξόφληση της επένδυσης (δάνεια και τόκοι), τα σταθερά έξοδα όπως κόστη διαχείρισης (πχ κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης) και οι μισθοί του προσωπικού, τα κόστη για την αγορά των χημικών ουσιών για την αγορά των χημικών επεξεργασίας, τα κόστη επεξεργασίας και διάθεσης υπολειμμάτων και τα κόστη συντήρησης και καθαρισμού του εξοπλισμού και κτιρίων. Κάποιες αποφάσεις που αφορούν οικονομικά θέματα παίζουν σπουδαίο ρόλο και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη (πχ φόροι αποτέφρωσης) [3,4].

Είδη όπως ο εξοπλισμός ανάκτησης ενέργειας οι λέβητες, το σύστημα αποτέφρωσης και επεξεργασίας των απερίων επιλέγονται όχι μόνο με βάση το κόστος αγοράς και εγκατάστασης τους, αλλά και τι ποσά θα δαπανηθούν για να συντηρηθούν, σπουδαίο ρόλο παίζει η εμπειρία και οι γνώσεις του προσωπικού. Το κόστος της αποτέφρωσης χαρακτηρίζεται ως ιδιαιτέρα υψηλό. Κάθε παράμετρος παίζει ρόλο στην λήψη αποφάσεων και ανάλογα και με τις υποδομές που θα κατασκευαστεί η μονάδα.

Πολλές φορές το κόστος ή μέρος του κόστους καλύπτεται από τους δήμους ή το κράτος (φορολογία ή δημοτικά τέλη) οι οποίοι έχουν την ευθύνη της διαχείρισης των απορριμμάτων που παράγουν (tipping fees). Τα ποσά αυτά είναι ενδεικτικά για την εκτίμηση του κόστους της αποτέφρωσης, καθώς είναι δύσκολο αυτό να εκτιμηθεί από άλλες πηγές [8].

Πίνακας 11: κόστος αποτέφρωσης σε χώρες της ΕΕ, δημοτικά τέλη (tipping fees) [14]

	Pre-tax[2] costs net of revenues in EUR per tonne waste input	Tax (for plant with energy recovery)	Revenues from energy supply (EUR per kWh)	Costs of ash treatment (EUR per tonne of ash unless otherwise specified)
A	326 @ 60 kt/yr 159 @150 kt/yr 97 @ 300 kt/yr		Electricity: 0.036 Heat: 0.018	Bottom ash: 63 Flue-gas residues: 363
B	72 average	EUR 12.7/t (Flanders)	Electricity: 0.025	Not available
DK	30 – 45	EUR 44/t	Electricity: 0.05	Bottom ash: 34 Flue-gas treatment residues: 80
FIN	None		For gasification, Electricity 0.034 Heat 0.017	
F	86 - 101 @ 37.5 kt/yr 80 - 90 @ 75 kt/yr 67 - 80 @ 150 kt/yr		Electricity 0.033 - 0.046 Heat: 0.0076 - 0.023	Bottom ash: EUR 13 – 18 per tonne input
D	250 (50 kt/yr and below)[1] 105 (200 kt/yr)[1] 65 @ 600 kt/yr[1]		Electricity 0.015 – 0.025	Bottom ash:25 - 30 Fly ash/air pollution control residues: 100 - 250
EL	None		Not known	Not known
IRL	None		Not known	Not known
I	41.3 – 93 (350 kt, depends on revenues for energy and packaging recovery)		Electricity: 0.14 (old) 0.04 (market) 0.05 (green cert.)	Bottom ash: 75 Fly ash and air pollution control residues: 29
L	97 (120 kt)		Electricity: 0.025 (estimated)	Bottom ash EUR 16/t input waste Flue-gas residues: EUR 8/t input waste
NL	71 – 110[1] 70 – 134[1]		Electricity: 0.027 - 0.04 (estimated)	
P	46 – 76 (est.)			No data
E	34 – 56		Electricity: 0.036	
S	21 – 53		Electricity: 0.03 Heat: 0.02	
UK	69 @ 100kt/yr 47 @ 200kt/yr		Electricity: 0.032	Bottom ash recycled (net cost to operator) fly ash circa 90

Notes:
1. These figures are gate fees, not costs
2. Pre-tax cost refers to gross costs without any tax.

3.4 Εκτίμηση Κόστους μονάδας Αποτέφρωσης ΑΣΑ (δεδομένα ΕΕ).

Η διεργασία σε μια μονάδα αποτέφρωσης απορριμμάτων χωρίζεται σε 3 κύρια στάδια, α) το στάδιο της αποτέφρωσης, β) το στάδιο της ανάκτησης της ενέργειας και γ) το στάδιο του συστήματος επεξεργασίας των αέριων εκπομπών και της ιπτάμενης τέφρας που παράγεται από την καύση.

Παρακάτω γίνεται εκτίμηση του κόστους για κάθε στάδιο ξεχωριστά, αλλά και η εκτίμηση του κόστους της όλης διεργασίας με βάση κάποια παραδείγματα από μονάδες στην Αυστρία. [3, 14].

3.4.1 Εκτίμησης Κόστους Αποτεφρωτήρα

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα κόστη μιας μονάδας αποτέφρωσης καθώς και η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για την λειτουργία του αποτεφρωτή και του συναρτήσει της δυναμικότητας της μονάδας σε επεξεργασία απορριμμάτων.

Πίνακας 12: κόστος αποτεφρωτήρα [3]

Parameter	Throughput		
	75,000 t yr^{-1}	100,000 t yr^{-1}	150,000 t yr^{-1}
Investment costs [€]	about 9.2 Mio.	about 11.6 Mio.	about 16 Mio.
Specific investment costs [€ yr^{-1}]	12.63	11.94	10.98
Yearly maintenance costs in percent of investment costs [% yr^{-1}]	4.00	4.00	4.00
Specific maintenance costs [€ yr^{-1}]	4.90	4.60	4.30
Average overall consumption of electricity (normal operation) [kWh t^{-1}]	27	27	27
Costs of electricity [€ t^{-1}]	0.67	0.67	0.67
Accumulating slag and boiler ash [kg t^{-1}]	271.50	271.50	271.50
Disposal costs of slag and boiler ash [€ t^{-1}]	19.16	19.16	19.16
Specific costs for firing and boiler [€ t^{-1}]	**37.37**	**36.42**	**35.08**

Προκύπτει ότι για μια μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των εσχαρών τα κόστη και η κατανάλωση ενέργειας που απαιτούντα αντίστοιχα ανά τόνο επεξεργασμένων ΑΣΑ, είναι:

	Δυναμικότητα (*tn / yr*)		
	75.000	**100.000**	**150.000**
Investment cost (€/tn)	**12,63**	**11,94**	**10,98**
Operating cost (€/tn)	**5,57**	**5,27**	**4,97**
Energy consumption (kwh/tn)	**27**	**27**	**27**

3.4.2 Εκτίμηση Κόστους Ανάκτησης Ενέργειας

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα κόστη επένδυσης, τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης μιας μονάδας αποτέφρωσης, για την παραγωγή ενέργειας, συναρτήσει της δυναμικότητας της μονάδας σε επεξεργασία απορριμμάτων και της μορφής που ανακτάται η ενέργεια αυτή (θέρμανση, ατμός, ηλ. ενέργεια ή συνδυασμός).

- **περίπτωση 1: Παραγωγή Ενέργειας για σκοπούς Θέρμανσης**

Πίνακας 13: κόστος παραγωγής ενέργειας για θέρμανση [3]

Parameter	Throughput		
	100,000 t yr^{-1}	200,000 t yr^{-1}	300,000 t yr^{-1}
Investment costs [€]	about 3 Mio.	about 4.5 Mio.	about 6 Mio.
Specific investment costs [€ t^{-1}]	3.09	2.32	2.06
Specific maintenance costs [€ t^{-1}]	0.90	0.68	0.60
Heat delivery [MWh t^{-1}]	2.2	2.2	2.2
Specific proceeds from heat production [€ t^{-1}]	13.2	13.2	13.2
Rated proceeds from water-steam cycle [€ t^{-1}]	**9.21**	**10.21**	**10.54**

Από την επεξεργασία του παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι για μια μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των εσχαρών τα κόστη επένδυσης, τα κόστη λειτουργίας για την παραγωγή απλής θερμότητας, που απαιτούντα αντίστοιχα ανά τόνο επεξεργασμένων ΑΣΑ, είναι:

	Δυναμικότητα (*tn / yr*)		
	100.000	**200.000**	**300.000**
Investment cost (€/tn)	**3,09**	**2,32**	**2,06**
Operating cost (€/tn)	**0,9**	**0,68**	**0,6**
Energy consumption (kwh/tn)	**-**	**-**	**-**

- **<u>Περίπτωση 2: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ατμό (50 bar and 400 °C)</u>**

Πίνακας 14: κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [3]

Parameter	Throughput		
	100,000 t yr^{-1}	200,000 t yr^{-1}	300,000 t yr^{-1}
Investment costs [€]	about 8 Mio.	about 12 Mio.	about 16 Mio.
Specific investment costs [€ t^{-1}]	8.24	6.18	5.49
Specific maintenance costs [€ t^{-1}]	2.40	1.80	1.60
Heat delivery [MWh t^{-1}]	0	0	0
Specific proceeds from heat production [€ t^{-1}]	0	0	0
Electricity delivery [MWh t^{-1}]	0.44	0.44	0.44
Specific proceeds from electricity production [€ t^{-1}]	11	11	11
Rated proceeds from water-steam cycle [€ t^{-1}]	**0.36**	**3.02**	**3.91**

Από την επεξεργασία του παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι για μια μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των εσχαρών τα κόστη επένδυσης, τα κόστη λειτουργίας για την παραγωγή απλής ηλεκτρικής ενέργειας, που απαιτούντα αντίστοιχα ανά τόνο επεξεργασμένων ΑΣΑ, είναι:

	Δυναμικότητα (*tn / yr*)		
	100.000	**200.000**	**300.000**
Investment cost (€/tn)	**8,24**	**6,18**	**5,49**
Operating cost (€/tn)	**2,4**	**1,8**	**1,6**
Energy consumption (kwh/tn)	**-**	**-**	**-**

- **περίπτωση 3: <u>Εξαγωγή ατμού από τουρμπίνα και είσοδο σε μια μονάδα παραγωγής ηλ. Ενέργειας</u>**

Πίνακας 15: κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ατμό [3]

Parameter	Throughput		
	100,000 t yr^{-1}	200,000 t yr^{-1}	300,000 t yr^{-1}
Investment costs [€]	about 8,5 Mio.	about 12,5 Mio.	about 15 Mio.
Specific investment costs [€ t^{-1}]	8.75	6.44	5.15
Specific maintenance costs [€ t^{-1}]	2.55	1.88	1.50
Heat delivery [MWh t^{-1}]	0	0	0
Specific proceeds from heat production [€ t^{-1}]	0	0	0
Electricity delivery [MWh t^{-1}]	0.66	0.66	0.66
Specific proceeds from electricity production [€ t^{-1}]	16.5	16.5	16.5
Rated proceeds from water-steam cycle [€ t^{-1}]	**5.20**	**8.19**	**9.85**

Από την επεξεργασία του παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι για μια μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ, που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των εσχαρών, τα κόστη επένδυσης, τα κόστη λειτουργίας για την παραγωγή απλής ηλεκτρικής ενέργειας από μια ρυθμιζόμενη μονάδα, που απαιτούντα αντίστοιχα ανά τόνο επεξεργασμένων ΑΣΑ, είναι:

	Δυναμικότητα (*tn / yr* **)**		
	100.000	**200.000**	**300.000**
Investment cost (€/tn)	**8,75**	**6,44**	**5,15**
Operating cost (€/tn)	**2,55**	**1,88**	**1,50**
Energy consumption (kwh/tn)	**-**	**-**	**-**

- **<u>περίπτωση4: Συμπαραγωγή θέρμανσης-ηλ. ενέργειας(CHP) παράμετροι ατμού (50 bar,400 °C)</u>**

Πίνακας 16: κόστος συμπαραγωγής ενέργειας [3]

Parameter	Throughput		
	100,000 t yr^{-1}	200,000 t yr^{-1}	300,000 t yr^{-1}
Investment costs [€]	about 9 Mio.	about 14 Mio.	about 18 Mio.
Specific investment costs [€ t^{-1}]	9.27	7.21	6.18
Specific maintenance costs [€ t^{-1}]	2.70	2.10	1.80
Heat delivery [MWh t^{-1}]	1.98	1.98	1.98
Specific proceeds from heat production [€ t^{-1}]	11.88	11.88	11.88
Electricity delivery [MWh t^{-1}]	0.22	0.22	0.22
Specific proceeds from electricity production [€ t^{-1}]	5.50	5.50	5.50
Rated proceeds from water-steam cycle [€ t^{-1}]	**5.41**	**8.07**	**9.40**

Από την επεξεργασία του παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι για μια μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ, που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των εσχαρών, τα κόστη επένδυσης, τα κόστη λειτουργίας για την συνπαραγωγή θέρμανσης και ηλεκτρικής ενέργειας, που απαιτούντα αντίστοιχα ανά τόνο επεξεργασμένων ΑΣΑ, είναι:

	Δυναμικότητα (*tn / yr* **)**		
	100.000	**200.000**	**300.000**
Investment cost (€/tn)	**9,27**	**7,21**	**6,18**
Operating cost (€/tn)	**2,70**	**2,10**	**1,80**
Energy consumption (kwh/tn)	**-**	**-**	**-**

- **<u>περίπτωση 5: Συμπαραγωγή θέρμανσης-ηλ. ενέργειας(CHP) –παράμετροι ατμού 80 bar ,400 °C</u>**

Πίνακας 17 κόστος συμπαραγωγής ενέργειας [3]

Parameter	Throughput		
	100,000 t yr^{-1}	200,000 t yr^{-1}	300,000 t yr^{-1}
Investment costs [€]	about 10 Mio.	about 15,5 Mio.	about 20 Mio.
Specific investment costs [€ t^{-1}]	10.30	7.98	6.86
Specific maintenance costs [€ t^{-1}]	3.00	2.33	2.00
Heat delivery [MWh t^{-1}]	1.87	1.87	1.87
Specific proceeds from heat production [€ t^{-1}]	11.22	11.22	11.22
Electricity delivery [MWh t^{-1}]	0.33	0.33	0.33
Specific proceeds from electricity production [€ t^{-1}]	8.25	8.25	8.25
Rated proceeds from water-steam cycle [€ t^{-1}]	**6.17**	**9.17**	**10.61**

Από την επεξεργασία του παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι για μια μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ, που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των εσχαρών, τα κόστη επένδυσης, τα κόστη λειτουργίας για την συμπαραγωγή θέρμανσης και ηλεκτρικής ενέργειας, που απαιτούντα αντίστοιχα ανά τόνο επεξεργασμένων ΑΣΑ, είναι:

	Δυναμικότητα (*tn / yr* **)**		
	100.000	**200.000**	**300.000**
Investment cost (€/tn)	**10,30**	**7,98**	**6,86**
Operating cost (€/tn)	**3,00**	**2,33**	**2,00**
Energy consumption (kwh/tn)	**-**	**-**	**-**

- **<u>περίπτωση 6: Παραγωγή ατμού σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας 50 bar και 400 °C</u>**

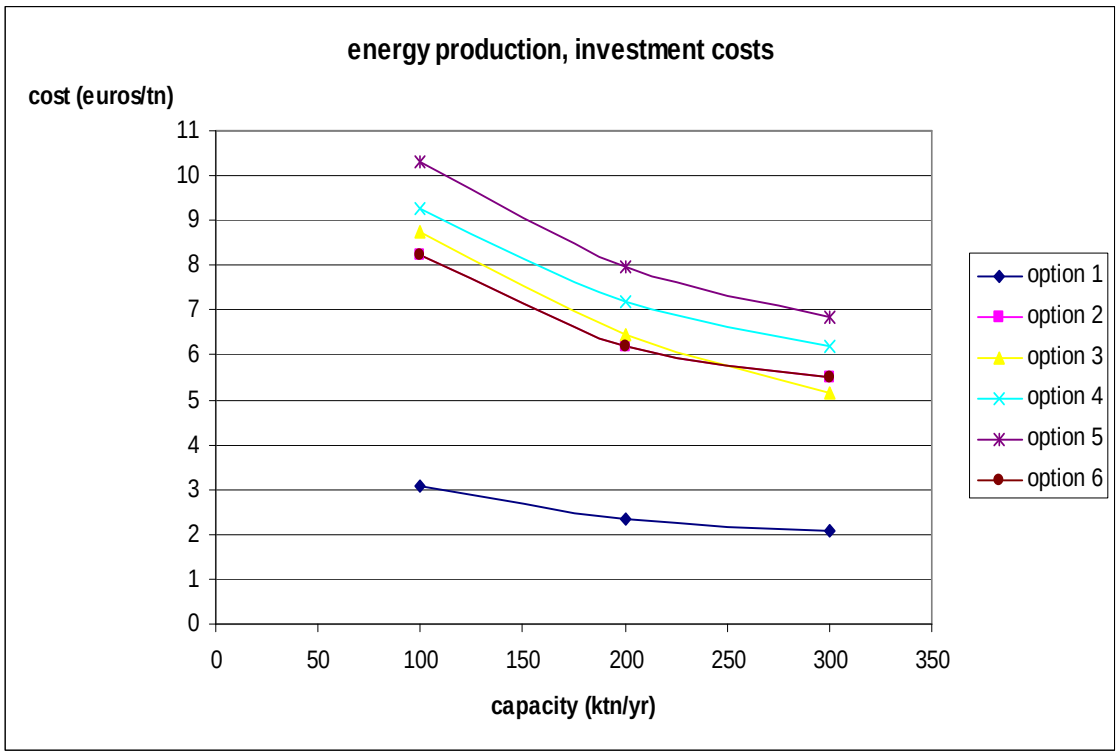
Πίνακας 18: κόστος συμπαραγωγής ατμού [3]

Parameter	Throughput		
	100,000 t yr^{-1}	200,000 t yr^{-1}	300,000 t yr^{-1}
Investment costs [€]	about 8 Mio.	about 12 Mio.	about 16 Mio.
Specific investment costs [€ t^{-1}]	8.24	6.18	5.49
Specific maintenance costs [€ t^{-1}]	2.40	1.80	1.60
Heat delivery [MWh t^{-1}]	0	0	0
Specific proceeds from heat production [€ t^{-1}]	0	0	0
Electricity delivery [MWh t^{-1}]	0.44	0.44	0.44
Specific proceeds from electricity production [€ t^{-1}]	19.8	19.8	19.8
Rated proceeds from water-steam cycle [€ t^{-1}]	**9.16**	**11.82**	**12.71**

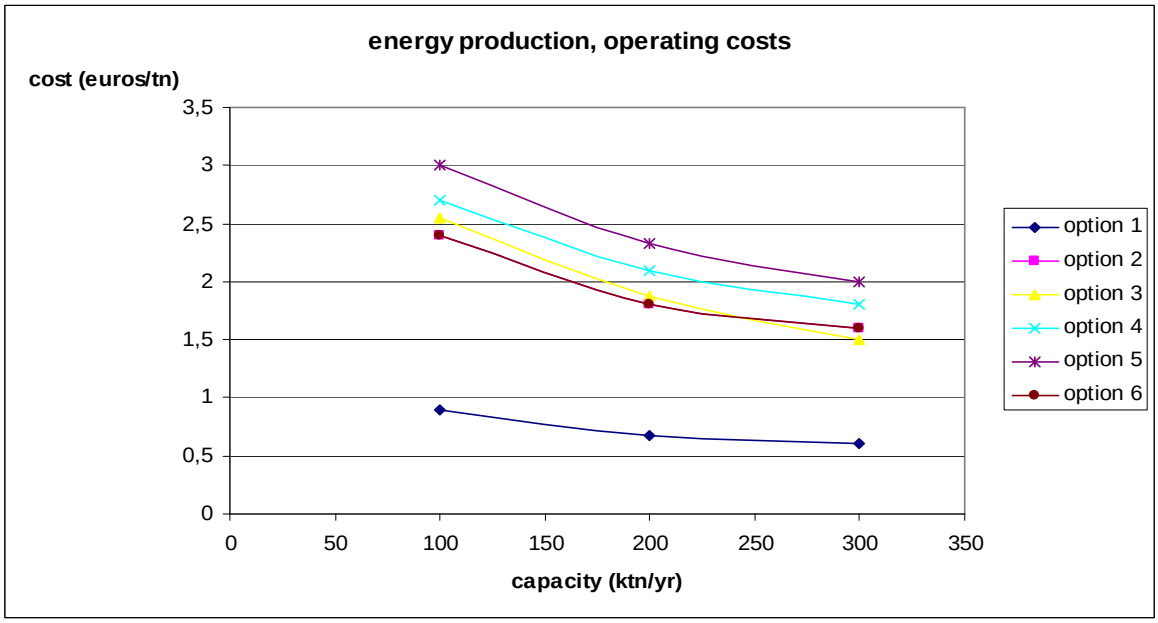
Από την επεξεργασία του παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι για μια μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ, που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των εσχαρών, τα κόστη επένδυσης, τα κόστη λειτουργίας για την παραγωγή απλής ηλεκτρικής ενέργειας, που απαιτούντα αντίστοιχα ανά τόνο επεξεργασμένων ΑΣΑ, είναι:

	Δυναμικότητα (*tn / yr* **)**		
	100,000	**200,000**	**300,000**
Investment cost (€/tn)	**8,24**	**6,18**	**5,49**
Operating cost (€/tn)	**2,4**	**1,8**	**1,6**
Energy consumption (kwh/tn)	**-**	**-**	**-**

Συγκρίνοντας τα εκτιμώμενα κόστη επένδυσης και λειτουργίας και συντήρησης για κάθε μια από τις παραπάνω επιλογές προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα.



Εικόνα 20: σύγκριση του κόστους επένδυσης για τις διάφορες περιπτώσεις παραγωγής ενέργειας [3]



Εικόνα 21: σύγκριση του κόστους λειτουργίας για τις διάφορες περιπτώσεις παραγωγής ενέργειας [3]

Μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι η παραγωγή ενέργειας για ανάγκες θέρμανσης είναι η πιο φθηνή επιλογή, ενώ η επιλογή για συμπαραγωγή ηλ. ενέργειας και θέρμανσης σε υψηλές συνθήκες πίεσης είναι η πιο δαπανηρή μέθοδος.

3.4.3 Εκτίμηση Κόστους Συστήματος Απορρύπανσης

Το αρχικό κόστος του συστήματος APC περιλαμβάνει το κόστος σχεδιασμού του συστήματος, το κόστος των εξαρτημάτων που αποτελούν το σύστημα και το κόστος εγκατάστασης. Το λειτουργικό κόστος αποτελείται από τη συντήρηση του συστήματος, το κόστος των δειγματοληπτικών ερευνών και των αναλύσεων και το κόστος οργάνωσης και επεξεργασίας των δεδομένων.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται διάφοροι συνδυασμοί συσκευών απορρύπανσης που χρησιμοποιούνται σε μονάδες αποτέφρωσης στην Αυστρία και για τους οποίους έχει γίνει η εκτίμηση του κόστους [3,14].

πίνακας 19: Συνδυασμοί συστημάτων αντί-ρύπανσης απαερίων [3]

- electrostatic precipitator, - two-stage wet scrubber with precipitation, - wet removal of fine dust and - catalytic plant (low-dust circuit)	- electrostatic precipitator, - two-stage wet scrubber, - wet removal of fine dust and - catalytic plant (low-dust circuit)
- fabric filter with dosage of lime and activated coke, - two-stage wet scrubbing with gypsum scrubber and - downstream catalytic plant (low-dust circuit)	- electrostatic precipitator, - two-stage wet scrubbing with NaOH scrubber, - fabric filter with dosage of lime and activated coke and - downstream catalytic plant (low-dust circuit)
- electrostatic precipitator, - two-stage wet scrubbing with precipitation, - activated coke adsorber (cross current) - downstream catalytic plant (low-dust circuit)	- electrostatic precipitator, - two-stage wet scrubber with precipitation, - wet removal of fine dust and - activated coke adsorber (counter current)

Τα κόστη επένδυσης και λειτουργίας καθώς και η συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά τόνο επεξεργαζόμενων ΑΣΑ παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 20:Συνδυασμός 1(ESP-Υγρές διαδικασίες 2επιπέδων-πλυντηρίδα-SCR)

	capacity (tn/yr)		
costs (€/tn)	**75.000**	**100.000**	**150.000**
investment cost	**8,51**	**7,93**	**6,94**
operating cost	**7,67**	**7,62**	**7,48**
electricity cost	**1,13**	**1,13**	**1,13**
electricity cons.(kwh/tn)	**45,00**	**45,00**	**45,00**

Πίνακας 21:Συνδυασμός 2 (σακόφιλτρο-Υγρή διαδικασία 2επιπέδων-SCR)

	capacity (tn/yr)		
costs (€/tn)	**75.000**	**100.000**	**150.000**
investment cost	**6,66**	**6,12**	**5,49**
operating cost	**8,61**	**8,48**	**8,31**
electricity cost	**0,90**	**0,90**	**0,90**
electricity cons.(kwh/tn)	**36,00**	**36,00**	**36,00**

Πίνακας 22:Συνδυασμός 3 (ESP-σακόφιλτρο-NaOH συλλεκτής-SCR)

	capacity (tn/yr)		
costs (€/tn)	**75.000**	**100.000**	**150.000**
investment cost	**7,07**	**6,54**	**5,90**
operating cost	**7,59**	**7,48**	**7,05**
electricity cost	**1,19**	**1,19**	**1,19**
electricity cons.(kwh/tn)	**48,00**	**48,00**	**48,00**

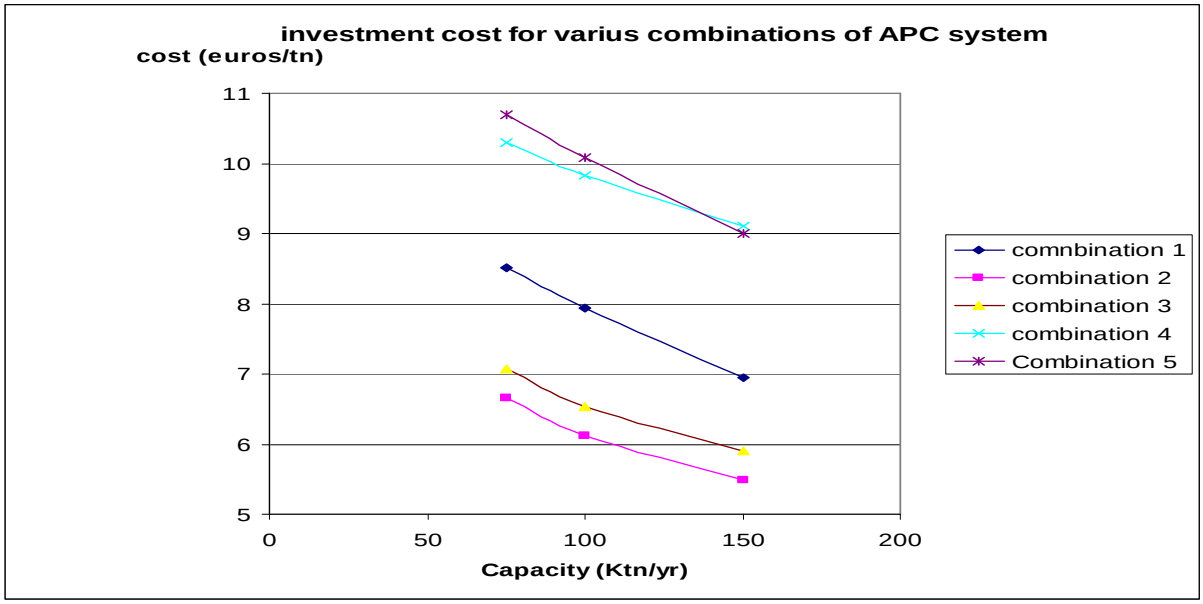
Πίνακας 23:Συνδυασμός 4 (ESP-ενεργός άνθρακας-πλυντηρίδα-SCR)

	capacity (tn/yr)		
costs (€/tn)	**75.000**	**100.000**	**150.000**
investment cost	**10,29**	**9,82**	**9,10**
operating cost	**8,45**	**8,38**	**8,29**
electricity cost	**0,90**	**0,90**	**0,90**
electricity cons.(kwh/tn)	**36,00**	**36,00**	**36,00**

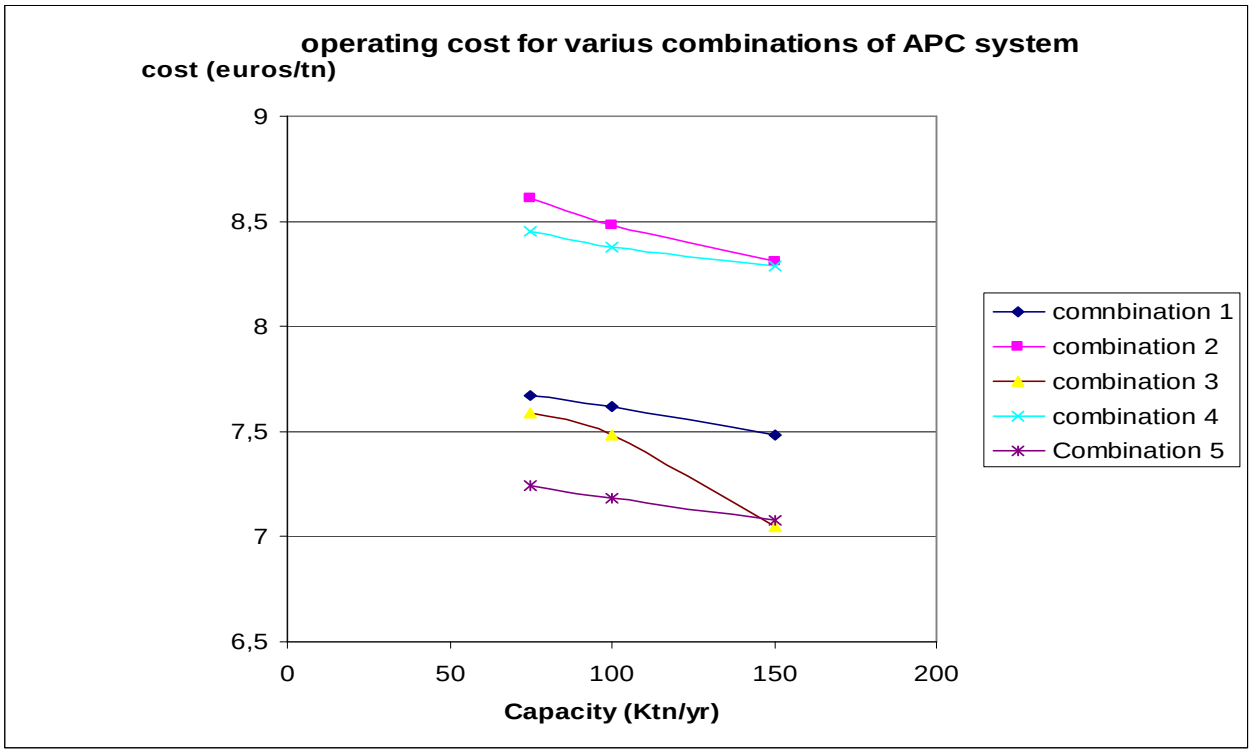
Πίνακας 24:Συνδυασμός 5 (ESP-ενεργός άνθρακας-πλυντηρίδα-Υγρή διαδικασία 2επιπέδων)

	capacity (tn/yr)		
costs (€/tn)	**75.000**	**100.000**	**150.000**
investment cost	**10,70**	**10,09**	**9,00**
operating cost	**7,24**	**7,18**	**7,08**
electricity cost	**1,18**	**1,18**	**1,18**
electricity cons.(kwh/tn)	**47,00**	**47,00**	**47,00**

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα για τα κόστη επένδυσης και λειτουργίας των παραπάνω συνδυασμών.



Εικόνα 22: σύγκριση του κόστους επένδυσης για τις διάφορα συστήματα αντί-ρύπανσης [3]



Εικόνα 23: σύγκριση του κόστους λειτουργίας για τις διάφορα συστήματα αντί-ρύπανσης [3]

3.4.4 Εκτίμηση Ολικού Κόστους Μονάδας Αποτέφρωσης

Έχοντας εκτιμήσει το κόστος ανά τμήματα μιας διεργασίας μιας μονάδας αποτέφρωσης ΑΣΑ, μπορούμε να κάνουμε μια εκτίμηση του κόστους (κόστους επένδυσης και λειτουργίας) της μονάδας αλλά και της ενέργειας που καταναλώνει για την επεξεργασία των απορριμμάτων.

Παρακάτω παρουσιάζονται 2 περιπτώσεις μονάδων όπου εκτιμάται το γενικό κόστος ανά τόνο απορριμμάτων. Από τα στοιχεία αυτά, αλλά και από τα παραπάνω εκτιμώμενα κόστη, θα προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε το κόστος της διεργασίας αποτέφρωσης [3,14].

Επιλογή μονάδας 1

Κόστη για μονάδα αποτέφρωσης που χρησιμοποιεί Σύστημα εσχαρών, Σύστημα APC (ESP, NaOH scrubber, flow injection adsorbed and catalytic plant) με παραγωγή ενέργειας συναρτήσει της δυναμικότητας.

Πίνακας 25: Σύστημα εσχαρών, Σύστημα APC (ESP, NaOH scrubber, flow injection adsorbed and catalytic plant) με παραγωγή ενέργειας [3]

Parameter	Unit	Throughput		
		100,000 t yr^{-1}	200,000 t yr^{-1}	300,000 t yr^{-1}
Costs for discharge and storage using refuse collection vehicles	€ t^{-1}	5.20	4.24	3.77
Additional costs for discharge and storage using the train	€ t^{-1}	3.99	2.66	2.22
Firing system and boiler	€ t^{-1}	36.42	36.42	35.08
Water steam cycle (option 2)	€ t^{-1}	0.36	3.02	3.91
Electrostatic precipitator	€ t^{-1}	5.89	5.89	5.73
NaOH scrubber	€ t^{-1}	11.14	11.14	10.96
Flow injection adsorber	€ t^{-1}	4.18	4.18	4.05
Catalytic flue gas cleaning	€ t^{-1}	3.20	3.20	3.02
Investment costs systems of engineering	€	37,250,000	59,400,000	80,200,000
Construction	€	7,450,000	11,800,000	16,040,000
EMC	€	5,587,500	8,910,000	12,030,000
Other investment costs	€	6,000,000	7,000,000	8,000,000
Specific costs for construction, EMC + others	€ t^{-1}	19.60	14.31	12.38
Personnel costs	€ yr^{-1}	1,700,000	1,800,000	2,000,000
Specific personnel costs	€ t^{-1}	17.00	9.00	6.67
Rated overall costs	**€ t^{-1}**	**106**	**88**	**80**
Estimated overall costs	**€ t^{-1}**	**148**	**123**	**112**

Από την μελέτη του παραπάνω πίνακα προκύπτει η εξής κατανομή του κόστους για μια τέτοια μονάδας

	capacity (tn/yr)		
costs (€/tn)	100.000	200.000	300.000
investment cost	66,56	54,56	48,65
operating cost	45,58	32,97	28,41
electricity cost	2,84	2, 84	2,84

Επιλογή μονάδας 2

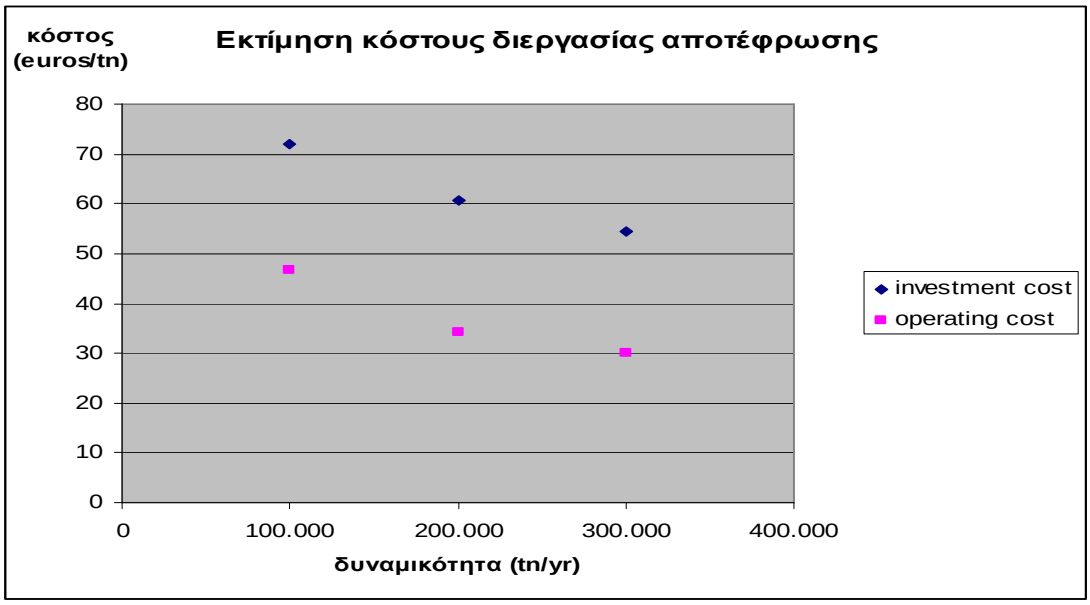
Κόστη για μονάδα αποτέφρωσης που χρησιμοποιεί: Σύστημα εσχαρών, Σύστημα APC (ESP, precipitation, activated coke absorber and catalytic plant) με παραγωγή ενέργειας συναρτήσει της δυναμικότητας.

Πίνακας 26: Σύστημα εσχαρών, Σύστημα APC (ESP, precipitation, activated coke adsorbed and catalytic plant) με παραγωγή ενέργειας [3]

Parameter	Unit	Throughput		
		100,000 t yr^{-1}	200,000 t yr^{-1}	300,000 t yr^{-1}
Costs for discharge and storage using refuse collection vehicles	€ t^{-1}	5.20	4.24	3.77
Additional costs for discharge and storage using the train	€ t^{-1}	3.99	2.66	2.22
Firing system and boiler	€ t^{-1}	36.42	36.42	35.08
Water steam cycle (option 2)	€ t^{-1}	0.36	3.02	3.91
Electrostatic precipitator	€ t^{-1}	5.89	5.89	5.73
Scrubber with precipitation	€ t^{-1}	8.78	8.78	8.37
Activated coke adsorber	€ t^{-1}	4.92	4.92	4.62
Catalytic flue gas cleaning	€ t^{-1}	3.20	3.20	3.02
Investment costs of systems engineering	€	40,500,000	65,300,000	88,200,000
Construction	€	8,100,000	13,060,000	17,640,000
EMC	€	6,075,000	9,795,000	13,230,000
Other investment costs	€	6,000,000	7,000,000	8,000,000
Specific costs for construction, EMC + others	€ t^{-1}	20.77	15.37	13.34
Personnel costs	€ yr^{-1}	1,700,000	1,800,000	2,000,000
Specific personnel costs	€ t^{-1}	17.00	9.00	6.67
Rated overall costs	**€ t^{-1}**	**105.82**	**87.46**	**78.90**
Estimated overall costs	**€ t^{-1}**	**147**	**122**	**110**

Από την μελέτη του παραπάνω πίνακα προκύπτει η εξής κατανομή του κόστους για μια τέτοια μονάδα

	capacity (tn/yr)		
costs (€/tn)	100.000	200.000	300.000
investment cost	72,02	60,63	54,47
operating cost	46,79	34,23	30,14
electricity cost	2,52	2,52	2,52



Εικόνα 23: Εκτίμηση κόστους διεργασίας αποτέφρωσης [3]

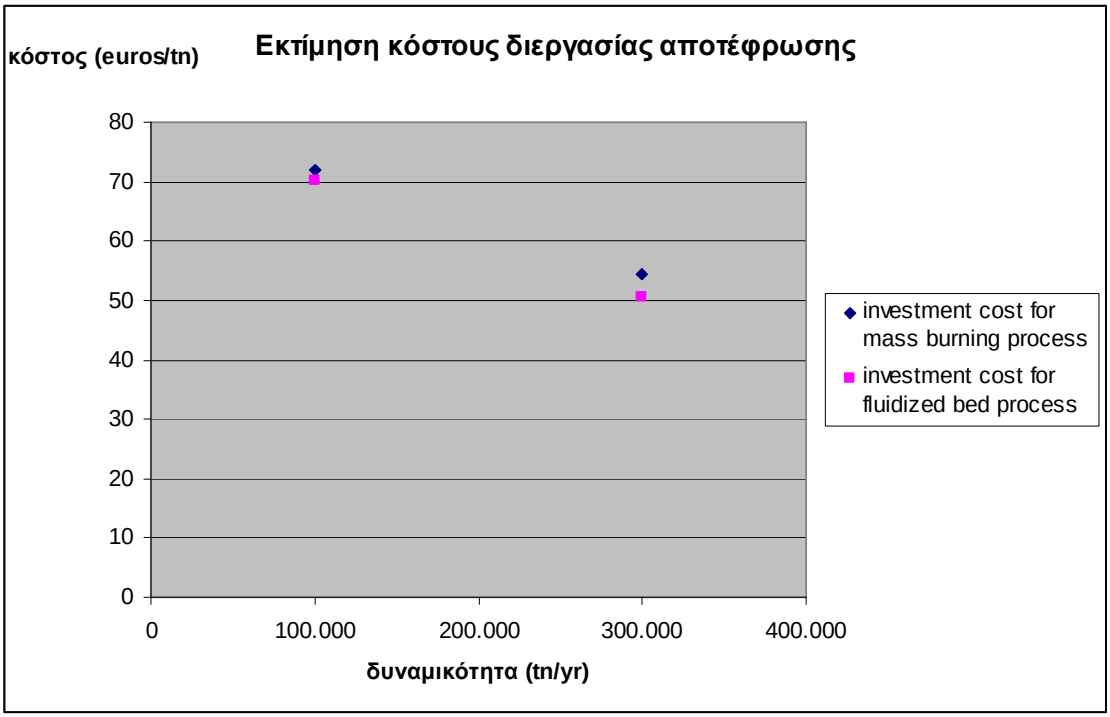
3.4.5 Εκτίμηση Ολικού Κόστους Μονάδας Αποτέφρωσης RDF

Η διαδικασία αποτέφρωσης των απορριμμάτων σε μονάδες που χρησιμοποιούν την τεχνολογία της ρευστοποιημένης κλίνης, διαφέρει ως προς το βαθμό της προ-επεξεργασίας των ΑΣΑ, αλλά και το τύπο του αποτεφρωτή (αποτεφρωτής ρευστοποιημένης κλίνης). Για τον υπολογισμό του κόστους της διεργασίας με ρευστοποιημένη κλίνη, γίνεται η αντιστοιχία στην ανάλογου μεγέθους μονάδα τύπου mass Burning.

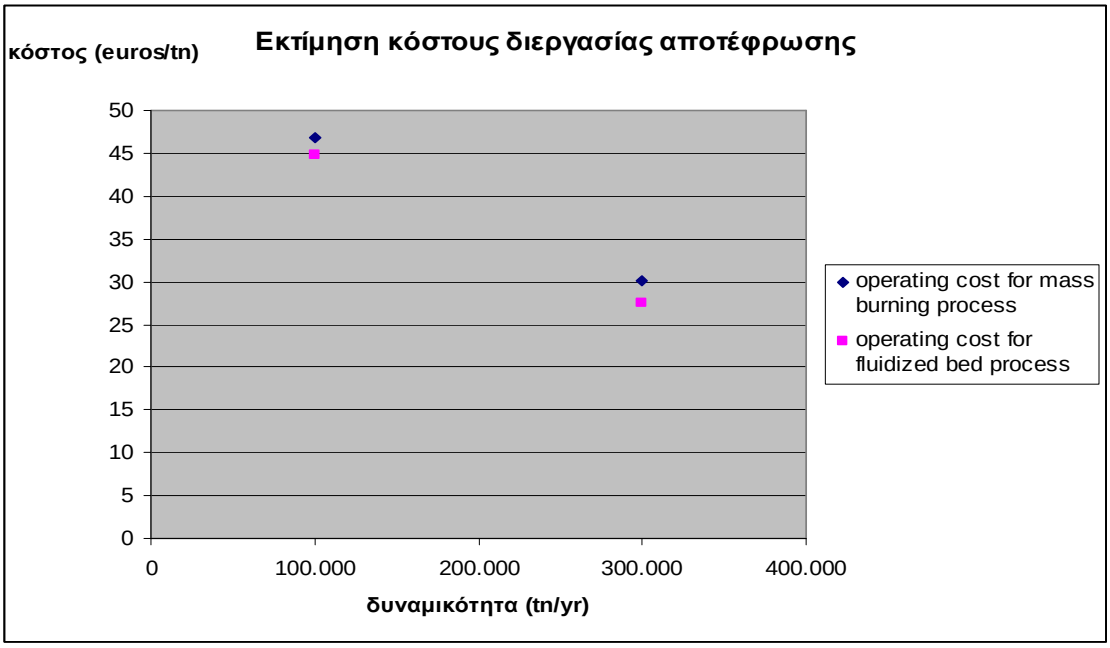
Μια μονάδα αποτέφρωσης mass Burning, με δυναμικότητες επεξεργασίας 100.000 και 300.000 τόνων ανά έτος αντιστοιχεί σε μια μονάδα αποτέφρωσης RDF ρευστοποιημένης κλίνης 70.000 και 200.000 tn ετησίως (πίνακας 27), ενώ το κόστος παραγωγής ενέργειας και το κόστος επεξεργασίας θεωρούνται ίδια.

Πίνακας 27: Κόστος μιας μονάδας αποτέφρωσης RDF

	capacity (tn/yr)		
costs (€/tn)	70.000 (100.000)		200.000 (300.000)
investment cost	70,16		50,63
operating cost	44,73		27,48



Εικόνα 24: Εκτίμηση κόστους επένδυσης διεργασίας αποτέφρωσης RDF σε σύγκριση με μια μονάδα τύπου Mass Burning [3]



Εικόνα 25: Εκτίμηση κόστους λειτουργίας διεργασίας αποτέφρωσης RDF σε σύγκριση με μια μονάδα τύπου Mass Burning [3]

Η σύγκριση των μονάδων αποτέφρωσης σύμμεικτων απορριμμάτων και αυτών που διαχειρίζονται το παραγόμενο RDF σαν καύσιμο υλικό έγκειται στο τμήμα του συστήματος αποτέφρωσης, δηλαδή στο τύπο τεχνολογίας αποτέφρωσης που θα επιλεγεί. Επιπλέον σημαντική διαφορά υπάρχει και στον τομέα της προεπεξεργασίας των απορριμμάτων. Ο βαθμός προ-επεξεργασίας επηρεάζει κατά το κόστος μια μονάδας αποτέφρωσης RDF. Αν και η αποτέφρωση με ρευστοποιημένη κλίνη είναι φθηνότερη μέθοδος σε σχέση με αυτή των κινούμενων εσχαρών, όπως δείχνουν τα στοιχεία του πίνακα 28, για τα κόστη προ-επεξεργασίας, αυξάνουν υπερβολικά το κόστος της αποτέφρωσης.

Πίνακας 28: κόστη προ-επεξεργασίας των απορριμμάτων [8]

Country	Austria	Belgium	Finland	France	Germany	Ireland	United Kingdom
Material				For mixed recyclables excl. glass €183-€229/t		€127/t	€30-66/t excl. glass
Paper	€28/t						
Plastics	€272/t						
Glass	€14/t						
PMD		€193			Light packaging €250/t		
Optical sorting - separation of energy bags or compost bags from residual waste			€8/t				

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ ΑΣΑ

4.1 Εισαγωγή στη Θεωρία Λήψης Αποφάσεων

4.1.1 Βασικές Έννοιες

Η Θεωρία Αποφάσεων (Decision Theory) ασχολείται με το πρόβλημα της λήψης των αποφάσεων. Η Στατιστική Θεωρία Αποφάσεων (Statistical Decision Theory) ασχολείται με την λήψη αποφάσεων, βασισμένη στη στατιστική γνώση που προκύπτει ύστερα από δειγματοληπτική έρευνα και προσδιορίζει ορισμένες αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στο υπό ανάλυση πρόβλημα της λήψης αποφάσεων.

Σημαντικό ρόλο-ιδιαίτερα σε προβλήματα μηχανικού- παίζει η Στατιστική Θεωρία Αποφάσεων του Bays, γιατί χρησιμοποιεί τη ταυτόχρονη χρήση της στατιστικής πληροφορίας και της «ποιοτικής πληροφορίας» για την λήψη αποφάσεων, ενώ συνδυάζει τη στατιστική με το οικονομικό κόστος μέσω της κατασκευής της Συνάρτησης Απώλειας (Loss Function). Ως «ποιοτική πληροφορία», ορίζεται η μη αυστηρά προσδιορισμένη ποσοτική πληροφορία. Τα βασικά στοιχεία της Θεωρίας Λήψης Αποφάσεων είναι α) η εκτίμηση της κατάστασης πραγματικότητας (θ), β) οι πιθανές αποφάσεις (ενέργειες) και γ) η Συνάρτηση Απώλειας που θα προκύψει.

Η παράμετρος θ, η οποία επηρεάζει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων ορίζεται ως η *κατάσταση πραγματικότητας*. Το σύμβολο Θ χρησιμοποιείται για να ορίσει το σύνολο των πιθανών καταστάσεων πραγματικότητας που είναι δυνατές για την παράμετρο θ και καλείται παραμετρικός χώρος. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται καλούνται ενέργειες ή δράσεις. Συγκεκριμένες ενέργειες συμβολίζονται με α ενώ ο το σύνολο των δυνατών ενεργειών που μπορεί να ληφθούν συμβολίζεται με Α. Για μια συγκεκριμένη απόφαση, α, η οποία θα ληφθεί με την αντίστοιχη κατάσταση πραγματικότητας θ, η συνάρτηση απώλειας συμβολίζεται ως $L(A,\Theta)$. Η Συνάρτηση απώλειας $L(\alpha,\theta)$ ορίζεται για όλα τα θ,α που ανήκουν στο διάστημα $\Theta \times A$ Ο όρος «απώλεια», είναι συμβατικός και χρησιμοποιείται κυρίως στη Στατιστική.

4.1.2 Διαδικασία Λήψης Αποφάσεων

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων αποτελείται από 2 βασικά στάδια: α) το στάδιο εκτίμησης της κατάστασης πραγματικότητας και β) το στάδιο λήψης αποφάσεων.

Για την εκτίμηση της κατάστασης της πραγματικότητας ακολουθείται η εξής διαδικασία: Αρχικά απαριθμούνται οι πιθανές καταστάσεις πραγματικότητας θ_K και έπειτα καθορίζονται οι αντίστοιχες προγενέστερες πιθανότητες για οποιαδήποτε πληροφορία που υπάρχει για τις θ_K. Αν υπάρχουν είναι δυνατόν καθορίζουμε τις

δειγματοληπτικές πιθανότητες $P(Z_M|\theta_K)$, οι οποίες αντιπροσωπεύουν οποιαδήποτε γνώση υπάρχει σχετικά με το μηχανισμό των μετρήσεων, ο οποίος παράγει τις μετρήσεις Z_M. Το τέλος της διαδικασίας γίνεται με την εφαρμογή του νόμου του Bayes για την εκτίμηση της μεταγενέστερης πιθανότητας $P(Z_M|\theta_K, \mathrm{I})$. Η εκτίμηση της κατάστασης πραγματικότητας μπορεί να γίνει και με την κατασκευή της υποκειμενικής προγενέστερης πληροφορίας (subjective prior pdf) της θ, η οποία συμβολίζεται ως $\pi(\theta)$.

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων έχει με τη σειρά της 3 βασικά βήματα.

1. Απαριθμούμε όλες τις πιθανές αποφάσεις (ενέργειες), $\mathrm{A_N}$
2. Καθορίζουμε την κατάλληλη συνάρτηση Απώλειας $L(\theta_\mathrm{K}, \mathrm{A_N})$, η οποία εκφράζει τα χαρακτηριστικά του λήπτη αποφάσεων και τι το επιδιώκει ο Λήπτης.
3. Παίρνουμε την απόφαση η οποία ελαχιστοποιεί, με κατάλληλα κριτήρια, ένα μέτρο της αναμενόμενης απώλειας για όλες τις μεταγενέστερες πιθανότητες θ_K

4.2 Εφαρμογή της Θεωρίας Λήψης Αποφάσεων του Bayes για Ρύπανση από Μονάδες Αποτέφρωσης ΑΣΑ.

4.2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια εκτίμηση για τις αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν από τους διαχειριστές μιας μονάδας αποτέφρωσης ΑΣΑ σε ενδεχόμενο ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η ανάλυση μπορεί να γενικευτεί και για την περίπτωση άλλων μονάδων που ενδέχεται να αποτελέσουν πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης ή για μονάδες καύσης με διαφορετικά απόβλητα ως καύσιμα από τα ΑΣΑ. Η χρήση της θεωρίας του Bayes που θα χρησιμοποιηθεί, αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στην διαδικασία λήψης αποφάσεων. Τα επιμέρους σημεία που θα αναπτυχθούν αναφέρονται στην: πιο σύνθετη ανάλυση της αβεβαιότητας σε επιστημονικά-περιβαλλοντικά προβλήματα, η επίδραση της συνάρτησης απώλειας στη λήψη αποφάσεων, η οικονομική αξία της πληροφορίας σε σχέση με το υπό μελέτη πρόβλημα, ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) των σχεδιαστικών και κατασκευαστικών επιλογών σε σχέση με τα επιστημονικά και οικονομικά μοντέλα προσομοίωσης της πραγματικότητας [28].

4.2.2 Ατμοσφαιρική Ρύπανση από Μονάδες Αποτέφρωσης ΑΣΑ

Εξετάζουμε το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που λαμβάνει χώρα σε μια περιοχή εξαιτίας των εκπομπών μιας μονάδας αποτέφρωσης ΑΣΑ (ή RDF, νοσοκομειακά απόβλητα, κλπ.). Ας θεωρήσουμε ότι οι εκπομπές της μονάδας καταγράφονται επί καθημερινής βάσης και έχουμε στοιχεία για το ποιοι ενδεχόμενοι ατμοσφαιρικοί ρύποι υπερβαίνουν τα ανώτατα όρια της κοινοτικής νομοθεσίας. Το ημερήσιο πρόστιμο το οποίο επιβάλλεται είναι *B*. Ας συμβολίσουμε με *N*, το συνολικό αριθμό των ημερών κατά τις οποίες ένας οργανισμός ελέγχου συλλέγει στοιχεία για να εξετάσει κατά πόσο η συγκεκριμένη μονάδα προκαλεί ή όχι ατμοσφαιρική ρύπανση (συνήθως ετήσιες επιθεωρήσεις . Θεωρούμε ότι κάθε ημέρα αντιστοιχεί σε ένα γεγονός παράβασης.

Μια μονάδα αποτέφρωσης αποβλήτων η οποία εκπέμπει ατμοσφαιρικούς ρύπους, δεν είναι απαραίτητο ότι ακολουθεί εσκεμμένα πολιτική περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, μπορεί να λειτουργούσε επί σειρά ετών χωρίς να παραβιάζει το νομοθετικό πλαίσιο της χώρας στην οποία είναι εγκατεστημένη. Η είσοδος της χώρας στην ευρωπαϊκή ένωση -ή η θέσπιση ενός αυστηρού νομοθετικού πλαισίου από την ΕΕ για τις εκπομπές (οδηγία 2000/76/EC) στη περίπτωση που η χώρα ήταν ήδη μέλος της-μπορεί να καταστήσει προβληματική την αποτελεσματικότητα των συστημάτων απορρύπανσης, τα οποία χρησιμοποιούνταν από την μονάδα (Η νέα νομοθεσία θέτει αυστηρότερα όρια σε σχέση με αυτά που ίσχυαν).

Υπάρχει επομένως το ενδεχόμενο να αποφασισθεί η επιβολή προστίμων στους διαχειριστές της μονάδας. Οι διαχειριστές αντιμετωπίζουν το δίλλημα κατά πόσον να συνεχίσουν τη λειτουργία της μονάδας ως έχει και να διακινδυνεύσουν με την επιβολή προστίμων (ενδεχόμενη δυσφήμηση των προϊόντων και πτώση της τιμής της μετοχής της εταιρίας) ή να εγκαταστήσουν ένα νέο σύστημα ελέγχου μεγαλύτερης απόδοσης στη κατακράτηση των ρύπων.

Η νομοθεσία χρησιμοποιεί διάφορα μοντέλα για την επιβολή προστίμων. Μπορεί να προβλέπει ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση επί ένα *Y* ημερών εκ του χρονικού διαστήματος των *N*, όπου γίνονται οι έλεγχοι καταλήγει σε ένα συνολικό πρόστιμο BY, αλλά και σε διακοπή της άδειας λειτουργίας της μονάδας. Αξίζει να τονιστεί ότι η επιβολή προστίμων ανά ημέρα ρύπανσης, εφαρμόζεται για περιστατικά ρύπανσης από μονάδες που λειτουργούν στις ΗΠΑ (US EPA). Στην Ευρώπη δεν υπάρχει μια αντίστοιχη επιβολή μέτρων. Είναι χαρακτηριστικό το παράδειγμα στην Ελλάδα με τον αποτεφρωτήρα νοσοκομειακών αποβλήτων στα Άνω Λιόσια, το πρόστιμο που

επιβλήθηκε στον φορέα διαχείρισης της μονάδας (ΕΣΚΑΝΑ) ήταν για μια ολόκληρη περίοδο λειτουργίας της μονάδας και όχι για κάθε ημέρα λειτουργίας όπου είχαμε ένα γεγονός ρύπανσης (Βέβαια σε μια προσπάθεια να γίνει κάποια ανάλυση μπορούμε να ανάγουμε το ποσό του προστίμου σε ημερήσια βάση, κάνοντας μια απλή διαίρεση με το συνολικό αριθμό των ημερών όπου παρατηρήθηκε ρύπανση).
Συνοπτικά στο πεδίο της ανάλυσης που θα ακολουθηθεί, οι αποφάσεις που μπορούν να λάβουν οι διαχειριστές μιας μονάδας αποτέφρωσης είναι οι εξής:

Απόφαση $A(0)$ **: Να συνεχίσει ως έχει (στοιχειώδες σύστημα απορρύπανσης) και να μην πάρει επιπλέον μέτρα.**

Απόφαση $A(1)$ **: Να εγκαταστήσει καινούριο και πιο ασφαλές σύστημα APC**

Το κόστος των συσκευών αυτών αναλύεται στο κεφάλαιο για το κόστος των συστημάτων επεξεργασίας των απαερίων. Στη συνέχεια μπορούμε να συμβολίσουμε με *C*, τη διαφορά του ημερήσιου κόστους, μεταξύ των συνδυασμών συστημάτων απορρύπανσης των 2 παραπάνω αποφάσεων [28].

4.2.3 Μαθηματική Ανάλυση για Γεγονότα Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης

Η παράβαση των ορίων εκπομπών ή μη για κάθε ημέρα j $(j = 1, 2, ...N)$ λειτουργίας μιας μονάδας αποτέφρωσης ΑΣΑ, περιγράφεται μαθηματικά από τη τυχαία μεταβλητή Bernoulli, X :

$$X(j) = \begin{cases} 0, & \mu\eta \quad \pi\alpha\rho\acute{\alpha}\beta\alpha\sigma\eta \\ 1, & \pi\alpha\rho\acute{\alpha}\beta\alpha\sigma\eta \end{cases} \tag{4.1}$$

Όπου η πιθανότητα να υπάρξει παράβαση μια οποιαδήποτε ημέρα είναι $P(X = 1) = \theta$ και η πιθανότητα να μην υπάρξει παράβαση, είναι $P(X = 0) = 1 - \theta$. Ο συνολικός αριθμός των ημερών *Y* όπου έχουμε παράβαση των ορίων δίνεται από την σχέση:

$$Y = \sum_{j=1}^{N} (X(j) = 0) \tag{4.2}$$

Η τυχαία μεταβλητή $Y = \{y \quad \varepsilon\pi\iota\tau\upsilon\chi\acute{\iota}\varepsilon\varsigma \quad \sigma\varepsilon \quad \mathrm{N} \quad \eta\mu\acute{\varepsilon}\rho\varepsilon\varsigma\}$, όπου με τον όρο «επιτυχία» εννοείται η εμφάνιση ρύπανσης, περιγράφεται μαθηματικά από την Διωνυμική κατανομή $\mathrm{B}(\mathrm{N},\theta)$:

$$f_Y(y) = \binom{N}{y}\theta^y(1-\theta)^{\mathrm{N}-y}, y = 0,1,2,..,N \tag{4.3}$$

$$\binom{\mathrm{N}}{y} = \frac{N!}{y!(N-y)!}$$

Η αναμενόμενη τιμή και η διασπορά της διωνυμικής κατανομής δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$$\begin{aligned} E[Y] &= N\theta \\ Var(Y) &= N\theta(1-\theta) \end{aligned} \tag{4.4}$$

Παρατήρηση:

Η διωνυμική κατανομή αναπτύχθηκε με την προϋπόθεση ότι η μεταβλητή Y είναι άθροισμα N ανεξάρτητων μεταβλητών Bernoulli. Η παράμετρος θ, είναι άγνωστη και πρέπει να εκτιμηθεί.

Η συνάρτηση απώλειας εκφράζεται ως :

$$L(A(0),Y) = \begin{cases} BY, \quad \acute{o}\tau\alpha\nu \quad \mathrm{A} = \mathrm{A}(0) \\ \\ CN, \quad \acute{o}\tau\alpha\nu \quad \mathrm{A} = \mathrm{A}(1) \end{cases} \tag{4.5}$$

Με την απαρίθμηση των αποφάσεων $A(0)$ και $A(1)$ την έκφραση της συνάρτησης απώλειας, ολοκληρώνονται τα 2 πρώτα στάδια για την διαδικασία της λήψης αποφάσεων. Στη συνέχεια θα γίνει περεταίρω ανάλυση για ποια απόφαση πρέπει να ληφθεί ώστε να ελαχιστοποιείται η αναμενόμενη απώλεια για τους διαχειριστές της μονάδας αποτέφρωσης. Η συνάρτηση επικινδυνότητας και η επικινδυνότητας κατά τον Bayes θα μελετηθούν παρακάτω [28].

4.2.4 Συνάρτηση Επικινδυνότητας

Η αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης απώλειας, σε σχέση με την τυχαία μεταβλητή Y, αναφέρεται στην κλασική θεωρία λήψης αποφάσεων ως Συνάρτηση επικινδυνότητας (Risk Function) ή Συνάρτηση επιδίωξης (Goal Function).

Για την απόφαση $A(0)$ η συνάρτηση επικινδυνότητας $G(A(0),\theta)$ δίνεται από τη σχέση:

$$G(A(0),\theta) = \sum_{Y=0}^{N} L(\mathrm{A}(0),\mathrm{Y}) \cdot f_{\mathrm{Y}}(Y) = \sum_{Y=0}^{N} \mathrm{BY} \cdot \binom{N}{\theta} \theta^{Y} (1-\theta)^{\mathrm{N}-Y}$$

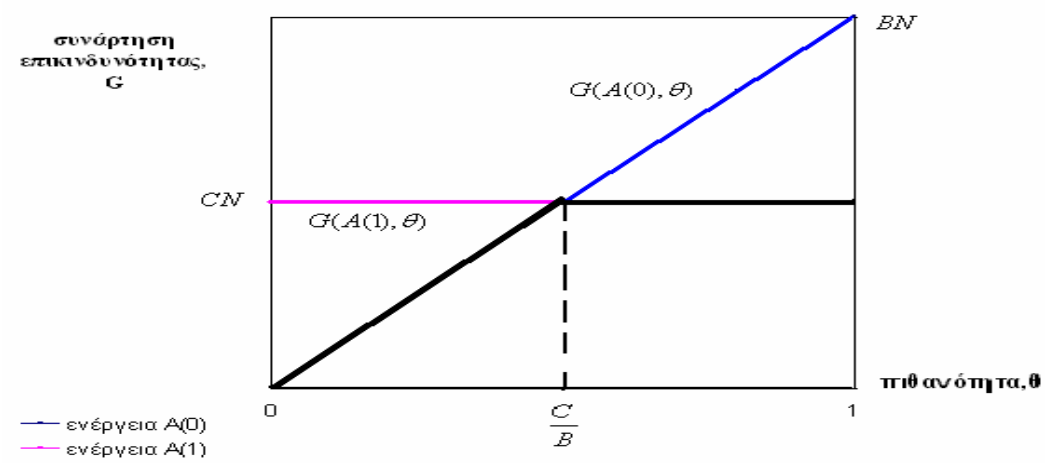
$$\Rightarrow G(A(0),\theta) = E\left[L(A(0),Y\right] = E\left[BY\right] = B \cdot E\left[Y\right] = BN\theta \tag{4.6}$$

Για την απόφαση $A(1)$ η συνάρτηση επικινδυνότητας $G(A(1),\theta)$ δίνεται από τη σχέση:

$$G(A(1),\theta) = \mathrm{E}[CN] = CN \tag{4.7}$$

Οι εξισώσεις (4.6) και (4.7) δείχνουν τι απώλεια υπάρχει, κατά μέσο όρο, εάν ληφθούν οι αποφάσεις $A(0)$ ή $A(1)$ αντίστοιχα.

Η κλασική ανάλυση κόστους-οφέλους υπολογίζει ποια απόφαση ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση απώλειας. Αυτό μπορεί να προκύψει εύκολα με τη γραφική απεικόνιση των δυο εκφράσεων $G(A(0),\theta)$ και $G(A(1),\theta)$. Η έκφραση της συνάρτησης απώλειας για την απόφαση-ενέργεια $A(0)$ δίνεται στο δεξιό κατακόρυφο άξονα, ενώ αυτή για την $A(1)$ στον αριστερό άξονα, αντίστοιχα. Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει την πιθανότητα θ.



Εικόνα 26: Γραφική παράσταση της *G(A,θ)*

Από την ερμηνεία του γραφήματος, έχουμε ότι η τιμή της πιθανότητας, για την οποία είναι αδιάφορο-από άποψη κόστους- ποια από τις 2 ενέργειες θα προτιμηθεί, δίνεται από τον λόγο $\lambda = C/B$.

- Εάν για την πιθανότητα ρύπανσης, θ ισχύει: $\theta < \lambda \Rightarrow$ Βέλτιστη ενέργεια είναι η $A(0)$
- Εάν για την πιθανότητα ρύπανσης, θ ισχύει: $\theta > \lambda \Rightarrow$ Βέλτιστη ενέργεια είναι η $A(1)$.

Αν γνωρίζουμε την άγνωστη παράμετρο θ θα μπορούσαμε εύκολα να επιλέξουμε την βέλτιστη απόφαση-ενέργεια [28].

4.2.5 Ανάλυση Bayes

Η ανάπτυξη των εξισώσεων (6) και (7) αποτελεί την ολοκλήρωση της κλαστικής στατιστικής ανάλυσης κόστους-οφέλους. Η ανάλυση του Bayes αναγνωρίζει ότι η πιθανότητα θ δεν είναι γνωστή με βεβαιότητα και επομένως πρέπει να θεωρηθεί ως τυχαία μεταβλητή. Το πρόβλημα τότε συνίσταται στην εκτίμηση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (probability density function), της θ.

Η ανάλυση του Bayes αναφέρεται στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα, τα οποία να αφορούν εκπομπές ρύπων από τη συγκεκριμένη μονάδα αποτέφρωσης ΑΣΑ, της οποίας τη λειτουργία του συστήματος απορρύπανσης μελετάμε, επομένως η πιθανότητα ρύπανσης δεν μπορεί να εκτιμηθεί σε αυτή τη φάση. Το παράδειγμα μιας υπό μελέτη μονάδας αποτέφρωσης ΑΣΑ (ή άλλων αποβλήτων), εμπεριέχει το δίλημμα για την επιλογή του συστήματος επεξεργασίας των απαερίων.

Η μονάδα δεν έχει λειτουργήσει ακόμα ώστε η να γίνει η εκτίμηση της θ με βάση υπάρχοντα δείγματα της μονάδας. Αντίστοιχα για μια μονάδα, η οποία είναι ήδη σε λειτουργία μπορεί μεν να υπάρχουν δείγματα εκπομπών από προγενέστερους ελέγχους. Υπάρχει όμως το ενδεχόμενο η περιοχή στην οποία είναι εγκατεστημένη η μονάδα να είναι και σημείο λειτουργίας και άλλων βιομηχανικών δραστηριοτήτων και επομένως οι μετρήσεις να μην είναι μόνο εξαιτίας της λειτουργίας της μονάδας, αλλά να αποτελούν συνιστώσα μιας γενικής βιομηχανικής δραστηριότητας [28].

Γενικότερα υπάρχει ένα εύρος τεχνικών έργων, για τα οποία τουλάχιστον σε κάποια φάση της μελέτης τους δεν υπάρχουν δεδομένα για την εκτίμηση της πιθανότητας θ. Υπάρχει όμως η μαλακή πληροφορία (soft information), η οποία στηρίζεται στην εμπειρία από άλλες παρόμοιες δραστηριότητες άλλων μονάδων του ομίλου ή δεδομένα από άλλες παρόμοιες μονάδες που λειτουργούν σε άλλες χώρες. Για την περίπτωση των

μονάδων αποτέφρωσης ΑΣΑ που λειτουργούν στην Ευρώπη υπάρχουν τα εξής δεδομένα:

- Το 23.94 % των γραμμών αποτέφρωσης έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για το HCl (απόδοση 76.06%).
- Το 13.94% των γραμμών αποτέφρωσης έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για το SO_2,(απόδοση 86.06%).
- Το 8.33 % των γραμμών αποτέφρωσης έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για την τέφρα,(απόδοση 91.67%).
- Το 52.8 % των γραμμών αποτέφρωσης έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για το NO_x,(απόδοση 47.20%).
- Το 21 % των γραμμών αποτέφρωσης έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για τα PCDD/Fs,(απόδοση 79%).
- Το 4.25 % των γραμμών αποτέφρωσης έχει ξεπεράσει τα απαιτούμενα από την νομοθεσία όρια για τον υδράργυρο,(απόδοση 95.75%) [14].

Θεωρούμε σε ένα σύστημα APC, το οποίο είναι εγκατεστημένο για την επεξεργασία των ρύπων, απομακρύνει ξεχωριστά κάθε χημική ουσία, δηλαδή τα στατιστικά γεγονότα που προέκυψαν από την έρευνα και αναφέρονται για κάθε ρύπο είναι μεταξύ τους ανεξάρτητα. Μια μονάδα όταν λειτουργεί απόλυτα εναρμονισμένη με τα όρια της κοινοτικής νομοθεσίας, πρέπει να μην επιτρέπει καμία συγκέντρωση από τους αέριους ρύπους να υπερβαίνει τα όρια. Η πιθανότητα μια μονάδα να κρατάει τα όρια σε όλους τους ρύπους μαθηματικά μεταφράζεται ως εξής: η πιθανότητα να κρατήσει τα όρια για το HCl ΚΑΙ η πιθανότητα να κρατήσει τα όρια για το SO_2 ΚΑΙ η πιθανότητα να κρατήσει τα όρια για την τέφρα ΚΑΙ η πιθανότητα να κρατήσει τα όρια για τα NOx ΚΑΙ πιθανότητα να κρατήσει τα όρια για τις διοξίνες ΚΑΙ η πιθανότητα να κρατήσει τα όρια για τον Hg. Η πιθανότητα της απόδοσης αυτής εκφράζεται ως εξής [28,29]:

$$P_{eff} = P(HCl \cap SO_2 \cap NO_x \cap Hg \cap PCDDF \cap f.ash) \tag{4.8}$$

Πιο αναλυτικά η (8) γίνεται για στατιστικά ανεξάρτητα γεγονότα ως εξής:

$$P_{ef} = P_{ef}(HCl)P_{ef}(SO_2)P_{ef}(NO_x)P_{ef}(Hg)P_{ef}(diox)P_{ef}(f.ash) \tag{4.9}$$

Με την εφαρμογή των τιμών των αποδόσεων για τους διάφορους ρύπους στην (4.9) προκύπτει ότι μόνο το 21.47% των μονάδων αποτέφρωσης ΑΣΑ κρατάνε όλους τους ρύπους σε επιτρεπτά επίπεδα. Αντίστοιχα το 79.53 % των μονάδων αποτέφρωσης ΑΣΑ έχουν παρουσιάσει γεγονότα παραβίασης της νομοθεσίας.

Συνεχίζοντας της ανάλυση προχωράμε στην κατασκευή της υποκειμενικής προγενέστερης πληροφορίας (subjective prior pdf) της θ, η οποία συμβολίζεται ως $\pi(\theta)$.

Για την κατασκευή της προγενέστερης πληροφορίας θα χρησιμοποιήσουμε την κατανομή Βήτα. Η κατανομή Βήτα έχει 2 παραμέτρους,t και r, οι οποίες της επιτρέπουν να λάβει πολύ διαφορετικές μορφές και την καθιστούν πολύ ευέλικτη στην προσομοίωση διαφορετικών δεδομένων. Η μαθηματική έκφραση της κατανομής Βήτα είναι:

$$\mathrm{B}(t,r;\theta) = \frac{(t-1)!}{(r-1)!(t-r-1)!}\theta^{r-1}(1-\theta)^{t-r-1} \tag{4.10}$$

Η μέση τιμή και η διασπορά της δίνονται ως εξής:

$$m_\theta = \frac{r}{t}$$

$$\sigma^2_\theta = \frac{r(t-r)}{t^2(t+1)} \tag{4.11}$$

- ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΓΕΝΕΣΤΕΡΗΣ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΕΣ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ

Από τη χρήση των δεδομένων για τις παραβάσεις των μονάδων αποτέφρωσης [14] με την εφαρμογή της σχέσης (4.9) προκύπτει ότι το 21.47% των μονάδων αποτέφρωσης έχουν σημειώσει παραβιάσεις των ανώτατων ορίων εκπομπών που απαιτεί η κοινοτική οδηγία. Αυτό σημαίνει ότι σχεδόν 4 στις 5 μονάδες αποτέφρωσης ΑΣΑ, έχουν παραβιάσει τα όρια.

Έχουμε $r = 4$ και $t=5$, οπότε η σχέση (4.10) θα γίνει ως εξής:

$$B(5,4;\theta) = \frac{(5-1)!}{(4-1)!(5-4-1)!}\theta^{4-1}(1-\theta)^{5-4-1}$$

$$\Rightarrow \quad \pi(\theta) = B(5,4;\theta) = \frac{4!}{3!0!}\theta^{3}(1-\theta)^{0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad \pi(\theta) = \frac{4!}{3!0!}\theta^{3} = 4\theta^{3}$$

(4.12)

- ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ BAYES ΓΙΑ ΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΑ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ ΑΣΑ.

Η επικινδυνότητα του Bayes (Bayes Risk), *R*, ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης επικινδυνότητας ως προς την άγνωστη παράμετρο *θ*.

$$R(A) = E^{\pi}[G(A,\theta)] = \int_0^1 G(A,\theta)\pi(\theta)d\theta \tag{4.13}$$

Η έκφραση $E^{\pi}[G(A,\theta)]$ συμβολίζει την αναμενόμενη τιμή της συνάρτησης επικινδυνότητας, και το σύμβολο *π* δε συμβολίζει κάποιον εκθέτη, αλλά υποδεικνύει ότι η σ.π.π. η οποία πρέπει να χρησιμοποιηθεί είναι η προγενέστερη κατανομή *π*.

Η συνάρτηση επικινδυνότητας που προκύπτει για την $A(0)$ είναι :

$$R(A(0)) = E^{\pi}[G(A(0),\theta)] = \int_0^1 G(A(0),\theta)\pi(\theta)d\theta$$

$$\Leftrightarrow \quad R(A(0)) \overset{(6),(12)}{=} \int_0^1 BN\,\theta\, 4\theta^{3} d\theta = \frac{4}{5}BN \tag{4.14}$$

Η συνάρτηση επικινδυνότητας που προκύπτει για την $A(1)$ είναι :

$$R(A(1)) = E^{\pi}[G(A(1),\theta)] = \int_0^1 G(A(1),\theta)\pi(\theta)d\theta$$

$$\Leftrightarrow \quad R(A(1)) \overset{(7),(12)}{=} \int_0^1 CN\, 4\theta^{3} d\theta = CN \tag{4.15}$$

Η βέλτιστη απόφαση του Bayes (optimal Bayes decision) λαμβάνεται για την ενέργεια, η οποία ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση επικινδυνότητας του Bayes.

Το ουδέτερο σημείο, όπου δεν υπάρχει προτίμηση μεταξύ των ενεργειών $A(0)$ και $A(1)$ είναι το σημείο όπου ισχύει:

$$R(A(0)) = R(A(1)) \tag{4.16α}$$

$$R(A(0)) = R(A(1)) \Leftrightarrow \frac{4}{5}BN = CN \Leftrightarrow C = \frac{4}{5}B \tag{4.16β}$$

Όταν ισχύει :

$$R(A(0)) > R(A(1)) \Leftrightarrow C < \frac{4}{5}B \Rightarrow A(1) \quad \eta \quad \beta\acute{\varepsilon}\lambda\tau\iota\sigma\tau\eta \quad \alpha\pi\acute{o}\varphi\alpha\sigma\eta$$

Όταν ισχύει:

$$R(A(0)) < R(A(1)) \Leftrightarrow C > \frac{4}{5}B \Rightarrow A(0) \quad \eta \quad \beta\acute{\varepsilon}\lambda\tau\iota\sigma\tau\eta \quad \alpha\pi\acute{o}\varphi\alpha\sigma\eta$$

Υπενθυμίζουμε ότι το B είναι το πρόστιμο το οποίο επιβάλλεται για κάθε ημέρα παραβίασης της νομοθεσίας για τα ανώτατα όρια εκπομπών της μονάδας αποτέφρωσης ΑΣΑ και C είναι το ημερήσιο κόστος που προκύπτει από την διαφορά κόστους των 2 αποφάσεων ($C=C_{Advanced\ APC}-C_{Basic\ APC}$). Η συνθήκη C<0.8B επομένως σημαίνει ότι , όταν τα 4/5 του ποσού του ημερήσιου προστίμου υπερβεί το ημερήσιο κόστος του νέου συστήματος APC, τότε η εγκατάσταση του είναι η πιο συμφέρουσα απόφαση.

Για την λήψη της τελικής απόφασης έγινε η παραδοχή ότι το ποσό του προστίμου παραμένει στην ίδια τιμή ανεξάρτητη από τον αριθμό των παραβάσεων Y οι οποίες παρουσιάζονται σε N ημέρες δειγματοληψίας.

- ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ BAYES ΓΙΑ ΤΗ ΡΥΠΑΝΣΗ ΑΠΟ ΜΟΝΑΔΑ ΑΠΟΤΕΦΡΩΣΗΣ ΑΣΑ ΕΤΗΣΙΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑΣ 100.000 tn.

Σύμφωνα με την EPA file:///G:/EPA-penalties.html, το πρόστιμο για μια μονάδα αποτέφρωσης, εάν Αυτή έχει επαλειμμένα παραβιάσει τα όρια εκπομπών, οι διαχειριστές κινδυνεύουν με πρόστιμο 1.000-10.000$ (περίπου 7000 €), για κάθε μέρα παράβασης. Δηλαδή B^*=7000€

Έστω μια μονάδα η οποία ήδη βρίσκεται σε φάση λειτουργίας ή μελετάται η κατασκευή της. Οι διαχειριστές πρέπει να κληθούν και στις 2 περιπτώσεις να επιλέξουν ένα συνδυασμό συστήματος APC για την επεξεργασία των εκπομπών της μονάδας. Είναι γνωστό ένα μεγαλύτερο μέρος της επένδυσης για την κατασκευή της μονάδας, θα δοθεί για την αγορά του συστήματος.

Έτσι θα κληθούν στο δίλημμα να αγοράσουν (διατηρήσουν το υπάρχον) ένα φθηνό-συμβατικό συνδυασμό με τον ενδεχόμενο κίνδυνο να υποπέσουν σε παραβάσεις και να πληρώσουν τα αντίστοιχα πρόστιμα (απόφαση A(0)) ή να επενδύσουν σε καλύτερης απόδοσης συστήματα ελαχιστοποιώντας το κίνδυνο παράβασης, αλλά επενδύοντας ακριβά στην αγορά του APC συστήματος (απόφαση A(1)).

Έστω ότι η ετήσια δυναμικότητα της μονάδας είναι η θερμική επεξεργασία 100.000 tn ετησίως. Τα πιθανά συστήματα επεξεργασίας των ρύπων που έχουν να επιλέξουν είναι αυτά του πίνακα 11. Το καλύτερο σε απόδοση σύστημα (81.83%) κοστίζει 26.63 *€/tn* απορρίμματος, ενώ το σύστημα με τη μικρότερη θεωρητική απόδοση (68.85%) κοστίζει 19.97 *€/tn* απορρίμματος. Η διαφορά κόστους των 2 συστημάτων είναι C=1824€ ανά ημέρα λειτουργίας.

Λαμβάνοντας τώρα τη συνθήκη που προκύπτει από την σχέση (4.16β), ισχύει ότι C=1824€ είναι μικρότερο από το 80% του ημερήσιου προστίμου B(=5600). Άρα η βέλτιστη απόφαση για την εταιρία διαχείρισης είναι να αγοράσει εξελιγμένα φίλτρα (A(1)). Αν ληφθεί υπόψη το κατώτερο πρόστιμο δηλαδή 1000$ (B^*=700€), παρατηρούμε ότι το ημερήσιο κόστος της διαφοράς αγοράς ενός εξελιγμένου συστήματος απορρύπανσης είναι και μεγαλύτερο από το ημερήσιο πρόστιμο και άρα η βέλτιστη απόφαση είναι η A(0).

4.3 Ανάλυση Bayes για κλιμακωτά αυξανόμενη συνάρτηση απωλείας

Η συνάρτηση απωλείας δεν είναι κατ'ανάγκη γραμμικής μορφής. Η επιλογή μιας μη γραμμικής ή γραμμικής μορφής συνάρτησης απωλείας, με αλλαγή κλίσης κατά τμήματα, επιλέγονται συχνά.

Στο παράδειγμα του προβλήματος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης το οποίο εξετάζουμε, η επιλογή μιας γραμμικής συνάρτησης απωλείας, σημαίνει ότι εάν οι παραβάσεις αυξηθούν, για παράδειγμα, από 3 σε 8 η μεταβολή στο πρόστιμο θα είναι η ίδια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μη δημιουργείται κίνητρο για τη μείωση του ρυθμού των περιστατικών ρύπανσης. Όπως θα έπρεπε να γίνει για κάποια μονάδα η οποία αρχίζει να ξεπερνάει έναν οριακό αριθμό περιστατικών, τα οποία θεωρούνται ότι εμπίπτουν στην αναμενόμενη από τη δραστηριότητα ρύπανση, και ενός αριθμού ο οποίος δεν δικαιολογείται εάν είχαν ληφθεί επαρκή μέτρα, με βάση τη τεχνολογία.

Ας αναλύσουμε λοιπόν τη κλιμακωτή-γραμμική συνάρτηση απωλείας. Η κλιμακωτή συνάρτηση απωλείας της σχέσης (4.5) όταν η απόφαση είναι η A(0) εκφράζεται ως εξής:

$$L(A(0),Y)=\begin{cases} BY, & 0\le Y\le n_1 \\ 2BY, & n_1<Y\le n_2 \\ M, & Y>n_2 \end{cases} \tag{4.17}$$

$$G(A(0),\theta)=\mathrm{E}[L(A(0),Y)]=\sum_{Y=0}^{N}L(A(0),Y)\cdot f(Y) \tag{4.18}$$

Από τις σχέσεις (4.17) και (4.18) προκύπτει ότι:

$$G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{N}L(A(0),Y)\cdot f(Y)=\sum_{Y=0}^{n_1}BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}2BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_2+1}^{N}M\cdot f(Y) \tag{4.19}$$

Η σχέση (4.19) αναλύεται ως εξής:

$$G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{N}L(A(0),Y)\cdot f(Y)=\sum_{Y=0}^{n_1}BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}2BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_2+1}^{N}M\cdot f(Y)$$

$$\Rightarrow G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{n_1}(BY-M)\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}(2BY-M)\cdot f(Y)+M \tag{4.20}$$

Αν υποθέσουμε ότι το ημερήσιο πρόστιμο θα είναι ίσο με Β για τις πρώτες 2 ημέρες ρύπανσης ($n_1=2$), διπλασιάζεται για τις επόμενες 2 ημέρες ($n_2=4$) και για οποιαδήποτε ημέρα επιπλέον το πρόστιμο που επιβάλλεται είναι αρκετά υψηλό και ίσο με Μ, τότε η συνάρτηση επιδίωξης, χρησιμοποιώντας την (4.3), θα γίνει:

$$G(A(0),\theta)=-M(1-\theta)^{\mathrm{N}}+(\mathrm{B}-\mathrm{M})\theta\cdot\mathrm{N}(1-\theta)^{\mathrm{N}-1}+\frac{(2\mathrm{B}-\mathrm{M})}{2}\theta^2\cdot\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(1-\theta)^{\mathrm{N}-2}$$
$$+\frac{(6\mathrm{B}-\mathrm{M})}{6}\theta^3\cdot\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}+\frac{(8\mathrm{B}-\mathrm{M})}{24}\theta^4\cdot\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}$$
$$+M \tag{4.21}$$

Μπορούμε να κάνουμε (για λόγους ευκολίας των πράξεων) τις εξής αντικαταστάσεις στην (4.21):

$$\begin{aligned}
-(\mathrm{B}-\mathrm{M})&=m_1\\
-\frac{(2\mathrm{B}-\mathrm{M})}{2}&=m_2\\
-\frac{(6\mathrm{B}-\mathrm{M})}{6}&=m_3\\
-\frac{(8\mathrm{B}-\mathrm{M})}{24}&=m_4
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Η (4.22) γίνεται τώρα:

$$G(A(0),\theta) = -M(1-\theta)^{\mathrm{N}} - m_1\theta\cdot\mathrm{N}(1-\theta)^{\mathrm{N}-1} - m_2\theta^2\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(1-\theta)^{\mathrm{N}-2}$$
$$- m_3\theta^3\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3} - m_4\theta^4\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}$$
$$+ M$$

(4.23)

Η συνάρτηση επικινδυνότητας (4.14) θα γίνει:

$$R(A(0)) = -\int_0^1 M(1-\theta)^{\mathrm{N}}\cdot 4\theta^3 d\theta - \int_0^1 m_1\mathrm{N}(1-\theta)^{\mathrm{N}-1}\cdot 4\theta^4 d\theta - \int_0^1 m_2\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(1-\theta)^{\mathrm{N}-2}4\theta^5 d\theta$$

$$-\int_0^1 m_3\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}4\theta^6 d\theta - \int_0^1 m_4\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}4\theta^7 d\theta + \int_0^1 \mathrm{M}4\theta^3 d\theta$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -\left(\frac{\mathrm{M}+4m_1+20m_2+120m_3+840m_4}{210}\right)\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}\theta^7 d\theta + \mathrm{M}$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -4(\mathrm{M}+4m_1+20m_2+120m_3+840m_4)\int_0^1 (1-\theta)^{\mathrm{N}}\theta^3 d\theta + \mathrm{M}$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -12(\mathrm{M}+4m_1+20m_2+120m_3+840m_4)\left[\frac{1}{(N+1)(N+4)} - \frac{1}{(N+2)(N+3)}\right] + \mathrm{M}$$

(4.24)

Ξέρουμε ότι το N είναι το άθροισμα των ημερήσιων μετρήσεων ενός έτους ($N=365$) άρα $\left[\frac{1}{(N+1)(N+4)} - \frac{1}{(N+2)(N+3)}\right] = 0 \overset{(4.24)}{\Rightarrow} R(A(0)) = M$.

Το ουδέτερο σημείο, όπου δεν υπάρχει προτίμηση μεταξύ των ενεργειών $A(0)$ και $A(1)$ είναι το σημείο όπου ισχύει:

$$R(A(0)) = R(A(1)) \tag{4.16α}$$

$$R(A(0)) = R(A(1)) \Leftrightarrow M = CN \Leftrightarrow C = \frac{M}{N} \tag{4.25}$$

Όταν ισχύει :

$$R(A(0)) > R(A(1)) \Leftrightarrow M > CN \Leftrightarrow C > \frac{M}{N} \Rightarrow A(1) \ \eta \ \beta\acute{\varepsilon}\lambda\tau\iota\sigma\tau\eta \ \alpha\pi\acute{o}\varphi\alpha\sigma\eta$$

Όταν ισχύει:

$$R(A(0)) < R(A(1)) \Leftrightarrow M < CN \Leftrightarrow C < \frac{M}{N} \Rightarrow A(0) \ \eta \ \beta\acute{\varepsilon}\lambda\tau\iota\sigma\tau\eta \ \alpha\pi\acute{o}\varphi\alpha\sigma\eta$$

4.4 Συμπεράσματα

Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση επικινδυνότητας είναι ότι: Η επιλογή για μια απόφαση ή ενέργεια που φαίνεται «φθηνή» δεν είναι απαραίτητα και η βέλτιστη. Η γνώση της πληροφορίας από προγενέστερες αντίστοιχες περιπτώσεις παίζει μεγάλο ρόλο σε συνδυασμό με το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο. Η συλλογή δεδομένων αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την εκτίμηση μιας κατάστασης αλλά και παράγοντα ποια απόφαση ή ενέργεια πρέπει να επιλέξουμε.

Η επιτυχία του μοντέλου του Bayes για την εκτίμηση του πόσο «σωστή» είναι μια απόφαση (ή ενέργεια) έγκειται στο γεγονός ότι η ανάλυση του μοντέλου συνδυάζει το ενδεχόμενο κόστος που θα στοιχήσει κάθε απόφαση (μέσω της συνάρτησης απώλειας), την ενδεχόμενη επιτυχία ή αποτυχία (χρήση της συνάρτησης επικινδυνότητας του Bayes) και την προγενέστερη υποκειμενική πιθανότητα (συλλογή πληροφοριών-δεδομένων). Η επιλογή της απόφασης που ελαχιστοποιεί την συνάρτηση επικινδυνότητας είναι η βέλτιστη ενέργεια που πρέπει να επιλεγεί.

Η επιλογή της συνάρτησης απώλειας επηρεάζει την παραπάνω ανάλυση. Μια απόφαση η οποία είναι η βέλτιστη για μια επιλεγμένη συνάρτηση απώλειας, δεν είναι απαραίτητο να είναι εξίσου βέλτιστη όταν αλλάξει η μορφή της συνάρτησης απώλειας. Η επιλογή

της συνάρτησης με την οποία θα καθορίζονται τα πρόστιμα ρύπανσης, άρα και το ενδεχόμενο κόστος για τη μονάδα, είναι καθαρά θέμα περιβαλλοντικής πολιτικής και επαφίεται στην εκάστοτε αρχή.

Η βέλτιστη απόφαση είναι αυτή που ελαχιστοποιεί την συνάρτηση επικινδυνότητας και αυτό είναι συνάρτηση της μορφής της συνάρτησης απώλειας αλλά και της γνώσης που προκύπτει από την προγενέστερη πληροφορία.

$$\textit{Βέλτιστη απόφαση } (A(0) \text{ ία}(1)) = \min(R(A)) = f(L(A,Y),\pi(\theta))$$

Όσο αφορά τις μονάδες αποτέφρωσης ΑΣΑ παρόμοια ανάλυση μπορεί να γίνει και στα υπόλοιπα τμήματα της μονάδας όπως το σύστημα αποτέφρωσης για την επιλογή της βέλτιστης τεχνολογίας αποτέφρωσης αλλά και στο σύστημα ανάκτησης ενέργειας για την βέλτιστη εκμετάλλευση του ενεργειακού δυναμικού των ΑΣΑ.

Το κομμάτι το οποίο και έγινε η ανάλυση, δηλαδή το σύστημα επεξεργασίας ρύπων, είναι το πιο σημαντικό τόσο από περιβαλλοντικής όσο και από οικονομικής άποψης. Η επιλογή του συνδυασμού των συσκευών αποτελεί σημαντικό παράγοντα τον διαχειριστή της μονάδας καθώς αυτό κοστίζει σχεδόν το 1/3 της συνολικής επένδυσης της μονάδας. Παράλληλα η τήρηση της περιβαλλοντικής νομοθεσίας επιβάλλει στο διαχειριστή να αγοράσει συσκευές που ελαχιστοποιούν τις συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων στην έξοδο της μονάδας με κίνδυνο να του επιβληθεί πρόστιμο. Η παραπάνω ανάλυση δίνει την δυνατότητα λοιπόν να επιλεγεί η βέλτιστη λύση που θα είναι και η καταλληλότερη για την εύρυθμη λειτουργίας της μονάδας.

Η συγκεκριμένη διατριβή ασχολήθηκε κυρίως με το εκτιμώμενο οικονομικό κόστος γις κάθε δυνατή απόφαση που αφορά την επιλογή ενός συστήματος επεξεργασίας ρύπων από τον διαχειριστή της μονάδας. Στην ανάλυση δεν εμπεριέχεται ένας σημαντικός παράγοντας όπως είναι η <u>εκτίμηση του κόστους αποκατάστασης απο ένα ενδεχόμενο γεγονός ρύπανσης</u>. Η εκτίμηση αυτή είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία καθώς επιπλέον των επιπτώσεων στο περιβάλλον έχουμε να αντιμετωπίσουμε και το κοινωνικό κόστος.

Η εκτίμηση ενός ενδεχόμενου περιβαλλοντικού κόστους θα επηρέαζε σε πολύ μεγάλο βαθμό την τελική απόφαση και ξεφεύγει κατα πολύ από τα αμιγώς οικονομικά κίνητρα με τα οποία λειτουργούν οι υπεύθυνοι λειτουργίας μιας τέτοιας μονάδας.

4.5 Παράρτημα: υπολογισμοί παραγράφου 4.3

Η σχέση (4.19) μετατρέπεται στην (4.20) σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{N}L(A(0),Y)\cdot f(Y)=\sum_{Y=0}^{n_1}BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}2BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_2+1}^{N}M\cdot f(Y)$$

$$\Rightarrow G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{n_1}BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}2BY\cdot f(Y)+M\sum_{Y=n_2+1}^{N}f(Y)$$

$$\Rightarrow G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{n_1}BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}2BY\cdot f(Y)+M\left(\sum_{Y=0}^{N}f(Y)-\sum_{Y=0}^{n_2}f(Y)\right)$$

$$\Rightarrow G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{n_1}BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}2BY\cdot f(Y)+M\left(1-\sum_{Y=0}^{n_2}f(Y)\right)$$

$$\Rightarrow G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{n_1}BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}2BY\cdot f(Y)+M-M\sum_{Y=0}^{n_2}f(Y)$$

$$\Rightarrow G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{n_1}BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}2BY\cdot f(Y)+M-M\left(\sum_{Y=0}^{n_1}f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}f(Y)\right)$$

$$\Rightarrow G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{n_1}BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}2BY\cdot f(Y)+M-M\sum_{Y=0}^{n_1}f(Y)-M\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}f(Y)$$

$$\Rightarrow G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{n_1}BY\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}2BY\cdot f(Y)+M-\sum_{Y=0}^{n_1}Mf(Y)-\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}Mf(Y)$$

$$\Rightarrow G(A(0),\theta)=\sum_{Y=0}^{n_1}(BY-M)\cdot f(Y)+\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}(2BY-M)\cdot f(Y)+M$$

Χρησιμοποιώντας την (4.3) έχουμε τα εξής αθροίσματα για την (4.20):

$$\sum_{Y=0}^{n_1}(BY-M)\cdot f(Y) \overset{n_1=2}{=} (B\cdot 0-M)\frac{N!}{0!(N-0)!}\theta^0(1-\theta)^{N-0} + (B\cdot 1-M)\frac{N!}{1!(N-1)!}\theta(1-\theta)^{N-1}$$
$$+(B\cdot 2-M)\frac{N!}{2!(N-0)!}\theta^2(1-\theta)^{N-2}$$

$$\sum_{Y=0}^{2}(BY-M)\cdot f(Y) = -M(1-\theta)^N + (B-M)N\theta(1-\theta)^{N-1} + +(2B-M)N(N-1)\theta^2(1-\theta)^{N-2}$$

$$\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}(2BY-M)\cdot f(Y) \overset{n_1=2}{=} (2B\cdot 3-M)\frac{N!}{3!(N-3)!}\theta^3(1-\theta)^{N-3} + (2B\cdot 4-M)\frac{N!}{4!(N-4)!}\theta^4(1-\theta)^{N-4}$$

$$\sum_{Y=n_1+1}^{n_2}(2BY-M)\cdot f(Y) \overset{n_2=4}{=} \frac{(6B-M)}{6}N(N-1)(N-2)\theta^3(1-\theta)^{N-3}$$
$$+\frac{(8B-M)}{24}N(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)\theta^4(1-\theta)^{N-4}$$

Αν αντικαταστήσουμε τα αθροίσματα στην (4.20) έχουμε:

$$G(A(0),\theta) = -M(1-\theta)^{\mathrm{N}} + (\mathrm{B}-\mathrm{M})\theta\cdot \mathrm{N}(1-\theta)^{\mathrm{N}-1} + \frac{(2\mathrm{B}-\mathrm{M})}{2}\theta^2\cdot \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(1-\theta)^{\mathrm{N}-2}$$
$$+\frac{(6\mathrm{B}-\mathrm{M})}{6}\theta^3\cdot \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3} + \frac{(8\mathrm{B}-\mathrm{M})}{24}\theta^4\cdot \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}$$
$$+M$$

(4.21)

Μπορούμε να κάνουμε (για λόγους ευκολίας των πράξεων) τις εξής αντικαταστάσεις στην (4.21):

$$
\begin{aligned}
-(\mathrm{B}-\mathrm{M}) &= m_1 \\
-\frac{(2\mathrm{B}-\mathrm{M})}{2} &= m_2 \\
-\frac{(6\mathrm{B}-\mathrm{M})}{6} &= m_3 \\
-\frac{(8\mathrm{B}-\mathrm{M})}{24} &= m_4
\end{aligned}
\tag{4.22}
$$

Η (4.22) γίνεται τώρα:

$$
\begin{aligned}
G(A(0),\theta) &= -M(1-\theta)^{\mathrm{N}} - m_1\theta\cdot\mathrm{N}(1-\theta)^{\mathrm{N}-1} - m_2\theta^2\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(1-\theta)^{\mathrm{N}-2} \\
&- m_3\theta^3\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3} - m_4\theta^4\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3} \\
&+ M
\end{aligned}
\tag{4.23}
$$

Η συνάρτηση επικινδυνότητας (4.14) θα γίνει:

$$R(A(0)) = -M\int_0^1 (1-\theta)^N 4\theta^3 d\theta - m_1\int_0^1 \mathrm{N}(1-\theta)^{\mathrm{N}-1}\cdot 4\theta^4 d\theta - \int_0^1 m_2\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(1-\theta)^{\mathrm{N}-2}4\theta^5 d\theta$$

$$-\int_0^1 m_3\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}4\theta^6 d\theta - \int_0^1 m_4\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}4\theta^7 d\theta + \int_0^1 \mathrm{M}4\theta^3 d\theta$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -M\int_0^1 \mathrm{N}(1-\theta)^{\mathrm{N}-1}\theta^4 d\theta - m_1\int_0^1 \mathrm{N}(1-\theta)^{\mathrm{N}-1}\cdot 4\theta^4 d\theta - \int_0^1 m_2\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(1-\theta)^{\mathrm{N}-2}4\theta^5 d\theta$$

$$-\int_0^1 m_3\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}4\theta^6 d\theta - \int_0^1 m_4\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}4\theta^7 d\theta + \int_0^1 \mathrm{M}4\theta^3 d\theta$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -(M+4m_1)\int_0^1 \mathrm{N}(1-\theta)^{\mathrm{N}-1}\theta^4 d\theta - \int_0^1 m_2\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(1-\theta)^{\mathrm{N}-2}4\theta^5 d\theta$$

$$-\int_0^1 m_3\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}4\theta^6 d\theta - \int_0^1 m_4\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}4\theta^7 d\theta + \int_0^1 \mathrm{M}4\theta^3 d\theta$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -\frac{(M+4m_1)}{5}\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(1-\theta)^{\mathrm{N}-2}\theta^5 d\theta - m_2\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(1-\theta)^{\mathrm{N}-2}4\theta^5 d\theta$$

$$-\int_0^1 m_3\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}4\theta^6 d\theta - \int_0^1 m_4\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}4\theta^7 d\theta + \int_0^1 \mathrm{M}4\theta^3 d\theta$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -\frac{(M+4m_1+20m_2)}{5}\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(1-\theta)^{\mathrm{N}-2}\theta^5 d\theta - \int_0^1 m_3\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}4\theta^6 d\theta$$

$$-\int_0^1 m_4\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}4\theta^7 d\theta + \int_0^1 \mathrm{M}4\theta^3 d\theta$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -\frac{(M+4m_1+20m_2)}{30}\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(N-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}\theta^6 d\theta - 4m_3\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}\theta^6 d\theta$$

$$-\int_0^1 m_4\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}4\theta^7 d\theta + \int_0^1 \mathrm{M}4\theta^3 d\theta$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -\frac{(M + 4m_1 + 20m_2 - 120m_3)}{30}\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(N-2)(1-\theta)^{\mathrm{N}-3}\theta^6 d\theta$$

$$-\int_0^1 m_4 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4} 4\theta^7 d\theta + \int_0^1 \mathrm{M}4\theta^3 d\theta$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -\frac{(M + 4m_1 + 20m_2 - 120m_3)}{210}\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(N-2)(N-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}\theta^7 d\theta$$

$$-\int_0^1 m_4 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(\mathrm{N}-2)(\mathrm{N}-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4} 4\theta^7 d\theta + \int_0^1 \mathrm{M}4\theta^3 d\theta$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -\frac{(M + 4m_1 + 20m_2 - 120m_3 - 840m_4)}{210}\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(N-2)(N-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}\theta^7 d\theta$$

$$+ M$$

Το ολοκλήρωμα $\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(N-2)(N-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}\theta^7 d\theta$ γίνεται:

$$\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(N-2)(N-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}\theta^7 d\theta = -\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(N-2)\int_0^1 \left((1-\theta)^{\mathrm{N}-3}\right)' \theta^7 d\theta =$$

$$= \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(N-2)\int_0^1 (1-\theta)^{\mathrm{N}-3} 7\theta^6 d\theta = -7\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)\int_0^1 \left((1-\theta)^{\mathrm{N}-2}\right)' \theta^6 d\theta =$$

$$= 7\mathrm{N}(\mathrm{N}-1)\int_0^1 (1-\theta)^{\mathrm{N}-2} 6\theta^5 d\theta = -42N\int_0^1 \left((1-\theta)^{\mathrm{N}-1}\right)' \theta^5 d\theta =$$

$$42N\int_0^1 (1-\theta)^{\mathrm{N}-1} 5\theta^4 d\theta = -210\int_0^1 \left((1-\theta)^{\mathrm{N}}\right)' \theta^4 d\theta = 210\int_0^1 (1-\theta)^{\mathrm{N}} 4\theta^3 d\theta$$

Άρα το $R(A(0))$ θα γίνει :

$$R(A(0)) = -\frac{(M + 4m_1 + 20m_2 - 120m_3 - 840m_4)}{210}\int_0^1 \mathrm{N}(\mathrm{N}-1)(N-2)(N-3)(1-\theta)^{\mathrm{N}-4}\theta^7 d\theta$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -\frac{(M + 4m_1 + 20m_2 - 120m_3 - 840m_4)}{210} 210\int_0^1 (1-\theta)^{\mathrm{N}} 4\theta^3 d\theta$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -4(M + 4m_1 + 20m_2 - 120m_3 - 840m_4)\int_0^1 (1-\theta)^{\mathrm{N}}\theta^3 d\theta + M$$

Για την επίλυση του ολοκληρώματος $\int_0^1 (1-\theta)^{\mathrm{N}}\theta^3 d\theta$ εργαζόμαστε ως εξής:

Θέτω $1-\theta = u \Leftrightarrow du = -d\theta$ και $\begin{cases} \theta = 0 \Rightarrow u = 1 \\ \theta = 1 \Rightarrow \theta = 0 \end{cases}$ το ολοκλήρωμα θα γίνει τότε:

$$\int_0^1 (1-\theta)^{\mathrm{N}}\theta^3 d\theta = -\int_1^0 u^{\mathrm{N}}(1-u)^3 du = \int_0^1 u^{\mathrm{N}}(1-u)^3 du = \int_0^1 u^{\mathrm{N}}(1-3u+3u^2-u^3)du =$$

$$= \int_0^1 (u^{\mathrm{N}} - 3u^{\mathrm{N}+1} + 3u^{\mathrm{N}+2} - u^{\mathrm{N}+3})du = \left[\frac{u^{\mathrm{N}+1}}{\mathrm{N}+1}\right]_0^1 - 3\left[\frac{u^{\mathrm{N}+2}}{\mathrm{N}+2}\right]_0^1 + 3\left[\frac{u^{\mathrm{N}+3}}{\mathrm{N}+3}\right]_0^1 - \left[\frac{u^{\mathrm{N}+4}}{\mathrm{N}+4}\right]_0^1 =$$

$$\frac{1}{\mathrm{N}+1} - 3\frac{1}{\mathrm{N}+2} + 3\frac{1}{\mathrm{N}+3} - \frac{1}{\mathrm{N}+4} = \frac{(N+2)(N+3)(N+4-N-1) + 3(N+1)(N+4)(N+2-N-3)}{(N+1)(N+2)(N+3)(N+4)} =$$

$$= \frac{3(N+2)(N+3) - 3(N+1)(N+4)}{(N+1)(N+2)(N+3)(N+4)} = 3\left[\frac{1}{(N+1)(N+4)} - \frac{1}{(N+2)(N+3)}\right]$$

Καταλήγουμε λοιπόν ότι η $R(A(0))$ θα είναι ίση με:

$$R(A(0)) = -4(M + 4m_1 + 20m_2 - 120m_3 - 840m_4)\int_0^1 (1-\theta)^{\mathrm{N}}\theta^3 d\theta + M$$

$$\Rightarrow R(A(0)) = -4(M + 4m_1 + 20m_2 - 120m_3 - 840m_4)3\left[\frac{1}{(N+1)(N+4)} - \frac{1}{(N+2)(N+3)}\right] + M$$

(4.24)

Επειδή όμως το N είναι το σύνολο των διακριτών γεγονότων (ημερήσιες μετρήσεις) και είναι συνήθως ίσο με ένα έτος (365 ημερήσιες μετρήσεις) η παράσταση

$$3\left[\frac{1}{(N+1)(N+4)} - \frac{1}{(N+2)(N+3)}\right] = 0$$

Η συνάρτηση επικινδυνότητας θα είναι *R(A(0))=M* .

5.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γιδαράκος, Ε., Σημειώσεις «Διαχείριση και Επεξεργασία Αστικών Απορριμμάτων», Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης Χανιά, Απρίλιος pp: 38, 2007.

2. SRI International, “Data Summary of Municipal Solid Waste Management Alternatives,” Volume III: Report Text, Appendix A: Mass Burn facilities, Report Number: NREL/TP--431-4988D, Menlo Park, CA, pp: 83, June 1992.

3. Stubenvoll, J., “State of the Art for Waste Incineration Plants," Federal Environment Agency and Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management, Vienna, pp: 189, 2002.

4. World Bank, World Bank Technical Guidance Report, “Municipal Solid Waste. Incineration,” Washington, DC, pp: 95, 1999.

5. SRI International, “Data Summary of Municipal Solid Waste Management Alternatives. Volume I: Report Text" Final Report Number: NREL/TP--431-4988D, Menlo Park, CA (United States), pp: 193, June 1992.

6. Kellam R., “Draft Guidelines on BAT and BEP for Municipal Waste Incineration,” UNEP/POPS/EGB.2/INF/1023, pp: 16, 2003.

7. Paleologos E.K., Economopoulos A.P, Rambow B., “Waste to Energy Alternatives: An Overview of Technologies, Regulatory Framework, and Economics,’’ 1st Inter. Conf. on Hazardous Management, pp: 17, 1-3 October 2008.

8. Hogg D., "Costs for municipal waste management in the EU", Eunomia, pp: 71, 2001.

9. Tsilemou K. and D. Panagiotakopoulos, “Economic Sustainability Criteria and Indicators for Waste Management,” LCA-IWM Report EVK4-CT-2002-00087, pp: 71, 2005.

10. Θεοχάρη, Χ., Αραβώσης, Κ., Βαρελίδης, Π., Διαβατζής, Η., Ζιώγας, Χ., Ιατρού, Σ., Μπούρκα, Α., Οικονομόπουλος, Α., Παπαγρηγορίου, Σ., Παντελάρας, Π., Φρατζής, Τ., “Διαχείριση Στερεών Απόβλητων Στην Ελλάδα/ Η περίπτωση της Αττικής,’’ ΤΕΕ, pp: 337, Αθήνα, 2006.

11. Tsotsos, D., “Biodegradable municipal waste management in Europe,” European Environment Agency, Topic report 15/2001, pp: 28, 2001.

12. European Commission, “Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the Incineration of Waste,” Official Journal of the European Communities (28.12.2000).

12. European Commission, “Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the Incineration of Waste,” Official Journal of the European Communities (28.12.2000).

13. Knox A., “An Overview of Incineration and EFW Technology as Applied to the Management of Municipal Solid Waste (MSW),” ONEIA Energy Subcommittee, pp: 89, 2008.

14. European Commission, “Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration,” pp: 601, 2006.

15. Ψωμάς, Σ. «Καύση Αποβλήτων: Ακριβή-Αναποτελεσματική-Επικίνδυνη» Έκθεση του ελληνικού γραφείου της Greenpeace [www.oikologos.gr], Αθήνα, pp: 32, 2005.

16. Achternbosch, M, and U. Richers, "Materials Flows and Investment Costs of Flue Gas Cleaning Systems of Municipal Waste Incinerators," Institute for Technical Chemistry Karlsruhe, Germany, FZKA 6726, pp: 112, 2002.

17. Zhang H. Z., Ni Y.W., Chen P.J. and Q. Zhang “Influence of Variation in The operating Conditions on PCDD/F Distribution I a Full Scale MSW Incinerator,” Chemosphere, 70, 721-730, 2008.

18. G.McKay “Dioxin Characterisation, Formation and Finimisation During Municipal Solid Waste (MSW) Incineration: Review, ”Chemical Engineering Journal, 86, pp:343–368, 2002.

19. A. M. Cunliffe and P. T. Williams “*De-novo* formation of dioxins and furans and the memory effect in waste incineration flue gases,”Waste Management,29(2),pp:739-748,2009.

20. Bontoux L. “The Incineration Of Waste In Europe: Issues And Perspectives,” IPTS Report EUR 18717 EN, pp:43,1999.

21. “Standards of Performance for New Stationary Sources and Emission Guidelines for Existing Sources: Large Municipal Waste Combustors,” Environmental Protection Agency, 71(90), pp:27324-27348

22. Sørum L. “Dioxin Emissions to Air from MSW Combustion-Data from Some IEA Member Countries,”IEA Technical Report-A5946, pp:21,2004.

23. Allsopp M., Costner P. and P.Johnston “Incineration And Human Health, State of Knowledge of the Impacts of Waste Incinerators on Human Health,” Greenpeace Research Laboratories, University of Exeter, pp:79, UK,2001.

24. Lisk D. J. “Environmental Implications of Incineration of Municipal Solid Waste and Ash Disposal,” The Science of The Total Environment,74,pp:39-66,1988.

25. Rowat S. C. “Incinerator toxic emissions: a brief summary of human health effects with a note on regulatory control,” Medical Hypotheses , **52**(5), pp:389–396,1999.

26. Cwan K.S., Jeon S.H.,Jung, Rok J.I., Hum K.K., Hee K.H., ,Hyung K.J., Heung Y.J.,Jin K.S., Cheon Y.J. and J.D.Hee “Removal Efficiencies of PCDDs/PCDFs By Air Pollution Control Devices in Municipal Solid Waste Incinerators,” Chemosphaire,43,pp:773-776,2001.

27. “Air Pollution Control Technology,” EPA report-452/F03-034,pp:5,2006.

28. Παλαιολόγος, Ε. “Ανάλυση Επικινδυνότητας (Πανεπιστημιακές Σημειώσεις),” Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης Χανιά, pp: 163, 2007.

29. Stengler E., “Where is waste-to-energy, and where is it going?,” Waste Management World, pp: 8, 2005

30. Caputo, A., Pacifico P., “ RDF production plants: I Design and costs,” Applied Thermal Engineering 22(4), pp: 423-437,2002

31. Οικονομόπουλος, Α, “Χημεία Και Έλεγχος Ρύπανσης Ατμόσφαιρας (Πανεπιστημιακές Σημειώσεις),” Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης Χανιά, pp: 400, 2000.

32. Cooper,D.C.,Alley,C.F. “Air Pollution Control, A Design approach,” Waveland press Inc, Prospect Heights, Illinois, ,3^{thd} Edition, 2002