



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

---

**«ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΥΣΗΣ  
ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ»**

υπό

**Μακαντάση Παναγιώτη**

**Διπλωματική Εργασία**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους απαιτήσεων για την απόκτηση  
του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

**Βόλος, Ιούνιος 2019**

Copyright©2019 Μακαντάσης Παναγιώτης

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Ν. Ανδρίτσος

(Επιβλέπων)

Καθηγητής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Β. Μποντόζογλου

Καθηγητής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Γ. Χαραλάμπους

Καθηγητής

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παράδοση της παρούσας εργασίας υποδηλώνει το τέλος των φοιτητικών μου χρόνων και την αρχή ενός νέου κεφαλαίου στη ζωή μου, αρκετά αγνώστου που όμως είμαι πρόθυμος και εφοδιασμένος να ανακαλύψω.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον κύριο Ν. Ανδρίτσο καθώς δέχτηκε να είναι επιβλέπων σε μία εργασία με θέμα που αποτέλεσε προσωπική μου επιλογή. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους κυρίους Β. Μποντόζογλου και Γ. Χαραλάμπους αλλά και όλους τους καθηγητές του τμήματος που συνάντησα στην πορεία μου.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ που μπορώ να πω είναι προς τους γονείς μου οι οποίοι με στήριξαν ηθικά και οικονομικά κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και χωρίς αυτούς δε θα γινόμουν ο άνθρωπος που είμαι σήμερα. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον αδερφό μου για τα 4 χρόνια συγκατοίκησης καθώς τα φοιτητικά μας χρόνια συναντήθηκαν στο Βόλο. Δε θα μπορούσα να παραλείψω τους συγγενείς μου στη Λάρισα όπου πάντα με υποδέχονταν με ένα πιάτο φαγητό.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και παλιούς συμμαθητές μου για την υποστήριξη τους και τους είμαι ευγνώμων για την κατανόηση που επέδειξαν καθώς τον καιρό της συγγραφής έπρεπε να ξοδεύω πολλές ώρες μπροστά από τον υπολογιστή.

# «ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ»

Μακαντάσης Παναγιώτης

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2019

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Ν. Ανδρίτσος

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την καύση των στερεών αποβλήτων όπως αυτή εφαρμόζεται σε σύγχρονες εγκαταστάσεις που ήδη έχουν δημιουργηθεί σε αρκετές ευρωπαϊκές πόλεις με σκοπό την ανάκτηση ενέργειας. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η *Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission)* η οποία, διαμορφώνοντας την κατάλληλη νομοθεσία, εξέδωσε σχετικό εγχειρίδιο-οδηγό προς τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αποφάσισαν να συμμετέχουν στο όλο εγχείρημα.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μία εισαγωγή στο πρόβλημα του συνεχώς αυξανόμενου ρυθμού παραγωγής στερεών αποβλήτων και στον τρόπο με τον οποίο μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα ζωής αλλά και την υγεία εκατομμυρίων πολιτών στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στον ορισμό, τις κατηγορίες και την ιεράρχηση στο τρόπο διαχείρισης των αποβλήτων. Τέλος, παρουσιάζεται η στρατηγική που ακολουθεί η Ευρωπαϊκή Ένωση για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα και επισημαίνονται οι κίνδυνοι που συνεπάγονται για τη δημόσια υγεία από κάθε δραστηριότητα σχετική με την καύση στερεών αποβλήτων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τη διαδικασία καύσης των απορριμμάτων, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα από μία τέτοια δραστηριότητα. Στη συνέχεια, εξετάζονται επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τη σύσταση και τη θερμογόνο δύναμη των απορριμμάτων ενώ ακολουθεί περιγραφή των μηχανικών τμημάτων που σχετίζονται με την τροφοδοσία και την καύση, όπως το σύστημα αποθήκευσης και τροφοδοσίας και ο κλίβανος. Η ενότητα αυτή κλείνει με παράθεση της νομοθεσίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης αναφορικά με τις συνθήκες καύσης και τις εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει όλες εκείνες τις τεχνολογίες που βρίσκονται στη διάθεση της εγκατάστασης ώστε να μετατρέψει τη θερμότητα που παράγεται από την καύση των απορριμμάτων σε αξιοποιήσιμη ενέργεια (ηλεκτρική, τηλεθέρμανση & τηλεψύξη) αλλά και να αποτρέψει τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Πρόκειται για τα συστήματα της ανάκτησης ενέργειας και του καθαρισμού των καυσαερίων, η λειτουργία των οποίων συνοψίζει το ρόλο που διαδραματίζει μία τέτοιου είδους εγκατάσταση.

Περνώντας στο κεφάλαιο 4, παρατηρούμε τα σημερινά δεδομένα στην Ευρώπη στον τομέα της καύσης στερεών αποβλήτων. Προβάλλεται η συνεισφορά του συνδέσμου Ευρωπαϊκών εγκαταστάσεων ανάκτησης ενέργειας από στερεά απόβλητα (C.E.W.E.P) στην υποστήριξη των εγκαταστάσεων μελών τόσο στην έρευνα όσο και στις εφαρμοζόμενες τεχνολογίες με σκοπό τη συνεχή τους βελτίωση. Σημαντική είναι και η καθιέρωση του τρόπου σκέψης που λαμβάνει υπόψη τον κύκλο ζωής των προϊόντων σύμφωνα με την ανάλυση του Life Cycle Thinking. Ακολουθεί η παρουσίαση των μοντέλων επένδυσης ενός σχεδίου καύσης απορριμμάτων και η πορεία προς την οικονομική βιωσιμότητα. Βασικός άξονα του κεφαλαίου είναι ο σχεδιασμός μίας πρότυπης εγκατάστασης με υπολογισμό της ενέργειας που δύναται να παρέχει σε

συνδυασμό με το κόστος αρχικού κεφαλαίου σύμφωνα με τη βιβλιογραφία. Το κεφάλαιο φτάνει στο τέλος του με μία ανασκόπηση των εγκαταστάσεων που βρίσκονται ήδη σε λειτουργία σε ευρωπαϊκό έδαφος.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με το μέλλον τέτοιων εγκαταστάσεων και τις συνθήκες που πρέπει να διαμορφωθούν στην Ελλάδα ώστε να υπάρξει ευνοϊκό έδαφος για την κατασκευή και ενσωμάτωση της ανάκτησης ενέργειας από τα απορρίμματα στην ελληνική πραγματικότητα.

# «MODERN WASTE TO ENERGY PLANTS»

Makantasis Panagiotis

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2019

*Supervisor:* Dr. N. Andritsos

## ABSTRACT

This paper is about waste incineration and the way it is applied to modern plants around European cities in order to retrieve energy. The contribution of the European Commission is crucial to this field of energy generation as they form the legislation that obligates the members of the European Union to comply with the best available techniques of waste incineration and air pollution control.

The first chapter introduces the problem of the increasing rate in waste production throughout the world as well as the health risks involved. The definition and the categories of waste are also described along with the hierarchy of waste management. The chapter ends with the analysis of the European strategy towards the problem and the most dangerous pollutants emitted from waste to energy plants according to Environmental Protection Agency and World Health Organization.

Chapter 2 emphasizes on the incineration procedure and enumerates the advantages and disadvantages implied by such an activity. Moreover, additional information about the waste composition and the mean heating value are provided. The plant sectors as well as the mechanical equipment required for waste incineration are discussed. The final stage of this chapter is dedicated to the European Directive about the incineration conditions that should be achieved in the furnace and the emission limits of the plant.

Chapter 3 is concerned with the systems used for the purposes of energy recovery and air pollution control. Heat exchangers, electrostatic precipitators, baghouses and NO<sub>x</sub> reductants are some of the described devices.

Chapter 4 observes the progress of waste to energy plants in Europe based on data provided by the Confederation of European Waste to Energy Plants (C.E.W.E.P.). C.E.W.E.P. is a platform where waste to energy plant members can exchange their experience on waste incineration or improve their performance towards a sustainable waste management. Performance can be improved through the advice of the Scientific and Technical Council which is responsible for research and scientific issues. The reason why Life Cycle Thinking acts as a different approach to the attempt of reducing waste and maximizing energy recovery is also discussed. Since the economic viability is important for any energy project, this chapter acknowledges the available models of ownership and the measurements needed to avoid economic failure. The chapter's most important part is the plan of financing and operating a waste to energy project where technical characteristics, capital cost, annual costs and annual revenues of the plant are calculated. The chapter is then concluded with a tour of the most popular waste to energy plants operating in Europe.

Chapter 5 provides the author's conclusions about the future of waste to energy projects in Europe. Greece is particularly mentioned as a country which is facing a dead-end in terms of waste management and the following discussion is about how the method of waste incineration can turn into the favorable option of waste management and disposal for the Greek Government.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Το πρόβλημα των στερεών αποβλήτων .....	<b>1</b>
1.2 Οι κατηγορίες των αποβλήτων .....	<b>3</b>
1.3 Η στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	<b>4</b>
1.4 Οι κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία .....	<b>6</b>
<b>2. Η ΚΑΥΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>16</b>
2.1 Εισαγωγή.....	<b>16</b>
2.2 Συστήματα καύσης.....	<b>17</b>
2.2.1 Σύστημα διανομής, αποθήκευσης & τροφοδοσίας απορριμμάτων .....	<b>19</b>
2.2.2 Κλίβανος .....	<b>21</b>
2.2 Οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	<b>25</b>
<b>3. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ</b> .....	<b>28</b>
3.1 Ανάκτηση ενέργειας .....	<b>28</b>
3.1.1 Εναλλάκτης θερμότητας .....	<b>28</b>
3.1.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	<b>33</b>
3.1.3 Τηλεθέρμανση.....	<b>35</b>
3.1.4 Τηλεψύξη.....	<b>38</b>
3.2 Έλεγχος εκπομπών.....	<b>43</b>
3.2.1 Κυκλώνες.....	<b>44</b>
3.2.2 Ηλεκτροστατικά φίλτρα .....	<b>46</b>
3.2.3 Πλυντρίδες σωματιδίων.....	<b>48</b>
3.2.4 Σακόφιλτρα .....	<b>49</b>
3.2.5 Μείωση NO <sub>x</sub> .....	<b>51</b>
3.2.6 Ενεργός άνθρακας .....	<b>52</b>
3.2.7 Καπνοδόχος.....	<b>53</b>
<b>4. ΟΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ</b> .....	<b>55</b>
4.1 Ο σύνδεσμος C.E.W.E.P .....	<b>55</b>
4.2 Life Cycle Thinking .....	<b>55</b>
4.3 Οικονομική βιωσιμότητα .....	<b>56</b>
4.4 Σχεδιασμός μίας πρότυπης εγκατάστασης .....	<b>59</b>
4.5 Παραδείγματα εγκαταστάσεων στην Ευρώπη.....	<b>66</b>
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>72</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>74</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....	<b>76</b>



# 1

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 1.1 Το πρόβλημα των στερεών αποβλήτων

Η ανάγκη διαχείρισης των αποβλήτων που προκύπταν από την ανθρώπινη δραστηριότητα κατέστη εμφανής καθώς οι λαοί ξεκίνησαν να οργανώνονται σε κοινότητες. Όσο μεγαλύτερος ήταν ο πληθυσμός των πόλεων τόσο πιο ενοχλητικό γινόταν το πρόβλημα της συγκέντρωσης αποβλήτων. Μάλιστα στην Αθήνα περίπου το 500 π.Χ. εκδόθηκε για πρώτη φορά στην ιστορία νόμος που απαγόρευε τη ρίψη σκουπιδιών στους δρόμους ενώ έκανε λόγο και για μεταφορά τους από οδοκαθαριστές σε ανοικτή χωματερή που βρισκόταν μερικά χιλιόμετρα εκτός της πόλης, γεγονός που υποδεικνύει ότι το πρόβλημα είχε ήδη λάβει μεγάλες διαστάσεις. Ωστόσο, οι πρώτες καταγραφές περί χρήσης της καύσης ως μέθοδο διαχείρισης αποβλήτων εμφανίστηκαν στις αρχές της πρώτης χιλιετίας στην Παλαιστίνη. Στην κοιλάδα της Γέεννα, κοντά στην Ιερουσαλήμ, βρισκόταν η τοποθεσία όπου τα απόβλητα συγκεντρώνονταν και καίγονταν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τοποθεσία αυτή ήταν συνώνυμο της κόλασης σύμφωνα με αναφορές της Παλαιάς Διαθήκης.

Κατά τη διάρκεια του Μεσαίωνα, τα απορρίμματα δεν έπαυσαν να είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα για τους πολίτες των πόλεων. Συχνό ήταν το φαινόμενο να συσσωρεύονται στους δρόμους προκαλώντας δυσοσμία και ευνοϊκό περιβάλλον για ζώδια αλλά και νοσήματα. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα ενός αγγλικού νόμου του 1297 που υποχρέωνε τους ιδιοκτήτες κατοικιών να κρατούν καθαρό το μέρος του δρόμου που τους αναλογούσε αλλά και το ζήτημα που προέκυψε σχετικά με την ασφάλεια της πόλης του Παρισιού το 1400 εξαιτίας της τεράστιας στοίβας απορριμμάτων που ξεπερνούσε το ύψος των τειχών.

Στην Ευρώπη, η βιομηχανική επανάσταση μεταξύ 1750 και 1850 οδήγησε σε ραγδαία αύξηση του πληθυσμού των πόλεων και αναπόφευκτα στον πολλαπλασιασμό του όγκου των απορριμμάτων. Η σημαντική διαφορά αυτής της περιόδου είναι ότι πλέον προστέθηκε μία νέα πηγή, οι βιομηχανίες. Με την ανάπτυξη διαφόρων βιομηχανικών κατεργασιών, τα απόβλητα περιλάμβαναν μεγάλη ποικιλία υλικών όπως σπασμένο γυαλί, σκουριασμένο μέταλλο, υπολείμματα τροφών και ανθρώπινα απόβλητα. Τα παραπάνω αποτελούν κίνδυνο για τον ίδιο τον άνθρωπο και ως αποτέλεσμα δόθηκε περισσότερη προσοχή στη σχέση μεταξύ δημόσιας υγείας και περιβάλλοντος.

Η πρώτη μορφή εγκατάστασης που χρησιμοποιούσε την καύση ως μέθοδο επεξεργασίας στερεών αποβλήτων υπήρξε στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα σε σαλόνια και κουζίνες σπιτιών όπου τα οικιακά απόβλητα καίγονταν σε εστίες παρέχοντας μία νέα «δωρεάν» πηγή ενέργειας ως συμπλήρωμα του κάρβουνου που τότε ήταν το κυρίαρχο καύσιμο. Το εύφλεκτο περιεχόμενο των απορριμμάτων άρχισε να αναγνωρίζεται ως μία πολλά υποσχόμενη αλλά και φθηνή ενέργεια για κάθε κοινότητα. Αυτός ήταν και ο λόγος που υπήρξε μετάβαση από τις οικιακές εστίες σε δημοτικούς αποτεφρωτήρες και μέχρι το 1912 στο Ηνωμένο Βασίλειο λειτουργούσαν περισσότεροι από 300, 76 εκ των οποίων είχαν, κατά μία έννοια, τη δυνατότητα να παράγουν αξιοποιήσιμη μορφή ενέργειας.

Πρόκειται λοιπόν για τις πρώτες εγκαταστάσεις διαχείρισης στερεών αποβλήτων στην ιστορία, με τη μορφή που γνωρίζουμε σήμερα, που όμως ήταν μικρής κλίμακας, απαιτούσαν χειρωνακτική εργασία και ο πρόχειρος σχεδιασμός και έλεγχός τους δεν επέφερε κερδοφορία στη λειτουργία τους.

Τα επόμενα χρόνια καθώς η Ευρώπη γνώρισε τους βιαιότερους πολέμους στην ιστορία της ανθρωπότητας, 1<sup>ος</sup> & 2<sup>ος</sup> Παγκόσμιος Πόλεμος, η διαχείριση των απορριμμάτων δεν αποτελούσε πλέον σοβαρό πρόβλημα τόσο για την κοινή γνώμη όσο και για τη νομοθεσία. Ως αποτέλεσμα οι πρωτοβουλίες για την ανάπτυξη και τον εκσυγχρονισμό των εγκαταστάσεων που ήδη υπήρχαν ήταν λιγοστές. Τα βλέμματα στράφηκαν ξανά στο ζήτημα αυτό στα τέλη των δεκαετιών του 1960 και 1970 όπου σοβαρά περιστατικά περιβαλλοντικής ρύπανσης έλαβαν χώρα σε Ηνωμένο Βασίλειο, Γερμανία και Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.



*1972: Η εύρεση κυανιούχου άλατος κοντά σε παιδική χαρά γίνεται πρώτο θέμα στην εφημερίδα Daily Mirror*

Η τεράστια δημοσιότητα που έλαβε το περιστατικό στο Ηνωμένο Βασίλειο δημιούργησε πιέσεις ώστε να διαμορφωθεί κατάλληλη νομοθεσία βάσει της οποίας η διαχείριση αποβλήτων θα μπορεί να ελεγχθεί αυστηρά. Πράγματι, μέχρι τα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα (1980-1990) στο Ηνωμένο Βασίλειο είχαν τεθεί τα θεμέλια της σημερινής ισχύουσας νομοθεσίας η οποία επηρέασε και την αντίστοιχη νομοθεσία που θεσπίστηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Περνώντας στο σήμερα, η επεξεργασία και διαχείριση των αποβλήτων αποτελούν πλέον ένα κεντρικό θέμα βιώσιμης ανάπτυξης. Η προσέγγιση της Ευρωπαϊκής ένωσης και οι οδηγίες της προς τα κράτη μέλη της σχετικά με το θέμα αυτό καθιστούν σαφές ότι πρόκειται για μία στρατηγική που βασίζεται σε δύο κυρίαρχους

άξονες, την επεξεργασία των απορριμμάτων ως «κλειδί» στην ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων προς ταφή και στην ελαχιστοποίηση οποιουδήποτε ρίσκου ως προς τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

## 1.2 Οι κατηγορίες των αποβλήτων

Ο ορισμός των αποβλήτων μπορεί να είναι αρκετά υποκειμενικός και αυτό διότι οτιδήποτε θεωρεί κάποιος ως περιττό δύναται να αποτελεί αξιοποιήσιμο υλικό για κάποιον άλλο. Πρέπει λοιπόν να υπάρξει ένας αυστηρός ορισμός που συμμορφώνεται με το ισχύον νομικό πλαίσιο δημιουργώντας ένα περιβάλλον οικονομικής και νομικής ασφάλειας τόσο για τις επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται σε αυτόν τον τομέα όσο και για τις τοπικές αρχές ή ακόμα και για την Κυβέρνηση κάθε κράτους. Επιπρόσθετα, σημαντική είναι και η κατηγοριοποίησή τους ώστε να υπάρχει ορθός προγραμματισμός στη διαχείρισή τους σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Στο σημείο αυτό δημιουργείται ένα εύλογο ερώτημα σχετικά με το κατά πόσο είναι εύκολη μία τέτοια διαδικασία από τη στιγμή που τα απόβλητα διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τη σύνθεση είτε σε καθημερινή ή εποχιακή βάση. Η απάντηση είναι ότι από τη «φύση» τους πρόκειται για ένα αντικείμενο δύσκολο ως προς την περιγραφή, τον ορισμό καθώς και την κατηγοριοποίηση. Ωστόσο, οποιαδήποτε διαφωνία κυρίως ως προς τις κατηγορίες τους, επιφέρει οικονομικές συνέπειες σε επιχειρήσεις που για παράδειγμα ασχολούνται με απόβλητα τα οποία απαλλάσσονται από περιβαλλοντικούς φόρους.

Τα παραπάνω οδήγησαν την Ευρωπαϊκή Ένωση να ορίσει ως απόβλητο οποιαδήποτε ουσία ή αντικείμενο του οποίου ο κάτοχος απορρίπτει ή έχει σκοπό να απορρίψει. Ως κάτοχος ορίζεται οποιοδήποτε άτομο ή επιχείρηση παράγει απόβλητα ή ασχολείται με δραστηριότητες που αλλάζουν τη σύνθεση και τη φύση τους. Επίσης, καθιστά σαφή και την κατηγοριοποίησή τους (Waste Framework Directive 1975) :

1. Υπολείμματα παραγωγής ή κατανάλωσης που δεν περιγράφονται από κάποια άλλη κατηγορία παρακάτω.
2. Προϊόντα που δε τηρούν τις προβλεπόμενες προδιαγραφές.
3. Προϊόντα των οποίων η προτεινόμενη ημερομηνία όριο ασφαλούς χρήσης έχει λήξει.
4. Οποιοδήποτε υλικό θεωρείται μολυσμένο εξαιτίας κάποιου ατυχήματος.
5. Υλικά μολυσμένα ή λερωμένα ως αποτέλεσμα σχεδιασμένης ενέργειας (π.χ. υπολείμματα ενεργειών καθαρισμού).
6. Μη χρησιμοποιούμενα αντικείμενα (π.χ. χρησιμοποιημένες μπαταρίες).
7. Ουσίες που πλέον δε δρουν ικανοποιητικά.
8. Υπολείμματα βιομηχανικών διεργασιών.
9. Υπολείμματα αντιρρυπαντικών δραστηριοτήτων (π.χ. σκόνη σακόφιλτρων, χρησιμοποιημένα φίλτρα).
10. Υπολείμματα κατεργασιών αφαίρεσης υλικού (π.χ. ρινίσματα τόννευσης)
11. Υπολείμματα εξαγωγής και κατεργασίας πρώτων υλών.
12. Νοθευμένα υλικά.
13. Οποιαδήποτε υλικά, ουσίες ή προϊόντα των οποίων η χρήση έχει απαγορευθεί.
14. Προϊόντα τα οποία δε χρησιμεύουν στους κατόχους τους (π.χ. γεωργικά, οικιακά απόβλητα)
15. Νοσοκομειακά απόβλητα

16. Οτιδήποτε δεν ανήκει στις παραπάνω κατηγορίες.

Στα επόμενα χρόνια ωστόσο, το πρόβλημα με τις διαφορετικές λίστες αποβλήτων καθώς και διαφωνίες ανάμεσα στα κράτη μέλη εξακολουθούσε να επηρεάζει τη στρατηγική που η Ευρωπαϊκή Ένωση προσπαθούσε να διαμορφώσει ως προς τη διαχείρισή τους. Η οριστική λύση δόθηκε με την έκδοση του Ευρωπαϊκού Καταλόγου Αποβλήτων (European Waste Catalogue), από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, ο οποίος βρίσκεται σε ισχύ από το 2000 και περιέχει περισσότερες από 650 κατηγορίες αποβλήτων χωρίς όμως να θεωρείται ολοκληρωμένος αλλά με προοπτική ένταξης σε αυτόν νέων κατηγοριών ανάλογα με τις απαιτήσεις του μέλλοντος. Ο κατάλογος βρίσκεται στη διάθεση των πολιτών με μία απλή αναζήτηση στο διαδίκτυο.

### 1.3 Η στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η Ευρωπαϊκή Ένωση υλοποιεί περιβαλλοντικά προγράμματα δράσης αλλά επίσης εφαρμόζει νομοθετικά μέτρα (π.χ. οδηγίες, κανονισμοί και αποφάσεις) σε θέματα σχετικά με τη διαχείριση απορριμμάτων.

Η επίσημη στρατηγική που επέλεξε η Ευρωπαϊκή Ένωση περιγράφεται για πρώτη φορά το 1989 μέσω ενός αρχείου (Community Strategy for Waste Management (SEC (89) 934 Final) το οποίο ήταν μέρος του 4<sup>ου</sup> Περιβαλλοντικού Προγράμματος Δράσης (1987-1192). Παρουσιάστηκε ως ένα είδος επικοινωνίας ανάμεσα στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή και το Συμβούλιο του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου καθιστώντας σαφή την αρχή της ιεράρχησης στη διαχείριση των απορριμμάτων μέσω νέων, βελτιωμένων και κυρίως καθαρών τεχνολογιών με άξονα την ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων που καταλήγουν σε οριστική ταφή. Πρόκειται για τη λογική που εστιάζει και αντιμετωπίζει τα απόβλητα όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πηγή τους ενώ παράλληλα θέτει ως στόχο την ανεξαρτησία στη διαχείρισή τους. Επιπλέον, σημαντικό σημείο στο οποίο δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση είναι η μέτρηση της επιτυχίας εφαρμογής των σχετικών μέτρων μέσα από τη συγκέντρωση ακριβών και αξιόπιστων στατιστικών δεδομένων πάνω στον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζουν την παρακάτω ιεράρχηση τα κράτη μέλη.



*Σχήμα 1.1: Η ιεράρχηση στη διαχείριση των αποβλήτων ΠΗΓΗ: WASTE NOT WANT NOT, 2002*

Όσο πιο κοντά στην πάνω ακμή της πυραμίδας βρίσκεται ένας τρόπος διαχείρισης απορριμμάτων τόσο πιο επιθυμητός είναι. Επομένως, σύμφωνα με την ιεράρχηση, περισσότερο επιθυμητές δράσεις είναι η μείωση, η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση και προηγούνται σαφώς της ανάκτησης ενέργειας και της υγειονομικής ταφής. Παράλληλα, η πρακτική υιοθέτηση της ιεραρχίας, υποδηλώνει ότι μέσω της πρόληψης και της επαναχρησιμοποίησης προϊόντων, όλο και περισσότερα απορρίμματα θα είναι διαθέσιμα για να οδηγηθούν στα επόμενα στάδια διαχείρισης. Δηλαδή, όσο περισσότερο μειώνουμε τα απορρίμματα που παράγουμε τόσο λιγότερα απορρίμματα οδηγούνται τελικά προς ανακύκλωση, ανάκτηση ενέργειας ή οριστική ταφή. Σε αυτό το σημείο, ακολουθεί μία αναλυτικότερη περιγραφή των επιπέδων της πυραμίδας.

- **Μείωση αποβλήτων:** Η κορυφή της πυραμίδας αποτελεί τον πλέον επιθυμητό τρόπο διαχείρισης. Ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά τις βιομηχανικές εργασίες η μείωση των αποβλήτων στην πηγή τους απαιτεί ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον τεχνολογιών ή δραστηκή βελτίωση, από άποψη τεχνολογικής αρτιότητας, των υφιστάμενων μέσων παραγωγής (π.χ. εκσυγχρονισμός μηχανημάτων). Αντίστοιχη όμως βελτίωση απαιτείται και στην κατασκευή των προϊόντων που θα οδηγήσει σε αύξηση του χρόνου ζωής αλλά και χρήσης τους. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί και η προσπάθεια για αποφυγή παραγωγής επικίνδυνων ή τοξικών αποβλήτων. Όσο απλή στον λόγο και αν φαντάζει η κατηγορία αυτή, πρόκειται και για την πιο δύσκολη ως προς την εφαρμογή διότι εμπλέκει όχι μόνο οικονομικά συμφέροντα αλλά και κοινωνικά (η υπερκατανάλωση και ο υπερπληθυσμός αποτελούν πλέον χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ανθρωπότητας), με τα οφέλη ωστόσο από την εφαρμογή της να είναι υψίστης σημασίας όπως η εξοικονόμηση φυσικών πόρων και ενέργειας.
- **Επαναχρησιμοποίηση:** Η συλλογή και επαναχρησιμοποίηση υλικών, όπως για παράδειγμα η επαναχρησιμοποίηση γυάλινων μπουκαλιών, αφορά τον απλό καθαρισμό τους και τη χρήση τους για τον ίδιο σκοπό. Η επαναχρησιμοποίηση μπορεί να αφορά και νέους τομείς χρήσης υλικών τα οποία έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για το σκοπό τον οποίο δημιουργήθηκαν. Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι η επαναχρησιμοποίηση αποτελεί μία ιδιότητα που μπορεί υπό προϋποθέσεις να αυξήσει την ελκυστικότητα του προϊόντος στην αγορά. Παρά το γεγονός ότι φαντάζει για μία επιλογή που έχει μόνο θετική πλευρά, αρκετές φορές η εφαρμογή της μπορεί να έχει περισσότερα μειονεκτήματα παρά πλεονεκτήματα όπως για παράδειγμα οικονομικά ασύμφορες ή ενεργοβόρες διαδικασίες μεταφοράς, καθαρισμού κτλ.
- **Ανακύκλωση & Λιπασματοποίηση:** *1. Ανακύκλωση υλικών:* Η ανάκτηση ανακυκλώσιμων υλικών από τα απόβλητα και η επεξεργασία τους ώστε να αποτελέσουν ξανά εμπορεύσιμα υλικά, όπως για παράδειγμα η ανακύκλωση γυάλινων και αλουμιένιων δοχείων η οποία ως μέθοδος χρησιμοποιείται σε ολόκληρο τον κόσμο, έχει εξαιρετικό ενεργειακό όφελος σε σχέση με την παραγωγή τους από το αρχικό στάδιο. Η πιθανότητα ύπαρξης τέτοιων υλικών στα απορρίμματα είναι μεγάλη χωρίς όμως η ανακύκλωση να αποτελεί πάντοτε την καταλληλότερη μέθοδο, όπως για παράδειγμα περιπτώσεις όπου η συλλογή και η επεξεργασία τους απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας ή οι ρύποι που εκπέμπονται με αυτού του είδους τις δραστηριότητες έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο στο περιβάλλον από τους αντίστοιχους που αφορούν την αρχική επεξεργασία των υλικών αυτών ως καθαρές πρώτες ύλες.  
*2. Λιπασματοποίηση:* Είναι η διαδικασία με την οποία η αποσύνθεση του οργανικού μέρους των αποβλήτων έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή

λιπασμάτων αλλά και γενικότερα τροφής για τα φυτά. Η απευθείας εναπόθεση των υπολειμμάτων τροφής στον κήπο του σπιτιού αποτελεί ένα τρόπο άμεσης αντιμετώπισης των αποβλήτων στην πηγή τους. Σε ό,τι αφορά την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου σε μεγαλύτερη κλίμακα (π.χ. χρήση σε πάρκα) πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή σε θέματα μόλυνσης καθώς σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητη η προστασία της δημόσιας υγιεινής.

- **Ανάκτηση ενέργειας:** Η ενέργεια ανακτάται μέσω της καύσης στερεών αποβλήτων ή αερίων ΧΥΤΑ. Αυτό συμβαίνει διότι περιέχουν οργανικό μέρος το οποίο μπορεί να καεί σε έναν αποτεφρωτήρα και μέσω των καυσαερίων να θερμανθεί νερό το οποίο με τη σειρά του αποτελεί είτε μέσο θέρμανσης για κτήρια που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή ή μέσο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατάσταση του αποτεφρωτήρα βέβαια απαιτεί δαπάνη κεφαλαίων και εξελιγμένα μέτρα ελέγχου των εκπομπών αερίων. Παρόμοια είναι η διαδικασία και για τα αέρια των ΧΥΤΑ των οποίων η βιοαποικοδόμηση παράγει ένα αέριο το οποίο αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από μεθάνιο. Αφού ολοκληρωθεί η συλλογή του (ειδικά σχεδιασμένη μέθοδος) στη συνέχεια καίγεται και ο παραγόμενος ατμός χρησιμοποιείται από CHP συστήματα. Επιπρόσθετα, υπάρχουν νέες τεχνολογίες όπως η πυρόλυση και η αεριοποίηση από τις οποίες παράγονται υγρά ή αέρια καύσιμα τα οποία μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις να χρησιμοποιηθούν όπως τα συμβατικά.
- **Υγειονομική ταφή:** Στη βάση της πυραμίδας ιεράρχησης συναντάμε την πιο ανεπιθύμητη επιλογή στη διαχείριση των απορριμμάτων. Η οριστική ταφή έχει ως αποτέλεσμα οποιοδήποτε βιοαποικοδομήσιμο απόβλητο να αποικοδομείται, να ουδετεροποιείται και να σταθεροποιείται σε ένα αδρανές πλέον υλικό. Ωστόσο, τα παραγόμενα αέρια της βιοαποικοδόμησης είναι το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα που έχουν χαρακτηριστεί ως υπεύθυνα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέση στόχους για μείωση των βιοαποικοδομήσιμων αποβλήτων τα οποία καταλήγουν σε ΧΥΤΑ, όπου βέβαια η διαδικασία πρέπει να είναι ελεγχόμενη ώστε να διασφαλιστεί η δημόσια υγεία και η απουσία κινδύνου για το περιβάλλον.

## 1.4 Οι κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία

Οι διάφορες δραστηριότητες που αφορούν τη διαχείριση απορριμμάτων παράγουν πλήθος ουσιών κυρίως σε μικρές ποσότητες που παρόλα αυτά αρκούν για να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα υγείας στον άνθρωπο σε βάθος χρόνου. Η παρακολούθηση όλων των πιθανών πηγών ρύπανσης είναι αδιάκοπη και μέχρι σήμερα γνωρίζουμε σε ικανοποιητικό βαθμό τα είδη και τις ποσότητες των ουσιών που προκύπτουν από αυτές. Για παράδειγμα, τα αέρια που εκπέμπονται από ΧΥΤΑ αποτελούνται κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, με τα υπόλοιπα αέρια όπως το υδρόθειο και οι ατμοί υδραργύρου να βρίσκονται σε μικρότερες συγκεντρώσεις και ένα μίγμα πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) να είναι περίπου στο 0.5%. Η καύση, που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας, επίσης παράγει ρύπους που εντάσσονται στις κατηγορίες των σωματιδίων, των αερίων και οργανικών ενώσεων. Οι δέκα ρύποι που θεωρούνται ότι έχουν τη μεγαλύτερη πιθανή επίπτωση στην υγεία του ανθρώπου βάσει της ανθεκτικότητάς τους, των ποσοτήτων που εκπέμπονται, της

βιοσυσσώρευσής\* τους και της έμφυτης τοξικότητάς τους είναι το κάδμιο, ο υδράργυρος, το αρσενικό, το χρώμιο, το νικέλιο, οι διοξίνες, PCBs, PAHs, PM<sub>10</sub> και το διοξείδιο του θείου (SO<sub>2</sub>). Βέβαια η μεγαλύτερη προσοχή αναφορικά με την καύση δίνεται στις διοξίνες, τα PCBs, και τα PM<sub>10</sub> εξαιτίας της δυνατότητάς τους να διεισδύουν και να συσσωρεύονται στο ανθρώπινο σώμα. Έρευνες παγκοσμίως έχουν επιδείξει σημαντική συνέπεια ως προς τη σύνδεση ανάμεσα στην έκθεση σε σωματιδιακούς ρύπους και σε σοβαρά προβλήματα υγείας όπως έκτακτες εισαγωγές σε νοσοκομεία κυρίως με καρδιαγγειακές και αναπνευστικές δυσλειτουργίες από τις οποίες, οι ευπαθείς ομάδες του πληθυσμού όπως τα βρέφη, οι ηλικιωμένοι και άτομα με χρόνια νοσήματα επηρεάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό. Ο βαθμός δυσκολίας στην καταγραφή των επιπτώσεων φαίνεται να αυξάνει στην περίπτωση των αερίων ρύπων καθώς δεν υπάρχει ανάλογη συνέπεια στα αποτελέσματα διαφόρων ερευνών. Με πιο απλά λόγια, οι άνθρωποι που υποφέρουν από άσθμα θεωρούνται επιρρεπείς σε αναπνευστικά προβλήματα όταν εισπνεύσουν SO<sub>2</sub> αλλά τα επίπεδα συγκέντρωσής του όταν αυτά τα προβλήματα εμφανίζονται διαφέρουν αρκετά μεταξύ των μελετών. Το συμπέρασμα από τα παραπάνω είναι ότι κάθε επέκταση των ευρημάτων έρευνας στην κλίμακα των χαμηλών επιπέδων έκθεσης σε ρύπους που κατά γενικές γραμμές συναντάται στον αέρα κρατών με ξεκάθαρη οικολογική πολιτική κρίνεται προβληματική.

Από την άλλη πλευρά είναι βέβαιο το γεγονός ότι η ανησυχία της πλειοψηφίας των πολιτών είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασής τους από κέντρα διαχείρισης αποβλήτων. Αυτό σημαίνει ότι είναι πολύ πιθανό σε δήμους που για παράδειγμα βρίσκονται κοντά σε μία εγκατάσταση αποτέφρωσης να υπάρχουν έντονες διαμαρτυρίες σχετικά με σοβαρά προβλήματα υγείας που θα προκύψουν για τους κατοίκους. Πρόκειται για συμπεριφορές που εντάσσονται στο σύνδρομο γνωστό με την ονομασία “not in my backyard” που αφορά όχι μόνο το πρόβλημα των αποβλήτων αλλά και αρκετές πρωτοβουλίες σε τομείς της τεχνολογίας όπου η κοινή γνώμη θεωρεί αποκλειστικά και μόνο επικίνδυνους όπως τα εργοστάσια θερμοπυρηνικής σύντηξης. Άλλη μία κατηγορία πολιτών που εμπλέκεται άμεσα στο ζήτημα είναι οι εργαζόμενοι αν και το ποσοστό έκθεσης και ρίσκου διαφέρει ανάμεσα στις μεθόδους διαχείρισης καθώς στις δύο κυριότερες, όπως η καύση και οι ΧΥΤΑ, τα επίπεδα αυτοματοποίησης των εργασιών είναι πολύ υψηλά σε σχέση με αυτές της συλλογής και ανακύκλωσης. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητη η σωστή ενημέρωση των πολιτών και η ανάπτυξη σχέσεων εμπιστοσύνης με την επιστημονική κοινότητα μέσα από τη διαρκή βελτίωση των προτύπων με τα οποία διεξάγονται οι έρευνες και την αυστηρότητα στην τήρηση των κανονισμών σχετικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση.

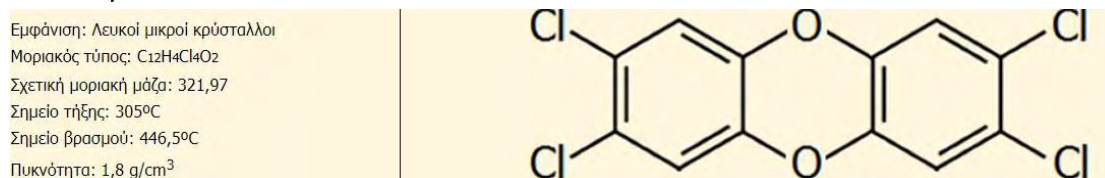
Η λύση των ατομικών μελετών υγείας μπορεί να αποτελέσει σημαντική καινοτομία του μέλλοντος για την διερεύνηση των πιθανών επιπτώσεων. Η επιδημιολογία (η μελέτη και ανάλυση της κατανομής και των παραγόντων υγείας και ασθενειών σε καθορισμένο πληθυσμό) αναπτύσσει τεχνολογία βιοδεικτών τόσο για τον υπολογισμό τόσο της έκθεσης όσο και της βιολογικής αντίδρασης. Οι βιοδείκτες επιτρέπουν την ανίχνευση των μικρών επιπέδων έκθεσης αλλά και τη συνολική επιβάρυνση της υγείας σε μία προσπάθεια κατανόησης του μηχανισμού σύνδεσης μεταξύ τους στον άξονα του χρόνου. Η επιλογή τους πρέπει να είναι προσεκτική και να μπορεί να υποστηρίξει ένα επιδημιολογικό σχέδιο. Ως παράδειγμα για καλύτερη κατανόηση είναι η χρήση των επιπέδων κοτινίνης στα ούρα ως επιβεβαίωση ότι ένα άτομο καπνίζει ενεργητικά ή παθητικά χωρίς όμως να υπάρχει η δυνατότητα εκτίμησης σχετικά με μακρόχρονη έκθεση και άρα ένας τέτοιος βιοδείκτης θα ήταν ακατάλληλος. Αντίθετα, βιοδείκτες

σχετικοί με γενετική ευαισθησία σε ουσίες είναι καθοριστικής σημασίας για μελέτες χρόνιων ασθενειών. Σε τελικό στάδιο συνδυάζοντας την επιδημιολογία με τη μοριακή τοξικολογία γεννάται η μοριακή επιδημιολογία που εξετάζει την αλληλεπίδραση των γενετικών και περιβαλλοντικών παραγόντων στην ανάπτυξη μίας ασθένειας και διαμορφώνει τις ευπαθείς ομάδες πληθυσμού που πλέον είναι επιστημονικά τεκμηριωμένες. Ας μη ξεχνούμε ότι η διαχείριση των αποβλήτων είναι απαραίτητο να σέβεται τα δικαιώματα των πολιτών και μέσω των ερευνών να βελτιώνει συνεχώς τις διαδικασίες της.

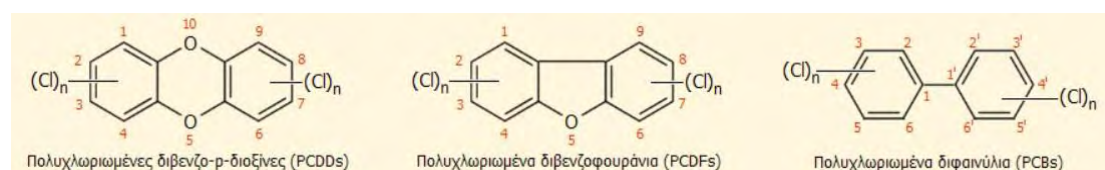
Στην παράγραφο αυτή αναφέρθηκαν οι κυριότεροι ρύποι που σχετίζονται με την καύση στερεών αποβλήτων και παρακάτω θα παρουσιαστούν με περισσότερη λεπτομέρεια αυτοί που συγκεντρώνουν τη μεγαλύτερη προσοχή της επιστημονικής κοινότητας.

- **Διοξίνες:** Ανήκουν στις χημικές ενώσεις που είναι ιδιαίτερα τοξικές για τον άνθρωπο και ανθεκτικές στη βιοαποικοδόμηση με ημιπερίοδο ζωής, δηλαδή μείωση στο 50% της αρχικής ποσότητας, να διαρκεί από 3 έως 30 χρόνια. Πρόκειται για πολυχλωριωμένες οργανικές ενώσεις που συναντώνται στο έδαφος, το νερό, τα τρόφιμα και τον αέρα αστικών και αγροτικών περιοχών σε συγκεντρώσεις από 0,1 μέχρι και άνω των 100 pg/kg ή pg/m<sup>3</sup>. Η κύρια πηγή τους είναι η ατελής καύση οργανοχλωριούχων ενώσεων, χλωριούχων πολυμερών (π.χ. PVC) αλλά και η καύση οργανικών υλικών παρουσία χλωριούχων αλάτων σε θερμοκρασίες 600°C–1000°C (π.χ. καύση κλάδων ελιάς σε παραθαλάσσιες περιοχές). Αποτελούν ανεπιθύμητα παραπροϊόντα διαφόρων βιομηχανικών διεργασιών όπως η καύση συμβατικών καυσίμων και η λεύκανση χαρτοπολτού. Αν και αρχικά οι διοξίνες θεωρήθηκαν αποκλειστικά ανθρωπογενείς ρύποι λόγω της αμελητέας παρουσίας τους σε δείγματα της προβιομηχανικής εποχής, μεταγενέστερα ερευνητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι σε δασικές πυρκαγιές παράγονται διοξίνες και μάλιστα σε μεγάλες ποσότητες.

Ο όρος διοξίνες είναι γενικός και αναφέρεται σε μία ομάδα 75 ομοειδών πολυχλωριωμένων διβενζο-p-διοξινών (PCDD). Επιπλέον, περιλαμβάνει και τα 135 ομοειδή πολυχλωριωμένα διβενζο-φουράνια (PCDF) που είναι γνωστά και ως φουράνια. Με τις διοξίνες εξετάζονται και ορισμένα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB). Η τοξικότητα όλων αυτών των πολυχλωριωμένων ενώσεων εξαρτάται από τον αριθμό και τη θέση των ατόμων χλωρίου στο μόριό τους. Οι γενικοί τύποι είναι οι ακόλουθοι:



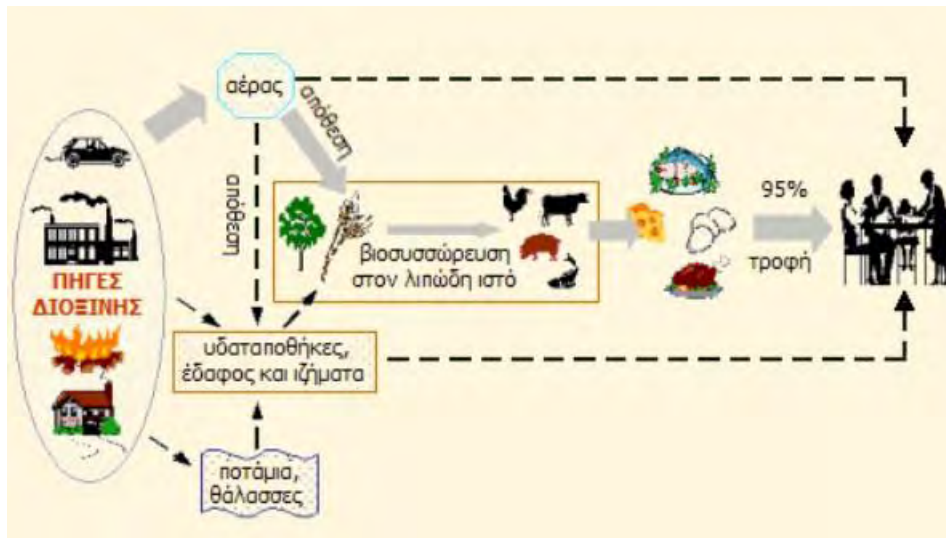
**Σχήμα 1.2:** Η διοξίνη 2,3,7,8-TCDD ΠΗΓΗ: Η χημική ένωση του μήνα (Ιούνιος 2010), Επιμέλεια σελίδας: Θανάσης Βαλαβανίδης, Καθηγητής - Κωνσταντίνος Ευσταθίου, Καθηγητής



**Σχήμα 1.3:** Η δομή των διοξινών ΠΗΓΗ: Η χημική ένωση του μήνα (Ιούνιος 2010), Επιμέλεια σελίδας: Θανάσης Βαλαβανίδης, Καθηγητής - Κωνσταντίνος Ευσταθίου, Καθηγητής

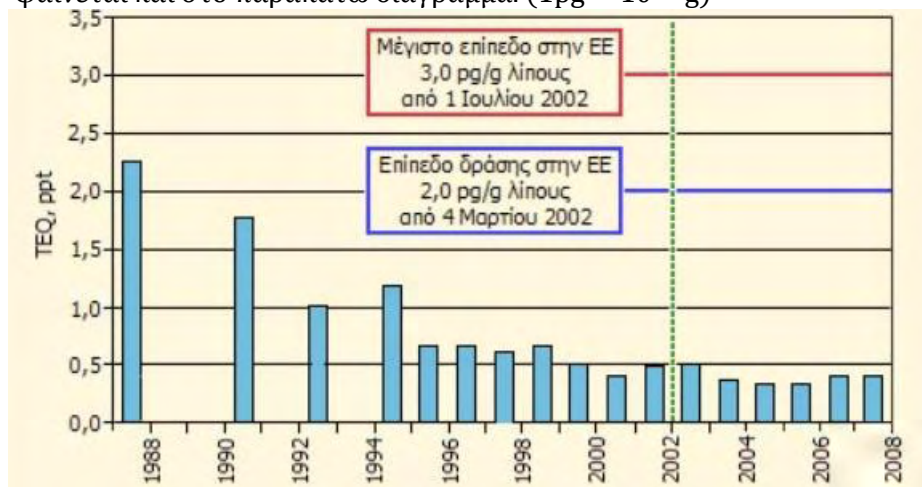


Οι διοξίνες εισέρχονται στην τροφική αλυσίδα κυρίως μέσω του αέρα ο οποίος τις μεταφέρει στο φυσικό αποδέκτη που είναι το έδαφος. Το ρυπασμένο χώμα κατακάθεται στα χόρτα και προσλαμβάνεται από τα ζώα (βοοειδή, χοίροι, κοτόπουλα κ.α.) κατά τη βοσκή τους (ελεύθερη ή ζωοτροφές) και επομένως συσσωρεύεται στο κρέας και άλλα προϊόντα (αυγά, γαλακτοκομικά) που διατίθεται στην κατανάλωση. Η ίδια διαδικασία συναντάται και στα υδάτινα περιβάλλοντα. Όσο περισσότερο ζει ένας οργανισμός, τόσο μεγαλύτερες συγκεντρώσεις διοξινών αναμένεται να υπάρχουν στους λιπώδεις ιστούς του. Εκτιμάται ότι το 90-95% της έκθεσης του ανθρώπου σε διοξίνες προέρχεται από τα τρόφιμα και το 80% αυτής από τρόφιμα ζωικής προέλευσης όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



*Σχήμα 1.4: Η «αλυσίδα» των διοξινών ΠΗΓΗ: Η χημική ένωση του μήνα (Ιούνιος 2010), Επιμέλεια σελίδας: Θανάσης Βαλαβανίδης, Καθηγητής - Κωνσταντίνος Ευσταθίου, Καθηγητής*

Ο Ευρωπαϊκός κανονισμός Νο 1881/2006 ορίζει τα ανώτερα όρια των διοξινών σε διάφορα τρόφιμα (κρέας, γάλα, αυγά, έλαια) σε τιμές από 1 έως 10 pg TEQ/g λίπους που κρίνονται ιδιαίτερα αυστηρές προδιαγραφές αλλά ταυτόχρονα αποδεικνύονται άκρως αποτελεσματικές μέσα από τους συνεχείς ελέγχους, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα. (1pg = 10<sup>-12</sup> g)



*Σχήμα 1.5: Μέση περιεκτικότητα γάλακτος σε διοξίνες το διάστημα 1987-2008 στη Γερμανία ΠΗΓΗ: Η χημική ένωση του μήνα (Ιούνιος 2010), Επιμέλεια σελίδας: Θανάσης Βαλαβανίδης, Καθηγητής - Κωνσταντίνος Ευσταθίου, Καθηγητής*

Ο όρος TEQ (Toxic Equivalent-Τοξικά Ισοδύναμη) είναι ένα μέτρο της συνολικής ποσότητας διοξινών εκφρασμένης σε 2,3,7,8-TCDD ή αλλιώς η ποσότητα 2,3,7,8-TCDD που προκαλεί τα ίδια τοξικά αποτελέσματα με τη δεδομένη ποσότητα μίγματος διοξινών. Πριν τον υπολογισμό του TEQ εισάγεται η έννοια του παράγοντα τοξικής ισοδυναμίας TEF (Toxic Equivalency Factors), ο οποίος χαρακτηρίζει καθεμία από τις πολυχλωριωμένες ενώσεις που αναφέρθηκαν και επιτρέπει τη μαθηματική μετατροπή της ποσότητας του μίγματος σε τοξικά ισοδύναμη ποσότητα 2,3,7,8-TCDD για την οποία εξ ορισμού τίθεται ότι TEF=1. Οι τιμές TEF αναθεωρούνται ανάλογα με τις νεότερες τοξικολογικές έρευνες ενώ διαφέρουν κατά κάποιους οργανισμούς. Για παράδειγμα υπάρχουν οι τιμές TEF του Παγκοσμίου Οργανισμού Υγείας (WHO-TEF).

PCDD	TEF	PCDF	TEF	PCB	TEF
2,3,7,8-τετραχλωρο-	1	2,3,7,8-τετραχλωρο-	0,1	3,3',4,4'-τετραχλωρο-	0,0001
1,2,3,7,8-πενταχλωρο-	1	1,2,3,7,8-πενταχλωρο-	0,03	3,4,4',5'-τετραχλωρο-	0,0003
1,2,3,4,7,8-εξαχλωρο-	0,1	2,3,4,7,8-πενταχλωρο-	0,3	2,3,3',4,4'-πενταχλωρο-	0,00003
1,2,3,6,7,8-εξαχλωρο-	0,1	1,2,3,4,7,8-εξαχλωρο-	0,1	2,3,4,4',5-πενταχλωρο-	0,00003
1,2,3,7,8,9-εξαχλωρο-	0,1	1,2,3,6,7,8-εξαχλωρο-	0,1	2,3',4,4',5-πενταχλωρο-	0,00003
1,2,3,4,6,7,8-επταχλωρο-	0,01	2,3,4,6,7,8-εξαχλωρο-	0,1	2',3,4,4',5-πενταχλωρο-	0,00003
οκταχλωρο-	0,0003	1,2,3,7,8,9-εξαχλωρο-	0,1	3,3',4,4',5-πενταχλωρο-	0,1
		1,2,3,4,6,7,8-επταχλωρο-	0,01	2,3,3',4,4',5-εξαχλωρο-	0,00003
		1,2,3,4,7,8,9-επταχλωρο-	0,01	2,3,3',4,4',5'-εξαχλωρο-	0,00003
		οκταχλωρο-	0,0003	2,3',4,4',5,5'-εξαχλωρο-	0,00003
				3,3',4,4',5,5'-εξαχλωρο-	0,03
				2,3,3',4,4',5,5'-επταχλωρο-	0,00003

**Σχήμα 1.6:** Πίνακας τιμών WHO-TEF (2005) **ΠΗΓΗ:** Η χημική ένωση του μήνα (Ιούνιος 2010), **Επιμέλεια σελίδας:** Θανάσης Βαλαβανίδης, Καθηγητής - Κωνσταντίνος Ευσταθίου, Καθηγητής

Μέσω του πίνακα αυτού μπορούμε για παράδειγμα να υπολογίσουμε την τοξικότητα μίγματος με βάση τον τύπο:

$$TEQ = (PCDD_i \times TEF_i) + (PCDF_i \times TEF_i) + (PCB_i \times TEF_i)$$

Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες ως προς τις ποσότητες διοξινών που εκλύονται κατά την καύση απορριμμάτων. Τυπικό παράδειγμα αποτελούν οι μελέτες καύσης οικιακών απορριμμάτων σε χαλύβδινα βαρέλια από τον Gullett (1999,2000). Οι μετρήσεις έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

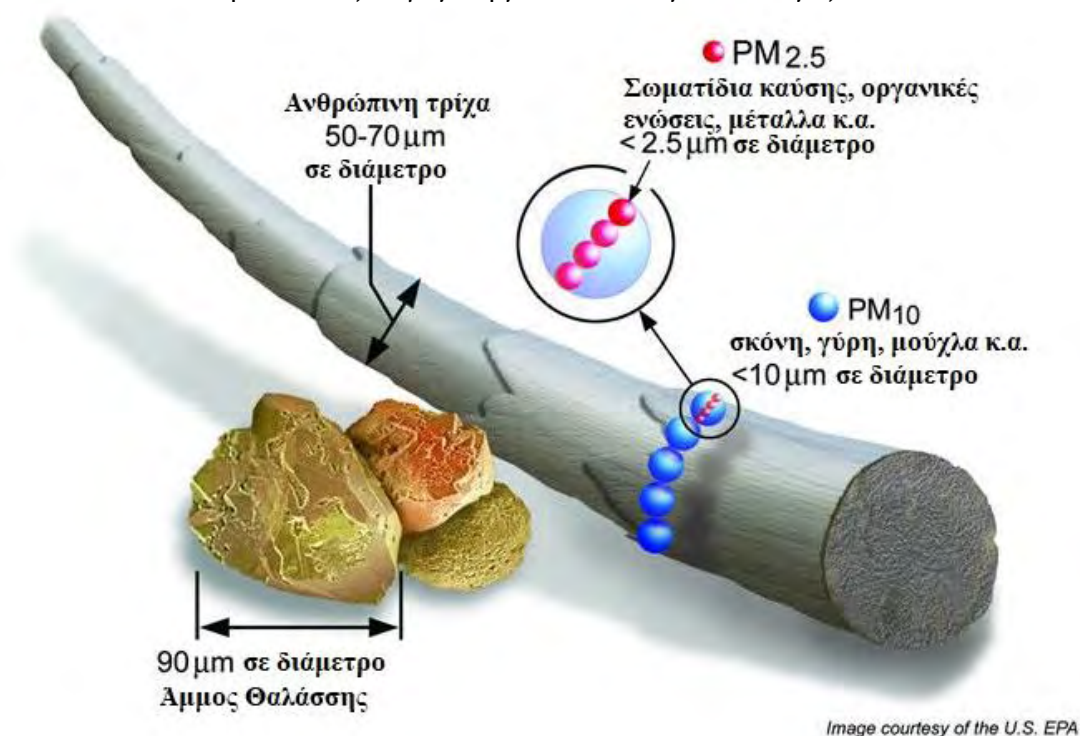
- 14 ng TEQ/kg απορριμμάτων που δεν περιείχαν PVC
- 79 ng TEQ/kg απορριμμάτων που περιείχαν 0,2% PVC
- 201 ng TEQ/kg απορριμμάτων που περιείχαν 1% PVC
- 4916 ng TEQ/kg απορριμμάτων που περιείχαν 7,5% PVC
- 734 ng TEQ/kg απορριμμάτων που περιείχαν CaCl<sub>2</sub> σε ποσότητα ισοδύναμη (ως προς το χλώριο) με 7,5% PVC

\*(1 ng = 10<sup>-9</sup> g)

Αξίζει να σημειωθεί ότι διαπιστώθηκε πως η παρουσία χάλκινων συρμάτων κατά την καύση απορριμμάτων που περιέχουν PVC αυξάνει τις παραγόμενες διοξίνες κατά 570 φορές στα εκλυόμενα αέρια και κατά 2000 φορές στην τέφρα. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η καύση απορριμμάτων σε σιδερένια δοχεία προκαλεί μεγαλύτερη παραγωγή διοξινών σε σχέση με την καύση σε ανοιχτό χώρο, γεγονός που αποδίδεται σε φαινόμενα επιφανειακής κατάλυσης.

Σε ό,τι αφορά τις εκπομπές διοξινών από βιομηχανικές διεργασίες στις οποίες περιλαμβάνεται και η καύση απορριμμάτων, το μέγιστο όριο είναι  $0,1 \text{ ng TEQ/m}^3$  αέρα. Ωστόσο, συνήθειες οι οποίες περιλαμβάνουν ανεξέλεγκτη καύση, όπως το ψήσιμο στα κάρβουνα, μπορούν να επιφέρουν σε απόσταση 8-10 μέτρα από την εστία ένα μέσο όρο  $0.6-0,7 \text{ ng TEQ/m}^3$  ο οποίος είναι 6-7 φορές πάνω από το όριο στις βιομηχανίες.

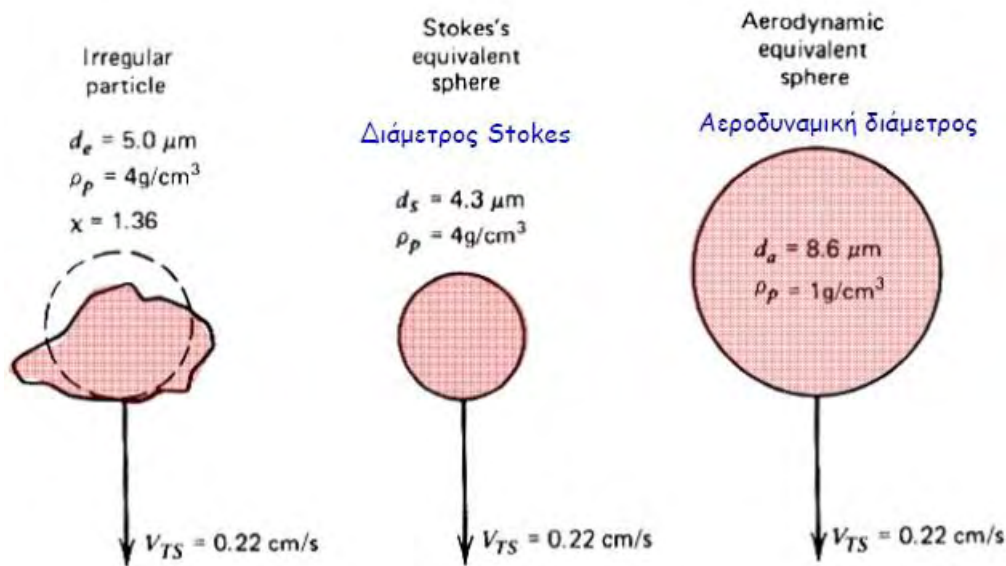
- **Αιωρούμενα σωματίδια (Particulate Matter-PM):** Τα PM αποτελούν μία εξίσου σημαντική κατηγορία αέριας ρύπανσης. Εκπέμπονται από πολλές διαφορετικές πηγές στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι βιομηχανικές διεργασίες με ή χωρίς καύση, οι κατασκευαστικές δραστηριότητες, τα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης και η αποτέφρωση απορριμμάτων. Μερικές από τις φυσικές πηγές των σωματιδίων είναι τα ηφαίστεια, οι πυρκαγιές στα δάση, οι ανεμοθύελλες, η γύρη των φυτών και τα σταγονίδια των ωκεανών. Τα σημαντικά χαρακτηριστικά τους είναι το μέγεθός τους και η κατανομή του, το σχήμα τους, η πυκνότητά τους, η ικανότητα διάβρωσης και η τοξικότητά τους. Ο δείκτης (π.χ.  $\text{PM}_{10}$ ) δηλώνει ότι γίνεται αναφορά σε μία ομάδα σωματιδίων, των οποίων η αεροδυναμική διάμετρος δε ξεπερνά την τιμή αυτού σε μονάδες μέτρησης μικρομέτρων ( $1\mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm}$ ). Ενδεικτικά ακολουθεί το παρακάτω σχήμα για να κατανοήσει κανείς τα μεγέθη για τα οποία γίνεται λόγος.



**Σχήμα 1.7:** Σύγκριση μεγεθών σωματιδίων **ΠΗΓΗ: U.S. EPA**

Στην πραγματικότητα, το σχήμα ορισμένων διαφέρει πολύ από το σχήμα της σφαίρας για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται κάποια βοηθητικά μεγέθη όπως η αεροδυναμική διάμετρος ή η διάμετρος Stokes ώστε να μελετηθεί η δυναμική των σωματιδίων αυτών κατά την κίνησή τους μέσα σε ένα ρευστό (π.χ. αέρας) και να βρεθεί ο τρόπος συλλογής τους μέσω κατάλληλων συσκευών. Αναλυτικότερα, η αεροδυναμική διάμετρος ορίζεται ως η διάμετρος μίας σφαίρας με μοναδιαία πυκνότητα (πυκνότητα του νερού,  $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ), η οποία θα καθιζάνει σε ακίνητο αέρα με τον ίδιο ρυθμό με το υπό εξέταση σωματίδιο (Friedlander 1977)

και η διάμετρος Stokes ως η διάμετρος σφαίρας που έχει την ίδια πυκνότητα και ίδιο και ίδιο ρυθμό καθίζησης με το υπό εξέταση σωματίδιο.



**Σχήμα 1.8:** Ακανόνιστο σωματίδιο και ισοδύναμες σφαίρες με κοινή ταχύτητας καθίζησης  $V_{TS}$   
**ΠΗΓΗ:** Σημειώσεις μαθήματος «Τεχνολογία Βιομηχανικής Αντιρρύπανσης», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Το μέγεθος των σωματιδίων μπορεί να εκτιμηθεί με μικροσκοπία αλλά και μέσω της ταχύτητας καθίζησης και πρόκειται για μία σημαντική πληροφορία καθώς επηρεάζει άμεσα την καθημερινότητα του ανθρώπου στους τομείς της υγείας, του περιβάλλοντος (π.χ. μειωμένη ορατότητα λόγω σκέδασης και απορρόφησης του φωτός) και του σχεδιασμού αντιρρυπαντικής τεχνολογίας.

Σε ό,τι αφορά τη συμπεριφορά τους ως προς την ανθρώπινη υγεία, τα προβλήματα εντοπίζονται στο αναπνευστικό σύστημα όπου τα  $PM_{<100\mu m}$  είναι εισπνεύσιμα, τα  $PM_{<10\mu m}$  διασχίζουν το λάρυγγα και τους πνεύμονες ενώ τα  $PM_{<4\mu m}$  φτάνουν ακόμα και στην περιοχή όπου γίνεται η ανταλλαγή αερίων με αυξημένη πιθανότητα να εισέλθουν στο αίμα.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση και ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας παρέχουν οδηγίες σχετικά με τη συγκέντρωση των σωματιδίων αυτών σε χρονικά διαστήματα μίας ημέρας και ενός έτους διαμορφώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο ένα πρότυπο ποιότητας αέρα, το οποίο καλούνται να εφαρμόσουν τα κράτη.

Οδηγίες ποιότητας αέρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης				Οδηγίες ποιότητας αέρα του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WHO)	
Ρύπος	Μέση Περίοδος	Όριο Συγκέντρωσης ( $\mu g/m^3$ )	Παρατηρήσεις	Όριο Συγκέντρωσης ( $\mu g/m^3$ )	Παρατηρήσεις
$PM_{2.5}$	1 ημέρα	—		25	99% percentile (3 ημέρες/έτος)
$PM_{2.5}$	1 έτος	25	Δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερες από 35 ημέρες το χρόνο. Το όριο αυτό πρέπει να τηρείται από την 01.01.2015.	10	
$PM_{10}$	1 ημέρα	50	Το όριο αυτό πρέπει τηρείται από την 01.01.2015.	50	99% percentile (3 ημέρες/έτος)
$PM_{10}$	1 έτος	40		20	

**Σχήμα 1.9:** Οδηγίες ποιότητας αέρα (EU-WHO)  $PM_{2.5}$  &  $PM_{10}$  **ΠΗΓΗ:** European Environment Agency

Μάλιστα η οδηγία (Directive/2008/50/EC) παρουσίασε επιπρόσθετους στόχους σχετικά με την έκθεση των πολιτών σε  $PM_{2.5}$ . Αυτοί βασίζονται στο μέσο δείκτη έκθεσης που αφορά ολόκληρο το κράτος (Average Exposure Indicator) και

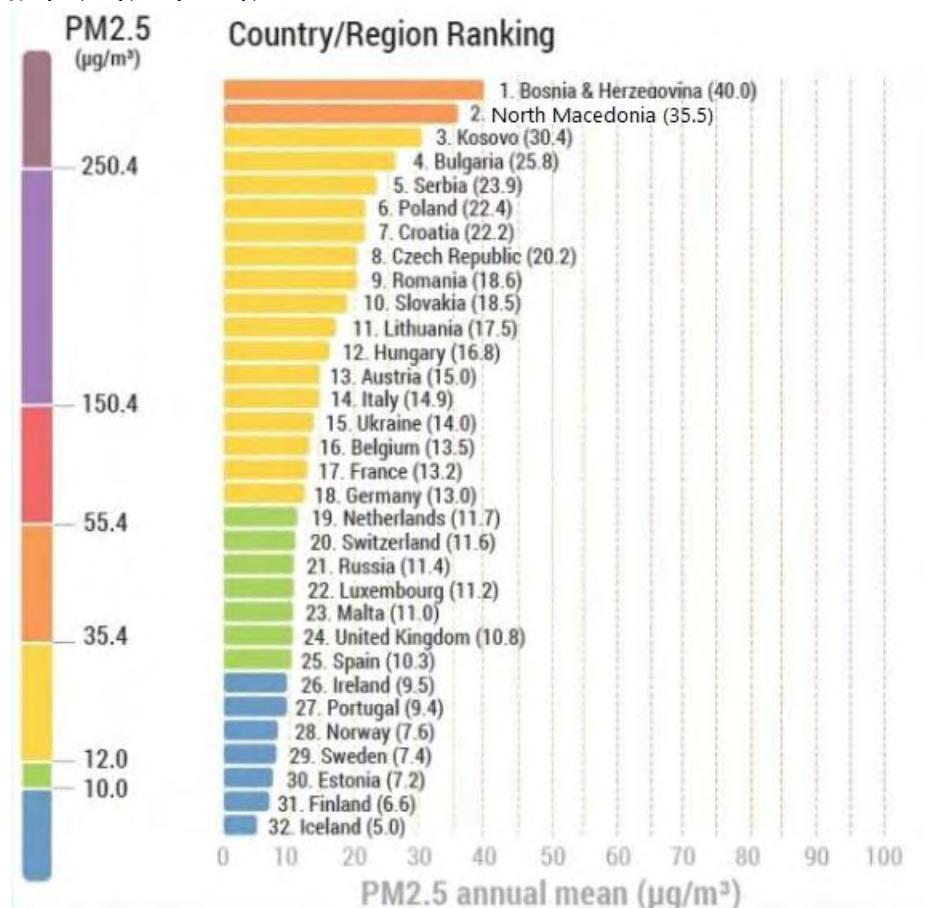
προκύπτει από το μέσο όρο των μέσων όρων συγκέντρωσης PM<sub>2.5</sub> που καταγράφηκαν σε σταθμούς μέτρησης εντός αστικών περιοχών κατά τη διάρκεια τριών συνεχόμενων ετών.

Ρύπος	Μέση Περίοδος	Όριο Συγκέντρωσης (μg/m <sup>3</sup> )	Παρατηρήσεις
PM <sub>2.5</sub> Υποχρεωτικό όριο έκθεσης	Μέσος όρος 3 ετών	20 (ΑΕΙ)	Δεσμευτικό από 01.01.2015
PM <sub>2.5</sub> Στόχος μείωσης έκθεσης	Μέσος όρος 3 ετών	Ποσοστό μείωσης* + όλα τα μέτρα να συμβάλλουν σε 18 (ΑΕΙ)	Η μείωση πρέπει να υπάρξει μέχρι το 2020 σε περιπτώσεις όπου είναι εφικτή, καθορισμένη από την τιμή της έκθεσης το 2010.

\*Ανάλογα με την τιμή ΑΕΙ του 2010, η οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης απαιτεί ποσοστό μείωσης (0,5,10 ή 20%). Εάν η τιμή ΑΕΙ το 2010 εκτιμάται πάνω από 22 μg/m<sup>3</sup>, χρειάζεται να εφαρμοστούν τα απαραίτητα μέτρα ώστε η τιμή ΑΕΙ να μειωθεί σε 18 μg/m<sup>3</sup> μέχρι το 2020.

*Σχήμα 1.10: Πρόσθετες οδηγίες σχετικά με PM<sub>2.5</sub> (ΕU) ΠΗΓΗ: European Environment Agency*

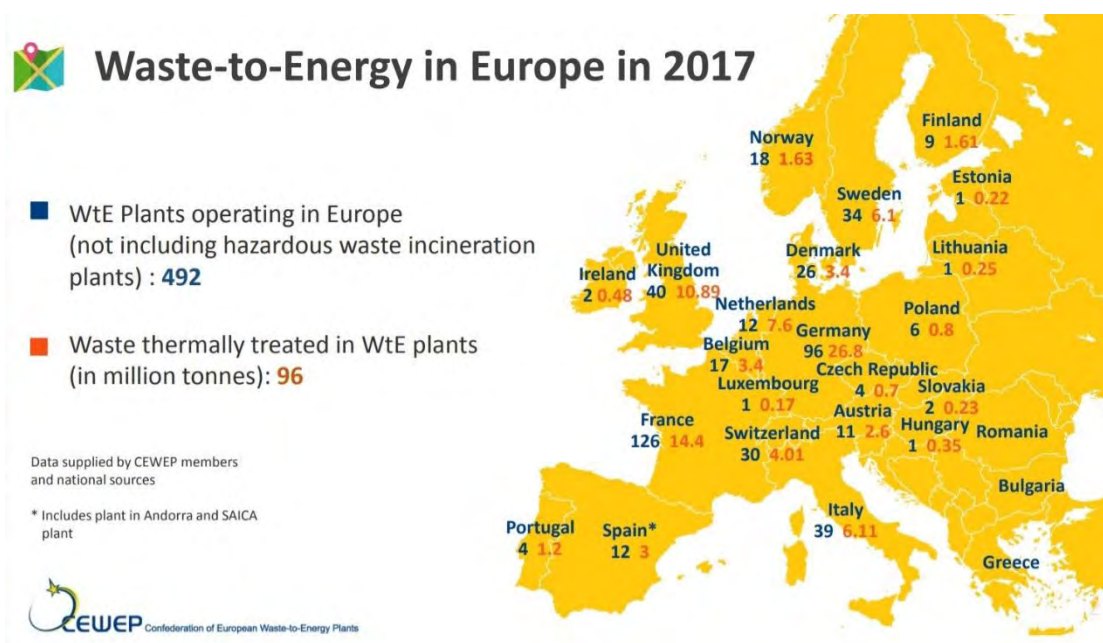
Στη συνέχεια, ακολουθεί ένα γράφημα με τη μέση ετήσια συγκέντρωση PM<sub>2.5</sub> σε χώρες της Ευρώπης.



*Σχήμα 1.11: Ετήσια μέση συγκέντρωση PM<sub>2.5</sub> σε χώρες της Ευρώπης (ΕU) ΠΗΓΗ: Balkan Green Energy News (6 Μαρτίου 2019)*

Παρατηρούμε ότι όλες οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με εξαίρεση την Βουλγαρία, συμμορφώνονται με το ετήσιο όριο των 25 μg/m<sup>3</sup> ενώ το μεγαλύτερο πρόβλημα αέριας ρύπανσης εντοπίζεται σε χώρες των Βαλκανίων, με τους

πολίτες στις χώρες αυτές να αναπνέουν τον πιο ρυπασμένο αέρα στην Ευρώπη. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι στις χώρες που βρίσκονται στις πρώτες θέσεις αέριας ρύπανσης δεν υφίσταται σχέδιο διαχείρισης απορριμμάτων που να περιλαμβάνει εγκαταστάσεις καύσης όπως επαληθεύει το παρακάτω γράφημα.



**Σχήμα 1.12:** Η καύση απορριμμάτων στην Ευρώπη **ΠΗΓΗ:** Confederation of European Waste-to-Energy Plants

Το γεγονός αυτό έρχεται ως απόδειξη στο γεγονός ότι η καύση απορριμμάτων δε δύναται από μόνη της να υποβαθμίσει την ποιότητα του αέρα καθώς χώρες που εφαρμόζουν την πρακτική αυτή εμφανίζουν αρκετά χαμηλότερες ετήσιες συγκεντρώσεις  $PM_{2.5}$ .

- **Διοξείδιο του θείου ( $SO_2$ ):** Πρόκειται για μία ανόργανη χημική ένωση που αποτελεί το κύριο προϊόν της καύσης ουσιών που περιέχουν θείο. Οι γαιάνθρακες (κάρβουνο), το πετρέλαιο και παράγωγά τους περιέχουν θείο με αποτέλεσμα να είναι αναπόφευκτη η παραγωγή  $SO_2$  κατά την καύση τους. Στις φυσικές πηγές  $SO_2$  εντάσσονται οι πυρκαγιές, οι εκρήξεις ηφαιστειών και η σκόνη από απογυμνωμένο έδαφος. Η απελευθέρωσή του στην ατμόσφαιρα, σε συνδυασμό με την υγρασία και με παρουσία κάποιου καταλύτη όπως το διοξείδιο του αζώτου οδηγεί σε οξειδωσή του, δηλαδή μετατροπή σε τριοξείδιο του θείου το οποίο όταν διαλυθεί στο νερό δίνει θειικό οξύ με αποτέλεσμα ένα τέτοιο φαινόμενο όταν λαμβάνει χώρα στην ατμόσφαιρα να αποτελεί τη γνωστή όξινη βροχή. Η όξινη απόθεση είναι επιβλαβής στα δάση, τις καλλιέργειες (προκαλεί απώλεια της χλωροφύλλης), το έδαφος και τα νερά όπου μεταβάλλει την τιμή οξύτητας (pH) και επηρεάζει κάθε μορφή υποθαλάσσιας ζωής. Οι επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό είναι ερεθισμός στα μάτια, τη μύτη και το λαιμό ενώ συνεισφέρει ιδιαίτερα στη μείωση της ορατότητας σε αστικά κέντρα, δηλαδή στην αστική

«ομίχλη». Η Ευρωπαϊκή Ένωση παρέχει τις παρακάτω οδηγίες σχετικά με τη συγκέντρωση του SO<sub>2</sub> στον αέρα.

Οδηγίες ποιότητας αέρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης			
Ρύπος	Μέση Περίοδος	Όριο Συγκέντρωσης (μg/m <sup>3</sup> )	Παρατηρήσεις
SO <sub>2</sub>	1 ώρα	350	Δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερες από 24 φορές σε ένα έτος. Το όριο αυτό πρέπει να τηρείται από την 01.01.2005.
SO <sub>2</sub>	1 ημέρα	125	Δεν πρέπει να υπερβαίνεται περισσότερες από 3 φορές σε ένα έτος. Το όριο αυτό πρέπει να τηρείται από την 01.01.2005.

*Σχήμα 1.13: Οδηγίες ποιότητας αέρα (EU-WHO) SO<sub>2</sub> ΠΗΓΗ: European Environment Agency*

Σε παρακάτω κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στις κύριες τεχνικές απομάκρυνσης των κυριότερων ρύπων από ρεύμα καυσαερίων.

Τέλος, για άλλη μία φορά πρέπει να τονιστεί ότι οποιαδήποτε δραστηριότητα καύσης απορριμμάτων πρέπει να γίνεται σε εγκαταστάσεις όπου τηρούν τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ως προς τις εκπομπές και τον εξοπλισμό αντιρρυπαντικής τεχνολογίας με διαφάνεια προκειμένου να χτιστούν σχέσεις εμπιστοσύνης με τους πολίτες οι οποίοι πιστεύουν ότι η υγεία τους βρίσκεται σε κίνδυνο λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των οικιών τους και των εγκαταστάσεων.

# 2

## Η ΚΑΥΣΗ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ

### 2.1 Εισαγωγή

Για τις περισσότερες χώρες του κόσμου, οι Χ.Υ.Τ.Α. είναι η κυρίαρχη επιλογή στη διαχείριση των απορριμμάτων. Στην τρέχουσα δεκαετία 2010-2020, η επιλογή της καύσης των απορριμμάτων παρουσιάζεται ενισχυμένη στις ισχυρές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, η καύση είναι η οξείδωση του εύφλεκτου υλικού που περιέχεται στα απορρίμματα που έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θερμότητας, ατμού, αζώτου, διοξειδίου του άνθρακα και οξυγόνου. Βέβαια, ανάλογα με τη σύνθεσή τους προκύπτουν εκπομπές που περιέχουν VOC, SO<sub>2</sub>, διοξίνες, φουράνια κ.α. Η απομάκρυνση τέτοιων ρύπων στα καυσαέρια μίας εγκατάστασης απαιτεί μεγάλα σε όγκο, σύνθετα ως προς τη δομή και ακριβά συστήματα αντιρρυπαντικής τεχνολογίας.

Η καύση έχει ένα πλήθος πλεονεκτημάτων σε σύγκριση με τους Χ.Υ.Τ.Α.

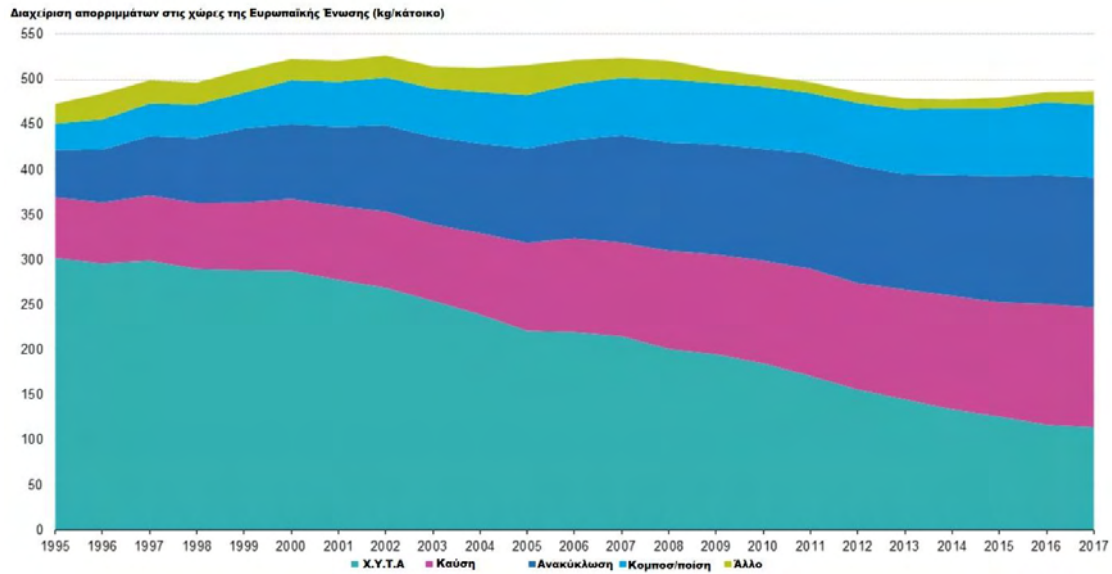
- Η καύση συνήθως μπορεί να εκτελείται κοντά στο σημείο συλλογής των απορριμμάτων. Σε μεγάλες πόλεις, ο αριθμός των Χ.Υ.Τ.Α. που βρίσκονται κοντά σε σημείο συλλογής διαρκώς μειώνεται με αποτέλεσμα να απαιτείται μεταφορά των απορριμμάτων σε μεγάλες αποστάσεις και επομένως πρόσθετα οικονομικά έξοδα.
- Τα απορρίμματα μετατρέπονται σε μία βιολογικά ανενεργή στάχτη η οποία αποτελεί μόλις το 10% του όγκου και το 33% της μάζας πριν την καύση.
- Δεν παράγεται μεθάνιο το οποίο όπως γνωρίζουμε ανήκει στα αέρια του θερμοκηπίου.
- Προσφέρει την επιλογή εξοικονόμησης των κύριων πηγών ενέργειας.
- Η τέφρα που συλλέγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύον δομικό υλικό.
- Αποτελεί την καλύτερη επιλογή προστασίας του περιβάλλοντος από επικίνδυνα απόβλητα όπως τοξικά και μολυσματικά.

Ωστόσο, δε παραλείπονται και τα μειονεκτήματα.

- Απαιτείται υψηλό κεφάλαιο επένδυσης με μεγάλη περίοδο απόσβεσης.
- Δεν υπάρχει η δυνατότητα ευελιξίας ως προς τις επιλογές διαχείρισης απορριμμάτων καθώς από τη στιγμή που γίνει η επιλογή της καύσης τότε η εγκατάσταση δεσμεύεται από μακροχρόνια συμβόλαια λειτουργίας.
- Ο αποτεφρωτήρας σχεδιάζεται με συγκεκριμένο θερμικό καθήκον. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε μη σχεδιασμένη μείωση υλικών στα απορρίμματα μπορεί να επηρεάσει την απόδοσή του.
- Αν και οι σύγχρονες εγκαταστάσεις συμμορφώνονται με την υπάρχουσα νομοθεσία σε ό,τι αφορά τις εκπομπές ρύπων, υπάρχει ανησυχία της κοινής γνώμης ότι δε διασφαλίζεται η δημόσια υγεία.
- Η παραγόμενη τέφρα δε παύει να αποτελεί στερεό απόβλητο που με τη σειρά του απαιτεί διαχείριση.



Με βάση τα στατιστικά της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η καύση αυξάνει συνεχώς το ποσοστό συμμετοχής της στη διαχείριση των απορριμμάτων όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.1: Διαχείριση απορριμμάτων στην Ε.Ε. ΠΗΓΗ: Eurostat

eurostat

## 2.2 Συστήματα καύσης

Ένα σύγχρονο κέντρο αποτέφρωσης αποτελείται από ένα αποδοτικό σύστημα καύσης με εκλεπτυσμένη αντιρρυπαντική τεχνολογία που στοχεύει στην παραγωγή ενέργειας και μετατροπή των απορριμμάτων σε αδρανή υπολείμματα με το ελάχιστο δυνατό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Μία συχνή κατηγοριοποίηση μεταξύ των κέντρων αποτέφρωσης είναι η παρακάτω.

**Κέντρα μαζικής καύσης:** Μεγάλης κλίμακας καύση αστικών αποβλήτων σε μία μονάδα με θάλαμο όπου η πλήρης καύση ή οξειδωση ολοκληρώνεται σε ένα στάδιο. Τυπικές ποσότητες αποβλήτων που επεξεργάζονται κυμαίνονται μεταξύ 10 και 50 t/h.

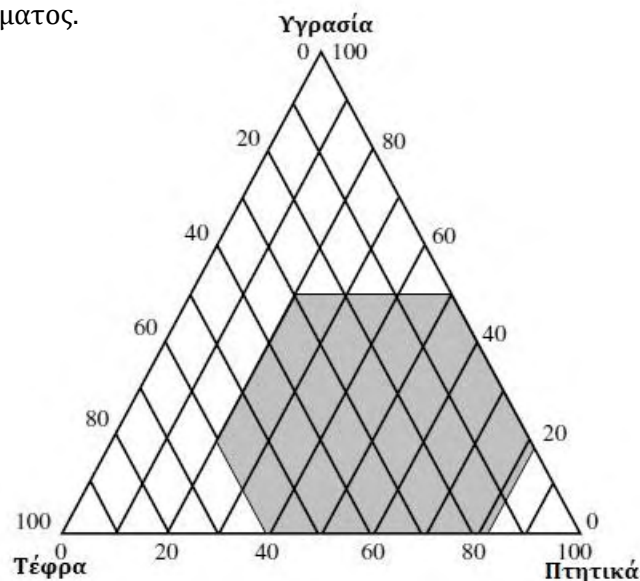
**Κέντρα διαφόρων ειδών καύσης:** Περιλαμβάνονται κέντρα μικρότερης κλίμακας ως προς την ποσότητα των αποβλήτων προς επεξεργασία που δε ξεπερνά τους 1 με 2 t/h. Τα απόβλητα που οδηγούνται σε τέτοιες εγκαταστάσεις είναι κυρίως νοσοκομειακά, λυματολάσπη και επικίνδυνα απόβλητα. Παραδείγματα τέτοιων εγκαταστάσεων είναι τα διυλιστήρια πετρελαίου και οι τσιμεντοβιομηχανίες.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, τα απορρίμματα είναι ετερογενή ως προς τη σύστασή τους η οποία είναι και αυτή που καθορίζει τις ιδιότητές τους ως προς την καύση και φυσικά τις εκπομπές ρύπων που παράγονται από το σύστημα. Ακολουθεί μία απεικόνιση των βασικών συστατικών.

ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ (kg/m <sup>3</sup> )
Υπολείμματα τροφών	290
Χαρτιά	85
Χαρτόνια	50
Πλαστικά	65
Γυαλιά	195
Μέταλλα	210
Κονσέρβες	90
Απορρίμματα κήπων	105
Στάχτη, σκόνη, τούβλα, κτλ	480
Δέρμα	160
Υφάσματα	240
Αδρανή άνω των 20mm	250
Αδρανή κάτω των 20mm	480

*Σχήμα 2.2*: Βασικά Συστατικά Απορριμμάτων ΠΗΓΗ: Διαχείριση Στερεών Απορριμμάτων Ν.Ανδρίτσος (βασιζεται σε σημειώσεις του Π. Σαμαρά)

Η τυπική θερμογόνο δύναμη των απορριμμάτων έχει εκτιμηθεί ότι κυμαίνεται από **5 έως 11 MJ/kg**. Βέβαια, η υψηλή περιεχόμενη υγρασία καθώς και το ποσό της παραγόμενης τέφρας είναι χαρακτηριστικά που δεν ευνοούν τη σύγκριση με ένα συμβατικό καύσιμο όπως για παράδειγμα το κάρβουνο (25-33 MJ/kg). Η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι κατανοητό ότι εμποδίζει την ανάφλεξη αλλά καθορίζει και την «καθαρή» θερμογόνο δύναμη που μπορεί να παρέχει ένα καύσιμο. Όμοια, ένα υψηλό ποσοστό τέφρας μειώνει τη θερμογόνο δύναμη ενώ απαιτούνται σύντομα ενέργειες συλλογής και απόρριψής της. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι εγκαταστάσεις έχουν περιορισμένο έλεγχο ως προς την ακριβή σύνθεση των απορριμμάτων. Επομένως, οι καυστήρες στην περίπτωση των εγκαταστάσεων μαζικής καύσης είναι σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να είναι ευέλικτοι και να διαχειριστούν επαρκώς την μεγάλη ποικιλία υλικών που καταλήγουν σε αυτούς. Αυτή η μεγάλη ποικιλία μπορεί να παρουσιαστεί επίσης σε ένα διάγραμμα συμπλέγματος.



*Σχήμα 2.3*: Γενικότερη σύνθεση απορριμμάτων ΠΗΓΗ: Waste Treatment & Disposal, Paul T. Williams

Η σκιασμένη περιοχή περιγράφει μία σύσταση απορριμμάτων η οποία μπορεί να υποστηρίξει διαδικασία καύσης χωρίς να απαιτείται βοηθητικό καύσιμο και επιπλέον περικλείει την ελάχιστη αποδεκτή θερμογόνο δύναμη όπως και τη μέγιστη επιτρεπτή υγρασία του περιεχομένου. Καθοριστική βέβαια είναι και οποιαδήποτε επιλογή διαχείρισης απορριμμάτων προηγηθεί της καύσης. Για παράδειγμα, η αφαίρεση γυαλιού και μετάλλων για ανακύκλωση θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμογόνου δύναμης και μείωση των μετάλλων στις εκπομπές είτε στα καυσαέρια ή στην τέφρα που συλλέγεται. Όμοια, αύξηση δύναται να επιτευχθεί μέσω της ανακύκλωσης οργανικών υπολειμμάτων τροφής, παραδείγματος χάρη για λιπασματοποίηση, που θα μειώνει την περιεχόμενη υγρασία. Αντίθετα, αν προηγηθεί συλλογή του χαρτιού και του πλαστικού τότε μειώνεται η θερμογόνος δύναμη.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που απαιτείται να υπάρχει μέχρι και το στάδιο της καύσης σε μία σύγχρονη εγκατάσταση.

### 2.2.1 Σύστημα διανομής, αποθήκευσης & τροφοδοσίας απορριμμάτων

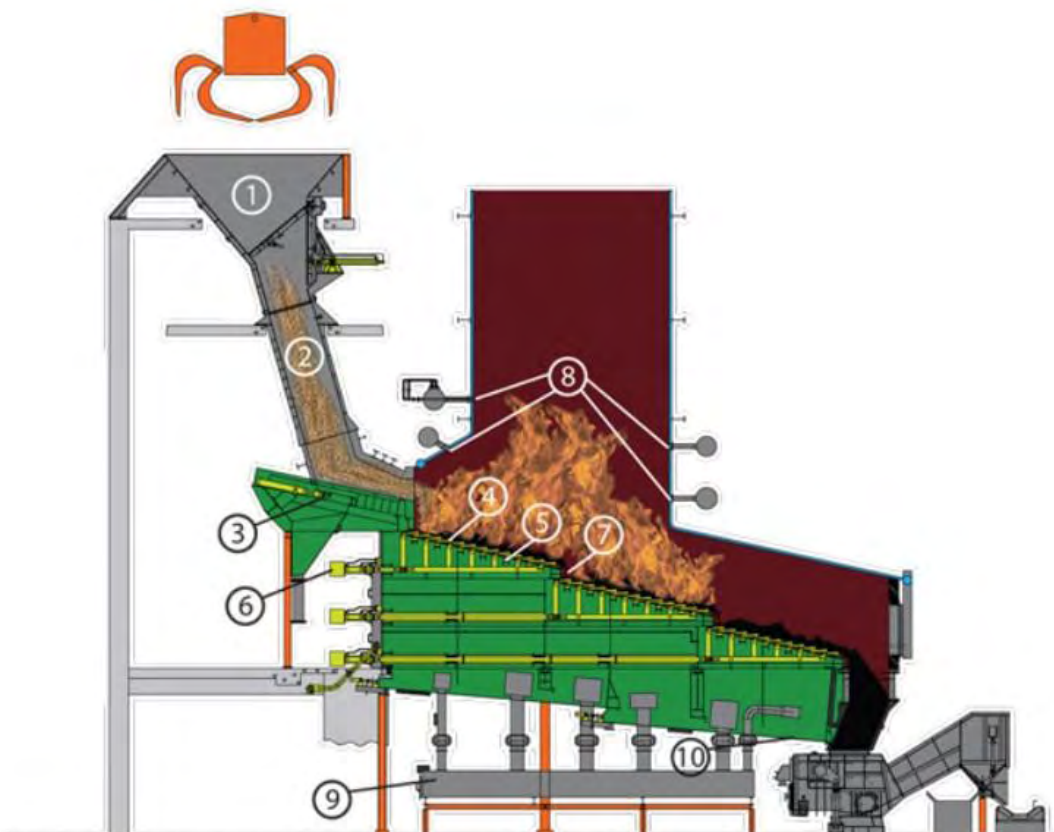
Τα απορρίμματα συνήθως διανέμονται μέσω απορριμματοφόρων οχημάτων αν και σε μερικές Ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται ειδικά διαμορφωμένα πλοία ή τρένα. Τα απορριμματοφόρα ζυγίζονται κατά την άφιξη και την αναχώρησή τους παρέχοντας έγκυρα δεδομένα της μάζας των απορριμμάτων που εισρέουν στο σύστημα προκειμένου να υπολογιστούν τα έξοδα που αφορούν την απόρριψή τους και να διασφαλιστεί ο έλεγχος της λειτουργίας του αποτεφρωτήρα. Αν γίνεται λόγος για εγκαταστάσεις που βρίσκονται εντός αστικού ιστού τότε σημαντική είναι η αντιμετώπιση των οσμών που είναι βέβαιο ότι θα προκύψουν λόγω βιοαποικοδόμησης και διαδικασίας διανομής. Για το λόγο αυτό, οι χώροι αποθήκευσης των απορριμμάτων βρίσκονται σε ελαφρώς χαμηλότερη πίεση καθώς ο αέρας που συμμετέχει στην καύση λαμβάνεται από αυτούς και εμποδίζεται η διαφυγή οσμών. Επιπλέον, οι χώροι αυτοί έχουν τέτοιο μέγεθος ώστε να μπορούν να επιφέρουν ισορροπία ανάμεσα στο ρυθμό διανομής απορριμμάτων και στο ρυθμό καύσης. Επομένως, ένας τυπικός σχεδιασμός τέτοιου χώρου προσφέρει χωρητικότητα ισοδύναμη με τη μάζα απορριμμάτων που καίγονται σε 2 έως 3 ημέρες αφού δεν επιτρέπεται μεγαλύτερη περίοδος αναμονής κυρίως λόγω του προβλήματος των οσμών που δημιουργείται. Η εκφόρτωση των απορριμμάτων από τα οχήματα λαμβάνει χώρα σε αποβάθρες και για την ανάμιξη υλικών με διαφορετική θερμογόνο δύναμη και διαφορετικές ιδιότητες κατά την καύση χρησιμοποιείται ένας κινούμενος γερανός ο οποίος λαμβάνει τα απορρίμματα και τα τοποθετεί στο μηχανισμό τροφοδοσίας του αποτεφρωτήρα ενώ απομακρύνει ογκώδη αντικείμενα ή επικίνδυνα αντικείμενα προκειμένου να επεξεργαστούν ξεχωριστά. Ο γερανός μπορεί κάθε φορά να μεταφέρει μέχρι και 6 m<sup>3</sup> απορριμμάτων.

Το σύστημα τροφοδοσίας αποτελείται από μία χαλύβδινη χοάνη όπου τα απορρίμματα ρέουν υπό την επίδραση του βάρους και στη συνέχεια οδηγούνται από ένα έμβολο ή άλλο μεταφορικό σύστημα, χωρίς να δημιουργούνται φαινόμενα γεφυροποίησης ή φραγμού, προς μία κινούμενη σχάρα η οποία διασχίζει το εσωτερικό του κλιβάνου. Η χοάνη διατηρείται μερικώς γεμάτη με σκοπό να ελαχιστοποιείται η διαρροή οσμών στο εσωτερικό του κλιβάνου και να μη διακόπτεται η τροφοδοσία στη σχάρα. Παράλληλα, με χρήση μέσων εικόνας πραγματοποιείται η μέτρηση της ποσότητας των απορριμμάτων που βρίσκονται στη χοάνη. Στην είσοδο του κλιβάνου τοποθετούνται υδραυλικά πάνελ τα οποία απομονώνουν τα απορρίμματα που έχουν εισέλθει στον κλίβανο και διασφαλίζουν ότι η φωτιά δε θα επεκταθεί προς τα πίσω, δηλαδή προς τη χοάνη και το

χώρο αποθήκευσης γεγονός που θα ήταν καταστροφικό. Τέλος, η σάρα τροφοδοσίας συχνά ψύχεται με νερό ή είναι κατασκευασμένη από πυρίμαχο υλικό ώστε να αποφεύγεται μία πιθανή πυρκαγιά εκτός του κλιβάνου. Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά το σύστημα.



*Σχήμα 2.4: Χώρος αποθήκευσης απορριμμάτων ΠΗΓΗ: Greatmoor Waste to Energy plant , Buckinghamshire, UK, [www.greatmoor.co.uk](http://www.greatmoor.co.uk)*



1. Χοάνη 2. Λαιμός χοάνης 3. Έμβολο 4. Κινούμενη σχάρα 5. Ρουλεμάν 6. Άξονας μεταφοράς ισχύος 7. Κάθετη πτώση 8. Δευτερεύουσα παροχή αέρα 9. Κύρια παροχή αέρα 10. Αυτόματο σύστημα μεταφοράς κίνησης στο σύστημα απομάκρυνσης υπολειμμάτων

*Σχήμα 2.5: Σύστημα τροφοδοσίας & κλίβανος απορριμμάτων ΠΗΓΗ: Detroit Stoker Company, εταιρία πάροχος εξοπλισμού εγκαταστάσεων καύσης, [www.detroitstoker.com](http://www.detroitstoker.com)*

### 2.2.2 Κλίβανος

Στο σχήμα 2.5 απεικονίζεται επίσης ένας τυπικός κλίβανος. Κάθε εγκατάσταση μπορεί να αποτελείται από αρκετούς κλιβάνους οι οποίοι τροφοδοτούνται από το χώρο αποθήκευσης. Για παράδειγμα, μία συνηθισμένη εγκατάσταση συνολικής δυναμικότητας 50 t/h δύναται να έχει 5 ξεχωριστούς κλιβάνους που μπορούν να καίνε 10 t/h. Οι πολλαπλοί κλιβανοί επιτρέπουν τη διεξαγωγή εργασιών συντήρησης ή επισκευής χωρίς να διακόπτεται η λειτουργία της εγκατάστασης. Κατά την εκκίνηση του αποτεφρωτήρα χρησιμοποιούνται βοηθητικοί καυστήρες προκειμένου να ξεκινήσει η καύση. Καθώς τα απορρίμματα εισάγονται στον κλίβανο μέσω της κινούμενης σχάρας υφίστανται 3 στάδια καύσης:

1. Ξήρανση και διαχωρισμός πτητικών ουσιών
2. Ανάφλεξη των πτητικών ουσιών και παραγωγή αιθάλης
3. Καύση των στερεών ανθρακωδών υπολειμμάτων και παραγωγή τέφρας

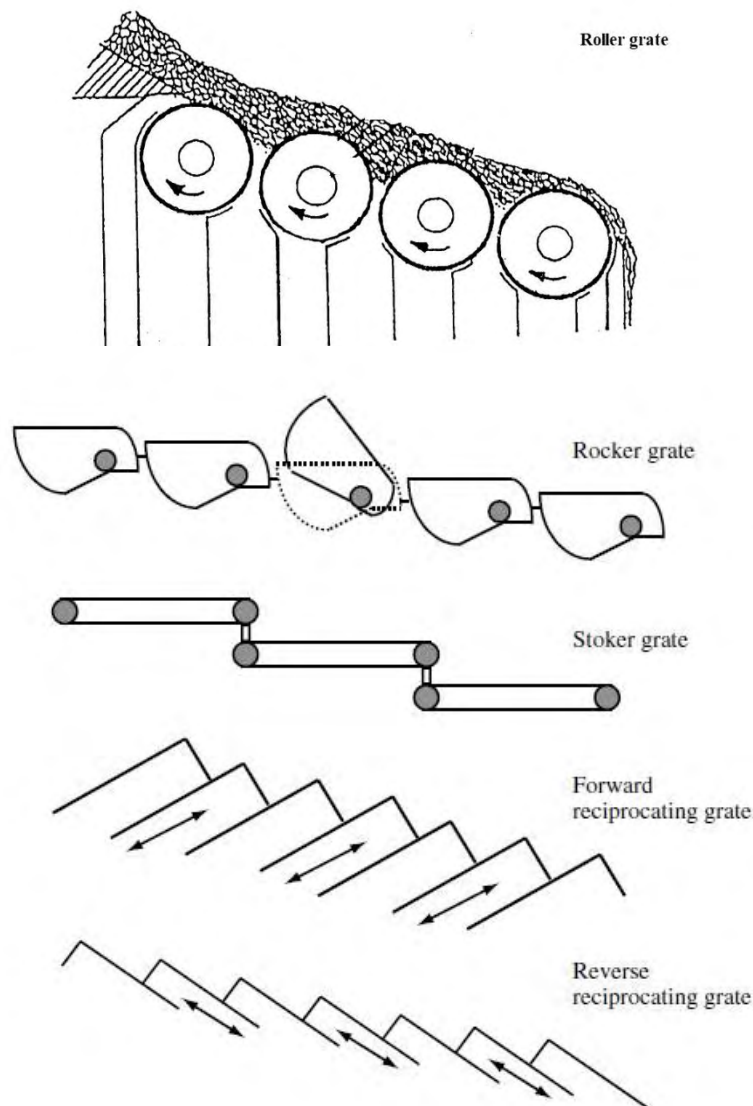
Στην πραγματικότητα, τα στάδια αυτά συγχωνεύονται διότι όπως έχει αναφερθεί τα απόβλητα διαφέρουν ως προς την περιεχόμενη υγρασία, την περιεκτικότητα σε πτητικές ουσίες, τη θερμοκρασία που υφίστανται θερμική υποβάθμιση, τη θερμοκρασία ανάφλεξης και την περιεκτικότητα σε άνθρακα.

Η θέρμανση των απορριμμάτων επιτυγχάνεται μέσω θερμών αερίων καύσης, προθερμασμένο αέρα αλλά και με ακτινοβολία από τα ήδη θερμά τοιχώματα του κλιβάνου απομακρύνοντας πλήρως την υγρασία που περιέχουν καθώς η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 50 και 100 °C. Η υγρασία είναι σημαντική ως περιεχόμενο καθώς απαιτείται θερμότητα προκειμένου το νερό να εξατμιστεί και επομένως η θερμότητα αυτή δε χρησιμοποιείται για την καύση αλλά για την ξήρανση με αποτέλεσμα να υπάρχει λιγότερη διαθέσιμη ενέργεια για την καύση αυτή καθαυτή. Συνήθως, η περιεκτικότητα σε υγρασία των αστικών στερεών αποβλήτων ποικίλει μεταξύ των τιμών 25 και 50%. Αμέσως μετά την ξήρανση ακολουθεί η θερμική αποσύνθεση και πυρόλυση οργανικών υλικών όπως χαρτί, πλαστικά, υπολείμματα τροφών, υφάσματα κ.α. που παράγει πτητική ύλη, εύφλεκτα αέρια και ατμούς. Τα πτητικά μέρη των οργανικών υλικών στα απόβλητα αποτελούν το 70 έως 90% και παράγονται με τη μορφή CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> και άλλων υδρογονανθράκων υψηλότερου μοριακού βάρους. Ο διαχωρισμός των πτητικών ενώσεων λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες μεταξύ 250 και 750 °C με την κύρια απελευθέρωση στο εύρος θερμοκρασιών 425-550 °C. Βέβαια πρόκειται για μία διαδικασία η οποία εξαρτάται από τη σύνθεση των απορριμμάτων. Για παράδειγμα, το πολυστυρένιο αποσυντίθεται στους 450-500 °C και αποδίδει 99% πτητικές ουσίες, ενώ το ξύλο αποσυντίθεται στους 280-500 °C και παράγει 70% πτητικά.

Η ανάφλεξη των πτητικών ουσιών δημιουργεί φλόγα ακριβώς πάνω από την επιφάνεια των απορριμμάτων που βρίσκονται στη σχάρα αλλά και στο θάλαμο καύσης. Η πλήρης καύση των αερίων απαιτεί επαρκώς υψηλές θερμοκρασίες, επαρκή χρόνο παραμονής στον κλίβανο και περίσσεια αέρα τυρβώδους ροής που θα εξασφαλίσει ικανοποιητική ανάμειξη. Οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EC Waste Incineration Directive 2000) προβλέπουν ότι τα αέρια που προκύπτουν κατά την διαδικασία καύσης πρέπει να αποκτήσουν θερμοκρασία 850 °C για να διασφαλιστεί η πλήρης καύση των πτητικών υδρογονανθράκων. Εντός του θαλάμου καύσης πρέπει να διασφαλίζεται ότι η θερμοκρασία δε ξεπερνά κατά πολύ τους 1200 °C καθώς τότε παρουσιάζονται φαινόμενα σκωρίας στο πυρίμαχο υλικό των τοιχωμάτων. Οι μέσοι χρόνοι παραμονής των αερίων στο θάλαμο είναι μεταξύ 2-4 s , που είναι σε πλήρη συμμόρφωση με τους κανονισμούς αλλά και τους τυπικούς χρόνους καύσης των πτητικών υδρογονανθράκων που είναι της τάξης milliseconds. Η δευτερεύουσα παροχή αέρα με ακροφύσια πάνω από την κινούμενη σχάρα εξασφαλίζει την περίσσεια αέρα αλλά και τυρβώδη ροή προκειμένου τα επίπεδα οξυγόνου να μη μηδενίζονται και να αποφεύγεται έτσι η πυρόλυση, αντί για καύση, των υδρογονανθράκων που μπορεί να δημιουργήσει επικίνδυνους υδρογονάνθρακες υψηλού μοριακού βάρους ή αιθάλη. Άρα η παροχή και τα χαρακτηριστικά της ροής του αέρα είναι σημαντικοί παράγοντες για την ελαχιστοποίηση των ρύπων εντός του θαλάμου.

Στο τρίτο στάδιο της καύσης, μετά την ξήρανση και την ανάφλεξη των πτητικών ουσιών, το υπόλειμμα αποτελείται από ανθρακώδες μέρος και αδρανή υλικά ενώ συνεχίζει να βρίσκεται στη σχάρα για χρονικό διάστημα μεταξύ 30 και 60 λεπτών έως την πλήρη καύση του. Η τέφρα και τα αδρανή μέταλλα αποβάλλονται συνεχώς στο τέλος του τελευταίου τμήματος της σχάρας και ψύχονται σε αέρα ή νερό. Ο μηχανισμός απομάκρυνσης υφίσταται βαριά φθορά εξαιτίας της φύσης του υλικού που διαχειρίζεται. Η εξαγωγή του αποτελέσματος σχετικά με το εάν η τέφρα είναι αποτέλεσμα πλήρους καύσης και βιολογικά αδρανής γίνεται μέσω του δείκτη TOC ο οποίος πρέπει να βρίσκεται κάτω από 3% για πλήρη καύση. Στη συνέχεια συλλέγεται και μεταφέρεται σε Χ.Υ.Τ.Α. ή χρησιμοποιείται σε δευτερεύον δομικό υλικό σε έργα όπως οδοποιία. Το άλλο είδος τέφρας, η ελαφρύτερη ιπτάμενη τέφρα μεταφέρεται στα υπόλοιπα μέρη του συστήματος και θα αποβάλλει οργανικά υλικά και μέταλλα καθώς ψύχεται στο σύστημα ανάκτησης ενέργειας και καθαρισμού. Το γεγονός ότι περιέχει βαρέα μέταλλα, διοξίνες και φουράνια την καθιστά μη ανακυκλώσιμη και γι' αυτό το λόγο απορρίπτεται σε Χ.Υ.Τ.Α.. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη βιβλιογραφία τα δύο αυτά είδη τέφρας ονομάζονται «bottom ash» και «flyash» αντίστοιχα, με την πρώτη να αποτελεί περίπου το 30% της αρχικής μάζας των απορριμμάτων και τη δεύτερη να καταλαμβάνει πολύ μικρότερα ποσοστά. Η παράλληλη μελέτη και των δύο είναι απαραίτητη προκειμένου να διαπιστώνεται εάν η καύση εκτελείται όπως έχει σχεδιαστεί.

Ένα επίσης πολύ σημαντικό μέρος του συστήματος είναι η κινούμενη σχάρα που μεταφέρει τα απορρίμματα στην καρδιά του αποτεφρωτήρα και στη συνέχεια προς την έξοδο. Υπάρχουν διαφορετικά είδη σχάρας που παρέχουν ανακίνηση ή πτώση των αποβλήτων για καλύτερη τροφοδοσία της φωτιάς. Επιπλέον, μπορεί να μεταβάλλεται και η ταχύτητα ώστε να ρυθμίζεται ο χρόνος παραμονή των απορριμμάτων στη ζώνη καύσης ανάλογα με τη σύνθεσή τους. Τα είδη σχάρας που μπορεί να συναντήσει κανείς σε ένα κλίβανο παρουσιάζονται παρακάτω.

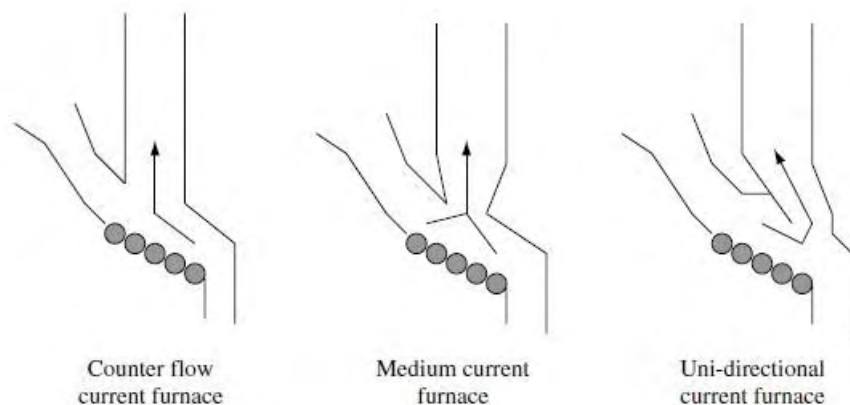


*Σχήμα 2.6: Είδη κινούμενης σχάρας ΠΗΓΗ: Clayton et al 1991; European Commission 2004*

Για παράδειγμα, το σύστημα roller grate έχει διάμετρο κυλίνδρου 1.5 m και περιφερειακή ταχύτητα μεταξύ 5 και 15 m/h. Η σχάρα είναι κεκλιμένη περίπου 30°, διευκολύνοντας την κίνηση των απορριμμάτων. Στο σύστημα rocker grate, η σειρά από μηχανικούς βραχίονες οι οποίοι περιστρέφονται, όπως φαίνεται στο σχήμα, δημιουργεί κίνηση προς τα πάνω και κατά μήκος του κλιβάνου με αποτέλεσμα τα απορρίμματα αφενός να ανακινούνται και αφετέρου να μετατοπίζονται προς την έξοδο. Η οριζόντια stoker type σχάρα είναι συνήθως διαχωρισμένη σε τμήματα ξήρανσης, ανάφλεξης και καύσης ενώ ταυτόχρονα προσφέρει διευκόλυνση στην παροχή και έλεγχο του κύριου αέρα. Οι σχάρες παλινδρομικής κίνησης, forward reciprocating grate, αποτελούνται από τρία ή περισσότερα τμήματα με βήμα 0.5-1 m μεταξύ τους. Κάθε τμήμα αποτελείται από μία σειρά σταθερών και κινουμένων ράβδων σε σχηματισμό σκάλας. Η κίνηση των ράβδων εξυπηρετεί την ανακίνηση και μεταφορά των απορριμμάτων επάνω στη σχάρα. Οι περισσότερες σχάρες είναι συνήθως αερόψυκτες. Ο κύριος αέρας τροφοδοτείται διαμέσου των σχισμών της σχάρας ψύχοντάς την αλλά ταυτόχρονα συντηρεί και την καύση. Όπως έχει αναφερθεί, ο δευτερεύον αέρας εισάγεται με ακροφύσια πάνω από τη

σχάρα και σε κάποια συστήματα εισάγεται τριτογενής αέρας προκειμένου να ψύχει τα καυσαέρια πριν την εισαγωγή τους στο σύστημα καθαρισμού. Κάποια λεπτά υλικά μπορεί να πέφτουν από τη σχάρα και να ανακυκλώνονται πίσω στον αποτεφρωτήρα ή να αφαιρούνται για οριστική ταφή.

Το μέγεθος και το σχήμα του κλιβάνου επηρεάζουν σημαντικά τη βέλτιστη απόδοση καύσης και υπάρχουν διαφορετικά σχέδια όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7.



*Σχήμα 2.7: Είδη σχεδίου κλιβάνου ΠΗΓΗ: European Commission 2004*

Το μέγεθος καθορίζει το μέσο χρόνο παραμονής των πτητικών ουσιών και επομένως επηρεάζει την καύση τους. Το σχήμα επηρεάζει το μοτίβο με το οποίο τα εισερχόμενα απορρίμματα θερμαίνονται από τα καυσαέρια και την ακτινοβολία θερμότητας από τα τοιχώματα. Επιπρόσθετα, καθορίζει τη ροή των αερίων μέσα στο θάλαμο συμπεριλαμβανομένων της ανάμιξης και ανακυκλοφορίας, φαινόμενα που με τη σειρά τους επηρεάζουν την καύση. Ανάλογα με το σχέδιο μπορεί να παραχθεί ρεύμα αντιροής, ρεύμα μέσης ροής και ρεύμα μονής κατεύθυνσης. Η αρχική ξήρανση και διαχωρισμός των πτητικών ουσιών μπορεί να προκαλέσει δυσοσμία και για το λόγο αυτό μοτίβο της ροής των αερίων απαιτείται να διέρχεται από το θερμότερο τμήμα του κλιβάνου προκειμένου να καούν πλήρως τα οργανικά μέρη και να καταστραφούν οι οσμές.

Τα πυρίμαχα υλικά των τοιχωμάτων του κλιβάνου περιβάλλονται εξωτερικά από χαλύβδινο κέλυφος. Ανάμεσα στα δύο αυτά είδη υλικών είναι δυνατό να βρίσκονται οι σωληνώσεις του νερού που χρησιμοποιείται για να παραχθεί ατμός και να ανακτηθεί η ενέργεια. Ο κύριος όγκος των σωληνώσεων βρίσκεται πάνω από το θάλαμο καύσης όπου και έρχονται σε επαφή με τα θερμά καυσαέρια. Τα είδη των πυρίμαχων υλικών που χρησιμοποιούνται ποικίλουν ανάμεσα στα τμήματα του κλιβάνου καθώς σε κάθε τμήμα οι θερμοκρασίες αλλά και η κατανομή της οξειδωσης, της τριβής με σκληρά αντικείμενα και της διάβρωσης από τα καυσαέρια που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα είναι στοιχεία που διαφοροποιούνται και σαφώς απαιτούνται υλικά με ιδιότητες που ανταποκρίνονται σε συγκριμένες συνθήκες. Ως παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε τα τούβλα από πυριτικό αργίλιο ή καρβίδια του πυριτίου που χρησιμοποιούνται στα θερμότερα επίπεδα του κλιβάνου που βρίσκονται κοντά στη σχάρα ενώ στα άνω τοιχώματα του θαλάμου καύσης τοποθετούνται πυρότουβλα πυριτικού αργιλίου χαμηλότερων προδιαγραφών.



## 2.3 Οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Το γεγονός της αντίθεσης της κοινής γνώμης στην καύση απορριμμάτων κινητοποίησε την Ευρωπαϊκή Ένωση να επιβάλλει όσο το δυνατό αυστηρούς κανονισμούς σε ό,τι αφορά τις εκπομπές βαρέων μετάλλων (όπως ο υδράργυρος, το κάδμιο, το χλώριο, και ο μόλυβδος), διοξινών, φουρανιών, CO (μονοξείδιο του άνθρακα), NO<sub>x</sub> (οξειδία του αζώτου), SO<sub>2</sub> και αερίων οργανικών ενώσεων (συχνά αναφέρονται ως Total Organic Compounds). Στο σχήμα παρουσιάζονται τα όρια εκπομπών στον αέρα όπως τα έθεσε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission Waste Incineration Directive 2000).

Ουσία	Όριο εκπομπής(mg/m <sup>3</sup> )
Συνολική σκόνη	10(ημερήσια μέση τιμή)
TOC	10 ( ----  ---- )
HCl	10 ( ----  ---- )
HF	1 ( ----  ---- )
CO	50 ( ----  ---- )
SO <sub>2</sub>	50 ( ----  ---- )
NO <sub>x</sub> (Εκφρασμένα ως NO <sub>2</sub> ) (Νέα εγκατάσταση)	200( ----  ---- )
NO <sub>x</sub> (Εκφρασμένα ως NO <sub>2</sub> ) (Υπάρχουσα εγκατάσταση καύσης 6-16 t/h)	400 ( ----  ---- ) (μέχρι το 2010)
NO <sub>x</sub> (Εκφρασμένα ως NO <sub>2</sub> ) (Υπάρχουσα εγκατάσταση καύσης 16-25 t/h)	400 ( ----  ---- ) (μέχρι το 2008)
Cd and Tl	0.05 (Για νέα εγκατάσταση) 0.1 (Για υφιστάμενη εγκατάσταση μέχρι το 2007)
Hg	0.05 (Για νέα εγκατάσταση) 0.1 (Για υφιστάμενη εγκατάσταση μέχρι το 2007)
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V (Total)	0.5 (Για νέα εγκατάσταση) 1.0 (Για υφιστάμενη εγκατάσταση μέχρι το 2007)
Διοξίνες και φουράνια (TEQ) ng/m <sup>3</sup>	0.1 (2007)

Συνθήκες αναφοράς : 273 K , 101.3 kPa, 11% Οξυγόνο, 0% Υγρασία

Σχήμα 2.8: Όρια εκπομπών ρύπων ΠΗΓΗ: Ευρωπαϊκή Επιτροπή

Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων είναι απαραίτητο να διεξάγονται σε συνεχή βάση με εξαίρεση τα βαρέα μέταλλα, τις διοξίνες και τα φουράνια για τα οποία η πολυπλοκότητα της διαδικασίας μέτρησης δεν επιτρέπει να αναφέρονται περισσότερες από 2 φορές σε διάστημα ενός έτους. Εκτός των εναερίων εκπομπών, έχουν καθοριστεί και όρια στη συγκέντρωση των ρύπων σε ύδατα απόρριψης τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί για τον καθαρισμό των καυσαερίων.

Ουσία	Όριο συγκέντρωσης(mg/l)
Συνολικά στερεά σωματίδια	30 (95% δεν υπερβαίνεται)
Συνολικά στερεά σωματίδια	45 (100% δεν υπερβαίνεται)
Hg	0.03
Cd	0.05
Tl	0.05
As	0.15
Pb	0.2
Cr	0.5
Cu	0.5
Ni	0.5
Zn	1.5
Διοξίνες και φουράνια (TEQ)	0.3

Σχήμα 2.9: Όρια ρύπων σε ύδατα απόρριψης ΠΗΓΗ: Ευρωπαϊκή Επιτροπή

Η καύση των απορριμμάτων θεωρείται βιομηχανική διεργασία και υπόκειται στο πρωτόκολλο IPPC (Integrated Pollution Prevention & Control) και απαιτείται άδεια η οποία εκδίδεται από την κυβέρνηση ή τις αρμόδιες αρχές κάθε μέλους της Ε.Ε. Στη συγκεκριμένη άδεια αναφέρονται οι κατηγορίες των απορριμμάτων, η χωρητικότητα της εγκατάστασης και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη δειγματοληψία και μέτρηση των καυσαερίων ως προς τους ρύπους. Επιπλέον, στους κανονισμούς IPPC περιλαμβάνεται και εγχειρίδιο που αναφέρει τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνολογίες (Best Available Techniques) που παρέχει λεπτομέρειες για όλα τα στάδια της διαδικασίας. Είναι εύλογο το γεγονός ότι οποιαδήποτε εγκατάσταση δε συμμορφώνεται με το IPPC πρέπει τερματίζει τη λειτουργία της άμεσα.

Στα πλαίσια της προστασίας του περιβάλλοντος από τις επιπτώσεις της καύσης απορριμμάτων στην Ευρώπη, η Επιτροπή επιβάλλει αυστηρές τεχνικές απαιτήσεις και συνθήκες λειτουργίας. Για παράδειγμα, η συγκέντρωση των απορριμμάτων εντός αστικών περιοχών απαιτεί διαδικασίες που ελαχιστοποιούν τις οσμές και το θόρυβο και επιπλέον η μάζα και το είδος των απορριμμάτων πρέπει να παρακολουθούνται διαρκώς και να καταγράφονται. Σε περιπτώσεις επικίνδυνων αποβλήτων απαιτείται η έγγραφη απόδειξη της πηγής τους όπως και η αναλυτική περιγραφή της σύστασής τους. Επιπροσθέτως, οι οδηγίες επισημαίνουν ότι τα καυσαέρια πρέπει να θερμαίνονται στους 850 °C για χρονικό διάστημα 2s. Εάν η περιεκτικότητα σε χλώριο είναι πάνω από 2% τότε η θερμοκρασία πρέπει να αυξηθεί στους 1100 °C. Για τη διασφάλιση των συνθηκών αυτών απαιτούνται βοηθητικοί καυστήρες οι οποίοι πρέπει να εκκινούν αυτόματα μόλις οι θερμοκρασίες πέσουν κάτω από αυτές που απαιτούνται. Ένα μέτρο που περιγράφει σε ποιο βαθμό έχει επιτευχθεί καύση σύμφωνα με τις προδιαγραφές είναι η περιεκτικότητα της τέφρας σε TOC η οποία πρέπει να είναι μικρότερη από 3%. Με άλλα λόγια τα TOC εκπροσωπούν το βαθμό πλήρους καύσης των οργανικών υλικών. Οι οδηγίες αφορούν επίσης το σχεδιασμό και το ύψος των καπνοδόχων που πρέπει να είναι τέτοιο ώστε οι συγκεντρώσεις των ρύπων στο επίπεδο του εδάφους να μην επιτρέπουν σημαντική επίδραση στη δημόσια υγεία. Σαφέστατη είναι και η αναφορά στις διαδικασίες που ακολουθούνται σε περιπτώσεις έκτακτης παύσης κάποιας διεργασίας ή δυσλειτουργίας. Στο παράρτημα περιγράφεται η διαδικασία έκτακτης διακοπής λειτουργίας.

Μία ξεχωριστή κατηγορία αποτελούν οι εγκαταστάσεις συναποτέφρωσης (co-incineration plants) οι οποίες έχουν ως κύριο σκοπό την παραγωγή ενέργειας ή υλικών προϊόντων και χρησιμοποιούν στερεά απόβλητα ως κύριο ή βοηθητικό καύσιμο ή επεξεργάζονται θερμικά τα απόβλητα με σκοπό την απόρριψη. Η Επιτροπή τονίζει ότι αυτές οι εγκαταστάσεις, των οποίων η βασική πρόθεση δεν είναι η καύση απορριμμάτων, δεν επιτρέπεται να προκαλούν μεγαλύτερες εκπομπές ρύπων στα καυσαέρια τους από τις εγκαταστάσεις που είναι αποκλειστικά σχεδιασμένες για το σκοπό αυτό. Ο τύπος που ακολουθείται για την εξαγωγή των οριακών τιμών εκπομπής είναι ο παρακάτω:

$$\frac{(V_W \times C_W) + (V_{pr} \times C_{pr})}{V_W + V_{pr}}$$

$V_W$ : ο όγκος των καυσαερίων μόνο από την καύση απορριμμάτων

$C_W$ : το όριο εκπομπής του ρύπου για την καύση απορριμμάτων

$V_{pr}$ : ο όγκος των καυσαερίων μόνο από την καύση ορυκτών καυσίμων

$C_{pr}$ : το όριο εκπομπής για τη διεργασία

Ωστόσο, όταν η συναποτέφρωση περιλαμβάνει μη επεξεργασμένα και ανάμεικτα αστικά απόβλητα, τότε τα όρια εκπομπών εφαρμόζονται όπως στην καύση απορριμμάτων. Επιπλέον, αν σε μία εγκατάσταση συναποτέφρωσης το 40% και πλέον της θερμότητας που απελευθερώνεται προέρχεται από επικίνδυνα απόβλητα τότε και πάλι εφαρμόζονται τα όρια εκπομπών για την καύση απορριμμάτων. Τέλος, για την καύση των απορριμμάτων σε τσιμεντοβιομηχανίες και άλλες μεγάλες εγκαταστάσεις καύσης ισχύουν ειδικά όρια εκπομπών τα οποία περιγράφονται από την Επιτροπή.

Στο παράρτημα γίνεται αναφορά στις συνθήκες αναφοράς που χρησιμοποιούνται.

# 3

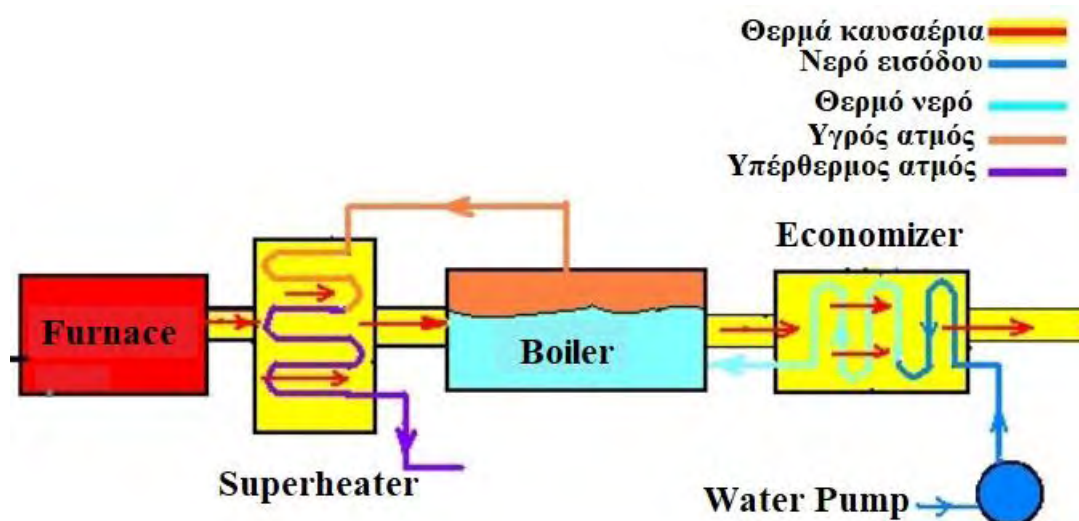
## Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

### 3.1 Ανάκτηση ενέργειας

Η καύση των απορριμμάτων αποτελεί μία εξώθερμη διαδικασία και σχεδόν ολόκληρο το ποσό της θερμότητας που εκλύεται, μεταφέρεται στα καυσαέρια. Η ανάκτηση της θερμότητας είναι μία αναγκαία διαδικασία καθώς τα καυσαέρια πρέπει να ψυχθούν πριν εισαχθούν στις συσκευές αντιρρυπαντικής τεχνολογίας. Οι θερμοκρασίες στο θάλαμο καύσης προσεγγίζουν τους 750-1000 °C, όπως έχει αναφερθεί, και ξεπερνούν σημαντικά το όριο των 250-300 °C που απαιτείται προκειμένου να εξελιχθεί ομαλά ο καθαρισμός με τον εξοπλισμό που θα αναφερθεί σε επόμενη παράγραφο.

#### 3.1.1 Εναλλάκτης θερμότητας

Η θερμότητα των καυσαερίων μεταφέρεται στο νερό το οποίο ρέει στο εσωτερικό του δικτύου των σωληνώσεων του εναλλάκτη και παράγεται ατμός. Η διαδρομή που ακολουθεί το νερό εντός των σωληνώσεων είναι τέτοια ώστε σταδιακά να μετατραπεί σε ατμό και ο ατμός με τη σειρά του να γίνεται συνεχώς θερμότερος. Το πρώτο πέρασμα των καυσαερίων γίνεται στην επιφάνεια των σωληνώσεων που χρησιμοποιούνται ώστε να παραχθεί υπέρθερμος και ξηρός ατμός και στη βιβλιογραφία συναντώνται συχνά με την ονομασία *superheater tubes* καθώς βρίσκονται πάνω από το θάλαμο καύσης όπου επικρατούν οι μέγιστες θερμοκρασίες. Στη συνέχεια ακολουθεί το δίκτυο σωληνώσεων του boiler που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του νερού σε ατμό. Μετά το boiler είναι σημαντική και η ύπαρξη ενός δικτύου σωληνώσεων που έρχονται σε επαφή με τα λιγότερο θερμά καυσαέρια προκειμένου να θερμάνουν το εισερχόμενο νερό πριν φτάσει στο boiler με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συνολική απόδοση του εναλλάκτη. Το επόμενο σχήμα αναπαριστά ένα τέτοιο εναλλάκτη.



*Σχήμα 3.1:* Δομικά στοιχεία εναλλάκτη θερμότητας [ΠΗΓΗ: ecoursesonline.iasri.res.in](http://ecoursesonline.iasri.res.in)

Όπως παρατηρούμε ένας εναλλάκτης από superheater, boiler και economizer.

**Economizer:** Η λειτουργία του είναι να αποσπάσει ποσό της θερμότητας που έχουν τα καυσαέρια στο τελευταίο στάδιο πριν μεταφερθούν στις συσκευές καθαρισμού με σκοπό την προθέρμανση του νερού που κατευθύνεται στο boiler.

**Πλεονεκτήματα:**

1. Αυξάνει την απόδοση του εναλλάκτη της εγκατάστασης αφού εκμεταλλεύεται θερμότητα που θα καταλήξει στις συσκευές καθαρισμού.
2. Η παροχή θερμού νερού στο boiler αυξάνει την ποσότητα ατμού που μπορεί να παράγει ο εναλλάκτης («evaporative capacity» σε kg ατμού/kg απορριμμάτων που καίγονται)
3. Αυξάνει τη λειτουργική ζωή του boiler αφού μειώνει τις θερμοκρασιακές διαφορές ανάμεσα στα τμήματά του.
4. Μεγάλη ποσότητα αλάτων που σχηματίζουν ακαθαρσίες μπορεί να αφαιρεθεί με καθίζηση λόγω της προθέρμανσης του νερού.
5. Διαλυμένα αέρια, όπως το CO<sub>2</sub>, μπορούν επίσης να αφαιρεθούν με την προθέρμανση, εμποδίζοντας τη διάβρωση των σωληνώσεων.

**Μειονεκτήματα:**

1. Κάθε επιπρόσθετη συσκευή σε ένα σύστημα που διαχειρίζεται κάποιο ρευστό προκαλεί αύξηση στην πτώση πίεσης με αποτέλεσμα να αυξάνονται τα λειτουργικά του έξοδα.

Ο λόγος για τον οποίο θεωρείται ότι προσφέρει οικονομία καυσίμου στο σύστημα, ή αλλιώς μεγαλύτερη ποσότητα ατμού για κάθε kg καυσίμου που καίγεται, μπορεί να γίνει κατανοητός με το παρακάτω απλό παράδειγμα με βασικές γνώσεις θερμοδυναμικής.

**Παράδειγμα:** Ας υποθέσουμε ότι στην έξοδο ενός boiler κυκλοφορεί κορεσμένος ατμός πίεσης 13 bar. Το νερό εισέρχεται στον economizer σε θερμοκρασία 40 °C και εξέρχεται από αυτόν στους 125 °C.

Όπως γνωρίζουμε, το ποσό θερμότητας που απαιτείται για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του νερού κατά αυτόν τον τρόπο είναι:

$$Q = m C_p (T_{EE} - T_{EIS})$$

Q: ποσό θερμότητας kJ/kg

m: μάζα του νερού (υπολογισμός για 1kg)

C<sub>p</sub>: ειδική θερμότητα (για νερό 4,18 kJ/kg)

T<sub>EE</sub>: θερμοκρασία εισόδου

T<sub>EIS</sub>: θερμοκρασία εξόδου

$$Q = 1 \times 4,18 \times (125 - 40) = 355,3 \text{ kJ/kg}$$

Από πίνακες ατμού αντλούμε τα δεδομένα T<sub>sat</sub> = 191,6 °C, h<sub>f</sub> = 814,59 kJ/kg, h<sub>g</sub> = 2785,7 kJ/kg

T<sub>sat</sub>: θερμοκρασία κορεσμού

h<sub>f</sub>: ενθαλπία υγρού kJ/kg

h<sub>g</sub>: ενθαλπία ατμού kJ/kg

Χωρίς economizer, η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται ώστε το νερό 40 °C να μετατραπεί σε κορεσμένο ατμό 13 bar είναι

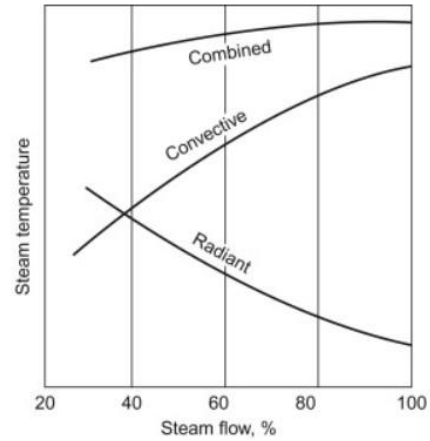
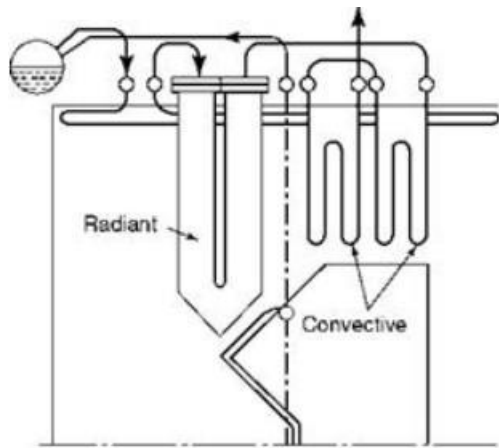
$$Q' = m C_p (T_{EE} - T_{EIS}) + m (h_g - h_f) = 1 \times 4,18 \times (191,6 - 40) + 1 \times (2785,7 - 814,59) = 2604,8 \text{ kJ/kg}$$

Άρα εξοικονομήθηκε το  $\frac{355,3}{2604,8} \times 100 = 13,6 \%$  της θερμότητας που απαιτείται χωρίς την ύπαρξη economizer.

**Superheater:** Ο ρόλος του είναι να θερμαίνει τον υγρό ή κορεσμένο ατμό σε θερμοκρασίες υψηλότερες από τη θερμοκρασία κορεσμού. Βρίσκεται αμέσως μετά τον κλίβανο όπως φάνηκε και στο σχήμα 3.1.

### Ταξινόμηση ως προς τη μεταφορά θερμότητας:

1. **Superheaters συναγωγής:** Η μεταφορά θερμότητας προς τις σωληνώσεις γίνεται κυρίως με συναγωγή μέσω των καυσαερίων και δευτερευόντως μέσω ακτινοβολίας. Με πολύ πιο απλά λόγια ο superheater του είδους αυτού δε «βλέπει» τη φλόγα του θαλάμου καύσεως. Σημαντικό στοιχείο είναι και ο τρόπος με τον οποίο συμπεριφέρονται σε αλλαγές των απαιτήσεων ως προς τον παραγόμενο ατμό. Όταν αυξηθεί η ανάγκη σε ατμό τότε αυξάνεται και η ροή των καυσαερίων με αποτέλεσμα οι συντελεστές συναγωγής εντός και εκτός των αγωγών να αυξηθούν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ καυσαερίων και ατμού ο οποίος δέχεται μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα παροχής μάζας και η θερμοκρασία του αυξάνεται καθώς αυξάνει η ανάγκη σε ατμό όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.
2. **Superheaters ακτινοβολίας:** Είναι οι superheater που θερμαίνονται από την ακτινοβολία της φλόγας του θαλάμου καύσης και συνήθως τοποθετούνται στα τοιχώματα του θαλάμου καύσης. Αντίθετα με τους superheaters συναγωγής, εδώ κάθε αύξηση της ανάγκης σε ατμό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η θερμοκρασία της φλόγας παραμένει σταθερή, οπότε και το ποσό της θερμότητας που ακτινοβολείται, προκαλεί πτώση της θερμοκρασίας του παραγόμενου ατμού όπως παρατηρείται και στο σχήμα 3.2.
3. **Superheaters μεικτού τύπου:** Σε αυτού του είδους τους superheaters ο ατμός εισέρχεται πρώτα στον superheater ακτινοβολίας και στη συνέχεια στον superheater συναγωγής. Ο συνδυασμός των δύο τύπων δίνει μεγαλύτερο έλεγχο στη θερμοκρασία του ατμού ανάλογα με τις απαιτήσεις ως προς την παροχή.

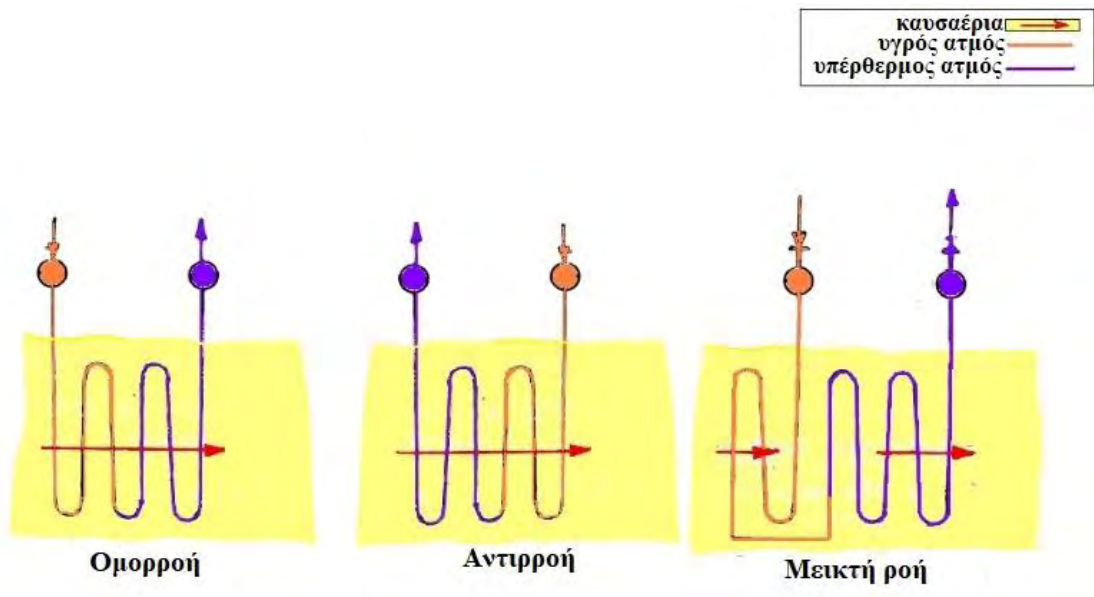


Σχήμα 3.2: Superheaters & συμπεριφορά [ΠΗΓΗ: gazogenerator.com](http://ΠΗΓΗ: gazogenerator.com)

### Ταξινόμηση ως προς τη φορά κίνησης ατμού και καυσαερίων:

1. Αντιρροή: Ο ατμός και τα καυσαέρια ρέουν προς την ίδια κατεύθυνση.
2. Ομορροή: Ο ατμός και τα καυσαέρια ρέουν προς αντίθετη κατεύθυνση.
3. Μεικτή ροή: Ο ατμός αρχικά ρέει σε αντίθετη κατεύθυνση με τα καυσαέρια και στη συνέχεια στην ίδια κατεύθυνση.

Ο superheater αντιρροής προτιμάται συνήθως λόγω του μικρότερου μεγέθους του, του μικρότερου βάρους του και της μέγιστης απόδοσης σε σχέση με τους υπόλοιπους.

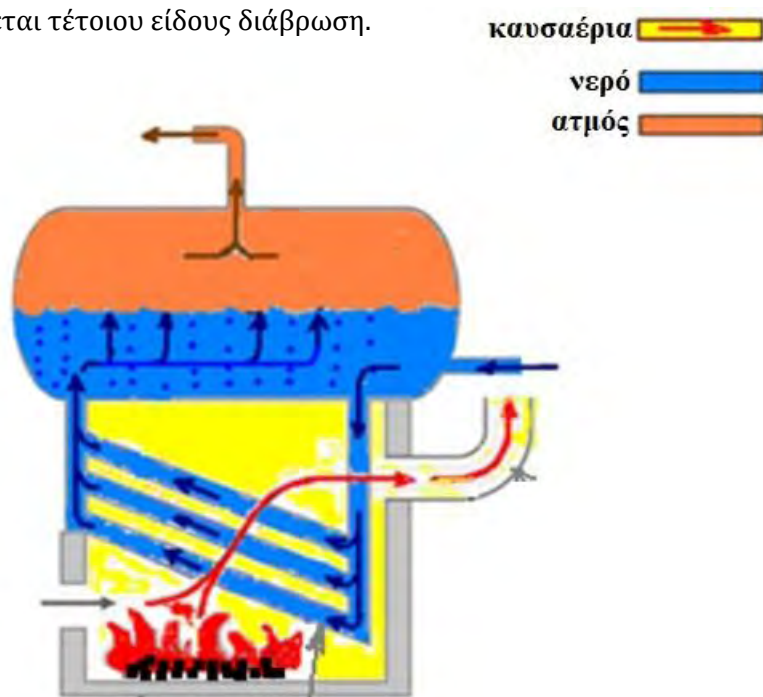


Σχήμα 3.3: Ταξινόμηση superheaters ως προς τη φορά κίνησης [ΠΗΓΗ: ecourseonline.iasri.res.in](http://ΠΗΓΗ: ecourseonline.iasri.res.in)

### Πλεονεκτήματα:

1. Μειώνει την ειδική κατανάλωση ατμού στους αμοστροβίλους.
2. Μειώνει τις απώλειες λόγω συμπύκνωσης του ατμού.
3. Μηδενίζει τη διάβρωση των πτερυγίων του αμοστροβίλου.
4. Αυξάνεται η απόδοση της συνολικής εγκατάστασης.

**Ατμοπαραγωγός/Boiler:** Πρόκειται για τη συσκευή η οποία μετατρέπει το θερμό νερό που λαμβάνει από τον economizer και το μετατρέπει σε ατμό καθώς εκτός των σωληνώσεων ρέουν τα θερμά καυσαέρια. Τα boiler του εμπορίου μπορεί να φέρουν μέχρι 331,756 m<sup>2</sup> επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας και να αποδίδουν έως 10 MW θερμότητας. Χωρίζονται σε υψηλής και χαμηλής πίεσης ανάλογα με το αν η πίεση του ατμού υπερβαίνει ή όχι τα 80 bar. Το boiler είναι σχεδιασμένο να εξασφαλίζει την καλύτερη δυνατή μεταφορά θερμότητας με τη βέλτιστη διαδρομή κυκλοφορίας του νερού που θα μειώσει το σχηματισμό αποθέσεων, να διευκολύνει τη διαδικασία καθαρισμού και να μην αστοχήσει υπό τις συνθήκες λειτουργίας. Ένας παράγοντας που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση ενός boiler είναι ο σχηματισμός αποθέσεων επάνω στην επιφάνεια εναλλαγής θερμότητας από τα θερμά καυσαέρια. Ο ρυθμός σχηματισμού των αποθέσεων εξαρτάται από το περιεχόμενο σε σκόνη των καυσαερίων και την ευκολία με την οποία η ιπτάμενη τέφρα «κολλάει» πάνω στα τοιχώματα, ιδιότητα η οποία επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα και τη γεωμετρία των σωληνώσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι σωλήνες τοποθετούνται παράλληλα στη ροή των καυσαερίων ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι αποθέσεις και η διάβρωση. Για την απομάκρυνση των αποθέσεων χρησιμοποιούνται φουσητήρες υπέρθερμου ατμού ή σφαιρίδια χάλυβα τα οποία βάλονται προς τις σωληνώσεις και τινάζουν τις αποθέσεις οι οποίες απομακρύνονται. Η πρώτη μέθοδος είναι η πιο συχνή και εκτελείται μία φορά σε κάθε βάρδια. Όταν η θερμοκρασία των καυσαερίων φτάσει μία προκαθορισμένη μέγιστη τιμή, περίπου μετά από 4000 ώρες λειτουργίας, τότε το boiler πρέπει να τεθεί εκτός λειτουργίας για πλήρη καθαρισμό. Η διάβρωση αποτελεί επίσης ένα σημαντικό θέμα και χωρίζεται σε διάβρωση υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας. Σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 450 °C, που αφορούν κυρίως τους superheaters, λαμβάνουν χώρα αλληλεπιδράσεις μεταξύ του μετάλλου των σωληνών, των αποθέσεων και των θερμών καυσαερίων. Ο ρυθμός διάβρωσης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και της παρουσίας όξινων αερίων όπως HCl, SO<sub>3</sub> και H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Η διάβρωση χαμηλής θερμοκρασίας ωφείλεται στη συμπύκνωση τέτοιων αερίων αφού η θερμοκρασία βρίσκεται κάτω από το σημείο δρόσου. Το σημείο δρόσου του H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> είναι 40-155 °C και του HCl 27-60 °C ανάλογα με τη συγκέντρωση και την ύπαρξη υγρασίας (Krause 1991). Άρα, απαιτούνται θερμοκρασίες πάνω από 200 °C για να αποφεύγεται τέτοιου είδους διάβρωση.



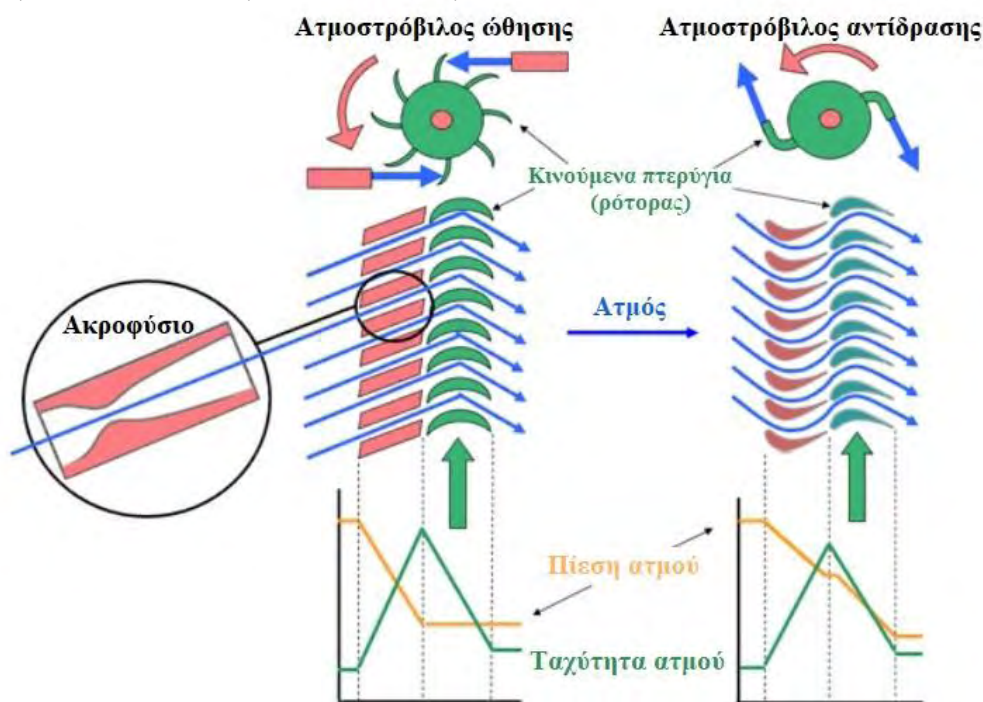
**Σχήμα 3.4:** Ένας τυπικός ατμοπαραγωγός/boiler [ΠΗΓΗ: ecoursesonline.iasri.res.in](http://ecoursesonline.iasri.res.in)



Σε μία εγκατάσταση καύσης απορριμμάτων, ο ρυθμός καύσης γενικά διατηρείται σταθερός και πάντα σύμφωνος με τη δυναμικότητα της εκάστοτε εγκατάστασης. Επομένως, το ποσό της ενέργειας που παράγεται δε μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τη ζήτηση. Για την τηλεθέρμανση το γεγονός αυτό μπορεί να αποτελεί ένα πρόβλημα ενέργειας που δε χρησιμοποιείται, π.χ. τους καλοκαιρινούς μήνες δεν υπάρχει καθόλου ζήτηση, ενώ ο παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να πωλείται στο κεντρικό δίκτυο. Το ζητούμενο είναι κάθε φορά που μειώνεται η ζήτηση σε θερμότητα να βρίσκονται εναλλακτικές λύσεις χρήσεις της ή να εγκατασταθεί ένα σύστημα ψύξης των καυσαερίων ώστε σε κάθε περίπτωση η καύση των αποβλήτων να συνεχίζεται αδιάκοπα.

### 3.1.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Ο υπέρθερμος ατμός που παράγεται από τον superheater, όπως έχει αναφερθεί έχει υψηλή θερμοκρασία και πίεση, μεταφέρεται στο επόμενο τμήμα της εγκατάστασης το οποίο αναλαμβάνει τη μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι το τμήμα της εγκατάστασης στο οποίο υπάρχουν οι ατμοστρόβιλοι οι οποίοι μετατρέπουν τη θερμική ενέργεια του ατμού σε κινητική χρησιμοποιώντας μία περιστροφική γεννήτρια που με τη σειρά της μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η αρχή λειτουργίας ενός ατμοστρόβιλου βασίζεται στην παροχή ατμού από τα σταθερά ακροφύσια του στάτη προς τα κινούμενα πτερύγια (ρότορας) κατά μήκος του άξονα της μηχανής και πλήθος σειρών στις οποίες εναλλάσσονται σταθερά και κινούμενα πτερύγια. Από την είσοδο του ατμού στον ατμοστρόβιλο μέχρι την τελική εκτόνωσή του, τα πτερύγια και η κοιλότητα αυξάνονται σταδιακά σε μέγεθος ώστε να επιτρέπουν την ομαλή εκτόνωση του ατμού. Τα πτερύγια του στάτη λειτουργούν ως ακροφύσια στα οποία ο ατμός εκτονώνεται και αυξάνει την ταχύτητά του. Καθώς ο ατμός έχει αποκτήσει υψηλή ταχύτητα, προσκρούει στα κινούμενα πτερύγια με τέτοια γωνία ώστε να μεταδίδει σε αυτά μέρος της κινητικής του ενέργειας. Τα δύο βασικά είδη ατμοστρόβιλου ονομάζονται ώθησης (impulse turbine) και αντίδρασης (reaction turbine).



*Σχήμα 3.5: Είδη ατμοστρόβιλων ΠΗΓΗ: [www.mpoweruk.com](http://www.mpoweruk.com)*

Ο σχεδιασμός των ακροφυσίων είναι καθοριστικής σημασίας για την απόδοση της μηχανής. Έχουν το σχήμα μίας κλεψύδρας και εκμεταλλεύονται το νόμο Bernoulli σύμφωνα με τον οποίο η κινητική ενέργεια ενός αερίου αυξάνεται καθώς η πίεσή του μειώνεται. Το σχέδιο αυτό του ακροφυσίου επινοήθηκε από τον Γκουστάφ ντι Λαβάλ και εφαρμόζεται σε μηχανές πυραύλων όπου το εργαζόμενο μέσο είναι θερμά αέρια.

**Ατμοστρόβιλος ώθησης:** Ο ατμός κατευθύνεται από τα ακροφύσια και προσκρούει με υψηλή ταχύτητα στα κινούμενα πτερύγια του ρότορα και αυτή η αλλαγή στην ορμή έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η ορμή του ρότορα (αρχή διατήρησης της ορμής). Πτώση πίεσης συναντάται μόνο στα ακροφύσια και όχι στο ρότορα καθώς η διατομή του θαλάμου μεταξύ των πτερυγίων είναι σταθερή οπότε και οι στρόβιλοι αυτοί ονομάζονται και στρόβιλοι σταθερής πίεσης. Συνήθως λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες της τάξης των 30000 rpm και καταπονούνται από τεράστιες φυγόκεντρες δυνάμεις. Στις περισσότερες εφαρμογές η ταχύτητά τους μειώνεται μέσω κιβωτίου ταχυτήτων.

**Ατμοστρόβιλος αντίδρασης:** Τα κινούμενα και ακίνητα πτερύγια αυτού του είδους στροβίλων έχουν το ίδιο σχήμα διατομής με τα πτερύγια ενός αεροπλάνου. Τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε η διατομή τους να μειώνεται από την είσοδο προς την έξοδο. Αυτό σημαίνει ότι η διατομή του περάσματος του ατμού μεταξύ στάτη και ρότορα αυξάνεται κατά μήκος του άξονα του στροβίλου. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται ακροφύσια μεταξύ τους προκαλώντας μείωση στην πίεση και αύξηση στην ταχύτητα του ατμού. Οι τρεις δυνάμεις που ευθύνονται για την περιστροφή του ρότορα είναι η δύναμη αντίδρασης που ασκείται στα κινούμενα πτερύγια καθώς ο ατμός εκτονώνεται ανάμεσά τους, η δύναμη αντίδρασης που ασκείται στα κινούμενα πτερύγια καθώς ο ατμός αλλάζει κατεύθυνση και τέλος η ώθηση που δίνει ο ατμός καθώς προσκρούει στα πτερύγια. Γενικά οι ατμοστρόβιλοι αντίδρασης είναι περισσότερο αποδοτικοί από τους αντίστοιχους της ώθησης και αναπτύσσουν χαμηλότερες ταχύτητες που σημαίνει ότι δεν είναι απαραίτητο το κιβώτιο ταχυτήτων. Ωστόσο, είναι πιο περίπλοκοι και για το λόγο αυτό ο ατμός υψηλής πίεσης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα διαρροών.

Οι στρόβιλοι ανήκουν στις θερμικές μηχανές και η μέγιστη απόδοσή τους υπολογίζεται από το νόμο του Carnot:

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

$T_h$ : θερμοκρασία σε Kelvin του εργαζόμενου μέσου στην είσοδο του στροβίλου

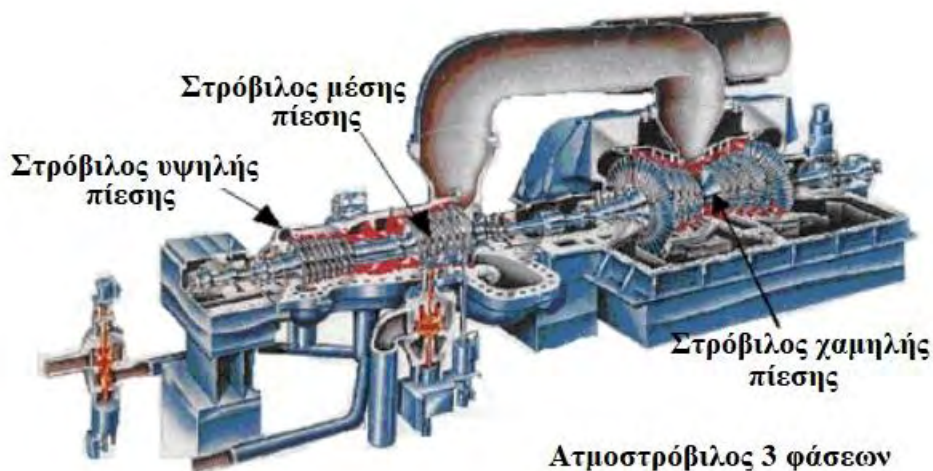
$T_c$ : θερμοκρασία σε Kelvin του εργαζόμενου μέσου στην έξοδο του στροβίλου

Για ένα τυπικό σύστημα στροβίλου με θερμοκρασία του ατμού στην είσοδο να ισούται με 543 °C (816 K) και θερμοκρασία εξόδου του νερού ίση με 23 °C (296 K), η μέγιστη θεωρητική απόδοση είναι:

$$\eta = 1 - \frac{296}{816} = 64\%$$

Η απόδοση αυτή βέβαια δε λαμβάνει υπόψη τις απώλειες θερμότητας, πίεσης και τριβών σε ένα σύστημα. Το γεγονός αυτό καθιστά τους στροβίλους ως την κύρια αιτία για τις απώλειες ενέργειας σε ένα σύστημα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι αν λάβουμε υπόψη τις απώλειες εντός του θαλάμου καύσης, τις απώλειες στο boiler αλλά και τις απώλειες

στη γεννήτρια τότε η συνολική διαδρομή από την αξιοποίηση του εκάστοτε καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει απόδοση περίπου 33%.

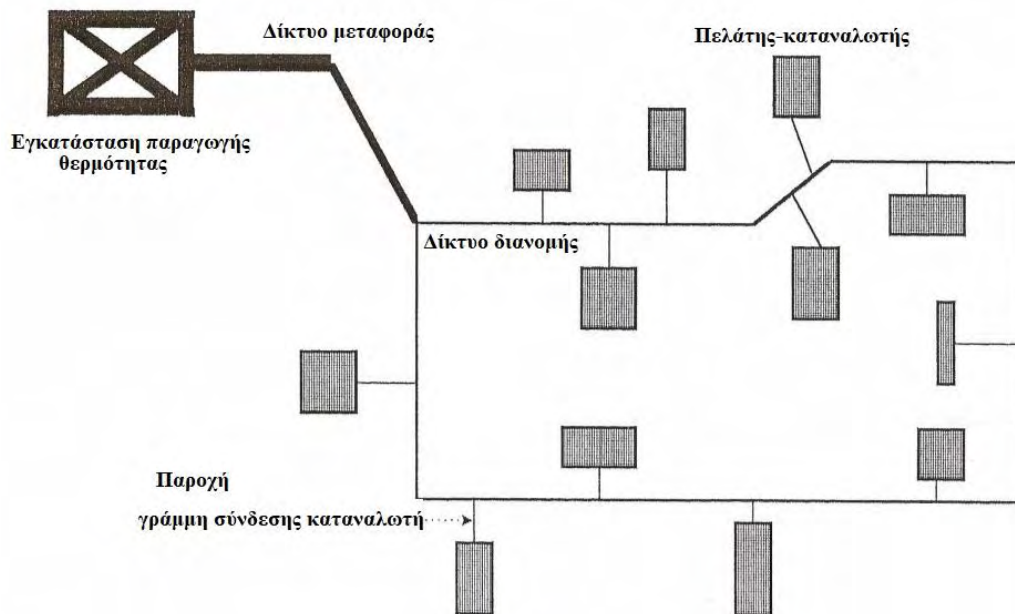


*Σχήμα 3.6:* Ατμοστρόβιλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας *ΠΗΓΗ:* [www.mpoweruk.com](http://www.mpoweruk.com)

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω μίας γεννήτριας. Η περιστροφή του άξονα του στροβίλου κινεί μία μηχανή συγχρόνων περιστρεφόμενων πεδίων η οποία ονομάζεται γεννήτρια. Η απόδοση αυτών των μηχανών μπορεί να φτάσει μέχρι 98-99% με το μόνο αρνητικό να εντοπίζεται στο ότι για παράδειγμα μία γεννήτρια 1000 MW αποβάλλει 20 MW θερμικών απωλειών με αποτέλεσμα να απαιτούνται ειδικές τεχνικές ψύξης. Η αρχή λειτουργίας κρίνεται σκόπιμο να παραληφθεί καθώς δε σχετίζεται άμεσα με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

### 3.1.3 Τηλεθέρμανση

Ο ατμός που θα βρεθεί στις τελευταίες βαθμίδες του ατμοστρόβιλου απομαστεύεται και συνήθως χρησιμοποιείται εναλλάκτης θερμότητας που παράγει υπέρθερμο νερό το οποίο διανέμεται μέσω ενός δικτύου σωληνώσεων και με τη βοήθεια αντλιών προς τη θερμική κατανάλωση. Η παραγωγή θερμότητας πλησίον του σημείου κατανάλωσής της φέρει τα πλεονεκτήματα του μικρού κόστους του έργου μεταφοράς (π.χ. δίκτυο αγωγών) και του μικρού λειτουργικού κόστους (π.χ. άντληση του θερμού νερού προς το δίκτυο διανομής). Βέβαια σε κάθε περίπτωση ο συνδυασμός της διαθέσιμης ενέργειας προς μεταφορά και της απόστασης είναι αυτός που θα καθορίσει τη βέλτιστη οικονομοτεχνική λύση του έργου τηλεθέρμανσης. Οι εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν το αντλιοστάσιο και τους αγωγούς προσαγωγής-επιστροφής αλλά επίσης και λέβητες αιχμής-εφεδρείας (με χρήση υγρών καυσίμων) σε περίπτωση βλάβης ή αυξημένης ζήτησης. Οι αγωγοί μπορεί να είναι υπέργειοι ή υπόγειοι. Οι υπέργειοι αγωγοί έχουν σαφώς μικρότερο κόστος εγκατάστασης ανά τρέχον μέτρο ενώ μονώνονται και καλύπτονται με προστατευτικό μεταλλικό κέλυφος αφού εγκατασταθούν. Αντίθετα, οι υπόγειοι αγωγοί είναι προμονωμένοι και απαιτούν προσεκτική σύνδεση. Στα περισσότερα συστήματα το μήκος των υπόγειων σωληνώσεων είναι σημαντικά μικρότερο από το αντίστοιχο των υπέργειων.



**Σχήμα 3.7:** Απλοποιημένο σύστημα τηλεθέρμανσης ΠΗΓΗ: Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού

Σημαντικά στοιχεία τα οποία πρέπει να είναι γνωστά προκειμένου να προχωρήσει ο σχεδιασμός ενός δικτύου τηλεθέρμανσης είναι:

- Η θερμική ενέργεια που δύναται να παρέχει η εγκατάσταση.
- Η ζήτηση της θερμικής ενέργειας και σε ποια απόσταση από την εγκατάσταση.
- Οι κλιματικές συνθήκες ανάλογα σε ποια περιοχή κατασκευάζεται η εγκατάσταση.

Η ζήτηση της θερμικής ενέργειας περιλαμβάνει τις βιομηχανικές και οικιακές απαιτήσεις σε θερμικά φορτία. Οι βιομηχανικές απαιτήσεις αποτελούνται συνήθως από μεγάλα θερμικά φορτία τα οποία διατηρούνται σταθερά όλο το χρόνο. Μία υψηλή ζήτηση έχει ως αποτέλεσμα ένα υψηλό συντελεστή φορτίου που επηρεάζει θετικά τη βιωσιμότητα της τηλεθέρμανσης. Όλα τα θερμικά φορτία υπολογίζονται με βάση τη ζήτηση αιχμής και οι απώλειες του συστήματος με βάση τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Σε ό,τι αφορά τις οικιακές απαιτήσεις σε ζεστό νερό, ο υπολογισμός βασίζεται στα καθορισμένα δεδομένα κάθε κατοικίας που πρόκειται να συνδεθεί. Παρ' όλα αυτά, η ζήτηση επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που μεταβάλλονται συχνά και απρόβλεπτα με αποτέλεσμα να στα αρχικά στάδια του έργου να απαιτούνται προσεγγιστικές μέθοδοι. Η πιθανή ετήσια κατανάλωση θερμικής ενέργειας εξαρτάται από τη ζήτηση αιχμής και μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση:

$$E = G \times K \times 24 \times \frac{Q}{\Delta_t}$$

G: ο ετήσιος αριθμός βαθμοημερών θέρμανσης (βαθμοημέρες είναι ο αριθμός των ημερών ανά χρόνο πολλαπλασιασμένος με τους βαθμούς διαφοράς ανάμεσα στην

εξωτερική θερμοκρασία και μια θερμοκρασία αναφοράς στην οποία ο άνθρωπος αισθάνεται άνετα)

K: συντελεστής διάρκειας λειτουργίας ανά ημέρα

Δ: η μέση τιμή διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος για τη χειμερινή περίοδο.

Q: η μέγιστη πιθανή τιμή ζήτησης (αιχμή κατανάλωσης)

Συντελεστές που επηρεάζουν τη ζήτηση στο χρόνο είναι ο ρυθμός αύξησης του πληθυσμού και ο ρυθμός αύξησης των συνδέσεων μέχρι τον κορεσμό της εγκατάστασης. Ο ρυθμός εισχώρησης νέων καταναλωτών εξαρτάται σημαντικά από το οικονομικό σύστημα (μονοπώλιο, ανταγωνισμός) και από το προϋπάρχον σύστημα θέρμανσης. Στη συνέχεια μελετώνται τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του συστήματος όπως το μήκος των σωληνώσεων, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (π.χ. στροφές σωλήνωσης), η ογκομετρική παροχή νερού, η μέση ταχύτητα, η πτώση πίεσης και επιλέγεται η διάμετρος των σωλήνων καθώς και ο αριθμός των αντλιοστασίων. Για την οικονομική βιωσιμότητα του έργου υπολογίζονται τα ετήσια λειτουργικά έξοδα και η ετήσια επιβάρυνση για την απόσβεση των επενδύσεων.

#### A. Ετήσια λειτουργικά κόστη

1. Ετήσιο κόστος θερμικών απωλειών κατά τη διανομή του ζεστού νερού
2. Ετήσιο κόστος λειτουργίας των αντλιών του συστήματος

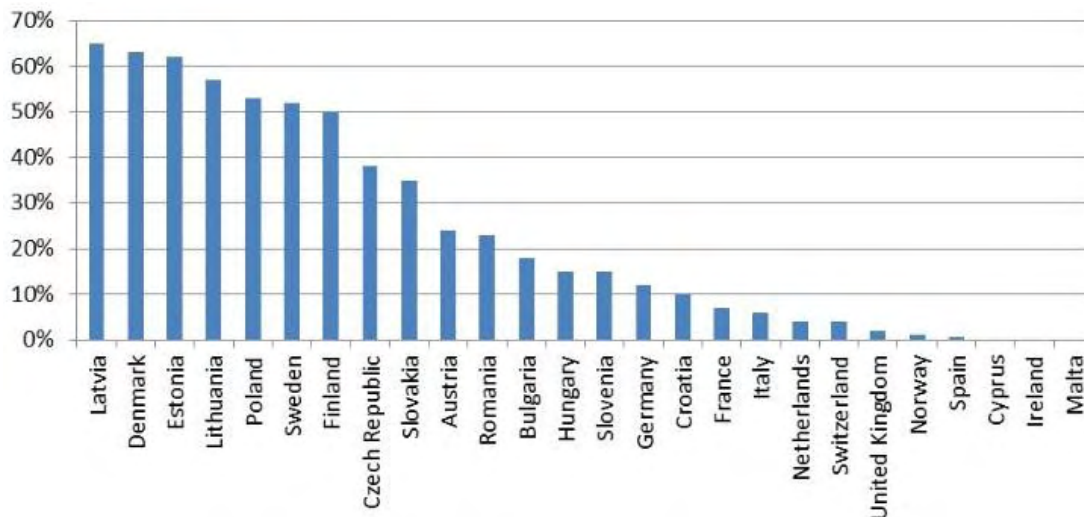
#### B. Ετήσια επιβάρυνση για την απόσβεση των επενδύσεων

1. Αρχικό κόστος εγκατάστασης του δικτύου σωληνώσεων
2. Αρχικό κόστος εγκατάστασης των αντλιών
3. Αρχικό κόστος εγκατάστασης μόνωσης

Με βάση τα παραπάνω βέβαια μπορεί να εκτιμηθεί το ετήσιο κόστος που αφορά διαφορετικές διαμέτρους σωλήνα και να επιλεγεί η οικονομικότερη διάμετρος αγωγού που θα μεταφέρει το υπέρθερμο νερό.

Η ρύθμιση του συστήματος της τηλεθέρμανσης γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η μονάδα παραγωγής να προσαρμόζεται στο θερμικό φορτίο όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Για παράδειγμα, η παροχή νερού είναι ανάλογη με το θερμικό φορτίο και έτσι όσο πιο μεγάλη είναι η ζήτηση τόσο πρέπει να αυξηθεί η παροχή που μεταφράζεται σε μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφών στις αντλίες. Όμοια σε περίπτωση μείωσης της ζήτησης, οι αντλίες είναι ρυθμισμένες να μειώνουν τις στροφές τους. Ένας άλλος τρόπος ρύθμισης επιτυγχάνεται μέσω της μεταβολής της θερμοκρασίας του νερού που αποστέλλεται στο δίκτυο. Η διαφορά ανάμεσα στους δύο τρόπους ρύθμισης εντοπίζεται στο είδος των μεταβολών της ζήτησης. Για στιγμιαίες μεταβολές, εφαρμόζεται ο πρώτος τρόπος (ρύθμιση της παροχής) ενώ για εποχικές μεταβολές (εναλλαγή φθινοπώρου, χειμώνα, άνοιξης, καλοκαιριού) ρυθμίζεται η θερμοκρασία του νερού από την εγκατάσταση.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που κοινοποιεί η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέχρι το 2013 περίπου 70 εκατομμύρια πολίτες επωφελούνται από την τηλεθέρμανση ενώ 140 εκατομμύρια ζουν σε πόλεις με εγκατεστημένο σύστημα τηλεθέρμανσης. Το συνολικό μήκος των αγωγών ξεπερνά τα 150000 χιλιόμετρα. Η Δανία, η Σουηδία, η Πολωνία, η Γερμανία και η Φινλανδία κατέχουν το 65% του συνολικού μήκους δικτύων. Το ποσοστό της θερμικής ενέργειας που καταναλώνεται σε οικίες αποτελεί το 45 % και σε βιομηχανίες το 35%. Βέβαια κάποιες χώρες (Γερμανία, Ιταλία κ.α.) χρησιμοποιούν την τηλεθέρμανση κυρίως στο βιομηχανικό τομέα. Το συνολικό θερμικό φορτίο για το έτος 2012 ήταν 576 TWh.



**Σχήμα 3.8:** Εισχώρηση της τηλεθέρμανσης στην Ευρώπη *ΠΗΓΗ:* European Commission

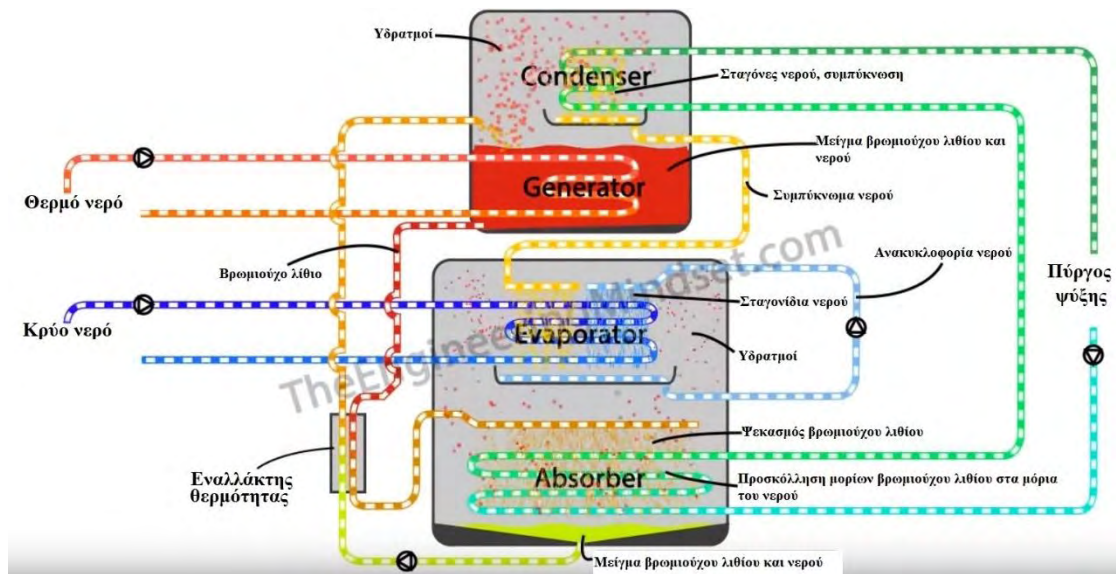
Συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα της τηλεθέρμανσης είναι:

- Μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> καθώς μειώνεται η συνολική χρήση ορυκτών καυσίμων ενώ αυξάνεται η ενεργειακή ανεξαρτησία της χώρας.
- Μείωση του θείου στην ατμόσφαιρα. Λόγω του φαινομένου αναστροφής δε μπορεί να διαχυθεί προς τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας καθώς οι καπνοδόχοι των οικιών βρίσκονται σε μικρό ύψος. Αντίθετα, η συγκεντρωμένη εκπομπή ρύπων από την υψηλή καπνοδόχο της εγκατάστασης ξεπερνά τη στάθμη αναστροφής.
- Μείωση της θερμικής ρύπανσης καθώς αξιοποιείται θερμότητα που θα κατέληγε απευθείας στο περιβάλλον.
- Οικονομική θέρμανση για τους καταναλωτές
- Αύξηση των τοπικών θέσεων εργασίας (νέες βιομηχανίες, θερμοκήπια κλπ.)

### 3.1.4 Τηλεψύξη

Η τηλεψύξη βασίζεται σε παρόμοιες αρχές με την τηλεθέρμανση. Το δίκτυο τηλεθέρμανσης κατά τη διάρκεια της ζήτησης σε ψύξη χρησιμοποιείται ως δίκτυο τηλεψύξης και στο εσωτερικό των αγωγών μεταφέρεται κρύο νερό. Όπως και στην περίπτωση της θέρμανσης έτσι και στην ψύξη είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του ψυκτικού φορτίου ώστε να ρυθμιστεί η θερμοκρασία προσαγωγής του νερού και η ταχύτατητά του εντός των αγωγών.

Η παραγωγή του κρύου νερού που θα τροφοδοτηθεί στο δίκτυο γίνεται μέσω μίας μονάδας ψύξης. Πρακτικά, το υπέρθερμο νερό που τροφοδοτείται στην προσαγωγή ου δικτύου τηλεθέρμανσης αποστέλλεται στη μονάδα ψύξης κατά τη διάρκεια των μηνών που υπάρχει ζήτηση σε ψύξη. Ο τρόπος λειτουργίας μίας τέτοιας μονάδας παρουσιάζεται μέσω του επόμενου σχήματος.



**Σχήμα 3.9:** Μονάδα ψύξης [ΠΗΓΗ: TheEngineeringMindset.com](http://TheEngineeringMindset.com)

Η διαδικασία ξεκινά από τον absorber όπου στη βάση του υπάρχει μείγμα βρωμιούχου λιθίου και νερού σε αναλογία 60% και 40% αντίστοιχα. Με τη βοήθεια μίας αντλίας το μείγμα καθώς προθερμαίνεται, δια μέσου ενός εναλλάκτη ο οποίος χρησιμοποιείται για να αυξήσει την απόδοση της διαδικασίας, μεταφέρεται στον generator όπου θερμαίνεται περαιτέρω καθώς έρχεται σε επαφή με σωληνώσεις εντός των οποίων κυκλοφορεί το θερμό νερό που παράγει η εγκατάσταση. Με την αύξηση της θερμοκρασίας σχηματίζονται υδρατμοί με αποτέλεσμα στη βάση του generator το θερμό μείγμα έχει αυξήσει την περιεκτικότητά σε βρωμιούχο λίθιο και οδηγείται στον εναλλάκτη θερμότητας, όπου θα μεταφέρει μέρος της θερμότητάς του στο μείγμα που κατευθύνεται στο generator, πριν καταλήξει ξανά στον absorber όπου και ψεκάζεται. Πίσω στον generator, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται στα τοιχώματα σωλήνα που μεταφέρει νερό από τον πύργο ψύξης, μία κατασκευή που χρησιμοποιείται για να απορρίπτεται στο περιβάλλον η θερμότητα που απομακρύνεται κατά τη διαδικασία ψύξης, σε θερμοκρασία ικανή για να προκαλέσει το φαινόμενο της συμπύκνωσης. Οι σταγόνες νερού συγκεντρώνονται σε δοχείο όπως φαίνεται στο σχήμα. Από το δοχείο θα μεταφερθούν και θα ψεκαστούν στον εξατμιστή (evaporator) όπου η πίεση είναι πολύ χαμηλή. Η ξαφνική πτώση στην πίεση προκαλεί ραγδαία πτώση της θερμοκρασίας του νερού περίπου στους 4 °C. Σε αυτό το σημείο εισέρχονται σωλήνες με νερό το οποίο θα ψυχθεί καθώς εξωτερικά ρέει το νερό των 4 °C. Το κρύο πλέον νερό εντός του σωλήνα (chilled water) εξέρχεται σε θερμοκρασία περίπου 7 °C και είναι αυτό που θα τροφοδοτηθεί στο δίκτυο τηλεψύξης. Από τη μεριά του το νερό, που καλύπτει το εξωτερικό των σωλήνων σε λεπτό υμένα, απορροφά τη θερμότητα του νερού προς ψύξη και λόγω της χαμηλής πίεσης μετατρέπεται σε υδρατμούς ή ατμό. Το νερό που δεν ήρθε σε επαφή με τους σωλήνες συγκεντρώνεται σε δοχείο και ανατροφοδοτείται στο στόμιο ψεκασμού μέχρι να εξατμιστεί. Οι υδρατμοί που έχουν σχηματιστεί στο εσωτερικό του θαλάμου του εξατμιστή έλκονται από το μείγμα βρωμιούχου λιθίου το οποίο ψεκάζεται στον absorber. Η έλξη του νερού και του βρωμιούχου λιθίου είναι τόσο έντονη που ευθύνεται για τη χαμηλή πίεση του εξατμιστή. Όσο μεγαλύτερη είναι η συγκέντρωση του βρωμιούχου λιθίου τόσο ισχυρότερη είναι η έλξη με τα μόρια του νερού. Όταν ενωθούν μεταξύ τους παράγεται θερμότητα η οποία πρέπει, μαζί με τη θερμότητα που απομακρύνθηκε από το νερό προσαγωγής της τηλεθέρμανσης, να απομακρυνθεί και για το λόγο αυτό η κυκλοφορία του νερού του πύργου ψύξης διέρχεται επίσης από τον absorber για να

παραλάβει αυτά τα ποσά θερμότητας. Με την απαγωγή της θερμότητας οι υδρατμοί θα συμπυκνωθούν και μαζί με το ιωδιούχο βρώμιο θα σχηματίσουν και πάλι υγρό μείγμα το οποίο είναι έτοιμο να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να επαναληφθεί ο ψυκτικός κύκλος που περιεγράφηκε.

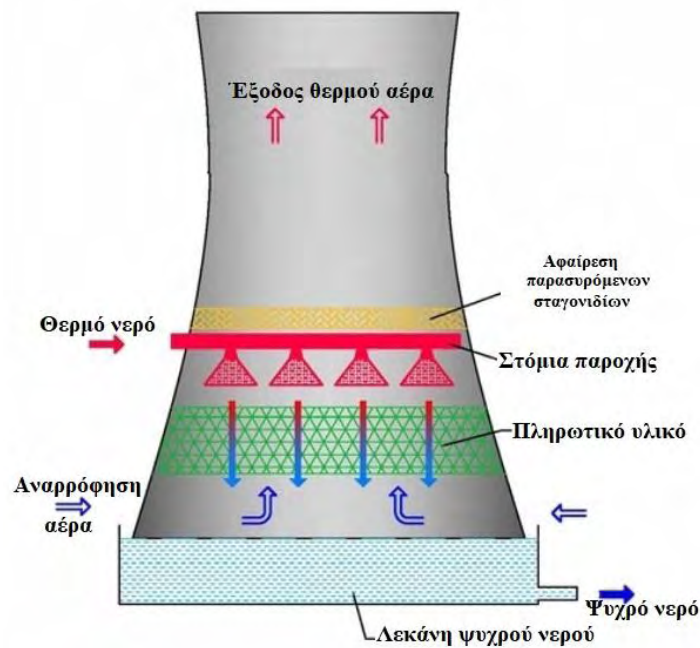
Οι πύργοι ψύξης αποτελούν ίσως την πιο επιβλητική κατασκευή σε μία εγκατάσταση καθώς φτάνουν τα 100 m σε ύψος και μέγιστη διάμετρο τα 300 m.



*Σχήμα 3.10:* Πύργοι ψύξης φυσικής κυκλοφορίας [IHHH](http://zenithstructural.com):zenithstructural.com

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο φαινόμενο της φυσικής κυκλοφορίας θερμού και υγρού αέρα που μετακινείται προς την έξοδο του πύργου ψύξης που βρίσκεται σε μεγάλο ύψος. Χαρακτηρίζονται από υπερβολοειδή μορφή και αποτελούν την πιο συνιθισμένη τακτική ψύξης από βιομηχανίες που χρειάζονται μεγάλες παροχές ψυχρού νερού. Σε αντίθεση με τους πύργους εξαναγκασμένης κυκλοφορίας οι οποίοι απαιτούν εξοπλισμό ελκυσμού, οι πύργοι ψύξης φυσικής κυκλοφορίας δεν έχουν κινούμενα μέρη, γεγονός που τους καθιστά λειτουργικά αξιόπιστους χωρίς σημαντικές απαιτήσεις ως προς τη συντήρηση. Όπως παρατηρούμε στο σχήμα 3.11, το θερμό νερό ψεκάζεται με στόμια πάνω από το πληρωτικό υλικό. Από την άλλη μεριά, ο αέρας συνθηκών περιβάλλοντος εισέρχεται στο πληρωτικό υλικό, το οποίο εξασφαλίζει την απαραίτητη επιφάνεια επαφής με το θερμό νερό, ώστε να υπάρξει εναλλαγή θερμότητας ανάμεσα στα δύο ρεύματα που βρίσκονται σε αντιροή. Στη συνέχεια ο θερμός αέρας και υγρός αέρας διέρχεται μέσω υλικού που αφαιρεί τα σταγονίδια νερού που έχουν παρασυρθεί από το ρεύμα και εξέρχεται στο περιβάλλον από την κορυφή του πύργου. Στη βάση του πύργου βρίσκεται η λεκάνη συλλογής του ψυχρού νερού καθώς και η έξοδός του. Με δεδομένη τη δυναμικότητα του πύργου που αφορά την παροχή και τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού καθορίζονται το ύψος του πληρωτικού υλικού του πύργου (συνδέεται με συγκεκριμένη παροχή αέρα) και οι απαραίτητη διατομή ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα πλημύρισης ή έντονου συμπαρασυρμού του νερού από τον αέρα. Περισσότερες λεπτομέρειες για το σχεδιασμό ενός πύργου ψύξης βρίσκονται στις σημειώσεις του μαθήματος Φυσικών Διεργασιών του κ. Β. Μποντόζογλου.



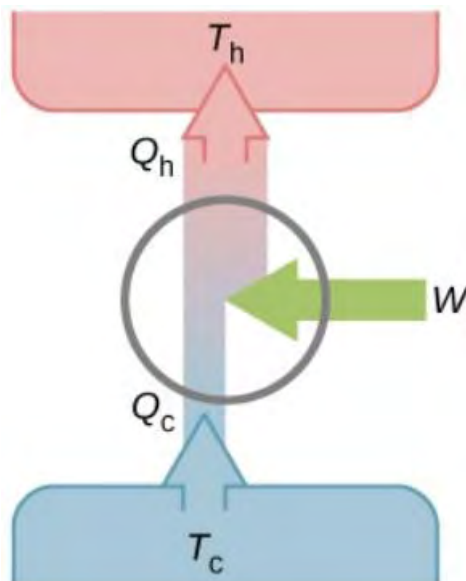


Σχήμα 3.11: Αρχή λειτουργίας πύργου ψύξης φυσικής κυκλοφορίας  
 ΠΗΓΗ: [theengineeringconcepts.com](http://theengineeringconcepts.com)

Σημαντικό μέγεθος σύμφωνα με το οποίο κρίνεται ένα σύστημα ψύξης είναι ο συντελεστής COP (coefficient of performance) ο οποίος ορίζεται ως:

$$\text{COP} = \frac{\text{Ψυκτικό φορτίο (kW)}}{\text{Εισερχόμενη Θερμότητα (kW)}}$$

Επιπλέον, η μονάδα ψύξης υπακούει στον ανεστραμμένο κύκλο Carnot οπότε ο ιδανικός βαθμός απόδοσης είναι:



Σχήμα 3.12: Ανεστραμμένος κύκλος Carnot ΠΗΓΗ: [phys.libretexts.org](http://phys.libretexts.org)

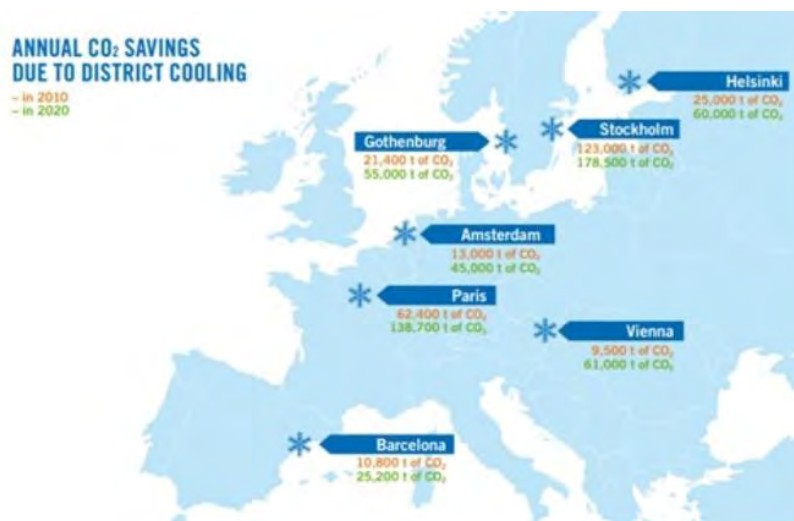
$$COP_{ideal} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

και αποτελεί τη βέλτιστη θεωρητική απόδοση της μονάδας.

Με βάση τα παραπάνω, ο θερμοδυναμικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ως εξής:

$$n_{TD} = \frac{COP}{COP_{ideal}}$$

Η μονάδα ψύξης όπως παρουσιάστηκε (absorption cooling system) έχει χαμηλό COP (ο ιδανικός βαθμός COP είναι περίπου 2,5 άρα ο πραγματικός είναι ακόμα χαμηλότερος) σε σχέση με μία αντλία θερμότητας η οποία θεωρείται συμφέρουσα επιλογή για τιμές  $COP > 4$ . Παρόλα αυτά, έχουν σημαντικά χαμηλότερο λειτουργικό κόστος καθώς τροφοδοτούνται με ατμό χαμηλότερης ποιότητας που αποτελεί φθηνότερη πηγή ενέργειας από την ηλεκτρική μιας και σε πολλές περιπτώσεις απλά δε θα αξιοποιούταν.



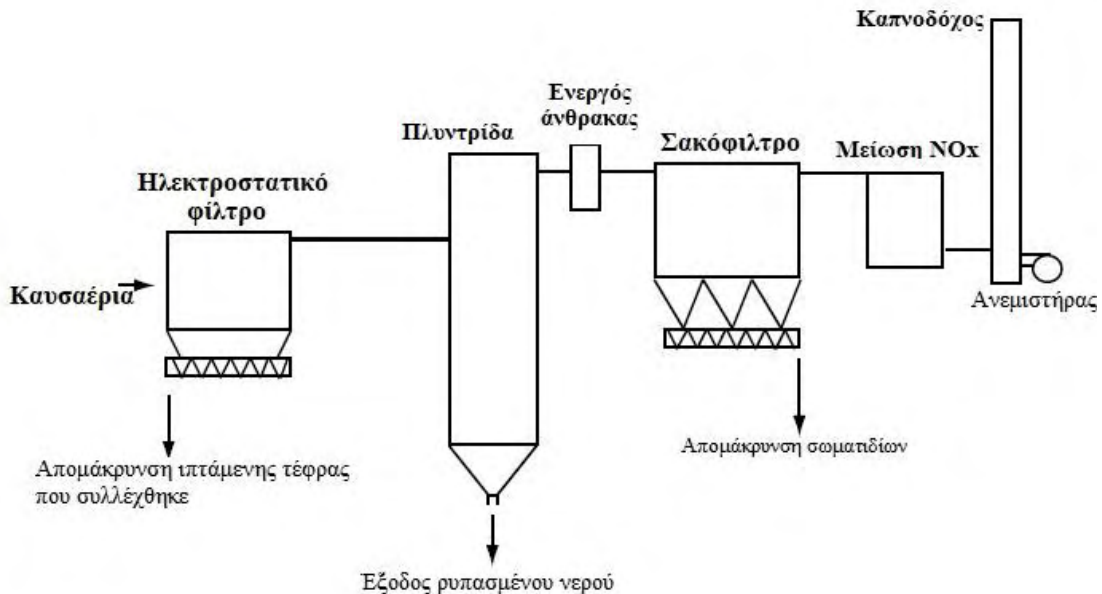
**Σχήμα 3.13:** Ετήσια μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> ΠΗΓΗ: Department of Energy Michel NOUSSAN, Marco MASOERO TOWARDS ASTANA Expo 2017 – “Future Energy” District Heating and Cooling: an opportunity for energy efficiency.

Σημαντικός είναι ο ρόλος της τηλεψύξης στην μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Το σημερινό ποσοστό της στην αγορά ψύξης της Ευρώπης είναι 2% και συνεπάγεται κάλυψη ψυκτικού φορτίου ίσου περίπου με 10 PJ (3 TWh). Όπως φαίνεται και στο σχήμα η διείσδυσή της σε εθνικό επίπεδο ποικίλει. Βέβαια εμφανίστηκε πολύ πρόσφατα στην αγορά και είναι σαφώς λιγότερο ανεπτυγμένη σε σχέση με την πορεία της τηλεθέρμανσης. Ωστόσο, με βάση τις προβλέψεις για το 2020 παρατηρούμε αξιοσημείωτη ανάπτυξη ως προς την ικανότητα κάλυψης ψυκτικών φορτίων.

### 3.2 Έλεγχος εκπομπών

Με την ολοκλήρωση του σταδίου της μεταφοράς θερμότητας προς τους εναλλάκτες, τα καυσαέρια βρίσκονται σε χαμηλότερη θερμοκρασία και εισέρχονται στο σύστημα αντιρρυπαντικής τεχνολογίας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σύστημα αυτό πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των οδηγιών ελέγχου εκπομπών που περιγράφονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (EC Waste Incineration Directive 2000) και για το λόγο αυτό κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους, της τεχνολογικής πολυπλοκότητας και του χώρου που απαιτεί σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματα της εγκατάστασης. Επιπροσθέτως, τα όρια εκπομπών της Ευρωπαϊκής νομοθεσίας δεν αποτελούν μόνο προϋπόθεση για την προστασία του περιβάλλοντος αλλά και μέτρο σύγκρισης μεταξύ εγκαταστάσεων που λειτουργούν σε διαφορετικές συνθήκες. Όλα λοιπόν τα όρια και τα δεδομένα σχετικά με τις εκπομπές αναφέρονται σε μία σειρά συνθηκών αναφοράς όπως 7% O<sub>2</sub>, 9% O<sub>2</sub>, 9% CO<sub>2</sub>, 11% O<sub>2</sub>, 11% CO<sub>2</sub> κ.α. Με άλλα λόγια, με τον τρόπο αυτό τα δεδομένα των εκπομπών είναι αρκετά όμοια μεταξύ των χωρών όπως για παράδειγμα η ογκομετρική παροχή καυσαερίων που συνήθως βρίσκεται μεταξύ 4500 και 6000 m<sup>3</sup> ανά τόνο σε 11% O<sub>2</sub> ως συνθήκη αναφοράς.

Ένα θεωρητικό σύστημα καθαρισμού παρουσιάζεται στο σχήμα 3.14.

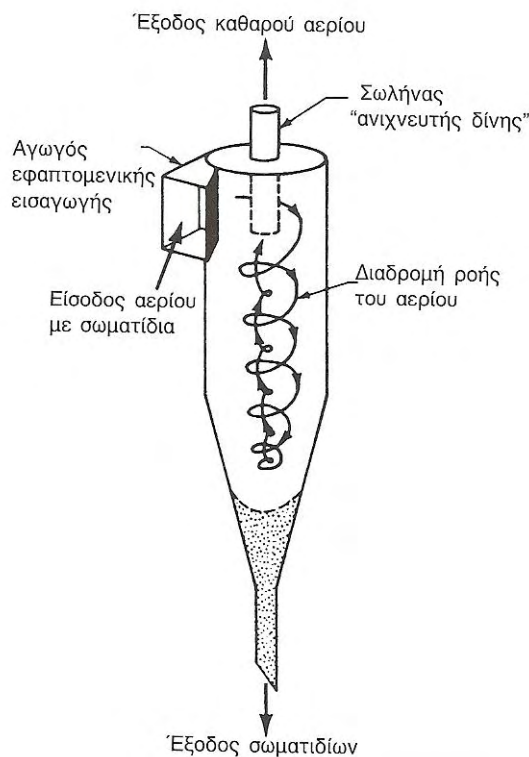


**Σχήμα 3.14:** Θεωρητικό σύστημα ελέγχου εκπομπών *ΠΗΓΗ:* Waste Treatment and Disposal, Second Edition, Professor Paul T. Williams

Τα αιωρούμενα σωματίδια αφαιρούνται σε πρώτο στάδιο από ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο και στη συνέχεια τα όξινα αέρια καθαρίζονται από μία πλυντρίδα. Στη συνέχεια ακολουθεί μία συσκευή που περιέχει ενεργό άνθρακα για να απορροφήσει τις διοξίνες και τα φουράνια ενώ το σακόφιλτρο αναλαμβάνει να απομακρύνει τα λεπτά σωματίδια και τον ενεργό άνθρακα που έχει συλλέξει τους ρύπους στο προηγούμενο στάδιο. Τέλος τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) αφαιρούνται με προσθήκη αμμωνίας για να σχηματιστεί αδρανές άζωτο. Καθεμία από τις συσκευές θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα παρακάτω ξεκινώντας από ένα κυκλώνα (δε συμπεριλαμβάνεται στο σχήμα) και καταλήγοντας στην καπνοδόχο της εγκατάστασης.

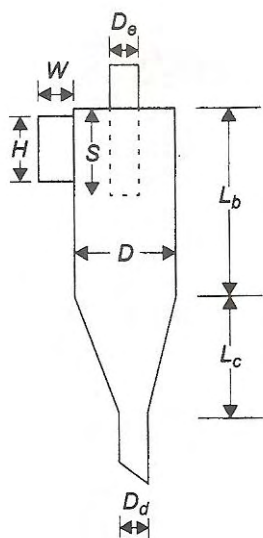
### 3.2.1 Κυκλώνες

Οι κυκλώνες είναι αποτελεσματικές συσκευές απομάκρυνσης σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη από 15  $\mu\text{m}$ , αλλά η απόδοσή συλλογής τους μειώνεται όταν έχει να αντιμετωπίσει σωματίδια μικρότερων διαμέτρων. Επομένως, οι κυκλώνες πρέπει να τοποθετούνται πριν από τα ηλεκτροστατικά φίλτρα ή τα σακόφιλτρα ως μία μέθοδος προκαταρκτικού καθαρισμού του ρεύματος αερίων η οποία τελικά θα αυξήσει την απόδοση σε συνδυασμό με αυτές τις πιο αποτελεσματικές συσκευές συλλογής. Η αρχή λειτουργίας ενός κυκλώνα βασίζεται στη φυγόκεντρη δύναμη που δρα πάνω στα σωματίδια καθώς το ρεύμα αερίων εισέρχεται εφαπτομενικά της συσκευής και περιστρέφεται σε ένα ελικοειδές μονοπάτι προς τη βάση σχηματίζοντας μία δίνη. Τα σωματίδια υπό την επίδραση της δύναμης αυτής εκσφενδονίζονται στο εσωτερικό τοίχωμα του κυκλώνα και πέφτουν προς τη βάση του όπου και συλλέγονται. Τα αέρια αφού απαλλαχθούν από τα εν λόγω σωματίδια, σχηματίζουν μία δεύτερη δίνη η οποία διασχίζει τον άξονα του κυκλώνα και διέρχεται από τον εσωτερικό κεντρικό αγωγό.



**Σχήμα 3.15:** Αρχή λειτουργίας κυκλώνα ΠΗΓΗ: Έλεγχος αέριας ρύπανσης, C. David Cooper, F.C. Alley

Είναι συσκευές που δεν απαιτούν μεγάλο κόστος τόσο σε κεφάλαιο όσο και σε συντήρηση διότι απουσιάζουν μηχανικά μέρη. Το κυριότερο ίσως μειονέκτημα αφορά την πτώση πίεσης που δημιουργούν και αυξάνουν κατά τον τρόπο αυτό το κόστος λειτουργίας. Οι τυπικές διαστάσεις των κυκλώνων υπακούουν σε μελέτες των Shepherd και Larple (1939, 1940) οι οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα.



	Τύπος Κυκλώνα				Υψηλής Δυναμικότητας	
	Υψηλής Απόδοσης		Συμβατικός		(5)	(6)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Διάμετρος Σώματος $D/D$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ύψος Στομίου Εισόδου $H/D$	0.5	0.44	0.5	0.5	0.75	0.8
Πλάτος Στομίου Εισόδου $W/D$	0.2	0.21	0.25	0.25	0.375	0.35
Διάμετρος Εξόδου Αερίου $D_e/D$	0.5	0.4	0.5	0.5	0.75	0.75
Μήκος Ανιχνευτή Δίνης $S/D$	0.5	0.5	0.625	0.6	0.875	0.85
Μήκος Σώματος $L_b/D$	1.5	1.4	2.0	1.75	1.5	1.7
Μήκος Κώνου $L_c/D$	2.5	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0
Διάμ. Εξόδου Σωματιδίων $D_d/D$	0.375	0.4	0.25	0.4	0.375	0.4

Οι στήλες (1) και (5) προσαρμόστηκαν από τον Stairmand, 1951· οι στήλες (2), (4) και (6) προσαρμόστηκαν από τον Swift, 1969· η στήλη (3) προσαρμόστηκε από τον Lapple, 1951.

**Σχήμα 3.16:** Τυπικοί κυκλώνες ΠΗΓΗ: Έλεγχος αέριας ρύπανσης, C. David Cooper, F.C. Alley

Η συνολική απόδοση ενός κυκλώνα είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος των αποδόσεων συλλογής για τα διάφορα είδη μεγέθους:

$$n_o = \sum n_j m_j$$

$n_j$ : η απόδοση συλλογής για το  $j$  εύρος του μεγέθους σωματιδίων (π.χ. 0-2  $\mu\text{m}$ )

$m_j$ : κλάσμα μάζας των σωματιδίων στο  $j$  εύρος μεγέθους (π.χ. το ποσοστό της μάζας των σωματιδίων που έχουν μέγεθος 0-2  $\mu\text{m}$ )

Το  $m_j$  υπολογίζεται με τη βοήθεια μίας συσκευής δειγματοληψίας η οποία ταξινομεί τα σωματίδια κατά μέγεθος. Το  $n_j$  υπολογίζεται με συνδυασμό ημι-εμπειρικής σχέσης του Lapple (1950) και μίας αλγεβρικής εξίσωσης των Theodore και DePaola (1980). Αν η απόδοση συλλογής (πάντα μικρότερη της μονάδας) αφαιρεθεί από τη μονάδα τότε προκύπτει η κλασματική διείσδυση η οποία είναι σημαντική πληροφορία για τη συσκευή που ακολουθεί αν γίνεται λόγος για συσκευές καθαρισμού τοποθετημένες σε σειρά

(δηλαδή η έξοδος της μίας αποτελεί την είσοδο της άλλης) καθώς έχει να διαχειριστεί διαφορετική ποσότητα από κάθε εύρος μεγέθους.

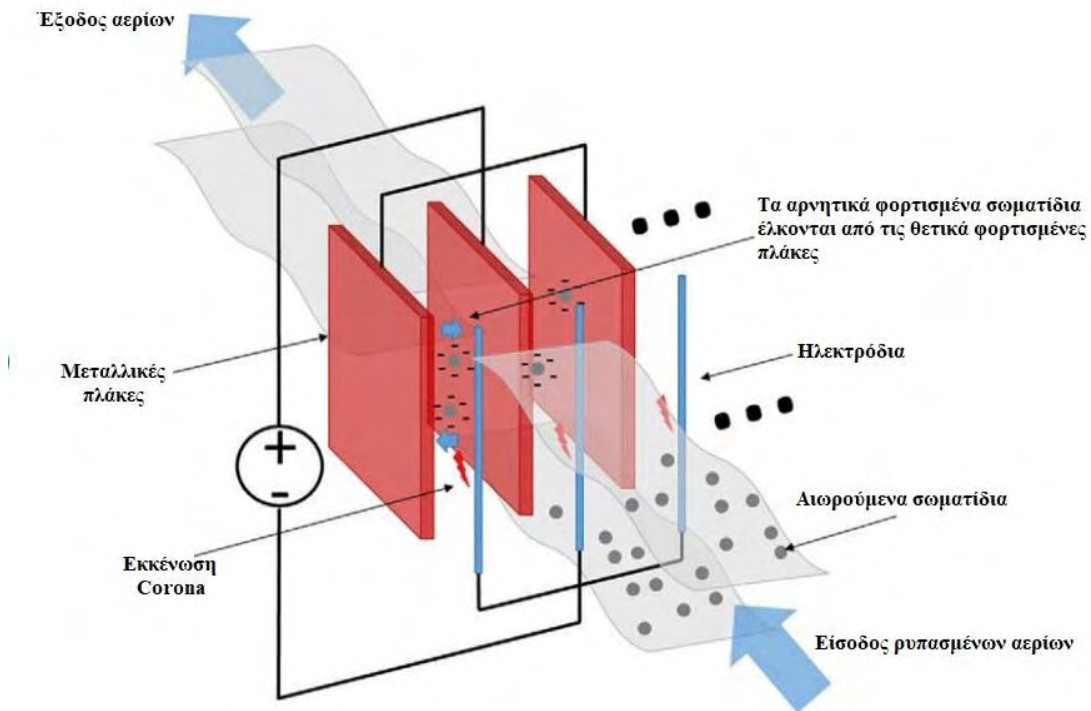
$$P_t = 1 - n_o$$

$P_t$ : κλασματική διείσδυση

Η απόδοση συλλογής ενός κυκλώνα μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας (π.χ. θερμοκρασία και παροχή αερίων).

### 3.2.2 Ηλεκτροστατικά φίλτρα

Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα (Electrostatic Precipitator-ESP) προκαλούν ιονισμό των καυσαερίων με το ρυπαντικό φορτίο που ρέει ανάμεσα στα ηλεκτρόδια με αποτέλεσμα τη φόρτιση, τον ελκυσμό και τη συλλογή των σωματιδίων στις αντίθετα φορτισμένες πλάκες. Η συλλογή τους από τις πλάκες προς τη βάση του ESP, όπου βρίσκεται η χοάνη συλλογής, γίνεται με τσίναγμα ή ξέπλυμα.



**Σχήμα 3.17:** Τρόπος λειτουργίας ESP ΠΗΓΗ: Data from Becker [30] ©2010 Nova Science Publishers

Τυπικές τιμές της ηλεκτρικής τάσης που χρησιμοποιείται είναι περίπου 50 kV. Η απόσταση μεταξύ των πλακών είναι περίπου 25 cm και ο συνολικός όγκος που καταλαμβάνει ένα ESP προσεγγίζει τα 7 m<sup>3</sup>. Η απόδοση της συσκευής είναι της τάξης 97 - 99,5 % ενώ χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα αποδοτική και για σωματίδια μεγέθους μικρότερου από την κλίμακα των μμ. Όπως οι κυκλώνες, τα ESP επηρεάζονται από τη θερμοκρασία των καυσαερίων και την υγρασία με τη διαφορά ότι παρουσιάζουν άλλον ένα παράγοντα ευαισθησίας που είναι η στρώση σωματιδίων που συσσωρεύεται στα ηλεκτρόδια.



*Σχήμα 3.18:* Βιομηχανικό ESP *ΠΗΓΗ:* isgrec.com

Οι συσκευές ESP απαιτούν υψηλό κόστος επένδυσης και όπως είναι φανερό από το παραπάνω σχήμα καταλαμβάνουν πολύ χώρο. Ωστόσο, εκτός των υψηλών αποδόσεων μπορούν να επεξεργάζονται μεγάλους όγκους αερίων χωρίς μεγάλη πτώση πίεσης και για το λόγο αυτό είναι αναπόσπαστο κομμάτι του συστήματος ελέγχου εκπομπών μίας εγκατάστασης.

Η απόδοση της συλλογής για ένα ESP υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης Deutsch:

$$\eta = 1 - e^{(-wA/Q)}$$

w: η ταχύτητα πλαγιολίσθησης

A: η συνολική επιφάνεια συλλογής

Q: η ογκομετρική παροχή των αερίων

Ο υπολογισμός της ταχύτητας πλαγιολίσθησης περιγράφεται στο σύγγραμμα «Έλεγχος αέριας ρύπανσης» των C. David Cooper και F.C. Alley στην ενότητα των ESP.

Ο υπολογισμός της συνολικής επιφάνειας συλλογής πραγματοποιείται με βάση το σκεπτικό ότι τα αέρια ρέουν δια μέσω των διαστημάτων μεταξύ των n πλακών και έτσι όλες οι n-2 έχουν δύο ενεργές επιφάνειες ενώ κάθε μία από τις δύο εξωτερικές πλάκες χρησιμοποιεί μόνο τη μία πλευρά της. Αν προστεθούν οι δύο «μονές» πλευρές θα δώσουν ακόμα μία πλάκα με δύο ενεργές επιφάνειες οπότε συνολικά θα υπάρχουν n-1 πλάκες. Αυτός ο αριθμός πλακών πολλαπλασιάζεται με τα τμήματα στη διεύθυνση ροής  $N_s$  του ESP και προκύπτει ο αριθμός των επιφανειών. Τέλος, το γινόμενο του αριθμού των πλακών με την επιφάνεια της πλάκας (συμπεριλαμβάνονται και οι δύο επιφάνειες) αποτελεί τη συνολική επιφάνεια συλλογής.

$$A = 2HL_p N_s (n - 1)$$

H: το ύψος της πλάκας

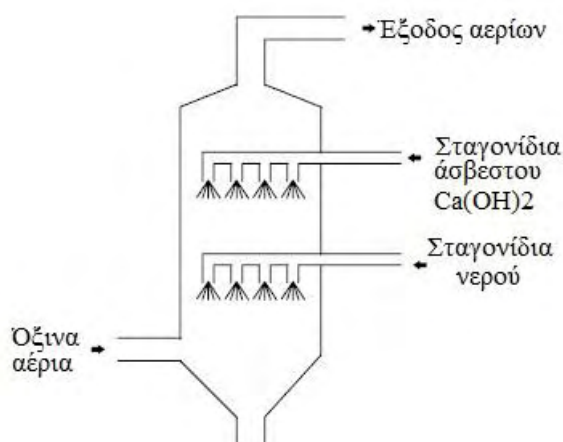
$L_p$ : το μήκος της πλάκας

$N_s$ : ο αριθμός των τμημάτων στη διεύθυνση της ροής

n: ο αριθμός των πλακών εν παραλλήλω κατά το πλάτος του ESP

### 3.2.3 Πλυντρίδες σωματιδίων

Αυτή η κατηγορία εξοπλισμού για τον έλεγχο των εκπομπών συλλέγει σωματίδια τα οποία έρχονται σε επαφή με ένα υγρό το οποίο συνήθως είναι νερό. Χρησιμοποιούνται για να απομακρύνουν όξινα αέρια όπως HCl, HF και SO<sub>2</sub>. Τα αέρια σε πρώτο στάδιο διοχετεύονται στη στήλη της πλυντρίδας σε αντιστροφή με σταγονίδια νερού τα οποία ψεκάζονται από ακροφύσια και απορροφούν το HCl και HF σχηματίζοντας υδροχλωρικό και υδροφθορικό οξύ. Το όξινο διάλυμα ρέει προς τη βάση της πλυντρίδας αφαιρώντας τα βαρέα μέταλλα που είναι ευδιάλυτα σε όξινα διαλύματα. Σε δεύτερη φάση, σε ανώτερο τμήμα της στήλης ή ακόμα και σε ξεχωριστή στήλη, ψεκάζεται αλκαλικό διάλυμα το οποίο συνήθως είναι άσβεστος για να απομακρύνει το υπόλοιπο HCl και SO<sub>2</sub>. Στο τελευταίο στάδιο, τα αέρια διέρχονται από διαφράγματα για την εξάλειψη της συμπαράσυρσης υγρού. Η απόδοση συλλογής είναι πολύ υψηλή σε ό,τι αφορά το HCl όπου υπερβαίνει το 95% ενώ για τα βαρέα μέταλλα αγγίζουν το 99% και 92% αναφορικά με το μόλυβδο και το κάδμιο αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.19:** Τυπική πλυντρίδα ΠΗΓΗ: European Commission 2004

Στα θετικά χαρακτηριστικά των πλυντρίδων εντάσσονται η ψύξη των θερμών αερίων (έξοδος περίπου στους 60 °C), η δυνατότητα χειρισμού εύφλεκτης και εκρηκτικής σκόνης χωρίς κίνδυνο και η προστασία των επόμενων συσκευών καθώς αδραντοποιούν διαβρωτικά αέρια και σκόνες. Στα αρνητικά σημεία, διατρέχουν υψηλό κίνδυνο διάβρωσης, ενδεχόμενη εκροή υδάτων μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα ρύπανσης νερού και τέλος η διάθεση της λάσπης των αποβλήτων μπορεί να απαιτεί υψηλά κόστη.



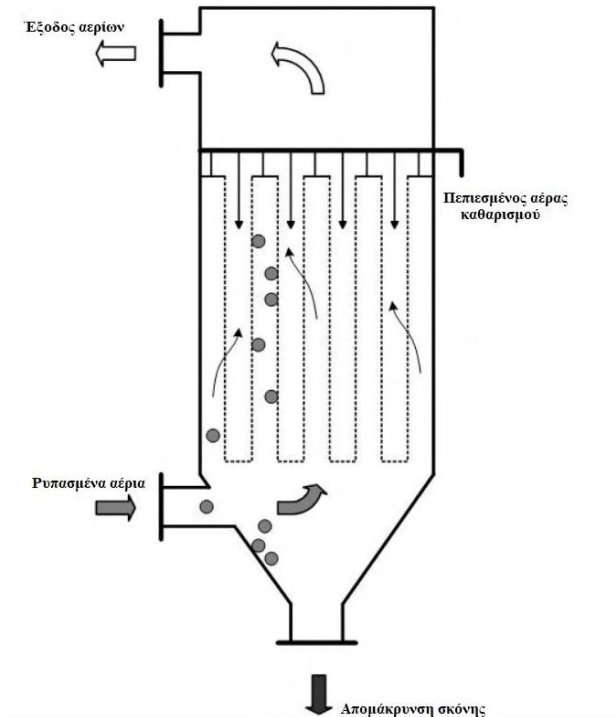


*Σχήμα 3.20: Όψη βιομηχανικής πλυντρίδας ΠΗΓΗ: UK Enviro Systems Pvt Ltd*

Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά μία πλυντρίδας οι οποίες δεν εξυπηρετούν τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, όπως η εξίσωση Calvert (1972), περιέχονται στο σύγγραμμα «Έλεγχος αέριας ρύπανσης», C. David Cooper, F.C. Alley.

### 3.2.4 Σακόφιλτρα

Η μέθοδος του φιλτραρίσματος με ύφασμα για το διαχωρισμό ξηρών σωματιδίων από ρεύμα αερίων είναι ιδιαίτερα γνωστή και διαδεδομένη. Τα σακόφιλτρα αποτελούνται από επιμήκη και διαπερατά φίλτρα στη μορφή λεπτών υφασμάτων σάκων οι οποίοι συλλέγουν τα σωματίδια. Οι κύριοι μηχανισμοί απομάκρυνσης είναι η πρόσκρουση, η διάχυση και η ηλεκτροστατική έλξη των σωματιδίων εκτός από το απλό φιλτράρισμα. Οι σάκοι μίας τέτοιας συσκευής, οι οποίοι μπορεί να φτάνουν τον αριθμό των 100, πρέπει πάντοτε να τοποθετούνται σε θήκη. Η προστασία τους εξασφαλίζεται με χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου των αερίων τα οποία είναι ικανά να προκαλέσουν φθορά σε διαφορετική περίπτωση. Πρόκειται για συσκευές ικανές να απομακρύνουν σωματίδια τάξης μεγέθους μικρότερης από  $\mu\text{m}$  και να μειώσουν τη συνολική συγκέντρωση σε σωματίδια στο επίπεδο των  $10 \text{ mg/m}^3$  ικανοποιώντας την ισχύουσα Ευρωπαϊκή νομοθεσία. Όλο και συχνότερα, τα σακόφιλτρα χρησιμοποιούνται ως η τελευταία συσκευή του συστήματος καθαρισμού μετά τα ηλεκτροστατικά φίλτρα και τις πλυντρίδες με την παρουσία βοηθητικής συσκευής ενεργού άνθρακα που θα αναλάβει τον έλεγχο των διοξινών και φουρανίων. Ο καθαρισμός τους από τα συσσωρευμένα σωματίδια είναι συχνός και εκτελείται με πεπιεσμένο αέρα ο οποίος διαστέλλει τους σάκους, εκτινάσσοντας τη σκόνη στη χοάνη συλλογής που βρίσκεται στη βάση της συσκευής.



**Σχήμα 3.21:** Αρχή λειτουργίας σακόφιλτρου ΠΗΓΗ: energie- en milieu-informatiesysteem voor het Vlaamse Gewest

Η πτώση πίεσης που απαιτούν τα σακόφιλτρα είναι σχετικά χαμηλή και ορίζεται ως εξής:

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_p + \Delta P_s$$

$\Delta P$  : η συνολική πτώση πίεσης

$\Delta P_f$ : η πτώση πίεσης λόγω του υφάσματος

$\Delta P_p$ : η πτώση πίεσης λόγω του στρώματος σωματιδίων

$\Delta P_s$  : η πτώση πίεσης λόγω της κατασκευής του σακόφιλτρου

Οι  $\Delta P_f$  και  $\Delta P_p$  υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης Darcy ενώ η  $\Delta P_s$  με βάση το μοντέλο αντίστασης φίλτρου σύμφωνα με το οποίο η πτώση πίεσης μπορεί να εκτιμηθεί για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας αν προηγηθούν δοκιμές μέτρησης πτώσης πίεσης ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάζεται ένα σακόφιλτρο δεν είναι συνηθισμένος καθώς η απόδοση συλλογής δεν είναι το ζητούμενο του κατασκευαστή όσο περίεργο και να θεωρείται κάτι τέτοιο. Η αποδοτικότητα ενός φίλτρου από ύφασμα που συντηρείται τακτικά και λειτουργεί σωστά κατόπιν καλού σχεδιασμού είναι δεδομένη και η προσοχή εστιάζεται στην ισορροπία μεταξύ κόστους επένδυσης και κόστους λειτουργίας (πτώση πίεσης). Καθοριστικής σημασίας στο σχεδιασμό του σακόφιλτρου βέβαια είναι και η προηγούμενη εμπειρία με παρόμοια αέρια όπως αυτά που θα κληθεί να επεξεργαστεί.

Στα αρνητικά χαρακτηριστικά τους εντοπίζεται η αδυναμία τους σε περιβάλλον με υγρασία και ο κίνδυνος για φωτιά ή έκρηξη εάν οι θερμοκρασίες ξεπεράσουν τις προδιαγεγραμμένες από τον κατασκευαστή.

Στο εμπόριο είναι διαθέσιμα τέσσερα είδη υλικού υφάσματος με διαφορές ως προς τις ιδιότητες που παρουσιάζουν όπως δείχνει το σχήμα 3.22.

Υλικό υφάσματος	Dralon-T	Nomex	PTFE	Glass fibre
Μέγιστη θερμοκρασία συνεχούς λειτουργίας	130 °C	200 °C	260 °C	220 -280 °C
Αντοχή σε υγρασία	καλή	μέτρια	εξαιρετική	καλή
Αντοχή σε όξινο περιβάλλον	καλή	μέτρια	εξαιρετική	καλή
Αντίσταση βάσης	μέτρια	καλή	εξαιρετική	μέτρια
Μηχανική αντοχή	καλή	καλή	λογική	λογική
Ευφλεκτότητα	Εύφλεκτο	Μη εύφλεκτο μέχρι τους 370°C	Μη εύφλεκτο	Μη εύφλεκτο
Σχετική τιμή	1	2.5 – 3.5	10 - 15	4 – 6

Σχήμα 3.22: Ιδιότητες σακόφιλτρων του εμπορίου

ΠΗΓΗ: energie- en milieu-informatiesysteem voor het Vlaamse Gewest

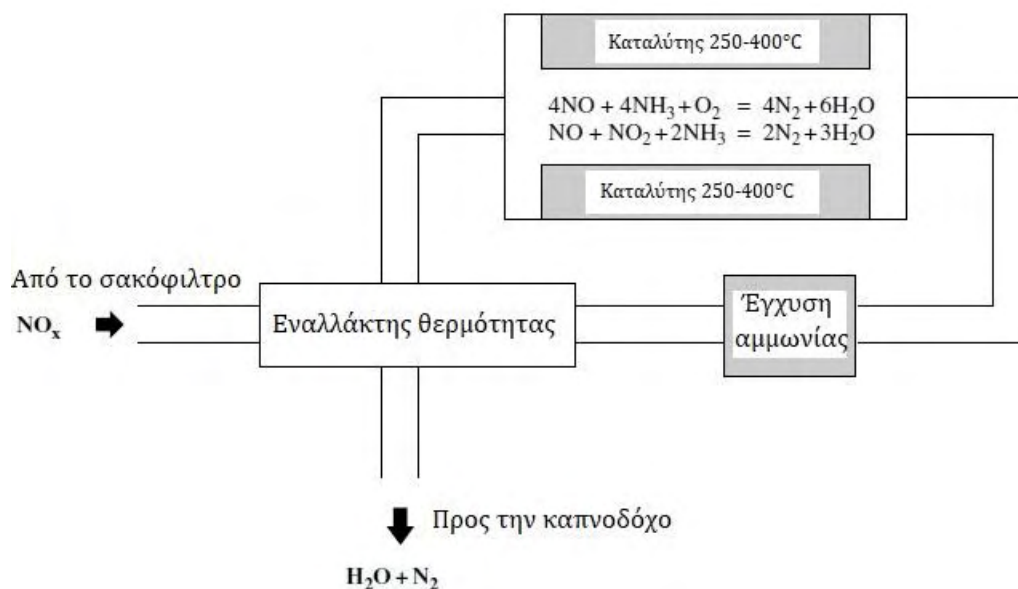


Σχήμα 3.23: Βιομηχανικό σακόφιλτρο ΠΗΓΗ: Wikipedia.org

### 3.2.5 Μείωση NO<sub>x</sub>

Τα οξείδια του αζώτου σχηματίζονται σε διεργασίες καύσης και επομένως οι σύγχρονες εγκαταστάσεις καύσης στερεών πρέπει να συμμορφώνονται με την ισχύουσα νομοθεσία που αφορά τους περιορισμούς στην εκπομπή NO<sub>x</sub>. Τα NO<sub>x</sub> αποτελούνται κυρίως από NO (συνήθως 90%) και NO<sub>2</sub> (συνήθως 10%). Ο σχηματισμός τους προέρχεται από το άζωτο που υπάρχει στον αέρα ο οποίος χρησιμοποιείται για την καύση αλλά και το άζωτο των υλικών που καίγονται. Τα μεγαλύτερα επίπεδα NO<sub>x</sub> συναντώνται σε υψηλές θερμοκρασίες καύσης. Όπως και τα οξείδια του θείου, τα NO<sub>x</sub> συμμετέχουν στο φαινόμενο της όξινης βροχής που είναι ο κυρίαρχος λόγος για τον οποίο θεωρούνται ρύποι. Η μείωσή τους επιτυγχάνεται με χρήση αμμωνίας (NH<sub>3</sub>) η οποία διασπά τα NO<sub>x</sub>

σε άζωτο και νερό. Ωστόσο, η μη καταλυτική διάσπαση των NO<sub>x</sub> απαιτεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες (850-950 °C) ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες η αντίδραση είναι πολύ αργή για να θεωρηθεί αποδοτική. Επομένως, για τη μείωση των NO<sub>x</sub> χρησιμοποιούνται καταλύτες όπως λευκόχρυσος, παλλάδιο κ.α. με την παρουσία της αμμωνίας, διαδικασία η οποία ονομάζεται επιλεκτική καταλυτική αναγωγή (Selective Catalytic Reduction- SCR) και μπορεί να επιτύχει ποσοστά μείωσης πάνω από 90%. Σε αυτή την περίπτωση η αντίδραση αναγωγής λαμβάνει χώρα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ο λόγος που η συσκευή αυτή βρίσκεται μετά τα σακόφιλτρα είναι ο κίνδυνος απενεργοποίησης του καταλύτη από βαρέα μέταλλα.



*Σχήμα 3.24:* Σύστημα μείωσης NO<sub>x</sub> (SCR) *ΠΗΓΗ:* European Commission 2004

### 3.2.6 Ενεργός άνθρακας

Η συσκευή ενεργού άνθρακα καταλαμβάνει αισθητά μικρότερο όγκο σε σύγκριση με όσες παρουσιάστηκαν πιο πάνω. Ο όρος «ενεργός» χρησιμοποιείται σε προσροφητικά υλικά και αναφέρεται στην αυξημένη εσωτερική και εξωτερική επιφάνεια που προέκυψε μετά από ειδική επεξεργασία. Στην πραγματικότητα κάθε ανθρακούχο υλικό μπορεί να μετατραπεί σε ενεργό άνθρακα συμπεριλαμβανομένων οστών, ξύλου, κάρβουνου κ.α., όμως ο βιομηχανικός ενεργός άνθρακας παράγεται από ασφαλτούχο άνθρακα. Η παραγωγή ενεργού άνθρακα γίνεται μέσω της αρχικής αφυδάτωσης και απανθράκωσης της πρώτης ύλης και συνεχίζεται με την ενεργοποίηση η οποία επιτυγχάνεται με ελεγχόμενη οξείδωση, όπου το υλικό θερμαίνεται με παρουσία οξειδωτικού αερίου. Σε συγκεκριμένους άνθρακες η αφυδάτωση μπορεί να γίνει με χρήση χημικών ουσιών. Οι άνθρακες που προορίζονται για έλεγχο αερίων έχουν ειδική επιφάνεια από 800 έως 1200 m<sup>2</sup>/g. Ο όγκος των πόρων κατανέμεται σε περιορισμένο εύρος διαμέτρων από 4 έως 30 angstroms (1 angstrom = 0.0001 μm). Μονάδες μέτρησης της ικανότητας προσρόφησης στην αέρια φάση αποτελούν ο αριθμός τετραχλωράνθρακα (ορίζεται ως g CCl<sub>4</sub>/100g άνθρακα) και ο αριθμός ιωδίου (ορίζεται ως I<sub>2</sub>/100g άνθρακα). Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ενεργών ανθράκων από διάφορες πρώτες ύλες.

Πρώτη Ύλη	Αριθμός I <sub>2</sub>	Μοριακός Αριθμός	Αριθμός CCl <sub>4</sub>	Όγκος Πόρων Βουτανίου, cc/g	Εφαρμογή
Λιγνίτης	550	490	34	0.23	Υγρή φάση
Ασφαλτούχος Άνθρακας	900/1000	200/250	60	0.45	Φάση Ατμού/Υγρά
Όξινη Λάσπη πετρελαϊκού οπτάνθρακα	1150	180	59	0.46	Φάση Ατμού
Καρύδα	1350	185	63	0.49	Φάση Ατμού
Υποασφαλτούχος Άνθρακας	1050	230	67	0.48	Φάση Ατμού
Ξύλο	1230	470	76	0.57	Φάση Ατμού/Υγρά

**Σχήμα 3.25:** Ιδιότητες ενεργών ανθράκων *ΠΗΓΗ:* Έλεγχος αέριας ρύπανσης, C. David Cooper, F.C. Alley

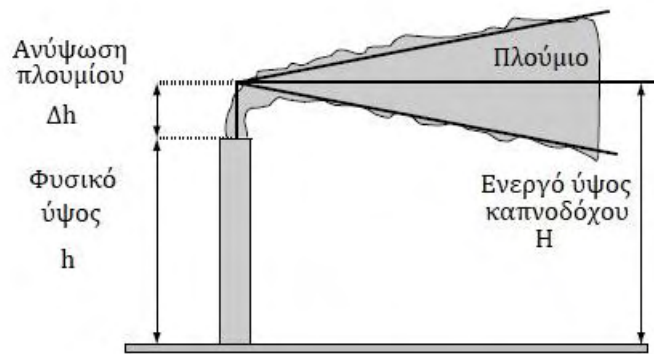
### 3.2.7 Καπνοδόχος

Η καπνοδόχος αποτελεί την τελευταία κατασκευή της εγκατάστασης η οποία έρχεται σε επαφή με τα καυσαέρια. Δεν πρόκειται για συσκευή αντιρρυπαντικής τεχνολογίας καθώς τα αέρια έχουν περάσει από όλες τις επιμέρους συσκευές και τηρούν τα όρια εκπομπής στην περίπτωση που η διαδικασία εξελίσσεται ομαλά. Στη βάση της καπνοδόχου λειτουργεί μία αντλία που με τις στροφές της ρυθμίζει την ποσότητα και την ταχύτητα των αερίων στην κορυφή. Όπως έχει ειπωθεί, η μέτρηση εκπομπών της εγκατάστασης εκτελείται στην κορυφή με αποτέλεσμα να θεωρείται από πολλούς ότι η καπνοδόχος είναι ο «καθρέπτης» μίας εγκατάστασης που φανερώνει το βαθμό σωστής λειτουργίας αλλά και νομιμότητας από άποψη τήρησης των ορίων.

Ο σύγχρονος σχεδιασμός μίας υψηλής καπνοδόχου (υψηλότερη από 100m) απαιτεί τη χρήση υπολογιστών καθώς απαιτείται επεξεργασία μεγάλου όγκου μετεωρολογικών δεδομένων και γρήγορος υπολογισμός των συγκεντρώσεων για ένα δεδομένο σύνολο συνθηκών. Για το σκοπό αυτό έχουν δημιουργηθεί διάφορα λογισμικά τα οποία βασίζονται στην παρακάτω λογική σχεδιασμού.

1. Ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων
2. Εκτίμηση επικινδυνότητας βάσει μετεωρολογίας
3. Δοκιμή διαφορετικών παραμέτρων (ύψος και διάμετρος) σε συνδυασμό με μοντέλα πλουμίου και τη «χειρότερη» πρόβλεψη μετεωρολογικά
4. Μελέτη επίδρασης της μορφολογίας του εδάφους
5. Ανασκόπηση αποτελεσμάτων

Το ενεργό ύψος της καμινάδας  $H$ , αποτελείται από το φυσικό της ύψος  $h$  και την ανύψωση του πλουμίου  $\Delta h$ . Το φυσικό ύψος αποτελεί μία ελεύθερη παράμετρο σχεδιασμού, αλλά η ανύψωση του πλουμίου είναι ίσως η σημαντικότερη παράμετρος. Σε κάθε περίπτωση βέβαια πρέπει να αποφεύγεται η υπερδιαστασιολόγηση μίας καπνοδόχου που θα οδηγήσει σε μη αναγκαίες δαπάνες.



**Σχήμα 3.26:** Χαρακτηριστικά καπνοδόχου ΠΗΓΗ: Waste Treatment and Disposal, Second Edition, Professor Paul T. Williams

Ένα πλούμιο σχηματίζεται από θερμά αέρια που εκπέμπονται κατακόρυφα ενώ έχει ορμή και άνωση. Καθώς τα αέρια απομακρύνονται κατακόρυφα από την καμινάδα χάνουν την ορμή τους λόγω της οπισθέλκουσας αντίστασης του αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα αέρια να γέρνουν προς την κατεύθυνση του αέρα. Συχνό είναι το φαινόμενο το πλούμιο να συνεχίζει να ανέρχεται για αρκετό χρόνο αφού λάβει κλίση λόγω της άνωσης. Η δύναμη της άνωσης οφείλεται στο μειωμένη πυκνότητα των αερίων σε σχέση με τον ατμοσφαιρικό αέρα είτε λόγω θερμοκρασίας ή λόγω σύστασης.

Τα μαθηματικά μοντέλα ανύψωσης του πλουμίου είναι περίπλοκα καθώς είναι φαινόμενο που εξαρτάται από παράγοντες όχι μόνο των αερίων αλλά και από τις ατμοσφαιρικές παραμέτρους όπως η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και οι συνθήκες ευστάθειας.

Από τις πιο γνωστές εξισώσεις ανύψωσης πλουμίου είναι αυτή του Holland (1953) με την τροποποίηση των Mark και Warner (1981):

$$\Delta h = 1.5 \frac{v_s d_s}{u} + \frac{9.6 Q_H}{u}$$

$v_s$ : ταχύτητα αερίων καπνοδόχου, (m/s)

$d_s$ : εσωτερική διάμετρος καπνοδόχου, (m)

$u$ : μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της καμινάδας, (m/s)

$Q_H$ : ο ρυθμός εκπομπής θερμότητας, (MW)

**Σημείωση:** Ο τύπος ισχύει για ουδέτερες συνθήκες. Για διαφορετικές κατηγορίες ευστάθειας ο πολλαπλασιαστικός συντελεστής λαμβάνει διαφορετικές τιμές.

# 4

## ΟΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

### 4.1 Ο σύνδεσμος C.E.W.E.P

Ο CEWEP (Confederation of European Waste to Energy Plants) αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ των διαχειριστών εγκαταστάσεων που δραστηριοποιούνται στην καύση αποβλήτων παράγοντας αξιοποιήσιμη ενέργεια. Ο αριθμός των μελών είναι 400 από 22 χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, εκπροσωπώντας το 80% αυτού του είδους των εγκαταστάσεων. Κάθε μέλος είναι δεσμευμένο να διασφαλίζει την τήρηση των περιβαλλοντικών προτύπων και να επιτυγχάνει χαμηλά επίπεδα εκπομπής ρύπων. Οι δραστηριότητες της συνομοσπονδίας συνοψίζονται από τα εξής:

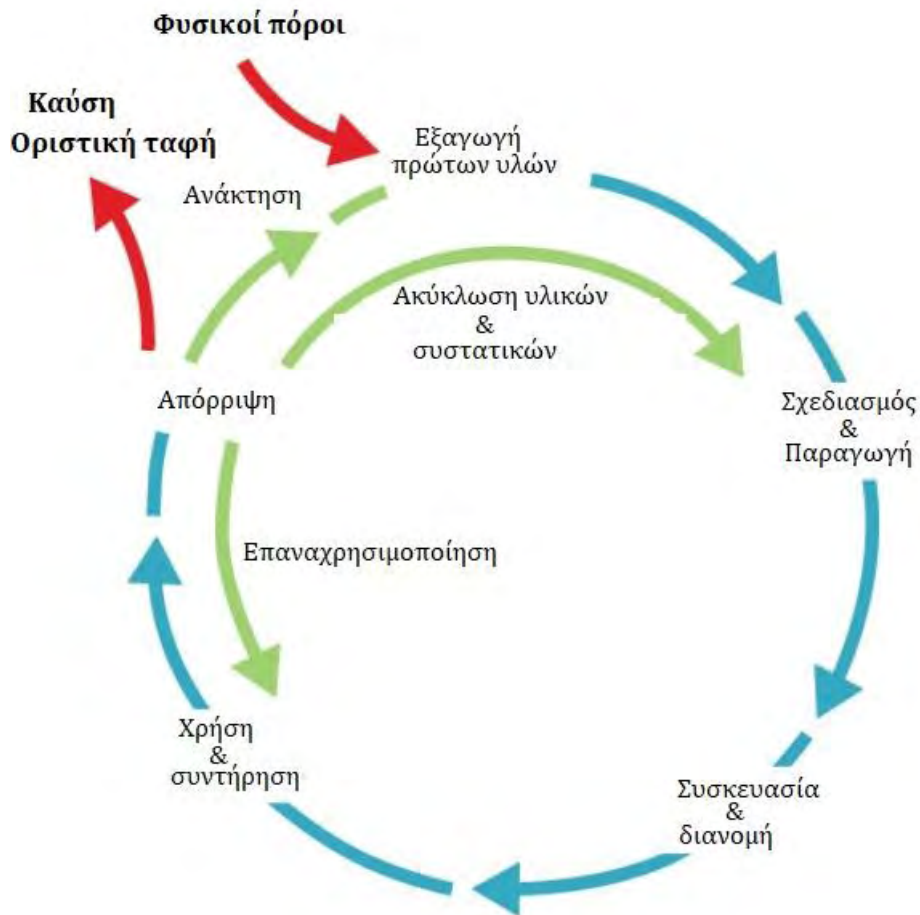
- Στενή και μόνιμη επαφή με τα Ευρωπαϊκούς Θεσμούς
- Προσεκτική ανάλυση και προληπτική συνεισφορά στις ενεργειακές και περιβαλλοντικές πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης
- Συμμετοχή σε μελέτες που βρίσκονται σε εξέλιξη (Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα Ηνωμένων Εθνών, Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης)
- Διεξαγωγή ιδίων μελετών σχετικές με το μοτίβο της σκέψης του κύκλου ζωής (Life Cycle Thinking), τη σύνθεση και τη διαδικασία ανακύκλωσης της συλλεγόμενης τέφρας (bottom ash) κ.α.
- Οργάνωση επισκέψεων σε εγκαταστάσεις
- Οργάνωση δημοσίων συζητήσεων που φιλοξενούνται συχνά στο Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο με σκοπό την ενημέρωση των νομοθετών και του κοινού σχετικά με την παραγωγή ενέργειας από τα απορρίμματα

Επιπλέον, σημαντική είναι η παροχή μίας πλατφόρμας ανταλλαγής εμπειρίας, τεχνολογικής προόδου, τεχνικών και πρακτικών πτυχών της καύσης απορριμμάτων για παραγωγή ενέργειας. Ο C.E.W.E.P σαφώς προάγει τη μελέτη, ανάπτυξη και διάδοση της γνώσης στο αντικείμενο της βιώσιμης διαχείρισης των απορριμμάτων. Σε επιστημονικό επίπεδο, οι μελέτες και τα επιστημονικά θέματα επιβλέπονται από ένα επιστημονικό και τεχνικό συμβούλιο το οποίο απαρτίζεται από επιφανείς καθηγητές και επιστήμονες του C.E.W.E.P.

### 4.2 Life Cycle Thinking

Η σκέψη του κύκλου ζωής (LCT) εκτείνεται πέρα από τις διεργασίες παραγωγής ώστε να περιλαμβάνει τις περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις ενός προϊόντος κατά τη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής του. Οι κύριοι στόχοι ενός LCT είναι η μείωση της χρήσης πρώτων υλών ενός προϊόντος, των εκπομπών ρυπογόνων ουσιών προς το περιβάλλον καθώς και η βελτίωση της κοινωνικοοικονομικής απόδοσης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Στο βιομηχανικό τομέα, η εφαρμογή της προσέγγισης LCT σημαίνει κάτι περισσότερο από την παραδοσιακή συγκέντρωση του ενδιαφέροντος αποκλειστικά στην παραγωγική διαδικασία της εγκατάστασης. Ο κύκλος

ζωής ενός προϊόντος ξεκινά με την εξόρυξη των πρώτων υλών από φυσικές πηγές και την παραγωγή ενέργειας. Τα υλικά και η ενέργεια στη συνέχεια είναι μέρος της παραγωγής, της συσκευασίας, της διανομής, της χρήσης, της συντήρησης και τελικά της ανακύκλωσης, της επαναχρησιμοποίησης, της ανάκτησης ενέργειας ή της οριστικής ταφής.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα κύκλου ζωής προϊόντος ΠΗΓΗ: [lifecycleinitiative.org](http://lifecycleinitiative.org)

### 4.3 Οικονομική βιωσιμότητα

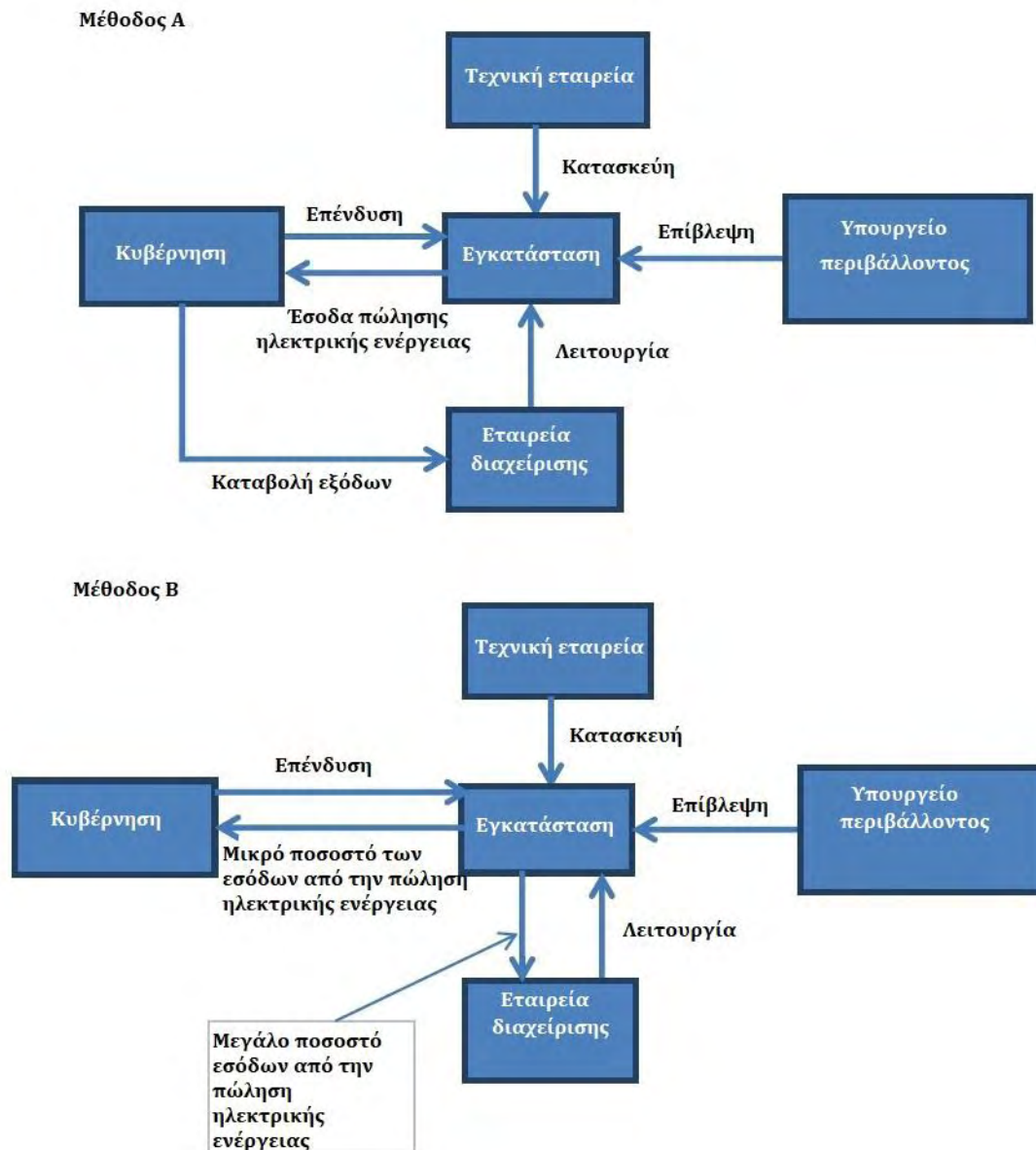
Το κυριότερο αντικείμενο συζητήσεων, ύστερα από τις πιθανές επιπτώσεις για τη δημόσια υγεία, είναι η οικονομική βιωσιμότητα των εγκαταστάσεων συμπαραγωγής με καύσιμο τα αστικά απόβλητα. Με πιο απλά λόγια τίθεται το ερώτημα σχετικά με το εάν υπάρχει η δυνατότητα να επιτυγχάνουν το σκοπό τους με την ταυτόχρονη εξασφάλιση των απαιτούμενων οικονομικών πόρων. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η βιωσιμότητα ενός επιχειρηματικού πλάνου που αφορά μία τέτοια εγκατάσταση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τοπικούς παράγοντες και για το λόγο αυτό δεν μπορεί κάποιος να απαντήσει με βεβαιότητα ότι πρόκειται για επιτυχημένο ή αποτυχημένο σχέδιο οπουδήποτε εφαρμοστεί.

Ένας παράγοντας που είναι καθοριστικής σημασίας είναι το μοντέλο ιδιοκτησίας που εφαρμόζεται. Υπάρχουν δύο μοντέλα τα οποία συναντώνται:

1. **Το μοντέλο της δημόσιας ιδιοκτησίας:** Σε αυτό το μοντέλο ιδιοκτήτης είναι το κράτος το οποίο χρησιμοποιεί μέρος του κρατικού προϋπολογισμού ή δανεισμού για να



επενδύσει σε πλάνο καύσης απορριμμάτων και συμπαραγωγής ενέργειας. Το κράτος στη συνέχεια, μέσω διαγωνισμού επιλέγει εταιρίες διαχείρισης που αναλαμβάνουν το έργο. Το κόστος λειτουργίας και διαχείρισης της εγκατάστασης καλύπτεται από το κράτος το οποίο επίσης επιβλέπει τις επιδόσεις ως προς τις εκπομπές ρύπων και την ανάκτηση ενέργειας. Ανάλογα με τους διαφορετικούς τρόπους πληρωμής από την κυβέρνηση, το μοντέλο υποδιαιρείται σε δύο μεθόδους όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα.



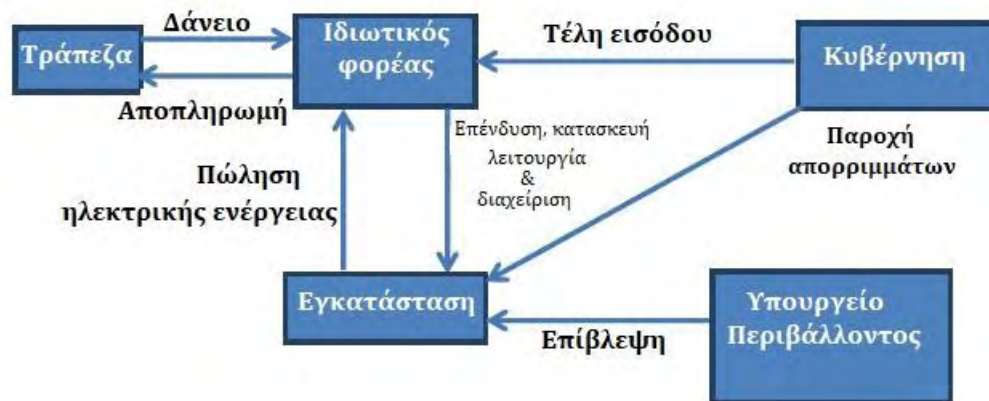
*Σχήμα 4.2: Μέθοδοι δημόσιας διοίκησης ΠΗΓΗ: Analysis of the economics of waste to energy in China, Ling Qiu*

Κοινό σημείο ανάμεσα στη δύο μεθόδους είναι ότι το κράτος είναι ο επενδυτής του σχεδίου. Η διαφορά εντοπίζεται στον τρόπο με τον οποίο προκύπτουν τα έσοδα της εταιρείας διαχείρισης. Στην Α μέθοδο, τα έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας καταλήγουν στην κυβέρνηση η οποία επιστρέφει στην εταιρεία διαχείρισης το ποσό που προβλέπεται από το συμβόλαιο συνεργασίας. Στη Β μέθοδο, η διαχειρίστρια εταιρεία έχει μεγαλύτερη ελευθερία σε σχέση με την Α για να οργανώσει τη στρατηγική του κέρδους της καθώς εισπράττει το μεγαλύτερο ποσοστό των εσόδων από την πώληση

ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Επομένως, η μέθοδος Β προτιμάται από τις εταιρείες διαχείρισης εγκαταστάσεων με επαρκή τροφοδοσία απορριμμάτων που εξασφαλίζουν μία σταθερή ροή εσόδων από την ηλεκτρική ενέργεια με χαμηλό κόστος λειτουργίας. Σε κάθε περίπτωση βέβαια είναι η ισχυρή η κυβερνητική παρέμβαση. Ωστόσο, η επιβάρυνση του κράτους από το αρχικό κόστος κεφαλαίου και τα λειτουργικά έξοδα μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την μακροπρόθεσμη ανάπτυξη του σχεδίου και για το λόγο αυτό προτιμάται το καθεστώς ιδιοκτησίας που περιγράφεται από το δεύτερο μοντέλο την ονομασία BOT (build-operate-transfer).

**2. Το μοντέλο BOT (build-operate-transfer):** Πρόκειται για το πιο συνηθισμένο μοντέλο σχεδιασμού διαχείρισης των απορριμμάτων. Ιδιωτική πρωτοβουλία λαμβάνει την άδεια από την κυβέρνηση για χρηματοδότηση της κατασκευής, του σχεδιασμού και της λειτουργίας μίας εγκατάστασης ανάκτησης ενέργειας όπως περιγράφεται στο συμβόλαιο. Με το μοντέλο αυτό ο επενδυτής έχει τη δυνατότητα να αποσβέσει το αρχικό κόστος κεφαλαίου. Το χρονικό διάστημα παραχώρησης όλων των ενεργειών διαχείρισης των απορριμμάτων συνήθως βρίσκεται μεταξύ 20 και 30 ετών. Στη διάρκεια αυτού του χρόνου, ο ιδιώτης επενδυτής έχει την αποκλειστική ευθύνη να διευθύνει τον οικονομικό σχεδιασμό και είναι εξουσιοδοτημένος να εισπράττει τα έσοδα από τη λειτουργία της εγκατάστασης της οποίας είναι ιδιοκτήτης. Μία πηγή εσόδων μπορεί να είναι η κρατική επιχορήγηση ανά τόνο απορριμμάτων που λαμβάνει η εγκατάσταση και ονομάζεται τέλος εισόδου. Στη λήξη του συμβολαίου, η εγκατάσταση μεταφέρεται στην κρατική ιδιοκτησία χωρίς αμοιβή. Συμβαλλόμενα μέρη στο σχέδιο ανάκτησης ενέργειας BOT είναι τα παρακάτω:

- **Κυβέρνηση:** Η κυβέρνηση εκκινεί το σχέδιο διαχείρισης απορριμμάτων και αποφασίζει αν το μοντέλο BOT ικανοποιεί τις ανάγκες. Συνήθως, διαμορφώνει ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη του σχεδίου όπως για παράδειγμα η παροχή του εδάφους όπου θα κατασκευαστεί η εγκατάσταση. Επιπλέον, σε περίπτωση που δεν υπάρχει συμφωνία για τη μεταφορά των απορριμμάτων προς την εγκατάσταση, η κυβέρνηση είναι υπεύθυνη να παρέχει σταθερά τις ποσότητες απορριμμάτων ώστε να μην επηρεάζεται η απόδοση της καύσης. Τέλος, προσπαθεί να εξασφαλίζει υψηλότερες τιμές πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας ενώ ταυτόχρονα επιβλέπει τη λειτουργία της μέσω του Υπουργείου περιβάλλοντος.
- **Χορηγοί:** Οι χορηγοί του σχεδίου εξυπηρετούν τους σκοπούς τους μέσα από την υλική ή οικονομική συνεισφορά τους.
- **Δανειοδοτικές τράπεζες:** Τα περισσότερα σχέδια ανάκτησης ενέργειας BOT χρηματοδοτούνται από δάνεια. Οι τράπεζες που χρηματοδοτούν τέτοιου είδους σχέδιο παρέχουν δάνεια με εγγύηση την ακίνητη περιουσία της εγκατάστασης ενώ σε περίπτωση πτώχευσης δε μπορούν να απευθυνθούν στον επενδυτή για περαιτέρω αποζημίωση.
- **Λοιποί δανειστές:** Ο ιδιωτικός φορέας που πραγματοποιεί την επένδυση μπορεί καταφύγει σε δανεισμό ξένων κεφαλαίων.



*Σχήμα 4.3: Μέθοδος BOT ΠΗΓΗ: Analysis of the economics of waste to energy in China, Ling Qiu*

Η αποπληρωμή των δανείων κατά τη διάρκεια της οικονομικής ζωής του έργου γίνεται με βάση την αρχή της ετήσιας καταβολής σταθερού ποσού το οποίο υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A = P \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

A: το ετήσιο ποσό αποπληρωμής

P: το ποσό του δανεισμού

i: το ετήσιο επιτόκιο (καθορίζεται από το δανειστή)

n: περίοδος αποπληρωμής (καθορίζεται από συμβόλαιο)

Επομένως, η οικονομική βιωσιμότητα ενός έργου διαχείρισης απορριμμάτων και ανάκτησης ενέργειας εξαρτάται αφενός από την αποφασιστικότητα μίας κυβέρνησης να παρέχει ευνοϊκό έδαφος για την ανάπτυξη του έργου και αφετέρου από τον τρόπο διαχείρισης των οικονομικών πόρων από τη μεριά του ιδιωτικού φορέα στην περίπτωση του μοντέλου BOT.

#### 4.4 Σχεδιασμός μίας πρότυπης εγκατάστασης

Έχοντας περιγράψει τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται μία εγκατάσταση ανάκτησης ενέργειας μπορεί να κατασκευαστεί μία πρότυπη μελέτη βασισμένη στα τεχνικά χαρακτηριστικά. Κατόπιν έρευνας στον συγκεκριμένο τομέα, η πρότυπη εγκατάσταση θα παράγει αποκλειστικά ηλεκτρική ενέργεια και θα αποτελείται από 3 γραμμές επεξεργασίας. Στη συνέχεια, κρίνεται ότι η εγκατάσταση δύναται να εξυπηρετήσει το σύνολο των απορριμμάτων της Θεσσαλονίκης ή το 1/3 της Αττικής που θα αποτελείται από μία ομάδα δήμων.

### Βασικές Παραδοχές:

- Η μέση παραγωγή απορριμμάτων των Ελλήνων είναι  $500 \frac{\text{kg}}{\text{κάτοικος \& \acute{e}\tau\omicron\varsigma}}$  (480 η μέση παραγωγή της Ευρωπαϊκής Ένωσης)
- Το ποσοστό ανακύκλωσης είναι 19%
- Η μέση θερμογόνος δύναμη των απορριμμάτων είναι 10,2 MJ/kg
- Η δυναμικότητα της εγκατάστασης είναι 15 t/h σε κάθε γραμμή
- Η εγκατάσταση παρέχει ηλεκτρική ενέργεια 8000 ώρες ανά έτος
- Η απόδοση του boiler είναι 85%
- Η εγκατάσταση χρησιμοποιεί το 16% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει
- Έξοδος υπέρθερμου ατμού σε θερμοκρασία 400 °C και πίεση 40 bar
- Η απόδοση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 33%

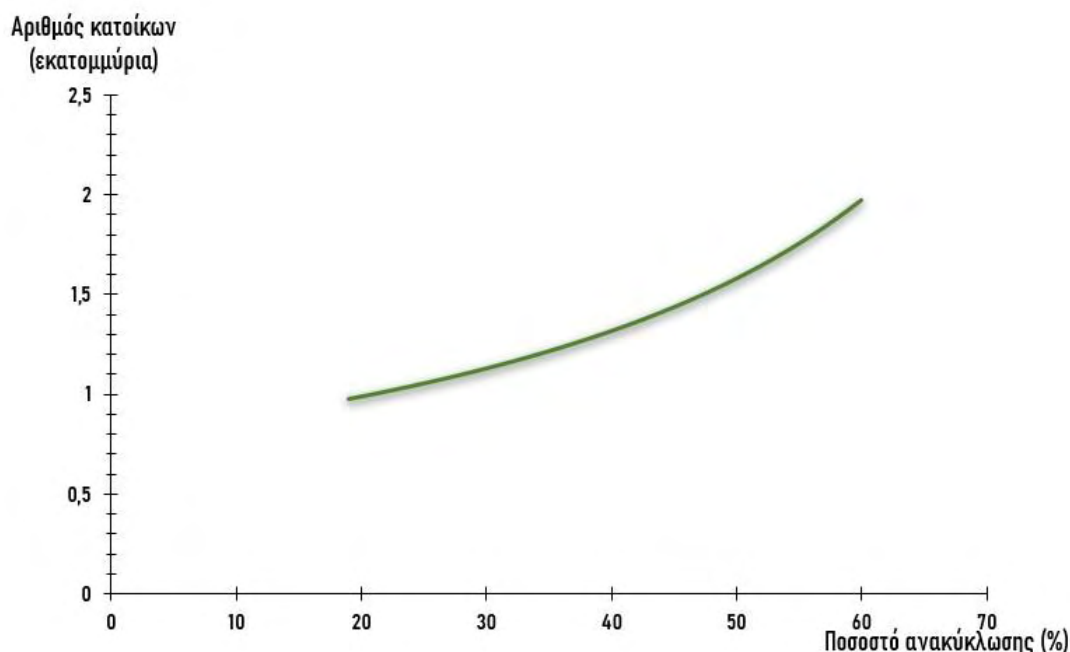
Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εγκατάσταση μπορεί να επεξεργαστεί ετησίως:

$$\text{ΕΕΠ} = 3 \times 15 \times 24 \times 365 = 394200 \text{ t/y}$$

Αυτή η ποσότητα αντιστοιχεί σε αριθμό κατοίκων:

$$\text{ΑΚΑΤ} = \frac{394200}{\frac{500}{1000} \times (1 - \frac{19}{100})} \times \frac{1}{1000000} = 0,97 \text{ εκατομμύρια κάτοικοι}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αριθμός των κατοίκων που μπορεί να εξυπηρετήσει η εγκατάσταση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ποσοστό ανακύκλωσης. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η σχέση μεταξύ αριθμού κατοίκων και ποσοστού ανακύκλωσης.



*Σχήμα 4.4: Αριθμός κατοίκων που εξυπηρετούνται συναρτήσει του ποσοστού ανακύκλωσης ΠΗΓΗ: Κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του Microsoft Excel 2016*

Το ποσό θερμότητας που παράγεται από την καύση απορριμμάτων είναι:

$$\text{ΠΘ} = 3 \times 15 \times 10.2 \times \frac{1}{3600} \times 1000 = 127,5 \text{ MW}$$

Ενώ το boiler θα χρησιμοποιήσει τελικά το 85% της θερμότητας και επομένως η πραγματική ενέργεια που μεταφέρεται στον ατμό είναι:

$$\text{ΠΠΕ} = 127,5 \times 0,85 = 108,4 \text{ MW}$$

Τα χαρακτηριστικά του boiler πρέπει να επιτρέπουν ικανότητα παραγωγής ατμού τέτοια ώστε να ικανοποιείται το ενεργειακό ισοζύγιο:

$$\text{ΠΠΑ} = \frac{\text{ΠΠΕ}}{h_{\text{ατμού}}} = \frac{108,4}{3,2} = 122 \text{ t/h ατμού}$$

\*( $h_{\text{ατμού}} = 3,2 \text{ MJ/kg}$  από πίνακα υπέρθερμου ατμού)

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι:

$$\text{ΗΕ} = 0,33 \times 108,4 = 35,7 \text{ MW}$$

Τέλος αν αφαιρεθούν οι ανάγκες της εγκατάστασης και ένα 5% απωλειών θερμότητας, η ενέργεια που τροφοδοτείται στο δίκτυο ηλεκτρισμού ανά έτος είναι:

$$\text{ΗΕΔ} = \text{ΗΕ} \times (1 - 0,16 - 0,05) \times 8000 = 226079 \text{ MWh}$$

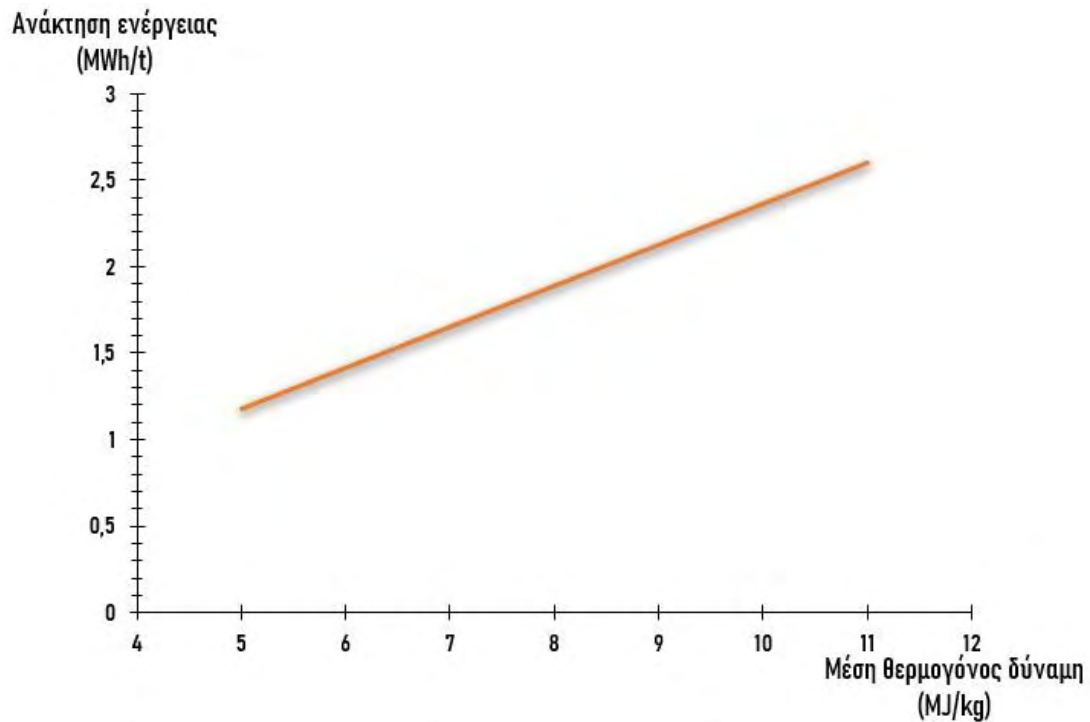
Το ποσό ανάκτησης ενέργειας ανά τόνο απορριμμάτων είναι:

$$\text{ΠΑΕ} = \frac{108,4 \times 24 \times 365}{394200} = 2,41 \frac{\text{MWh}}{\text{t}}$$

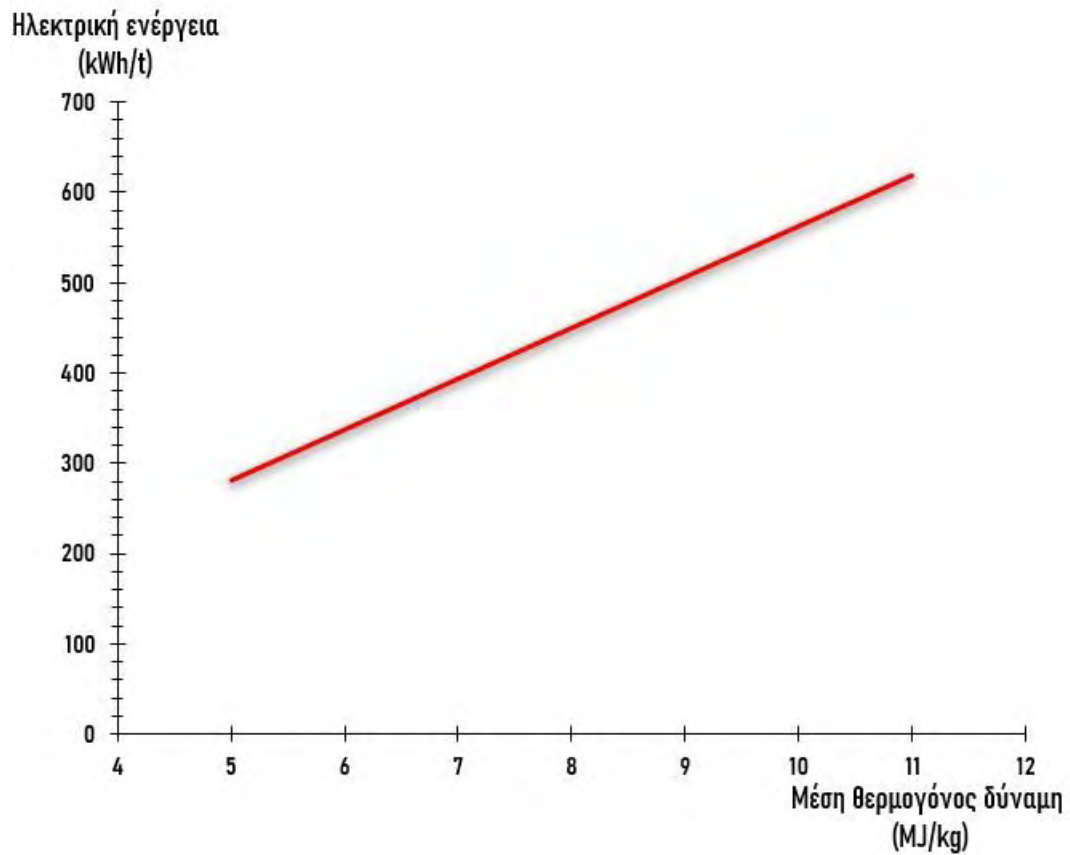
Το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτείται στο δίκτυο ανά μονάδα τόνου απορριμμάτων είναι:

$$\text{ΠΗΕ} = \frac{226079}{394200} \times 1000 = 573 \frac{\text{kWh}}{\text{t}}$$

Με βάση τα παραπάνω μπορούν να κατασκευαστούν τα διαγράμματα που περιγράφουν το ποσό ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί ανά τόνο απορριμμάτων καθώς και την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται συναρτήσει της θερμογόνου δύναμης η οποία γενικά είναι μεταβλητή.



*Σχήμα 4.5: Ποσό ενέργειας που ανακτάται ΠΗΓΗ: Κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του Microsoft Excel 2016*



*Σχήμα 4.6: Ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται ΠΗΓΗ: Κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του Microsoft Excel 2016*

Το ποσό αυτής της ηλεκτρικής ενέργειας επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών περίπου 60000 νοικοκυριών για ένα χρόνο (μέση κατανάλωση νοικοκυριού 3750 kWh ετησίως). Με βάση στοιχεία της βιβλιογραφίας, η παραπάνω εγκατάσταση θα χρειαζόταν 2 χρόνια κατασκευής (μέγιστος αριθμός εργατών 680) και θα κάλυπτε περίπου 60000 m<sup>2</sup> με την απασχόληση 70 ανθρώπων ως μέλη του προσωπικού.

Με την εφαρμογή του μοντέλου BOT, τον πρώτο χρόνο κατασκευής επενδύεται το 60% του συνολικού κεφαλαίου και το υπόλοιπο 40% το δεύτερο χρόνο με ετήσιο επιτόκιο 6%. Η αποπληρωμή του δανείου έχει διάρκεια 13 χρόνων και ο επενδυτής μπορεί να ξεκινήσει την αποπληρωμή στην αρχή του πρώτου χρόνου λειτουργίας της εγκατάστασης.

Κόστος κεφαλαίου της πρότυπης εγκατάστασης (σε εκατομμύρια ευρώ)					
	Περίοδος κατασκευής		Περίοδος λειτουργίας	Σύνολο	Ποσοστό συνολικής επένδυσης
	1	2	3		
Κεφάλαιο ιδιώτη	18,9	0	0,27	19,17	29 %
Δάνειο τράπεζας	19,9	26,6	0	46,5	71 %
Συνολική επένδυση	38,8	26,6	0,27	65,67	100 %
Συνολική επένδυση ανά τόνο (euro/t)				182,4	

*Σχήμα 4.7: Κόστος κεφαλαίου σύμφωνα με τη βιβλιογραφία*

Βέβαια το παραπάνω κόστος πρόκειται για εκτίμηση και η πραγματική τιμή του μπορεί να είναι +/- 25% καθώς εξαρτάται από μεγέθη της οικονομίας όπως οι φόροι και τοπικοί παράγοντες.

Το ετήσιο κόστος αφορά την αγορά πρώτων υλών (π.χ. σκόνη ασβέστου, αμμωνία) καθώς και στη συντήρηση του εξοπλισμού όπως για παράδειγμα τα φίλτρα στο σακόφιλτρο που είναι σχεδιασμένα ώστε να αντικαθίστανται σε 2,5 χρόνια με το κόστος αγοράς νέων να είναι περίπου 40000 € ανά τεμάχιο. Το κόστος απόρριψης σε Χ.Υ.Τ.Α. της ιπτάμενης τέφρας που συλλέγεται στο σύστημα καθαρισμού ενδέχεται να είναι υψηλό σε τιμές 30-80 €/t. Η τέφρα που συλλέγεται στον κλίβανο μπορεί να είναι χρήσιμο υλικό οπότε δε συγκαταλέγεται στα έξοδα απόρριψης. Πιο αναλυτικά παρουσιάζονται τα κόστη στο παρακάτω σχήμα.

	Ετήσιο κόστος (εκατ. €)
Αγορά πρώτων υλών	0,68
Αγορά νερού	0,06
Διάθεση ρυπασμένου νερού	0,44
Διάθεση ιπτάμενης τέφρας	0,20
Προσωπικό	0,40
Συντήρηση	0,88
Αποσβέσεις	3,89
Άλλα έξοδα	3,45
Σύνολο	10
<b>Κόστος ανά τόνο απορριμμάτων (euro/ton)</b>	<b>27,8</b>

*Σχήμα 4.8: Ετήσια κόστη σύμφωνα με τη βιβλιογραφία*

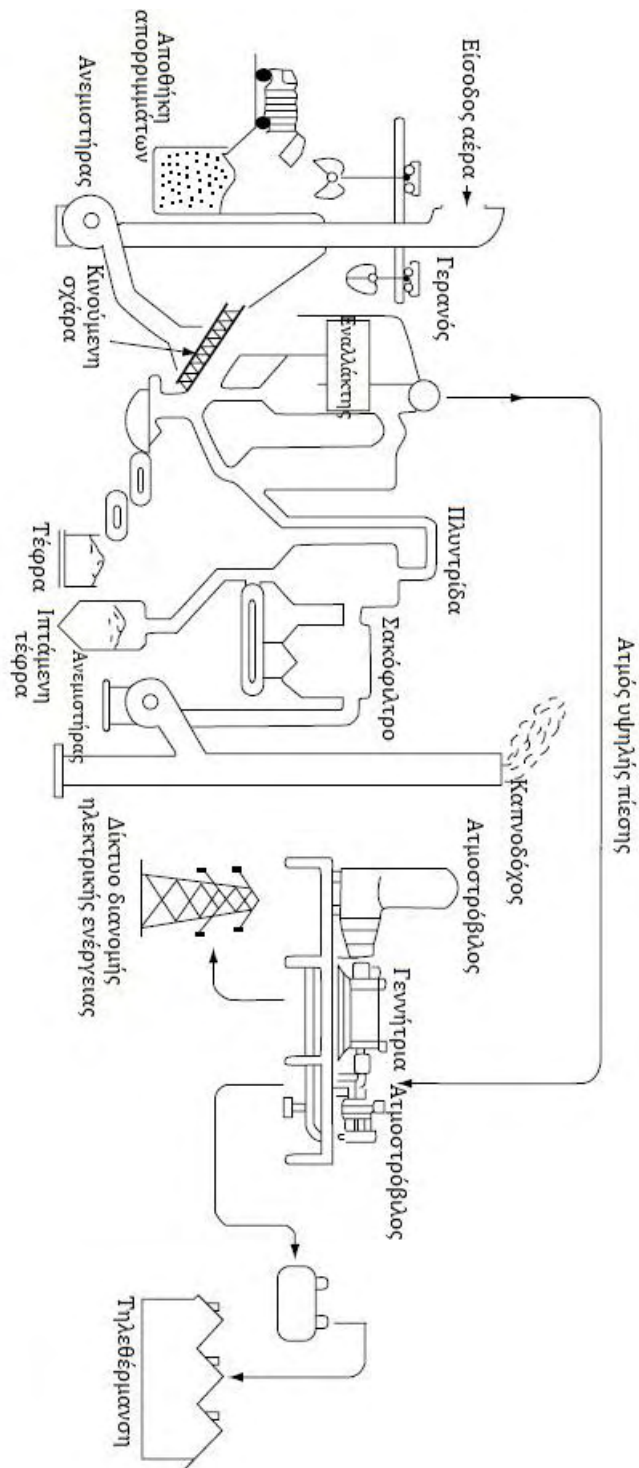
Τα ετήσια έξοδα έχουν ως βασικούς άξονες την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας και την καταβολή τελών εισόδου από μέρος του κράτους. Η τιμή πώλησης ανά kWh σε περίπτωση ευνοϊκής νομοθεσίας είναι υψηλότερη από τη συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατόπιν επιδότησης της κυβέρνησης. Για τιμή 0,10 €/kWh η πρότυπη εγκατάσταση έχει ετήσια έσοδα 22,56 εκατομμύρια €. Τα τέλη εισόδου από την άλλη πλευρά μπορούν να μεταβάλλονται με την πάροδο των χρόνων. Κύριοι παράγοντες καθορισμού της τιμής είναι η τοπική οικονομία, η δομή του συστήματος διαχείρισης και η κατάσταση της εγκατάστασης. Όπως παρατηρήθηκε σε άλλες Ευρωπαϊκές χώρες η τιμή αυτή δε ξεπερνάει τα 40 €/t. Αρκετές φορές βέβαια εφαρμόζονται διάφορα μαθηματικά μοντέλα για τον καθορισμό του τέλους εισόδου προκειμένου να ικανοποιούν τις οικονομικές ανάγκες της εγκατάστασης. Η εμπειρία έχει δείξει ότι τιμές κάτω των 20 €/t θέτουν σε κίνδυνο την οικονομική βιωσιμότητα ενώ πολύ υψηλές τιμές της τάξης των 60-90 €/t ενδέχεται να μη μπορούν να καλυφθούν από την τοπική οικονομία.

Στην περίπτωση που η εγκατάσταση τροφοδοτεί σύστημα τηλεθέρμανσης τότε η αναλογία που διαπιστώνεται από τη βιβλιογραφία είναι περίπου 1 μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας για 4 μονάδες θερμικής ενέργειας.

Ένα τελευταίο χαρακτηριστικό, αν και αμφιλεγόμενο, είναι η συνεισφορά των εγκαταστάσεων στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Αν θεωρήσουμε ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται χωρίς την καύση λιγνίτη προσφέρει μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 0,28307/kWh τότε εύκολα μπορούμε να υπολογίσουμε ότι η πρότυπη εγκατάσταση μπορεί να εξοικονομεί κάθε έτος λειτουργίας 63867 τόνους CO<sub>2</sub>. Το κυρίαρχο αντικείμενο συζήτησης είναι εάν τα απορρίμματα αποτελούν εναλλακτική πηγή ενέργειας. Εάν θεωρήσουμε ότι ανήκουν στην κατηγορία αυτή τότε ο παραπάνω υπολογισμός κρίνεται ορθός. Η απάντηση φαίνεται να κρύβει παγίδες τόσο υπέρ της μίας όσο και υπέρ της άλλης πλευράς. Ωστόσο, το συμπέρασμα είναι ότι ένας τέτοιος διεθνής διάλογος κρατά το θέμα των απορριμμάτων στο προσκήνιο καθώς στο μέλλον θα αποτελεί ένα από τα πιο σοβαρά προβλήματα για την ανθρωπότητα.

Με βάση το 2<sup>ο</sup> και το 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο η πρότυπη εγκατάσταση πρόκειται να έχει τη δομή του παρακάτω απλοποιημένου σχήματος.





*Σχήμα 4.9: Απλοποιημένη δομή πρότυπης εγκατάστασης ΠΗΓΗ: Waste Treatment and Disposal, Second Edition, Professor Paul T. Williams*

#### 4.5 Παραδείγματα εγκαταστάσεων στην Ευρώπη

**Essen-Karnap (Γερμανία):** Η εγκατάσταση βρίσκεται στο Essen της Βεστφαλίας περίπου 80 χρόνια καθώς λειτουργούσε με καύσιμο το κάρβουνο και το 1960 ξεκίνησε την καύση απορριμμάτων. Ανακατασκευάστηκε το 1987 για να διαχειριστεί οικιακά, εμπορικά και ογκώδη απόβλητα. Τα αστικά κέντρα που εξυπηρετεί είναι το Essen και το Gelsenkirchen που καταλαμβάνουν το 50% της δυναμικότητάς της που υπολογίζεται σε 740000 τόνους μη ανακυκλώσιμων απορριμμάτων ανά χρόνο λειτουργίας. Η καθαρή συνεισφορά της στο δίκτυο είναι 38 MW ηλεκτρικής ενέργειας και 130 MW τηλεθέρμανσης γεγονός για το οποίο συγκαταλέγεται στις κορυφαίες εγκαταστάσεις ανάκτησης ενέργειας της Γερμανίας. Οι τεχνολογίες καθαρισμού που χρησιμοποιεί είναι το ηλεκτροστατικό φίλτρο, η απορρόφηση με ενεργό άνθρακα και η μείωση NOx και SOx. Η πλειοψηφία των υπολειμμάτων της καύσης ανακυκλώνεται ενώ το 1995 αναβαθμίστηκε το σύστημα καθαρισμού με πλυντρίδες και το 1996 το σύστημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.



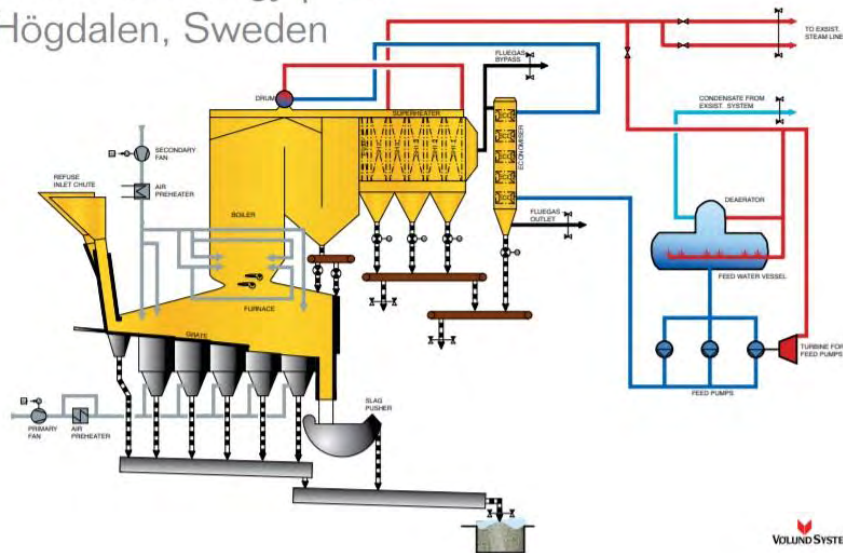
*Σχήμα 4.10:* Η εγκατάσταση του Essen-Karnap ΠΗΓΗ: Essen-Karnap waste-to-energy plant

**Stockholm-Hogdalen (Σουηδία):** Σε μία χώρα όπως η Σουηδία η οποία έχει πολύ χαμηλό έως μηδενικό ποσοστό απορριμμάτων που καταλήγουν σε Χ.Υ.Τ.Α, δε θα ήταν παράλογο να συναντήσει κανείς στην πρωτεύουσα μία εγκατάσταση που δέχεται 700000 τόνους απορριμμάτων ετησίως υπό την συνιδιοκτησία της εταιρείας Fortum και της πόλης της Στοκχόλμης. Με νέα τμήματα να προστίθενται στην εγκατάσταση, από το 2009 παράγει 2147 GWh θερμικής ενέργειας και 197 GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως από δύο ατμοστροβίλους. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εγκατάσταση χρησιμοποιείται για καύση απορριμμάτων από το 1970 με τη διαφορά ότι παρήγαγε αποκλειστικά ηλεκτρική ενέργεια. Σήμερα τροφοδοτεί το δίκτυο τηλεθέρμανσης των συνοικιών του κέντρου της Στοκχόλμης.



Σχήμα 4.11: Η εγκατάσταση στη Στοκχόλμη ΠΗΓΗ: [www.fortum.com](http://www.fortum.com)

### Waste-to-energy plant Högdalen, Sweden



VOLUND SYSTEMS

Plant design data		
Process parameters	Values	Units
Nominal capacity	34	t/h
Nominal lower calorific value for waste	10.2	MJ/kg
Steam flow	115	t/h
Steam temperature	400	°C
Steam pressure	36	bara
Heat output (steam)	86387	KW

Flue gas guarantees: Out of boiler		
Values	Units	
TOC	< 2.5	%
LOI	< 4	%
NO <sub>x</sub>	< 80	mg/Nm <sup>3</sup> *)
NH <sub>3</sub>	< 8.0	mg/Nm <sup>3</sup> *)
CO	< 50.0	mg/Nm <sup>3</sup> *)

\* Hourly average values, 11% O<sub>2</sub> dry flue gas

The plant limit values comply with the EU directive on waste incineration

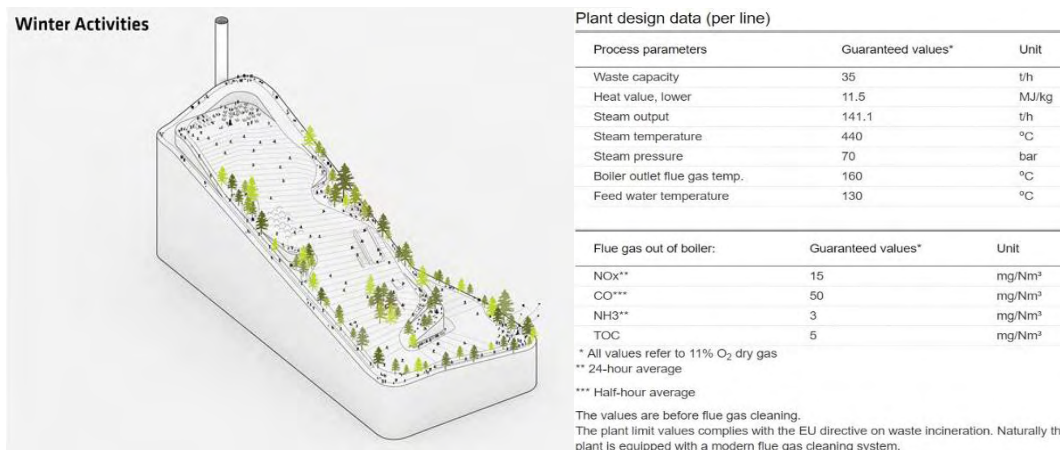
Σχήμα 4.12: Τεχνικά χαρακτηριστικά εγκατάστασης Στοκχόλμης (2006)  
ΠΗΓΗ: [www.fortum.com](http://www.fortum.com)

**Spittelau-Βιέννη (Αυστρία):** Άλλη μία Ευρωπαϊκή πρωτεύουσα 1,8 εκατομμυρίων κατοίκων που φιλοξενεί εγκατάσταση ανάκτησης ενέργειας από απορρίμματα. Από το 2015 επεξεργάζεται ετησίως 250000 τόνους αποβλήτων και παράγει 120 GWh ηλεκτρικής ενέργειας και 500 GWh προς το σύστημα τηλεθέρμανσης το οποίο καλύπτει το θερμικό φορτίο 60000 νοικοκυριών σε διάστημα ενός χρόνου. Αποτέλεσμα της καύσης είναι η συλλογή 6000 τόνων scrap και 60000 τόνων τέφρας. Η εγκατάσταση σχεδιάστηκε στο κέντρο της Βιέννης στη βάση της λογικής της αντιμετώπισης των απορριμμάτων στην πηγή τους. Αυτό συνεπάγεται ότι εναρμονίζεται με την πολεοδομική αισθητική του κέντρου και μάλιστα κατόπιν αιτήματος των κατοίκων έχει λάβει μία καλλιτεχνική εξωτερική όψη που την καθιστά σημείο αναφοράς ιδίως για τους επισκέπτες. Ειδική αναφορά γίνεται από ταξιδιωτικά πρακτορεία για την καπνοδόχο η οποία δεσπόζει στο ύψος των 126 m και είναι ορατή από κάθε συνοικία.



**Σχήμα 4.13:** Η εγκατάσταση Spittelau ΠΗΓΗ: [www.wienenergie.at](http://www.wienenergie.at)

**Κοπεγχάγη (Δανία):** Κορυφαία από άποψη αρχιτεκτονικού σχεδιασμού, η εγκατάσταση της Κοπεγχάγης αναλαμβάνει 400000 τόνους απορριμμάτων το χρόνο που παράγουν οι 500000-700000 κάτοικοι και 46000 επιχειρήσεις και τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια και τηλεθέρμανση 50000 και 120000 σπίτια αντίστοιχα. Ο ατμός εγκαταλείπει το boiler σε θερμοκρασία 440 °C και πίεση 70 bar, γεγονός που έχει διπλασιάσει το βαθμό απόδοσης στη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την εγκατάσταση που προϋπήρχε. Ο νέος βαθμός απόδοσης υπολογίστηκε ότι είναι 28%. Στη μείωση των SOx επιτυγχάνει απόδοση 99,5 % ενώ έχει μειώσει κατά 90% τις εκπομπές NOx σε σχέση με τον προκάτοχό της. Ο ιδιαίτερος σχεδιασμός της οροφής προσφέρει τη δυνατότητα διοργάνωσης δραστηριοτήτων για τους πολίτες ικανοποιώντας αφενός το στόχο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής να μετατραπούν οι εγκαταστάσεις σε πόλο έλξης των ανθρώπων και αφετέρου το αίτημα των πολιτών για εξάλειψη του φαινομένου καύσης απορριμμάτων «πίσω από κλειστές πόρτες».



**Σχήμα 4.14:** Η εγκατάσταση της Κοπεγχάγης ΠΗΓΗ: [www.volund.dk](http://www.volund.dk)

**Κρακοβία (Πολωνία):** Η Κρακοβία με πληθυσμό 1,4 εκατομμύρια (μέτρηση του 2014) χρησιμοποιεί μία από τις πιο σύγχρονες εγκαταστάσεις ανάκτησης ενέργειας από απορρίμματα η οποία εγκαινιάστηκε τον Ιούνιο του 2016 και καλύπτει έκταση 30000 m<sup>3</sup> κοστίζοντας περίπου 156 εκατομμύρια ευρώ. Το 55,8% του κόστους παρείχε η Ευρωπαϊκή Ένωση ενώ το υπόλοιπο η ιδιωτική πρωτοβουλία και το δάνειο από το εθνικό ταμείο προστασίας του περιβάλλοντος και διαχείρισης απορριμμάτων. Περίπου 220000 (28 t/h) τόνοι αποβλήτων που προέρχονται αποκλειστικά από την πόλη της Κρακοβίας ανά έτος επεξεργάζονται σε 2 παράλληλες γραμμές καύσης. Ο χώρος αποθήκευσης μπορεί να δεχτεί τα απορρίμματα 5 ημερών. Στα τεχνικά στοιχεία, ο

υπέρθερμος ατμός για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι σε θερμοκρασία 415 °C και πίεση 40 bar ενώ τα καυσαέρια εισάγονται στο σύστημα καθαρισμού σε θερμοκρασία 160 °C. Σημαντική θέση και εδώ κατέχει η προσπάθεια ευαισθητοποίησης των κατοίκων σχετικά με την προστασία του περιβάλλοντος και τον κύκλο ζωής των προϊόντων καθώς η Πολωνία βρίσκεται κάτω από το μέσο ευρωπαϊκό όρο όσο αναφορά την ανακύκλωση και λιπασματοποίηση. Η πρόσβαση είναι ελεύθερη για τους κατοίκους μία μέρα κάθε μήνα ενώ καθημερινά διοργανώνονται επισκέψεις τις πρωινές ώρες κατόπιν συνεννόησης με τη διοίκηση της εγκατάστασης. Ο εξωτερικός σχεδιασμός της εγκατάστασης είναι και σε αυτή την περίπτωση εξαιρετικός καθώς δε μπορεί να διανοηθεί κάποιος επισκέπτης ότι το κτήριο που κοιτάζει αποτελεί μία βιομηχανία πλήρως εξοπλισμένη με τις πιο σύγχρονες τεχνολογίες καύσης απορριμμάτων. Το μόνο μελανό σημείο στην πορεία της εν λόγω εγκατάστασης είναι οι ανησυχίες για το αν αποτελεί μία βιώσιμη οικονομικά λύση διαχείρισης των απορριμμάτων δεδομένου του αρχικού κόστους κεφαλαίου και του δανείου που εισέπραξε η πόλη της Κρακοβίας.



*Σχήμα 4.15: Η εγκατάσταση της Κρακοβίας ΠΗΓΗ: [kfk.krakow.pl](http://kfk.krakow.pl)*

**Brescia (Ιταλία):** Στη γειτονική Ιταλία λειτουργεί από το 1998 μονάδα καύσης στερεών αποβλήτων αποτελούμενη από 3 ξεχωριστούς αποτεφρωτήρες. Το 2006 βραβεύτηκε από το Πανεπιστήμιο Κολούμπια της Νέας Υόρκης ως η καλύτερη εγκατάσταση στον κόσμο. Πρόκειται για εγκατάσταση που τροφοδοτεί ένα από τα μεγαλύτερα δίκτυα τηλεθέρμανσης στην Ευρώπη που εκτείνεται σε μήκος 670 χιλιομέτρων. Η ηλεκτρική ενέργεια που δύναται να παράγει είναι 85 MW ενώ η συμπαραγόμενη θερμική ενέργεια είναι περίπου 200 MW. Η δυναμικότητά της βρίσκεται ανάμεσα σε 700000 και 750000 τόνους απορριμμάτων σε διάρκεια ενός έτους εξοικονομώντας 488000 τόνους CO<sub>2</sub> το έτος 2017.



*Σχήμα 4.16: Η εγκατάσταση της πόλης Brescia ΠΗΓΗ: ramboll.com*

# 5

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ισχύουσα πολιτική διαχείρισης των απορριμμάτων στην Ελλάδα αλλά και σε χώρες των Βαλκανίων που ανήκουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση βασίζεται στην υγειονομική ταφή. Στην Ελλάδα η διαδικασία της ανακύκλωσης εισχώρησε στην κοινωνία το 2004 και 15 χρόνια το ποσοστό ανέβηκε από το 9% στο 19%. Παρόλα αυτά, το σύστημα της διαχείρισης εξακολουθεί να πάσχει από χαμηλό ποσοστό ανακύκλωσης, έλλειψη χώρων υγειονομικής ταφής και σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα που αφορούν την υπάρχουσα διαδικασία λιπασματοποίησης και ταφής. Αυτοί οι λόγοι καθιστούν την κατασκευή εγκατάστασης ανάκτησης ενέργειας ως μία επιλογή προς την κατεύθυνση της βιώσιμης διαχείρισης απορριμμάτων.

Σε τεχνικό επίπεδο, η έλλειψη εμπειρίας των Ελλήνων στον τομέα μπορεί δημιουργήσει δυσπιστία στις τοπικές αρχές και στους πολίτες που στην πράξη θα εμποδίσουν οποιαδήποτε ενέργεια αφορά το εν λόγω σχέδιο. Αρωγός στην προσπάθεια ενημέρωσης σχετικά με το πώς λειτουργεί μία τέτοια εγκατάσταση είναι τόσο η βούληση μίας κυβέρνησης να ακολουθήσει νέα μονοπάτια όσο και η εμπειρία των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης που εφαρμόζουν παρόμοια πλάνα μερικές δεκαετίες. Ο εξοπλισμός της εγκατάστασης περιλαμβάνει τις πιο πρόσφατες τεχνολογικές καινοτομίες και προέρχεται από κράτη με πολυετή έρευνα στο σχετικό τομέα που αφορά ως επί το πλείστον τη διασφάλιση της ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα. Για παράδειγμα, το επίπεδο εκπομπής διοξινών δύναται να αγγίζει το 0,0085 TEQ ng/m<sup>3</sup> που βρίσκεται εντός του ορίου των 0,1 ng/m<sup>3</sup>.

Σε ό,τι αφορά τους πολίτες, η νοοτροπία όπου η ευθύνη του καθενός ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση της σακούλας απορριμμάτων προς τον κάδο συλλογής, αν όχι με την άτακτη απόρριψη σε κάθε πιθανό σημείο, και η επακόλουθη αδιαφορία για το πώς εξελίσσεται η διαδικασία διαχείρισης είναι παράγοντες που είναι αναγκαίο να αλλάξουν για την εφαρμογή ενός πλάνου ανάκτησης ενέργειας. Βέβαια, με βάση την εμπειρία του προγράμματος ευαισθητοποίησης σχετικά με την ανακύκλωση μπορεί μεν τα ποσοστά να έχουν αυξηθεί στο 19% αλλά η διαδικασία συναντά πολλά εμπόδια κυρίως λόγω της αδιαφορίας της πλειοψηφίας των πολιτών και τη μετατροπή των κάδων ανακύκλωσης σε επιπλέον κάδους απορριμμάτων. Επομένως, απαιτείται εφαρμογή μίας νομοθεσίας που παρέχει κίνητρα στους πολίτες να ενισχύσουν την ανακύκλωση και ταυτόχρονα ευνοεί τη σκέψη του κύκλου ζωής. Μιλάμε λοιπόν για μία νομοθεσία που πέρα από το τέλος ταφής απορριμμάτων ενισχύει το τέλος «κυκλικής οικονομίας» σε σημείο που θα είναι οικονομικά ασύμφορο για τους δήμους να στρέφονται σε υψηλά ποσοστά υγειονομικής ταφής όπως για τους πολίτες οι οποίοι θα κληθούν να πληρώσουν αυξημένα δημοτικά τέλη. Από το 2000 έως το 2010 τα τέλη εισόδου στους Χ.Υ.Τ.Α. ήταν περίπου 10-37 €/t ενώ το αντίστοιχο κόστος πύλης για μία εγκατάσταση καύσης απορριμμάτων όπως υπολογίστηκε το 2005 από το ΑΠΘ ήταν 65 €/t. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον ανταγωνισμού η κατασκευή μονάδας καύσης δεν είναι βιώσιμη λύση. Όμως, συνήθως ό,τι δε λύνει η οικονομία μπορεί να λύσει το περιβάλλον. Από το 2014 το τέλος πύλης των Χ.Υ.Τ.Α. αυξάνεται κατά 5€/t και άγγιξε τη μέγιστη τιμή των 60€/t από 35€/t που ήταν στην αρχή του 2014. Αυτό υποδεικνύει ότι οι Χ.Υ.Τ.Α. αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα και είναι κάθε άλλο παρά βιώσιμοι. Ήδη ο Χ.Υ.Τ.Α. Φυλής που δέχεται σχεδόν το σύνολο των απορριμμάτων της Αττικής, από τις αρχές του 2019 έθεσε σε ισχύ τέλος εισόδου που ανέρχεται σε 100 €/t για σύμμεικτα απορρίμματα (δηλαδή περιέχουν



και πράσινο). Παράλληλα, το 2016 η Ελλάδα τιμωρήθηκε με πρόστιμο 10000000 € και επιπρόσθετα 30000 κάθε μέρα για μη συμμόρφωση με τους κανόνες διαχείρισης απορριμμάτων που έχει επιβάλλει η Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Από το 2017 η Ελλάδα δέχεται πιέσεις για σταδιακή αύξηση των τελών εισόδου των Χ.Υ.Τ.Α. ώστε να ενισχυθούν η ανακύκλωση και η ανάκτηση υλικών. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι η κακή διαχείριση επιβαρύνει τον κρατικό προϋπολογισμό και είναι επιτακτική η αναζήτηση νέων βιώσιμων λύσεων.

Η εισχώρηση των εγκαταστάσεων στην ελληνική πραγματικότητα μπορεί επίσης να προσφέρει τεράστια ανακούφιση στην νησιωτική Ελλάδα. Η ανάπτυξη του τουρισμού έχει προκαλέσει έντονα προβλήματα στη διαχείριση του όγκου των απορριμμάτων και είναι ορατό το ενδεχόμενο να πληγεί η λεγόμενη βαριά βιομηχανία της Ελλάδας. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε νησιωτικές περιοχές είναι ιδανική η ενσωμάτωση της τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης που θα προσφέρει ανακούφιση από τις υψηλές τιμές των καυσίμων και της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η νομοθεσία επιβάλλει την παροχή κλιβάνων με συνοδεία συστήματος καταγραφής της εκπομπής ρύπων ώστε να εξασφαλιστεί το γεγονός ότι καμία εγκατάσταση δε λειτουργεί ανεξέλεγκτα. Αντιθέτως, σύγχρονες μονάδες καύσεις διατηρούν ανοιχτές τις πόρτες τους προς τους πολίτες έχοντας μετατραπεί σε σημεία αναφοράς των πόλεων που τις φιλοξενούν. Άρα είναι φανερό ότι έχουν χτιστεί σχέσεις εμπιστοσύνης μεταξύ πολιτών και του συστήματος διαχείρισης των απορριμμάτων.

Τέλος το ευρέως εφαρμοσμένο μοντέλο ιδιοκτησίας BOT ανακουφίζει τον κρατικό προϋπολογισμό από το αρχικό κόστος κεφαλαίου και παρέχει κλίμα ασφάλειας σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα του πλάνου.

Το πρόβλημα των απορριμμάτων είναι πιο εμφανές από ποτέ και σίγουρα πρέπει να βρίσκεται στο προσκήνιο καθώς θα απασχολήσει τις δυτικές κοινωνίες στα επόμενα χρόνια. Η πολιτική του zero waste (μηδενικά απορρίμματα) φαντάζει ουτοπική βάσει του ισχύοντος καταναλωτικού προτύπου και θα η συζήτηση θα πρέπει να στραφεί στην πολιτική του zero dumping (μηδενική ταφή). Αναμφισβήτητα η στρατηγική της αντιμετώπισης απαιτεί διάλογο και συνεννόηση αφενός μεταξύ της επιστημονικής κοινότητας και αφετέρου μεταξύ κυβέρνησης και πολιτών. Ας μη ξεχνάμε ότι το περιβάλλον είναι αυτό που μας ενώνει και η διασφάλιση της ποιότητάς του λειτουργεί προς όφελος της υγείας του ανθρώπου.

*«Τα απορρίμματα είναι απορρίμματα μόνο όταν τα απορρίπτουμε»*

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Williams, Paul T.** *Waste Treatment and Disposal*. s.l. : John Wiley & Son,s Ltd, 2005.
2. **Cengel, Yunus A. & Boles, Michael A.** *Θερμοδυναμική για μηχανικούς*. s.l. : Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2013.
3. **Cooper, David C. & Alley, F. C.** *Έλεγχος αέριας ρύπανσης*. s.l. : Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2015.
4. **Ανδρίτσος, Ν. & Σαμαράς, Π.** *Σημειώσεις Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων* . 2017.
5. **Ling, Qui.** *Analysis of the economics of Waste to Energy in China*. s.l. : Columbia University, 2012.
6. **Λυμπερόπουλος, Γ. & Σαχαρίδης, Γ.** *Σημειώσεις Οργάνωσης και Διοίκησης Εργοστασίων*. s.l. : Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2013.
7. **Μποντόζογλου, Β.** *Σημειώσεις Θερμικών Διεργασιών*. s.l. : Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2017.
8. **Ανδρίτσος, Ν.** *Σημειώσεις Τεχνολογίας Βιομηχανικής Αντιρρύπανσης*. s.l. : Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2017.
9. **ΚΑΚΑΤΕΣ, Γ. & ΧΡΥΣΟΠΟΛΙΤΗΣ, Ν.** *Τηλεθέρμανση πόλεων*.
10. **Confederation of Waste to Energy plants.** *Interactive presantation: Waste to Energy: Energising your waste*. s.l. : Available at <http://www.cewep.eu/>.
11. **European Commission.** *Waste Incineration Directive*. s.l. : Available at <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/links/waste-incineration-directive-2000-76-ec>, 2006.
12. **Ecoheat4cities.** *Guidelines for techincal assessment of Distrist Heating Systems*. s.l. : Available at [www.ecoheat4cities.eu](http://www.ecoheat4cities.eu).
13. **Stringfellow, Thomas.** *An Independent Engineering Evaluation of Waste-to-Energy Technologies*. s.l. : Available at <https://www.renewableenergyworld.com/articles/2014/01/an-independent-engineering-evaluation-of-waste-to-energy-technologies.html>, 2014.
14. **Ecoursesonline.** *Thermodynamics and Heat Engine - LESSON - 30 BOILER ACCESSORIES*. s.l. : Available at <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=2428>.
15. **Confederation of Waste to Energy Plants.** *Waste-to-Energy Plants in Europe in 2017*. s.l. : Available at <http://www.cewep.eu/waste-to-energy-plants-in-europe-in-2017/>, 2017.
16. **Rushton, Lesley.** *Health hazards and waste management*. s.l. : Available at <https://academic.oup.com/bmb/article/68/1/183/421368>, 2003.
17. **Balkan Green Energy News.** *Most polluted countries in Europe report*. s.l. : Available at <https://balkangreenenergynews.com/bih-north-macedonia-most-polluted-countries-in-europe-report/>, 2019.

18. **Εκστρατεία Rethink.** *Οι αρχές της Μείωσης (Reduce), Επαναχρησιμοποίησης (Reuse) και Ανακύκλωσης (Recycle).* s.l. : Available at <http://rethink.com.cy/el/rrr/ti-einai-to-rrr>, 2014.
19. **U.S. Energy Information Administration.** *Waste-to-Energy (Municipal Solid Waste).* s.l. : Available at [https://www.eia.gov/energyexplained/?page=biomass\\_waste\\_to\\_energy#tab2](https://www.eia.gov/energyexplained/?page=biomass_waste_to_energy#tab2), 2019.
20. **ΣΕΛΛΟΥΝΤΟΣ, Β. Η.** *ΘΕΡΜΑΝΣΗ-ΚΛΙΜΑΤΙΣΜΟΣ.* s.l. : ΕΚΔΟΣΕΙΣ "ΤεΚΔΟΤΙΚΗ"/"ΣΕΛΚΑ-4Μ"ΕΠΕ, 1995.
21. **Electropaedia.** *Steam Turbine Electricity Generation Plants.* s.l. : Available at [https://www.mpoweruk.com/steam\\_turbines.htm](https://www.mpoweruk.com/steam_turbines.htm).
22. **Χαντζηκωσταντής Γεώργιος, Κ.** *Αναθέρμανση - Απομάστευση.* s.l. : ΤΕΙ ΑΘΗΝΑΣ.
23. **Confederation of Waste to Energy plants.** *Landfill taxes and bans.* s.l. : Available at <http://www.cewep.eu/landfill-taxes-and-bans/>, 2017.
24. **Λιαλιος Γ, .** *Νέος «τιμοκατάλογος» για τα απορρίμματα.* s.l. : Available at <http://www.kathimerini.gr/1019878/article/epikairothta/ellada/neos-timokatalogos-gia-ta-aporrimmata>, 2019.
25. **Miettinen, Ville & US Environmental Protection Agency.** *What is PM2.5 and Why You Should Care.* s.l. : Available at <https://blissair.com/what-is-pm-2-5.htm>.
26. **UN Environment.** *What is Life Cycle Thinking?* s.l. : Available at <https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/what-is-life-cycle-thinking/>.
27. **Environmental Protection Authority, .** *Emergency Shutdown Scenarios.* s.l. : Available at [http://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/PER\\_documentation/Appendix%2019.pdf](http://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/PER_documentation/Appendix%2019.pdf).
28. **Environmental Protection Agency.** *Correction of Concentration and Volumetric Flows.* s.l. : Available at <https://www.epa.ie/air/aireinforcement/epalicenseeinformation/airguidancedocuments/correctionofconcentrationandvolumetricflows/>.
29. **Gupta, Shubham & Mishra, R. S.** *Estimation of Electrical Energy Generation from Waste to Energy using.* s.l. : Available at <http://www.ijari.org/CurrentIssue/2015Volume4/IJARI-ME-15-12-108.pdf>, 2015.
30. **European Environment Agency.** *Managing municipal solid waste - a review of achievements in 32 European countries.* s.l. : Available at <https://www.eea.europa.eu/>, 2013.
31. **European Environment Agency.** *Air quality in Europe report.* s.l. : Available at <https://www.eea.europa.eu>, 2018.
32. **European Environment Agency.** *Air quality standards.* s.l. : Available at <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-standards>, 2019.
33. **Waste Control.** *Database of Waste Management Technologies.* s.l. : Available at <http://www.epem.gr/waste-c-control/database/html/WtE-03.htm>.
34. **European Environmental Agency.** *Recycling rates in Europe.* s.l. : Available at [https://www.eea.europa.eu/about-us/competitions/waste-smart-competition/recycling-rates-in-europe/image\\_view\\_fullscreen](https://www.eea.europa.eu/about-us/competitions/waste-smart-competition/recycling-rates-in-europe/image_view_fullscreen), 2013.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## Συνθήκες αναφοράς μετρήσεων εκπομπών

Για την απόδειξη τήρησης των καθορισμένων ορίων, οι εγκαταστάσεις είναι υποχρεωμένες να δημοσιεύουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων των εκπομπών εκφρασμένα σε συνθήκες αναφοράς προκειμένου να υπάρχει μέτρο σύγκρισης μεταξύ τους καθώς λειτουργούν σε διαφορετικές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές είναι θερμοκρασία 273 K (0 °C) , πίεση 101,3 kPa (ατμοσφαιρική πίεση), 11% O<sub>2</sub> και 0% υγρασία. Η μετατροπή της συγκέντρωσης μίας ουσίας γίνεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{SC} = C_M \times \frac{21 - O_{2,S}}{21 - O_{2,M}} \times \frac{100 - H_2O_S}{100 - H_2O_M} \times \frac{T_M}{T_S} \times \frac{P_S}{P_M}$$

- C<sub>SC</sub>: η συγκέντρωση σε συνθήκες αναφοράς  
C<sub>M</sub>: η συγκέντρωση σε συνθήκες λειτουργίας  
O<sub>2,S</sub>: το ποσοστό οξυγόνου σε συνθήκες αναφοράς (11%)  
O<sub>2,M</sub>: το ποσοστό οξυγόνου σε συνθήκες λειτουργίας  
H<sub>2</sub>O<sub>S</sub>: το ποσοστό υγρασίας σε συνθήκες αναφοράς (0%)  
H<sub>2</sub>O<sub>M</sub>: το ποσοστό υγρασίας σε συνθήκες λειτουργίας  
T<sub>M</sub>: η θερμοκρασία σε συνθήκες λειτουργίας  
T<sub>S</sub>: η θερμοκρασία σε συνθήκες αναφοράς (273 K)  
P<sub>S</sub>: η πίεση σε συνθήκες αναφοράς (101,3 kPa)  
P<sub>M</sub>: η πίεση σε συνθήκες λειτουργίας

Επιπλέον χρήσιμη είναι και η μετατροπή της συγκέντρωσης από ppm σε mg/Nm<sup>3</sup> όπου Nm<sup>3</sup> εκφράζει τον όγκο του αερίου σε συνθήκες αναφοράς ( 273 K, 101,3 kPa). Τύπος που χρησιμοποιείται είναι:

$$\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} = \text{ppm} \times \frac{\text{γραμμομοριακή μάζα (mg)}}{\text{γραμμομοριακός όγκος (ml)}}$$

### Παράδειγμα

Η ένδειξη ενός μετρητή VOC είναι 150 ppm προπανίου (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>). Μετατρέψτε τη συγκέντρωση αυτή σε mg/Nm<sup>3</sup>.

Η γραμμομοριακή μάζα του προπανίου είναι (3 × 12) + (8 × 1) = 44 g/mol

Ο γραμμομοριακός όγκος για τις συνθήκες αναφοράς μπορεί να υπολογιστεί από την καταστατική εξίσωση:

$$P V = n R T$$

- P: η πίεση του αερίου (1 ατμόσφαιρα)  
V: ο γραμμομοριακός όγκος (liter)  
n: η ποσότητα των mol (1 mol στην περίπτωση μας)  
R: σταθερά (0,082  $\frac{\text{liter} \times \text{atm}}{\text{mol} \times \text{K}}$ )  
T: η θερμοκρασία του αερίου (273 K)

$$\frac{V}{n} = \frac{RT}{P} = \frac{0,082 \times 273}{1} = 22,4 \frac{\text{liter}}{\text{mol}}$$

Άρα, η συγκέντρωση είναι:

$$150 \times \frac{44 \text{ mg}}{22,4 \text{ ml}} = 294,6 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

$$* \frac{\text{g}}{\text{liter}} = \frac{\text{mg}}{\text{ml}}$$

Η συγκέντρωση των VOC (εκφρασμένα ως C) είναι:

$$150 \times \frac{3 \times 12}{22,4} = 241 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

## Διαδικασίες έκτακτης διακοπής λειτουργίας

Οι διαδικασίες που ακολουθούνται είναι οι παρακάτω:

No	ΤΟΜΕΑΣ	ΣΥΜΒΑΝ	ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΙΤΙΕΣ	ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ/ΜΕΤΡΑ	ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ
1	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΑΖΑΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ/ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ	Υπερπίεση στο θάλαμο καύσης	Μεγαλύτερη ποσότητα απορριμμάτων στον κλίβανο από την προβλεπόμενη	Η παροχή αέρα και απορριμμάτων διακόπτεται ενώ η κινούμενη σχάρα ακινητοποιείται. Οι ανεμιστήρες λειτουργούν στην ελάχιστη ταχύτητα.	Περιορισμένη άμεση έξοδος αερίων (η υπερπίεση συνήθως διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα, η διαδρομή των αερίων από το boiler είναι αεροστεγής) αλλά τα απορρίμματα που συσσωρεύονται μπορεί να απελευθερώσουν ρύπους (CO, VOC) που δεν αντιμετωπίζονται από το σύστημα καθαρισμού. Όλη η ποσότητα των αερίων συνεχίζει να περνά από το σασκόφιλτρο όπου τα σωματίδια, τα όξινα αέρια και τα βερέα μέταλλα συλλέγονται
2	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΑΖΑΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ/ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ	Πτώση θερμοκρασίας	Έμφραξη χοάνης τροφοδοσίας απορριμμάτων	Οι βοηθητικοί καυστήρες τίθενται σε λειτουργία. Ο χειριστής αποφασίζει αν το πρόβλημα μπορεί να λυθεί ή αλλιώς εφαρμόζεται διαδικασία ομαλής διακοπής λειτουργίας.	Κανένα πρόβλημα εκπομπών. Το σύστημα καθαρισμού παραμένει σε λειτουργία.
3	ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ	Έλλειψη νερού	Βλάβη αντλίας ή διαρροή νερού από τις σωληνώσεις του boiler	Όπως στο σενάριο No.1	Όπως στο σενάριο No.1
4	ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	Αστοχία σασκόφιλτρου	Κακή ποιότητα (υφάσματος ή τρόπου ύφανσης)	Διαρροή-εκπομπή σκόνης. Ο αισθητήρας σκόνης που βρίσκεται μετά το φίλτρο ηχεί. Η μονάδα ελέγχου υποδεικνύει το θάλαμο και τη σειρά που βρίσκεται το φίλτρο που αντιμετωπίζει πρόβλημα. Ο χειριστής οφείλει να απομονώσει το θάλαμο αυτό. Το προσωπικό της εγκατάστασης πρέπει να ανοίξει τη θήκη και να αντικαταστήσει το φίλτρο. Μετά την αντικατάσταση συνεχίζεται η ομαλή λειτουργία.	Αμελητέα επίδραση για μικρό χρονικό διάστημα (συνήθως μικρότερο από μισή ώρα). Η εγκατάσταση μπορεί να λειτουργεί έως 24 ώρες με απομονωμένο ένα θάλαμο στο σασκόφιλτρο.
5	ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΥ	Υπέρβαση των ορίων εκπομπής	Μπλοκαρισμένη τροφοδοσία	Η υπέρβαση των ορίων προκαλεί το συναγερμό ηχήσει. Εναλλαγή σε εφεδρικό σύστημα τροφοδοσίας. Επισκευή του μπλοκαρισμένου συστήματος τροφοδοσίας	Καμία συνέπεια, από τη στιγμή που εφαρμοστούν τα μέτρα αντιμετώπισης.
6	ΓΕΝΙΚΑ	Μείωση ελκυσμού ανεμιστήρα	Βλάβη μετατροπέα συχνότητας	Όπως στο σενάριο No.1	Όπως στο σενάριο No.1
7	ΓΕΝΙΚΑ	Βλάβη δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	Κεραυνικά φαινόμενα	Οι γεννήτριες συνδέονται παράλληλα στο δίκτυο ώστε να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια μέχρι ο πάροχος να αποκαταστήσει τη βλάβη στο δίκτυο του	Καμία συνέπεια, καθώς η εγκατάσταση συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά καθώς είναι ενεργειακά αυτόνομη.
8	ΓΕΝΙΚΑ	Έκτακτη διακοπή λειτουργίας ατμοστροβίλου	Κεραυνικά φαινόμενα	Η εφεδρική γεννήτρια τίθεται σε λειτουργία και παρέχει ενέργεια σε βασικά συτήματα: - αντλίες παροχής νερού - ανεμιστήρες - UPS ( το οποίο τροφοδοτεί με ρεύμα πχ τους υπολογιστές στο δωμάτιο ελέγχου) Ελεγχόμενη διακοπή λειτουργίας της εγκατάστασης	Βασικά όπως στο σενάριο 1 ( η μόνη διαφορά είναι ότι ο ελκυσμός των καυσαερίων γίνεται με τον ανεμιστήρα να λειτουργεί με το εφεδρικό μοτέρ, αντί για το κανονικό, στην ελάχιστη ταχύτητα)