

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Σύγκριση βιολογικών μεθόδων αξιοποίησης του
προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος των Αστικών
Σύμμεικτων Απορριμμάτων βάσει των αρχών της
Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.**

*Comparison between biological processes of source separated organic
MSW based on Life Cycle Analysis principles.*

ΘΕΟΠΟΥΛΟΥ ΓΙΑΝΝΟΥΛΑ

Επιβλέπων: Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π. Καρέλλας Σωτήριος
Αθήνα, Φεβρουάριος 2013

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	2
Πρόλογος	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	7
1. Διαχείριση, διάθεση & επεξεργασία Οργανικού κλάσματος των Αστικών Σύμμεικτων Απορριμμάτων στην Ελλάδα	8
1.1. Υφιστάμενη κατάσταση στα ελληνικά νησιά.....	9
1.2. Ισχύον Νομοθετικό πλαίσιο.....	13
2. Βιολογικές Μέθοδοι Αξιοποίησης Οργανικού κλάσματος ΑΣΑ.....	23
2.1. Εισαγωγή στην τεχνολογία της κομποστοποίησης.....	24
2.1.1. Ορισμός & Διεργασία κομποστοποίησης.....	24
2.1.2. Παράμετροι απόδοσης & λειτουργίας κομποστοποίησης.....	26
2.1.3. Συστήματα & Τεχνολογίες κομποστοποίησης.....	28
2.2. Εισαγωγή στην τεχνολογία της Αναερόβιας Χώνευσης.....	30
2.2.1. Ορισμός & Διεργασία αναερόβιας χώνευσης.....	30
2.2.2. Παράμετροι απόδοσης & λειτουργίας αναερόβιας χώνευσης	32
2.2.3. Συστήματα & Τεχνολογίες αναερόβιας χώνευσης	33
2.2.4. Τελική χρήση βιοαερίου	37
2.3. Σύγκριση δύο μεθόδων	39
3. Ανάλυση Κύκλου Ζωής	43
3.1. Ορισμός ανάλυσης κύκλου ζωής	44
3.2. Καθορισμός Σκοπού και Στόχου της Μελέτης	44
3.2.1. Όρια συστήματος & Λειτουργική μονάδα	44
3.2.2. Επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου	47
3.3. Καταγραφή δεδομένων και ανάλυση επιπτώσεων	48
4. Περιγραφή εξεταζόμενου συστήματος	49
4.1 Περιοχή μελέτης – Παραγωγή & σύσταση ΑΣΑ	50
4.2 Ολοκληρωμένο πρόγραμμα διαχείρισης ΑΣΑ	51
5. Κομποστοποίηση οργανικού κλάσματος ΑΣΑ	56
5.1. Δεδομένα & Υπολογιστικές Παραδοχές	57

5.1.1.	Διαχείριση προδιαλεγμένου κλάσματος – Περιγραφή διαδικασίας	57
5.1.2.	Βιολογική Αποδόμηση Οργανικού κλάσματος	61
5.1.3.	Κατασκευή μονάδας & Υποδομή – Κατανάλωση ενέργειας	65
5.1.4.	Εφαρμογή τελικού κομπόστ στο έδαφος	69
5.1.5.	Απορρίμματα μονάδας κομποστοποίησης	73
5.2.	Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	74
5.2.1.	Βασικό Σενάριο	74
5.2.2.	Ανάλυση Ευαισθησίας βάσει τελικής χρήσης εδαφοβελτιωτικού	80
5.2.3.	Ανάλυση Ευαισθησίας βάσει σύστασης χαρτιού	82
6.	Αναερόβια Χώνευση οργανικού κλάσματος ΑΣΑ	89
6.1.	Δεδομένα & υπολογιστικές παραδοχές	90
6.1.1.	Διαχείριση οργανικού κλάσματος – Περιγραφή διαδικασίας	90
6.1.2.	Αναερόβια αποδόμηση οργανικού κλάσματος	93
6.1.3.	Τελική χρήση βιοαερίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	96
6.1.4.	Κατανάλωση Ενέργειας , Υποδομή μονάδας & εξοπλισμός	97
6.1.5.	Αναβάθμιση βιοαερίου σε βιομεθάνιο	99
6.1.6.	Διαχείριση χωνεμένης ιλύος	101
6.1.7.	Απορρίμματα της μονάδας αναερόβιας χώνευσης	101
6.2.	Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	102
6.2.1.	Βασικό Σενάριο	102
6.2.2.	Ανάλυση Ευαισθησίας βάσει τελικής χρήσης βιοαερίου	111
6.2.3.	Ανάλυση Ευαισθησίας βάσει σύστασης ΑΣΑ	114
6.2.4.	Ανάλυση Ευαισθησίας βάσει ποσοστού προς αναερόβια χώνευση και προς κομποστοποίηση – Σύγκριση των 2 μεθόδων	118
7.	Εισαγωγή στην τεχνοοικονομική ανάλυση	124
7.1.	Παράμετροι τεχνοοικονομικής ανάλυσης	125
7.2.	Παρουσίαση βασικών οικονομικών σεναρίων	133
8.	Συμπεράσματα & πρόταση για μελλοντική εργασία	143
9.	Βιβλιογραφία	146

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο αντικείμενο την μελέτη, αξιολόγηση και σύγκριση δυο μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας του προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος των αστικών σύμμεικτων απορριμμάτων των ελληνικών νησιών βάσει των αρχών της ανάλυσης κύκλου ζωής, σε σχέση με την επίδραση τους στο φαινόμενο του Θερμοκηπίου. Οι μέθοδοι που εξετάζονται είναι η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση.

Στο 1^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υφιστάμενη κατάσταση στα ελληνικά νησιά σε σχέση με την συλλογή, διάθεση και αξιοποίηση των ΑΣΑ. Επιπλέον, παρουσιάζεται συνοπτικά το νομοθετικό πλαίσιο που σχετίζεται με την διαχείριση των οργανικών ΑΣΑ και την αδειοδότηση των μονάδων κομποστοποίησης και αναερόβιας χώνευσης.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρατίθενται οι αρχές λειτουργίας των δύο μεθόδων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι παράμετροι λειτουργίας και απόδοσης, τα συστήματα και οι τεχνολογίες, τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους καθώς επίσης και τα βασικά πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Στο 3^ο κεφάλαιο εισάγεται η έννοια της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και περιγράφεται η εφαρμογή των αρχών της στην παρούσα διπλωματική εργασία. Περιγράφονται αναλυτικά τα όρια του συστήματος και η κατηγορία επίδρασης και διακρίνονται οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου σε άμεσες, έμμεσες & εξοικονόμησης.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφεται η περιοχή μελέτης στην οποία εξετάζονται οι δύο μέθοδοι και παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης έξι (6) ρευμάτων των ΑΣΑ με εφαρμογή προγράμματος διαλογής στην πηγή με κεντρικούς κάδους. Τα ρεύματα που μελετώνται είναι: το χαρτί, το γυαλί, το πλαστικό, τα σιδηρούχα μέταλλα και τα μέταλλα αλουμινίου. Αναλυτικά περιγράφεται το σύστημα συλλογής και μεταφοράς του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ στην αντίστοιχη μονάδα βιολογικής επεξεργασίας.

Στο 5^ο και 6^ο κεφάλαιο, στο πρώτο μέρος πραγματοποιείται η καταγραφή των δεδομένων, βάσει βιβλιογραφικής αναζήτησης, και των υπολογιστικών παραδοχών. Γίνεται περιγραφή της κομποστοποίησης και της αναερόβιας χώνευσης, για το κάθε κεφάλαιο αντίστοιχα, σε βιομηχανική κλίμακα και παρουσίαση του υπολογιστικού μοντέλου. Στο δεύτερο μέρος πραγματοποιείται η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των βασικών σεναρίων των δύο μεθόδων σε σχέση με το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Πραγματοποιούνται επιπλέον αναλύσεις ευαισθησίας βάσει τελικής χρήσης του κομποστ και του βιοαερίου, βάσει σύστασης ΑΣΑ, βάσει ποσοστού χαρτιού προς κομποστοποίηση, βάσει ποσοστού οργανικού προς αναερόβια χώνευση και προς κομποστοποίηση και τέλος γίνεται σύγκριση των δύο μεθόδων με κριτήριο την επίδραση του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Στο 7^ο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην τεχνοοικονομική ανάλυση των δύο μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας. Παρουσιάζονται δύο βασικά σενάρια και συγκρίνεται η οικονομική βιωσιμότητα της κάθε μεθόδου συναρτήσει του συνδυασμού των παραμέτρων της δυναμικότητας και του πληθυσμού της εξεταζόμενης περιοχής.

Τέλος στο 8^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και πραγματοποιείται πρόταση για μελλοντική εργασία.

Abstract

The overall aims of the present thesis is to assess and compare two biological treatment methods, digestion and composting, of the biodegradable fraction of municipal solid waste based on life cycle principles through assessing the greenhouse gas emission impacts of the two biological treatments.

The 1st chapter presents the current situation in the Greek Islands with respect to the collection, disposal and treatment of the municipal solid waste (MSW). Moreover, the legislative framework, which is related to the management of the organic MSW and the licensing of anaerobic digestion and composting units, is summarized.

The 2nd chapter lists the operating principles of both methods. Specifically, the parameters of performance and operation are presented as well as the available technologies and their technical characteristics. Finally, the main advantages and disadvantages of each method are illustrated.

The 3rd chapter introduces the concept of Life Cycle Analysis (LCA) and describes the application of its principles in the present thesis. The system's boundaries are defined in detail. Moreover, the effect of greenhouse gases is categorized and the emissions are distinguished in direct, indirect and saving ones.

In chapter 4, the study area is detailed, in which both anaerobic digestion and composting are addressed. Additionally, the integrated management system of the six (6) fractions of MSW is examined by applying a source separation system, using central waste bins. The fractions studied are paper, plastic, ferrous and non-ferrous metals. The collection and transfer system of the organic fraction of MSW to the corresponding biological treatment unit are thoroughly described.

In the 5th and 6th chapters, the first part consists of data reporting, based on literature research and the computational assumptions. In each chapter, both industrial scale composting and aerobic digestion are analyzed, using the respective computational model. The second part includes assessing the environmental impact of the baseline scenarios for both composting and digestion in concern of the greenhouse effect. Furthermore, a sensitivity analysis is conducted based on the end use of the compost and the biogas, on the composition of the organic fraction of MSW, on the percentage of the paper

composted and on the organic substrate digested or composted. Then, with respect to the influence on the greenhouse effect, the two methods are compared.

Chapter 7 is an introduction to the techno-economic analysis of the two biological treatment methods. In this chapter two baseline scenarios are tested. For each scenario, the economic viability is evaluated as a function of the capacity of each unit and the population in the region concerned.

Finally, the last chapter includes the conclusions of the thesis and the perspectives and proposals for further study and research.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Καρέλλα Σωτήριο για τη δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική εργασία και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον MSc Μηχανολόγο Μηχανικό Κουρκούμπα Δημήτριο για την άψογη συνεργασία και την μείζονος σημασίας βοήθεια του για την εκπόνηση της εργασίας μου. Ήταν πρόθυμος να με βοηθήσει σε κάθε μου δυσκολία και να με καθοδηγήσει.

Ξεχωριστή αναφορά θα ήθελα να κάνω στην Θεοπούλου Ελένη, τον Αρωνίδη Δαμιανό και την Μυρτώ Ζενέλη για την βοήθεια και την υποστήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια διεξαγωγής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 1^ο

Διαχείριση, διάθεση & επεξεργασία
Οργανικού κλάσματος των Αστικών
Σύμμεικτων Απορριμμάτων στην Ελλάδα

1.1 Υφιστάμενη Κατάσταση στα ελληνικά νησιά

Η αντιμετώπιση της διαχείρισης των ΑΣΑ των νησιωτικών περιοχών δεν μπορεί να γίνει με τον τρόπο που συνηθίζεται στην ηπειρωτική χώρα. Το πιο διαδεδομένο περιβαλλοντικό πρόβλημα που εντοπίζεται σχεδόν σε όλες τις νησιωτικές περιοχές, είναι η ασφαλής διάθεση των υγρών αποβλήτων, κυρίως των αστικών λυμάτων καθώς επίσης και η ολοκληρωμένη διαχείριση στερεών αποβλήτων, λόγω έλλειψης εγκαταστάσεων ανακύκλωσης και αξιοποίησης των ρευμάτων των ΑΣΑ, τα οποία στο μεγαλύτερο μέρος τους οδηγούνται σε ΧΑΔΑ¹ ή σε ΧΥΤΑ². Η παρούσα κατάσταση λοιπόν, στη διαχείριση των αστικών απορριμμάτων στα ελληνικά νησιά αναφέρεται κυρίως στη διάθεση τους σε ΧΥΤΑ και ΧΑΔΑ.

Σύμφωνα με στοιχεία της ΕΕΔΣΑ, του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ, 2012) & του σχεδίου Καλλικράτη, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1, αποτυπώνονται οι συνολικοί χώροι ΧΑΔΑ και ΧΥΤΑ επί των νησιωτικών περιοχών.

¹ ΧΑΔΑ: Χώρος ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων

² ΧΥΤΑ: Χώρος υγειονομικής ταφής απορριμμάτων

Πίνακας 1.1. Στοιχεία ΧΥΤΑ & ΧΑΔΑ για τρεις νησιωτικές περιφέρειες (ΕΕΣΔΑ, Σχέδιο Καλλικράτης, ΥΠΕΚΑ)

Περιφέρεια	ΧΥΤΑ	ΧΑΔΑ ανενεργοί	ΧΑΔΑ ενεργοί	ΧΑΔΑ αποκατεστημένοι	ΧΑΔΑ σε διαδικασία αποκατάστασης
Βόρειο Αιγαίο	4	12	9	80	27
Ιόνια Νησιά	5	3	8	18	17
Νότιο Αιγαίο	19	12	19	24	45
Σύνολο	28	27	36	122	89

Τα νησιά έχουν μια σειρά από ιδιαιτερότητες, που επιβάλλουν την ξεχωριστή αντιμετώπισή τους, όπως αναφέρεται στον Εθνικό Σχεδιασμό διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΚΥΑ 14312/1302/2000). Τα προβλήματα και οι ιδιαιτερότητες που παρατηρούνται σχετίζονται με την γεωγραφική τους θέση, τα κλιματολογικά, γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά τους καθώς και τα κοινωνικό-οικονομικά-διοικητικά χαρακτηριστικά τους (Σχέδιο Καλλικράτης).

Πιο συγκεκριμένα, η πλειοψηφία των νησιών βρίσκεται σε απόσταση από την υπόλοιπη ηπειρωτική χώρα, ενώ ένα μέρος αυτών απέχουν και από άλλο νησί. Η συχνότητα της κακοκαιρίας, με συνακόλουθη την απαγόρευση του απόπλου των πλοίων, δυσχεραίνουν την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης (που θα ενώνει τα νησιά με τα νησιά & με την ηπειρωτική χώρα). Χαρακτηριστικό του κλίματος είναι οι μεγάλοι περίοδοι υψηλών θερμοκρασιών, οι οποίες εντείνουν τα προβλήματα δυσοσμίας και τους κινδύνους υγείας (κατά στην φάση της προσωρινής αποθήκευσης & της τελικής διάθεσης), καθώς και οι ισχυροί άνεμοι που προκαλούν διασπορά τόσο των απορριμμάτων όσο και των οσμών που εκλύονται από αυτά. Τα νησιά χαρακτηρίζονται από περιορισμένη διαθέσιμη γη, κυρίως όμως, από περιορισμένα υδατικά αποθέματα καθώς αποτελούν ένα ευαίσθητο υδροφορέα. Παρουσιάζουν σημαντική πληθυσμιακή αύξηση κατά την τουριστική περίοδο, η οποία συγκεντρώνεται σε λίγα μέρη του νησιού (η τοπική οικονομία εξαρτάται σημαντικά από τον τουρισμό).

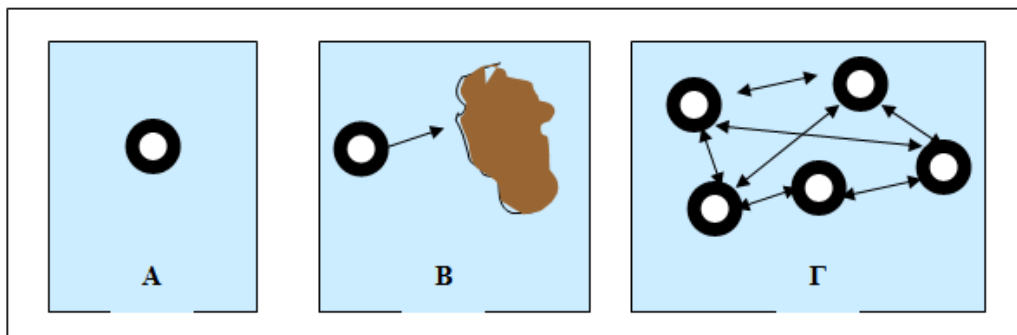
Εξαιτίας των διοικητικών χαρακτηριστικών των νησιωτικών περιοχών υπάρχει δυσκολία στην εφαρμογή κοινής διαχείρισης με την ηπειρωτική χώρα ή ακόμα και με μεγαλύτερα νησιά. Επιπλέον, παρουσιάζεται συχνή έλλειψη πόρων για την λειτουργία συστήματος επεξεργασίας και διάθεσης απορριμμάτων. Τέλος, το μεγάλο κόστος μεταφοράς των ανακυκλώσιμων αποβλήτων σε κέντρα συλλογής στην ηπειρωτική χώρα, όπου εφαρμόζονται προγράμματα ανακύκλωσης εντείνει τα προβλήματα διαχείρισης των ΑΣΑ.



Σχήμα 1.1. Χώροι ανεξέλεγκτης διάθεσης απορριμμάτων στα ελληνικά νησιά

Με γνώμονα τα παραπάνω προκύπτουν τρεις κύριες στρατηγικές για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων στα νησιά, όπως περιγράφεται στο Διαχειριστικό Σχέδιο Αποβλήτων Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου:

- Η στρατηγική της επιτόπιας επεξεργασίας και διάθεσης
- Η στρατηγική της μεταφοράς των στερεών αποβλήτων σε μονάδες επεξεργασίας και διάθεσης της ηπειρωτικής χώρας
- Η στρατηγική της συνένωσης των νησιών.



Σχήμα 1.2. Τρεις κύριες στρατηγικές για την διαχείριση στερεών αποβλήτων

Η 1^η περίπτωση αφορά είτε απομονωμένα νησιά είτε νησιά με μεγάλη παραγωγή απορριμμάτων, ικανά να συντηρήσουν οικονομικά μία εγκατάσταση επεξεργασίας και διάθεσης απορριμμάτων. Η 2^η περίπτωση, όπου αυτό είναι δυνατόν, αφορά τη μεταφορά είτε στην ηπειρωτική χώρα είτε σε κάποιο γειτονικό νησί που διαθέτει σχετικές εγκαταστάσεις και η 3^η νησιά με μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, τα οποία ομαδοποιούνται σε μία διαχειριστική ενότητα και λειτουργούν από κοινού μία εγκατάσταση επεξεργασίας και διάθεσης απορριμμάτων. Στην πραγματικότητα η

στρατηγική διαχείρισης των στερεών αποβλήτων στα νησιά θα είναι πάντα ένας συνδυασμός των πιο πάνω στρατηγικών.

Προκειμένου να επιλυθεί και να εφαρμοστεί ένας βιώσιμος σχεδιασμός διαχείρισης απορριμμάτων, προτείνονται οι ακόλουθες λύσεις περιβαλλοντικής διαχείρισης:

- Παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μέσω της αξιοποίησης οργανικών αποβλήτων με σεβασμό στο νησιωτικό χώρο και στο περιβάλλον και ενεργή συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών & της τοπικής αυτοδιοίκησης στις δραστηριότητες αυτές.
- Κομποστοποίηση των οργανικών αποβλήτων προς παραγωγή βιολογικών λιπασμάτων για αναβάθμιση της αγροτικής παραγωγής
- Επεμβάσεις στην επεξεργασία αποβλήτων και μείωση απορριμμάτων ώστε να μειωθούν οι επιπτώσεις από την εποχιακή αύξηση των απορριμμάτων κατά την διάρκεια της τουριστικής περιόδου

Για τα βιοαποδομήσιμα απορρίμματα καθορίζεται σαφώς η ανάγκη για αξιοποίηση τους με σκοπό την ανάκτηση υλικών και την παραγωγή ενέργειας μέσω της κομποστοποίησης (λιπασματοποίηση) και της αναερόβιας χώνευσης προς συμμόρφωση με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής και Διεθνούς Νομοθεσίας.

1.2 Ισχύον Νομοθετικό πλαίσιο & Αδειοδότηση έργων αξιοποίησης οργανικών ΑΣΑ

Οι υπεύθυνοι για τις εργασίες διαχείρισης των απορριμμάτων, σύμφωνα με τις διατάξεις της [ΚΥΑ 50910/2727/2003](#), καθορίζονται στο Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ). Στην διαχείριση συμπεριλαμβάνονται η αξιοποίηση των απορριμμάτων μέσω της ανακύκλωσης και της επαναχρησιμοποίησης, η περιβαλλοντικά ασφαλής διάθεση καθώς και η δημιουργία εθνικού δικτύου εγκαταστάσεων διαχείρισης απορριμμάτων.

Σύμφωνα με την οδηγία [99/31/ΕΚ](#), όπως αυτή ενσωματώθηκε στο εθνικό δίκαιο μέσω της [ΚΥΑ 29407/3508](#), η αναερόβια χώνευση και η κομποστοποίηση περιλαμβάνονται στις εργασίες διαχείρισης καθώς ορίζονται ως επεξεργασία που μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ, προκειμένου να περιοριστεί ο όγκος τους, οι επικίνδυνες ιδιότητες τους κατά τη φάση της διάθεσης τους σε ΧΥΤΑ και ανακτηθούν χρήσιμα υλικά. Ως κομμάτι της συνολικής επεξεργασίας νοείται και η διαλογή στην πηγή, καθώς συμβάλλει στην διευκόλυνση της διακίνησης και της τελικής αξιοποίησης των απορριμμάτων.

Για τις νησιωτικές περιοχές ο ΕΣΔΑ καταρτίζει τρεις ΠΕΣΔΑ (Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης Απορριμμάτων) με σκοπό να υλοποιήσει τα παραπάνω: Βορείου & Νοτίου Αιγαίου και Ιόνιων Νήσων. Σε κάθε Διαχειριστική Ενότητα την ευθύνη για την μεταφόρτωση, αξιοποίηση και διάθεση των αποβλήτων έχει ο Φορέας Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΦοΔΣΑ). Οι εργασίες συλλογής και μεταφοράς των

αστικών αποβλήτων εκτελούνται με ευθύνη των οικείων Οργανισμών Τοπικής Αυτοδιοίκησης (ΟΤΑ) πρώτου βαθμού εντός των διοικητικών ορίων στα οποία παράγονται. Στις νησιωτικές περιφέρειες Ιονίου, Βορείου και Νοτίου Αιγαίου, αντιστοιχεί ένας ΦοΔΣΑ σε κάθε Περιφερειακή Ενότητα (3852/2010). Επιπλέον, ορίζεται η δημιουργία Επιχειρήσεων Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΕΔΙΣΑ) των δήμων, στις οποίες συγχωνεύονται οι σημερινοί ΦοΣΔΑ (Μπουρτσάλας, 2011).

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις της οδηγίας 99/31/ΕΚ για την υγειονομική ταφή, ο ΕΣΔΑ & οι ΠΕΣΔΑ υποχρεούνται να καταρτίσουν στρατηγική για τη μείωση των βιοαποδομήσιμων ΑΣΑ που προορίζονται για χώρους υγειονομικής ταφής. Η στρατηγική, που οφείλεται να ακολουθείται, βασίζεται σε μια ιεραρχική προτίμηση για τις επιλογές διαχείρισης των απορριμμάτων, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

- Ελαχιστοποίηση μέσω της πρόληψης
- Επαναχρησιμοποίηση
- Ανακύκλωση υλικών (συμπεριλαμβανομένης της λιπασματοποίησης)
- Ανάκτηση Ενέργειας
- Ασφαλής διάθεση

Η εθνική στρατηγική για τη μείωση της ποσότητας του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ, όπως παρουσιάζεται στην ΚΥΑ 50910/2727/2003, που προορίζεται προς διάθεση σε ΧΥΤΑ, καθορίζει συγκεκριμένους στόχους για τα έτος 2013. Οι στόχοι αυτοί έχουν γνωστοποιηθεί στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2003 και έχουν συμπεριληφθεί στον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης μη επικίνδυνων Στερεών Αποβλήτων (ΕΣΔΑ).

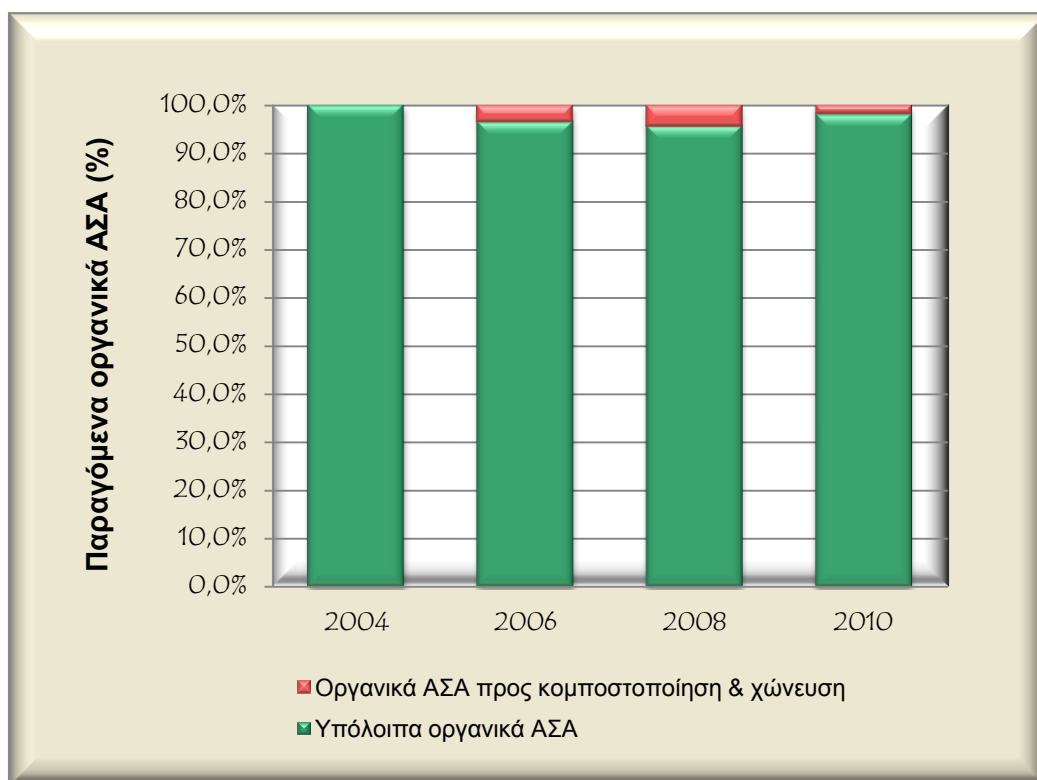
Στόχος είναι ο διαχρονικός περιορισμός της ποσότητας και η βελτίωση της ποιότητας του οργανικού κλάσματος των αποβλήτων που προορίζονται για υγειονομική ταφή. Σύμφωνα λοιπόν, με εισήγηση του τμήματος Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2006) ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων περιλαμβάνει διαλογή στην πηγή του οργανικού κλάσματος και κατασκευή μονάδων αερόβιας ή αναερόβιας βιολογικής επεξεργασίας του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των στερεών αποβλήτων, όπου κρίνεται οικονομοτεχνικά σκόπιμο και με γνώμονα τις οικονομίες κλίμακας.

Σύμφωνα με την οδηγία 99/31/ΕΚ, όπως προσαρμόστηκε στην ΚΥΑ 29407/3508, προβλεπόταν ότι μέχρι το 2010 τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα που προορίζονται για χώρους ταφής (ΧΥΤΑ) θα πρέπει να μειωθούν στο 50% κ.β. της ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που είχαν παραχθεί το 1995. Εντούτοις, ο στόχος αυτός δεν υλοποιήθηκε. Σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat (2012), το 2010 από τα συνολικά παραγόμενα βιοαποδομήσιμα ΑΣΑ, μόνο το 1,90% οδηγήθηκε προς κομποστοποίηση και χώνευση.

Πίνακας 1.2. Παραγωγή ΑΣΑ σε κιλά/κάτοικο (Eurostat 2012)

	2004	2006	2008	2010
	κιλά/κάτοικο			
Παραγωγή ΑΣΑ	432	442	452	457
Κομποστοποίηση & χώνευση	0	7	9	4 ^α

α: εκτίμηση της Eurostat



Διάγραμμα 1.1. Παραγωγή Αστικών Σύμμεικτων Απορριμμάτων ανά κάτοικο, συνολική διάθεση σε ΧΥΤΑ & ΧΑΔΑ, ΑΣΑ προς κομποστοποίηση και χώνευση (Eurostat 2012)

Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.2, παρατηρείται αυξητική πορεία στην παραγωγή των ΑΣΑ. Αντίθετα, οι διενέργειες για την συμμόρφωση προς τις οδηγίες της ΕΕ δεν έχουν πραγματοποιηθεί. Ο επόμενος στόχος τοποθετείται το έτος 2020, σύμφωνα με τον οποίο, τα βιοαποδομήσιμα αστικά απόβλητα που προορίζονται για χώρους ταφής (ΧΥΤΑ) πρέπει να μειωθούν στο 35% κ.β. της ποσότητας των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων που είχαν παραχθεί το 1995 (99/31/ΕΚ).

Σύμφωνα με την ιεραρχία που έχει θεσπίσει η ΕΕ για την μείωση των απορριμμάτων, προκειμένου να υπάρξει πρόοδος προς τις αειφόρες πρακτικές ολοκληρωμένης διαχείρισης των απορριμμάτων, είναι απαραίτητες οι διενέργειες των υψηλότερων στην ιεραρχία σε σχέση με την παρούσα κατάσταση, η οποία χαρακτηρίζεται κυρίως από την διάθεση σε ΧΥΤΑ και ΧΑΔΑ. Ωστόσο, η ιεράρχηση των αποβλήτων δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως πανάκεια, δεδομένου ότι ιδίως οι διαφορετικές μέθοδοι επεξεργασίας των αποβλήτων μπορεί να έχουν διαφορετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Καθορίζεται σαφώς η ανάγκη για αξιοποίηση τους με σκοπό την ανάκτηση υλικών και την παραγωγή ενέργειας μέσω της κομποστοποίησης (λιπασματοποίηση) και της παραγωγής βιομεθανίου προς συμμόρφωση με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής και Διεθνούς Νομοθεσίας. Για την ολοκλήρωση των έργων διαχείρισης απορριμμάτων, δηλαδή της αδειοδότησης και της έναρξης λειτουργίας, απαιτούνται διενέργειες που καθορίζονται από την Νομοθεσία και το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ).

Κατάταξη & αδειοδότηση έργων κομποστοποίησης & αναερόβιας χώνευσης

Η αξιοποίηση των οργανικών απορριμμάτων σύμφωνα με τον νόμο [4014/2011](#) κατατάσσεται σε 2 κατηγορίες ανάλογα με την επίπτωση στο περιβάλλον:

- i. Η πρώτη κατηγορία (Α) περιλαμβάνει έργα και δραστηριότητες τα οποία ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Επιπρόσθετα, τα έργα και οι δραστηριότητες της κατηγορίας Α κατατάσσονται:
 - ο σε αυτά που ενδέχεται να προκαλέσουν πολύ σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και αποτελούν την υποκατηγορία Α1 και
 - ο σε αυτά που ενδέχεται να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και αποτελούν την υποκατηγορία Α2.
- ii. Η δεύτερη κατηγορία (Β) περιλαμβάνει έργα και δραστηριότητες τα οποία χαρακτηρίζονται από τοπικές και μη σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Σύμφωνα με το άρθρο 1 του ως άνω νόμου, οι εγκαταστάσεις διαχείρισης προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος με τελικό προϊόν το κομπόστ ή/και το βιομεθάνιο κατατάσσονται σε κατηγορίες βάσει της εισερχόμενης ποσότητας απορριμμάτων και την επίπτωση αυτής στο περιβάλλον, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3. Κατάταξη έργων Αξιοποίησης Οργανικών Αστικών Απορριμμάτων σύμφωνα με τις διατάξεις του Νόμου (4014/2011)

	Μεμονωμένες εγκαταστάσεις παρασκευής εδαφοβελτιωτικών-κομπόστ από προδιαλεγμένο ή διαχωρισμένο οργανικό κλάσμα αστικών στερεών αποβλήτων σε βιομηχανικά κτήρια ή άλλες κατάλληλες κατασκευές (εργασία R3)³	Εγκαταστάσεις επεξεργασίας μη επικίνδυνων αποβλήτων προς παραγωγή βιοαερίου (εργασία R3)
Υπό-κατηγορία A1	-	$Q \geq 100.000$ tn/έτος
Υπό-κατηγορία A2	$Q \geq 20$ tn/ημέρα	$10.000 \leq Q \leq 100.000$t/έτος
Κατηγορία B	$1 \leq Q \leq 20$ tn/ημέρα	$Q \leq 10.000$ tn/έτος
Παρατηρήσεις	Q: εισερχόμενη ποσότητα ανά ημέρα	Q: ετήσια παραγωγή αποβλήτων προς επεξεργασία

1^ο Στάδιο

Για την υλοποίηση του έργου καταρχάς, καταρτίζεται Μελέτη Σχεδιασμού, η οποία πρέπει να εγκριθεί από το οικείο Νομαρχιακό ή Περιφερειακό Συμβούλιο στο οποίο υπάγεται η περιοχή. Κατόπιν τούτου, και εφόσον είναι θετική η γνωμοδότηση, ακολουθεί η εκπόνηση της Μελέτης Προέγκρισης Χωροθέτησης του έργου. Όπου απαιτείται τοπογραφικό διάγραμμα υποβάλλεται και σε ψηφιακή μορφή και περιλαμβάνει το περίγραμμα του προς πραγματοποίηση έργου καθώς και φωτογραφική απεικόνιση.

2^ο Στάδιο

Για λόγους συντόμευσης των διαδικασιών, η Μελέτη Προέγκρισης Χωροθέτησης είναι σκόπιμο να κατατίθεται μαζί με τη Μελέτη Σχεδιασμού. Εφόσον η Διεύθυνση

³ Εργασία R3 ορίζεται η «ανακύκλωση/ανάκτηση οργανικών ουσιών που δεν χρησιμοποιούνται ως διαλύτες, συμπεριλαμβανομένης της κομποστοποίησης και άλλων διαδικασιών βιολογικού μετασχηματισμού (π.χ. αναερόβια χώνευση).

Περιβαλλοντικού Σχεδιασμού του ΥΠΕΚΑ γνωμοδοτήσει θετικά, γίνεται έναρξη διαδικασιών απόκτησης γης, είτε με αγορά, είτε με απαλλοτρίωση.

3^ο Στάδιο

Συνέχεια έχει η Περιβαλλοντική αδειοδότηση, κατά την οποία ο υπεύθυνος φορέας του έργου υποβάλλει Προμελέτη έργου και Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων. Παράλληλα με την Προμελέτη έργου πραγματοποιούνται τοπογραφικές εργασίες, γεωλογικές και υδρολογικές μελέτες καθώς και γεωτεχνικές έρευνες. Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που αναφέρεται στον Πίνακα 1.3, καθορίζεται και η αρμόδια περιβαλλοντική Υπηρεσία, στην οποία πρέπει να απευθυνθεί ο αρμόδιος του έργου για την Περιβαλλοντική αδειοδότηση:

- A1: περιβαλλοντική Υπηρεσία του ΥΠΕΚΑ
- A2: περιβαλλοντική Υπηρεσία της Αποκεντρωμένης Διοίκησης
- B: περιβαλλοντική Υπηρεσία της Περιφέρειας

Όσον αφορά την Μελέτη Περιβαλλοντικών Όρων, σύμφωνα με την κατάταξη που παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.3, ισχύουν:

- i. Για την κατηγορία A απαιτείται η διεξαγωγή Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) προκειμένου να επιβάλλονται ειδικοί όροι και περιορισμοί για την προστασία του περιβάλλοντος σχετικά με το συγκεκριμένο έργο ή δραστηριότητα. Ο φάκελος υποβάλλεται στην αρμόδια περιβαλλοντική Υπηρεσία (ΥΠΕΚΑ ή Αποκεντρωμένη Διοίκηση). Εφόσον ελεγχθεί η πληρότητα του και γνωμοδοτηθεί θετικά, εκδίδεται απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) ή σε αντίθετη περίπτωση Απόφαση Απόρριψης.
- ii. Για την δεύτερη κατηγορία (B) δεν ακολουθείται η διαδικασία εκπόνησης Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων. Αντίθετα, τα έργα αυτά υπόκεινται σε Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις, δηλαδή γενικές προδιαγραφές, όρους και περιορισμούς που τίθενται για την προστασία του περιβάλλοντος.

Για τις κατηγορίες των έργων που απαιτείται υποβολή ΜΠΕ οφείλεται να προσκομιστούν στην αρμόδια Περιβαλλοντική Υπηρεσία οι μελέτες και το σύνολο των πληροφοριών, ιδίως των περιβαλλοντικών, που έχουν συλλεχθεί για την πραγματοποίηση των μελετών, με ρητή αναφορά στις πηγές από τις οποίες προήλθαν. Τα περιεχόμενα της ΜΠΕ καθορίζονται στο Παράρτημα II του νόμου [4014/2011](#) και συνοπτικά διακρίνονται σε δύο μέρη:

- Στην μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (ΜΠΕ) των κυρίων και των συνοδών έργων και δραστηριοτήτων. Τα συνοδά έργα περιλαμβάνουν έργα οδικής προσβασιμότητας στη θέση εγκατάστασης του έργου και έργα διασύνδεσης για τα έργα ενεργειακής αξιοποίησης.

- ο Στις απαιτούμενες γνωμοδοτήσεις για το έργο (Εφορείες αρχαιοτήτων, δασική Υπηρεσία, Γ.Ε.ΕΘ.Α., Υ.Π.Α., Ε.Ο.Τ., πολεοδομική Υπηρεσία, Υπηρεσία υδάτων, Δήμος)

Σημαντική είναι η διαδικασία δημοσιοποίησης της ΜΠΕ, η οποία καθορίζεται αναλυτικά στην ΚΥΑ [37111/2021/2003](#). Η αρμόδια Περιβαλλοντική Υπηρεσία διαβιβάζει τον φάκελο ΜΠΕ στο Περιφερειακό Συμβούλιο και ένα αντίγραφο στην περιβαλλοντική Υπηρεσία της Περιφέρειας. Εντός πέντε (5) ημερών το Περιφερειακό Συμβούλιο δημοσιεύει σε μια τουλάχιστον τοπική εφημερίδα σχετική ανακοίνωση. Για το διάστημα των επομένων 30 ημερών, φορείς, οργανώσεις κλπ μπορούν να εξετάσουν το φάκελο και να υποβάλλουν γραπτώς τις απόψεις και τυχόν ενστάσεις. Μετά το πέρας 30 ημερών το Περιφερειακό Συμβούλιο καλείται να γνωμοδοτήσει επί του έργου.

Η διαδικασία που ακολουθείται για την αδειοδότηση διαφέρει για τα έργα αναερόβιας χώνευσης, στα οποία πραγματοποιείται ενεργειακή αξιοποίηση σε σχέση με αντίστοιχα της κομποστοποίησης, που δεν πραγματοποιείται ενεργειακή αξιοποίηση. Συγκεκριμένα, σε ένα σταθμό συμπαραγωγής με καύση βιοαερίου πραγματοποιούνται παράλληλα παραγωγή βιοαερίου και ηλεκτροπαραγωγή με καύση αυτού. Επομένως, σύμφωνα με τις διατάξεις του Νόμου [4014/2011](#) για τα έργα στα οποία πραγματοποιείται ενεργειακή αξιοποίηση ισχύει η κατάταξη, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4. Κατάταξη έργων αναερόβιας χώνευσης (Ανανεώσιμων πηγών Ενέργειας) Απορριμμάτων σύμφωνα με τις διατάξεις του Νόμου (4014/2011)

	Ηλεκτροπαραγωγή με καύση βιοαερίου	Εγκαταστάσεις παραγωγής βιοαερίου με καύση βιοαερίου προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	
Υπό-κατηγορία Α1	$P \geq 3MW$	-	$Q \geq 100.000$ tn/έτος
Υπό-κατηγορία Α2	$5 < P < 3MW$ ή $P < 0,5$ και ισχύει η Ξ^4	$Q \geq 20$ tn/ημέρα	$10.000 \leq Q \leq 100.000$ t/έτος
Κατηγορία Β	-	$1 \leq Q \leq 20$ tn/ημέρα	$Q \leq 10.000$ tn/έτος
Παρατηρήσεις	P: εγκατεστημένη ισχύς	Q: εισερχόμενη ποσότητα ανά ημέρα	Q: ετήσια παραγωγή αποβλήτων προς επεξεργασία

Στην κατηγορία Β κατατάσσονται οι σταθμοί με ονομαστική ηλεκτρική ισχύ μικρότερη των 500 kW, υπό την προϋπόθεση ότι:

- ο δεν γειτνιάζουν σε περιοχές Natura ή σε παράκτιες ζώνες που απέχουν λιγότερο από 100 m από τον αιγιαλό και
- ο δεν γειτνιάζουν σε απόσταση μικρότερη των 150 m με σταθμούς της ίδιας τεχνολογίας, η ισχύς των οποίων αθροιστικά να υπερβαίνει τα 500 kW.

Αναφέρεται πως όταν οι δύο κύριες δραστηριότητες κατατάσσονται σε διαφορετικές κατηγορίες, τότε ο σταθμός συνολικά υπάγεται στην ανώτερη κατηγορία. Για παράδειγμα, εάν ως προς την εισερχόμενη ποσότητα ανήκει στην Α1 και ως προς την εγκατεστημένη ισχύ στην Α2, τότε το σύνολο του σταθμού υπάγεται στην κατηγορία Α1.

Επιπλέον, για τους σταθμούς βιοαερίου είναι απαραίτητη η απόκτηση άδειας παραγωγής ενέργειας από την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ). Όσον

⁴ Εξαιρέση σύμφωνα με την παρ. 13 του άρθρου 8 του ν. 3468/2006 όπως τροποποιήθηκε από το άρθρο 3 του ν. 3851/2010, δηλαδή: α) Το έργο εγκαθίστανται σε γήπεδο που βρίσκεται σε περιοχή του δικτύου Natura 2000 ή σε παράκτια θέση που απέχει λιγότερο από 100 m από την οριογραμμή του αιγιαλού εκτός βραχονησίδων, ή β) Το έργο γειτνιάζει, σε απόσταση μικρότερη των 150 m, με σταθμό Α.Π.Ε. της ίδιας τεχνολογίας που είναι εγκατεστημένος σε άλλο γήπεδο και έχει εκδοθεί γι' αυτόν άδεια παραγωγής ή απόφαση Ε.Π.Ο. ή προσφορά σύνδεσης, η δε συνολική ισχύς των σταθμών υπερβαίνει το 0,5 MW για σταθμούς βιοαερίου.

αφορά την αδειοδότηση υπάρχει διαφορετική απαίτηση ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του έργου αναερόβιας χώνευσης. Σύμφωνα λοιπόν, με το άρθρο 4 του νόμου υπ' αριθμό [3851/2010](#):

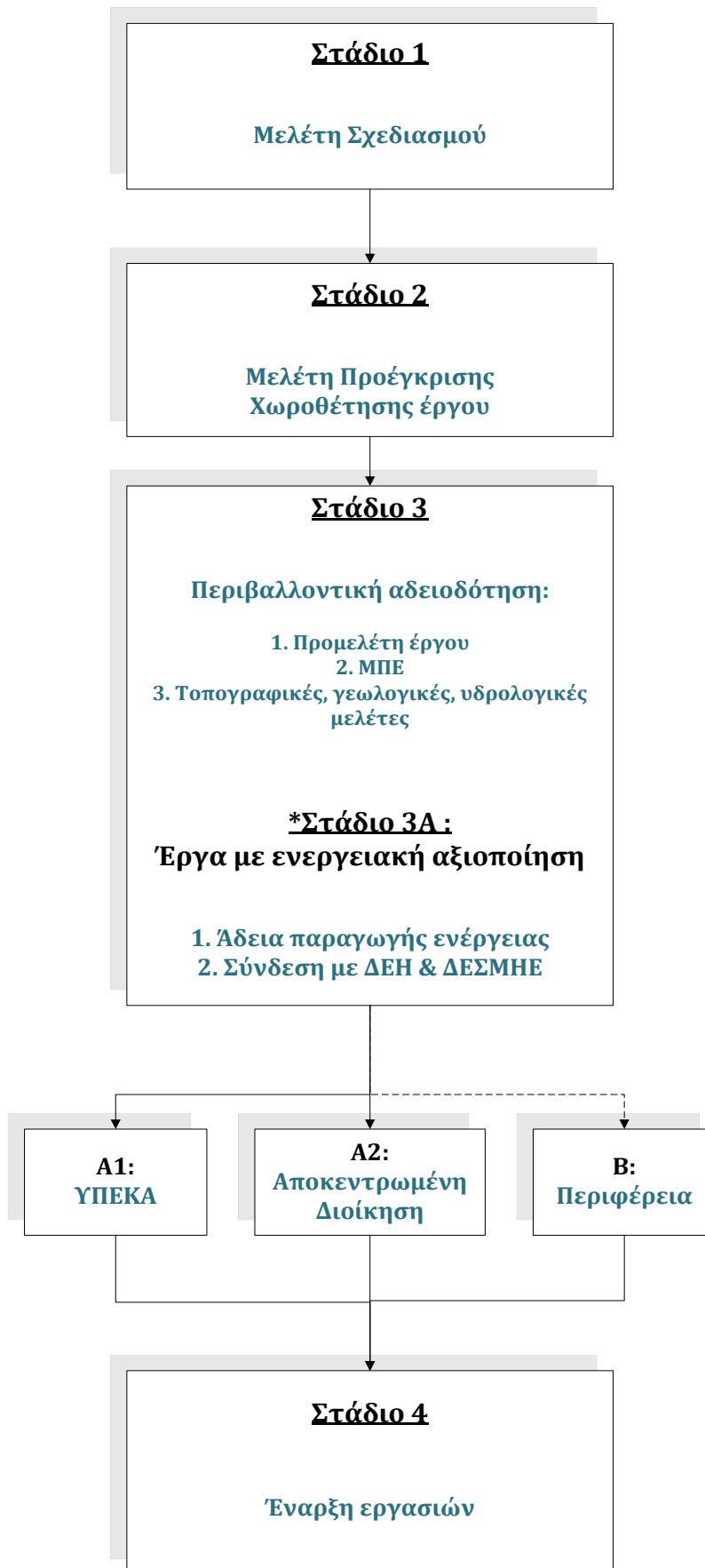
- i. σταθμοί βιοαερίου με εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ μικρότερη ή ίση του ενός (1) MW δεν υποχρεούνται να λάβουν άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- ii. σταθμοί βιοαερίου με εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ μεγαλύτερη του ενός (1) MW υποχρεούνται να λάβουν άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ΡΑΕ.

Στη συνέχεια, πρέπει να γίνει αίτηση στη ΔΕΗ για προσφορά σύνδεσης. Εφόσον είναι θετική η γνωμοδότηση, γίνονται οι απαιτούμενες ενέργειες για τη χορήγηση της άδειας εγκατάστασης και σύναψης των συμβάσεων σύνδεσης και πώλησης με τη ΔΕΗ και το ΔΕΣΜΗΕ αντίστοιχα. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται και απορροφάται από το Σύστημα ή το Δίκτυο, τιμολογείται με μηνιαία βάση σε ευρώ ανά μεγαβατώρα (€/MWh) σε 120,0 €/MWh για συνολική εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη των 2MW και 99,5€/MWh για εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη των 2MW ([3851/2010](#)).

Τελικό Στάδιο

Τέλος, εφόσον είναι θετική η γνωμοδότηση των Ειδικών Περιβαλλοντικών Όρων, και για τις δύο κατηγορίες έργων δύναται να αρχίσουν οι εργασίες κατασκευής, εφόσον αυτό είναι οικονομοτεχνικά εφικτό.

Ακολουθεί σχηματική απεικόνιση σε Διάγραμμα ροής των επιμέρους σταδίων που ακολουθούνται για την υλοποίηση της αδειοδότησης ενός έργου κομποστοποίησης ή αναερόβιας χώνευσης.



Σχήμα 1.3. Διαδικασία Αδειοδότησης έργων αξιοποίησης Οργανικού κλάσματος ΑΣΑ

Κεφάλαιο 2^ο

Βιολογικές μέθοδοι αξιοποίησης Οργανικού κλάσματος απορριμμάτων

2.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία της Κομποστοποίησης

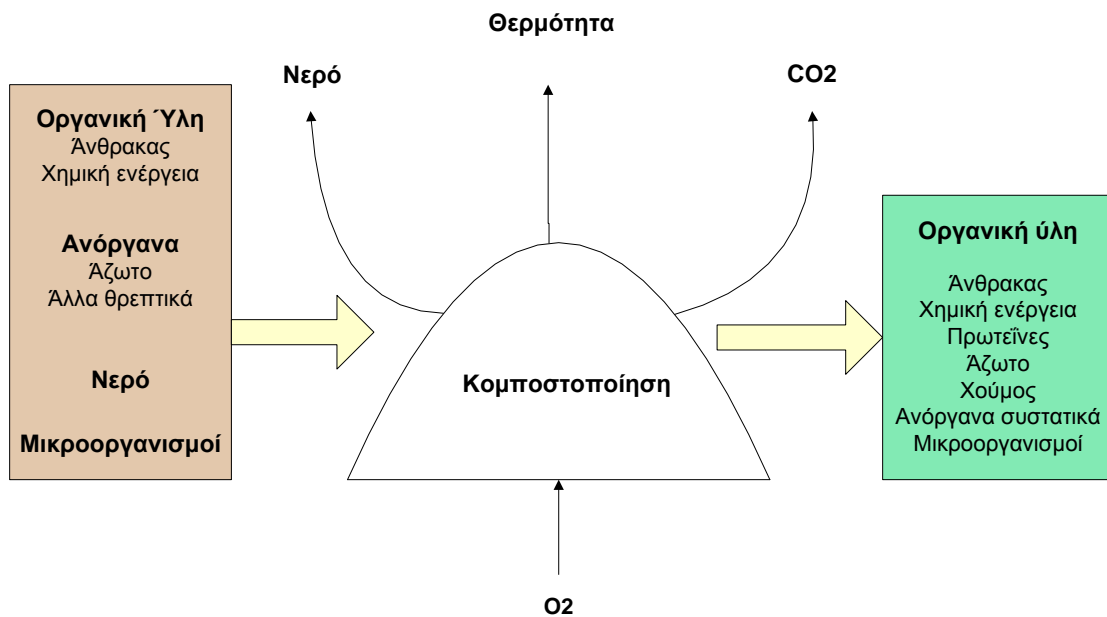
2.1.1 Ορισμός & Διεργασία Κομποστοποίησης

Κομποστοποίηση ορίζεται ως η αερόβια βιολογική αποδόμηση και σταθεροποίηση του οργανικού κλάσματος των απορριμμάτων κάτω από ελεγχόμενες, θερμοφιλικές και αερόβιες συνθήκες. Προϊόν της κομποστοποίησης είναι το κομπόστ το οποίο είναι πλούσιο σε οργανική ουσία με υψηλό χουμικό⁵ περιεχόμενο. Το κομπόστ χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό υλικό, αλλά και ως υπόστρωμα για την καλλιέργεια φυτών – λίπασμα.

Μια μεγάλη ποικιλία ετερογενών, μεσοφιλικών, θερμοφιλικών αερόβιων μικροοργανισμών, (βακτήρια, ακτινομύκητες, ζυμομύκητες και σε μικρότερο βαθμό πρωτόζωα και άλγη) λαμβάνουν μέρος στην διεργασία της αποδόμησης της οργανικής ύλης. Η υπό αερόβιες συνθήκες δράση των μικροβίων εξασφαλίζει την ζύμωση των απορριμμάτων, με την παράλληλη ανάπτυξη σοβαρής ποσότητας θερμικής ενέργειας. Οι μικροοργανισμοί σπάνε τους χημικούς δεσμούς με τους οποίους συνδέονται τα

⁵ Χούμος ονομάζεται (Schefflen 1956) το σύνολο της οργανικής ύλης η οποία βρίσκεται στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους και η οποία υποβάλλεται σε συνεχείς διεργασίες αποσύνθεσης και σύνθεσης νέων ουσιών. Ο χούμος δημιουργείται από τα φύλλα και τις βελόνες που πέφτουν κάθε χρόνο, τα υπολείμματα κλαδιών και ριζών καθώς και από τα απορρίμματα και υπολείμματα των ζωικών οργανισμών. Πηγή: βικιπαίδεια

άτομα του άνθρακα μεταξύ τους. Στη συνέχεια σχηματίζουν πρωτεΐνες, συνδυάζοντας την χημική ενέργεια που εκλύεται, με τα άτομα άνθρακα και αζώτου, που βρίσκονται προσωρινά σε διάσπαση (Ντζαμίλης, 2004). Κατά τη μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών εκλύονται αέρια, όπως αμμωνία, διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου και υδρατμοί, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα.



Σχήμα 2.1. Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας της κομποστοποίησης

Η διαδικασία της κομποστοποίησης αποτελείται από δύο κύριες φάσεις: την αποδόμηση του οργανικού υποστρώματος και την φάση της ωρίμανσης. Η φάση της αποδόμησης αποτελείται από τρεις (3) επιμέρους φάσεις:

- i. Τη λανθάνουσα φάση, κατά την οποία αναπτύσσονται οι αποικίες των μικροοργανισμών
- ii. Τη φάση της αύξησης, κατά την διάρκεια της οποίας αυξάνεται η θερμοκρασία – μέχρι τους 40°C – και αναπτύσσονται τα μεσόφιλα μικρόβια υπεύθυνα για την έναρξη της ζύμωσης.
- iii. Τη θερμόφιλη φάση, αναλαμβάνοντας ένα νέο μικροβιακό κύμα για να συνεχίσει το έργο της αποδόμησης και της ανύψωσης της θερμοκρασίας (Αναγνωστόπουλος, 2010).

Κατά τη φάση της ωρίμανσης η διαδικασία τελειώνει. Το κομπόστ με την ολοκλήρωση της διαδικασίας είναι πλέον έτοιμο για χρήση. Χαρακτηρίζεται άοσμο, βιολογικά

σταθεροποιημένο και χουμοειδές υλικό. Το περιεχόμενο του είναι πλούσιο σε οργανικό ύλη, πρωτεΐνες και υδρογονάνθρακες, περιέχει μεταλλικά στοιχεία (σίδηρος, άζωτο, ασβέστιο κλπ) και είναι υγειονομικά ασφαλές. Η ποιότητα του συγκρίνεται πλέον μόνο με αυτήν του φυσικού χούμου.

Υποστρώματα κομποστοποίησης

Ένα ευρύ φάσμα οργανικών οδηγούνται προς κομποστοποίηση όπως απόβλητα ελαιολιτριβείων, τυροκομείων, πτηνοτροφείων κλπ, άχυρο από καλλιέργειες ή από ενσταυλισμό ζώων, υπολείμματα καλλιεργειών και θερμοκηπίων, φύκια θάλασσας και ιλύς (λυματολάσπη), ωστόσο ένα μεγάλο μέρος των μονάδων κομποστοποίησης στην Ευρώπη στοχεύει στο βιοαποδομήσιμο κλάσμα των ΑΣΑ.

2.1.2 Παράμετροι απόδοσης και λειτουργίας

Λόγω του γεγονότος ότι η ανάπτυξη της μεθόδου στηρίζεται στην παρουσία κατάλληλων πληθυσμών μικροοργανισμών, οι παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη και δραστηριότητα τους είναι αυτές που επηρεάζουν την αποδοτικότητα της κομποστοποίησης. Οι παράμετροι αυτές είναι ο λόγος του συνολικού οργανικού άνθρακα προς το συνολικό άζωτο - C/N, η θερμοκρασία, η παρουσία οξυγόνου, η υγρασία, το μέγεθος τεμαχίων και το pH. Οι παράμετροι αυτές καθορίζουν:

- Την ταχύτητα της αποδόμησης
- Την σταθερότητα του τελικού προϊόντος
- Την εξυγίανση του τελικού προϊόντος
- Τον βέλτιστο αερισμό του προς κομποστοποίηση υλικού
- Την επιθυμητή θερμοκρασία αποδόμησης

Θερμοκρασία κομποστοποίησης

Το θερμοκρασιακό εύρος για την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης περιλαμβάνει τόσο μεσόφιλες, που κυμαίνονται μεταξύ 30 – 40 °C όσο και θερμόφιλες θερμοκρασίες, που κυμαίνονται μεταξύ 50 – 60 °C. Η παραμονή στη θερμόφιλη φάση διαρκεί μόλις λίγες ημέρες και στη συνέχεια η θερμοκρασία διατηρείται στη μεσόφιλη φάση όπου λαμβάνει μέρος η φάση της αύξησης των μικροοργανισμών. Οι θερμόφιλες θερμοκρασίες είναι επιθυμητές για την θανάτωση των παθογόνων μικροοργανισμών, επομένως εξυγίανση του τελικού προϊόντος, και για την επίτευξη ταχύτερης αποδόμησης (Zur, 2012) . Ωστόσο η μετάβαση στη θερμόφιλη φάση πρέπει να γίνεται συνεχή και προσεκτικό έλεγχο προκειμένου να μην υπερβούν τους 60 με

70°C, καθώς ενέχει ο κίνδυνος να καταστραφούν ομάδες μικροοργανισμών σημαντικών για την διαδικασία (Richard, 1991).

Θρεπτικά συστατικά – λόγος άνθρακα προς άζωτο

Τα σημαντικότερα μακροθρεπτικά στοιχεία για τη διαδικασία της κομποστοποίησης είναι ο άνθρακας (C), το άζωτο (N), ο φώσφορος (P) και το κάλιο (K). Ο άνθρακας αποτελεί την πηγή ενέργειας για τους μικροοργανισμούς, καθώς ένα μικρό κλάσμα του ενσωματώνεται στα κύτταρα τους. Το άζωτο είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη του μικροβιακού πληθυσμού, ενώ χρήση του φωσφόρου έγκειται κυρίως στην αποθήκευση ενέργειας (Diaz, 2007).

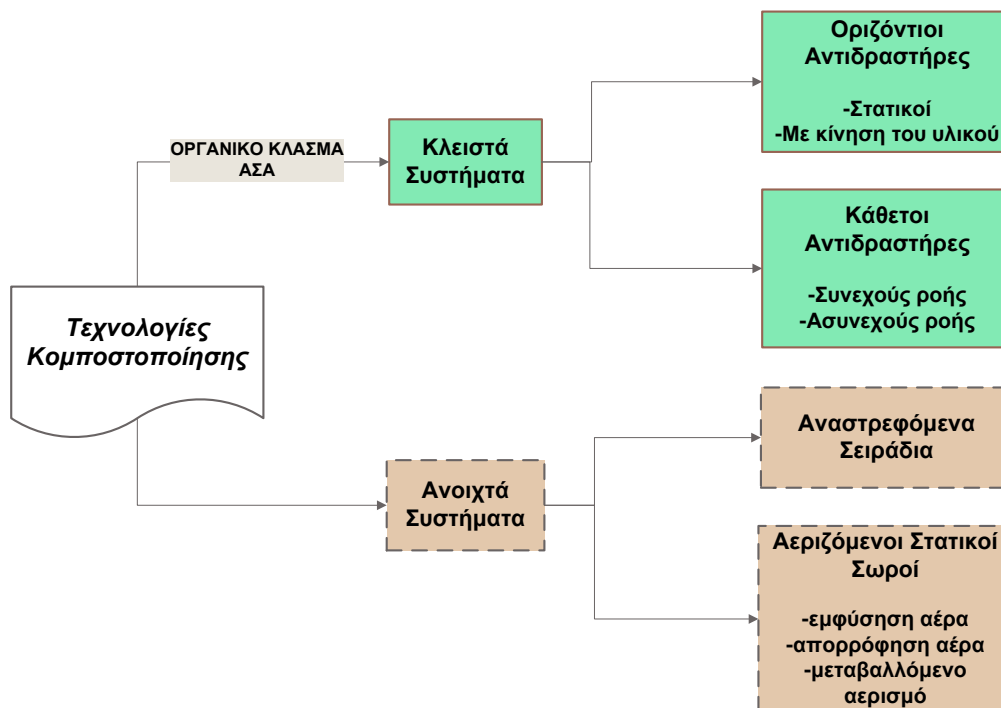
Η αναλογία άνθρακα προς άζωτο (C/N) είναι μια από τις σημαντικότερες τροφικές παραμέτρους. Η καλύτερη βιοσταθεροποίηση γίνεται όταν ο λόγος C/N κυμαίνεται από 20:1 έως 40:1 κατά βάρος (Francou, 2008; ITA, 2007) με βέλτιστη τιμή λόγου περίπου 30:1 (Komilis & Ham, 2006). Σημαντικό ρόλο στην διατήρηση του λόγου C/N διαδραματίζει το βοηθητικό υλικό της κομποστοποίησης. Βοηθητικά υλικά πλούσια σε C, όπως απορρίμματα κήπου, κλαδέματα, πριονίδια ξύλου, χαρτί κλπ, προστίθενται σε απορρίμματα με χαμηλό λόγο C/N, ενώ σε απορρίμματα με υψηλό λόγο C/N ενδείκνυται η προσθήκη ιλύος από εγκαταστάσεις καθαρισμού λυμάτων, η οποία έχει λόγο C/N περίπου ίσο με 10. Το τελικό προϊόν (κομπόστ) πρέπει να ελέγχεται ώστε ο λόγος C/N να μην είναι μεγαλύτερος από 30:1 γιατί σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος κατά την εφαρμογή του κομπόστ στο έδαφος, να συνεχιστεί η αποδόμηση της οργανικής ουσίας από τους εμπεριεχόμενους μικροοργανισμούς, οι οποίοι θα απορροφήσουν ακόμη και από το έδαφος το άζωτο – πολύτιμο στοιχείο ως λίπασμα – για την κυτταρική τους ανάπτυξη.

Υγρασία μείγματος οργανικών απορριμμάτων

Η περιεχόμενη στα οργανικά απορρίμματα υγρασία συμβάλει σε δύο άλλες βασικές για την διεργασία της αποικοδόμησης παραμέτρους, την παροχή αέρα και την επάρκεια οξυγόνου. Η αυξημένη υγρασία παρεμποδίζει την παροχή αέρα και μειώνει την μεταφορά οξυγόνου δημιουργώντας αναερόβιες συνθήκες, οι οποίες με την σειρά τους οδηγούν στην ενεργοποίηση αναερόβιου μεταβολισμού και την παραγωγή ανεπιθύμητων οσμών και άλλων υποπροϊόντων, όπως το μεθάνιο (Nguyen Thanh Phong, 2012). Η βέλτιστη υγρασία εξαρτάται από τη σύσταση του, το μέγεθος των σωματιδίων, από την αερισμό και από τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται. Ανάλογα την τεχνολογία κομποστοποίησης που ακολουθείται υπάρχει και βέλτιστο εύρος υγρασίας.

2.1.3 Συστήματα και Τεχνολογίες κομποστοποίησης

Τα συστήματα κομποστοποίησης ταξινομούνται σε ανοιχτά και κλειστά. Τα ανοιχτά πραγματοποιούνται στην ύπαιθρο ή σε ημίκλειστα κτίρια ενώ τα κλειστά σε ειδικά σχεδιασμένους βιοαντιδραστήρες ή σε κλειστά κτίρια. Τα ανοιχτά διαχειρίζονται κατά κύριο λόγο πράσινα απορρίμματα σε αντίθεση με τα κλειστά, τα οποία παρουσιάζουν ευελιξία στο είδος και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του εισερχόμενου οργανικού υποστρώματος. Όταν πρόκειται για το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ, στο οποίο εμπεριέχονται και ζωικά απόβλητα, η κομποστοποίηση υποχρεούται από την Ευρωπαϊκή Νομοθεσία (ΕΚ/749/2011, ΕΚ/1069/2009, ΕΚ/142/2011) να πραγματοποιείται σε κλειστό σύστημα για περιβαλλοντικούς λόγους και λόγους υγιεινής. Με τα κλειστά συστήματα αφενός μεν αποφεύγεται η προσέλκυση πτηνών, τρωκτικών και εντόμων, αφετέρου δε είναι εφικτή η απαγωγή και η επεξεργασία του αέρα και των οσμών, οι οποίες αποτελούν σημαντικό πρόβλημα, ειδικά όταν είναι εγκατεστημένες κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Επίσης απαιτούν ακριβές τεχνολογίες υψηλού επιπέδου για τον έλεγχο των παραμέτρων της κομποστοποίησης.



Σχήμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση των συστημάτων κομποστοποίησης

Στα κλειστά συστήματα το οργανικό υπόστρωμα των ΑΣΑ τοποθετείται μέσα στον αντιδραστήρα υπό έλεγχο θερμοκρασίας και αερισμού. Περιλαμβάνουν συστήματα ρύθμισης αναλογίας του αέρα που ανακυκλώνεται προς το φρέσκο αέρα που εισέρχεται στο σύστημα, καθώς και της ροής του αέρα μέσα από το υλικό. Συνήθως είναι συστήματα συνεχούς ροής αλλά έχουν παρουσιαστεί και ασυνεχούς ροής. Η

μέθοδος των κλειστών, αν και πολυπλοκότερη από την αντίστοιχη των ανοιχτών, παράγει ελάχιστες οσμές ή/και καθόλου στραγγίσματα. Στα κλειστά συστήματα συναντώνται : τούνελ, κιβώτια, βιοκελιά, δεξαμενές, τράπεζες και περιστρεφόμενοι κύλινδροι.

Σε κεντρικές μονάδες κομποστοποίησης μικρής δυναμικότητας συνήθως εφαρμόζεται κομποστοποίηση σε βιοκελιά ή κιβώτια. Τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι μόνιμες κατασκευές, μεταλλικές ή από μπετόν, αλλά μπορεί να είναι και προσωρινές κατασκευές, με κινούμενη είσοδο από μπετό ή άλλα υλικά. Το βασικό τους χαρακτηριστικό είναι ότι χρησιμοποιούν δυναμικό αερισμό, συνήθως με εμφύσηση αέρα, μέσα από το πάτωμα της κατασκευής, με κανάλια ή σωλήνες, ενώ τα απαέρια απομακρύνονται συνήθως από το πάνω μέρος των κελιών. Ο αέρας ανακυκλώνεται εύκολα, επιτυγχάνοντας ομοιόμορφες και καλά ελεγχόμενες θερμοκρασίες σε όλη τη μάζα του οργανικού υλικού, ενώ μπορεί να υποστεί επεξεργασία κατά την έξοδο του, για την απομάκρυνση των οσμών και άλλων ρύπων με τη χρήση βιοφίλτρων.



Σχήμα 2.3. Κιβώτια και βιοκελιά κομποστοποίησης
(<http://www.compostsystems.com/systems/cv-composter>)

Η απαιτούμενη χρήση γης της κομποστοποίησης σε βιοκελιά εξαρτάται από την δυναμικότητα της μονάδας. Σύμφωνα με (Golder Associates Ltd 2009) απαιτείται έκταση γης $0.40-0.80m^2$ ανά ετήσια εισερχόμενη ποσότητα απορριμμάτων που η μονάδα διαχειρίζεται. Λαμβάνοντας υπόψη τον απαραίτητο χώρο για τα στάδια της προεπεξεργασίας και της αποθήκευσης του τελικού προϊόντος η συνολική απαιτούμενη έκταση φτάνει τα $200m^2$ ανά τόνο απορριμμάτων την ημέρα (Short, 2005).

2.2 Εισαγωγή στην τεχνολογία της Αναερόβιας Χώνευσης

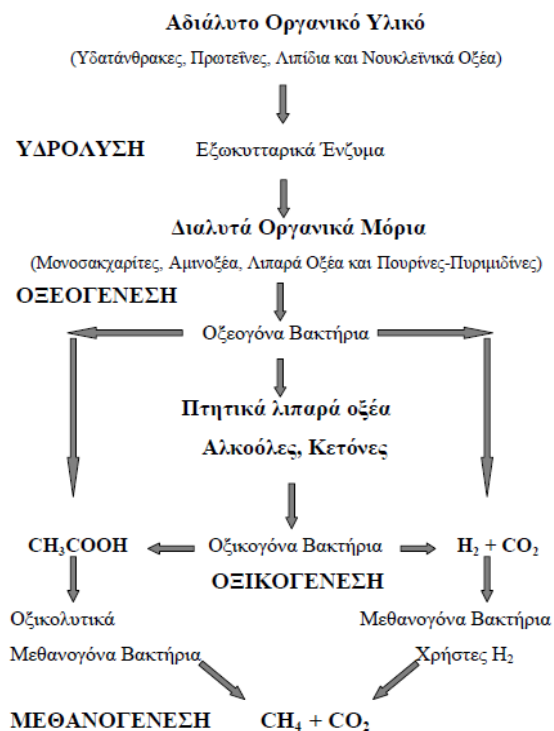
2.2.1 Ορισμός & Διεργασία Αναερόβιας Χώνευσης

Η Αναερόβια Χώνευση είναι μια βιοχημική διεργασία κατά τη διάρκεια της οποίας σύνθετα οργανικά στοιχεία αποσυντίθενται απουσία οξυγόνου, από διάφορους τύπους αναερόβιων μικροοργανισμών. Σε μία εγκατάσταση βιοαερίου, το αποτέλεσμα της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι το βιοαέριο, αέριο καύσιμο μίγμα διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και μεθανίου (CH_4), και η χωνεμένη ιλύς, το αποσυντιθέμενο υπόστρωμα της χώνευσης, πλούσιο σε άζωτο.

Κατά τη διάρκεια της αναερόβιας χώνευσης, παράγεται πολύ λίγη θερμότητα σε αντίθεση με την κομποστοποίηση. Η ενέργεια, που είναι χημικά δεσμευμένη μέσα στο υπόστρωμα, παραμένει κυρίως στο παραγόμενο βιοαέριο με τη μορφή μεθανίου. Η διεργασία σχηματισμού του βιοαερίου είναι ένα αποτέλεσμα συνδυαστικών βημάτων, στα οποία το αρχικό υλικό συνεχώς διασπάται σε μικρότερα στοιχεία. Ειδικές ομάδες μικροοργανισμών εμπλέκονται σε καθένα από τα μεμονωμένα βήματα. Αυτοί οι οργανισμοί αποσυνθέτουν διαδοχικά τα προϊόντα των προηγούμενων βημάτων. Ένα απλουστευμένο διάγραμμα της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4, όπου διακρίνονται τα τέσσερα κύρια στάδια της διεργασίας: η υδρόλυση, η οξεογένεση, η οξικογένεση, και η μεθανογένεση (Al Seadi, 2010). Τα στάδια της διεργασίας που αναφέρονται στο Σχήμα λαμβάνουν χώρα παράλληλα στο

χώρο και το χρόνο, στη δεξαμενή χώνευσης. Η παραγωγή βιοαερίου φθάνει στην αιχμή της κατά την μεθανογένεση.

Κατά το πρώτο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης, λαμβάνει μέρος η υδρόλυση κατά την οποία αποσυντίθενται τα οργανικά πολυμερή σε μικρότερα στοιχεία, μονό ή ολιγομερή, από μια ποικιλία υδρολυτικών μικροοργανισμών (Yebo Li, 2011). Τα προϊόντα της υδρόλυσης μετατρέπονται εν συνεχεία από οξεογενή βακτηρίδια σε μεθανογενή υποστρώματα κατά τη φάση της οξεογένεσης. Κατά τη διάρκεια της οξικογένεσης τα πτητικά λιπαρά οξέα και οι αλκοόλες οξειδώνονται σε μεθανογενή υποστρώματα, όπως οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Κατά τη διάρκεια της μεθανογένεσης, το υδρογόνο μετατρέπεται σε μεθάνιο. Το 70% του διαμορφωμένου μεθανίου προέρχεται από οξικό άλας, ενώ το υπόλοιπο 30% παράγεται από τη μετατροπή του υδρογόνου και του CO₂. Η οξικογένεση και η μεθανογένεση συνήθως λαμβάνουν χώρα παράλληλα, ως συμβίωση δύο ομάδων οργανισμών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4. Τα κύρια βήματα της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης (Κάλφας, 2007)

Η παραγωγή του μεθανίου και του διοξειδίου του άνθρακα από ενδιάμεσα προϊόντα πραγματοποιείται από τα μεθανογενή βακτήρια. Η μεθανογένεση είναι ένα κρίσιμο βήμα σε ολόκληρη τη διεργασία της χώνευσης, δεδομένου ότι είναι η πιο αργή βιοχημική αντίδραση της διεργασίας. Η μεθανογένεση επηρεάζεται από τις συνθήκες λειτουργίας (σύνθεση της πρώτης ύλης, ρυθμός τροφοδοσίας, θερμοκρασία, pH).

Ανασταλτικοί παράγοντες για την παραγωγή μεθανίου αποτελούν η υπερπλήρωση του χωνευτή, οι αλλαγές θερμοκρασίας και η παρουσία οξυγόνου. Τα βακτήρια μεθανίου είναι δύσκολοι αναερόβιοι οργανισμοί, οπότε πρέπει να αποφεύγεται αυστηρά η παρουσία οξυγόνου στη διεργασία της χώνευσης (Al Seadi, 2010).

Υποστρώματα Αναερόβιας Χώνευσης

Ένα ευρύ φάσμα βιομάζας δύναται να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα, δηλαδή πρώτη ύλη, για την παραγωγή βιοαερίου με πιο κοινές κατηγορίες πρώτης ύλης που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή βιοαερίου στην Ευρώπη να είναι η στερεή και υδαρής κοπριά, τα γεωργικά υπολείμματα και υποπροϊόντα, τα οργανικά απόβλητα που μπορούν να υποστούν χώνευση από βιομηχανίες τροφίμων και αγροτοβιομηχανίες (φυτικής και ζωικής προέλευσης), η λυματολάσπη και οι ενεργειακές καλλιέργειες, όπως αραβόσιτος, μίσχανθος, σόργος, τριφύλλι.

Παρατηρείται πως, σε κεντρικές μονάδες συγχώνευσης χρησιμοποιούνται το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ και των υπολειμμάτων εστίασης ως δεύτερο υπόστρωμα (φυτικής και ζωικής προέλευσης) καθώς οδηγούν σε αύξηση του παραγόμενου βιοαερίου. Στη Ισπανία, στη Γερμανία, στην Ελβετία, στη Δανία, στη Σουηδία, στην Αυστρία, στην Ιταλία και στο Βέλγιο λειτουργούν τέτοιες μονάδες με μεγάλη επιτυχία (Ecoparc 2/Montcada – Vallogra, Spain), (Brecht II Dranco, Belgium), (Biowaste AD plant Vienna, Austria).

2.2.2 Παράμετροι απόδοσης και λειτουργίας

Η αποδοτικότητα της αναερόβιας χώνευσης εξαρτάται από μερικές κρίσιμες παραμέτρους, οι οποίες επηρεάζουν την ανάπτυξη και την δραστηριότητα των αναερόβιων μικροοργανισμών, όπως:

- ο η απουσία οξυγόνου, η θερμοκρασία, η τιμή του pH, ο ανεφοδιασμός με θρεπτικές ουσίες και ιχνοστοιχεία, η ένταση της ανάδευσης, τα πτητικά λιπαρά οξέα καθώς και η παρουσία και η ποσότητα ανασταλτικών παραγόντων (π.χ. αμμωνία).

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης και την επιλογή του όγκου του χωνευτήρα είναι:

- ο Το Οργανικό φορτίο, το οποίο δείχνει πόση οργανική ξηρή ουσία μπορεί να τροφοδοτηθεί στον χωνευτήρα ανά m^3 και μονάδα χρόνου
- ο Υδραυλικός Χρόνος Παραμονής (ΥΧΠ), ο οποίος είναι το μέσο χρονικό διάστημα κατά το οποίο διατηρείται το υπόστρωμα μέσα στη δεξαμενή του

χωνευτή. Ο ΥΧΠ σχετίζεται με τον όγκο του χωνευτή, και τον όγκο του υποστρώματος που τροφοδοτείται στη μονάδα του χρόνου.

Η κατασκευή των μονάδων βιοαερίου απαιτεί ένα συνδυασμό οικονομικών και τεχνικών εκτιμήσεων. Η μέγιστη παραγωγή βιοαερίου που λαμβάνεται από την πλήρη χώνευση του υποστρώματος θα απαιτούσε ένα μεγάλο υδραυλικό χρόνο παραμονής (ΥΧΠ) και ένα αντίστοιχο μέγεθος χωνευτή. Στην πράξη, η επιλογή του συστήματος (π.χ. το μέγεθος και ο τύπος του χωνευτή) βασίζεται σε έναν συμβιβασμό μεταξύ της μέγιστης παραγωγής βιοαερίου και της οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας. Ο χρόνος παραμονής πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος για να εξασφαλιστεί ότι η ποσότητα των βακτηρίων που αφαιρείται με το χωνεμένο υπόλειμμα δεν θα είναι υψηλότερη από την ποσότητα των αναπαραγόμενων βακτηρίων (π.χ. ο ρυθμός διπλασιασμού των αναερόβιων βακτηρίων είναι 10 ημέρες ή περισσότερο). Ένας μικρός ΥΧΠ παρέχει μια καλή παροχή υποστρώματος αλλά χαμηλή παραγωγή αερίου. Είναι επομένως σημαντικό να προσαρμοστεί ο ΥΧΠ στο συγκεκριμένο ρυθμό αποσύνθεσης των χρησιμοποιούμενων υποστρωμάτων. Ξέροντας το επιθυμητό ΥΧΠ, την καθημερινή εισαγωγή πρώτης ύλης και τον ρυθμό αποσύνθεσης του υποστρώματος, είναι δυνατό να υπολογιστεί ο απαραίτητος όγκος του χωνευτή.

Συγχώνευση Οργανικού κλάσματος

Μια άλλη παράμετρος που επηρεάζει και την αποδοτικότητα αλλά και την λειτουργία της αναερόβιας χώνευσης είναι η συγχώνευση του προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος με άλλα είδη απορριμμάτων. Πρόκειται για μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική για την βελτίωση του παραγόμενου βιοαερίου, καθιστώντας το βιοαέριο πιο σταθερό και τα οργανικά απορρίμματα πιο εύκολα στην διαχείριση. Ωστόσο η συγχώνευση παρουσιάζει μερικά μειονεκτήματα, όπως επιπλέον εγκαταστάσεις προεπεξεργασίας, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη (Maşa Alvarez., 2002).

Στην βιβλιογραφία έχουν γίνει πολλές αναφορές για την συγχώνευση του προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος με άλλα ρεύματα οργανικών απορριμμάτων, όπως ενεργειακές καλλιέργειες (Pognani, 2009) λυματολάσπη (Stucki, 2011), απορρίμματα από εστιατόρια (Nayono) και κοπριά (Nielsen, 2008). Στη Ισπανία, στη Γερμανία, στην Ελβετία, στη Δανία, στη Σουηδία, στην Αυστρία, στην Ιταλία και στο Βέλγιο λειτουργούν τέτοιες μονάδες με μεγάλη επιτυχία (Västersterås, Sweden; Voghera, Italy)

2.2.3 Συστήματα και Τεχνολογίες Αναερόβιας Χώνευσης

Η αναερόβια χώνευση αποτελεί μια ευέλικτη τεχνολογία (Defra, 2011) εφαρμοσμένη σε πολλές χώρες, αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες (Bywater, 2011). Ο σχεδιασμός και η τεχνολογία των μονάδων βιοαερίου διαφέρουν από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, τα εθνικά πλαίσια (νομοθεσία και πολιτικές σε θέματα ενέργειας)

και την ενεργειακή διαθεσιμότητα. Σύμφωνα με το σχετικό τους μέγεθος, τη λειτουργία και θέση τους, υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες εγκαταστάσεων αναερόβιας χώνευσης:

- Οι μονάδες βιοαερίου οικογενειακής κλίμακας (μικρής κλίμακας)
- Οι μονάδες βιοαερίου κλίμακας αγροκτήματος (μεσαίας έως μεγάλης κλίμακας)
- Οι κεντρικές μονάδες βιοαερίου/κοινή συγχώνευση (μεσαίας έως μεγάλης κλίμακας).



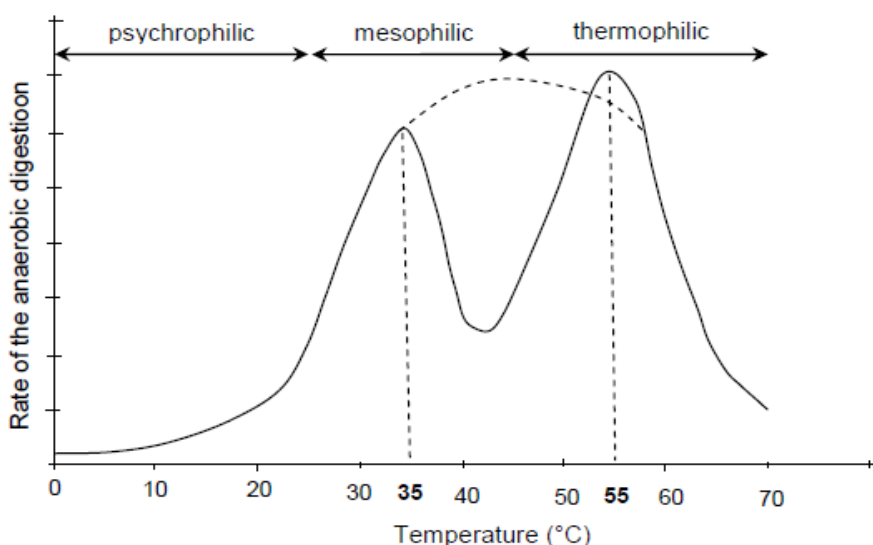
Σχήμα 2.5. Μονάδα βιοαερίου κλίμακας αγροκτήματος (Duggan Energy Brochure)

Πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν οδηγήσει στην αύξηση της εφαρμογής της ΑΧ ως μέθοδο διαχείρισης των οργανικών απορριμμάτων. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αναερόβια χώνευση, συμπεριλαμβανομένων του υποστρώματος, της θερμοκρασίας, της υγρασίας κλπ στον χωνευτήρα (Klähid, 2011) καθορίζουν και την τεχνολογία που ακολουθείται και έτσι μια μονάδα ΑΧ μπορεί να χαρακτηριστεί σε :

- Ξηρή ή Υγρή χώνευση. Η διαδικασία χαρακτηρίζεται ως ξηρή ή υψηλής συγκέντρωσης στερεών όταν η περιεχόμενη υγρασία του χωνευτήρα είναι λιγότερη από 75% ή τα περιεχόμενα στερεά κυμαίνονται μεταξύ 25-40%TS. Ομοίως η διαδικασία χαρακτηρίζεται ως υγρή ή χαμηλής συγκέντρωσης στερεών όταν η περιεχόμενη υγρασία του χωνευτήρα είναι λιγότερη από 90% ή τα περιεχόμενα στερεά είναι λιγότερα <10%TS. Η υγρασία του χωνευτήρα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την περιεχόμενη υγρασία των οργανικών απορριμμάτων. Όταν πρόκειται για το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ τότε συνήθως εφαρμόζεται η ξηρή αναερόβια χώνευση.
- Θερμόφιλη και μεσόφιλη αναερόβια χώνευση, κατά τις οποίες η χώνευση πραγματοποιείται στους ανάμεσα στους 50-60°C και 30-40°C αντίστοιχα. Οι μεσόφιλοι μικροοργανισμοί εμφανίζονται πιο ανθεκτικοί στις μεγάλες αλλαγές που πιθανόν να παρουσιαστούν στο περιβάλλον τους. Απαιτείται μεγαλύτερος υδραυλικός χρόνος παραμονής, ωστόσο η σταθερότητα της μεσόφιλης

διαδικασίας την καθιστά μια από τις πιο δημοφιλείς στις μονάδες αναερόβιας χώνευσης (Nayono, 2010).

Το κύριο πλεονέκτημα της θερμόφιλης έναντι της μεσόφιλης είναι η υψηλότερη παραγωγή μεθανίου καθώς και η μεγαλύτερη απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών από τα απορρίμματα. Ωστόσο είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις πιθανές αλλαγές του περιβάλλοντος (Maşa Alvarez, 2002). Μελέτη που συνέκρινε την απόδοση των δυο μεθόδων όταν διαχειρίζονται μηχανικώς διαχωριζόμενα ΑΣΑ (Cecchi, 1991) κατέληξε στο ότι η θερμόφιλη διαδικασία παρήγαγε 100% περισσότερο μεθάνιο και καλύτερη μείωση των πηκτικών στερεών (VS) σε σχέση με την μεσόφιλη.



Σχήμα 2.6. Συνάρτηση θερμοκρασίας και αναερόβιας χώνευσης. Βέλτιστη θερμοκρασία για θερμόφιλη διαδικασία 35°C και για μεσόφιλη 55°C (Maşa Alvarez, 2002)

Το κύριο μειονέκτημα της 2^{ης} έναντι της 1^{ης} είναι η απαίτηση σε ενέργεια για θέρμανση του αντιδραστήρα και διατήρηση της θερμοκρασίας σε επίπεδα των 55°C (Nayono, 2010), το οποίο αποτελεί και την κύρια τεχνολογική διαφορά των δύο διαδικασιών.

- Χώνευση ενός σταδίου/δύο σταδίων. Η αναερόβια χώνευση λαμβάνει χώρα σε δύο διαφορετικά μικροβιακά στάδια: οξικογένεση και μεθανογένεση, με διαφορετικές βέλτιστες συνθήκες. Η χώνευση, στην οποία πραγματοποιείται διαχωρισμός των δύο αυτών σταδίων, λειτουργεί με τουλάχιστον δύο αντιδραστήρες που λειτουργούν σε σειρά. Η μέθοδος αυτή οδηγεί στην αύξηση του παραγόμενου μεθανίου, ταυτόχρονα όμως απαιτεί πολυπλοκότερη τεχνολογία, με επιπλέον διαχωρισμό του χωνευτήρα σε υγρή και στερεή φάση. Σε αυτή την περίπτωση, το στερεό κλάσμα που εξέρχεται από την οξεογένεση

οδηγείται πίσω στον βασικό χωνευτήρα, ενώ το υγρό κλάσμα υπόκειται την φάση της μεθανογένεσης ξεχωριστά.



Σχήμα 2.7. Κάθετοι χωνευτήρες μεταλλικής κατασκευής για παραγωγή βιοαερίου αριστερά (ZORG), μονάδα αναερόβιας χώνευσης δεξιά (Autev Engineering A.E.)

Διάφορες τεχνολογίες έχουν εφαρμοστεί στην Ευρώπη τα τελευταία 20 χρόνια. Για την διαχείριση του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ διάφορες ευρωπαϊκές εταιρίες έχουν αναπτύξει τεχνολογίες όπως η Valorga, Kompogas, Dranco. Περισσότερες από 75 μονάδες κάνουν χρήση αυτών των τεχνολογιών και μάλιστα 24 από αυτές βρίσκονται σε λειτουργία πάνω από 10 χρόνια (Yebo Li, 2011). Η συγκέντρωση στερεών των χωνευτήρων κυμαίνονται μεταξύ 20% και 40% και είναι χωνευτήρες ενός σταδίου, με υψηλή συγκέντρωση στερεών και συναντώνται είτε σε μεσόφιλες είτε σε θερμόφιλες θερμοκρασίες (Yebo Li, 2011). Γνωστά συστήματα που λειτουργούν σε ένα στάδιο και με χαμηλή συγκέντρωση στερεών λειτουργούν οι μέθοδοι Wassa και BTA.

Περισσότερες από 4.000 μονάδες αναερόβιας χώνευσης λειτουργούν στην Ευρώπη, διαχειρίζοντας διαφορετικούς τύπους οργανικών απορριμμάτων (2.500 – 150.000 τόνους το χρόνο) (IEA, 2008; AEBIOM, 2010; RosRoca). Πολλές από αυτές πρόκειται για μονάδες συγχώνευσης. Ωστόσο, ανεξάρτητα από την τεχνολογία που η κάθε μονάδα χρησιμοποιεί η διαδικασία που ακολουθείται κατά πλειοψηφία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- i. Προεπεξεργασία των απορριμμάτων (κυρίως για την ξηρή αναερόβια χώνευση), που περιλαμβάνει άλεση, τεμαχισμό, κοσκίνισμα και ανάμιξη.
- ii. Χώνευση των οργανικών απορριμμάτων, που περιλαμβάνει την τροφοδοσία και την ανάμιξη τους στον χωνευτήρα.
- iii. Τέλος, διαχείριση της χωνεμένης ιλύος.

2.2.4 Τελική χρήση Βιοαερίου

Το βιοαέριο έχει πολλές ενεργειακές χρήσεις, ανάλογα με την τοπική ζήτηση για μια συγκεκριμένη μορφή ενέργειας. Οι κυριότερες χρήσεις του είναι οι εξής:

- i. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε λέβητες (boilers). Η θερμότητα που παράγεται έχει πολλές εφαρμογές, όπως για χρήση στην εγκατάσταση ή παραγωγή ατμού για βιομηχανικές χρήσεις. Οι λέβητες δεν έχουν υψηλές απαιτήσεις ποιότητας αερίου.
- ii. Οι μονάδες Συμπαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (ΣΗΘ) είναι ένας καλός τρόπος για να παράγεται αποδοτικά ηλεκτρισμός και θερμότητα για την εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης, καλύπτοντας τις ίδιες ηλεκτρικές και θερμικές ανάγκες της μονάδας. Το υπόλοιπο της ηλεκτρικής ενέργειας διαχέεται στο εθνικό δίκτυο και πωλείται σε εγγυημένη τιμή βάσει της ισχύουσας νομοθεσίας (3851/2010). Η πιο συνήθης εφαρμογή των μονάδων ΣΗΘ είναι οι θερμικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής τύπου συστοιχίας, με κινητήρες καύσης που συνδέονται με μια γεννήτρια. Οι κινητήρες μπορεί να είναι μηχανές έγχυσης τύπου Otto, Diesel ή πιλοτικές. Οι εναλλακτικές τεχνολογίες που είναι ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης είναι οι μικροί αεριοστρόβιλοι, οι μηχανές Stirling και οι κυψέλες καυσίμου.



Σχήμα 2.8. Μονάδα Συμπαγωγής (Biomass Energy; Zorg)

- iii. Το βιοαέριο επιπλέον μπορεί να αναβαθμιστεί για χρήση ως καύσιμο οχημάτων. Σε χώρες όπως η Σουηδία, η Ελβετία και η Γερμανία, η συγκεκριμένη διαδικασία εφαρμόζεται ευρέως με μεγάλη επιτυχία. Σε αυτές τις χώρες εγκαθίστανται δίκτυα σταθμών αναβάθμισης καυσίμου και πρατήρια καυσίμων (Al Seadi, 2010).
- iv. Μια σχετικά νέα εφαρμογή, είναι η αναβάθμιση και τροφοδότηση του βιοαερίου στο δίκτυο του φυσικού αερίου και οι πρώτες εγκαταστάσεις, στη Γερμανία και την Αυστρία, τροφοδοτούν με βιομεθάνιο τα δίκτυα του φυσικού αερίου (Al Seadi, 2010)



Σχήμα 2.9. Αναβάθμιση βιοαερίου σε βιομεθάνιο και έγχυση στο δίκτυο ΦΑ (Biomass Energy)

Ωστόσο, οι απαιτήσεις ποιότητας του αερίου, για τη χρήση είτε ως καύσιμο είτε για την έγχυση του στο δίκτυο του φυσικού, αερίου είναι υψηλές. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι η περιεκτικότητα σε μεθάνιο θα πρέπει να αυξηθεί σε 95% και το αέριο θα πρέπει να συμπιεστεί. Το αναβαθμισμένο βιοαέριο θεωρείται ένα από τα καθαρότερα καύσιμα με ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Παρά το γεγονός ότι οι εργασίες αυτές μπορεί να συνεπάγονται υψηλό κόστος, υπάρχουν πολλά παραδείγματα συστημάτων σε όλη την Ευρώπη όπου το βιοαέριο αναβαθμίζεται σε εμπορική βάση.



Σχήμα 2.10. Αναβάθμιση βιοαερίου σε βιομεθάνιο (MT Biomethan)

2.3 Σύγκριση των δύο μεθόδων

Η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση προτείνονται ως μέθοδοι αξιοποίησης των οργανικών απορριμμάτων ΑΣΑ, με πολλά περιβαλλοντικά και ταυτόχρονα, κοινωνικό-οικονομικά οφέλη τόσο για την κοινωνία ως σύνολο όσο και για τον αγροτικό τομέα:

- i. Τα περιβαλλοντικά οφέλη είναι πολλαπλά καθώς και οι δύο μέθοδοι συμβάλλουν στην υλοποίηση των στόχων που έχει θέσει η ΕΕ για την ενέργεια και την προστασία του περιβάλλοντος με δύο βασικούς μηχανισμούς: την εκτροπή των οργανικών απορριμμάτων από τους ΧΥΤΑ μέσω της αειφόρου διαχείρισης των αποβλήτων και την ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (ΑτΘ).



Σχήμα 2.11. Υφιστάμενη κατάσταση στην διαχείριση απορριμμάτων (Πηγή: διαδίκτυο)

- ii. Τα κοινωνικό-οικονομικά οφέλη εντοπίζονται, αφενός μεν στην δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, ενισχύοντας τις τοπικές κοινωνίες και αυξάνοντας την αγοραστική δύναμη, αφετέρου δε, στην βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, καθώς συμβάλλουν στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη.

Η αγροτική οικονομία ωφελείται από την εφαρμογή του κομπόστ. Πρόκειται για ένα πολύτιμο εδαφοβελτιωτικό, πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί στα εδάφη συνεισφέροντας στην βελτίωση και στην αύξηση της παραγωγής καθώς και της ποιότητας του τελικού προϊόντος.



Σχήμα 2.12. Τελική χρήση του κομπόστ (Defra 2010)

Επιπλέον, ενισχύει και οικονομικά τους εμπλεκόμενους γεωργούς οι οποίοι, πωλώντας τα γεωργικά υπολείμματα τους, είτε ως πρόσθετα κομποστοποίησης είτε ως δεύτερο υπόστρωμα – σε περίπτωση όπου εφαρμόζεται «συγχώνευση αναερόβιας χώνευσης» των οργανικών απορριμμάτων ΑΣΑ με υπολείμματα αγροτικών εργασιών – αποκτούν ένα επιπλέον εισόδημα.

Ωστόσο οι δύο μέθοδοι διαφέρουν σημαντικά, τόσο σε σχέση με την χρήση των τελικών προϊόντων, όσο και με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Πιο συγκεκριμένα:

- ο Το κομπόστ ως εδαφοβελτιωτικό μειώνει την ανάγκη για χημικά λιπάσματα (Favoino & Hogg 2008; Lou, Nair 2009). Επιπλέον, η εφαρμογή του επιτρέπει την γρηγορότερη ανάπτυξη των φυτών και κατά αυτό τον τρόπο αυξάνει την απορρόφηση και αποθήκευση του άνθρακα εντός των φυτών. Μελέτες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή του κομπόστ αυξάνει την βιομάζα των φυτών, διαδικασία που αποτελεί τη φόρμα παραγωγής του άνθρακα, η οποία αφαιρεί CO₂ από την ατμόσφαιρα (Lou, Nair 2009, Gonzalez & Cooperband, 2002; Lynch et al 2005).

Αντίθετα, το κύριο πλεονέκτημα της παραγωγής βιοαερίου είναι η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από τα απόβλητα, καθώς η αξιοποίηση του βιοαερίου αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Εκμεταλλεύεται τη βιομάζα και μάλιστα, τις περισσότερες φορές την υπολειμματική βιομάζα, και προσφέρει τεράστια περιβαλλοντικά οφέλη σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα καθώς το βιοαέριο

προέρχεται από την αναερόβια χώνευση της βιομάζας, η οποία είναι η έμβια αποθήκη της ηλιακής ενέργειας μέσω της φωτοσύνθεσης.



Σχήμα 2.13. Τελικό κομπόστ (biodeposit; Claudio Calcajno από fotolia.com)

Το βιοαέριο συμβάλλει σημαντικά στη διατήρηση των φυσικών πόρων και στην προστασία του περιβάλλοντος. Σημαντικό πλεονέκτημα των μονάδων ΣΗΘ αποτελεί η χρήση της πλεονάζουσας θερμικής ενέργειας, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές διεργασίες και αγροτικές δραστηριότητες της γύρω περιοχής, καθώς και για τη θέρμανση κτιρίων και νοικοκυριών με σύστημα τηλεθέρμανσης. Το βιομεθάνιο, το οποίο προκύπτει από την αναβάθμιση του βιοαερίου, αποτελεί ένα από τα λίγα ανανεώσιμα καύσιμα κατάλληλα ώστε να μειωθεί η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Οι εισροές και οι εκροές της αναερόβιας τεχνολογίας είναι ευέλικτες με την έννοια ότι η εκάστοτε μονάδα σχεδιάζεται για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της τοπικής κοινωνίας, ενώ ταυτόχρονα παραμένει συνδεδεμένο με το εθνικό δίκτυο ηλεκτρισμού (Defra, 2010) καθώς παρέχουν την δυνατότητα επέκτασης της δυναμικότητάς τους.



Σχήμα 2.14. Μονάδα αναερόβιας χώνευσης (Ληθαίος Ενεργειακή Α.Ε.)

- ο Οι διαφορές στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους εντοπίζονται στις απαιτήσεις σε έκταση, σε ενέργεια, στην πολυπλοκότητα της τεχνολογίας, στην ευελιξία της μονάδας καθώς και στο κόστος παραγωγής καθώς και στην περιοχή εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της φύσης του τελικού προϊόντος, μια μονάδα κομποστοποίησης εφαρμόζεται σε αγροτικές και ημιαστικές περιοχές, στις οποίες μπορεί να γίνει απορρόφηση του κομπόστ από την αγορά. Αντίθετα μια μονάδα αναερόβιας χώνευσης δεν εφαρμόζεται σε περιοχές με μικρή δυναμικότητα προκειμένου να έχει ικανοποιητική παραγωγή βιοαερίου και άρα ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 2.1. Σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών κομποστοποίησης και αναερόβιας χώνευσης.

Τεχνικά χαρακτηριστικά	Κομποστοποίηση (κλειστό σύστημα)	Αναερόβια χώνευση
Απαιτήσεις σε έκταση	+++	++
Απαιτήσεις σε ενέργεια	++	+++
Ευελιξία μονάδας	++	+++
Πολυπλοκότητα τεχνολογίας	++	+++
Κόστος αρχικής επένδυσης	++	+++

++: μεσαία απαίτηση

+++ : υψηλή απαίτηση

Οι δύο μέθοδοι αξιοποίησης, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην διαχείριση των οργανικών ΑΣΑ. Ωστόσο για την επιλογή της περιβαλλοντικά πιο ωφέλιμης απαιτείται η διεξαγωγή ανάλυσης κύκλου ζωής των δύο μεθόδων και σύγκριση τους βάσει των ορίων τους συστήματος, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στα κεφάλαια 5 & 6, που ακολουθούν. Επιπλέον, για μια πιο ολοκληρωμένη συγκριτική ανάλυση απαιτείται και τεχνοοικονομική προσέγγιση για την βιωσιμότητα της κάθε μεθόδου. Εισαγωγή στην τεχνοοικονομική ανάλυση παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 7.

Κεφάλαιο 3^ο

Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ)

3.1 Ορισμός ανάλυσης κύκλου ζωής

Η Ανάλυση κύκλου ζωής αποτελεί μια τεχνική δημιουργίας ενός μοντέλου προσομοίωσης δραστηριοτήτων και διεργασιών, αλληλοεξαρτώμενων μεταξύ τους, προκειμένου να αναγνωριστούν, καταγραφούν και τέλος να εξεταστούν οι περιβαλλοντικές πτυχές και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος από την απόκτηση της πρώτης ύλης μέσω της παραγωγής, χρήσης μέχρι την επεξεργασία και την τελική διάθεση του (τέλος ζωής) (ISO 14040, 2006).

Η ανάλυση κύκλου ζωής αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια:

- Τον προσδιορισμό του στόχου και του σκοπού
- Την καταγραφή και ανάλυση των δεδομένων για το σύστημα
- Την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την λειτουργία του συστήματος
- Την εκτίμηση των βελτιώσεων του συστήματος

3.2 Καθορισμός Σκοπού και Στόχου της Μελέτης

Ο βασικός σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να κατανοηθεί το σύστημα διαχείρισης και τα όρια αυτού με στόχο να εκτιμηθούν οι συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις τόσο της βιομηχανικής αερόβιας επεξεργασίας (κομποστοποίησης) όσο και της αναερόβιας χώνευσης του προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος ΑΣΑ και να πραγματοποιηθεί συγκριτική ανάλυση των δυο μεθόδων βάσει των ορίων συστήματος.

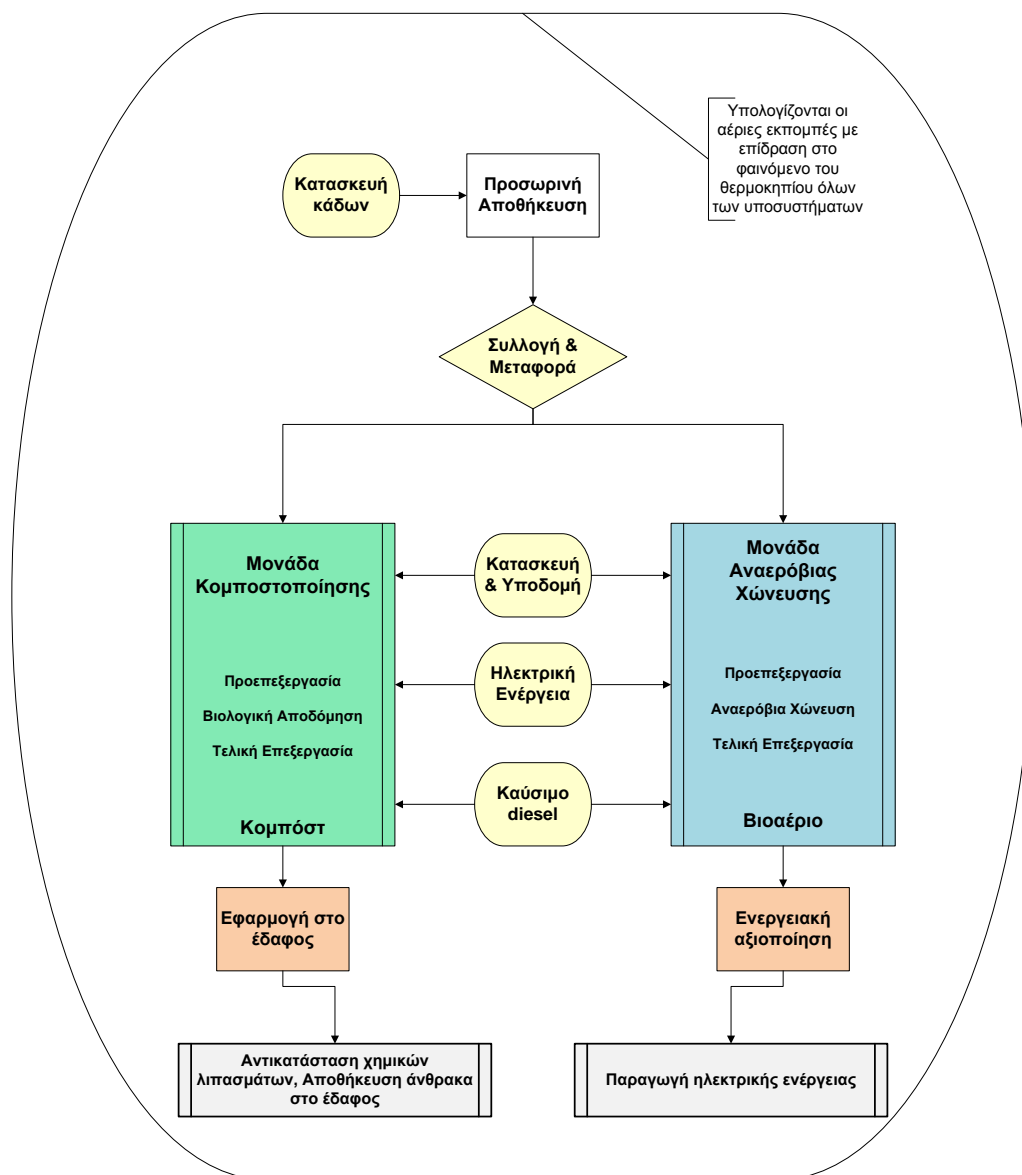
Στο στάδιο του καθορισμού σκοπού και στόχου της μελέτης παρέχεται περιγραφή του υπό εξέταση συστήματος, η οποία πρέπει να είναι σαφώς καθορισμένη και να περιλαμβάνει τις εξής τεχνικές λεπτομέρειες (ISO 14040, 2006):

- Τη βασική/λειτουργική μονάδα, βάσει της οποίας συνδέονται οι εισροές και οι εκροές του συστήματος.
- Τα όρια του συστήματος
- Την κατηγορία επίπτωσης.

3.2.1. Λειτουργική μονάδα & Όρια συστήματος

Η λειτουργική μονάδα είναι μια σημαντική παράμετρος που επιτρέπει τη συγκριτική ανάλυση μεταξύ των διαφορετικών διεργασιών που εξετάζονται. Πρόκειται δηλαδή, για μια ποσοτική περιγραφή των υπό εξέταση συστημάτων. Στην παρούσα μελέτη η βασική μονάδα είναι 1 Mg ΑΣΑ καθώς εξετάζεται ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης των απορριμμάτων με ΔσΠ.

Η παρούσα διπλωματική μελετά τον κύκλο ζωής των οργανικών απορριμμάτων ΑΣΑ για τις μεθόδους της κομποστοποίησης και της αναερόβιας χώνευσης. Όταν πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση δύο μεθόδων διαχείρισης είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τα ίδια όρια συστήματος, τα οποία θα πρέπει απαραίτητως να περιλαμβάνουν τις διεργασίες από την τελική χρήση των προϊόντων. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ορθή σύγκριση των δύο μεθόδων λοιπόν, πρέπει στα δύο συστήματα να αποδοθούν οι λεγόμενες «αποφευχθείσες διεργασίες» οι οποίες προέρχονται από την τελική χρήση των παραγόμενων προϊόντων. Τα όρια συστήματος της ανάλυσης κύκλου ζωής επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα εξαγόμενα αποτελέσματα και ως εκ τούτου και τα συνακόλουθα συμπεράσματα της ανάλυσης. Είναι πολύ σημαντικό να έχουν καθορισθεί εξαρχής και επακριβώς.



Σχήμα 3.1. Σχηματική απεικόνιση των ορίων των συστημάτων Κομποστοποίησης και Αναερόβιας Χώνευσης

Στο Σχήμα 3.1 περιγράφονται τα όρια του συστήματος και για τις δύο μεθόδους αξιοποίησης του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ, στα όποια περιλαμβάνονται:

- i. Η προσωρινή αποθήκευση του οργανικού κλάσματος που περιλαμβάνει την κατασκευή των απαραίτητων κάδων για την εφαρμογή του προγράμματος διαλογής στην πηγή.
- ii. Η συλλογή του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ από τους κάδους και η μεταφορά του στην αντίστοιχη μονάδα βιολογικής επεξεργασίας (κομποστοποίηση ή αναερόβια χώνευση).
- iii. Η πρωτογενής ενέργεια και οι πρώτες ύλες για την κατασκευή της εκάστοτε μονάδας καθώς και για τον εξοπλισμό της με τα απαραίτητα μηχανήματα.
- iv. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμου diesel για τις επιμέρους εργασίες της μονάδας.
- v. Χρήση του τελικού προϊόντος, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η μεταφορά αυτού στον τελικό υποδοχέα.
- vi. Η φάση της αερόβιας και αναερόβιας αποδόμησης της οργανικής ύλης

Αξίζει να σημειωθεί και να τονισθεί πως η παρούσα κατάσταση στη διαχείριση των οργανικών απορριμμάτων, η διάθεση δηλαδή σε ΧΥΤΑ και ΧΑΔΑ, δεν λαμβάνεται υπόψη στη συγκριτική ανάλυση, καθώς σκοπός είναι να βρεθεί η καταλληλότερη μέθοδος αξιοποίησης μεταξύ της αερόβιας και αναερόβιας επεξεργασίας.

3.2.2 Επίδραση στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που μελετά η ΑΚΖ σχετίζονται με την υγεία του ανθρώπου, την χρήση των πόρων και τις οικολογικές συνέπειες. Η κατηγορία επίδρασης που εξετάζεται είναι η κλιματική αλλαγή μέσω της εκτροπής του φαινομένου του θερμοκηπίου. Επομένως, υπολογίζονται οι αέριες εκπομπές με επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (αλλιώς αέρια του θερμοκηπίου – ΑτΘ) κατά τη διάρκεια όλων των επιμέρους σταδίων που περιγράφονται στα όρια του συστήματος. Για τον υπολογισμό του συνολικού δυναμικού όξυνσης του φαινομένου του θερμοκηπίου (ΦτΘ) ελήφθησαν υπόψη τα εξής αέρια: το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , το μεθάνιο CH_4 , το υποξείδιο του αζώτου N_2O . Η χρονική περίοδος αναφοράς είναι τα 100 έτη και οι συντελεστές δυναμικού των αερίων είναι σύμφωνοι με τις κατευθυντήριες γραμμές του (IPCC, 2006) :

- o CO_2 : 1 kg CO_2 eq./kg αερίου,
- o CH_4 : 21 kg CO_2 eq./kg αερίου,

- ο N_2O : 310 kg CO_2 eq./kg αερίου.

Η μεθοδολογία των υπολογισμών των εκπομπών του φαινομένου του θερμοκηπίου, εκφρασμένες σε ισοδύναμες εκπομπές CO_2 ανά τόνο ΑΣΑ (kg CO_2 eq/Mg ΑΣΑ), βασίζεται στην ακόλουθη διάκριση (Gentil 2009, EpE 2010) :

- ο Άμεσες Εκπομπές. Πρόκειται για εκπομπές άμεσα συνδεδεμένες με δραστηριότητες που πραγματοποιούνται απευθείας στο σύστημα οι οποίες διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει εκπομπές μη βιογενείς, που σχετίζονται με την καύση καυσίμου και η δεύτερη με βιογενείς εκπομπές κατά την αερόβια και αναερόβια αποδόμηση του οργανικού υποστρώματος οι οποίες διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα. Οι βιογενείς εκπομπές που συνυπολογίζονται είναι οι εκπομπές μεθανίου και υποξειδίου του αζώτου. Πρέπει να τονισθεί πως οι βιογενείς εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά την φάση της αποδόμησης, θεωρούνται ουδέτερες και δε λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς. (Eggleston 2006).
- ο Έμμεσες Εκπομπές. Πρόκειται για εκπομπές συνδεδεμένες με δραστηριότητες που πραγματοποιούνται εκτός του συστήματος, ωστόσο το τελικό προϊόν αυτών αποδίδεται στο εξεταζόμενο σύστημα. Περιλαμβάνονται εκπομπές μη βιογενείς που σχετίζονται με την παροχή ενέργειας και πρώτων υλών.
- ο Αποφευχθείσες ή Εκπομπές Εξοικονόμησης. Πρόκειται για εκπομπές συνδεδεμένες με δραστηριότητες και προϊόντα που είτε εξοικονομούνται είτε αποφεύγονται από την λειτουργία του συστήματος. Ουσιαστικά περιλαμβάνονται στις έμμεσες εκπομπές ωστόσο, επειδή επιδρούν θετικά στο συνολικό σύστημα και άρα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου κατατάσσονται ξεχωριστά.

Στον Πίνακα 3.1 κατατάσσονται οι επιμέρους διεργασίες που απεικονίζονται στα όρια του συστήματος με βάση τον παραπάνω διαχωρισμό.

Πίνακας 3.1. Κατάταξη επιμέρους διεργασιών βάσει του διαχωρισμού των εκπομπών

Διεργασία	
Άμεσες Εκπομπές	Συλλογή και μεταφορά οργανικού κλάσματος
	Διαφυγές βιογενών εκπομπών κατά την αερόβια και αναερόβια αποδόμηση του οργανικού υποστρώματος
	Απευθείας καύση καυσίμου για διεργασίες εντός της μονάδας

<p>Έμμεσες Εκπομπές</p>	<p>Κατασκευή κάδων για το σύστημα συλλογής Κατασκευή & υποδομή της μονάδας Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας</p>
<p>Εκπομπές Εξοικονόμησης</p>	<p>Αντικατάσταση χημικών λιπασμάτων Απαγωγή αερίων θερμοκηπίου μέσω της αποθήκευσης άνθρακα Αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων</p>

3.3 Καταγραφή δεδομένων & Ανάλυση Επιπτώσεων

Η Καταγραφή δεδομένων, το 2^ο στάδιο της ΑΚΖ, αποτελείται από μια λεπτομερή βιβλιοθήκη όλων των εισροών και των εκροών που σχετίζονται με το εξεταζόμενο σύστημα σε κάθε στάδιο της ΑΚΖ, από την προσωρινή απόθεση του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ μέχρι την τελική του διάθεση. Πιο συγκεκριμένα, τα υποσυστήματα που περιλαμβάνονται είναι τα εξής :

- Η συλλογή και μεταφορά του οργανικού κλάσματος.
- Η κατασκευή και υποδομή της μονάδας.
- Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμου diesel
- Η αερόβια και η αναερόβια αποδόμηση της οργανικής ύλης για την μονάδα κομποστοποίησης και αναερόβιας χώνευσης αντίστοιχα.
- Τα τελικά προϊόντα και οι αποφευχθείσες διεργασίες από την χρήση τους

Ακολουθεί το 3^ο στάδιο, η ανάλυση των επιπτώσεων όπου αξιολογούνται οι επιπτώσεις των συστημάτων διαχείρισης που εξετάζονται ξεχωριστά, με επιπλέον αναλύσεις ευαισθησίας για την βέλτιστη κατανόηση και αξιολόγηση της περιβαλλοντικής σημασίας των αποτελεσμάτων στην κλιματική αλλαγή. Επιπλέον πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση μεταξύ των συστημάτων διαχείρισης.

Τέλος, στο 4^ο στάδιο, στην εκτίμηση των βελτιώσεων, συνοψίζονται και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα για την εξαγωγή συμπερασμάτων και βελτιώσεων σε συμφωνία με τον σκοπό και τον στόχο του συστήματος που εξετάζεται.

Κεφάλαιο 4^ο

Περιγραφή εξεταζόμενου συστήματος -
Ολοκληρωμένο Σύστημα Διαχείρισης ΑΣΑ

4.1. Περιοχή μελέτης – Παραγωγή & Σύσταση ΑΣΑ

Η ποιοτική σύσταση των απορριμμάτων είναι παράμετρος δυναμική. Ποικίλει ανάλογα την περιοχή διότι επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η πληθυσμιακή πυκνότητα, οι πληθυσμιακές διακυμάνσεις, το οικονομο-κοινωνικό επίπεδο, το πολιτιστικό και μορφωτικό επίπεδο, η εμπορική και βιομηχανική δραστηριότητα, η ηλικία των καταναλωτών της περιοχής κα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η εγκατάσταση μονάδας αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας των οργανικών απορριμμάτων ΑΣΑ σε ελληνικό νησί. Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται με πληθυσμό 1.000 κατοίκων. Η επιλογή γίνεται ώστε να εξυπηρετηθεί η αγροτική οικονομία της περιοχής και με αυτό τον τρόπο να εξασφαλιστεί η απορρόφηση του κομπόστ από την αφορά. Επιπλέον εξετάζεται η εγκατάσταση αναερόβιας βιολογικής επεξεργασίας, ομοίως σε ελληνικό νησί και σε περιοχή συνολικού πληθυσμού 20.000 κατοίκων.

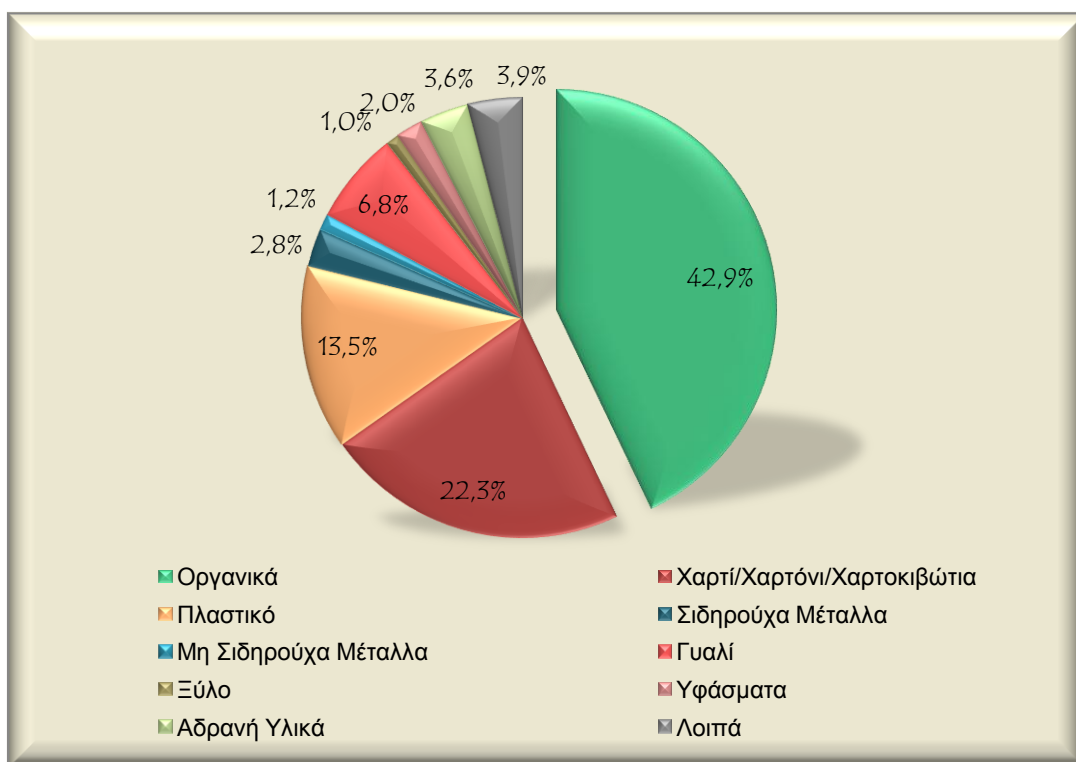
Πίνακας 4.1. Ποιοτική Σύσταση ΑΣΑ των ελληνικών νησιών & μέση ποιοτική σύσταση εξεταζόμενης περιοχής

Σύσταση ΑΣΑ	Ιόνιο	Ν. Αιγαίο	Β. Αιγαίο	Μέση
Οργανικά	41,0%	39,4%	48,3%	42,9%
Χαρτί/Χαρτόνι/Χαρτοκιβώτια	23,0%	22,4%	21,6%	22,3%
Πλαστικό	18,5%	12,7%	9,4%	13,5%
Σιδηρούχα Μέταλλα	3,1%	3,0%	2,1%	2,8%
Μη Σιδηρούχα Μέταλλα	1,6%	1,0%	1,1%	1,2%
Γυαλί	5,0%	9,5%	5,8%	6,8%
Ξύλο	1,0%	1,0%	1,0%	1,0%
Υφάσματα	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Αδρανή Υλικά	2,7%	4,0%	4,0%	3,6%
Λοιπά	2,1%	5,0%	4,7%	3,9%

Στα πλαίσια λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα για τις ποιοτικές συστάσεις των ελληνικών νησιών. Μετά από συλλογή στοιχείων από το ΠΕΣΔΑ Νοτίου Αιγαίου, τον Μπουρτσάλα (2011) & τον Μαλαμή (2012), όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1, ελήφθη μια μέση ετήσια σύσταση Αστικών Σύμμεικτων Απορριμμάτων (ΑΣΑ) για εξεταζόμενο σύστημα, η

οποία προκύπτει από την ποιοτική σύσταση των επιμέρους περιοχών και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1. Σύμφωνα με CEN/TS 15440 το βιογενές κλάσμα της ποιοτικής σύστασης που ελήφθη εκτιμάται ότι βρίσκεται σε ποσοστό 66%.

Η ημερήσια παραγωγή ΑΣΑ σύμφωνα με στοιχεία του Eurostat (2012) έχει ληφθεί ίση με 1,25 kg/κάτοικο. Λαμβάνοντας υπόψη τη σύσταση ΑΣΑ, στο εξεταζόμενο σύστημα η παραγωγή οργανικού κλάσματος ΑΣΑ εκτιμάται σε 0,49 kg / κάτοικο / ημέρα. Στο βασικό σενάριο εξετάζεται η περίπτωση κατά την οποία συμμετέχει το 65% του συνολικού πληθυσμού στο πρόγραμμα. Έχει θεωρηθεί ένα μέσο νοικοκυριό αποτελούμενο από 3 ανθρώπους.



Σχήμα 4.1. Μέση ποιοτική σύσταση ΑΣΑ εξεταζόμενου συστήματος

4.2 Ολοκληρωμένο πρόγραμμα διαχείρισης ΑΣΑ

Διαλογή στην Πηγή

Σύμφωνα με τις οδηγίες Νομοθεσίας για μια ολοκληρωμένη διαχείριση απορριμμάτων απαιτείται εφαρμογή συστήματος Διαλογής στην Πηγή (ΔσΠ). Η εφαρμογή της ΔσΠ σε Ευρωπαϊκές χώρες των όλων των ανακυκλώσιμων ρευμάτων ΑΣΑ θεωρείται

ζωτικής σημασίας για την επιτυχία του προγράμματος συλλογής του οργανικού κλάσματος των ΑΣΑ καθώς η εμπειρία έχει δείξει πως χωρίς ένα πλήρες σύστημα συλλογής, δηλαδή ανακυκλώσιμων και οργανικών, οι κάτοικοι των εκάστοτε περιοχών θα είχαν μικρότερη συμμετοχή.

Το σύστημα διαλογής στην πηγή (ΔσΠ) προσφέρει τη δυνατότητα μιας υψηλής ποιότητας πρώτης ύλης για κομποστοποίηση και παραγωγής ενός μη μολυσματικού προϊόντος. Η καθαρή πρώτη ύλη που συλλέγεται είναι πιο πιθανό να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές για το κομπόστ, ώστε να είναι κατάλληλο για πώληση και χρήση. Ομοίως, προσφέρει τη δυνατότητα μιας υψηλής ποιότητας πρώτης ύλης για αναερόβια χώνευση, χωρίς απαιτήσεις για υψηλή κατανάλωση ενέργειας στο στάδιο της προεπεξεργασίας, όπως θα γινόταν στην περίπτωση που το εισερχόμενο υπόστρωμα θα προερχόταν από Αστικά Σύμμεικτα Απορρίμματα. Επιπλέον, η απόδοση παραγωγής μεθανίου και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της χωνεμένης ιλύος ποικίλουν και επηρεάζονται από την στρατηγική διαλογής και συλλογής του ρεύματος αυτού καθώς έχουν παρατηρηθεί υψηλότερη παραγωγή μεθανίου από το προδιαλεγμένο οργανικό κλάσμα σε σχέση με το μηχανικώς διαχωριζόμενο από το κλάσμα των ΑΣΑ (Bonzonella, 2006)

Στην παρούσα μελέτη έχει επιλεγεί να πραγματοποιείται κεντρική ΔσΠ με τα ακόλουθα είδη κάδων για τα αντίστοιχα ρεύματα των ΑΣΑ :

- i. κάδος για πλαστικά-μέταλλα.
- ii. κάδος για χαρτί,
- iii. κάδος για οργανικά κλάσμα και
- iv. κάδος για γυαλί.
- v. Επιπλέον υπάρχει και κάδος για τη συλλογή των υπολοίπων σύμμεικτων απορριμμάτων.

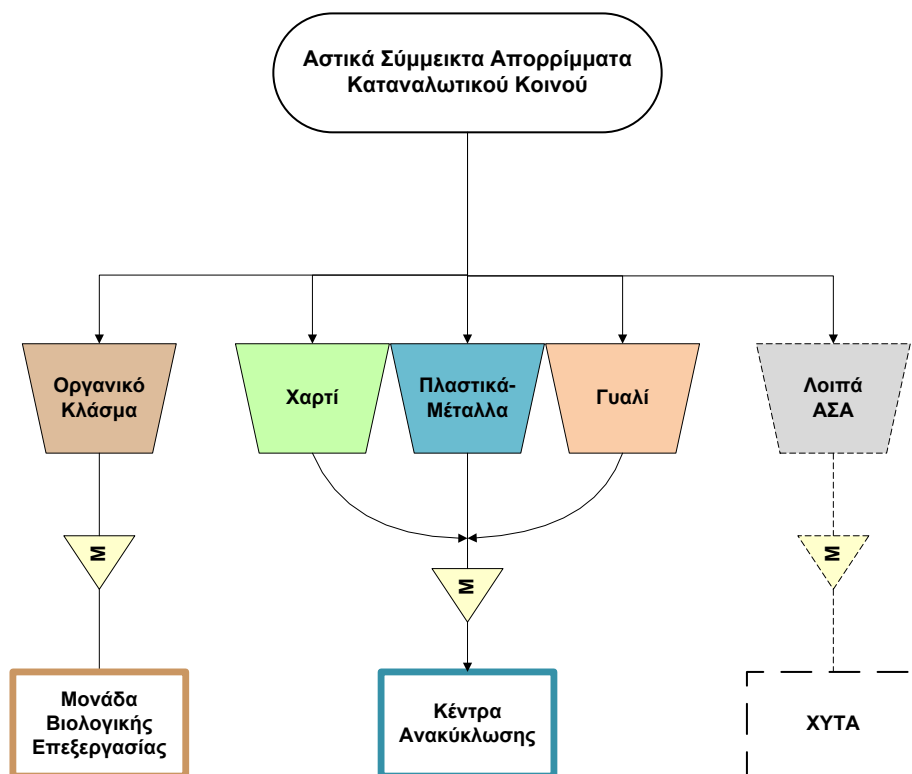
Σημειώνεται ότι η διαλογή του χαρτιού σε ανεξάρτητο κάδο οφείλεται στην ευκολία διάκρισης του από το καταναλωτικό κοινό αλλά και παράλληλα στον υψηλό βαθμό δυσκολίας ανάκτησης του από το κλάσμα μίξης του με άλλα ρεύματα απορριμμάτων (EEA, 2006). Το οργανικό κλάσμα που συγκεντρώνεται στους αντίστοιχους κάδους, οδηγείται στη μονάδα κομποστοποίησης.

Θεωρείται ότι η διαλογή στην πηγή βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2. Τα ποσοστά επί της συνολικής ποσότητας των ΑΣΑ του καταναλωτικού κοινού που καταλήγουν στους αντίστοιχους κάδους ελέχθησαν τοιουτοτρόπως θεωρώντας πως, αφενός μεν δεν θα συμμετέχει όλος ο πληθυσμός (ή το καταναλωτικό κοινό) στο πρόγραμμα, αφετέρου δε λόγω είτε μη σωστής ενημέρωσης ή μη προσεκτικής διαλογής από τους εμπλεκόμενους ενδέχεται να μην

καταλήγουν όλα τα παραγόμενα απορρίμματα στο αντίστοιχο κάδο αλλά στο κάδο των σύμμεικτων απορριμμάτων, τον «γκρι» κάδο.

Πίνακας 4.2. Ροές ρευμάτων ΑΣΑ του βασικού σεναρίου

Ρεύματα κάδων	Ποσοστό επί της συνολικής ποσότητας των ΑΣΑ του καταναλωτικού κοινού
Βιοκάδος	65% οργανικό κλάσμα
Κάδος ανακύκλωσης χαρτιού	70% χαρτί
Κάδος ανακύκλωσης γυαλιού	70% γυαλί
Κάδος ανακύκλωσης μετάλλων-πλαστικού (1)	60 % πλαστικό
Κάδος ανακύκλωσης μετάλλων πλαστικού (2)	70% μέταλλα σιδήρου
Κάδος ανακύκλωσης μετάλλων πλαστικού (3)	70% μέταλλα αλουμινίου



Σχήμα 4.2. Αποτύπωση Εξεταζόμενου Συστήματος Διαχείρισης ΑΣΑ

Σύστημα συλλογής και μεταφοράς

Η οικοδομική δομή των χωριών και των πόλεων στα ελληνικά νησιά δεν επιτρέπει την διέλευση των απορριμματοφόρων σε όλη την έκταση του για αυτό και δεν επιλέγεται το σύστημα συλλογής να γίνεται από πόρτα σε πόρτα. Για την προσωρινή αποθήκευση των οργανικών απορριμμάτων ΑΣΑ έχει θεωρηθεί ότι κατασκευάστηκαν ειδικοί κάδοι για τη συλλογή του ρεύματος των οργανικών, αλλιώς καφέ κάδοι. Οι καφέ κάδοι διαθέτουν ειδικά ανοίγματα αερισμού στα πλαϊνά τοιχώματα, διάτρητο τοίχωμα σε στεγαζόμενο σημείο του καπακιού, καθώς και ειδικά σχεδιασμένο πλέγμα στην βάση τους για την απορροή των υγρών και την εύκολη αφαίρεση των οργανικών απορριμμάτων κατά το άδειασμα των κάδων. Ο σχεδιασμός τους διευκολύνει τον αερισμό και επιτρέπει προετοιμασία των οργανικών υλικών για την μετέπειτα επεξεργασία τους. Επιπλέον, τα ειδικά τους χαρακτηριστικά επιταχύνουν την αποστράγγιση της υγρασίας, έτσι ώστε ο όγκος των αποβλήτων να μπορεί να μειωθεί σημαντικά κατά τη συλλογή των απορριμμάτων (Helesi Waste Containers). Εξαιτίας του πλέγματος που βρίσκεται στην βάση αυτών, ο ωφέλιμος όγκος μειώνεται.

Τα χαρακτηριστικά των καφέ κάδων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3, ενώ τα στοιχεία για τα χαρακτηριστικά τους λαμβάνονται από (Bovea 2010; Helesi Waste Containers).

Πίνακας 4.3. Κάδοι προσωρινής αποθήκευσης οργανικών ΑΣΑ

	Πλαστικό HDPE (κιλά ανά κάδο)	Μεταλλικά μέρη	Χωρητικότητα λίτρα	Διάρκεια ζωής (χρόνια)
Βιοκάδοι ¹	8,5	1	120	15

¹: Bovea 2010; Helesi Waste Containers

Ανά κάτοικο αντιστοιχούν (1/65) κάδοι. Για το σύστημα της κομποστοποίησης θεωρείται ότι κατασκευάζονται 22 κάδοι και για το σύστημα της αναερόβιας χώνευσης 320 κάδοι. Οι κάδοι είναι από HDPE, χωρητικότητας 120 L και διάρκειας ζωής 15 χρόνια, τοποθετημένοι σε κεντρικά σημεία και σε περιφερειακά της εκάστοτε εξεταζόμενης περιοχής.

Για τον υπολογισμό της επίδρασης στο Φαινόμενο του θερμοκηπίου της κατασκευής των βιοκάδων πρέπει να ληφθούν υπόψη οι αναλύσεις κύκλου ζωής για την παρασκευή τόσο των μετάλλων όσο και του πλαστικού HDPE. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι συντελεστές εκπομπών.

Πίνακας 4.4. Ισοδύναμες εκπομπές από την παρασκευή των υλικών

	Συντελεστής Εκπομπής (Kg CO ₂ eq/kg προϊόντος)	Πηγή
HDPE	1,96	Plastics Europe
Μέταλλα	2,5	Worldsteel association

Η συχνότητα συλλογής του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ μπορεί να ποικίλει από μια φορά την εβδομάδα ή μια το δεκαπενθήμερο έως και καθημερινά. Εφόσον στην υπό εξέταση περιοχή εφαρμόζεται ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης και άλλων ρευμάτων εκτός του οργανικού κλάσματος, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι η συλλογή του οργανικού κλάσματος είναι αρκετά συχνή ώστε να αποφευχθούν οι υψηλές συγκεντρώσεις τους. Αυτό είναι ιδιαίτερης σημασίας για την περιοχή που μελετάται, καθώς χαρακτηρίζεται από θερμό και υγρό κλίμα με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να αποσυντίθεται τα οργανικά πριν την συλλογή και να προκαλούν οσμές και περιβαλλοντικές οχλήσεις ([Compost brochure](#)). Η συχνότητα συλλογής επομένως είναι διαφορετική κατά τους χειμερινούς (κάθε 3 ημέρες) και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (καθημερινά) όπου υπάρχει έντονη τουριστική κίνηση, και παράλληλα συχνότερη από την αντίστοιχη συλλογή των υπόλοιπων ρευμάτων ΑΣΑ.

Για την μεταφορά του οργανικού κλάσματος η κατανάλωση του καυσίμου αυξάνει σε σχέση με την συλλογή των ΑΣΑ καθώς τα απορριμματοφόρα οχήματα πραγματοποιούν συχνότερα δρομολόγια, τα οποία επιπλέον περιλαμβάνουν συχνές στάσεις για συλλογή μικρών ποσοτήτων απορριμμάτων. Ο δείκτης κατά τους ([Moller & Christensen, 2007](#)) είναι 2,86 L diesel/Mg ΑΣΑ.

Κεφάλαιο 5^ο

Κομπροστοποίηση οργανικού κλάσματος ΑΣΑ

5.1 Δεδομένα & Υπολογιστικές Παραδοχές

5.1.1 Διαχείριση προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος – Περιγραφή διαδικασίας

Το βιοαποδομήσιμο κλάσμα, αφού συλλεχθεί μεταφέρεται με τα απορριμματοφόρα οχήματα στην μονάδα Αερόβιας Επεξεργασίας η οποία θεωρείται πως βρίσκεται τοποθετημένη σε απόσταση 10 χλμ από την εξεταζόμενη περιοχή.

Χώρος Υποδοχής

Αρχικά, τα οχήματα συλλογής οδηγούνται σε ειδική γεφυροπλάστιγγα για να ζυγιστούν κατά την είσοδο τους και ελέγχεται μακροσκοπικά το περιεχόμενό τους. Στη συνέχεια τα οχήματα συλλογής εκφορτώνουν τα απορρίμματα στον χώρο υποδοχής απορριμμάτων ο οποίος διαμορφώνεται σε κλειστό και στεγανό κτίριο, ώστε να αποφευχθούν τυχόν διαρροές, λειτουργώντας ταυτόχρονα και ως προσωρινός αποθηκευτικός χώρος παρέχοντας τη δυνατότητα αποθήκευσης ως τη σταδιακή επεξεργασία τους. Τα παραγόμενα στραγγίσματα οφείλονται να συλλέγονται. Ο χρόνος της προσωρινής αποθήκευσης πρέπει να είναι περιορισμένος λόγω της φύσης των συγκεκριμένων αποβλήτων και πρέπει να υπάρχει ξεχωριστός χώρος αποθήκευσης για τα πράσινα απορρίμματα και για το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων καθώς κάθε ρεύμα υφίσταται διαφορετική προεπεξεργασία.

Για τα πράσινα απορρίμματα δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις σε σχέση με την προσωρινή τους αποθήκευση, καθώς το ρεύμα αυτό δεν αποτελεί άμεσο κίνδυνο στη δημόσια υγεία. Τα οχήματα εισέρχονται εξ' ολοκλήρου στο κτίριο υποδοχής του οποίου οι πόρτες παραμένουν ανοιχτές μόνο για όσο χρόνο χρειάζεται να εισέλθει και να εξέλθει το όχημα. Όσο παραμένει εσωτερικά παραμένουν κλειστές για αποφυγή διαρροή οσμών προς το περιβάλλον.

Προεπεξεργασία οργανικού κλάσματος ΑΣΑ

Στο τμήμα παραλαβής τα απόβλητα ζυγίζονται και γίνεται ένας πρώτος οπτικός έλεγχος ως προς την σύσταση τους. Ενδεχομένως να χρειαστεί να αποθηκευτούν προσωρινά μέχρι να οδηγηθούν προς επεξεργασία για αυτό ο χώρος προσωρινής αποθήκευσης πρέπει να είναι στεγανός και διαμορφωμένος σε κλειστό κτίριο ώστε να αποφευχθούν τυχόν διαρροές.

Από τις ειδικές δεξαμενές του χώρου υποδοχής τα απορρίμματα μεταφέρονται μέσω ταινιόδρομου με ιμάντα στον χώρο χειροδιαλογής. Αφού πραγματοποιηθεί χειροδιαλογή για την απομάκρυνση πιθανών ογκωδών και ανεπιθύμητων υλικών οδηγούνται σε περιστροφικό κόπτη όπου υπόκεινται σε μείωση μεγέθους με σκοπό την αύξηση της ειδικής επιφάνειας τους για βέλτιστη βιολογική αποδόμηση. Αυξάνοντας την επιφάνεια των σωματιδίων των απορριμμάτων, μέσω τεμαχισμού, αυξάνεται και η διαθεσιμότητα του άνθρακα και να επιταχυνθεί η αποικοδόμηση αν υπάρχει και διαθεσιμότητα του αζώτου

Κατόπιν, οδηγούνται σε μαγνητικό ιμάντα και ιμάντα δινορευμάτων για την απομάκρυνση πιθανών σιδηρούχων και μη σιδηρούχων προσμίξεων αντίστοιχα. Αφού το οργανικό υπόστρωμα διαχωριστεί από πιθανές προσμίξεις μετάλλων υπόκειται οδηγείται στο τελικό στάδιο της προ-επεξεργασίας όπου γίνεται ανάμιξη του υποστρώματος τροφοδοσίας με τα πρόσθετα κομποστοποίησης.

Ως πρόσθετα κομποστοποίησης αναφέρονται τα υλικά που προστίθενται με στόχο τη μείωση του ειδικού βάρους και την αύξηση του πορώδους, ώστε να διευκολύνεται ο αερισμός καθώς επίσης και για να βελτιωθούν οι λόγοι άνθρακα και αζώτου μέσα στο σωρό για τη βέλτιστη βιολογική αποδόμηση (Αναγνωστόπουλος, 2010). Συγκεκριμένα, αν η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι πολύ μεγάλη, προκαλείται μια αργή αποσύνθεση που αυξάνει τον απαιτούμενο χρόνο επεξεργασίας. Αν το άζωτο είναι πολύ περιορισμένο, τότε οι μικροοργανισμοί παραμένουν μικροί και καθυστερούν αρκετά να αποδομήσουν τον διαθέσιμο άνθρακα. Από την άλλη πλευρά, υπερβολική περιεκτικότητα σε άζωτο, δηλαδή πολύ παραπάνω από τις απαιτήσεις των μικροοργανισμών, οδηγούν στην απώλεια του με τη δημιουργία αμμωνίας ή άλλων αζωτούχων ενώσεων, όπως N_2O , που προκαλούν οσμές και άλλα περιβαλλοντικά προβλήματα (Richard, 1991). Το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ έχει συνήθως λόγο C/N κυμαινόμενο από 18:1 μέχρι 50:1.

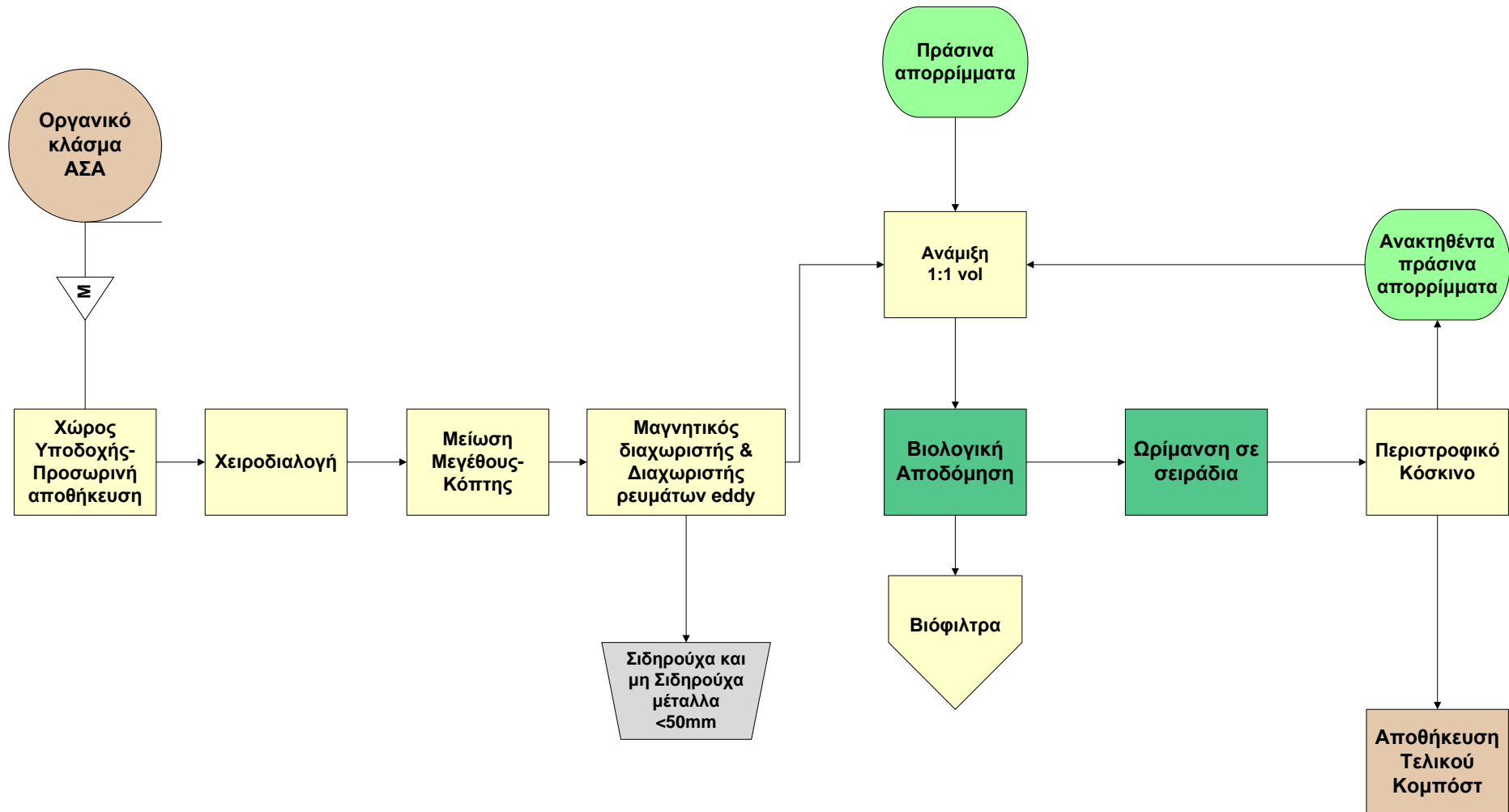
Ως πρόσθετα κομποστοποίησης λοιπόν, που θεωρείται ότι βρίσκονται διαθέσιμα στην περιοχή, έχουν επιλεγεί τα πράσινα απορρίμματα. Η αναλογία μίξης καθορίζεται σαφώς από την σύσταση του οργανικού κλάσματος. Στη παρούσα μελέτη έχει ληφθεί όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα. Έτσι το οργανικό κλάσμα αναμιγνύεται με πράσινα απόβλητα (κλαδέματα, φύλλα) με ογκομετρική αναλογία 1:1 και σύσταση των δύο ρευμάτων όπως παρουσιάζεται στους Πίνακες 5.1 & 5.2.

Πίνακας 5.1. Ποιοτικά χαρακτηριστικά οργανικών απορριμμάτων ΑΣΑ (Yoshida, 2012)

Υγρασία	60,0	%
Συνολική Οργανική Ύλη	90,1	% επί ξηρού
Συνολικός Οργανικός C	49,7	% επί ξηρού
Άζωτο	2,3	% επί ξηρού
Φώσφορος (ως P ₂ O ₅)	0,3	% επί ξηρού
Κάλλιο (ως K ₂ O)	1,1	% επί ξηρού
Ειδικό βάρος	490	kg/m ³

Πίνακας 5.2. Σύσταση Πράσινων απορριμμάτων (Yoshida, 2012; Eklinđ, 2000)

Υγρασία	50,0	%
Συνολικά Στερεά	50,0	%
Συνολική Οργανική Ύλη	50,90	% επί ξηρού
Συνολικός Οργανικός C	36,50	% επί ξηρού
Άζωτο	1,5	% επί ξηρού
Φώσφορος (ως P ₂ O ₅)	0,2	% επί ξηρού
Κάλλιο (ως K ₂ O)	1,3	% επί ξηρού
Ειδικό βάρος	380	κιλά/κμ



Σχήμα 5.1. Σχηματική απεικόνιση διαγράμματος ροής των επιμέρους διεργασιών εντός της μονάδας κομποστοποίησης

5.1.2 Βιολογική αποδόμηση οργανικού κλάσματος ΑΣΑ

Το μίγμα οδηγείται πλέον σε ειδικά διαμορφωμένα οριζόντια κελιά, τα βιοκελιά (biocells) για τη βιολογική αποδόμηση του. Τα βιοκελιά αποτελούν ένα κλειστό, αεροστεγές σύστημα το οποίο προσφέρει σχεδόν πλήρη έλεγχο στο περιβάλλον, υπό τον έλεγχο της θερμοκρασίας και του αερισμού. Περιλαμβάνουν συστήματα ρύθμισης αναλογίας του αέρα που ανακυκλώνεται προς το νέο εισερχόμενο ρεύμα αέρα, καθώς και της ροής του αέρα μέσα από το υλικό. Το βασικό τους χαρακτηριστικό τους είναι ότι χρησιμοποιούν δυναμικό αερισμό, συνήθως με εμφύσηση αέρα, μέσα από το πάτωμα της κατασκευής με κανάλια ή σωλήνες, ενώ τα απαέρια απομακρύνονται συνήθως από το πάνω μέρος της. Στα βιοκελιά πραγματοποιείται μερική ανακυκλοφορία του εξερχόμενου αέρα επιτυγχάνοντας ομοιόμορφες και καλά ελεγχόμενες θερμοκρασίες σε όλη τη μάζα του οργανικού υλικού και επιτρέποντας τη μείωση των απαερίων στην ατμόσφαιρα σε όλη τη φάση της αποδόμησης μέχρι και 95% (Ambiocell), ενώ για την για αποφυγή οσμών και άλλων ρύπων χρησιμοποιούνται βιόφιλτρα (Cadena 2009). Η φάση της βιολογικής αποδόμησης διαρκεί 21 ημέρες.

Το προϊόν της βιολογικής αποδόμησης δεν είναι ακόμα βιολογικά σταθερό για αυτό και ακολουθεί το στάδιο της ωρίμανσης σε σειράδια εντός στεγανού-κλειστού κτιρίου για χρονικό διάστημα 6-8 εβδομάδων. Τα σειράδια αναστρέφονται κάθε βδομάδα για την επίτευξη του καλύτερου αερισμού με ειδικό αναστροφέα.

Ακολουθεί ο εξευγενισμός του κομπόστ όπου μέσω περιστροφικού κόσκινου αφαιρείται το χονδρόκοκκο κομμάτι των πράσινων αποβλήτων κυρίως το οποίο δεν αποδομήθηκε πλήρως, καθώς και πιθανές προσμίξεις (πέτρες). Το ανακτηθέν κλάσμα των πράσινων απορριμμάτων δύναται να επανεισαχθεί στο αρχικό μίγμα και να υποστεί ξανά αερόβια αποδόμηση ενώ οι προσμίξεις στέλνονται σε χώρο υγειονομικής ταφής.

Τελικά το κομπόστ δεματοποιείται και αποθηκεύεται σε κατάλληλο χώρο πριν την τελική του διάθεση στην αγορά. Η συνολική διαδικασία διαρκεί 10 εβδομάδες.

Υπολογιστικό Μοντέλο Εκπομπών

Ο άνθρακας που εμπεριέχεται στα οργανικά απορρίμματα προέρχεται από την διαδικασία της φωτοσύνθεσης και για αυτό πρόκειται για βιογενή άνθρακα (Yoshida 2012). Η έκλυση του οργανικού άνθρακα λοιπόν, με τη μορφή του διοξειδίου του άνθρακα, δεν συμβάλει στην αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα που συμβάλουν στο φαινόμενο όξυνσης του φαινομένου του θερμοκηπίου (Gentil 2009, EpE 2010).

Τα απαέρια της κομποστοποίησης που συμβάλουν στην εκτροπή του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι το μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου. Τα απαέρια τα οποία παράγονται καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας της μονάδας διαχειρίζονται από βιόφιλτρα σε κάθε στάδιο της επεξεργασίας προτού απελευθερωθούν στο περιβάλλον. Τα βιόφιλτρα

αποτελούνται από στρώμα 1 μέτρου από φυτικό υπόστρωμα, το οποίο προηγουμένως είχε χρησιμοποιηθεί ως βοηθητικό υλικό στην κομποστοποίηση, με το οποίο οι ρύποι των απαερίων αποδομούνται από μικροοργανισμούς (Martínez-Blanco 2009).

Εκπομπές μεθανίου

Σε μια ιδανική λειτουργία του μηχανισμού της αερόβιας αποδόμησης, τα οργανικά απορρίμματα θα παρήγαγαν αποκλειστικά διοξείδιο του άνθρακα προερχόμενο από τον βιογενή άνθρακα. Στην πραγματικότητα, λόγω υψηλών ποσοστών σε υγρασία και μη επαρκούς αερισμού σε όλο τον όγκο του προς κομποστοποίηση υλικού, σε θερμοκρασίες πάνω των 40-50 °C μέρος του άνθρακα δύναται να εκλυθεί ως μεθάνιο, το οποίο λαμβάνεται υπόψη στη συνολική περιβαλλοντική αποτύπωση (Amlinger, 2008). Αξίζει να αναφερθεί ότι (Smith, 2001), (Recycled Organics Unit, 2003), (USEPA, 2006) και ο (Çabaroğlu, 2008), αναφέρουν πως κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης δεν εκλύεται καμία ποσότητα μεθανίου, ενώ αντίθετα ο (Clemens & Cuhls, 2003) αναφέρουν πως μεθάνιο εκπέμπεται ακόμα και σε πολύ καλά αεριζόμενες διαδικασίες.

Η ποσότητα του άνθρακα που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης εκτιμάται με βάση το μοντέλο που πρότειναν ο (Boldrin, 2009). Σύμφωνα με αυτό υπολογίζονται οι εκλυόμενες ποσότητες άνθρακα εκφρασμένες σε kg C :

$$C_{release} = C_{input} \times C_{loss} \quad (1)$$

, όπου

- C_{input} : η ποσότητα συνολικού άνθρακα που περιέχεται στο προς κομποστοποίηση μίγμα σε kg C
- C_{loss} : η απώλεια σε % του άνθρακα κατά την αποδόμηση (δλδ ο άνθρακας που αποδομείται)

Η συνολική ποσότητα μεθανίου που εκλύεται εκφρασμένη σε kg CH₄ υπολογίζεται από:

$$CH_{4,release} = C_{release} \times CH_{4,emitted} \times (1 - \eta_{CH_4}) \times \frac{16}{12} \quad (2)$$

, όπου:

- $CH_{4,emitted}$: το ποσοστό του αποδομημένου άνθρακα που εκλύεται ως μεθάνιο
- η_{CH_4} : βαθμός απόδοσης απομάκρυνσης μεθανίου

Εκπομπές υποξειδίου του αζώτου

Το υποξείδιο του αζώτου μπορεί να παραχθεί είτε λόγω μη επαρκούς παροχής οξυγόνου είτε μέσω ημιτελούς απονίτρωσης (Beck-Friis, 2000; Eggleston, 2006). Ο He (2000) καταγράφει υψηλές εκπομπές N_2O κατά το πέρας της αποδόμησης όταν το απαιτούμενο ποσοστό άνθρακα έχει καταναλωθεί, ενώ ο Beck-Friis (2000) καταγράφει εκπομπές καθ' όλη την διάρκεια. Σύμφωνα με Amlinger & Cuhls (2008) μια χαμηλή τιμή του λόγου C/N, μικρότερη από 17, στο αρχικό υπόστρωμα, συνήθως οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές N_2O . Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχουν μελέτες οι οποίες δεν συμπεριλαμβάνουν τις εκπομπές N_2O στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της κομποστοποίησης (Smith, 2001; Recycled Organics Unit, 2003).

Η ποσότητα του αζώτου που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα κατά την διάρκεια της κομποστοποίησης εκτιμάται και αυτή με τη σειρά της, με βάση το μοντέλο που πρότειναν ο Boldrin & Favoino (2009). Σύμφωνα με αυτό υπολογίζονται οι εκλυόμενες ποσότητες αζώτου εκφρασμένες σε kg N:

$$N_{release} = N_{input} \times N_{loss} \quad (3)$$

, όπου

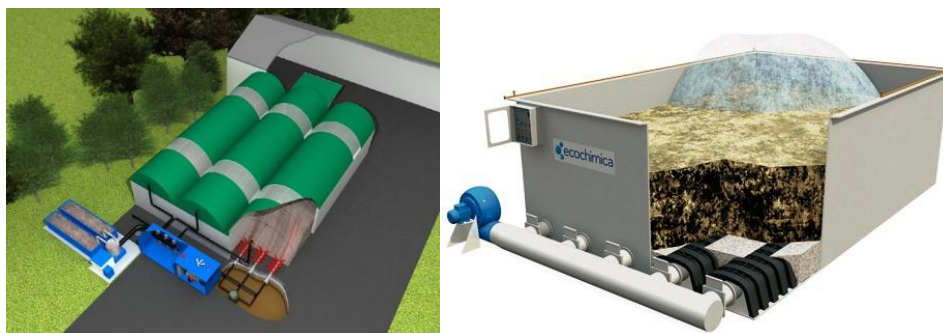
- N_{input} : η ποσότητα του συνολικού αζώτου που περιέχεται στο προς κομποστοποίηση μίγμα σε kg N
- N_{loss} : η απώλεια σε % του αζώτου κατά την αποδόμηση.

Το υποξείδιο του αζώτου σχηματίζεται κυρίως κατά την τελική φάση της αποδόμησης όταν το απαιτούμενο ποσοστό άνθρακα έχει καταναλωθεί (He, 2000). Ομοίως με το μεθάνιο υπολογίζεται και το εκπεμπόμενο υποξείδιο του αζώτου εκφρασμένο σε kg N_2O :

$$N_{2O_{release}} = CN_{release} \times N_{2O_{emitted}} \times (1 - \eta_{N_2O}) \times \frac{44}{28} \quad (4)$$

, όπου:

- $N_{2O_{emitted}}$: το ποσοστό του αζώτου που εκλύεται ως υποξείδιο του αζώτου
- η_{N_2O} : βαθμός απόδοσης απομάκρυνσης υποξειδίου του αζώτου



Σχήμα 5.2. Βιόφιλτρα για την πλύση των αερίων (Comprobox; Ecochimica)

Προηγούμενες μελέτες έχουν καταγράψει τις ικανότητες αφαίρεσης αερίων από τα βιόφιλτρα που χρησιμοποιούνται στις μονάδες κομποστοποίησης. Για το μεθάνιο έχουν καταγραφεί αποδόσεις από 33% έως και 100% CH_4 (Dalemo, 1997; den Boer, 2007; Powelson, 2006), ενώ ο Amlinger & Cuhls (2008) μετά από μετρήσεις καταγράφουν αποδόσεις από 10 έως 20%.

Για τις εκπομπές του υποξειδίου του αζώτου (N_2O) οι καταγραφές είναι αμφιλεγόμενες καθώς ο Dalemo (1997) αναφέρει στην μελέτη του ικανότητα αφαίρεσης 90% ενώ άλλοι συγγραφείς υποστηρίζουν πως τα βιόφιλτρα δεν έχουν καμία ουσιαστική επίδραση στην αφαίρεση του N_2O , αντιθέτως οδηγούν στην δημιουργία του (Amlinger & Peyr, 2003; Clemens & Cuhls, 2003).

Στην παρούσα διπλωματική, για την ικανότητα απομάκρυνσης του μεθανίου (CH_4) και του υποξειδίου του αζώτου (N_2O) έχουν ληφθεί αντίστοιχα 50% και 60%. Στους Πίνακες 5.3 & 5.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι παράμετροι που ελήφθησαν υπόψη.

Πίνακας 5.3. Απώλειες άνθρακα και αζώτου κατά την αποδόμηση, απόδοση βιοφίλτρων

		%		
C_{loss}	Απώλεια C στο CO_2	57		Hermann, 2011; Fisher 2006; Edelmann, 2000
$\text{CH}_4_{\text{emitted}}$	Απώλεια C στο CH_4	0,11		Hermann, 2011
N_{loss}	Απώλεια N	1,1		Boldrin, 2009
$\text{N}_2\text{O}_{\text{emitted}}$	Απώλεια N στο N_2O	1,3		Hermann, 2011
η_{CH_4}	Απομάκρυνση CH_4	50		Boldrin, 2009
$\eta_{\text{N}_2\text{O}}$	Απομάκρυνση N_2O	60		Boldrin, 2009

Πίνακας 5.4. Βαθμός απόδοσης βιοφίλτρων

	%	
η_{CH_4}	33 – 100	Dalemo, 1997; den Boer, 2007; Powelson 2006
	20	Amlinger & Peyr, 2008.
η_{N_2O}	90	Dalemo, 1997
	0	Amlinger, 2008; Clemens & Cuhls, 2003

5.1.3 Κατασκευή μονάδας & Υποδομή – Κατανάλωση ενέργειας

Η μονάδα Αερόβιας Επεξεργασίας των Οργανικών απορριμμάτων έχει διάρκεια ζωής 25 χρόνια (Martinez-Blanco, 2010) και λειτουργεί 5 ημέρες την εβδομάδα (ΔΕΔΙΣΑ Χανίων).

Στα πλαίσια της διεξαγωγής της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε σχεδιασμός πρότυπης μονάδας κομποστοποίησης σε ελληνικό νησί με σκοπό τον υπολογισμό των απαιτούμενων υλικών για την κατασκευή του σκελετού της μονάδας αλλά και των κιβωτίων μέσα στα οποία πραγματοποιείται η διεργασία της ελεγχόμενης βιολογικής αποδόμησης των οργανικών (Design manual for small scale composting plants, 2009; Ambiocell, Composting facility, 2005).



Σχήμα 5.4. Προοπτική απεικόνιση της Μονάδας Κομποστοποίησης σε κελιά

Με την ολοκλήρωση του σχεδίου μετρήθηκαν ο συνολικός όγκος του σκελετού, του δαπέδου και της οροφής και κατ' επέκταση η μάζα των υλικών για την κατασκευή αυτών. Για την κατασκευή του δαπέδου υπολογίστηκε ότι χρησιμοποιήθηκε οπλισμένο σκυρόδεμα σε ποσότητα 8 kg/Mg ΑΣΑ. Ο σκελετός της μονάδας, η οροφή και τα βιοκελιά θεωρήθηκαν μεταλλικής κατασκευής από μέταλλα σε ποσότητα 3 kg/Mg ΑΣΑ. Ο Blanco (2010) καταγράφουν απαίτηση για 14,17 kg οικοδομικών υλικών (μέταλλα, σκυρόδεμα κα) ανά τόνο οργανικού κλάσματος ΑΣΑ. Εδώ υπολογίστηκαν 11 kg/Mg ΑΣΑ, δηλαδή 27,37 kg/Mg οργανικού κλάσματος ΑΣΑ. Η διαφορά έγκειται στην δυναμικότητα της εκάστοτε μονάδας. Τα απαραίτητα μηχανήματα για την λειτουργία της μονάδας της κομποστοποίησης έχουν υπολογιστεί από τον Blanco (2010) 0,06 kg/Mg ΑΣΑ.



Σχήμα 5.3 Αριστερά απεικονίζεται η μπροστά όψη της Μονάδας και δεξιά η πίσω όψη.



Σχήμα 5.5. Προοπτική απεικόνιση της Μονάδας Κομποστοποίησης. Τομή των κιβωτίων αποδόμησης και του κλειστού χώρου ωρίμανσης σε σειράδια.

Με βάση μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής υπολογίζονται οι ισοδύναμες εκπομπές για την παραγωγή ενός κιλού σκυροδέματος και ενός κιλού μετάλλων, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6. Επιπλέον, στον Πίνακα 5.5 δίνεται η ογκομετρική σύσταση του σκυροδέματος που θεωρήθηκε για τους υπολογισμούς.

Πίνακας 5.5 . Σύσταση οπλισμένου σκυροδέματος (Jeannette Sjunnesson, 2005)

Συστατικά	Ογκομετρική σύσταση (%)
Τσιμέντο	18
Αδρανή υλικά	40
Αμμοχάλικο	35
Νερό	7

Πίνακας 5.6. Ισοδύναμες Εκπομπές για την παραγωγή 1 κιλού σκυροδέματος σύμφωνα με (Jeannette Sjunnesson, 2005)

Ατθ για την παραγωγή ενός κιλού σκυροδέματος			Ισοδύναμες Εκπομπές (Kg CO _{2eq} /kg προϊόντος)
CO ₂	CH ₄ (gr /kg προϊόντος)	N ₂ O	
150,833	0,479	5,88E-05	0,161

Σύμφωνα με τους (Cadena, 2009; Belgini, 2008; Blanco, 2010; Blanco, 2009) η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία μονάδας κομποστοποίησης σε κλειστό σύστημα εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 8,5 kWh/Mg ΑΣΑ, και η κατανάλωση καυσίμου diesel σε 0,98 L/Mg ΑΣΑ.

Η ηλεκτρική ενέργεια λαμβάνεται από το εθνικό δίκτυο διανομής ηλεκτρισμού. Οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα διανομής λαμβάνονται ίσες με 2%.

Το καύσιμο diesel χρησιμοποιείται για τη λειτουργία μηχανημάτων όπως ο ειδικός αναστροφέας, οχήματα μεταφοράς οργανικού εντός της μονάδας κλπ. Θεωρήθηκε ότι κατά την καύση του καυσίμου diesel παράγονται 2,62 κιλά CO₂/L diesel ενώ επιπλέον οι εκπομπές για την παροχή του καυσίμου diesel είναι 0,5 kg CO_{2eq}/ L diesel (Fruergaard 2009). Ο υπολογισμός βασίστηκε στους δείκτες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.8. Η θερμογόνοτητα του καυσίμου έχει ληφθεί 36 MJ/Litre.

Θεωρούνται δύο περιπτώσεις: Διασυνδεδεμένου Συστήματος (Eurostat, 2008) και μη Διασυνδεδεμένων νησιών. Τα νησιά τα οποία είναι διασυνδεδεμένα είναι τα Επτάνησα, οι Σποράδες, τα νησιά Αργοσαρωνικού, Β. Αιγαίου, Άνδρο, Τήνο και Εύβοια.

Πίνακας 5.8. Εκπομπές κατά την καύση καυσίμου diesel (IPCC)

Εκπομπές κατά την καύση καυσίμου Diesel θερμογόνου ικανότητας 36MJ/Litre	72,098	gr CO ₂ /MJ diesel
	0,003	gr CH ₄ /MJ diesel
	0,002	gr N ₂ O/MJ diesel

Πίνακας 5.7. Ισοδύναμες Εκπομπές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα με βάση το εγχώριο ενεργειακό μίγμα

	Διασυνδεδεμένο Σύστημα	Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά
	Ποσοστό συνεισφοράς (%)	
Παλιά λιγνιτική μονάδα	36,91	0,0
Νέα λιγνιτική μονάδα	10,86	0,0
Μονάδα Φυσικού Αερίου	17,76	0,0
Πετρελαϊκή μονάδα	6,77	98,0
Υδροηλεκτρικό	27,28	0,0
ΑΠΕ	0,42	2,0
Ισοδύναμες Εκπομπές (kg CO ₂ /kWh)	0,932	1,081

Για να υπολογιστούν οι εκπομπές εξοικονόμησης από την ανακύκλωση των υλικών έγινε χρήση των αντίστοιχων αναλύσεων κύκλου ζωής βάσει (Prognos 2008) οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 5.9. Στον Πίνακα 5.10 συνοψίζονται τα δεδομένα των εισροών του συστήματος.

Πίνακας 5.9. Εκπομπές εξοικονόμησης ανακυκλώσιμων υλικών (Prognos 2008)

	kg CO _{2eq} /Mg υλικού
Χαρτί	820
Γυαλί	180
Πλαστικό	1400
Μέταλλα σιδήρου	1000
Μέταλλα αλουμινίου	11100

Πίνακας 5.10. Σύνοψη των εισροών της ανάλυσης καταγραφών για την βιομηχανική κομποστοποίηση.

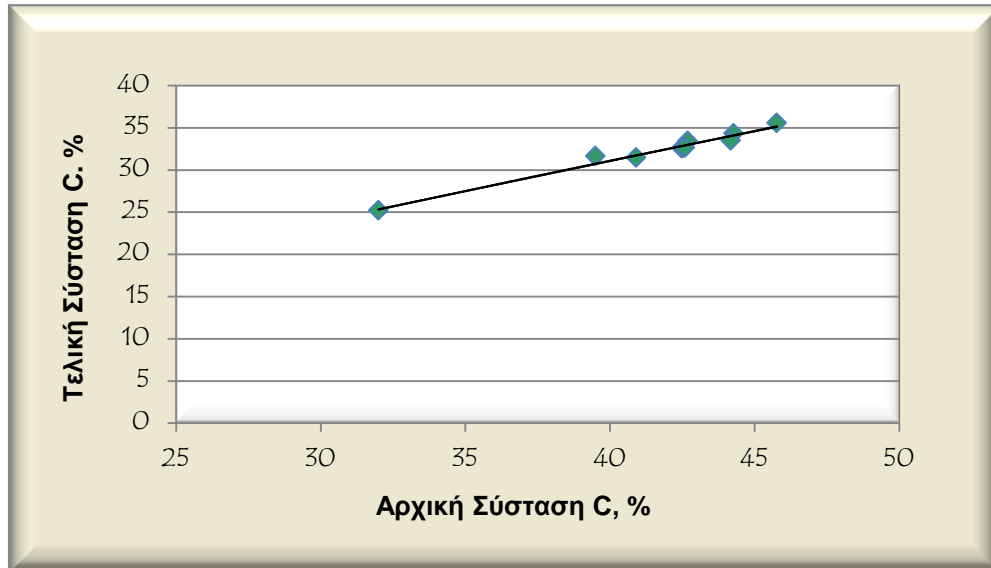
Διεργασίες	Κατηγορία	Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα
Συλλογή Οργανικού κλάσματος	Κάδοι	HDPE	0,19	Kg/Mg ΑΣΑ
		Μέταλλα	0,02	Kg/Mg ΑΣΑ
	Μεταφορά	diesel	2,01	L/Mg ΑΣΑ
Υποδομή & Μηχανήματα	Κατασκευή μηχανημάτων	Μέταλλα	0,06	Kg/Mg ΑΣΑ
		Μονάδα	Μέταλλα	3,0
	Μονάδα	Σκυρόδεμα	8,0	Kg/Mg ΑΣΑ
Ενέργεια	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας	Ηλεκτρική ενέργεια	9,20	kWh/Mg ΑΣΑ
	Κατανάλωση καυσίμου Diesel	Καύσιμο Diesel	1,06	L/Mg ΑΣΑ

5.1.4 Εφαρμογή τελικού κομπόστ στο έδαφος

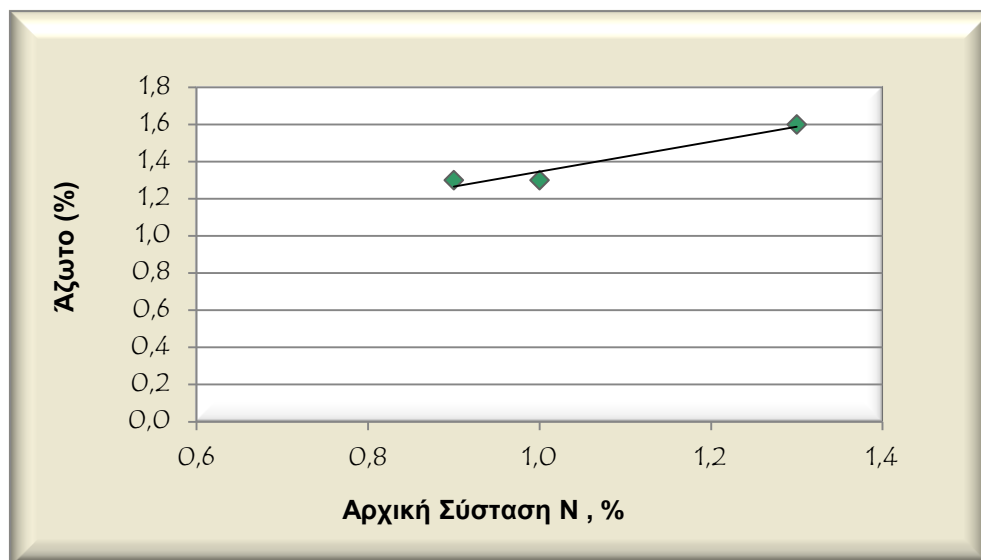
Για τον υπολογισμό της ποιοτικής σύστασης του τελικού κομπόστ στα θρεπτικά συστατικά του, δηλαδή για τον υπολογισμό της σύστασης σε άνθρακα, N-P-K καθώς και την τελική του υγρασία, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων της αποδόμησης που παρουσιάζονται στις μελέτες των (Chang, 2008) και (Francou, 2008). Λόγω έλλειψης βιβλιογραφικών στοιχείων σε σχέση με την τελική σύσταση σε φώσφορο και κάλλιο θεωρήθηκε ότι η αποδόμηση τους ακολουθεί την ίδια εξίσωση με

αυτή του αζώτου. Σύμφωνα με τους δείκτες του (Yoshida, 2012) επιβεβαιώνεται η θεώρηση.

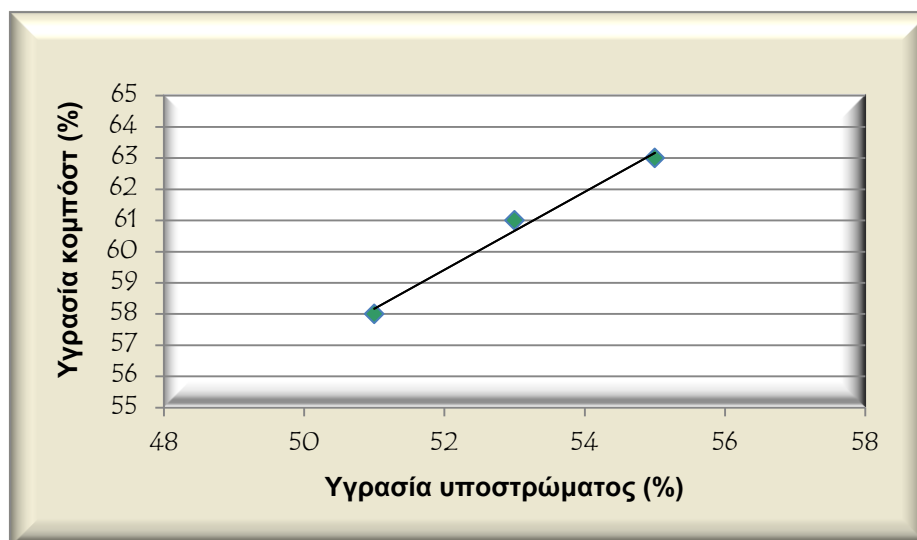
Ακολουθούν τα Διαγράμματα 5.1, 5.2 & 5.3 με τις αντίστοιχες εξισώσεις, καθώς και ο Πίνακας 5.11 όπου παρουσιάζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού κομπόστ του βασικού σεναρίου.



Διάγραμμα 5.1. Σύσταση σε άνθρακα (C, %) του τελικού προϊόντος



Διάγραμμα 5.2. Σύσταση τελικού κομπόστ σε άζωτο, N (%)



Διάγραμμα 5.3. Τελική υγρασία στο τελικό κομπόστ, (%)

Πίνακας 5.11. Ποιοτική σύσταση τελικού κομπόστ βασικού σεναρίου

Υγρασία	61,6	%
Άνθρακας	20,8	% επί ξηρού
Άζωτο	2,5	% επί ξηρού
Φώσφορος (ως P ₂ O ₅)	0,7	% επί ξηρού
Κάλιο (ως K ₂ O)	1,0	% επί ξηρού

Η απαγωγή του άνθρακα είναι η διαδικασία κατά την οποία το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας απορροφάται από τα δέντρα, τα φυτά, τις καλλιέργειες μέσω της φωτοσύνθεσης και αποθηκεύεται ως άνθρακας στην βιομάζα και στο έδαφος (Hansen, 2006; Brunn, 2006). Όταν η απαγωγή του άνθρακα είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες εκπομπές μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό ορίζοντα τότε χρησιμοποιείται ο όρος «δεξαμενή διοξειδίου του άνθρακα» στο έδαφος και ουσιαστικά προσομοιάζεται μια διαδικασία αφαίρεσης των εκπομπών CO₂ από την ατμόσφαιρα και αποδίδεται στην κατηγορία των εκπομπών εξοικονόμησης (Hansen, 2006; Boldrin, 2010; Hermann 2011).

Η οργανική ύλη από την οποία αποτελείται το κομπόστ χαρακτηρίζεται από την άμεσα αποδομήσιμη, την βραδέως αποδομήσιμη και την σταθερή οργανική ύλη. Όταν η αποδομήσιμη ύλη οξειδώνεται εκλύεται διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Η σταθερή οργανική ύλη έχει ένα συγκέντρωση 100 χρόνων και για αυτό, μέρος του άνθρακα αποθηκεύεται στο έδαφος για πολύ μεγάλες περιόδους (Hermann, 2011; Boldrin, 2009; Smith, 2001; Favoino & Hogg, 2008). Υπολογίζεται λοιπόν, η ποσότητα του

διοξειδίου που αποθηκεύεται σαν μια «δεξαμενή» στο έδαφος εκφρασμένη σε kg CO₂, όπως προτάθηκε από τους (Boldrin & Favoino, 2009):

$$CO_{2,bind} = C_{input} \times C_{bind} \times \frac{44}{12} \quad (5)$$

, όπου:

- C_{bind}: η ποσότητα του άνθρακα που αποτελεί την σταθερή οργανική ύλη που μένει στο έδαφος μετά από 100 χρόνια
- C_{input}: η ποσότητα συνολικού άνθρακα που περιέχεται στο προς κομποστοποίηση μίγμα σε kg C

Πίνακας 5.12. Αποθήκευση άνθρακα τελικού κομπόστ

	%	Πηγή
C _{bind}	9	(Boldrin, 2009; Bruun, 2006)

Το κομπόστ είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο, φώσφορο και κάλλιο. Εξαιτίας της σύνθεσης του δύναται να αντικαταστήσει συμβατικά-χημικά λιπάσματα με πιο συνήθης την αντικατάσταση των N - P - K λιπασμάτων. Για τον υπολογισμό των λιπασμάτων που αντικαθίστανται πρέπει να ληφθεί υπόψη η ικανότητα αντικατάστασης. Σύμφωνα με το μοντέλο που πρότειναν οι Boldrin & Favoino (2009) υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (6) η εκτρεπόμενη μάζα λιπάσματος εκφρασμένη σε kg. Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζονται οι ικανότητες αντικατάστασης λιπασμάτων από το κομπόστ.

$$Mass_{displaced} = M_{input_nutrient} \times Subs_{eff} \quad (6)$$

, όπου:

- M_{input,nutrient}: η ποσότητα του θρεπτικού συστατικού στο οργανικό λίπασμα εκφρασμένη σε kg
- Subs_{eff}: η ικανότητα αντικατάστασης του αντίστοιχου θρεπτικού συστατικού εκφρασμένο σε %

Πίνακας 5.13. Ικανότητα αντικατάστασης θρεπτικών συστατικών

Θρεπτικό Συστατικό	Sub _{eff} (%)	Πηγή
N	60	Boldrin & Favoino, 2009; Hansen
P	95	2006; Brinkman 2004; Dalemo,
K	100	1997

Για να υπολογιστούν οι εκπομπές εξοικονόμησης από την εφαρμογή του κομπόστ στο έδαφος πρέπει να ληφθούν υπόψη η πρωτογενής ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή των χημικών λιπασμάτων. Για κάθε κιλό λιπάσματος N-P-K εκλύονται ισοδύναμες εκπομπές CO₂. Οι εκπομπές για την παραγωγή συμβατικών λιπασμάτων ελήφθησαν βάσει στοιχείων από τους (Boldrin, 2009; Hansen, 2006) και οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.14. Αέρια του θερμοκηπίου για την παραγωγή των χημικών λιπασμάτων

Θρεπτικό Συστατικό	Συντελεστής Εκπομπής (kg CO ₂ eq/kg nutrient)	Πηγή
N	12,25	Boldrin & Favoino, 2009; Hansen, 2007
P	2,72	Boldrin & Favoino, 2009
K	1,53	Boldrin & Favoino 2009

5.1.5 Απόβλητα της μονάδας κομποστοποίησης

Τα απόβλητα στην εξεταζόμενη μονάδα κομποστοποίησης προέρχονται από τη διαδικασία της προ-επεξεργασίας και από τη διαδικασία του εξευγενισμού. Ένα μέρος του χονδρόκοκκου κλάσματος της αποδόμησης επανεισάγεται στην διαδικασία για να αποδομηθεί πλήρως. Υπολογίστηκε ότι τα συνολικά απορρίμματα σε όλες τις φάσεις της κομποστοποίησης ανέρχονται στα 63 kg/Mg ΑΣΑ ή 227 kg/Mg οργανικού κλάσματος ΑΣΑ. Αναφέρεται πως σε αντίστοιχη μονάδα, ο Cadena (2009) καταγράφει απορρίμματα 280 kg/Mg οργανικού κλάσματος ΑΣΑ. Από την μονάδα τα απορρίμματα αυτά οδηγούνται σε ΧΥΤΑ, ωστόσο, η μεταφορά και η διαχείριση αυτών των ρευμάτων δεν λαμβάνεται υπόψη στο εξεταζόμενο σύστημα.

5.2 Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

5.2.1 Βασικό Σενάριο

Στο βασικό σενάριο, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, εφαρμόζεται διαλογή στην πηγή έξι (6) ρευμάτων των ΑΣΑ με τέσσερις αντίστοιχους κάδους. Σκοπός λοιπόν, είναι να εκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ολοκληρωμένης διαχείρισης των ρευμάτων των ΑΣΑ. Η ροή των αστικών απορριμμάτων του καταναλωτικού κοινού για το εξεταζόμενο σύστημα, θεωρείται ίση με 1250 kg/ημέρα ΑΣΑ.

Παρουσίαση Αποτελεσμάτων - Σχολιασμός

Οι υπολογισμοί των ισοδύναμων εκπομπών πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό Excel 07'. Η συμβολή της κομποστοποίησης σε βιομηχανική κλίμακα στην εκτροπή του φαινομένου του θερμοκηπίου αντικατοπτρίζεται στα Διαγράμματα 5.4 και 5.5, ενώ τα αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.15.

Οι τρεις διεργασίες που συμβάλλουν περισσότερο στο σύστημα της κομποστοποίησης για την περίπτωση του Διασυνδεδεμένου Συστήματος είναι, κατά σειρά, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η κατασκευή και υποδομή της μονάδας και τέλος, η συλλογή και μεταφορά του οργανικού κλάσματος. Τα ποσοστά προκύπτουν επί του συνόλου των έμμεσων και άμεσων εκπομπών του συστήματος της αναερόβιας χώνευσης, δηλαδή στα ποσοστά επίδρασης δεν συνυπολογίζονται οι εκπομπές εξοικονόμησης.

Άμεσες Εκπομπές

Η συλλογή και η μεταφορά του οργανικού κλάσματος συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου στο εξεταζόμενο σύστημα κατά 21,9%. Το ποσοστό είναι ιδιαίτερα υψηλό ωστόσο αυτό εξηγείται καθώς τα δρομολόγια που πραγματοποιούν τα απορριμματοφόρα οχήματα περιλαμβάνουν συχνές στάσεις για αντίστοιχη συλλογή μικρών ποσοτήτων απορριμμάτων, όπως αναφέρουν και οι *Moller & Cristensen (2007)*.

Κατά την λειτουργία της μονάδας καταναλώνεται ποσότητα καυσίμου diesel για την διεξαγωγή επιμέρους διεργασιών. Θεωρήθηκε ότι η κατανάλωση καυσίμου diesel είναι 1,06 L diesel/Mg ΑΣΑ, επομένως η συμβολή της κατανάλωσης καυσίμου diesel ανέρχεται σε 11,6% επί των έμμεσων και άμεσων εκπομπών.

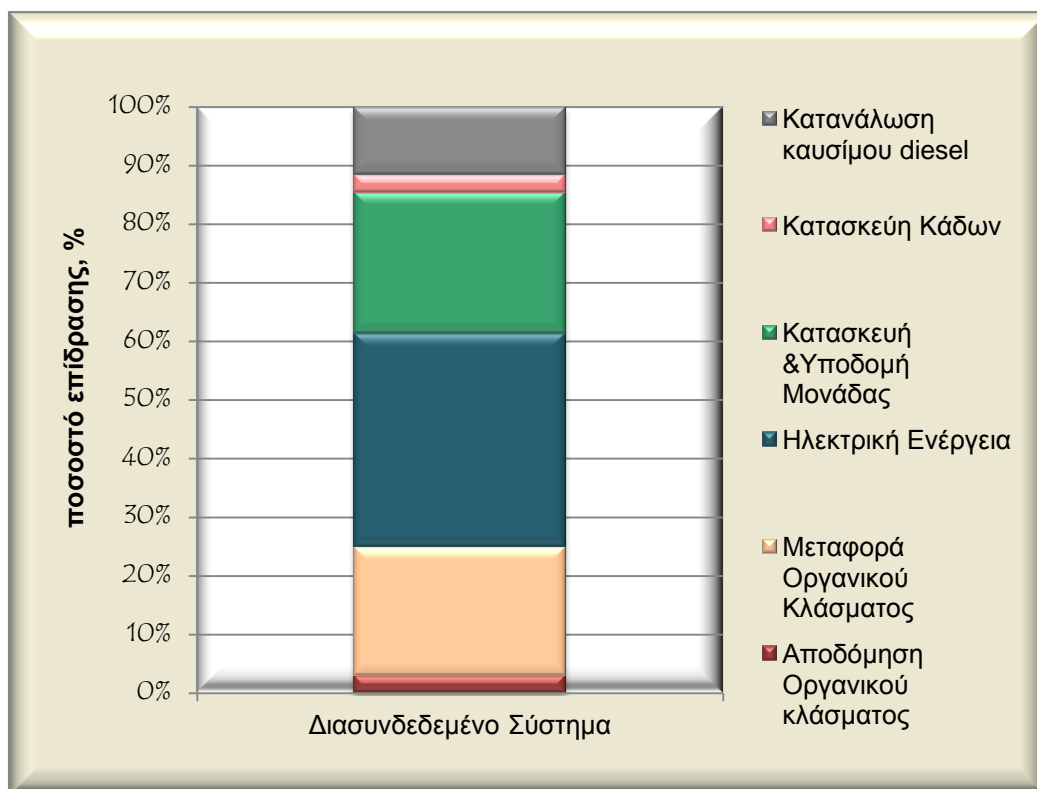
Η αποδόμηση του οργανικού κλάσματος συμβάλει κατά 3,0%. Εάν οι μηχανισμοί λειτουργούσαν ιδανικά τόσο οι εκπομπές μεθανίου όσο και υποξειδίου του αζώτου θα ήτανε μηδαμινές. Κατά την βιολογική αποδόμηση όμως, υπολογίστηκε παραγωγή μεθανίου 0,017 kg/Mg ΑΣΑ και παραγωγή υποξειδίου του αζώτου 0,0012 kg/Mg ΑΣΑ, και λαμβάνοντας υπόψη το ποσοστό επίδρασης αυτών των ΑτΘ, η βιολογική αποδόμηση του οργανικού κλάσματος συμβάλει κατά 0,724 kg CO₂eq/Mg ΑΣΑ.

Έμμεσες Εκπομπές

Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται εντός της μονάδας κομποστοποίησης συμβάλλει στην περίπτωση του Διασυνδεδεμένου Συστήματος κατά 36,4%. Το ποσοστό αυτό είναι ιδιαίτερα υψηλό καθώς η κομποστοποίηση σε κλειστό σύστημα είναι μια διεργασία με υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια. Επιπλέον έχουν υπολογιστεί απώλειες κατά την ηλεκτροδότηση της τάξης του 2%.

Οι ισοδύναμες εκπομπές από την κατασκευή της μονάδας ανέρχονται στα 5,58 kg CO₂eq/Mg ΑΣΑ. Το νούμερο αυτό φαίνεται μικρό σε σχέση με την απαιτούμενη πρωτογενή ενέργεια και τις πρώτες ύλες για την κατασκευή της, καθώς για τον υπολογισμό των εκπομπών από την κατασκευή της μονάδας ελήφθη υπόψη και ο χρόνος ζωής της μονάδας, δηλαδή τα 25 χρόνια. Για την υποδομή θεωρήθηκε πως κατά τη διάρκεια λειτουργίας της μονάδας τα μηχανήματα και ο εξοπλισμός αντικαταστάθηκε μια φορά. Επομένως, η υποδομή της μονάδας και η κατασκευή της συμβάλλουν κατά 24,1%, με την υποδομή να συμβάλει κατά 0,9%.

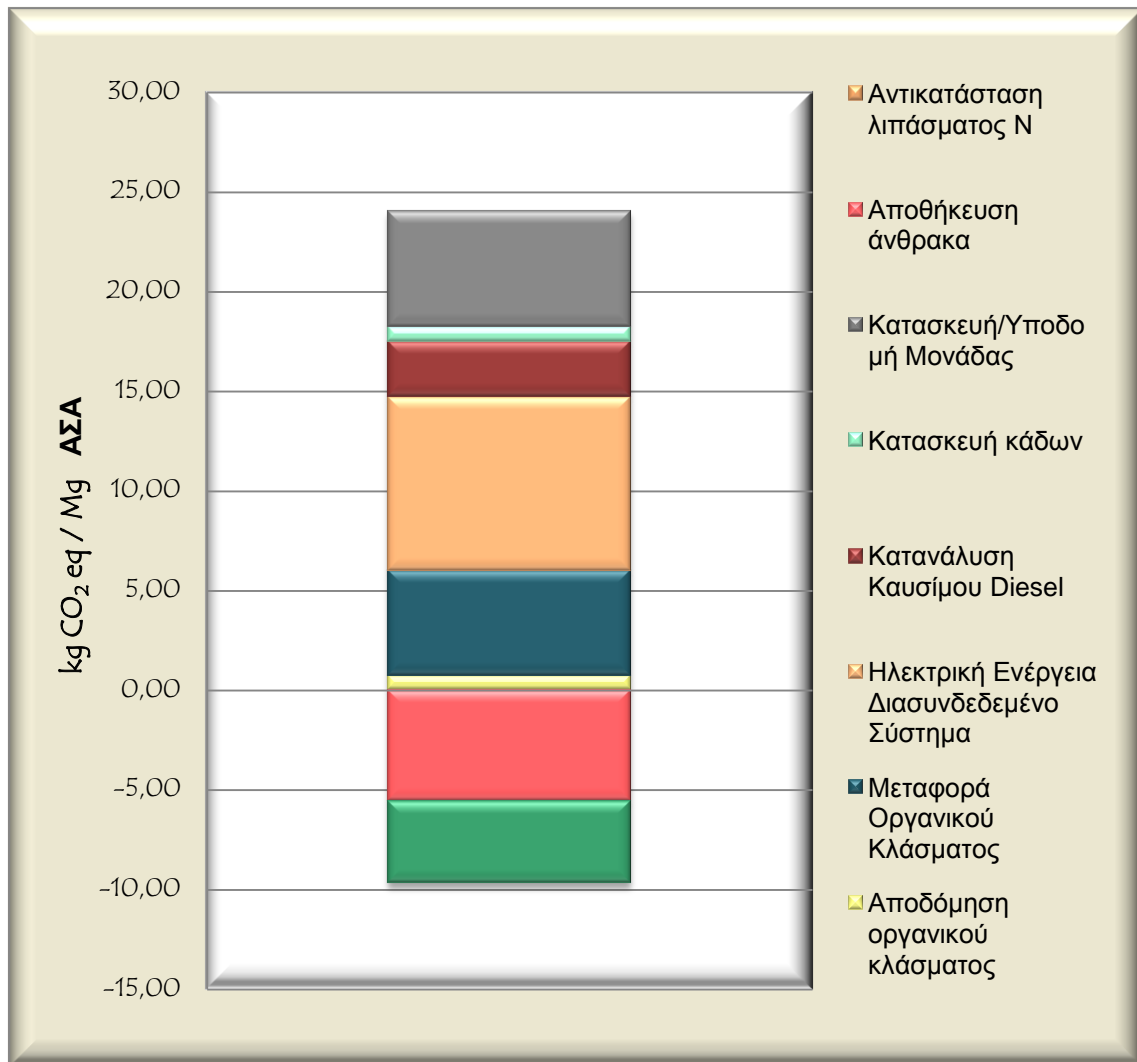
Η κατασκευή των κάδων συμβάλλει κατά 3,0%. Η συμβολή είναι ιδιαίτερα υψηλή καθώς, για την ορθή σύγκριση, η διάρκεια ζωής των κάδων έχουν αναχθεί στα 25 χρόνια λειτουργίας της μονάδας, επομένως μετά το πέρας της ζωής αυτών θεωρείται πως αντικαθίστανται με καινούριους.



Διάγραμμα 5.4. Ποσοστά επίδρασης στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου των επιμέρους εργασιών

Εκπομπές εξοικονόμησης

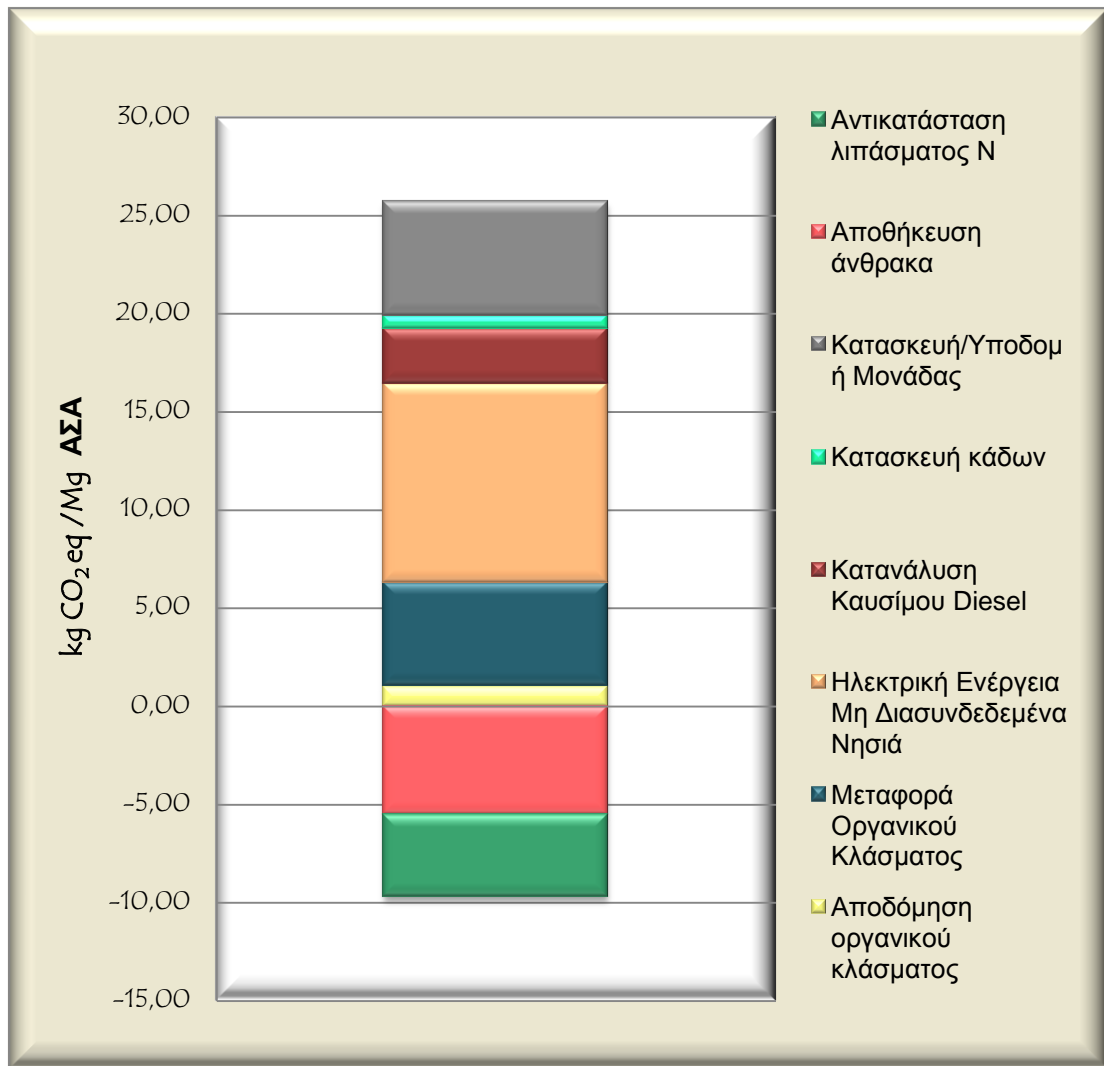
Στο σύστημα της κομποστοποίησης μέσω δυο βασικών μηχανισμών αποδίδονται οι εκπομπές εξοικονόμησης, μέσω της αποθήκευσης άνθρακα και της αντικατάστασης των αζωτούχων λιπασμάτων. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς προκύπτει ότι ένας τόνος οργανικών απορριμμάτων αντικαθιστά 2.57 κιλά N, νούμερο το οποίο έρχονται σε συμφωνία με τον [Boldrin \(2009\)](#). Η αντικατάσταση των αζωτούχων λιπασμάτων (N) συνεισφέρει στο σύστημα κατά 28,19%. Η απαγωγή CO₂ από την ατμόσφαιρα συμβάλει σε μεγάλο ποσοστό, 37,79% καθώς υπολογίστηκε ότι εξοικονομεί 5.54 κιλά CO₂/Mg ΑΣΑ. Τα ποσοστά επίδρασης των εκπομπών εξοικονόμησης υπολογίζονται επί των συνολικών εκπομπών.



Διάγραμμα 5.5. Συνολικές Εκπομπές Συστήματος Κομποστοποίησης, περίπτωση βασικού σεναρίου διασυνδεδεμένου συστήματος

Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά

Στην περίπτωση των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών έχουν εξαχθεί τα ίδια αποτελέσματα όσον αφορά τις διεργασίες με την μεγαλύτερη επίδραση, αλλά με διαφορετικό ποσοστό επίδρασης. Παρατηρείται πως στην περίπτωση των Μη Διασυνδεδεμένων Νήσων η επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι μεγαλύτερη κατά 1,27 kg CO₂eq/Mg ΑΣΑ. Η μεταβολή οφείλεται στην διαφορά του συντελεστή εκπομπής για την παραγωγή μιας ηλεκτρικής kWh, όπου για τα Μη Διασυνδεδεμένα νησιά είναι κατά 16,0% μεγαλύτερος.



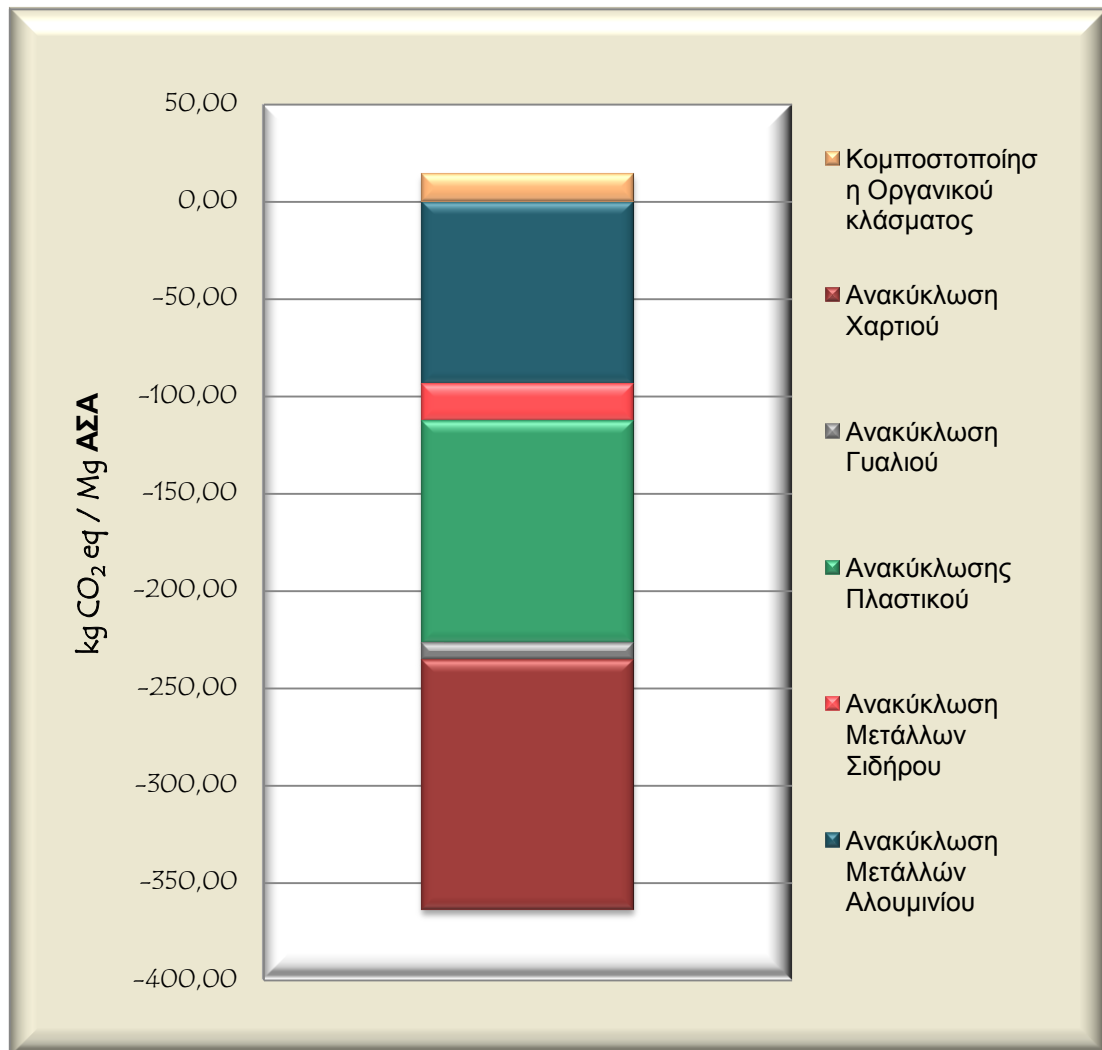
Διάγραμμα 5.6. Συνολικές Εκπομπές Συστήματος Κομποστοποίησης, περίπτωση βασικού σεναρίου μη Διασυνδεδεμένου νησιών

Ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης ΑΣΑ

Λαμβάνοντας υπόψη το ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης των ΑΣΑ, οι εκπομπές εξοικονόμησης είναι πολύ υψηλότερες. Η ανακύκλωση των υπόλοιπων ρευμάτων ΑΣΑ συμβάλει πολύ πιο θετικά στο όλο σύστημα καθώς η πρωτογενής ενέργεια που εξοικονομείται από την ανακύκλωση τους είναι πολύ υψηλή, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μετάλλων αλουμινίου.

Αξίζει να αναφερθεί πως, εάν τα όρια του συστήματος που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική ήταν πιο διευρυμένα και συμπεριελάμβαναν και τις εκπομπές εξοικονόμησης από την εκτροπή των οργανικών απορριμμάτων από τους ΧΥΤΑ, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα θα ήταν ακόμα μικρότερο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα οργανικά

απορρίμματα είναι υπεύθυνα για την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων μεθανίου στους ΧΥΤΑ. Σύμφωνα με μελέτη του Manfredi (2009), ένας εν λειτουργία ΧΥΤΑ δύναται να εκπέμπει 1000 kg CO₂eq/Mg απορριμμάτων. Όταν εφαρμόζεται ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων με εκτροπή των οργανικών ο ΧΥΤ υπολειμμάτων δύναται να συμβάλλει μέχρι και 70 kg CO₂eq/Mg απορριμμάτων, ουσιαστικά δηλαδή να μειώσει τις εκπομπές κατά 930 kg CO₂eq/Mg απορριμμάτων



Διάγραμμα 5.7. Συνολικές Ισοδύναμες Εκπομπές ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης ΑΣΑ, περίπτωση βασικού σεναρίου διασυνδεδεμένου δικτύου

Πίνακας 5.15. Ισοδύναμες Εκπομπές του συστήματος κομποστοποίησης & της ολοκληρωμένης διαχείρισης ΑΣΑ, περίπτωση βασικού σεναρίου

		kg CO ₂ eq / Mg ΑΣΑ
Άμεσες Εκπομπές		
	Αποδόμηση οργανικού κλάσματος	0,72
	Μεταφορά οργανικού κλάσματος στη μονάδα κομποστοποίησης	5,26
	Κατανάλωση καυσίμου diesel	2,78
Έμμεσες Εκπομπές		
	Ηλεκτρική ενέργεια	
	<i>Διασυνδεδεμένο Σύστημα</i>	8,76
	<i>Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά</i>	10,13
	Κατασκευή & Υποδομή μονάδας	5,79
	Κατασκευή κάδων	0,73
Αποφευχθείσες Εκπομπές		
	Αποθήκευση άνθρακα	5,54
	Λίπασμα N	4,14
	<i>Σύστημα διαλογής ανακυκλώσιμων υλικών</i>	
	<i>Χαρτί</i>	128,16
	<i>Πλαστικό</i>	113,68
	<i>Γυαλί</i>	8,51
	<i>Μέταλλα Σιδήρου</i>	19,29
	<i>Μέταλλα Αλουμινίου</i>	94,10

5.3 Ανάλυση ευαισθησίας βάσει τελικής χρήσης εδαφοβελτιωτικού

Το κομπόστ είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο, φώσφορο και κάλλιο και δύναται να αντικαταστήσει συμβατικά-χημικά λιπάσματα με πιο συνήθης την αντικατάσταση των N-P-K λιπασμάτων. Στο Βασικό Σενάριο μελετήθηκε η αντικατάσταση των αζωτούχων λιπασμάτων από την εφαρμογή του κομπόστ. Στην παρούσα ανάλυση εξετάζονται επιπλέον η αντικατάσταση των φωσφορούχων και

καλιούχων λιπασμάτων με βάση την τελική σύσταση του κομπόστ. Στον Πίνακα 5.16 παρουσιάζονται οι εκτρεπόμενες ποσότητες χημικών λιπασμάτων, στον υπολογισμό των οποίων έχει ληφθεί υπόψη η ικανότητα αντικατάστασης για το άζωτο (N), το φώσφορο (P) και το κάλιο (K) 60%, 95% και 100% αντίστοιχα.

Πίνακας 5.16. Δυνατή ποσότητα χημικών λιπασμάτων που αντικαθίστανται από την εφαρμογή του κομπόστ

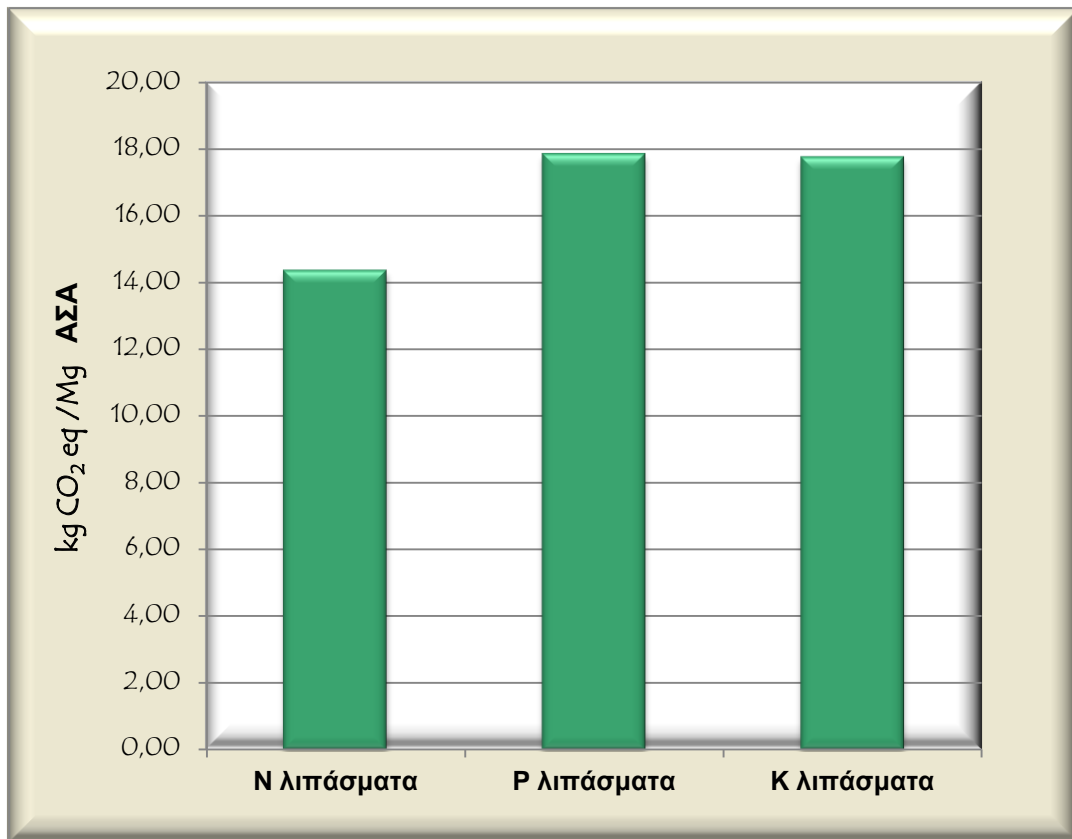
Εισροή (kg)	Παραγόμενο κομπόστ (kg)	Εκτρεπόμενα χημικά λιπάσματα (kg θρεπτικού συστατικού/Mg ΑΣΑ)		
		N	P	K
1000	309	0,34	0,24	0,49

Παρατηρείται πως, η αντικατάσταση των αζωτούχων λιπασμάτων οδηγεί σε μεγαλύτερες εκπομπές εξοικονόμησης παρόλο που η ικανότητα αντικατάστασης είναι η μικρότερη (60%) καθώς οι εκπομπές εξοικονόμησης από την αντικατάστασή τους είναι υψηλότερη. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.17.

Πίνακας 5.17. Εκπομπές εξοικονόμησης από την αντικατάσταση των χημικών λιπασμάτων με κομπόστ

Εκπομπές εξοικονόμησης					
kg CO ₂ eq/kg θρεπτικού συστατικού			kg CO ₂ eq/Mg ΑΣΑ		
N	P	K	N	P	K
12,25	2,72	1,53	4,14	0,65	0,75

Στο Διάγραμμα 5.8 που ακολουθεί αποτυπώνονται οι ισοδύναμες εκπομπές βάσει τελικής χρήσης κομπόστ. Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν και για τα μη Διασυνδεδεμένα Νησιά.



Διάγραμμα 5.8. Ανάλυση Ευαισθησίας βάσει τελικής χρήσης κομπόστ, αντικατάσταση N-P-K λιπασμάτων, περίπτωση Διασυνδεδεμένου συστήματος

5.4 Ανάλυση Ευαισθησίας βάσει σύστασης χαρτιού

Το βοηθητικό υλικό, που θεωρήθηκε ότι συμβάλει στην διαδικασία της κομποστοποίησης στο βασικό σενάριο, είναι τα πράσινα απορρίμματα, λόγω της ευκολίας παραλαβής αυτών, μιας και θεωρείται ότι η οικονομία των ελληνικών νησιών είναι κατά βάση αγροτική, επομένως τα υπολείμματα καλλιεργειών και κλαδεμάτων βρίσκονται άπλετα στην περιοχή. Υπάρχουν μελέτες (Eklinđ, 2000; Komilis & Ham, 2006; Francou, 2008; Hermann, 2011) οι οποίες αναφέρουν την συμβολή του χαρτιού στην διαδικασία της κομποστοποίησης μιας και χαρακτηρίζεται από πλούσιο οργανικό άνθρακα. Υπάρχει η δυνατότητα να αντικατασταθεί μέρος ή όλο το βοηθητικό υλικό (τα πρόσθετα κομποστοποίησης) από χαρτί. Εναλλακτικά λοιπόν, της ανακύκλωσης ρεύμα χαρτιού δύναται να οδηγηθεί στην μονάδα κομποστοποίησης και να υποστεί μαζί με τα υπολείμματα τροφής αερόβια αποδόμηση. Με βάση αυτή την παραδοχή εξετάζονται τρία σενάρια βάσει της σύστασής του προς κομποστοποίηση ρεύματος σε χαρτί. Σημειώνεται ότι το χαρτί αυτό σε σχέση με

το βασικό σενάριο «προέρχεται» από τον αντίστοιχο κάδο ανακύκλωσης και πως σε κάθε σενάριο η εισροή της ποσότητας χαρτιού αντικαθιστά ποσότητα πράσινων απορριμμάτων.

Πίνακας 5.18. Σενάρια βάσει της σύστασης του προς κομποστοποίηση ρεύματος σε χαρτί⁶

Ποσοστό επί της συνολικής ποσότητας ΑΣΑ του καταναλωτικού κοινού				
Εξεταζόμενα ρεύματα	Α Σενάριο	Β Σενάριο	Γ Σενάριο	Δ Σενάριο
Χαρτί προς κομποστοποίηση	0%	10%	20%	40%
Χαρτί προς κάδο ανακύκλωσης	70%	60%	50%	30%

Στον Πίνακα 5.18. συνοψίζονται τα σενάρια. Τα ποσοστά που χρησιμοποιήθηκαν για τα σενάρια Β και Γ ουσιαστικά προσπαθούν να καλύψουν την περίπτωση κατά την οποία, μαζί με τα υπολείμματα κουζίνας δύναται στους κάδους να εμπεριέχονται ποσοστά χαρτιού, πιθανόν από συσκευασίες τροφίμων. Για το Δ σενάριο θεωρήθηκε ένα σχετικά μεγαλύτερο ποσοστό για να γίνει μια πιο ακριβής σύγκριση για το ποια μέθοδος αξιοποίησης του χαρτιού είναι περιβαλλοντικά πιο ωφέλιμη, η κομποστοποίηση ή η ανακύκλωση.

Για τον υπολογιστικό μοντέλο έγινε χρήση σύστασης χαρτιού σύμφωνα με (Yoshida, 2012) και (Hermann, 2011) όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 5.19. Το βασικό πλεονέκτημα του χαρτιού είναι η σύσταση του, καθώς είναι πλούσιο σε οργανικό άνθρακα, έχει πολύ λίγη υγρασία και σε σύγκριση με τα πράσινα απορρίμματα παρουσιάζει ομοιότητες στην σύσταση του στα θρεπτικά συστατικά (βλέπε πίνακα σύστασης πράσινων απορριμμάτων). Το χαρτί ωστόσο, παρουσιάζει και μερικά μειονεκτήματα καθώς χωρίζεται σε κατηγορίες, ανάλογα με την ποιότητα των ινών και την ύπαρξη προσμίξεων (μελάνι, συνδετήρες κλπ) και δύναται να μολύνει το τελικό κομπόστ αλλοιώνοντας την τελική ποιότητα του. Το ειδικό βάρος έχει ληφθεί ίσο με 431 κιλά/κμ (Wrap, 2010).

⁶ Το υπόλοιπο ποσοστό χαρτιού βρίσκεται στο ρεύμα των λοιπών ΑΣΑ

Πίνακας 5.19. Ποιοτική Σύσταση ρεύματος χαρτιού ΑΣΑ προς κομποστοποίηση (Yoshida 2012; Hermann 2011)

Υγρασία	5,0	%
Συνολικά Στερεά	95,0	%
Συνολική Οργανική Ύλη	89,2	% επί ξηρού
Συνολικός Οργανικός C	44,6	% επί ξηρού
Άζωτο	0,5	% επί ξηρού
Φώσφορος (ως P ₂ O ₅)	0,1	% επί ξηρού
Κάλλιο (ως K ₂ O)	0,3	% επί ξηρού

Ακολουθώντας το υπολογιστικό μοντέλο του βασικού σεναρίου για την αποδόμηση του οργανικού κλάσματος προκύπτουν τα χαρακτηριστικά του τελικού κομπόστ για τα εξεταζόμενα σενάρια, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.20. Παρατηρείται πως η είσοδος του χαρτιού αυξάνει τη σύσταση σε άνθρακα, ταυτόχρονα όμως μειώνει τη σύσταση στα θρεπτικά συστατικά. Αύξουσα πορεία ακολουθούν και τα συνολικά στερεά.

Πίνακας 5.20. Σύσταση τελικού κομπόστ για τα εξεταζόμενα σενάρια Α, Β, Γ & Δ.

	Σενάρια				
	A	B	Γ	Δ	
Υγρασία	58,6	56,2	53,8	48,96	%
Συνολικά Στερεά	41,4	43,8	46,2	51,04	%
Άνθρακας	33,26	33,59	33,88	34,41	% επί ξηρού
Άζωτο	1,99	1,91	1,83	1,69	% επί ξηρού
Φώσφορος (ως P ₂ O ₅)	0,74	0,73	0,72	0,71	% επί ξηρού
Κάλλιο (ως K ₂ O)	1,03	1,03	1,03	0,02	% επί ξηρού

Στο Διάγραμμα 5.9. και στον Πίνακα 5.22 συνοψίζονται οι συνολικές ισοδύναμες εκπομπές για το σύστημα της κομποστοποίησης των υπό εξέταση σεναρίων, θεωρώντας πως το παραγόμενο κομπόστ αντικαθιστά αζωτούχα λιπάσματα. Σύμφωνα με το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε υπολογίστηκαν οι εκπομπές των ΑτΘ των επιμέρους εργασιών. Για την

πραγματοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας γίνεται η παραδοχή ότι και στα τέσσερα σενάρια παραμένουν σταθερές και ίσες με το αρχικό σενάριο Α οι εκπομπές που αφορούν την κατασκευή & υποδομή της μονάδας, την κατασκευή των κάδων και το σύστημα συλλογής και μεταφοράς, προκειμένου να μπορούν να συγκριθούν μιας και το ρεύμα χαρτιού που εισάγεται θεωρείται πως για την κατασκευή της μονάδας έχει γίνει προμελέτη για την πιθανή αύξηση της δυναμικότητας της.

Η εισαγωγή του ρεύματος χαρτιού στην διαδικασία της κομποστοποίησης επιδρά θετικά στο συνολικό σύστημα αυτής. Παρόλο που οι διακυμάνσεις στα θρεπτικά συστατικά δεν είναι ιδιαίτερα υψηλές ωστόσο, επειδή το χαρτί χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό ποσοστό σε υγρασία – 10%- οδηγεί στην παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας κομπόστ. Έτσι για τα τέσσερα εξεταζόμενα σενάρια το συνολικά παραγόμενο κομπόστ είναι αυτό που παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.21.

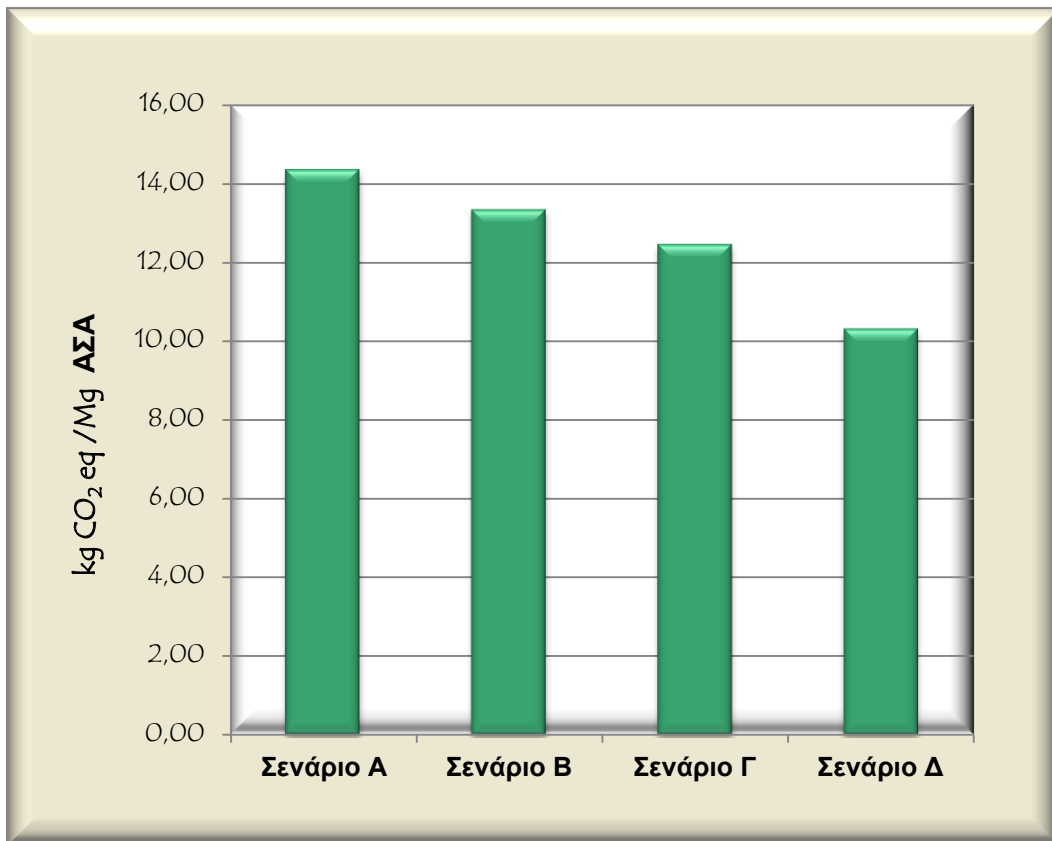
Πίνακας 5.21. Συνολικά Παραγόμενο κομπόστ για τα εξεταζόμενα Σενάρια

	Σενάρια				
	A	B	Γ	Δ	
Παραγόμενο κομπόστ	309	352	398	505	Kg/Mg οργανικό
	80	114	138	199	Kg/Mg ΑΣΑ

Πίνακας 5.22. Ισοδύναμες Εκπομπές Σεναρίων βάσει σύστασης χαρτιού

Σενάρια	Ισοδύναμες Εκπομπές	Διαφορά
	(Kg CO ₂ eq/Mg ΑΣΑ)	
A	14,35	-
B	13,34	-1,42
Γ	12,45	-1,90
Δ	10,31	-4,04

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, παρατηρείται πως η επίδραση του χαρτιού στο σύστημα της κομποστοποίησης είναι σημαντική. Οι εκπομπές μειώνονται στο Σενάριο Β κατά 5,06%, στο Σενάριο Γ κατά 10,88% ενώ στο Σενάριο Δ η μείωση ανέρχεται στο ποσοστό 25,14% σε σχέση με το βασικό Σενάριο-Α.



Διάγραμμα 5.9. Συνολική Περιβαλλοντική Αποτύπωση των υπό εξέταση σεναρίων Α, Β, Γ και Δ για το σύστημα της κομποστοποίησης, περίπτωση Διασυνδεδεμένου Συστήματος

Η μείωση που παρατηρείται στα εξεταζόμενα σενάρια σχετίζεται με το υψηλότερο περιεχόμενο σε άνθρακα του ρεύματος του χαρτιού, το οποίο βρίσκεται σε ποσοστό 44,6%, σε συνδυασμό με το υψηλό ποσοστό σε συνολικά στερεά (90%) σε σχέση με τα αντίστοιχα ποσοστά των θρεπτικών συστατικών των πράσινων απορριμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο βασικό σενάριο Α. Αυτή η διαφορά οδηγεί σε βελτίωση του λόγου άνθρακα προς άζωτο C/N και ως εκ τούτου σε βελτίωση της αποδόμησης του οργανικού υποστρώματος και στην παραγωγή ενός τελικού προϊόντος πλουσιότερου σε οργανικό άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα για το βασικό σενάριο υπολογίστηκε λόγος άνθρακα προς άζωτο C/N ίσος με 24, για το σενάριο Β 25, για το σενάριο Γ ίσος με 28 και τέλος για το σενάριο Δ 30. Παρατηρείται δε πως για το σενάριο Δ ο λόγος C/N είναι ο βέλτιστος. Το υψηλό ποσοστό των συνολικών στερεών οδηγεί και σε μεγαλύτερη παραγωγή ανά τόνο οργανικού, η οποία συνεισφέρει θετικά στα σενάρια με την μεγαλύτερη σύσταση σε χαρτί.

Ωστόσο, εάν λάβουμε υπόψη και τις εκπομπές εξοικονόμησης από την ανακύκλωση ενός τόνου χαρτιού οι διαφορές που προκύπτουν είναι μικρές και, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.9 (Prognos 2008) συμπεραίνεται πως η ανακύκλωση του χαρτιού σε σχέση με την κομποστοποίηση αποτελεί την καταλληλότερη μέθοδο για τη διαχείρισή του.

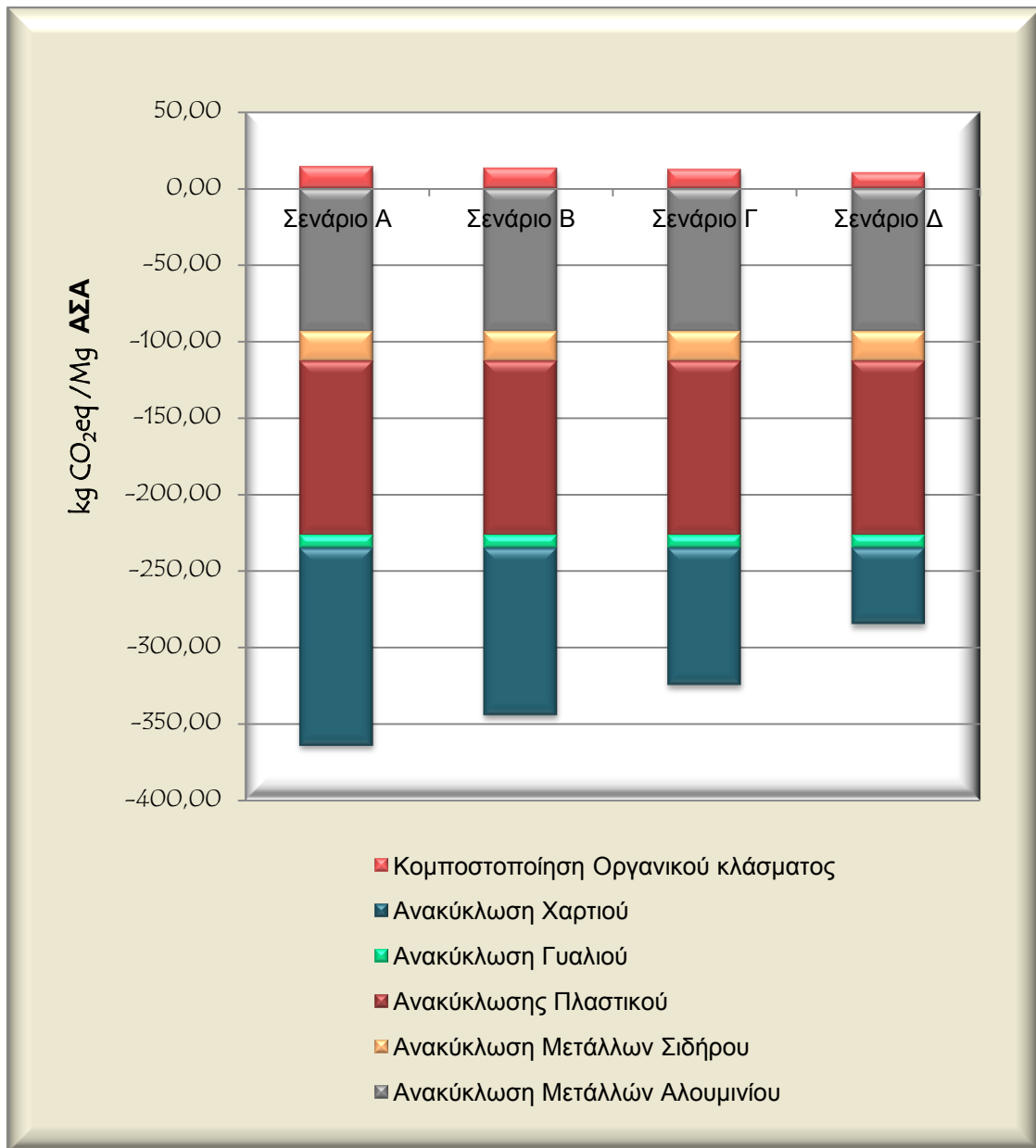
Αυτό γίνεται αντιληπτό μελετώντας και τα αποτελέσματα των ισοδύναμων εκπομπών ΑτΘ, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.23 και στο Διάγραμμα 5.10 που ακολουθούν, σε σχέση με την εκτροπή του φαινομένου του θερμοκηπίου λαμβάνοντας υπόψη, όχι μόνο το σύστημα της κομποστοποίησης αλλά το συνολικό σύστημα στο οποίο διαχειρίζονται και τα υπόλοιπα ρεύματα ΑΣΑ, τα οποία οδηγούνται προς ανακύκλωση, όπου γίνεται φανερό πως το Σενάριο Α (βασικό σενάριο) έχει την μικρότερη επίδραση στο φαινομένου του θερμοκηπίου από τα σενάρια Β, Γ και Δ.

Πίνακας 5.23. Ισοδύναμες Εκπομπές ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης βάσει σύστασης χαρτιού προς κομποστοποίηση

Σενάρια	Ισοδύναμες Εκπομπές	Διαφορά
	(Kg CO ₂ eq/Mg ΑΣΑ)	
A	-349,4	-
B	-330,7	18,7
Γ	-311,9	37,5
Δ	-274,7	74,7

Συμπεραίνεται λοιπόν, πως η ανακύκλωση του χαρτιού σε σχέση με την αερόβια αποδόμηση αποτελεί την καταλληλότερη μέθοδο για τη διαχείρισή του. Ως εκ τούτου όπως γίνεται αντιληπτό η διαλογή στην πηγή των ανακυκλώσιμων υλικών, καθώς επίσης και του οργανικού κλάσματος το οποίο οδηγείται για κομποστοποίηση, αποτελεί την ιδανικότερη μέθοδο διαχείρισης.

Ωστόσο, η επιλογή της καλύτερης μεθόδου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα όρια του εκάστοτε συστήματος. Εάν εξετάζεται μεμονωμένα το σύστημα της κομποστοποίησης τότε σαφώς και η συμβολή του χαρτιού είναι θετική. Στο διευρυμένο όμως σύστημα, της διαχείρισης όλων των ρευμάτων η ανακύκλωση του χαρτιού είναι η βέλτιστη επιλογή



Διάγραμμα 5.10. Συνολική περιβαλλοντική αποτύπωση σεναρίων Α, Β, Γ, Δ – Ανάλυση ευαισθησίας βάσει σύστασης χαρτιού – Διασυνδεδεμένο σύστημα

Κεφάλαιο 6^ο

Αναερόβια χώνευση οργανικού κλάσματος ΑΣΑ

6.1 Δεδομένα & Υπολογιστικές Παραδοχές

6.1.1 Διαχείριση Προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος – Περιγραφή Διαδικασίας

Η μονάδα αναερόβιας χώνευσης διαχειρίζεται το προδιαλεγμένο οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ της εξεταζόμενης νησιωτικής περιφέρειας, πληθυσμού 20.000 κατοίκων, το οποίο συλλέγεται από τους ειδικούς βιοκάδους οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι σε περιφερειακά και κεντρικά σημεία της περιοχής. Τα ειδικά απορριμματοφόρα οχήματα αφού συλλέξουν το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ, το μεταφέρουν στην μονάδα αναερόβιας χώνευσης.

Χώρος Υποδοχής

Αφού τα απορριμματοφόρα οχήματα εισέλθουν στην μονάδα, οδηγούνται σε ειδική γεφυροπλάστιγγα για να ζυγιστούν και να ελεγχθεί μακροσκοπικά το περιεχόμενό τους. Στη συνέχεια, τα οχήματα συλλογής εκφορτώνουν τα απορρίμματα στον χώρο υποδοχής απορριμμάτων ο οποίος διαμορφώνεται σε κλειστό και στεγανό κτίριο, ώστε να αποφευχθούν τυχόν διαρροές, λειτουργώντας ταυτόχρονα και ως προσωρινός αποθηκευτικός χώρος παρέχοντας τη δυνατότητα αποθήκευσης ως τη σταδιακή επεξεργασία τους. Τα παραγόμενα στραγγίσματα οφείλονται να συλλέγονται. Ο χρόνος της προσωρινής αποθήκευσης πρέπει να είναι περιορισμένος λόγω της φύσης των συγκεκριμένων αποβλήτων. Στην περίπτωση κατά την οποία πρόκειται για μονάδα

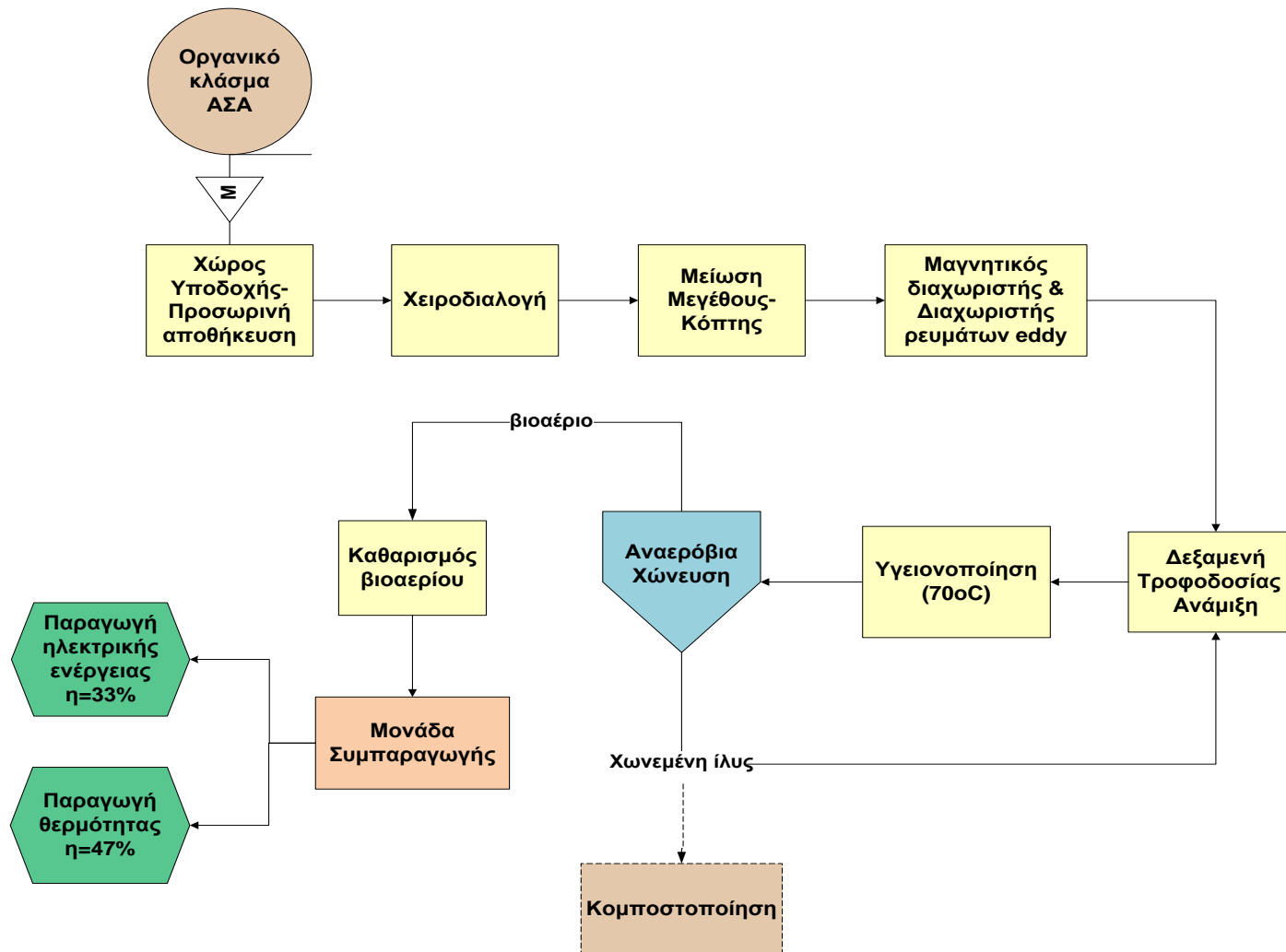
«συγχώνευσης» θα πρέπει να υπάρχει ξεχωριστός χώρος αποθήκευσης για το δεύτερο οργανικό υπόστρωμα και για το βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αστικών απορριμμάτων καθώς κάθε ρεύμα υφίσταται διαφορετική προεπεξεργασία. Τα οχήματα εισέρχονται εξ' ολοκλήρου στο κτίριο υποδοχής του οποίου οι πόρτες παραμένουν ανοιχτές μόνο για όσο χρόνο χρειάζεται να εισέλθει και να εξέλθει το όχημα. Όσο παραμένει εσωτερικά παραμένουν κλειστές για αποφυγή διαρροή οσμών προς το περιβάλλον.

Προεπεξεργασία οργανικού υποστρώματος

Στο τμήμα παραλαβής τα απόβλητα ζυγίζονται και γίνεται ένας πρώτος οπτικός έλεγχος ως προς την σύστασή τους. Ενδεχομένως να χρειαστεί να αποθηκευτούν προσωρινά μέχρι να οδηγηθούν προς επεξεργασία για αυτό ο χώρος προσωρινής αποθήκευσης πρέπει να είναι στεγανός και διαμορφωμένος με κλειστό κτίριο ώστε να αποφευχθούν τυχόν διαρροές.

Από τις ειδικές δεξαμενές του χώρου υποδοχής τα απορρίμματα μεταφέρονται μέσω ταινιοδρόμου με ιμάντα στον χώρο χειροδιαλογής. Αφού πραγματοποιηθεί χειροδιαλογή για την απομάκρυνση πιθανών ογκωδών και ανεπιθύμητων υλικών οδηγούνται σε περιστροφικό κόπτη όπου υπόκεινται σε μείωση μεγέθους τουλάχιστον 40 χιλιοστών (Luc De Baere, 2010) με σκοπό την αύξηση της ειδικής επιφάνειάς τους. Κατόπιν, οδηγούνται σε μαγνητικό ιμάντα και ιμάντα δινоруεμάτων για την απομάκρυνση πιθανών σιδηρούχων και μη σιδηρούχων προσμίξεων.

Αφού ολοκληρωθεί η μηχανική προ-επεξεργασία το οργανικό κλάσμα τοποθετείται σε δεξαμενή αποθήκευσης, η οποία εξασφαλίζει τη συνεχή παροχή της οργανικής ύλης στην διαδικασία της χώνευσης. Από την δεξαμενή αποθήκευσης το κλάσμα οδηγείται στον τροφοδότη. Στον τροφοδότη το οργανικό υπόστρωμα αναμιγνύεται είτε με νερό, είτε με το υγρό ανακτηθέν υπόλειμμα –χωνεμένη ιλύς– από τις προηγούμενες διαδικασίες για την ρύθμιση της υγρασίας και τη δημιουργία ενός ομοιογενούς μίγματος. Στις μονάδες αναερόβιας χώνευσης υπάρχει απαίτηση για υγειονομοποίηση του οργανικού υποστρώματος για αυτό μετά τον τροφοδότη το ομοιογενές υλικό οδηγείται στην δεξαμενή παστερίωσης όπου για μία (1) ώρα θερμαίνεται στους 70°C για την θανάτωση των παθογόνων μικροοργανισμών.



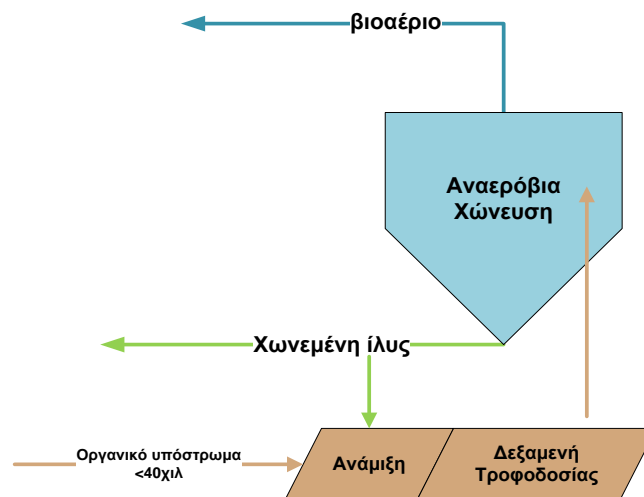
Σχήμα 6.2. Σχηματική απεικόνιση διαγράμματος ροής μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης

6.1.2 Αναερόβια αποδόμηση οργανικού κλάσματος

Η μονάδα αποτελείται από ένα κατακόρυφο χωνευτήρα, κυλινδρικού σχήματος με όγκο $46\text{m}^3/\text{Mg}$ ΑΣΑ/ημέρα. Είναι ενός σταδίου χωνευτήρας, ο οποίος λειτουργεί με υψηλή συγκέντρωση πτητικών στις θερμοφιλικές θερμοκρασίες με υδραυλικό χρόνο παραμονής 21 ημέρες.

Το προθερμασμένο μίγμα οργανικών και χωνεμένης ιλύος, από τη δεξαμενή παστερίωσης, διοχετεύεται στην κορυφή του χωνευτήρα μέσω αντλιών τροφοδοσίας και μετακινείται προς τα κάτω μέχρι τη βάση. Χρειάζεται περίπου δύο με τέσσερις ημέρες, ανάλογα με το οργανικό φορτίο που τροφοδοτείται, για να φτάσει το οργανικό στη βάση του χωνευτήρα υπό την επίδραση της βαρύτητας και μόνο (Luc De Baere, 2010). Η διαμόρφωση της βάσης είναι κωνική για να διευκολύνεται η απομάκρυνση της χωνεμένης ιλύος από τον χωνευτήρα. Δεν υπάρχει ανάδευση στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, περά από αυτήν που προκαλείται από την κίνηση των αποβλήτων προς τα κάτω, και την κίνηση των φυσαλίδων των βιογενών αερίων που παράγονται, προς τα πάνω.

Το παραγόμενο βιοαέριο υψώνεται και εξέρχεται από τον χωνευτήρα διαμέσου της οροφής και κατευθύνεται προς την δεξαμενή αποθήκευσης – αεροφυλάκιο. Η χωνεμένη ιλύς εξάγεται από τη βάση του χωνευτήρα μέσω ειδικών μηχανημάτων. Ένα μεγάλο κλάσμα της ιλύος μεταφέρεται στην αντλία ανάμειξης, όπου εκεί αναμειγνύεται με την νέα τροφοδοσία προκειμένου η δεύτερη να έρθει στην θερμοκρασία λειτουργίας. Ουσιαστικά ανακυκλώνεται και επανεισάγεται στην διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης.



Σχήμα 6.2. Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας που πραγματοποιείται στον χωνευτήρα

Για την παραγωγή του μεθανίου δημιουργήθηκε προσεγγιστικό υπολογιστικό μοντέλο με βασική παράμετρο το οργανικό φορτίο. Η δημιουργία του βασίστηκε στα αποτελέσματα του Kastner (2012), ο οποίος καταγράφει, μετά από μια σειρά πειραμάτων, την απόδοση

παραγωγής μεθανίου μέσω της αναερόβιας χώνευσης των οργανικών απορριμμάτων σε δυο είδη αντιδραστήρων: συνεχούς και ασυνεχούς ροής. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό βασίστηκαν οι υπολογισμοί του δυναμικού παραγωγής μεθανίου και δημιουργήθηκαν εξισώσεις που προσομοιάζουν την απόδοση του χωνευτήρα. Λαμβάνοντας τα αποτελέσματα από τον χωνευτήρα συνεχούς ροής, υπολογίστηκε το παραγόμενο μεθάνιο.

Τα συνολικά πτητικά που εμπεριέχονται στο οργανικό υπόστρωμα υπολογίστηκαν 0,30 kg/kg οργανικού υποστρώματος. Το οργανικό φορτίο, για χρόνο παραμονής 21 ημέρες, υπολογίστηκε 1,82 κιλά VS/m³ χωνευτήρα/ημέρα. Το μοντέλο, εισάγοντας αυτά τα δεδομένα δίνει απόδοση παραγωγής του μεθανίου ίση με 393m³ CH₄/Mg VS. Ωστόσο, σύμφωνα με (Dong-jie Niu, 2012) και (Møller, 2009), οι συνθήκες στον χωνευτήρα δεν είναι πάντα οι ιδανικές, καθώς επίσης, υπάρχει περιορισμός σε σχέση με τον υδραυλικό χρόνο παραμονής καθαρά λόγω οικονομικών παραγόντων. Επομένως, το μεθάνιο δεν δύναται να ανακτηθεί πλήρως. Προτείνεται λοιπόν, από (Møller, 2009), με βάση το ποσοστό ανάκτησης του μεθανίου, το παραγόμενο μεθάνιο:

$$CH_{4,production} = VS_{input} \times CH_{4,potential} \times \%_{potential_reached} \quad (1)$$

, όπου:

- VS_{input} : τα συνολικά πτητικά που εισάγονται στον χωνευτήρα [kg VS/kg οργανικού]
- $CH_{4,potential}$: η δυναμικότητα παραγωγής μεθανίου [m³ CH₄/Mg VS]
- $\%_{potential_reached}$: ποσοστό ανάκτησης μεθανίου [%]

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το μεθάνιο που εν τέλει ανακτάται ανέρχεται σε 24 Nm³ CH₄/Mg ΑΣΑ. Θεωρώντας πως το βιοαέριο περιέχει 64% μεθάνιο και 34% διοξείδιο του άνθρακα, υπολογίζεται πως το παραγόμενο βιοαέριο από τον χωνευτήρα είναι 38 Nm³ βιοαερίου/Mg ΑΣΑ. Το υπόλοιπο ποσοστό (2%) εμπεριέχει μικρά ποσοστά από υδροθείο, άζωτο, νερό, οξυγόνο, αμμωνία και σιλοξάνες (Starr, 2012). Η θερμογόνο ικανότητα του βιοαερίου υπολογίζεται ίση με 23 MJ/Nm³. Τα κύρια χαρακτηριστικά του παραγόμενου βιοαερίου πλησιάζουν τα χαρακτηριστικά του Ελβετικού βιοαερίου σύμφωνα με (Jungbluth, 2007).

Πίνακας 6.1. Αποτελέσματα παραγωγής βιοαερίου

Απόδοση Παραγωγής μεθανίου	393	$m^3 CH_4/Mg VS$
Ποσοστό ανάκτησης μεθανίου	80	%
Παραγόμενο μεθάνιο	24	$Nm^3 CH_4/Mg ΑΣΑ$
Παραγόμενο βιοαέριο	38	$Nm^3 βιοαερίου/Mg ΑΣΑ$
Κατώτερη Θερμογόνος δύναμη	23	MJ/Nm^3

Διαρροές/Διαφυγές μεθανίου

Κατά τη διάρκεια των επιμέρους εργασιών και διεργασιών σε μια μονάδα αναερόβιας χώνευσης εντοπίζονται διαρροές βιοαερίου σε διάφορα στάδια (Yoshida, 2012), (Moller, 2009). Οι διαρροές μεθανίου εντοπίζονται κυρίως κατά τη φάση συντήρησης καθώς και από τους αγωγούς και τις βαλβίδες του συστήματος. Επομένως διαρροές έχουν μετρηθεί:

- Στην δεξαμενή αποθήκευσης
- Στον χωνευτήρα
- Στην φάση καθαρισμού του βιοαερίου
- Στους αγωγούς

Ο IPCC δίνει μια διακύμανση μεταξύ 0 και 10% του παραγόμενου μεθανίου, ταυτόχρονα όμως τονίζει πως εάν σε μια μονάδα αναερόβιας χώνευσης εξασφαλίζεται ότι οι ακούσιες εκπομπές μεθανίου καίγονται σε δίαυλο βιοαερίου, τότε οι εκπομπές μεθανίου λόγω διαρροών είναι μηδαμινές (Eggleston, 2006). Άλλες μελέτες εκτιμούν ότι οι διαρροές είναι της τάξης του 3% επί του παραγόμενου μεθανίου (Reeh & Møller, 2003). Σύμφωνα με (Jury, 2010) οι απώλειες κατά την χώνευση και την αποθείωση κυμαίνονται μεταξύ 1 με 4%, ωστόσο οι απώλειες κατά τον καθαρισμό (αποθείωση) δεν ξεπερνούν το 2%. Στην παρούσα διπλωματική έχουν ληφθεί απώλειες στην δεξαμενή αποθήκευσης σε ποσοστό 0,8%, στον χωνευτήρα κατά 1%, στην μονάδα αποθείωσης κατά 1,0% και στους αγωγούς κατά 0,2%.

Οι διαρροές αυτές θεωρείται ότι διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα συμβάλλοντας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Στον Πίνακα 6.2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι διαφυγές μεθανίου στα διαφορετικά στάδια της παραγωγικής διαδικασίας.

Πίνακας 6.2. Διαρροές μεθανίου κατά τη διαδικασία παραγωγής

	Απώλειες (%)	Μεθάνιο (Nm ³ /Mg ΑΣΑ)
Χωνευτήρας	1	0,38
Σύστημα αγωγών	0,2	0,08
Δεξαμενή Αποθήκευσης	0,8	0,30
Αποθείωση	1	0,38

6.1.3 Τελική χρήση βιοαερίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Στο βασικό σενάριο η παραγωγή της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας γίνεται σε μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας με βάση παλινδρομική μηχανή. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιείται καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου για τις ανάγκες της μονάδας και η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια να πωλείται στο εθνικό δίκτυο.

Οι περισσότερες μηχανές αερίου έχουν μέγιστα όρια για το υδρόθειο, τους αλογονικούς υδρογονάνθρακες και τις ενώσεις οργανοπυριτίου (σιλοξάνες) στο βιοαέριο. Για την καύση του λοιπόν, σε μια παλινδρομική μηχανή πρέπει από τη σύστασή του να αφαιρεθεί το υδρόθειο (H₂S), διότι σχηματίζει θειώδες οξύ στο συμπύκνωμα το οποίο είναι εξαιρετικά διαβρωτικό καθώς επίσης να συμπυκνωθούν οι υδρατμοί στο ακατέργαστο αέριο, διότι μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα. Με την απομάκρυνση νερού απομακρύνεται επίσης ένα μεγάλο ποσοστό υδρόθειου. Επομένως, το βιοαέριο συνίσταται να υποβάλλεται σε καθαρισμό που περιλαμβάνει: συμπύκνωση και αφαίρεση των σωματιδίων, συμπίεση, ψύξη και ξήρανση.

Κατά την καύση του βιοαερίου το μεθάνιο μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα και ενέργεια. Ωστόσο, η διεργασία δεν έχει 100% απόδοση με αποτέλεσμα να παραμένει ποσοστό του μεθανίου άκαυστο και να συμβάλλει στο φαινόμενο της εκτροπής του θερμοκηπίου.

Μια μέση τιμή συντελεστή εκπομπής για μηχανές βιοαερίου –μικρότερες των 25MW– σύμφωνα με μετρήσεις σε 13 μονάδες στη Δανία, είναι 323 gr CH₄/GJ βιοαέριο για το μεθάνιο και 0,5gr N₂O/GJ βιοαερίου για το υποξείδιο του αζώτου (Nielsen, 2008). Επιπλέον, για τις ίδιες μονάδες, υπολογίστηκε και ο συντελεστής εκπομπής του διοξειδίου του άνθρακα 83,6 gr CO₂/GJ βιοαερίου, ωστόσο δεν συνυπολογίζεται στις ισοδύναμες εκπομπές μιας και ο άνθρακας που εμπεριέχεται στα οργανικά απορρίμματα προέρχεται από την διαδικασία της φωτοσύνθεσης και για αυτό πρόκειται για βιογενή άνθρακα (Yoshida, 2012). Η έκλυση του οργανικού άνθρακα λοιπόν, με τη μορφή του διοξειδίου του άνθρακα, δεν συμβάλλει στην αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα που

συμβάλουν στο φαινόμενο όξυνσης του φαινομένου του θερμοκηπίου (Gentil, 2009; EpE 2010).

Για τους υπολογισμούς θεωρήθηκε ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης 33% και θερμικό 47% (Poeschl, 2012) με ολικό συμπαραγωγικό βαθμό απόδοσης 80%.

Πίνακας 6.3. Συντελεστές εκπομπής από την καύση βιοαερίου σε μηχανή βιοαερίου

Καύση βιοαερίου σε (< 25MW)	83,6	gr CO ₂ /GJ βιοαερίου
	323	gr CH ₄ /GJ βιοαερίου
	0,5	gr N ₂ O/GJ βιοαερίου

6.1.4 Κατανάλωση Ενέργειας, Υποδομή Μονάδας & Εξοπλισμός

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία και τις υπάρχουσες μονάδες αναερόβιας χώνευσης, η μονάδα συμπαραγωγής αρχικά δύναται να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες της μονάδας για την λειτουργία των επιμέρους μηχανημάτων και την κάλυψη των θερμικών της αναγκών (Stucki, 2011).

Στην παρούσα διπλωματική, στο βασικό σενάριο λαμβάνεται πως οι ηλεκτρικές & θερμικές καταναλώσεις ανέρχονται στο 15% επί της συνολικής παραγόμενης ενέργειας και στο 20% αντίστοιχα και θεωρείται πως καλύπτονται εξ' ολοκλήρου από την καύση του βιοαερίου στη μονάδα ΣΗΘ. Επιπλέον, θεωρείται πως το καθαρό μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας διοχετεύεται στο δίκτυο ενώ η πλεονάζουσα θερμική ενέργεια απορρίπτεται στο περιβάλλον χωρίς εκμετάλλευση.

Για τη λειτουργία των κινητών μονάδων & μηχανημάτων διαχείρισης απορριμμάτων, καταναλώνεται επιπλέον και καύσιμο diesel εντός της μονάδας. Μια τυπική κατανάλωση καυσίμου diesel είναι 1,3 κιλά ή περίπου 0,41 L diesel/Mg ΑΣΑ (Fisher, 2006).

Θεωρείται ότι, κατά την καύση του καυσίμου diesel παράγονται 2,62 κιλά CO₂eq/L diesel ενώ επιπλέον οι εκπομπές για την παροχή του καυσίμου diesel είναι 0,5 kg CO₂eq/L diesel (Fruergaard, 2009). Ο υπολογισμός βασίστηκε στους δείκτες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4. Η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου έχει ληφθεί 36 MJ/L..

Πίνακας 6.4. Εκπομπές κατά την καύση καυσίμου diesel

Εκπομπές κατά την καύση καυσίμου Diesel θερμογόνου ικανότητας 36MJ/Litre	72,098	gr CO ₂ /MJ diesel
	0,003	gr CH ₄ /MJ diesel
	0,002	gr N ₂ O/MJ diesel

Το μη βιογενές διοξείδιο του άνθρακα που εκλύεται σχετίζεται με την κατανάλωση καυσίμου για τη για την κίνηση των κινητών μηχανημάτων διαχείρισης απορριμμάτων εντός της μονάδας, καθώς και με την καύση του βιοαερίου για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι υπολογίζονται με βάση τη σχέση:

$$CO_{2, fossil} = (EF_e \times EC_e) + (EF_{d1} + EF_{d2}) \times EC_d \quad (2)$$

, όπου:

- EF_e : συντελεστής εκπομπής από την καύση του βιοαερίου εντός της μονάδας [kg CO₂/ kWh_e]
- EF_{d1} : συντελεστής εκπομπής από την κατανάλωση καυσίμου diesel [kg CO₂/L diesel]
- EF_{d2} : ο συντελεστής εκπομπής από την παροχή του καυσίμου diesel [kg CO₂/L diesel]
- EC_e : η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια [kWh_e/Mg ΑΣΑ]
- EC_d : η απαιτούμενη παροχή καυσίμου diesel για κάλυψη ίδιων καταναλώσεων [L diesel/Mg ΑΣΑ]

Πίνακας 6.5. Συντελεστές εκπομπών για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών

EF_e	0,076	kg CO ₂ eq/ kWh _e
EF_{d1}	2,62	kg CO ₂ eq/L diesel
EF_{d2}	0,5	kg CO ₂ eq/L diesel
EC_e	77	kWh _e /Mg ΑΣΑ
EC_d	0,45	L diesel/Mg ΑΣΑ

Τα στοιχεία για τις εκπομπές σχετικά με την κατασκευή της μονάδας αλλά και των μηχανημάτων λαμβάνονται από την (Poeschl, 2012). Οι εκπομπές ΑτΘ καταγράφονται στον Πίνακα 6.6

Πίνακας 6.6. Εκπομπές κατά τη φάση της κατασκευής και υποδομής της μονάδας

Εκπομπές				
CO ₂ ,μη βιογενές	22	gr CO ₂ /Mg	ΑΣΑ	Martina Poeschl, 2012
CH ₄ ,μη βιογενές	1629	gr CH ₄ /Mg	ΑΣΑ	Martina Poeschl, 2012
N ₂ O	54	gr N ₂ O/Mg	ΑΣΑ	Martina Poeschl, 2012

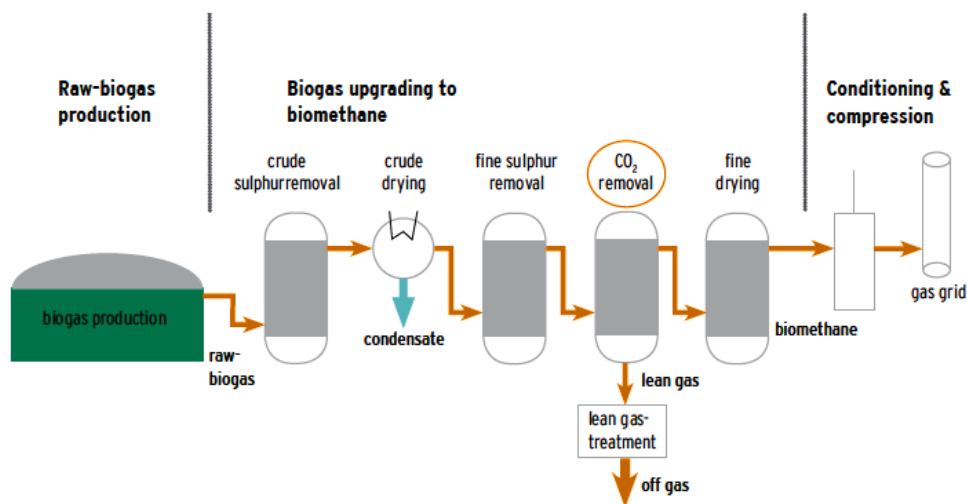
6.1.5 Αναβάθμιση βιοαερίου σε βιομεθάνιο

Το βιοαέριο μπορεί να διανεμηθεί μέσω των υπάρχοντων δικτύων φυσικού αερίου και να χρησιμοποιηθεί για τους ίδιους σκοπούς με το φυσικό αέριο. Πριν από τη χρησιμοποίησή του για έγχυση στο δίκτυο φυσικού αερίου το βιοαέριο υπόκειται μία διαδικασία αναβάθμισης, όπου αφαιρούνται όλοι οι μολυσματικοί παράγοντες και το διοξείδιο του άνθρακα και ενισχύεται το περιεχόμενό του σε μεθάνιο, από το 64% σε 95–99,5%. Το αναβαθμισμένο βιοαέριο ονομάζεται βιομεθάνιο.

Διάφορες τεχνολογίες μπορούν να εφαρμοστούν για την αφαίρεση των μολυσματικών παραγόντων και για την αύξηση της περιεκτικότητας του βιοαερίου σε μεθάνιο. Η αφαίρεση του διοξειδίου του άνθρακα πρέπει να γίνεται προκειμένου να επιτευχθεί ο απαιτούμενος δείκτης Wobbe του αερίου, ο οποίος σύμφωνα με τις απαιτήσεις της (ΔΕΣΦΑ) κυμαίνεται μεταξύ 46,8–58,46 MJ/Nm³. Κατά την αφαίρεση του διοξειδίου του άνθρακα από το βιοαέριο αφαιρούνται επίσης και μικρές ποσότητες μεθανίου (CH₄). Είναι σημαντικό να κρατηθούν χαμηλές αυτές οι απώλειες μεθανίου, τόσο για οικονομικούς όσο και για περιβαλλοντικούς λόγους. Υπάρχουν δύο συνήθεις μέθοδοι για την αφαίρεση του διοξειδίου του άνθρακα, η απορρόφηση (καθαρισμός μέσω ύδατος ή οργανικού διαλύτη) και η προσρόφηση (προσρόφηση με μετάπτωση πίεσης, PSA). Άλλες τεχνικές, λιγότερο συνηθισμένες, είναι ο διαχωρισμός μέσω μεμβρανών και ο κρυογενής διαχωρισμός. Στον Πίνακα 6.7 παρουσιάζονται οι ενεργειακές απαιτήσεις 3 τεχνολογιών αναβάθμισης του βιοαερίου σε βιομεθάνιο καθώς και η απόδοσή τους και στο Σχήμα 6.3 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της αναβάθμισης σε βιομεθάνιο.

Πίνακας 6.7. Ενεργειακές ανάγκες για την αναβάθμιση του βιοαερίου

	Απορρόφηση μέσω ύδατος	Προσρόφηση με μετάπτωση πίεσης (PSA)	Διαχωρισμός με μεμβράνες	Πηγή
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (MJ/m ³ biogas)	0,97 – 1,08	0,72 – 0,97	1,8	Pertl, 2012
Ανάκτηση μεθανίου (%)	98,5	83,0 – 99,0	90,0 – 94,0	Electrigaz Technologies, 2008
Απώλειες μεθανίου (%)	1,5	17,0 – 1,0	10,0 – 6,0	Electrigaz Technologies, 2008
Καθαρότητα μεθανίου (%)	98,0	97,5	85,0	Electrigaz Technologies, 2008
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για συμπίεση (6bar) & ξήρανση (MJ/m ³ biogas)	0,17	0,62	-	Pertl, 2012



Σχήμα 6.3. Σχηματική Απεικόνιση της αναβάθμισης του βιοαερίου σε βιομεθάνιο.

6.1.6 Διαχείριση Χωνεμένης ιλύος

Η χωνεμένη ιλύς, αφού ανακτηθεί από την βάση του χωνευτήρα, ανακυκλώνεται και επανακυκλοφορεί την διαδικασία της χώνευσης. Το κομμάτι που δεν χρησιμοποιεί απορρίπτεται ως απόβλητο. Εναλλακτικά, δύναται να υποστεί αερόβια αποδόμηση, δηλαδή κομποστοποίηση προς παραγωγή εδαφοβελτιωτικού για εφαρμογή στο έδαφος, καθώς κύριο χαρακτηριστικό της χωνεμένης ιλύος είναι η υψηλή περιεκτικότητα της σε άνθρακα και άζωτο.

6.1.7 Απορρίμματα μονάδας Αναερόβιας Χώνευσης

Η υπό εξέταση μονάδα παράγει τρία είδη απορριμμάτων: τα ανακτηθέντα υλικά κατά την φάση της προεπεξεργασίας, το κλάσμα της χωνεμένης ιλύς που δεν επαναχρησιμοποιείται καθώς και τα μηχανήματα κατά το τέλος της ζωής του. Από την μονάδα τα απορρίμματα αυτά οδηγούνται σε Χώρο Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων, ωστόσο, η μεταφορά και η διαχείριση αυτών των ρευμάτων δεν λαμβάνεται υπόψη στο εξεταζόμενο σύστημα.

6.2 Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

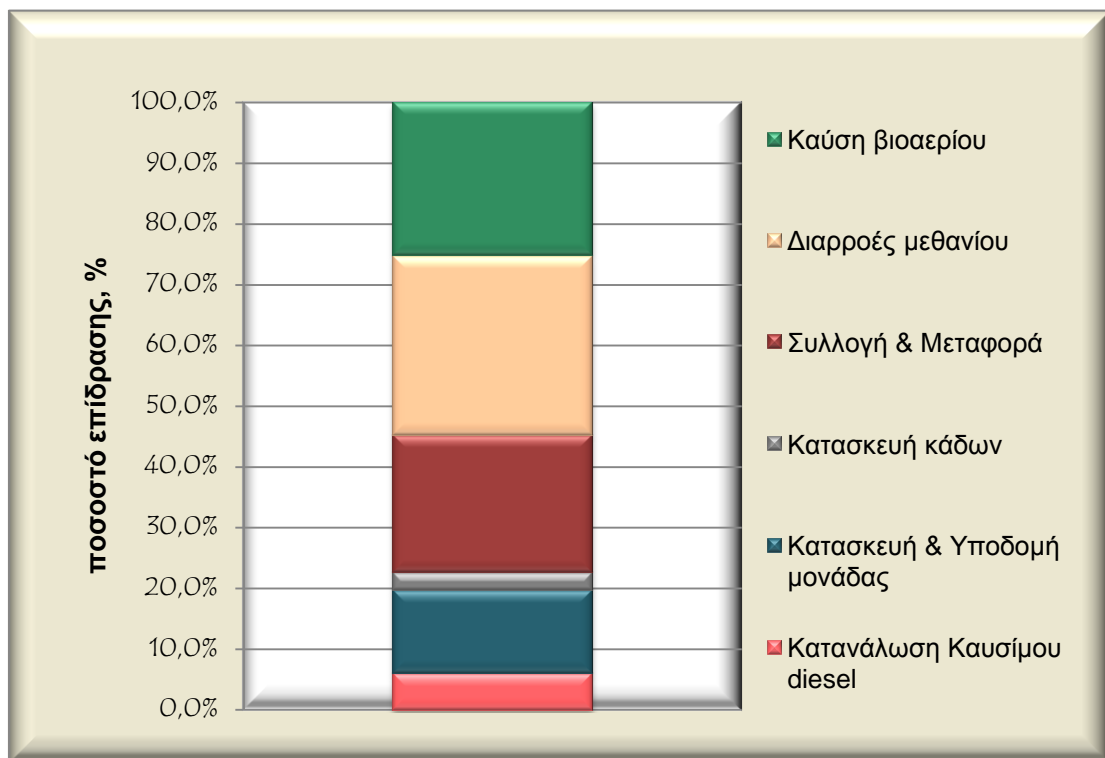
6.2.1 Βασικό Σενάριο

Στο βασικό σενάριο, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 4, εφαρμόζεται διαλογή στην πηγή έξι (6) ρευμάτων των ΑΣΑ με τέσσερις αντίστοιχους κάδους. Σκοπός είναι να εκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος της αναερόβιας χώνευσης, ταυτόχρονα όμως και της ολοκληρωμένης διαχείρισης των ρευμάτων των ΑΣΑ. Η ροή των αστικών απορριμμάτων του καταναλωτικού κοινού για το εξεταζόμενο σύστημα, θεωρείται ίση με 25 Mg ΑΣΑ /ημέρα.

Όσον αφορά το σύστημα της αναερόβιας χώνευσης και μόνο, στο βασικό σενάριο θεωρείται ότι το βιοαέριο αξιοποιείται εντός της μονάδας, σε μονάδα Συμπαραγωγής Ηλεκτρικής & Θερμικής ενέργειας με ηλεκτρικό και θερμικό βαθμό απόδοσης 33% και 47% αντίστοιχα. Οι ηλεκτρικές & θερμικές καταναλώσεις καλύπτονται εξ' ολοκλήρου από την καύση του βιοαερίου εντός της μονάδας. Οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα ανέρχονται στο 15% και στο 25% αντίστοιχα επί της συνολικής παραγόμενης ενέργειας. Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται κατά 100% στο εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ αντίθετα η πλεονάζουσα θερμική ενέργεια θεωρείται ότι δεν αξιοποιείται περαιτέρω.

Η συμβολή της αναερόβιας χώνευσης σε βιομηχανική κλίμακα στην εκτροπή του φαινομένου του θερμοκηπίου αντικατοπτρίζεται στα Διαγράμματα 6.1 και 6.2, ενώ τα αναλυτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6. 8.

Οι τρεις διεργασίες που συμβάλλουν περισσότερο στο σύστημα για την περίπτωση του Διασυνδεδεμένου Συστήματος είναι, κατά σειρά, οι διαρροές μεθανίου, η καύση του βιοαερίου και τέλος το σύστημα μεταφοράς και συλλογής των οργανικών απορριμμάτων. Τα ποσοστά προκύπτουν επί του συνόλου των έμμεσων και άμεσων εκπομπών του συστήματος της αναερόβιας χώνευσης, δηλαδή στα ποσοστά επίδρασης δεν συνυπολογίζονται οι εκπομπές εξοικονόμησης.



Διάγραμμα 6.1. Συνολική Επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, περίπτωση Διασυνδεδεμένου Συστήματος

Άμεσες Εκπομπές

Η συλλογή και η μεταφορά του οργανικού κλάσματος συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου στο εξεταζόμενο σύστημα κατά 22,7%. Το ποσοστό είναι ιδιαίτερα υψηλό ωστόσο αυτό εξηγείται, καθώς τα δρομολόγια που πραγματοποιούν τα απορριμματοφόρα οχήματα περιλαμβάνουν συχνές στάσεις για αντίστοιχη συλλογή μικρών ποσοτήτων απορριμμάτων, όπως αναφέρουν και οι [Moller & Cristensen \(2007\)](#).

Κατά την λειτουργία της μονάδας καταναλώνεται ποσότητα καυσίμου diesel για την διεξαγωγή επιμέρους διεργασιών & η συμβολή της κατανάλωσης καυσίμου diesel ανέρχεται σε 6,0%.

Οι διαφυγές του μεθανίου συμβάλλουν κατά 29,4%. Οι ισοδύναμες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανέρχονται σε 6,82 kg CO₂eq/Mg ΑΣΑ. Το ποσοστό αυτό είναι τόσο μεγάλο καθώς το μεθάνιο έχει συντελεστή δυναμικού σε σχέση με την επίδραση του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά 21 φορές.

Η καύση του βιοαερίου στην μονάδα ΣΗΘ για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της μονάδας και για την έγχυση στο Δίκτυο συμβάλλει σε ποσοστό 25,3%.

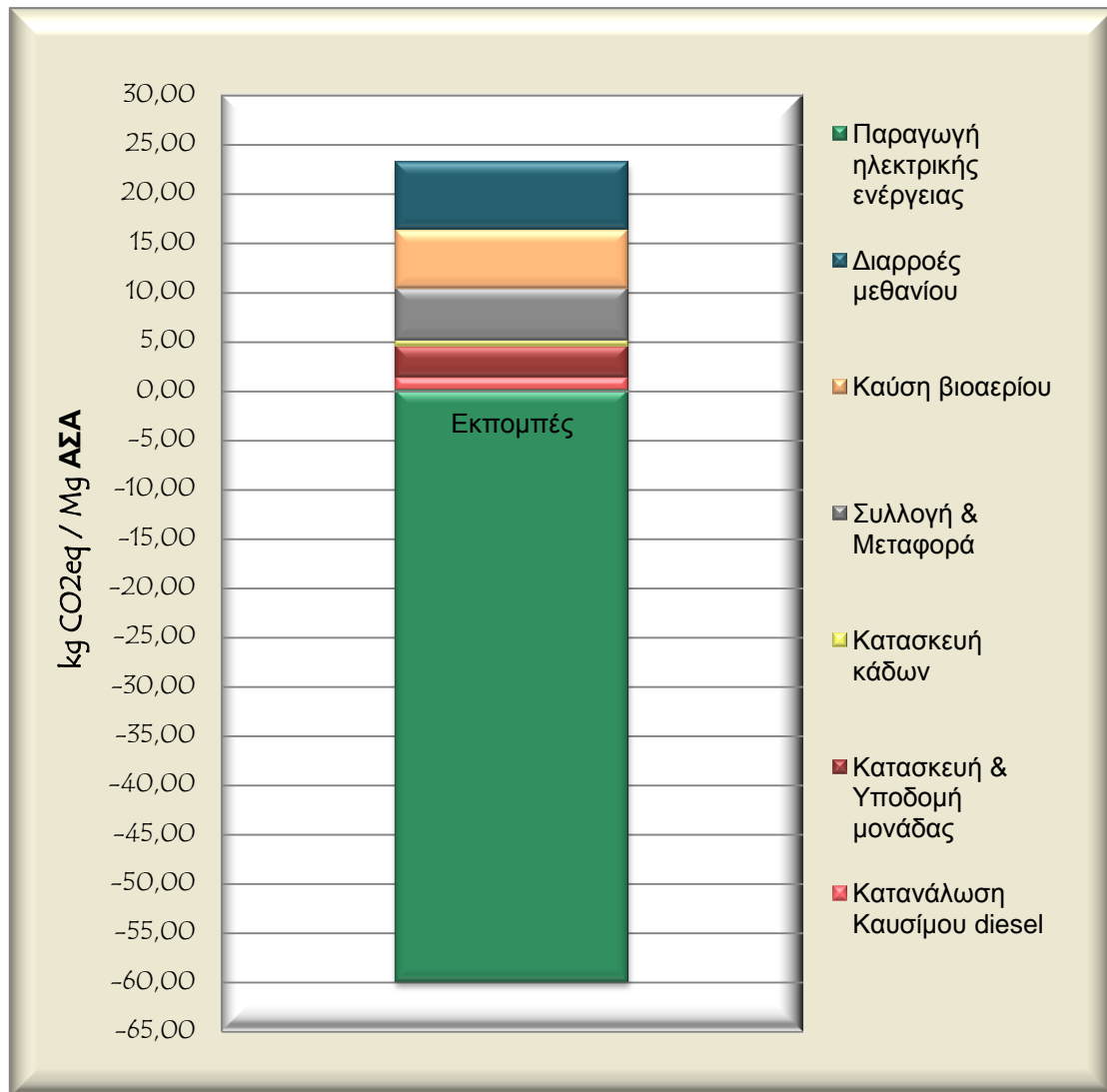
Έμμεσες Εκπομπές

Οι ισοδύναμες εκπομπές από την κατασκευή και την υποδομή της μονάδας ανέρχονται στα 3,16 kg CO₂eq/Mg ΑΣΑ. Για τον υπολογισμό των εκπομπών ελήφθη υπόψη και ο χρόνος ζωής της μονάδας, δηλαδή τα 15 χρόνια. Για την υποδομή θεωρήθηκε πως κατά τη διάρκεια των 15 ετών της μονάδας τα μηχανήματα και ο εξοπλισμός δεν αντικαταστάθηκαν καμία φορά. Επομένως, η υποδομή της μονάδας και η κατασκευή της συμβάλλουν κατά 12,9%.

Η κατασκευή των κάδων αντιστοιχεί σε συνολικές ισοδύναμες εκπομπές 0,67 kg CO₂eq/Mg ΑΣΑ. Οι κάδοι που είναι τοποθετημένοι σε κεντρικά και περιφερειακά σημεία συμβάλλουν κατά 2,9%. Για την ορθή σύγκριση, η διάρκεια ζωής των όλων κάδων έχουν αναχθεί στα 15 χρόνια λειτουργίας της μονάδας, επομένως μετά το πέρας της ζωής αυτών θεωρείται πως αντικαθίστανται με καινούριους.

Εκπομπές Εξοικονόμησης

Οι εκπομπές εξοικονόμησης του συστήματος προέρχονται από την διοχέτευση της παραγόμενης από το βιοαέριο ηλεκτρικής ενέργειας στο Δίκτυο, οι οποίες ανέρχονται στο 72,1% επί των συνολικών ισοδύναμων εκπομπών, με θετική επίδραση στο εξεταζόμενο σύστημα. Στην περίπτωση του Διασυνδεδεμένου Συστήματος θεωρείται ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αντικαθιστά ηλεκτρική ενέργεια από το ενεργειακό μίγμα της χώρας.

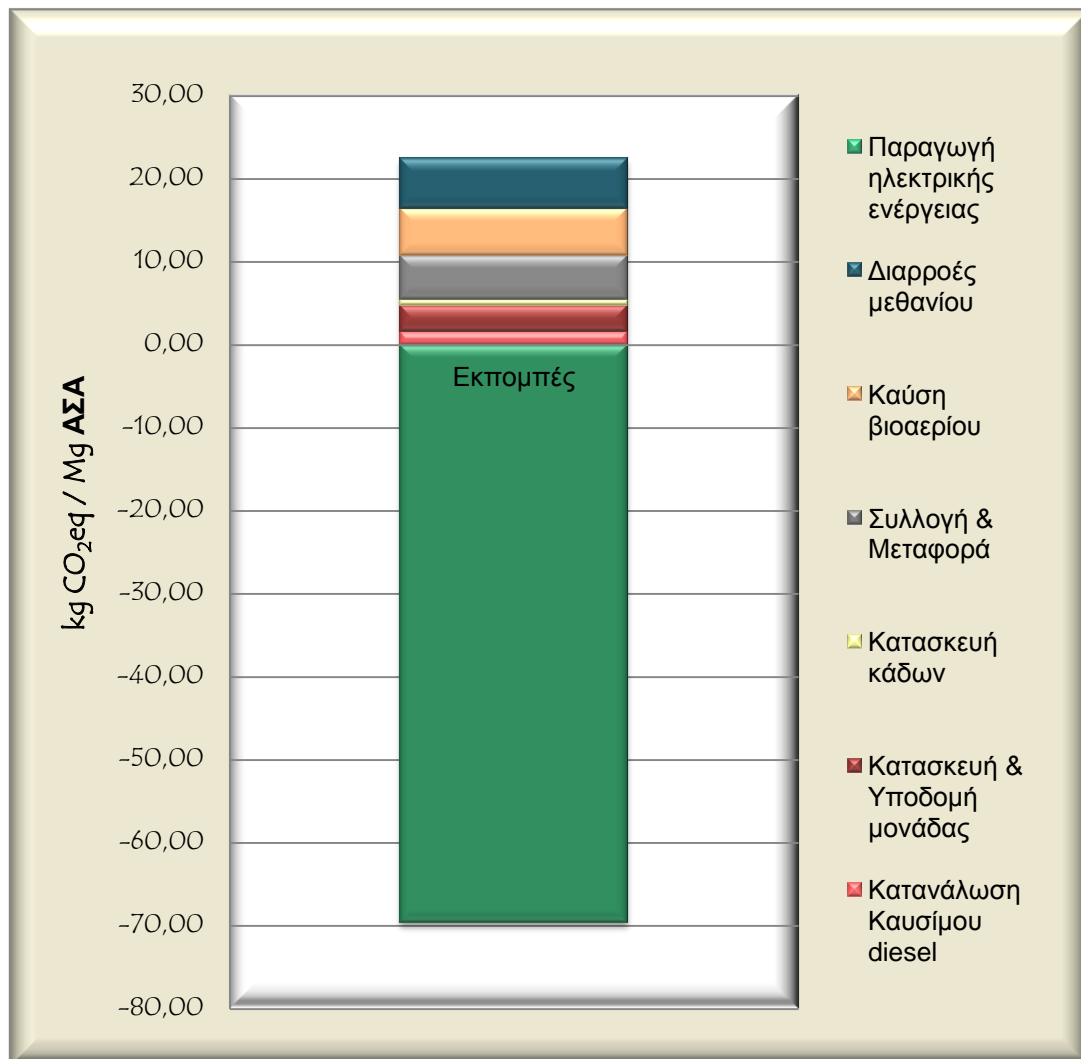


Διάγραμμα 6.2. Συνολικές ισοδύναμες εκπομπές CO₂ ανά τόνο ΑΣΑ, περίπτωση βασικού σεναρίου Διασυνδεδεμένου Συστήματος

Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά

Στην περίπτωση των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών έχουν εξαχθεί τα ίδια αποτελέσματα όσον αφορά τις διεργασίες με την μεγαλύτερη επίδραση, αλλά με διαφορετικό ποσοστό επίδρασης. Η μεταβολή οφείλεται στην διαφορά του συντελεστή εκπομπής όπου για τα μη Διασυνδεδεμένα νησιά είναι κατά 16,0% μεγαλύτερος. Ωστόσο, εξαιτίας της διαφοράς αυτής στον συντελεστή εκπομπής, ο οποίος ανέρχεται, σύμφωνα με το ενεργειακό μίγμα των μη Διασυνδεδεμένων νησιών, στα 1,081 kg CO₂eq/kWh, οι εκπομπές εξοικονόμησης από την ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου είναι κατά 9,60 kg CO₂eq/Mj AΣΑ υψηλότερες από τις αντίστοιχες για το Διασυνδεδεμένο δίκτυο. Επομένως, στην περίπτωση των μη Διασυνδεδεμένων νησιών η αναερόβια χώνευση έχει πιο θετική

επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.3. που ακολουθεί.



Διάγραμμα 6.3. Συνολικές ισοδύναμες εκπομπές CO₂ ανά τόνο ΑΣΑ, περίπτωση βασικού σεναρίου μη Διασυνδεδεμένου νησιών.

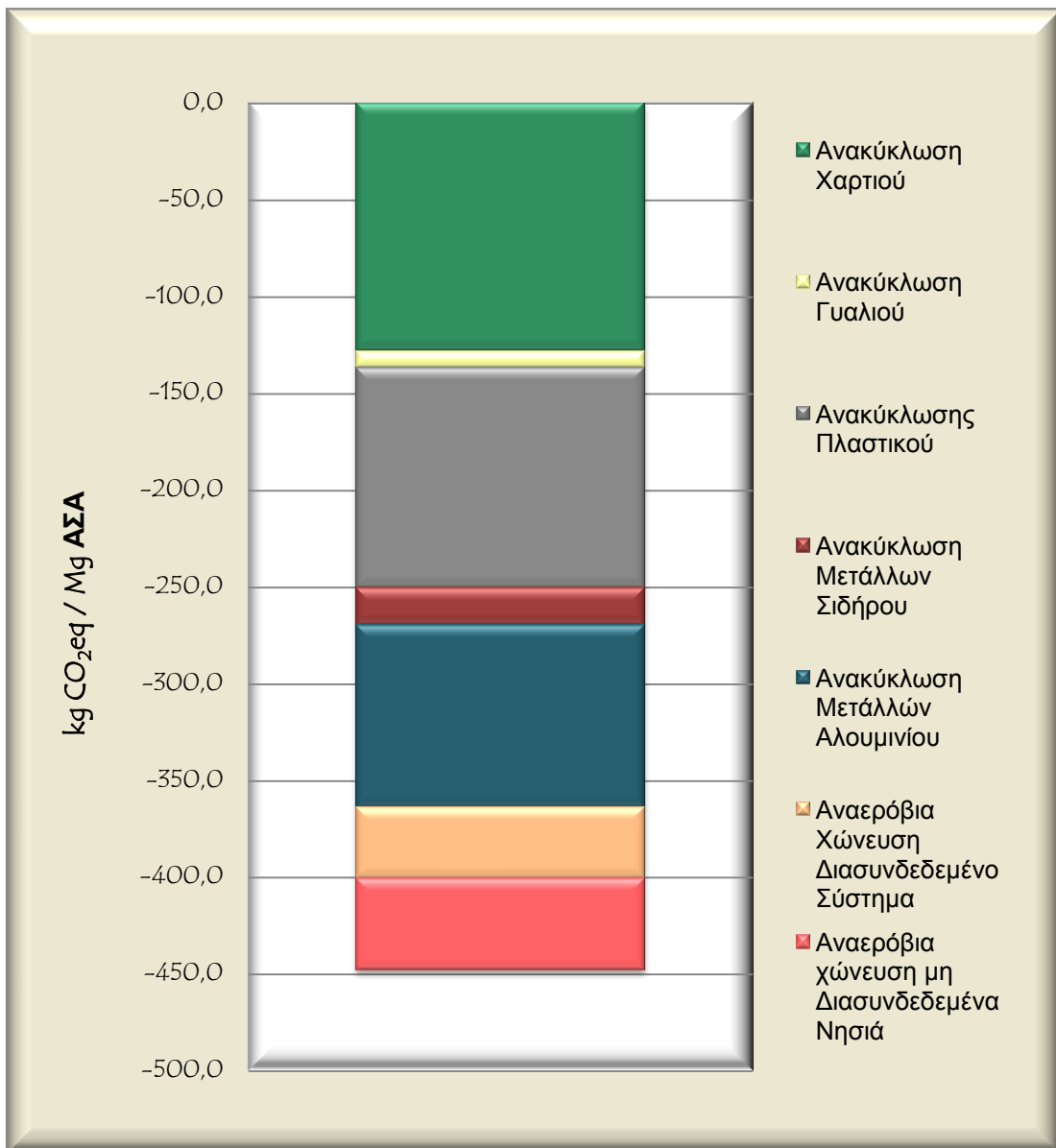
Ολοκληρωμένο Σύστημα Διαχείρισης ΑΣΑ

Στη μελέτη του ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης, παρατηρούμε πως οι εκπομπές εξοικονόμησης από την χρήση του βιοαερίου είναι απόλυτα συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες από την ανακύκλωση των υπόλοιπων ρευμάτων ΑΣΑ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6.8 και στο Διάγραμμα 6.4.

Πίνακας 6.8. Ισοδύναμες Εκπομπές σε kg CO₂eq/Mg ΑΣΑ του συστήματος αναερόβιας χώνευσης, περίπτωση βασικού σεναρίου

		Ισοδύναμες εκπομπές
		kg CO₂ / Mg ΑΣΑ
Άμεσες Εκπομπές		
	Κατανάλωση καυσίμου diesel εντός της μονάδας αναερόβιας χώνευσης	1,39
	Μεταφορά οργανικού κλάσματος στη μονάδα αναερόβιας χώνευσης	5,26
	Διαρροές μεθανίου	6,82
	Καύση βιοαερίου	5,86
Έμμεσες Εκπομπές		
	Κατασκευή & Υποδομή μονάδας	3,16
	Κατασκευή κάδων	0,67
Αποφευχθείσες Εκπομπές		
	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	
	<i>Διασυνδεδεμένο Σύστημα</i>	59,98
	<i>Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά</i>	69,59
Σύστημα διαλογής ανακυκλώσιμων υλικών		
	Χαρτί	128,16
	Πλαστικό	113,68
	Γυαλί	8,51
	Μέταλλα Σιδήρου	19,29
	Μέταλλα Αλουμινίου	94,10

Επί του συνόλου των εκπομπών η αναερόβια χώνευση συμβάλλει (θετικά) κατά 9,2%, περισσότερο δηλαδή από την ανακύκλωση γυαλιών και μετάλλων σιδήρου. Στην περίπτωση των μη Διασυνδεδεμένων Νησιών έχει ποσοστό επίδρασης 11,5% επί του συνόλου των εκπομπών εξοικονόμησης μέσω του ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων.



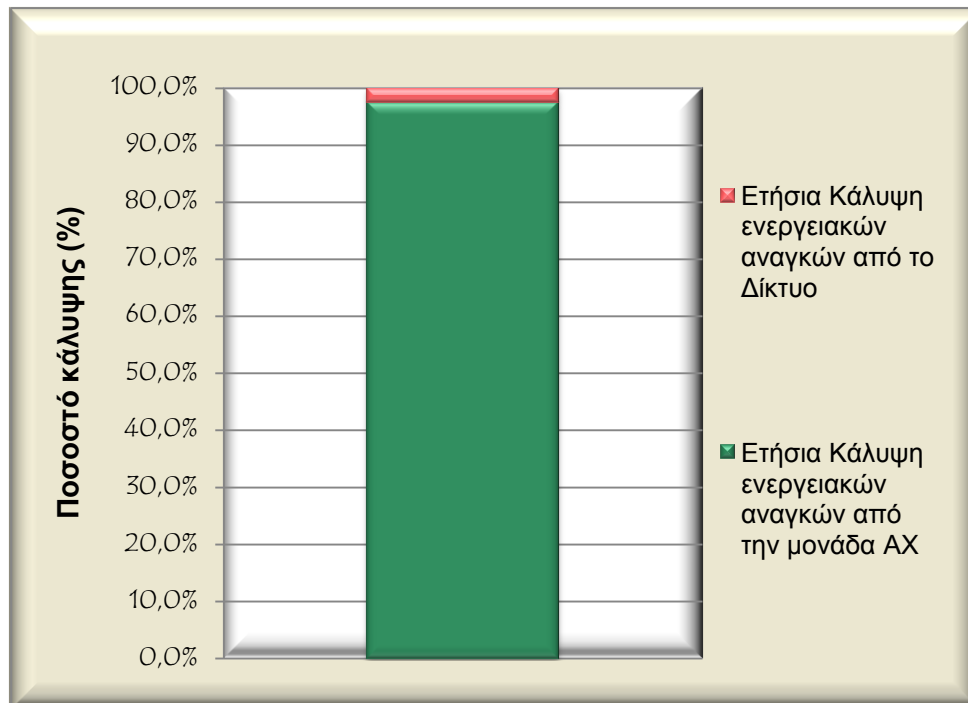
Διάγραμμα 6.4. Συνολική επίδραση του συστήματος ολοκληρωμένης διαχείρισης απορριμμάτων από την ανακύκλωση των έξι (6) ρευμάτων ΑΣΑ

Αξίζει να αναφερθεί πως, εάν τα όρια του συστήματος που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική ήταν πιο διευρυμένα και συμπεριελάμβαναν και τις εκπομπές εξοικονόμησης από την εκτροφή των οργανικών απορριμμάτων από τους ΧΥΤΑ, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα θα ήταν ακόμα μικρότερο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα οργανικά απορρίμματα είναι υπεύθυνα για την έκλυση μεγάλων ποσοτήτων μεθανίου στους ΧΥΤΑ. Σύμφωνα με μελέτη του [Manfredi \(2009\)](#), ένας εν λειτουργία ΧΥΤΑ δύναται να εκπέμπει 1000 kg CO₂eq/Mg απορριμμάτων. Όταν εφαρμόζεται ολοκληρωμένο σύστημα

διαχείρισης απορριμμάτων με εκτροπή των οργανικών ο ΧΥΤ υπολειμμάτων δύναται να συμβάλλει μέχρι και 70 kg CO₂eq/Mg απορριμμάτων, ουσιαστικά δηλαδή να μειώσει τις εκπομπές κατά 930 kg CO₂eq/Mg απορριμμάτων.

Κάλυψη ενεργειακών αναγκών στην υπό εξέταση περιοχή

Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά νοικοκυριό ανέρχεται σε 3500 kWh/νοικοκυριό. Με τη θεώρηση των 3 κατοίκων ανά νοικοκυριό και το συνολικό πλήθος των 20.000 κατοίκων, οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της περιοχής ανέρχονται στις 23,3 GWh. Η μονάδα τροφοδοτεί το ηλεκτρικό δίκτυο με 66 kWh_e/Mg ΑΣΑ, δηλαδή ετησίως 0,60 GWh, επομένως το ποσοστό κάλυψης των ηλεκτρικών αναγκών της υπό εξέταση περιοχής ανέρχεται στο 2,6% (171 νοικοκυριά).



Διάγραμμα 6.5. Κάλυψη ενεργειακών αναγκών στην υπό εξέταση περιοχή από την μονάδα αναερόβιας χώνευσης

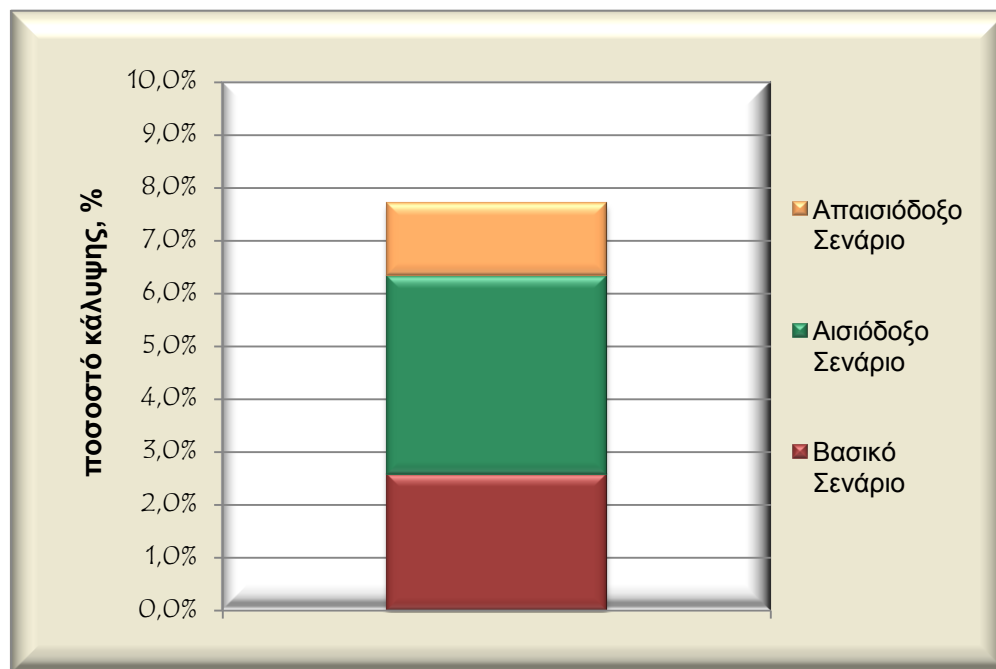
Στο βασικό Σενάριο έχει γίνει η παραδοχή πως το 65% του συνόλου του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ καταλήγει στην μονάδα Αναερόβιας Χώνευσης. Πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας με την θεώρηση 2 ακόμα σεναρίων με βάση τη συμμετοχή του καταναλωτικού κοινού με σκοπό να υπολογιστεί το ποσοστό της κάλυψης των ενεργειακών αναγκών της περιοχής από την μονάδα. Στον Πίνακα παρουσιάζονται τα Σενάρια με βάση τη συμμετοχή του καταναλωτικού κοινού. Έχει θεωρηθεί «αισιόδοξο» και «απαισιόδοξο» σενάριο με αντίστοιχη ροή οργανικού κλάσματος ΑΣΑ 95% και 35%. Με

δεδομένη την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την μονάδα στις 66 kWh/Mg ΑΣΑ προκύπτουν τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στον Πίνακα 6.9.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης γίνεται αντιληπτό πως μια μονάδα αναερόβιας χώνευσης δεν δύναται να καλύψει παρά ένα μέρος των ενεργειακών αναγκών μιας περιοχής.

Πίνακας 6.9. Σενάριο βάσει συμμετοχής του καταναλωτικού κοινού

Σενάρια	Ποσοστό συμμετοχής (%)	Ετήσια παραγόμενη Ενέργεια (GWh/έτος)	Ποσοστό κάλυψης ενεργειακών αναγκών της υπό εξέτασης περιοχής (%)
Βασικό	65	0,60	2,6
Αισιόδοξο	95	0,88	3,8
Απαισιόδοξο	35	0,32	1,4



Διάγραμμα 6.6. Ποσοστό κάλυψης ενεργειακών αναγκών βάσει ποσοστού συμμετοχής στο πρόγραμμα διαλογής στην πηγή

6.2.2 Ανάλυση Ευαισθησίας βάσει τελικής χρήσης βιοαερίου

Εξετάζονται επιπλέον, 2 Σενάρια με βάση την τελική χρήση του βιοαερίου. Τα Σενάρια περιγράφονται και συνοψίζονται στον Πίνακα 6.10.

Στο Σενάριο 1, ομοίως με το Σενάριο 0 (βασικό Σενάριο), το βιοαέριο αξιοποιείται σε μονάδα ΣΗΘ. Η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται μέσω του δικτύου της ΔΕΗ. Το 30% της πλεονάζουσας θερμότητας, θεωρείται ότι αξιοποιείται από βιομηχανία πλησίον της μονάδας αναερόβιας χώνευσης καλύπτοντας μέρος των θερμικών αναγκών της (θεωρείται ότι η βιομηχανία στην υφιστάμενη κατάσταση για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της κάνει χρήση πετρελαίου diesel). Οι θερμικές απαιτήσεις της βιομηχανίας είναι ετήσιες επομένως εξασφαλίζεται ότι το ποσοστό αυτής της θερμότητας θα παρέχεται συνεχώς.

Πίνακας 6.10. Περιγραφή Σεναρίων βάσει τελικής χρήσης βιοαερίου

	Κάλυψη ηλεκτρικών καταναλώσεων εντός της μονάδας	Κάλυψη ηλεκτρικών καταναλώσεων από το Δίκτυο	Εκμετάλλευση Πλεονάζουσας Θερμότητα	ΣΗΘ	Αναβάθμιση βιοαερίου
Σενάριο 0 ^α	100%	0%	0%	✓	
Σενάριο 1	100%	0%	30%	✓	
Σενάριο 2 ^β	0%	100%	0%		✓

α: Βασικό Σενάριο

β: Στο Σενάριο αυτό χρησιμοποιείται λέβητας για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της μονάδας

Στα Σενάριο 2 πραγματοποιείται αναβάθμιση του βιοαερίου σε βιομεθάνιο με σκοπό την έγχυση του στο δίκτυο Φυσικού Αερίου. Θεωρείται πως οι ενεργειακές ανάγκες της μονάδας, για την παραγωγή και αναβάθμιση του βιοαερίου, καλύπτονται εξ' ολοκλήρου από το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο, οι οποίες ανέρχονται σε 23 kWh/Mg ΑΣΑ. Για την αναβάθμιση του βιοαερίου έχει επιλεγεί η μέθοδος απορρόφησης μέσω ύδατος (Πίνακας 6.11). Η παραγόμενη ποσότητα βιομεθανίου ανέρχεται σε 23 Nm³ βιομεθανίου/Mg ΑΣΑ, με σύσταση 98% σε μεθάνιο, τα οποία και εγχέονται στο δίκτυο φυσικού αερίου.

Ο ηλεκτρικός και θερμικός βαθμός απόδοσης της ΣΗΘ εκτιμάται 33% και 47% αντίστοιχα. Στα Σενάρια όπου υπάρχει αναβάθμιση του βιοαερίου δεν συνυπολογίζεται η επιπλέον υποδομή για την αναβάθμιση. Επίσης, θεωρείται πως σε όλα τα Σενάρια η κατανάλωση καυσίμου πετρελαίου diesel είναι η ίδια. Στον Πίνακα 6.12 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας, ενώ στο Διάγραμμα 6.7 παρουσιάζεται η περιβαλλοντική αποτύπωση των επιμέρους σεναρίων.

Πίνακας 6.11. Αναβάθμιση βιοαερίου σε βιομεθάνιο μέσω απορρόφησης ύδατος

	Απορρόφηση μέσω ύδατος	Πηγή
Συνολική Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh/Mg ΑΣΑ)	11,7	Pertl, 2010
Ανάκτηση μεθανίου (%)	98,5	Electrigaz Technologies, 2008
Απώλειες μεθανίου (%)	1,5	Electrigaz Technologies, 2008
Καθαρότητα μεθανίου (%)	98,0	Electrigaz Technologies, 2008
Παραγόμενο βιομεθάνιο (Nm ³ /Mg ΑΣΑ)	23	

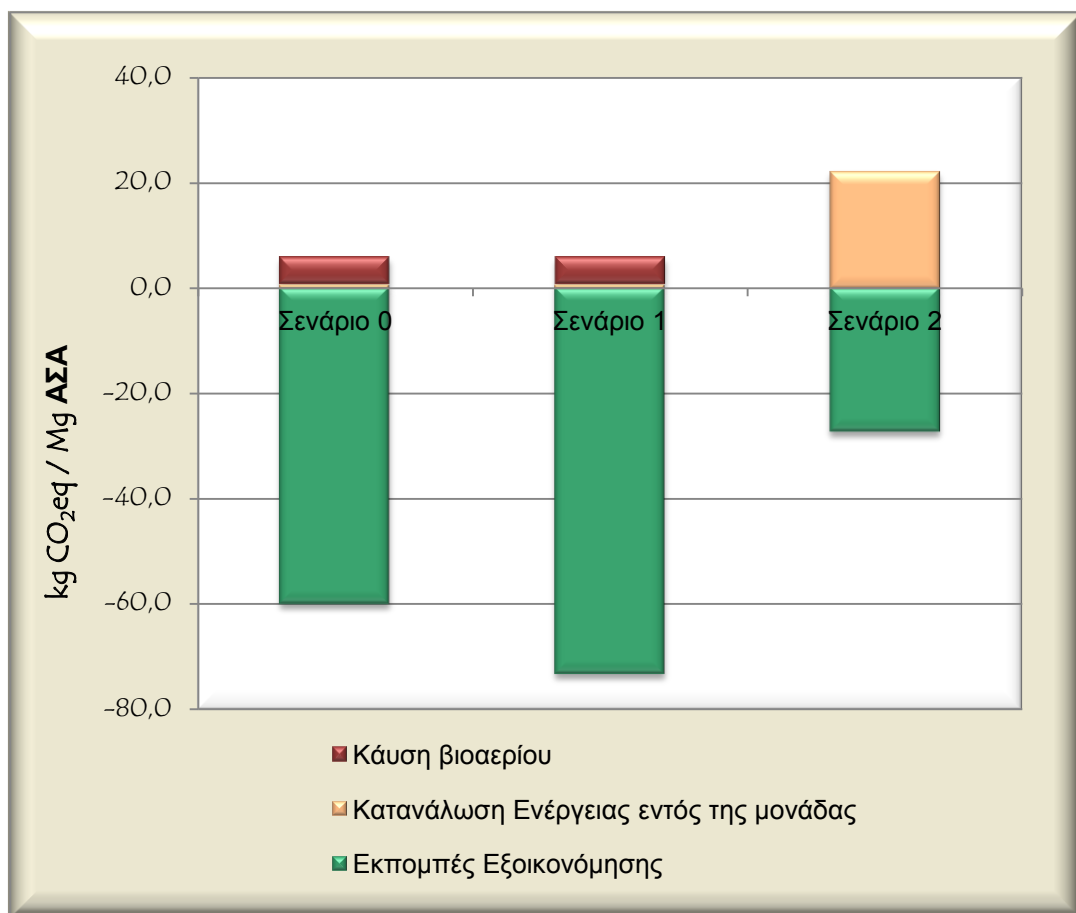
Πίνακας 6.12. Συνολικές ισοδύναμες εκπομπές των υπό εξέταση σεναρίων βάσει τελικής χρήσης βιοαερίου

Ισοδύναμες Εκπομπές kg CO ₂ eq/Mg ΑΣΑ	Σενάριο 0	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Έμμεσες Εκπομπές από εσωτερική κατανάλωση ενέργειας	0,9	0,9	22,1
Έμμεσες Εκπομπές από την καύση του βιοαερίου	5,0	5,0	-
Εκπομπές εξοικονόμησης από αντικατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας	60,0	60,0	27,3
Εκπομπές εξοικονόμησης από αντικατάσταση θερμικής ενέργειας	0	15,62	0
Σύνολο Εκπομπών	-59,1	-74,7	-5,2

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στα Σενάρια 0 και 1 θεωρείται ότι η ενέργεια που παράγεται από το βιοαέριο εξοικονομεί ορυκτά καύσιμα τα οποία μετέχουν στην ηλεκτροπαραγωγή της χώρας. Στην περίπτωση του Διασυνδεδεμένου Συστήματος για την παραγωγή μιας (1) kWh εκπέμπονται 0,932 kg CO_{2eq} σύμφωνα με το εθνικό ενεργειακό μίγμα, ενώ στην περίπτωση των Μη Διασυνδεδεμένων Νήσων 1,081 kg CO_{2eq}/kWh. Αντίθετα το βιομεθάνιο αντικαθιστά φυσικό αέριο, όπου θεωρείται πως για την παραγωγή μιας (1) kWh εκπέμπονται 0,400 kg CO_{2eq}.

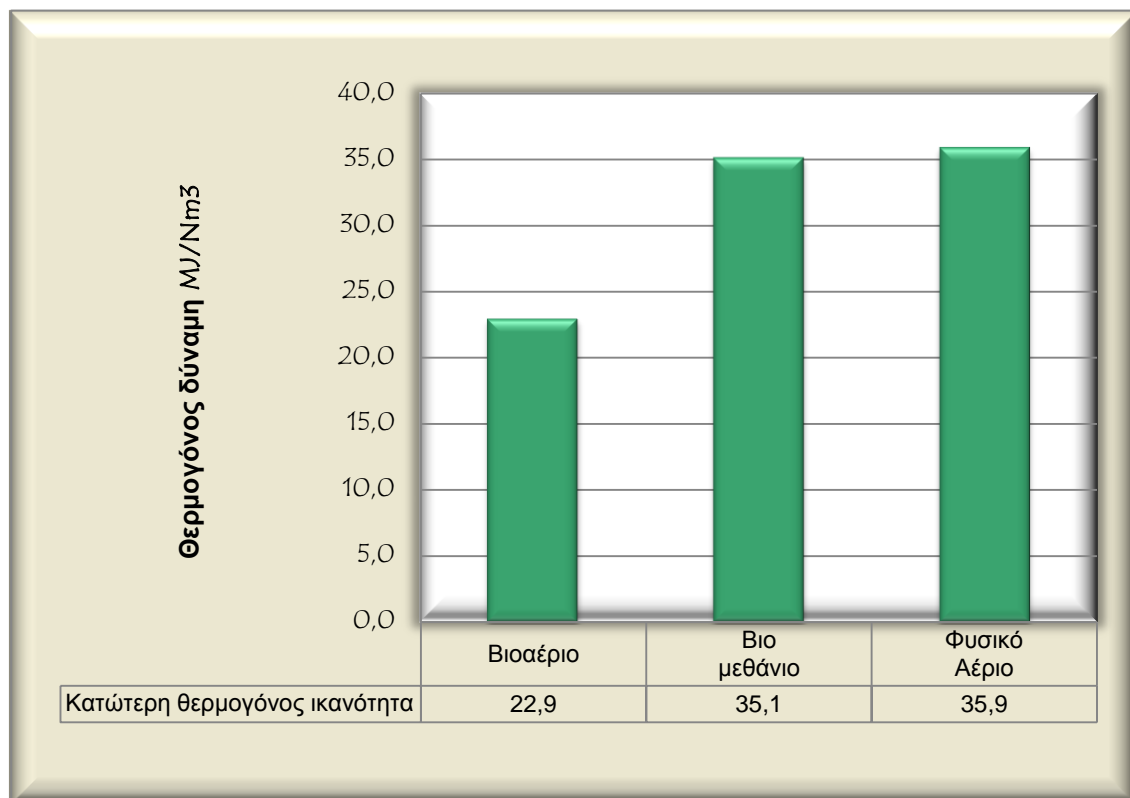
Το Σενάριο 1 η εκμετάλλευση της πλεονάζουσας θερμικής ενέργειας, οδηγεί σε εκπομπές εξοικονόμησης. Αυτό οφείλεται στο ότι η θερμική ενέργεια αντικαθιστά καύσιμο πετρέλαιο diesel και μάλιστα 0,64 L diesel/Nm³ βιοαερίου. Κατά την καύση του diesel εκπέμπονται 2,62 kg CO_{2eq}/L diesel, επομένως εξοικονομούνται 1,66 kg CO_{2eq}/Nm³ βιοαερίου.



Διάγραμμα 6.7. Ισοδύναμες εκπομπές βάσει τελικής χρήσης του βιοαερίου, σύγκριση με βασικό σενάριο, περίπτωση διασυνδεδεμένου συστήματος

Στο Σενάριο 2 εξοικονομούνται $0,98 \text{ Nm}^3$ φυσικού αερίου/ Nm^3 βιομεθανίου. Ωστόσο, οι συνολικές απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια διπλασιάζονται, καθώς η αναβάθμιση του βιοαερίου είναι μια ενεργοβόρος διεργασία. Οι ενεργειακές απαιτήσεις καλύπτονται εξ' ολοκλήρου από το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο. Για αυτό και η επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου στην περίπτωση του Σεναρίου 2 είναι η μεγαλύτερη.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτει πως, για τα όρια του συστήματος που εξετάζονται, η καύση του βιοαερίου σε μονάδα ΣΗΘ με εκμετάλλευση της πλεονάζουσας θερμότητας έχει τη μικρότερη περιβαλλοντική επίδραση. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της ανάλυσης επηρεάζονται από τα όρια του συστήματος.



Διάγραμμα 6.8. Κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του βιοαερίου, του βιομεθανίου και του φυσικού αερίου

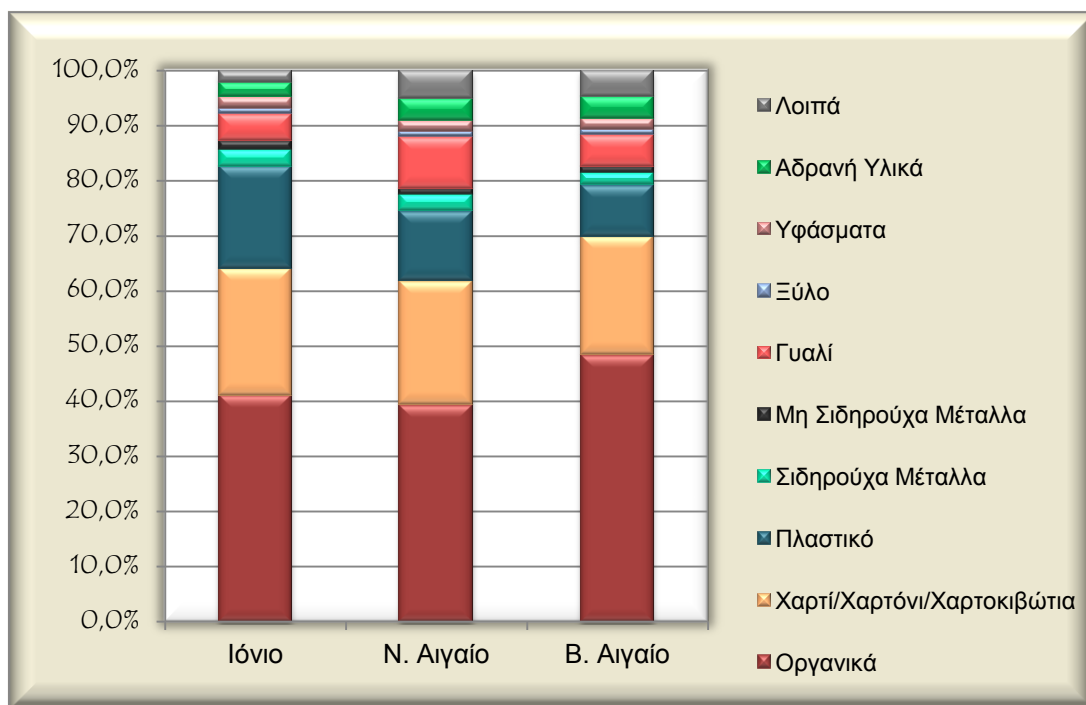
6.2.3 Ανάλυση Ευαισθησίας βάσει σύστασης ΑΣΑ

Η ποιοτική σύσταση των απορριμμάτων είναι παράμετρος δυναμική. Ποικίλει ανάλογα την περιοχή διότι επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η πληθυσμιακή πυκνότητα, οι πληθυσμιακές διακυμάνσεις, το οικονομικό-κοινωνικό επίπεδο, το πολιτιστικό και μορφωτικό επίπεδο, η εμπορική και βιομηχανική δραστηριότητα, η ηλικία των καταναλωτών της περιοχής κα.

Στο Βασικό Σενάριο θεωρήθηκε συγκεκριμένη σύσταση απορριμμάτων. Ωστόσο από η σύσταση των ΑΣΑ ποικίλει ανάλογα με την περιοχή, επηρεάζοντας το εξεταζόμενο σύστημα της κομποστοποίησης καθώς και την επίδραση αυτού στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα, τα ελληνικά νησιά διαχωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες με βάση την γεωγραφική περιοχή σε:

- ο Στο Ιόνιο με σύσταση ζυμώσιμων 41,0%
- ο Στο Νότιο Αιγαίο με σύσταση ζυμώσιμων 39,4%
- ο Στο Βόρειο Αιγαίο με σύσταση ζυμώσιμων 48,3%

Οι ποιοτικές συστάσεις υπολογίστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα ποσοστά προέκυψαν μέσω τις συλλογή στοιχείων από (ΠΕΣΣΔΑ Νοτίου Αιγαίου), (Μπουρτσάλας 2011) & (Μαλαμής, 2012). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6.9.

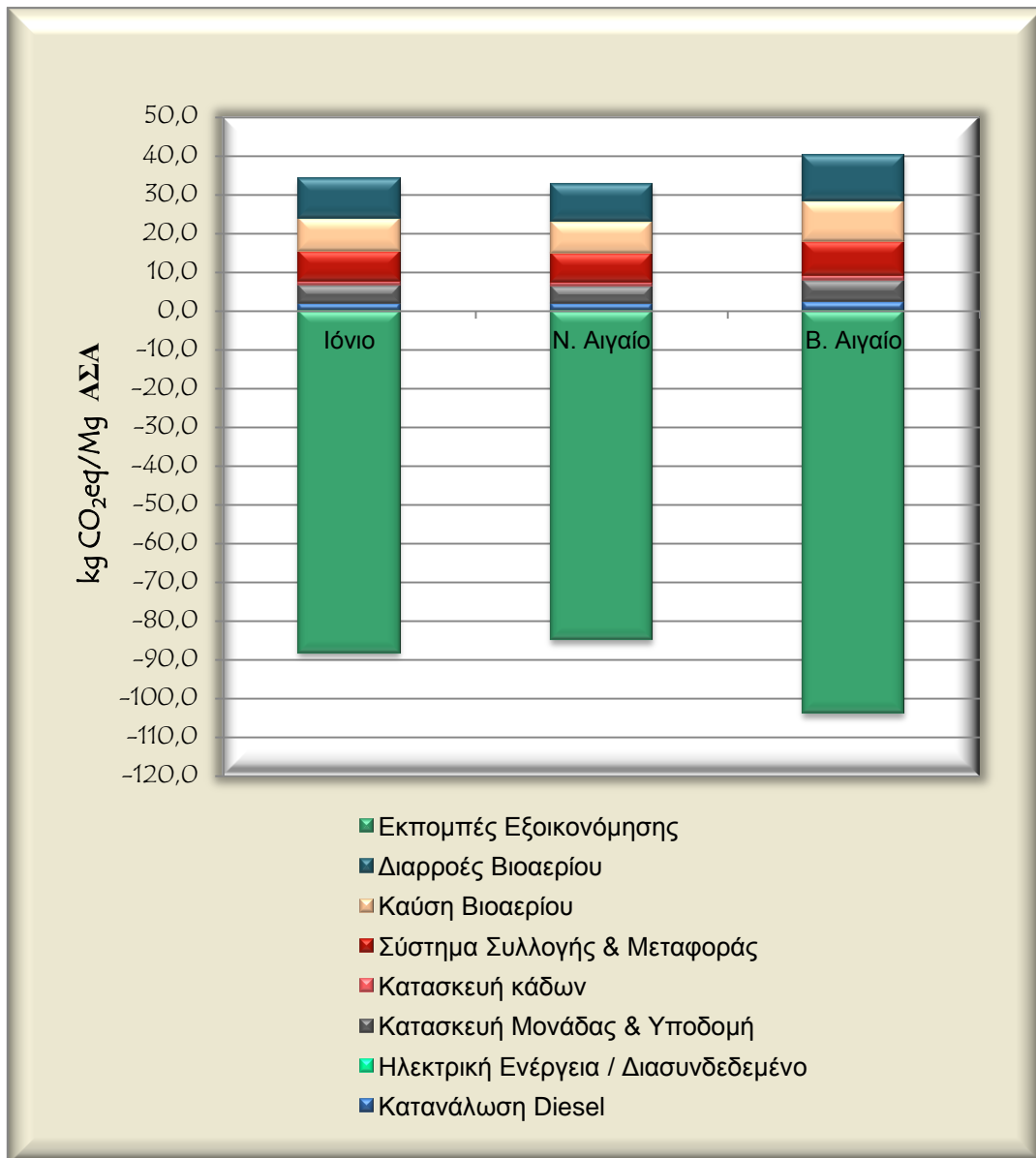


Διάγραμμα 6.9. Ποιοτική Σύσταση ΑΣΑ εξεταζόμενων περιοχών

Πίνακας 6.13. Περιβαλλοντική Αποτύπωση βάσει σύστασης ΑΣΑ

Ισοδύναμες Εκπομπές (kg CO ₂ eq/Mg ΑΣΑ)	Ιόνια Νησιά	Νότιο Αιγαίο	Βόρειο Αιγαίο
Άμεσες Εκπομπές			
Σύστημα Συλλογής & Μεταφοράς	7,7	7,4	9,1
Κατανάλωση diesel	2,0	2,0	2,4
Διαρροές βιοαερίου	10,0	9,6	11,8
Καύση βιοαερίου	8,6	8,3	10,1
Έμμεσες εκπομπές			
Κατασκευή & Υποδομή Μονάδας	4,6	4,5	5,5
Κατασκευή κάδων	1,0	0,9	1,2
Εκπομπές εξοικονόμησης			
Παραγωγή πράσινης ενέργειας			
Διασυνδεδεμένο Σύστημα	88,2	84,7	103,9
Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά	102,3	98,3	120,5
Σύνολο Εκπομπών			
Διασυνδεδεμένο Σύστημα	-54,1	-52,0	-63,8
Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά	-68,2	-65,6	-80,4

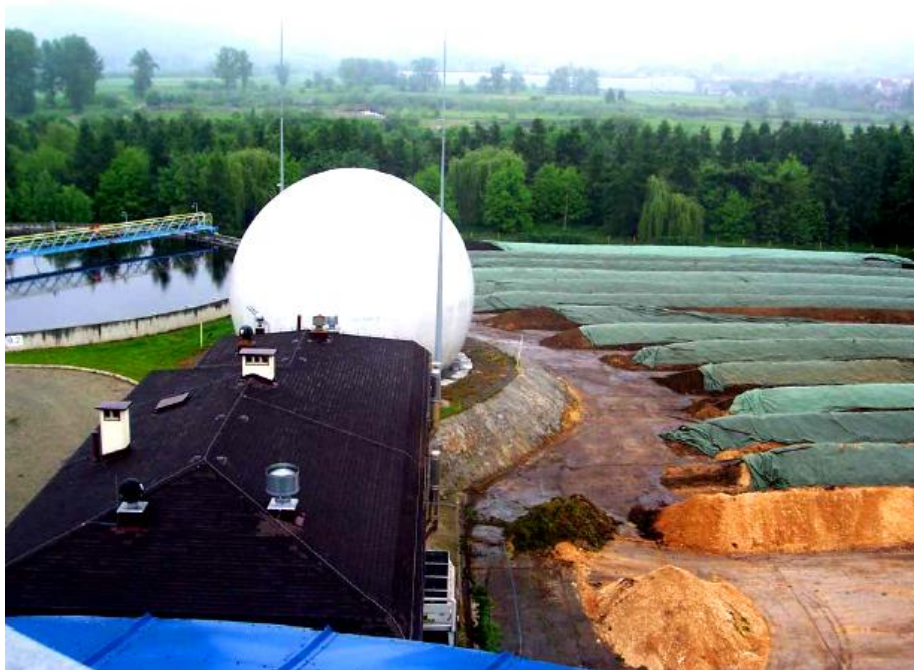
Παρατηρείται πως στο Βόρειο Αιγαίο η αναερόβια χώνευση έχει τη μικρότερη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ακολουθούν τα Ιόνια νησιά και τέλος το Νότιο Αιγαίο. Στο Διάγραμμα 6.10 παρουσιάζονται οι συνολικές ισοδύναμες εκπομπές για την περίπτωση του Διασυνδεδεμένων Συστήματος. Παρόμοια αποτελέσματα εξάγονται και τα μη Διασυνδεδεμένα Νησιά.



Διάγραμμα 6.10. Συνολική Επίδραση στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου του συστήματος της Αναερόβιας Χώνευσης βάσει σύστασης ΑΣΑ, περίπτωση Διασυνδεδεμένου Συστήματος

6.2.4 Ανάλυση Ευαισθησίας βάσει ποσοστού προς Αναερόβια Χώνευση & προς Κομποστοποίηση – Σύγκριση των δύο μεθόδων

Η χωνεμένη ιλύς στο βασικό σενάριο ανακυκλοφορεί και επαναχρησιμοποιείται στην διεργασία της αναερόβιας χώνευσης. Εναλλακτικά δύναται να υποστεί αερόβια αποδόμηση, υπό ελεγχόμενες συνθήκες, δηλαδή κομποστοποίηση. Πρόκειται για μια συνδυασμένη μονάδα αναερόβιας και αερόβιας αποδόμησης με τελικά προϊόντα βιοαέριο και κομπόστ.



Σχήμα 6.4. Συνδυασμένη μονάδα αναερόβιας χώνευσης & κομποστοποίησης στην Πολωνία
(*Biogas Regions, 2008*)

Σύμφωνα με *Poghani (2010 & 2012)* υπολογίζεται ότι κάθε τόνος οργανικών που υπόκειται σε αναερόβια χώνευση παράγει 680 κιλά χωνεμένης ιλύος. Η χωνεμένη ιλύς αναμιγνύεται με πράσινα απορρίμματα με ογκομετρική αναλογία 1:4 κατ' όγκο (*Poghani, 2010*) και κομποστοποιείται για 21 μέρες σε βιοκελιά. Τα πράσινα απορρίμματα προστίθενται ως πρόσθετο κομποστοποίησης με στόχο τη μείωση του ειδικού βάρους και την αύξηση του πορώδους, ώστε να διευκολύνεται ο αερισμός καθώς επίσης και για να βελτιωθούν οι λόγοι άνθρακα και αζώτου μέσα στο σωρό για τη βέλτιστη βιολογική αποδόμηση (*Αναγνωστόπουλος, 2010*).

Σύμφωνα με αυτή την παραδοχή, δημιουργήθηκαν δύο ακόμα Σενάρια στα οποία ποσοστό του οργανικού κλάσματος οδηγείται αντί της αναερόβιας αποδόμησης, απευθείας προς κομποστοποίηση.

Πίνακας 6.14. Σύσταση Χωνεμένης ιλύος και πράσινων απορριμμάτων (Pogņani, 2010; Pogņani, 2012; Moller, 2012)

	Πράσινα Απορρίμματα	Χωνεμένη ιλύς	
Υγρασία	50,0	75,3	%
Συνολικά Στερεά	50,0	24,7	%
Συνολική Οργανική Ύλη	50,90	63,8	% επί ξηρού
Συνολικός Οργανικός C	36,50	40,90	% επί ξηρού
Αζωτο	1,5	5,10	% επί ξηρού
Φώσφορος (ως P₂O₅)	0,2	1,15	% επί ξηρού
Κάλιο (ως K₂O)	0,13	3,20	% επί ξηρού
Ειδικό βάρος	380	490	κιλά/κμ

Περιγραφή Σεναρίων

Στο Σενάριο Α ολόκληρη η εισροή του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ οδηγείται προς αναερόβια χώνευση, ενώ η χωνεμένη ιλύς που ανακτάται υπόκειται κομποστοποίηση. Στα υπό εξέταση σενάρια ποσοστό του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ εκτρέπεται και οδηγείται απευθείας προς κομποστοποίηση σε ποσοστά 20% για το Β και 40% για το Γ.

Για την σύγκριση των σεναρίων δεν συνυπολογίζονται οι εκπομπές που αφορούν την κατασκευή & υποδομή της μονάδας, την κατασκευή των κάδων, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμου diesel και τέλος το σύστημα συλλογής και μεταφοράς των οργανικών απορριμμάτων καθώς θεωρούνται κοινές και για τα τρία εξεταζόμενα Σενάρια. Για το σύστημα της αναερόβιας χώνευσης λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς η καύση του βιοαερίου στη μονάδα ΣΗΘ, οι διαρροές μεθανίου και η αντικατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας. Ομοίως για το σύστημα της κομποστοποίησης, οι εκπομπές κατά την βιολογική αποδόμηση, όπως και οι εκπομπές εξοικονόμησης που σχετίζονται με την αντικατάσταση αζωτούχων λιπασμάτων και των αποθήκευση άνθρακα στο έδαφος.

Πίνακας 6.15. Ισοζύγιο μάζας για τα εξεταζόμενα σενάρια

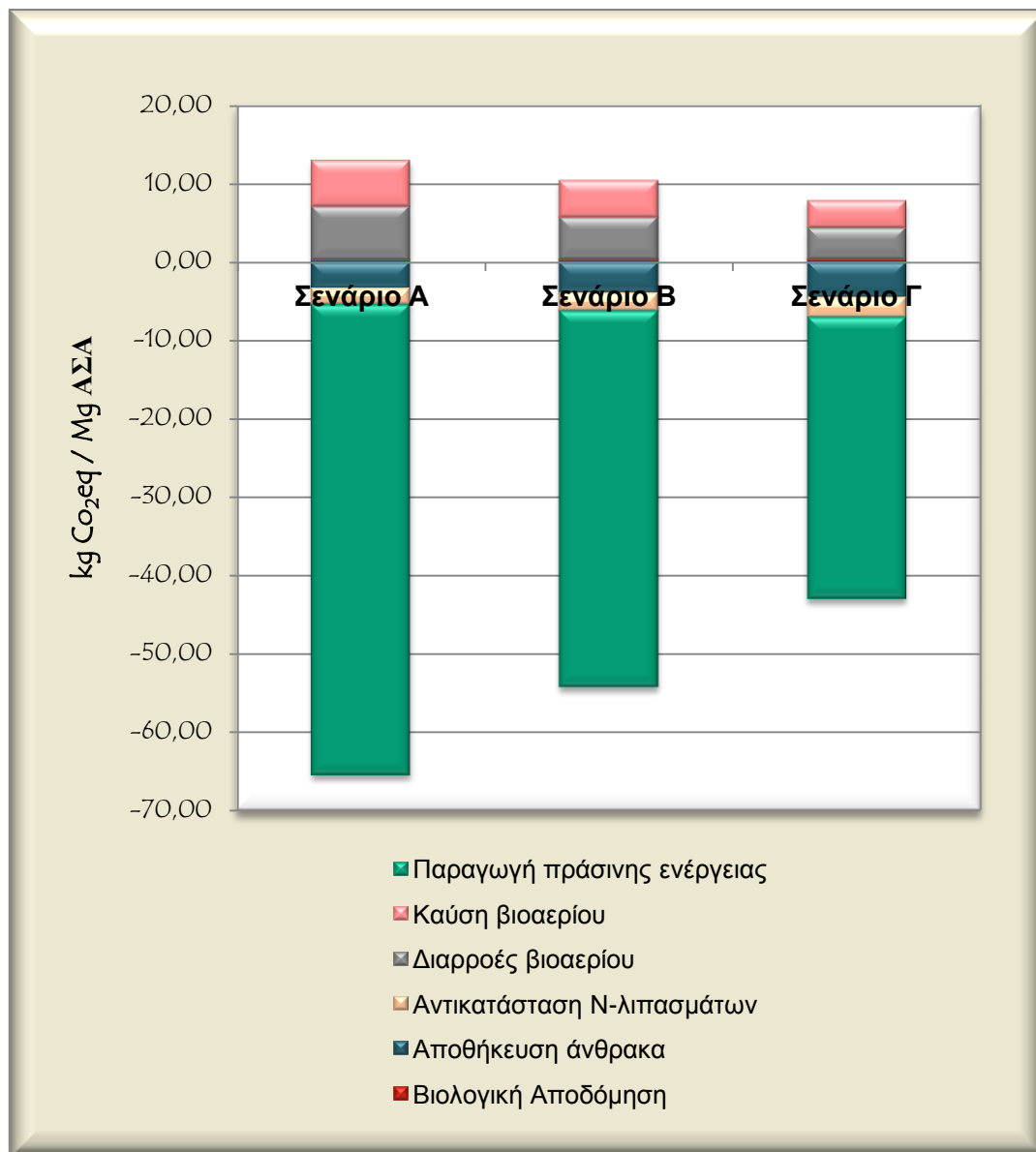
	Σενάριο Α-0%	Σενάριο Β-20%	Σενάριο Γ-40%
	(kg)	(kg)	(kg)
Οργανικό κλάσμα ΑΣΑ προς ΑΧ	1000	800	600
Οργανικό κλάσμα ΑΣΑ προς Κομποστοποίηση	0	200	400
Χωνεμένη ιλύς προς κομποστοποίηση	592	474	357
Πράσινα Απορρίμματα	3462	3387	3317

Πίνακας 6.16. Ισοδύναμες εκπομπές των υπό εξέταση σεναρίων

	Σενάριο Α	Σενάριο Β	Σενάριο Γ
	(kg CO ₂ eq/Mg ΑΣΑ)		
Άμεσες Εκπομπές			
Αερόβια Αποδόμηση	0,33	0,37	0,42
Διαρροές Μεθανίου	6,82	4,46	4,09
Καύση βιοαερίου	5,86	4,69	3,52
Εκπομπές Εξοικονόμησης			
Παραγωγή πράσινης ενέργειας	59,98	47,98	35,99
Αντικατάσταση Ν-λιπασμάτων	2,08	2,43	2,60
Αποθήκευση άνθρακα	3,43	3,95	4,49
Σύνολο	-52,48	-43,77	-35,05

Παρατηρείται πως, καθώς αυξάνει το ποσοστό του οργανικού προς την διεργασία της κομποστοποίησης αυξάνουν αντίστοιχα και οι εκπομπές εξοικονόμησης λόγω αποθήκευσης άνθρακα και λόγω αντικατάστασης λιπασμάτων. Ταυτόχρονα, στο σύστημα της αναερόβιας χώνευσης παρατηρείται μείωση των εκπομπών εξοικονόμησης αλλά με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι η αντίστοιχη αύξηση των εκπομπών εξοικονόμησης του συστήματος της κομποστοποίησης. Επομένως, σε σχέση με το Σενάριο Α η διαφορά των

συνολικών ισοδύναμων εκπομπών εξοικονόμησης είναι της τάξης του 16,6% για το Σενάριο Β και 33,2% για το Σενάριο Γ αντίστοιχα.



Διάγραμμα 6.11. Περιβαλλοντική Αποτύπωση των Σεναρίων βάσει σύστασης προς αναερόβια χώνευση και προς κομποστοποίηση

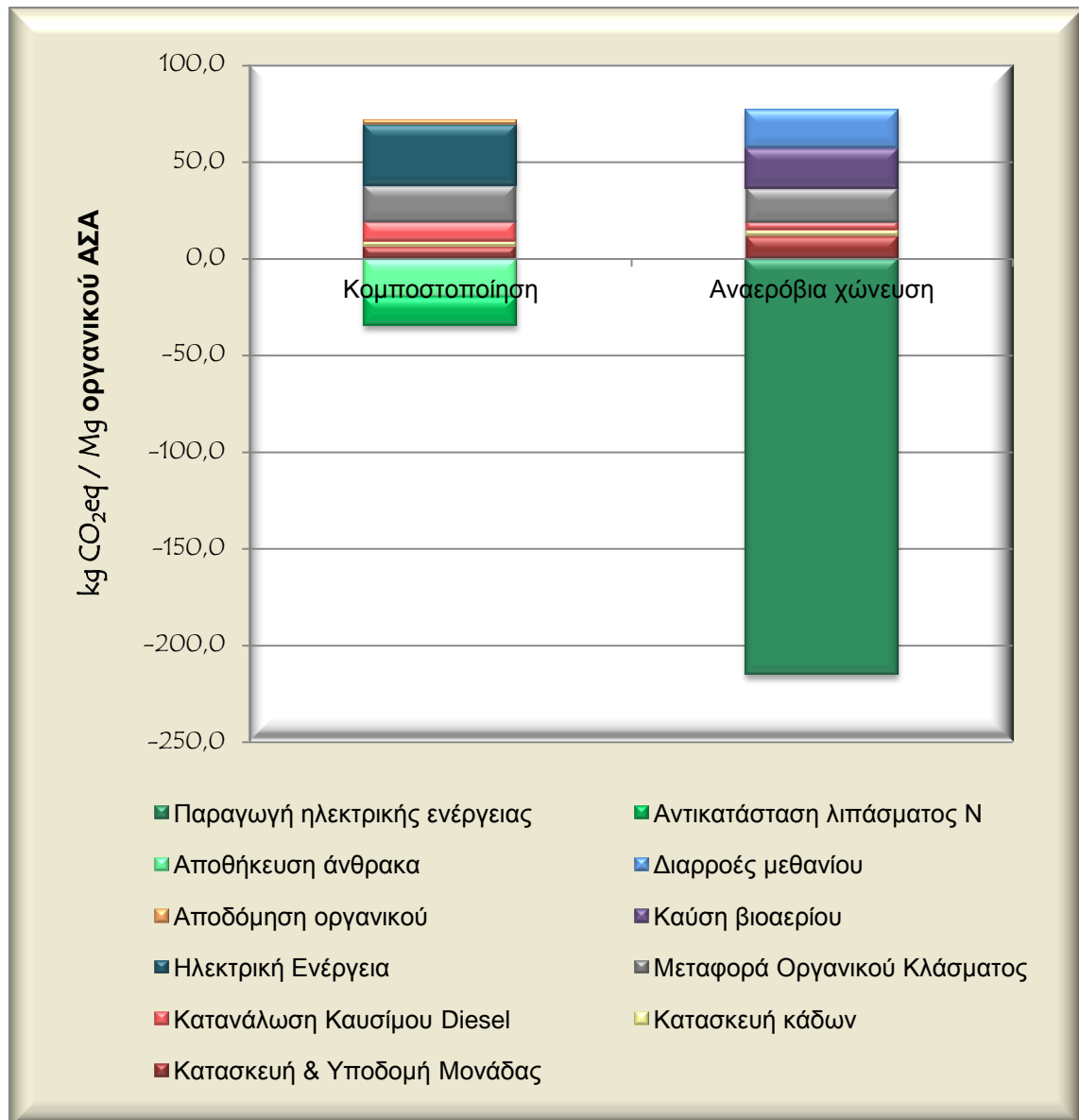
Σύμφωνα με την ανάλυση ευαισθησίας βάσει ποσοστού προς αναερόβια χώνευση και προς κομποστοποίηση γίνεται αντιληπτό λοιπόν, όπως παρουσιάζεται και στο Διάγραμμα 6.11, πως η αναερόβια χώνευση του οργανικού κλάσματος ΑΣΑ σε σχέση με την κομποστοποίηση αποτελεί την καταλληλότερη μέθοδο για τη διαχείριση του.

Για την σύγκριση των δύο μεθόδων ενεργειακής αξιοποίησης θεωρείται μονάδα κομποστοποίησης ίσης δυναμικότητας με αυτή της αναερόβιας χώνευσης. Τα

αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6.12. Όπως και παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα πως η αναερόβια χώνευση αποτελεί την καταλληλότερο μέθοδο αξιοποίησης έναντι της κομποστοποίησης σε σχέση με την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και αυτό διότι στην περίπτωση της αναερόβιας χώνευσης έχουμε ενεργειακή αξιοποίηση. Επιπλέον στο Διάγραμμα 6.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανά τόνο οργανικού.



Διάγραμμα 6.12. Συνολική περιβαλλοντική αποτύπωση των δύο μεθόδων αξιοποίησης



Διάγραμμα 6.13. Συνολική περιβαλλοντική αποτύπωση των δύο μεθόδων αξιοποίησης

Κεφάλαιο 7^ο

Εισαγωγή στην τεχνοοικονομική ανάλυση
των μεθόδων βιολογικής αξιοποίησης των
οργανικών απορριμμάτων ΑΣΑ

7.1 Παράμετροι τεχνοοικονομικής ανάλυσης

Η ανάλυση για την τεχνοοικονομική σύγκριση των δύο μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας είναι συνάρτηση των εξής παραμέτρων:

- i. Κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας & συντήρησης
- ii. Τιμολογιακή πολιτική & απορρόφηση του τελικού προϊόντος

Κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας & συντήρησης

Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό του κόστους εγκατάστασης και του λειτουργικού κόστους μίας μονάδας κομποστοποίησης (κλειστό σύστημα) και αναερόβιας χώνευσης συνοψίζονται στον Πίνακα 7.1.

Και οι δύο μέθοδοι αξιοποίησης χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος εγκατάστασης. Διαθέσιμες κρατικές και ευρωπαϊκές επιδοτήσεις μπορεί να περιορίσουν το βασικό κόστος. Σχετικά με το αρχικό κόστος επένδυσης ανά τόνο οργανικού υποστρώματος μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

- i. Όσο πιο καθαρό είναι το εισερχόμενο υπόστρωμα (πχ αν είναι προδιαλεγμένο ή όχι), τόσο απλούστερα και φθηνότερα είναι τα απαιτούμενα συστήματα προεπεξεργασίας

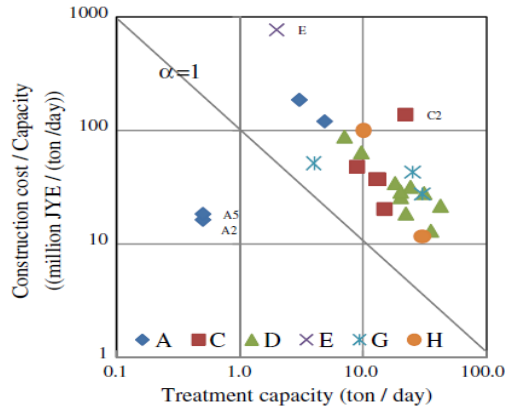
- i. Όσο υψηλότερη είναι η απαιτούμενη τεχνολογία (πχ βιοαντιδραστήρες), τόσο υψηλότερο είναι το κόστος κατασκευής, ενώ συνήθως αντιστρόφως ανάλογα κυμαίνεται το εργατικό κόστος.
- ii. Όσο αυξάνεται η δυναμικότητα τόσο μειώνεται το αρχικό κόστος επένδυσης ανά τόνο οργανικού.

Πίνακας 7.1. Παράμετροι κόστος επένδυσης και λειτουργίας μονάδων αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης (EPA, *Eunomia* 2002)

Αναερόβια χώνευση	Κομποστοποίηση
Απόκτηση γης	
Χρόνος κατασκευής	
Εξοπλισμός/Τεχνολογία/Αυτοματισμοί	
Ρυθμός χρήσης μονάδας	
Ισχύουσα φορολογική νομοθεσία	
Ενεργειακές απαιτήσεις	
Νερό & Διαχείριση λυμάτων	
Κόστη Συντήρησης	
Εργατικό κόστος	
Πρόσθετα υποστρώματα	
Δυναμικότητα	
Καθαρότητα εισερχόμενου οργανικού	

Κόστος κομποστοποίησης κλειστού συστήματος

Έρευνα από *Eunomia* (2009) προτείνει για μονάδα κομποστοποίησης κλειστού συστήματος στην Ελλάδα δυναμικότητας 20.000 Mg/έτος & διάρκεια ζωής 20 χρόνια, αρχικό κόστος επένδυσης 171€/Mg εισερχομένων απορριμμάτων και ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης 11€/Mg εισερχομένων απορριμμάτων. Στα λειτουργικά έξοδα περιλαμβάνονται και το κόστος του ανθρώπινου δυναμικού. Στο Σχήμα 7.1, που ακολουθεί, ο Zhang (2011) συγκεντρώνει στοιχεία σχετικά με το κόστος κατασκευής και τα λειτουργικά κόστη διαφόρων μονάδων στην Ιαπωνία. Παρατηρείται ότι η γενική τάση είναι ότι το κόστος κατασκευής μειώνεται με την αύξηση της δυναμικότητας.



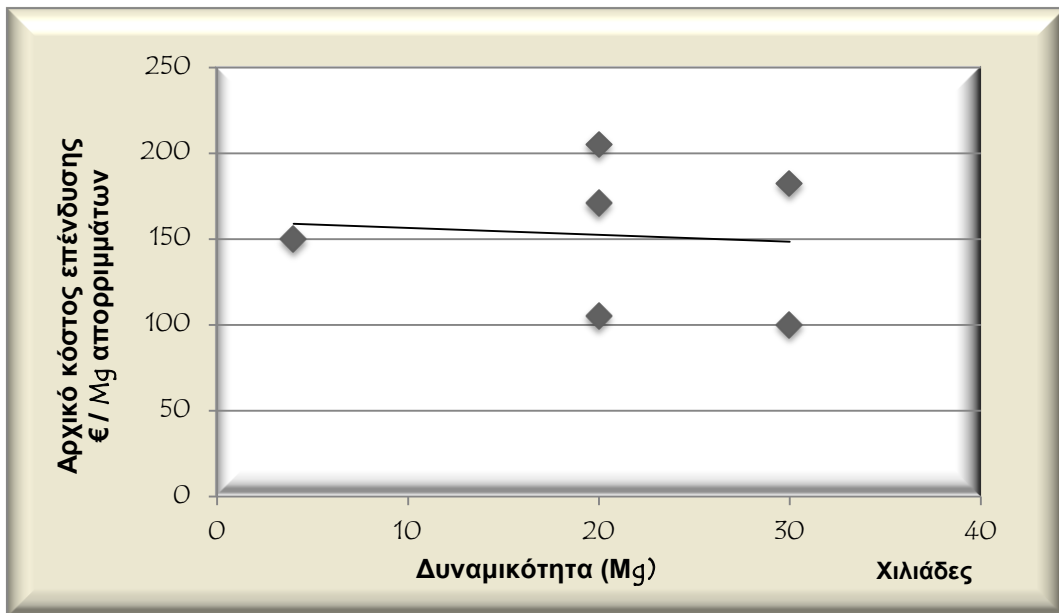
Σχήμα 7.1. Κόστος κατασκευής μονάδων κομποστοποίησης στην Ιαπωνία συναρτήσει της δυναμικότητας

Συγκεντρώνοντας στοιχεία από την βιβλιογραφία, από ήδη υπάρχουσες μονάδες και από προσεγγιστικά μοντέλα, δημιουργήθηκαν γραμμές τάσεις για την προσέγγιση του αρχικού κόστους επένδυσης και ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης μονάδας κομποστοποίησης σε κλειστό σύστημα συναρτήσει της ετήσιας δυναμικότητας. Τυπικές τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.

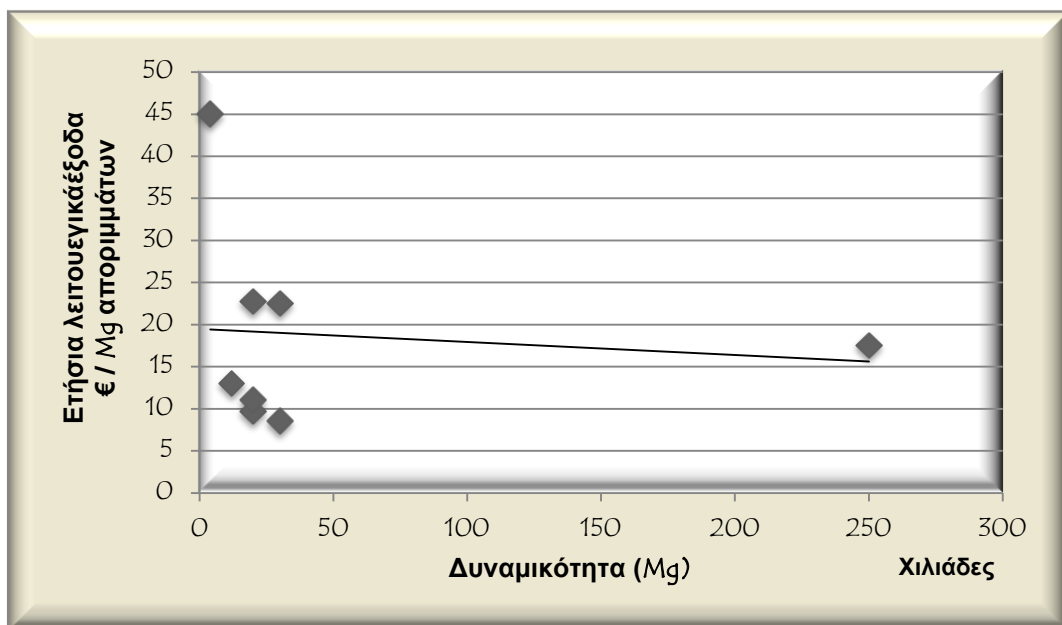
Πίνακας 7.2. Αρχικό κόστος Επένδυσης και ετήσιο κόστος λειτουργίας & συντήρησης μονάδας κομποστοποίησης κλειστού συστήματος

Υπόστρωμα	Δυναμικότητα	Αρχικό Κόστος	Ετήσιο κόστος λειτουργίας & συντήρησης	Πηγή
	(Mg/έτος)	(€/Mg/έτος)	(€/Mg/έτος)	
ΟΚ ΑΣΑ ¹	4000	150	45	Compost brochure
ΟΚ ΑΣΑ ¹	30.000	182,50	22,50	Jacobs, 2008
ΟΚ ΑΣΑ ¹	30.000	100	-	ΕΕΑ, 2002
ΟΚ ΑΣΑ ¹	17.200	108	25	Eunomia, 2002
ΟΚ ΑΣΑ ¹	20.000	205	22,75	Eunomia, 2009

1: Οργανικό Κλάσμα Αστικών Σύμμεικτων Απορριμμάτων



Διάγραμμα 7.1. Αρχικό κόστος επένδυσης μονάδας κομποστοποίησης σε κλειστό σύστημα



Διάγραμμα 7.2. Λειτουργικών έξοδα & κόστη συντήρησης μονάδας κομποστοποίησης σε κλειστό σύστημα

Κόστος αναερόβιας χώνευσης

Ομοίως, έρευνα από [Eunomia \(2009\)](#) προτείνει για μονάδα αναερόβιας χώνευσης με μονάδα συμπαραγωγής στην Ελλάδα δυναμικότητας 20.000 Mg/έτος & διάρκεια ζωής 20 χρόνια, αρχικό κόστος επένδυσης 399 €/Mg εισερχομένων απορριμμάτων και ετήσιο

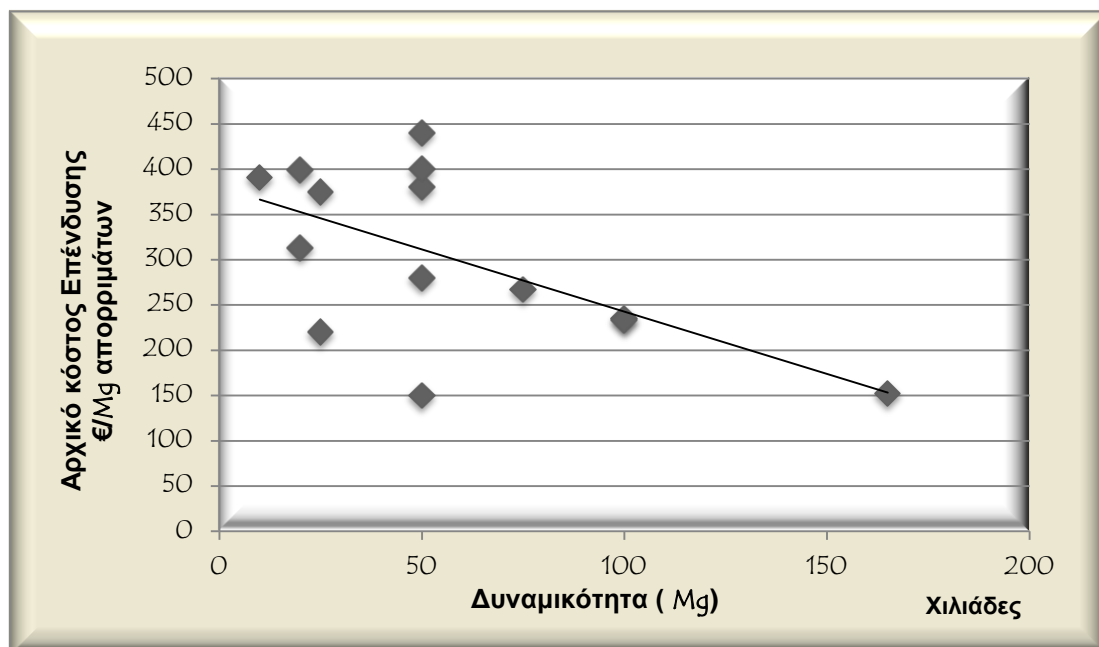
κόστος λειτουργίας και συντήρησης 31€/Mg εισερχομένων απορριμμάτων. Στα λειτουργικά έξοδα περιλαμβάνονται και το κόστος του ανθρώπινου δυναμικού.

Συγκεντρώνοντας στοιχεία από την βιβλιογραφία, από ήδη υπάρχουσες μονάδες και από προσεγγιστικά μοντέλα δημιουργήθηκαν γραμμές τάσεις για την προσέγγιση του αρχικού κόστους επένδυσης και ετήσιου κόστους λειτουργίας και συντήρησης μονάδας αναερόβιας χώνευσης συναρτήσει της ετήσιας δυναμικότητας. Τα κυριότερα κόσθη αναφορικά με την επένδυση της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης είναι ο ακριβός βασικός εξοπλισμός (Βαβουράκη, 2010). Στον Πίνακα 7.3 παρατίθενται αρχικά κόσθη επένδυσης για διαφορετικές δυναμικότητες σε διάφορες χώρες της Ευρώπης. Στα νούμερα αυτά δεν περιλαμβάνεται το κόστος απόκτησης γης.

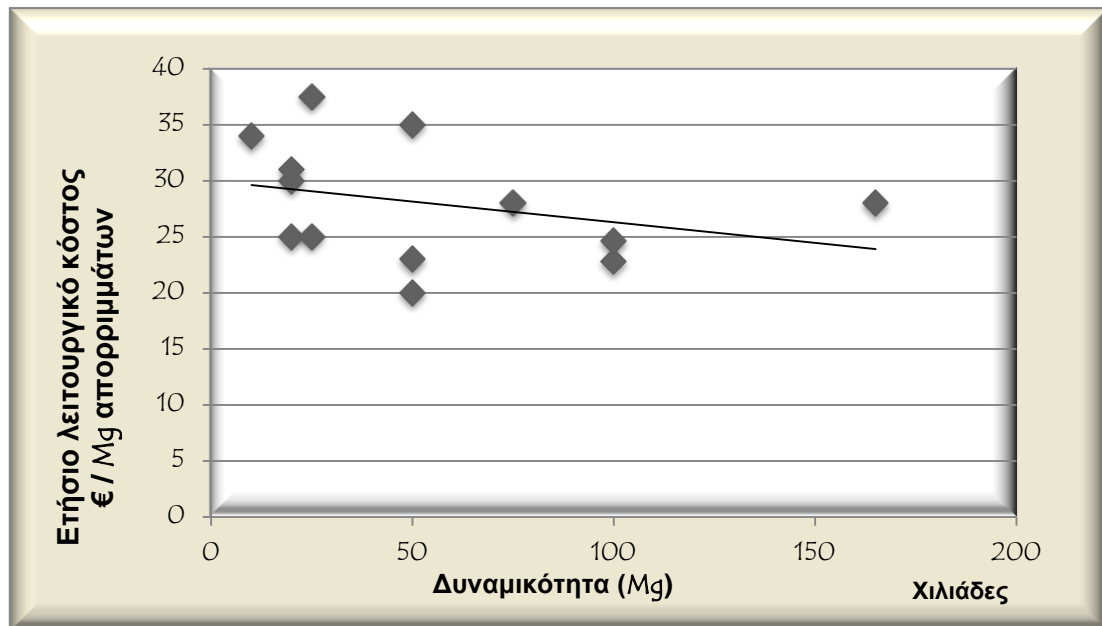
Πίνακας 7.3. Σύγκριση αρχικού κόστους επένδυσης για μονάδες αναερόβιας χώνευσης στην Ευρώπη (Browne, 2011)

Υπόστρωμα	Τεχνολογία	Χώρα	Ποσότητα	Αρχικό Κόστος
			(Mg/έτος)	(€/Mg)
OK ΑΣΑ ¹	Ξηρή ασυνεχούς ροής	Γερμανία	25.000	220
OK ΑΣΑ ¹	Ξηρή ασυνεχούς ροής	Ιρλανδία	50.000	280
OK ΑΣΑ ¹	Ξηρή συνεχούς ροής	Βέλγιο	50.000	380

1: Οργανικό Κλάσμα Αστικών Σύμμεικτων Απορριμμάτων



Διάγραμμα 7.3. Αρχικό κόστος επένδυσης μονάδας αναερόβιας χώνευσης



Διάγραμμα 7.4 Κόστη λειτουργίας & συντήρησης μονάδας αναερόβιας χώνευσης

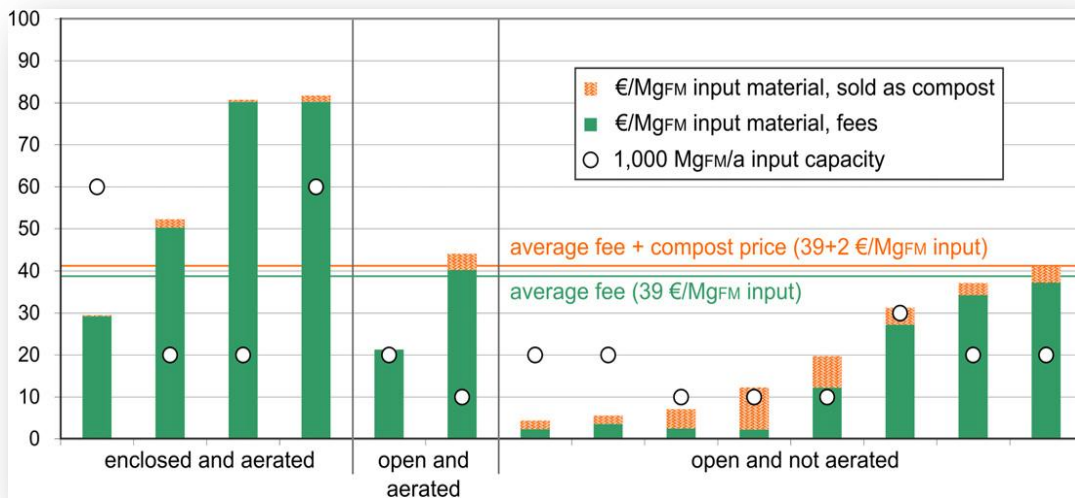
Τιμολογιακή πολιτική & απορρόφηση

Σημαντική παράμετρος για την οικονομική βιωσιμότητα μιας μονάδας διαχείρισης απορριμμάτων είναι η τιμολογιακή πολιτική η οποία περιλαμβάνει την τιμή πώλησης και το τέλος εισερχόμενων απορριμμάτων ή αλλιώς το τέλος εισόδου (*gate fee*) καθώς και η απορρόφηση του τελικού προϊόντος.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το βιοαέριο πωλείται σε εγγυημένη τιμή, όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 1. Αντίθετα για το κομπόστ δεν υπάρχει καθορισμένη τιμή πώλησης. Η ποιότητα του τελικού προϊόντος εξαρτάται τόσο από την τεχνολογία κομποστοποίησης όσο και από το σύστημα διαλογής του οργανικού. Σύμφωνα με [van Haaren \(2009\)](#) πολλές μονάδες είτε παραχωρούν το τελικό κομπόστ δωρεάν ([Nantucket Visit 2008](#)), είτε το πωλούν με την τιμή να κυμαίνεται μεταξύ € 7/Mg κομπόστ ([Clemson University, 2009](#)) και € 22/Mg κομπόστ ([Cedar Grove composting, 2009](#)). Σύμφωνα με [Eunomia \(2009\)](#) και [Barth \(2008\)](#) η μέση τιμή πώλησης στην ΕΕ είναι € 7/Mg κομπόστ, δηλαδή περίπου 3,5 €/Mg εισερχομένων απορριμμάτων.

Ο [Meyer-Kohlstock \(2012\)](#) πραγματοποίησε έρευνα για την τιμή πώλησης του κομπόστ και το τέλος εισόδου σε 56 μονάδες κομποστοποίησης στην Γερμανία, που αντιπροσωπεύουν το 16% των συνολικών μονάδων που είναι εγκατεστημένες στην Γερμανία. Σύμφωνα με τα στοιχεία που συνέλεξε από το 25% των μονάδων που συμμετείχαν στην έρευνα καταγράφει πως η αξία του κομπόστ είναι πολύ μικρή, περίπου €4/Mg εισερχομένων απορριμμάτων. Το 75% των μονάδων που συμμετείχαν στην έρευνα κατέθεσε πως πωλούν το παραγόμενο κομπόστ, το 4,5% το διαθέτει χωρίς αντίτιμο ενώ το 20,5% δεν

δήλωσε τίποτα σχετικά με την τιμή πώλησης. Η μέση τιμή του τέλους εισόδου, σύμφωνα με την έρευνα εκτιμάται στα €39/Mg εισερχομένων απορριμμάτων.



Σχήμα 7.2. Δυναμικότητα, τέλος πύλης και τιμή πώλησης κομπόστ σε 14 μονάδες κομποστοποίησης στη Γερμανία.

Στην Μ. Βρετανία, σύμφωνα με στοιχεία [Wrap \(2012\)](#), το τέλος εισόδου για την αναερόβια χώνευση των οργανικών απορριμμάτων ΑΣΑ κυμαίνεται μεταξύ 40€ - 70€/Mg εισερχομένων απορριμμάτων. Για την κομποστοποίηση σε κλειστό σύστημα οι τιμές κυμαίνονται όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα.

Πίνακας 7.4 Τέλος εισερχομένων απορριμμάτων σε κλειστό σύστημα κομποστοποίησης ([Wrap, 2012](#))

Τύπος απορριμμάτων	Μέση τιμή (€/Mg)	Διακύμανση (€/Mg)
Υπολείμματα τροφών	53	35-70
Πράσινα απορρίμματα	30	20-40
Υπολείμματα τροφών & πράσινα απορρίμματα	52	33-71
Υπολείμματα τροφών, πράσινα απορρίμματα & χαρτί	65	30-100

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια απορροφάται 100% από το Σύστημα καθώς η αναερόβια χώνευση αποτελεί ΑΠΕ και η ΔΕΗ υποχρεούται να την αγοράσει. Από την άλλη μεριά η απορρόφηση για το σύστημα της κομποστοποίησης εξαρτάται τόσο από την αγορά που απευθύνεται αλλά και από την παραγόμενη ποσότητα του κομπόστ. Πιο συγκεκριμένα, μια μονάδα κομποστοποίησης πρέπει να εφαρμόζεται σε αγροτικές και ημιαστικές περιοχές για την απορρόφηση του τελικού κομπόστ. Οι ήδη υπάρχουσες μονάδες στην Ευρώπη καταγράφουν ένα ευρύ φάσμα δυναμικότητων. Για παράδειγμα στην πόλη Gironde της Γαλλίας η δυναμικότητα ανέρχεται σε 36.000 Mg/έτος ενώ σε μονάδα κομποστοποίησης στο Cupello στην Ιταλία η δυναμικότητα ανέρχεται σε 315 Mg/έτος. Στον Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται οι δυναμικότητες σε διάφορες μονάδες στην Ευρώπη και ο πληθυσμός/νοικοκυριά που καλύπτουν με εφαρμογή προγράμματος Διαλογής στην Πηγή και συγκεντρωτικής κομποστοποίησης.

Πίνακας 7.5. Δυναμικότητες σε μονάδες συγκεντρωτικής κομποστοποίησης στην Ευρώπη με εφαρμογή προγράμματος ΔσΠ (*Compost brochure*)

Κράτος	Πόλη	Πληθυσμός που καλύπτει το πρόγραμμα/Αριθμός νοικοκυριών	Δυναμικότητα (Mg/έτος)
Ισπανία	Baix Camp	25.000 κάτοικοι	4.000
		8.000 νοικοκυριά	
	Barcelona	137.000 κάτοικοι	10.700
		55.000 νοικοκυριά	
Ηνωμένο Βασίλειο	Wyecycle	1.000 νοικοκυριά	250
Γαλλία	Gironde	20.000 νοικοκυριά	36.000
Ιταλία	Cupello	4.200 νοικοκυριά	315
	Monza	119.000 κάτοικοι	10.000
Ιρλανδία	Kerry	5.600 κάτοικοι	500
	Limerick	1.766 νοικοκυριά	950

7.2 Παρουσίαση βασικών οικονομικών σεναρίων

Σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι να βρεθεί το κατάλληλο εύρος πληθυσμού στο οποίο συμφέρει οικονομικά η κάθε μια από τις δύο μεθόδους βιολογικής επεξεργασίας. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων σε σχέση με την οικονομικότητα της κάθε επένδυσης υπολογίζονται οι εξής οικονομικοί δείκτες: ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης επένδυσης (IRR), η καθαρά παρούσα αξία (NPV) και τέλος τα έτη αποπληρωμής του αρχικού κεφαλαίου.

Για την τεχνοοικονομική ανάλυση δημιουργείται υπολογιστικό μοντέλο για το αρχικό κόστος επένδυσης και για τα κόστη λειτουργίας & συντήρησης βάσει των στοιχείων που συλλέχθηκαν από την βιβλιογραφία. Στον Πίνακα 7.6 συνοψίζονται οι παραδοχές. Θεωρείται ότι δεν λαμβάνονται δάνεια πέρα της επιχορήγησης. Το υπόλοιπο κεφάλαιο προέρχεται από ίδια κεφάλαια.

Πίνακας 7.6. Παραδοχές τεχνοοικονομικής ανάλυσης

Επιχορήγηση	30% επί του αρχικού κεφαλαίου
Επιτόκιο αναγωγής	9%
Τέλος εισερχομένων απορριμμάτων	40€/Mg απορριμμάτων
Έτη λειτουργίας μονάδων	20 έτη

Στους Πίνακες 7.7 παρουσιάζεται το βασικό σενάριο μονάδας αναερόβιας χώνευσης, με μονάδα ΣΗΘ, δυναμικότητας 20.000Mg/έτος, ενώ στο Πίνακα 7.8 το βασικό σενάριο μονάδας κομποστοποίησης δυναμικότητας 500Mg/έτος.

Πίνακας 7.7. Παραδοχές, οικονομικά στοιχεία και αποτελέσματα ανάλυσης μονάδας αναερόβιας χώνευσης δυναμικότητας 20.000Mg/έτος

Παραδοχές			
Πληθυσμός	156.000	Κάτοικοι	
Συμμετοχή	65	%	
Δυναμικότητα	20.000	Mg/έτος	
Αρχικό κόστος Επένδυσης	340	€/Mg	
Ετήσιο κόστος λειτουργίας & συντήρησης	29	€/Mg	
Εγκατεστημένη ισχύς	792	kW	
Διάρκεια ζωής	20	Έτη	
Τιμή πώλησης	120	€/MWh	
Επιτόκιο	9	%	
Επιχορήγηση	30	% επί του αρχικού κεφαλαίου	
Τέλος εισόδου εισερχομένων απορριμμάτων	40	€/Mg	
Αποτελέσματα			
IRR	15,52	%	
NPV	2.380.892	€	
Χρόνος αποπληρωμής αρχικού κεφαλαίου	9,2	Έτη	

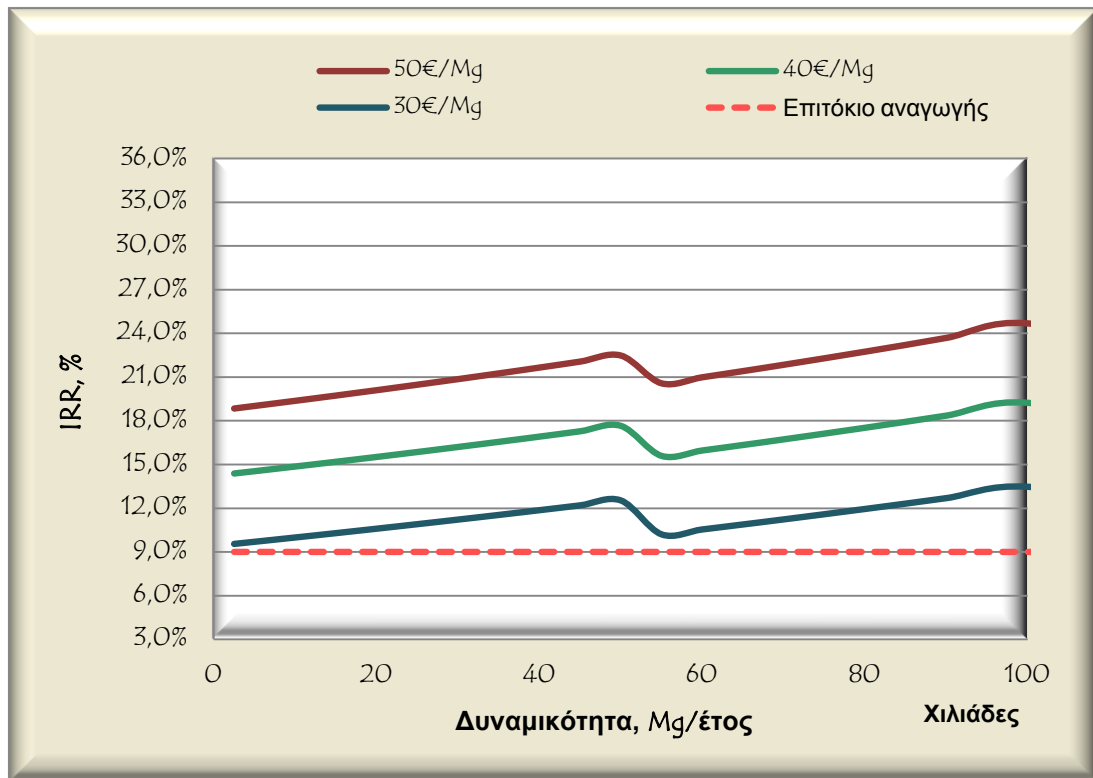
Πίνακας 7.8. Παραδοχές, οικονομικά στοιχεία και αποτελέσματα ανάλυσης μονάδας κομποστοποίησης κλειστού συστήματος δυναμικότητας 500Mg/έτος

Παραδοχές			
Πληθυσμός	4.000	Κάτοικοι	
Συμμετοχή	65	%	
Δυναμικότητα	500	Mg/έτος	
Αρχικό κόστος Επένδυσης	160	€/Mg	
Ετήσιο κόστος λειτουργίας & συντήρησης	19	€/Mg	
Διάρκεια ζωής	20	Έτη	
Τιμή πώλησης	7	€/Mg κομπόστ	
Επιτόκιο αναγωγής	9	%	
Επιχορήγηση	30	% επί του αρχικού κεφαλαίου	
Τέλος εισόδου εισερχομένων απορριμμάτων	40	€/Mg	
Αποτελέσματα			
IRR	19,65	%	
NPV	47.432	€	
Χρόνος αποπληρωμής αρχικού κεφαλαίου	6,8	Έτη	

Ανάλυση Ευαισθησίας βασικού σεναρίου αναερόβιας χώνευσης

Αρχικά πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας βάσει τέλους εισερχομένων απορριμμάτων. Εξετάζονται 2 σενάρια με 30 και 50€/Mg. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 7.6.

Παρατηρείται πως σε όλα τα σενάρια η μονάδα αναερόβιας χώνευσης είναι οικονομικά βιώσιμη με δυναμικότητα σε όλο το εύρος των δυναμικότητων. Σημειώνεται πως για να υπάρχει ικανοποιητική εγκατεστημένη ισχύς η δυναμικότητα της μονάδας αναερόβιας χώνευσης πρέπει να είναι πάνω από 2.500 Mg/έτος

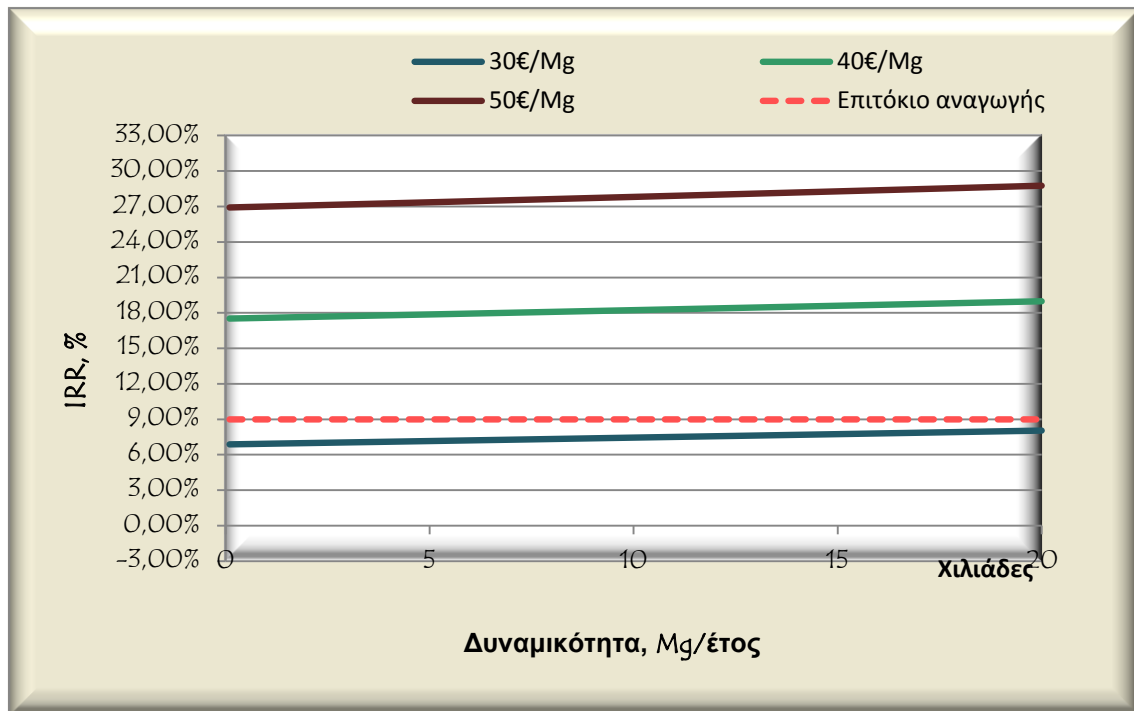


Διάγραμμα 7.6. Εσωτερικός βαθμός απόδοσης επένδυσης μονάδας αναερόβιας χώνευσης συναρτήσει τέλους εισόδου εισερχομένων απορριμμάτων και δυναμικότητας

Ανάλυση Ευαισθησίας κομποστοποίησης

Σύμφωνα με στοιχεία που παρουσιάζονται στο υποκεφάλαιο 'Τιμολογιακή πολιτική', πολλές μονάδες παραχωρούν το παραγόμενο κομπόστ έναντι μηδενικού αντιτίμου. Εξετάζονται τρεις αναλύσεις ευαισθησίας με παράμετρο την τιμή του τέλους εισερχομένων απορριμμάτων προκειμένου να εξεταστεί η οικονομική βιωσιμότητα της μονάδας κομποστοποίησης. Θεωρούνται πέραν του βασικού δυο επιπλέον τέλη εισερχομένων απορριμμάτων, ένα αισιόδοξο με τιμή στα 50€/Mg κομπόστ και ένα απαισιόδοξο με τιμή στα 30 €/Mg κομπόστ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 7.8.

Παρατηρείται πως, στο συντηρητικό σενάριο κατά το οποίο το τέλος εισερχομένων απορριμμάτων ανέρχεται στα 30€/Mg, η μονάδα κομποστοποίησης δεν είναι οικονομικά βιώσιμη σε όλο το εύρος των δυναμικοτήτων. Στα άλλα δύο σενάρια, το βασικό και το αισιόδοξο, με τιμές αντίστοιχα 40 και 50€/Mg, παρατηρείται πως η μονάδα είναι οικονομικά βιώσιμη σε όλο το εύρος.



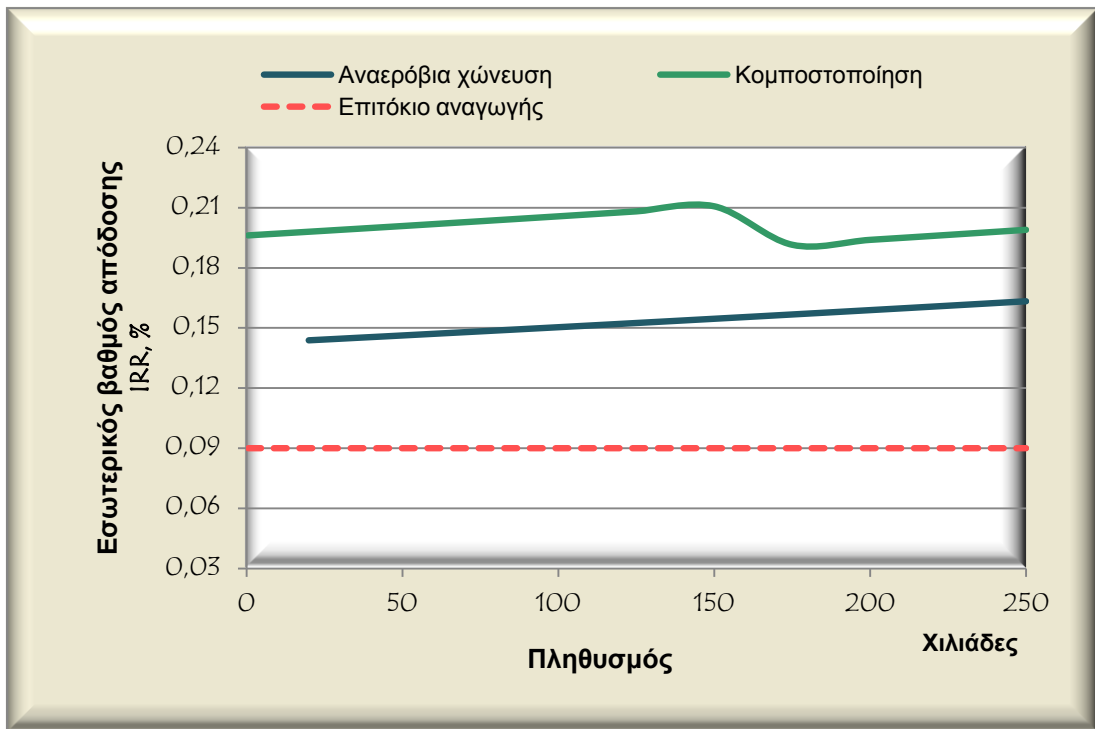
Διάγραμμα 7.8. Εσωτερικός βαθμός απόδοσης επένδυσης μονάδας κομποστοποίησης βάσει τέλους εισερχομένων απορριμμάτων κομπόστ

Σύγκριση αναερόβιας χώνευσης & κομποστοποίησης βάσει πληθυσμού

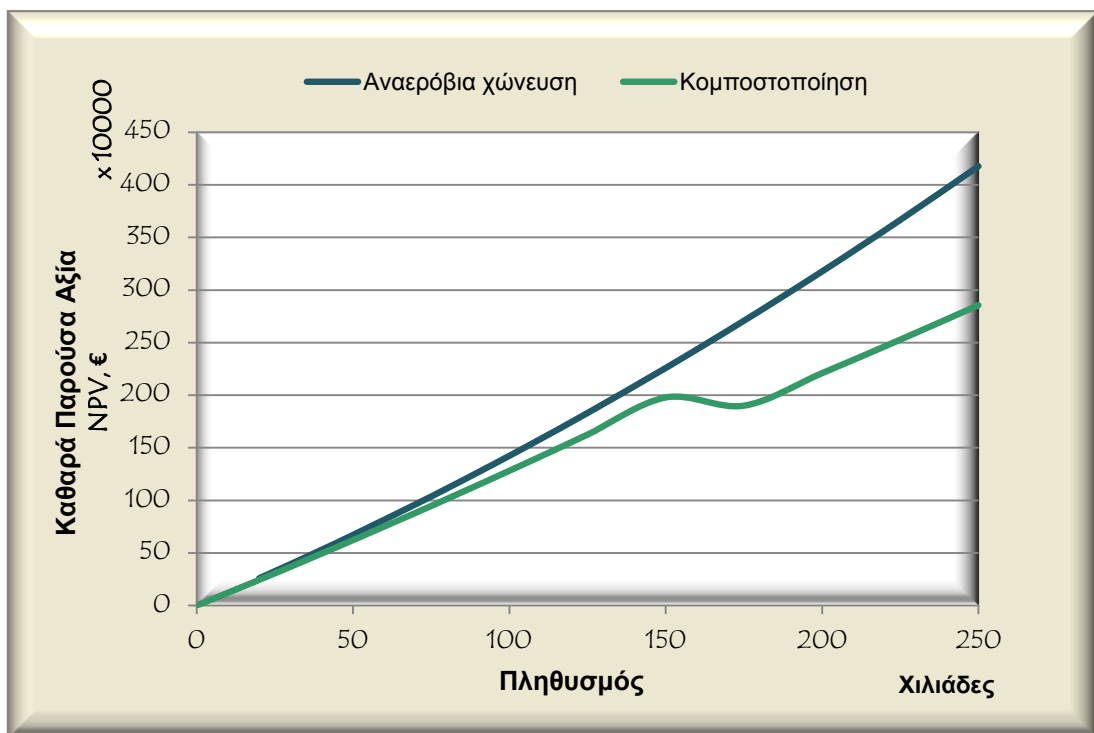
Σε περιοχές με πληθυσμό μεγαλύτερο από 160.000 κατοίκους η αγορά δεν μπορεί να απορροφήσει το παραγόμενο κομπόστ. Για αυτό και η κομποστοποίηση απευθύνεται σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Με δεδομένη αυτή τη θεώρηση, η οποία προκύπτει από στοιχεία από ήδη υπάρχουσες μονάδες αναερόβιας χώνευσης στην Ευρώπη ([Compost brochure](#)) θεωρούνται 2 περιοχές μελέτης:

- Από 500 έως 250.000 κατοίκους
- Από 250.000 έως 800.000 κατοίκους

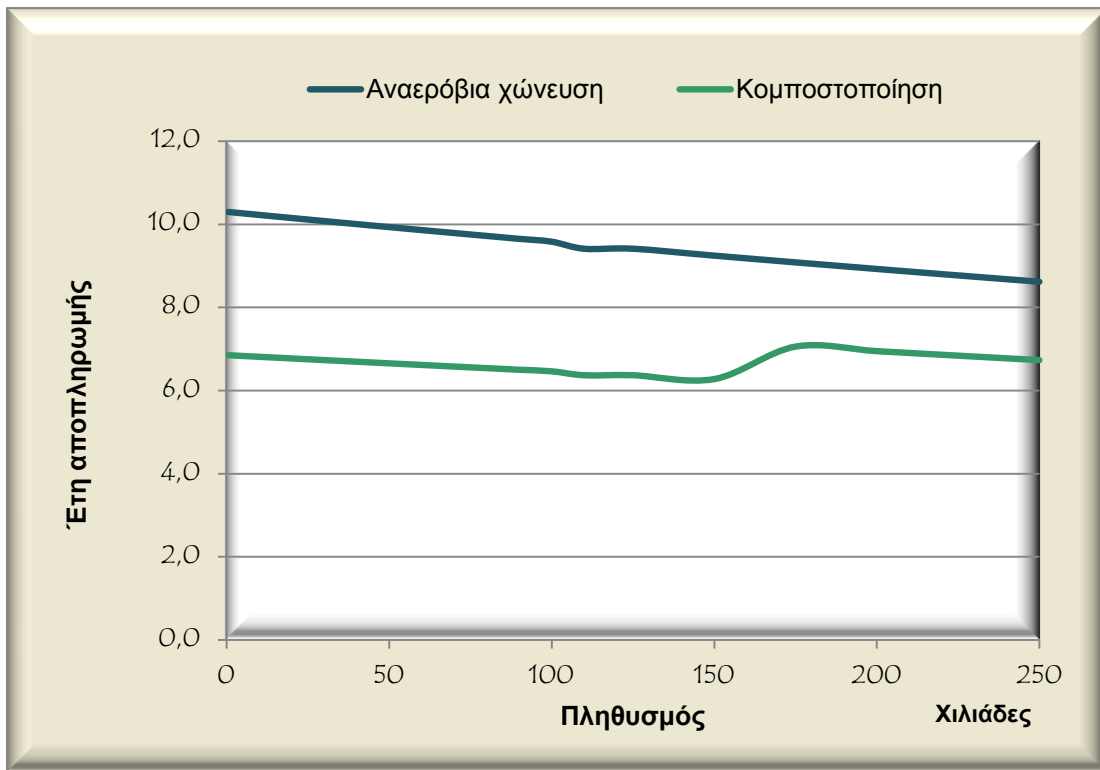
Σημειώνεται ότι, η αναερόβια χώνευση στις περιοχές με πληθυσμό πάνω από 20.000 κατοίκους (δυναμικότητα 2.500 Mg/έτος) έχει ικανοποιητική εγκατεστημένη ισχύ και για αυτό κάτω από τους 20.000 κατοίκους μελετάται μόνο η μονάδα κομποστοποίησης ως προς την οικονομικότητα της. Επιπλέον, για δυναμικότητα άνω των 20.000Mg/έτος (περίπου 155.000 κάτοικοι) θεωρείται το παραγόμενο κομπόστ δεν μπορεί να απορροφηθεί πλήρως και για αυτό λαμβάνεται τιμή πώλησης του κομπόστ 0€/Mg.



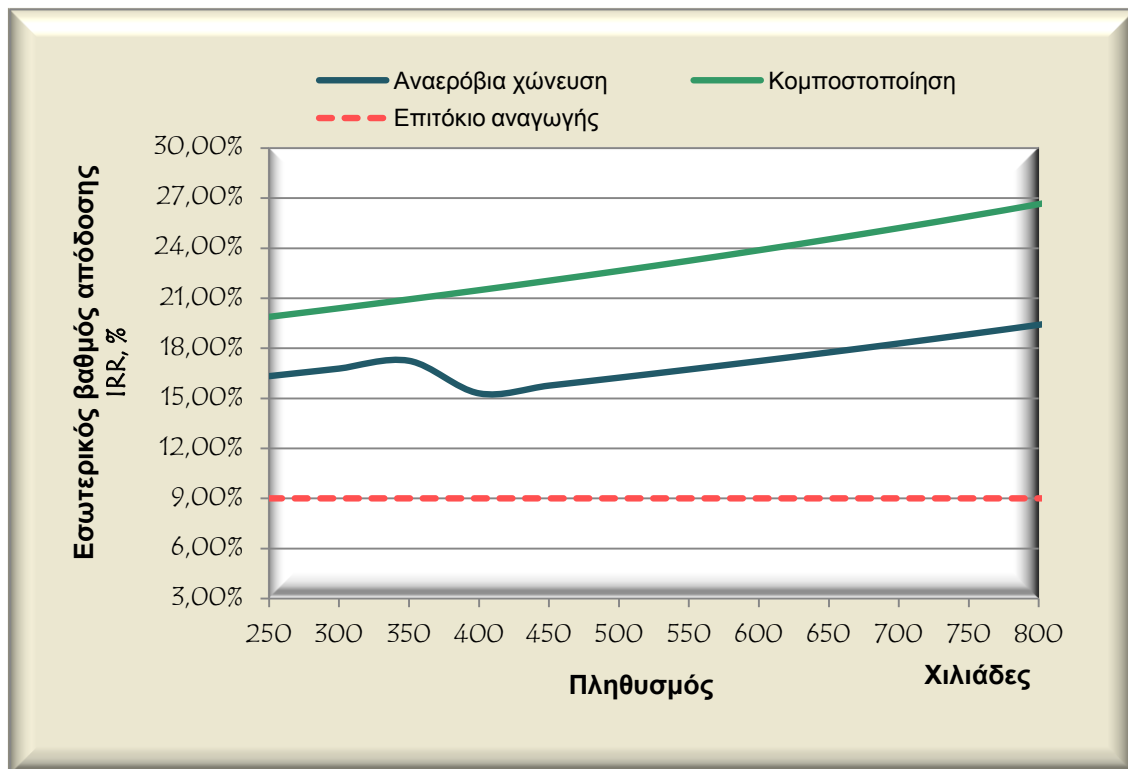
Διάγραμμα 7.9. Σύγκριση εσωτερικού βαθμού απόδοσης μονάδας αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης για περιοχή πληθυσμού έως 250.000 κατοίκους



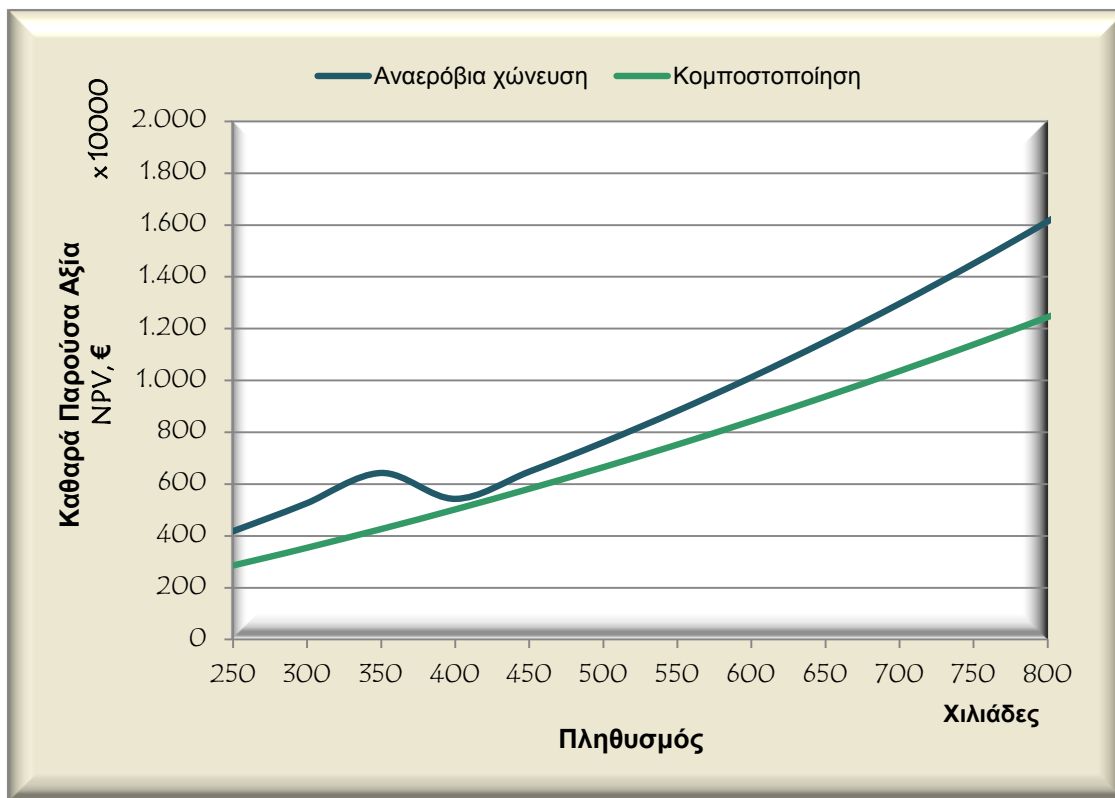
Διάγραμμα 7.10. Σύγκριση καθαρής παρούσας αξίας (NPV) μονάδας αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης για περιοχή έως 250.000 κατοίκους.



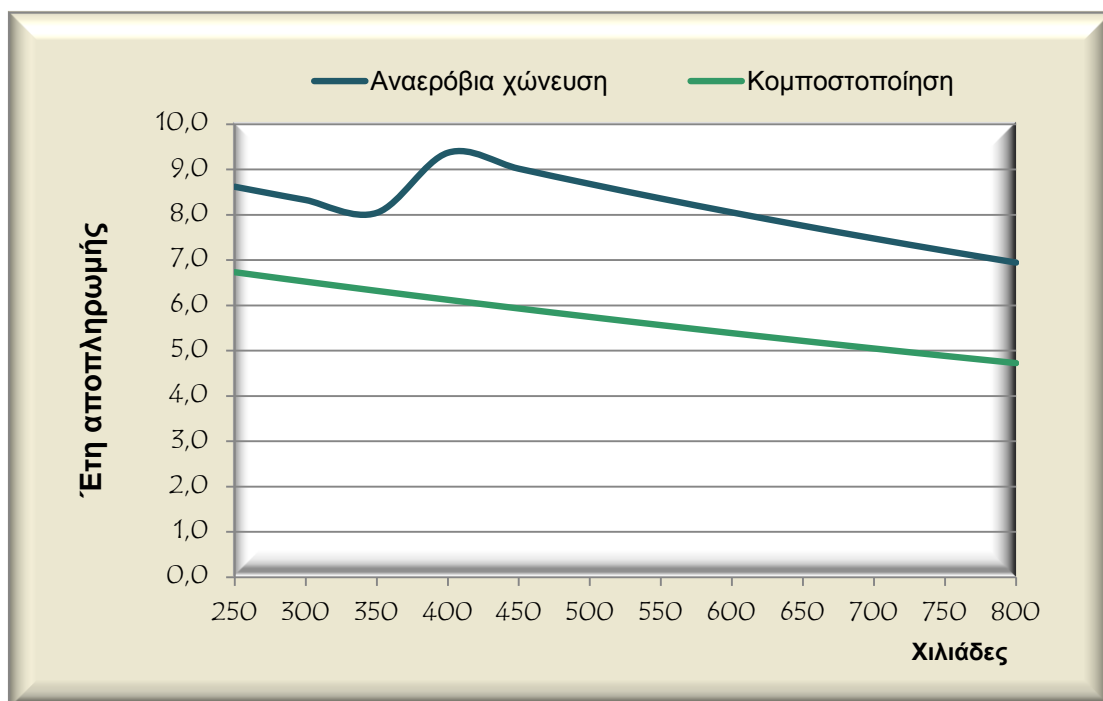
Διάγραμμα 7.11. Σύγκριση χρόνου αποπληρωμής αρχικής επένδυσης μονάδας αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης για περιοχή έως 250.000 κατοίκους



Διάγραμμα 7.12. Σύγκριση εσωτερικού βαθμού απόδοσης μονάδας αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης για περιοχή πληθυσμού από 250.000 έως 800.000 κατοίκους



Διάγραμμα 7.13. Σύγκριση καθαρής παρούσας αξίας μονάδας αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης για περιοχή πληθυσμού από 250.000 έως 800.000 κατοίκους



Διάγραμμα 7.14. Σύγκριση χρόνου αποπληρωμής αρχικής επένδυσης μονάδας αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης για περιοχή πληθυσμού από 250.000 έως 800.000 κατοίκους

Βάσει του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της εκάστοτε επένδυσης παρατηρείται ότι η κομποστοποίηση σε όλο εύρος παρουσιάζει υψηλότερο εσωτερικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με την αναερόβια χώνευση. Αυτό εξηγείται λόγω του γεγονότος ότι το αρχικό κόστος επένδυσης της πρώτης ανέρχεται σχεδόν στο μισό της δεύτερης. Επιπλέον παρατηρούνται τα ακόλουθα:

- ο Στους 155.000 κατοίκους γίνεται η παραδοχή της μηδενικής τιμής πώλησης του κομπόστ εξαιτίας της δυσκολίας απορρόφησης από την αγορά και για αυτό το IRR της κομποστοποίησης μειώνεται. Στην συνέχεια καθώς αυξάνεται η δυναμικότητα, ταυτόχρονα μειώνεται και το αρχικό κόστος επένδυσης για αυτό και το IRR ακολουθεί και πάλι αύξουσα πορεία.
- ο Μετά τους 400.000 κατοίκους στο σύστημα της αναερόβιας χώνευσης η εγκατεστημένη ισχύς είναι πλέον μεγαλύτερη των 2MW, με αποτέλεσμα να είναι μικρότερη η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτό και η τιμή του IRR μειώνεται. Αντίστοιχα όμως με την κομποστοποίηση, καθώς αυξάνεται η δυναμικότητα μειώνεται και το αρχικό κόστος επένδυσης για αυτό και το IRR ακολουθεί και πάλι αύξουσα πορεία.

Για την ορθή όμως σύγκριση των δύο επενδύσεων πρέπει να ληφθεί υπόψη και η καθαρά παρούσα αξία. Η κομποστοποίηση εμφανίζει σε όλο το εύρος υψηλότερο IRR. Ωστόσο, σε περιοχές με πληθυσμός από 20.000 κατοίκους και πάνω η αναερόβια χώνευση παρουσιάζει υψηλότερη καθαρά παρούσα αξία των χρηματοροών της επένδυσης. Σε σχέση με τα έτη αποπληρωμής προκύπτει ότι, ο μέρος όρος για την αποπληρωμή μια επένδυσης μονάδας αναερόβιας χώνευσης ανέρχεται στα 9,1 έτη ενώ για την κομποστοποίηση στα 6,3 έτη.

Από τους οικονομικούς δείκτες συμπεραίνεται πως, και οι δύο επενδύσεις είναι οικονομικά συμφέρουσες. Η επιλογή εξαρτάται από τις ανάγκες της εκάστοτε τοπικής κοινωνίας στην οποία η μονάδα πρόκειται να εγκατασταθεί. Συνοψίζεται ότι, μια μονάδα κομποστοποίησης απευθύνεται σε αγροτικές και ημιαστικές περιοχές μέχρι 160.000 κατοίκους περίπου, ενώ αντίθετα μια μονάδα αναερόβιας χώνευσης σε περιοχές ημιαστικές-αστικές (>20.000 κάτοικοι).

Στο σχήμα 7.3 που ακολουθεί απεικονίζονται τα νησιά στα οποία μια μονάδα αναερόβιας χώνευσης δύναται να πραγματοποιηθεί. Τα επιλεγμένα νησιά χωρίζονται σε 2 κατηγορίες με βάση τον πληθυσμό:

- 1^η κατηγορία: πληθυσμός μεγαλύτερος των 20.000 κατοίκων. Περιλαμβάνονται τα νησιά Κέρκυρα, Ζάκυνθο, Κεφαλονιά, Λευκάδα, Λέσβο, Σάμο, Χίο, Ρόδο, Κω, Σύρο & Σαλαμίνα.
- ii. 2^η κατηγορία: πληθυσμός μικρότερος των 20.000 κατοίκων. Περιλαμβάνονται ανήκουν τα νησιά Σαντορίνη & Νάξος, στα οποία λόγω της έντονης τουριστικής κίνησης αυξάνονται ο όγκος των ΑΣΑ φτάνει μέχρι τους 10.000 τόνους τον χρόνο (ΠΕΣΣΔΑ Ν. Αιγαίου).



Σχήμα 7.3. Απεικόνιση νησιών για την εγκατάσταση μονάδας αναερόβιας χώνευσης

Κεφάλαιο 8^ο

Συμπεράσματα & πρόταση για
μελλοντική εργασία

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελέτησε και συνέκρινε δύο βιολογικές μεθόδους αξιοποίησης των οργανικών απορριμμάτων ΑΣΑ, της αναερόβιας χώνευσης και της κομποστοποίησης, βάσει των αρχών της ανάλυσης κύκλου ζωής. Σκοπός ήταν να υπολογισθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της κάθε μεθόδου και να βρεθεί η περιβαλλοντικά πιο ωφέλιμη. Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε και μελέτη ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης των ΑΣΑ προκειμένου να εφαρμοστούν οι οδηγίες που ορίζει η ευρωπαϊκή νομοθεσία σε σχέση με την υγειονομική ταφή και την εκτροπή των ρευμάτων ΑΣΑ στα ελληνικά νησιά. Τέλος, η τεχνοοικονομική ανάλυση αποτέλεσε μια εισαγωγή στις δύο μεθόδους προκειμένου να εκτιμήσει και να συγκρίνει το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας μιας μονάδας βιολογικής αξιοποίησης του προδιαλεγμένου κλάσματος ΑΣΑ.

Η μέθοδος της κομποστοποίησης και της αναερόβιας χώνευσης, σύμφωνα με τις αρχές της ανάλυσης κύκλου ζωής, έχουν μικρότερη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε σχέση με τη μέθοδο της υγειονομικής ταφής των απορριμμάτων, η οποία εφαρμόζεται στα ελληνικά νησιά στην παρούσα κατάσταση. Μάλιστα, η διαλογή στην πηγή του οργανικού κλάσματος σε συνδυασμό με την διαλογή στην πηγή των ανακυκλώσιμων υλικών αποτελεί σενάριο, όπως παρουσιάζεται στη παρούσα διπλωματική εργασία, του οποίου το περιβαλλοντικό αποτύπωμα σχετικά με την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου παρουσιάζει αποφευχθείσες εκπομπές.

Οι περιβαλλοντικές επιδράσεις της κάθε μεθόδου εξαρτώνται από την τελική χρήση του αντίστοιχου προϊόντος καθώς και από τα όρια του συστήματος μελέτης. Συγκεκριμένα, οι περιβαλλοντικές επιδράσεις της κομποστοποίησης εξαρτώνται από τις μεθόδους διατήρησης των αερόβιων διαδικασιών, ενώ τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους αντιστάθμισης που χρησιμοποιούνται, με την αντικατάσταση των αζωτούχων λιπασμάτων να παρουσιάζουν μικρότερη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας βάσει σύστασης χαρτιού προς κομποστοποίηση, προκύπτει πως η προσθήκη του ρεύματος του χαρτιού συνεισφέρει θετικά, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος της κομποστοποίησης σε σχέση με την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ουσιαστικά εμπλουτίζει το οργανικό υπόστρωμα σε οργανικό άνθρακα, βελτιώνοντας τον λόγο C/N, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η αποδόμηση του. Επιπλέον, το τελικό κομπόστ χαρακτηρίζεται από υψηλά ποσοστά οργανικού άνθρακα με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι εκπομπές εξοικονόμησης από την τελική χρήση του κομπόστ (αποθήκευση άνθρακα στο έδαφος). Ωστόσο, στο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης των απορριμμάτων συμπεραίνεται ότι κατά την ανακύκλωση του χαρτιού εξοικονομούνται περισσότερες ισοδύναμες εκπομπές σε σχέση με την κομποστοποίηση του με το υπόλοιπο οργανικό κλάσμα.

Ομοίως, στο σύστημα της αναερόβιας χώνευσης σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η τελική χρήση του βιοαερίου και η μέθοδος αξιοποίησης του με την καύση σε μονάδα ΣΗΘ να

παρουσιάζει μικρότερη επίδραση σε σχέση με την αναβάθμιση του σε βιομεθάνιο. Σημειώνεται πως η αναβάθμιση του βιοαερίου είναι μια διεργασία με υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια. Με την μέθοδο της αναερόβιας χώνευσης δεν δύναται παρά να καλυφθεί ένα μέρος των συνολικών ετήσιων ενεργειακών αναγκών της εκάστοτε περιοχής. Η ανάλυση ευαισθησίας βάσει σύστασης ΑΣΑ παρουσιάζει πως σε περιοχές με υψηλό ποσοστό σε οργανικά εξοικονομούνται περισσότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Με κριτήριο την επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, η σύγκριση των δύο βιολογικών μεθόδων εξήγαγε το συμπέρασμα πως, βάσει των επιλεγμένων ορίων του συστήματος, η αναερόβια χώνευση αποτελεί την καταλληλότερο μέθοδο αξιοποίησης του προδιαλεγμένου οργανικού κλάσματος έναντι της κομποστοποίησης διότι στην περίπτωση της πρώτης πραγματοποιείται ενεργειακή αξιοποίηση και μάλιστα παραγωγή πράσινης ενέργειας.

Σύμφωνα με την τεχνοοικονομική ανάλυση, η επιλογή της μεθόδου αξιοποίησης των οργανικών ΑΣΑ εξαρτάται από οικονομικές παραμέτρους. Συγκεκριμένα, η αναερόβια χώνευση παρουσιάζει υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας έναντι της κομποστοποίησης. Έτσι σε περιοχές με πληθυσμό άνω των 20.000 κατοίκων η μέθοδος της αναερόβιας χώνευσης παρουσιάζει οικονομική βιωσιμότητα, σε συνάρτηση πάντα με το τέλος εισερχομένων απορριμμάτων. Αντίθετα, η κομποστοποίηση είναι οικονομικά βιώσιμη σε αγροτικές και ημιαστικές περιοχές με πληθυσμό από 500 έως 155.000 κατοίκους καθώς το κομπόστ απευθύνεται σε συγκεκριμένη αγορά με περιορισμένη απορρόφηση. Ωστόσο για την επιλογή της κάθε μεθόδου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι ανάγκες της τοπικής κοινωνίας.

Μελλοντική εργασία

Τα αποτελέσματα και τα εξαγόμενα συμπεράσματα είναι συνυφασμένα με την κατάλληλη επιλογή των ορίων συστημάτων. Σε μελλοντική εργασία προτείνεται να διερευνηθούν τα όρια συστήματος όπως για παράδειγμα να υπολογιστεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα από την εκτροπή των οργανικών απορριμμάτων από τους ΧΥΤΑ, καθώς και να διερευνηθεί η βιβλιοθήκη δεδομένων.

Στο σύστημα της κομποστοποίησης δύναται να εξεταστεί η τελική χρήση του ως κάλυμμα σε ΧΥΤΑ. Στο σύστημα της αναερόβιας χώνευσης μπορεί να εξεταστεί η αναβάθμιση σε βιομεθάνιο και η χρήση του ως καύσιμο οχημάτων. Τέλος, προτείνεται περαιτέρω οικονομική ανάλυση της επένδυσης των δύο μεθόδων βιολογικής επεξεργασίας βάσει προσφορών και μεγαλύτερης παραμετροποίησης, όπως δανειοδότηση.

Κεφάλαιο 9^ο

Βιβλιογραφία

Ξενογλώσση Βιβλιογραφία

- Amlinger Florian, Peyr Stefan and Cuhls Carsten, 2008. Green house gas emissions form composting and mechanical biological treatment. *Waste Management & Research* 26, 47–60
- Barth J., F. Amlinger, E. Favoino, S. Siebert, B. Kehres, R. Gottschall, M. Bieker, A. Löbig and W. Bidlingmaier, 2008. Compost Production and Use in the European Union. Report for the European Commission DG/JRC.
- Beck-Friis, B., Pell, M., Sonesson, U., Jönsson, H. & Kirchmann, H, 2000. Formation and emission of N₂O and CH₄ from compostheaps of organic household wastes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 62, 317–331.
- Al Seadi Teodorita, Dominik Rutz, Heinz Prassl, Michael Köttner, Tobias Finsterwalder, Silke Volk, Rainer Janssen, 2010. Biogas Handbook, BIG EAST. Published by University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark, <http://www.sdu.dk>.
- Biogas Regions, 2008. Overview table for shining examples of biogas plants. Supported by Intelligent Energy.
- Blanco Julia Martinez, Colon Joan, Gabarrell Xavier, Font Xavier, Sanchez Antoni, Artola Adriana, Rieradevall Joan, 2010. The use of life cycle assessment for the comparison of biowaste composting at home and full scale. *Waste Management* 30, 983–994.
- Blanco Julia Martinez, Pere Munoz, Assumpcio Anton, Joan Rieradevall, 2009. Life cycle assessment of the use of compost from municipal organic waste for fertilization of tomato crops. *Resources, Conservation and Recycling* 53, 340–351
- Boldrin Alessio, Hartling Karin R, Laugen Maria, Christensen Thomas H., 2010. Environmental inventory modelling of the use of compost and peat in growth media preparation. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 1250–1260.
- Boldrin Alessio, Anderson Jacob K., Moller Jacob, Christensen Thomas H., 2009. Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste management & Research* 27, 800–812.
- Bolzonella D, Pavan P, Mace S, Cecchi F. Dry anaerobic digestion of differently sorted organic municipal solid waste: a full-scale experience. *Water Science and Technology* 2006;53(8):23–32.
- Bovea M.D., V. Ibanez-Flores, A. Gallardo, F.J. Colomer-Mendoza, 2010. Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. *Waste management* 30, 2383–2395.
- Brownea James, Abdul-Sattar Nizamia, T Thamsiroj, Jerry D. Murphy, 2011. Assessing the cost of biofuel production with increasing penetration of the transport fuel market: A case study of gaseous biomethane in Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 4537–4547.
- Bruun, S., Hansen, T.L., Christensen, T.H., Magid, J. & Jensen, L.S, 2006. Application of processed organic municipal solid waste on agricultural land: a scenario analysis. *Environmental Modeling and Assessment*, 11, 251–265.
- Bywater Angela. A Review of Anaerobic Digestion Plants on UK Farms – Barriers, Benefits and Case Studies.

- Cabaraban, M.T.I., Khire, M.V. & Alocilja, E.C. (2008) Aerobic in-vessel composting versus bioreactor landfilling using life cycle inventory models. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 10, 39–52.
- Cadena Erasmo, Colon Joan, Sanchez Antoni, Font Xavier, Artola Adriana, 2009. A methodology to determine gaseous emissions in a composting plant. *Waste Management* 29, 2799–2807. .
- Cecchi, F., Pavan, P., Mata_Alvarez, J., Bassettit, A. and Cozzolino, C., 1991. Anaerobic digestion of MSW: thermophilic vs. mesophilic performance at high solids. *Waste management & Research*, vol. 9, 305–315
- CEN/TS 15440 Solid Recovered fuels–Method for the determination of biomass content
- Chang James I., Hsu Tin-En, 2008. Effects of compositions on food waste composting. *Biosource Technology* 99, 8068–8074.
- Clemens, J. & Cuhls, C. (2003) Greenhouse gas emissions from mechanical and biological waste treatment of municipal waste. *Environmental Technology*, 24, 745–754.
- Compost brochure. DG ENV E.3/BU-9 02/12/Compost brochure
- Dalemo, M., Sonesson, U., Bjorklund, A., Mingarini, K., Frostell, B., Jonsson, H., Nybrant, T., Sundqvist, J.-O. & Thyselius, L. (1997). ORWARE – A simulation model for organic waste handling systems. Part 1: Model description. *Resources, Conservation and Recycling*, 21, 17–37.
- Den Boer, E., Den Boer, J., Jager, J., Rodrigo, J., Meneses, M., Castells, F. & Schanne, L., (2005) Deliverable Report on D3.1 and D3.2:
- Defra, 2008 Guidelines to Defra’s GHG Conversion Factors
- Design manual for small scale composting plants, 2009. NSWMSC In cooperation with JICA Expert Team
- Dong-jie Niu, Hui Huang, Xiao-hu Dai, You-cai Zhao, 2012. Greenhouse gases emissions accounting for typical sewage sludge digestion with energy utilization and residue land application in China. *Waste Management*. Article in press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.06.024>
- Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe, K. (2006) IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. 5. Waste. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (accessed February 2009).
- Eklind Y., H. Kirchmann, 2000. Composting and storage of organic household waste with different litter amendments. I: carbon turnover. *Bioresource Technology* 74, 115–124
- Environmental Sustainability Criteria and Indicators for waste management (Work Package 3). The Use of Life Cycle Assessment Tool for the Development of Integrated Waste Management Strategies for Cities and Regions with Rapid Growing Economies. LCA-IWM.198 pp. Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Germany
- EpE, Entreprises pour l’ Environnement. Protocol for the quantification of greenhouse gases emissions from waste management activities, 2010.
- Electrigaz Technologies Inc, Final Report, 2008. Feasibility Study – Biogas upgrading and grid injection in the Fraser Valley, British Columbia.

- Eunomia Reaserch & Consulting Ltd., 2009. Final Report to DG Environment, European Commission. Assessment of the options to improve the management of bio-waste in the European Union. Annex E: Approach to estimating costs. ARCADIS Project number – 11/004759, Version A.
- Eunomia Reaserch & Consulting Ltd, 2002. Final Report to DG Environment, European Commission. Costs for Municipal Waste Management in the European Union: Annexes. <http://europa.eu.int/comm/environment/waste/studies/pdf/eucostwaste.pdf>
- European Environment Agency (EEA), Paper and cardboard–recovery or disposal, Review of life cycle Assessment and cost benefit analysis on the recovery and disposal of paper and cardboard, Technical report, 2006.
- European Environment Agency (EEA), 2002. Biodegradable municipal waste management in Europe, Part 3. Technology and market issues, available at: http://www.eea.europa.eu/publications/topic_report_2001_15
- Favoino Enzo & Hogg Dominic, 2008. The potential role of compost in reducing greenhouse gases. Waste management & Research, 26, 61–69.
- Fisher, K. (2006) Impact of Energy from Waste and Recycling Policy on UK Greenhouse Gas Emissions – Final Report. Prepared by Environment Resource Management (ERM) for Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), Oxford, UK. http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=WRO609_5737_FRP.pdf (accessed February 2009).
- Franco Cedric, Lineres Monique, Derenne Sylvie, Maelenn Le Villio-Poitrenaud, Sabine Houot, 2008. Influence of green waste, biowaste and paper-cardboard initial ratios on organic matter transformations. Bioresource Technology 99, 8926–8934.
- Fruergaard, T., Ekvall, T. & Astrup, T., 2009. Energy use and recovery in waste management and implications for accounting of greenhouse gases and global warming contributions. Waste Management & Research, 27, in press.
- Gentil Emmanuel, Christensen Thomas H & Aoustin Emmanuelle, 2009. Greenhouse gas accounting and waste management. Waste Management & Research, 27, 696–706.
- Gian Andrea Blengini, 2008. Using LCA to evaluate impacts and resources conservation potential of composting: A case study of the Asti District in Italy. Resources, Conservation and Recycling 52, 1373–1381.
- Hansen, T.L., La Cour Jansen, J., Spliid, H., Davidsson, Å. & Christensen, T.H. (2007) Composition of source-sorted municipal organic waste collected in Danish cities. Waste Management, 27, 510–518.
- Hansen Trine Lund, Højlund Thomas, Schmidt Christensen and Sonja, 2006. Environmental modelling of use of treated organic waste on agricultural land: a comparison of existing models for life cycle assessment of waste systems. Waste Management Research 24, 141–152
- Hermann B.G, Debeer, Wilde B.De ., Blok K, Patel M.K, 2011. To compost or not to compost: Carbon & energy footprints of biodegradable materials' waste treatment. Polymer Degradation & Stability 96, 1159–1171..

- Hiroko Yoshida, Joshua J. Gable, Jae K. Park, 2012. Evaluation of organic waste diversion alternatives for greenhouse gas reduction. *Resources, Conservation & Recycling* 60, 1-9.
- ISO 14040, International Standard, Second Edition 2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework.
- Jacobs, 2008. Development of a Policy Framework for the Tertiary Treatment of Commercial and Industrial Wastes: Technical Appendices, Report for SNIFFER / SEPA, March 2008.
- Jeannette Sjunnesson, Master Thesis, 2005. Life Cycle Assessment of Concrete. Lund University, Department of Technology and Society Environmental and Energy Systems Studies.
- Jungbluth N., Chudacoff M., Dauriat A., Dinkel F., Doka G., Faist Emmenegger M., Gnansounou E., Kljun N., Schleiss K., Spielmann M., Stettler C. and Sutter J. (2007) Life Cycle Inventories of Bioenergy. ecoinvent report No. 17, v2.0. ESU-services, Uster, CH, retrieved from: www.ecoinvent.org.
- Jury Colin, Enrico Benetto, Daniel Koster, Bianca Schmitt, Joëlle Weltring, 2010. Life Cycle Assessment of biogas production by monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid. *Biomass and Bioenergy* 34, 54 – 66.
- Kastner Verena, Walter Somitsch, Wolfgang Schnitzhofer, 2012. The anaerobic fermentation of food waste: a comparison of two bioreactor systems. *Journal of Cleaner Production* 34, 82-90.
- Khalid Azeem, Muhammad Arshad, Muzammil Anjum, Tariq Mahmood, Lorna Dawson, 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste. Review. *Waste Management* 31, 1737-1744.
- Komilis Dimitris, Robert K. Ham, 2006. Carbon dioxide and ammonia emissions during composting of mixed paper, yard waste and food waste. *Waste Management* 26, 62-70
- Lou J. Nair, 2009. The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions – A review. *Resources, Conservation & Recycling* 100, 3792-3798.
- Luc De Baere, 2010. The Dranco Technology: A unique digestion technology for solid organic waste. *Organic Waste Systems*.
- Manfredi Simone, Davide Tonini, Thomas H. Christensen, 2009. Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research* 27, 825-836.
- Meyer-Kohlstock Daniel, Gunnar Hadrich, Werner Bidlingmaier, Eckhard Kraft, 2012. The value of composting in Germany – Economy, ecology, and legislation. *Waste Management*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.020>
- Møller Jacob, Boldrin Alessio, Thomas H. Christensen, 2009. Anaerobic digestion and digestate use: accounting of greenhouse gases and global warming contribution. *Waste Management & Research* 27: 813-824.
- Moller, Jacob., Christensen, T.H., 2007. LCA of the household waste management system in seven municipalities in northern Zealand, in Danish. Institut for Miljø & Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet.
- Nayono Sanoto Endar, 2010. Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production. Dissertation, genehmigt von der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH).

- Nielsen, O.-K., Lyck, E., Mikkelsen, M.H., Hoffmann, L., Gyldenkærne, S., Winther, M., Nielsen, M., Fauser, P., Thomsen, M., Plejdrup, M.S., Illerup, J.B., Sørensen, P.B. & Vesterdal, L., 2008. Denmark's National Inventory Report. Emission Inventories 1990–2006. Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change. NERI Technical Report no. 667. National Environmental Research Institute, University of Aarhus, Denmark. <http://www.dmu.dk/Pub/FR667.pdf> (accessed February 2009).
- Nguyen Thanh Phong, 2012. Greenhouse Gas Emissions from Composting and Anaerobic Digestion Plants. Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES) Lehr- und Forschungsbereich Pflanzenernährung der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- Plastics Europe, Association of Plastics Manufacturers, 2008. Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers.
- Poeschl Martina, Shane Ward, Philip Owende, 2012. Environmental impacts of biogas deployment e Part I: life cycle inventory for evaluation of production process emissions to air. *Journal of Cleaner Production* 24, 168–183.
- Pertl A., P. Mostbauer, G. Obersteiner, 2010. Climate balance of biogas upgrading systems. *Waste Management* 30, 92–99.
- Pognani, M., Barrena, R., Font, X., Scaglia, B., Adani, F., Sanchez, A., 2010. Monitoring the organic matter properties in a combined anaerobic/aerobic full-scale municipal source-separated waste treatment plant. *Bioresour. Technol.* 101, 6873–6877.
- Pognani, M., Barrena, R., Font, X., Scaglia, B., Adani, F., Sanchez, A., 2012. A complete mass balance of a complex combined anaerobic/aerobic municipal source-separated waste treatment plant. *Waste Management* 32, 799–805.
- Powelson, D.K., Chanton, J., Abichou, T. & Morales, J. (2006) Methane oxidation in water-spreading and compost biofilters. *Waste Management & Research*, 24, 528–536
- Prognos in Co-operation with institute of Environmental research university of Dortmund, October 2008, Resource savings and CO2 reduction potential in waste management in Europe and the possible contribution to the CO2 reduction target in 2020, Final report.
- Recycled Organics Unit (2003) Life Cycle Inventory and Life Cycle Assessment for Windrow Composting Systems. Report prepared for NSW Department of Environment and Conservation (Sustainability Programs Division). Recycled Organics Unit, The University of New South Wales, Sydney, Australia
- Reeh, U. & Møller, J. (2001) Evaluation of different biological waste treatment strategies. In: Proc. of NJF Seminar No. 327, Urban Areas – Rural Areas and Recycling – the Organic Way Forward? The Royal Veterinary and Agricultural University of Denmark. Aug. 20–21, 2001. NJF, Stockholm. Danish Research Centre for Organic Agriculture, Research Centre Foulum, Tjele, Denmark.
- Richard Tom L. , 1991. Municipal Solid Waste Composting: Physical and Biological Processing. *Biomass and Bioenergy* 3: 163–180
- Smith, A., Brown, K., Ogilvie, S., Rushton, K. & Bates, J., 2001. Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment. AEA Technology. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

- Starr Katherine, Xavier Gabarrell, Gara Villalba, Laura Talens, Lidia Lombardi, 2012. Life cycle assessment of biogas upgrading technologies. *Waste Management* 32, 991–999.
- Stucki Matthias, Jungbluth, Marianne Leuenberger, 2011. Life Cycle Assessment of Biogas Production from Different Substrates. ESU-services Ltd., fair consulting in sustainability Kanzleistr. 4, CH-8610 Uster www.esu-services.ch
- USEPA (2006) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Lifecycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd edition. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA. <http://www.epa.gov/climatechange/wycd/waste/downloads/fullreport.pdf>
- van Haaren Rob, 2009. Large scale aerobic composting of source separated organic wastes: A comparative study of environmental impacts, costs & contextual effects. Department of Earth & Environmental Engineering, Foundation of Engineering and Applied Science Columbia University.
- World Steel Association, 2011 . Life Cycle Assessment Methodology Report, Life cycle inventory study for steel products. www.worldsteel.org
- Wrap, 2012. Gates fee report. Comparing the cost of alternative waste treatment options. www.wrap.org.uk/marketknowledge
- Yebo Li, Stephen Y. Park, Jiyang Zhu, 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 821–826
- Zaher, U., Cheong, D_Y., Wu,B., and Chen, S., 2007. Producing energy and fertilizer from organic municipal solid waste. Olympia, WA: Department of Biological Systems Engineering, WSU. online at: <http://www.ecy.wa.gov/programs/swfa/solidwastedata/>
- Zhang HuiJun, Toshihiko Matsuto, 2011. Comparison of mass balance, energy consumption and cost of composting facilities for different types of organic waste. *Waste Management* 31, 416–422

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αναγνωστόπουλος–Πολίτης Ηλίας, Χατζηδημητρίου Ανάργυρος. 2010. Επίδραση του λόγου C/N και πρόσθετων στην κομποστοποίηση οργανικών αποβλήτων.
- Βαβουράκη Αικατερίνη, 2010. «Ανάπτυξη ολοκληρωμένης πολιτικής για τη διαχείριση αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων με στόχο την μεγιστοποίηση της ανάκτησης υλικών και ενέργειας». Προκαταρκτική Ανάλυση Κόστους–Οφέλους. LIFE08 ENV/GR/000578. Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Βαρελά Ευαγγελία, 2011. Αξιολόγηση Τεχνολογιών Μηχανικής & Βιολογικής Επεξεργασίας Αστικών Στερεών Αποβλήτων. Εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμερών. Σχολή Χημικών Μηχανικών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ελληνική Δημοκρατία Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου. Γενική Δ/ση Εσωτερικής Λειτουργίας. Συνεδρίαση 10^η/ 30-8-2011. Απόφαση Υπ’ αριθμόν 107/2011.
- Κάλφας Δ. Χαράλαμπος, 2007. Παραγωγή βιοαερίου από αναερόβια χώνευση προεπεξεργασμένου και μη ελαιοπολλτού. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πάτρας.
- Κανονισμός (ΕΕ) αριθ. 749/2011 ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ της 29ης Ιουλίου 2011

Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 1069/2009 ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ
της 21ης Οκτωβρίου 2009

Κανονισμός (ΕΕ) αριθ. 142/2011 ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ της 25ης Φεβρουαρίου 2011

Καραγιαννιδής Αβραάμ. Οικονομικά εργαλεία για την αειφόρο διαχείριση απορριμμάτων & οι επιπτώσεις τους στα ανταποδοτικά τέλη καθαριότητας.

Καραμάνου Άννα, Αθήνα 2006. Η Διαχείριση των απορριμμάτων και οι ιδιαιτερότητες των νησιών. Τμήμα Πολιτικής Επιστήμης και Δημόσιας Διοίκησης, Διεθνής Προστασία του Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Μαλαμής, Μουστάκας, Βιδάλης, Λοϊζίδου, 2012. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΕ ΠΥΡΓΟ & ΠΑΝΟΡΜΟ ΣΤΗΝ ΤΗΝΟ. LIFE10 ENV/GR/000610. «Development and implementation of a demonstration system on Integrated Solid Waste Management for Tinos in line with the Waste Framework Directive».

Μπουρτσάλας Αθανάσιος Χ., Θέμελης Νικόλας Ι., Καλογήρου Ευστράτιος, 2011. Περιγραφή της υφιστάμενης κατάστασης διαχείρισης Αστικών Στερεών Αποβλήτων (Α.Σ.Α.) για τις Περιφέρειες της Ελλάδος. Earth Engineering Center Columbia University. Waste-to-Energy Research and Technology Council (WVERT).

ΚΥΑ 50910/2727/2003, Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας.

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Κλιματικής αλλαγής, 2012,
<http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=438>

Ντζαμίλης Π., Χάβας Γ., (2004), «Ποιοτική και ποσοτική ανάλυση αστικών απορριμμάτων περιφέρειας Κρήτης», Μεταπτυχιακή Διατριβή, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών, Έλεγχος Ποιότητας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχέδιο Τελικής Έκθεσης προς το ΙΤΑ της Μελέτης «Εκτίμησης των Γενικευμένων Επιπτώσεων και Κόστους Διαχείρισης Αποβλήτων», 2007.

Διαδίκτυο

<http://www.unescap.org/esd/suds/swm/workshop/2010/dhaka/Resources/O2-SWM-InteractManual/source/task6.html>

<http://www.youtube.com/watch?v=IGPxrmiqfHM&feature=related>

<http://www.youtube.com/watch?v=FB5ηX66MD1Y>

<http://www.youtube.com/watch?v=E9ηEI3VERhc>

<http://www.mbt.landfill-site.com/Composting/composting.html>

<http://www.apbtc.com.au/tunnel-composting-the-technology>

<http://www.hytech-water.co.uk/in-vessel-composting-plant.html>

<http://www.biomassenergy.gr/en/articles/technology/biogas/15-biogas-plants-electric-and-thermal-production-from-the-cogeneration-system>