



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη βιωσιμότητας της μεθόδου αεριοποίησης υπολειμματικών
καυσίμων από αστικά απορρίμματα μέσω διερεύνησης
περιβαλλοντικών και τεχνοοικονομικών παραγόντων

*Sustainability of RDF gasification process through environmental & techno-
economic principles*

ΞΕΝΗ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

Επιβλέπων: Καρέλλας Σωτήριος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ
Αθήνα, Ιούλιος 2013

Πρόλογος

Με την παρούσα εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Δρ. Καρέλλα Σωτήριο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα της εργασίας, που τυγχάνει του άμεσου ενδιαφέροντός μου.

Επιπλέον οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον MSc Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Κουρκούμπα Δημήτριο, Επιστημονικό Συνεργάτη του ΕΚΕΤΑ/ΙΔΕΠ, για την πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και την άψογη συνεργασία μας, καθώς και για τις γνώσεις που τελικά απέκτησα μέσα από την ενασχόληση με το θέμα αυτό.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την υποστήριξη που μου παρείχε ώστε να καταφέρω να φτάσω μέχρι εδώ.

*Βίλλυ Ξένη
Νέα Σμύρνη, Ιούλιος 2013*

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	9
Summary	10
Κεφάλαιο 1^ο : Εισαγωγή	13
Κεφάλαιο 2^ο : Τεχνολογία αεριοποίησης RDF	16
2.1. Γενικά.....	16
2.2. Παραγωγή RDF.....	16
2.3. Αεριοποίηση RDF	18
2.3.1. Βασικές αρχές αεριοποίησης RDF	18
2.3.2. Χημικές αντιδράσεις αεριοποίησης	19
2.3.3. Τεχνολογικά στοιχεία αεριοποιητών	20
2.3.4. Πλεονεκτήματα αεριοποίησης.....	21
2.3.5. Αέριο σύνθεσης	22
2.3.6. Μονάδες αεριοποίησης σε λειτουργία στην Ευρώπη	22
2.4. Εισαγωγή στη Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis – LCA) για τη διαδικασία της αεριοποίησης RDF.....	24
2.4.1. Γενικά.....	24
2.4.2. Περιγραφή διαδικασίας κατά ISO 14040	24
2.4.3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής μεθόδων διαχείρισης απορριμμάτων	24
2.4.4. Ανάλυση Κύκλου Ζωής αεριοποίησης βιομάζας.....	33
2.4.5. Συμπεράσματα από ανασκόπηση ανάλυσης κύκλου ζωής	38
Κεφάλαιο 3^ο : Μοντέλο παραγωγής αερίου σύνθεσης από αεριοποίηση RDF	39
3.1. Γενική διαδικασία.....	39
3.2. Περιγραφή εξεταζόμενων σεναρίων	40
3.3. Εφαρμογή του μοντέλου σε συγκεκριμένη περίπτωση	40
3.4. Εγκυρότητα μοντέλου	48
3.4.1. Σύγκριση υπολογιζόμενης σύστασης syngas με την αντίστοιχη της βιβλιογραφίας.....	48
3.4.2. Σύγκριση με βάση την υγρασία του RDF.....	49
Κεφάλαιο 4^ο : Υπολογισμός περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου βάσει των αρχών της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής	50
4.1. Γενικά.....	50
4.2. Υπολογισμός δείκτη επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Global Warming Potential Factor).....	51

4.3. Ανάλυση ευαισθησίας του συστήματος σε σχέση με την ανάκτηση χαρτιού και πλαστικού	52
4.4. Σύγκριση των αποτελεσμάτων επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου με άλλη μέθοδο διαχείρισης (απόθεση σε ΧΥΤΑ)	58
4.5. Εκπομπές εξοικονόμησης CO ₂ από την ανακύκλωση υλικών	61
4.6. Διατάξεις αξιοποίησης του αερίου σύνθεσης	63
4.6.1. Καύση σε πυρσό	64
4.6.2. Καύση σε ΜΕΚ	64
4.6.3. Καύση σε αεριοστρόβιλο	64
4.6.4. Καύση σε διάταξη ατμοπαραγωγής	65
4.6.5. Υπολογισμός εκπομπών από τη διαδικασία καύσης του αερίου σύνθεσης	65
4.7. Κατηγορίες επίδρασης της απόθεσης των υπολειμμάτων αεριοποίησης	67
4.8. Περιβαλλοντική νομοθεσία	70
4.8.1. Κατάσταση στην Ελλάδα	71
4.8.2. Σενάριο κομποστοποίησης	74
Κεφάλαιο 5^ο : Οικονομοτεχνική ανάλυση μονάδας αεριοποίησης RDF	77
5.1. Γενικά	77
5.2. Παράμετροι οικονομοτεχνικής ανάλυσης μονάδας αεριοποίησης RDF	77
5.2.1. Τμήμα αεριοποίησης RDF (κοινό για τις 2 περιπτώσεις)	79
5.2.2. Τμήμα ανάκτησης υλικών (αφορά την ολοκληρωμένη μονάδα)	83
5.2.3. Έσοδα εγκατάστασης	84
5.3. Ανάπτυξη τιμολογιακής πολιτικής πώλησης ενέργειας	86
5.3.1. Δεδομένα βασικών οικονομικών σεναρίων	86
5.3.2. Υπολογισμός τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από αέριο σύνθεσης που προέρχεται από αεριοποίηση RDF	87
5.4. Αναλύσεις ευαισθησίας οικονομικών μεγεθών	89
5.4.1. Ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με το τέλος εισόδου	89
5.4.2. Ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με την ανάκτηση υλικών	91
5.4.3. Ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με τον δείκτη IRR της επένδυσης	92
5.4.4. Ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ	94
5.4.5. Ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με τον τρόπο χρηματοδότησης	95
Κεφάλαιο 6^ο : Εισαγωγή στην εμπορία εκπομπών	97
6.1. Γενικά	97
6.2. Κατάσταση στην Ελλάδα	98

6.3. Υπολογισμός τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπ' όψιν τα κόστη εκπομπών.....	99
Κεφάλαιο 7^ο : Συμπεράσματα – Προτάσεις μελλοντικής εργασίας.....	101
Κεφάλαιο 8^ο : Βιβλιογραφία.....	104

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη βιωσιμότητας της μεθόδου αεριοποίησης υπολειμματικών καυσίμων από αστικά απορρίμματα (RDF) σύμφωνα με περιβαλλοντικά κριτήρια βασισμένα στις αρχές της ανάλυσης κύκλου ζωής, και την αξιολόγηση της επένδυσης σε τέτοιου είδους εγκατάσταση, βάσει τεchnο-οικονομικών παραγόντων.

Στο κεφάλαιο **1** γίνεται μία εισαγωγή στην ιεράρχηση των μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων, όπου παρουσιάζονται οι στρατηγικές που ακολουθούνται για τα απορρίμματα από τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης και η βαθμίδα στην οποία κατατάσσεται η αεριοποίηση RDF στην πυραμίδα της ιεράρχησης.

Στο κεφάλαιο **2** συγκεντρώνεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας, το οποίο αφορά το RDF, την τεχνολογία της αεριοποίησης και τη μέθοδο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται επεξήγηση της μεθόδου παραγωγής του RDF στη μονάδα ανάκτησης υλικών, παρουσιάζεται η θεωρία της αεριοποίησης και οι διαθέσιμες τεχνολογίες και τέλος γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση σε μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής μεθόδων διαχείρισης στερεών αποβλήτων και αεριοποίησης βιομάζας.

Στο κεφάλαιο **3** εφαρμόζεται το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για τη μοντελοποίηση της αεριοποίησης. Δίνονται αναλυτικά οι είσοδοι, όπως η σύσταση του προς αεριοποίηση RDF, η θερμοκρασία αεριοποίησης και οι δύο περιπτώσεις μονάδων που εξετάζονται και παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν για το αέριο σύνθεσης που παράγεται. Επιπλέον γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τη βιβλιογραφική αναφορά στην οποία στηρίχθηκε το μοντέλο.

Στο κεφάλαιο **4** υπολογίζεται η επίδραση της εξεταζόμενης μεθόδου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου βάσει των αρχών της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Επιπλέον πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας σχετικά με τις σημαντικότερες παραμέτρους. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την εφαρμοζόμενη αυτή τη στιγμή μέθοδο διαχείρισης της απόθεσης σε ΧΥΤΑ στην Ελλάδα. Τέλος παρουσιάζονται προτάσεις σύμφωνα με την περιβαλλοντική νομοθεσία, σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο, προκειμένου η Ελλάδα σαν κράτος-μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης να επιτύχει τους στόχους που έχουν τεθεί.

Στο κεφάλαιο **5** εφαρμόζεται βάσει των δεδομένων των προηγούμενων κεφαλαίων το οικονομικό μοντέλο, υπολογίζοντας τις χρηματοροές της επένδυσης. Τελικό αποτέλεσμα της οικονομικής ανάλυσης είναι ένα εύρος τιμών πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από αέριο σύνθεσης που έχει προέλθει από αεριοποίηση RDF. Ακόμα παρουσιάζονται αναλύσεις ευαισθησίας σε σχέση με τα οικονομικά και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της επένδυσης.

Στο κεφάλαιο **6** γίνεται εισαγωγή στο σύστημα εμπορίας εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, όπου αναφέρεται και η σχετική ευρωπαϊκή νομοθεσία η οποία επέβαλε το σύστημα εμπορίας εκπομπών με σκοπό να μειωθεί η αυξανόμενη τάση των εκπομπών

διοξειδίου του άνθρακα. Παράλληλα, υπολογίζεται το οικονομικό αποτέλεσμα που θα είχε η εισαγωγή μίας εγκατάστασης διαχείρισης απορριμμάτων στο σύστημα εμπορίας εκπομπών σχετικά με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται.

Τέλος, στο κεφάλαιο **7** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας και δίνονται προτάσεις για μελλοντική εργασία.

Summary

The scope of the present thesis is a sustainability study of the gasification of RDF process according to environmental criteria based on the Life Cycle Analysis principles and the investment evaluation for this kind of waste treatment plant, based on techno-economic factors.

Chapter **1** is an introduction to the waste hierarchy, while the waste treatment strategies followed by the European member states and the level of the waste hierarchy pyramid in which gasification of RDF belongs, are also presented.

Chapter **2** includes the necessary theoretical basis for the study, referring to the RDF production, the gasification technology and the Life Cycle Analysis process. Specifically, the production of RDF in a material recovery facility, and the gasification theory and available technology are analyzed. Finally, a Life Cycle Analysis literature review over solid waste management methods and biomass gasification is illustrated.

In chapter **3** the developed computational model for gasification modelling is applied. Parameters such as RDF composition and gasification temperature are given, as well as the results referring to the product gas chemical composition. Furthermore, there is a comparison between these results and the ones from the literature reference, on which the developed model is based.

In chapter **4** the environmental impact of the baseline scenarios in concern of the greenhouse effect is assessed, based on the Life Cycle Analysis principles. Moreover, sensitivity analyses according to the most important parameters are presented. These results are compared to the current method of untreated MSW landfilling. Finally, suggestions according to the environmental legislative framework are being made, so that Greece as a member-state of the EU achieves the expected results.

Chapter **5** of the developed economic computational model is applied, based on the previously mentioned data, calculating the investment cash flow. The main result of this economic evaluation is a range for the selling price of the electricity produced by syngas combustion. In addition, several sensitivity analyses are being undertaken, in order to determine the effects of altering the basic financial and technical factors of the investment.

Chapter **6** is an introduction to the emission trading system as an additional parameter to a waste management investment evaluation and its effect especially to the produced electricity selling price.

The **7th** and final chapter includes the conclusions of the above study and the perspectives and proposals for further study and research.

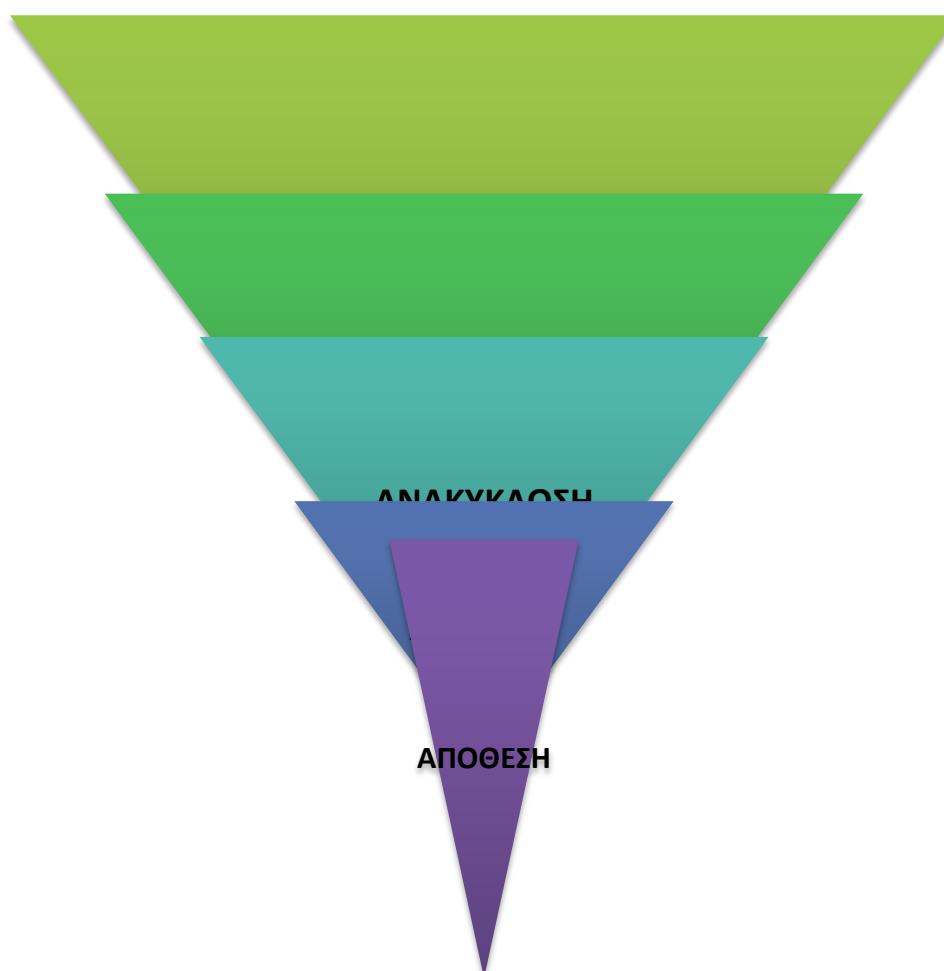
Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

Η διαχείριση των απορριμμάτων μέσω της απόθεσής τους σε χώρους υγειονομικής ταφής έχει αποτελέσει εδώ και πολλά χρόνια κοινή πρακτική για την πλειονότητα των απορριμμάτων παγκοσμίως. Δεδομένων των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της μεθόδου αυτής, της έλλειψης γης για δημιουργία χώρου απόθεσης αλλά και υψηλού κόστους της, πολλές χώρες του ανεπτυγμένου και του αναπτυσσόμενου κόσμου, έχουν στραφεί, με γρηγορότερους ή πιο αργούς ρυθμούς, σε εναλλακτικές μεθόδους διαχείρισης.

Σύμφωνα με την ιεράρχηση των προτεραιοτήτων στη διαχείριση των απορριμμάτων, η ταφή τους κατατάσσεται στο κατώτατο επίπεδο (σχήμα 1.1).

Η ανακύκλωση με διαλογή στην πηγή εφαρμόζεται σε όλο και μεγαλύτερο επίπεδο, αλλά παρόλα αυτά παραμένει το πρόβλημα των μη ανακυκλώσιμων κλασμάτων, των υπολειμμάτων που δε μπορούν να ανακτηθούν.

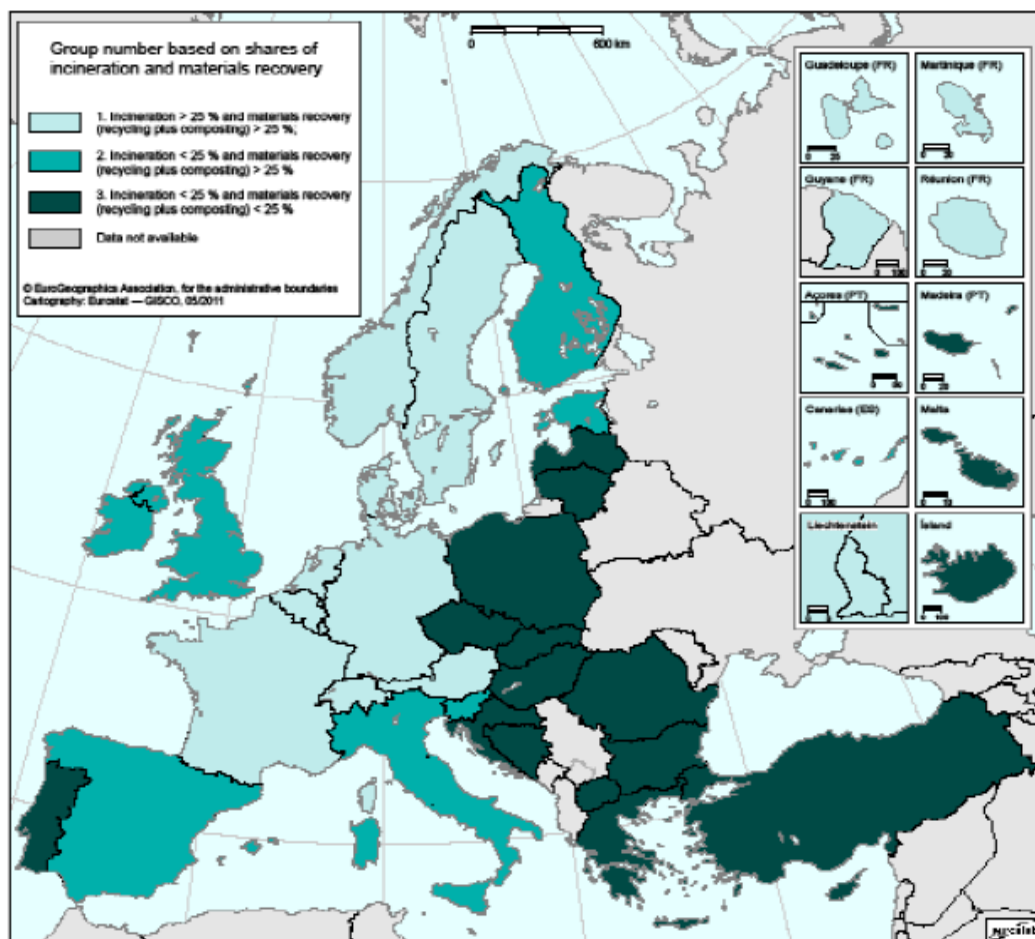


Σχήμα 1.1: Πυραμίδα ιεράρχησης προτεραιοτήτων διαχείρισης απορριμμάτων

Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat για το 2009 (δημοσιευμένα το 2011), διαφαίνεται η τάση των 27 κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης να διαχειρίζονται πλέον τα

απορρίμματα με τρόπο τέτοιο ώστε να εκτρέπεται όλο και μεγαλύτερο ποσοστό του ρεύματος από τους χώρους υγειονομικής ταφής.

Για αυτό το σκοπό, οι χώρες μπορεί να ακολουθούν διαφορετικές στρατηγικές διαχείρισης, με την αποτέφρωση και την ανάκτηση υλικών να είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι. Το σχήμα 1.2 παρουσιάζει την κατανομή των κρατών-μελών αναλόγως με το συνολικό ποσοστό αποτέφρωσης και ανάκτησης υλικών (η οποία εκφράζει εδώ το άθροισμα της ανακύκλωσης και της κομποστοποίησης).



Source: Eurostat (online data code: [env_wasmun](#))

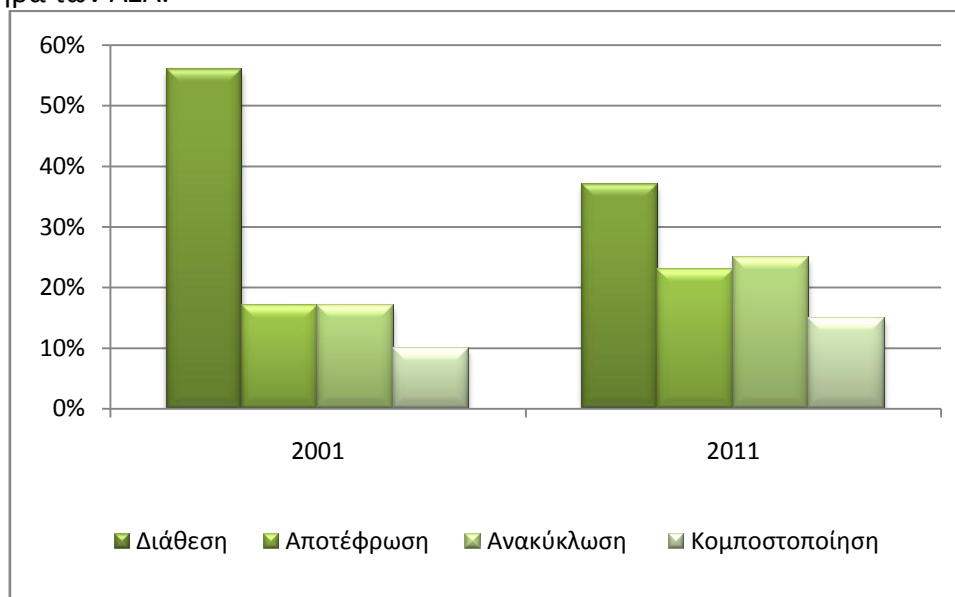
Σχήμα 1.2: Στρατηγικές διαχείρισης απορριμμάτων (Eurostat, 2011)

Στην πρώτη ομάδα ανήκουν τα κράτη όπου εφαρμόζεται συνδυασμός των δύο μεθόδων σε ποσοστό μεγαλύτερο του 25% για την κάθε μία. Στη δεύτερη περιλαμβάνονται τα κράτη όπου εφαρμόζονται υψηλά επίπεδα ανακύκλωσης (>25%) αλλά το ποσοστό απορριμμάτων προς αποτέφρωση είναι ακόμα χαμηλό και τέλος, η τρίτη ομάδα περιλαμβάνει τις χώρες όπου και οι δύο προαναφερθείσες στρατηγικές δεν εφαρμόζονται ακόμα ευρέως (σε ποσοστό <25% και για τις δύο).

Πιο πρόσφατα στοιχεία της Eurostat (News release – 33/2013) δείχνουν ότι το ποσοστό ανακύκλωσης και κομποστοποίησης ανήλθε το 2011 στο 40%, έναντι του 27% που είχε σημειωθεί για την EU27 το έτος 2001.

Πιο αναλυτικά δίνονται τα στοιχεία στο διάγραμμα 1.1, όπου διαφαίνεται η τάση εκτροπής του ρεύματος απορριμμάτων από τους χώρους υγειονομικής ταφής και η ενίσχυση στρατηγικών όπως η ανάκτηση υλικών και η αποτέφρωση απορριμμάτων, που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Όπως φαίνεται τελικά, η ανάκτηση υλικών και ενέργειας από τα απορρίμματα κερδίζει συνεχώς έδαφος, αφού δε δίνει μόνο λύση στο πρόβλημα της διαχείρισης από οικονομικής άποψης, αλλά είναι και φιλικότερη προς το περιβάλλον συγκριτικά με την απόθεσή τους σε χώρους ταφής, ιδίως λαμβάνοντας υπ' όψιν τον ανανεώσιμο χαρακτήρα των ΑΣΑ.



Διάγραμμα 1.1: Διαχείριση απορριμμάτων EU27 (Eurostat, 2013)

Άλλες μέθοδοι θερμικής επεξεργασίας, οι οποίες παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με την καύση, αρχίζουν να υιοθετούνται, ώστε να συμπληρώσουν τη βαθμίδα της ανακύκλωσης με ανάκτηση ενέργειας από τα υλικά που δε μπορούν να ανακτηθούν. Μία τέτοια μέθοδος είναι η αεριοποίηση πρωτογενών καυσίμων που προέρχονται από απορρίμματα, με σκοπό την παραγωγή αερίου σύνθεσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε διάφορες εφαρμογές.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη βιωσιμότητας μίας εγκατάστασης αεριοποίησης υπολειμματικού καυσίμου από απορρίμματα (RDF), η σύγκρισή της από περιβαλλοντικής πλευράς με τις εφαρμοζόμενες μεθόδους διαχείρισης απορριμμάτων στην Ελλάδα και η μελέτη της οικονομικής βιωσιμότητάς της, σύμφωνα με την εγχώρια και ευρωπαϊκή νομοθεσία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα απορρίμματα, βασισμένη στις αρχές της ανάλυσης κύκλου ζωής.

Κεφάλαιο 2^ο Τεχνολογία αεριοποίησης RDF

2.1. Γενικά

Με τον όρο υπολειμματικά καύσιμα RDF (Refuse Derived Fuels) νοούνται όλα τα ανακτηθέντα, από τη μηχανική επεξεργασία αστικών ή βιομηχανικών αποβλήτων, στερεά καύσιμα. Υπό την προϋπόθεση ότι τα παραπάνω καύσιμα πληρούν ορισμένες οικονομικές, τεχνολογικές και περιβαλλοντικές προδιαγραφές που ορίζονται από το πρότυπο CEN/TC 343, χαρακτηρίζονται ως “Στερεά Ανακτηθέντα Καύσιμα” SRF (Solid Recovered Fuels).

Η αεριοποίηση RDF είναι η θερμική διεργασία, σύμφωνα με την οποία, το παραχθέν RDF από ειδικές μονάδες προ-επεξεργασίας απορριμμάτων θερμαίνεται σε υποστοιχειομετρικές συνθήκες, με σκοπό την παραγωγή αερίου σύνθεσης (syngas).

Η διαδικασία συνεχίζεται με τον καθαρισμό του αερίου σύνθεσης που εξάγεται από τον αεριοποιητή σε διάταξη καθαρισμού, ανάλογη με τη χρήση για την οποία προορίζεται (καύση σε πυρσό, σε αεριοστρόβιλο, σε διάταξη ατμοπαραγωγής, σε παλινδρομική ΜΕΚ, σε συνδυασμένο κύκλο ή για αναβάθμιση σε συνθετικό φυσικό αέριο).

Κατάλοιπα της θερμικής διεργασίας εμφανίζονται μέσα στον αεριοποιητή (τέφρα πυθμένα) αλλά και στο αέριο που εξέρχεται από αυτόν (πίσσες, ιπτάμενη τέφρα, εξανθράκωμα, σωματίδια πληρωτικού υλικού, αναλόγως με το είδος του αεριοποιητή). Τα κατάλοιπα αυτά συγκρατούνται είτε από τη διάταξη καθαρισμού είτε συλλέγονται από τον πυθμένα του αεριοποιητή και αναλόγως με τις ιδιότητές τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Σε περίπτωση που δεν πληρούν τις προϋποθέσεις χρήσης, τίθενται υπό επεξεργασία ώστε να αδρανοποιηθούν και στη συνέχεια απορρίπτονται σε χώρους ταφής υπολειμμάτων (εκτενής αναφορά γίνεται για τα υπολείμματα σε επόμενο κεφάλαιο).

2.2. Παραγωγή RDF

Μετά τη συλλογή των απορριμμάτων από τους κάδους, αυτά μεταφέρονται σε μονάδες προ-επεξεργασίας. Η λειτουργία μιας τέτοιας μονάδας μπορεί είτε να περιορίζεται σε

απλή ανάκτηση υλικών (Material Recovery Facility – MRF) είτε να επεκτείνεται και σε βιολογική επεξεργασία των απορριμμάτων (Mechanical & Biological Treatment – MBT).

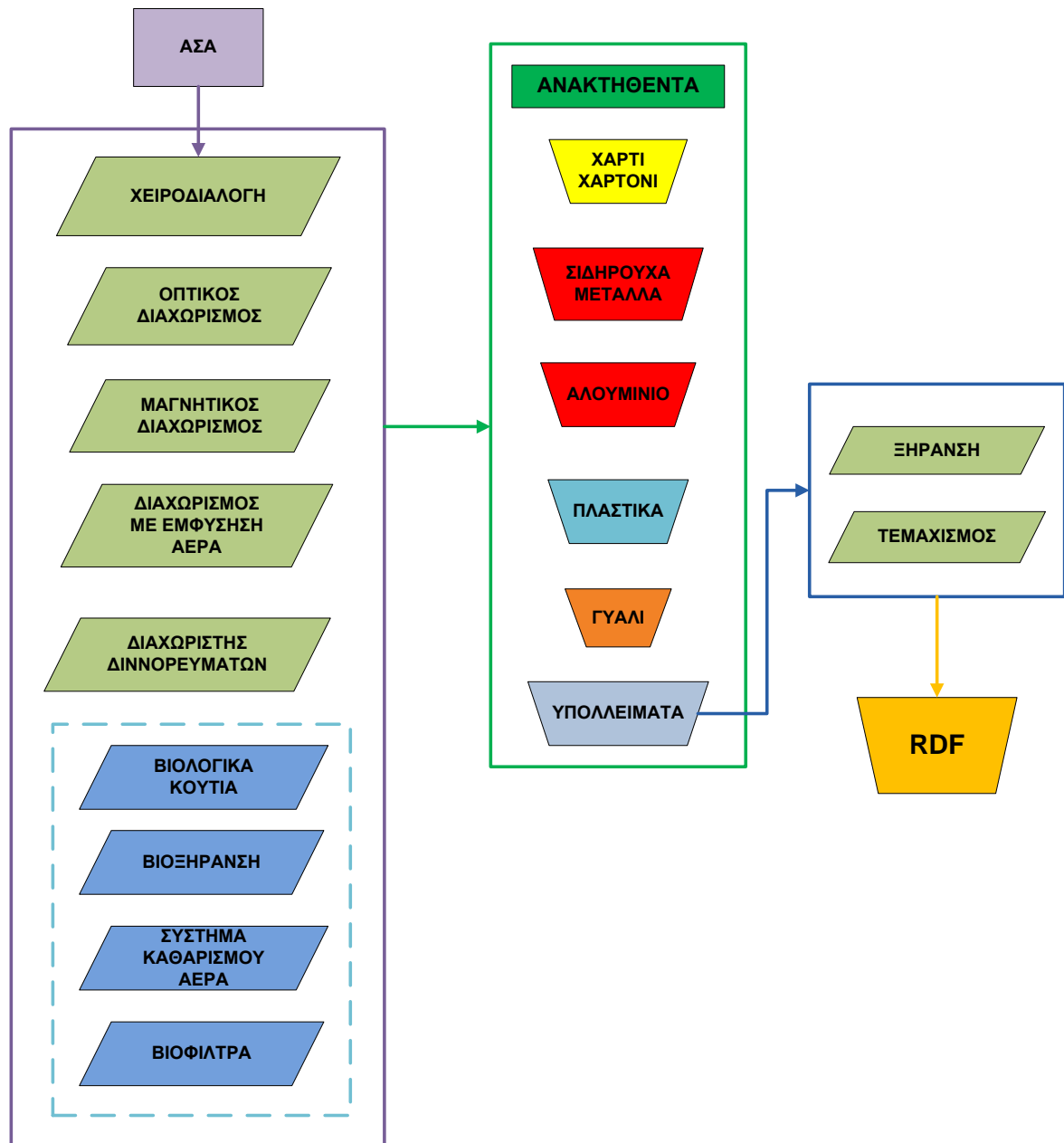
Το κοινό μηχανικό στάδιο τέτοιου είδους μονάδων μπορεί να περιλαμβάνει χειροδιαλογή, μαγνήτες, οπτικό διαχωριστή, διαχωριστή δινορρευμάτων, διαχωριστή με εμφύσηση αέρα, τύμπανα και άλλες διατάξεις.

Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι πώς, στην περίπτωση μονάδας MBT, το ρεύμα των ΑΣΑ διέρχεται και από στάδιο βιολογικής επεξεργασίας, στάδιο που περιλαμβάνει διατάξεις, όπως βιολογικά κουτιά, βιόφιλτρα, συστήματα καθαρισμού αέρα και βιολογικής ξήρανσης (Σ. Καρέλλας, *Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών*).

Ο εξοπλισμός της μονάδας (τεχνολογία μονάδας) ή η προτεραιότητα που μπορεί να δίνεται στην ανάκτηση κάποιου συγκεκριμένου υλικού (λόγω μεγαλύτερης ζήτησης από την αγορά ανακυκλωμένων ειδών) καθορίζει τις ποσότητες ανάκτησης των υλικών από το αρχικό ρεύμα που εισέρχεται στη μονάδα.

Μετά το πέρας της ανάκτησης (και της βιολογικής επεξεργασίας, όπου αυτή εφαρμόζεται) απομένει ένα ρεύμα μη διαχωρίσιμων υλικών με μία συγκεκριμένη σύσταση.

Το διάγραμμα ροής της μονάδας προ- επεξεργασίας δίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής μονάδας βιολογικής & μηχανικής επεξεργασίας απορριμμάτων
 Το ανακτηθέν υλικό που προκύπτει στο τέλος της διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω προέρχεται από μη επικίνδυνα απόβλητα και ανήκει, όπως αναφέρθηκε, στην κατηγορία των Refuse Derived Fuels (RDF). Είναι καύσιμο με αρκετά υψηλή θερμογόνο ικανότητα, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση αεριοποιείται, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εγκαταστάσεις αποτέφρωσης και συν-αποτέφρωσης.

2.3. Αεριοποίηση RDF

2.3.1. Βασικές αρχές αεριοποίησης RDF

Η αεριοποίηση υπολειμματικών καυσίμων από απορρίμματα είναι η μετατροπή των στερεών αυτών αποβλήτων σε καύσιμα αέρια ή αέρια σύνθεσης διαμέσου αντιδράσεων

μετασχηματισμού. Μπορεί να καθοριστεί επίσης ως μερική οξείδωση των αποβλήτων παρουσία οξειδωτικού μέσου, σε ποσότητα μικρότερη από τη στοιχειομετρική (U. Arena, 2012).

Ως μέσο οξείδωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο αέρας και το καθαρό οξυγόνο (αυτοθερμική αεριοποίηση) ή ο ατμός (αλλοθερμική αεριοποίηση).

Η διαδικασία έχει ως εξής: η πρώτη ύλη (πρωτεύον καύσιμο, στην προκειμένη περίπτωση RDF) τροφοδοτείται σε ένα λέβητα (για παράδειγμα σε ρευστοποιημένη κλίνη) και θερμαίνεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 600°-900°C (για την περίπτωση της αεριοποίησης με αέρα) και 1000°-1600°C (U. Arena, 2012).

Βασική διαφορά της αεριοποίησης με την καύση είναι πως το παραγόμενο από την αεριοποίηση αέριο, αλλιώς αέριο σύνθεσης, δεν είναι θερμό καυσαέριο άλλα θερμό καύσιμο αέριο, που αποτελεί φορέα ενέργειας που προήλθε από το πρωτεύον στερεό καύσιμο, σε πιο ευέλικτη μορφή.

Αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας είναι η μετατροπή του πρωτεύοντος καυσίμου σε syngas, το οποίο αποτελείται κυρίως από υδρογόνο (H₂), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), μεθάνιο (CH₄), νερό (H₂O), ανώτερους υδρογονάνθρακες (C_xH_y) και άζωτο (N₂ - αν μέσο αεριοποίησης είναι ο αέρας).

Ανάλογα με το μέσο οξείδωσης διαφέρει η τελική σύσταση του συνθετικού αερίου και συνεπώς η κατώτερη θερμογόνος ικανότητά του. Τυπικές τιμές δίνονται στον παρακάτω πίνακα 2.1.

Μέσο οξείδωσης	Κατώτερη θερμογόνος syngas [MJ/m ³]
Αέρας	4-7
Οξυγόνο	10-18
Ατμός	15-20

2.3.2. Χημικές αντιδράσεις αεριοποίησης

Κατά τη διαδικασία της αεριοποίησης λαμβάνει χώρα μεγάλος αριθμός ετερογενών και ομογενών αντιδράσεων. Οι πρώτες συμβαίνουν μεταξύ μορίων υλικών που τα μεν βρίσκονται σε στερεή και τα δε σε αέρια φάση. Οι δεύτερες συμβαίνουν μεταξύ υλικών που βρίσκονται σε αέρια φάση.

Οι κυριότερες από αυτές τις αντιδράσεις δίνονται στον πίνακα 2.2.

Ετερογενείς αντιδράσεις	
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	Οξείδωση του άνθρακα
$2C + O_2 \rightarrow 2CO$	Μερική οξείδωση του άνθρακα

$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	Ετερογενής αντίδραση νερού – αερίου
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	Αντίδραση Boudouard
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	Υδρογόνο – αεριοποίηση (Hydrogasification)
Ομογενείς αντιδράσεις	
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	Οξείδωση του μονοξειδίου του άνθρακα
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	Οξείδωση του υδρογόνου
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	Οξείδωση του μεθανίου
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	Αντίδραση μετατόπισης (water-gas shift reaction)
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	Αντίδραση αναμόρφωσης (methane formation)

Από τις αντιδράσεις αυτές είναι δυνατό να διακριθούν τρεις ανεξάρτητες μεταξύ τους: η αντίδραση νερού-αερίου, η αντίδραση Boudouard και αντίδραση αεριοποίησης του υδρογόνου. Στα τμήματα του αεριοποιητή όπου δεν υπάρχει πλέον στερεός άνθρακας, αυτές εκφυλίζονται σε δύο τελικά, την αντίδραση αναμόρφωσης (μεθανοποίησης) και την αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου (U. Arena, 2012). Όπως θα αναφερθεί ξανά στη συνέχεια, αυτές οι δύο αντιδράσεις χρησιμοποιήθηκαν και για την ανάπτυξη του μοντέλου αεριοποίησης της παρούσας εργασίας.

2.3.3. Τεχνολογικά στοιχεία αεριοποιητών

Η διαδικασία της αεριοποίησης πραγματοποιείται στους αεριοποιητές, οι οποίοι χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με το είδος της κλίνης, το σημεία εισόδου του αέρα και τα λοιπά. Επιγραμματικά αναφέρονται παρακάτω τα εξής είδη (A. Φάκωνα, 2010):

- Αεριοποιητές σταθερής κλίνης, ανερχόμενης ή κατερχόμενης ροής
- Αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης, αναβράζουσας ή ανακυκλοφορίας
- Αντιδραστήρες ενσωματωμένης ροής
- Δίδυμοι αντιδραστήρες ρευστοποιημένης κλίνης (αεριοποιητής και καυστήρας ρευστοποιημένης κλίνης).

Επιπλέον, πρέπει να τονιστεί ότι η αεριοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πιέσεις από ατμοσφαιρική μέχρι 20 bar.

Η διαφορά ανάμεσα στα δύο συστήματα (υψηλής και ατμοσφαιρικής πίεσης) έγκειται καταρχάς στο ότι για την πρώτη απαιτείται ειδική και μεγαλύτερου κόστους κατασκευή του δοχείου αεριοποίησης ώστε να συνδυάζονται οι υψηλές πιέσεις με τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την επεξεργασία. Βέβαια στη συνέχεια το παραγόμενο αέριο μπορεί να οδηγηθεί κατευθείαν σε αεριοστρόβιλο, χωρίς να απαιτείται συμπίεση, σε αντίθεση με την αεριοποίηση σε ατμοσφαιρική πίεση, όπου, εκτός του ότι απαιτείται συμπιεστής, δημιουργείται επιπλέον κόστος λόγω της απαίτησης υψηλής καθαρότητας του συνθετικού αερίου για να μην καταστρέψει το συμπιεστή.

Παρόλα αυτά πρέπει να παρατηρηθεί ότι η σύνθεση του παραγόμενου αερίου, καθώς και η θερμογόνος ικανότητά του δε διαφέρουν σημαντικά, είτε το σύστημα λειτουργεί υπό πίεση είτε λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση (A. V. Bridgwater, 1995).

Η σχετική διαδοχή των τμημάτων αξιοποίησης και καθαρισμού του παραγόμενου αερίου εξαρτάται από δύο πιθανές διαμορφώσεις του συστήματος αεριοποίησης οι οποίες μπορούν να υιοθετηθούν: τη διαμόρφωση *ισχύος* και τη διαμόρφωση *θερμότητας*. Στην πρώτη περίπτωση, το αέριο που εξέρχεται από τον αεριοποιητή καθαρίζεται και στη συνέχεια καίγεται ενώ στη δεύτερη καίγεται απευθείας σε καυστήρα και τα καυσαέρια από αυτή τη διαδικασία διέρχονται από τη διάταξη καθαρισμού (U. Arena, 2012).

Στο σύστημα με διαμόρφωση ισχύος, η διάταξη καθαρισμού μεσολαβεί ώστε τα χαρακτηριστικά του παραγόμενου αερίου να συναντήσουν τις απαιτήσεις της συσκευής τελικής χρήσης. Αντίθετα, στο σύστημα με διαμόρφωση θερμότητας, όπου ο καυστήρας έχει χαμηλές απαιτήσεις καθαριότητας για το καύσιμο, υπάρχει πιθανή προ-επεξεργασία του αερίου για αφαίρεση ρυπαντών όπως το υδροχλώριο, αλλά το κύριο σύστημα αντιρρύπανσης βρίσκεται μετά τον καυστήρα και επεξεργάζεται τα καυσαέρια.

Σε διαμορφώσεις τύπου θερμότητας, η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως σταδιακή καύση και σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι δυνατόν να γίνει διάκριση μεταξύ του σταδίου της αεριοποίησης από αυτό της καύσης. Από την άλλη πλευρά, στη διαμόρφωση ισχύος, υπάρχει σαφής διάκριση του σταδίου παραγωγής του αερίου από εκείνη του καθαρισμού του και τελικά αξιοποιούνται καλύτερα οι δυνατότητες της μονάδας (U. Arena, 2012).

Παρόλο που στην πρώτη περίπτωση μπορούν να επιτευχθούν υψηλότεροι βαθμοί απόδοσης της συνολικής εγκατάστασης, λόγω του ότι το καθαρό αέριο σύνθεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μηχανές με υψηλότερο βαθμό απόδοσης, εντούτοις η δεύτερη διαμόρφωση απαντάται πιο συχνά κατά τον U. Arena, 2012, και μάλιστα σε συνδυασμό με ατμοπαραγωγή. Η διαμόρφωση αυτή ενεργειακής αξιοποίησης απορριμμάτων παρουσιάζει πλεονεκτήματα κυρίως συγκριτικά με τη μέθοδο της καύσης, η οποία είναι μέχρι στιγμής ευρύτερα χρησιμοποιούμενη.

Τέλος, σημειώνεται πως η σύσταση καυσίμων όπως το RDF και κυρίως η περιεκτικότητά τους σε τέφρα και η θερμογόνος ικανότητά τους υποδεικνύουν τη διερεύνηση της περίπτωσης της συν-αεριοποίησής τους με άλλα καύσιμα. Αυτό σημαίνει ότι ο αεριοποιητής τροφοδοτείται με μείγμα καυσίμων, ο συνδυασμός των οποίων αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της απόδοσης της διαδικασίας όσον αφορά στις απώλειες άνθρακα σε πίσσες και εξανθράκωμα ενώ αυξάνει και το ενεργειακό περιεχόμενο του παραγόμενου αερίου (Pinto et al., 2007, Pinto et al., 2008, Mastellone et al., 2010b).

2.3.4. Πλεονεκτήματα αεριοποίησης

Παρόλο που αποτελεί ακόμα μία τεχνολογία που εφαρμόζεται σε μικρή κλίμακα, η αεριοποίηση παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με την καύση:

- Σε αντίθεση με την καύση, το προϊόν της αεριοποίησης αποτελεί δευτερεύον καύσιμο, το οποίο είναι πιο ευέλικτο από το πρωτεύον καύσιμο από το οποίο προήλθε και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ευρύτερο πεδίο εφαρμογών, όπως για παράδειγμα σε MEK (για χρήσεις syngas βλέπε επόμενη παράγραφο).
- Οι μονάδες αεριοποίησης μπορούν να επιτύχουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης, αν και προς το παρόν οι αισιόδοξες εκτιμήσεις ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης 35% δεν έχουν πραγματοποιηθεί.

- Το παράγωγο συνθετικό αέριο έχει μικρότερο όγκο από τα καυσαέρια που είναι το αντίστοιχο προϊόν καύσης, πράγμα που καθιστά τον καθαρισμό του προτιμότερο από αυτόν των καυσαερίων από την άποψη των εγκαταστάσεων καθαρισμού
- Τα στερεά κατάλοιπα της διεργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω σε εφαρμογές όπως η οδοποιία, αφού υποστούν ειδική επεξεργασία πριν την τελική χρήση τους, ώστε να περιοριστεί η πιθανή αρνητική επίδρασή τους στο περιβάλλον.

Στα μειονεκτήματά της συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος της εγκατάστασης και κατά συνέπεια το ότι δεν είναι ακόμα ευρέως εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία.

2.3.5. Αέριο σύνθεσης

Τα βασικότερα από τα συστατικά του αερίου σύνθεσης είναι το υδρογόνο και το μονοξείδιο του άνθρακα, δεδομένου ότι αυτά το καθιστούν καύσιμο αέριο και καθορίζουν τη θερμογόνο ικανότητα του (το μεθάνιο δεν είναι τόσο σημαντικό δεδομένου ότι η συγκέντρωσή του στο αέριο είναι συνήθως αρκετά μικρή).

Η αναλογία των αερίων αυτών στο μίγμα εξαρτάται από τη συνολική διαδικασία της αεριοποίησης (δηλαδή από το οξειδωτικό μέσο που θα χρησιμοποιηθεί και από τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται) και από τη σύσταση της στερεής ύλης τροφοδοσίας.

Οι χρήσεις του αερίου σύνθεσης μπορούν να είναι πολλαπλές, αναλόγως με το πόσο καθαρό εξέρχεται από την εγκατάσταση. Έτσι, μπορεί να διατεθεί:

- Για καύση σε λέβητα και παραγωγή ατμού (απαιτείται μέτριος καθαρισμός και επιτυγχάνεται ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της τάξης του 30%).
- Για καύση σε μηχανή εσωτερική καύσης και ηλεκτροπαραγωγή μέσω γεννήτριας (απαιτείται πολύ καλός καθαρισμός και επιτυγχάνεται ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της τάξης του 35-40%). Αυτή είναι και η χρήση που εξετάζεται εκτενώς στην παρούσα εργασία.
- Για καύση σε αεριοστρόβιλο (απαιτείται πολύ καλός καθαρισμός και επιτυγχάνεται ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης της τάξης του 40%).
- Στην τσιμεντοβιομηχανία για απευθείας καύση σε εστία (οπότε μειώνονται οι απαιτήσεις σε καθαρισμό).
- Για σύνθεση χημικών ουσιών, όπως μεθανόλη, αμμωνία και άλλα (όπου απαιτείται να έχει θερμογόνο ικανότητα πάνω από $15[\text{MJ}/\text{Nm}^3]$) καθώς και για αναβάθμισή του σε συνθετικό φυσικό αέριο (SNG).

2.3.6. Μονάδες αεριοποίησης σε λειτουργία στην Ευρώπη

Οι μονάδες αεριοποίησης που αναφέρονται παρακάτω είναι εμπορικής κλίμακας μονάδες που βρίσκονται στην Ευρώπη.

Σύμφωνα με στοιχεία που αντλήθηκαν από την τελική αναφορά της διεύθυνσης περιβάλλοντος της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το καύσιμο RDF (EC, 2003).

Ο πίνακας 2.3 αναφέρεται αποκλειστικά σε μονάδες που επεξεργάζονται RDF.

Πίνακας 2.3: Μονάδες αεριοποίησης RDF στην Ευρώπη (EC, 2003)

Μονάδα/ Περιοχή	Κατασκευαστής	Ισχύς	Λεπτομέρειες
Lahti, Φινλανδία	Foster Wheeler	50 MW	Συν-αεριοποίηση με άλλα βιομηχανικά απόβλητα
Varkaus, Φινλανδία	Foster Wheeler	40 MW	Ανάκτηση αλουμινίου
SVZ Schwarze Pumpe, Γερμανία	Lurgi	50MW	Επιπλέον παραγωγή μεθανόλης
Aalen, Γερμανία	PKA	-	25kTpa ΑΣΑ
Rotterdam, Ολλανδία	Texaco	-	40kTpa πλαστικών για παραγωγή χημικών
Greve-in-Chianti, Ιταλία	TPS	-	Βιομάζα

Όπως έχει αναφερθεί, η τεχνολογία της αεριοποίησης έχει εφαρμοστεί μέχρι στιγμής κυρίως με καύσιμο τη βιομάζα. Στον πίνακα 2.4 δίνονται μονάδες αεριοποίησης βιομάζας οι οποίες βρίσκονται αυτή τη στιγμή σε λειτουργία στην Ευρώπη.

Πίνακας 2.4: Μονάδες αεριοποίησης βιομάζας στην Ευρώπη

Μονάδα/ Περιοχή	Κατασκευαστής	Ισχύς	Πηγή/ Λεπτομέρειες
Newry, Ιρλανδία	Zeropoint	3.6 MW _e	http://www.zeropointcleantech.com
Schwarze Pumpe, Γερμανία	Zeropoint	2 MW _e	The Energy Industry Times, 2012
Varnamo, Σουηδία	Sydkraft AB/ Foster Wheeler	6 MW _e + 9 MW _{th}	Krister Ståhl et al., 1998
Ilomantsin/ Φινλανδία	Foster Wheeler	6,4 MW _{th}	EC AIR3-CT-94-2284/τηλεθέρμανση
Harboore/ Δανία	-	1,2 MW _e + 3,5 MW _{th}	EC/ B & W Volund, 2010

Όλες οι παραπάνω μονάδες χρησιμοποιούν σαν καύσιμο προς αεριοποίηση το ξύλο και τα πριονίδια (wood chips). Οι δύο πρώτες του πίνακα ξεκίνησαν τη λειτουργία τους το 2012 ενώ οι υπόλοιπες 3 τη δεκαετία του '90 και συνεχίζουν έως σήμερα.

Στην περίπτωση της εγκατάστασης στη Δανία, η λειτουργία της ξεκίνησε το 1996 για ηλεκτροπαραγωγή, ενώ το 2000 αναβαθμίστηκε σε μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ), ενώ αρχικά είχε σχεδιαστεί για τηλεθέρμανση.

Η τεχνολογία της αεριοποίησης έχει εξελιχθεί τόσο, ώστε να εγκαινιάζεται το 2013 η μεγαλύτερη μονάδα αεριοποίησης βιομάζας στον κόσμο.

Πρόκειται για τη μονάδα στην πόλη Vaasa της Φινλανδίας, κατασκευασμένη από τη φινλανδική εταιρία Metso, ισχύος 140 MW.

Η βασική λειτουργία της είναι η συν-αποτέφρωση του αερίου που παράγεται από την αεριοποίηση ξυλώδους βιομάζας (κυρίως δασικών υπολειμμάτων) με άνθρακα.

Σκοπός της κατασκευής της είναι καταρχάς η ανάγκη για χρήση εγχώριων καυσίμων για παραγωγή ενέργειας. Παράλληλα μπορούν να μειωθούν η χρήση αλλά και οι συνολικές

εκπομπές του άνθρακα και να αυξηθεί το μερίδιο της βιομάζας στην αγορά της ενέργειας (<http://www.power-technology.com>, <http://www.metso.com>).

Με μία τέτοιου είδους μονάδα ενισχύεται ο τομέας αξιοποίησης βιομάζας, συμβάλλοντας στη μείωση της χρήσης συμβατικών καύσιμων. Συγκεκριμένα, η εταιρία αναμένει να εξοικονομήσει 25-40% της ποσότητας άνθρακα που χρησιμοποιεί στην παρούσα φάση για ηλεκτροπαραγωγή.

2.4. Εισαγωγή στη Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis – LCA) για τη διαδικασία της αεριοποίησης RDF

2.4.1. Γενικά

Η ανάλυση κύκλου ζωής αποτελεί τη μέθοδο σύμφωνα με την οποία εξετάζεται η επίδραση στο περιβάλλον προϊόντων, τεχνολογιών ή υπηρεσιών σε όλη τη διάρκεια της ζωής τους, ή όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία “from-cradle-to-grave”.

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω για την εμπορική διαθεσιμότητα της τεχνολογίας αεριοποίησης, οι εφαρμογές της στον τομέα της διαχείρισης απορριμμάτων που μελετάται εδώ βρίσκονται κατά κύριο λόγο ακόμα σε πειραματικό – πιλοτικό στάδιο. Γι’ αυτούς τους λόγους, δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια ολοκληρωμένη μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής αεριοποίησης RDF μέχρι στιγμής.

Στο παρόν υποκεφάλαιο γίνεται μία ανασκόπηση της πιο αντιπροσωπευτικής βιβλιογραφίας που μελετήθηκε με θέμα την ανάλυση κύκλου ζωής μεθόδων διαχείρισης αστικών σύμμεικτων απορριμμάτων, καθώς και με θέμα την ανάλυση κύκλου ζωής αεριοποίησης βιομάζας, όπου η τεχνολογία της αεριοποίησης είναι διαδεδομένη σε μεγαλύτερο βαθμό.

2.4.2. Περιγραφή διαδικασίας κατά ISO 14040

Η διαδικασία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής χωρίζεται σε τέσσερα στάδια (ISO 14040, 2006):

- Τον καθορισμό του σκοπού για τον οποίον γίνεται
- Την καταγραφή των δεδομένων που διατίθενται/υπάρχουν
- Την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιδράσεων
- Την ερμηνεία των αποτελεσμάτων

με απώτερο στόχο τη βελτίωση των τελικών προϊόντων ή υπηρεσιών, όσον αφορά την περιβαλλοντική τους συμπεριφορά.

Η ανασκόπηση πραγματοποιείται εδώ βάσει των κυριότερων στοιχείων της διαδικασίας Ανάλυσης Κύκλου Ζωής τα οποία παραθέτουν οι μελετητές.

2.4.3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής μεθόδων διαχείρισης απορριμμάτων

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί ένα δημοφιλές εργαλείο, συχνά χρησιμοποιούμενο για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων (J. Cleary, 2009).

Στη συνέχεια ακολουθεί συγκριτική ανάλυση 10 μελετών (δημοσιευμένων στο χρονικό διάστημα 2004-2013) σχετικών με μεθόδους διαχείρισης και αξιοποίησης αστικών απορριμμάτων.

Οι κύριες παράμετροι σύγκρισης των μελετών είναι η κατηγορία της μεθόδου αξιοποίησης των απορριμμάτων (προ-επεξεργασία και θερμική αξιοποίηση), η λειτουργική μονάδα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και οι κατηγορίες της επίδρασης στο περιβάλλον, εκφρασμένη στους αντίστοιχους δείκτες.

Παράλληλα γίνεται αναφορά σχετικά με την περιοχή που λαμβάνει χώρα η μελέτη, το σκοπό για τον οποίο πραγματοποιείται, τα όρια του συστήματος, τα οικονομικά στοιχεία της εκάστοτε εγκατάστασης, τη χρήση LCA λογισμικών κ.α.

Τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν θα αποτελέσουν το θεωρητικό υπόβαθρο για την παρούσα εργασία.

Περιοχή και μέγεθος εγκατάστασης

Η πλειονότητα των μελετών δεν αναφέρεται στην ποσότητα αποβλήτων που θα διαχειρίζεται η εκάστοτε εγκατάσταση ή την εγκατεστημένη ισχύ (αν πρόκειται για εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής). Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα μεγέθη των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται ανηγμένα στη λειτουργική μονάδα.

Από αυτές που απομένουν, σε τρεις αναφέρεται ότι οι εγκαταστάσεις είναι μεγάλης κλίμακας (J. D. Murphy, E. McKeogh, 2004 , W. Zhao et al., 2008 , R. Turconi et al., 2011) ενώ σε δύο ότι είναι τοπικής κλίμακας (μία μεγέθους δήμου – D. Chen, T. H. Christensen, 2010 και μία μεγέθους πόλης υπαίθρου – G. De Feo, C. Malvano, 2009). Η S. Tunesi, 2011 αναφέρει 4 εναλλακτικά σενάρια θερμικής επεξεργασίας, με δυνατότητα επεξεργασίας 30.000 - 200.000 τόνων SRF ετησίως.

Επιπροσθέτως, όπου δεν είναι καθορισμένη η περιοχή χρησιμοποιούνται σαν συστάσεις ΑΣΑ οι μέσες συστάσεις κάθε χώρας.

Τέλος, οι περιοχές των μελετών βρίσκονται κυρίως στην Ευρώπη και μερικές στην Ασία (Κίνα και κεντρική Ρωσία).

Στον πίνακα 2.5 δίνονται συγκεντρωμένες οι πηγές, η περιοχή μελέτης και η κλίμακα κάθε εγκατάστασης (όπου είναι διαθέσιμη).

Πίνακας 2.5: Περιοχές και μεγέθη εγκατάστασης των αναλύσεων κύκλου ζωής που εξετάζονται

Πηγή	Περιοχή	Μέγεθος εγκατάστασης
H. H. Khoo (2009)	Σιγκαπούρη	δ. α.
J. D. Murphy, E. McKeogh (2004)	Ιρλανδία	Μεγάλη
D. Chen, T. H. Christensen (2010)	Κίνα	Τοπική (δήμου)
G. De Feo, C. Malvano (2009)	Campania, Νότια Ιταλία	Τοπική (πόλης υπαίθρου)
W. Zhao et al. (2008)	Tianjin, Κίνα	Μεγάλη
R. Turconi et al. (2011)	Aarhus, Δανία & Milan, Ιταλία	Μεγάλες
S. Tunesi (2011)	Ηνωμένο Βασίλειο	Μεσαία

J. Kaazke et al. (2013)	Khanty-Mansiysk and Surgut, Ρωσία	δ. α.
M. D. Bovea et al. (2010)	Castellón de la Plana, Ισπανία	δ. α.
E. Gentil et al. (2009)	Ευρωπαϊκό επίπεδο: Δανία, Γερμανία, Γαλλία, Πολωνία, Ελλάδα, Ηνωμένο Βασίλειο	δ. α.

Στόχοι των μελετών

Η πρώτη φάση στην καθορισμένη διαδικασία της ΑΚΖ, δηλαδή ο στόχος, αναφέρεται σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες μελέτες. Το κοινό σημείο όλων είναι η σύγκριση της περιβαλλοντικής επίδρασης, είτε διαφόρων εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης μεταξύ τους (αναζητώντας μία προς εφαρμογή για να λύσει το πρόβλημα των απορριμμάτων), είτε μίας ή περισσότερων με την εκάστοτε υπάρχουσα μέθοδο διαχείρισης.

Σε μερικές ο σκοπός διαφέρει κατά σημεία, για παράδειγμα οι [R. Turconi et al., 2011](#) έχουν ως σκοπό τον καθορισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος ενδιάμεσα στον ευρωπαϊκό Βορρά και Νότο, συγκρίνοντας 2 εγκαταστάσεις. Στη μελέτη των [G. De Feo, C. Malvano, 2009](#), γίνεται σύγκριση 12 σεναρίων διαχείρισης σε 11 κατηγορίες δεικτών επίδρασης ώστε να ευρεθεί το φιλικότερο προς το περιβάλλον σενάριο για κάθε κατηγορία.

Τέλος, οι [E. Gentil et al., 2009](#), έχουν ως σκοπό να ποσοτικοποιήσουν τις επιδράσεις και τα οφέλη από την πρακτική διαχείρισης αστικών αποβλήτων που χρησιμοποιεί κάθε μία από τις 6 εξεταζόμενες ευρωπαϊκές χώρες.

Σύγκριση των συστημάτων διαχείρισης ΑΣΑ

Όλες οι μελέτες είναι συγκριτικές αναλύσεις κύκλου ζωής, οι οποίες εκτιμούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ή/και τη λειτουργία ποικίλων συστημάτων διαχείρισης. Οι περισσότερες από αυτές συγκρίνουν διάφορες μεθόδους, κυρίως την απόθεση σε ΧΥΤΑ (landfilling) που τις περισσότερες φορές αποτελεί την ήδη εφαρμοζόμενη μέθοδο, με ανακύκλωση, θερμική επεξεργασία (είτε αποτέφρωση, είτε αεριοποίηση, είτε πυρόλυση) και σε μερικές περιπτώσεις με βιολογική επεξεργασία (κομποστοποίηση ή αναερόβια χώνευση).

Λειτουργική μονάδα

Η χρήση της λειτουργικής μονάδας είναι απαραίτητη για την κατανόηση μίας μελέτης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, ώστε τα αποτελέσματα να είναι εκφρασμένα σε μία κοινή βάση, προκειμένου να δίνεται η δυνατότητα σύγκρισης των διαφόρων σεναρίων.

Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται από το μελετητή μαζική λειτουργική μονάδα. Πιο συγκεκριμένα, στις μελέτες των [J. D. Murphy, E. McKeogh, 2004](#), [R. Turconi et al., 2011](#), [M. D. Bovea et al., 2010](#) και [E. Gentil et al. \(2009\)](#) αναφέρεται η λειτουργική μονάδα του 1 τόνου ΑΣΑ, ενώ σε αυτήν των [D. Chen, T. H. Christensen, 2010](#), αναφέρεται η μονάδα ΡΕ/τόνο_{ΑΣΑ} (person equivalent – κατά κεφαλήν).

Οι W. Zhao et al., 2008, S. Tunesi, 2011 και J. Kaazke et al., 2013 λαμβάνουν ως λειτουργική μονάδα τη συνολική ποσότητα ΑΣΑ που παράχθηκε στην εκάστοτε περιοχή σε ένα χρόνο.

Τέλος, ο H. H. Khoo (2009) λαμβάνει στη μελέτη του ως λειτουργική μονάδα τον 1 τόνο παραγόμενου αερίου από θερμική επεξεργασία.

Όρια συστήματος

Τα όρια συστήματος αποτελούν σημαντικότατο κομμάτι μίας μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής και ο καθορισμός τους αποτελεί μείζον ζήτημα. Αυτό γίνεται κατανοητό αν λάβει κανείς υπ' όψιν ότι με διαφορετικά όρια συστήματος μεταβάλλεται η συνολική επίδρασή του στο περιβάλλον, συνεπώς αλλάζει η ποιότητα των συμπερασμάτων.

Συνήθως τα όρια περιλαμβάνουν την συλλογή των απορριμμάτων από τους κάδους, τη διαδικασία θερμικής αξιοποίησης (Waste to Energy), τον τομέα της μεταφοράς προς και από μονάδα μηχανικής – βιολογικής επεξεργασίας (αν υπάρχει), της μεταφοράς προς τη μονάδα θερμικής επεξεργασίας και της μεταφοράς των υπολειμμάτων από αυτήν, καθώς και την τελική διάθεση των υπολειμμάτων.

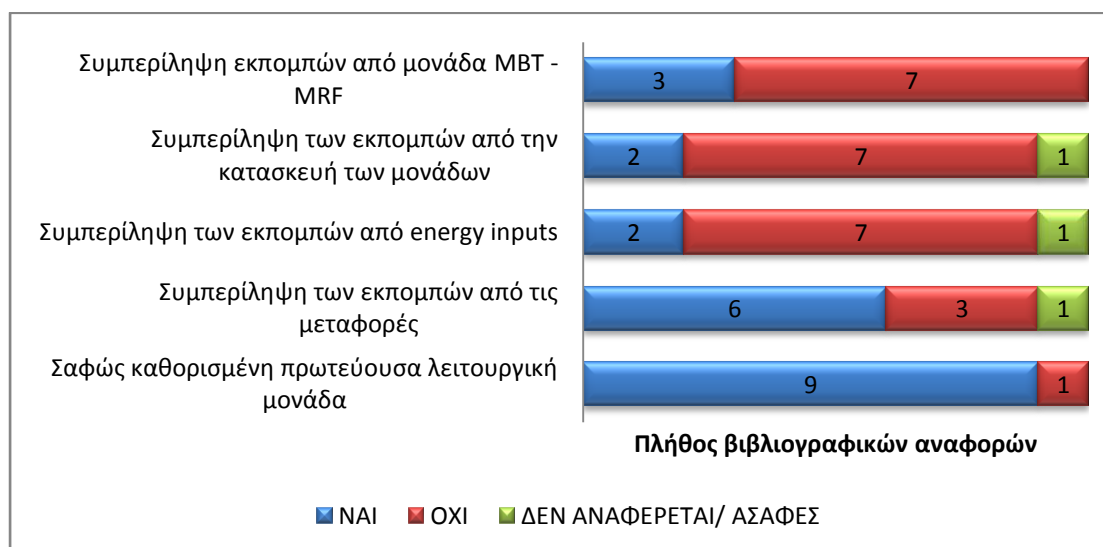
Ειδικά για την περίπτωση σύγκρισης μεθόδων, είναι πολύ σημαντικό αυτή η σύγκριση να γίνει στα ίδια πλαίσια, ώστε αν στη μία περίπτωση δε ληφθεί για παράδειγμα η επίδραση από τη φάση της συλλογής να μη ληφθεί ούτε στην άλλη.

Τα όρια συστήματος για την κάθε βιβλιογραφική αναφορά δίνονται στον πίνακα 2.6. Στο συνοπτικό διάγραμμα 2.1 γίνεται αναφορά των κυριότερων στοιχείων που περιλαμβάνονται στις μελέτες που εξετάζονται εδώ.

Πίνακας 2.6: Όρια συστήματος

Πηγή	Όρια συστήματος
H. H. Khoo (2009)	Μονάδα θερμικής επεξεργασίας, μεταφορά και διάθεση των στερεών υπολειμμάτων σε ΧΥΤΑ
J. D. Murphy, E. McKeogh (2004)	Μονάδα θερμικής επεξεργασίας και χρήση παραγόμενου αερίου
D. Chen, T. H. Christensen (2010)	Είσοδος: απορρίμματα στη μονάδα θερμικής επεξεργασίας Έξοδος: υπτάμενη τέφρα και τέφρα πυθμένα χωρίς επεξεργασία
G. De Feo, C. Malvano (2009)	Συλλογή, φάση μεταφοράς (όλες οι μεταφορές), φάση ανακύκλωσης (όλες οι ενδιάμεσες φάσεις επεξεργασίας), μονάδα θερμικής επεξεργασίας (από κατασκευή μέχρι αυτή καθαυτή τη διαδικασία) και τελική διάθεση (από την κατασκευή και τη χρήση της περιοχής μέχρι τα στραγγίσματα και την παραγωγή ενέργειας από το βιοαέριο)
W. Zhao et al. (2008)	Συλλογή, μεταφορά στη μονάδα θερμικής επεξεργασίας, τελική διάθεση, υποδομή των εγκαταστάσεων (υλικά), ενέργεια βοηθητικών συστημάτων
R. Turconi et al. (2011)	Είσοδος: μονάδα θερμικής επεξεργασίας Έξοδος: τελική διάθεση όλων των στερεών υπολειμμάτων
S. Tunesi (2011)	Απόθεση στα οχήματα, μεταφορά σε μονάδα μηχανικής ανακύκλωσης, χειροδιαλογή, μεταφορά στη μονάδα θερμικής επεξεργασίας, τελική απόθεση (σχηματικά)

J. Kaazke et al. (2013)	Είσοδος: απόθεση απορριμμάτων στους κάδους Συλλογή, μεταφορά και θερμική επεξεργασία Έξοδος: τελική διάθεση
M. D. Bovea et al. (2010)	Συλλογή, μεταφορά σε μονάδα μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας, μεταφορά σε μονάδα ανακύκλωσης, μεταφορά στη μονάδα θερμικής επεξεργασίας, μεταφορά στην περιοχή τελικής απόθεσης για όλες τις παραπάνω διαδικασίες και τελική απόθεση (σχηματικά)
E. Gentil et al. (2009)	Είσοδος: συλλογή από τον εκάστοτε οργανισμό διαχείρισης απορριμμάτων Έξοδος: χώρος τελικής απόθεσης για κάθε κράτος - μέλος



Διάγραμμα 2.1: Συνοπτικό διάγραμμα αναφορών στη βιβλιογραφία ανά κατηγορία

Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιδράσεων

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει ποσοτικοποίηση των επιδράσεων στα διάφορα σενάρια, πράγμα που απαιτεί τον διαχωρισμό και την ομαδοποίηση των φορτίων που εξακριβώθηκαν στη φάση της συλλογής δεδομένων (Life Cycle Inventory) στις διάφορες κατηγορίες δεικτών.

Οι πιο κοινές κατηγορίες επιδράσεων είναι αυτή του φαινομένου του θερμοκηπίου (Global Warming Potential), αυτή της οξύνισης (Acidification Potential), αυτή του ευτροφισμού των υδάτων (Nutrient Enrichment) και αυτή της κατανάλωσης ενεργειακών πηγών.

Μία ακόμη πολύ κοινή κατηγορία ανάμεσα στις μελέτες που εξετάζονται εδώ είναι αυτή της φωτοχημικής δημιουργίας οξειδωτικών παραγόντων (Photochemical Oxidant Formation), ενώ δύο μελέτες έχουν λάβει υπ' όψιν τους έως και 11 κατηγορίες επίδρασης (D. Chen, T. H. Christensen, 2010 και G. De Feo, C. Malvano, 2009).

Οι W. Zhao et al., 2008, έχουν θεωρήσει μόνο τον δείκτη GWP, δεδομένου ότι αποτελεί και τον πιο συχνά μελετώμενο σε σχέση με τους υπόλοιπους, κυρίως λόγω της ραγδαίας κλιματικής αλλαγής (το πρωτόκολλο του Κyoto θέτει και τα διεθνή όρια εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου).

Πιο αναλυτικά, παρατίθενται συγκριτικά τα αποτελέσματα των αναφορών:

- Αρχικά για τον δείκτη GWP, τα αποτελέσματα θα συγκριθούν και *ποιοτικά* και *ποσοτικά* (όσο αυτό είναι δυνατόν).

Ξεκινώντας με την **ποιοτική** σύγκριση, ο δείκτης αναφέρεται σε όλες τις μελέτες (πολλές περιορίζονται μόνο σε αυτόν) και αποδεικνύεται σε πρώτη φάση, πως οι μέθοδοι που περιλαμβάνουν μηχανική ανακύκλωση πλαστικού, χαρτιού και μετάλλων, διαχωρισμό ποσοστού του οργανικού κλάσματος από το ρεύμα των ΑΣΑ και γενικώς κάποιου είδους μηχανική ή/και βιολογική επεξεργασία, έχουν χαμηλότερες εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα από όταν, για την ίδια μέθοδο διαχείρισης, τα απορρίμματα δεν υφίστανται κάποια προ-επεξεργασία. Συγκεκριμένα, οι [W. Zhao et al., 2008](#), [J. Kaazke et al., 2013](#) και [M. D. Bovea et al., 2010](#) μελετούν αρκετά ξεχωριστά σενάρια σχετικά με την ανακύκλωση, ενώ οι [G. De Feo, C. Malvano, 2009](#), εξετάζουν το δείκτη, αναλογικά με το ποσοστό ανακυκλώσιμων υλικών που μπορούν να συλλεχθούν σε μία μονάδα ανάκτησης υλικών με τελικό προϊόν το RDF το οποίο στη συνέχεια αποτεφρώνεται. Σαν αποτέλεσμα φαίνεται ότι το σενάριο όπου γίνεται η μεγαλύτερη ανάκτηση υλικών είναι και αυτό με τη μικρότερη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ο [H. H. Khoo, 2009](#), λαμβάνει υπ' όψιν στη μελέτη του μεγαλύτερο εύρος ορίων συστήματος, δίνοντας τις εκπομπές από τις διαδικασίες απόθεσης, μεταφορών, επεξεργασίας αλλά και ενέργειας που απαιτείται για την εκκίνηση της εγκατάστασης.

Μία άλλη περίπτωση που εξετάζεται από τους [W. Zhao et al., 2008](#), αλλά και τους [M. D. Bovea et al., 2010](#), είναι η συγκριτική ανάλυση για την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου του σεναρίου της απόθεσης σε ΧΥΤΑ με το σενάριο απόθεσης με επιπλέον ανάκτηση και αξιοποίηση προς ηλεκτροπαραγωγή του παραγόμενου βιοαερίου. Εδώ φαίνεται ότι, σε σχέση με την περίπτωση μη ανάκτησης του βιοαερίου (landfill gas), υπάρχει 50% μείωση της επίδρασης (εφόσον ανακτάται ένα αέριο πλούσιο σε μεθάνιο). Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η περίπτωση των [J. D. Murphy, E. McKeogh, 2004](#), όπου γίνεται σύγκριση διαφόρων σεναρίων όπως αποτέφρωση, αεριοποίηση και ανάκτηση βιοαερίου, με τη διαφορά όμως ότι υπάρχει και σύγκριση στο καθένα ανάμεσα σε απλή ηλεκτροπαραγωγή ή συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (CHP – combined heat & power).

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η συμπαραγωγή υπερτερεί περιβαλλοντικά από την απλή ηλεκτροπαραγωγή, δεδομένου ότι μπορούν να αποφευχθούν ενέργεια που θα χρειαζόταν και εκπομπές που θα εκλύονταν για την αυτούσια παραγωγή θερμότητας, η οποία εδώ λαμβάνεται ως απορριπτόμενη από το σύστημα.

Τη μικρότερη συνολική επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε σχέση με τα υπόλοιπα εξεταζόμενα σενάρια της μελέτης των [J. D. Murphy, E. McKeogh, 2004](#), έχει η χρήση του βιοαερίου σαν καύσιμο οχημάτων.

Τέλος, οι [D. Chen, T. H. Christensen, 2010](#) κάνοντας σύγκριση μεθόδων αποτέφρωσης απορριμμάτων, καταλήγουν πως η καύση σε ρευστοποιημένη κλίση είναι προτιμότερη από την καύση σε εσχάρα, όσον αφορά τις εκπομπές ισοδύναμων CO₂.

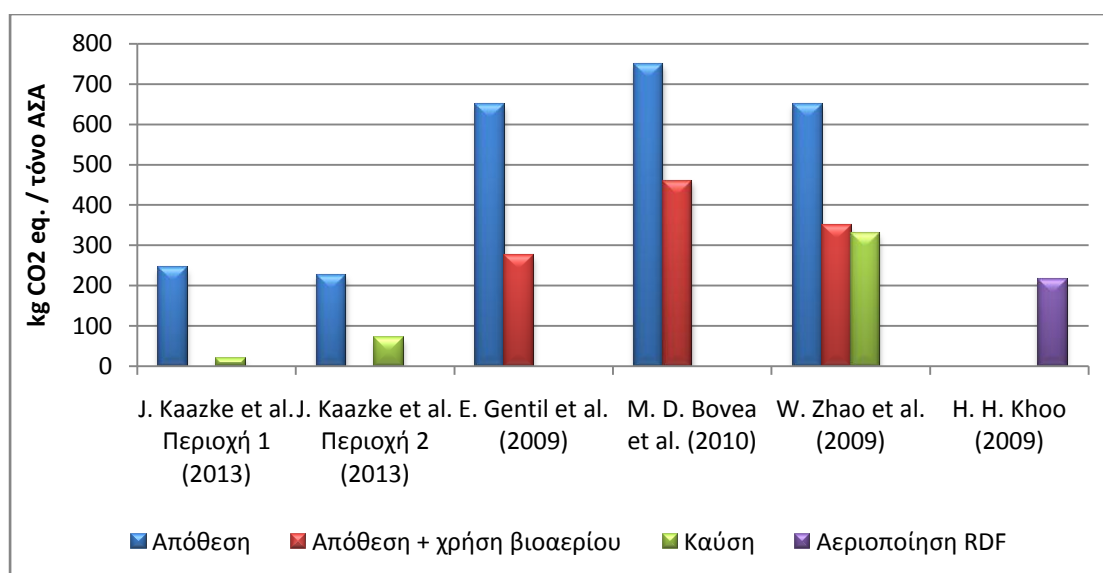
Συνεχίζοντας με την **ποσοτική** σύγκριση των τιμών, θα πρέπει πρώτα να αναφερθεί πως οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι [J. Kaazke et al., 2013](#), [M. D. Bovea et al., 2010](#), [W. Zhao et al., 2008](#), [E. Gentil et al., 2009](#) και [H. H. Khoo, 2009](#). Ο λόγος είναι πως η μονάδα στην οποία εκφράζεται ο δείκτης είναι ή μπορεί να μετατραπεί άμεσα σε [kg CO₂eq./τόνο ΑΣΑ], μονάδα που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη και κατανοητή σε αυτό το είδος μελετών.

Οι μελέτες αυτές περιέχουν πολλά διαφορετικά συστήματα διαχείρισης, από τα οποία επιλέχθηκαν για να συγκριθούν αυτά που ήταν κοινά σε τουλάχιστον δύο από αυτές. Αυτά ήταν σενάρια που περιλαμβάνουν κυρίως απόθεση σε ΧΥΤΑ, απόθεση σε ΧΥΤΑ με ανάκτηση και χρήση του βιοαερίου και καύση ΑΣΑ. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας παρατίθενται τα αποτελέσματα του [H. H. Khoo, 2009](#), που αφορούν τη διαδικασία παραγωγής αερίου σύνθεσης από αεριοποίηση RDF.

Στον πίνακα 2.7 δίνονται το διάγραμμα και ο πίνακας σύγκρισης των τιμών.

Πίνακας 2.7: επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου ανά είδος επεξεργασίας

Πηγή	Απόθεση [kg CO ₂ eq./τόνο ΑΣΑ]	Απόθεση + χρήση βιοαερίου [kg CO ₂ eq./τόνο ΑΣΑ]	Καύση [kg CO ₂ eq./τόνο ΑΣΑ]	Αεριοποίηση RDF [kg CO ₂ eq./τόνο ΑΣΑ]
J. Kaazke et al., 2013 Περιοχή 1	245	-	22	-
J. Kaazke et al., 2013 Περιοχή 2	226	-	71	-
E. Gentil et al. 2009	649	276	-	-
M. D. Bovea et al., 2010	750	460	-	-
W. Zhao et al., 2008	650	350	330	-
H. H. Khoo, 2009	-	-	-	215



Διάγραμμα 2.2: Σύγκριση βιβλιογραφικών αναφορών σχετικά με την επίδραση το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Σχόλια διαγράμματος

- Παρατηρώντας το ραβδόγραμμα, γίνεται κατανοητός ο λόγος που η απόθεση σε ΧΥΤΑ αποτελεί πλέον την έσχατη λύση και κατατάσσεται τελευταία στην ιεράρχηση διαχείρισης ΑΣΑ. Η μεγάλη διαφορά στην εκπομπή ισοδυνάμων διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους έγκειται στην παραγωγή μεθανίου κατά την αποσύνθεση των βιοαποδομήσιμων συστατικών των απορριμμάτων. Αυτό που αξίζει να τονισθεί είναι η κατακόρυφη μείωση της επίδρασης στο φαινόμενο το θερμοκηπίου όταν ανακτηθεί το βιοαέριο που παράγεται, τόσο λόγω του ότι αποφεύγεται η εκπομπή μεθανίου στην ατμόσφαιρα, όσο και λόγω του ότι η χρήση του σαν καύσιμο προς ηλεκτροπαραγωγή εξοικονομεί ορυκτά καύσιμα.

Στην περίπτωση των [J. Kaazke et al., 2013](#), υπάρχει διαφορά στη σύσταση των ΑΣΑ των δύο περιοχών, με την πρώτη να έχει μεγαλύτερο ποσοστό οργανικών και τη δεύτερη να έχει μεγαλύτερο ποσοστό πλαστικού. Το πλαστικό, όπως θα αναφερθεί παρακάτω, έχει πολύ μικρότερη περιβαλλοντική επίδραση στην περίπτωση της ταφής, δεδομένου ότι δε βιοδιασπάται με τον ίδιο τρόπο όπως το οργανικό κλάσμα.

Η μικρή διαφορά των δύο συστάσεων στη συγκέντρωση οργανικού εξηγεί την ελαφρώς αυξημένη τιμή της περιοχής 1 στο σύστημα της απόθεσης σε ΧΥΤΑ σε σχέση με την περιοχή 2. Αντίθετα, στην περίπτωση της καύσης, τα αποτελέσματα είναι χειρότερα για την περιοχή 2, λόγω της μεγαλύτερης συγκέντρωσης πλαστικού στη σύσταση.

Τα αποτελέσματα της μελέτης των [W. Zhao et al., 2008](#), παρουσιάζουν ελάχιστη διαφορά ανάμεσα στην επίδραση του σεναρίου απόθεσης με ανάκτηση βιοαερίου και του σεναρίου καύσης. Η μικρή διαφορά οφείλεται στο ότι στην πρώτη περίπτωση δεσμεύεται μεγάλο ποσοστό από το παραγόμενο βιοαέριο, οπότε αποφεύγεται η διαφυγή αντίστοιχης ποσότητας μεθανίου στην ατμόσφαιρα. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι τελικά είναι προτιμότερη η ταφή απορριμμάτων και η ανάκτηση βιοαερίου από την καύση τους, εφόσον έχουν παρόμοια επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και η πρώτη είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα.

Στη μελέτη των [E. Gentil et al., 2009](#), πρέπει να αναφερθεί ότι τα στοιχεία για την απόθεση σε ΧΥΤΑ προέρχονται από έρευνα για την Ελλάδα (δεδομένου ότι τα υπόλοιπα πέντε κράτη μέλη που εξετάζονται εφαρμόζουν ελάχιστα πλέον αυτή την πρακτική). Επιπλέον, για την ανάκτηση και χρήση του βιοαερίου λήφθηκαν οι τιμές για σχετικά χαμηλά ποσοστά χρήσης του, τα οποία παρόλα αυτά δίνουν και πάλι ικανοποιητικότερα αποτελέσματα από τη συμβατική διαδικασία.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η επίδραση της αεριοποίησης RDF στο φαινόμενο του θερμοκηπίου παρατίθεται εδώ για να υπάρξει σύνδεση με την παρούσα εργασία. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί εδώ είναι ότι, σύμφωνα με τον [H. H. Khoo, 2009](#), στο αποτέλεσμα που δίνεται έχουν συμπεριληφθεί και οι εκπομπές κατά τη φάση της προ-επεξεργασίας των απορριμμάτων αλλά κυρίως αυτές της ενέργειας που απαιτείται για τη εκκίνηση του συστήματος (start-up energy).

- Ο δείκτης οξύνισης (Acidification Potential) μελετάται από τους [J. Kaazke et al., 2013](#), [S. Tunesi, 2011](#), [G. De Feo, C. Malvano, 2009](#), [M. D. Bovea et al., 2010](#), [R. Turconi et al., 2011](#) και [D. Chen, T. H. Christensen, 2010](#). Γενικότερα αποδεικνύεται ότι οι διαδικασίες που περιλαμβάνουν ανακύκλωση έχουν περιβαλλοντικά οφέλη σχετικά με αυτό το δείκτη. Αδιάφορες ποσοτικά είναι οι επιδράσεις σε αυτή την κατηγορία από διαδικασίες απόθεσης, καθώς και αερόβιας και αναερόβιας μηχανικής και βιολογικής επεξεργασίας σύμφωνα με τους [J. Kaazke et al., 2013](#). Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζουν και οι [D. Chen, T. H. Christensen, 2010](#), τονίζοντας όμως την επιβάρυνση που προκαλείται από το κομμάτι των μεταφορών, δεδομένου ότι για την αποκομιδή και μεταφορά των απορριμμάτων από τους κάδους στις μονάδες προ-επεξεργασίας και θερμικής επεξεργασίας χρησιμοποιούνται βαρέα οχήματα, με καύσιμο diesel και άρα υψηλές εκπομπές SO₂ και ισοδυνάμων του.
- Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ο δείκτης του ευτροφισμού (Nutrient enrichment) των υδάτων, ο οποίος προκαλείται από τα οξείδια του αζώτου, που μπορούν να επηρεάσουν τη βιοποικιλότητα του φυσικού περιβάλλοντος αλλά και την ποιότητα του νερού τυχόντος υπογείου υδροφόρου ορίζοντα. Όλες οι διαδικασίες διαχείρισης απορριμμάτων έχουν αρνητική επίδραση στο φαινόμενο του ευτροφισμού. Κατά τους [J. Kaazke et al., 2013](#) τα σενάρια που περιλαμβάνουν διάθεση σε ΧΥΤΑ, αναερόβια και αερόβια μηχανική και βιολογική επεξεργασία, ακόμα και όταν συνδυάζονται με ανακύκλωση, επιδρούν αρνητικά στο φαινόμενο, σε αντίθεση με θερμικές διαδικασίες, οι οποίες μπορεί να μην επιδρούν θετικά αλλά δεν προκαλούν και επιδείνωση. Οι [D. Chen, T. H. Christensen, 2010](#), από την άλλη, βρίσκουν ότι διαδικασίες, όπως ανακύκλωση, διαλογή στερεών υπολειμμάτων, παραγωγή RDF και καύση δημιουργούν συνθήκες στις οποίες αποφεύγονται εκπομπές συστατικών που εντείνουν το φαινόμενο μόλυνσης των υδάτων.

Κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων των επιδράσεων

Η κανονικοποίηση επιτρέπει την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων σε μία κοινή βάση. Γίνεται μέσω εμπειρικών συντελεστών και είναι πολύ κοινή στις μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής (εδώ 5 στις 10 μελέτες την χρησιμοποιούν) για να μπορούν να παρουσιάζουν τα αποτελέσματα τους σε κοινά διαγράμματα (χαρακτηριστικότερο παράδειγμα αποτελεί η μελέτη του [H. H. Khoo, 2009](#)). Εντούτοις, ο κανονισμός [ISO 14040 \(2006\)](#) αποθαρρύνει τους μελετητές να χρησιμοποιούν αυτή την πρακτική λόγω του ότι στηρίζεται σε ελλιπές επιστημονικό υπόβαθρο. Ακόμα ορίζεται από τον κανονισμό πως δεν θα πρέπει να γίνεται κανονικοποίηση σε μελέτες οι οποίες περιέχουν σύγκριση μεθόδων και γνωστοποιούνται στη συνέχεια στο ευρύ κοινό ([J. Cleary, 2009](#)).

Πηγές δεδομένων

Όλες οι μελέτες εδώ έχουν χρησιμοποιήσει βάσεις δεδομένων που περιέχονται στα πακέτα λογισμικών που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για αναλύσεις κύκλου ζωής (βλέπε επόμενη παράγραφο), εκτός από τους [J. D. Murphy, E. McKeogh, 2004](#), οι οποίοι χρησιμοποίησαν εξωτερική βάση δεδομένων.

Χρήση λογισμικών

Από τις 10 μελέτες που εξετάζονται, οι 3 έχουν χρησιμοποιήσει λογισμικό EASEWASTE (D. Chen, T. H. Christensen, 2010, R. Turconi et al., 2011, E. Gentil et al., 2009), οι δύο SimaPro 7 (R. Turconi et al. (2011), M. D. Bovea et al. (2010)) και οι υπόλοιποι ποικιλία λογισμικών, όπως GaBi Pro 4, WISARD, CMLCA, WRATE 1.0.1.0., και LCA-IWM, πολλά από τα οποία έχουν σχεδιαστεί κατεξοχήν για ανάλυση κύκλου ζωής που αφορά τη διαχείριση απορριμμάτων.

Οικονομικά στοιχεία

Τα οικονομικά στοιχεία σε αυτές τις μελέτες παρατίθενται συνήθως για να μπορέσει κανείς να κάνει μία σύγκριση και του κόστους των εγκαταστάσεων, ώστε η σύγκριση των μεθόδων να μπορέσει προοδευτικά να οδηγήσει σε μία τελική επιλογή.

Στην προκειμένη περίπτωση, η λεπτομερέστερη οικονομικοτεχνική ανάλυση συναντάται στη μελέτη του H. H. Khoo, 2009 και μία λιγότερο λεπτομερή σε αυτή των J. D. Murphy, E. McKeogh, 2004.

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά ISO (2006) δεν απαιτείται μία ανάλυση κύκλου ζωής να περιέχει οικονομικά στοιχεία.

Ανάλυση ευαισθησίας

Οι αναλύσεις ευαισθησίας γίνονται ώστε να προσδιορίζονται οι μικρές ή μεγάλες επιδράσεις που μπορεί να εμφανιστούν αλλάζοντας κάποια παράμετρο ή κάποια παραδοχή. Από τις δέκα μελέτες που εξετάζονται εδώ, οι επτά περιέχουν αναλύσεις ευαισθησίας. Από αυτές, σε τρεις γίνεται ανάλυση ευαισθησίας της επίδρασης του ποσοστού ανάκτησης υλικών (W. Zhao et al., 2008, M. D. Bovea et al., 2010, E. Gentil et al., 2009) με αποτέλεσμα, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό ανάκτησης και ανακύκλωσης, τόσο μειώνεται η επίδραση της διαδικασίας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Μία άλλη παράμετρος που εξετάζεται συχνά είναι η απόδοση των συστημάτων, είτε του ποσοστού βιοαερίου που ανακτάται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας (E. Gentil et al., 2009, W. Zhao et al., 2008), είτε του δείκτη απόδοσης της μονάδας θερμικής επεξεργασίας (S. Tunesi, 2011).

Τέλος, άλλες παράμετροι που προσφέρθηκαν για ανάλυση ευαισθησίας είναι η απόσταση από τη μία μονάδα στην άλλη ή στην τελική απόθεση, λόγω της επίδρασης από τη μεταφορά (E. Gentil et al., 2009, J. Kaazke et al., 2013), η ποιοτική σύσταση του αρχικού ρεύματος των απορριμμάτων (J. Kaazke et al., 2013, R. Turconi et al., 2011) καθώς και ο καθαρισμός του αερίου που παράγεται (D. Chen, T. H. Christensen, 2010).

2.4.4. Ανάλυση Κύκλου Ζωής αεριοποίησης βιομάζας

Ο λόγος που η μέθοδος της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής εφαρμόζεται για τα διάφορα είδη βιομάζας, είναι η αναγκαιότητα που έχει παρουσιαστεί τα τελευταία χρόνια για εύρεση νέων πηγών ενέργειας. Δεδομένης της επικείμενης εξάντλησης των ορυκτών καυσίμων, η

μείωση της κατανάλωσής τους είναι ένα σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Έτσι, τα βιοκαύσιμα, προερχόμενα από ενεργειακά φυτά, ερευνώνται όλο και περισσότερο, όσον αφορά τις επιδράσεις της χρήσης τους στο φυσικό περιβάλλον, στη θέση των ορυκτών.

Οι 6 μελέτες που εξετάζονται εδώ (δημοσιευμένες στο χρονικό διάστημα 2005-2012) περιλαμβάνουν διάφορα στοιχεία, όπως το είδος της πρώτης ύλης της βιομάζας, τις τεχνολογίες μετατροπής της σε ενέργεια (Biomass to Energy – BtE), τις τελικές χρήσεις των προϊόντων, τα όρια του συστήματος, καθώς και πολλές φορές σύγκριση με κάποιο σύστημα αναφοράς (συνήθως το ήδη υπάρχον σύστημα παραγωγής ενέργειας).

Είδος βιομάζας (α' ύλη)

Ένα αρκετά μεγάλο εύρος πηγών βιομάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Η βιοενέργεια στην παραδοσιακή της μορφή (ξύλο και κάρβουνο που καίγονται σε εγκαταστάσεις χαμηλής απόδοσης, όπως τζάκια) κυριαρχεί στις αναπτυσσόμενες χώρες, ενώ στις ανεπτυγμένες γίνεται όλο και πιο σημαντική η χρήση της βιομάζας, σαν ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (είτε στη μορφή καλλιεργούμενων ενεργειακών φυτών είτε στη μορφή βιομαζικών υπολειμμάτων).

Για την ακρίβεια, στην ανασκόπηση αυτή, τρεις από τις μελέτες αναφέρονται σε βιομάζα από ενεργειακά φυτά (C. Gasol et al., 2011, P. Goglio et al., 2012, M. Carpentieri et al., 2005) ενώ δύο σε βιομάζα από υπολείμματα, όπως απορρίμματα, αγροτικά υπολείμματα, δασικά και υπολείμματα ξύλου (D. Tonini, T. Astrup, 2012, C. Perilhon et al., 2012). Οι S. Caserini et al., 2010, εξετάζουν διάφορα σενάρια, που περιλαμβάνουν και υπολείμματα και ενεργειακά φυτά.

Τα στοιχεία δίνονται στο συγκεντρωτικό πίνακα 2.8.

Πηγή	Περιοχή	Τύπος βιομάζας
C. Gasol et al., 2011	Καταλονία, Ισπανία	Ενεργειακά φυτά
D. Tonini, T. Astrup, 2012	Δανία	Υπολείμματα
P. Goglio et al., 2012	Μεσόγειος (γενικά)	Ενεργειακά φυτά
S. Caserini et al., 2010	Lombardy, Ιταλία	Υπολείμματα
C. Perilhon et al., 2012	Δεν αναφέρεται	Υπολείμματα
M. Carpentieri et al., 2005	Δεν αναφέρεται	Ενεργειακά φυτά

Αξίζει να σημειωθεί, πως, όσον αφορά τα απόβλητα και τα υπολείμματα βιομάζας, η χρήση τους για την παραγωγή ενέργειας συνήθως δεν επιβαρύνει επιπλέον το περιβάλλον, δεδομένου ότι η παραγωγή τους είναι αποτέλεσμα της οικονομικής δραστηριότητας και της παραγωγής αγαθών.

Από την άλλη πλευρά, τα φυτά που καλλιεργούνται ειδικά για την παραγωγή ενέργειας, απαιτείται να ικανοποιούν κριτήρια, όπως η χαμηλή απαίτηση σε νερό, η χαμηλή υγρασία τους μετά τον θερισμό, η χαμηλή απαίτηση σε χημικά βοηθήματα κατά την ανάπτυξή τους και άλλα. Επίσης, θα πρέπει να βρεθούν πρακτικές που θα κάνουν την

καλλιέργεια τέτοιων φυτών κομμάτι της βιώσιμης γεωργίας ώστε να μην προκληθούν προβλήματα από την έντονη ζήτηση που ενδεχομένως θα υπάρξει.

Στόχοι των μελετών

Απαραίτητο στοιχείο κάθε μελέτης είναι η αναφορά του σκοπού για τον οποίο γίνεται. Εδώ παρατηρείται ότι ο βασικός στόχος είναι κοινός σε όλες της μελέτες και αφορά την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης βιομάζας για παραγωγή ενέργειας. Σε τέσσερις από τις μελέτες καθορίζεται επακριβώς ότι επιπλέον σκοπεύουν στη σύγκριση διαφόρων σεναρίων παραγωγής ενέργειας, συνήθως με το υπάρχον σενάριο (D. Tonini, T. Astrup, 2012, P. Goglio et al., 2012, S. Caserini et al., 2010, C. Perilhon et al., 2012) ενώ οι C. Gasol et al., 2011, αναφέρονται στη χρήση της μεθόδου για την εκτίμηση των επιπτώσεων των συστημάτων αξιοποίησης της βιομάζας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Λειτουργική μονάδα

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας αποτελεί σημαντικό κομμάτι της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.

Η μελέτη των S. Caserini et al., 2010, είναι η μόνη από τις μελέτες που εξετάστηκαν εδώ που χρησιμοποιεί μαζική λειτουργική μονάδα, τον 1 τόνο ξηρής βιομάζας (σε αντιδιαστολή με τις περιπτώσεις Ανάλυσης Κύκλου Ζωής των απορριμμάτων, όπου η μαζική λειτουργική μονάδα ήταν η συχνότερα χρησιμοποιούμενη).

Οι M. Carpentieri et al., 2005, P. Goglio et al., 2012, και C. Perilhon et al., 2012, χρησιμοποιούν ενεργειακή λειτουργική μονάδα, ενώ οι P. Goglio et al., 2012, εκφράζουν τα αποτελέσματά τους και ανά εκτάριο (hectare). Ο λόγος για το τελευταίο είναι ότι ο χώρος καλλιέργειας α' ύλης βιομάζας αποτελεί και τον μεγαλύτερο περιορισμό στην παραγωγή βιοκαυσίμων.

Όρια συστήματος

Τα όρια των συστημάτων που εξετάζονται περιλαμβάνουν και εδώ κυρίως τις μεταφορές (από την περιοχή παραγωγής ή συλλογής της βιομάζας μέχρι την περιοχή θερμικής επεξεργασίας), τη διαδικασία παραγωγής ή/και συλλογής της βιομάζας, το στάδιο της θερμικής επεξεργασίας και την τελική διάθεση των υπολειμμάτων μετά από αυτή. Τα όρια κάθε συστήματος δίνονται στον πίνακα 2.9.

Πηγή	Όρια συστήματος
C. Gasol et al. (2011)	Παραγωγή α' ύλης (ενεργειακά φυτά), μονάδα θερμικής επεξεργασίας, μεταφορά και απόθεση των υπολειμμάτων
D. Tonini, T. Astrup (2012)	Μονάδα θερμικής επεξεργασίας
P. Goglio et al. (2012)	Είσοδος: παραγωγή α' ύλης (ενεργειακά φυτά, όπως ηλιοτρόπια) Έξοδος: τελικό ενεργειακό προϊόν (βιοκαύσιμο)
S. Caserini et al. (2010)	Συλλογή υπολειμμάτων ξύλου, διαδικασία BtE, απόθεση υπολειμμάτων

C. Perilhon et al. (2012)	Αποθήκευση α' ύλης και θερμική επεξεργασία
M. Carpentieri et al. (2005)	Παραγωγή α' ύλης (ενεργειακά φυτά), μεταφορές από και προς τη μονάδα θερμικής επεξεργασίας, θερμική επεξεργασία και κατασκευή μονάδας

Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιδράσεων

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.4.3, οι επιδράσεις στο περιβάλλον καθορίζονται από δείκτες, οι οποίοι αναφέρονται σε διάφορες περιβαλλοντικές κατηγορίες, όπως η επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, η οξύνιση, ο ευτροφισμός των υδάτων και άλλες.

Ο πιο βασικός δείκτης από όλους, ο οποίος συμπεριλαμβάνεται σε όλες τις μελέτες είναι αυτός της επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, για λόγους που εξηγήθηκαν και παραπάνω.

Τέσσερις μελέτες περιλαμβάνουν το δείκτη οξύνισης ([D. Tonini, T. Astrup, 2012](#), [P. Goglio et al., 2012](#), [S. Caserini et al., 2010](#), [M. Carpentieri et al., 2005](#)) και τρεις το δείκτη ευτροφισμού ([D. Tonini, T. Astrup, 2012](#), [P. Goglio et al., 2012](#), [M. Carpentieri et al., 2005](#)). Άλλοι δείκτες που εμφανίζονται είναι αυτός της επίδρασης στην ανθρώπινη υγεία και αυτός της φωτοχημικής αντίδρασης σχηματισμού όζοντος.

Στη συνέχεια γίνεται ποιοτική σύγκριση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που εξήγαγε ο κάθε ερευνητής, με έμφαση στους κυριότερους δείκτες, όπως αναφέρθηκαν και παραπάνω:

- Κοινό στοιχείο σε όλες αποτελεί η απόδειξη πως η χρήση της βιομάζας μειώνει την επίδραση της οποιασδήποτε διαδικασίας παραγωγής ενέργειας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, το CO₂ που παράγεται από την θερμική της επεξεργασία θεωρείται βιογενές, δηλαδή ισοδύναμο με αυτό που απορρόφησαν τα φυτά στη διάρκεια της ζωής τους για να αναπτυχθούν. Οι [S. Caserini et al., 2010](#) τονίζουν παρόλα αυτά ότι η χρήση της βιομάζας για ηλεκτροπαραγωγή αντί για συμβατικά καύσιμα είναι ωφέλιμη όσον αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, μόνο όταν η απόσταση τροφοδοσίας της μονάδας με πρώτη ύλη είναι μικρότερη των 600km.
- Εκτός από τους [P. Goglio et al., 2012](#), όπου η μελέτη αφορά καθαρά την εύρεση του βέλτιστου τρόπου καλλιέργειας ενεργειακών φυτών ώστε να έχει η διαδικασία αυτή τη μικρότερη δυνατή επίδραση στο περιβάλλον, οι υπόλοιποι μελετητές τονίζουν την αρνητική επίπτωση της καλλιέργειας κυρίως στο υδάτινο περιβάλλον, λόγω της χρήσης λιπασμάτων (που είναι πλούσια σε άζωτο και φωσφόρο). Πιο συγκεκριμένα, οι [S. Caserini et al., 2010](#), καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η χρήση βιομάζας στη μορφή υπολειμμάτων (δασικών ή από βιομηχανίες επεξεργασίας ξύλου) είναι προτιμότερη από την καλλιέργεια ενεργειακών φυτών εξαρχής. Παρόλα αυτά, οι [D. Tonini, T. Astrup, 2012](#), των οποίων η μελέτη αφορά ολοκληρωμένα ενεργειακά σενάρια και έχουν υπολογίσει ποσοστά τα οποία επιδιώκεται να καλύπτει η βιομάζα στο ενεργειακό μίγμα της Δανίας, τονίζουν ότι δεν μπορεί να καλυφθεί αυτό το ποσοστό με τα υπολείμματα και απαιτείται καλλιέργεια βιομάζας. Αυτό φυσικά συνεπάγεται όχι μόνο

ζημιογόνα αποτελέσματα για το δείκτη του ευτροφισμού, αλλά και για άλλες κατηγορίες δεικτών.

- Η μείωση της χρήσης ορυκτών πόρων (η οποία αποτελεί εξίσου έναν δείκτη που περιλαμβάνεται στις περισσότερες μελέτες) υπολογίζεται στα πλεονεκτήματα της βιομάζας. Πιο επισταμένα εξετάστηκε αυτός ο δείκτης από τους [C. Perilhon et al., 2012](#), [M. Carpentieri et al., 2005](#) και [C. Gasol et al., 2011](#).
- Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο με τη λειτουργική μονάδα, στην ανάλυση κύκλου ζωής της βιομάζας ως ανανεώσιμη πηγή, και ιδιαίτερα όσον αφορά στην καλλιέργεια ενεργειακών φυτών, είναι πολύ σημαντικό να εντοπίζεται το πρόβλημα στην έκταση και τη χρήση της γης που απαιτείται για την παραγωγή της α' ύλης. Από τις μελέτες που εξετάζονται εδώ, οι [P. Goglio et al., 2012](#), εξετάζοντας τρεις περιπτώσεις αγροτικών πρακτικών που μπορούν να ακολουθηθούν (μικρότερο δυνατό κόστος πόρων για βελτίωση της καλλιέργειας, μέτριο και πολύ ψηλό, με το οποίο επιτυγχάνεται το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στην καλλιέργεια) κατέληξαν στο συμπέρασμα, πως με χαμηλό κόστος και παράλληλα ακρίβεια στην επιλογή του φυτού που θα καλλιεργηθεί, καθώς και στη διευθέτηση των εναλλακτικών καλλιεργειών δημητριακών στα μεσοδιαστήματα, μπορούν να επιτευχθούν τα βέλτιστα περιβαλλοντικά -αλλά και οικονομικά- αποτελέσματα από την αγροτική παραγωγή βιομάζας.
Από την άλλη πλευρά, οι [C. Gasol et al., 2011](#) εκπονούν τη μελέτη τους βασισμένοι σε σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών, αποδεικνύοντας ότι η περιοχή καλλιέργειας παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη μιας στρατηγικής για τη βιομάζα, καθώς επιτρέπει τον εντοπισμό περιοχών καλλιέργειας, στις οποίες μπορεί να κατασκευαστεί μονάδα παραγωγής ενέργειας ή/και βιοκαυσίμων, χωρίς να υπάρχει το πρόβλημα της μεταφοράς σε μεγάλη απόσταση.
- Η επίδραση στην ανθρώπινη υγεία από τη χρήση βιομάζας σε θερμικές διεργασίες εξετάζεται μόνο από τους [C. Perilhon et al., 2012](#) και [S. Caserini et al., 2010](#), με τους μεν πρώτους να εξετάζουν (κατά τη μέθοδο IMPACT 2002+) το δείκτη ως σύνολο καρκινογόνων και μη επιδράσεων, επιδράσεων στο αναπνευστικό, επιδράσεων λόγω ακτινοβολιών καθώς και λόγω καταστροφής του στρώματος του όζοντος με πιο ποιοτική προσέγγιση, ενώ οι δε δεύτεροι παραθέτουν κανονικά το δείκτη HTP σε kg 1.4-DBC eq. (ισοδύναμο διχλωροβενζόλιο).

Χρήση – τελικό προϊόν από θερμική επεξεργασία βιομάζας

Πέντε από τις έξι μελέτες αναφέρουν την τελική χρήση (end-use) του προϊόντος (συνήθως αέριου) που παράγεται από τη θερμική επεξεργασία βιομάζας ή την απευθείας χρήση της για παραγωγή ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, οι [C. Perilhon et al., 2012](#), [C. Gasol et al., 2011](#), [S. Caserini et al., 2010](#) και [Tonini – T. Astrup, 2012](#) αναφέρονται στη θερμική επεξεργασία (αεριοποίηση) της βιομάζας (είτε υπολειμμάτων είτε ενεργειακών φυτών) με τελικό προϊόν το syngas και χρήση του για παραγωγή ηλεκτρικής αλλά και θερμικής ενέργειας (μονάδες συμπαραγωγής – combined heat & power plants – συνήθως ισχύος 2 MW). Οι [S. Caserini et al., 2010](#) εξετάζουν επίσης 4 σενάρια οικιακής χρήσης βιομάζας (δασικά υπολείμματα, αγροτικά και βιομηχανικά υπολείμματα ξύλου): καύση σε συμβατικό τζάκι, σε συμβατική σόμπα, σε σόμπα με χαμηλές εκπομπές και σε σόμπα pellet με την καλύτερη διαθέσιμη τεχνολογία (για αυτό το λόγο παραθέτουν και το δείκτη

που αφορά τη ανθρωπινή υγεία, δεδομένων των στερεών σωματιδίων που εκπέμπονται από τέτοιου είδους συσκευές).

Τέλος οι [M. Carpentieri et al., 2005](#) εξετάζουν τη χρήση σε εγκατάσταση συνδυασμένου κύκλου αεριοποίησης βιομάζας με αφαίρεση CO₂, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και μάλιστα σε σύγκριση με αντίστοιχη μονάδα με καύσιμο τον ορυκτό άνθρακα.

2.4.5 Συμπεράσματα από ανασκόπηση ανάλυσης κύκλου ζωής

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις μεθόδους διαχείρισης απορριμμάτων και την αεριοποίηση βιομάζας, προκύπτουν συμπεράσματα για τη μέθοδο της αεριοποίησης συγκριτικά με άλλες μεθόδους διαχείρισης απορριμμάτων αλλά και για τη βιομάζα ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας, κυρίως αναφορικά με την επίδραση αυτών στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, που είναι και αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Καταρχάς, όσον αφορά τη διαχείριση απορριμμάτων, το στάδιο της προ-επεξεργασίας τους παίζει σημαντικό ρόλο, αφού μειώνει τις συνολικές εκπομπές του συστήματος, είτε λόγω ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης υλικών, είτε λόγω εκτροπής των οργανικών από την ταφή και συλλογής του βιοαερίου υπό ελεγχόμενες συνθήκες, ώστε να μην εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα.

Επιπλέον, διαφαίνεται ότι είναι μεγαλύτερη η επίπτωση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από αυξημένη συγκέντρωση οργανικού κλάσματος στη σύσταση των ΑΣΑ σε διαδικασίες όπως η απόθεση σε ΧΥΤΑ, από την αντίστοιχη σε θερμικές διεργασίες διαχείρισης, όπως η καύση.

Πρέπει επίσης να τονιστεί πως τα αποτελέσματα των μελετών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής επηρεάζει και το αν λαμβάνεται υπ' όψιν ο κατά κάποιο ποσοστό ανανεώσιμος χαρακτήρας των ΑΣΑ, ο οποίος μειώνει τα τελικά ισοδύναμα κιλά διοξειδίου του άνθρακα που υπολογίζεται ότι εκπέμπει το σύστημα.

Αναφορικά με τη χρήση βιομάζας για παραγωγή ενέργειας, τονίζεται αρχικά πως όλες οι διαδικασίες έχουν μειωμένη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, εφόσον λαμβάνεται υπ' όψιν ο 100% βιογενής χαρακτήρας του καυσίμου.

Γίνεται κατανοητό πως η μέθοδος της αεριοποίησης είναι ευρύτερα ανεπτυγμένη μέχρι στιγμής στον τομέα της βιομάζας έναντι αυτού των απορριμμάτων, είτε πρόκειται για βιομαζικά υπολείμματα είτε για ενεργειακά φυτά.

Παρόλα αυτά, ενώ η χρήση των ενεργειακών φυτών στην παραγωγή ενέργειας επιδιώκεται να αυξηθεί λόγω των πλεονεκτημάτων στην κατηγορία της επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, παράγοντες όπως η έλλειψη εκτάσεων για μαζική καλλιέργεια, η εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες και η αρνητική επίδραση στον ευτροφισμό των υδάτων από τα αζωτούχα λιπάσματα που απαιτούνται για την αύξηση της απόδοσης της καλλιέργειας, αποτελούν εμπόδια.

Τέλος, η σύγκριση της αεριοποίησης με τη συνηθέστερα εφαρμοζόμενη καύση, είτε απορριμμάτων είτε βιομάζας, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το προϊόν της

αεριοποίησης αποτελεί καύσιμο υλικό το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές αντικαθιστώντας ορυκτά καύσιμα.

Κεφάλαιο 3^ο

Μοντέλο παραγωγής αερίου σύνθεσης από αεριοποίηση RDF

3.1. Γενική διαδικασία

Η διαδικασία που ακολουθείται για τους υπολογισμούς σε γενικές γραμμές ξεκινάει από μία αρχική ποιοτική σύσταση ΑΣΑ, η οποία μετά από ανάκτηση υλικών δίνει τη σύσταση του προς αεριοποίηση RDF. Η αεριοποίηση θεωρείται ότι πραγματοποιείται σύμφωνα με το μοντέλο που θα περιγραφεί στη συνέχεια, από την οποία προκύπτει η σύσταση του αερίου σύνθεσης.

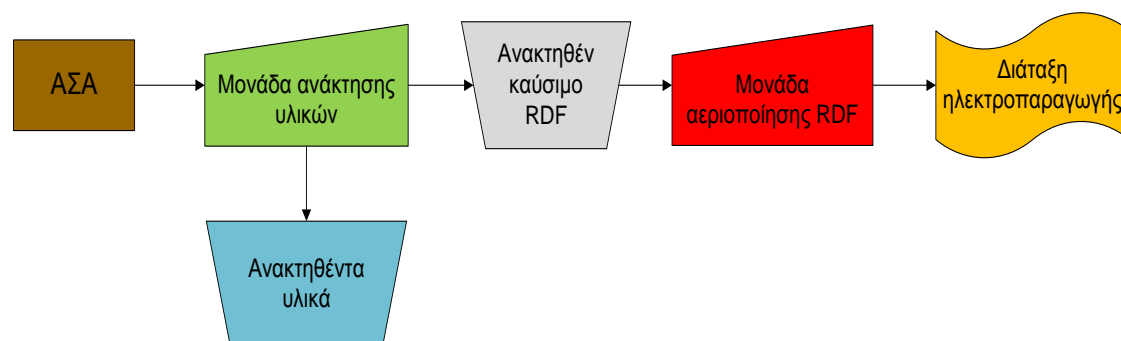
3.2. Περιγραφή εξεταζόμενων σεναρίων

Οι δύο βασικές περιπτώσεις εγκατάστασης αεριοποίησης RDF που θα εξεταστούν εδώ (και από οικονομικής άποψης) είναι οι παρακάτω (σχήματα 3.1 και 3.2):

Ολοκληρωμένη μονάδα ανάκτησης υλικών, αεριοποίησης RDF και ηλεκτροπαραγωγής

Σε αυτή την περίπτωση η μονάδα αποτελεί ολοκληρωμένη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων, που περιλαμβάνει μονάδα ανάκτησης υλικών, μονάδα αεριοποίησης και μονάδα αξιοποίησης του συνθετικού αερίου προς ηλεκτροπαραγωγή.

Αυτό σημαίνει την παραλαβή των απορριμμάτων αμέσως μετά τη συλλογή τους από τους κάδους, τη μηχανική επεξεργασία τους για ανάκτηση υλικών, την παραγωγή RDF από τα υπολείμματα της διαδικασίας ανάκτησης, την αεριοποίηση αυτού του RDF και την παραγωγή αερίου σύνθεσης, το οποίο τελικά αξιοποιείται σε ΜΕΚ προς ηλεκτροπαραγωγή.



Σχήμα 3.1: Ολοκληρωμένη μονάδα διαχείρισης απορριμμάτων

Απλή μονάδα αεριοποίησης RDF και ηλεκτροπαραγωγής

Αυτή η περίπτωση είναι πανομοιότυπη με την παραπάνω στο τμήμα της αεριοποίησης και της ηλεκτροπαραγωγής.

Η διαφορά των δύο έγκειται στο ότι σε αυτή την περίπτωση η μονάδα παραλαμβάνει το RDF από ανεξάρτητη μονάδα ανάκτησης υλικών, συνεπώς η λειτουργία της αφορά αποκλειστικά την ηλεκτροπαραγωγή από το καύσιμο αέριο που παράγεται από την αεριοποίηση.



Σχήμα 3.2: Απλή μονάδα αεριοποίησης RDF για ηλεκτροπαραγωγή

3.3. Εφαρμογή του μοντέλου σε συγκεκριμένη περίπτωση

Στο βασικό σενάριο εξετάζεται συγκεκριμένη σύσταση RDF, η οποία στην περίπτωση απλής εγκατάστασης αφορά το RDF που παραλαμβάνει η μονάδα ενώ στην περίπτωση ολοκληρωμένης εγκατάστασης αφορά το RDF το οποίο ανακτάται μετά τη μηχανική επεξεργασία των ΑΣΑ τα οποία παραλαμβάνει η μονάδα προς διαχείριση.

3.3.1. Ανάπτυξη μοντέλου αεριοποίησης RDF

Ορίζονται εδώ και αναφέρονται στη συνέχεια ως **μπλε κάδος** ο κάδος απορριμμάτων όπου αποτίθενται τα ανακυκλώσιμα υλικά συσκευασιών (χαρτί – χαρτόνι, μέταλλα, πλαστικό, γυαλί) και ως **πράσινος κάδος** ο κάδος όπου απορρίπτονται τα σύμμεκτα απορρίμματα, χωρίς προηγούμενο διαχωρισμό οποιουδήποτε υλικού.

Φάση Α: Υπολογισμοί που αφορούν το RDF, πριν την αεριοποίηση

Στον πίνακα 3.1 δίνονται οι τυπικές συστάσεις σύμμεκτων απορριμμάτων από μπλε και πράσινο κάδο για την Ελλάδα.

	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος
Οργανικά	8,07	40,00
Χαρτί	25,55	29,00
Πλαστικό	31,42	14,00
Υφάσματα	4,25	2,00
Σιδηρούχα μέταλλα	10,44	2,00
Μη σιδηρούχα μέταλλα	6,27	1,00
Γυαλί	3,13	3,00
Ξύλο – Δέρμα	2,92	1,50
Αδρανή	3,56	3,00
Άλλα	4,40	4,50

Για την κατηγοριοποίηση της σύστασης σημειώνονται τα εξής:

- *Αδρανή απόβλητα* είναι τα μη επικίνδυνα απόβλητα που δεν υφίστανται καμία σημαντική φυσική, χημική ή βιολογική μετατροπή. Τα αδρανή απόβλητα δε διαλύονται, δεν καίγονται, ούτε συμμετέχουν σε άλλες φυσικές ή χημικές αντιδράσεις, δε βιοδιασπώνται ούτε επιδρούν δυσμενώς σε άλλα υλικά με τα οποία έρχονται σε επαφή, κατά τρόπο ικανό να προκαλέσει ρύπανση του περιβάλλοντος ή να βλάψει την υγεία του ανθρώπου (**ΕΕΣΔΑ**).
- Άλλα θεωρούνται τα απόβλητα τα οποία δε μπορούν να καταταγούν σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες ή αποτελούνται από υλικά τα οποία ανήκουν σε παραπάνω από μία από αυτές και δε μπορούν να διαχωριστούν στη μηχανική επεξεργασία. Επιπλέον, σε αυτή την κατηγορία κατατάσσονται τυχόν ηλεκτρονικά απόβλητα, συσσωρευτές, ηλεκτρικές στήλες και άλλα.

Στην περίπτωση της ολοκληρωμένης εγκατάστασης θεωρήθηκαν τα ποσοστά ανάκτησης υλικών και διαφυγών που δίνονται στον πίνακα 3.2, με αποτέλεσμα να υπολογιστεί η τελική σύσταση RDF από την αντίστοιχη σύσταση των ΑΣΑ που δόθηκε παραπάνω, ενώ

ίδιας σύστασης RDF θεωρείται ότι παραλαμβάνεται προς αεριοποίηση και στην περίπτωση της απλής εγκατάστασης.

Τονίζεται ότι τα ποσοστά ανάκτησης που αναφέρονται εδώ είναι ποσοστά επί της συγκέντρωσης του εκάστοτε συστατικού στο ρεύμα των απορριμμάτων, όπως επίσης και το ποσοστό διαφυγής.

Πίνακας 3.2: Ποσοστά ανάκτησης υλικών, διαφυγής και ποιοτική σύσταση RDF ως έχει [% κ. β.]

Συστατικά	Μπλε κάδος			Πράσινος κάδος		
	Ανάκτηση	Διαφυγή	Τελική σύσταση	Ανάκτηση	Διαφυγή	Τελική σύσταση
Οργανικά	2*	5	11,98	10*	5	40,91
Χαρτί	30	5	26,50	10	5	29,66
Πλαστικό	30	5	32,59	10	5	14,32
Υφάσματα	0	5	6,45	0	5	2,29
Σιδηρούχα μέταλλα	80	5	2,50	80	5	0,36
Μη σιδηρούχα μέταλλα	80	5	1,50	80	5	0,18
Γυαλί	55	5	2,00	40	5	1,99
Ξύλο – Δέρμα	0	5	4,42	0	5	1,71
Αδρανή	0	5	5,39	0	5	3,43
Άλλα	0	5	6,67	0	5	5,14

*: ως προσμίξεις στα ανακτηθέντα υλικά

Γνωρίζοντας την αρχική σύσταση δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης ευαισθησίας αναλόγως με τα ποσοστά ανάκτησης.

Σε αντίθετη περίπτωση, μπορεί να τεθεί η ευκολότερα και συνηθέστερα μετρούμενη σύσταση RDF και τα εκτιμώμενα ποσοστά ανάκτησης και να προκύψει αντίστροφα η εκτιμώμενη σύσταση των ΑΣΑ από τα οποία προήλθε.

Σε κάθε περίπτωση, επόμενο βήμα στη διαδικασία είναι ο υπολογισμός του βιογενούς κλάσματος του προς αεριοποίηση RDF.

Σύμφωνα με την θέσπιση των τεχνικών προδιαγραφών [CEN/TS 15440:2006](#), όπου παρέχονται τα λεπτομερή στοιχεία για τα βιογενή κλάσματα των επιμέρους υλικών που απαρτίζουν το RDF, υπολογίζεται στο μοντέλο το συνολικό βιογενές κλάσμα του, από τα δεδομένα που δίνονται στον πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Βιογενές κλάσμα ανά συστατικό [%] ([CEN/TS 15440:2006](#))

Οργανικά	100,00
Χαρτί	98,00
Πλαστικό	31,56
Υφάσματα	50,00
Σιδηρούχα μέταλλα	0,00
Μη σιδηρούχα μέταλλα	0,00
Γυαλί	0,00
Ξύλο – Δέρμα	96,50
Αδρανή	0,00
Άλλα	0,00

Εκτός από τα οργανικά, τα οποία θεωρούνται 100% βιοαποδομήσιμο υλικό, τα υπόλοιπα προέκυψαν ως μέσος όρος των διαφορετικών ειδών που περιέχει η κατηγορία. Έτσι, το βιογενές ποσοστό του χαρτιού προκύπτει από τα ποσοστά των διαφόρων ειδών χαρτιού

(χαρτόνι, εφημερίδα, έντυπο χαρτί, χάρτινη συσκευασία), το αντίστοιχο ποσοστό του πλαστικού προκύπτει με ανάλογο τρόπο (ενώ κανονικά το πλαστικό θεωρείται μη βιογενές υλικό, εντούτοις υφίστανται πλέον είδη πλαστικού τα οποία κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να διασπαστούν), στο ποσοστό των υφασμάτων λαμβάνονται υπ' όψιν και τα συνθετικά υφάσματα ενώ τέλος, το βιογενές ποσοστό ξύλου-δέρματος προκύπτει από το ημίαιθροισμα των δύο κατηγοριών (επειδή στις συστάσεις απορριμμάτων δίνονται συνήθως ενοποιημένες).

Τελικά, για το προαναφερθείσας σύστασης RDF από μπλε κάδο προκύπτει βιογενές ποσοστό **55,73%**, ενώ για αυτό από πράσινο κάδο **77,30%**.

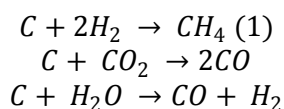
Όπως θα γίνει σαφές στη συνέχεια, για την εφαρμογή του μοντέλου αεριοποίησης που υιοθετήθηκε, είναι απαραίτητο να γίνει μετατροπή της ποιοτικής σύστασης σε στοιχειακή. Σύμφωνα με βάση δεδομένων που αντλήθηκε από τη μελέτη των [F. Cherubini et al., 2008](#), καθώς και συμπληρωματικά (για όσες κατηγορίες έλειπαν) από την πτυχιακή εργασία του [Σ. Τσομπανόγλου, 2009](#), οι οποίες παρέχουν τη στοιχειακή σύσταση των επιμέρους συστατικών του RDF, δηλαδή την συγκέντρωση άνθρακα (C), υδρογόνου (H), οξυγόνου (O), αζώτου (N), θείου (S), χλωρίου (Cl), υγρασίας και τέφρας σε κάθε ένα από αυτά, υπολογίζεται η τελική στοιχειακή σύσταση του RDF και δίνεται στον πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.4: Στοιχειακή σύσταση RDF ως έχει [% κ. β.]		
	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος
C	39,60	30,27
H	5,11	3,96
O	22,79	21,15
N	0,47	0,52
S	0,32	0,22
Cl	0,08	0,03
Υγρασία	11,87	31,58
Τέφρα	19,76	12,28

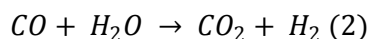
Φάση Β: Θεωρία ανάπτυξης μοντέλου αεριοποίησης

Το μοντέλο της αεριοποίησης που υιοθετήθηκε και προσαρμόστηκε ([Z. A. Zainal et al., 2001](#)), βασίζεται στη θεωρία της χημικής ισορροπίας (chemical equilibrium model). Για να μπορέσει να μοντελοποιηθεί η αεριοποίηση, μία κατεξοχήν πολυσύνθετη θερμική διεργασία, σε ένα απλό και εύχρηστο μοντέλο, έγιναν οι εξής παραδοχές ([Z. A. Zainal et al., 2001](#), [U. Arena, 2012](#)):

- Αρχικά υποτίθεται ότι όλες οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μέσα στον αεριοποιητή βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία.
- Επιπλέον, από την πλειάδα των αντιδράσεων, λαμβάνονται υπ' όψιν μόνο οι παρακάτω τρεις:



με τις δύο τελευταίες να μπορούν να συνδυαστούν δίνοντας την αντίδραση μετατόπισης:

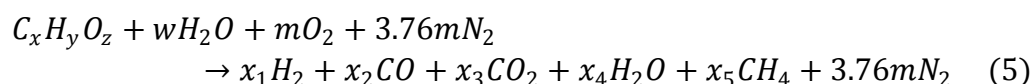


- Για τις δύο αντιδράσεις που θεωρούνται, λαμβάνονται και οι σταθερές χημικής ισορροπίας, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$K_1 = \frac{P_{CH_4}}{(P_{H_2})^2} \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{P_{CO_2}P_{H_2}}{P_{CO}P_{H_2O}} \quad (4)$$

- Για τους κύριους υπολογισμούς που αφορούν την αεριοποίηση χρησιμοποιείται η ολική αντίδραση αεριοποίησης, η οποία μπορεί να γραφτεί ως εξής:



Επεξήγηση αντίδρασης:

- ο όρος $C_xH_yO_z$ είναι η αναλογία του προς αεριοποίηση καυσίμου και προκύπτει από τη στοιχειακή του σύσταση
- ο όρος w είναι η ποσότητα υγρασίας ανά kmol RDF και δίνεται από τη σχέση $w = \frac{MB_{RDF} * MC}{MB_{H_2O} * (1 - MC)}$, όπου $MC = \frac{\text{υγρασ ία [\% κ.β.]}}{RDF \text{ απουσ ία τέφρας [\% κ.β.]}}$.
- ο όρος m είναι η ποσότητα οξυγόνου ανά kmol RDF
- οι όροι x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 είναι οι συντελεστές στην αντίδραση των συστατικών των προϊόντων.

Τελικά, οι άγνωστοι κατά την επίλυση του προβλήματος είναι 6: x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 και m . Συνεπώς, απαιτούνται 6 εξισώσεις, οι οποίες σχηματίζονται από τους ισολογισμούς μάζας του άνθρακα, του υδρογόνου και του οξυγόνου μεταξύ αντιδρώντων και προϊόντων, από τις εξισώσεις των σταθερών χημικής ισορροπίας οι οποίες μπορούν να γραφτούν ως:

$$K_1 = \frac{x_5}{x_1^2} \quad \text{και} \quad K_2 = \frac{x_1 x_3}{x_2 x_4}$$

και ως έκτη εξίσωση λαμβάνεται ο ισολογισμός ενέργειας της διαδικασίας αεριοποίησης, η οποία θεωρείται αδιαβατική.

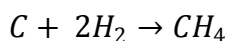
Σημειώνεται εδώ πως οι σταθερές K_1 και K_2 εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία και μπορούν να υπολογιστούν από τη συνάρτηση σχηματισμού του Gibbs, συναρτήσει της θερμοκρασίας αεριοποίησης και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

3.3.2. Αποτελέσματα μοντέλου αεριοποίησης

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναλύθηκε παραπάνω, τίθεται για το βασικό σενάριο η θερμοκρασία αεριοποίησης στους 800° C, η θερμοκρασία περιβάλλοντος στους 20° C και η στοιχειακή σύσταση του RDF όπως δόθηκε στον πίνακα 3.4. Η αεριοποίηση πραγματοποιείται σε ατμοσφαιρική πίεση.

Υπολογίζεται επιπλέον και η θερμογόνος ικανότητα του πρωτεύοντος καυσίμου (ως έχει) από τη σχέση $LHV = 34834c + 93868h + 10132s + 5945n - 10802o$ ίση με 16,193 [MJ/kg] (N. Παπαγεωργίου, Ατμοπαραγωγί Ι).

Κατά την υλοποίηση του μοντέλου γίνεται μία επιπλέον υπολογιστική παραδοχή, πως από τη συνολική συγκέντρωση του άνθρακα στο RDF, ποσοστό 1,20% για το βασικό σενάριο μετατρέπεται απευθείας σε μεθάνιο, και δε λαμβάνεται υπ' όψιν στους υπολογισμούς της σύστασης του αερίου σύνθεσης. Το ίδιο συμβαίνει ως επακόλουθο για ποσοστό υδρογόνου αντίστοιχο του άνθρακα που λαμβάνεται από την αρχική σύσταση (0,40% στην προκειμένη περίπτωση). Η υπολογιστική παραδοχή προέρχεται από την αντίδραση αεριοποίησης του υδρογόνου, που αναφέρεται εδώ για λόγους πληρότητας:



η οποία λαμβάνει χώρα στην αρχή της διαδικασίας, όπου υπάρχει ακόμα στερεός άνθρακας (U. Arena, 2012).

Τελικά, η στοιχειακή σύσταση του RDF που λαμβάνεται υπ' όψιν στην αεριοποίηση δίνεται στον πίνακα 3.5.

Από τη σύσταση αυτή υπολογίζεται η στοιχειακή αναλογία του RDF, ώστε να χρησιμοποιηθεί στην αντίδραση αεριοποίησης, ως $CH_{1.47}O_{0.45}$ για τον μπλε κάδο και $CH_{1.47}O_{0.55}$ για τον πράσινο κάδο.

Τα υπόλοιπα δεδομένα είναι τα εξής: $MB_{RDF,μπλε}=21$, $MB_{RDF,πράσινος}=23$, $MB_{H_2O}=18$, $MC=14.79$, $w=0.20$, $K_1=0.045$ και $K_2=0.505$.

Πίνακας 3.5: Στοιχειακή σύσταση RDF ως έχει (μετά την υπολογιστική παραδοχή) [% κ. β.]		
	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος
C	38,40	29,07
C→CH ₄ κατευθείαν	1,20	1,20
H	4,71	0,40
H→CH ₄ κατευθείαν	0,40	3,56
O	22,79	21,15
N	0,47	0,52
S	0,32	0,22
Cl	0,08	0,03
Υγρασία	11,87	31,58
Τέφρα	19,76	12,28

Επίλυση του μοντέλου για τα παραπάνω δεδομένα καταλήγει στα αποτελέσματα του πίνακα 3.6, που αφορούν το αέριο σύνθεσης που παράχθηκε.

Πίνακας 3.6: Στοιχειακή σύσταση αερίου σύνθεσης

	Μπλε κάδος		Πράσινος κάδος	
	[% κ. ο.]	[% κ. β.]	[% κ. ο.]	[% κ. β.]
H ₂	16,32	1,39	14,48	1,24
CO	21,40	25,56	14,04	16,78
CO ₂	5,76	10,80	9,11	17,10
H ₂ O	8,69	6,67	18,59	14,28
CH ₄	3,02	2,06	3,32	2,27
N ₂	44,82	53,52	40,46	48,34

Σημαντικό στοιχείο είναι ότι ο λόγος αέρα-καυσίμου λ δεν τίθεται ως δεδομένο, αλλά είναι ανάμεσα στα εξαγόμενα αποτελέσματα και συγκεκριμένα προκύπτει ίσος με 0,43 στην περίπτωση του RDF από μπλε κάδο και 0,46 για την περίπτωση αυτού από πράσινο κάδο (το m της αντίδρασης αεριοποίησης).

Το αποτέλεσμα αυτό είναι πολύ κοντά σε αυτό που θα έπρεπε, σύμφωνα με τη μελέτη του [U. Arena, 2012](#), όπου αναφέρεται πως τα βέλτιστα αποτελέσματα στην αεριοποίηση δίνονται μεν για λ από 0,25-0,35, αλλά έως 0,50 είναι αποδεκτό.

Η σύγκριση μεταξύ του αερίου σύνθεσης από αεριοποίηση RDF με προέλευση από μπλε και από πράσινο κάδο μπορεί να επεκταθεί και σε άλλα στοιχεία που αφορούν το αέριο, όπως η κατώτερη θερμογόνος ικανότητά του, η οποία υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση

$$LHV = (126.36 * CO + 107.98 * H_2 + 358.18 * CH_4) * 10,$$

όπου τα CO, CH₄ και H₂O είναι η κατ' όγκο περιεκτικότητες των συστατικών στο αέριο σύνθεσης ([M. He et al., 2009](#)), το μοριακό του βάρος, η πυκνότητά του και το κλάσμα δυνατής παραγωγής αερίου σύνθεσης από το εκάστοτε καύσιμο τροφοδοσίας.

Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7: Λοιπά χαρακτηριστικά του αερίου σύνθεσης

	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος
Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα [MJ/Nm ³]	5,549	4,528
Μοριακό βάρος	23	23
Πυκνότητα [m ³ /kg]	1,0473	1,0469
Κλάσμα δυνατής παραγωγής αερίου σύνθεσης [Nm ³ αερίου/kg RDF]	2,685	2,462

Επιπλέον, η απόδοση του συστήματος υπολογίζεται σύμφωνα με τους παρακάτω δείκτες ([M. He et al., 2009](#)):

- Cold gas efficiency: $CGE = \frac{LHV_{syngas} * Y}{LHV_{RDF}} = 62,92\%$ για τον μπλε και 52,01% για τον πράσινο κάδο
- Carbon conversion efficiency: $CCE = \frac{12 * Y * (CO\% + CO_2\% + CH_4\%)}{22.4 * C\%} = 96,62\%$ για τον μπλε και 78,90% για τον πράσινο κάδο

όπου:

- Η κατώτερη θερμογόνος του αερίου είναι σε $[MJ/Nm^3]$
- Η κατώτερη θερμογόνος του RDF είναι σε $[MJ/kg]$
- Το μέγεθος Y εκφράζει το κλάσμα δυνατής παραγωγής αερίου σε $[Nm^3 \text{ αερίου}/kg \text{ RDF}]$
- Το μέγεθος $C\%$ εκφράζει την κατά βάρος περιεκτικότητα σε άνθρακα του RDF, για τη στοιχειακή σύσταση επί ξηρού
- Τα μεγέθη $CO\%$, $CO_2\%$ και $CH_4\%$ εκφράζουν την κατ' όγκο περιεκτικότητα του παραγόμενου αερίου στα αντίστοιχα συστατικά.

Από τους παραπάνω δείκτες, ο πρώτος εκφράζει το λόγο της χημικής ενέργειας του παραγόμενου αερίου προς τη χημική ενέργεια του RDF με το οποίο τροφοδοτείται η εγκατάσταση. Ο όρος “cold” υποδηλώνει ότι δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν η λανθάνουσα θερμότητα του αερίου. Τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι πολύ ικανοποιητικά και για τα δύο σενάρια RDF, με τον δείκτη να είναι υψηλότερος για τον μπλε κάδο λόγω κυρίως του υψηλότερου κλάσματος παραγωγής αερίου σύνθεσης από το αντίστοιχο RDF.

Ο δεύτερος δείκτης δίνει μία ένδειξη για την ποσότητα του πρωτεύοντος καυσίμου που δε μετασχηματίστηκε κατά την αεριοποίηση και πρέπει να υποστεί επεξεργασία πριν απορριφθεί σε χώρο ταφής. Ουσιαστικά παρέχει ένα μέσο εκτίμησης της χημικής αποδοτικότητας της εγκατάστασης. Τα αποτελέσματα προκύπτουν και σε αυτή την περίπτωση πολύ ικανοποιητικά, ενώ όπως και προηγουμένως, ο δείκτης είναι υψηλότερος για τον μπλε κάδο λόγω της σύστασης του παραγόμενου αερίου και λόγω του κλάσματος παραγωγής αερίου σύνθεσης.

3.3.3. Ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με τη θερμοκρασία αεριοποίησης

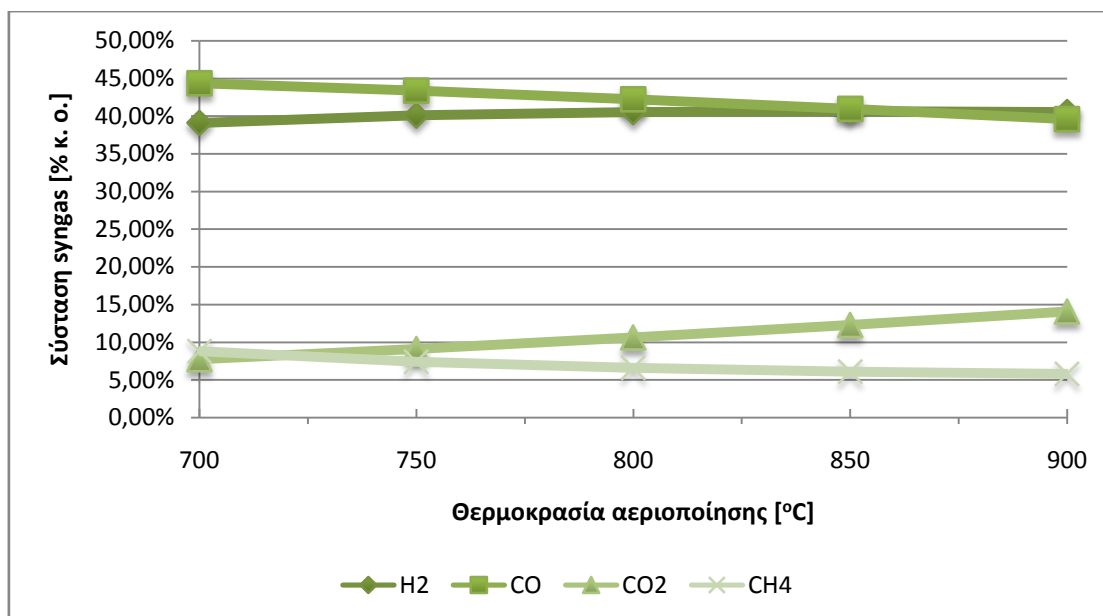
Στο παρόν υποκεφάλαιο γίνεται ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου σε σχέση με τη θερμοκρασία αεριοποίησης, μόνο για το σενάριο του μπλε κάδου.

Πιο συγκεκριμένα, στο παρόν μοντέλο η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει αύξηση και στο λόγο αέρα – καυσίμου. Συνεπώς, η μετακίνηση κοντύτερα στη στοιχειομετρία σημαίνει μετακίνηση πιο κοντά στην τέλεια καύση, οπότε σχηματίζεται περισσότερο CO_2 σε βάρος του CO .

Επιπλέον, στις υψηλές θερμοκρασίες, το οξυγόνο προτιμά να αντιδράσει με τον άνθρακα για να σχηματίσει CO και CO_2 , παρά με το υδρογόνο για να σχηματίσει νερό. Συνεπώς, η συγκέντρωση υδρογόνου αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας δίνονται στον πίνακα 3.8 και στο διάγραμμα 3.1.

Πίνακας 3.8: Σύσταση syngas επί ξηρού [% κ. ο.] συναρτήσει της θερμοκρασίας					
Συστατικό	700°	750°	800°	850°	900°
Υπολογισμοί					
H₂	39,09	40,08	40,54	40,65	40,53
CO	44,35	43,37	42,23	40,97	39,62
CO₂	7,76	9,12	10,64	12,29	14,05
CH₄	8,80	7,42	6,59	6,09	5,80



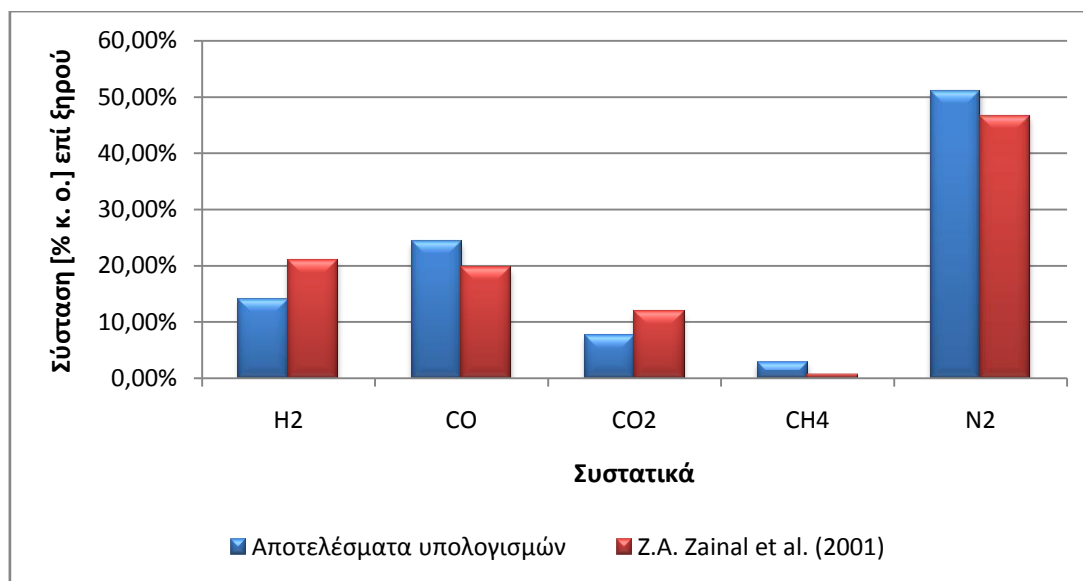
Διάγραμμα 3.1: Σύσταση syngas συναρτήσει της θερμοκρασίας αεριοποίησης

3.4. Εγκυρότητα μοντέλου

3.4.1 Σύγκριση υπολογιζόμενης σύστασης syngas με την αντίστοιχη της βιβλιογραφίας

Εφαρμογή του μοντέλου για δεδομένα σύμφωνα με αυτά της μελέτης πάνω στην οποία βασίστηκε, έδειξε αρκετά καλή συμπεριφορά. Η σύγκριση έγινε για 800° C και για αναλογία βιομάζας CH_{1,44}O_{0,66} (αντίστοιχη με των Z. A. Zainal et al., 2001). Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 3.9 και σχηματικά στο διάγραμμα 3.2.

Πίνακας 3.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία [% κ. ο. επί ξηρού]		
	Υπολογισμοί	Βιβλιογραφία
H ₂	14,01	21,06
CO	24,34	19,61
CO ₂	7,63	12,01
CH ₄	2,93	0,64
N ₂	51,09	46,68



Διάγραμμα 3.2: Σύγκριση με τη βιβλιογραφική αναφορά

Η μόνη διαφορά από το μοντέλο της βιβλιογραφίας είναι η υπολογιστική παραδοχή για τον απευθείας σχηματισμό του μεθανίου, η οποία επιφέρει και τις διαφορές που παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα.

3.4.2. Σύγκριση με βάση την υγρασία του RDF

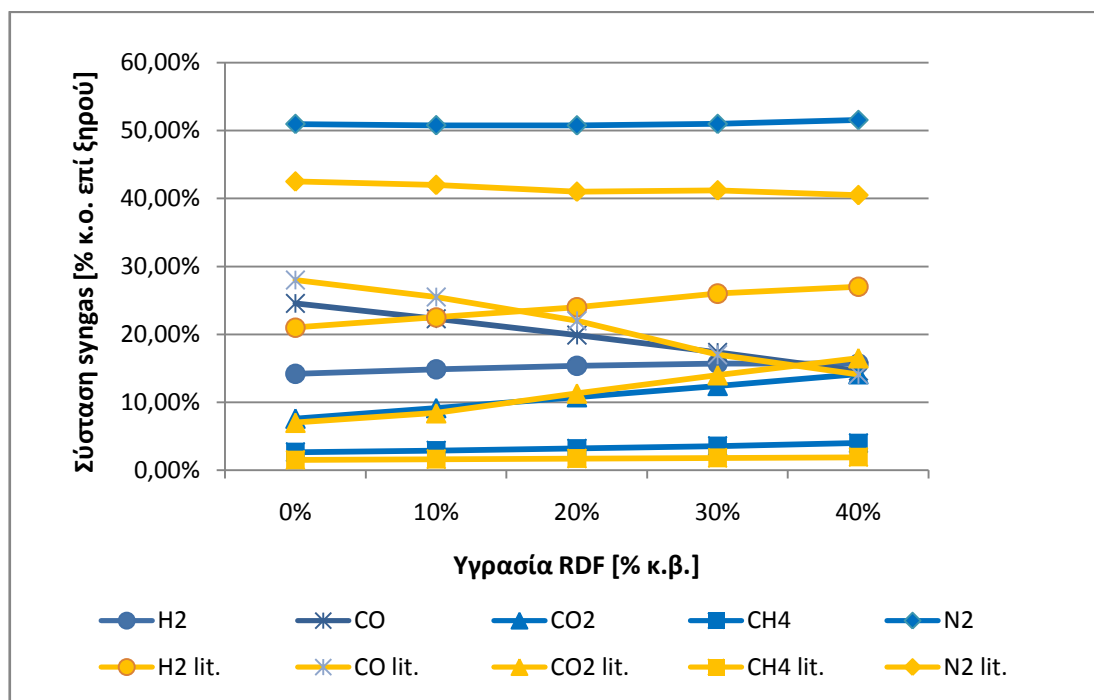
Επιπλέον, στη βιβλιογραφική μελέτη γινόταν και μία ανάλυση ευαισθησίας της σύστασης του syngas συναρτήσει του ποσοστού υγρασίας που περιείχε η αρχική βιομάζα που αεριοποιήθηκε.

Στην προκειμένη περίπτωση, το μοντέλο παρουσιάζει ακριβώς ίδια συμπεριφορά συγκριτικά με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής αναφοράς, με τα συστατικά του παραγόμενου αερίου να εμφανίζουν την ίδια τάση σχηματισμού όσο αυξάνεται η υγρασία του καυσίμου τροφοδοσίας.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ίδια τάση με αυτή που παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία και παρουσιάζονται στον πίνακα 3.10 και στο διάγραμμα 3.3.

Συστατικό	0%	10%	20%	30%	40%
Υπολογισμοί					
H ₂	14,20	14,86	15,38	15,69	15,68
CO	24,57	22,30	19,90	17,36	14,62
CO ₂	7,59	9,15	10,75	12,42	14,14
CH ₄	2,65	2,90	3,19	3,55	3,99
N ₂	50,98	50,80	50,78	50,99	51,57

Βιβλιογραφία (λήφθηκαν προσεγγιστικά από το διάγραμμα)					
H ₂	21,00	22,50	24,00	26,00	27,00
CO	28,00	25,50	22,00	17,00	14,10
CO ₂	7,00	8,40	11,30	14,00	16,50
CH ₄	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90
N ₂	42,50	42,00	41,00	41,20	40,50



Διάγραμμα 3.3: Ανάλυση ευαισθησίας της σύστασης syngas σε σχέση με την υγρασία του RDF

Κεφάλαιο 4^ο

Υπολογισμός περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου βάσει των αρχών της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

4.1 Γενικά

Προκειμένου να γίνει η σύγκριση της μεθόδου που εξετάζεται με τη μέθοδο διαχείρισης απορριμμάτων που εφαρμόζεται αυτή τη στιγμή στην Ελλάδα, όσον αφορά την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, βάσει των αρχών της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, πρέπει να οριστούν μερικά βασικά σημεία της μεθοδολογίας της ΑΚΖ. Θα ορισθούν λεπτομερώς παρακάτω τα εξής:

- Τα όρια του συστήματος στο οποίο πραγματοποιείται η σύγκριση.
- Η λειτουργική μονάδα του συστήματος.

Επιπλέον, όσον αφορά τη μεθοδολογία υπολογισμού των ισοδυνάμων διοξειδίου του άνθρακα, γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις για τους παράγοντες συνεισφοράς του κάθε αερίου (IPCC, 2007):

- $CO_{2,fossil}=1$
- $CO_{2,biogenic}=0$
- $CH_{4,fossil}=25$
- $CH_{4, biogenic}=0$
- $CO=1.9$

Το μονοξείδιο του άνθρακα θεωρείται δυναμικά αέριο του θερμοκηπίου. Το γεγονός ότι περιέχεται στο αέριο σύνθεσης θεωρείται ότι συνεισφέρει στο φαινόμενο ως έμμεση εκπομπή αερίου του θερμοκηπίου, εφόσον σε περίπτωση καύσης του αερίου σε υπερστοιχειομετρικές συνθήκες (όπως συμβαίνει σε όλες τις μηχανές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί), μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα.

Όλοι οι δείκτες αφορούν την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε βάση 100 χρόνων.

4.2 Υπολογισμός δείκτη επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Global Warming Potential Factor)

Αρχικά, αναφορικά με τη μεθοδολογία ΑΚΖ, σημειώνεται ότι στην προκειμένη περίπτωση τα όρια του συστήματος περιλαμβάνουν το παραγόμενο αέριο σύνθεσης από την εγκατάσταση, ώστε να υπολογιστεί η άμεση επίδρασή του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου εάν απελευθερωνόταν στην ατμόσφαιρα μετά την παραγωγή του (προκειμένου να συγκριθεί στη συνέχεια με της άμεσες εκπομπές αερίου προερχόμενου από χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων).

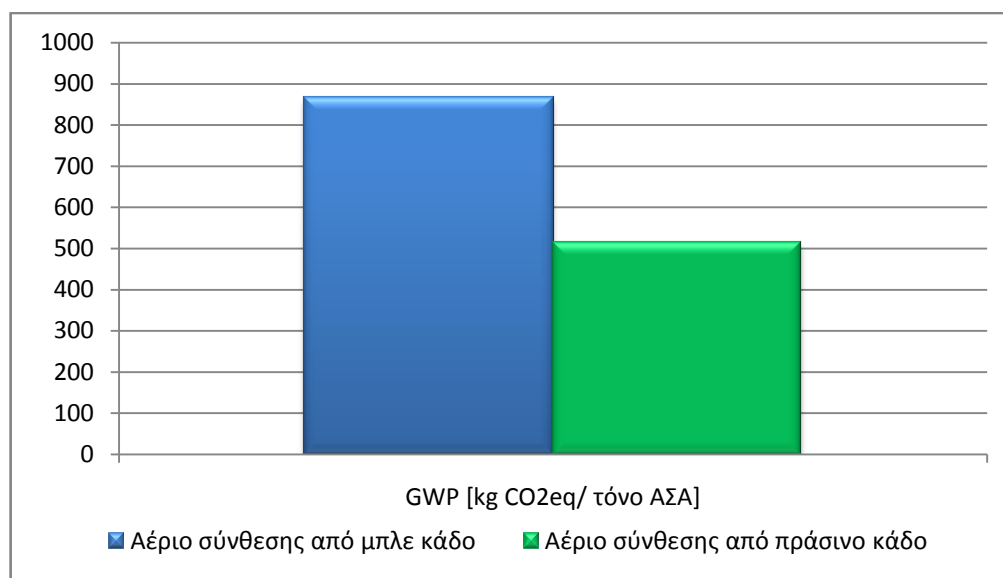
Για τον υπολογισμό του δείκτη επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου για τα δύο βασικά σενάρια του μπλε και του πράσινου κάδου, λαμβάνονται υπ' όψιν το CO_2 , το CO και το CH_4 που περιέχονται στο αέριο, όπως επίσης και το βιογενές κλάσμα του RDF όπως υπολογίστηκε προηγουμένως, δεδομένου ότι θα είναι το ίδιο και για το αέριο σύνθεσης που παράγεται από την αεριοποίησή του.

Δίνεται ο εν λόγω δείκτης που υπολογίστηκε για το βασικό σενάριο του μπλε και του πράσινου κάδου στον πίνακα 4.1, σε τέσσερις χρήσιμες μορφές, και η σύγκρισή των δύο περιπτώσεων εποπτικά στο διάγραμμα 4.1.

Από αυτές, ο 1 τόνος ΑΣΑ αποτελεί και τη λειτουργική μονάδα του συστήματος, βασική για τη σύγκριση που θα γίνει παρακάτω με τη μέθοδο απόθεσης σε ΧΥΤΑ (ώστε να συμβαδίζει με τη μονάδα της μεθόδου απόθεσης).

Πίνακας 4.1: Περιβαλλοντικός δείκτης Global Warming Potential

	[kg CO _{2eq} /τόνο RDF]	[kg CO _{2eq} /τόνο ΑΣΑ]	[kg CO _{2eq} / kg syngas]	[kg CO _{2eq} / MJ]
GWP_{μπλε}	1381,55	865,67	0,491	0,091
GWP_{πράσινο}	617,98	513,54	0,240	0,055



Διάγραμμα 4.1: Σύγκριση της επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

Από το διάγραμμα φαίνεται πως η αέριο σύνθεσης που παράγεται με αεριοποίηση RDF το οποίο προέρχεται από πράσινο κάδο έχει μικρότερη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διαφορά του βιογενούς ποσοστού των δύο RDF, η οποία είναι της τάξης του 20%, ενώ και στη σύσταση του συνθετικού αερίου παρατηρείται αρκετά αυξημένο ποσοστό CO στην περίπτωση του μπλε κάδου, το οποίο συμβάλλει στην αύξηση του υπολογιζόμενου δείκτη.

4.3 Ανάλυση ευαισθησίας του συστήματος σε σχέση με την ανάκτηση χαρτιού και πλαστικού

Με σκοπό να εξεταστεί το κατά πόσο τα αποτελέσματα του μοντέλου αεριοποίησης RDF επηρεάζονται από την ποιοτική σύστασή του, κατά συνέπεια από την ανάκτηση υλικών – και συγκεκριμένα από την ανάκτηση χαρτιού και πλαστικού – πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας, όπως περιγράφεται παρακάτω:

Με αρχική σύσταση απορριμμάτων αυτή του πίνακα 3.1, και θεωρώντας ότι το RDF του εκάστοτε βασικού σεναρίου προέρχεται από αυτή τη σύσταση για χαμηλή ανάκτηση χαρτιού και πλαστικού (η ανάκτηση των υπολοίπων θεωρείται σταθερή στα σενάρια που ακολουθούν), εξετάζονται οι ακόλουθες περιπτώσεις και για τους δύο κάδους:

- Περίπτωση χαμηλού βαθμού ανάκτησης χαρτιού και πλαστικού
- Περίπτωση χαμηλού βαθμού ανάκτησης χαρτιού, υψηλού βαθμού ανάκτησης πλαστικού
- Περίπτωση υψηλού βαθμού ανάκτησης χαρτιού, χαμηλού βαθμού ανάκτησης πλαστικού
- Περίπτωση υψηλού βαθμού ανάκτησης χαρτιού και πλαστικού

Περίπτωση 1: χαμηλός βαθμός ανάκτησης και για τα δύο υλικά

Σε αυτή την περίπτωση, που στην ουσία αφορά τα βασικά σενάρια τα οποία εξετάστηκαν λεπτομερώς παραπάνω, θεωρείται ότι πραγματοποιείται ανάκτηση χαρτιού και πλαστικού 30% επί της συγκέντρωσης καθενός από τα δύο υλικά στο αρχικό ρεύμα των απορριμμάτων για το μπλε κάδο και αντίστοιχη ανάκτηση 10% για τον πράσινο κάδο (δεδομένου ότι η ανάκτηση είναι πιο περίπλοκη στην περίπτωση του πράσινου κάδου). Η ποσοτικοποίηση των ποσοστών ανάκτησης στην προκειμένη φάση είναι απαραίτητη, χωρίς αυτό να προκαλεί βλάβη της γενικότητας της περίπτωσης χαμηλού βαθμού ανάκτησης.

Περίπτωση 2: χαμηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & υψηλός πλαστικού

Πραγματοποιείται ανάκτηση χαρτιού ίση με προηγουμένως, δηλαδή 30% για τον μπλε κάδο και 10% για τον πράσινο, ενώ για το πλαστικό ισχύει ανάκτηση 60% και 30% αντίστοιχα.

Περίπτωση 3: υψηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & χαμηλός πλαστικού

Αντίστροφη της περίπτωσης 2, με ποσοστό ανάκτησης χαρτιού 60% για το μπλε και 30% για τον πράσινο κάδο και πλαστικού 30% και 10% αντίστοιχα.

Περίπτωση 4: υψηλός βαθμός ανάκτησης και για τα δύο υλικά

Εδώ ανακτώνται 60% του χαρτιού και του πλαστικού για τον μπλε κάδο και 30% αντίστοιχα για τον πράσινο.

Τα αποτελέσματα δίνονται συνοπτικά στους πίνακες 4.2 – 4.4 και εποπτικά στα διαγράμματα 4.2 – 4.5.

Πίνακας 4.2: Σύσταση του RDF προς αεριοποίηση [% κ. β.]

	Χαμηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – μπλε κάδος	Χαμηλή ανάκτηση χαρτιού & υψηλή πλαστικού – μπλε κάδος	Υψηλή ανάκτηση χαρτιού & χαμηλή πλαστικού – μπλε κάδος	Υψηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – μπλε κάδος	Χαμηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – πράσινος κάδος	Χαμηλή ανάκτηση χαρτιού & υψηλή πλαστικού – πράσινος κάδος	Υψηλή ανάκτηση χαρτιού & χαμηλή πλαστικού – πράσινος κάδος	Υψηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – πράσινος κάδος
Οργανικά	11,98	14,10	13,65	16,47	40,91	42,34	43,98	45,64
Χαρτί	26,50	31,19	16,26	19,62	29,66	30,70	24,39	25,30

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

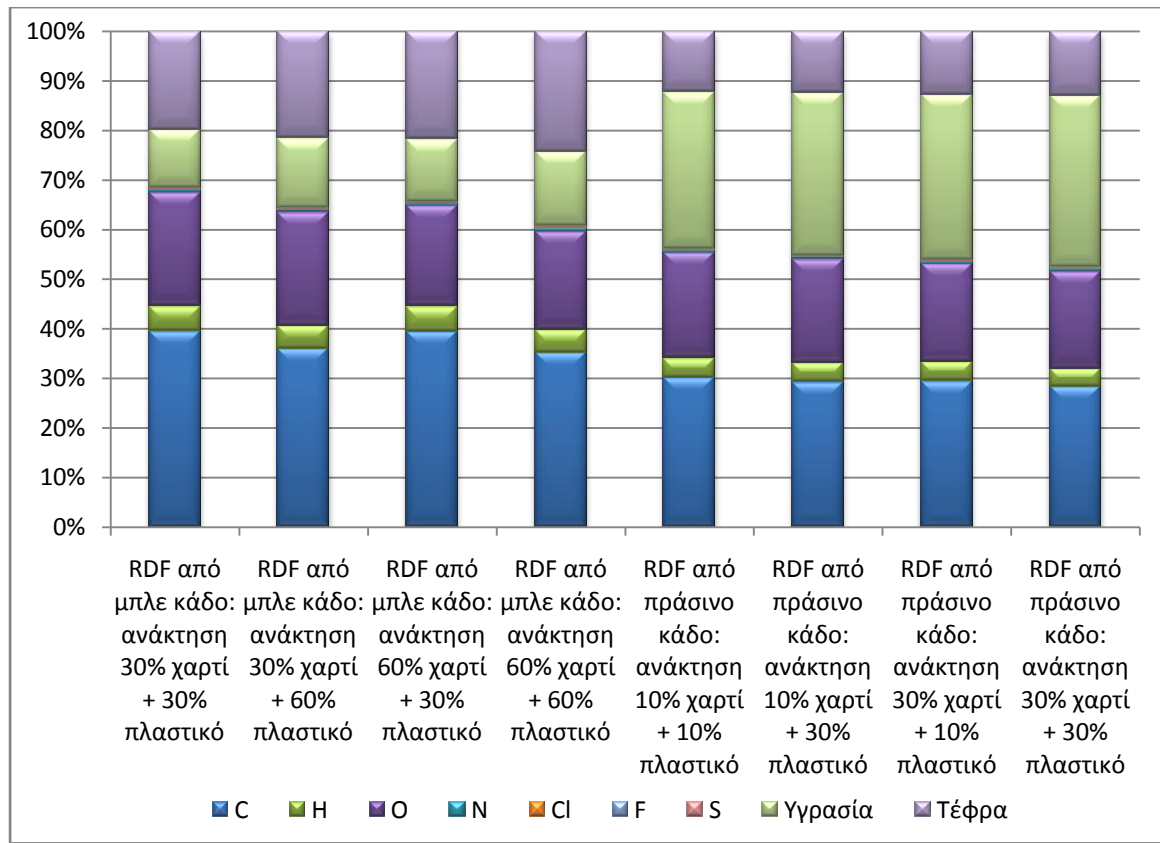
Πλαστικό	32,59	20,66	37,13	24,13	14,32	11,33	15,39	12,21
Υφάσματα	6,45	7,59	7,35	8,87	2,29	2,37	2,46	2,55
Σιδηρούχα μέταλλα	2,50	2,94	2,85	3,44	0,36	0,37	0,39	0,40
Μη σιδηρούχα μέταλλα	1,50	1,77	1,71	2,06	0,18	0,19	0,19	0,20
Γυαλί	2,00	2,35	2,28	2,75	1,99	2,05	2,13	2,21
Ξύλο – Δέρμα	4,42	5,20	5,04	6,08	1,71	1,77	1,84	1,91
Αδρανή	5,39	6,34	6,14	7,41	3,43	3,55	3,69	3,83
Άλλα	6,67	7,85	7,60	9,17	5,14	9,46	5,53	5,74

Πίνακας 4.3: Σύσταση του αερίου σύνθεσης [% κ. ο.]

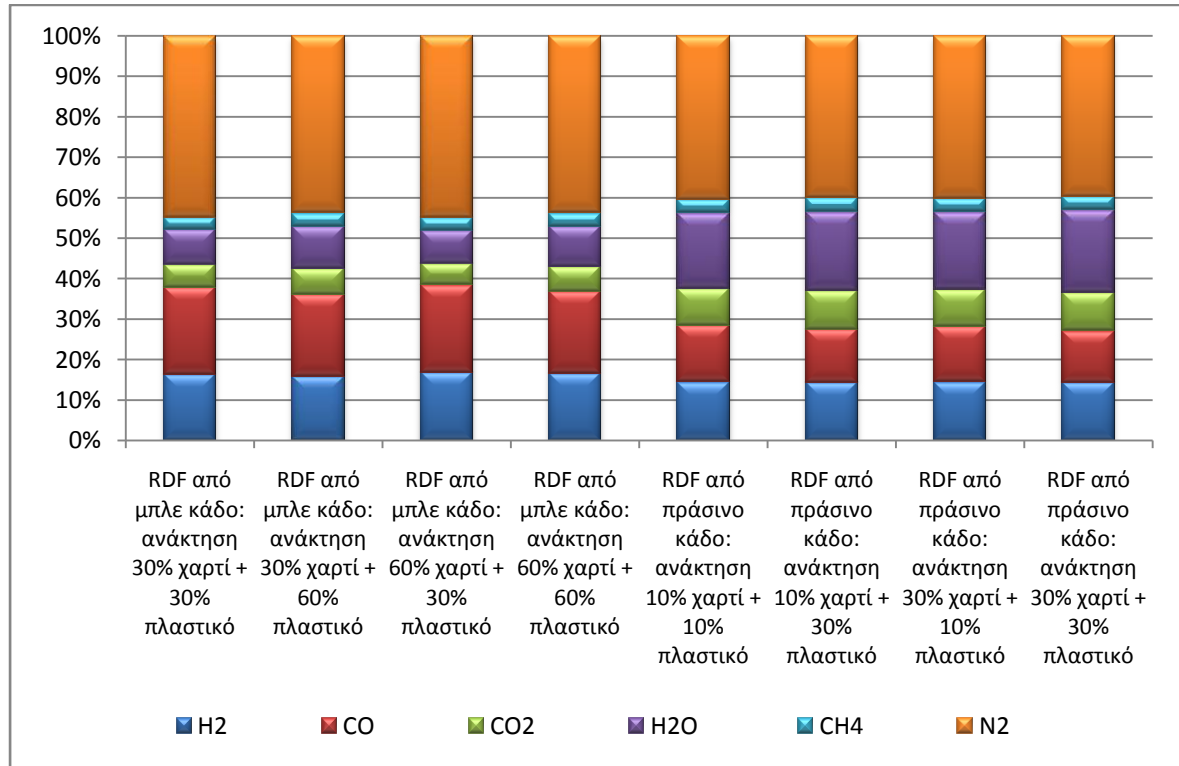
	Χαμηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – μπλε κάδος	Χαμηλή ανάκτηση χαρτιού & υψηλή πλαστικού – μπλε κάδος	Υψηλή ανάκτηση χαρτιού & χαμηλή πλαστικού – μπλε κάδος	Υψηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – μπλε κάδος	Χαμηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – πράσινος κάδος	Χαμηλή ανάκτηση χαρτιού & υψηλή πλαστικού – πράσινος κάδος	Υψηλή ανάκτηση χαρτιού & χαμηλή πλαστικού – πράσινος κάδος	Υψηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – πράσινος κάδος
H ₂	16,32	16,30	16,79	16,59	14,48	14,21	14,56	14,25
CO	21,40	20,02	21,69	20,16	14,04	13,43	13,65	12,97
CO ₂	5,76	6,55	5,35	6,16	9,11	9,36	9,09	9,35
H ₂ O	8,69	10,37	8,20	10,04	18,59	19,60	19,18	20,33
CH ₄	3,02	3,22	3,05	3,30	3,32	3,37	3,36	3,42
N ₂	44,82	43,80	44,92	43,76	40,46	40,02	40,17	39,68

Πίνακας 4.4: Σύσταση του RDF προς αεριοποίηση [% κ. β.]

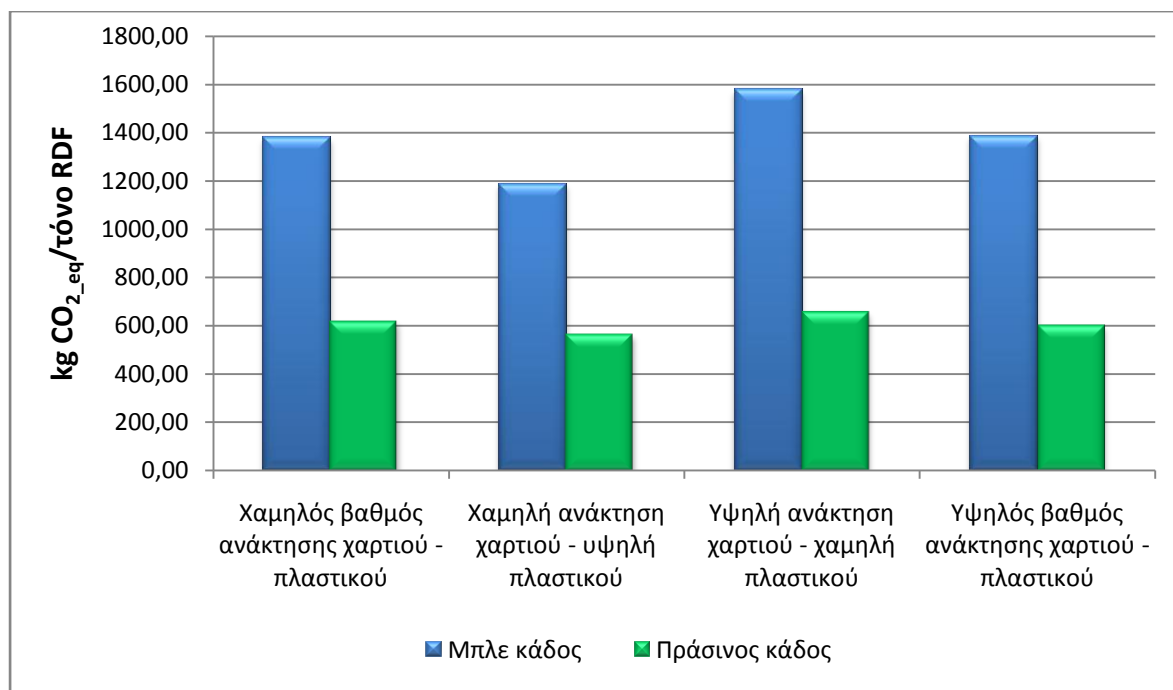
	Χαμηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – μπλε κάδος	Χαμηλή ανάκτηση χαρτιού & υψηλή πλαστικού – μπλε κάδος	Υψηλή ανάκτηση χαρτιού & χαμηλή πλαστικού – μπλε κάδος	Υψηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – μπλε κάδος	Χαμηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – πράσινος κάδος	Χαμηλή ανάκτηση χαρτιού & υψηλή πλαστικού – πράσινος κάδος	Υψηλή ανάκτηση χαρτιού & χαμηλή πλαστικού – πράσινος κάδος	Υψηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού & πλαστικού – πράσινος κάδος
GWP [kg CO _{2eq} /τόνο RDF]	1381,55	1188,19	1581,10	1386,85	617,98	565,03	658,67	602,66
GWP [kg CO _{2eq} /τόνο ΑΣΑ]	865,66	632,53	869,54	632,00	513,54	453,72	509,15	448,98
LHV [MJ/kg]	5,298	5,168	5,424	5,309	4,325	4,240	4,315	4,221



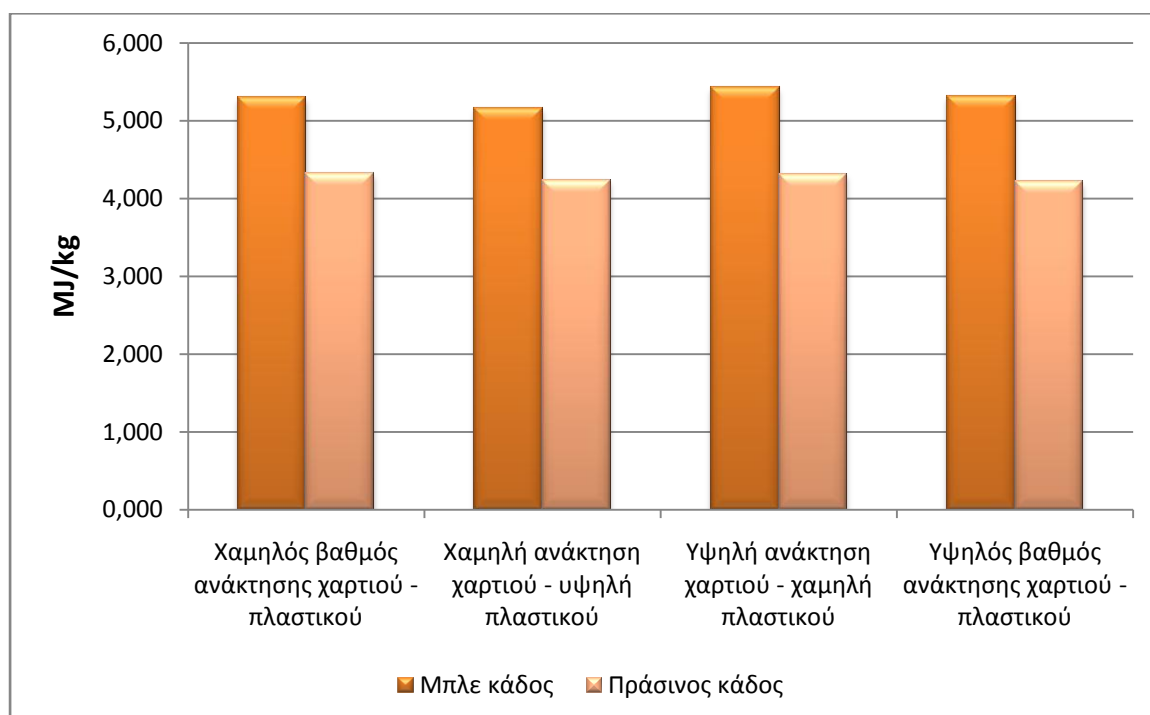
Διάγραμμα 4.2: Στοιχειακή σύσταση RDF [% w/w]



Διάγραμμα 4.3: Στοιχειακή σύσταση syngas [% v/v]



Διάγραμμα 4.4: Δείκτης GWP syngas [kg CO₂eq/ τόνο RDF]



Διάγραμμα 4.5: Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα syngas [MJ/kg]

Από τα παραπάνω μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Καταρχάς, όσον αφορά στη στοιχειακή σύσταση του RDF από τους δύο κάδους, παρατηρείται διαφορά στη συγκέντρωση άνθρακα, υγρασίας και τέφρας μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Αυτή η διαφορά οφείλεται στην υψηλή συγκέντρωση οργανικών και τη χαμηλή συγκέντρωση πλαστικού στην περίπτωση του πράσινου κάδου, με αποτέλεσμα την υψηλότερη υγρασία, το χαμηλότερο ποσοστό άνθρακα και το χαμηλότερο ποσοστό τέφρας. Αντίθετα αποτελέσματα εξάγονται για τον

μπλε κάδο, όπου η συγκέντρωση οργανικών είναι πολύ χαμηλότερη ενώ του πλαστικού αρκετά υψηλή.

- Όσον αφορά τη σύσταση του παραγόμενου αερίου, οι διακυμάνσεις στη συγκέντρωση των συστατικών είναι πολύ μικρές, συγκριτικά με την ανάκτηση υλικών για τον εκάστοτε κάδο. Πιο συγκεκριμένα, για το υδρογόνο διαφαίνεται μικρή αύξηση όσο μειώνεται το χαρτί στο πρωτεύον καύσιμο, ενώ μικρή μείωση όσο μειώνεται το πλαστικό (μεγαλύτερη ανάκτηση). Για το μονοξειδίο το άνθρακα παρατηρείται μείωση όσο αυξάνεται το ποσοστό ανάκτησης πλαστικού, αλλά καμία σημαντική αλλαγή αναφορικά με το χαρτί, ενώ το αντίστροφο ισχύει για το διοξειδίο του άνθρακα (αυξάνεται όσο αυξάνεται η ανάκτηση πλαστικού). Ο υδρατμός που περιέχεται στο αέριο, όπως και το μεθάνιο, ακολουθούν αντίστοιχη συμπεριφορά με το CO₂, ο δεύτερο με πολύ μικρότερη διακύμανση και με μέγιστη τιμή στην παράλληλη υψηλή ανάκτηση (περίπτωση 60-60).

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από τους δύο κάδους μεταξύ τους, διαφαίνεται ότι η συγκέντρωση υδρατμού στο αέριο σύνθεσης είναι υψηλότερη στην περίπτωση που το αεριοποιηθέν RDF προέρχεται από πράσινο κάδο ενώ παράλληλα η συγκέντρωση μονοξειδίου είναι μικρότερη, πράγμα που οφείλεται στη διάκριση που έγινε παραπάνω, όσον αφορά στη συγκέντρωση οργανικού στο πρωτεύον καύσιμο. Τα υπόλοιπα συστατικά του αερίου δεν παρουσιάζουν κάποια αξιοσημείωτη διαφορά.

- Για τον παράγοντα επίδρασης του παραγόμενου συνθετικού αερίου στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (GWP), παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό ανάκτησης πλαστικού και στις δύο περιπτώσεις κάδων, δηλαδή μειώνεται η συγκέντρωσή του στο πρωτεύον καύσιμο (RDF), τόσο μειώνεται ο δείκτης επίδρασης GWP. Με άλλα λόγια, αφαιρώντας περισσότερο μη βιογενές υλικό, ενισχύεται το συνολικό βιογενές κλάσμα του καυσίμου που αεριοποιείται και παράλληλα του παραγόμενου αερίου (το οποίο φυσικά λαμβάνεται υπ' όψιν στον υπολογισμό του δείκτη). Αντίθετα, όσο αυξάνεται το ποσοστό ανάκτησης χαρτιού (είτε με υψηλή, είτε με χαμηλή παράλληλη ανάκτηση πλαστικού) μειώνεται το τελικό βιογενές ποσοστό του RDF, συνεπώς το GWP αυξάνεται (χαρακτηριστική είναι η περίπτωση 3, με υψηλή ανάκτηση χαρτιού και χαμηλή πλαστικού, που παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή GWP από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και για τον μπλε και για τον πράσινο κάδο).

Τελικά, το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι η υψηλή συγκέντρωση χαρτιού στη σύσταση του RDF ενισχύει τον βιογενή χαρακτήρα του πρωτεύοντος και άρα του δευτερεύοντος καυσίμου, ενώ αντίθετα, η υψηλή συγκέντρωση πλαστικού τον υπονομεύει.

Η διαφορά μεταξύ του αποτελέσματος του μπλε και του πράσινου κάδου έχει εξηγηθεί παραπάνω.

- Όσον αφορά την κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του αερίου, διαφαίνεται πως μειώνεται όσο μειώνεται η συγκέντρωση του πλαστικού στο RDF, και για τον μπλε και για τον πράσινο κάδο (χαρακτηριστική είναι η περίπτωση 3, όπου συναντάται η υψηλότερη κατώτερη θερμογόνος ικανότητα από τις 4 περιπτώσεις, για υψηλή ανάκτηση χαρτιού και χαμηλή πλαστικού).

Το συνολικό συμπέρασμα που εξάγεται όσον αφορά την ανάκτηση υλικών, ανεξαρτήτως από πού προέρχεται το προς αεριοποίηση RDF, είναι πως ο βαθμός ανάκτησης χαρτιού

και πλαστικού που θα επιδιωχθεί τελικά εξαρτάται άμεσα από την εφαρμογή στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί το παραγόμενο.

Αυτό πρακτικά σημαίνει πώς εάν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογή με επιζητούμενη υψηλή ηλεκτροπαραγωγή, θα απαιτηθεί υψηλή θερμογόνος ικανότητα του αερίου, συνεπώς θα πρέπει να ανακτηθεί λιγότερο πλαστικό.

Αντίθετα, εάν το ζητούμενο δεν είναι η υψηλή ηλεκτροπαραγωγή αλλά απαιτείται το αέριο να έχει τη μικρότερη δυνατή επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, θα επιδιωχθεί η μέγιστη δυνατή ανάκτηση του πλαστικού έναντι αυτής του χαρτιού, ώστε όπως προαναφέρθηκε να ενισχυθεί ο βιογενής χαρακτήρας του.

4.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου με άλλη μέθοδο διαχείρισης (απόθεση σε ΧΥΤΑ)

Η σύγκριση της μεθόδου της αεριοποίησης με τη μέθοδο της απόθεσης σε ΧΥΤΑ, η οποία αποτελεί μοναδική πρακτική αντιμετώπισης του προβλήματος των απορριμμάτων αυτή τη στιγμή στην Ελλάδα, συμπληρώνει τα παραπάνω, δεδομένου ότι τελικός στόχος είναι η εύρεση φιλικότερων προς το περιβάλλον μεθόδων.

Για ΑΣΑ ίδιας αρχικής σύστασης (εφόσον της αεριοποίησης προηγείται ανάκτηση υλικών), γίνεται η σύγκριση αναφορικά με τον δείκτη επίδρασης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Η σύγκριση με τη μέθοδο της απόθεσης γίνεται σύμφωνα με τρεις βιβλιογραφικές πηγές, από τις οποίες υπολογίζεται η παραγωγή (κυρίως) μεθανίου από χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, όπως εξηγείται παρακάτω, με σκοπό να υπολογιστεί ένα εύρος εκπομπών ισοδύναμων διοξειδίου του άνθρακα για την περίπτωση που, αντί να γίνει η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, τα απορρίμματα καταλήξουν σε ΧΥΤΑ.

- Σύμφωνα με τους [S. Manfredi et al., 2009](#), μπορεί να γίνει υπολογισμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα υλικά που περιέχουν βιοαποδομήσιμο κλάσμα. Υπολογίζοντας τον βιογενή άνθρακα [kg C/ τόνο ΑΣΑ] που περιέχει το εκάστοτε υλικό για συγκεκριμένη σύσταση και ποσότητα ΑΣΑ και χρησιμοποιώντας έναν παράγοντα ανομοίωσης του άνθρακα αυτού σε βιοαέριο (dissimilation factor – D_{LFG}), καθώς και την παραδοχή πως το 55% του άνθρακα γίνεται μεθάνιο, ενώ το υπόλοιπο 45% γίνεται διοξείδιο του άνθρακα, δίνεται σαν αποτέλεσμα η ολική ποσότητα αερίων που εκλύονται (σε περίοδο 100 χρόνων).

Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως επειδή ο D_{LFG} δινόταν από τη βιβλιογραφία μόνο για τα οργανικά, το χαρτί και το ξύλο, έγινε μία εκτίμηση για το δείκτη όσον αφορά το πλαστικό (που, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι βιογενές κατά ένα ποσοστό) και τα υφάσματα, ώστε εφόσον βιοαποδομούνται, να ληφθεί υπ' όψιν η συνεισφορά τους.

Η εκτίμηση αυτή έγινε αναλογικά, με βάση το βιογενές ποσοστό του κάθε υλικού αλλά και το πόσο γρήγορα διασπάται σε συνθήκες ταφής. Πιο συγκεκριμένα, το πλαστικό είναι βιοαποδομήσιμο κατά ένα ποσοστό αλλά δε διασπάται το ίδιο εύκολα όσο τα οργανικά υλικά, ενώ τα υφάσματα έχουν μεγαλύτερο βιογενές

κλάσμα και διασπώνται ευκολότερα. Οι δείκτες και οι εκτιμήσεις που έγιναν δίνονται στον πίνακα 4.6.

- Οι [D. Kong et al., 2012](#), θεωρούν τον παράγοντα L_0 δημιουργίας μεθανίου σε $[m^3/τόνο]$ για τις διάφορες κατηγορίες οργανικών. Λαμβάνοντας την πυκνότητά του μεθανίου ίση με $0,716 [kg/m^3]$, το βιοαποδομήσιμο κλάσμα του κάθε υλικού όπως έχει υπολογιστεί παραπάνω, τη συγκέντρωσή του στο ρεύμα των ΑΣΑ και τον παράγοντα L_0 υπολογίζεται πόσο μεθάνιο εκλύεται από την ταφή αυτών. Τονίζεται ότι από την προκείμενη πηγή έλειπαν τα στοιχεία δυνατότητας παραγωγής μεθανίου από τη διάσπαση του χαρτιού και του πλαστικού, για τα οποία έγινε εκτίμηση, όπου ακολουθήθηκε λογική αντίστοιχη με την παραπάνω, ώστε να υπολογιστεί η συνεισφορά τους (δίνονται επίσης στον πίνακα 4.6).
- Τέλος, στη μελέτη των [H. S. Cho et al., 2012](#), η έκλυση μεθανίου εκτιμάται με εμπειρικό τρόπο, ο οποίος καταλήγει σε αντίστοιχους δείκτες δυνατότητας παραγωγής μεθανίου από τα βιοαποδομήσιμα υλικά. Στη συγκεκριμένη μελέτη παράλα αυτά γίνονται και μετρήσεις, οποίες οδηγούν στην εκτίμηση ενός διορθωτικού παράγοντα 0,70 για τα αποτελέσματα που εξάγονται από τον εμπειρικό τρόπο. Ούτε εδώ έχει εξαχθεί δείκτης για το πλαστικό, οπότε γίνεται εκτίμηση για τρίτη φορά, ενώ ο παράγοντας διόρθωσης λαμβάνεται 0,8 (μεγαλύτερη ασφάλεια).

Τα στοιχεία από τη βιβλιογραφία και τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 4.5.

Συστατικό	S. Manfredi et al., 2009 Παράγοντας ανομοίωσης του βιογενούς άνθρακα – D_{LFG}	D. Kong et al., 2012 Παράγοντας δημιουργίας μεθανίου $[m^3 CH_4/τόνο$ υλικού]	H.S. Cho et al., 2012 Παράγοντας δημιουργίας μεθανίου $[kg CH_4/τόνο$ υλικού]
Οργανικά	0,64	300,70	100,00
Χαρτί	0,51	210,00*	211,00
Πλαστικό	0,20*	10,00*	150,00*
Υφάσματα	0,40*	14,80	189,00
Σιδηρούχα μέταλλα	0,00	0,00	0,00
Μη σιδηρούχα μέταλλα	0,00	0,00	0,00
Γυαλί	0,00	0,00	0,00
Ξύλο – Δέρμα	0,23	62,60	174,00
Υπολογιζόμενη τιμή GWP για μπλε κáδο [kg CO_{2eq}/ τόνο ΑΣΑ]	1455,88	1430,42	1212,66
Υπολογιζόμενη τιμή GWP για πράσινο κáδο [kg CO_{2eq}/ τόνο ΑΣΑ]	1907,64	3229,23	1526,42

*: οι εκτιμήσεις για τους δείκτες που έλειπαν από τις βιβλιογραφικές μελέτες

Επιπλέον, για τη σύγκριση αυτή διευρύνονται τα όρια συστήματος που έχουν ληφθεί, και συμπεριλαμβάνονται:

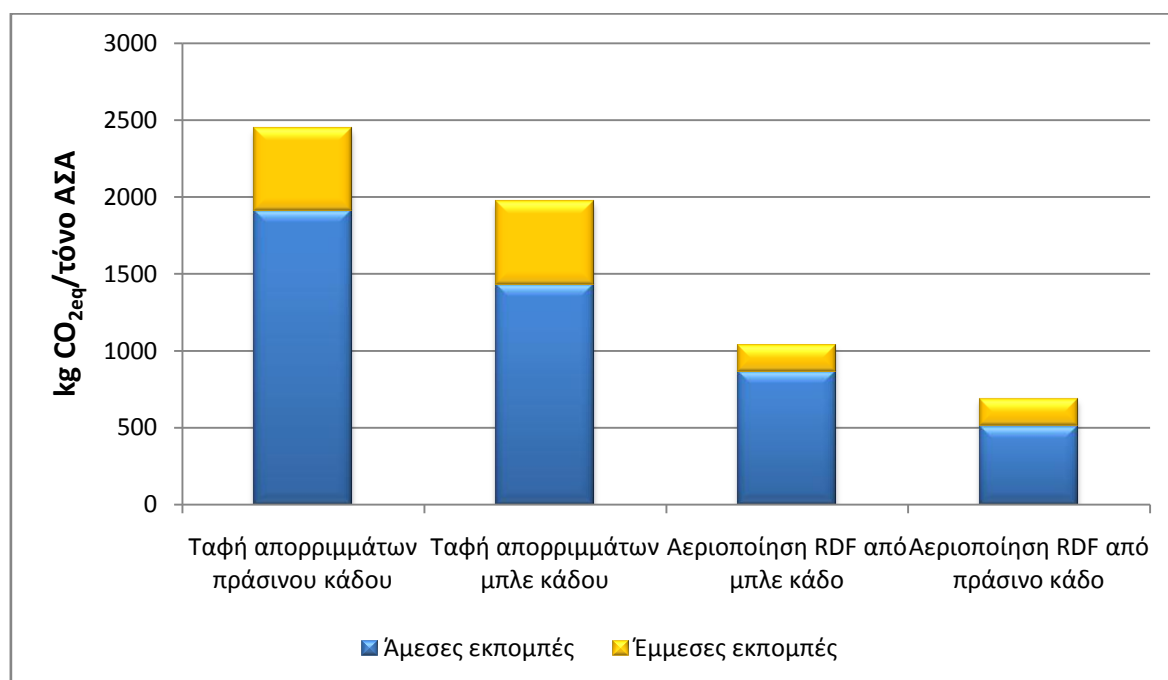
- Για τη μέθοδο της αεριοποίησης, οι εκπομπές ισοδυνάμων διοξειδίου του άνθρακα από την εκκίνηση της εγκατάστασης. Το μέγεθος των εκπομπών αυτών λήφθηκε από τη μελέτη του [H.H. Khoo, 2009](#), ίσο με 172,41 [kg CO_{2eq}/τόνο ΑΣΑ].
- Για τη μέθοδο της απόθεσης, οι εκπομπές από τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται στους χώρους ταφής για να διαχειρίζονται τον όγκο των απορριμμάτων που παραλαμβάνεται. Το αποτέλεσμα λαμβάνεται ίσο με 40,0869 [kg CO_{2eq}/τόνο ΑΣΑ], το οποίο προκύπτει από τη μελέτη του [D. Kong et al., 2012](#), ως το άθροισμα των παρακάτω (πίνακας 4.6):

Πίνακας 4.6: Υπολογισμός έμμεσων εκπομπών ([D. Kong et al., 2012](#))

	MtCE Mt _{w.w.} ⁻¹	kg CO _{2eq} /τόνο ΑΣΑ
Εκπομπές διαδικασίας απόθεσης CO ₂	0.005	18,335
Διαφυγούσες εκπομπές CH ₄	0.138	506,046
Διαφυγούσες εκπομπές N ₂ O	0.004	14,668

Η μετατροπή από τη μονάδα που δίνει η βιβλιογραφία στη μονάδα που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της σύγκρισης έγινε από τη σχέση 1 [MTCE] = 0,2727 * [MTCO_{2eq}] ([D. Kong et al., 2012](#)).

Σύμφωνα με τα παραπάνω δημιουργείται το διάγραμμα 4.6.



Διάγραμμα 4.6: Σύγκριση μεθόδων αεριοποίησης και απόθεσης σε ΧΥΤΑ

Από εδώ παρατηρείται πως τη μεγαλύτερη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου έχει η πρακτική που ακολουθείται στην Ελλάδα, δηλαδή η απόθεση σε χώρους υγειονομικής ταφής ανεπεξέργαστων ΑΣΑ. Από την άλλη πλευρά, η αεριοποίηση RDF, ακόμα και αν ληφθούν υπ' όψιν οι έμμεσες εκπομπές από τη χρήση συμβατικών καυσίμων για την εκκίνηση του συστήματος, έχει τελικά πολύ μικρότερη επίδραση στο περιβάλλον, κυρίως αν εφαρμοστεί στην περίπτωση του πράσινου κάδου, όπου το

βιογενές ποσοστό είναι μεγαλύτερο λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης οργανικών, όπως προαναφέρθηκε.

4.5 Εκπομπές εξοικονόμησης CO₂ από την ανακύκλωση υλικών

Σύμφωνα με τη θεωρία των εκπομπών εξοικονόμησης διοξειδίου του άνθρακα, διαδικασίες όπως η ανάκτηση και η επαναχρησιμοποίηση ανακυκλώσιμων υλικών, δεν έχουν άμεση σύνδεση με εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αλλά επηρεάζουν θετικά τη συνολική επίδραση μίας μεθόδου διαχείρισης απορριμμάτων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως εξηγείται αναλυτικά παρακάτω.

Διευρύνοντας εδώ τα όρια συστήματος ώστε να συμπεριληφθεί σε αυτά η διαδικασία ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης των υλικών, υπολογίζονται οι τελικές εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα για κάθε μία από τις περιπτώσεις που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Μεθοδολογία υπολογισμού εκπομπών εξοικονόμησης

Η μεθοδολογία υπολογισμού στηρίχθηκε στη μελέτη των [T.- C. Chen, C.- F. Lin, 2008](#). Σύμφωνα με αυτούς, η χρήση ανακυκλωμένων υλικών έναντι της εξαρχής παραγωγής τους, μειώνει τις απαιτήσεις σε ενέργεια κατά την παραγωγική διαδικασία (εφόσον δεν απαιτείται να κατασκευαστεί το υλικό από το μηδέν) αλλά εξοικονομεί επιπλέον μη ενεργειακούς φυσικούς πόρους, όπως τα δάση στην περίπτωση του χαρτιού, τα οποία βοηθούν παράλληλα και στη δέσμευση διοξειδίου το άνθρακα.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω, οι [T.- C. Chen, C.- F. Lin, 2008](#) έχουν υπολογίσει παράγοντες εκπομπών εξοικονόμησης από ανακύκλωση για διάφορες κατηγορίες υλικών, τα οποία μπορούν να ανακτηθούν. Εδώ λήφθηκαν και δίνονται στον πίνακα 4.7 οι παράγοντες για τα κυριότερα υλικά, τα οποία έχει θεωρηθεί ότι ανακτώνται στην περίπτωση της ολοκληρωμένης μονάδας που εξετάζεται παραπάνω, σε [MTCE/τόνο υλικού] και μετατρέπονται σε [MTCO_{2eq}/τόνο υλικού] σύμφωνα με τη σχέση: $1 \text{ [MTCE]} = 0,2727 * \text{[MTCO}_{2eq}]$ ([D. Kong et al., 2012](#)).

Πίνακας 4.7: Παράγοντες εκπομπών εξοικονόμησης από ανακύκλωση υλικών ([T.- C. Chen, C.- F. Lin, 2008](#))

Υλικό	Παράγοντας εκπομπών [MTCE/τόνο υλικού]	Παράγοντας εκπομπών [kg CO _{2eq} /τόνο υλικού]
Πλαστικό	-0,455	-1.668,50
Χαρτί	-0,76	-2.786,95
Σιδηρούχα μέταλλα	-1,54	-5.647,23
Μη σιδηρούχα μέταλλα	-3,535	-12.962,96
Γυαλί	-0,09	-330,03

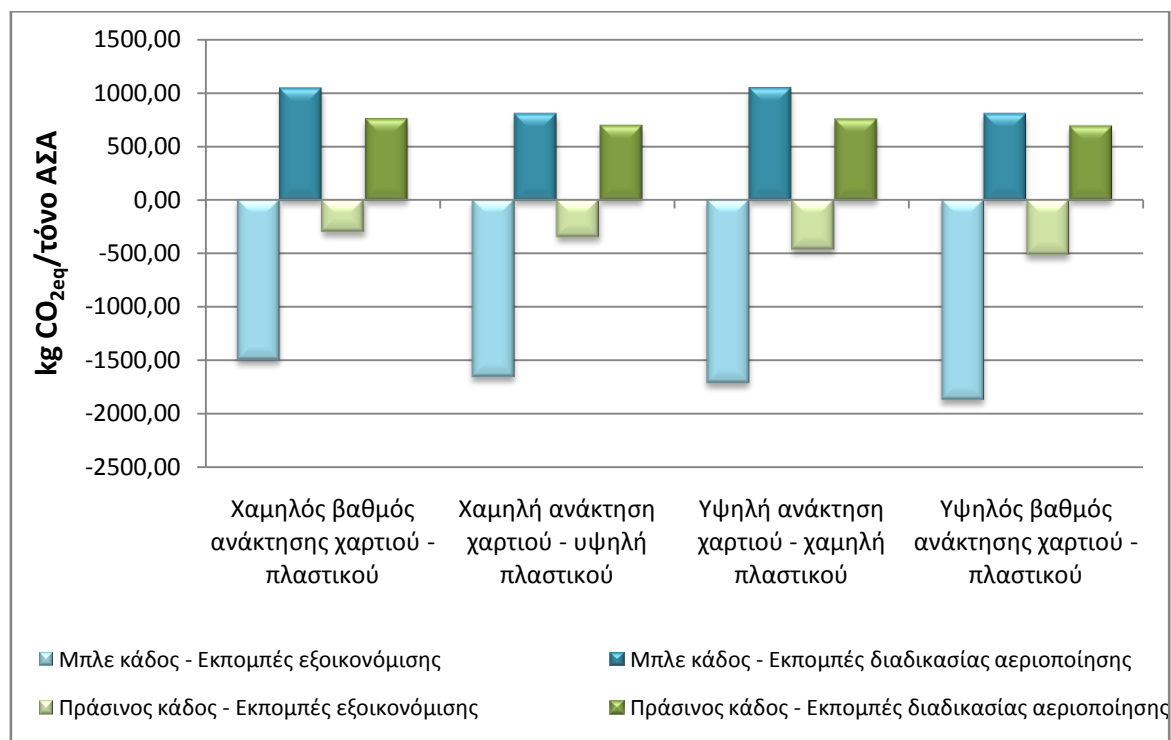
Αυτό που παρατηρείται από τον πίνακα είναι πώς οι υψηλότεροι παράγοντες εκπομπών εξοικονόμησης είναι αυτοί των μετάλλων και ιδίως των μη σιδηρούχων, δηλαδή κυρίως του αλουμινίου, εφόσον όπως είναι γνωστό η παραγωγή του εξ αρχής περιλαμβάνει θερμικές διεργασίες που απαιτούν κατανάλωση μεγάλων ποσών ενέργειας.

Σύγκριση εκπομπών εξοικονόμησης μπλε – πράσινου κάδο

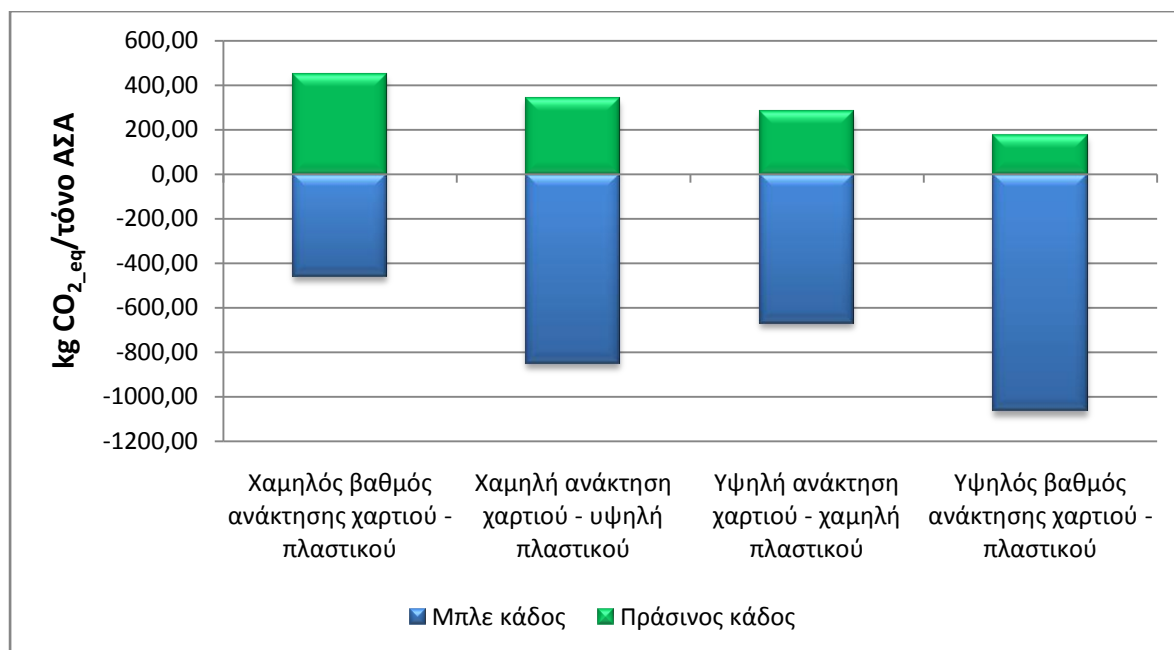
Οι εκπομπές εξοικονόμησης για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω για το μπλε και τον πράσινο κάδο υπολογίστηκαν σύμφωνα με τους παράγοντες του πίνακα 4.7, και δίνονται στον πίνακα 4.8, ως το άθροισμα των εκπομπών εξοικονόμησης από το σύνολο των υλικών που ανακτώνται για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Επιπλέον, στο διάγραμμα 4.7 παρουσιάζονται για κάθε περίπτωση και οι συνολικές εκπομπές, άμεσες και έμμεσες, της διαδικασίας αεριοποίησης, όπως υπολογίστηκαν παραπάνω. Τέλος, στο διάγραμμα 4.8 παρουσιάζονται οι συνολικές εκπομπές για κάθε περίπτωση ανάκτησης υλικών, για μπλε και πράσινο κάδο.

Πίνακας 4.8: Εκπομπές εξοικονόμησης λόγω ανακύκλωσης σε [kg CO_{2eq}/τόνο ΑΣΑ]

	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος
Χαμηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού - πλαστικού	-1498,13	-302,20
Χαμηλή ανάκτηση χαρτιού - υψηλή πλαστικού	-1655,39	-348,92
Υψηλή ανάκτηση χαρτιού - χαμηλή πλαστικού	-1711,71	-463,84
Υψηλός βαθμός ανάκτησης χαρτιού - πλαστικού	-1868,97	-510,56



Διάγραμμα 4.7: Εκπομπές εξοικονόμησης και εκπομπές διαδικασίας αεριοποίησης



Διάγραμμα 4.8: Συνολικές εκπομπές συστήματος ανάκτησης υλικών και αεριοποίησης RDF

Από το τελευταίο διάγραμμα εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Στην περίπτωση του μπλε κάδου, οι συνολικές εκπομπές του συστήματος είναι σε όλες τις περιπτώσεις αρνητικές, πράγμα που είναι αποτέλεσμα κυρίως της μεγαλύτερης ποσότητας υλικών που μπορεί να ανακτηθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί σε σχέση με τον πράσινο κάδο. Ακόμα αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που το χαρτί έχει υψηλότερο δείκτη εκπομπών εξοικονόμησης από ότι το πλαστικό, η περίπτωση χαμηλής ανάκτησής του παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά, λόγω του αυξημένου βιογενούς ποσοστού του αερίου σύνθεσης, πράγμα που συντελεί στη μείωση των άμεσων εκπομπών.
- Στην περίπτωση του πράσινου κάδου, τα συνολικά αποτελέσματα είναι θετικά, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμα και λαμβάνοντας υπ' όψιν τις εκπομπές εξοικονόμησης, το σύστημα συνεχίζει να επιδρά επιζήμια στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω των πολύ μικρότερων ποσοτήτων ανακτηθέντων υλικών, σε σχέση με την περίπτωση του μπλε κάδου. Η περίπτωση υψηλού βαθμού ανάκτησης έχει τελικά τη μικρότερη επίδραση σε σχέση με τις υπόλοιπες, ενώ

4.6 Διατάξεις αξιοποίησης του αερίου σύνθεσης

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, το αέριο σύνθεσης είναι δευτερεύον καύσιμο, το οποίο είναι ευέλικτο λόγω της αέριας φάσης και έχει αποδεκτή θερμογόνο ικανότητα (η οποία αυξάνεται περαιτέρω, αν ως μέσο αεριοποίησης χρησιμοποιηθεί ο ατμός ή το καθαρό οξυγόνο).

Συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις εξής εφαρμογές:

- Καύση σε MEK

- Καύση σε αεριοστρόβιλο
- Καύση σε διάταξη ατμοπαραγωγής

ενώ εάν οι συνθήκες δεν το επιτρέπουν, να καεί σε μία διάταξη πυρσού.

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι 4 διατάξεις καύσης.

4.6.1 Καύση σε πυρσό

Η καύση σε πυρσό του αερίου σύνθεσης δεν αποτελεί μέθοδο αξιοποίησής του, αλλά μέθοδο διαχείρισης σε περίπτωση που δε μπορεί να αξιοποιηθεί ενεργειακά. Τέτοιες περιπτώσεις είναι όταν το αέριο έχει πολύ χαμηλή θερμογόνο ικανότητα και δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καύση και ηλεκτροπαραγωγή (όταν παραδείγματος χάριν έχει προέλθει από RDF με υψηλό οργανικό κλάσμα) ή όταν δεν υπάρχει εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας στη μονάδα αεριοποίησης, δεδομένου ότι η μεταφορά του αερίου για να χρησιμοποιηθεί αλλού αποτελεί περίπλοκη διαδικασία.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μέθοδος της αεριοποίησης RDF έχει εφαρμοστεί ουσιαστικά αποκλειστικά για τη διαχείριση αποβλήτων (δηλαδή για μείωση του όγκου τους και εκτροπή τους από το ΧΥΤΑ), χωρίς να περιλαμβάνει ανάκτηση ενέργειας.

4.6.2 Καύση σε MEK

Η καύση αερίου σύνθεσης σε μηχανή εσωτερικής καύσης αποτελεί συνήθη μέθοδο αξιοποίησής του. Το αέριο σύνθεσης μπορεί να αξιοποιηθεί σε τέτοιου είδους μηχανές ακόμα και στην περίπτωση που έχει χαμηλή κατώτερη θερμογόνο ικανότητα. Επιπλέον, οι απαιτήσεις των μηχανών εσωτερικής καύσης σε καθαρότητα του καυσίμου είναι χαμηλές και παράλληλα έχουν υψηλό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης. Τέλος, μπορούν να εργαστούν σε μερικό φορτίο χωρίς ιδιαίτερες επιπτώσεις στη συνολική απόδοση του συστήματος.

Πλεονέκτημα των συστημάτων εσωτερικής καύσης αποτελεί και η σχετικά χαμηλή τιμή τους.

4.6.3 Καύση σε αεριοστρόβιλο

Η χρήση αερίου σύνθεσης σε αεριοστρόβιλο για παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιορίζεται από δύο παράγοντες: αρχικά από τις υψηλές απαιτήσεις στον καθαρισμό του αερίου από διαβρωτικούς για τα πτερύγια του στρόβιλου παράγοντες που περιέχονται σε αυτό και δεύτερον από την απαίτηση για σχετικά υψηλή θερμογόνο ικανότητα.

Παρόλα αυτά η τεχνολογία προσανατολίζεται στην κατασκευή αεριοστροβίλων οι οποίοι να μπορούν να δέχονται καύσιμα χαμηλότερης κατώτερης θερμογόνου ικανότητας, οπότε η χρήση σε αυτούς αερίων σύνθεσης να είναι αποδοτική.

4.6.4 Καύση σε διάταξη ατμοπαραγωγής

Σκοπός στην προκειμένη περίπτωση είναι η παραγωγή ατμού, που θα αποτονώνεται σε παλινδρομική μηχανή ατμού, η οποία θα είναι συνδεδεμένη με μία γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Συνεπώς εδώ οι εκπομπές αφορούν την καύση του αερίου σύνθεσης στο λέβητα, από τον οποίο εξέρχονται υπέρθερμος ατμός, καυσαέρια που περιέχουν διοξείδιο του άνθρακα και τέφρα. Η διάταξη ατμοπαραγωγής δεν έχει υψηλό βαθμό απόδοσης αλλά είναι χρήσιμη σε διατάξεις που σκοπός είναι η χαμηλή ηλεκτροπαραγωγή αλλά και η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης.

4.6.5 Υπολογισμός εκπομπών από τη διαδικασία καύσης του αερίου σύνθεσης

Η μέθοδος για τον υπολογισμό των εκπομπών CO₂ από τη θερμική αξιοποίηση του παραγόμενου αερίου σύνθεσης ξεκινάει με τον υπολογισμό της περιεκτικότητας του καυσίμου σε συστατικά που με την καύση θα παράγουν διοξείδιο του άνθρακα. Η σύσταση του συνθετικού αερίου από την αεριοποίηση RDF υπολογίστηκε παραπάνω (πίνακας 3.6). Ο υπολογισμός των εκπομπών πραγματοποιείται για τη διάταξη καύσης σε πυρσό και για τη διάταξη αξιοποίησης σε ΜΕΚ.

Η κατά μάζα περιεκτικότητα υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mu_{CO_2} = \frac{MB_{CO_2}}{MB_{CH_4}} * \gamma_{CH_4} + \frac{MB_{CO_2}}{MB_{CO}} * \gamma_{CO} + \gamma_{CO_2}$$

όπου γ είναι η κατά βάρος περιεκτικότητα του κάθε συστατικού στο καύσιμο.

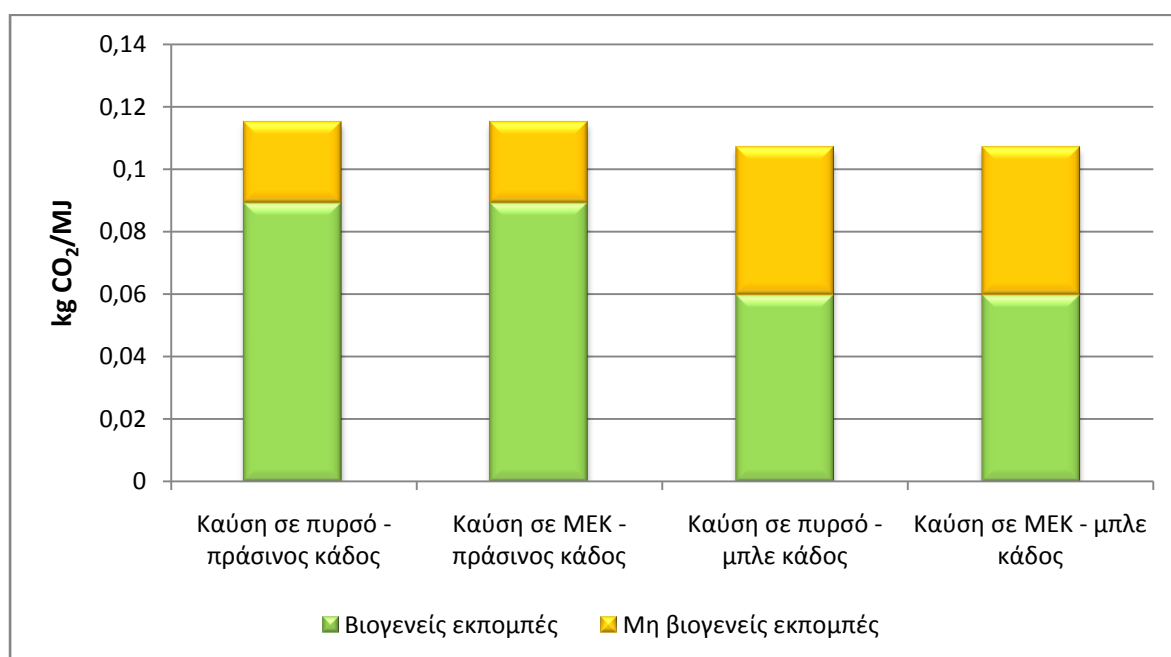
Στην περίπτωση του βασικού σεναρίου του μπλε κάρου που θα εξεταστεί παρακάτω στις διατάξεις αξιοποίησης του αερίου σύνθεσης, προκύπτει $\mu_{CO_2,μπλε} = 0,5664 \left[\frac{kg}{kg} \right]$, ενώ για το αντίστοιχο σενάριο του πράσινου κάρου προκύπτει $\mu_{CO_2,πράσινου} = 0,4970 \left[\frac{kg}{kg} \right]$.

- Για την περίπτωση του πυρσού θεωρείται ότι καίγεται ολόκληρη η παραγόμενη ποσότητα σε κάθε περίπτωση.
- Για την περίπτωση της αξιοποίησης του αερίου του βασικού σεναρίου του μπλε κάρου σε ΜΕΚ, με εγκατεστημένη ισχύ μονάδας 500 kW_e και λαμβάνοντας ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης 35% (M. Baratieri et al., 2009), προκύπτει απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου: $\dot{m}_{b,MEK} = \frac{P_{el}}{\eta_{el} * LHV_{syngas}} = 0,2696 \left[\frac{kg}{sec} \right]$, με $LHV_{syngas} = 5.298 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$ για το μπλε κάρου και $\dot{m}_{b,MEK} = 0,3303 \left[\frac{kg}{sec} \right]$, με $LHV_{syngas} = 4.325 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$ για τον πράσινο κάρου.

Το συνολικά εκπεμπόμενο CO₂ για κάθε περίπτωση δίνεται από τη σχέση $\dot{m}_{CO_2} = \dot{m}_b * \mu_{CO_2}$ και τα αποτελέσματα δίνονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 4.9 και σχηματικά στο διάγραμμα 4.9.

Πίνακας 4.9: Εκπομπές CO ₂ από τις διατάξεις καύσης του αερίου σύνθεσης [kg CO ₂ /MJ]			
	Συνολικές εκπομπές	Βιογενείς εκπομπές	Μη βιογενείς εκπομπές
Πυρσός – πράσινος κάδος	0,114903	0,08882	0,02618
ΜΕΚ – πράσινος κάδος	0,114903	0,08883	0,02618
Πυρσός – μπλε κάδος	0,106890	0,05957	0,04733
ΜΕΚ – μπλε κάδος	0,106890	0,05957	0,04733

Οι βιογενείς εκπομπές υπολογίστηκαν λόγω του ανανεώσιμου κλάσματος του αερίου που έχει υπολογιστεί στο κεφάλαιο 3 ίσο με 55,73% για τον μπλε κάδο και ίσο με 77,30% για τον πράσινο.



Διάγραμμα 4.9: Σύγκριση εκπομπών από τις διατάξεις καύσης του αερίου σύνθεσης

Από το τελευταίο διάγραμμα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η διάταξη αξιοποίησης του αερίου με μηχανή εσωτερικής καύσης έχει παρόμοιες εκπομπές με τη διάταξη καύσης του αερίου σε πυρσό, με τη διαφορά όμως ότι στην πρώτη περίπτωση παράγεται και ενέργεια ενώ στη δεύτερη περιορίζεται η επίδραση του αερίου που τελικά θα απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα, μέσω της καύσης του, εφόσον το μεθάνιο και το μονοξείδιο του άνθρακα που περιέχει μετατρέπονται σε διοξείδιο του άνθρακα. Επιπλέον, για την περίπτωση του πράσινου κάδου συνολικές οι εκπομπές είναι μεγαλύτερες λόγω της μικρότερης θερμογόνου του αερίου σύνθεσης.

4.7 Κατηγορίες επίδρασης της απόθεσης των υπολειμμάτων αεριοποίησης

Κατά τις θερμικές διεργασίες όπως είναι η αεριοποίηση και η καύση, δημιουργούνται διάφορα υπολείμματα σωματιδιακού τύπου.

Εδώ εξετάζεται το υπόλειμμα στον πυθμένα του εκάστοτε αεριοποιητή ή λέβητα, η τέφρα πυθμένα.

Η τέφρα πυθμένα αποτελείται από τα συσσωματώματα που δημιουργούνται κατά τη θερμική διεργασία, τα οποία είναι πολύ βαριά για να παρασυρθούν από το αέριο που παράγεται (είτε είναι αέριο σύνθεσης είτε καυσαέρια) και καταλήγουν στον πυθμένα. Η τέφρα αυτή εξάγεται και μπορεί είτε να απορριφθεί σε ειδικούς χώρους ταφής είτε να χρησιμοποιηθεί στην οδοποιία και άλλες εφαρμογές.

Δεδομένου ότι στη σύστασή της περιλαμβάνει κυρίως βαρέα μέταλλα, αλλά και διάφορα ανόργανα στοιχεία, η τέφρα απαιτείται να αδρανοποιείται πριν την απόθεση ή χρήση της σε εφαρμογές, ώστε να πληροί τα πρότυπα που επιτρέπουν τις παραπάνω ενέργειες (ουσιαστικά να μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη επικίνδυνο υλικό). Τα πρότυπα αυτά αφορούν τα όρια συγκέντρωσης των διαφόρων μετάλλων στην τέφρα (L. Sivula et al., 2012b).

Στην παρούσα εργασία, η απόθεσή της εξετάστηκε από βιβλιογραφικής άποψης και χρησιμοποιώντας ως βασική πηγή τη μελέτη των H. Birgisdottir et al., 2007 και συμπληρωματικά τις μελέτες των L. Suvila et al., 2012a, M. Gori et al., 2011 και S. Rocca et al., 2012.

Στη βασική βιβλιογραφική πηγή (H. Birgisdottir et al., 2007) μελετάται η επίδραση της τέφρας πυθμένα συγκρίνοντας την περίπτωση απόθεσης σε χώρο ταφής με την περίπτωση χρήσης στην οδοποιία, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ανάλυσης κύκλου ζωής. Εδώ λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο η περίπτωση της απόθεσης, ώστε να μπορέσει να συγκριθεί και με τις υπόλοιπες μελέτες.

Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται πως πριν την απόθεση πραγματοποιείται αναβάθμιση της τέφρας με μαγνητικό διαχωρισμό των σιδηρούχων υπολειμμάτων και επιπλέον διαχωρισμό των σωματιδίων μεγέθους > 50mm. Επίσης, εφαρμόστηκε περίοδος ωρίμανσης μεγαλύτερη των 3 μηνών. Πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο πως η συγκεκριμένη μελέτη αναφέρεται σε τέφρα από καύση ΑΣΑ.

Η επίδραση της τέφρας στο περιβάλλον προκύπτει από την έκλυση των βαρέων μετάλλων (λόγω κυρίως του νερού από βροχοπτώσεις) και τη μεταφορά τους στο οικοσύστημα. Οι δύο σημαντικότερες κατηγορίες στις οποίες επιδρά η έκλυση της τέφρας είναι οι $Ecotoxicity_{water}$ και $Human Toxicity_{soil}$, που αφορούν την αύξηση των επιπέδων τοξικότητας σε νερό και έδαφος, που μπορούν να επηρεάσουν το οικοσύστημα και την ανθρώπινη υγεία αντίστοιχα.

Τα κύρια συστατικά της τέφρας που αυξάνουν τους δύο δείκτες επίδρασης σε αυτές τις κατηγορίες είναι ο χαλκός (Cu) και το αρσενικό (As) αντίστοιχα. Η περιεκτικότητα των εκπλυμάτων είναι 0,59 [mg_{Cu}/kg_{τέφρας}] και 0,0055 [mg_{As}/kg_{τέφρας}] που ισοδυναμούν σε 30 [PE] και 3 [PE] αντίστοιχα, σε βάση 100 χρόνων.

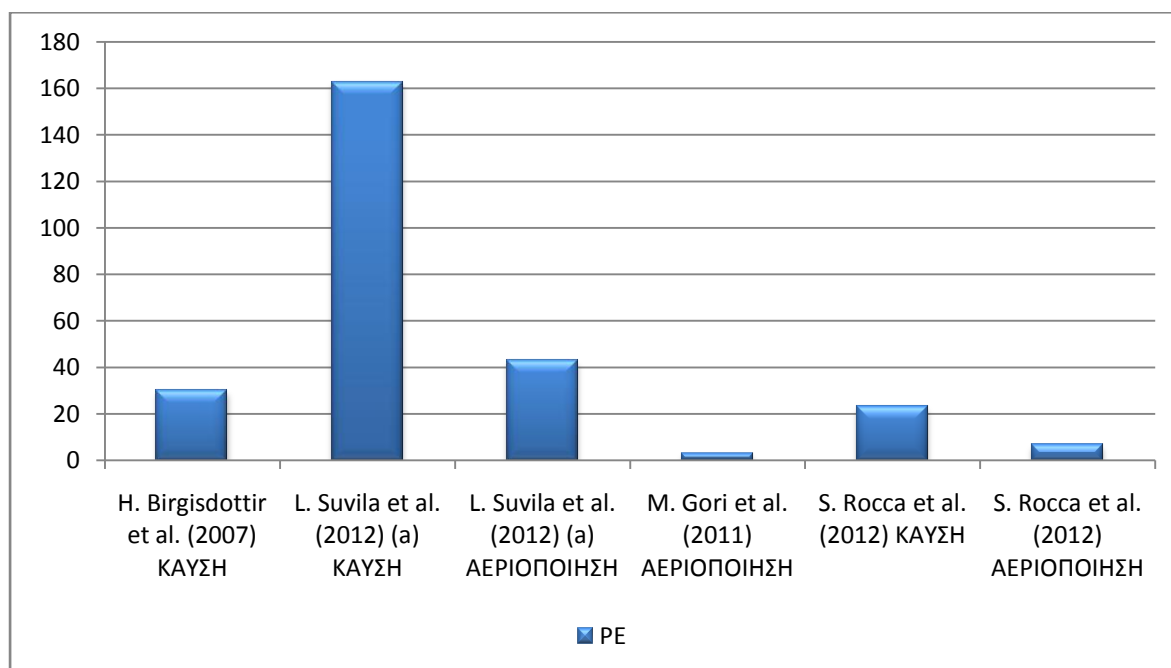
Για τις υπόλοιπες μελέτες σημειώνεται ότι δεν είναι αναλύσεις κύκλου ζωής ώστε να περιλαμβάνουν τις κατηγορίες δεικτών που αναφέρθηκαν παραπάνω, εντούτοις περιέχουν τη σύσταση της τέφρας. Κάνοντας μία αναλογική προσαρμογή στα αποτελέσματα της βασικής μελέτης, δημιουργούνται οι παρακάτω πίνακες 4.10 και 4.11, καθώς και τα διαγράμματα 4.10 και 4.11.

Πίνακας 4.10: Επίδραση στην κατηγορία Ecotoxicity_{water}

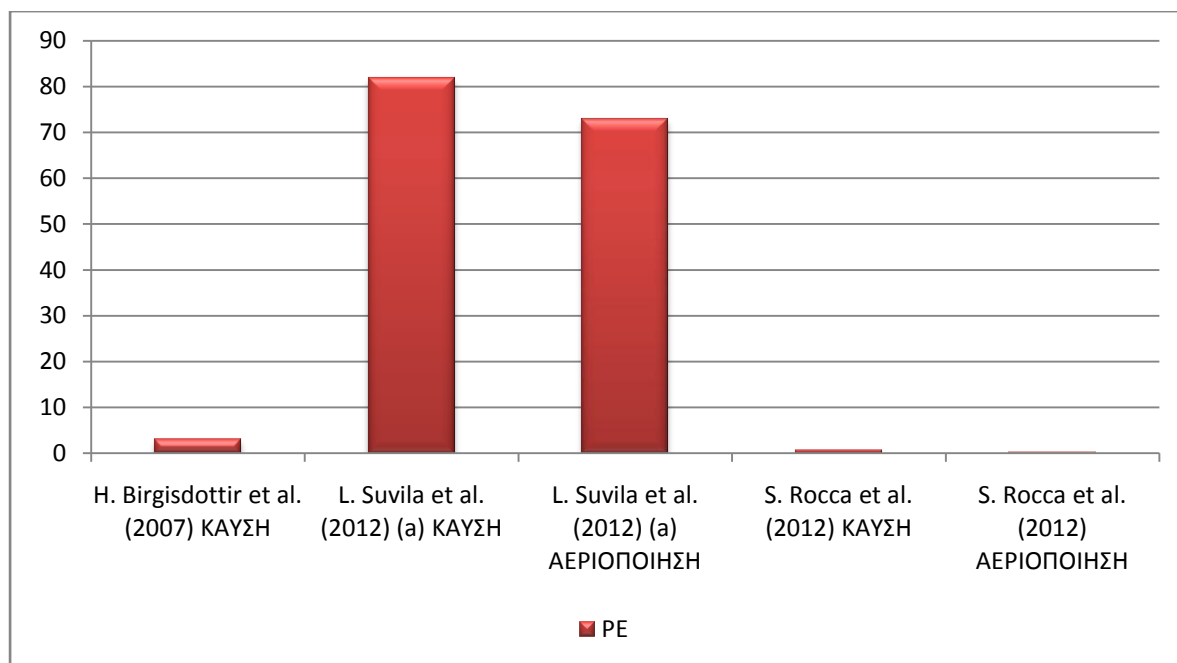
Πηγή	Συγκέντρωση Cu [mg _{Cu} /kg _{τέφρας}]	PE
H. Birgisdottir et al., 2007	0,59	30
L. Suvila et al., 2012a (καύση)	3,20	162,71
L. Suvila et al., 2012a (αεριοποίηση)	0,84	42,71
M. Gori et al., 2011 (αεριοποίηση)	0,0623	3,17
S. Rocca et al., 2012 (καύση)	0,454	23,08
S. Rocca et al., 2012 (αεριοποίηση)	0,1367	6,95

Πίνακας 4.11: Επίδραση στην κατηγορία Human Toxicity_{soil}

Πηγή	Συγκέντρωση As [mg _{As} /kg _{τέφρας}]	PE
H. Birgisdottir et al., 2007	0,0055	3
L. Suvila et al., 2012a (καύση)	0,1497	81,65
L. Suvila et al., 2012a (αεριοποίηση)	0,1337	72,93
S. Rocca et al., 2012 (καύση)	0,0013	0,71
S. Rocca et al., 2012 (αεριοποίηση)	0,0004	0,22



Διάγραμμα 4.10: Επίδραση στην κατηγορία Ecotoxicity_{water}



Διάγραμμα 4.11: Επίδραση στην κατηγορία Human Toxicity_{soil}

Από τη σύγκριση των μελετών προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Καταρχάς, όσον αφορά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων από διαδικασίες καύσης των [H. Birgisdottir et al., 2007](#), [L. Suvila et al., 2012a](#) και [S. Rocca et al., 2012](#), η μεγάλη διαφορά της δεύτερης από την πρώτη και την τρίτη (οι οποίες παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα), οφείλεται στο γεγονός ότι η τέφρα πυθμένα στη δεύτερη περίπτωση δεν υφίσταται καμία επεξεργασία εκτός από το διαχωρισμό σωματιδίων μεγαλύτερων από 30mm με χειροδιαλογή. Αντίθετα, στην περίπτωση των [H. Birgisdottir et al., 2007](#), γίνεται, όπως αναφέρθηκε, επεξεργασία της τέφρας πριν την απόθεση, όπως αντίστοιχα και στην περίπτωση των [S. Rocca et al., 2012](#), όπου αναφέρεται ομογενοποίηση των δειγμάτων της τέφρας που μελετώνται και διαχωρισμός δια χειρός των μεταλλικών και κεραμικών σωματιδίων με διάμετρο > 5cm.
- Σύγκριση ανάμεσα στις διαδικασίες καύσης και αεριοποίησης δείχνει ότι η τέφρα πυθμένα από αεριοποίηση RDF είναι λιγότερο τοξική σε σχέση με την τέφρα από καύση απορριμμάτων. Αυτό θεωρητικά οφείλεται στην ανάκτηση υλικών που είναι απαραίτητο να γίνει από τα απορρίμματα ώστε αυτά να αεριοποιηθούν (οπότε απομένει το RDF σαν καύσιμο προς αεριοποίηση), ενώ η καύση δεν θέτει κανέναν περιορισμό ως προς την ανάκτηση. Συνεπώς είναι πιθανόν τα μη ανακτηθέντα υλικά στα απορρίμματα και κυρίως τα μέταλλα, τα οποία περιέχουν προσμίξεις, να προξενούν αυτή την αυξημένη τοξικότητα.
- Τέλος, παρατηρώντας πάλι τη μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα για τη διαδικασία της αεριοποίησης των [L. Suvila et al., 2012a](#) με τους [M. Gori et al., 2011](#) και [S. Rocca et al., 2012](#), αποδίδεται στο ότι στην πρώτη δε γίνεται αυτή τη φορά καμία ανάκτηση υλικών από την τέφρα πριν την απόθεση και καμία επεξεργασία, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις ακολουθούνται ειδικές διαδικασίες ομογενοποίησης, ανάκτησης μεγάλων υπολειμμάτων, ξήρανσης και άλλες. Επομένως, αποτρέπεται από την ταφή σημαντική ποσότητα βαρέων μετάλλων και

άλλων υλικών που εντείνουν την τοξική συμπεριφορά των εκπλυμάτων της τέφρας.

4.8 Περιβαλλοντική νομοθεσία

Η ευρωπαϊκή νομοθεσία που αφορά τη διαχείριση των απορριμμάτων στην Κοινότητα εισήχθη αρχικά με την [Οδηγία 2006/12](#). Εκεί δίνονται ακριβείς ορισμοί για το τι είναι απόβλητο, ανάκτηση και διάθεση ενώ θεσπίζονται ουσιαστικές απαιτήσεις για τη διαχείριση των αποβλήτων.

Η αρχική οδηγία συμπληρώθηκε στη συνέχεια από την [Οδηγία 2008/98](#), η οποία θεσπίζει μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας εμποδίζοντας ή μειώνοντας τις αρνητικές επιπτώσεις της παραγωγής και της διαχείρισης αποβλήτων, και περιορίζοντας το συνολικό αντίκτυπο της χρήσης των

πόρων και βελτιώνοντας την αποδοτικότητά της. Με την οδηγία αυτή θεσπίζεται επίσης η προτεραιότητα στην ιεράρχηση των μεθόδων διαχείρισης στερεών αποβλήτων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Από την ιεράρχηση αυτή γίνεται αντιληπτό πως οι μέθοδοι ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων έρχονται ουσιαστικά να συμπληρώσουν τη διαδικασία της ανακύκλωσης που προηγείται και να μειώσουν όσο το δυνατόν περισσότερο την ποσότητα των υπολειμμάτων που θα διατεθεί σε χώρο υγειονομικής ταφής, με απώτερο σκοπό στην ταφή να καταλήγουν μόνο υπολείμματα τα οποία δε μπορούν να αξιοποιηθούν με κάποιον άλλον τρόπο.

Η οδηγία επιπρόσθετα θεσμοθετεί ότι τα κράτη-μέλη υποχρεούνται ως το 2020 να λάβουν τα αναγκαία μέτρα ώστε η προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση των υλικών αποβλήτων, όπως τουλάχιστον το χαρτί, το πλαστικό, το γυαλί και τα μέταλλα, που προέρχονται από οικιακά απορρίμματα ή από απορρίμματα που η σύστασή τους προσομοιάζει αυτή των οικιακών, να αγγίζει τουλάχιστον το 50% ως προς το συνολικό βάρος των αποβλήτων.

Επιπλέον, καθιερώνεται από το 2015 η χωριστή συλλογή, τουλάχιστον για το χαρτί, το πλαστικό, το γυαλί και τα μέταλλα (όπου αυτό είναι περιβαλλοντικά και οικονομικά εφικτό, όπως αναφέρεται ρητά στην οδηγία), ενώ ξεκαθαρίζεται πως ξεχωριστή συλλογή σημαίνει πως αυτά τα υλικά δεν πρέπει να αναμειγνύονται με άλλα απόβλητα ή με υλικά με διαφορετικές ιδιότητες.

Πρακτικά αυτό σημαίνει 4 διαφορετικούς κάδους διαλογής, έναν για το χαρτί, έναν για τα πλαστικά, έναν για τις γυάλινες συσκευασίες και τέλος έναν για τα μεταλλικά υλικά συσκευασίας.

Παρόλα αυτά, θεωρείται δεδομένο πως δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί 100% ανάκτηση υλικών από ένα συνονθύλευμα απορριμμάτων, ακόμα και αυτών που αποτελούνται από ένα είδος υλικών.

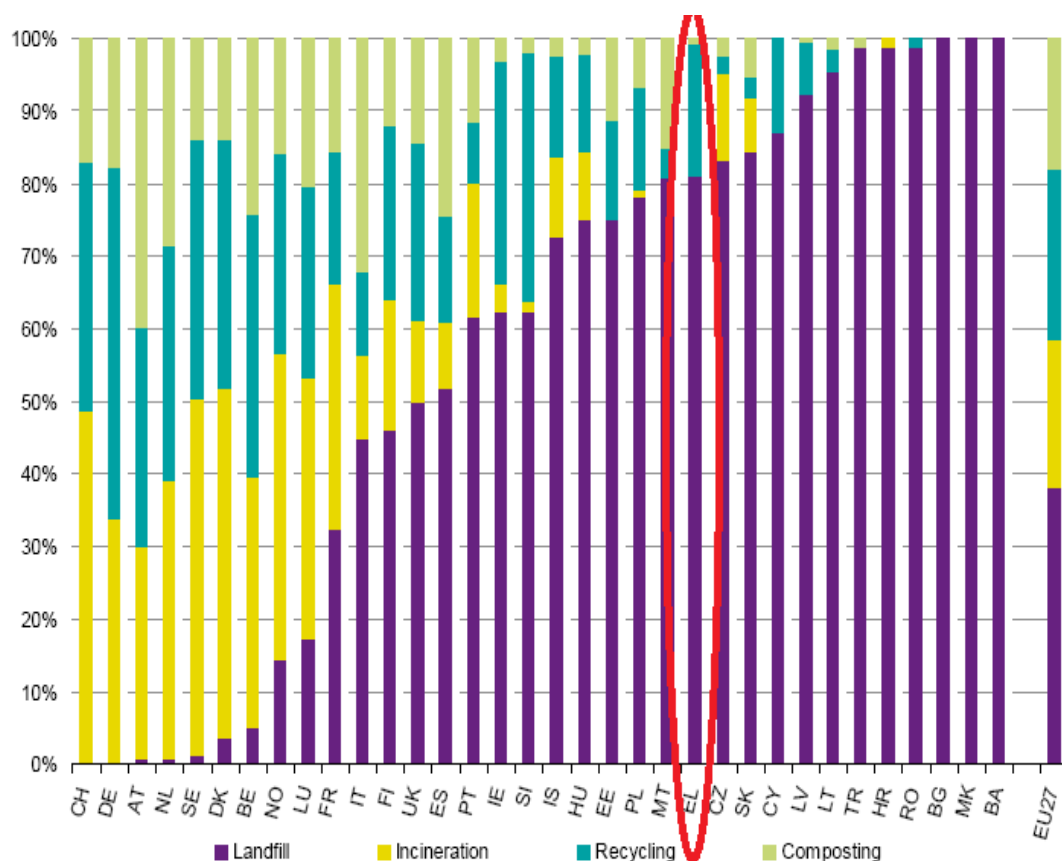
Συνεπώς θα υπάρχει πάντα ως υπόλειμμα σε κάθε διαδικασία ανάκτησης το ανακτηθέν καύσιμο RDF, το οποίο μέσω μίας μεθόδου ενεργειακής αξιοποίησης, όπως η αεριοποίηση RDF και η χρήση του αερίου που παράγεται προς ηλεκτροπαραγωγή, θα

συντελεί στην ανάκτηση (αυτή τη φορά ενέργειας) από τα υπολείμματα τα οποία δε μπορούν να ανακτηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν.

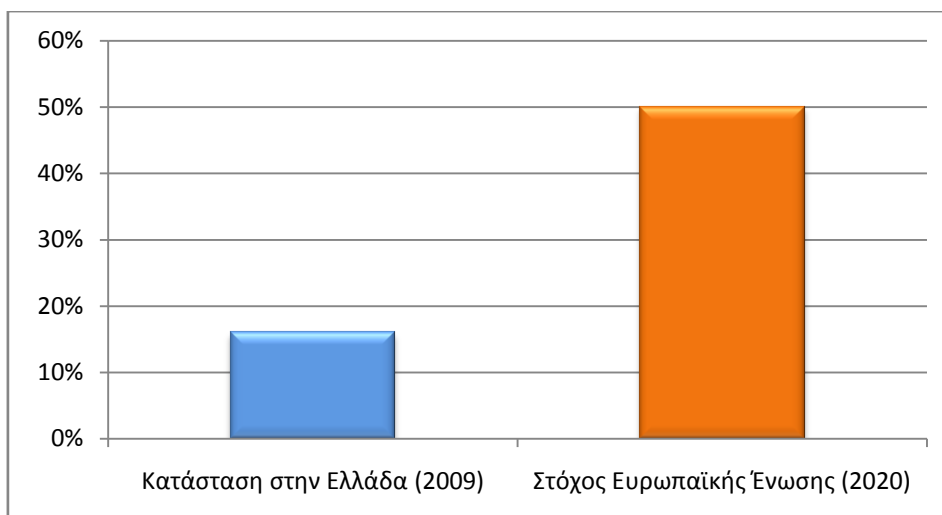
Κατά αυτόν τον τρόπο, η τέταρτη βαθμίδα της ιεράρχησης συμπληρώνει την τρίτη.

4.8.1 Κατάσταση στην Ελλάδα

Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat για τη χρονιά 2009 (http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Municipal_waste_statistics), αναφέρονται με ποσοστά οι μέθοδοι διαχείρισης αποβλήτων για κάθε χώρα της Ευρώπης των 27. Για την Ελλάδα το ποσοστό απόθεσης των απορριμμάτων σε χώρους ταφής (ανεξέλεγκτης και μη) ανέρχεται στο 82%, της ανακύκλωσης στο 16% και της κομποστοποίησης στο 2% (για το οποίο εδαφοβελτιωτικό που παράγεται δεν υπάρχει αγορά που να μπορεί να το απορροφήσει και καταλήγει επίσης σε ταφή) (σχήμα 4.1). Παρατηρείται εδώ πως παρόλο που τα στοιχεία είναι του 2009, η κατάσταση δεν θεωρείται ότι διαφέρει κατά πολύ από τη σημερινή, δεδομένου ότι δεν έχει συντελεστεί κάποια μεγάλη αλλαγή στον τρόπο διαχείρισης των απορριμμάτων.



Σχήμα 4.1: Διαχείριση απορριμμάτων στην Ευρώπη των 27 (πηγή: Eurostat)



Διάγραμμα 4.12: Απόκλιση από το στόχο του 2020 για την ανακύκλωση

Από το διάγραμμα 4.12 παρατηρείται ότι ενώ μέχρι το 2020 η προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση, τουλάχιστον για το χαρτί, το πλαστικό, το μέταλλο και το γυαλί που προέρχονται από τα οικιακά απορρίμματα ή από απορρίμματα που η σύστασή τους προσομοιάζει αυτή των οικιακών, επιβάλλεται να αυξηθούν κατ'ελάχιστο στο 50% ως προς το συνολικό βάρος, τα τελευταία στοιχεία δείχνουν για την Ελλάδα μία απόκλιση από το στόχο της τάξης του 34%, εάν ληφθεί υπ' όψιν ότι μόνο το 16% της συνολικής ποσότητας απορριμμάτων ανακυκλώθηκε το 2009, ποσοστό το οποίο δεν αναμένεται να έχει αυξηθεί σε ικανοποιητικό επίπεδο μέχρι σήμερα.

Εκτός από τους παραπάνω στόχους, η επιτακτική ανάγκη για επεξεργασία των ΑΣΑ πριν την ταφή τους προέρχεται και από το γεγονός ότι από 1.1.2014 θα επιβάλλεται τέλος ταφής για τα ανεπεξέργαστα απορρίμματα που θα ανέρχεται στα 35 [€/τόνο] (Ηλιόπουλος Γ. - Τσομπανίδης Χ., 2012).

Όσον αφορά, τέλος, την ξεχωριστή συλλογή, η Ελλάδα βρίσκεται στο στάδιο των 2 κάδων, του γκρι-πράσινου για τα σύμμεικτα απορρίμματα και του μπλε για το σύνολο των συσκευασιών, όπως αυτές αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η ύπαρξη του γκρι-πράσινου κάδου αποτελεί βασικό εμπόδιο στην επίτευξη των στόχων. Για διάφορους λόγους, όπως είναι η ελλιπής ενημέρωση των πολιτών για την επιβεβλημένη από την ευρωπαϊκή νομοθεσία ανάγκη για ανακύκλωση, σε συνδυασμό με την αλλαγή συνηθειών την οποία πρέπει να υποστούν διάφορες μερίδες του πληθυσμού, όπως παραδείγματος χάριν οι ηλικιωμένοι άνθρωποι, που μέχρι πρότινος δεν τους είχε απασχολήσει το ζήτημα της ανακύκλωσης, αρκετά μεγάλο ποσοστό υλικών που θα μπορούσαν να επαναχρησιμοποιηθούν και να ανακυκλωθούν αντιμετωπίζονται σαν απόβλητα, εναποτίθενται στον πράσινο κάδο και οδηγούνται για ταφή.

Αντίστοιχα, το μειονέκτημα του μπλε κάδου αφορά το επόμενο στάδιο μετά την ανακύκλωση, αυτό της ανάκτησης. Δεδομένου ότι όλες οι συσκευασίες τοποθετούνται μαζί ανεξαρτήτως υλικού, ο διαχωρισμός των υλικών δεν είναι τόσο αποτελεσματικός και δε μπορούν να επιτευχθούν υψηλοί βαθμοί ανάκτησης. Σε περίπτωση που οι κάδοι είναι διαφορετικοί για κάθε ένα από τα 4 κυριότερα υλικά επιτυγχάνονται υψηλότερα ποσοστά ανάκτησης, με μικρότερες προσμίξεις άλλων υλικών στα ανακτηθέντα. Το τελικό

αποτέλεσμα είναι μικρότερη ποσότητα μη ανακτηθέντων υλικών προς διαχείριση και καλύτερη τιμή μεταπώλησης των ανακτηθέντων, λόγω της υψηλής καθαρότητάς τους.

Σημειώνεται εδώ πως το 50% που έχει ορίσει η Ευρωπαϊκή Οδηγία για την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση έχει προκύψει από τη μέση σύσταση των αστικών σύμμεικτων απορριμμάτων, όπως είναι για παράδειγμα η σύσταση που δόθηκε παραπάνω για τον πράσινο κάδο στην Ελλάδα. Από εκεί φαίνεται ότι το ποσοστό που τίθεται ως στόχος είναι στην πραγματικότητα το σύνολο των συγκεντρώσεων των ανακυκλώσιμων υλικών στο ρεύμα των ΑΣΑ.

Επιπλέον, και εφόσον ο μακροπρόθεσμος στόχος είναι να μειωθεί η συνολική ποσότητα των παραγόμενων απορριμμάτων και κυρίως να εκτραπεί το ρεύμα των οργανικών από την ταφή, το όριο του 50% μπορεί να επιτευχθεί και μέσω της πρόληψης δημιουργίας απορριμμάτων και μέσω της επαναχρησιμοποίησής τους πριν απορριφθούν, που αποτελούν την πρώτη και τη δεύτερη αντίστοιχα προτεραιότητα στη διαχείριση στερεών αποβλήτων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το αισιόδοξο σενάριο διαχείρισης των ανακυκλώσιμων υλικών που θα μπορούσε να εφαρμοστεί, με σκοπό να δειχθεί ότι με απλή εφαρμογή της μεθόδου διαλογής στην πηγή, ο στόχος που τίθεται από την Ευρωπαϊκή Ένωση δεν είναι ανεπίτευκτος.

Σενάριο διαλογής στην πηγή

Από τη σύσταση του πράσινου κάδου όπως αναφέρθηκε παραπάνω, διαπιστώνεται πως συνολικά το 49% των απορριμμάτων που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ θα μπορούσαν είτε να έχουν ανακυκλωθεί απευθείας στον μπλε κάδο (το παραπάνω ποσοστό αναφέρεται στο χαρτί, το γυαλί, τα μέταλλα και το πλαστικό) είτε να έχουν ανακτηθεί από τον πράσινο κάδο, σε περίπτωση που μπορούσε να εφαρμοστεί ανάκτηση υλικών αντίστοιχη με αυτή του μπλε κάδου (όπως στο σενάριο που εξετάστηκε παραπάνω).

Στην περίπτωση ανακύκλωσής τους στον μπλε κάδο, θα εκτρεπόταν από το ΧΥΤΑ ποσοστό:

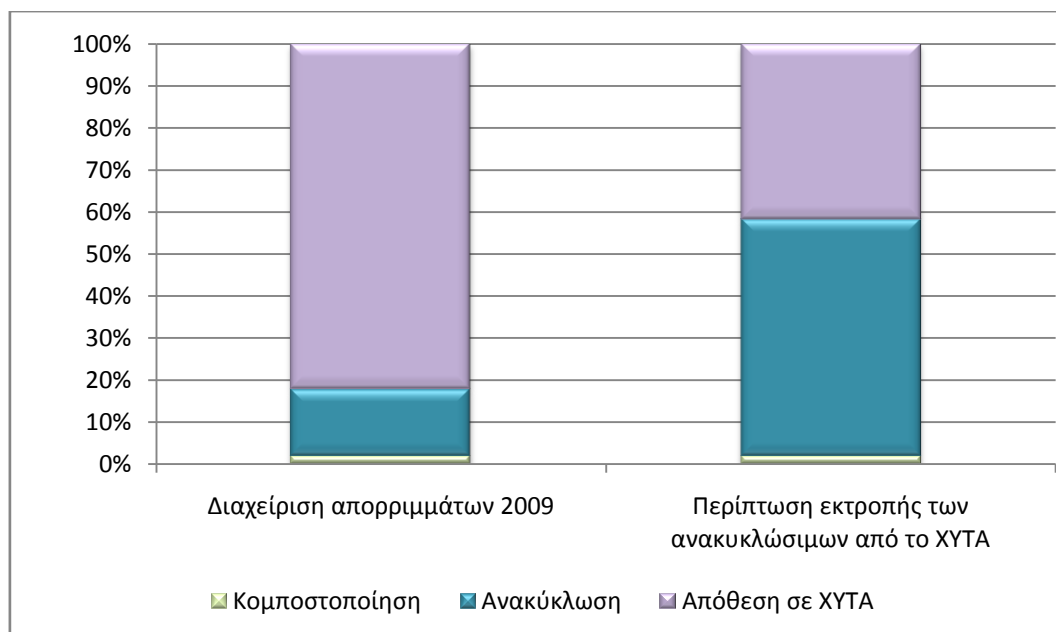
$$49\% * 82\% = 40,18\%$$

δηλαδή το συνολικό ποσοστό ανακυκλώσιμων υλικών του ποσοστού των ΑΣΑ που καταλήγουν σε πράσινο κάδο.

Συνεπώς από το 82% απομένει 41,82% που θα καταλήξει στο ΧΥΤΑ και συνολικά το ποσοστό ανακύκλωσης αυξάνεται στο 56,18%.

Σχηματικά δίνονται τα παραπάνω στο Διάγραμμα 4.13.

Από το διάγραμμα αυτό εξάγεται το συμπέρασμα πως αν ανακυκλώνονταν στο σύνολό τους το χαρτί, το πλαστικό, τα μέταλλα και το γυαλί και στον πράσινο κατέληγαν μόνο τα οργανικά και τα σύμμεικτα, η χώρα θα είχε επιτύχει ήδη το στόχο της ΕΕ για το 2020, ξεπερνώντας τον μάλιστα ήδη κατά 6,18%.



Διάγραμμα 4.13: Περίπτωση ανακύκλωσης των ανακυκλώσιμων υλικών που καταλήγουν στον πράσινο κάδο

4.8.2 Σενάριο κομποστοποίησης

Σε ένα επόμενο επίπεδο γίνεται αναφορά στη διαδικασία της κομποστοποίησης ή λιπασματοποίησης, η οποία κατατάσσεται στη βαθμίδα της ανακύκλωσης κατά την προτεραιότητα της ιεράρχησης των απορριμμάτων.

Κομποστοποίηση ορίζεται ως η αερόβια βιολογική αποδόμηση και σταθεροποίηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων κάτω από ελεγχόμενες, θερμοφίλες και αερόβιες συνθήκες. Προϊόν της κομποστοποίησης είναι το κομπόστ το οποίο είναι πλούσιο σε οργανική ουσία.

Το κομπόστ χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό υλικό, αλλά και ως υπόστρωμα για την καλλιέργεια φυτών – λίπασμα.

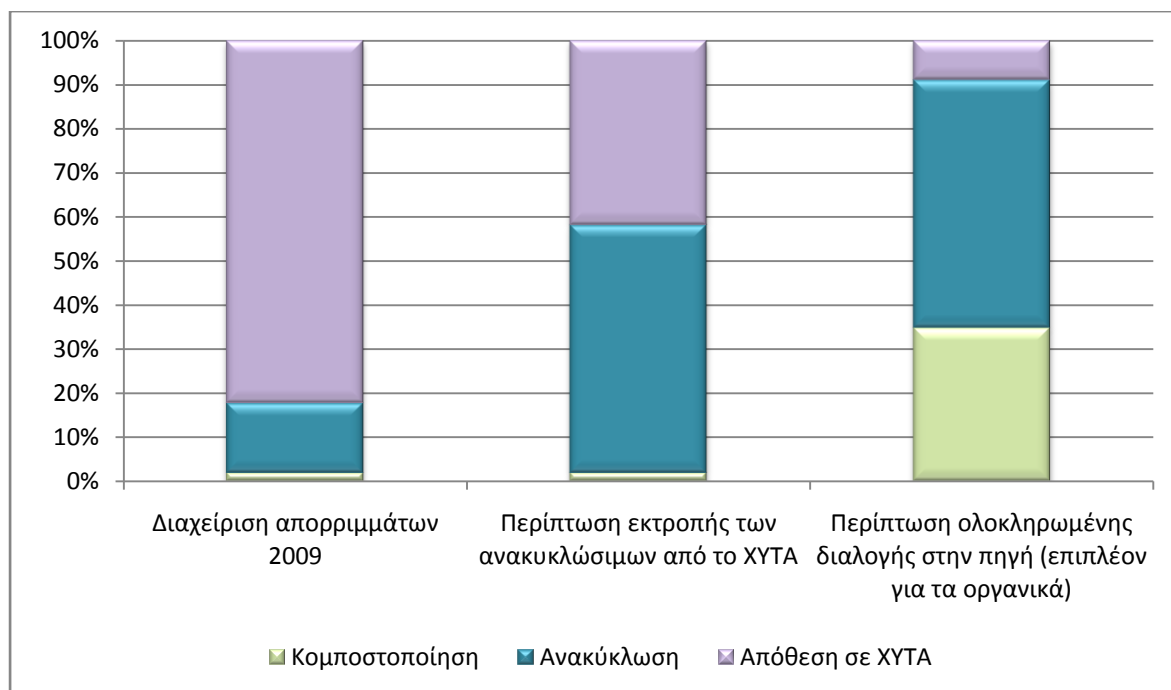
Η διαλογή στην πηγή, η οποία επιβάλλεται από την ευρωπαϊκή νομοθεσία σε πρώτη φάση μόνο για τα 4 βασικά υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα αποτελούσε λύση για τη συλλογή προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος το οποίο στη συνέχεια θα αποτελούσε πρώτη ύλη για την παρασκευή εδαφοβελτιωτικού.

Στην περίπτωση αυτή, το επιπλέον ποσοστό των απορριμμάτων που θα ανακυκλωνόταν αντί να απορριφθεί στο ΧΥΤΑ θα ήταν:

$$40\% * 82\% = 32,8\%$$

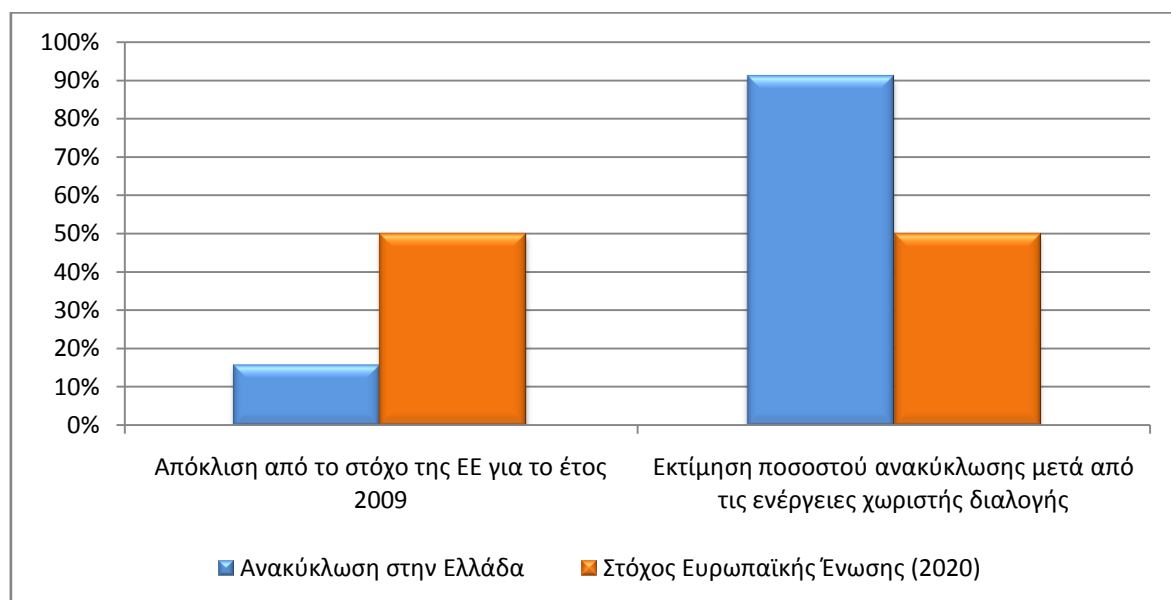
Συνεπώς από το 41,82% που θα κατέληγε προηγουμένως στο ΧΥΤΑ, τώρα θα καταλήξει το 9,02%, ενώ με σταθερό το ποσοστό ανακύκλωσης υλικών στο 56,18%, η κομποστοποίηση αυξάνεται στο **34,80%**.

Τα αποτελέσματα δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα 4.14.



Διάγραμμα 4.14: Περίπτωση υιοθέτησης πολιτικής κομποστοποίησης προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος

Συνολικά, το ποσοστό απορριμμάτων που θα προετοιμάζεται για επαναχρησιμοποίηση και θα ανακυκλώνεται θα υπερβαίνει κατά πολύ το 50% που επιτάσσει η ευρωπαϊκή οδηγία. Η σύγκριση δίνεται στο διάγραμμα 4.15.



Διάγραμμα 4.15: Εκτίμηση επίτευξης Ευρωπαϊκού στόχου 2020

Το συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τα παραπάνω είναι πως, παρόλο που το σενάριο αυτό αποτελεί την πιο αισιόδοξη εκδοχή και δε μπορεί να υλοποιηθεί στο 100%, εντούτοις η Ελλάδα θα μπορούσε να δείξει θετικά αποτελέσματα στη διαχείριση των αποβλήτων, ξεκινώντας από την υιοθέτηση πολιτικής διαλογής στην πηγή.

Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσαν να εφαρμοστούν οι κατάλληλες μέθοδοι ανάκτησης για την εκάστοτε υποκατηγορία των αστικών σύμμεικτων αποβλήτων, ενώ παράλληλα θα εκτρεπόταν σημαντικός όγκος από τους ΧΥΤΑ, πράγμα που αποτελεί μείζον πρόβλημα σε τοπικό και εθνικό επίπεδο.

Παράλληλα, θα μπορούσε να ενταχθεί στο ενεργειακό μίγμα της χώρας η παραγωγή ενέργειας από το ανακτηθέν καύσιμο RDF, κατά τον τρόπο που εξηγήθηκε ανωτέρω.

Κεφάλαιο 5^ο

Οικονομοτεχνική ανάλυση μονάδας αεριοποίησης RDF

5.1 Γενικά

Η χρήση της τεχνολογίας της αεριοποίησης στον τομέα της διαχείρισης απορριμμάτων είναι όπως αναφέρθηκε μέχρι στιγμής περιορισμένη, ακόμα και σε παγκόσμιο επίπεδο. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται εμπορικής κλίμακας μονάδες αεριοποίησης RDF το πολύ μέχρι 50 MW. Ωστόσο, υπάρχουν πολύ περισσότερες πιλοτικές και ερευνητικές εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας.

Παράλληλα, για λόγους που θα αναφερθούν στη συνέχεια, υπάρχει κενό και στην ελληνική νομοθεσία, η οποία ορίζει την τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (Νόμος 3851/2010). Με άλλα λόγια δεν υπάρχει συγκεκριμένη τιμή πώλησης για ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από εγκαταστάσεις που αξιοποιούν το αέριο σύνθεσης από αεριοποίηση RDF ως καύσιμο.

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται μία εκτίμηση για την οικονομική βιωσιμότητα μονάδας αεριοποίησης RDF, για ένα αντίστοιχο εύρος τιμών πώλησης της ενέργειας από το αέριο σύνθεσης, καθώς και για την τιμή πώλησης συνθετικού φυσικού αερίου, το οποίο προέρχεται από αναβάθμιση του υπό εξέταση αερίου σύνθεσης.

5.2 Παράμετροι οικονομοτεχνικής ανάλυσης μονάδας αεριοποίησης RDF

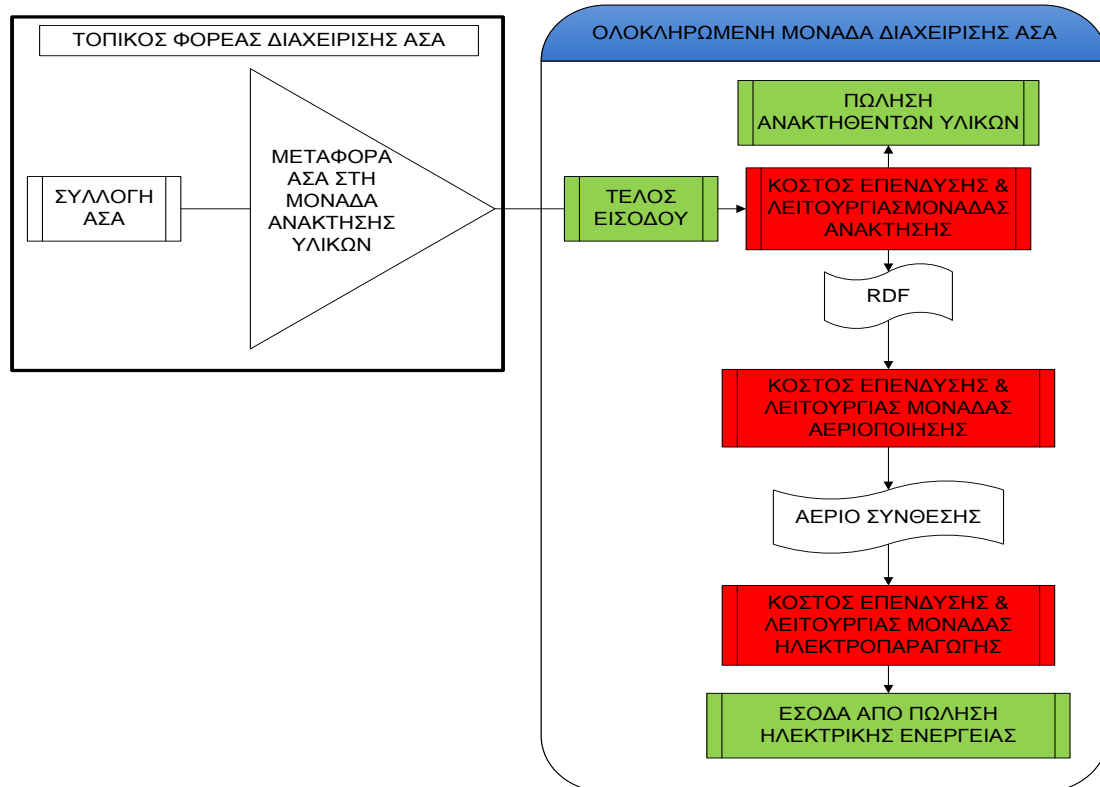
Στο οικονομικό μοντέλο που αναπτύχθηκε λήφθηκαν υπ' όψιν οι δύο περιπτώσεις εγκατάστασης αεριοποίησης RDF, όπως αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3, τα κύρια στοιχεία των οποίων δίνονται εποπτικά στα σχήματα 5.1 και 5.2:

- Ολοκληρωμένη μονάδα ανάκτησης υλικών, αεριοποίησης RDF και ηλεκτροπαραγωγής
- Απλή μονάδα αεριοποίησης RDF και ηλεκτροπαραγωγής.

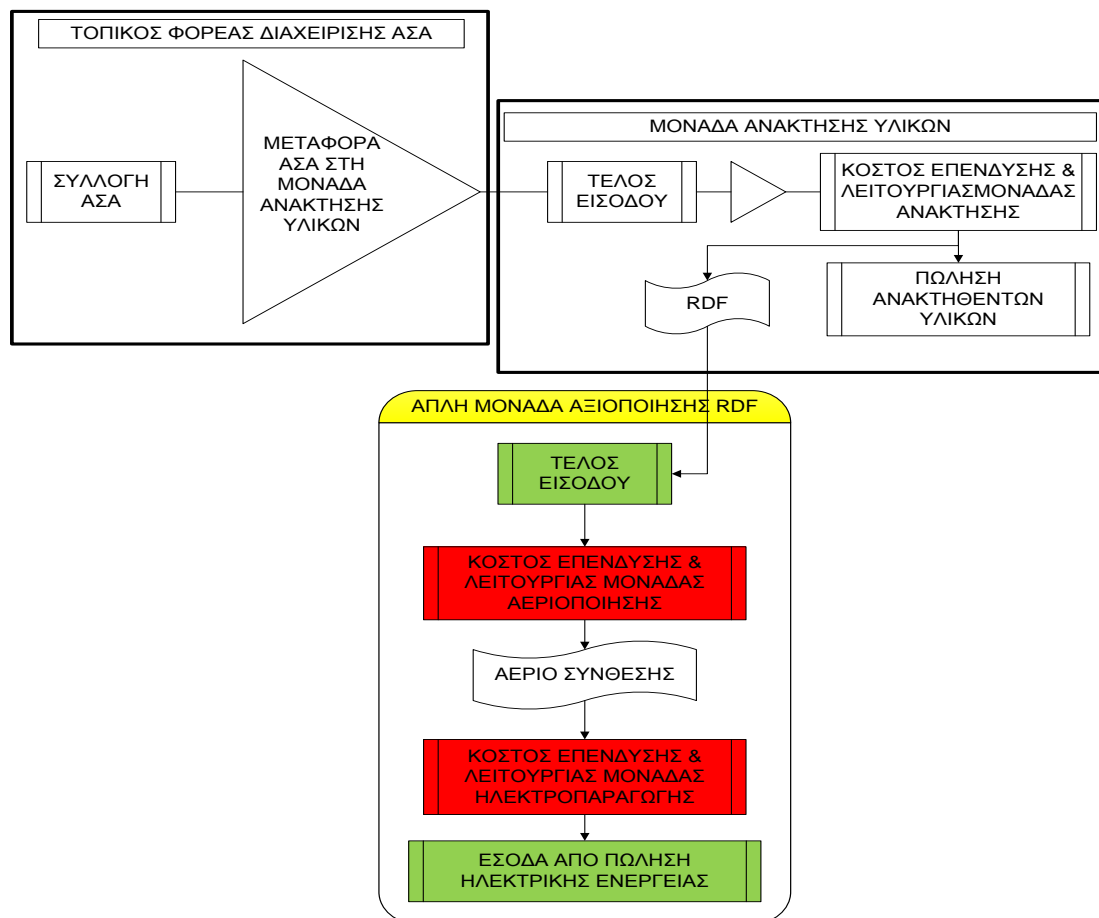
Η οικονομοτεχνική ανάλυση που εκπονείται εδώ χωρίζεται σε δύο τμήματα:

- i. Την εκτίμηση του συνολικού κόστους επένδυσης και λειτουργίας της απλής και της ολοκληρωμένης μονάδας αεριοποίησης RDF, καθώς και την εκτίμηση των εσόδων
- ii. Την εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας μιας τέτοιας μονάδας με κριτήριο οικονομικούς δείκτες.

Η ανάλυση αυτή αφορά το παρακάτω σενάριο, σύμφωνα με το οποίο έγιναν και οι χρηματοροές της επένδυσης, καθώς και οι αναλύσεις ευαισθησίας.



Σχήμα 5.1: Ολοκληρωμένη μονάδα διαχείρισης ΑΣΑ



Σχήμα 5.2: Απλή μονάδα θερμικής αξιοποίησης RDF

Βασικό σενάριο

Στο βασικό σενάριο που μελετήθηκε και για τις δύο μονάδες και αφορά το κομμάτι της αεριοποίησης, θεωρήθηκε ως δεδομένο ότι το αέριο σύνθεσης που παράγεται αξιοποιείται εξ ολοκλήρου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για εγκατεστημένη ισχύ της μονάδας που λαμβάνεται ίση με 500 kW_e και σαν πρωτεύον καύσιμο το RDF από μπλε κάδο, με σύσταση αυτήν που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3, η οποία επαναλαμβάνεται εδώ για λόγους πληρότητας (πίνακας 5.1).

Οργανικά	11,98
Χαρτί	26,50
Πλαστικό	32,59
Υφάσματα	6,45
Σιδηρούχα μέταλλα	2,50
Μη σιδηρούχα μέταλλα	1,50
Γυαλί	2,00
Ξύλο – Δέρμα	4,42
Αδρανή	5,39
Άλλα	6,67

Η αεριοποίηση του RDF με την παραπάνω σύσταση δίνει, όπως αναφέρεται παραπάνω, αέριο σύνθεσης με κατώτερη θερμογόνο ικανότητα 5,298 [MJ/kg].

Εάν θεωρηθεί ότι η μονάδα λειτουργεί 7000 [h/έτος], για να παράγεται ηλεκτρική ισχύς 500 kW_e από τη διάταξη ηλεκτροπαραγωγής, απαιτείται συγκεκριμένη ποσότητα αερίου. Αυτή υπολογίζεται ίση με 970,64 [kg syngas/h], αν θεωρηθεί ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης 35% (για αξιοποίηση του αερίου σε ΜΕΚ, [M. Baratieri et al., 2009](#)).

Συνεπώς, υπολογίζεται ότι ο αεριοποιητής θα πρέπει να τροφοδοτείται με 345,13 [kg RDF/h].

5.2.1. Τμήμα αεριοποίησης RDF (κοινό για τις 2 περιπτώσεις)

Το τμήμα της εγκατάστασης αεριοποίησης και ηλεκτροπαραγωγής για τα 2 σενάρια μονάδων που εξετάζονται είναι κοινό.

Συνεπώς, τα στοιχεία που παρατίθενται στη συνέχεια αφορούν και τις 2 περιπτώσεις. Τονίζεται εδώ ότι όλα τα μεγέθη αναφέρονται σε μονάδα ηλεκτροπαραγωγής 0,50 MW_e, κατά το βασικό σενάριο.

Εξοπλισμός

Ο μηχανολογικός εξοπλισμός που επιλέγεται εδώ για την αεριοποίηση RDF και τη χρήση του αερίου σύνθεσης για ηλεκτροπαραγωγή δίνεται στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Βασικός εξοπλισμός εγκατάστασης αεριοποίησης RDF

Αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας
Μηχανή εσωτερικής καύσης
Σύστημα καθαρισμού αερίου (εναλλάκτης θερμότητας, κυκλώνας, σακκόφιλτρο, υγρή πλυντηρίδα)

Οι λόγοι που επιλέχθηκε αεριοποιητής ρευστοποιημένης κλίνης ανακυκλοφορίας είναι ότι δέχεται μεγάλο εύρος καυσίμων, πράγμα που τον καθιστά κατάλληλο για το RDF, του οποίου η σύσταση μπορεί να διαφέρει σημαντικά, λόγω της αντίστοιχης διαφοράς στη σύσταση των ΑΣΑ αλλά και του βαθμού ανάκτησης υλικών, ο οποίος μπορεί να ποικίλει για διάφορους λόγους.

Λόγω αυτής της διαφοροποίησης στη σύσταση εμφανίζεται και διαφοροποίηση στην κατώτερη θερμογόνο ικανότητα του καυσίμου, ζήτημα που επίσης δεν αποτελεί πρόβλημα για τέτοιου είδους αεριοποιητές, οι οποίοι δέχονται καύσιμα με κατώτερη θερμογόνο από 3 – 34 [MJ/kg].

Παράλληλα, ο υψηλός βαθμός απόδοσης εστίας (της τάξης του 99%) και η καλή συμπεριφορά του σε χαμηλά φορτία, συνιστούν δύο ακόμη λόγους για την επιλογή της τεχνολογίας αυτής για την αεριοποίηση του RDF.

Η MEK επιλέγεται ως μέσο αξιοποίησης του syngas για ηλεκτροπαραγωγή καθώς έχει μικρότερες απαιτήσεις στην ποιότητα του, όσον αφορά το σωματιδιακό φορτίο του σε σχέση, παραδείγματος χάρη, με έναν αεριοστροβίλο. Πιο συγκεκριμένα, το syngas στην έξοδό του από τον αεριοποιητή μπορεί να παρασύρει μαζί του στερεής και στερεής-υγρής φάσης αιωρούμενη ύλη, η οποία χωρίζεται στις εξής κατηγορίες ([Γ. Πανούσης, 2011](#)):

- Την ιπτάμενη τέφρα, δηλαδή τμήματα ακαύστων που είναι ελαφριά και παρασύρονται από το ρεύμα του καυσίμου.
- Το εξανθράκωμα, που δεν έχει αντιδράσει πλήρως αλλά έχει αποκτήσει τέτοιο μέγεθος ώστε να καθίσταται δυνατή η διαφυγή του από τον αντιδραστήρα.
- Τα σωματίδια πληρωτικού υλικού από την κλίνη.
- Τα σωματίδια βαρέων ενώσεων πίσσας.

Παρόλα αυτά, τα στοιχεία που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για τις απαιτήσεις ποιότητας του αερίου όσον αφορά το σωματιδιακό φορτίο είναι περιορισμένα και μόνο ελάχιστα από αυτά είναι στοιχεία μετρήσεων από εγκαταστάσεις σε λειτουργία ([M. Baratieri et al., 2009](#)).

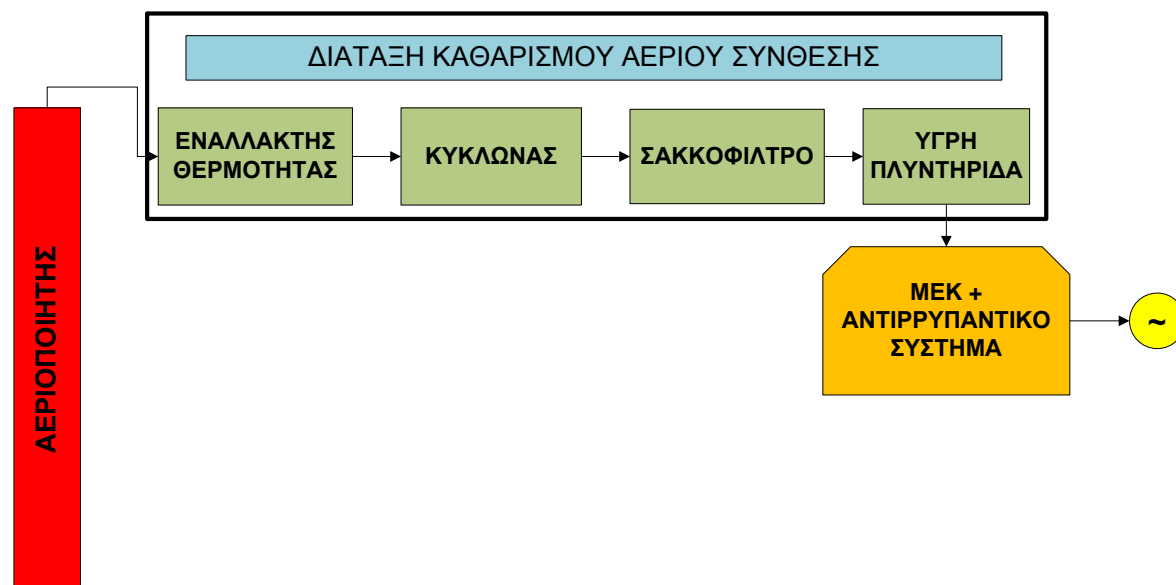
Σε κάθε περίπτωση, το αέριο περιέχει επιπλέον από τα παραπάνω στοιχεία αλκαλικές και θεικές ενώσεις που διαβρώνουν τα κινούμενα μέρη των μηχανών, όπως για παράδειγμα τα πτερύγια αεριοστροβίλου.

Για να μπορέσει να διέλθει το αέριο από το τμήμα αντιρρύπανσης πρέπει να έχει χαμηλή σχετικά θερμοκρασία, συνεπώς σε καμία περίπτωση τη θερμοκρασία εξόδου του από τον αεριοποιητή (~600° C) ([M. Baratieri et al., 2009](#)). Γι' αυτό το λόγο επιλέγεται να τοποθετηθεί αμέσως μετά τον αεριοποιητή ένας εναλλάκτης θερμότητας, ο οποίος μπορεί να αξιοποιήσει την απορριπτόμενη από το αέριο θερμότητα για θέρμανση νερού χρήσης.

Τέλος, το πλέον χαμηλότερης θερμοκρασίας αέριο μπορεί να διέλθει από το σύστημα αντιρρύπανσης, το οποίο επιλέγεται να αποτελείται από έναν κυκλώνα, για την αρχική αφαίρεση των στερεών σωματιδίων μεγαλύτερων από περίπου 5 μ m, ένα σακκόφιλτρο, το οποίο έχει υψηλή απόδοση ακόμα και για σωματίδια μικρότερα από 1 μ m και μία υγρή πλυντηρίδα, η οποία παράλληλα μειώνει κι άλλο το θερμοκρασία του, τελικά περίπου στους 30° C.

Σημειώνεται πως στην εξεταζόμενη περίπτωση όλες οι διατάξεις δουλεύουν σε ατμοσφαιρική πίεση.

Η εγκατάσταση φαίνεται εποπτικά στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Τμήμα αεριοποίησης RDF και ηλεκτροπαραγωγής

Κόστος επένδυσης & λειτουργίας

Η εκτίμηση του συνολικού κόστους επένδυσης για μία μονάδα αεριοποίησης και ηλεκτροπαραγωγής με εγκατεστημένη ισχύ 500 [kW_e], όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, δίνεται στον πίνακα 5.3 και είναι κοινή για τα δύο σενάρια.

Η εκτίμηση για τα κόστη του μηχανολογικού εξοπλισμού έγινε μέσω τυπικών τιμών. Το κόστος αποστολής εξοπλισμού 15% επί του συνολικού κόστους του (K. Choy et al., 2004). Το κεφάλαιο κίνησης ορίζεται στο 10% του συνολικού κόστους του εξοπλισμού και κατασκευής της μονάδας ενώ το κόστος εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο 2% αυτού (K. Choy et al., 2004). Τέλος, το συνολικό κόστος μελέτης, κατασκευής και προμήθειας εξοπλισμού για την ανέγερση της εγκατάστασης εκτιμήθηκε εμπειρικά για τις επιμέρους εργασίες και τον εξοπλισμό που απαιτείται και δίνεται το σύνολο αυτής της εκτίμησης.

Έτσι προκύπτει το τελικό κόστος επένδυσης ίσο με 8.432,87 [€/ εγκατεστημένο KW].

Πίνακας 5.3: Κόστος επένδυσης μονάδας αεριοποίησης & ηλεκτροπαραγωγής [€]

	Κόστος [€]	Ποσοστό επί του συνολικού κόστους
Σύστημα αεριοποίησης ¹	2.473.569,52	58,68%
Σύστημα ηλεκτροπαραγωγής (ΜΕΚ + σύστημα καθαρισμού καυσαερίων) ²	480.000,00	11,39%
Σύστημα καθαρισμού αερίου ³	45.190,11	1,05%
Αποστολή μηχανολογικού εξοπλισμού	449.813,95	10,67%
Μελέτες – Κατασκευή – Προμήθεια εξοπλισμού και υλικών κατασκευής	292.600,00	6,94%
Συστήματα ελέγχου	20.000,00	0,48%
Απρόβλεπτα κόστη	3.500,00	0,08%
ΜΕΡΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	3.764.673,58	89,29%
Κεφάλαιο κίνησης	376.467,36	8,93%
Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων	75.293,47	1,79%
ΤΕΛΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ	4.216.434,41	100,00%

¹: http://www.alentecinc.com/papers/IGCC/BIO_GASIFICTION.PDF

²: Energy and Environmental Analysis, Inc., 2008

³: EPA-452/F-03-005, 2003 (κυκλώνας),

<http://www.energyefficiencyasia.org/docs/casestudies/Thailand/Lime%20Master/Lime%20Master%20-%20Installation%20of%20bag%20filters%20for%20lime%20dust.pdf> (σακκόφιλτρο),

http://www.alibaba.com/product-gs/631028256/water_scrubber.html (υγρή πλυντηρίδα),

http://www.turismdurabil.ro/literatura/cp/CP-in-Hotels/e_bat_fhnw_CP-research_Flue-gas-heat-recovery.pdf (εναλλάκτης θερμότητας)

Το ετήσιο κόστος λειτουργίας περιλαμβάνει το κόστος συντήρησης, το κόστος λειτουργίας, το κόστος μισθοδοσίας και το κόστος ασφάλειας. Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται τα κόστη ως εξής:

- συντήρησης = 4% επί του συνολικού κόστους επένδυσης,
- ασφάλειας = 1% επί του συνολικού κόστους επένδυσης,
- Για τον υπολογισμό του κόστους μισθοδοσίας, έχουν γίνει οι παραδοχές που δίνονται στον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Κόστη μισθοδοσίας

Ιδιότητα	Αριθμός απασχολούμενων	Μηνιαίος μισθός [€/μήνα]
Ανειδίκευτοι εργαζόμενοι	7	1.500 €
Επιβλέποντες μηχανικοί	3	2.100 €
Διοικητικά στελέχη	3	2.500 €

Το ετήσιο κόστος μισθοδοσίας υπολογίζεται για 14 μηνιαίους μισθούς στην κάθε κατηγορία, ενώ προσαυξάνεται κατά 20%, ως εκτίμηση για τις κρατήσεις.

- Για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους λειτουργίας, λαμβάνονται τα επιμέρους κόστη: λειτουργίας των μηχανημάτων της μονάδας, πρώτων υλών (αβεστόλιθος), ηλεκτρικής ενέργειας για ιδιοκαταναλώσεις, νερού χρήσης και αδρανοποίησης και απόθεσης τέφρας. Πιο συγκεκριμένα:

Το μέσο κόστος λειτουργίας για το σύνολο των μηχανημάτων της μονάδας έχει εκτιμηθεί στα 16 [€/MWh_e] για το βασικό σενάριο εγκατεστημένης ισχύος 500 [KW_e].

Στο τμήμα της αεριοποίησης, όπου χρησιμοποιείται ασβεστόλιθος για αποθείωση, η απαιτούμενη ποσότητά του λαμβάνεται ίση με 12 [kg/τόνο RDF] με τιμή 83,96 [€/τόνο] (K. Choy et al., 2004).

Για τη συνολική λειτουργία της εγκατάστασης απαιτείται επίσης ηλεκτρική ενέργεια και νερό χρήσης. Οι ιδιοκαταναλώσεις της μονάδας εκτιμώνται στις 192 [kWh/τόνο RDF] (K. Choy et al., 2004), και καλύπτονται από ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας. Η κατανάλωση νερού υπολογίζεται στα 0,58 [m³/τόνο RDF] με τιμή 0,8381 [€/m³] (ΕΥΔΑΠ, για βιομηχανικές εγκαταστάσεις με κατανάλωση έως 1000 [m³/μήνα]).

Βασικά κόστη αποτελούν και τα κόστη αδρανοποίησης και απόθεσης της τέφρας, τα οποία εκτιμώνται στα 28,1 (B4-3040/2000/306517/MAR/E3, 2003, τιμή Γερμανίας) και 60 [€/τόνο τέφρας] αντίστοιχα.

Τα συνολικά λειτουργικά κόστη δίνονται στον πίνακα 5.5, ενώ οι ιδιοκαταναλώσεις καλύπτονται από το 15,28% της παραγόμενης ενέργειας.

	Κόστος [€]	Ποσοστό επί του κόστους επένδυσης
Κόστος συντήρησης - λειτουργίας	252.419,29 €	5,97%
Κόστος μισθοδοσίας	408.240,00 €	9,69%
Κόστος ασφάλειας	42.164,34 €	1,00%
ΣΥΝΟΛΟ	702.823,64 €	16,67%

Συνεπώς, τα τελικά κόστη επένδυσης και λειτουργίας για τη συγκεκριμένη μονάδα δίνονται στον πίνακα 5.6.

Κόστος επένδυσης [€]	4.216.434,41 €
Κόστη λειτουργίας [€/έτος]	702.823,64 €

5.2.2. Τμήμα ανάκτησης υλικών (αφορά την ολοκληρωμένη μονάδα)

Κόστος επένδυσης & λειτουργίας μονάδας ανάκτησης υλικών

Τα κόστη που αφορούν τη μονάδα ανάκτησης υλικών λήφθηκαν από την μελέτη του A.P. Economopoulos, 2010, στην οποία έχουν εξαχθεί σχέσεις υπολογισμού του κόστους επένδυσης και κόστους λειτουργίας για μονάδα μηχανικής και αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας.

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- Κόστος επένδυσης = $-680x^2 + 324.259x + 1.747,123$ [€]

$$- \text{Κόστος λειτουργίας} = 27,647x + 1.786,291 \text{ [€/έτος]}$$

όπου x είναι η ποσότητα απορριμμάτων που δέχεται η μονάδα σε [τόνους/έτος].
Λόγω του ότι στην παρούσα εργασία έχει θεωρηθεί απλή ανάκτηση υλικών, χωρίς βιολογική επεξεργασία, έχει ληφθεί υπ' όψιν το 80% του κόστους επένδυσης και το 90% του κόστους λειτουργίας που υπολογίστηκε από τις παραπάνω σχέσεις.

Σύμφωνα με το βασικό σενάριο, για το οποίο απαιτούνται 345,13 [kg RDF/h], εκτελώντας την αντίστροφη διαδικασία από αυτήν που εκτελέστηκε για να βρεθεί από τη σύσταση των ΑΣΑ η σύσταση του RDF, υπολογίζεται η ποσότητα των ΑΣΑ, από την οποία προέρχεται το συγκεκριμένο RDF, κατά σύσταση και ποσότητα.

Επιπλέον, για 7000 ώρες λειτουργίας ανά έτος, υπολογίζεται πως η τελική ποσότητα που απαιτείται σε σύμμεικτα απορρίμματα για τη λειτουργία της μονάδας με εγκατεστημένη ισχύ 0,5 MW_e είναι 3855,62 [τόνοι ΑΣΑ/έτος].

Τελικά, για την επεξεργασία αυτής της ποσότητας απορριμμάτων, τα κόστη επένδυσης και λειτουργίας δίνονται στον πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Κόστος επένδυσης και λειτουργίας μονάδας ανάκτησης	
Κόστος επένδυσης [€]	993.486,63 €
Κόστος λειτουργίας [€/έτος]	67.912,09 €

5.2.3. Έσοδα εγκατάστασης

Και στις δύο περιπτώσεις, τα έσοδα της μονάδας περιλαμβάνουν το τέλος εισόδου που εισπράττεται για την παραλαβή των απορριμμάτων ή του RDF. Σύμφωνα με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», το κόστος διαχείρισης επιβαρύνει τον παραγωγό απορριμμάτων, για παράδειγμα τη δημοτική αρχή.

Επιπλέον, υπολογίζονται τα έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται.

Τέλος, η ολοκληρωμένη μονάδα έχει και έσοδα από την πώληση των υλικών που ανακτώνται.

Στη συνέχεια δίνονται αναλυτικά τα έσοδα για κάθε μονάδα.

Πάνια έσοδα απλής μονάδας

Η απλή εγκατάσταση παραλαμβάνει RDF, το οποίο έχει παραχθεί σε μονάδα ανάκτησης υλικών. Το τέλος εισόδου για το RDF εκτιμάται για το βασικό σενάριο στα 40 [€/τόνο_{RDF}]. Συνεπώς, για 7000 ώρες λειτουργίας, τα ετήσια έσοδα της μονάδας από το τέλος εισόδου ανέρχονται στα 96.636,61 [€/έτος].

Πάνια έσοδα ολοκληρωμένης μονάδας

Σε αυτή την περίπτωση η μονάδα παραλαμβάνει σύμμεικτα απορρίμματα (για το βασικό σενάριο γίνεται η παραδοχή ότι προέρχονται μόνο από μπλε κάδο), οπότε το τέλος εισόδου θα είναι μεγαλύτερο και εκτιμάται στα 60 [€/τόνο_{ΑΣΑ}].

Επομένως, για 7000 ώρες λειτουργίας, τα ετήσια έσοδα από το τέλος εισόδου θα ανέρχονται στα 231.337,28 [€/έτος].

Από τις ποσότητες υλικών που ανακτώνται και πωλούνται η μονάδα έχει επιπλέον έσοδα. Σύμφωνα με τα ποσοστά ανάκτησης του βασικού σεναρίου του μπλε κάδου (30% ανάκτηση πλαστικού και 30% ανάκτηση χαρτιού), δίνονται οι ποσότητες που ανακτώνται από κάθε υλικό στον πίνακα 5.8.

Υλικό	Ποσότητα ανάκτησης [τόνοι/έτος]
Χαρτί	295,48
Πλαστικό	363,39
Σιδηρούχα μέταλλα	322,12
Μη σιδηρούχα μέταλλα	193,27
Γυαλί	66,44

Οι τιμές πώλησης και τα έσοδα από την πώληση των ανακτηθέντων υλικών δίνονται στον πίνακα 5.9.

Υλικό	Τιμή πώλησης [€/τόνο]	Σύνολο εσόδων [€/έτος]
Χαρτί	100,00	29.548,44
Πλαστικό	280,00	101.749,21
Γυαλί	40,00	2.657,50
Σιδηρούχα μέταλλα	125,00	40.265,17
Μη σιδηρούχα μέταλλα	1.000,00	193.272,80

Από τον τελευταίο πίνακα προκύπτει ένα αρχικό συμπέρασμα, σε σχέση με τα υλικά τα οποία συμφέρει να ανακτώνται. Παρατηρείται πως τα μέταλλα, τα οποία γενικά ανακτώνται εύκολα και με απλές διατάξεις, αποτελούν το μεγαλύτερο έσοδο από την ανάκτηση, λόγω του ότι προσφέρεται υψηλή τιμή για την απόκτησή τους.

Η τιμή αυτή παρόλα αυτά είναι σίγουρα πολύ μικρότερη από αυτή που θα κόστιζε για να κατασκευαστεί ένας τόνος από τη αρχή (συμπεριλαμβάνοντας τις ενεργειακές καταναλώσεις).

Αντίθετα, η τιμή που προσφέρεται παραδείγματος χάρη για το γυαλί είναι αρκετά μικρή. Παρόλα αυτά, συμφέρει πιο πολύ να ανακτηθεί το γυαλί και να πωληθεί στην τιμή αυτή παρά να παραμένει στο RDF, εφόσον στο μεγαλύτερο ποσοστό του αποτελείται από υλικά, τα οποία παραμένουν άκαυστα.

Συνεπώς, η αεριοποίησή του προσδίδει ελάχιστα στο παραγόμενο αέριο, ενώ αντίθετα αυξάνει την ποσότητα της τέφρας που θα πρέπει να απορριφθεί.

Για το χαρτί και το πλαστικό έχει γίνει αναφορά παραπάνω για το αν συμφέρει και σε ποιον τομέα η ανάκτησή τους. Η τιμή που προσφέρεται για τα ανακτηθέντα χαρτιά και πλαστικά δεν είναι το κύριο κριτήριο που καθορίζει την ανάκτησή τους, αλλά τα έσοδα από την πώλησή τους δεν είναι μεγέθους τέτοιου που να μπορούν να αγνοηθούν.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω τιμές που λήφθηκαν ποικίλουν αναλόγως με την ποιότητα του ανακτηθέντος υλικού (προσμίξεις υλικών άλλης σύστασης χειροτερεύουν την ποιότητα, συνεπώς επηρεάζουν αρνητικά την τιμή).

Τα συνολικά πάγια έσοδα της ολοκληρωμένης μονάδας είναι 598.830,40 [€/έτος].

5.3. Ανάπτυξη τιμολογιακής πολιτικής πώλησης ενέργειας

Η τιμολογιακή πολιτική που ακολουθείται εδώ είναι βασισμένη στο ότι η τιμή πώλησης της ενέργειας πρέπει να είναι τέτοια ώστε η εγκατάσταση να είναι οικονομικά βιώσιμη.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στο οικονομικό μοντέλο, κάνοντας κάποιες παραδοχές που θα αναφερθούν λεπτομερώς παρακάτω, περιλαμβάνει την κατάρτιση των χρηματοροών της επένδυσης, σε 20ετή ορίζοντα, και εφαρμόζει τη μέθοδο αντίστροφα.

Με αυτόν τον τρόπο, λαμβάνονται ως αποτέλεσμα τα έσοδα που πρέπει να έχει η μονάδα από την πώληση της ενέργειας, ώστε να είναι βιώσιμη, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις που επεξηγούνται στη συνέχεια.

5.3.1. Δεδομένα βασικών οικονομικών σεναρίων

Ως δεδομένα για το βασικό οικονομικό σενάριο λαμβάνονται τα εξής στοιχεία:

- Όσον αφορά τη χρηματοδότηση, αυτή θεωρείται ότι είναι αποτελείται από 30% ίδια κεφάλαια, 40% δανειοδότηση και 30% επιχορήγηση.
- Θεωρούνται επίσης οι συντελεστές:
 - Φορολόγησης **25%**
 - Πληθωρισμού **2,0%**
 - Απόσβεσης παγίων περιουσιακών στοιχείων **8%**
 - Επιτοκίου αναγωγής **9%**
 - Ετήσιας αύξησης τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας ίση με το 25% του πληθωρισμού, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση **0,50%**

Ο συντελεστής ετήσιας αύξησης της τιμής πώλησης καθορίζεται από το νόμο [3859/2010](#), όπου το 25% είναι το ανώτατο όριο επιτρεπόμενης ετήσιας προσαύξησης της τιμής.

- Στοιχεία δανείου: για τον υπολογισμό του δανείου θεωρήθηκε επιτόκιο 7%, μηνιαία περίοδος πληρωμής και αποπληρωμή σε 120 μήνες (10 έτη).

Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται υπ' όψιν στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω, για το σενάριο χαμηλού βαθμού ανάκτησης για την περίπτωση του μπλε κάδου.

5.3.2. Υπολογισμός τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από αέριο σύνθεσης που προέρχεται από αεριοποίηση RDF

Νομοθετικό πλαίσιο

Ο νόμος 3851/2010 ορίζει την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε [€/MWh].

Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που γίνεται για τις ανανεώσιμες πηγές, η ενέργεια από αέριο σύνθεσης που προέρχεται από σύμμεικτα απορρίμματα (που έχει προέλθει δηλαδή από θερμική διεργασία, και όχι από υγειονομική ταφή) δεν μπορεί να καταταγεί σε κάποια από τις κατηγορίες.

Συνεπώς, επιδιώκεται να υπολογιστεί μία τιμή πώλησης, τέτοια ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμη η εγκατάσταση αεριοποίησης.

Παράλληλα, θα μπορέσει να λειτουργήσει και ως μελλοντική πρόταση, ώστε να συμπεριληφθεί προοδευτικά στη νομοθεσία, εφόσον εφαρμοστεί η αεριοποίηση ως μέθοδος διαχείρισης αστικών αποβλήτων.

Υπολογισμός τιμής πώλησης

Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, επεξηγείται αρχικά η μέθοδος υπολογισμού των καθαρών ταμειακών ροών για το σύνολο της επένδυσης, από τις οποίες θα προκύψουν στη συνέχεια οι οικονομικοί δείκτες που θα καθορίσουν την οικονομική βιωσιμότητά της.

Για τον υπολογισμό των καθαρών ταμειακών ροών κάθε έτους λαμβάνονται τα παρακάτω:

- [Αρχικές εκροές]=[Ιδια κεφάλαια επενδυτή]+[Δανειακά κεφάλαια]
- [Εισροές]=[Συνολικά ετήσια έσοδα]
- [Κόστη λειτουργίας]
- [Δόση Δανείου]=[Χρεολύσιο δανείου]+[Τόκοι δανείου]
- [Αποσβέσεις παγίων]=[Αρχικές εκροές]*[Συντελεστή αποσβέσεων παγίων]
- [Φορολογητέο εισόδημα]=[Εισροές]-[Κόστη λειτουργίας]-[Τόκοι δανείου]-[Αποσβέσεις]
- [Φόροι]=[Φορολογητέο εισόδημα]*[Συντελεστή φορολόγησης]
- [Υπολειμματική αξία]=[Συνολικές εκροές]-[σύνολο αποσβέσεων] (υπολογίζεται στο τελευταίο έτος του επενδυτικού ορίζοντα και εκφράζει την αξία των παγίων περιουσιακών στοιχείων στο τέλος της επένδυσης)
- [Καθαρές Ταμειακές Ροές]=[Εισροές]-[Κόστη λειτουργίας]-[Τόκοι δανείου]-[Φόροι]+[Υπολειμματική αξία]

Ο οικονομικός δείκτης που εξετάζεται αρχικά είναι ο IRR (εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης).

Η οικονομική θεωρία ορίζει τον IRR έτσι, ώστε εάν σε σύγκριση με το επιτόκιο αναγωγής που έχει θέσει ο επενδυτής ως κριτήριο είναι μεγαλύτερος, τότε η επένδυση θεωρείται βιώσιμη.

Παρόλα αυτά, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης θεωρείται αξιόπιστη εκτίμηση για μία επένδυση όταν είναι αρκετά μεγαλύτερος από το επιτόκιο αναγωγής, ώστε να υπάρχει το

περιθώριο της ασφάλειας για τυχόν μη εκτιμημένο εκ των προτέρων επιχειρηματικό κίνδυνο.

Στην προκειμένη περίπτωση, όπου εξετάζεται η επένδυση στο σύνολό της, θα πρέπει στο επιτόκιο αναγωγής να ληφθεί υπ' όψιν όχι μόνο η απόδοση των ιδίων κεφαλαίων που θεωρεί ο επενδυτής ικανοποιητική αλλά και το επιτόκιο των δανειακών κεφαλαίων, εφόσον το αρχικό κόστος καλύπτεται τόσο από τα ίδια όσο και από τα δανειακά κεφάλαια. Συνεπώς το συνολικό επιτόκιο αναγωγής θα δίνεται από τη σχέση:

$$r_{total} = [\% \text{ Συμμετοχή δανειακών κεφαλαίων}] * r_{\deltaανει\omicron\upsilon} + [\% \text{ Συμμετοχή ιδίων κεφαλαίων}] * r_{ιδίων \text{ κεφαλαίων}}$$

Το μη επιδοτούμενο τμήμα της επένδυσης αποτελεί στο βασικό σενάριο το 70% του συνολικού κόστους επένδυσης, συνεπώς τα αντίστοιχα ποσοστά δανειακών και ιδίων κεφαλαίων ανάγονται στο 100% του μη επιδοτούμενου (57,14% και 42,86% αντίστοιχα) και το τελικό αποτέλεσμα είναι ίσο με 7,8571%, με το οποίο θα συγκριθεί ο IRR και θα υπολογιστούν οι υπόλοιποι οικονομικοί δείκτες.

Για να ευρεθεί τελικά η προτεινόμενη τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας που αναφέρθηκε παραπάνω, πρέπει να πραγματοποιηθεί η αντίστροφη διαδικασία από αυτήν που περιγράφηκε, με γνωστό τον IRR και άγνωστο το τμήμα των ετήσιων εσόδων που αφορά την πώληση της παραγόμενης ενέργειας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση (Κ. Αραβώσης, 2007):

$$[Ταμειακές \text{ ροές}_0] = \sum_{i=1}^{20} \frac{[Ταμειακές \text{ ροές}_i]}{(1 + IRR)^i}$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, εφόσον πρόκειται για εγκατάσταση η οποία θα παράγει ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμη πηγή και θα διασυνδεθεί με το δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής, ο επιχειρηματικός κίνδυνος θεωρείται σχετικά μικρός.

Γ' αυτό το λόγο, μπορεί εκτιμάται ως αποδεκτός IRR=20%, ο οποίος θεωρείται ότι συμπεριλαμβάνει συντελεστή ασφαλείας.

Από εδώ υπολογίστηκαν για κάθε έτος οι ταμειακές ροές σύμφωνα με τα υπόλοιπα έσοδα της εγκατάστασης, συνεπώς υπολογίστηκαν τα ετήσια έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας (εφόσον όλα τα υπόλοιπα στοιχεία των ταμειακών ροών ήταν γνωστά).

Τα αποτελέσματα για το πρώτο έτος λειτουργίας παρουσιάζονται στον πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10: Υπολογισμός τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας		
	Απλή εγκατάσταση	Ολοκληρωμένη εγκατάσταση
Έσοδα από πώληση ενέργειας για το 1^ο έτος της επένδυσης [€]	1.478.333,92	1.241.880,38
Ετήσια παραγόμενη ενέργεια [kWh/έτος]	3.036.144,28	3.036.144,28
Αρχική τιμή πώλησης [€/MWh]	486,90	409,00

Παρατηρείται ότι, λόγω των μικρών εσόδων που έχει η απλή μονάδα χωρίς να ληφθούν υπ' όψιν τα έσοδα από την ηλεκτροπαραγωγή, απαιτείται υψηλότερη τιμή πώλησης ώστε να μπορέσει να είναι βιώσιμη η εγκατάσταση. Με άλλα λόγια, η τιμολόγηση σε μικρότερη τιμή ώστε να μπορεί να είναι πιο ανταγωνιστική δεν θα έκανε αποδεκτό το επιχειρηματικό σχέδιο, σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν τεθεί για την αποδοχή του.

Από την ευθεία μέθοδο τώρα, υπολογίζεται ο δείκτης IRR ίσος με 21%, αποτέλεσμα της ετήσιας αύξησης τιμής λόγω του πληθωρισμού, ενώ υπολογίζονται άλλοι δύο οικονομικοί δείκτες, αυτός της καθαρής παρούσας αξίας (NPV) και αυτός της έντοκης περιόδου αποπληρωμής (ΕΠΑ) της επένδυσης.

Η καθαρή παρούσα αξία μίας επένδυσης ορίζεται ως η αξία της επένδυσης ανηγμένη στη χρονική στιγμή έναρξης της εμπορικής της λειτουργίας.

Η έντοκη περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης ορίζεται ως η περίοδος επανάκτησης του αρχικού κόστους επένδυσης.

Στον πίνακα 5.11 δίνονται οι δύο αυτοί δείκτες για τις δύο περιπτώσεις εγκατάστασης.

Πίνακας 5.11: Δείκτες καθαρής παρούσας αξίας και έντοκης περιόδου αποπληρωμής		
	Απλή εγκατάσταση	Ολοκληρωμένη εγκατάσταση
Καθαρή παρούσα αξία [€]	3.329.858,50	3.999.770,80 €
Έντοκη περίοδος αποπληρωμής [Ετη]	6,03	6,08

Ο δείκτης της καθαρής παρούσας αξίας σε μία βιώσιμη επένδυση βγαίνει θετικός, όπως σε αυτή την περίπτωση, και μάλιστα το αποτέλεσμα είναι αρκετά μεγαλύτερο του μηδενός και στις δύο περιπτώσεις εγκατάστασης.

Παρατηρείται ότι στην περίπτωση της ολοκληρωμένης εγκατάστασης, η καθαρή παρούσα αξία βγαίνει μεγαλύτερη από αυτήν της απλής περίπτωσης, πράγμα που σημαίνει ότι η επένδυση στη μία περίπτωση αποδίδει περισσότερο από ότι στην άλλη (Δ. Χ. Παναγιωτακόπουλος, 2008).

Το κριτήριο του χρόνου αποπληρωμής είναι πιο απλοϊκό σε σχέση με τα άλλα δύο αλλά είναι προτιμητέο σε περιόδους έλλειψης ρευστότητας, ώστε εάν ο χρόνος που υπολογίζεται είναι μικρότερος από τον επιθυμητό χρόνο ανάκτησης κεφαλαίου, η επένδυση να γίνει αποδεκτή. Εδώ εξάγεται σαν αποτέλεσμα ικανοποιητικός χρόνος αποπληρωμής, δεδομένου ότι πρόκειται για την αποπληρωμή του συνόλου του μη επιδοτούμενου τμήματος της επένδυσης.

5.4. Αναλύσεις ευαισθησίας οικονομικών μεγεθών

5.4.1. Ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με το τέλος εισόδου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, το τέλος εισόδου για τις δύο εγκαταστάσεις έχει ληφθεί σταθερό και ίσο με 40 €/τόνο_{RDF} στην περίπτωση απλής μονάδας και 60 €/τόνο_{ΑΣΑ} στην περίπτωση ολοκληρωμένης μονάδας. Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται εδώ βάση του εύρους τιμών τέλους εισόδου που συναντάται σε μονάδες επεξεργασίας

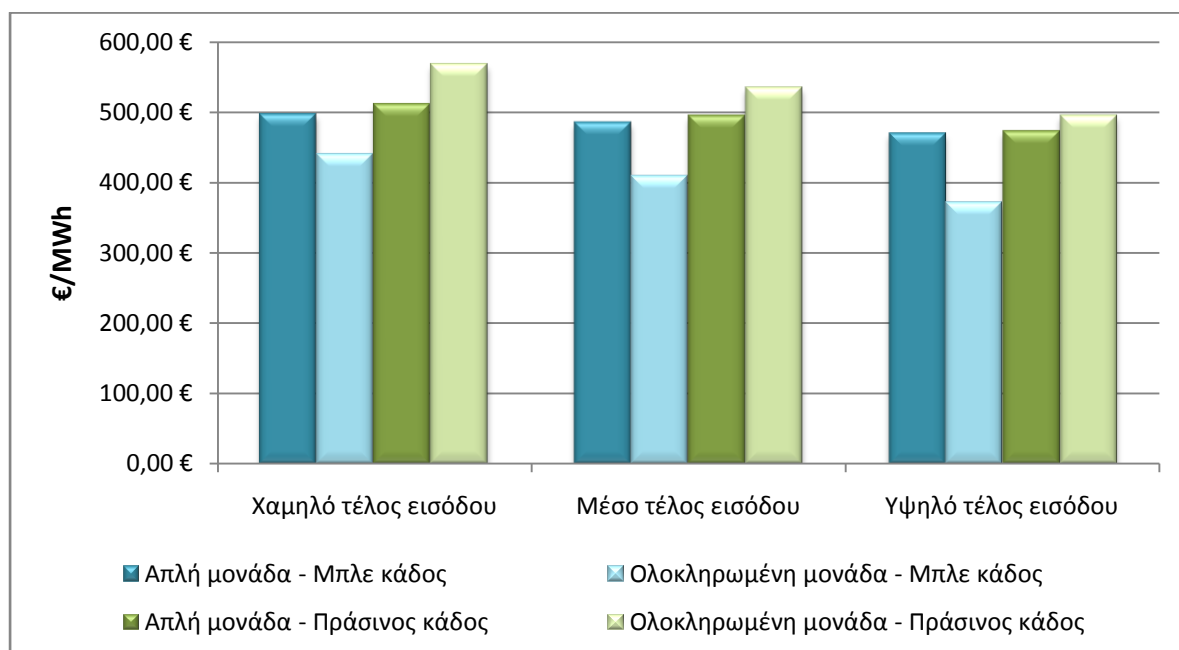
απορριμμάτων στη Ευρώπη (K. N. Finney et al., 2012), όπου τονίζεται ότι το τέλος εισόδου για ανεπεξέργαστα απορρίμματα είναι υψηλότερο από αυτό για ανακτηθέντα καύσιμα από απορρίμματα.

Οι υπολογισμοί γίνονται για επιδιωκόμενο IRR=20%, με μορφή χρηματοδότησης της επένδυσης αυτήν που ορίστηκε ανωτέρω και για το σενάριο χαμηλών βαθμών ανάκτησης για τις περιπτώσεις των δύο κάδων. Επίσης, οι τιμές τέλους εισόδου που λήφθηκαν αφορούν το άνω και κάτω όριο που αντλήθηκε από τη βιβλιογραφία και μία μέση τιμή, η οποία έχει θεωρηθεί και στα βασικά οικονομικά σενάρια.

Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 5.12 και στο διάγραμμα 5.1.

Πίνακας 5.12: Τιμή πώλησης παραγόμενης ενέργειας [€/MWh] συναρτήσει του τέλους εισόδου της μονάδας επεξεργασίας

Απλή μονάδα			Ολοκληρωμένη μονάδα		
Τέλος εισόδου [€/τόνο _{RDf}]	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος	Τέλος εισόδου [€/τόνο _{A2SA}]	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος
25,00	497,20	510,60	35,00	440,10	567,80
40,00	486,90	494,20	60,00	409,00	535,50
60,00	470,10	472,20	90,00	372,10	495,10



Διάγραμμα 5.1: Τιμή πώλησης παραγόμενης ενέργειας συναρτήσει του τέλους εισόδου των απορριμμάτων στη μονάδα

Το συμπέρασμα που εξάγεται από εδώ είναι πως το υψηλό τέλος εισόδου επιτρέπει στην τιμή πώλησης να κινηθεί σε χαμηλότερα επίπεδα. Παράλληλα, παρατηρείται ότι ενώ το τέλος εισόδου δεν επηρεάζει πολύ την τιμή πώλησης για τις δύο περιπτώσεις κάδου στην περίπτωση της απλής μονάδας, στην περίπτωση ολοκληρωμένης μονάδας εμφανίζεται μεγάλη διαφορά μεταξύ των τιμών πώλησης για τα σενάρια των δύο κάδων. Αυτό οφείλεται στην επιπρόσθετη διαδικασία της ανάκτησης υλικών και των εσόδων που προκύπτουν από αυτή, όπως θα αναφερθεί λεπτομερώς και στη συνέχεια.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει τέλος η συμπεριφορά του μοντέλου για τον πράσινο κάδο, για τον οποίο η τιμή πώλησης στην περίπτωση ολοκληρωμένης εγκατάστασης εμφανίζεται

πολύ υψηλή για χαμηλό τέλος εισόδου, αλλά είναι και γενικά η υψηλότερη σε κάθε μία από τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται και πάλι στο γεγονός των χαμηλών ανακτήσεων που μπορούν να πραγματοποιηθούν στην περίπτωση των απορριμμάτων με προέλευση τον πράσινο κάδο και συνεπώς των μικρών ποσοτήτων ανακυκλώσιμων υλικών που διατίθενται προς πώληση, ενώ τα κόστη λειτουργίας και επένδυσης της μονάδας ανάκτησης είναι υψηλά.

Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί πως το χαμηλό τέλος εισόδου κάνει πιο ελκυστική μία μέθοδο διαχείρισης απορριμμάτων, οπότε είναι συνήθως προτιμητέο.

Στις αναλύσεις ευαισθησίας που ακολουθούν χρησιμοποιείται το μέσο αντίστοιχο τέλος εισόδου για καθεμία από της περιπτώσεις εγκατάστασης.

5.4.2. Ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με την ανάκτηση υλικών

Εδώ γίνεται μία σύνδεση με το περιβαλλοντικό κομμάτι της μελέτης. Καταρχάς, η συγκεκριμένη ανάλυση ευαισθησίας αφορά μόνο την ολοκληρωμένη μονάδα, και την τιμή στην οποία θα πρέπει να πωλείται η ηλεκτρική ενέργεια αναλόγως με τα ποσοστά ανάκτησης χαρτιού και πλαστικού, που αναφέρθηκαν ως σενάρια στο κεφάλαιο 4 (δεδομένου ότι για τα υπόλοιπα υλικά έχουν θεωρηθεί σταθερά ποσοστά ανάκτησης). Γίνεται επιπλέον εδώ και μία σύγκριση σε σχέση με τον IRR, ο οποίος τίθεται και σε χαμηλότερα επίπεδα εκτός από το βασικό σενάριο του 20%.

Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 5.13 και στο διάγραμμα 5.2.

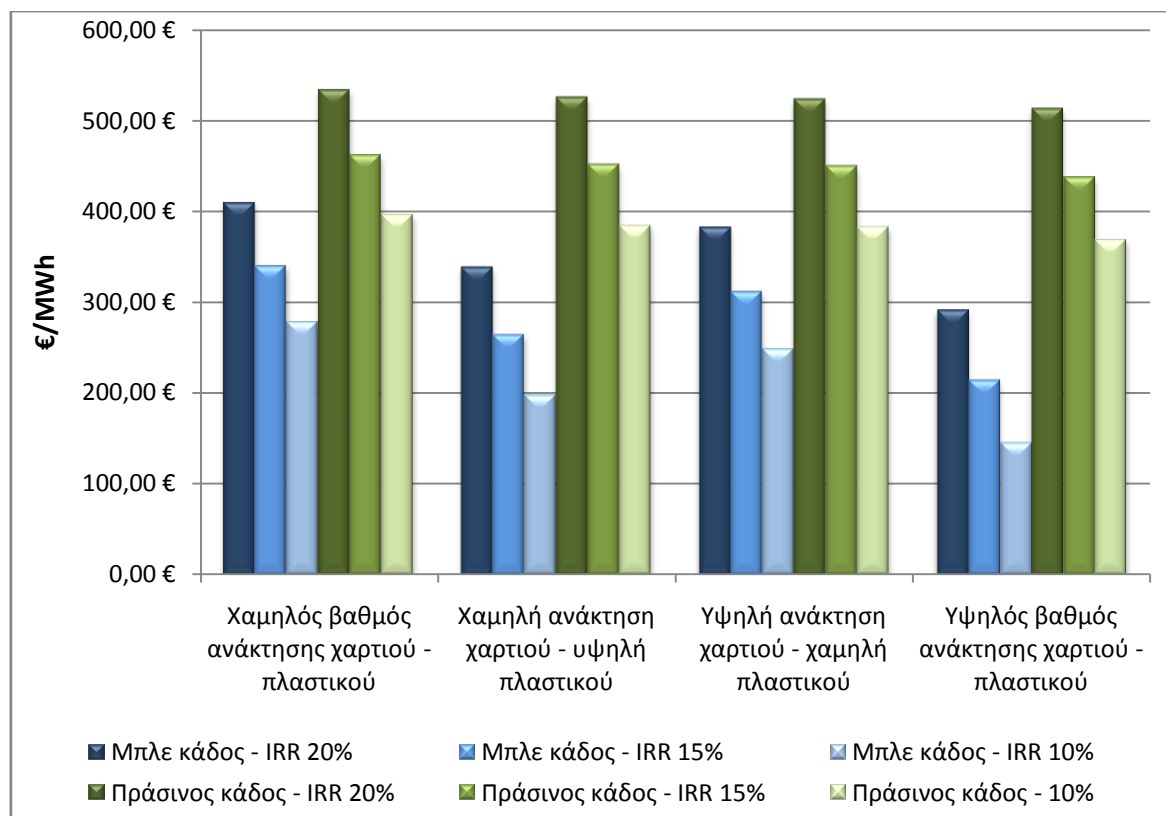
Πίνακας 5.13: Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της ανάκτησης υλικών [€/MWh]

IRR	10%	15%	20%	Εύρος
Χαμηλός βαθμός ανάκτησης - μπλε	277,90	340,00	409,00	131,30
Χαμηλή ανάκτηση χαρτιού & υψηλή πλαστικού - μπλε	197,70	264,40	338,50	140,80
Υψηλή ανάκτηση χαρτιού & χαμηλή πλαστικού - μπλε	248,40	311,90	382,50	134,10
Υψηλός βαθμός ανάκτησης - μπλε	145,50	214,70	291,50	146,00
Χαμηλός βαθμός ανάκτησης - πράσινο	396,40	461,90	535,50	137,80
Χαμηλή ανάκτηση χαρτιού & υψηλή πλαστικού - πράσινο	384,40	451,60	526,10	141,70
Υψηλή ανάκτηση χαρτιού & χαμηλή πλαστικού - πράσινο	383,20	449,90	524,10	140,90
Υψηλός βαθμός ανάκτησης - πράσινο	369,10	437,50	513,70	144,60

Παρατηρείται αρχικά η μεγάλη διαφορά στην τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας μεταξύ των αντίστοιχων σεναρίων ανάκτησης για τον μπλε και τον πράσινο κάδο. Αυτή οφείλεται στις μικρές ποσότητες ανακτηθέντων υλικών στην περίπτωση του πράσινου κάδου, πρώτον λόγω του ότι δε μπορεί να γίνει υψηλή ανάκτηση και δεύτερον επειδή η ανάκτηση που γίνεται αφορά υλικά τα οποία στον πράσινο κάδο υφίστανται σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις. Εφόσον τα έσοδα από την πώληση ανακτηθέντων είναι λιγότερα, κατά συνέπεια αυξάνεται η τιμή πώλησης ενέργειας ώστε να είναι βιώσιμη η εγκατάσταση.

Επιπλέον, για τον ίδιο λόγο, όσο αυξάνεται η ανάκτηση σε σχέση με την περίπτωση του βασικού σεναρίου, η απαιτούμενη τιμή πέφτει.

Ακόμα, λόγω της μεγαλύτερης τιμής πώλησης του ανακυκλωμένου πλαστικού σε σχέση με αυτή του χαρτιού, στην περίπτωση της υψηλής ανάκτησής του, η τιμή πώλησης ενέργειας θα μπορεί να κινείται σε χαμηλότερα επίπεδα.



Διάγραμμα 5.2: τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την ανάκτηση υλικών

Τέλος, η τιμή που προκύπτει για την περίπτωση υψηλών ανακτήσεων και για τα δύο υλικά είναι η πλέον χαμηλή, και για τις δύο περιπτώσεις, μπλε και πράσινου κάδου. Όσον αφορά τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης, εδώ δείχνει το εύρος μέσα στο οποίο μπορεί να κινηθεί η τιμή προς τα κάτω, δεδομένου του επιτοκίου αναγωγής. Το εύρος αυτό είναι παρόμοιο για όλα τα σενάρια ανάκτησης και στις δύο περιπτώσεις κάδων.

5.4.3. Ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με τον δείκτη IRR της επένδυσης

Η ανάλυση αυτή πραγματοποιήθηκε για τις δύο περιπτώσεις μονάδας, απλή και ολοκληρωμένη, για τα δύο είδη RDF, από μπλε και από πράσινο κάδο και για δύο περιπτώσεις χρηματοδότησης, με και χωρίς κρατική επιχορήγηση.

Τα υπόλοιπα δεδομένα παρέμειναν όπως στο βασικό σενάριο, ενώ επιλέχθηκε ο IRR να κυμανθεί από 10% έως 30% (απαισιόδοξο και αισιόδοξο σενάριο βιωσιμότητας της επένδυσης).

Η περίπτωση χωρίς επιχορήγηση εξετάζεται δεδομένου ότι και στο νόμο [3851/2010](#) υπάρχει ξεχωριστή αναφορά που ορίζει ότι αν δεν δοθεί κρατική επιχορήγηση, η τιμή αυξάνεται κατά ένα ποσοστό (ισχύει για συγκεκριμένες κατηγορίες ΑΠΕ, όπως είναι το βιοαέριο). Εδώ θεωρείται προσαύξηση της τιμής κατά **15%** για την περίπτωση χωρίς επιχορήγηση.

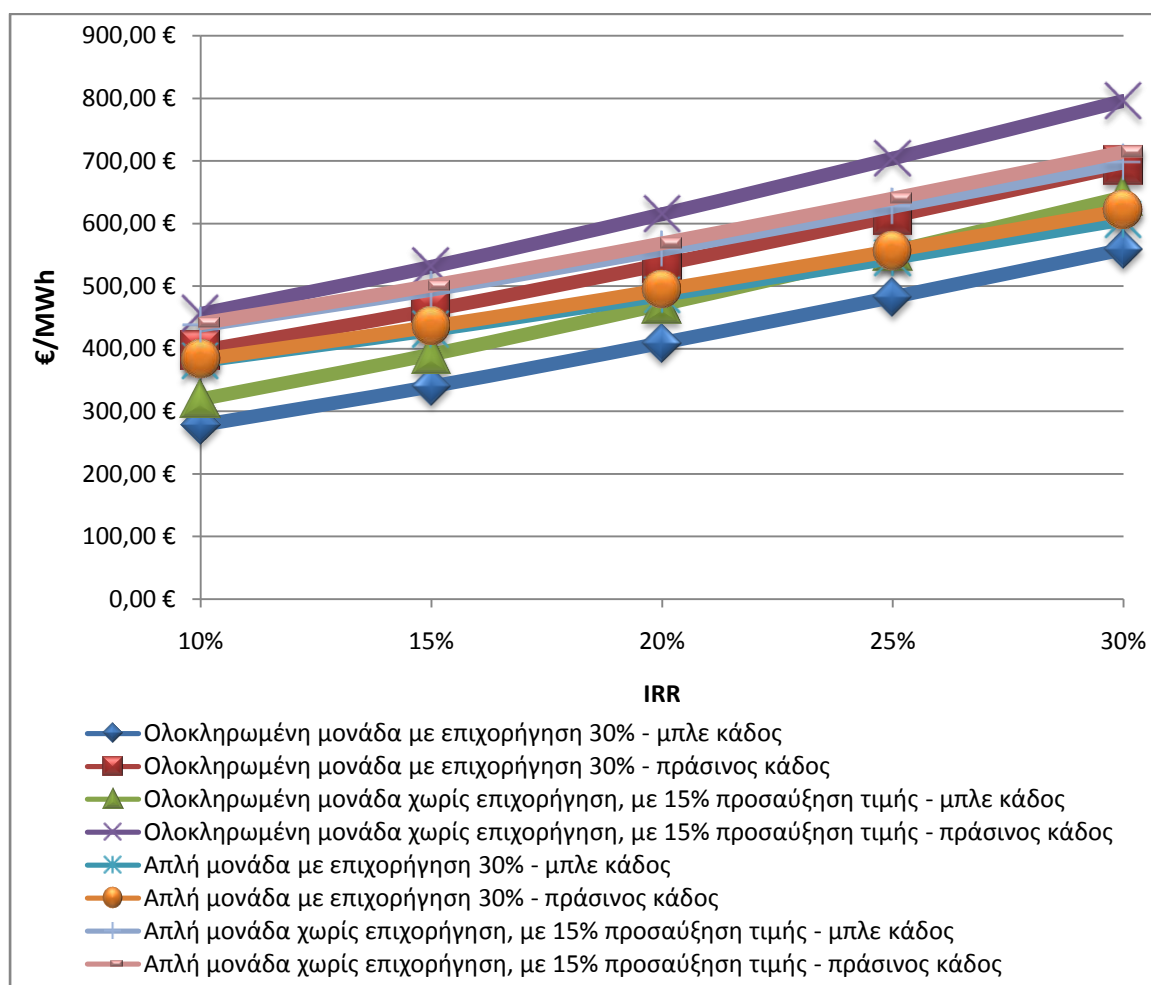
Συνεπώς, κατά τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, βρίσκεται η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας και για την περίπτωση όπου δεν υπάρχει επιχορήγηση προσαυξάνεται κατά 15%.

Τα αποτελέσματα δίνονται στο διαγράμματα 5.3 και στον πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14: Τιμή πώλησης ενέργειας συναρτήσει του IRR της επένδυσης [€/MWh]

IRR	Ολοκληρωμένη μονάδα – χωρίς προσαύξηση		Ολοκληρωμένη μονάδα – με προσαύξηση		Απλή μονάδα - χωρίς προσαύξηση		Απλή μονάδα – με προσαύξηση	
	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος
10%	277,90	396,40	319,59	455,86	380,10	383,00	437,12	440,45
15%	340,00	461,90	391,00	531,19	429,90	435,50	494,39	500,83
20%	409,00	535,50	470,35	615,83	486,90	494,20	559,94	568,33
25%	482,60	612,10	554,99	703,92	544,80	556,60	626,52	640,09
30%	558,60	692,20	642,28	796,03	606,30	621,20	697,25	714,38

Από αυτό το διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα όσο ανεβαίνουν οι απαιτήσεις για ασφάλεια της επένδυσης (δηλαδή ο IRR ο οποίος θα θεωρηθεί ως κριτήριο ώστε να γίνει αποδεκτή η επένδυση), τόσο ανεβαίνει και η τιμή πώλησης της ενέργειας. Επίσης, η καμπύλη με τις υψηλότερες τιμές σχηματίζεται για την περίπτωση ολοκληρωμένης μονάδας για πράσινο κάδο. Αυτό είναι όπως αναφέρθηκε αποτέλεσμα του μεγάλου κόστους επένδυσης της μονάδας ανάκτησης το οποίο δε μπορεί να καλυφθεί επαρκώς από τους χαμηλούς βαθμούς ανάκτησης υλικών που επιτρέπει ο πράσινος κάδος.



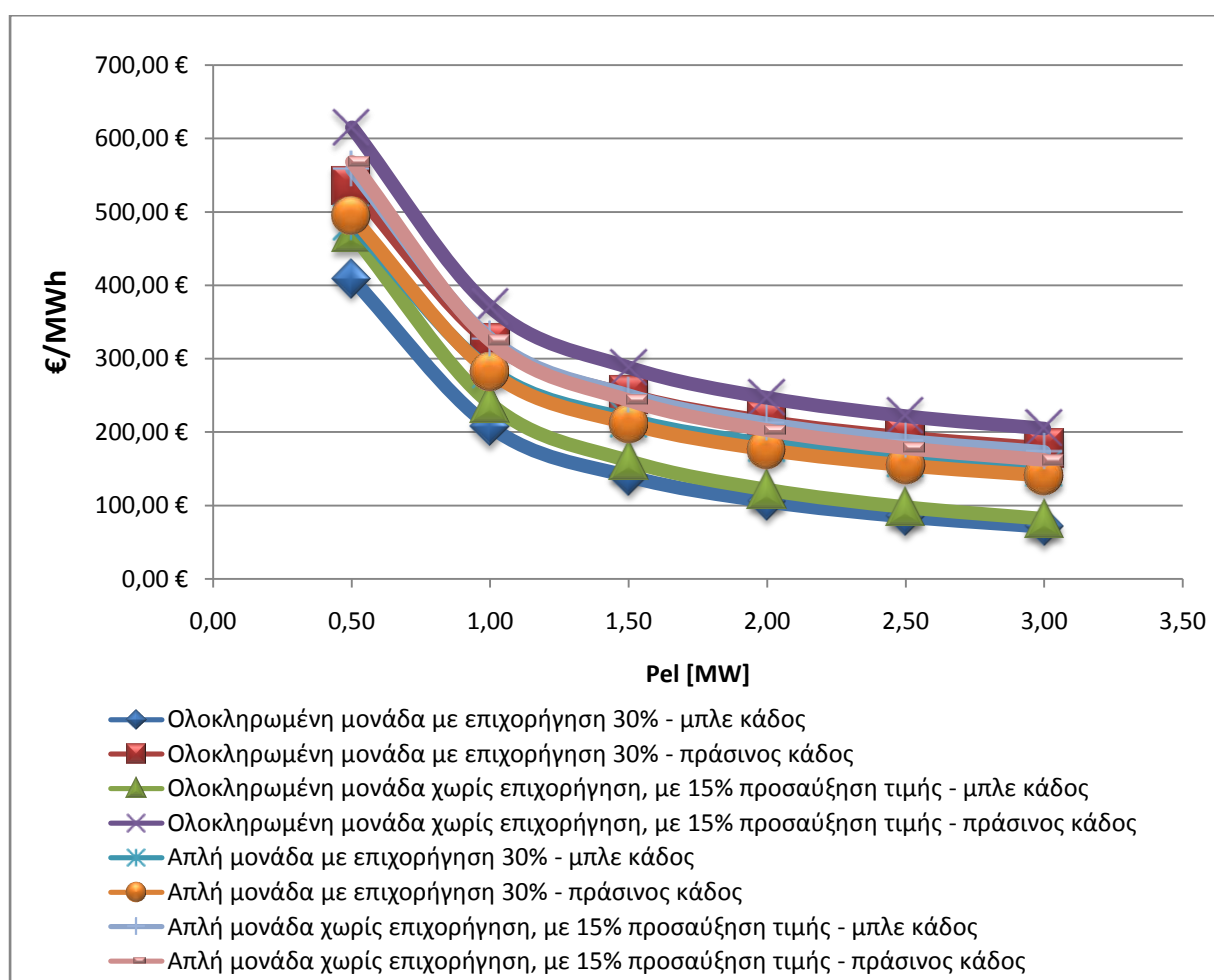
Διάγραμμα 5.3: Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει του IRR της επένδυσης

5.4.4. Ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ

Στη μελετώμενη περίπτωση έχει θεωρηθεί η εγκατεστημένη ισχύς της εγκατάστασης ίση με 500kW_e. Η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιείται εδώ αφορά το αποτέλεσμα του μοντέλου όσον αφορά την τιμή πώλησης παραγόμενης ενέργειας για ένα εύρος τιμών εγκατεστημένης ισχύος της εγκατάστασης.

Η ανάλυση ευαισθησίας έγινε πάλι σύμφωνα με τη βασική παραδοχή χρηματοδότησης, με και χωρίς κρατική επιχορήγηση, και για τις δύο περιπτώσεις μονάδας, και για τις δύο περιπτώσεις κάδων, ενώ τα υπόλοιπα δεδομένα παραμένουν όπως στο βασικό σενάριο. Η τιμή στην περίπτωση που δε δίνεται κρατική επιχορήγηση υπολογίζεται όπως παραπάνω, με προσαύξηση κατά 15%.

Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 5.15 και στο διάγραμμα 5.4.



Διάγραμμα 5.4: Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της εγκατεστημένης ισχύος

Από το διάγραμμα αξίζει να τονισθεί ότι αποδεικνύεται πως για μικρή εγκατεστημένη ισχύ, η τιμή πώλησης πρέπει να είναι αρκετά υψηλή σε κάθε περίπτωση, ξεπερνώντας τα όρια που μπορεί να είναι ανταγωνιστική, ώστε η εγκατάσταση να είναι οικονομικά βιώσιμη.

Πίνακας 5.15: Τιμή πώλησης ενέργειας συναρτήσει της εγκατεστημένης ισχύος P_{el} [€/MWh]

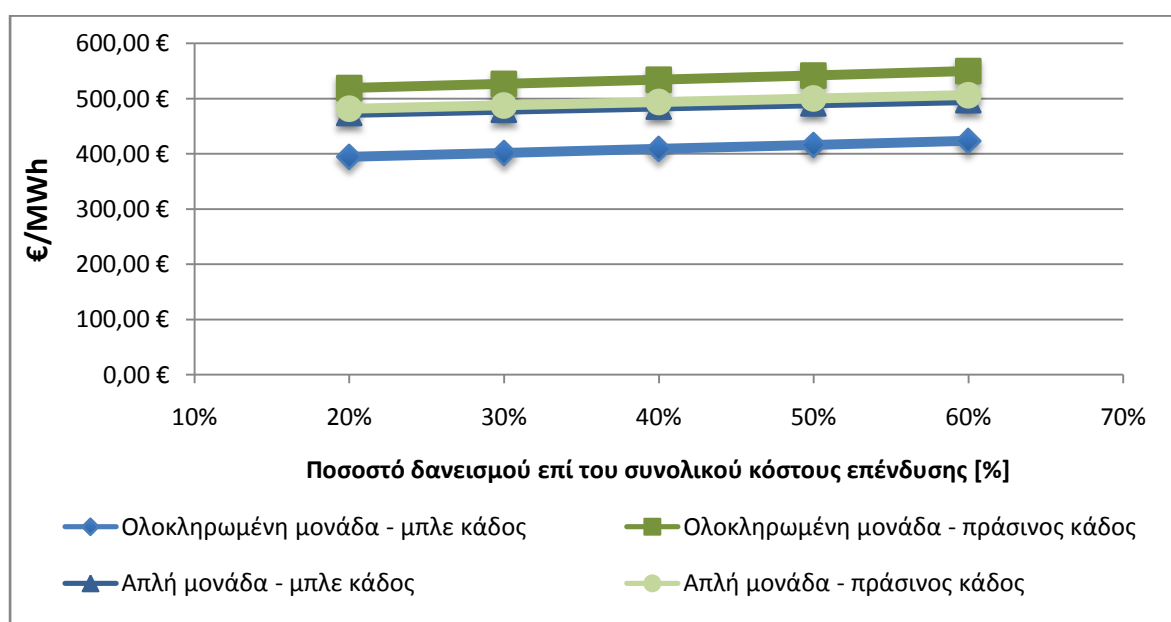
P_{el} [MW]	Ολοκληρωμένη μονάδα – χωρίς προσαύξηση		Ολοκληρωμένη μονάδα – με προσαύξηση		Απλή μονάδα - χωρίς προσαύξηση		Απλή μονάδα – με προσαύξηση	
	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος	Μπλε κάδος	Πράσινος κάδος
0.5	409,00	535,50	470,35	615,83	486,90	494,20	559,94	568,33
1.0	207,30	321,90	238,40	370,19	284,50	282,20	327,18	324,53
1.5	139,80	250,70	160,77	288,31	217,50	211,60	250,13	243,34
2.0	105,70	214,70	121,56	246,91	183,90	176,20	211,49	202,63
2.5	85,10	193,00	97,87	221,95	163,80	155,00	188,37	178,25
3.0	71,20	178,30	81,88	205,05	150,40	140,90	172,96	162,04

Παρατηρείται παρόλα αυτά, ότι για αντίστοιχες μονάδες με εγκατεστημένη ισχύ από 1 MW και πάνω η υπολογιζόμενη τιμή μειώνεται αισθητά και μπορεί να είναι ανταγωνιστική συγκριτικά με τις υπόλοιπες ΑΠΕ, για τις οποίες καθορίζεται η τιμή μέσω του νόμου 3859/2010, ακόμα και στην περίπτωση που το RDF που αεριοποιείται προέρχεται από πράσινο κάδο.

5.4.5. Ανάλυση ευαισθησίας σε σχέση με τον τρόπο χρηματοδότησης

Στην περίπτωση αυτή γίνεται ανάλυση ευαισθησίας της τιμής πώλησης ενέργειας για τις δύο εγκαταστάσεις, σε σχέση με το ποσοστό επί του κόστους επένδυσης το οποίο καλύπτεται με δανεισμό, για λαμβανόμενη κρατική επιχορήγηση σταθερή και ίση με το 30% του συνολικού κόστους επένδυσης.

Τα ποσοστά δανεισμού που εξετάζονται είναι 60%, 50%, 40%, 30% και 20% επί του κόστους επένδυσης, ενώ τα υπόλοιπα καλύπτονται από αντίστοιχα ίδια κεφάλαια για την εκάστοτε περίπτωση. Τα υπόλοιπα δεδομένα παραμένουν όπως στο βασικό σενάριο. Τα αποτελέσματα δίνονται στο διάγραμμα 5.5.



Διάγραμμα 5.5: Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει του ποσού δανείου

Από το διάγραμμα εξάγεται το συμπέρασμα πως και στις τέσσερις περιπτώσεις, όσο αυξάνεται το ποσό δανεισμού έναντι των ιδίων κεφαλαίων, η τιμή πώλησης αυξάνεται.

Το κυριότερο συμπέρασμα είναι ότι οι τιμές δεν ποικίλουν πολύ αναλόγως με το ποσό δανεισμού. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως με δεδομένη την κρατική επιχορήγηση, η επένδυση είναι εύκολα υλοποιήσιμη, με ανταγωνιστική τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, ακόμα και αν οι επενδυτές δύνανται να διαθέσουν περιορισμένα ίδια κεφάλαια, εφόσον η διαφορά μπορεί να καλυφθεί με δανεισμό χωρίς ιδιαίτερη επίδραση στη βιωσιμότητα της επένδυσης.

Τέλος, παρατηρείται ότι όσον αφορά την απλή μονάδα, οι δύο καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν, ενώ για την ολοκληρωμένη μονάδα απέχουν αρκετά, για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν και παραπάνω, όσον αφορά την ανάκτηση υλικών από πράσινο κάδο.

Κεφάλαιο 6^ο

Εισαγωγή στην εμπορία εκπομπών

6.1. Γενικά

Η επικύρωση του πρωτοκόλλου του Κιότο μεταξύ των εθνών τα δεσμεύει σε μείωση των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

Τα κράτη – μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεσμεύονται από την [Ευρωπαϊκή Οδηγία 2003/87](#) και την ανανέωσή της με την [Οδηγία 2009/89](#) να ενταχθούν στο *σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου* εντός της κοινότητας, το οποίο θα συντελέσει τελικά στη μείωση των εκπομπών με τρόπο οικονομικά αποδοτικό. Από τους ορισμούς που παρατίθενται στις Οδηγίες, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν εδώ οι εξής:

- Ως *δικαίωμα* ορίζεται η εκπομπή ενός μετρικού τόνου ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα
- Ως *όριο εκπομπών* ορίζεται η ποσότητα δικαιωμάτων εκπομπών που μπορεί να «διαθέτει» μία εγκατάσταση στην οποία λαμβάνουν χώρα δραστηριότητες που σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή αερίων του θερμοκηπίου (π.χ. βιομηχανική μονάδα ή μονάδα ηλεκτροπαραγωγής).

Με τον αρχικό καταμερισμό των δικαιωμάτων εκπομπών, εκχωρήθηκε σε κάθε κράτος – μέλος ένας συνολικός αριθμός δικαιωμάτων εκπομπών τον οποίο οφείλει να μην υπερβαίνει.

Στη συνέχεια το κάθε κράτος – μέλος διανέμει τα δικαιώματα στις υπόχρεες εγκαταστάσεις, οι οποίες από 1.1.2005 δε μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς να τους εκχωρηθεί η αντίστοιχη άδεια εκπομπών. Κάθε εγκατάσταση οφείλει να διαθέτει διάταξη παρακολούθησης εκπομπών και να υποβάλλει ετήσια έκθεση όπου θα αναφέρονται οι ποσότητες που εξέπεμψε.

Ειδικές διατάξεις αφορούν τις νεοεισερχόμενες στο σύστημα εμπορίας εκπομπών εγκαταστάσεις, καθώς και τις εγκαταστάσεις συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ), στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής.

Τα δικαιώματα που δεν αποδόθηκαν κάπου τίθενται σε πλειστηριασμό και μπορούν να αγοραστούν από κάποια εγκατάσταση ή ακόμα και χώρα, η οποία αναμένει να υπερβεί το όριο δικαιωμάτων της.

Με την [Οδηγία 2003/87](#) ξεκίνησε, όπως αναφέρθηκε, από το 2005 το κοινοτικό σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών, το οποίο μέχρι το 2007 κάλυπτε μόνο εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από μεγάλες σταθερές εγκαταστάσεις.

Η δεύτερη φάση έληξε στο τέλος του 2012 και από το 2013 έως το 2020 περιλαμβάνονται στο σύστημα και οι αεροπορικές εταιρίες.

Δικαιώματα ανανεώσιμης ενέργειας

Μία νέα μονάδα αγοραπωλησίας στον τομέα των εκπομπών είναι το δικαίωμα ανανεώσιμης ενέργειας (*Renewable Energy Credit – REC*) (US DOE).

Για συστήματα παραγωγής ενέργειας, όπως τα υδροηλεκτρικά και τα αιολικά, που είναι αποκλειστικά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να υπολογιστούν τα αντίστοιχα αποφευχθέντα ποσά εκπομπών με αυτά που θα εκπέμπονταν αν για την ίδια παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιούνταν παραδοσιακές μέθοδοι με ορυκτά καύσιμα.

Με τον καθορισμό αυτής της μονάδας η οποία ισοδυναμεί με 1 MWh ανανεώσιμης ενέργειας, εγκαταστάσεις που θέλουν να ισοσκελίσουν τις εκπομπές από ορυκτά καύσιμα, μπορούν να «αγοράσουν» ανανεώσιμη ενέργεια μέσω των RECs.

Αγορά δικαιωμάτων ανανεώσιμης ενέργειας υπάρχει αυτή τη στιγμή κυρίως στις ΗΠΑ ενώ εμφανίζεται και στην Ευρώπη.

Η τιμή που προσφέρεται για τα RECs ποικίλει ανάλογα με την προέλευση της ενέργειας, εκτός από την περίπτωση της ηλιακής ενέργειας, για την οποία είναι σχετικά καθορισμένη (<http://energy.gov/savings/aep-ohio-renewable-energy-credit-rec-purchase-program>).

6.2. Κατάσταση στην Ελλάδα

Όπως κάθε κράτος – μέλος, η Ελλάδα υποχρεώθηκε να καταρτίσει, καταρχάς για την περίοδο 2005-2007, ένα Εθνικό Σχέδιο Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΕΣΚΔΕ), το οποίο προσδιορίζει τη συνολική ποσότητα των δικαιωμάτων και την κατανομή αυτών στις υπόχρεες εγκαταστάσεις.

Αντίστοιχα, για την περίοδο 2008-2012 καταρτίζεται στο ΕΣΚΔΕ-2, το οποίο προσδιορίζει την ποσότητα δικαιωμάτων εκπομπών για την περίοδο αυτή και καθορίζει πως η συνολική αποθήκη νεοεισερχομένων εγκαταστάσεων ανέρχεται στους 16.740.701 τόνους διοξειδίου του άνθρακα.

Για την τελευταία περίοδο (2013-2020) υπάρχει μέχρι στιγμής μόνο μία προκαταρκτική κατανομή δικαιωμάτων εκπομπών, οπότε οι υπολογισμοί που θα γίνουν στη συνέχεια γίνονται βάσει των στοιχείων του ΕΣΚΔΕ-2.

Σύμφωνα με την Οδηγία 2003/87, το ποσοστό επί των συνολικών δικαιωμάτων το οποίο δε διατίθεται δωρεάν, τίθεται σε δημοπρασία, και από το 2008 ανέρχεται στο 10% αυτών (έως το 90% μπορεί να διατίθεται από το κάθε κράτος στις υπόχρεες εγκαταστάσεις δωρεάν). Στην περίπτωση της Ελλάδας, διατίθεται δωρεάν το συνολικό ποσό δικαιωμάτων και δημοπρατείται τυχόν διαθέσιμο από την Αποθήκη Νεοεισερχομένων εγκαταστάσεων.

Επιπλέον αναφέρεται ότι μέχρι στιγμής δεν υπάρχει κάποια πρόβλεψη στην ελληνική νομοθεσία για υιοθέτηση της πολιτικής των δικαιωμάτων ανανεώσιμης ενέργειας, όπως αυτά περιγράφηκαν παραπάνω.

6.3. Υπολογισμός τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπ' όψιν τα κόστη εκπομπών

Σκοπός αυτού του υποκεφαλαίου αυτού είναι να υπολογισθεί η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, αν λαμβάνονταν υπ' όψιν τα κόστη εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που θα είχε η εγκατάσταση που μελετήθηκε παραπάνω.

Αρχικά, πρέπει να υπολογιστούν τα δικαιώματα εκπομπών της εγκατάστασης, η οποία θεωρείται ως νεοεισερχόμενη στο σύστημα. Κατά συνέπεια, τα δωρεάν δικαιώματα που της εκχωρούνται, υπολογίζονται ως εξής:

$$A_i = P_i * H_i * 3,6 * 10^{-3} * BA_i * EF_j * CF_i \text{ (ΕΣΚΔΕ 1)}$$

όπου:

- A_i = τα ετήσια δικαιώματα εκπομπών της εγκατάστασης i [τόνοι CO_2 /έτος]
- P_i = η εγκατεστημένη ισχύς της νεοεισερχόμενης εγκατάστασης i [MW]
- H_i = οι ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης i [ώρες/έτος]
- BA_i = ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης i (=35%)
- EF_j = ο συντελεστής καυσίμου j [τόνοι CO_2 /TJ] (=209,41t CO_2 /TJ)
- CF_i = ο συντελεστής συμμόρφωσης της εγκατάστασης i (λαμβάνεται 100%, αφού στους επόμενους υπολογισμούς αφαιρείται το ποσοστό των εκπομπών που θεωρείται βιογενές).

Από τη νομοθεσία ορίζεται ότι για των υπολογισμό των δικαιωμάτων εκπομπών λαμβάνονται υπ' όψιν 5000 ώρες λειτουργίας της εγκατάστασης σε μέγιστο φορτίο, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση για 0,5 [MW_e].

Τελικά προκύπτει ότι από την κατανομή εκχωρούνται στην εγκατάσταση δωρεάν 659,63 [τόνοι CO_2 /έτος] ή αλλιώς το 0,43% του συνόλου των εκπομπών νεοεισερχομένων.

Οι εκπομπές της εγκατάστασης λαμβάνονται από το κεφάλαιο 4 για την περίπτωση της μηχανής εσωτερικής καύσης, όμως μόνο το μη βιογενές ποσοστό τους, το οποίο για το βασικό σενάριο είναι 44,27%, και ισούνται με 1.216,94 [τόνους CO_2 /έτος].

Διευκρινίζεται εδώ ότι στις ευρωπαϊκές οδηγίες και την ελληνική νομοθεσία δεν συγκεκριμενοποιείται αν θα συμπεριληφθεί ή όχι το βιογενές ποσοστό στον υπολογισμό των ισοδυνάμων του διοξειδίου του άνθρακα. Παρόλα αυτά, συμπεριλαμβάνεται εδώ, δεδομένου ότι ο στόχος του συστήματος εμπορίας εκπομπών είναι η μείωση των μη βιογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, και οι εκπομπές από μία τέτοια εγκατάσταση είναι κατά το ποσοστό που αναφέρθηκε παραπάνω ουδέτερες ως προς την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τελικά, από αυτές τις εκπομπές που υπολογίστηκαν αφαιρούνται τα δωρεάν δικαιώματα της εγκατάστασης και το υπόλοιπο επισύρει το κόστος υπέρβασης των εκπομπών.

Η πιο πρόσφατη τιμή για τα ευρωπαϊκά δεδομένα λαμβάνεται από εδώ: <http://www.skai.gr/news/greece/article/229530/eurokoinovouliao-ohi-stis-upsiles-times-gia-agora-dikaiomaton-ekpobis-rupon/> και ισούται με 2,9 [€/τόνο CO_2].

Συνεπώς, η εγκατάσταση θα επωμίζεται επιπλέον κόστος 1.616,19 [€/έτος] για να καλύψει την υπέρβαση του ορίου εκπομπών της.

Εξετάζοντας επιπλέον την περίπτωση όπου τελικά δεν αφαιρείται το ποσοστό εκπομπών που αντιστοιχεί στο βιογενές ποσοστό των απορριμμάτων, για το βασικό σενάριο του μπλε κάδου και με IRR=20%, τα αποτελέσματα της σύγκρισης με την προηγούμενη περίπτωση, καθώς και με αυτήν όπου δε λαμβάνεται υπ' όψιν το σύστημα εμπορίας εκπομπών, δίνονται στον πίνακα 6.1. Σημειώνεται εδώ ότι το κόστος δικαιωμάτων εκπομπών αποτελεί στην περίπτωση της απλής εγκατάστασης το 0,2294% του ετήσιου κόστους λειτουργίας, ενώ στην περίπτωση της ολοκληρωμένης το 0,2093% του αντίστοιχου κόστους λειτουργίας.

Πίνακας 6.1: Σύγκριση τιμών με και χωρίς τον ανανεώσιμο χαρακτήρα των ΑΣΑ [€/MWh]			
	44,28% μη βιογενής εκπομπές	100% μη βιογενείς εκπομπές	Χωρίς σύστημα εμπορίας εκπομπών
Απλή εγκατάσταση	487,50	489,10	486,90
Ολοκληρωμένη εγκατάσταση	409,00	410,60	408,40

Παρατηρείται από τον παραπάνω πίνακα ότι η διαφορά μεταξύ της τιμής πώλησης σε κάθε μία από τις δύο περιπτώσεις είναι πολύ μικρή, σχεδόν δεν επηρεάζεται από το κόστος υπέρβασης εκπομπών, είτε ληφθεί υπ' όψιν το βιογενές ποσοστό των ΑΣΑ είτε όχι.

Αυτό πρακτικά σημαίνει πως λόγω της πολύ μικρής τιμής υπέρβασης, το κόστος των εκπομπών δεν επιβαρύνει ιδιαίτερα μία τέτοια εγκατάσταση, ώστε να χρειαστεί να αγοράσει επιπλέον δικαιώματα εκπομπών.

Τονίζεται ότι τα παραπάνω ισχύουν για νεοεισερχόμενη εγκατάσταση στο σύστημα. Η αντίστοιχη περίπτωση υφιστάμενης εγκατάστασης μπορεί να έχει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα και δεν εξετάζεται εδώ.

Τέλος, σημειώνεται εδώ πως λόγω του ότι τα δικαιώματα εκπομπών αποδείχθηκαν λίγα σε σχέση με τις τελικές εκπομπές της εγκατάστασης, η υπέρβαση εκπομπών και το κόστος που αυτή επισύρει είναι αναμενόμενα σε κάθε περίπτωση, ανεξαρτήτου του ανανεώσιμου χαρακτήρα των ΑΣΑ. Για το λόγο αυτό δεν συμπεριλήφθηκε στην ανάλυση η περίπτωση πώλησης δικαιωμάτων ανανεώσιμης ενέργειας, δεδομένου ότι τελικά δεν περισσεύουν ώστε να μπορέσουν να διατεθούν.

Κεφάλαιο 7^ο

Συμπεράσματα – Προτάσεις μελλοντικής εργασίας

Η παρούσα εργασία ανέλυσε τη βιωσιμότητα της μεθόδου αεριοποίησης RDF σύμφωνα με περιβαλλοντικές και τεχνο- οικονομικές παραμέτρους. Σκοπός ήταν να διερευνηθεί η επίδρασή της ως μέθοδος διαχείρισης απορριμμάτων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς και να αξιολογηθεί η επένδυση για την κατασκευή και τη λειτουργία μίας τέτοιου είδους εγκατάστασης, μέσω οικονομικών δεικτών.

Από το πρώτο σκέλος της εργασίας που αφορά την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της μεθόδου βάσει αρχών της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, εξάγεται αρχικά το συμπέρασμα ότι η ανάκτηση υλικών που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν και να ανακυκλωθούν ωφελεί σημαντικά τις επιδόσεις του συστήματος όσον αφορά την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, δεδομένου ότι από τη διαδικασία εξοικονομούνται εκπομπές και ορυκτά καύσιμα που θα απαιτούνταν για την εκ νέου κατασκευή των υλικών αυτών.

Συγκεκριμένα, από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε στο περιβαλλοντικό μέρος σχετικά με την ανάκτηση υλικών προκύπτει τελικά ότι η περίπτωση υψηλών βαθμών ανάκτησης χαρτιού και πλαστικού και για τους δύο κάδους έχει τα καλύτερα συνολικά αποτελέσματα σχετικά με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου του συστήματος, και συγκεκριμένα για την περίπτωση του μπλε κάδου προκύπτει $-1064,56$ [kg CO_{2eq}/τόνο ΑΣΑ] (ο αρνητικός δείκτης παρουσιάζει την εξοικονόμηση των εκπομπών), ενώ για τον πράσινο κάδο προκύπτει $110,83$ [kg CO_{2eq}/τόνο ΑΣΑ] αντίστοιχα (προκύπτει θετικό, λόγω των χαμηλών ποσοτήτων ανακυκλώσιμων υλικών). Επιπρόσθετα, η ανάκτηση υλικών επηρεάζει τη σύσταση του RDF με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η σύσταση του αερίου σύνθεσης και κατ'επέκταση η θερμογόνος ικανότητά του. Τελικά, διαφαίνεται πρώτον η διαφορά στη θερμογόνο ικανότητα μεταξύ των περιπτώσεων μπλε και πράσινου κάδου, η οποία είναι της τάξης του 1 [MJ/kg], ενώ όσον αφορά την ανάκτηση υλικών, στην περίπτωση του μπλε κάδου, η χαμηλότερη τιμή εμφανίζεται για υψηλή ανάκτηση πλαστικού ($5,168$ [MJ/kg]) ενώ η υψηλότερη για χαμηλή ανάκτηση πλαστικού ($5,424$ [MJ/kg]). Στην περίπτωση του πράσινου κάδου, όπου οι συγκεντρώσεις των προς ανάκτηση υλικών είναι μικρότερες, η μέγιστη και η ελάχιστη θερμογόνος εμφανίζονται για τη χαμηλή και την υψηλή ανάκτηση και των δύο υλικών αντίστοιχα.

Επιπλέον, η διαχείριση των απορριμμάτων μέσω αυτής της μεθόδου είναι προτιμότερη από την ταφή τους σε ΧΥΤΑ, τόσο εάν η διαδικασία εφαρμοστεί για μπλε κάδο, όσο και εάν εφαρμοστεί για πράσινο, για την περίπτωση του οποίου υπάρχει επιπλέον όφελος από την εκτροπή των οργανικών από τους ΧΥΤΑ και την αποφυγή εκπομπών μεθανίου. Συγκεκριμένα, η ταφή των απορριμμάτων προέλευσης πράσινου κάδου έχει συνολικές εκπομπές (συμπεριλαμβανομένων και των εκπομπών από τη διαδικασία της απόθεσης) της τάξης των 2.500 [kg CO_{2eq}/τόνο ΑΣΑ], ενώ οι αντίστοιχες εκπομπές από τη διαδικασία αεριοποίησης ανέρχονται περίπου στα 700 [kg CO_{2eq}/τόνο ΑΣΑ]. Αντίστοιχα, για την περίπτωση του μπλε κάδου, οι εκπομπές από τη διαδικασία αεριοποίησης ανέρχονται

περίπου στα 1000 [kg CO_{2eq}/τόνο ΑΣΑ], ενώ οι αντίστοιχες για την ταφή στα 2000 [kg CO_{2eq}/τόνο ΑΣΑ].

Από ενεργειακής πλευράς, το παραχθέν αέριο αποτελεί ένα ευέλικτο καύσιμο το οποίο, μέσω της χρήσης του για παραγωγή ενέργειας, επιτυγχάνει ικανοποιητικές επιδόσεις στον τομέα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, εφόσον θεωρούνται κατά μεγάλο ποσοστό βιογενείς.

Συνολικά, γίνεται αντιληπτή η αλληλοεπικάλυψη των βαθμίδων της πυραμίδας ιεράρχησης των προτεραιοτήτων στη διαχείριση απορριμμάτων, εφόσον τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται εάν η μία βαθμίδα συμπληρώνει την άλλη, όπως στην προκειμένη περίπτωση η ανάκτηση ενέργειας καλύπτει το κενό που αφήνει η ανακύκλωση, για τα υπολείμματα που δε μπορούν να ανακτηθούν.

Στο τεchnο-οικονομικό σκέλος της εργασίας δόθηκε έμφαση στο να εξαχθεί ένα εύρος τιμών πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από αέριο σύνθεσης που προέρχεται από αστικά σύμμεικτα απορρίμματα, λόγω του κενού που υπάρχει στην ελληνική νομοθεσία περί Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την ανάκτηση ενέργειας από απορρίμματα.

Η αξιολόγηση της επένδυσης βασίστηκε στη διερεύνηση του κόστους και των εσόδων που εκτιμάται ότι προκύπτουν για μία μονάδα διαχείρισης RDF ή ΑΣΑ μέσω αεριοποίησής τους και στη συνέχεια καύσης του συνθετικού αερίου. Μέσω κυρίως του δείκτη IRR εξάγεται το συμπέρασμα ότι η εγκατάσταση είναι σε κάθε περίπτωση βιώσιμη οικονομικά χωρίς να απαιτείται τιμή πώλησης ενέργειας που να υπερβαίνει κατά πολύ τις θεσμοθετημένες τιμές των υπόλοιπων ΑΠΕ.

Από τις αναλύσεις ευαισθησίας που έγιναν, προκύπτει επιπλέον πως η τιμή μειώνεται καθώς αυξάνει το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος της μονάδας. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση ολοκληρωμένης εγκατάστασης που διαχειρίζεται ΑΣΑ από μπλε κάδο, για IRR=20% και με εγκατεστημένη ισχύ 0,5 MW_e, προκύπτει τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας 409,20 [€/MWh] ενώ για αντίστοιχη περίπτωση εγκατεστημένης ισχύος 1,5 MW_e η τιμή προκύπτει 139,80 [€/MWh]. Επιπλέον, όσον αφορά το χρηματοδοτικό σχήμα, η επένδυση είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και χωρίς κρατική επιχορήγηση, χωρίς να επηρεαστεί δραστικά η βιωσιμότητά της.

Όσον αφορά την προέλευση του RDF πρέπει να τονισθεί πως η υψηλότερη τιμή προέκυψε σε όλα τα σενάρια για την περίπτωση που η ολοκληρωμένη μονάδα διαχείρισης παραλαμβάνει ΑΣΑ από πράσινο κάδο, ενώ η χαμηλότερη τιμή για την περίπτωση που η μονάδα αυτή παραλαμβάνει ΑΣΑ από μπλε κάδο, λόγω της διαφοράς των εσόδων από την πώληση των ανακτηθέντων υλικών. Παρόλα αυτά, μικρή είναι η διαφορά που προέκυψε από αντίστοιχη σύγκριση για την περίπτωση της απλής μονάδας, η οποία παραλαμβάνει RDF από μπλε ή πράσινο κάδο. Σε αυτή την περίπτωση η απαιτούμενη τιμή πώλησης κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα.

Μελλοντική εργασία

Ως μελλοντική εργασία προτείνεται αρχικά η εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στο σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων που μελετήθηκε με μεγαλύτερο εύρος ορίων συστήματος και επιπλέον η περαιτέρω διερεύνηση των επιδράσεων που έχει η απόθεση

των στερεών υπολειμμάτων από τη διαδικασία της αεριοποίησης στο έδαφος, καθώς και η επίδραση της χρήσης τους στην οδοποιία.

Για το τεchnο – οικονομικό μέρος προτείνεται η αξιολόγηση αντίστοιχης επένδυσης σε περίπτωση διεύρυνσης της εγκατάστασης αεριοποίησης με μία μονάδα αναβάθμισης του αερίου σύνθεσης από RDF σε συνθετικό φυσικό αέριο και έγχυσής του στο δίκτυο φυσικού αερίου.

Επιπλέον δύναται να εξεταστεί η αξιοποίηση του αερίου σύνθεσης ή του συνθετικού φυσικού αερίου που προήλθε από την αναβάθμισή του σε διατάξεις ατμοπαραγωγής, διατάξεις αεριοστροβίλου ή διατάξεις συνδυασμένου κύκλου, η περίπτωση συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, καθώς και η ένταξη τέτοιου είδους μονάδων στο δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής.

Τέλος, σχετικά με την εμπορία εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα προτείνεται να πραγματοποιηθεί μεγαλύτερη ανάλυση, όσον αφορά τις προτεινόμενες τιμές πώλησης της παραγόμενης ενέργειας.

Κεφάλαιο 8^ο Βιβλιογραφία

Ξένη Βιβλιογραφία

Arena U., 2012. "Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review". *Waste Management* **32**, 625–639.

Baratieri M., Baggio P., Bosio B., Grigiante M., Longo G.A., 2009. "The use of biomass syngas in IC engines and CCGT plants: A comparative analysis". *Applied Thermal Engineering* **29**, 3309–3318.

Birgisdottir H., Bhandar G., Hauschild M.Z., Christensen T.H., 2007. "Life cycle assessment of disposal of residues from municipal solid waste incineration: Recycling of bottom ash in road construction or landfilling in Denmark evaluated in the ROAD-RES model". *Waste Management* **27**, S75–S84.

Bovea M.D. , Ibáñez-Forés V., Gallardo A., Colomer-Mendoza F.J., 2010. "Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study". *Waste Management* **30**, 2383–2395.

Bridgwater A .V., 1995. "The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation". *Fuel* **74** (5), 631-653.

Carpentieri M., Corti A., Lombardi L., 2005. "Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) with CO₂ removal". *Energy Conversion and Management* **46**, 1790–1808.

Caserini S., Livio S., Giugliano M., Grosso M., Rigamonti L., 2010. "LCA of domestic and centralized biomass combustion: The case of Lombardy (Italy)". *Biomass and Bioenergy* **34**, 474-482.

CEN/TS 15440:2006. "Solid Recovered fuels-Method for the determination of biomass content".

Chen D., Christensen T.H., 2010. "Life-cycle assessment (EASEWASTE) of two municipal solid waste incineration technologies in China". *Waste Management & Research* **28**(6), 508–519.

Chen T.C., Lin C.F., 2008. "Greenhouse gases emissions from waste management practices using Life Cycle Inventory model". *Journal of Hazardous Materials* **155**, 23–31.

Cherubini F., Bargigli S., Ulgiati S., 2008. "Life cycle assessment of urban waste management: Energy performance s and environmental impacts. The case of Rome, Italy". *Waste Management* **28**, 2552–2564.

Cho H.S., Moon H.S., Kim J.Y., 2012. "Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills". *Bioresource Technology* **109**, 86–92.

Choy K., Porter J.F., Hui C.W., McKay G., 2004. "Process design and feasibility study for small scale MSW gasification". *Chemical Engineering Journal* **105**, 31–41.

Cleary J., 2009. "Life cycle assessments of municipal solid waste management systems: A comparative analysis of selected peer-reviewed literature". *Environment International* **35**, 1256–1266.

De Feo G., Malvano C., 2009. "The use of LCA in selecting the best MSW management system". *Waste Management* **29**, 1901–1915.

Economopoulos A.P., 2010. "Technoeconomic aspects of alternative municipal solid wastes treatment methods". *Waste Management* **30**, 707–715.

Energy and Environmental Analysis Inc. (an ICF Company), 2008. "Technology Characterization: Reciprocating Engines".

EPA-452/F-03-005, 2003. "Air pollution control technology fact sheet".

European Commission - Directorate General Environment, 2003. "Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3)".

Eurostat, News release 33/2013 – 4 March 2013

Felder R., Dones R., 2007. "Evaluation of ecological impacts of synthetic natural gas from wood used in current heating and car systems". *Biomass and Bioenergy* **31**, 403–415.

Finney K. N., Chen Q., Sharifi V. N., Swithenbank J., Nolan A., White S., Ogden S., 2012. "Developments to an existing city-wide district energy network: Part II – Analysis of environmental and economic impacts". *Energy Conversion and Management* **62**, 176–184.

Gasol C.M., Gabarrell X., Rigola M., Gonzalez-Garcia S., Rieradeva J., 2011. "Environmental assessment: (LCA) and spatial modelling (GIS) of energy crop implementation on local scale". *Biomass and Bioenergy* **35**, 2975-2985.

Gassner M., Marechal F., 2009. "Thermo-economic process model for thermochemical production of Synthetic Natural Gas (SNG) from lignocellulosic biomass". *Biomass and Bioenergy* **33**, 1587-1604.

Gentil E., Clavreul J., Christensen T.H., 2009. "Global warming factor of municipal solid waste management in Europe". *Waste Management & Research* **27**, 850–860.

Goglio P., Bonari E., Mazzoncini M., 2012. "LCA of cropping systems with different external input levels for energetic purposes". *Biomass and Bioenergy* **42**, 33 - 42.

Gori M., Pifferi L., Sirini P., 2011. "Leaching behaviour of bottom ash from RDF high-temperature gasification plants". *Waste Management* **31**, 1514–1521.

He M., Xiao B., Hu Z., Liu S., Guo X., Luo S., 2009. "Syngas production from catalytic gasification of waste polyethylene: Influence of temperature on gas yield and composition". *International Journal of Hydrogen Energy* **34**, 1342 - 1348.

IPCC, 2007. 4th Assessment Report, Working Group I, Ch. 2.10.

ISO 14040:2006, "Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework".

Kaazke J., Meneses M., Wilke B.M., Rotter V.S., 2013. "Environmental evaluation of waste treatment scenarios for the towns Khanty-Mansiysk and Surgut, Russia". *Waste Management & Research* **0** (0), 1–12.

Karellas S., 2005. "Online analysis of the composition of biogenous gases and their effect on microturbine and fuel cell systems", VDI Verlag GmbH, Stuttgart.

Khoo H.H., 2009. "Life cycle impact assessment of various waste conversion technologies". *Waste Management* **29**, 1892–1900.

Kong D., Shan J., Iacoboni M., Maguin S.R., 2012. "Evaluating greenhouse gas impacts of organic waste management options using life cycle assessment". *Waste Management & Research* **30** (8), 800 – 812.

Manfredi S., Tonini D., Christensen T.H., 2009. "Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions". *Waste Management & Research* **27**, 825–836.

Mastellone M.L., Zaccariello L., Arena U., 2010b. "Co-gasification of coal, plastic waste and wood in a bubbling fluidized bed reactor". *Fuel* **89** (10), 2991–3000.

Murphy J.D., McKeogh E., 2004. "Technical, economic and environmental analysis of energy production from municipal solid waste". *Renewable Energy* **29**, 1043–1057.

Perilhon C., Alkadee D., Descombes G., Lacour S., 2012. "Life cycle assessment applied to electricity generation from renewable biomass". *Energy Procedia* **18**, 165-176.

Pinto F., Lopes H., André R.N., Gulyurtlu I., Cabrita I., 2007. "Effect of catalysts in the quality of syngas and by-products obtained by co-gasification of coal and wastes. 1. Tars and nitrogen compounds abatement". *Fuel* **86**, 2052–2063.

Pinto F., Lopes H., André R.N., Gulyurtlu I., Cabrita I., 2008. Effect of catalysts in the quality of syngas and by-products obtained by co-gasification of coal and wastes. 2. Heavy metals, sulphur and halogen compounds abatement. *Fuel* **87**, 1050–1062.

Rocca S., Zomeren A., Costa G., Dijkstra J.J., Comans R.N.J., Lombardi F., 2012. "Characterization of major component leaching and buffering capacity of RDF incineration and gasification bottom ash in relation to reuse or disposal scenarios". *Waste Management* **32**, 759–768.

Sivula L., Oikari A., Rintala J., 2012. "Toxicity of waste gasification bottom ash leachate". *Waste Management* **32**, 1171–1178.

Sivula L., Sormunen K., Rintala J., 2012. "Leachate formation and characteristics from gasification and grate incineration bottom ash under landfill conditions". *Waste Management* **32**, 780–788.

Tonini D., Astrup T., 2012. "LCA of biomass-based energy systems: A case study for Denmark". *Applied Energy* **99**, 234-246.

Tunessi S., 2011. "LCA of local strategies for energy recovery from waste in England, applied to a large municipal flow". *Waste Management* **31**, 561–571.

Turconi R., Butera S., Boldrin A., Grosso M., Rigamonti L., Astrup T., 2011. "Life cycle assessment of waste incineration in Denmark and Italy using two LCA models". *Waste Management & Research* **29** (10), 78–90.

Zainal Z.A., Ali R., Lean C.H., Seetharamu K.N., 2011. "Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials". *Energy Conversion and Management* **42**, 1499-1515.

Zhao W., Van Der Voet E., Zhang Y., Huppes G., 2009. "Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: Case study of Tianjin, China". *Science of The Total Environment* **407**, 1517 – 1526.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αραβώσης Κωνσταντίνος, 2007. "Κατάρτιση & αξιολόγηση επενδυτικών σχεδίων & προγραμμάτων από τη θεωρία στην πράξη". Εκδόσεις Οικονομική Βιβλιοθήκη.

Ευρωπαϊκή Οδηγία 2003/87

Ευρωπαϊκή Οδηγία 2006/12

Ευρωπαϊκή Οδηγία 2008/98

Ευρωπαϊκή Οδηγία 2009/29

Ηλιόπουλος Γ., Τσομπανίδης Χ., 2012. "Η ολοκληρωμένη διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων ως μοχλός κοινωνικής ανάπτυξης". Εισηγήση Οργανωτικής Επιτροπής, ΤΕΕ.

Καρέλλας Σ., Κακαράς Ε., 2011. "Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών", Εκδόσεις ΕΜΠ.

Κουρκούμπας Δ. Σ., 2010. "Συγκριτική Ανάλυση Κύκλου Ζωής ενεργειακής αξιοποίησης ΑΣΑ". Μεταπτυχιακή διατριβή, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών "Παραγωγή & Διαχείριση Ενέργειας", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Νάκος Α., 2011. "Ανάλυση κόστους παραγωγής και διάθεσης υποκατάστατου φυσικού αερίου". Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
Νόμος 3851 / 2010 – ΦΕΚ Α 85, 1753-1780.

Παναγιωτακόπουλος Δ.Χ., 2008. "Συστημική μεθοδολογία και τεχνική οικονομική". Εκδόσεις Ζυγός.

Πανούσης Γ., 2011. "Μελέτη κατασκευής πιλοτικής μονάδας ενεργειακής αξιοποίησης του στερεού δευτερογενούς καυσίμου STABILAT®". Μεταπτυχιακή διατριβή, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών "Παραγωγή & Διαχείριση Ενέργειας", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Παπαγεωργίου Ν., 1991. "Ατμοπαραγωγοί Ι - Γενικές αρχές". Εκδόσεις Συμεών.

Τσομπανόγλου Σ., 2009. "Παρουσίαση και αξιολόγηση τεχνολογιών θερμικής επεξεργασίας & ενεργειακής αξιοποίησης αστικών στερεών αποβλήτων". Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Κοζάνης.

ΥΠΕΧΩΔΕ, 2004. "Εθνικό σχέδιο κατανομής δικαιωμάτων εκπομπών για την περίοδο 2005-2007".

ΥΠΕΧΩΔΕ, 2007. "Εθνικό σχέδιο κατανομής δικαιωμάτων εκπομπών για την περίοδο 2008-2012".

Φάκωνα Α., 2010. "Ολοκληρωμένα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής με συνθετικό φυσικό αέριο από αλλοθερμική αεριοποίηση γαιάνθρακα". Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Διαδίκτυο

<http://www.zeropointcleantech.com>

US Department Of Energy

<http://apps3.eere.energy.gov/greenpower/markets/certificates.shtml?page=0>

<http://energy.gov/savings/aep-ohio-renewable-energy-credit-rec-purchase-program>

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

<http://www.power-technology.com>

<http://www.metso.com>

Ελληνική Εταιρία Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων – ΕΕΣΔΑ

<http://www.eedsa.gr/Contents.aspx?CatId=95>

Eurostat, 2011. “Municipal Waste Statistics”

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Municipal_waste_statistics

http://www.alentecinc.com/papers/IGCC/BIO_GASIFICTION.PDF

http://www.turismdurabil.ro/literatura/cp/CP-in-Hotels/e_bat_fhnw_CP-research_Flue-gas-heat-recovery.pdf

<http://www.energyefficiencyasia.org/docs/casestudies/Thailand/Lime%20Master/Lime%20Master%20-%20Installation%20of%20bag%20filters%20for%20lime%20dust.pdf>

http://www.alibaba.com/product-gs/631028256/water_scrubber.html

<http://www.skai.gr/news/greece/article/229530/eurokoinovoulio-ohi-stis-upsiles-times-gia-agma-dikaiomaton-ekpobis-ruon/>