ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Ι: ΧΗΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΜΟΝΑΔΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διδακτορική διατριβή με τίτλο

Αξιολόγηση βιωσιμότητας τεχνολογιών αξιοποίησης αστικών στερεών αποβλήτων και περαιτέρω διερεύνηση εφαρμογής βιοδιϋλιστηρίου

Χριστίνα Παπαδασκαλοπούλου

Αθήνα, 2020

Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

1. Μαρία Λοϊζίδου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
2. Δημήτριος Κέκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. Αικατερίνη Ι. Χαραλάμπους, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Μέλη Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής

1. Μαρία Λοϊζίδου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
2. Δημήτριος Κέκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. Αικατερίνη Ι. Χαραλάμπους, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
4. Απόστολος Βλυσίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
5. Κωνσταντίνα Κόλλια, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
6. Ευαγγελία Παυλάτου, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.
7. Μιρτάτ Μπουρουσιάν, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202)

Στο Σταθούλη μου

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στη Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, της Σχολής Χημικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα μου, την Καθηγήτρια Μαρία Λοϊζίδου, για το πολύ ενδιαφέρον θέμα που μου ανέθεσε, την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, τη συνεχή υποστήριξη που μου παρήχε και τις ευκαρίες που μου έδωσε στο πλαίσιο αυτό να διερύνω τις γνώσεις και δεξιότητές μου. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής και συγκεκριμένα την Καθηγήτρια Αικατερίνη Ι. Χαραλάμπους και τον Καθηγητή Δημήτριο Κέκο που αποδέχθηκαν να συμμετέχουν στην τριμελή μου επιτροπή και να παρακολουθούν την εξέλιξη της διατριβής μου, αλλά και για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε όταν αυτό απαιτήθηκε. Θα ήθελα επίσης να κάνω ιδιαίτερη μνεία στον Ιωάννη Ζιώμα, πρώην καθηγητή του Πολυτεχνείου και μέλος της τριμελούς μου επιτροπής, ο οποίος δεν είναι πλέον μαζί μας, για τη σημαντική καθοδήγηση που μου παρείχε από την αρχή της διατριβής μου και για την καλοσύνη και υποστήριξη που μου έδειχνε σε κάθε μας συνάντηση.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά και όλους αυτούς που συνεργάστηκα στο πλαίσιο εκπόνησης της διατριβής αυτής, όπως τη Δανάη Τσουρδαλάκη, με την οποία συνεργαστήκαμε στο ίδιο επιστημονικό αντικείμενο κατά την εκπόνηση της προπτυχιακής της εργασίας και στην ουσία η μία αποτέλεσε την κινητήριο δύναμη της άλλης. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Βάσω Παναρέτου για τις χρήσιμες γνώσεις που μου παρείχε απλόχερα καθόλη τη διάρκεια της διατριβής μου, καθώς και την Αγγελική Κώνστα και τη Χριστίνα Τσούτη με τις οποίες συνεργαστήκαμε άψογα στο πλαίσιο κοινού ερευνητικού σκοπού. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Νικολέτα Κοντογιάννη, τη Jelica Novakovic, τη Σοφία Μάη και την Έλλη Μπαραμπούτη για τα δεδομένα που μου παρήχαν για την υλοποίηση της διατριβής μου, καθώς και για τη συμβολή τους στην επαλήθευση και επισκόπηση των αποτελεσμάτων.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ οφείλω και στα κατά καιρούς μέλη του εργαστηρίου οι οποίοι είναι πλέον φίλοι μου και με τους οποίους έχουμε μοιραστεί τις ίδιες ανησυχίες και πολλές χαρούμενες στιγμές, όπως την Κατερίνα Βαλτά η οποία μέχρι και σήμερα με στηρίζει αδιάκοπα ηθικά και με εμψυχώνει, αλλά και τη Βάσω Παναρέτου, τη Μαρία Κασιδώνη, τη Πωλίνα Δαμάλα, τη Νικολέτα Κοντογιάννη, τη Δέσποινα Μπακογιάννη και την Εύα Σκουρτανιώτη.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που είναι πάντα δίπλα μου, αλλά και τη μητέρα μου, τον πατέρα μου και το σύντροφό μου Κώστα για την αγάπη, τη στήριξη, την κατανόηση και την εμπιστοσύνη που μου δείχνουν πάντα. Σας ευχαριστώ και σας αγαπώ πολύ.

Εκτενής περίληψη

Στο πλαίσιο της διατριβής αυτής γίνεται διερεύνηση του δυναμικού αξιοποίησης των αστικών αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος από τη διαχείριση αποβλήτων. Η αξιολόγηση γίνεται υπό το πρίσμα της συνολικής περιβαλλοντικής, οικονομικής και κοινωνικής βιωσιμότητας, προκειμένου να δωθεί μια συνολική εικόνα όσον αφορά την επίδοσή τους. Η ανάλυση βασίζεται στη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, η οποία λαμβάνει υπόψη όλα τα στάδια της διαχείρισης αποβλήτων, από τη συλλογή και μεταφορά τους έως και την τελική τους διάθεση ή την ανακύκλωσή τους και την υποκατάσταση παρθένων πρώτων υλών.

Στο πρώτο μέρος της διατριβής, γίνεται προσδιορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την υφιστάμενη διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα και διερευνάται το δυναμικό περιορισμού των επιπτώσεων αυτών με την υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης αστικών αποβλήτων που προβλέπεται για το 2020 στον τελευταίο Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) του 2015. Ειδικότερα, ο νέος ΕΣΔΑ προβλέπει τη χωριστή διαλογή στην πηγή των διαφορετικών ρευμάτων αποβλήτων (οργανικά, χαρτί, πλαστικό, γυαλί, μέταλλο) και θέτει ποσοτικούς στόχους για την ανάκτησή τους. Επίσης, η ανάλυση εξειδικεύεται περαιτέρω όσον αφορά τις διαφορετικές μεθόδους και τα στάδια της διαλογής, προεπεξεργασίας και ανακύκλωσης για τα διαφορετικά ανακυκλώσιμα, ενώ παράλληλα εξετάζεται το επίπεδο καθαρότητας και αποτελεσματικότητας της διαλογής.

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής εξετάζεται η περίπτωση ενός συστήματος βιοδιϋλιστηρίου για την εναλλακτική διαχείριση και αξιοποίηση των αστικών βιοαποβλήτων με την παραγωγή αιθανόλης και άλλων προϊόντων. Η περιβαλλοντική απόδοση του βιοδιυλιστηρίου συγκρίνεται με παραλλαγές αυτού αλλά και με τα συμβατικά συστήματα διαχείρισης των βιοαποβλήτων. Στη συνέχεια, γίνεται αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας της εφαρμογής του συστήματος αυτού σε πλήρη κλίμακα και προσδιορίζονται οι τιμές των κρίσιμων παραμέτρων για τις οποίες το σύστημα αυτό μπορεί να είναι οικονομικά βιώσιμο. Τέλος, πραγματοποιείται πολυκριτηριακή αξιολόγηση της συνολικής βιωσιμότητας των διαφορετικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων με βάση περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια.

Ειδικότερα, στο πρώτο μέρος υπολογίζονται αρχικά οι εκπομπές αερίων φαινομένου του θερμοκηπίου (ΑΦΘ) που παράγονται από το υφιστάμενο σύστημα διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) στην Ελλάδα για την περίοδο 1991-2015. Το υφιστάμενο σύστημα περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο την ταφή των αποβλήτων και, σε αρκετά μικρότερο βαθμό, την κομποστοποίηση του οργανικού κλάσματος που ανακτάται κυρίως μέσω της μηχανικής διαλογής των σύμμεικτων αποβλήτων σε κεντρικές μονάδες επεξεργασίας και την ανακύκλωση των ανακτώμενων ανακυκλώσιμων αποβλήτων από το σύμμεικτο ρεύμα των ανακυκλώσιμων αποβλήτων. Στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση της δυνατότητας μείωσης των εκπομπών ΑΦΘ με την υλοποίηση των στόχων χωριστής διαλογής και ανάκτησης των διαφορετικών ρευμάτων αποβλήτων για το 2020, σύμφωνα με τον τελευταίο ΕΣΔΑ (2015). Για τον υπολογισμό των εκπομπών ΑΦΘ, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό εργαλείο της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) για την περίπτωση της ταφής, ενώ για τις υπόλοιπες μεθόδους χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές εκπομπών από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία. Τα κύρια αποτελέσματα της έρευνας αυτής συνοψίζονται στα ακόλουθα σημεία. Οι συνολικές ποσότητες που οδηγούνται προς ταφή την περίοδο 1991-2015 ανέρχονται σε περίπου 110 εκατομμύρια τόνους, με τις αντίστοιχες συνολικές ποσότητες που θα οδηγούνται προς ταφή σύμφωνα με τον ΕΣΔΑ στο μέλλον να ανέρχονται σε περίπου 41 εκατομμύρια τόνους. Οι συνολικές εκπομπές ΑΦΘ σε ορίζοντα 100ετίας για τη δεύτερη περίπτωση υπολογίζονται σε 40.9 δισεκατομμύρια kg CO2eq., δηλαδή 26% των αντίστοιχων εκπομπών της υφιστάμενης κατάστασης. Παρατηρείται επομένως ότι μειώνοντας την ταφή των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων και συλλέγοντας το παραγόμενο βιοαέριο, μειώνονται δραστικά οι εκπομπές ΑΦΘ από την ταφή αποβλήτων. Οι μέσες ετήσιες καθαρές εκπομπές από την κομποστοποίηση

την υφιστάμενη περίοδο υπολογίζονται σε 18.8 εκατομμύρια kg CO2 eq. και αντιστοιχούν στη διαχείριση περίπου 46,000 τόνων οργανικών αποβλήτων/έτος κατά μέσο όρο.

Το έτος 2020 όπου προβλέπεται σύμφωνα με το στόχο του ΕΣΔΑ η επεξεργασία 2,048,000 τόνων με κομποστοποίηση (ποσότητα περίπου 45 φορές μεγαλύτερη από τον υφιστάμενο μέσο όρο), οι αντίστοιχες εκπομπές υπολογίζονται σε 812.3 εκατομμύρια kg CO2 eq.. Οι καθαρές εκπομπές ΑΦΘ από την ανακύκλωση των ανακυκλώσιμων αποβλήτων είναι αρνητικές, καθώς οι αποφευχθείσες εκπομπές ΑΦΘ λόγω της υποκατάστασης της παραγωγής των αντίστοιχων υλικών από παρθένες πρώτες ύλες, είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Κατά μέσο όρο την υφιστάμενη περίοδο οι καθαρές εκπομπές από τη διαχείριση των ανακυκλώσιμων αποβλήτων είναι -342 εκατομμύρια kg CO2 eq./έτος, ενώ για το 2020 υπολογίζονται σε -1689 εκατομμύρια kg CO2 eq.. Οι συνολικές αποφευχθείσες εκπομπές από την ανακύκλωση το 2020 είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερες σε σχέση με την υφιστάμενη περίοδο. Τέλος, όσον αφορά τη συνολική διαχείριση των αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα, οι καθαρές εκπομπές την υφιστάμενη περίοδο είναι αρκετά υψηλές καθώς καθορίζονται κατά κύριο λόγο από τις εκπομπές της ταφής, με την υψηλότερη τιμή να υπολογίζεται περίπου στα 8,200 εκατομμύρια kg CO2eq., με βάση τις συνολικές εκπομπές που αντιστοιχούν στη διαχείριση αποβλήτων το έτος 2010. Οι συνολικές καθαρές εκπομπές από τη διαχείριση των αποβλήτων το 2020 υπολογίζονται σε περίπου 300 εκατομμύρια kg CO2eq., ποσότητα 25 φορές μικρότερη σε σχέση με το 2010, για μια διαχειριζόμενη ποσότητα αποβλήτων μόνο ελαφρώς μικρότερη (-12%) σε σχέση με το 2010.

Για το υπόλοιπο της έρευνας ΑΚΖ που διεξήχθη στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιήθηκε εξειδικευμένο λογισμικό ΑΚΖ για τη διαχείριση αποβλήτων (EASETECH). Ειδικότερα, στη συνέχεια μελετώνται περαιτέρω οι διαφορετικές μέθοδοι ανακύκλωσης των ξηρών ανακυκλώσιμων αποβλήτων και εξετάζεται η υλοποίηση ενός συστήματος διαλογής στην πηγή σε τέσσερα ρεύματα των ανακυκλώσιμων αποβλήτων (χαρτί, πλαστικό, γυαλί, μέταλλο), όπως προβλέπεται από τον τελευταίο ΕΣΔΑ. Στη μελέτη αυτή, η ανάλυση εξειδικεύεται περαιτέρω όσον αφορά τα διαφορετικά υλικά που περιέχονται στα επιμέρους ρεύματα και τις σχετικές διεργασίες προεπεξεργασίας και ανακύκλωσης, ενώ παράλληλα εξετάζεται το επίπεδο καθαρότητας και αποτελεσματικότητας της διαλογής. Το πλαίσιο ανάλυσης του συστήματος περιλαμβάνει τόσο τη διαλογή και προεπεξεργασία των ανακυκλώσιμων αποβλήτων και την καθαυτή διεργασία της ανακύκλωσης, όσο και την πρωτογενή παραγωγή των υποκαθιστούμενων προϊόντων από παρθένες πρώτες ύλες, και την ταφή των υπολειμμάτων από τις επιμέρους διεργασίες. Οι εκπομπές υπολογίστηκαν αρχικά συνολικά για ένα τόνο συλλεγόμενων ανακυκλώσιμων αποβλήτων, με βάση τη σύσταση των προδιαλεγμένων αποβλήτων που συλλέχθησαν στο πλαίσιο του έργου LIFE PAVETHEWAySTE. Τα κύρια αποτελέσματα της έρευνας αυτής παρουσιάζονται στη συνέχεια. Λόγω της προδιαλογής των ανακυκλώσιμων αποβλήτων στην πηγή, τα ποσοστά καθαρότητας των ρευμάτων αποβλήτων καθώς και τα ποσοστά ανάκτησης των υλικών στα ΚΔΑΥ είναι σημαντικά μεγαλύτερα σε σχέση με τα αντίστοιχα μέσα επίπεδα ανάκτησης στα υφιστάμενα ΚΔΑΥ (~60%) που υποδέχονται σύμμεικτα ανακυκλώσιμα απόβλητα. Γενικά, οι καθαρές εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση των ανακυκλώσιμων αποβλήτων είναι αρνητικές, καθώς οι αποφευχθείσες εκπομπές λόγω της υποκατάστασης της παραγωγής υλικών από παρθένες πρώτες ύλες, είναι μεγαλύτερες από τις εκπομπές από τα υπόλοιπα στάδια της διαλογής, προεπεξεργασίας και ταφής των υπολειμμάτων. Κατά μέσο όρο από όλα τα επιμέρους εξεταζόμενα υλικά, το στάδιο της ανακύκλωσης ανακτημένων υλικών συνεισφέρει 20% στις συνολικές εκπομπές από τη διαχείριση των ανακυκλώσιμων αποβλήτων, η υποκατάσταση συνεισφέρει 78%, ενώ τα στάδια της διαλογής, της προεπεξεργασίας και της ταφής συνεισφέρουν το καθένα κατά 1%. Οι υψηλότερες αρνητικές εκπομπές παρατηρούνται στην περίπτωση του χαρτιού/χαρτονιού (-313kg CO2 eq./τόνο), το οποίο οφείλεται κυρίως στη μεγάλη συμμετοχή του ρεύματος αυτού στα συλλεχθέντα ανακυκλώσιμα απόβλητα. Οι αμέσως χαμηλότερες αρνητικές εκπομπές συνδέονται με τη διαχείριση των αποβλήτων πλαστικού και μετάλλου (-249kg CO2 eq./τόνο και -150 kg CO2 eq./τόνο, αντίστοιχα). Τέλος, οι χαμηλότερες αρνητικές εκπομπές παρατηρούνται για την περίπτωση της διαχείρισης αποβλήτων γυαλιού (-54 kg CO2 eq./τόνο). Όσον αφορά τις εκπομπές από τη διαχείριση 1

τόνου αποβλήτου/υλικό, οι υψηλότερες αρνητικές καθαρές εκπομπές (-10,080 kg CO_2 eq./τόνο) προκύπτουν από τη διαχείριση μη σιδηρούχων μετάλλων (αλουμινίου), ενώ ακολουθούν με σημαντική διαφορά οι καθαρές εκπομπές από τη διαχείριση των σιδηρούχων μετάλλων (-2,508 kg CO_2 eq./τόνο) και των πλαστικών (-1,248 έως -2,205 kg CO_2 eq./τόνο). Η διαχείριση ενός τόνου αποβλήτων γυαλιού επιφέρει τις χαμηλότερες σχετικές καθαρές εκπομπές (-316 kg CO_2 eq./τόνο), με τις εκπομπές από τη διαχείριση ίσης ποσότητας αποβλήτων χαρτιού και χαρτονιού να κυμαίνονται επίσης σε χαμηλά επίπεδα (-466 έως -575 kg CO_2 eq./τόνο).

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής αυτής, διεξήχθη ΑΚΖ για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εφαρμογή σε πλήρη κλίμακα του συστήματος βιοδιϋλιστηρίου. Το σύστημα αυτό βασίζεται στη διεργασία της βιομετατροπής, η οποία αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του LIFE έργου WASTE2BIO. Το βασικό σύστημα παραγωγής αιθανόλης περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια: συλλογή και μεταφορά των βιοαποβλήτων; προεπεξεργασία; βιομετατροπή; απόσταξη αιθανόλης; αναερόβια χώνευση του υπολείμματος; παραγωγή ενέργειας από το βιοαέριο. Μελετήθηκε επίσης πλήθος εναλλακτικών συστημάτων, όσον αφορά τα πιθανά προϊόντα της διεργασίας, βασικές παραμέτρους λειτουργίας και μέρη του συστήματος. Τα πιθανά προϊόντα που εξετάστηκαν πέρα από τη βιοαιθανόλη περιλαμβάνουν την ενέργεια από το βιοαέριο, την παραγωγή εδαφοβελτιωτικού από την αξιοποίηση του χωνεύματος της αναερόβιας χώνευσης, την παραγωγή μεθανίου από το βιοαέριο της αναερόβιας χώνευσης και, τέλος, την παραγωγή ζωοτροφής από το υπόλειμμα της απόσταξης. Επίσης εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν με το υπό μελέτη σύστημα παραγωγής βιοαιθανόλης, οι υφιστάμενες εναλλακτικές μέθοδοι για τη διαχείριση των αστικών βιοαποβλήτων, όπως η ταφή, η κομποστοποίηση, η αναερόβια χώνευση και η καύση. Τα διαφορετικά συστήματα παραγωγής αιθανόλης και οι μέθοδοι διαχείρισης βιοαποβλήτων αξιολογήθηκαν με βάση την απόδοσή τους σε δεκατρείς κατηγορίες επιπτώσεων ΑΚΖ.

Τα αποτελέσματα της ΑΚΖ δείχνουν ότι το σύστημα παραγωγής αιθανόλης παρουσιάζει πολύ καλή περιβαλλοντική απόδοση. Ειδικότερα, οι καθαρές εκπομπές στο περιβάλλον είναι σχετικά χαμηλές και στις περισσότερες κατηγορίες περιπτώσεων είναι αρνητικές, δηλαδή υπάρχει καθαρό όφελος για το περιβάλλον. Οι μεγαλύτερες θετικές καθαρές εκπομπές παρατηρούνται στις κατηγορίες «Οικοτοξικότητα», «Ευτροφισμός, θάλασσα» και «Ευτροφισμός, έδαφος», οι οποίες αποδίδονται στις εκπομπές που σχετίζονται με το στάδιο της εφαρμογής στο έδαφος του χωνεύματος που παράγεται από την αναερόβια χώνευση, το οποίο είναι κοινό στάδιο στα περισσότερα εξεταζόμενα συστήματα παραγωγής αιθανόλης.

Το σύστημα παραγωγής αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση των βιοαποβλήτων σε επίπεδο δήμου ή δήμων παρουσιάζει χαμηλές αλλά θετικές εκπομπές στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων, το οποίο αποδίδεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι η θερμότητα που παράγεται στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της ξήρανσης, καθώς η τελευταία γίνεται σε άλλο μέρος. Το σύστημα παραγωγής αιθανόλης με οικιακή ξήρανση των βιοαποβλήτων παρουσιάζει υψηλότερες εκπομπές σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, με τις περισσότερες κατηγορίες οι εκπομπές να είναι σημαντικά υψηλότερες, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι οι οικιακοί ξηραντήρες καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια και δη ηλεκτρισμό, σε αντίθεση με την κεντρική και αποκεντρωμένη ξήρανση η οποία χρησιμοποιεί απευθείας θερμότητα.

Όσον αφορά τα εναλλακτικά/επιπρόσθετα προϊόντα του συστήματος παραγωγής αιθανόλης από βιοαπόβλητα, διαπιστώνεται ότι η παραγωγή από το βιοαέριο μεθανίου ως καύσιμο κίνησης αντί για ηλεκτρισμό και θερμότητα, παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση σε σχέση με το σύστημα αναφοράς σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων. Η παραγωγή ένυδρης αιθανόλης για χρήση ως καύσιμο θέρμανσης αντί για άνυδρη αιθανόλη ως καύσιμο κίνησης παρουσιάζει χειρότερη απόδοση σε σχέση με το σύστημα αναφοράς σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, ενώ η εκτροπή μέρους του υπολείμματος της απόσταξης για την παραγωγή ζωοτροφής παρουσιάζει χειρότερη απόδοση σε ορισμένες κατηγορίες επιπτώσεων και καλύτερη σε κάποιες άλλες.

Όσον αφορά την ανάλυση ευαισθησίας, αυτή έδειξε ότι η χρήση βιοαποβλήτων από υπηρεσίες εστίασης ως υπόστρωμα και η μείωση της δοσολογίας των ενζύμων λόγω βελτίωσης της δραστικότητάς τους οδηγεί σε περαιτέρω εξοικονομήσεις εκπομπών, όπως ήταν αναμενόμενο. Η παραγωγή ενέργειας από την καύση του στερεού κλάσματος του υπολείμματος της απόσταξης επίσης παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε αρκετές κατηγορίες επιπτώσεων σε σχέση με το σύστημα αναφοράς. Η αύξηση της δοσολογίας των ενζύμων για την επίτευξη της μέγιστης παραγωγής αιθανόλης παρουσιάζει χειρότερη απόδοση στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων.

Το βασικό σύστημα παραγωγής αιθανόλης σε σχέση με τις υφιστάμενες μεθόδους διαχείρισης των αστικών βιοαποβλήτων παρουσιάζει γενικά πολύ καλή επίδοση σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων ή είναι πολύ κοντά στις καλύτερες επιδόσεις των άλλων μεθόδων. Όσον αφορά τις επιπτώσεις στην κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», οι καλύτερες επιδόσεις παρατηρούνται για την αναερόβια χώνευση, την καύση και το σύστημα αναφοράς όπου πραγματοποιούνται εξοικονομήσεις, ενώ η χειρότερη απόδοση με επιβαρύνσεις παρατηρείται για τη μέθοδο της ταφής. Όσον αφορά τις υπόλοιπες κατηγορίες επιπτώσεων, σχετικά υψηλές τιμές παρατηρούνται για την κομποστοποίηση στις κατηγορίες «Οξύνιση, έδαφος», «Ευτροφισμός, έδαφος» και «Αιωρούμενα σωματίδια» οι οποίες σχετίζονται με τις αέριες εκπομπές κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης καθαυτή, για την αναερόβια χώνευση και την κομποστοποίηση στην κατηγορία «Ανθρώπινη τοξικότητα, μη καρκινογενής» και για όλες τις μεθόδους πλην της καύσης στην κατηγορία «Οικοτοξικότητα», οι οποίες σχετίζονται με τις εκπομπές κατά το στάδιο της χρήσης του παραγόμενου εδαφοβελτιωτικού ή με τις εκπομπές από τη διάθεση των επεξεργασμένων στραγγισμάτων της ταφής στα επιφανειακά νερά.

Στη συνέχεια, έγινε αξιολόγηση της βιωσιμότητας της εφαρμογής του συστήματος διαχείρισης των βιοαποβλήτων για την παραγωγή αιθανόλης σε πλήρη κλίμακα. Ειδικότερα, διεξήχθη λεπτομερής χρηματοοικονομική ανάλυση της μονάδας μετατροπής των βιοαποβλήτων για την παραγωγή αιθανόλης για τρία διαφορετικά σενάρια όσον αφορά τη ξήρανση, ήτοι (i) ξήρανση σε οικιακό επίπεδο, (ii) ξήρανση σε επίπεδο δήμων και (iii) ξήρανση σε επίπεδο κεντρικής μονάδας. Για κάθε σενάριο εξετάστηκαν διαφορετικά υποσενάρια ανά περίπτωση όσον αφορά το κόστος ή/και τη δοσολογία των ενζύμων, την τιμή πώλησης της βιοαιθανόλης, το ύψος δανειοδότησης και τη διάρκεια του δανείου. Επίσης, χρηματοοικονομική ανάλυση διεξήχθη και για τις συμβατικές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων, προκειμένου να προσδιοριστεί το ελάχιστο τέλος διαχείρισης των βιοαποβλήτων για τους δήμους, το οποίο είναι παράλληλα βιώσιμο για την μονάδα διαχείρισης των βιοαποβλήτων.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι το σύστημα διαχείρισης των βιοαποβλήτων με κεντρική ξήρανση για την παραγωγή αιθανόλης είναι το πιο οικονομικό για τους δήμους (κόστος διαχείρισης για τους δήμους: 91-122€/τόνο νωπού βιοαπόβλητου) σε σύγκριση με την αποκεντρωμένη ξήρανση (κόστος διαχείρισης για τους δήμους: 113-136€/τόνο νωπού βιοαποβλήτου). Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του γεγονότος ότι η παραγόμενη θερμότητα από το βιοαέριο στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης δεν αξιοποιείται για την ικανοποίηση (μέρους) των ενεργειακών αναγκών της ξήρανσης στην περίπτωση που αυτή πραγματοποιείται αλλού (αποκεντρωμένα), με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος διαχείρισης των δήμων με το αντίστοιχο ποσό για την αγορά φυσικού αερίου και την κάλυψη των ενεργειακού ελλείμματος. Στην περίπτωση που μέρος των ξηρών βιοαποβλήτων που παράγονται από την αποκεντρωμένη ξήρανση χρησιμοποιηθούν προκειμένου να παραχθεί ενέργεια μέσω της καύσης τους για να τροφοδοτήσει την ξήρανση, τότε το κόστος διαχείρισης για το δήμο μπορεί να μειωθεί περαιτέρω (78-88€/τόνο νωπού βιοαποβλήτου). Το σύστημα αποκεντρωμένης ξήρανσης με καύση παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση σε σχέση με την αποκεντρωμένη ξήρανση στις κατηγορίες επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή» και «Εξάντληση αβιοτικών ορυκτών πόρων», λόγω της αποφυγής χρήσης ορυκτών καυσίμων για τη ξήρανση, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής. Ωστόσο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η ανάκτηση ενέργειας από τα απόβλητα είναι λιγότερο επιθυμητή μέθοδος διαχείρισης σε σχέση με την ανακύκλωση σύμφωνα με την ιεράρχηση των μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Απόβλητα, καθώς επιτυγχάνεται εξοικονόμηση

πόρων λόγω της υποκατάστασης της παραγωγής ανόργανων λιπασμάτων. Αυτό αντικατοπτρίζεται στην κατηγορία επίπτωσης «Εξάντληση αβιοτικών πόρων-Στοιχεία και ενώσεις», όπου η αποκεντρωμένη ξήρανση με καύση εμφανίζει επιβαρύνσεις, σε αντίθεση με τις άλλες δύο περιπτώσεις όπου έχουμε εξοικονόμηση πόρων. Αυτό αποδίδεται κυρίως στο γεγονός ότι παράγεται λιγότερο λίπασμα, λόγω της καύσης μέρους των ΒΑΑ και έτσι οι εξοικονομήσεις είναι μικρότερες από τις επιβαρύνσεις. Τέλος, η ανάλυση έδειξε ότι η ξήρανση σε επίπεδο οικίας δεν είναι οικονομική (κόστος διαχείρισης για τους δήμους: 152-176€/τόνο νωπού βιοαποβλήτου), κυρίως λόγω του υψηλού κόστους για την αγορά των οικιακών ξηραντήρων και των υψηλής κατανάλωσης ενέργειας για ξήρανση (και δη ηλεκτρισμού) σε σχέση με τα άλλα σενάρια. Η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι μια μείωση του κόστους του οικιακού ξηραντήρα κατά 50€ (100€ από 150€) μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μείωση περίπου 14€ στο συνολικό κόστος διαχείρισης του δήμου.

Στο τελευταίο μέρος της διατριβής αυτής, παρουσιάζεται το εργαλείο πολυκριτηριακής ανάλυσης (Multicriteria Analysis, MCA) που αναπτύχθηκε για τη συγκριτική αξιολόγηση της συνολικής βιωσιμότητας των συμβατικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων και του συστήματος βιοδιϋλιστηρίου. Η αξιολόγηση γίνεται με βάση ένα αριθμό σχετικών οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών κριτηρίων. Σύμφωνα με τον μέσο όρο των περιβαλλοντικών κριτηρίων που εξετάζονται, η καύση με παραγωγή ενέργειας αναδεικνύεται ως η καλύτερη περιβαλλοντικά μέθοδος, ακολουθούμενη από το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με κεντρική/αποκεντρωμένη ξήρανση. Σύμφωνα με το οικονομικό κριτήριο, προτιμώτερη οικονομικά μέθοδος είναι αυτή της κομποστοποίησης, ενώ ακολουθεί η ταφή και η αναερόβια χώνευση. Η καύση και το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση ισοβαθμούν στην πέμπτη θέση. Τα εναλλακτικά συστήματα βιοδιϋλιστηρίου συνδέονται με υψηλά κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς περιλαμβάνουν πιο σύνθετες διεργασίες, και απαιτούν ειδικό εξοπλισμό, ακριβότερες πρώτες ύλες (π.χ. ένζυμα) και πιο εξειδικευμένο προσωπικό. Ωστόσο τα συστήματα βιοδιϋλιστηρίου παράγουν και τα υψηλότερα καθαρά έσοδα, καθώς εκτός από την πώληση του παραγόμενου πλεονάζοντος ηλεκτρισμού και του εδαφοβελτιωτικού, προκύπτουν και σημαντικά έσοδα από την πώληση της παραγόμενης αιθανόλης. Σύμφωνα με το μέσο όρο των κοινωνικών κριτηρίων της κοινωνικής αποδοχής και της δημιουργίας θέσεων εργασίας, καλύτερη μέθοδος αναδεικνύεται η αναερόβια χώνευση, ακολοθούμενη από την καύση και το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με αποκεντρωμένη ξήρανση χωρίς καύση και με καύση. Στη συνέχεια εξετάστηκαν με την πολυκριτηριακή ανάλυση τέσσερα εναλλακτικά σενάρια, όπου στα τρία πρώτα δινόταν μεγαλύτερη βαρύτητα σε διαφορετική ομάδα κριτηρίων (περιβαλλοντικό, οικονομικό, κοινωνικό σενάριο), ενώ στο τέταρτο δινόταν ίση βαρύτητα σε όλες τις ομάδες κριτηρίων (ισοσταθμισμένο). Τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης έδειξαν ότι η μέθοδος της καύσης είναι η προτιμότερη μέθοδος τόσο σύμφωνα με το σταθμισμένο σενάριο όπου δίνεται ίση βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια, όσο και με το περιβαλλοντικό σενάριο, όπου δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στα περιβαλλοντικά κριτήρια. Η μέθοδος της αναερόβιας χώνευσης αναδεικνύεται ως η καλύτερη μέθοδος σύμφωνα τόσο με το οικονομικό σενάριο, όσο και με το κοινωνικό σενάριο. Η κομποστοποίηση σε όλα τα σενάρια εκτός από το περιβαλλοντικό, βρίσκεται μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης θέσης. Σύμφωνα με το περιβαλλοντικό σενάριο, στην τρίτη θέση βρίσκεται το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με κεντρική ξήρανση, αλλά και το αντίστοιχο σύστημα με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση. Γενικά, τα δύο αυτά συστήματα βιοδιϋλιστηρίου υπερτερούν σε σχέση με τα συστήματα βιοδιϋλιστηρίου με ξήρανση σε αποκεντρωμένο και οικιακό επίπεδο, σε όλα τα σενάρια. Η μέθοδος της ταφής με καύση του βιοαερίου και με παραγωγή ενέργειας αλλά και το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με οικιακή ξήρανση καταλαμβάνουν τις τελευταίες θέσεις σε όλα τα σενάρια.

Extensive summary

In the framework of the current thesis, the environmental impacts associated with the management of municipal waste in Greece are examined with the use of the Life Cycle Assessment method. The first part of the thesis focuses on the climate change impact incurred by the current status of municipal waste management in Greece, as well as by the new waste management status which is foreseen for 2020 in the latest National Waste Management Plan (NWMP) of 2015. In particular, the new NWMP foresees the separation at source of the different municipal waste streams (food and garden waste, paper, plastic, glass, metal) and sets quantified targets for their recovery. In the second part of this thesis, the case of a biorefinery system is examined for the alternative management and valorization of municipal biowaste with the production of ethanol fuel and other products. The environmental performance of the biorefinery system is assessed compared to different versions of it, as well against the conventional systems for biowaste treatment. Following, the economic sustainability of the application of such a system in full scale is assessed and the values of the critical parameters for which the system may be economically viable, are defined. Finally, the examined biowaste management systems are evaluated against their overall sustainability, based on a set of environmental, technical, economic and social criteria with the use of the MultiCriteria Analysis method.

In specific, in the first part of this thesis, the greenhouse gas (GHG) emissions generated by the current municipal waste management system in Greece are estimated for the period 1991-2015. The current system mainly includes the management of municipal waste though its disposal to landfills, while there is also a small percent of organic waste that is recovered from the mixed waste through mechanical separation at central treatment plans and is treated with the composting method, and another fraction of recyclable waste that is recovered from a mixed recyclable waste stream and recycled. Next, the potential for reducing GHG emissions through the realization of the targets set in the NWMP (2015) with respect to the separation at source and recovery of recyclables. For the estimation of GHG emissions from landfilling, the waste model developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) was used, while for the rest management methods, the appropriate emission factors from the scientific literature were selected. The main outcomes of this research are summarized next. The total quantity of municipal waste that is disposed of in landfills during the period 1991-2015 amounts to approximately 110 million tonnes, with the respective quantity being landfilled in the future according to the new NWMP, being 41 million tonnes. The total GHG emissions that are estimated to occur within a 100-year horizon are for the second case 40.9 billion kg CO2eq., which corresponds to 26% of the respective emissions from the current situation. It is thus observed that by reducing the amount of biodegradable waste that is landfilled and collecting the generated landfill gas, the GHG emissions are drastically reduced. The average net emissions from composting are estimated to be approximately 18.8 million kg CO2eq. for the current situation and refer to the treatment of about 46,000 tn organic waste/year on average. With respect to the year 2020 when, according to the NWMP target, it is foreseen that 2,048,000 tonnes of organic waste will be composted (about 45 times higher quantity compared to the current average composted amount), the respective emissions are estimated to be 812.3 million kg CO2eq.. the net GHG emissions from the recycling of recyclable waste are negative, as the avoided GHG emissions related to the substitution of the production of the respective materials from virgin raw materials, are considerable higher compared to the other emissions. On average, the net emissions from the management of recyclable waste during the current period are -342 million kg CO2eq./year, while for the year 2020 the respective emissions amount to -1,689 million kg CO2eq.. The total avoided emissions due to recycling for 2020 are estimated to be about 5 times higher compared to the average annual avoided emissions of the current period. Finally, with respect to the overall management of municipal waste in Greece, the net emissions are quite high for the current period, as they are mostly determined by the emissions from landfilling, with the higher total emissions amounting to about 8,200 million kg CO2eq., based on the total emissions that correspond to the management of waste during 2010. The total net

emissions from waste management during 2020 are estimated to be about 300 million kg CO2eq., which are 25 times lower compared to 2010, for a managed waste quantity only slightly smaller (-12%) compared to 2010.

For the rest of the LCA research conducted in this thesis, an LCA software tool specialized in waste management (EASETECH) was used. In specific, next the available recycling methods for the dry recyclable materials present in the municipal waste were examined and an LCA was conducted on the implementation of a system for the separation at source of four recyclable waste streams (paper, plastic, glass, metal), as foreseen in the new NWMP. In this study, the analysis is further specified with respect to thr different materials present in the recyclable streams and to the relevant pretreatment and recycling processes, while the purity and separation efficiency of collected recyclables is also examined. The analysis framework includes the sorting and pretreatment processes and the recycling process, as well as, the processes for the primary production of substituted products by virgin raw materials and the landfilling of all process residuals. The GHG emissions were initially calculated for one tonne of collected recyclable waste, based on the composition of presorted waste collected in the framework of the project LIFE PAVETHEWAySTE. The main results of the research are presented next. In general, the net GHG emissions generated from the treatment of recyclable waste are negative, as the avoided emissions due to the substitution of material production from virgin raw material are higher compared to the emissions generated from the sorting, pretreatment and residue management processes. On average, the stage of recycling of recovered materials contributes 20% to the total emissions from the management of recyclable waste, the substitution stage contributes 78%, while the stages of sorting, pretreatment and disposal contribute each by 1%. The higher negative emissions are observed for the case of paper/carton waste recycling (-313kg CO2 eq./tn), which is attributed mainly to the high share of this waste stream in the collected recyclable waste. High negative emissions are also observed from the recycling of plastic and metal waste (-249kg CO2 eq./tn and -150 kg CO2 eq./tn, respectively). Finally, the lowest negative net emissions are observed for the case of glass recycling (-54 kg CO2 eq./tn). With respect to the management of 1 tn waste/material, it was shown that the highest negative emissions (-10,080 kg CO2 eq./tn) are generated from the recycling of non metal waste (aluminium), followed by the net emissions of ferrous metal waste (-2,508 kg CO2 eq./tn) and of plastic waste (-1,248 to -2,205 kg CO2 eq./tn). The management of glass waste results in the lowest negative emissions (-316 kg CO2 eq./tn), with the emissions from the treatment of paper and carton waste ranging also in low levels (-466 to -575 kg CO2 eq./τόνο).

In the second part of the current thesis, an LCA was conducted for the identification of the environmental impacts from the implementation, at full scale, of a biorefinery system for the alternative management and valorization of municipal biowaste with the production of ethanol fuel and other products. The system is based on the bioconversion process that was developed in the framework of the LIFE project WASTE2BIO. To this aim, LCA was applied to a number of alternative bioconversion systems concerning the potential process products and system configurations. The basic bioethanol production system includes the following stages: collection and transportation of biowaste; pretreatment; bioconversion; ethanol distillation; anaerobic digestion of stillage; generation of energy from biogas. Besides bioethanol, the potential system products that were also taken into account are the energy from biogas production; the production of soil conditioner from the anaerobic digestate; the production of methane fuel from biogas; and the production of animal feed from the stillage. Furthermore, the available biowaste management methods were examined and compared to the reference biorefinery system, such as the landfilling, composting, anaerobic digestion and incineration methods. The different ethanol production systems and waste management methods were evaluated against thirteen life cycle impact categories.

The results of the LCA study show that the reference biorefinery system presents very good environmental performance compared to the conventional waste management methods examined. The net emissions to the environment are quite low for all the impact categories examined, while in many of the cases the emissions are negative, meaning that the examined system creates a net benefit for the environment. The

highest positive impacts are observed for the impact categories "Ecotoxicity", "Marine eutrophication" and "Soil eutrophication" and are related to the emissions from the stage where the digestate is applied on land, which is common for most of the examined ethanol production systems. The ethanol production system with decentralized waste drying at municipal level presents low but positive emissions in most of the impact categories, which is mainly attributed to the fact that the heat produced at the bioethanol plant cannot be exploited for satisfying the heat requirements of drying, since the latter takes place remotely. The ethanol production system with waste drying at household level presents higher emissions in all impact categories, with substantially higher emissions in most categories, which is attributed to the fact that household dryers consume more energy and in particular electricity, in contrast to the central/decentralized dryers which use heat. With respect to the alternative/additional products of the bioethanol system studied, it was found that the production of methane transport fuel from biogas instead of electricity and heat presents better environmental performance compared to the reference system in all impact categories. The production of hydrous ethanol for use as heat fuel for fireplaces instead of anhydrous ethanol as transport fuel results in worse performance in all impact categories, while the partial diversion of stillage for the production of animal feed presents worse performance in some categories and better in some others. With respect to the results of the sensitivity analysis, it was shown that the use of catering waste as substrate and the reduction of enzyme dosage due to improvements in their effectiveness leads to further emission savings, as anticipated. The production of energy from the combustion of the solid fraction of process stillage also presents better performance compared to the reference system in many of the impact categories. The increase in enzyme dosage for achieving maximum ethanol production presents worse performance in most impact categories. The reference biorefinery system in general presents very good performance against almost all impact categories compared to the current waste management methods. As regards the impacts in the "Climate change" category, the best performances are observed for the methods of anaerobic digestion, incineration and the reference system, where savings are achieved, while the worst performance with positive emissions is observed for the landfill method. With respect to the rest of the impact categories, relatively high emissions are observed for the composting method in the categories "Acidification, soil", "Eutrophication, soil" and "Particulate matter" which are related to the air emissions from the composting process, for the anaerobic digestion and the composting method in the category "Human Toxicity, non-carcinogenic" and for all methods except incineration in the category "Ecotoxicity" which are related to the emissions from application of compost/digestate on land or to the emissions from the disposal of effluent landfill leachate to surface waters.

Following, the sustainability of the full-scale implementation of the biowaste management system for the production of ethanol is assessed. In particular, a thorough financial analysis of the biowaste conversion plant for the production of ethanol took place. Three basic scenarios were examined with respect to biowaste drying: (i) drying at municipal level, (ii) drying at home level and (iii) drying at central plant level. Furthermore, for each scenario different sub-scenarios are examined with respect to the system critical/most influencial parameters, such as the enzyme costs, the ethanol selling price, the debt level and loan duration. The results of the financial analysis for each of the examined sub-scenarios indicated the lowest fee at which the municipalities may manage their biowaste which is at the same time feasible for the business investment at the ethanol production plant level.

The analysis showed that biowaste drying at central level is more economical for the municipalities (management costs for the municipality: 91-122€/tn wet waste) compared to drying at municipal level (management costs for the municipality: 113-136€/tn wet waste), mainly due to the fact that the thermal energy produced at the biorefinery plant is not fully exploited in the case where drying takes place distantly (at municipal level). On the other hand, the required thermal energy for drying at municipal level is satisfied through the purchase and use of natural gas, thus substantially increasing costs for the municipality. If dried biowaste produced at municipal level are combusted in order to exploit the produced energy for drying, then the management costs are reduced (78-88€/tn wet waste). The biorefinery system with decentralized drying

and combustion presents better environmental performance compared to the biorefinery system with decentralized drying, at the impact categories "Climate change" and "Depletion of abiotic resources – Fossil". This is attributed to the avoidance of fossil fuel use for drying, according to the LCA results. However, it should also be taken into account that combustion and energy recovery from waste is less preferable compared to recycling based on the waste management hierarchy of the Waste Framework Directive, as savings in resources are achieved due to the substitution of mineral fertilizer production. This is reflected through the impact category "Depletion of abiotic resources – Elements and compounds", where the biorefinery system with decentralized drying and combustion creates net burdens, in contrast to the biorefinery systems with central and decentralized drying, where we have net savings. This is attributed to the fact that less fertilizer is produced, due to the combustion of (part of) biowaste and thus the savings are smaller than the burdens. Finally, drying at household level did not prove to be economical (management costs for the municipality: 152-176€/tn wet waste), mainly due to the high costs for the purchase of the household driers and the high amounts of electricity consumed for drying. However, the sensitivity analysis showed that a reduction in the cost of the household dryer of 50€ (100€ from 150€) may result in a reduction of about 14€ in the total management cost for the municipality.

In the last part of this thesis, the multicriteria analysis tool developed for the comparative assessment of the overall sustainability of the examined biowaste management methods, is presented. Sustainability is assessed in terms of economic, environmental, technical and social criteria. The assessment takes into account the whole waste management system, from the production and transportation of waste to their treatment or final disposal and the use of potential products. According to the selected environmental criteria, combustion with energy recovery is the best method from the environmental point of view followed by the biorefinery system with central/decentralized drying. According to the economic criterion which is based on the minimum management fee, the most preferred method is that of composting, followed by landfilling and anaerobic digestion. The methods of combustion and the biorefinery system with decentralized drying and combustion are in fifth place. The alternative biorefinery systems incur higher capital and operational costs, which is attributed to the complex processes involved, the advanced equipment, the costly raw materials (e.g. enzymes) and the specialized personnel. The biorefinery systems however produce higher net revenues, as apart from the sale of excess electricity and of the fertilizer produced, there are significant revenues from the sale of ethanol as well. According to the examined social criteria, anaerobic digestion is considered to be the most preferred method, followed by combustion and the biorefinery system with decentralized drying (without and with combustion). Following, four alternative scenarios were assessed with the multicriteria method, where higher weights were assigned to different criteria groups at the three scenarios (environmental, economic, social scenarios), while at the fourth scenario, equal weights are assigned to all criteria groups (weighted scenario). The results of the multicriteria analysis show that the method of combustion is the most preferred option both for the weighted scenario and the environmental scenario. Anaerobic digestion is the most preferred option according to both the economic and the social scenario. Composting is ranked between the second and the third place in all scenarios, except for the environmental one. According to the environmental scenario, the biorefinery system with central drying and the respective system with decentralized drying and combustion are ranked in the third place. Those two systems are ranked higher compared to the other biorefinery systems which involve drying at decentralized/household level, in all scenarios.

Συντομογραφίες

APOS: Allocation at the point of substitution

CFC: chlorofluorocarbon

CO_2 eq.: ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα

CO_2: carbon dioxide

COP: Conference of the UNFCCC Parties

DME: dimethyl ether

DOC: decomposable organic carbon

dw: dry waste

ELCD: European Platform on Life Cycle Assessment

EPR: Extended Producer Responsibility

ETBE: Ethyl tert-butyl ether

ETS: Emissions Trading System

FAME: fatty-acid methyl ester

FFVs: flexible fuel vehicles

FOD: First Order Decay

GHG: Greenhouse Gas

GWP: Global Warming Potential

HCFC: hydrochlorofluorocarbon

HDPE: High-density polyethylene

HFC: hydrofluorocarbon

HVO: hydrogenated vegetables oil

ILCD: International Reference Life Cycle Data System

ILUC: Indirect Land Use Change

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

ISO: International Standardization Organization

JRC: Joint Research Institute

kg: kilograms

LCA: Life Cycle Assessment

LCI: Life Cycle Inventory

LCIA: Life Cycle Impact Assessment

MJ: MegaJoule

N: nitrogen

N_2O: Nitrous oxide

PCM: Phase Change Material

PE: Person Equivalent

PET: Polyethylene terephthalate

PFC: Perfluorinated carbons

PM: particulate matter

PP: Polypropylene

RED: Renewable Energy Directive

RF: Radiative Forcing

SWOT: Strengths, Weaknesses, Opportunitiesm Threats

TAEE: tert-amyl ethyl ether

tn: tonnes

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

VS: Volatile Solids

ww: wet waste

ΑΔΚΖ: Απογραφή Δεδομένων Κύκλου Ζωής

ΑΕΠ: Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν

ΑΚΖ: Ανάλυση Κύκλου Ζωής

ΑΣΑ: αστικά στερεά απόβλητα

ΑΦΘ: αέρια φαινομένου του θερμοκηπίου

ΑΧ: αναερόβια χώνευση

ΒΑΑ: βιοαποδομήσιμα απόβλητα

ΒΔΤ: Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές

ΔΘΠ: Δυναμικό Θέρμανσης του Πλανήτη

Ε5, Ε10: μίγματα βενζίνης με 5- 10% περιεχόμενο σε βιοαιθανόλη

EtOH: Ethanol

ΕΒΑ: Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης

ΕΕ: Ευρωπαϊκή Ένωση/Επιτροπή

ΕΕΑΑ: Ελληνική Εταιρεία Αξιοποίησης Ανακύκλωσης

ΕΕΚΖ: Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής

ΕΛΣΤΑΤ: Ελληνική Στατιστική Αρχή

ΕΜΑΚ: Εγκατάσταση Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης

ΕΟΑΝ: Εθνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης

ΕΣΔΑ: Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων

ΚΔΑΥ: Κέντρο Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών

ΚΘΔ: Καθαρή Θερμογόνος Δύναμη

ΚΠΑ: Καθαρή Παρούσα Αξία

ΜΚΟ: Μη Κυβερνητική Οργανώση

ΜΠΕΤ: Μονάδα Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας

ΞΥ : Ξηρά ύλη

ΠΣΝ: Πολικά Στρατοσφαιρικά Νέφη

ΣΗΘ: συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

ΥΠΕΚΑ: Υπουργείο Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής

ΧΑΔΑ: Χώρος Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων

ΧΔΑ: Χώρος Διάθεσης Αποβλήτων

ΧΥΤΑ/ΧΥΤΥ: Χώρος Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων / Υπολειμμάτων

Περιεχόμενα

Πρόλογος ii
Εκτενής περίληψη iii
Extensive summary viii
Συντομογραφίες xii
Περιεχόμενα 15
Εισαγωγή 1
Συνεισφορές 5
Χρήσιμοι ορισμοί 5
Α' ΜΕΡΟΣ: ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ 7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Περιγραφή του προβλήματος 8
1.1 Διαχείριση αστικών αποβλήτων 8
1.2 Συμβολή τομέων της οικονομίας στην κλιματική αλλαγή 11
1.3 Παρατηρούμενη και αναμενόμενη αλλαγή του κλίματος 15
1.4 Συνεισφορά ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην κλιματική αλλαγή 19
1.4.1 Διοξείδιο του άνθρακα 22
1.4.2 Μεθάνιο 23
1.4.3 Υποξείδιο του αζώτου 23
1.4.4 Αλογόνα 24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Πλαίσιο πολιτικής για την αντιμετώπιση του προβλήματος 26
2.1 Διαχείριση αστικών αποβλήτων 27
2.1.1 Οδηγία 1999/31/ΕΚ περί υγειονομικής ταφής απορριμμάτων 27
2.1.2 Οδηγία 94/62/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας 28
2.1.3 Οδηγία για τα Απόβλητα 2008/98/ΕΚ 29
2.2 Στρατηγική Βιοοικονομίας 32
2.3 Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία 36
2.3.1 Διαχείριση αποβλήτων 39
2.3.2 Μετατροπή αποβλήτων σε πόρους 42
2.3.3 Τομέας προτεραιότητας: Πλαστικά 44
2.3.4 Τομέας προτεραιότητας: Βιομάζα και προϊόντα βιολογικής προέλευσης 44
2.4 Κλιματική αλλαγή 45
2.4.1 Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή 45

2.4.2 Δέσμη μέτρων ΕΕ για το κλίμα και την ενέργεια για το 2020 47
2.4.3 Πλαίσιο πολιτικής ΕΕ για το κλίμα και την ενέργεια από το 2020 έως το 2030 ... 48
2.4.4 Μακροπρόθεσμη στρατηγική ΕΕ για το 2050 50
2.5 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία 52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Τα βιοκαύσιμα ως λύση στο πρόβλημα 55
3.1 Πρώτη ύλη 55
3.2 Μίγματα συμβατικών καυσίμων με βιοκαύσιμα 57
3.3 Αποτύπωση της αγοράς 59
3.4 Εξοικονόμηση εκπομπών στον τομέα των μεταφορών 64
3.5 Εμπόδια για την εμπορική αξιοποίηση 65
Β' ΜΕΡΟΣ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ 68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Τεχνολογίες Διαχείρισης ΑΣΑ 69
4.1 Τελική Διάθεση – Ταφή 69
4.1.1 Λειτουργία 71
4.1.2 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ 73
4.2 Μηχανική Επεξεργασία 74
4.2.1 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ 76
4.3 Ανακύκλωση 76
4.3.1 Κέντρα Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών 76
4.3.2 Ανακύκλωση χαρτιού – χαρτονιού 77
4.3.3 Ανακύκλωση πλαστικού 79
4.3.4 Ανακύκλωση γυαλιού 80
4.3.5 Ανακύκλωση μετάλλων 82
4.4 Κομποστοποίηση 84
4.4.1 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ 86
4.5 Αναερόβια χώνευση 87
4.5.1 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ 88
4.6 Επεξεργασία οργανικών αποβλήτων για την παραγωγή βιοαιθανόλης 89
4.6.1 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ 91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Ανάλυση Κύκλου Ζωής 92
5.1 Προσδιορισμός σκοπού και πεδίου εφαρμογής 93
5.1.1 Ορισμός πεδίου εφαρμογής 93
5.1.2 Ορολογία και κύριες έννοιες 94

5.1.3 Πλαίσιο μοντελοποίησης 95
5.1.4 Όρια συστήματος 100
5.1.5 Αντιπροσωπευτικότητα δεδομένων 100
5.2 Απογραφή Δεδομένων Κύκλου Ζωής 100
5.2.1 Βάσεις δεδομένων 101
5.3 Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής 102
5.3.1 Επιλογή 103
5.3.2 Κατηγοριοποίηση 104
5.3.3 Ομαδοποίηση 104
5.3.4 Χαρακτηρισμός 104
5.3.5 Κανονικοποίηση 106
5.3.6 Στάθμιση (και συνυπολογισμός) 107
5.4 Ερμηνεία 108
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Εφαρμογή ανάλυσης κύκλου ζωής για τη διαχείριση αποβλήτων 111
6.1 Λογισμικά ΑΚΖ για τη διαχείριση αποβλήτων 115
Γ' ΜΕΡΟΣ: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 119
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Γενική μεθοδολογία 120
7.1 Ερευνητική ενότητα Α1: Αξιολόγηση του δυναμικού μείωσης των εκπομπών ΑΦΘ από τη διαχείριση αποβλήτων στην Ελλάδα 120
7.2 Ερευνητική ενότητα Α2: ΑΚΖ για τη διαλογή, προεπεξεργασία και ανακύκλωση χωριστά συλλεχθέντων ανακυκλώσιμων υλικών 122
7.3 Ερευνητική ενότητα Β1: ΑΚΖ συστήματος βιοδιϋλιστηρίου και συμβατικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων 125
7.4 Ερευνητική ενότητα Β2: Αξιολόγηση οικονομικής βιωσιμότητας συστήματος βιοδιϋλιστηρίου 129
7.5 Ερευνητική ενότητα Β3: Πολυκριτηριακή αξιολόγηση βιωσιμότητας συστήματος βιοδιϋλιστηρίου και συμβατικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων 131
7.5.1 Κριτήρια αξιολόγησης 133
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Μεθοδολογικά εργαλεία 135
8.1 IPCC waste model 135
8.2 Μοντέλο EASETECH 137
8.3 Βάση δεδομένων Ecoinvent 144
8.4 Μέθοδος ILCD - Κατηγορίες επιπτώσεων κύκλου ζωής 147
8.4.1 Κλιματική αλλαγή (Global warming) 147

8.4.2 Εξάντληση του όζοντος της στρατόσφαιρας (Stratospheric ozone depletion) 150

8.4.3 Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος/οξειδωτικών (Photochemical Ozone/Oxidant Formation) 151

8.4.4 Οξίνιση (Acidification)....153

8.4.5 Ευτροφισμός (Eutrophication)....154

8.4.6 Οικοτοξικότητα (Ecotoxicity)....155

8.4.7 Τοξικότητα στον άνθρωπο (Human toxicity)....157

8.4.8 Αιωρούμενα σωματίδια (Particulate matter)....158

8.4.9 Εξάντληση αβιοτικών πόρων (Depletion of abiotic resources)....158

Δ' ΜΕΡΟΣ: ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ....161

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Ερευνητική ενότητα Α1: Αξιολόγηση δυναμικού μείωσης εκπομπών ΑΦΘ από τη διαχείριση αποβλήτων στην Ελλάδα.... 162

9.1 Υπολογισμός εκπομπών ΑΦΘ από την ταφή....162

9.1.1 Αποτελέσματα....165

9.2 Υπολογισμός εκπομπών ΑΦΘ από την κομποστοποίηση....169

9.2.1 Αποτελέσματα....173

9.3 Υπολογισμός εκπομπών ΑΦΘ από την ανακύκλωση....175

9.3.1 Αποτελέσματα....177

9.4 Συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση ΑΣΑ στην Ελλάδα....179

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. Ερευνητική ενότητα Α2: ΑΚΖ για την ανακύκλωση χωριστά συλλεχθέντων ξηρών ανακυκλώσιμων αποβλήτων.... 182

10.1 Στάδιο διαλογής και προεπεξεργασίας....182

10.1.1 Χαρτί/χαρτόνι.... 182

10.1.2 Πλαστικό.... 182

10.1.3 Γυαλί....183

10.1.4 Μέταλλα.... 184

10.2 Στάδιο ανακύκλωσης....185

10.2.1 Χαρτί/Χαρτόνι.... 186

10.2.2 Πλαστικό....187

10.2.3 Γυαλί.... 189

10.2.4 Μέταλλο....191

10.3 Ταφή υπολειμμάτων....192

10.4 Αποτελέσματα....193

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11. Ερευνητική ενότητα Β1: ΑΚΖ συστήματος βιοδιϋλιστηρίου και συμβατικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων 197

11.1 Απογραφή δεδομένων – Μέρος Ι: Σύστημα βιοδιϋλιστηρίου και παραλλαγές.....197

11.1.1 Παραγωγή και ΔσΠ αστικών βιοαποβλήτων 197

11.1.2 Οικιακή ξήρανση (Σ3) 198

11.1.3 Συλλογή και μεταφορά ΒΑΑ 198

11.1.4 Κεντρική και Αποκεντρωμένη ξήρανση (Σ1&Σ2) 202

11.1.5 Μονάδα παραγωγής αιθανόλης από αστικά βιοαπόβλητα 203

11.2 Απογραφή δεδομένων – Μέρος ΙΙ: Υφιστάμενες μέθοδοι διαχείρισης βιοαποβλήτων 217

11.2.1 Ταφή 218

11.2.2 Σύστημα κομποστοποίησης 220

11.2.3 Σύστημα αναερόβιας χώνευσης 224

11.2.4 Σύστημα καύσης.... 229

11.3 Αποτελέσματα ΑΚΖ: Ερμηνεία & σχολιασμός 232

11.3.1 Κεντρική ξήρανση (Σ1) 236

11.3.2 Αποκεντρωμένη ξήρανση (Σ2) 240

11.3.3 Οικιακή ξήρανση (Σ3) 242

11.3.4 Εναλλακτικά/επιπρόσθετα προϊόντα 243

11.3.5 Ανάλυση ευαισθησίας....247

11.3.6 Συμβατικές/υφιστάμενες μέθοδοι διαχείρισης βιοαποβλήτων 255

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12. Ερευνητική ενότητα Β.2: Αξιολόγηση οικονομικής βιωσιμότητας συστήματος βιοδιϋλιστηρίου 260

12.1.1 Αποκεντρωμένη ξήρανση 264

12.1.2 Οικιακή ξήρανση 272

12.1.3 Κεντρική ξήρανση 276

12.2 Υλοποίηση σε πλήρη κλίμακα του προτεινόμενου συστήματος & Ανάλυση SWOT 283

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13. Ερευνητική ενότητα Β3: Πολυκριτηριακή αξιολόγηση βιωσιμότητας συστήματος βιοδιϋλιστηρίου και συμβατικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων 286

13.1 Παρουσίαση εργαλείου πολυκριτηριακής ανάλυσης.... 286

13.2 Βαθμολόγηση κριτηρίων αξιολόγησης 292

13.2.1 Περιβαλλοντικά κριτήρια 292

13.2.2 Οικονομικά κριτήρια 294

13.2.3 Κοινωνικά κριτήρια 305

13.3 Αποτελέσματα πολυκριτηριακής αξιολόγησης....308
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14. Συμπεράσματα 311
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 15. Προτάσεις....316
Βιβλιογραφία....318
Παράρτημα Ι: Σχετικές δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά....330

Πίνακες

Πίνακας 1: Κάλυψη τύπων μεταφοράς και εύρος διανυόμενης απόστασης για τα κύρια εναλλακτικά καύσιμα [33] 55

Πίνακας 2: Χαρακτηριστική και συνεπαγωγική μοντελοποίηση και χειρισμός της πολυλειτουργικότητας (Πηγή: Bjørn et al., 2018b) 99

Πίνακας 3: Σχεδιασμός διαχείρισης ΑΣΑ για το έτος 2020, τόνοι (και % επί της παραγωγής). Πηγή: ΥΠΕΚΑ, 2015 122

Πίνακας 4: Ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα για την συνολική διάρκεια της μελετώμενης περιόδου για το σύνολο των Τοπικών Κοινοτήτων του Δήμου Νάξου και Μικρών Κυκλάδων 124

Πίνακας 5: Κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και μονάδες χαρακτηρισμού και κανονικοποίησης (Laurent et al., 2013) 128

Πίνακας 6: Χρόνοι ζωής, ικανότητα απορρόφησης ακτινοβολίας και ΔΘΠ των κύριων ΑΦΘ (Myhre et al. 2013)....150

Πίνακας 7: Συντελεστές εκπομπής ΑΦΘ ανά είδος διεργασίας. Πηγή: Fruergaard et al. 2009 169

Πίνακας 8: Αέριες εκπομπές από την κομποστοποίηση οργανικών αποβλήτων. Πηγή: Boldrin et al. (2009) 170

Πίνακας 9: Περιεκτικότητα των εισερχόμενων βιοαποβλήτων σε άνθρακα και άζωτο (kg/tn ww) . Πηγή: Boldrin et al. (2009)....171

Πίνακας 10: Εισροές και εκροές κατά το στάδιο της εφαρμογής του κόμποστ στη γη (ανά τόνο ww) και έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές. Πηγή: Boldrin et al. (2009) 173

Πίνακας 11: Εισροές και συντελεστές εκπομπών για την επεξεργασία και ανακύκλωση ανακυκλώσιμων αστικών αποβλήτων, ανά τόνο απόβλητου 175

Πίνακας 12. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της διαλογής και προεπεξεργασίας των αποβλήτων χαρτιού-χαρτονιού....182

Πίνακας 13. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της διαλογής και προεπεξεργασίας των αποβλήτων πλαστικού 183

Πίνακας 14. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της διαλογής και προεπεξεργασίας των αποβλήτων γυαλιού 184

Πίνακας 15. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της διαλογής και προεπεξεργασίας των σιδηρούχων μετάλλων 184

Πίνακας 16. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της διαλογής και προεπεξεργασίας των σιδηρούχων μετάλλων 185

Πίνακας 17. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης συσκευασιών χαρτιού και χαρτονιού σε χαρτόνι 186

Πίνακας 18. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης συσκευασιών έντυπου χαρτιού σε χαρτί εφημερίδας 186

Πίνακας 19. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης αποβλήτων PET σε κοκκοποιημένο PET 187

Πίνακας 20. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης αποβλήτων HDPE σε κοκκοποιημένο HDPE 188

Πίνακας 21. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης αποβλήτων PP σε κοκκοποιημένο PP 189

Πίνακας 22. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της επεξεργασίας των γυάλινων δοχείων για επαναχρησιμοποίηση 190

Πίνακας 23. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης υαλοθραύσματος σε καινούριο γυαλί 190

Πίνακας 24. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης αλουμινίου 191

Πίνακας 25. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης χάλυβα 191

Πίνακας 26: Ποσοστό εισερχόμενου στο σύστημα αποβλήτου που οδηγείται προς ταφή (υπολείμματα διεργασίας) 192

Πίνακας 27: Εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση ενός τόνου ανακυκλώσιμων αποβλήτων ανά υλικό και στάδιο διαχείρισης (kg CO2 eq.) 193

Πίνακας 28: Ποσότητες παραγόμενων ΑΣΑ και ΒΑΑ στους υπό εξέταση δήμους 197

Πίνακας 29: Εισροές στο στάδιο της οικιακής ξήρανσης 198

Πίνακας 30: Στόλος οχημάτων και πραγματοποιούμενα δρομολόγια για τη συλλογή των σύμμεικτων ΑΣΑ στο Δήμο Παπάγου-Χολαργού 199

Πίνακας 31: Εισροές στο στάδιο της συλλογής & μεταφοράς ΒΑΑ για το Δήμο Παπάγου-Χολαργού 200

Πίνακας 32: Στόλος οχημάτων και πραγματοποιούμενα δρομολόγια για τη συλλογή των σύμμεικτων ΑΣΑ στο Δήμο Ασπρόπυργου 202

Πίνακας 33: Εισροές στο στάδιο της συλλογής & μεταφοράς ΒΑΑ για το Δήμο Ασπρόπυργου 202

Πίνακας 34: Εισροές στο στάδιο της κεντρικής και αποκεντρωμένης ξήρανσης 203

Πίνακας 35: Βιοχημική σύσταση εξεταζόμενων υποστρωμάτων διεργασίας 203

Πίνακας 36: Εισροές στο στάδιο τεμαχισμού και άλεσης 205

Πίνακας 37: Ποσότητες χημικών που εισέρχονται στη μονάδα βιομετατροπής 206

Πίνακας 38: Εισροές στο στάδιο βιομετατροπής 208

Πίνακας 39: Εισροές στο στάδιο της απόσταξης της βιοαιθανόλης 209

Πίνακας 40: Εισροές στο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης 211

Πίνακας 41: Εισροές στο στάδιο του διαχωρισμού του υπολείμματος της διεργασίας βιομετατροπής 212

Πίνακας 42: Εισροές στο στάδιο της ξήρανσης 212

Πίνακας 43: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης του λιπάσματος 213

Πίνακας 44: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης του καύσιμου κίνησης/θέρμανσης 214

Πίνακας 45: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από το βιοαέριο 214

Πίνακας 46: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από το στερεό βιοκαύσιμο 215

Πίνακας 47: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της ζωοτροφής 216

Πίνακας 48: Εισροές στο στάδιο αναβάθμισης & συμπίεσης βιοαερίου 216

Πίνακας 49: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης του καύσιμου θέρμανσης 217

Πίνακας 50: Βασικά χαρακτηριστικά και στοιχειακή ανάλυση εισερχόμενου αστικού βιοαποβλήτου (μέσος όρος) 217

Πίνακας 51: Εισροές στο στάδιο της ταφής 220

Πίνακας 52: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της ενέργειας από την ταφή 220

Πίνακας 53: Εισροές στο στάδιο της ανοιχτής κομποστοποίησης 222

Πίνακας 54: Εισροές στο στάδιο της κλειστής κομποστοποίησης 222

Πίνακας 55: Κατανομή του άνθρακα, του άζωτου και του φώσφορου από το κόμποστ στα φυτά και το περιβάλλον 223

Πίνακας 56: Εισροές στο στάδιο της εφαρμογής του κόμποστ 223

Πίνακας 57: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης του κόμποστ 224

Πίνακας 58: Εισροές στο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης 227

Πίνακας 59: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από την αναερόβια χώνευση 227

Πίνακας 60: Κατανομή του άνθρακα, του άζωτου και του φώσφορου από το χώνευμα στα φυτά και το περιβάλλον 228

Πίνακας 61: Εισροές στο στάδιο της εφαρμογής του χωνεύματος 228

Πίνακας 62: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης του χωνεύματος 229

Πίνακας 63: Εισροές στο στάδιο της καύσης 230

Πίνακας 64: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από την καύση 231

Πίνακας 65: Δυναμικότητα μονάδας παραγωγής βιοαιθανόλης 261

Πίνακας 66: Υπολογισμός συνολικού κεφαλαιουχικού κόστους για μονάδα παραγωγής αιθανόλης 700,000τν βιομάζας/έτος με βάση τους Humbird et al. (2011) 261

Πίνακας 67: Τιμές αγοράς και πώλησης για υπολογισμό λειτουργικού κόστους και εσόδων 262

Πίνακας 68: Χρηματοοικονομικά στοιχεία επένδυσης για τη μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης 263

Πίνακας 69: Ισοζύγιο προϊόντων στη μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης (ΑΞ) 264

Πίνακας 70: Κεφαλαιουχικά κόστη, λειτουργικά κόστη και έσοδα μονάδας παραγωγής αιθανόλης, αποκεντρωμένη ξήρανση (ΑΞ) 264

Πίνακας 71: Οικονομικά στοιχεία αποκεντρωμένης ξήρανσης σε επίπεδο δήμων 265

Πίνακας 72: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους διαχείρισης δήμων για τη μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης παραγωγής αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση 266

Πίνακας 73: Κεφαλαιουχικά κόστη, λειτουργικά κόστη και έσοδα μονάδας παραγωγής αιθανόλης, αποκεντρωμένη ξήρανση (ΑΞκ) 267

Πίνακας 74: Οικονομικά στοιχεία αποκεντρωμένης ξήρανσης σε επίπεδο δήμων με καύση ξηρών ΒΑΑ 268

Πίνακας 75: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους διαχείρισης δήμων για τη μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης παραγωγής αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση ξηρών ΒΑΑ 269

Πίνακας 76: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση σε επίπεδο δήμων, τέλος διαχείρισης ξηρών ΒΑΑ 241€/ τόνο, κόστος ενζύμων 22.8€/τόνο ξηρών ΒΑΑ, τιμή αιθανόλης 0.60€/λίτρο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 85,000 τν/έτος 270

Πίνακας 77: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση σε επίπεδο δήμων και καύση ξηρών ΒΑΑ, τέλος διαχείρισης ξηρών ΒΑΑ 474€/ τόνο, κόστος ενζύμων 22.8€/τόνο ξηρών ΒΑΑ, τιμή αιθανόλης 0.60€/λίτρο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 21,404 τν/έτος 271

Πίνακας 78: Ισοζύγιο προϊόντων στη μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης-ΟΞ 272

Πίνακας 79: Κεφαλαιουχικά κόστη, λειτουργικά κόστη και έσοδα μονάδας παραγωγής αιθανόλης, οικιακή ξήρανση (ΟΞ) 272

Πίνακας 80: Οικονομικά στοιχεία οικιακής ξήρανσης 273

Πίνακας 81: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους διαχείρισης δήμων για τη μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης παραγωγής αιθανόλης με οικιακή ξήρανση 274

Πίνακας 82: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας αιθανόλης με ξήρανση ΒΑΑ σε οικιακό επίπεδο, τέλος διαχείρισης ξηρών ΒΑΑ 184€/ τόνο, κόστος ενζύμων 20.9€/τόνο ξηρών ΒΑΑ, τιμή αιθανόλης 0.60€/λίτρο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 85,000 τν/έτος 275

Πίνακας 83: Ισοζύγιο προϊόντων στη μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης-ΚΞ 276

Πίνακας 84: Κεφαλαιουχικά κόστη, λειτουργικά κόστη και έσοδα μονάδας παραγωγής αιθανόλης περιλ. ξήρανσης (ΚΞ), δυναμικότητα 85,000 τν ξηρών ΒΑΑ/έτος 276

Πίνακας 85: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους διαχείρισης δήμων για τη μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης παραγωγής αιθανόλης με κεντρική ξήρανση, δυναμικότητα 85,000 τν ξηρών ΒΑΑ/έτος 278

Πίνακας 86: Κεφαλαιουχικά κόστη, λειτουργικά κόστη και έσοδα μονάδας παραγωγής αιθανόλης περιλ. ξήρανσης (ΚΞ), δυναμικότητα 40,000 τν ξηρών ΒΑΑ/έτος 278

Πίνακας 87: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους διαχείρισης δήμων για τη μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης παραγωγής αιθανόλης με κεντρική ξήρανση, δυναμικότητα 40,000 τν ξηρών ΒΑΑ/έτος 280

Πίνακας 88: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας παραγωγής αιθανόλης με κεντρική ξήρανση, τέλος διαχείρισης νωπών ΒΑΑ 104€/τν, τιμή αιθανόλης 0.60€/λίτρο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 336,101 τν/έτος 281

Πίνακας 89: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας παραγωγής αιθανόλης με κεντρική ξήρανση, τέλος διαχείρισης νωπών ΒΑΑ 138€/τν, τιμή αιθανόλης 0.60€/λίτρο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 158,165 τν νωπών ΒΑΑ/έτος 282

Πίνακας 90: Κανονικοποιημένες τιμές για τις εξεταζόμενες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τα συστήματα διαχείρισης βιοαποβλήτων (κλίμακα 0-100), Περιβαλλοντικό κριτήριο 293

Πίνακας 91: Διάρκεια ζωής επένδυσης και επιτόκιο προεξόφλησης (ιδιωτικό μέτρο κόστους) για τις μεθόδους διαχείρισης βιοαποβλήτων, σύμφωνα με ARCADIS/Eunomia (2009) 294

Πίνακας 92: Δεδομένα υπολογισμού εσόδων μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων 294

Πίνακας 93: Κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη των συμβατικών μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων (€/τόνο αποβλήτου). Πηγή: ARCADIS/Eunomia, 2009 296

Πίνακας 94: Κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη για τα εναλλακτικά σενάρια συστήματος βιοδιϋλιστηρίου (€/τόνο αποβλήτου) 296

Πίνακας 95: Έσοδα από την πώληση των παραγόμενων προϊόντων και έξοδα από τη διάθεση αποβλήτων για τα εξεταζόμενα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων (ανά τόνο αποβλήτων) 297

Πίνακας 96: Συγκεντρωτικά οικονομικά στοιχεία για τα εξεταζόμενα συστήματα διαχείρισης βιοαποβλήτων (€/τόνο), Οικονομικό κριτήριο 298

Πίνακας 97: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας ταφής με καύση βιοαερίου, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 19€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 250,000 τν/έτος 299

Πίνακας 98: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας ταφής με παραγωγή ενέργειας, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 13€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 250,000 τν/έτος 300

Πίνακας 99: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας ταφής ανοιχτής κομποστοποίησης, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 16€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 20,000 τν/έτος 301

Πίνακας 100: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας κλειστής κομποστοποίησης, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 28€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 30,000 τν/έτος..... 302

Πίνακας 101: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας αναερόβιας χώνευσης, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 54€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 25,000 τν/έτος 303

Πίνακας 102: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας καύσης με παραγωγή ενέργειας, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 82€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 200,000 τν/έτος 304

Πίνακας 103: Υπολογισμός εργατικού κόστους για τα εξεταζόμενα συστήματα διαχείρισης βιοαποβλήτων, κριτήριο «Δημιουργία θέσεων εργασίας» 305

Πίνακας 104: Βαθμολόγηση κριτηρίου «Κοινωνική αποδοχή» 306

Πίνακας 105: Μέσος όρος βαθμολόγησης κοινωνικών κριτηρίων για τα συστήματα διαχείρισης βιοαποβλήτων, κανονικοποιημένες τιμές (κλίμακα 0-100) 306

Σχήματα

Σχήμα 1: Ποσότητες αστικών αποβλήτων ανά μέθοδο διαχείρισης στην ΕΕ-28, για την περίοδο 1995-2018. Πηγή: Eurostat, 2020a. 8

Σχήμα 2: Συνεισφορά των μεθόδων διαχείρισης αστικών αποβλήτων στη συνολική διαχείριση στην ΕΕ-28, 2017 (χιλιάδες τόνοι, %). Πηγή: Eurostat, 2020a 9

Σχήμα 3: Συνεισφορά των μεθόδων διαχείρισης αστικών αποβλήτων στη συνολική διαχείριση στην Ελλάδα, 2017 (χιλιάδες τόνοι, %). Πηγή: Eurostat, 2020a 9

Σχήμα 4: Συνεισφορά των μεθόδων διαχείρισης αστικών αποβλήτων στη συνολική διαχείριση για τα Κράτη-Μέλη της ΕΕ-28, 2017 (%). Πηγή: Eurostat, 2020a..... 11

Σχήμα 5: Συνολικές ανθρωπογενείς εκπομπές ΑΦΘ ($GtCO_2eq$ / yr) από τους οικονομικούς τομείς, για το έτος 2010. Πηγή: IPCC, 2014a. 12

Σχήμα 6: Συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τον τομέα της βιομηχανίας ανά πηγή σε παγκόσμιο επίπεδο, 1970-2010 ($GtCO_2eq$ / yr). Πηγή: IPCC, 2014β 13

Σχήμα 7: Συμβολή των εκπομπών ΑΦΘ ανά τομέα στις συνολικές εκπομπές σε επίπεδο ΕΕ-28, 2018. Πηγή: Eurostat/EEA, 2020 13

Σχήμα 8: Παγκόσμιες εκπομπές ΑΦΘ από τον τομέα διαχείρισης αποβλήτων σε MtCO2eq/έτος, ανά ΑΕΠ και κατά κεφαλή. Πηγή: IPCC, 2014β 14

Σχήμα 9: Συμβολή των εκπομπών ΑΦΘ από τις διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων (υγρών και στερεών) στις συνολικές εκπομπές του τομέα διαχείρισης αποβλήτων στην ΕΕ-28, 2018. Πηγή: Eurostat/EEA, 2020 15

Σχήμα 10: Παρατηρήσεις ετήσιων παγκόσμιων μέσων θερμοκρασιών στην επιφάνεια της γης και των ωκεανών από διαφορετικές σειρές δεδομένων σε σχέση με την περίοδο 1986-2005. Πηγή: IPCC, 2014β.... 16

Σχήμα 11: Συνεισφορές στην παρατηρούμενη αλλαγή της θερμοκρασίας επιφάνειας την περίοδο 1951-2010. Πηγή: IPCC, 2014β 16

Σχήμα 12: Ετήσια και παγκόσμια μέση αλλαγή της στάθμης της θάλασσας σε σχέση με την περίοδο 1986-2005 Πηγή: IPCC, 2014β..... 17

Σχήμα 13: Ετήσιες ανθρωπογενείς εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στα διαφορετικά RCPs εκφρασμένος ως $GtCO_2/yr$ (γραμμές, αριστερός άξονας) με βάση τις κατηγορίες σεναρίων της WGIII (οι χρωματισμένες περιοχές δείχνουν το εύρος 5-95%). Πηγή: IPCC, 2014β 18

Σχήμα 14: Παγκόσμια μέση αύξηση της θερμοκρασίας τη στιγμή που οι παγκόσμιες εκπομπές CO2 (σε Gt) φτάσουν ένα συγκεκριμένο αθροιστικό επίπεδο από το 1870. Πηγή: IPCC, 2014β 19

Σχήμα 15: Παγκόσμιες μέσες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των τριών κυριότερων ΑΦΘ όπως έχουν προσδιοριστεί από πυρήνες πάγου (τελείες) και από άμεσες ατμοσφαιρικές μετρήσεις (γραμμές). Πηγή: IPCC, 2014 20

Σχήμα 16: (a) Διατάραξη ακτινοβολίας (radiative forcing) από τα κύρια ΑΦΘ και τις ομάδες αλογόνων, 1850-2011, (b) όπως στο (a) αλλά με λογαριθμική κλίμακα. Πηγή: Myhre et al., 2013 20

Σχήμα 17: Διατάραξη ακτινοβολίας (radiative forcing) από τις ομάδες αλογόνων με λογαριθμική κλίμακα, 1850-2011. Πηγή: Myhre et al., 2013 20

Σχήμα 18: Ρυθμός αλλαγής της διατάραξης ακτινοβολίας (radiative forcing) από τα κύρια ΑΦΘ και τις ομάδες αλογόνων, 1850-2011. Πηγή: Myhre et al., 2013 21

Σχήμα 19: Παγκόσμιες ανθρωπογενείς εκπομπές ΑΦΘ ανά αέριο για την περίοδο 1970 – 2010, με βάση το $ΔΘΠ_{100}$ της 2ης Έκθεσης Αξιολόγησης του IPCC. Πηγή: IPCC (2014) 21

Σχήμα 20: Συμμετοχή των ΑΦΘ στη διατάραξη της ακτινοβολίας και τη θέρμανση του πλανήτη. Πηγή: EEA, 2020 22

Σχήμα 21: Ιεράρχηση της πρόληψης και διαχείρισης αποβλήτων σύμφωνα με το Άρθρο 4 της Οδηγίας 2008/98/ΕΚ 30

Σχήμα 22: Απεικόνιση της Στρατηγικής της Βιοοικονομίας 34

Σχήμα 23: Μοντέλο Κυκλικής Οικονομίας 37

Σχήμα 24: Δύο κύκλοι του μοντέλου Κυκλικής Οικονομίας (Πηγή: Ellen Macarthour Foundation) 38

Σχήμα 25: Στάδια κύκλου ζωής της Σχεδίου Δράσης για την Κυκλική οικονομία (EC, 2015) 38

Σχήμα 26: Κατάταξη των διεργασιών ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα σύμφωνα με την ιεραρχία διαχείρισης των αποβλήτων της ΕΕ 42

Σχήμα 27: Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία 53

Σχήμα 28: Μερίδιο του μίγματος Ε10 στην αγορά σε επιλεγμένες χώρες της ΕΕ (Πηγή: Epure) 58

Σχήμα 29: Εκτιμώμενη συνεισφορά της βιοενέργειας στη συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τελικό χρήστη-τομέα, 2017 (REN21, 2019) 60

Σχήμα 30: Παγκόσμια παραγωγή αιθανόλης, βιοντίζελ και HVO/HEFA με βάση το ενεργειακό τους περιεχόμενο 2008-2018 (Πηγή: REN21, 2019) 61

Σχήμα 31: Μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στις μεταφορές, 2018, σε % της ακαθάριστης συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Πηγή: Eurostat, 2020β (nrg_ind_ren) 61

Σχήμα 32: Συνεισφορά σε ενεργειακό περιεχόμενο των διαφορετικών τύπων βιοκαυσίμων στη συνολική κατανάλωση βιοκαυσίμων στην ΕΕ για τις μεταφορές το 2018, * Εκτίμηση (Πηγή: EurObserv'ER, 2019) 62

Σχήμα 33: Κατανάλωση βιοκαυσίμων στις μεταφορές στις χώρες της ΕΕ σε ktoe, εκτίμηση για το 2018 (Πηγή: EurObserv'ER, 2019) 63

Σχήμα 34: Μερίδια στην προμήθεια ενέργειας από βιοκαύσιμα για χρήση στις οδικές μεταφορές για τα 22 Κ-Μ που υπέβαλλαν εκθέσεις, 2017 [46] 64

Σχήμα 35: Μείωση της έντασης των εκπομπών ΑΦΘ από τα καύσιμα για τα 22 κράτη μέλη της ΕΕ για το έτος 2017, σε σχέση με το 2010 [46] 65

Σχήμα 36: Πολυπλοκότητα και ανταγωνιστικότητα επιλογών στην αλυσίδα αξίας των προηγμένων βιοκαυσίμων (Πηγή: IRENA, 2019) 66

Σχήμα 37: Ιεράρχηση εμποδίων για την ανάπτυξη των προηγμένων βιοκαυσίμων με βάση τη σπουδαιότητά τους (Πηγή: IRENA, 2019) 66

Σχήμα 38: Διαδοχικές φάσεις παραγωγής βιοαερίου σε ΧΔΑ (I-Αρχική προσαρμογή, II-Μεταβατική φάση, III-Όξινη φάση, IV-Φάση ζύμωσης μεθανίου, V-Φάση ωρίμανσης). Πρωτεύον διάγραμμα: σύνθεση αερίων ανά φάση, Δευτερεύον διάγραμμα: χαρακτηριστικά στραγγισμάτων. (G. Tchobanoglous & F. Kreith, 2002) 73

Σχήμα 39: Συνοπτική περιγραφή διεργασιών κομποστοποίησης και ενδιάμεσων προϊόντων της. Πηγή: ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014 85

Σχήμα 40: Βασικές μέθοδοι παραγωγής βιοαιθανόλης (Valta et al., 2019) 90

Σχήμα 41: Πλαίσιο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ISO, 2006a) 93

Σχήμα 42: Επίλυση του προβλήματος της πολυλειτουργικότητας με υποδιαίρεση (Πηγή: Bjørn et al., 2018β) 96

Σχήμα 43: Επίλυση του προβλήματος της πολυλειτουργικότητας με επέκταση του συστήματος (a) και πίστωση (b) (Πηγή: Bjørn et al., 2018b) 96

Σχήμα 44: Ιεραρχία του ISO για την επίλυση της πολυλειτουργικότητας (Πηγή: Bjørn et al., 2018b) 98

Σχήμα 45: Πλαίσιο χαρακτηρισμού ILCD για τη σύνδεση των στοιχειώδων ροών, των δεικτών ενδιάμεσου και τελικού σημείου και των τριών περιοχών προστασίας (Rosenbaum et al., 2018a; EC-JRC, 2010b) 106

Σχήμα 46: Τυπικό ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης αποβλήτων. Η εξωτερική διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην ευρύτερη κοινωνία (σύστημα γης και τεχνόσφαιρα). Η εσωτερική διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων τα οποία εκπροσωπούνται από έναν αριθμό τεχνολογιών διαχείρισης αποβλήτων (Gentil et al., 2010) 112

Σχήμα 47: Όρια συστήματος παραγωγής βιοαιθανόλης από αστικά βιοαπόβλητα για τα τρία επίπεδα ξήρανσης (Σ1-Σ3) 127

Σχήμα 48: Διάγραμμα ροής για τα τρία επίπεδα ξήρανσης (οικιακή, αποκεντρωμένη, κεντρική) 130

Σχήμα 49: Άξονες αειφορίας 132

Σχήμα 50: Κριτήρια πολυκριτηριακής αξιολόγησης μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων 134

Σχήμα 51: Περιβάλλον EASETECH 139

Σχήμα 52: Δεδομένα και υπολογισμοί στα διαφορετικά επίπεδα αποτελεσμάτων. Τα βέλη δείχνουν τις ροές της απαιτούμενης πληροφορίας 143

Σχήμα 53: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου (Πηγή: Le Treut et al., 2007) 148

Σχήμα 54: Εκτίμηση του ετήσιου μέσου παγκόσμιου ισοζυγίου ενέργειας της Γης. Πηγή: Kiehl and Trenberth (1997) 148

Σχήμα 55: Συνολικές ποσότητες αποβλήτων που οδηγούνται σε ΧΑΔΑ και ΧΥΤΑ την περίοδο 1991-2015 και το 2020, σε επίπεδο Ελλάδας 165

Σχήμα 56: Αθροιστικές εκπομπές ΑΦΘ από τη διάθεση αποβλήτων σε ΧΥΤΑ και σε ΧΑΔΑ την περίοδο 1991-2015, σύνολο Ελλάδας 166

Σχήμα 57: Εκπομπές ΑΦΘ από το χώρο ταφής αποβλήτων στους Ταγαράδες Θεσσαλονίκης για την περίοδο 1981-2081 168

Σχήμα 58: Αθροιστικές εκπομπές ΑΦΘ από την τελική διάθεση αποβλήτων, υφιστάμενη κατάσταση (1991-2015) και σενάριο ΕΣΔΑ (2016-2040), σύνολο Ελλάδας 168

Σχήμα 59: Διαχειριζόμενες ποσότητες οργανικών αποβλήτων αστικής προέλευσης με τη μέθοδο της οικιακής και κεντρικής κομποστοποίησης την περίοδο 1997-2015 και το 2020, επίπεδο Ελλάδας 174

Σχήμα 60: Συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από την οικιακή και κεντρική κομποστοποίηση οργανικών αποβλήτων, σε επίπεδο Ελλάδας, 1997-2015 και 2020 175

Σχήμα 61: Ποσότητες διαχειριζόμενων ανακυκλώσιμων αποβλήτων ανά ρεύμα την περίοδο 2004-2015 και το 2020 (στόχος), επίπεδο Ελλάδας 177

Σχήμα 62: Συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από την ανακύκλωση αποβλήτων ανά υλικό για την περίοδο 2004-2015 & για το έτος-στόχο 2020 (kg CO2 eq.) 178

Σχήμα 63: Ποσοστιαία συμμετοχή των ρευμάτων αποβλήτων στη συνολική ποσότητα των διαχειριζόμενων ανακυκλώσιμων αποβλήτων και στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείρισή τους, μ.ο. 2004-2015 178

Σχήμα 64: Συμμετοχή ρευμάτων ανακυκλώσιμων αποβλήτων στις συνολικές εκπομπές, 2004-2015 (αριστερά) και 2020 (δεξιά) 179

Σχήμα 65: Ποσοστιαία κατανομή των μεθόδων διαχείρισης των αστικών αποβλήτων για την περίοδο 1991-2015 και το έτος-στόχο 2020, επίπεδο Ελλάδας 179

Σχήμα 66: Συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τις διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων για την περίοδο 1991-2015 και για το έτος-στόχο 2020, επίπεδο Ελλάδας 180

Σχήμα 67: Καθαρές εκπομπές ΑΦΘ (kg CO2 eq.) από τη διαχείριση 1 τόνου συλλλεχθέντων ανακυκλώσιμων αποβλήτων ανά ρεύμα αποβλήτου (μπάρες) και ποσότητα αποβλήτου προς διαχείριση (kg/τόνο συλλεγόμενου αποβλήτου) (γραμμή) 193

Σχήμα 68: Εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση 1 τόνου/υλικό (σε kg CO2 eq./tn) 194

Σχήμα 69: Ποσοστιαία συνεισφορά των επιμέρους σταδίων διαχείρισης των ανακυκλώσιμων υλικών στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ 195

Σχήμα 70: Εκπομπές ΑΦΘ από την ταφή των υπολειμμάτων διαχείρισης 1 τόνου ανακυκλώσιμων αποβλήτων (πρωτεύων κάθετος άξονας-αριστερά) και από την ταφή 1 τόνου αποβλήτου (δευτερεύων κάθετος άξονας- δεξιά) (kg CO2 eq.) 196

Σχήμα 71: Απεικόνιση διάταξης δοχείων για τη διεργασία της βιομετατροπής 208

Σχήμα 72: Διάγραμμα ροής για το σύστημα διαχείρισης βιοαποβλήτων με υγειονομική ταφή & καύση βιοαερίου για παραγωγή ενέργειας 219

Σχήμα 73: Διάγραμμα ροής για το σύστημα διαχείρισης βιοαποβλήτων με κομποστοποίηση 222

Σχήμα 74: Διάγραμμα ροής για το σύστημα διαχείρισης βιοαποβλήτων με αναερόβια χώνευση 225

Σχήμα 75: Διάγραμμα ροής για το σύστημα διαχείρισης βιοαποβλήτων με καύση και παραγωγή ενέργειας 230

Σχήμα 76: ΑΚΖ για τα συστήματα Σ1, Σ2 και Σ3: επίπεδο ξήρανσης (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ) 233

Σχήμα 77: ΑΚΖ για τα σύστημα αναφοράς Σ1 και τις παραλλαγές Σ1Α-Σ1Γ: εναλλακτικά/επιπρόσθετα προϊόντα (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ) 234

Σχήμα 78: ΑΚΖ για τα σύστημα αναφοράς Σ1 και τις παραλλαγές Σ1Δ, Σ1Εα&β, Σ1Ζ, Σ2Α & Σ3Α: ανάλυση ευαισθησίας (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ) 235

Σχήμα 79: ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και τις υφιστάμενες μεθόδους διαχείρισης βιοαποβλήτων ΥΜ1-ΥΜ4 (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ) 236

Σχήμα 80: Αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 (ΙΑ) 238

Σχήμα 81: Συνεισφορά σταδίων συστήματος Σ1 στις θετικές εκπομπές (επιβαρύνσεις) της κατηγορίας επιπτώσεων «Οικοτοξικότητα» (%) 239

Σχήμα 82: Συνεισφορά σταδίων συστήματος Σ1 στις θετικές εκπομπές (επιβαρύνσεις) της κατηγορίας επιπτώσεων «Ευτροφισμός - θάλασσα» (%) 239

Σχήμα 83: Συνεισφορά σταδίων συστήματος Σ1 στις θετικές εκπομπές (επιβαρύνσεις) της κατηγορίας επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή» (%) 240

Σχήμα 84: Συνεισφορά σταδίων συστήματος Σ1 στις αποφευχθείσες εκπομπές (οφέλη) της κατηγορίας επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή» (%) 240

Σχήμα 85: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για τα συστήματα Σ1 και Σ2 (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ) 241

Σχήμα 86: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για τα συστήματα Σ1 και Σ3 (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)..... 243

Σχήμα 87: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Α (παραγωγή ζωοτροφής) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ) 244

Σχήμα 88: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Β (παραγωγή μεθανίου) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)..... 245

Σχήμα 89: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Γ (παραγωγή ένυδρης αιθανόλης) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ) 247

Σχήμα 90: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Δ (χρήση υποστρώματος από υπηρεσίες εστίασης) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)..... 249

Σχήμα 91: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Εα (μέγιστη δοσολογία ενζύμων) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)..... 250

Σχήμα 92: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Εβ (μείωση δοσολογίας ενζύμων) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ) 251

Σχήμα 93: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Ζ (παραγωγή ενέργειας από στερεό υπόλειμμα απόσταξης) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ) 252

Σχήμα 94: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για τα συστήματα Σ1, Σ2 και την παραλλαγή Σ2Α (παραγωγή ενέργειας από στερεό υπόλειμμα απόσταξης) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ) 253

Σχήμα 95: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για τα συστήματα Σ1, Σ3 και την παραλλαγή Σ3Α (οικιακή ξήρανση με Φ/Β) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)..... 254

Σχήμα 96: Αποτελέσματα ΑΚΖ για τη μέθοδο ΥΜ1: Ταφή (ΙΑ) 256

Σχήμα 97: Αποτελέσματα ΑΚΖ για τη μέθοδο ΥΜ2: Κομποστοποίηση (ΙΑ) 257

Σχήμα 98: Αποτελέσματα ΑΚΖ για τη μέθοδο ΥΜ3: Αναερόβια χώνευση (ΙΑ) 258

Σχήμα 99: Αποτελέσματα ΑΚΖ για τη μέθοδο ΥΜ4: Καύση (ΙΑ) 259

Σχήμα 100: Στόχοι ανάκτησης οργανικών αποβλήτων στις Περιφέρειες της Ελλάδας, σε τόνους (ΥΠΕΚΑ, 2015)..... 261

Σχήμα 101: Επίδοση μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων στην κατηγορία επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή» (kg CO_{2-eq}/ανά τόνο ΒΑΑ)..... 292

Σχήμα 102: Επίδοση μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων στην κατηγορία επιπτώσεων «Οικοτοξικότητα» (CTU/ανά τόνο ΒΑΑ) 292

Σχήμα 103: Επίδοση μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων στην κατηγορία επιπτώσεων «Εξάντληση αβιοτικών ορυκτών πόρων» (MJ/ανά τόνο ΒΑΑ) 293

Σχήμα 104: Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης για το σταθμισμένο σενάριο (ίση βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια) 308

Σχήμα 105: Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης για το περιβαλλοντικό σενάριο (Περιβαλλοντικά: 50%, Οικονομικά: 25%, Κοινωνικά: 25%) 309

Σχήμα 106: Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης για το οικονομικό σενάριο (Περιβαλλοντικά: 25%, Οικονομικά: 50%, Κοινωνικά: 25%)..... 309

Σχήμα 107: Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης για το κοινωνικό σενάριο (Περιβαλλοντικά: 25%, Οικονομικά: 25%, Κοινωνικά: 50%)..... 310

Εισαγωγή

Η παραγωγή αποβλήτων στην Ευρώπη και παγκοσμίως αυξάνει συνεχώς καθώς αυξάνει ο πληθυσμός, αλλά και η κατά κεφαλή κατανάλωση πόρων και προϊόντων, ως συνέπεια της ανάπτυξης της οικονομίας και της προσφοράς πληθώρας καταναλωτικών αγαθών. Η ετήσια παραγωγή αποβλήτων από όλες τις οικονομικές δραστηριότητες στην Ευρώπη ανήλθε σε 2.5 δισεκατομμύρια τόνους το 2016, με την παραγωγή των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) να αποτελεί περίπου 9% της συνολικής παραγωγής. Ειδικότερα, εκτιμάται ότι κάθε Ευρωπαίος πολίτης παράγει σχεδόν μισό τόνο ΑΣΑ το έτος, εκ των οποίων ποσοστό περίπου 25% κατά μέσο όρο στην ΕΕ να οδηγείται για ταφή, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για την Ελλάδα ανέρχεται σε 80%.

Ωστόσο τα απόβλητα αποτελούν ένα πόρο που συνεχίζει να έχει αξία μετά την απόρριψή του από τον καταναλωτή, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις μπορεί να ανακυκλωθεί για την παραγωγή νέων υλικών και προϊόντων ή να ανακτηθεί μέσω της καύσης για την παραγωγή ενέργειας, υποκαθιστώντας έτσι την εκμετάλλευση παρθένων πρώτων υλών και την καύση ορυκτών καυσίμων. Για παράδειγμα, τα θρεπτικά συστατικά που βρίσκονται στα οργανικά απόβλητα μπορούν να επιστραφούν στο έδαφος ως λίπασμα. Η βιώσιμη χρήση τους στη γεωργία μειώνει την ανάγκη για ανόργανα ορυκτά λιπάσματα, η παραγωγή των οποίων συνδέεται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις και εξαρτάται από εισαγωγές πετρωμάτων φωσφορικού άλατος, του οποίου η διαθεσιμότητα ως πόρος είναι περιορισμένη.

Η αυξανόμενη εκμετάλλευση των πόρων και η μη αποδοτική διαχείριση των παραγόμενων αποβλήτων, θέτει σημαντικές προκλήσεις για το περιβάλλον και την υγεία, όπως την εξάντληση των πόρων, τη ρύπανση του αέρα, των υδάτων και του εδάφους, την απώλεια της βιοποικιλότητας και την κλιματική αλλαγή. Ειδικότερα όσον αφορά την κλιματική αλλαγή, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά την ταφή και αναερόβια αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων εκλύεται μεθάνιο, το οποίο αποτελεί ένα πολύ ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου με δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης 28 φορές μεγαλύτερο από το διοξείδιο του άνθρακα. Επίσης, από την καύση αλλά και την ταφή των αποβλήτων μπορούν να εκλυθούν τοξικές ουσίες στο περιβάλλον οι οποίες είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς για την υγεία των ανθρώπων και των οικοσυστημάτων.

Σύμφωνα με την Ειδική Έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2018), η ανθρωπογενής παγκόσμια θέρμανση έχει φτάσει ήδη τον 1°C πάνω από τα προ-βιομηχανικά επίπεδα και αυξάνεται με ρυθμό περίπου 0.2°C ανά δεκαετία. Εάν δεν επιταχυνθεί η κλιματική δράση για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας θα μπορούσε να φτάσει τους 1.5°C μεταξύ του διαστήματος 2030-2052 και σύντομα μετά το 2060 να αγγίξει τους 2°C. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αναμένεται να είναι πολύ πιο έντονες και δυσμενείς στην περίπτωση της αύξησης 2°C σε σχέση με την αύξηση 1.5°C, και για αυτό τονίζεται ότι είναι σημαντικό να μειωθούν οι εκπομπές πολύ πιο δραστικά από ότι αρχικά υπολογιζόταν. Σε απάντηση λοιπόν σε αυτές τις εξελίξεις, η ΕΕ έθεσε στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, όπου οι καθαρές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα είναι μηδενικές.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού σημαντικό ρόλο αναμένεται να διαδραματίσει η κυκλική οικονομία, σύμφωνα με την οποία η αξία των προϊόντων, των υλικών και των πόρων παραμένει στην οικονομία όσο το δυνατόν περισσότερο. Στο πλαίσιο αυτό, η διαχείριση των αποβλήτων πρέπει είναι αποδοτική ακολουθώντας την ιεραρχία: πρόληψη, επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση ενέργειας και στο τέλος, ταφή.

Επίσης, η παραγωγή βιοκαυσίμων και βιοπροϊόντων (δηλαδή καυσίμων και προϊόντων από βιομάζα) παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο πλαίσιο της βιοοικονομίας, καθώς τα προϊόντα αυτά μπορούν να υποκαταστήσουν πολλά προϊόντα που παράγονται από ορυκτούς πόρους. Παράλληλα, τα βιοκαύσιμα έχουν σημαντικό δυναμικό μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα του τομέα των μεταφορών, ενός από

τους τομείς με τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, η παραγωγή βιοπροϊόντων από απόβλητα βιομάζας, ή αλλιώς βιοαπόβλητα, προωθείται ιδιαίτερα τα τελευταία έτη, δεδομένου ότι τα βιοαπόβλητα αποτελούν μια άφθονη και οικονομική ανανεώσιμη πρώτη ύλη, η οποία δεν ανταγωνίζεται την παραγωγή τροφίμων.

Στην ίδια κατεύθυνση, τα βιοδιϋλιστήρια, δηλαδή οι παραγωγικές μονάδες οι οποίες παράγουν πολλαπλά βιο-προϊόντα και βιοκαύσιμα χρησιμοποιώντας βιοδιεργασίες και ανανεώσιμους πόρους ως πηγή άνθρακα, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς παράλληλα αποσκοπούν στην παραγωγή μηδενικών αποβλήτων. Τα βιοδιϋλιστήρια βασίζονται στην αρχή της διαδοχικής χρήσης των εισροών για την παραγωγή πολλαπλών προϊόντων, όπου τα παραπροϊόντα και τα απόβλητα από τη μία διεργασία χρησιμοποιούνται ως εισροές σε άλλες παραγωγικές διεργασίες ή για παραγωγή ενέργειας.

Ωστόσο, κάθε εναλλακτική διαχείρισης των αποβλήτων πρέπει να εξετάζεται συνολικά τόσο όσο προς την αποδοτικότητά της, όσο και ως προς τις διαφορετικές επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει στο περιβάλλον, τα οικοσυστήματα και την υγεία, από τη στιγμή που παράγεται το απόβλητο έως την τελική διάθεση ή την ανακύκλωσή του. Η πολυπλοκότητα και η ποικιλία των περιβαλλοντικών ζητημάτων που προκύπτουν από τη διαχείριση των αποβλήτων απαιτεί μια συστηματική προσέγγιση, όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, η οποία λαμβάνει υπόψη όλες τις πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις «από την κούνια έως τον τάφο». Ταυτόχρονα, η ΑΚΖ λαμβάνει υπόψη τις διασυνδέσεις του τομέα της διαχείρισης αποβλήτων με άλλους οικονομικούς τομείς, μέσω της ανακύκλωσης και της υποκατάστασης της παραγωγής προϊόντων από πρωτογενείς ύλες.

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η αξιολόγηση του δυναμικού αξιοποίησης των αστικών αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος από τη διαχείριση αποβλήτων. Περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από το υφιστάμενο σύστημα διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα και τη διερεύνηση του δυναμικού περιορισμού των επιπτώσεων αυτών με τις διαθέσιμες εναλλακτικές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων, αλλά και με άλλες προηγμένες μεθόδους διαχείρισης, οι οποίες στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης των πόρων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Επίσης περιλαμβάνει την αξιολόξηση της οικονομικής και συνολικής βιωσιμότητας των μεθόδων αυτών, προκειμένου να υποστηρίξει τη λήψη ενημερωμένων αποφάσεων για τη διαχείριση αποβλήτων σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο. Η ανάλυση βασίζεται στη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, η οποία λαμβάνει υπόψη όλα τα στάδια της διαχείρισης αποβλήτων, από τη συλλογή και μεταφορά τους έως και την τελική τους διάθεση ή την ανακύκλωσή τους και την υποκατάσταση παρθένων πρώτων υλών.

Ειδικότερα, στο πρώτο μέρος της παρούσας διατριβής, υπολογίστηκαν οι εκπομπές αερίων φαινομένου του θερμοκηπίου (ΑΦΘ) που παράγονται από το υφιστάμενο σύστημα διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) στην Ελλάδα και στη συνέχεια έγινε εκτίμηση της δυνατότητας μείωσης των εκπομπών ΑΦΘ με την υλοποίηση των στόχων μείωσης της παραγωγής αποβλήτων και αύξησης του ποσοστού ξεχωριστής διαλογής και επεξεργασίας των ΑΣΑ για το 2020, σύμφωνα με τον αναθεωρημένο Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (2015). Στη συνέχεια μελετήθηκαν οι διαφορετικές μέθοδοι ανακύκλωσης των ξηρών ανακυκλώσιμων αποβλήτων και πραγματοποιήθηκε έρευνα για την υλοποίηση ενός συστήματος διαλογής στην πηγή σε τέσσερα ρεύματα των ανακυκλώσιμων αποβλήτων (χαρτί, πλαστικό, γυαλί, μέταλλο), όπως προβλέπεται από τον τελευταίο Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων.

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής αυτής, διεξήχθη ΑΚΖ για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εφαρμογή σε πλήρη κλίμακα ενός εναλλακτικού συστήματος διαχείρισης των αστικών βιοαποβλήτων για την παραγωγή αιθανόλης και τη συγκριτική αξιολόγηση με τις συμβατικές μεθόδους διαχείρισης βιοαποαβλήτων. Το σύστημα παραγωγής βιοαιθανόλης μπορεί να περιγραφεί

και ως βιοδιϋλιστήριο, καθώς εκτός από βιοαιθανόλη παράγει και άλλα βιοπροϊόντα, όπως εδαφοβελτιωτικό και ενέργεια. Στο πλαίσιο της μεγιστοποίησης της βιωσιμότητας του βιοδιϋλιστηρίου, εξετάστηκαν παραλλαγές αυτού, όσον αφορά τα πιθανά προϊόντα της διεργασίας, τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας και τα μέρη του συστήματος. Επίσης διενεργήθηκε χρηματοοικονομική ανάλυση για τον προσδιορισμό των συνθηκών και παραμέτρων που πρέπει να πληρούνται προκειμένου να είναι οικονομικά βιώσιμη μια τέτοια εφαρμογή. Τέλος, αναπτύχθηκε ένα εργαλείο πολυκριτηριακής ανάλυσης για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής, οικονομικής και κοινωνικής βιωσιμότητας των εναλλακτικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της περίπτωσης του εν λόγω βιοδιϋλιστηρίου.

Τα αποτελέσματα της διατριβής αυτής μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο από ένα δήμο προκειμένου να επιλέξει την επιθυμητή μέθοδο διαχείρισης των αποβλήτων, όσο και από ένα επενδυτή ο οποίος ενδιαφέρεται να επενδύσει σε μια μονάδα παραγωγής αιθανόλης από βιοαπόβλητα.

Η παρούσα διατριβή έχει χωριστεί στα ακόλουθα τέσσερα μέρη και επιμέρους κεφάλαια:

Α' Μέρος: ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟ ΠΛΑΣΙΟ το οποίο περιλαμβάνει την αποτύπωση του υφιστάμενου πλαισίου όσον αφορά το πρόβλημα που μελετάται και του πλαισίου πολιτικής για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Επίσης στο Μέρος αυτό αναδεικνύονται οι ευκαιρίες και τα εμπόδια για την επιστράτευση των βιοκαυσίμων από απόβλητα στην αντιμετώπιση του προβλήματος (Κεφάλαια 1-3).

Ειδικότερα, στο **1ο Κεφάλαιο** δίνεται μια εικόνα της υφιστάμενης κατάστασης όσον αφορά τη διαχείριση των αποβλήτων σε ευρωπαϊκό επίπεδο και στην Ελλάδα, αλλά και όσον αφορά την κλιματική αλλαγή. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συμβολή των διαφορετικών τομέων στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, με έμφαση στον τομέα της διαχείρισης των αποβλήτων αλλά και των μεταφορών. Τέλος, παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες αλλαγές του κλίματος από το 1950 και δίνονται προβλέψεις για την εξέλιξη του κλίματος στο μέλλον με βάση διαφορετικά σενάρια περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Στο **2ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται το πλαίσιο πολιτικής ειδικά για τη διαχείριση αποβλήτων αλλά και σε σχέση με τη βιοοικονομία και την κυκλική οικονομία. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το πλαίσιο πολιτικής για την κλιματική αλλαγή και τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

Στο **3ο Κεφάλαιο** γίνεται περαιτέρω ανάλυση για τα βιοκαύσιμα όσον αφορά την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τους, τα μίγματα συμβατικών καυσίμων με βιοκαύσιμα που υπάρχουν στην αγορά και το μερίδιο τους στην αγορά. Επίσης παρουσιάζεται η εξοικονόμηση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής στον τομέα των μεταφορών λόγω της εισχώρησης των βιοκαυσίμων, ενώ στο τέλος παρουσιάζονται τα εμπόδια για την περαιτέρω εμπορική τους αξιοποίηση.

Β' Μέρος: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ στο οποίο παρουσιάζονται οι εξεταζόμενες τεχνολογίες διαχείρισης αποβλήτων, ενώ στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και γίνεται εξειδίκευση όσον αφορά την περίπτωση της διαχείρισης αποβλήτων (Κεφάλαια 4-6).

Στο **4ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται οι τεχνολογίες διαχείρισης ΑΣΑ που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή ως προς τις επιμέρους λειτουργίες και διεργασίες που περιλαμβάνουν και στη συνέχεια προσδιορίζονται οι άμεσες και έμμεσες πηγές εκπομπών ΑΦΘ που προκύπτουν από την εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών.

Στο **5ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται η μεθολογία Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) και αναλύονται τα επιμέρους στάδια από τα οποία απαρτίζεται η ΑΚΖ, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις προτεινόμενες μεθοδολογικές προσεγγίσεις σύμφωνα με το ISO14040 και τις σχετικές κατευθυντήριες οδηγίες του Joint Research Center της ΕΕ.

Στο **6ο Κεφάλαιο** γίνεται εξειδίκευση στα το πλαίσιο μοντελοποίησης ΑΚΖ για τη διαχείριση των αποβλήτων και προσδιορίζονται οι κρίσιμες παραμέτροι οι οποίες μπορούν να έχουν σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα μιας ΑΚΖ. Στη συνέχεια γίνεται ανασκόπηση των διαθέσιμων εξειδικευμένων λογισμικών ΑΚΖ διαχείρισης αποβλήτων.

Γ' Μέρος: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ στο οποίο παρουσιάζεται η διάρθρωση της έρευνας και η γενική μεθοδογία που ακολουθείται ανά ερευνητική ενότητα, ενώ στη συνέχεια γίνεται αναλυτικότερη παρουσίαση των κύριων μεθολογικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται στη διατριβή αυτή (Κεφάλαια 7-8).

Στο **7ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται η διάρθρωση της έρευνας και η γενική μεθοδογία που ακολουθείται ανά ερευνητική ενότητα. Ειδικότερα, η έρευνα διαχωρίζεται σε δύο ερευνητικές ενότητες, με την πρώτη να εστιάζει στις συμβατικές μεθόδους διαχείρισης των ΑΣΑ και τη δεύτερη σε ένα εναλλακτικό σύστημα βιοδιϋλιστηρίου για τη διαχείριση των βιοαποβλήτων, ενώ η κάθε ερευνητική ενότητα διαχωρίζεται σε επιμέρους ενότητες.

Στο **8ο Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα μεθοδολογικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της έρευνας αυτής, όπως το IPCC waste model που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των εκπομπών ΑΦΘ από την ταφή των αποβλήτων, το εξειδικευμένο μοντέλο ΑΚΖ για τη διαχείριση αποβλήτων EASETECH, η βάση δεδομένων Ecoinvent και οι κατηγορίες Εκτίμησης Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής της μεθόδου ILCD.

Δ' Μέρος: ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ στο οποίο γίνεται η απογραφή των δεδομένων και οι απαραίτητοι υπολογισμοί, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανά ερευνητική ενότητα (Κεφάλαια 9-13).

Στο **9ο Κεφάλαιο**, γίνεται αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης στην Ελλάδα όσον αφορά τις εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση αποβλήτων και υπολογίζεται το δυναμικό μείωσής τους, μέσω της υλοποίησης των στόχων του τελευταίου Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων.

Στο **10ο κεφάλαιο**, μελετάται περαιτέρω στο πλαίσιο της ΑΚΖ η εφαρμογή ενός συστήματος διαλογής στην πηγή του ξηρού κλάσματος των αστικών ανακυκλώσιμων αποβλήτων σε τέσσερα ρεύματα, ο βαθμός καθαρότητας και ανάκτησης του κάθε ρεύματος, οι ανάγκες προεπεξεργασίας και τελικά η ανακύκλωσή τους σε νέα προϊόντα και υλικά.

Στο **11ο κεφάλαιο** πραγματοποιείται ΑΚΖ για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εφαρμογή σε πλήρη κλίμακα ενός εναλλακτικού συστήματος διαχείρισης των αστικών βιοαποβλήτων για την παραγωγή αιθανόλης και τη συγκριτική τους αξιολόγηση με τις υφιστάμενες εναλλακτικές μεθόδους για τη διαχείριση των αστικών βιοαποβλήτων, όπως η ταφή, η κομποστοποίηση, η αναερόβια χώνευση και η καύση.

Στο **12ο κεφάλαιο** γίνεται αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας της εφαρμογής του συστήματος διαχείρισης των βιοαποβλήτων για την παραγωγή αιθανόλης σε πλήρη κλίμακα για διαφορετικά σενάρια και υποσενάρια, όσον αφορά το κόστος ή/και τη δοσολογία των ενζύμων, την τιμή πώλησης της βιοαιθανόλης, το ύψος δανειοδότησης και τη διάρκεια του δανείου. Στη συνέχεια γίνεται αναγνώριση των πιθανών παραγόντων επιτυχίας και αποτυχίας σχετικά με την υλοποίηση του εξεταζόμενου συστήματος.

Στο **13ο κεφάλαιο** το οποίο αποτελεί και το τελευταίο κεφάλαιο της διατριβής αυτής, παρουσιάζεται το εργαλείο πολυκριτηριακής ανάλυσης (Multicriteria Analysis, MCA) που αναπτύχθηκε για τη συγκριτική αξιολόγηση της συνολικής βιωσιμότητας των μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, περιλαμβανομένου και του συστήματος παραγωγής αιθανόλης από βιοαπόβλητα.

Τα τελευταία δύο κεφάλαια (**14° και 15° κεφάλαιο**) περιλαμβάνουν τα συγκεντρωτικά συμπεράσματα από τη διατριβή αυτή και τις προτάσεις που προκύπτουν τόσο σε επίπεδο διαχείρισης αποβλήτων, όσο και σε επίπεδο περαιτέρω έρευνας.

Συνεισφορές

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν οι σημαντικότερες συνεισφορές άλλων ερευνητών στην εκπόνηση αυτής της διατριβής, καθώς και τα ερευνητικά έργα στο πλαίσιο των οποίων εκπονήθηκε μέρος αυτής της διατριβής.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 9 έχουν προκύψει μέσα από τη συνεργασία με τη φοιτήτρια Δανάη Τσουρδαλάκη, στο πλαίσιο εκπόνησης της προπτυχιακής διπλωματικής της εργασίας και της παρούσας διατριβής. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε συλλογική εργασία τόσο όσον αφορά τη συλλογή όσο και την επεξεργασία των δεδομένων, ενώ η αποκλειστικά προσωπική συνεισφορά της υποφαινόμενης αναφέρεται κατά κύριο λόγο στον ορισμό της μεθοδολογίας εκτίμησης των εκπομπών ΑΦΘ και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων.

- *Δανάη Τσουρδαλάκη, 2017. Εκτίμηση της δυνατότητας μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα με βάση τους στόχους του νέου Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων. Προπτυχιακή διπλωματική εργασία, ΕΜΠ*

Η έρευνα που παρουσιάζεται στα κεφάλαια 11-13 της διατριβής αυτής πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου LIFE "Waste2bio - Ανάπτυξη και επίδειξη μιας καινοτόμου μεθόδου παραγωγής βιοαιθανόλης από απόβλητα" (LIFE11 ENV/GR/000949). Η υπόλοιπη ομάδα έργου του ΕΜΠ παρήχε δεδομένα όσον αφορά τη σύσταση των εισερχόμενων αποβλήτων, τη συλλογή και μεταφορά τους και, την πιλοτική λειτουργία του συστήματος παραγωγής αιθανόλης. Επίσης, όσον αφορά την ανάπτυξη του εργαλείου πολυκριτηριακής ανάλυσης, η συνεισφορά της υποφαινόμενης αναφέρεται στην παροχή των απαραίτητων βάσεων δεδομένων (περιβαλλοντικά, κοινωνικά, οικονομικά, τεχνικά δεδομένα) για την πολυκριτηριακή αξιολόγηση, τον ορισμό των εξισώσεων συσχέτισης των δεδομένων και τη διαμόρφωση της δομής του εργαλείου και των χαρακτηριστικών/λειτουργιών του. Η υλοποίηση του εργαλείου σε εφαρμογή excel έγινε από την υπόλοιπη ομάδα του ΕΜΠ.

Χρήσιμοι ορισμοί

Η παρούσα διατριβή έχει ως πεδίο εφαρμογής στο πρώτο μέρος τα αστικά απόβλητα, ενώ στο δεύτερο μέρος εστιάζει στα βιολογικά απόβλητα (ή αλλιώς βιοαπόβλητα). Στη συνέχεια δίνονται οι σχετικοί ορισμοί σύμφωνα με το Άρθρο 3 της Οδηγίας 2008/98/ΕΚ για τα απόβλητα όπως αυτή τροποποιήθηκε από την Οδηγία (ΕΕ) 2018/851:

Τα «**αστικά απόβλητα**» περιλαμβάνουν:

α) *τα ανάμεικτα απόβλητα και τα απόβλητα που συλλέγονται χωριστά από τα νοικοκυριά, μεταξύ άλλων χαρτί και χαρτόνι, γυαλί, μέταλλα, πλαστικά, βιολογικά απόβλητα, ξύλο, υφάσματα, συσκευασίες, απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, απόβλητα ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών, ογκώδη απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων στρωμάτων και επίπλων·*

β) τα ανάμεικτα απόβλητα και τα απόβλητα που συλλέγονται χωριστά από άλλες πηγές και είναι παρόμοια ως προς τη φύση και τη σύνθεση με τα οικιακά απόβλητα·

Στα αστικά απόβλητα δεν περιλαμβάνονται απόβλητα παραγωγής, γεωργίας, δασοκομίας, αλιείας, σηπτικών δεξαμενών και απόβλητα από δίκτυα αποχέτευσης και επεξεργασίας αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της ιλύος καθαρισμού λυμάτων, οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους ή απόβλητα από κατασκευές και κατεδαφίσεις.

Η μελέτη αυτή δεν εξετάζει ειδικές ροές αποβλήτων και ροές αποβλήτων σε πολύ μικρή συγκέντρωση μέσα στα αστικά απόβλητα, όπως ξύλο, υφάσματα, απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, απόβλητα ηλεκτρικών στηλών και συσσωρευτών και ογκώδη απόβλητα.

Τα **ξήρα ανακυκλώσιμα** περιλαμβάνουν όλα τα ανακυκλώσιμα ρεύματα εκτός από τα οργανικά απόβλητα τροφίμων και κήπων, όπως το χαρτί, το πλαστικό, το γυαλί και το μέταλλο.

Τα «**βιολογικά απόβλητα**» περιλαμβάνουν *τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα κήπων και πάρκων, τα απόβλητα τροφίμων και μαγειρείων από σπίτια, γραφεία, εστιατόρια, χονδρεμπόριο, κυλικεία, παρόχους υπηρεσιών εστίασης και χώρους πωλήσεων λιανικής και τα συναφή απόβλητα από εγκαταστάσεις μεταποίησης τροφίμων.*

Επίσης, χρήσιμοι είναι και οι ακόλουθοι ορισμοί οι οποίοι αφορούν τα προϊόντα βιολογικής προέλευσης (biobased products), ή αλλιώς βιο-προϊόντα, τα οποία επίσης εξετάζονται στο πλαίσιο της διατριβής αυτής.

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 16575:2014, τα **προϊόντα βιολογικής προέλευσης** είναι τα προϊόντα που προέρχονται εξολοκλήρου ή εν μέρει από βιομάζα, δηλαδή από υλικό βιολογικής προέλευσης (με εξαίρεση υλικά ενσωματωμένα σε γεωλογικούς σχηματισμούς και/ή απολιθωμένα), το οποίο μπορεί να έχει υποστεί φυσική, χημική ή βιολογική επεξεργασία.

Επίσης, σύμφωνα με την Οδηγία ΕΕ 2018/2001 για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, τα «**βιοκαύσιμα**» αναφέρονται στα υγρά καύσιμα μεταφορών τα οποία παράγονται από βιομάζα. Σύμφωνα με την ίδια Οδηγία ορίζεται ότι η «**βιομάζα**» αναφέρεται μεταξύ άλλων στο βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των αστικών αποβλήτων και απορριμμάτων, βιολογικής προέλευσης.

Α’ ΜΕΡΟΣ: ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

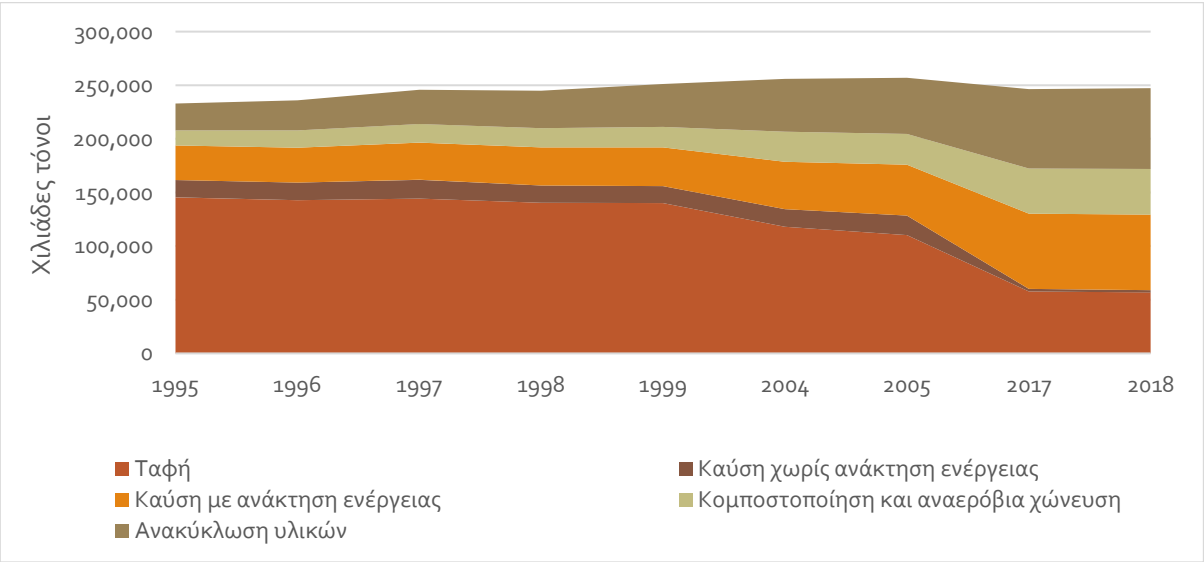
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Περιγραφή του προβλήματος

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται μια εικόνα της υφιστάμενης κατάστασης όσον αφορά τη διαχείριση των αποβλήτων σε ευρωπαϊκό επίπεδο και στην Ελλάδα, αλλά και όσον αφορά την κλιματική αλλαγή. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συμβολή των διαφορετικών τομέων στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, με έμφαση στον τομέα της διαχείρισης των αποβλήτων αλλά και των μεταφορών σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο. Τέλος, παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες αλλαγές του κλίματος από το 1950, όπου και προσδιορίζεται η ανθρώπινη συμβολή στο φαινόμενο αυτό, και δίνονται προβλέψεις για την εξέλιξη του κλίματος στο μέλλον με βάση διαφορετικά σενάρια περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

1.1 Διαχείριση αστικών αποβλήτων

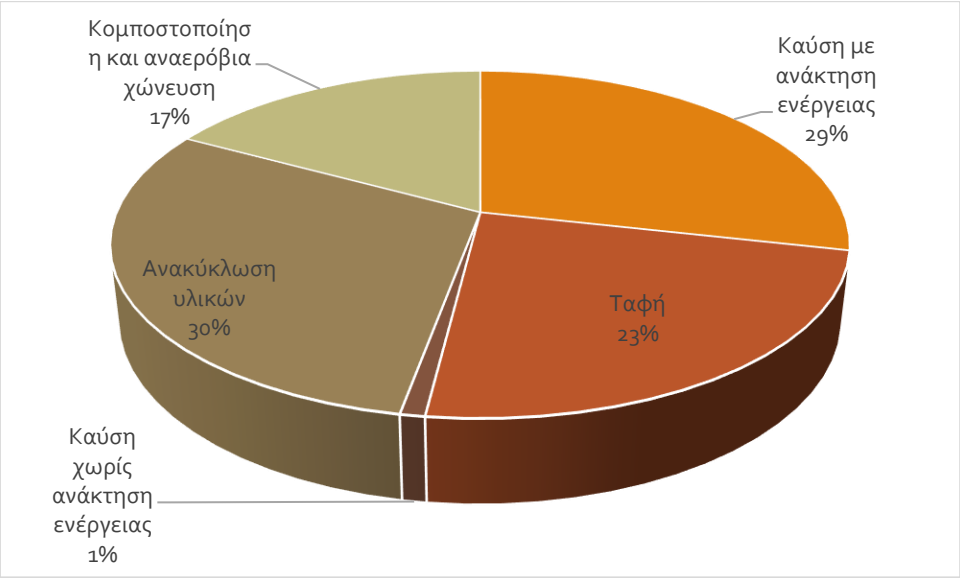
Σκοπός αυτής της ενότητας είναι η ανασκόπηση της υφιστάμενης κατάστασης όσον αφορά τις μεθόδους διαχείρισης των αστικών αποβλήτων που εφαρμόζονται σε επίπεδο ΕΕ. Οι βασικές μέθοδοι διαχείρισης αστικών αποβλήτων είναι η ταφή, η καύση, η ανακύκλωση υλικών, η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση των οργανικών αποβλήτων.

Στο Σχήμα 1 παρατίθεται η ποσότητα των αστικών αποβλήτων που διαχειρίζεται ανά μέθοδο για το σύνολο της ΕΕ-28 και τη χρονική περίοδο 1995-2018. Από το σχήμα φαίνεται ότι ενώ διαχρονικά η συνολικά παραγόμενη ποσότητα έχει παραμείνει σχετικά σταθερή (226.8 εκατ. τόνους το 1995 σε σχέση με 250.8 εκατ. τόνους το 2018, 11% αύξηση) έχει μειωθεί σημαντικά η ποσότητα των αποβλήτων που οδηγούνται σε ταφή. Ειδικότερα στην περίοδο που μελετάται η συνολική ποσότητα αστικών αποβλήτων που οδηγήθηκαν σε ταφή μειώθηκε από τους 145.5 εκατ. τόνους το 1995 σε 56.8 εκατ. τόνους το 2018 (61% μείωση). Η καύση με ανάκτηση ενέργειας παρουσιάζει σταθερή αύξηση για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο, με την ποσότητα των αστικών αποβλήτων που οδηγήθηκαν σε καύση με ανάκτηση ενέργειας το 1995 να έχει αυξηθεί από τους 32 εκατ. τόνους σε 70 εκατ. τόνους το 2018 (αύξηση 112%). Η ποσότητα αστικών αποβλήτων που οδηγήθηκε προς ανακύκλωση υλικών αυξήθηκε από 25 εκατ. τόνους το 1995 σε 75 εκατ. τόνους το 2018, δηλαδή τριπλασιάστηκε. Τέλος, η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση παρουσίασαν παρόμοια αύξηση, καθώς το 1995 διαχειρίστηκαν 14 εκατ. τόνοι με τις μεθόδους αυτούς, ενώ το 2018 η ποσότητα αυτή ήταν τριπλάσια (43 εκατ. τόνοι).



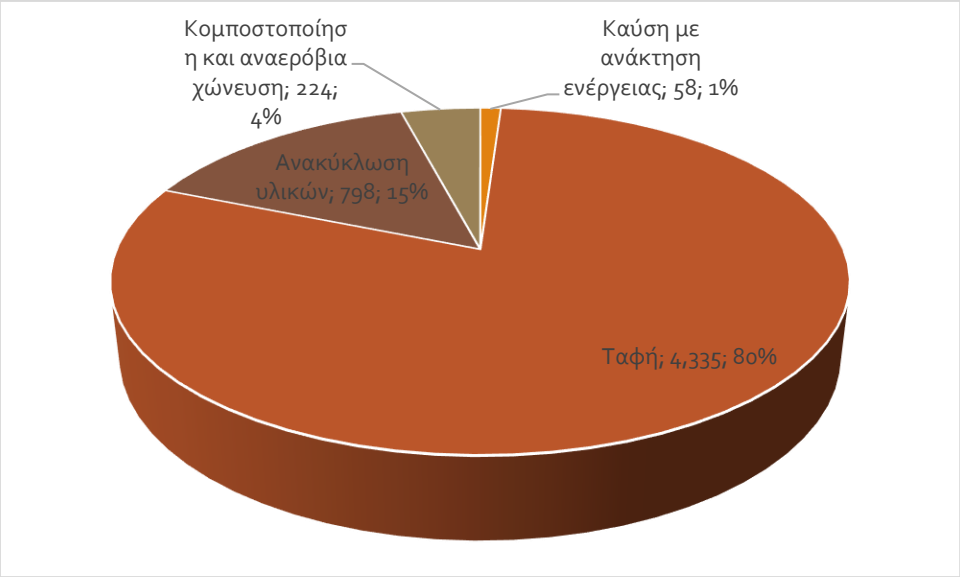
Σχήμα 1: Ποσότητες αστικών αποβλήτων ανά μέθοδο διαχείρισης στην ΕΕ-28, για την περίοδο 1995-2018. Πηγή: Eurostat, 2020a.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανομή των αστικών αποβλήτων ανά μέθοδο διαχείρισης για το έτος 2017 στην ΕΕ-28 (Σχήμα 2) αλλά και στην Ελλάδα (Σχήμα 3). Σε επίπεδο ΕΕ-28 η ταφή έχει περιοριστεί στο 23% της παραγωγής αστικών αποβλήτων, η καύση με ανάκτηση ενέργειας ανέρχεται στο 29%, η ανακύκλωση υλικών σε 30% και η κομποστοποίηση/ αναερόβια χώνευση σε 17%.



Σχήμα 2: Συνεισφορά των μεθόδων διαχείρισης αστικών αποβλήτων στη συνολική διαχείριση στην ΕΕ-28, 2017 (χιλιάδες τόνοι, %). Πηγή: Eurostat, 2020a

Η εικόνα στην Ελλάδα ωστόσο είναι διαφορετική, καθώς η ταφή εξακολουθεί να αποτελεί τον κυρίαρχο τρόπο διαχείρισης των αστικών αποβλήτων (80%), με μόνο 15% και 4% των αστικών αποβλήτων να διαχειρίζονται με τη μέθοδο της ανακύκλωσης και της κομποστοποίησης/ αναερόβιας χώνευσης, αντίστοιχα. Τα ποσοστά αυτά είναι χαμηλά κυρίως γιατί δεν υπάρχουν ακόμα οι απαραίτητες υποδομές στην Ελλάδα για τη χωριστή συλλογή των βιοαποβλήτων, ενώ τα υπόλοιπα ανακυκλώσιμα υλικά σύλλεγονται σύμμεικτα σε ένα ρεύμα, ενώ σε άλλες χώρες της ΕΕ υπάρχει σύστημα διαχωρίζονται σε περισσότερα ρεύματα, γεγονός που αυξάνει το ποσοστό ανακύκλωσης. Η καύση δεν είναι διαδεδομένη μέθοδος στην Ελλάδα.



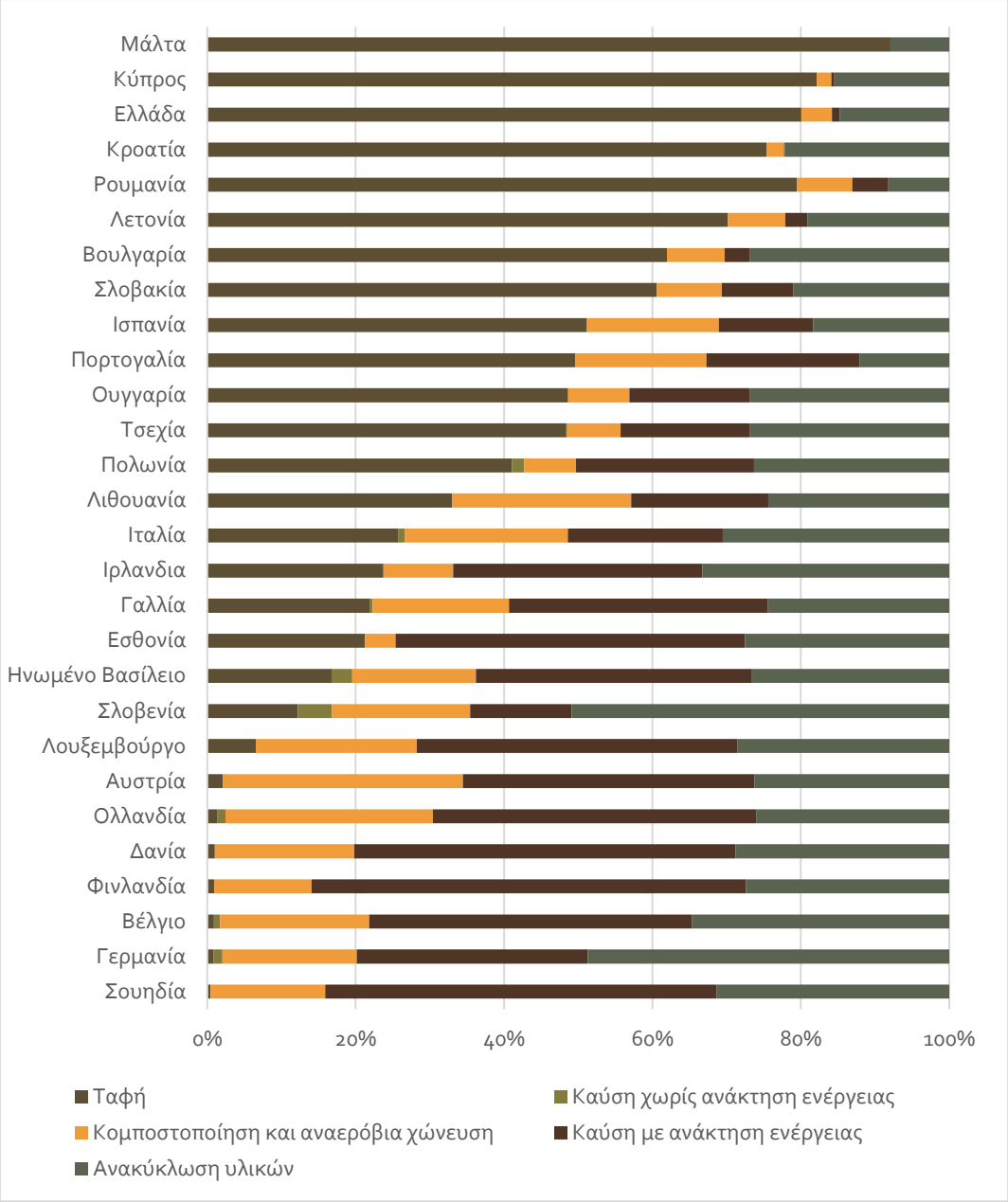
Σχήμα 3: Συνεισφορά των μεθόδων διαχείρισης αστικών αποβλήτων στη συνολική διαχείριση στην Ελλάδα, 2017 (χιλιάδες τόνοι, %). Πηγή: Eurostat, 2020a

Ειδικότερα, η τελική διάθεση των ΑΣΑ σε επίπεδο χώρας, αφορά την ταφή τους σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής (74 ΧΥΤΑ στο σύνολο), η οποία κάλυπτε το 94% του μόνιμου πληθυσμού της χώρας το έτος 2011. Σύμφωνα με στοιχεία που παραχωρήθηκαν από το ΥΠΕΚΑ, το έτος 2013, σε 66 ΧΥΤΑ πραγματοποιείτο συμπίεση των αποβλήτων πριν την ταφή τους, σε 69 γινόταν επικάλυψη των αποβλήτων με εδαφικό υλικό σε καθημερινή βάση, σε 22 πραγματοποιείτο συλλογή του βιοαερίου, σε 2 γινόταν ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου με παραγωγή ενέργειας (συνολικά 4735MW), ενώ καύση του βιοαερίου πραγματοποιούνταν σε 15 ΧΥΤΑ. Ακόμα, μία τέτοια μονάδα λειτουργεί αντλώντας βιοαέριο από Χώρους Ανεξέλεγκτης Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΑΔΑ) και ακόμα 2 μονάδες είναι κατασκευασμένες αλλά δεν λειτουργούν (Κωνσταντινίδης, 2012). Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος, απαρέγκλιτο στόχο αποτελεί η παύση λειτουργίας και η περιβαλλοντική αποκατάσταση όλων των χώρων ανεξέλεγκτης διάθεσης αποβλήτων καθώς και η δημιουργία προϋποθέσεων για τη φυσική επανένταξη των χώρων αυτών στο γειτονικό τους περιβάλλον.

Από τους συνολικά 69 ενεργούς ΧΑΔΑ το 2013, το 39% αυτών βρίσκόταν σε νησιωτικές περιοχές εξυπηρετώντας περίπου 60.000 κατοίκους. Για την πλειοψηφία των ΧΑΔΑ έχει ήδη εγκριθεί η χρηματοδότηση, έχουν ληφθεί οι απαραίτητες διοικητικές αποφάσεις και έχουν δρομολογηθεί οι διαδικασίες παύσης λειτουργίας και αποκατάστασης τους (ΥΠΕΚΑ, 2013). Το 2020, λειτουργούν ακόμα 52 ΧΑΔΑ στη χώρα.

Το έτος 2011, λειτουργούσαν σε επίπεδο χώρας 3 Εγκαταστάσεις Μηχανικής Ανακύκλωσης και Κομποστοποίησης (ΕΜΑΚ) στην περιοχή των Άνω Λιοσίων, στα Χανιά και στην Κεφαλονιά. Παράλληλα, λειτουργούσε η κινητή μονάδα κομποστοποίησης του Δήμου Ελευσίνας καθώς και η μονάδα βιοξήρανσης στο Ηράκλειο Κρήτης. Στις διεργασίες ανάκτησης οργανικών από τα ΑΣΑ συμπεριλαμβάνονται, επίσης, η οικιακή κομποστοποίηση μέσω των αντίστοιχων κάδων καθώς και η εκτροπή οργανικού κλάσματος αγροτικών περιοχών σε επίπεδο νοικοκυριού. Η ποσότητα οργανικών που συλλέγεται σε επίπεδο νοικοκυριού στις αγροτικές περιοχές και χρησιμοποείται κυρίως ως ζωοτροφές, προσμετράται στην ανακύκλωση (ΥΠΕΚΑ, 2013). Στα τέλη του έτους 2014, το 87% του πληθυσμού της χώρας εξυπηρετούνταν από το δίκτυο μπλε κάδων για τη συλλογή των ανακυκλώσιμων υλικών (200 Δήμοι).

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η συνεισφορά των μεθόδων διαχείρισης που εφαρμόζονται ανά χώρα σε επίπεδο ΕΕ-28, για το έτος 2017. Όπως παρατηρείται, οι διαφορές ανάμεσα στα κράτη μέλη είναι σημαντικές. Ειδικότερα, τα κράτη μέλη με τα μεγαλύτερα ποσοστά κομποστοποίησης/ αναερόβιας χώνευσης είναι η Αυστρία και η Ολλανδία (32% και 28% αντίστοιχα), ενώ αυτά με τα μεγαλύτερα ποσοστά ανακύκλωσης είναι η Σλοβενία και η Γερμανία (53% και 49% αντίστοιχα). Άλλα, παρουσιάζουν μεγάλα ποσοστά καύσης με ανάκτηση ενέργειας, όπως η Φινλανδία, η Σουηδία και η Δανία (59%, 53% και 51%, αντίστοιχα). Τα κράτη μέλη με τα υψηλότερα ποσοστά υγειονομικής ταφής των αποβλήτων, είναι η Μάλτα, η Κύπρος και η Ελλάδα (92%, 82% και 80%). Τέλος, τα κράτη μέλη με τα χαμηλότερα ποσοστά ταφής (0-2%) είναι η Σουηδία, η Γερμανία, το Βέλγιο, η Φινλανδία, η Δανία, η Ολλανδία και η Αυστρία.

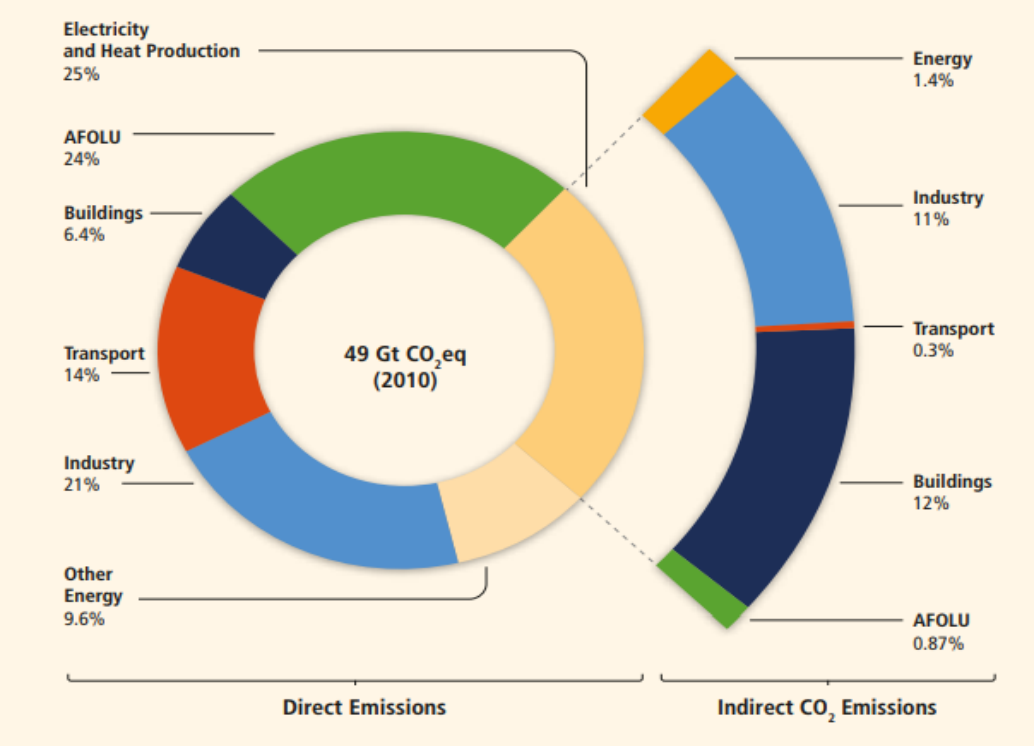


Σχήμα 4: Συνεισφορά των μεθόδων διαχείρισης αστικών αποβλήτων στη συνολική διαχείριση για τα Κράτη-Μέλη της ΕΕ-28, 2017 (%). Πηγή: Eurostat, 2020α.

1.2 Συμβολή τομέων της οικονομίας στην κλιματική αλλαγή

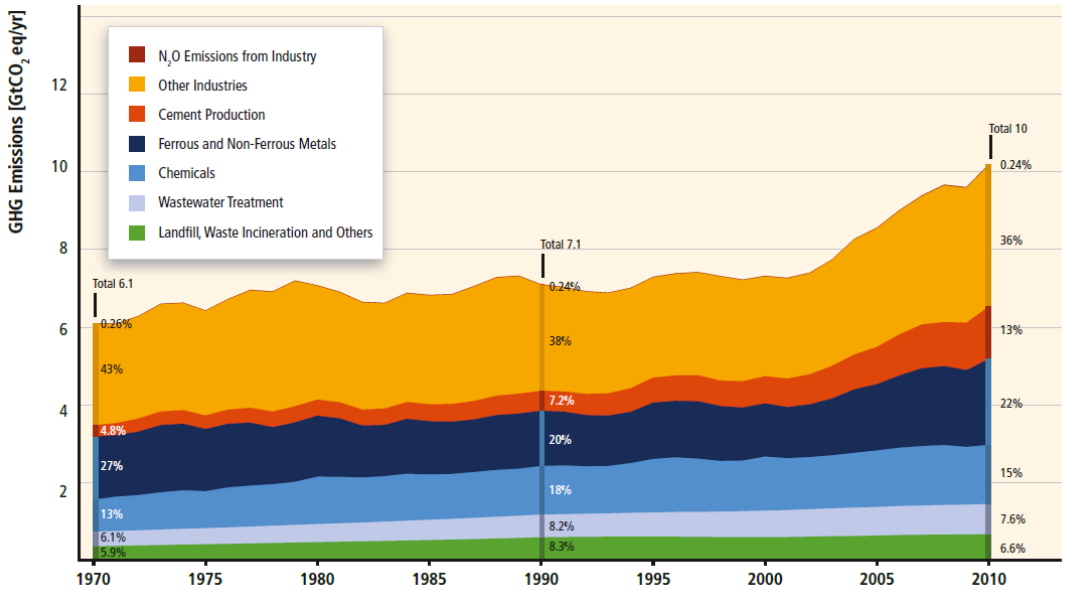
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι εκπομπές ΑΦΘ σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο ανά τομέα, με έμφαση στον τομέα της διαχείρισης αποβλήτων αλλά και στον τομέα των μεταφορών. Σκοπός αυτής της ενότητας είναι αφενός να αναδειχθεί η συνεισφορά του τομέα διαχείρισης αποβλήτων και ειδικότερα της μεθόδου της ταφής των αποβλήτων στο φαινόμενο της παγκόσμιας θέρμανσης, και αφετέρου να δωθούν ενδείξεις για τη δυνατότητα περιορισμού των εκπομπών αυτών μέσω της υιοθέτησης άλλων μεθόδων διαχείρισης των στερεών αποβλήτων (π.χ. βιολογική διαχείριση αποβλήτων, ανακύκλωση υλικών). Για παράδειγμα, η ανακύκλωση μπορεί να μείωσει τις εκπομπές ΑΦΘ και από άλλους τομείς της οικονομίας, όπως στην περίπτωση της διαχείρισης των βιοαποβλήτων για τη παραγωγή αιθανόλης, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στο τομέα των μεταφορών και να μειώσει τις σχετικές εκπομπές του τομέα.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται οι άμεσες και έμμεσες ανθρωπογενείς εκπομπές ΑΦΘ από τους διαφορετικούς τομείς της οικονομίας σε παγκόσμιο επίπεδο, για το έτος 2010. Όσον αφορά τις άμεσες εκπομπές ΑΦΘ οι οποίες απεικονίζονται στον κύκλο του σχήματος, οι τομείς με το μεγαλύτερο μερίδιο είναι αυτοί της παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (25%), της γεωργίας, δασοκομίας και άλλης χρήσης γης (24%) και του τομέα της βιομηχανίας (21%), με τον τομέα των μεταφορών να βρίσκεται στην τέταρτη θέση (14%). Το πέταλο στα δεξιά δείχνει τις έμμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (σε % των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών ΑΦΘ) από τον τομέα ηλεκτρισμού και θερμότητας οι οποίες αποδίδονται στους τομείς τελικής χρήσης ενέργειας.



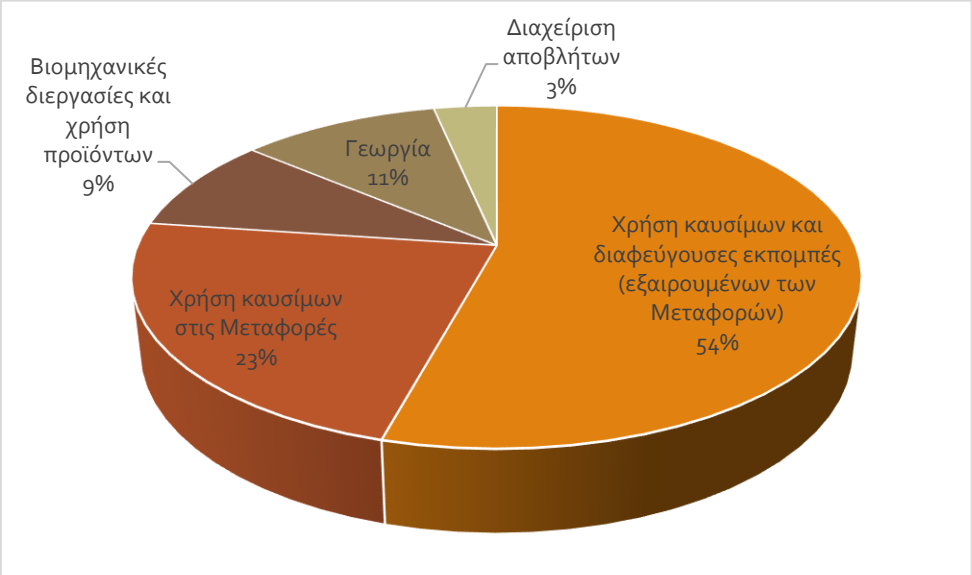
Σχήμα 5: Συνολικές ανθρωπογενείς εκπομπές ΑΦΘ ($GtCO_2eq$ / yr) από τους οικονομικούς τομείς, για το έτος 2010. Πηγή: IPCC, 2014a.

Ο τομέας της διαχείρισης αποβλήτων και οι εκπομπές αυτού συμπεριλαμβάνονται στον τομέα της βιομηχανίας. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι επιμέρους εκπομπές ΑΦΘ από τον τομέα της βιομαχανίας σε παγκόσμιο επίπεδο για το έτος 2010. Παρατηρείται ότι η διαχείριση στερεών αποβλήτων (ταφή, καύση και άλλα) συνέβαλλε κατά 6.6% το 2010 στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ του τομέα της βιομηχανίας (ή 1.4% στις συνολικές εκπομπές). Επίσης στο ίδιο σχήμα φαίνεται η διαχρονική εξέλιξη της συνεισφοράς του τομέα των αποβλήτων από το 1970 έως το 2010. Παρατηρείται ότι η συμβολή των εκπομπών από τη διαχείριση στερεών αποβλήτων αυξήθηκε από 5.9% το 1970 σε 8.3% το 1990, για να ξαναμειωθεί το 2010 στο 6.6%.



Σχήμα 6: Συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τον τομέα της βιομηχανίας ανά πηγή σε παγκόσμιο επίπεδο, 1970-2010 ($GtCO_2eq$ / yr). Πηγή: IPCC, 2014β

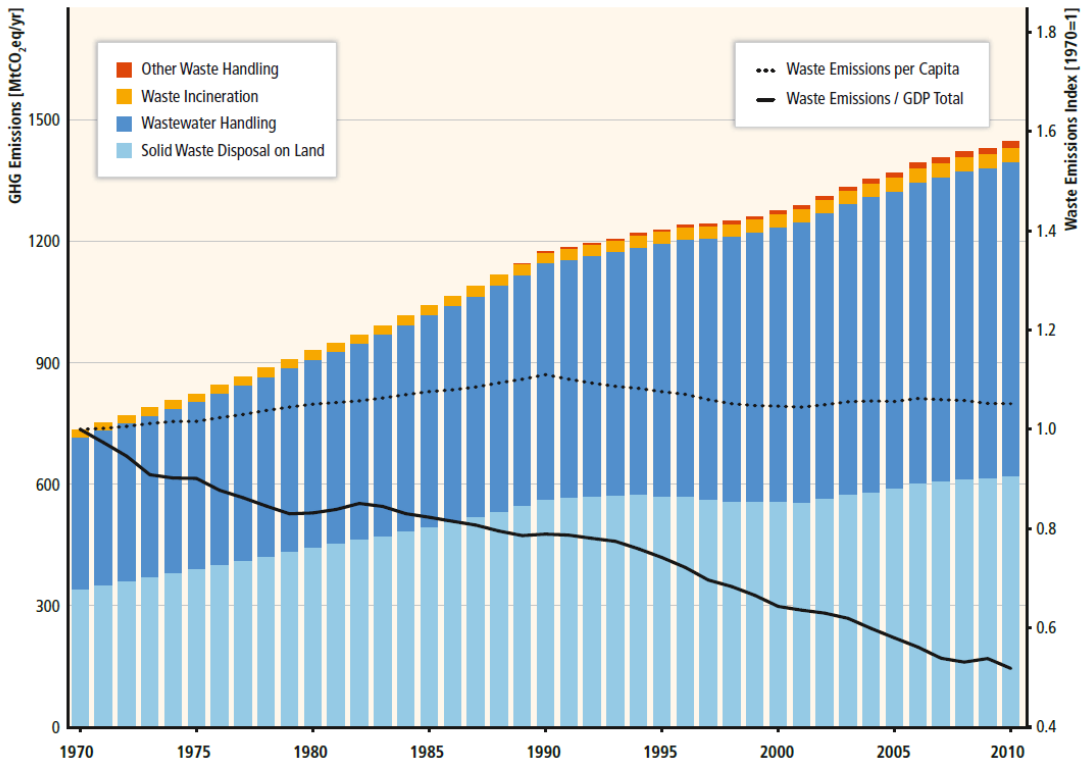
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης το 2018 (ΕΕ-28), οι εκπομπές ΑΦΘ από τον τομέα της διαχείρισης (υγρών και στερεών) αποβλήτων συνεισφέρει περίπου 3% στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ, με τη μεγαλύτερη συμβολή στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ να προέρχονται από τον τομέα της ενέργειας, και ειδικότερα, από την κατανάλωση καυσίμων στους διάφορετικούς τομείς (εξαιρουμένου του τομέα των μεταφορών) και τις διαφεύγουσες εκπομπές από τα καύσιμα (54%) και από τη χρήση καυσίμων στον τομέα των μεταφορών (23%). Οι εκπομπές ΑΦΘ από τον τομέα των μεταφορών, αναφέρονται κατά 95% στην καύση ορυκτών καυσίμων στις οδικές μεταφορές, δείχνοντας έτσι το μεγάλο δυναμικό μείωσης της συμβολής του τομέα αυτού στις συνολικές εκπομπές με την υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων από βιοκαύσιμα.



Σχήμα 7: Συμβολή των εκπομπών ΑΦΘ ανά τομέα στις συνολικές εκπομπές σε επίπεδο ΕΕ-28, 2018. Πηγή: Eurostat/EEA, 2020

Με βάση τα παραπάνω σχήματα, τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο όσο και σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, προκύπτει ότι η διαχείριση των αποβλήτων έχει μικρή όμως μετρήσιμη συνεισφορά στις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

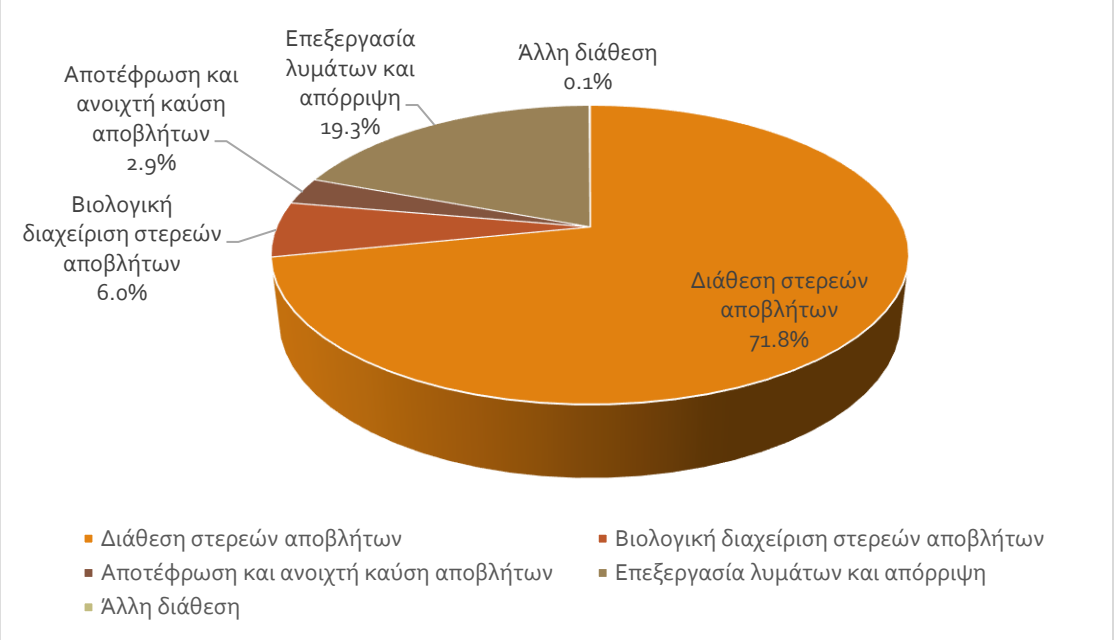
Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τον τομέα διαχείρισης (υγρών και στερεών) αποβλήτων σε παγκόσμιο επίπεδο από το 1970 έως το 2010. Επίσης στο ίδιο σχήμα (δευτερεύων κάθετος άξονας – δεξιά) παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εκπομπές ΑΦΘ κατά κεφαλή και ανά συνολικό ΑΕΠ. Παρατηρείται ότι, όσον αφορά τη συνεισφορά των διαφορετικών μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων το 2010 στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ, οι κύριες εκπομπές προέρχονται από την επεξεργασία υγρών αποβλήτων (~50%) και από την ταφή στερεών αποβλήτων (~43%), ενώ η καύση ευθύνεται για ένα πολύ μικρό μερίδιο των εκπομπών. Διαχρονικά φαίνεται ότι από το 1970 έως το 1990 παρουσιάζουν αύξηση τόσο οι εκπομπές από τη διαχείριση υγρών αποβλήτων όσο και από τη διάθεση των στερεών αποβλήτων, ενώ από το 1990 και μετά παρατηρείται σχετική σταθεροποίηση των εκπομπών από τη διάθεση των αποβλήτων. Σε σχέση με τις εκπομπές ΑΦΘ κατά κεφαλή, φαίνεται ότι αυτές αυξάνονται ελαφρώς έως το 1990, ενώ από το 1990 έως το 2010 επανέρχονται σταδιακά στα αρχικά επίπεδα. Τέλος, όσον αφορά το δείκτη εκπομπών ΑΦΘ σε σχέση με το συνολικό ΑΕΠ, φαίνεται ότι οι εκπομπές ΑΦΘ αυξάνονται με αισθητά μικρότερο ρυθμό σε σχέση με το ΑΕΠ.



Σχήμα 8: Παγκόσμιες εκπομπές ΑΦΘ από τον τομέα διαχείρισης αποβλήτων σε MtCO2eq/έτος, ανά ΑΕΠ και κατά κεφαλή. Πηγή: IPCC, 2014β

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η συμβολή των επιμέρους μεθόδων διαχείρισης (υγρών και στερεών) αποβλήτων, στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τον τομέα αυτό στην ΕΕ-28 για το 2018. Υπολογίζεται ότι το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών ΑΦΘ προέρχεται από τη διάθεση στερεών αποβλήτων (72%), ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η διαχείριση υγρών αποβλήτων και η απόρριψή τους (19%), με τη βιολογική διαχείριση και την αποτέφρωση των στερεών αποβλήτων να έχουν σημαντικά μικρότερη συνεισφορά (6% και 3% αντίστοιχα). Όσον αφορά τις εκπομπές από τη διάθεση στερεών αποβλήτων, το 86% των εκπομπών προέρχεται από ελεγχόμενους χώρους διάθεσης και το υπόλοιπο περίπου 14% από ανεξέλεγκτους χώρους διάθεσης (ΧΑΔΑ). Οι εκπομπές από αυτό τον τρόπο διαχείρισης αποτελούνται αποκλειστικά από μεθάνιο. Οι εκπομπές από τη βιολογική διαχείριση των αποβλήτων προέρχονται κατά κύριο λόγο από την κομποστοποίηση (77%) με το υπόλοιπο να προέρχεται από την αναερόβια χώνευση. Οι εκπομπές από την κομποστοποίηση αποτελούνται κατά 58% μεθάνιο και 42% υποξείδιο του αζώτου, ενώ από την αναερόβια χώνευση οι εκπομπές αποτελούνται κατά 94% από το

διαφεύγον μεθάνιο και 6% από υποξείδιο του αζώτου. Οι εκπομπές από την καύση προέρχονται κυρίως από μονάδες αποτέφρωσης (81%) αλλά και από την ανοιχτή καύση των αποβλήτων (19%). Από την αποτέφρωση, οι εκπομπές ΑΦΘ αποτελούνται κατά κύριο λόγο από διοξείδιο του άνθρακα, ενώ από την ανοιχτή καύση περιέχουν μεθάνιο και υποξείδιο του αζώτου.



Σχήμα 9: Συμβολή των εκπομπών ΑΦΘ από τις διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων (υγρών και στερεών) στις συνολικές εκπομπές του τομέα διαχείρισης αποβλήτων στην ΕΕ-28, 2018. Πηγή: Eurostat/EEA, 2020

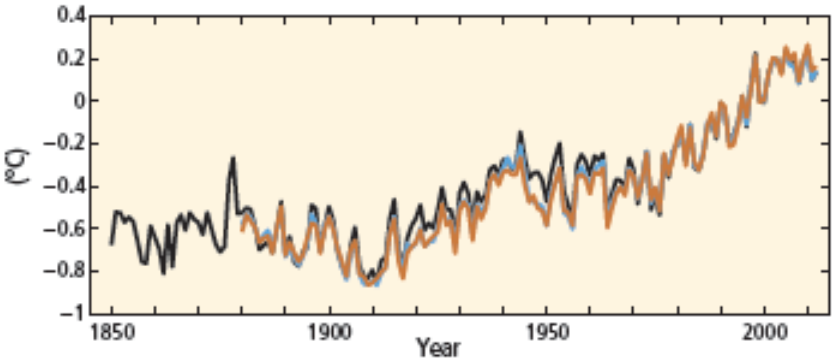
Επομένως πιστεύεται ότι η μείωση των εκπομπών μεθανίου από τη διάθεση αποβλήτων ή η μείωση της διάθεσης αποβλήτων εν γένει, αποτελεί το πιο αποδοτικό μέτρο για τη μείωση της συνεισφοράς του τομέα της διαχείρισης αποβλήτων στη κλιματική αλλαγή. Επιπρόσθετα, εκτιμάται ότι λόγω του μικρού χρόνου ζωής του μεθανίου, οι εκπομπές μεθανίου θα πρέπει να μειωθούν μόλις κατά 8% για να σταθεροποιηθούν στα επίπεδα του 2000. Αυτή είναι πολύ μικρότερη ποσοστιαία μείωση από την αντίστοιχη απαιτούμενη για τα άλλα δύο κύρια αέρια του θερμοκηπίου, CO_2 και N_2O (Smith et al., 2001).

Τέλος, εκτός από τη μείωση καθαυτή των εκπεμπόμενων αερίων, η διαχείριση των αποβλήτων μπορεί να μετατραπεί σε σημαντική πηγή εξοικονόμησης αέριων εκπομπών. Εκτός από τα μέτρα προστασίας του περιβάλλοντος κατά τη διαχείριση και διάθεση των αποβλήτων που μπορούν να ληφθούν, με την ανάκτηση ενέργειας ή/και υλικών αποφεύγονται εκπομπές σε όλους τους υπόλοιπους τομείς της οικονομίας. Για παράδειγμα, με την αξιοποίηση του βιοαερίου που παράγεται από τη διάθεση των αποβλήτων και την αναερόβια χώνευση για την παραγωγή ενέργειας, ή με την αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από την καύση των αποβλήτων, μειώνονται οι απαιτήσεις για παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και συνεπώς οι σχετικές εκπομπές CO_2. Μέσω της ανάκτησης υλικών από τα απόβλητα μειώνονται οι ανάγκες για νέες πρώτες ύλες και οι αντίστοιχες εκπομπές που θα προκαλούνταν από την παραγωγή τους (UNEP, 2010).

1.3 Παρατηρούμενη και αναμενόμενη αλλαγή του κλίματος

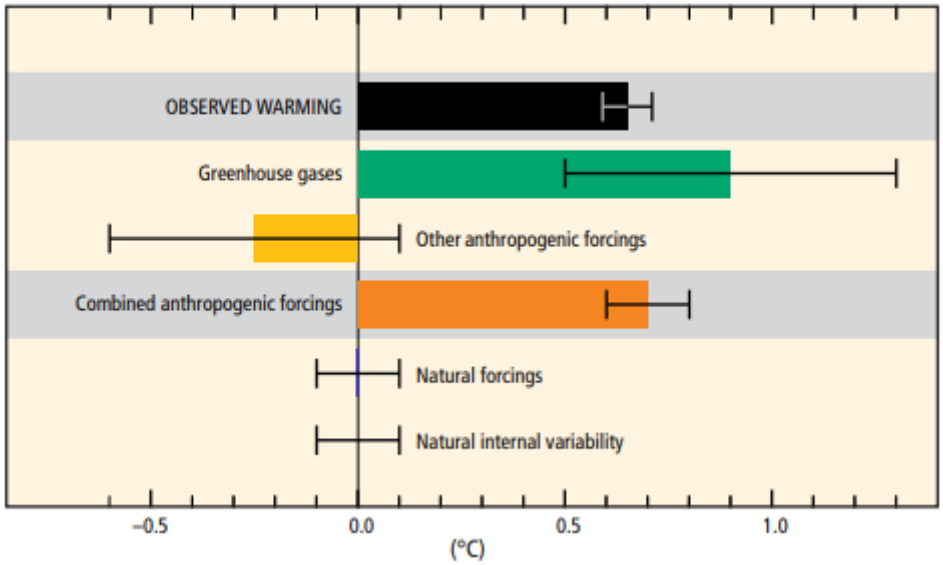
Η θέρμανση του κλιματικού συστήματος είναι αναπόφευκτη καθώς από το 1950 πολλές από τις παρατηρούμενες αλλαγές ήταν πρωτοφανείς τις τελευταίες δεκαετίες έως χιλιετίες. Η ατμόσφαιρα και ο ωκεανός έχουν θερμανθεί, οι ποσότητες χιονιού και πάγου έχουν ελαττωθεί και το επίπεδο της

θαλάσσιας στάθμης έχει ανυψωθεί. Καθεμία από τις τελευταίες τρεις δεκαετίες ήταν διαδοχικά θερμότερη από οποιαδήποτε προγενέστερη δεκαετία από το 1850. Η περίοδος 1983-2012 ήταν πιθανότατα η θερμότερη 30-ετής περίοδος των τελευταίων 1400 ετών στο Βόρειο Ημισφαίριο (IPCC, 2014β). Οι σχετικές πληροφορίες παρουσιάζονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Σχήμα 10: Παρατηρήσεις ετήσιων παγκόσμιων μέσων θερμοκρασιών στην επιφάνεια της γης και των ωκεανών από διαφορετικές σειρές δεδομένων σε σχέση με την περίοδο 1986-2005. Πηγή: IPCC, 2014β

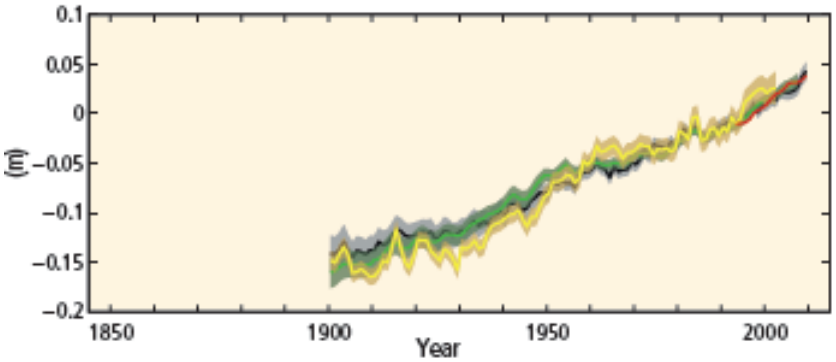
Σύμφωνα με την 5η Έκθεση Αξιολόγησης του IPCC (2014β), είναι ιδιαίτερα πιθανό ότι περισσότερο από το ήμισυ της παρατηρούμενης αύξησης στην παγκόσμια επιφανειακή θερμοκρασία την περίοδο 1950-2010 προκλήθηκε από την ανθρωπογενή αύξηση της συγκέντρωσης ΑΦΘ και άλλων ανθρωπογενών παραγόντων. Η καλύτερη εκτίμηση της συνεισφοράς της ανθρώπινης δραστηριότητας στην παγκόσμια θέρμανση είναι παρόμοια με την παρατηρούμενη θέρμανση αυτή την περίοδο. Στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται οι επιμέρους συνεισφορές στην παρατηρούμενη θέρμανση την περίοδο 1951-2010. Οι διαφορετικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τα καλά αναμεμιγμένα ΑΦΘ, άλλους ανθρωπογενείς παράγοντες (συμπερ. των αερολυμάτων και της αλλαγής χρήσης γης), τις φυσικές επιρροές και τη φυσική εσωτερική κλιματική μεταβλητότητα.



Σχήμα 11: Συνεισφορές στην παρατηρούμενη αλλαγή της θερμοκρασίας επιφάνειας την περίοδο 1951-2010. Πηγή: IPCC, 2014β

Οι ανθρωπογενείς παράγοντες έχουν πιθανότατα συνεισφέρει σημαντικά στην αύξηση της θερμοκρασίας επιφάνειας από τα μέσα του 20ου αιώνα σε κάθε ηπειρωτική περιοχή εκτός από την Ανταρκτική. Οι ανθρωπογενείς επιρροές πιθανότατα έχουν επηρεάσει τον παγκόσμιο κύκλο του νερού από το 1960 και συνεισέφεραν στην υποχώρηση των παγετώνων και στην επιφανειακή τήξη του πάγου της Γροιλανδίας από το 1993. Οι ανθρωπογενείς επιρροές έχουν επίσης πολύ πιθανότατα συνεισφέρει

σημαντικά στην απώλεια πάγου της Αρκτικής θάλασσας από το 1979 και στην αύξηση της θερμότητας στο ανώτερο στρώμα (0-700μ) των ωκεανών παγκοσμίως, καθώς και στην αύξηση της παρατηρούμενης μέσης ανόδου της στάθμης της θάλασσας από το 1970.



Σχήμα 12: Ετήσια και παγκόσμια μέση αλλαγή της στάθμης της θάλασσας σε σχέση με την περίοδο 1986-2005 Πηγή: IPCC, 2014β

Από το 1950 περίπου έχουν παρατηρηθεί αλλαγές σε πολλά ακραία καιρικά και κλιματικά φαινόμενα. Μερικές από αυτές τις αλλαγές έχουν συνδεθεί με ανθρώπινες επιρροές, συμπεριλαμβανομένης της αύξησης των ιδιαίτερα θερμών και ψυχρών θερμοκρασιών, της αύξησης των ιδιαίτερα υψηλών επιπέδων στάθμης της θάλασσας και της αύξησης του αριθμού των γεγονότων έντονης βροχόπτωσης σε διάφορες περιοχές.

Η συνέχιση της εκπομπής θερμοκηπικών αερίων αναμένεται να προκαλέσει επιπρόσθετη θέρμανση και αλλαγές μακράς διαρκείας σε όλες τις συνιστώσες του κλιματικού συστήματος, αυξάνοντας την πιθανότητα σοβαρών, διάχυτων και μη αναστρέψιμων επιπτώσεων σε ανθρώπους και οικοσυστήματα. Ο περιορισμός της κλιματικής αλλαγής απαιτεί σημαντικές και παρατεταμένες μειώσεις των εκπομπών θερμοκηπικών αερίων, οι οποίες, μαζί με την προσαρμογή μπορούν να περιορίσουν τους κινδύνους της κλιματικής αλλαγής.

Η θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης αναμένεται να αυξηθεί τον 21° αιώνα, ενώ είναι πολύ πιθανό ότι τα κύματα καύσωνα θα συμβαίνουν πιο συχνά και θα διαρκούν περισσότερο και ότι τα ακραία γεγονότα βροχόπτωσης θα γίνουν πιο έντονα και συχνά σε πολλές περιοχές. Ο ωκεανός θα συνεχίσει να θερμαίνεται και να οξινίζεται και η μέση παγκόσμια στάθμη της θάλασσας να αυξάνεται.

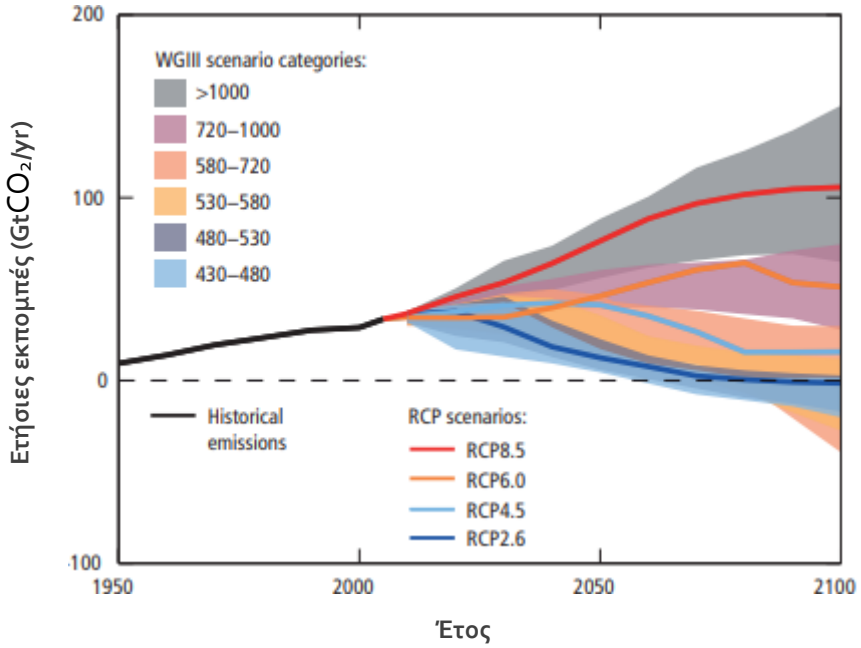
Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επιτείνει τους υφιστάμενους κινδύνους και θα δημιουργήσει νέους κινδύνους για τα φυσικά και ανθρώπινα συστήματα. Οι κίνδυνοι κατανέμονται άνισα και γενικά είναι μεγαλύτεροι για τις αδύναμες κοινωνικές ομάδες.

Οι συσσωρευμένες εκπομπές CO_2 καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την παγκόσμια μέση θέρμανση της επιφάνειας της Γης από τα τέλη του 21ου αιώνα και μετά. Οι προβλέψεις των εκπομπών θερμοκηπικών αερίων διαφοροποιούνται σημαντικά, ανάλογα με τα διαφορετικά σενάρια κοινωνικο-οικονομικής ανάπτυξης και κλιματικής πολιτικής (IPCC, 2014β).

Οι ανθρωπογενείς εκπομπές ΑΦΘ εξαρτώνται κυρίως από το μέγεθος του πληθυσμού, την οικονομική δραστηριότητα, τον τρόπο ζωής, την κατανάλωση ενέργειας, τα πρότυπα χρήσης γης την τεχνολογία και την κλιματική πολιτική. Τα Αντιπροσωπευτικά Μονοπάτια Συγκέντρωσης (Representative Concentration Pathways, RCPs) που χρησιμοποιούνται για τις προβλέψεις με βάση αυτούς τους παράγοντες περιγράφουν τέσσερα διαφορετικά μονοπάτια εκπομπών ΑΦΘ και ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις, εκπομπές αέριων ρυπαντών και χρήσης γης του 21ου αιώνα. Τα RCPs περιλαμβάνουν ένα αυστηρό σενάριο μετριασμού εκπομπών (RCP2.6), δύο μετριοπαθή σενάρια (RCP4.5 και RCP6.0) και ένα σενάριο με πολύ υψηλές εκπομπές ΑΦΘ (RCP8.5). Τα σενάρια χωρίς επιπρόσθετες προσπάθειες για τον περιορισμό των εκπομπών οδηγούν σε μονοπάτια μεταξύ των RCP6.0 και RCP8.5. Το RCP2.6

αντιπροσωπεύει ένα σενάριο που στοχεύει στη συγκράτηση της παγκόσμιας θέρμανσης κάτω από τους 2°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα (IPCC, 2014β).

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ετήσιες ανθρωπογενείς εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα με βάση τα διαφορετικά RCPs και τα αντίστοιχα επίπεδα συγκέντρωσης ισοδύναμου CO_2 το 2100.

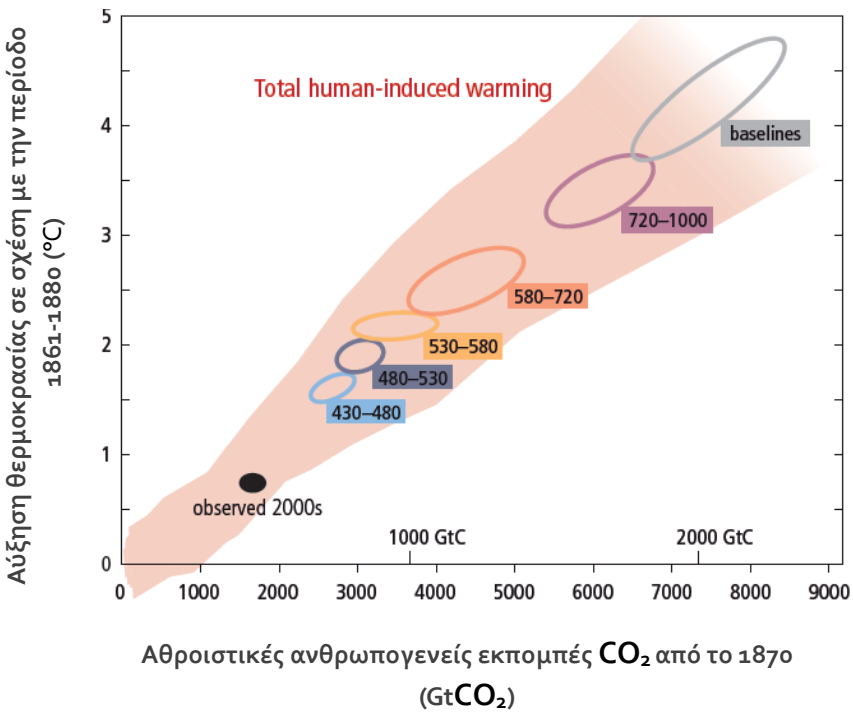


Σχήμα 13: Ετήσιες ανθρωπογενείς εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στα διαφορετικά RCPs εκφρασμένος ως $GtCO_2$/yr (γραμμές, αριστερός άξονας) με βάση τις κατηγορίες σεναρίων της WGIII (οι χρωματισμένες περιοχές δείχνουν το εύρος 5-95%). Πηγή: IPCC, 2014β

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η αναμενόμενη παγκόσμια μέση αύξηση της θερμοκρασίας με βάση διαφορετικά αθροιστικά επίπεδα εκπομπών CO_2 από το 1870. Η χρωματισμένη περιοχή δείχνει το εύρος των προβλέψεων από ένα πλήθος κλιματικών μοντέλων κύκλου άνθρακα, τα οποία βασίζονται σε ιστορικές εκπομπές και στα 4 RCPs έως το 2100 (το χρώμα ξεθωριάζει με το μειούμενο αριθμό των διαθέσιμων μοντέλων).

Οι ελλείψεις δείχνουν τη συνολική ανθρωπογενή θέρμανση το 2100 σε σχέση με τις αθροιστικές εκπομπές CO_2 την περίοδο 1870-2100 από ένα απλό κλιματικό μοντέλο με βάση τις κατηγορίες σεναρίων της WGIII. Το εύρος των ελλείψεων όσον αφορά τη θερμοκρασία προκαλείται από την επίδραση των διαφορετικών σεναρίων για τους μη- CO_2 κλιματικούς παράγοντες.

Τα αποτελέσματα από πολλαπλά μοντέλα δείχνουν ότι ο περιορισμός της συνολικής ανθρωπογενούς θέρμανσης σε λιγότερο από 2°C σε σχέση με την περίοδο 1861-1880 με πιθανότητα >66%7 θα απαιτούσε τις σωρευτικές εκπομπές CO_2 από όλες τις ανθρωπογενείς πηγές από το 1870 να παραμείνουν κάτω από 2900 $GtCO_2$ (με ένα εύρος 2550-3150 $GtCO_2$ ανάλογα τους μη-CO_2 παράγοντες). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το 2011 είχαν εκπεμφθεί περίπου 1900 $GtCO_2$ (IPCC, 2014β).



Σχήμα 14: Παγκόσμια μέση αύξηση της θερμοκρασίας τη στιγμή που οι παγκόσμιες εκπομπές CO2 (σε Gt) φτάσουν ένα συγκεκριμένο αθροιστικό επίπεδο από το 1870. Πηγή: IPCC, 2014β

Εάν οι συγκεντρώσεις των διαφορετικών αερίων του θερμοκηπίου συνεχίσουν να αυξάνονται με τους υφιστάμενους ρυθμούς, τα ανώτερα επίπεδα συγκέντρωσης που απαιτούνται για να μην ξεπεράσει η αύξηση της θερμοκρασίας τους 1.5°C πάνω από τα προ-βιομηχανικά επίπεδα, θα μπορούσαν να επιτευχθούν μέσα στα επόμενα 3-13 έτη. Τα ανώτερα επίπεδα συγκέντρωσης που απαιτούνται για να μην ξεπεράσει η αύξηση της θερμοκρασίας τους 2°C πάνω από τα προ-βιομηχανικά επίπεδα, θα μπορούσαν να επιτευχθούν μέσα στα επόμενα 15-29 έτη (EEA, 2020).

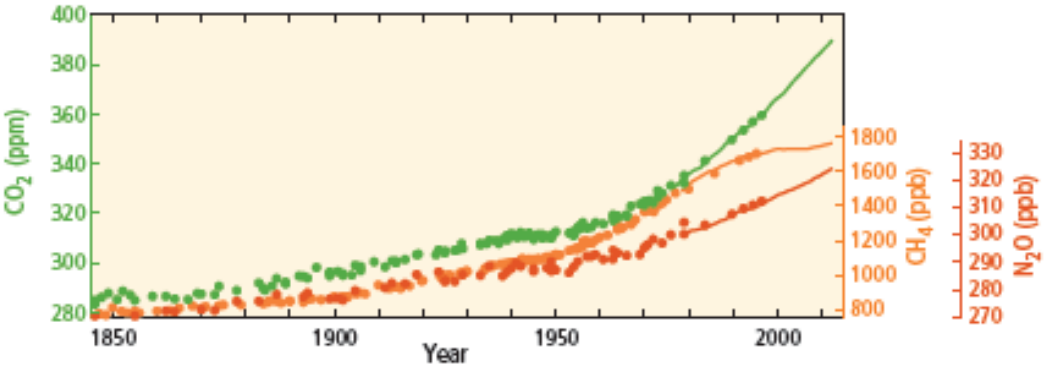
1.4 Συνεισφορά ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην κλιματική αλλαγή

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες συνεισφέρουν στην αλλαγή του κλίματος προκαλώντας αλλαγές στις ποσότητες των θερμοκηπιακών αερίων, των αερολυμάτων και των σύννεφων στην ατμόσφαιρα της Γης. Τα θερμοκηπιακά αέρια και τα αερολύματα επηρεάζουν το κλίμα μεταβάλλοντας την ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που εισέρχεται και την υπέρυθρη ακτινοβολία που εξέρχεται από την ατμόσφαιρα της Γης, διαταράσσοντας έτσι το ισοζύγιο ενέργειας της Γης (radiative forcing, RF). Από την αρχή της βιομηχανικής εποχής (μετά το 1750) η συνολική επίδραση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο κλίμα έχει συνεισφέρει στη θέρμανση του κλίματος. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν ως αποτέλεσμα τις εκπομπές τεσσάρων κύριων ΑΦΘ: του διοξειδίου του άνθρακα, του μεθανίου, του υποξειδίου του αζώτου και των αλογονανθράκων (μια ομάδα αερίων που περιέχουν φθόριο, χλώριο και βρώμιο). Η μεγαλύτερη συνεισφορά προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων η οποία απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα ενώ η αποψίλωση των δασών έχει εντείνει το φαινόμενο αυτό, με συνέπεια την υπερθέρμανση του πλανήτη (Forster et al. 2007).

Σημειώνεται ότι η παρατηρούμενη αύξηση της συγκέντρωσης CO_2 στην ατμόσφαιρα δεν αντικατοπτρίζει το σύνολο των ανθρώπινων εκπομπών καθώς αντιστοιχούν μόνο στο 55% του συνόλου των εκπομπών από ανθρώπινες δραστηριότητες από το 1959. Το υπόλοιπο έχει απορροφηθεί από τα φυτά και τους ωκεανούς. Σε κάθε περίπτωση, οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των θερμοκηπιακών

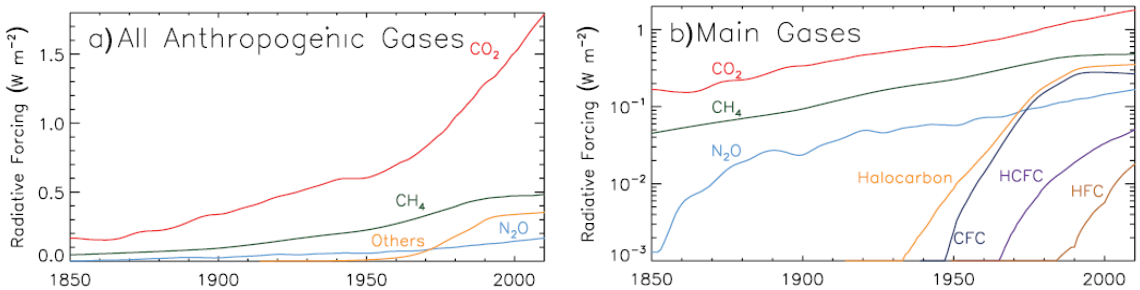
αερίων και οι αυξήσεις τους καθορίζονται από την ισορροπία μεταξύ των πηγών (ανθρώπινες δραστηριότητες και φυσικά συστήματα) και των καταβόθρων (απομάκρυνση του αερίου από την ατμόσφαιρα μέσω της μετατροπής του σε διαφορετική χημική ένωση). Επίσης πολλά από τα αλογονούχα αέρια δεν υπήρχαν πριν τη βιομηχανική εποχή, καθώς είναι προϊόν αποκλειστικά ανθρώπινης δραστηριότητας (Denman et al., 2007). Τέλος, οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν τροποποιήσει την εδαφοκάλυψη και ως εκ τούτου, έχει αλλάξει η επιφανειακή φωταύγεια (albedo) (Myhre et al., 2013).

Οι συνολικές ανθρωπογενείς εκπομπές ΑΦΘ συνέχισαν να αυξάνονται την περίοδο 1970-2010 με μεγαλύτερες απόλυτες αυξήσεις μεταξύ της περιόδου 2000-2010, παρά τον αυξανόμενο αριθμό πολιτικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής.

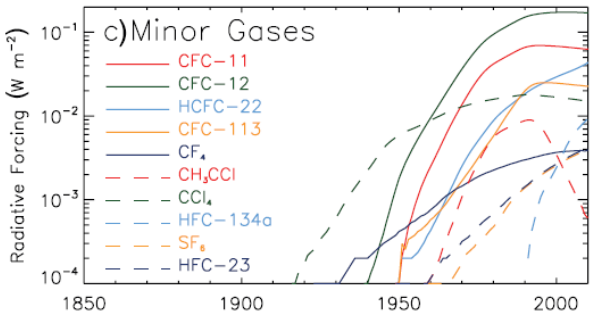


Σχήμα 15: Παγκόσμιες μέσες ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των τριών κυριότερων ΑΦΘ όπως έχουν προσδιοριστεί από πυρήνες πάγου (τελείες) και από άμεσες ατμοσφαιρικές μετρήσεις (γραμμές). Πηγή: IPCC, 2014

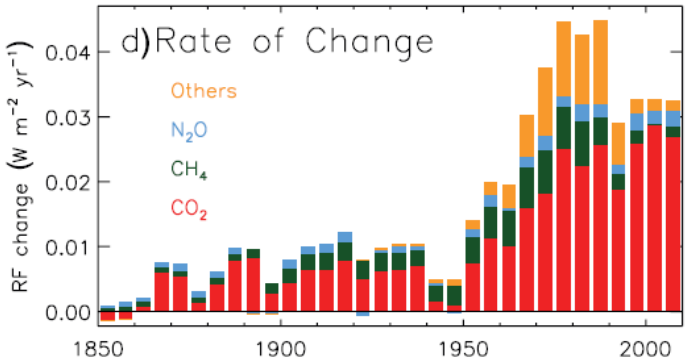
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η διατάραξη ακτινοβολίας που έχει προκληθεί την περίοδο 1850-2011 από τα καλά αναμεμιγμένα ΑΦΘ και τις ομάδες αλογόνων.



Σχήμα 16: (a) Διατάραξη ακτινοβολίας (radiative forcing) από τα κύρια ΑΦΘ και τις ομάδες αλογόνων, 1850-2011, (b) όπως στο (a) αλλά με λογαριθμική κλίμακα. Πηγή: Myhre et al., 2013



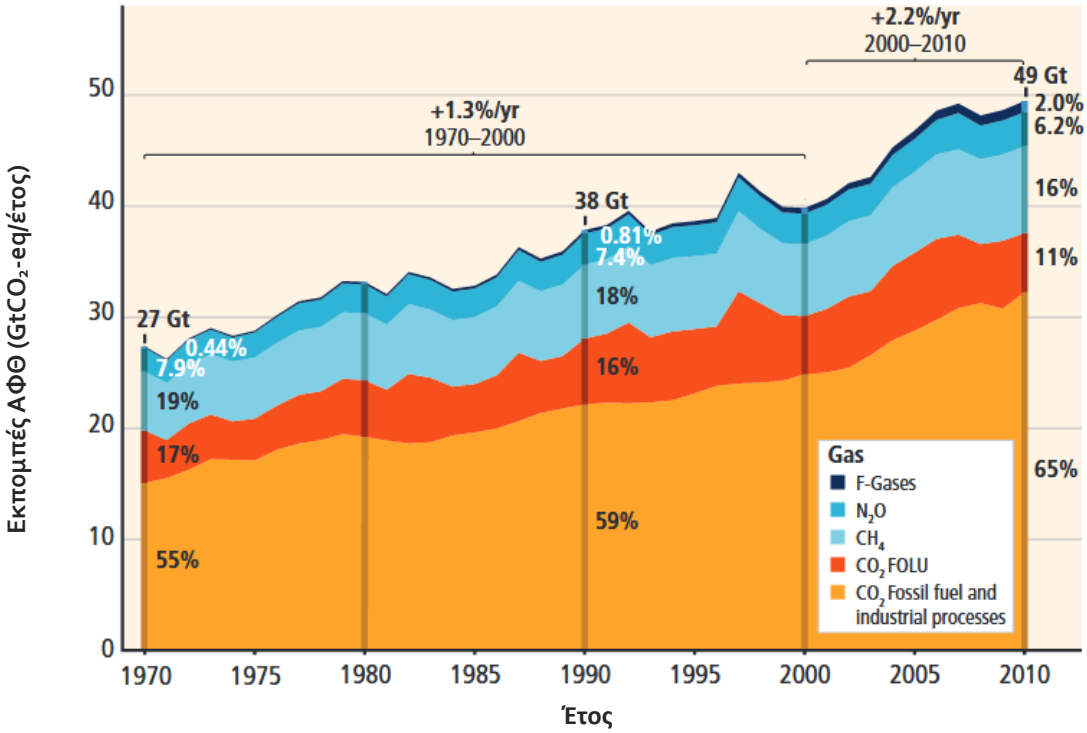
Σχήμα 17: Διατάραξη ακτινοβολίας (radiative forcing) από τις ομάδες αλογόνων με λογαριθμική κλίμακα, 1850-2011. Πηγή: Myhre et al., 2013



Σχήμα 18: Ρυθμός αλλαγής της διατάραξης ακτινοβολίας (radiative forcing) από τα κύρια ΑΦΘ και τις ομάδες αλογόνων, 1850-2011. Πηγή: Myhre et al., 2013

Οι εκπομπές CO_2 από την καύση ορυκτών καυσίμων και τις βιομηχανικές διεργασίες συνεισέφεραν περίπου 78% στη συνολική αύξηση των ΑΦΘ την περίοδο 1970-2010, με παρόμοια αύξηση την περίοδο 2000-2010 (IPCC, 2014b).

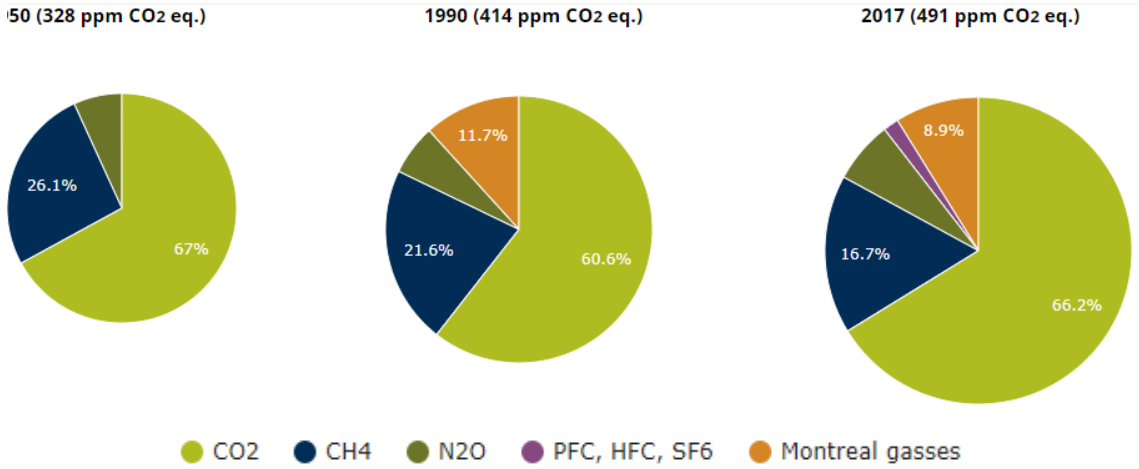
Παγκοσμίως, η ανάπτυξη της οικονομίας και του πληθυσμού συνέχισαν να είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες αύξησης των εκπομπών CO_2 από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η συνεισφορά της πληθυσμιακής ανάπτυξης την περίοδο 2000-2010 παρέμεινε σχεδόν ίδια σε σχέση με τις προηγούμενες τρεις δεκαετίες, ενώ η ανάπτυξη της οικονομίας αυξήθηκε δραματικά. Η αυξημένη χρήση του άνθρακα ανέτρεψε την μακροπρόθεσμη πολιτική για σταδιακή απεξάρτηση από τον άνθρακα στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας (IPCC, 2014b).



Σχήμα 19: Παγκόσμιες ανθρωπογενείς εκπομπές ΑΦΘ ανά αέριο για την περίοδο 1970 – 2010, με βάση το ΔΘΠ$_{100}$ της 2^{ης} Έκθεσης Αξιολόγησης του IPCC. Πηγή: IPCC (2014)

Το 2017, η συγκέντρωση όλων των αερίων του θερμοκηπίου συμπεριλαμβανομένων των αερολυμάτων, έφτασε τα 454 ppm CO_2 eq., μια αύξηση πάνω από 4 ppm σε σχέση με το 2016 και 37 ppm σε σχέση με το 2007 (EEA, 2020).

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συνεισφορά των ΑΦΘ στη θέρμανση του πλανήτη σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Επίσης σημειώνεται ότι τα ΑΦΘ που δεν καλύπτονται από πρωτόκολλα, όπως το όζον και τα αερολύματα, συνέβαλλαν στη ψύχρανση του πλανήτη κατά περίπου 38 ppm CO_2eq. το 2016, το οποίο αντισταθμίζει περίπου 14% τη διατάραξη της ακτινοβολίας από τα ΑΦΘ που καλύπτονται από τα πρωτόκολλα του Κιότο και του Μόντρεαλ (ΕΕΑ, 2020).



Σχήμα 20: Συμμετοχή των ΑΦΘ στη διατάραξη της ακτινοβολίας και τη θέρμανση του πλανήτη. Πηγή: ΕΕΑ, 2020

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επιμέρους ανθρωπογενείς παράγοντες που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου με μη-αμελητέα συμμετοχή και ποσοτικοποιούνται σε όρους δυναμικού διατάραξης του ισοζυγίου ενέργειας της γης (RF). Οι κύριες διαφορές σε σχέση με την 5η Έκθεση Αξιολόγησης του IPCC σχετίζονται με την επικαιροποίηση των ατμοσφαιρικών συγκεντρώσεων και την προσθήκη νέων ενώσεων (NF_3 και SO_2F_2) στα ΑΦΘ. Το N_2O είναι πλέον στην τρίτη θέση όσον αφορά τη συνεισφορά στο RF, με το CFC-12 να είναι στην τέταρτη θέση (Myhre et al., 2013).

1.4.1 Διοξείδιο του άνθρακα

Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί το κύριο ανθρωπογενές αέριο του θερμοκηπίου που επηρεάζει το ισοζύγιο ακτινοβολίας της Γης. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων αλλά και από την παραγωγή τσιμέντου ευθύνονται για περισσότερο από 75% της αύξησης της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικού CO_2 από την προ-βιομηχανική εποχή. Το υπόλοιπο ποσοστό της αύξησης προέρχεται από αλλαγές στις χρήσεις γης και κυρίως από την αποψίλωση των δασών (και τη σχετική καύση βιομάζας) αλλά και από αλλαγές σε γεωργικές πρακτικές. Όλες αυτές οι αυξήσεις προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες, ενώ ο φυσικός κύκλος του άνθρακα δεν σχετίζεται με αυτές. Οι φυσικές διεργασίες των φυτών όπως η φωτοσύνθεση, η αναπνοή, η αποδόμηση και η ανταλλαγή αερίων από την επιφάνεια της θάλασσας οδηγούν σε μαζικές ανταλλαγές, πηγές και καταβόθρες CO_2 μεταξύ της γης και της ατμόσφαιρας, καθώς και των ωκεανών και της ατμόσφαιρας. Η αύξηση της συγκέντρωσης ατμοσφαιρικού CO_2 προέρχεται από ανθρώπινες δραστηριότητες καθώς ο τύπος του CO_2 στην ατμόσφαιρα, ειδικότερα η αναλογία των βαρέων προς τα ελαφριά άτομα άνθρακα, έχει αλλάξει με τέτοιο τρόπο ώστε να συσχετίζεται με την προσθήκη άνθρακα από ορυκτά καύσιμα. Επιπρόσθετα, η αναλογία οξυγόνου προς άζωτο στην ατμόσφαιρα έχει μειωθεί με την αύξηση του CO_2, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς το οξυγόνο καταναλώνεται με την καύση ορυκτών καυσίμων. Μια βαριά μορφή του άνθρακα, το ισότοπο C-13, είναι λιγότερο άφθονο στη βλάστηση και στα ορυκτά καύσιμα που δημιουργήθηκαν από προηγούμενη βλάστηση, και είναι πιο άφθονο στον άνθρακα που

βρίσκεται στους ωκεανούς και στις ηφαιστειακές και γεωθερμικές εκπομπές. Η σχετική ποσότητα του ισοτόπου C-13 στην ατμόσφαιρα μειώνεται, δείχνοντας ότι ο προστιθέμενος άνθρακας προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα και από τη βλάστηση. Ο άνθρακας έχει επίσης ένα σπάνιο ραδιενεργό ισότοπο, το C-14, το οποίο υπάρχει στο ατμοσφαιρικό CO_2 αλλά δεν υπάρχει στα ορυκτά καύσιμα. Πριν τις δοκιμές στην ατμόσφαιρα των πυρηνικών όπλων, οι μειώσεις στη σχετική ποσότητα του C-14 έδειχναν ότι είχε προστεθεί άνθρακας από ορυκτά καύσιμα στην ατμόσφαιρα (Denman et al., 2007).

Η αναλογία μίξης του CO_2 στην τροπόσφαιρα αυξήθηκε παγκοσμίως από τα 278ppm το 1750 στα 390ppm το 2011 (Myhre et al., 2013) και στα 408ppm το 2018 (NOAA[1]), το οποίο αντιστοιχεί σε μια αύξηση 143% (EEA, 2019). Το RF του CO_2 έχει μια αυξητική τάση με ρυθμό 0.3 W m^{-2} ανά δεκαετία. Από το 1996 έως το 2011, ο ρυθμός αύξησης του RF των καλά αναμεμιγμένων ΑΦΘ καθορίστηκε από το CO_2 ενώ από το 2007 είναι υπεύθυνο για το 80% της αύξησης (Myhre et al.,2013).

1.4.2 Μεθάνιο

Το μεθάνιο (CH_4) είναι το δεύτερο σε ποσότητα αέριο του θερμοκηπίου που απαντάται στην ατμόσφαιρα. Οι εκπομπές μεθανίου στην ατμόσφαιρα που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες είναι μεγαλύτερες από αυτές που προέρχονται από φυσικά συστήματα. Η κύρια φυσική πηγή εκπομπών μεθανίου στην ατμόσφαιρα είναι οι υγρότοποι, ενώ άλλες φυσικές πηγές περιλαμβάνουν τους τερμίτες, τους ωκεανούς και τους υδρίτες μεθανίου. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες που παράγουν μεθάνιο περιλαμβάνουν την παραγωγή ενέργειας από άνθρακα και φυσικό αέριο, την απόθεση αποβλήτων σε χωματερές, την εκτροφή μηρυκαστικών ζώων, την καλλιέργεια ρυζιού και την καύση βιομάζας. Μεταξύ της περιόδου 1960-1999, η συγκέντρωση μεθανίου αυξήθηκε κατά μέσο όρο τουλάχιστον έξι φορές γρηγορότερα από οποιαδήποτε 40ετή περίοδο των δύο χιλιετιών πριν το 1800, παρά τη σχεδόν μηδενική ανάπτυξη από το 1980. Το μεθάνιο αφού εκπεμφθεί παραμένει στην ατμόσφαιρα για περίπου 12.4 έτη (Myhre et al., 2013) πριν την απομάκρυνσή του, κυρίως από χημική οξείδωση στην ατμόσφαιρα. Μικρές καταβόθρες μεθανίου προκύπτουν με την απορρόφησή του από το έδαφος και με την τελική καταστροφή του στην στρατόσφαιρα (Denman et al., 2007).

Η συγκέντρωση μεθανίου στην επιφάνεια του πλανήτη έχει αυξηθεί από τα 722ppb το 1750 στα 1803ppb το 2011, το οποίο αντιστοιχεί σε RF 0.48W m–2 ή 17% του συνολικού RF των ανθρωπογενών ΑΦΘ (Myhre et al., 2013).

1.4.3 Υποξείδιο του αζώτου

Το υποξείδιο του αζώτου (N_2O), αν και σε μικρές ποσότητες, αποτελούσε πάντα συστατικό της ατμόσφαιρας. Οι πηγές εκπομπών N_2O στην ατμόσφαιρα που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες είναι περίπου ίσες με τις πηγές N_2O από φυσικά συστήματα. Οι φυσικές πηγές N_2O περιλαμβάνουν τους ωκεανούς, τη χημική οξείδωση της αμμωνίας στην ατμόσφαιρα και τα εδάφη. Τα τροπικά εδάφη είναι μια ιδιαίτερα σημαντική πηγή N_2O στην ατμόσφαιρα. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες που παράγουν εκπομπές N_2O περιλαμβάνουν τη χρήση νιτρικών λιπασμάτων και την επακόλουθη εκπομπή τους από γεωργικά εδάφη, την καύση βιομάζας, την εκτροφή βοοειδών, την επεξεργασία λυμάτων αλλά και κάποιες βιομηχανικές διεργασίες, περιλαμβανομένης της παραγωγής νάυλον (Denman et al., 2007).

[1] NOAA, Data and Products. National Oceanic and Atmospheric Administration. Available online at https://www.ngdc.noaa.gov/ngdcinfo/onlineaccess.html

Το N_2O αφού εκπεμφθεί παραμένει στην ατμόσφαιρα για περίπου 121 έτη πριν την απομάκρυνσή του, κυρίως με την καταστροφή του στην στρατόσφαιρα μέσω αντιδράσεων φωτόλυσης και οξείδωσης. Μεταξύ της περιόδου 1960-1999, οι συγκεντρώσεις N_2O αυξήθηκαν κατά μέσο όρο τουλάχιστον δύο φορές γρηγορότερα από οποιαδήποτε άλλη 40ετή περίοδο των δύο χιλιετιών πριν το 1800. Η συγκέντρωση N_2O στην ατμόσφαιρα αυξήθηκε από τα 270ppb το 1750 στα 324ppb το 2011, που αντιστοιχεί σε μια αύξηση 19%. Οι ανθρωπογενείς εκπομπές συνεισφέρουν 30-45% στην παρούσα συγκέντρωση. Από την τέταρτη έκθεση αξιολόγησης του IPCC (AR4), το N_2O έχει πλέον το τρίτο μεγαλύτερο RF από τα ανθρωπογενή αέρια, ήτοι 0.17 W m–2, το οποίο αντιστοιχεί σε 6% συνεισφορά στο συνολικό RF των ΑΦΘ (Myhre et al., 2013).

1.4.4 Αλογόνα

Τα αλογόνα μπορεί να είναι ιδιαίτερα ισχυρά ΑΦΘ, ενώ αυτά που περιέχουν χλώριο και βρώμιο ευθύνονται επίσης για την εξάντληση της στοιβάδας του όζοντος. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι υπεύθυνες για το μεγαλύτερο μέρος των συγκεντρώσεων αλογονούχων αερίων. Πριν τη βιομηχανοποίηση, υπήρχαν μόνο λίγα φυσικά αλογονούχα αέρια, ενώ η ανάπτυξη νέων τεχνικών για τη χημική σύνθεσή τους είχε ως αποτέλεσμα την ταχεία εξάπλωσή τους κατά τη διάρκεια του τελευταίου μισού του 20ου αιώνα. Την περίοδο 1970-1990, οι αλογονάνθρακες συνεισέφεραν σημαντικά στο ρυθμό αλλαγής του RF. Ο ρυθμός αλλαγής του RF των καλά αναμεμιγμένων ΑΦΘ ήταν υψηλότερος σε σχέση με το παρόν, λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης των μη-CO_2 αερίων και ιδιαίτερα των αλογόνων (Forster et al., 2007).

Κύριοι αλογονάνθρακες είναι οι χλωροφθοράνθρακες (CFC) οι οποίοι χρησιμοποιούνταν εκτεταμένα ως ψυκτικά μέσα καθώς και σε άλλες βιομηχανικές διεργασίες, προτού ανακαλυφθεί ότι η παρουσία τους στην ατμόσφαιρα προκαλεί την εξάντληση της στοιβάδας του όζοντος, οπότε και άρχισαν να αντικαθιστώνται από τους υδροχλωροφθοράνθρακες (HCFC) και τους υδροφθοράνθρακες (HFC). Οι χλωροφθοράνθρακες έχουν πολύ υψηλό δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη (4600-13900) και μεγάλο χρόνο ζωής (45-1000 έτη) (Myhre et al., 2013), ωστόσο οι συγκεντρώσεις τους στην επιφάνεια της γης πλέον σταθεροποιούνται ή μειώνονται ως αποτέλεσμα του Πρωτόκολλου του Μόντρεαλ (1987) που προβλέπει τη μείωση και την σταδιακή κατάργηση των ουσιών που καταστρέφουν τη στιβάδα του όζοντος (Montzka et al., 2011). Ειδικότερα για τους CFC, οι οποίοι αποτελούσαν προτεραιότητα σύμφωνα με το Πρωτόκολλο, η οριστική κατάργησή τους έγινε το 1996. Το 2011 οι CFC συνεισέφεραν 9% στο RF των καλά αναμεμιγμένων ΑΦΘ και 71% στο συνολικό RF των αλογόνων (Myhre et al., 2013), καθώς ενώ οι εκπομπές τους έχουν μειωθεί δραστικά, οι μεγάλοι χρόνοι ζωής τους καθυστερούν την επίδραση της μείωσης στην ατμοσφαιρική τους συγκέντρωση.

Οι HCFC που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά ως υποκατάστατα των CFC, επίσης συνεισφέρουν στην καταστροφή της στοιβάδας του όζοντος αλλά σε χαμηλότερο βαθμό, καθώς οι περισσότεροι HCFC διασπώνται στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ που καλύπτει και αυτή την ομάδα αλογονανθράκων, προβλέπει την σταδιακή κατάργησή τους μέχρι το 2030. Οι HCFC έχουν σχετικό μικρό χρόνο ζωής (1-18 έτη) και παρά τις πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις τους στην ατμόσφαιρα αποτελούν ισχυρά ΑΦΘ με GWP έως και 1980. Το 2011 οι HCFC συνεισέφεραν 2% στο συνολικό RF των καλά αναμεμιγμένων ΑΦΘ και 14% στο RF των αλογόνων, ενώ συνεχίζουν να παρουσιάζουν αυξητική τάση (Myhre et al., 2013).

Οι HFC, οι οποίοι επίσης χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα προς αντικατάσταση των CFC, δεν συνεισφέρουν στην εξάντληση της στοιβάδας του όζοντος, όμως είναι πολύ ισχυρά ΑΦΘ με GWP έως και 12400 και χρόνο ζωής 1-270 έτη (Myhre et al., 2013). Το 2019 τέθηκε σε ισχύ τροποποίηση του Πρωτόκολλου του Μόντρεαλ προκειμένου να ενταχθεί και αυτή η ομάδα των αλογονανθράκων στο Πρωτόκολλο και να μειωθεί η χρήση τους κατά 80% μέχρι το 2047. Το 2011 οι HFC συνεισέφεραν 1% στο

RF των καλά αναμεμιγμένων ΑΦΘ και 5% στο συνολικό RF των αλογόνων, ενώ το RF τους έχει διπλασιαστεί σε σχέση με το 2005 (Myhre et al., 2013).

Οι υπερφθοράνθρακες (PFC) και το εξαφθοριούχο θείο (SF6) είναι πολύ ισχυρά ΑΦΘ (GWP έως και 11100 για τους PFC και 23500 για το SF6) με χρόνους ζωής χιλιάδων έως δεκάδων χιλιάδων ετών και γι' αυτό οι εκπομπές τους στην ουσία συσσωρεύονται στην ατμόσφαιρα. Οι PFC χρησιμοποιούνται συνήθως στον τομέα των ηλεκτρονικών, καθώς και στον τομέα των καλλυντικών και τη φαρμακευτική βιομηχανία, ενώ στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν επίσης σε πυροσβεστήρες. Το SF6 χρησιμοποιείται κυρίως ως μονωτικό αέριο, σε διακόπτες υψηλής τάσης καθώς και στην παραγωγή μαγνησίου και αλουμινίου. Παρά το γεγονός ότι η μέχρι τώρα συμβολή του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ελάχιστη, εντούτοις, διαφαίνεται ότι υπάρχει στην ατμόσφαιρα μία αυξητική τάση απόθεσης του αερίου αυτού. Τα αέρια αυτά συνεισέφεραν το 2011 0.01 W m–2, που ισοδυναμεί με ποσοστό 0.4% στο συνολικό RF των καλά αναμεμιγμένων ΑΦΘ (Myhre et al., 2013).

Όσον αφορά τα νέα ΑΦΘ, το τριφθοριούχο άζωτο (NF3) χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά και το σουλφουρυλοφθορίδιο (SO2F2) ως καπνιστικό. Και τα δύο έχουν ταχύτατα αυξανόμενες εκπομπές και υψηλά GWP (16100 και 4090), αν και προς το παρόν δεν συνεισφέρουν σημαντικά στο RF (0.0002 W m–2 και 0.0003 W m–2 αντίστοιχα, σύμφωνα με τους Weiss et al. (2008), Andersen et al. (2009), Muhle et al. (2009), Arnold et al. (2013).

Από το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, ο ρυθμός αλλαγής του RF από τα αλογόνα και τις σχετικές ενώσεις είναι πολύ μικρότερος, αλλά ακόμα θετικός (0.36 W m^{-2} το 2011 και 0.35 W m^{-2} το 2005) καθώς η αύξηση του RF των HCFC, HFC, PFC και άλλων αλογόνων (SF_6, SO_2F_2, NF_3) είναι μεγαλύτερη από τη μείωση των CFC, CH_3CCl_3 και του CCl_4.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Πλαίσιο πολιτικής για την αντιμετώπιση του προβλήματος

Η διαχείριση των αποβλήτων, λόγω των πολλαπλών επιπτώσεων που προκαλεί στο περιβάλλον, τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία, έχει αποτελέσει σημαντικό τομέα πολιτικής τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, οι σχετικές νομοθεσίες αφορούν θέματα διαχείρισης, όπως η διασφάλιση της ασφαλούς διάθεσης των αποβλήτων, η θέσπιση στόχων για την αύξηση της ανακύκλωσης των επιμέρους ρευμάτων αποβλήτων, η μείωση της διάθεσης των βιοαποβλήτων και η ιεράρχηση των μεθόδων διαχείρισης των αποβλήτων. Τα τελευταία έτη ωστόσο έχει αναγνωριστεί η αξία των αποβλήτων για την ανάκτηση υλικών και έτσι τα απόβλητα δεν θεωρούνται πλέον ως άχρηστα υλικά αλλά ως πολύτιμοι πόροι υλικών. Στο πλαίσιο αυτό, έχει αναπτυχθεί ένα νέο πλαίσιο πολιτικής το οποίο έχει ως στόχο να αφομοιώσει τη διαχείριση αποβλήτων κάτω από το πρίσμα ενός νέου οράματος για την κυκλική οικονομία, με σημαντική αύξηση των ενεργειών για την αξιοποίηση των αποβλήτων και για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας του εγχειρήματος αυτού.

Από την άλλη πλευρά, το πλαίσιο πολιτικής για την κλιματική αλλαγή στην Ευρωπαϊκή Ένωση αναφέρεται στην ενέργεια και το κλίμα και ενώ αφορά όλους τους οικονομικούς τομείς, εστιάζει περισσότερο:

(i) στη μείωση των εκπομπών από ιδιαίτερα ρυπογόνους τομείς όπως η βιομηχανία και η παραγωγή ενέργειας,
(ii) στην αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας, με τον τομέα των μεταφορών να αποτελεί επιμέρους διακριτό τομέα πολιτικής
(iii) στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.

Ενώ στην πρώτη περίπτωση δεν γίνεται ειδική αναφορά στον τομέα της διαχείρισης των αποβλήτων, στη δεύτερη περίπτωση προωθούνται πλέον καύσιμα προερχόμενα από απόβλητα, και έτσι υπάρχει εμφανής συσχέτιση της πολιτικής για την κλιματική αλλαγή και της πολιτικής για τη διαχείριση των αποβλήτων.

Ωστόσο, υπό το φως των τελευταίων εξελίξεων για την κλιματική αλλαγή όπου σύμφωνα με την τελευταία Ειδική Έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2018), η παγκόσμια μέση θερμοκρασία αυξάνεται ταχύτερα από ότι προβλεπόταν αρχικά, με τις σχετικές επιπτώσεις να αναμένονται να είναι πολύ πιο έντονες και δυσμενείς, κρίνεται απαραίτητη η δραστική μείωση των εκπομπών ΑΦΘ. Σε απάντηση λοιπόν σε αυτές τις εξελίξεις, η ΕΕ έθεσε στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, όπου οι καθαρές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα είναι μηδενικές. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, ανακοινώθηκε η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία η οποία έχει ως σκοπό τη συνολική και αποφασιστική αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και παράλληλα της περιβαλλοντικής υποβάθμισης, μέσα από μια νέα στρατηγική ανάπτυξης η οποία περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα πολιτικών μεταξύ των οποίων η πολιτική για την αειφόρο ενέργεια και τις μεταφορές, οι στόχοι μείωσης των εκπομπών ΑΦΘ, αλλά και η κυκλική οικονομία.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζεται αρχικά το πλαίσιο πολιτικής ειδικά για τη διαχείριση αποβλήτων αλλά και σε σχέση με τη βιοοικονομία και την κυκλική οικονομία. Ακολούθως, παρουσιάζεται το πλαίσιο πολιτικής για την κλιματική αλλαγή και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ενώ το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας.

2.1 Διαχείριση αστικών αποβλήτων

Η στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διαχείριση των αστικών αποβλήτων περιλαμβάνει τις Οδηγίες για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων (1999/31/ΕΚ), τη διαχείριση των συσκευασιών και των απορριμάτων συσκευασίας (94/62/ΕΚ) και την Οδηγία πλαίσιο για τα απόβλητα (2008/98/ΕΚ).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εν λόγω Οδηγίες καθώς και το αντίστοιχο εθνικό νομοθετικό πλαίσιο στην Ελλάδα με το οποίο ενσωματώνονται οι Οδηγίες αυτές.

2.1.1 Οδηγία 1999/31/ΕΚ περί υγειονομικής ταφής απορριμμάτων

Η Οδηγία 1999/31/ΕΚ περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων[2], έχει ως σκοπό τον καθορισμό μέτρων, διαδικασιών και κατευθύνσεων για την κατά το δυνατόν πρόληψη ή μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, και ειδικότερα της ρύπανσης των επιφανειακών και των υπογείων υδάτων, του εδάφους και της ατμόσφαιρας και των επιπτώσεων σε όλο το περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένου του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς και οποιουδήποτε κινδύνου προκύπτει για την υγεία του ανθρώπου από την υγειονομική ταφή των αποβλήτων καθ' όλο τον κύκλο ζωής του χώρου υγειονομικής ταφής.

Η Οδηγία ταξινομεί τους χώρους ταφής σε τρεις κατηγορίες:

- Χώροι Υγειονομικής Ταφής Επικινδύνων Αποβλήτων (ΧΥΤΕΑ)
- Χώροι Υγειονομικής Ταφής Μη Επικινδύνων Αποβλήτων / Υπολειμμάτων (ΧΥΤΑ/ΧΥΤΥ)
- Χώροι Υγειονομικής Ταφής Αδρανών Αποβλήτων (ΧΥΤ Αδρανών)

Επιπροσθέτως, αποσκοπώντας στη διασφάλιση της ελεγχόμενης διάθεσης των αποβλήτων, απαγορεύει τη διάθεση αποβλήτων χωρίς να προηγηθεί η επεξεργασία τους. Με τον όρο επεξεργασία νοούνται οι φυσικές, θερμικές, χημικές ή βιολογικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της διαλογής, που μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων προκειμένου να περιοριστούν ο όγκος ή οι επικίνδυνες ιδιότητές τους, να διευκολυνθεί η διακίνησή τους ή να βελτιωθεί η ανάκτηση χρήσιμων υλών.

Επίσης, τίθενται ποσοτικοί στόχοι για την εκτροπή των βιοαποδομήσιμων αστικών αποβλήτων (ΒΑΑ) από τους χώρους διάθεσης:

- τα ΒΑΑ που προορίζονται για χώρους υγειονομικής ταφής πρέπει να μειωθούν στο 75% της συνολικής (κατά βάρος) ποσότητας των ΒΑΑ που είχαν παραχθεί το 1995, μέχρι τις 16 Ιουλίου 2010
- τα ΒΑΑ που προορίζονται για χώρους υγειονομικής ταφής πρέπει να μειωθούν στο 50% της συνολικής (κατά βάρος) ποσότητας των ΒΑΑ που είχαν παραχθεί το 1995, μέχρι τις 16 Ιουλίου 2013
- τα ΒΑΑ που προορίζονται για χώρους υγειονομικής ταφής πρέπει να μειωθούν στο 35% της συνολικής (κατά βάρος) ποσότητας των ΒΑΑ που είχαν παραχθεί το 1995, μέχρι τις 16 Ιουλίου του 2020

[2] Οδηγία 1999/31/ΕΚ του Συμβουλίου της 26ης Απριλίου 1999 περί υγειονομικής ταφής των αποβλήτων. Επίσημη Εφημερίδα αριθ. L 182 της 16/07/1999

Η αναθεώρηση της Οδηγίας αυτής από την Οδηγία 2018/850, προβλέπει την περαιτέρω μείωση της ταφής των ΒΑΑ μέχρι το 2035 στο 10% της συνολικής παραγωγής τους.

Με την Κοινή Υπουργική Απόφαση ΚΥΑ 29407/3508 (ΦΕΚ 1572Β/2002) «Μέτρα και όροι για την υγειονομική ταφή των αποβλήτων» ενσωματώθηκε στο εθνικό δίκαιο η κοινοτική Οδηγία 99/31/ΕΚ.

2.1.2 Οδηγία 94/62/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας

Η Οδηγία 94/62/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας[3], όπως τροποποιήθηκε με την Οδηγία 2004/12/ΕΚ[4], καλύπτει όλες τις συσκευασίες που διατίθενται στην αγορά και όλα τα απορρίμματα συσκευασίας, είτε έχουν χρησιμοποιηθεί είτε προέρχονται από τις βιομηχανίες, το εμπόριο, τα γραφεία, τα καταστήματα, τις υπηρεσίες, τα νοικοκυριά ή οποιαδήποτε άλλη πηγή, ανεξάρτητα από τα υλικά εκ των οποίων αποτελούνται.

Η Οδηγία ορίζει ότι τα κράτη-μέλη πρέπει να λάβουν τα αναγκαία μέτρα με στόχο την πρόληψη της δημιουργίας απορριμμάτων συσκευασίας, την ανάπτυξη συστημάτων επαναχρησιμοποίησης των συσκευασιών και την καθιέρωση συστημάτων ανάκτησης, συλλογής και αξιοποίησης ώστε να επιτύχουν τους ακόλουθους στόχους:

α) έως τις 30 Ιουνίου 2001 το αργότερο, ανάκτηση ή αποτέφρωση σε εγκαταστάσεις αποτεφρώσεως απορριμμάτων με ανάκτηση ενέργειας μεταξύ 50% τουλάχιστον και 65% το πολύ κατά βάρος, των απορριμμάτων συσκευασίας·

β) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2008 το αργότερο, ανάκτηση ή αποτέφρωση σε εγκαταστάσεις αποτεφρώσεως απορριμμάτων με ανάκτηση ενέργειας 60% τουλάχιστον κατά βάρος, των απορριμμάτων συσκευασίας·

γ) έως τις 30 Ιουνίου 2001 το αργότερο, ανακύκλωση μεταξύ 25% τουλάχιστον και 45% το πολύ, κατά βάρος, του συνόλου των υλικών συσκευασίας που περιέχονται στα απορρίμματα συσκευασίας, με ελάχιστο ποσοστό 15% κατά βάρος, για κάθε υλικό συσκευασίας·

δ) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2008 το αργότερο, ανακύκλωση μεταξύ 55% τουλάχιστον και 80% το πολύ, κατά βάρος, των απορριμμάτων συσκευασίας·

ε) έως τις 31 Δεκεμβρίου 2008 το αργότερο, επίτευξη των ακόλουθων ελάχιστων στόχων ανακύκλωσης για υλικά που περιέχονται σε απορρίμματα συσκευασίας:

i) 60 %, κατά βάρος, για το γυαλί,

ii) 60 %, κατά βάρος, για το χαρτί και χαρτόνι,

iii) 50 %, κατά βάρος, για τα μέταλλα,

iv) 22,5 %, κατά βάρος, για τα πλαστικά, λαμβάνοντας αποκλειστικά υπόψη υλικά που ανακυκλώνονται εκ νέου σε πλαστικά,

v) 15 %, κατά βάρος, για το ξύλο.

[3] Οδηγία 94/62/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 20ής Δεκεμβρίου 1994 για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας. Επίσημη Εφημερίδα αριθ. L 365 της 31/12/1994

[4] Οδηγία 2004/12/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 11ης Φεβρουαρίου 2004, που τροποποιεί την οδηγία 94/62/ΕΚ για τις συσκευασίες και τα απορρίμματα συσκευασίας. Επίσημη Εφημερίδα αριθ. L 047 της 18/02/2004

Με την οδηγία 2004/12/ΕΚ οι στόχοι για την Ελλάδα, την Ιρλανδία και την Πορτογαλία, λόγω της ειδικής τους κατάστασης, δηλαδή του μεγάλου αριθμού μικρών νήσων, της ύπαρξης αγροτικών και ορεινών περιοχών και του υφιστάμενου σήμερα χαμηλού επιπέδου κατανάλωσης συσκευασιών, μετατέθηκαν κατά 4 χρόνια έως το 2005 και 2011 αντίστοιχα.

Η αναθεώρηση της Οδηγίας 94/62/ΕΚ από την Οδηγία (ΕΕ) 2018/852, προβλέπει τη σταδιακή αύξηση της ανακύκλωσης όλων των αποβλήτων συσκευασίας στο 70% έως το 2030 (από 55% το 2008), καθώς και ειδικούς στόχους ανακύκλωσης για τα επιμέρους υλικά που περιέχονται στα απόβλητα συσκευασίας:

- 55% του πλαστικού έως το 2030 (από 22.5% το 2008)
- 30% του ξύλου έως το 2030 (από 15% το 2008)
- 80% των σιδηρούχων μετάλλων έως το 2030 (από 50% το 2008, για όλα τα μέταλλα)
- 60% του αλουμινίου έως το 2030 (από 50% το 2008, για όλα τα μέταλλα)
- 75% του γυαλιού έως το 2030 (από 60% το 2008)
- 85% του χαρτιού και του χαρτονιού έως το 2030 (από 60% το 2008)

Με το Νόμο 2939/2001 (ΦΕΚ 179Α/2001) «Συσκευασίες και εναλλακτική διαχείριση των συσκευασιών και άλλων προϊόντων – Ίδρυση Εθνικού Οργανισμού Εναλλακτικής Διαχείρισης Συσκευασιών και άλλων προϊόντων (Ε.Ο.Ε.Δ.Σ.Α.Π.) και άλλες διατάξεις», όπως τροποποιήθηκε με την Υ.Α. 9268/469/2007 «Τροποποίηση των ποσοτικών στόχων για την ανάκτηση και ανακύκλωση των αποβλήτων των συσκευασιών» και το Νόμο 3854/2010, ενσωματώνεται η οδηγία 94/62/ΕΚ στο Εθνικό Δίκαιο. Ειδικότερα, καθορίζεται το πλαίσιο για την υλοποίηση προγραμμάτων ανακύκλωσης/ επαναχρησιμοποίησης/ αξιοποίησης συσκευασιών και άλλων προϊόντων (μπαταρίες, ηλεκτρονικά κ.α.), θέτοντας συγκεκριμένους ποσοτικούς στόχους και χρονικά όρια πραγματοποίησής τους.

2.1.3 Οδηγία για τα Απόβλητα 2008/98/ΕΚ

Η Οδηγία 2008/98/ΕΚ για τα απόβλητα[5] θεσπίζει μια σειρά από μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας, με σκοπό την αποφυγή ή μείωση των αρνητικών επιπτώσεων που προκύπτουν από την παραγωγή και τη διαχείριση αποβλήτων, τον περιορισμό του συνολικού αντίκτυπου της χρήσης των πόρων και τη βελτίωση της αποδοτικότητάς της.

Μεταξύ άλλων η Οδηγία αυτή θέτει εκ νέου την προτεραιότητα που πρέπει να ακολουθείται όσον αφορά την πρόληψη και διαχείριση των αποβλήτων (Άρθρο 4), η οποία απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.

[5] Οδηγία 2008/98/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 19ης Νοεμβρίου 2008 για τα απόβλητα και την κατάργηση ορισμένων οδηγιών. Επίσημη Εφημερίδα αριθ. L 312/3 της 22/11/2008

Σχήμα 21: Ιεράρχηση της πρόληψης και διαχείρισης αποβλήτων σύμφωνα με το Άρθρο 4 της Οδηγίας 2008/98/ΕΚ

Το ίδιο άρθρο ορίζει ότι για την εφαρμογή της ιεράρχησης των αποβλήτων, τα κράτη μέλη πρέπει να προωθούν τις εναλλακτικές αυτές που παράγουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα από περιβαλλοντική άποψη. Αυτό ενδέχεται να επιτρέπει την παρέκκλιση από την ιεράρχηση για ορισμένες ειδικές ροές αποβλήτων, εφόσον αυτό δικαιολογείται από τον κύκλο ζωής, λαμβάνοντας υπόψη τις συνολικές επιπτώσεις της παραγωγής και της διαχείρισης τέτοιων αποβλήτων.

Η ιεράρχηση των αποβλήτων αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα σημεία της Ευρωπαϊκής πολιτικής και νομοθεσίας για τα απόβλητα. Στόχος της είναι να ελαχιστοποιήσει τις δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις και να βελτιστοποιήσει την αποδοτικότητα στη χρήση των πόρων, τόσο στην πρόληψη όσο και στη διαχείριση των αποβλήτων.

Η Οδηγία ορίζει επίσης τα κριτήρια αποχαρακτηρισμού των αποβλήτων (άρθρο 6), σύμφωνα με τα οποία ορισμένα προσδιορισμένα απόβλητα παύουν να αποτελούν απόβλητα, εάν έχουν υποστεί κάποια εργασία ανάκτησης, περιλαμβανομένης της ανακύκλωσης.

Με το άρθρο 8, εισάγεται η διευρυμένη ευθύνη παραγωγού σύμφωνα με την οποία τα κράτη μέλη πρέπει να λαμβάνουν τα απαραίτητα μέτρα ώστε οι παραγωγοί των αποβλήτων να αποδέχονται τα επιστρεφόμενα προϊόντα και τα απόβλητα που παραμένουν μετά τη χρήση των προϊόντων αυτών, καθώς και τη συνακόλουθη διαχείριση των αποβλήτων και την οικονομική ευθύνη για τις δραστηριότητες αυτές.

Σύμφωνα με το άρθρο 9 της Οδηγίας, προβλέπεται ως το 2014 ο καθορισμός στόχων πρόληψης των αποβλήτων και αποσύνδεσης από την οικονομική ανάπτυξη για το 2020.

Όσον αφορά την ανάκτηση, η Οδηγία ορίζει συγκεκριμένα ποιες είναι οι εργασίες διάθεσης και ποιες οι εργασίες ανάκτησης των αποβλήτων (Παράρτημα Ι και ΙΙ αντίστοιχα). Ειδικότερα στο Παράρτημα ΙΙ ορίζεται ότι η αποτέφρωση αποβλήτων θεωρείται εργασία ανάκτησης μόνο εφόσον τα απόβλητα χρησιμοποιούνται ως καύσιμο ή ως άλλο μέσο παραγωγής ενέργειας, με ενεργειακή απόδοση >60% για εγκαταστάσεις που λειτουργούσαν έως και το τέλος του 2008 και >65% για εγκαταστάσεις που λειτουργούσαν από το 2009.

Με το άρθρο 11 προβλέπεται η καθιέρωση έως το 2015 της χωριστής συλλογής τουλάχιστον για το χαρτί, το μέταλλο, το πλαστικό και το γυαλί. Επίσης, τίθενται οι ακόλουθοι στόχοι της προετοιμασίας για επαναχρησιμοποίηση και επανακύκλωση:

- έως το 2020 η προετοιμασία για την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση των υλικών αποβλήτων, όπως τουλάχιστον το χαρτί, το μέταλλο, το πλαστικό και το γυαλί από τα νοικοκυριά, και ενδεχομένως από άλλη προέλευση στο βαθμό που τα απόβλητα αυτά είναι

παρόμοια με τα απόβλητα των νοικοκυριών, πρέπει να αυξηθεί κατ' ελάχιστον στο 50 % ως προς το συνολικό βάρος.

Σύμφωνα με την αναθεώρηση της Οδηγίας από την Οδηγία 2018/851, τίθενται οι ακόλουθοι στόχοι για τη σταδιακή αύξηση της ανακύκλωσης των αστικών αποβλήτων:

- έως το 2025, η προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση των αστικών αποβλήτων αυξάνονται τουλάχιστον σε ποσοστό 55 % κατά βάρος·
- έως το 2030, η προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση των αστικών αποβλήτων αυξάνεται τουλάχιστον σε ποσοστό 60 % κατά βάρος·
- έως το 2035, η προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση των αστικών αποβλήτων αυξάνονται τουλάχιστον σε ποσοστό 65 % κατά βάρος.

Το άρθρο 14 της Οδηγίας ορίζει ότι σύμφωνα με την αρχή «ο ρυπαίνων πληρώνει», το κόστος διαχείρισης των αποβλήτων βαρύνει τον αρχικό παραγωγό αποβλήτων, τον τρέχοντα ή τους προηγούμενους κατόχους αποβλήτων.

Σύμφωνα με το άρθρο 22 της Οδηγίας για τα βιολογικά απόβλητα και όπως αυτό τροποποιήθηκε από την Οδηγία 2018/851, προβλέπεται ότι τα κράτη μέλη πρέπει να διασφαλίσουν έως το τέλος του 2023 ότι τα βιολογικά απόβλητα είτε διαχωρίζονται και ανακυκλώνονται στην πηγή, είτε συλλέγονται χωριστά και δεν αναμιγνύονται με άλλα είδη αποβλήτων. Επίσης πρέπει να λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα προκειμένου:

- να ενθαρρύνουν την ανακύκλωση, συμπεριλαμβανομένων της κομποστοποίησης και της χώνευσης, των βιολογικών αποβλήτων κατά τρόπο που να διασφαλίζει υψηλό επίπεδο περιβαλλοντικής προστασίας και να οδηγεί σε εξερχόμενο υλικό που πληροί τα σχετικά πρότυπα υψηλής ποιότητας·
- να ενθαρρύνουν την οικιακή κομποστοποίηση· και
- να προωθήσουν τη χρήση υλικών παραγόμενων από βιολογικά απόβλητα.

Επίσης τα κράτη μέλη οφείλουν να καταρτίσουν Σχέδια διαχείρισης αποβλήτων τα οποία να περιλαμβάνουν ανάλυση της υπάρχουσας κατάστασης όσον αφορά τη διαχείριση αποβλήτων, καθώς και τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για τη βελτίωση της προετοιμασίας προς επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση και διάθεση των αποβλήτων (άρθρο 28). Τέλος, τα κράτη μέλη οφείλουν να εκπονήσουν έως το τέλος του 2013 προγράμματα για την πρόληψη της δημιουργίας αποβλήτων (άρθρο 29).

Η Οδηγία ενσωματώθηκε στο ελληνικό δίκαιο με το Ν. 4042/2012 (ΦΕΚ 24Α/2012 13.02.2012) «Ποινική προστασία του περιβάλλοντος – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/99/ΕΚ – Πλαίσιο παραγωγής και διαχείρισης αποβλήτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2008/98/ΕΚ – Ρύθμιση θεμάτων Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής».

Ειδικά για τα βιοαπόβλητα, αναφέρει με το Άρθρο 41, ότι έως το 2015, το ποσοστό χωριστής συλλογής των βιολογικών αποβλήτων πρέπει να ανέλθει, κατ' ελάχιστον στο 5% του συνολικού βάρους των βιολογικών αποβλήτων και έως το 2020, κατ' ελάχιστον, στο 10% του συνολικού βάρους των βιολογικών αποβλήτων.

Ο Νόμος ορίζει με το άθρο 43 το ειδικό τέλος ταφής με το οποίο επιβαρύνονται από 1/1/2014 οι οργανισμοί ή οι επιχειρήσεις που διαθέτουν σε Χώρο Υγειονομικής Ταφής τα απόβλητα χωρίς να έχουν προηγηθεί εργασίες επεξεργασίας. Το εν λόγω πρόστιμο ορίζεται σε 35 ευρώ ανά τόνο, ποσό που θα αυξάνεται ετησίως 5 ευρώ έως του ποσού των 60 ευρώ. Σημειώνεται ότι μέχρι στιγμής το ειδικό τέλος ταφής δεν εφαρμόζεται καθώς θα πρέπει πρώτα να διασφαλιστούν οι προϋποθέσεις και να

υλοποιηθουν οι υποδομές προδιαλογής και ανάκτησης σύμφωνα με τον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ), το οποίο προϋποθέτει την κύρωση και την υλοποίηση των προβλεπόμενων έργων στα Περιφερειακά Σχέδια Διαχείρισης Αποβλήτων (ΠΕΣΔΑ).

Με την ΚΥΑ 50910/2727 (ΦΕΚ 1909Β/22-12-03) «Μέτρα και Όροι για τη Διαχείριση Στερεών Αποβλήτων/Εθνικός και Περιφερειακός Σχεδιασμός Διαχείρισης» ενσωματώθηκε η βασική Κοινοτική Νομοθεσία που αφορά στα στερεά απόβλητα, σύμφωνα με την οδηγία 75/442/ΕΟΚ όπως τελικά κωδικοποιήθηκε με την Οδηγία 2006/12/ΕΚ και την Οδηγία 2008/98/ΕΚ. Ειδικότερα, τίθενται οι στόχοι και οι αρχές που πρέπει να ισχύουν σε επίπεδο χώρας και δίνονται οι γενικές κατευθύνσεις της πολιτικής διαχείρισης των στερεών αποβλήτων. Πιο συγκεκριμένα, εξειδικεύεται η εθνική στρατηγική για τα στερεά απόβλητα η οποία στοχεύει στη λήψη των αναγκαίων μέτρων για τη ορθολογική και ολοκληρωμένη διαχείριση αυτών και τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Το Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ) και το Εθνικό Στρατηγικό Σχέδιο Πρόληψης Δημιουργίας Αποβλήτων εγκρίθηκαν με την Πράξη Υπουργικού Συμβουλίου 49 της 15.12.2015 «Τροποποίηση και έγκριση του Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Αποβλήτων (Ε.Σ.Δ.Α.) και του Εθνικού Στρατηγικού Σχεδίου Πρόληψης Δημιουργίας Αποβλήτων που κυρώθηκαν με την 51373/4684/ 25–11–2015 κοινή απόφαση των Υπουργών Εσωτερικών και Διοικητικής Ανασυγκρότησης και Περιβάλλοντος και Ενέργειας, σύμφωνα με το άρθρο 31 του Ν. 4342/2015»

Το ΕΣΔΑ καθορίζει τη στρατηγική, τις πολιτικές τους στόχους και τις δράσεις για τη διαχείριση των αποβλήτων σε εθνικό επίπεδο για την επόμενη εξαετία, ως το 2020. Η εθνική πολιτική για τα απόβλητα είναι προσανατολισμένη στους εξής στόχους-ορόσημα για το 2020:

- τα κατά κεφαλή παραγόμενα απόβλητα να έχουν μειωθεί δραστικά,
- η προετοιμασία προς επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση με χωριστή συλλογή ανακυκλώσιμων - βιοαποβλήτων να εφαρμόζεται στο 50% του συνόλου των αστικών στερεών αποβλήτων,
- η ανάκτηση ενέργειας να αποτελεί συμπληρωματική μορφή διαχείρισης, όταν έχουν εξαντληθεί τα περιθώρια κάθε άλλου είδους ανάκτησης και
- η υγειονομική ταφή να αποτελεί την τελευταία επιλογή και να έχει περιοριστεί σε λιγότερο από το 30% του συνόλου των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ).

2.2 Στρατηγική Βιοοικονομίας

Το 2012, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε μια στρατηγική με τίτλο «Καινοτομία για τη βιώσιμη ανάπτυξη: Μια βιοοικονομία για την Ευρώπη»[6]. Η στρατηγική αυτή προτείνει μια συνολική προσέγγιση για την αντιμετώπιση των οικολογικών, περιβαλλοντικών και ενεργειακών προκλήσεων, καθώς και των προκλήσεων που σχετίζονται με την επάρκεια των τροφίμων και των φυσικών πόρων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός εκτιμάται ότι θα φτάσει τα 9 δισεκατομμύρια έως το 2050 και ότι οι φυσικοί πόροι είναι πεπερασμένοι, η στρατηγική θέτει ως προτεραιότητα για την Ευρώπη την αξιοποίηση των ανανεώσιμων βιολογικών πόρων για την ανάπτυξη υλικών και **προϊόντων βιολογικής προέλευσης** (bio-based).

[6] COM(2012)060

Τα προϊόντα βιολογικής προέλευσης σύμφωνα και με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 16575:2014[7] είναι τα προϊόντα που προέρχονται εξολοκλήρου ή εν μέρει από **βιομάζα**, δηλαδή από υλικό βιολογικής προέλευσης (με εξαίρεση υλικά ενσωματωμένα σε γεωλογικούς σχηματισμούς και/ή απολιθωμένα), το οποίο μπορεί να έχει υποστεί φυσική, χημική ή βιολογική επεξεργασία. Για λόγους συντομίας, στο παρόν κείμενο τα προϊόντα βιολογικής προέλευσης θα αποκαλούνται εφεξής βιο-προϊόντα.

Τα πλεονεκτήματα αυτών των προϊόντων έναντι των συμβατικών προϊόντων μπορεί να περιλαμβάνουν την πιο βιώσιμη παραγωγή τους, τη βελτιωμένη απόδοσή τους, τη χαμηλότερη κατανάλωση, την υποκατάσταση μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων, και τη βελτίωση των χαρακτηριστικών τους.

Η βιοοικονομία καλύπτει όλους τους τομείς και τα συστήματα που χρησιμοποιούν βιολογικούς πόρους (βιομάζα από ζώα, φυτά, μικροοργανισμούς και οργανικά απόβλητα) και βιολογικές διεργασίες ενώ διασυνδέει όλους τους τομείς της οικονομίας και της βιομηχανίας που παράγουν τρόφιμα, ζωοτροφές, βιο-προϊόντα και βιοενέργεια καθώς και σχετικές υπηρεσίες.

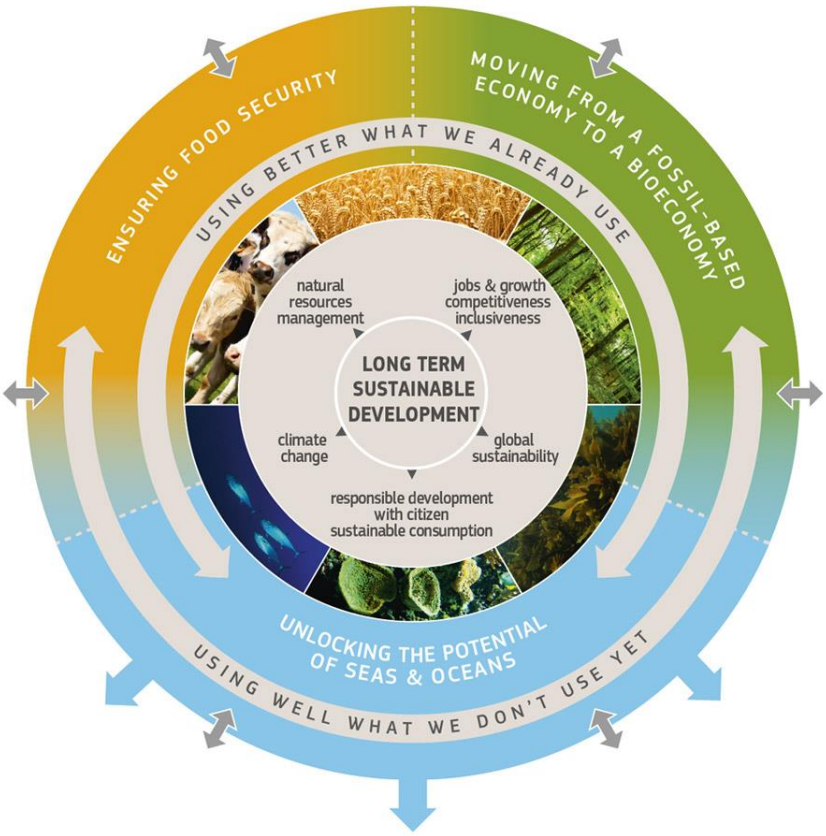
Η βιώσιμη παραγωγή και εκμετάλλευση των βιολογικών πόρων επιτρέπει την παραγωγή περισσότερων από λιγότερα, καθώς και από απόβλητα, ενώ παράλληλα περιορίζει τις αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και την εξάρτηση από τους ορυκτούς πόρους και μετριάζει την κλιματική αλλαγή. Η βιοοικονομία έτσι συνεισφέρει σημαντικά μεταξύ άλλων και στην εμβληματική πρωτοβουλία «Μια Ευρώπη που χρησιμοποιεί αποδοτικά τους πόρους[8]» της στρατηγικής «Ευρώπη 2020». Η βιοοικονομία παρέχει μια χρήσιμη βάση για μια τέτοια προσέγγιση, καθώς περιλαμβάνει την παραγωγή ανανεώσιμων βιολογικών πόρων και τη μετατροπή αυτών αλλά και των ροών αποβλήτων σε προϊόντα προστιθέμενης αξίας, όπως τρόφιμα, ζωοτροφές, βιο-προϊόντα και βιοενέργεια.

Στόχος της Στρατηγικής είναι να προωθήσει την καινοτομία για την παραγωγή ποιοτικής βιομάζας σε ανταγωνιστικές τιμές με παράλληλη διασφάλιση της επισιτιστικής ασφάλειας, προστασία της πρωτογενούς παραγωγής και του περιβάλλοντος, αποφεύγοντας τη στρέβλωση των αγορών υπέρ των ενεργειακών χρήσεων των καλλιεργειών.

Επιπλέον, η Στρατηγική στοχεύει στην κατανόηση της παρούσας και μελλοντικής διαθεσιμότητας και ζήτησης βιομάζας και του ανταγωνισμού μεταξύ των χρήσεων, καθώς και το δυναμικό της χρήσης βιομάζας για το μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Αυτό περιλαμβάνει την εξεύρεση και διασφάλιση εναλλακτικών πηγών άνθρακα και ενέργειας (π.χ. γεωργικά και δασικά υπολείμματα, απόβλητα) και την προώθηση της έρευνας σε καινοτόμες πηγές, όπως τα μικροφύκη.

[7] Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε την εντολή M/492 για την ανάπτυξη οριζόντιων προτύπων για τα προϊόντα βιολογικής προέλευσης. Τα πρότυπα αυτά δεν περιλαμβάνουν τρόφιμα και ζωοτροφές ή βιομάζα για παραγωγή ενέργειας, καθώς αυτά καλύπτονται από άλλα πρότυπα. European Standard EN 16575:2014 'Bio-based products – Vocabulary

[8] COM(2011) 21 Μια Ευρώπη που χρησιμοποιεί αποτελεσματικά τους πόρους - Εμβληματική πρωτοβουλία στο πλαίσιο της στρατηγικής «Ευρώπη 2020»



Σχήμα 22: Απεικόνιση της Στρατηγικής της Βιοοικονομίας

Η Στρατηγική έχει τρεις κύριους πυλώνες:

1) Επενδύσεις στην έρευνα, την καινοτομία και τις δεξιότητες στη βιοοικονομία.

2) Υλοποίηση πολιτικής και ενίσχυση των αγορών και της ανταγωνιστικότητας σε τομείς της βιοοικονομίας.

3) Ενίσχυση του συντονισμού της πολιτικής και της συμμετοχής των ενδιαφερομένων μερών.

Το Σχέδιο Δράσης για τη Βιοοικονομία περιλαμβάνει τις δράσεις για την υλοποίηση των στόχων της Στρατηγικής. Μεταξύ αυτών διακρίνονται οι ακόλουθες δράσεις του Πυλώνα, που έχουν τη μεγαλύτερη συνάφεια με το αντικείμενο της παρούσας διατριβής.

Παροχή τεχνογνωσίας για τη βιώσιμη εντατικοποίηση της πρωτογενούς παραγωγής. Καλύτερη καταγραφή της υφιστάμενης, της δυνητικής αλλά και της μελλοντικής προσφοράς και ζήτησης της βιομάζας (συμπεριλ. των αγροτικών και δασικών υπολειμμάτων και των αποβλήτων) σε όλους τους τομείς, λαμβάνοντας υπόψη την προστιθέμενη αξία, τη βιωσιμότητα, τη γονιμότητα των εδαφών και το δυναμικό μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Υποστήριξη της υιοθέτησης κοινής μεθοδολογίας για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, π.χ. με τη χρήση εργαλείων **Ανάλυσης Κύκλου Ζωής** (ΑΚΖ). Χρήση των ευρημάτων αυτών για τη διαμόρφωση και αναθεώρηση σχετικών πολιτικών.

Προώθηση της λειτουργίας ολοκληρωμένων και διαφοροποιημένων βιοδιϋλιστήριων, πιλοτικών μονάδων και μονάδων επίδειξης σε όλη την Ευρώπη, καθώς και των απαραίτητων δικτύων εφοδιασμού, για τη διαδοχική χρήση της βιομάζας και των ροών αποβλήτων. Η διαδοχική χρήση των εισροών θα πρέπει να γίνεται με προτεραιότητα στην παραγωγή των προϊόντων με την υψηλότερη προστιθέμενη αξία, στα οποία γίνεται αποδοτική χρήση πόρων, τόσο κατά την παραγωγή τους όσο και

κατά τη χρήση τους. Η αρχή της διαδοχικής χρήσης βασίζεται σε μία ή πολλαπλές χρήσεις των υλικών με τη χρήση για την παραγωγή ενέργειας να λαμβάνει χώρα στο τέλος του κύκλου ζωής του υλικού, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα μείωσης των αερίων φαινομένου του θερμοκηπίου.

Το 2018 η Στρατηγική της Βιοοικονομίας ανανεώθηκε[9] προκειμένου να προσαρμοστεί το πεδίο εφαρμογής των στόχων της σε συμφωνία με τις νέες προτεραιότητες της Ευρώπης οι οποίες διαμορφώθηκαν μετά το 2012, ειδικότερα όσον αφορά το Σχέδιο Δράσης της Κυκλικής Οικονομίας[10] (2015), το Πακέτο πολιτικών για Καθαρή Ενέργεια[11] (2016) και την ανανεωμένη Στρατηγική για τη Βιομηχανική Πολιτική[12] (2017). Οι δράσεις τις Στρατηγικής επανεστιάζονται προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η επίδρασή τους στις προτεραιότητες αυτές της Ευρώπης.

Όσον αφορά τη σύνδεση με την κυκλική οικονομία, επισημαίνεται ότι μια βιώσιμη βιοοικονομία είναι στην ουσία το ανανεώσιμο τμήμα της κυκλικής οικονομίας, καθώς μπορεί να μετατρέψει τα βιοαπόβλητα και τα υπολείμματα σε πολύτιμους πόρους και μπορεί να δημιουργήσει τις απαραίτητες καινοτομίες και κίνητρα για την επίτευξη του στόχου για τη μείωση της παραγωγής αποβλήτων τροφίμων στο μισό μέχρι το 2030. Επίσης αναγνωρίζεται ότι οι πόλεις πρέπει να μετατραπούν σε κύριους κόμβους κυκλικής οικονομίας, καθώς η υλοποίηση σχεδίων κυκλικής αστικής ανάπτυξης μπορεί να αποφέρει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Οι στόχοι της βιοοικονομίας για ένα βιώσιμο μέλλον με χαμηλή εξάρτηση από τον άνθρακα είναι επίσης σε συμφωνία με τους στόχους της Συμφωνίας του Παρισίου, που έλαβε χώρα κατά την 21η διάσκεψη των μερών του UNFCCC το 2015.

Η βιοενέργεια, καθώς αποτελεί αυτή τη στιγμή τη μεγαλύτερη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας στην Ευρώπη, συνεισφέρει σημαντικά στους στόχους της Ευρώπης για τουλάχιστον 32% μερίδιο της ανανεώσιμης ενέργειας έως το 2030, σύμφωνα με το Πλαίσιο για το Κλίμα και την Ενέργεια της ΕΕ.

Τονίζεται επίσης η συνέργεια με τους στόχους της ανανεωμένης Βιομηχανικής πολιτικής[12], ειδικότερα όσον αφορά την υποκατάσταση ορυκτών πρώτων υλών από υλικά βιογενούς προέλευσης σε πολύ σημαντικά τμήματα της Ευρωπαϊκής βιομηχανίας. Σύμφωνα με τις προβλέψεις της βιομηχανίας, η ζήτηση για βιομηχανικές βιοτεχνολογίες αναμένεται να διπλασιαστεί στην επόμενη δεκαετία (EuropaBio, 2016).

Για να υποστηριχθούν περαιτέρω οι στόχοι της Στρατηγικής στο πλαίσιο των νέων προτεραιοτήτων πολιτικής, προτείνονται τρεις κύριες περιοχές δράσεις:

1. Ενδυνάμωση και κλιμάκωση των τομέων που χρησιμοποιούν βιομάζα, ενεργοποίηση των επενδύσεων και των αγορών
2. Ταχεία ανάπτυξη τοπικών βιοοικονομιών σε όλη την Ευρώπη
3. Κατανόηση των οικολογικών συνόρων της βιοοικονομίας

Ειδικότερα για την πρώτη περιοχή δράσης, προβλέπονται οι ακόλουθες δράσεις:

1.1. Κινητοποίηση των δημόσιων και ιδιωτικών ενδιαφερόμενων μερών για την έρευνα, την επίδειξη και τη χρήση βιώσιμων και κυκλικών βιολύσεων, χωρίς αποκλεισμούς.

[9] COM(2018) 673 final A sustainable Bioeconomy for Europe: Strengthening the connection between economy, society and the environment
[10] COM(2015)614, Closing the loop – An EU action plan for the circular economy
[11] COM(2016)860, Clean Energy for All Europeans – unlocking Europe's growth potential
[12] COM(2017)479, Investing in a smart, innovative and sustainable Industry A renewed EU Industrial Policy Strategy

1.2. Έναρξη της Θεματικής Πλατφόρμας Επενδύσεων για την Κυκλική Βιοοικονομία, ενός στοχευμένου χρηματοδοτικού εργαλείου για τη μείωση του κινδύνου επένδυσης σε βιώσιμες λύσεις.

1.3. Μελέτη και ανάλυση των καταλυτών και των εμποδίων για την εφαρμογή βιοκαινοτομιών και παροχή προαιρετικής καθοδήγησης

1.4. Προώθηση και/ή ανάπτυξη προτύπων και κινήτρων με βάση αναδυόμενες αγορές, και βελτίωση των σημάνσεων για τα προϊόντα βιολογικής προέλευσης με στόχο την παροχή αξιόπιστων και συγκρίσιμων δεδομένων για την περιβαλλοντική και κλιματική απόδοση

1.5. Διευκόλυνση την ανάπτυξης νέων βιώσιμων βιοδιϋλιστηρίων και επιβεβαίωση του τύπου και του εκτιμώμενου δυναμικού

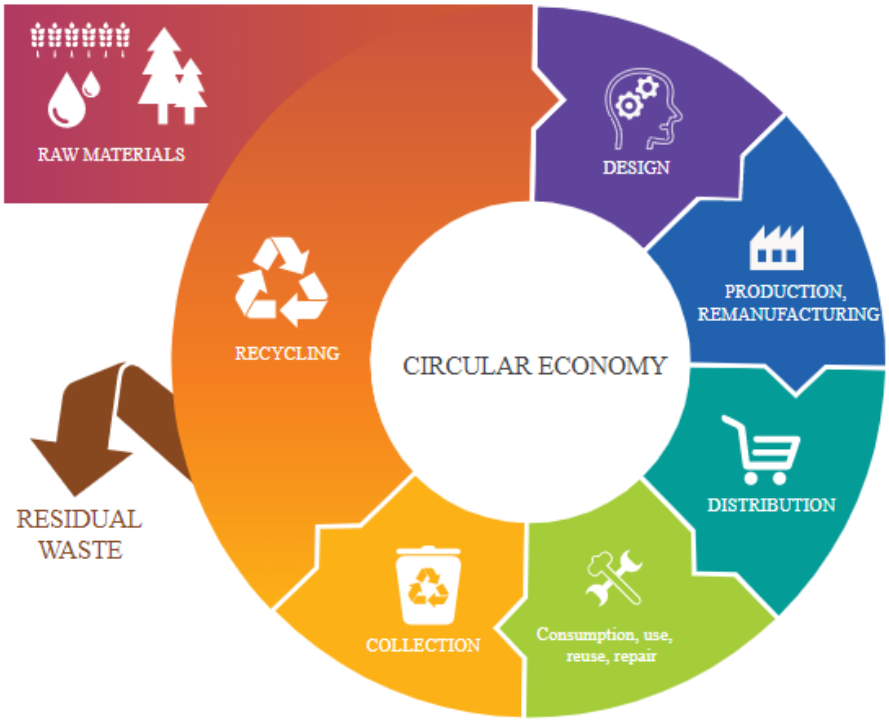
1.6. Επενδύσεις στην έρευνα και την καινοτομία για την ανάπτυξη υλικών βιολογικής προέλευσης, ανακυκλώσιμων και βιοαποδομήσιμων στο θαλάσσιο περιβάλλον, τα οποία θα υποκαταστήσουν τα ορυκτά υλικά, καθώς και για την ανάπτυξη μεθόδων βιο-αποκατάστασης, κινητοποιώντας τους κύριους παράγοντες στις σχετικές αξιακές αλυσίδες

2.3 Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία

Το 2015 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε ένα φιλόδοξο Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία[13] το οποίο περιλάμβανε μέτρα για την προώθηση της μετάβασης της Ευρώπης σε μια κυκλική οικονομία, με απώτερο στόχο την τόνωση της παγκόσμιας ανταγωνιστικότητας, της βιώσιμης οικονομικής ανάπτυξης και της δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας.

Στο μοντέλο της κυκλικής οικονομίας, η αξία των προϊόντων, των υλικών και των πόρων διατηρείται στην οικονομία όσο το δυνατόν περισσότερο, ενώ ελαχιστοποιείται η παραγωγή αποβλήτων. Ενώ το παραδοσιακό γραμμικό μοντέλο οικονομίας βασίζεται στο πρότυπο «Παίρνω-Παράγω-Καταναλώνω-Πετάω», το κυκλικό μοντέλο βασίζεται μεταξύ άλλων στην επιμήκυνση του χρόνου ζωής των προϊόντων και των υλικών μέσω του καλύτερου σχεδιασμού των προϊόντων, της επαναχρησιμοποίησης, της επιδιόρθωσης, της ανακαίνισης αλλά και με την ανακύκλωσή τους, για την επίτευξη ενός όσο το δυνατόν κλειστού κύκλου, όπου ελαχιστοποιείται η διαρροή των πόρων. Ό,τι θεωρείτο παλαιότερα ως απόβλητο μπορεί να μετατραπεί σε πολύτιμο πόρο (EPRS, 2016).

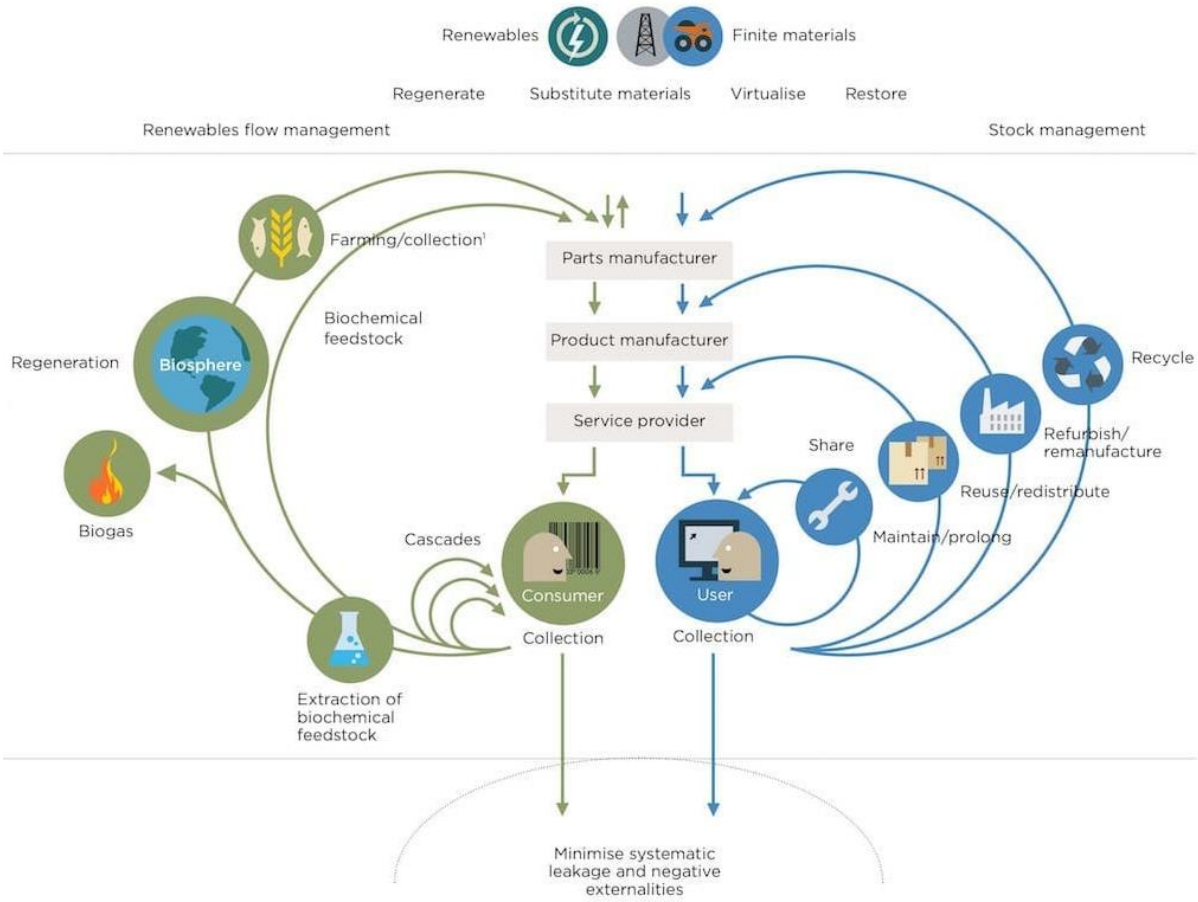
[13] COM(2015) 614 final Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy



Σχήμα 23: Μοντέλο Κυκλικής Οικονομίας[14]

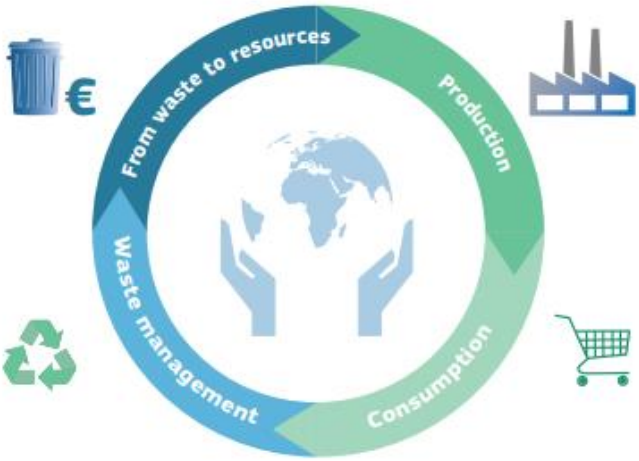
Το μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης αποτελείται στην ουσία από δύο συμπληρωματικούς κύκλους, ένα «βιολογικό» κύκλο για τα υλικά βιολογικής προέλευσης (τα οποία μπορούν να αποδομηθούν από ζωντανούς οργανισμούς) και ένα «τεχνικό» κύκλο για τα «τεχνικά» υλικά (τα οποία δεν μπορούν να αποδομηθούν από ζωντανούς οργανισμούς) (EPRS, 2016).

[14] https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20150701STO72956/circular-economy-the-importance-of-re-using-products-and-materials



Σχήμα 24: Δύο κύκλοι του μοντέλου Κυκλικής Οικονομίας (Πηγή: Ellen Macarthour Foundation[15])

Το Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία θέτει ένα πρόγραμμα δράσης με μέτρα που καλύπτουν όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των προϊόντων και των υλικών, από την παραγωγή και την κατανάλωση έως την διαχείριση των αποβλήτων και την μετατροπή τους σε πόρους, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 25: Στάδια κύκλου ζωής της Σχεδίου Δράσης για την Κυκλική οικονομία (EC, 2015)

15 https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/infographic

Στις ενότητες 2.3.1 και 2.3.1.1 παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα δύο τελευταία στάδια του κύκλου ζωής, τα οποία σχετίζονται με το πεδίο εφαρμογής της παρούσας διατριβής, καθώς και τα προβλεπόμενα μέτρα.

Μεταξύ των **τομέων προτεραιότητας** οι οποίοι σύμφωνα με το Σχέδιο Δράσης αντιμετωπίζουν ιδιαίτερες προκλήσεις στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας και για τους οποίους προκρίνονται συγκεκριμένες δράσεις, οι τομείς (i) των πλαστικών και (ii) της βιομάζας και των προϊόντων βιολογικής προέλευσης, παρουσιάζουν ενδιαφέρον στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις δράσεις που προβλέπονται για τους τομείς αυτούς παρουσιάζονται στις ενότητες 2.3.3 και 2.3.4.

Το 2020 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανακοίνωσε το **Νέο Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία**[16], το οποίο ενσωματώνει στο Σχέδιο Δράσης του 2015 τις κατευθύνσεις που δίνονται από την **Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία**[17] (2019) σχετικά με την κυκλική οικονομία. Συγκεκριμένα, η Πράσινη Συμφωνία καλεί για την επιτάχυνση της διαδικασίας μετασχηματισμού που απαιτείται για την επίτευξη μιας κλιματικά ουδέτερης και κυκλικής οικονομίας. Λαμβάνοντας υπόψη ότι απαιτούνται περίπου 25 έτη - μια γενιά- για το μετασχηματισμό ενός βιομηχανικού τομέα και των εφοδιαστικών του αλυσίδων, συμπεραίνεται ότι για να είμαστε έτοιμοι το 2050, θα πρέπει να παρθούν αποφάσεις και να αναληφθούν οι σχετικές δράσεις τα επόμενα πέντε έτη.

Το Νέο Σχέδιο Δράσης παρουσιάζει μια σειρά από αλληλεξαρτώμενες πρωτοβουλίες για την καθιέρωση ενός συνεκτικού πλαισίου πολιτικής προϊόντων, το οποίο θα έχει ως στόχο την καθολική επικράτηση βιώσιμων προϊόντων, υπηρεσιών και επιχειρηματικών μοντέλων και το μετασχηματισμό των προτύπων κατανάλωσης έτσι ώστε να μην παράγονται εξαρχής απόβλητα.

Επίσης το Νέο Σχέδιο Δράσης ορίζει ότι προκειμένου να επιτευχθεί κλιματική ουδετερότητα πρέπει να ενισχυθούν οι συνέργειες μεταξύ της κυκλικής οικονομίας και της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ειδικότερα η Επιτροπή προβλέπει ότι:

- Θα διερευνήσει τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να αποτιμηθεί συστηματικά η επίδραση της κυκλικής οικονομίας στο μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και την προσαρμογή
- Θα βελτιώσει τα εργαλεία μοντελοποίησης για την αποτίμηση των οφελών της κυκλικής οικονομίας στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε Ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο
- Θα προωθήσει την ενίσχυση του ρόλου της κυκλικότητας σε μελλοντικές αναθεωρήσεις των Εθνικών Σχεδίων για την Ενέργεια και το Κλίμα και, κατά περίπτωση, σε άλλες κλιματικές πολιτικές.

2.3.1 Διαχείριση αποβλήτων

Για την αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων και την επίτευξη υψηλών επιπέδων ανάκτησης υλικών, το Σχέδιο Δράσης προκρίνει ως σημαντικό να μεταφερθούν τα κατάλληλα μακροπρόθεσμα μηνύματα στις δημόσιες αρχές, τις επιχειρήσεις και τους επενδυτές και να εδραιωθούν οι κατάλληλες συνθήκες σε επίπεδο Ευρώπης, οι οποίες θα λαμβάνουν υπόψη μεταξύ άλλων και τη συνεπή εφαρμογή των υφιστάμενων υποχρεώσεων.

Με το Σχέδιο Δράσης η Επιτροπή προώθησε προτάσεις για την αναθεώρηση της υφιστάμενης νομοθεσίας για τα απόβλητα, προκειμένου να παρέχει μια πιο μακροπρόθεσμη προοπτική για την

[16] COM(2020) 98 final A new Circular Economy Action Plan
[17] COM(2019) 640 final The European Green Deal

αύξηση της ανακύκλωσης και τη μείωση της ταφής των αστικών αποβλήτων, καθώς και για την αύξηση της ανακύκλωσης των υλικών συσκευασίας.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την αναθεώρηση της Οδηγίας 2008/98/ΕΕ για τα απόβλητα από την Οδηγία 2018/851, τίθενται στόχοι για σταδιακή αύξηση της ανακύκλωσης των αστικών αποβλήτων στο 65% της συνολικής παραγωγής τους έως το 2035. Η αναθεώρηση της Οδηγίας 94/62/ΕΕ για τα απόβλητα συσκευασίας από την Οδηγία 2018/852, προβλέπει τη σταδιακή αύξηση της ανακύκλωσης όλων των αποβλήτων συσκευασίας στο 70% έως το 2030 (από 55% το 2008), καθώς και ειδικούς στόχους ανακύκλωσης για τα επιμέρους υλικά που περιέχονται στα απόβλητα συσκευασίας:

- 55% του πλαστικού έως το 2030 (από 22.5% το 2008)
- 30% του ξύλου έως το 2030 (από 15% το 2008)
- 80% των σιδηρούχων μετάλλων έως το 2030 (από 50% το 2008, για όλα τα μέταλλα)
- 60% του αλουμινίου έως το 2030 (από 50% το 2008, για όλα τα μέταλλα)
- 75% του γυαλιού έως το 2030 (από 60% το 2008)
- 85% του χαρτιού και του χαρτονιού έως το 2030 (από 60% το 2008)

Η αναθεώρηση της Οδηγίας 1999/31/ΕΕ για την ταφή των αποβλήτων από την Οδηγία 2018/850, προβλέπει τη μείωση της ταφής των αστικών αποβλήτων μέχρι το 2035 στο 10% της συνολικής παραγωγής τους.

Η αναθεώρηση της Οδηγίας για τα απόβλητα ενθαρρύνει επίσης την εκτενέστερη χρήση οικονομικών εργαλείων για την διασφάλιση της συνέπειας με την ιεράρχηση της διαχείρισης αποβλήτων στην ΕΕ.

Το Σχέδιο αναγνωρίζει ότι για την αύξηση της ανακύκλωσης υψηλής ποιότητας απαιτούνται βελτιώσεις στα συστήματα συλλογής και διαλογής. Δεδομένου ότι τα συστήματα αυτά συχνά χρηματοδοτούνται εν μέρει από σχήματα Διευρυμένης Ευθύνης Παραγωγών (Extended Producer Responsibility, EPR), η Επιτροπή έθεσε ελάχιστες απαιτήσεις σχετικά με τη διαφάνεια και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας, μέσα από την αναθεώρηση της Οδηγίας 2008/98.

Διαπιστώνεται ότι η επίτευξη υψηλότερων ποσοστών ανακύκλωσης συχνά εμποδίζεται από την περιορισμένη διοικητική ικανότητα, την έλλειψη επενδύσεων σε υποδομές χωριστής συλλογής και ανάκτησης και την ανεπαρκή αξιοποίηση των διαθέσιμων οικονομικών εργαλείων (π.χ. εφαρμογή φόρων για την ταφή των απορριμμάτων ή τελών για την απόρριψη στους κάδους συλλογής).

Οι αναθεωρημένες προτάσεις της νομοθεσίας για τα απόβλητα λαμβάνουν υπόψη τα εμπόδια αυτά και προβλέπουν χρονικές παρατάσεις για τις χώρες που αντιμετωπίζουν προβλήματα με την εφαρμογή συστημάτων χωριστής συλλογής, ενώ παράλληλα απαιτούν στρατηγικές υλοποίησης των στόχων τους. Η Επιτροπή μέσα από το Σχέδιο αυτό δεσμεύεται για την παροχή τεχνικής βοήθειας στις χώρες αυτές και ξεκίνησε πρωτοβουλίες για την προώθηση της συμμόρφωσης με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία για τα απόβλητα.

Για το τρέχον (2014-2020) πρόγραμμα χρηματοδότησης του Ταμείου Συνοχής, προβλέπονται εκ των προτέρων οι προϋποθέσεις που πρέπει να ικανοποιούνται προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι νέες επενδύσεις στον τομέα διαχείρισης των αποβλήτων είναι σε συμφωνία με τα εθνικά σχέδια διαχείρισης αποβλήτων για την επίτευξη των στόχων ανακύκλωσης. Αυτό σημαίνει ότι η χρηματοδότηση για νέους χώρους ταφής εγκρίνεται μόνο υπό εξαιρετικές συνθήκες και ότι η χρηματοδότηση για νέες εγκαταστάσεις επεξεργασίας υπολειμματικών αποβλήτων, όπως η καύση και η μηχανική βιολογική επεξεργασία, εγκρίνεται μόνο σε περιορισμένες και επαρκώς αιτιολογημένες περιστάσεις, όπου δεν υπάρχει κίνδυνος πλεονάζουσας δυναμικότητας και εφόσον τηρούνται οι στόχοι της ιεράρχησης της διαχείρισης των αποβλήτων.

Η Επιτροπή δεσμεύτηκε επίσης να εξετάσει το ρόλο της παραγωγής ενέργειας από απόβλητα και τις συνέργειες που δημιουργεί με την πολιτική της ΕΕ για την ενέργεια και το κλίμα, σύμφωνα με τις αρχές της ιεράρχησης των μεθόδων διαχείρισης των αποβλήτων (βλ. περισσότερα στην Ενότητα 2.3.1.1). Ειδικότερα, θα εξετάσει πώς ο ρόλος αυτός μπορεί να βελτιστοποιηθεί χωρίς να υποβιβάζεται η ανάγκη επίτευξης υψηλότερων ποσοστών επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης, καθώς και πώς αυτό το δυναμικό ενέργειας μπορεί να αξιοποιηθεί με τον καλύτερο τρόπο.

Το Νέο Σχέδιο Δράσης της Κυκλικής Οικονομίας (2020) αναγνωρίζει την ανάγκη για την περαιτέρω ενίσχυση και καλύτερη υλοποίηση της Ευρωπαϊκής νομοθεσίας για τα απόβλητα, στην κατεύθυνση του συνεχή εκσυγχρονισμού προκειμένου να είναι σε συμφωνία με την κυκλική οικονομία και να αξιοποιεί τα οφέλη της ψηφιακής εποχής.

Στο πλαίσιο της προώθησης της ανακύκλωσης υψηλής ποιότητας, η Επιτροπή ανακοινώνει ότι θα προτείνει τον εναρμονισμό των συστημάτων χωριστής συλλογής αποβλήτων. Ειδικότερα, η πρόταση θα αναφέρεται στους πιο αποτελεσματικούς συνδυασμούς μοντέλων χωριστής συλλογής, την πυκνότητα και προσβασιμότητα των σημείων χωριστής συλλογής, συμπεριλαμβανομένων και των σημείων σε δημόσιους χώρους, λαμβάνοντας υπόψη τις ευρύτερες και τοπικές συνθήκες. Θα ληφθούν υπόψη και άλλες πτυχές οι οποίες διευκολύνουν την συμμετοχή των πολιτών, όπως η κοινή χρωματική κωδικοποίηση των κάδων, τα εναρμονισμένα σύμβολα για τους κύριους τύπους αποβλήτων, η σήμανση των προϊόντων, εκστρατείες ενημέρωσης και οικονομικά εργαλεία. Η Επιτροπή θα επιδιώξει την προτυποποίηση και τη χρήση συστημάτων διαχείρισης ποιότητας για τη διασφάλιση της ποιότητας των συλλεγόμενων αποβλήτων που προορίζονται για χρήση σε προϊόντα και ιδιαίτερα σε υλικά που έρχονται σε επαφή με τρόφιμα.

Επισημαίνεται ότι απαιτούνται επιπρόσθετες προσπάθειες για τη στήριξη των χωρών της ΕΕ στη διαχείριση αποβλήτων, καθώς μισές από αυτές κινδυνεύουν να μην επιτύχουν τους στόχους ανακύκλωσης των αστικών αποβλήτων για το 2020.

Τέλος, η Επιτροπή θα προωθήσει στόχους μείωσης των αποβλήτων για συγκεκριμένα απόβλητα στο πλαίσιο της αναθεώρησης της Οδηγίας 2008/98/ΕΕ και θα ενισχύσει τις απαιτήσεις για τα σχήματα Διευρυμένης Ευθύνης Παραγωγού, θα παρέχει κίνητρα και θα ενθαρρύνει την ανταλλαγή πληροφοριών και βέλτιστων πρακτικών στην ανακύκλωση των αποβλήτων. Τα παραπάνω εκτιμάται ότι θα εξυπηρετήσουν το στόχο για τη σημαντική μείωση της παραγωγής αποβλήτων και την κατά 50% μείωση των υπολειμματικών αστικών αποβλήτων έως το 2030.

2.3.1.1 Ανάκτηση ενέργειας από απόβλητα

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και την Ανακοίνωσή της για το Ρόλο της παραγωγής ενέργειας από απόβλητα στην κυκλική οικονομία[18], η ανάκτηση ενέργειας από απόβλητα (waste-to-energy) είναι ένας ευρύς όρος ο οποίος καλύπτει πολύ περισσότερα από την αποτέφρωση αποβλήτων. Περιλαμβάνει διάφορες διεργασίες διαχείρισης αποβλήτων που παράγουν ενέργεια, καθεμία από τις οποίες έχει διαφορετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και διαφορετικό δυναμικό όσον αφορά την κυκλική οικονομία. Ο κύριος στόχος της Ανακοίνωσης αυτής ήταν να διασφαλίσει ότι η ανάκτηση ενέργειας από απόβλητα στην ΕΕ υποστηρίζει τους στόχους της ΕΕ για την κυκλική οικονομία και γίνεται με βάση την ιεράρχηση των μεθόδων της διαχείρισης αποβλήτων, όπως αυτή ορίζεται από την Οδηγία 2008/98/ΕΕ.

Η Ανακοίνωση αυτή καλύπτει τις ακόλουθες διεργασίες ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα: αποτέφρωση αποβλήτων; αναερόβια χώνευση βιοαποδομήσιμων αποβλήτων; παραγωγή στερεών,

[18] COM(2017) 34 final The role of waste-to-energy in the circular economy

υγρών ή αέριων καυσίμων από απόβλητα; άλλες διεργασίες περιλαμβανομένης της έμμεσης αποτέφρωσης μετά από πυρόλυση ή αεριοποίηση.

Οι διεργασίες ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα περιλαμβάνουν πολύ διαφορετικά στάδια διαχείρισης, τα οποία μπορεί να θεωρούνται ως τελική διάθεση, ανάκτηση ή ανακύκλωση. Στη συνέχεια γίνεται κατάταξη αυτών με βάση την ιεράρχηση των αποβλήτων της ΕΕ.

Σχήμα 26: Κατάταξη των διεργασιών ανάκτησης ενέργειας από απόβλητα σύμφωνα με την ιεραρχία διαχείρισης των αποβλήτων της ΕΕ

Σύμφωνα με μελέτη του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, ΕΟΑ (Bogdanovic et al., 2017), περίπου 1.5% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας ικανοποιήθηκε το 2014 από ενέργεια προερχόμενη από απόβλητα και συγκεκριμένα από αποτέφρωση, συναποτέφρωση σε κλιβάνους παραγωγής τσιμέντου και αναερόβια χώνευση. Παρόλο που δεν αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά το ποσοστό αυτό στο μέλλον καθώς όλο και περισσότερα απόβλητα κατευθύνονται προς ανακύκλωση, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των διεργασιών παραγωγής ενέργειας από απόβλητα και η προώθηση αυτών των διεργασιών που συνδυάζουν ανάκτηση υλικών εκτός από ενέργεια μπορεί να συμβάλλει στην ανεξαρτητοποίηση από τον άνθρακα σημαντικών τομέων, όπως η θέρμανση και η ψύξη ή οι μεταφορές και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα διαχείρισης αποβλήτων.

Όσον αφορά τα βιοαποδομήσιμα απόβλητα, η υλοποίηση των απαιτήσεων της Οδηγίας 1999/31 για την ταφή, σε συνδυασμό με την απαιτούμενη χωριστή συλλογή των βιοαποβλήτων, αναμένεται ότι θα έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη παραγωγή βιοαερίου από απόβλητα για χρήση σε συμπαραγωγή, διοχέτευση στο δίκτυο του βιοαερίου και χρήση σε καύσιμα μεταφορών.

Η μελέτη του ΕΟΑ (Bogdanovic et al., 2017) εκτιμά ότι εάν υλοποιηθούν τεκμηριωμένες τεχνικές και υποστηρικτικά μέτρα, η ανακτημένη ποσότητα ενέργειας από απόβλητα θα μπορούσε να αυξηθεί κατά 29% με την ίδια ακριβώς ποσότητα αποβλήτων ως πρώτη ύλη, το οποίο δείχνει το δυναμικό βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης.

2.3.2 Μετατροπή αποβλήτων σε πόρους

Οι δευτερογενείς πρώτες ύλες συνεισφέρουν μέχρι στιγμής με ένα μικρό ποσοστό στα υλικά που χρησιμοποιούνται στην ΕΕ. Αυτό αποδίδεται κυρίως στις υφιστάμενες πρακτικές διαχείρισης των αποβλήτων οι οποίες επηρεάζουν την ποσότητα και την ποιότητα των υλικών που ανακτώνται και για το λόγο αυτό αναγνωρίζεται η ανάγκη να βελτιωθούν αυτές οι πρακτικές. Η Επιτροπή αναγνωρίζει ότι

υπάρχουν και άλλα εμπόδια τα οποία περιορίζουν την ανάπτυξη αυτής της σημαντικής αγοράς και την ομαλή κυκλοφορία αυτών των υλικών, και διεξάγει περαιτέρω ανάλυση στο πλαίσιο αυτό.

Ένα από εμπόδια που αντιμετωπίζουν οι χειριστές που επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν δευτερογενείς πρώτες ύλες σχετίζεται με την αβεβαιότητα ως προς την ποιότητά τους. Χωρίς Ευρωπαϊκά πρότυπα, ο χειριστής δεν μπορεί να γνωρίζει την ποιότητά τους και ποια είναι τα επιτρεπτά επίπεδα προσμίξεων ή την καταλληλόλητα για ανακύκλωση υψηλής ποιότητας. Η Επιτροπή αναγνωρίζει ότι είναι σημαντικό να αναπτυχθούν τέτοια πρότυπα για ορισμένα υλικά (και ειδικά για τα πλαστικά) και δεσμεύεται να ξεκινήσει τις σχετικές εργασίες, σε διαβούλευση με τις εμπλεκόμενες βιομηχανίες.

Επιπλέον, οι αναθεωρημένες νομοθετικές προτάσεις για τα απόβλητα θέτουν εναρμονισμένους κανόνες προκειμένου να προσδιορίσουν πότε μια δευτερογενής πρώτη ύλη δεν πρέπει πλέον να θεωρείται απόβλητο, διευκρινίζοντας τα υφιστάμενα κριτήρια για τον αποχαρακτηρισμό των αποβλήτων (end-of-waste), το οποίο εκτιμάται ότι θα παρέχει περισσότερη βεβαιότητα στους χειριστές.

Τα ανακυκλωμένα θρεπτικά συστατικά που χρησιμοποιούνται σε λιπάσματα είναι μια ξεχωριστή και ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία δευτερογενών πρώτων υλών, για τις οποίες η ανάπτυξη προτύπων ποιότητας κρίνεται απαραίτητη. Ωστόσο, η κυκλοφορία τέτοιων λιπασμάτων παρεμποδίζεται προς το παρόν, λόγω του γεγονότος ότι οι σχετικοί κανόνες και τα ποιοτικά και περιβαλλοντικά πρότυπα διαφέρουν μεταξύ των χωρών της ΕΕ. Για το λόγο αυτό, το 2019 η Επιτροπή εξέδωσε ένα νέο Ευρωπαϊκό Κανονισμό, τον Κανονισμό 2019/1009 για τα προϊόντα λίπανσης της ΕΕ[19], με τον οποίο θέτει κριτήρια αποχαρακτηρισμού των χωριστά συλλεχθέντων βιοαποβλήτων τα οποία έχουν υποστεί αερόβια ή αναερόβια επεξεργασία, προκειμένου το παραγόμενο κόμποστ ή χώνευμα να μπορεί να αποτελέσει συστατικό υλικό ενός προϊόντος λίπανσης.

Τονίζεται τέλος η σημαντικότητα της ύπαρξης επαρκούς ζήτησης για τη δημιουργία μιας δυναμικής αγοράς για δευτερογενείς πρώτες ύλες, η οποία θα τροφοδοτείται από τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών σε προϊόντα και υποδομές. Για το σκοπό αυτό προτείνεται η προώθηση του ρόλου του ιδιωτικού τομέα για τη δημιουργία ζήτησης και τη διαμόρφωση των εφοδιαστικών αλυσίδων, ενώ οι δημόσιες αρχές μπορούν να συνεισφέρουν στη ζήτηση μέσω τις πολιτικές.

Το Νέο Σχέδιο Δράσης της Κυκλικής Οικονομίας (2020) προωθεί μέσα από ένα αριθμό δράσεων τη δημιουργία μιας εύρυθμης αγοράς στην ΕΕ για δευτερογενείς πρώτες ύλες. Συγκεκριμένα, δράσεις όπως η εισαγωγή απαιτήσεων για το ανακυκλωμένο περιεχόμενο των προϊόντων εκτιμάται ότι θα βελτιώσει την αντιστοιχία προσφοράς και ζήτησης για τις δευτερογενείς πρώτες ύλες και θα διασφαλίσει την ομαλή επέκταση του τομέα ανακύκλωσης στην ΕΕ. Επιπλέον, για την δημιουργία μιας εύρυθμης εσωτερικής αγοράς για τις δευτερογενείς πρώτες ύλες, η Επιτροπή:

- Θα αξιολογήσει την προοπτική ανάπτυξης επιπρόσθετων κριτηρίων αποχαρακτηρισμού αποβλήτων για συγκεκριμένες ροές αποβλήτων σε επίπεδο ΕΕ και θα υποστηρίξει διασυνοριακές πρωτοβουλίες συνεργασίας για τον εναρμονισμό εθνικών κριτηρίων αποχαρακτηρισμού αποβλήτων και παραπροϊόντων
- Θα ενισχύσει του ρόλου της προτυποποίησης με βάση τα αποτελέσματα της συνεχούς αξιολόγησης σε εθνικό, Ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο
- Θα αξιολογήσει τη βιωσιμότητα της ανάπτυξης ενός παρατηρητηρίου αγοράς για κύρια δευτερογενή υλικά

[19] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ (ΕΕ) 2019/1009 για τη θέσπιση κανόνων σχετικά με τη διάθεση προϊόντων λίπανσης της ΕΕ στην αγορά και για την τροποποίηση των κανονισμών (ΕΚ) αριθ. 1069/2009 και (ΕΚ) αριθ. 1107/2009 και την κατάργηση του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 2003/2003

2.3.3 Τομέας προτεραιότητας: Πλαστικά

Η χρήση των πλαστικών στην ΕΕ αυξάνεται σταθερά, όμως την ίδια στιγμή λιγότερο από το 25% των συλλεγόμενων πλαστικών αποβλήτων ανακυκλώνεται και περίπου 50% οδηγείται για ταφή. Το Σχέδιο Δράσης αναγνωρίζει ότι είναι απαραίτητη η ανάπτυξη εξυπνότερων συστημάτων χωριστής συλλογής και πιστοποίησης για την εκτροπή των ανακυκλώσιμων πλαστικών από τους χώρους ταφής και τις μονάδες καύσης. Επίσης, η παρουσία επικίνδυνων χημικών πρόσθετων μπορεί να δημιουργήσει τεχνικές δυσκολίες ενώ οι νέοι τύποι των πλαστικών εγείρει νέα ερωτήματα. Από την άλλη πλευρά, η καινοτομία στα πλαστικά μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην κυκλική οικονομία με την καλύτερη διατήρηση των τροφίμων, την αύξηση της ανακυκλωσιμότητας των πλαστικών ή τη μείωση του βάρους των υλικών που χρησιμοποιούνται στα οχήματα.

Για την αντιμετώπιση αυτών των σύνθετων και σημαντικών ζητημάτων, η Επιτροπή προετοίμασε μια Στρατηγική για τα πλαστικά λαμβάνοντας υπόψη όλη την εφοδιαστική αλυσίδα και όλο τον κύκλο ζωής τους.

Επίσης η Επιτροπή προτείνει μέσω των αναθεωρημένων νομοθετικών προτάσεων για τα απόβλητα, πιο φιλόδοξους στόχους για την ανακύκλωση των πλαστικών υλικών συσκευασίας.

2.3.4 Τομέας προτεραιότητας: Βιομάζα και προϊόντα βιολογικής προέλευσης

Στο Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική οικονομία αναγνωρίζεται η συνέργεια με την Στρατηγική της βιοοικονομίας, καθώς η βιομάζα και τα προϊόντα βιολογικής προέλευσης μπορούν να ανακυκλωθούν σύμφωνα με το «βιολογικό» κύκλο της κυκλικής οικονομίας (βλ. Σχήμα 24). Τα προϊόντα βιολογικής προέλευσης παρουσιάζουν επίσης πλεονεκτήματα σε σχέση με την ανανεωσιμότητά τους, τη βιοαποδομησιμότητά τους ή την ικανότητά τους για λιπασματοποίηση.

Για το λόγο αυτό η Επιτροπή δεσμεύεται να προωθήσει μια σειρά μέτρων για την αποδοτική χρήση των πόρων βιολογικής προέλευσης, συμπεριλαμβανομένης της έκδοσης οδηγού βέλτιστων πρακτικών για τη διαδοχική χρήση των ανανεώσιμων πόρων μέσω της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης, σύμφωνα με την ιεράρχηση των μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων της ΕΕ. Επίσης, τονίζεται και εδώ ότι όσον αφορά τη χρήση βιολογικών πόρων πρέπει να εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις κύκλου ζωής καθώς και η βιώσιμη άντλησή τους.

Στο πλαίσιο αυτό, ανακοινώνεται μέσα από το Σχέδιο Δράσης ότι θα εξεταστεί η συνεισφορά της Στρατηγικής για τη Βιοοικονομία (2012) στην κυκλική οικονομία και ότι θα ενημερωθεί εφόσον απαιτείται, το οποίο και έγινε τρία χρόνια αργότερα, το 2018.

Αναγνωρίζεται το δυναμικό του τομέα των βιοπροϊόντων για καινοτομία σε νέα υλικά, χημικά και διεργασίες τα οποία μπορούν να αποτελέσουν ένα αναπόσπαστο μέρος της κυκλικής οικονομίας, καθώς και ότι η υλοποίηση του δυναμικού αυτού εξαρτάται από την επένδυση σε ολοκληρωμένα βιοδιϋλιστήρια. Επιπλέον, η Επιτροπή ανακοίνωσε ότι θα προωθήσει συνέργειες με την κυκλική οικονομία κατά τη διερεύνηση της βιωσιμότητας της βιοενέργειας στην ΕΕ.

Τέλος, προβλέπει τη διασφάλιση της χωριστής συλλογής των βιοαποβλήτων μέσα από την αναθεώρηση της Οδηγίας 2008/98 για τα απόβλητα, και προσδιορίζει μέτρα σε εθνικό επίπεδο τα οποία μπορούν να έχουν θετική επίδραση, όπως η Διευρυμένη Ευθύνη Παραγωγού για τα έπιπλα ή τα ξύλινα απόβλητα συσκευασίας και η χωριστή συλλογή των αποβλήτων ξύλου.

Το Νέο Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία (2020) συνεχίζει και ενισχύει την υποστήριξη στους βιολογικούς πόρους ως κύρια τροφοδότηση της οικονομίας στην ΕΕ και αναγνωρίζει ότι θα διαδραματίσουν ακόμα πιο σημαντικό ρόλο στο μέλλον. Η Επιτροπή θα στοχεύσει στην διασφάλιση της βιωσιμότητας των ανανεώσιμων υλικών βιολογικής προέλευσης και μέσω της Στρατηγικής Βιοοικονομίας.

2.4 Κλιματική αλλαγή

2.4.1 Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή

Η Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) είναι μια διεθνής περιβαλλοντική συνθήκη η οποία ήταν ανοιχτή προς υπογραφή από τον Ιούνιο του 1992 και για ένα χρόνο. Η Σύμβαση τέθηκε σε ισχύ το 1994 αφού επικυρώθηκε από επαρκή αριθμό χωρών. Μέχρι τότε, η Σύμβαση είχε συγκεντρώσει 166 υπογραφές. Η Ελλάδα επικύρωσε την Σύμβαση με το Νόμο 2205/1994 (ΦΕΚ 60/Α/15-4-1994). Μέχρι στιγμής η Σύμβαση έχει 197 μέλη (196 χώρες συν την Ευρωπαϊκή Ένωση), τα οποία έχουν επικυρώσει τη Σύμβαση.

Ο στόχος της Σύμβασης είναι «η σταθεροποίηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα σε επίπεδο ικανό να αποτρέψει την επικίνδυνη ανθρωπογενή παρεμβολή στο κλιματικό σύστημα». Καθώς αναγνωρίζεται ότι οι βιομηχανοποιημένες χώρες είναι η πηγή των περισσότερων παρελθοντικών και υφιστάμενων εκπομπών ΑΦΘ, η μεγαλύτερη ευθύνη για μείωση των εκπομπών επιμερίζεται σε αυτές. Αυτές οι χώρες περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Ι και ανήκουν στον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (Organization for Economic Cooperation and Development, OECD). Οι χώρες αυτές είχαν ως στόχο να μειώσουν τις εκπομπές τους στα επίπεδα του 1990 έως το 2000, εκ των οποίων κάποιες τον πέτυχαν. Επίσης, οι βιομηχανοποιημένες χώρες συμφώνησαν να υποστηρίξουν δράσεις αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής σε αναπτυσσόμενες χώρες παρέχοντας οικονομική βοήθεια, πέρα από τη βοήθεια που παρείχαν μέχρι τότε.

Η Σύμβαση θέτει μη δεσμευτικά όρια εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για τις επιμέρους χώρες αλλά προβλέπει ότι μπορούν να συμφωνηθούν ειδικές διεθνείς συνθήκες (πρωτόκολλα ή συμφωνίες) προκειμένου να προσδιοριστούν περαιτέρω δράσεις για την υλοποίηση του στόχου της Σύμβασης.

Τα μέλη της Σύμβασης συναντώνται ετησίως από το 1995 στις Διασκέψεις των Μελών (Conference of the Parties, COP) για να αξιολογήσουν την πρόοδο σχετικά με την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (UNFCCC[20]).

Το 1997 υιοθετήθηκε το Πρωτόκολλο του Κιότο, στο πλαίσιο της Σύμβασης-Πλαίσιο για την κλιματική αλλαγή, ωστόσο δεν τέθηκε σε ισχύ νωρίτερα από το 2005. Στην παρούσα φάση, το Πρωτόκολλο του Κιότο έχει 192 μέλη.

Το Πρωτόκολλο βασίζεται στις αρχές και τις διατάξεις της Συνθήκης και ακολουθεί τη δομή με τα παραρτήματα. Θέτει δεσμευτικούς στόχους μόνο για τις ανεπτυγμένες χώρες και ορίζει μεγαλύτερα βάρη για αυτές με βάση την «αρχή της κοινής αλλά διαφοροποιημένης υπευθυνότητας και των αντίστοιχων ικανοτήτων». Στο Παράρτημα Β, το Πρωτόκολλο ορίζει δεσμευτικούς στόχους μείωσης των εκπομπών για 36 βιομηχανοποιημένες χώρες και την Ευρωπαϊκή Ένωση. Συνολικά αυτοί οι στόχοι

20 UNFCCC, n.d. What is the United Nations Framework Convention on Climate Change? Available at: https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change

αθροίζουν σε κατά μέσο όρο 5% μείωση των εκπομπών σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 την περίοδο 2008-2012, η οποία αποτελεί την πρώτη περίοδο δέσμευσης. Το Πρωτόκολλο καλύπτει έξι αέρια του θερμοκηπίου (διοξείδιο του άνθρακα CO_2, μεθάνιο CH_4, υποξείδιο του αζώτου N_2O, υδροφθοράνθρακες HFC, υπερφθοράνθρακες PFC και εξαφθοριούχο θείο SF_6).

Η Ε.Ε. υπέγραψε το Πρωτόκολλο τον Απρίλιο του 1998, παράλληλα με τα υπόλοιπα Κράτη Μέλη της Ε.Ε. και την Ελλάδα και στη συνέχεια το 2002 όλα τα Κράτη-Μέλη της ΕΕ κύρωσαν το Πρωτόκολλο. Η Ελλάδα το κύρωσε με το Νόμο 3017/2002 (ΦΕΚ Α'117). Σύμφωνα με το Πρωτόκολλο, η ΕΕ και τα Κράτη-Μέλη είχαν ως στόχο τη συνολική μείωση των εκπομπών κατά 8% κατά τη περίοδο 2008-2012 σε σύγκριση με τις εκπομπές του έτους βάσης (1990). Ο αντίστοιχος στόχος για την Ελλάδα ήταν ο περιορισμός της αύξησης των εκπομπών της στο +25% για το διάστημα 2008-2012, προκειμένου να συνεισφέρει στο κοινό στόχο της ΕΕ. Οι ΗΠΑ αν και υπέγραψαν αρχικά το Πρωτόκολλο, δεν το επικυρώσαν καθώς απορρίφθηκε από την Γερουσία. Επίσης, ο Καναδάς αποχώρησε από το Πρωτόκολλο το 2011.

Παράλληλα το Πρωτόκολλο δεσμεύει τα μέλη του σε εφαρμογή ή υιοθέτηση πολιτικών και μέτρων για την επίτευξη των στόχων, σύμφωνα με τις εθνικές συνθήκες κάθε κράτους. Περιλαμβάνει και ενδεικτικό κατάλογο συγκεκριμένων μέτρων που μπορούν να εφαρμοσθούν από τα Κράτη-Μέρη. Ενώ προβλέπει την εγκαθίδρυση ενός αυστηρού καθεστώτος συμμόρφωσης.

Το Δεκέμβριο του 2012, υιοθετήθηκε στη Ντόχα του Κατάρ η Τροποποίηση της Ντόχα στο Πρωτόκολλο του Κιότο, η οποία προέβλεπε μια δεύτερη περίοδο δέσμευσης για το 2013-2020. Κατά την περίοδο αυτή προβλεπόταν μια μείωση τουλάχιστον 18% των εκπομπών ΑΦΘ σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Ωστόσο, η τροποποίηση αυτή δεν τέθηκε σε ισχύ καθώς δεν συγκέντρωσε τον απαραίτητο αριθμό των 144 επικυρώσεων από τα μέλη, καθώς μέχρι το Φεβρουάριο του 2020 μόνο 137 μέλη την είχαν επικυρώσει. Από τα 37 μέλη με δεσμευτικές υποχρεώσεις, 34 την είχαν επικυρώσει (UNFCCC[21]).

Η ΕΕ,τα Κράτη Μέλη και η Ισλανδία δεσμεύτηκαν για την 2η περίοδο να πετύχουν μαζί μια μείωση 20% στις συνολικές τους εκπομπές ΑΦΘ μέχρι το 2020 σε σχέση με το 1990.

Το 2015, κατά την 21η Διάσκεψη των Μελών (COP21) στο Παρίσι, τα Μέλη στο UNFCCC έφτασαν σε μια ιστορική συμφωνία για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και για την επιτάχυνση των δράσεων και των επενδύσεων που απαιτούνται για ένα βιώσιμο μέλλον χαμηλού άνθρακα. Η Συμφωνία του Παρισιού βασίζεται στη Σύμβαση και για πρώτη φορά ενώνει όλα τα έθνη κάτω από ένα κοινό σκοπό για την ανάληψη φιλόδοξων προσπαθειών για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής περιορίζοντας την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας αρκετά κάτω από τους 2°C σε σχέση με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα και επιδιώκοντας την περαιτέρω μείωση της αύξησης στους 1.5°C. Επιπρόσθετα, η Συμφωνία στοχεύει στην ενδυνάμωση της ικανότητας προσαρμογής στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, με ενισχυμένη στήριξη προς τις αναπτυσσόμενες χώρες για να το επιτύχουν από την πλευρά τους.

Η Συμφωνία του Παρισιού τέθηκε σε ισχύ το Νοέμβριο του 2016, ένα μήνα μετά την επικύρωσή της από τουλάχιστον 55 Μέλη της Σύμβασης τα οποία παράγουν αθροιστικά τουλάχιστον 55% των συνολικών παγκοσμίων εκπομπών ΑΦΘ. Μέχρι σήμερα, 189 από τα 197 Μέλη της Σύμβασης έχουν επικυρώσει τη Συμφωνία, ενώ το Ιράν και η Τουρκία είναι οι μόνες χώρες που εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες ΑΦΘ και δεν είναι μέλη (UNFCCC[22]).

21 UNFCC, n.d. What is the Kyoto Protocol? Available at https://unfccc.int/kyoto_protocol

22 UNFCC, n.d. What is the Paris Agreement? Available at https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement

Ευρωπαϊκή πολιτική για το κλίμα και την ενέργεια

Σε συνέχεια της 12ης Διάσκεψης των Μελών του UNFCCC (COP12) και της 2ης Συνάντησης των Μελών του Πρωτόκολλου του Κυότο (MOP2) στο Ναϊρόμπι της Κένυα το 2006, κατά τις οποίες συζητήθηκε το πλαίσιο της κλιματικής πολιτικής μετά το 2012, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε το 2007 μια ανακοίνωση προς το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο για τον περιορισμό της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας στους 2°C και την πορεία της ΕΕ για το 2020 αλλά και μετά (COM(2007) 2 final)[23].

2.4.2 Δέσμη μέτρων ΕΕ για το κλίμα και την ενέργεια για το 2020

Το 2008, η Επιτροπή ανακοίνωσε τους στόχους που αποφάσισε το Συμβούλιο μέσα από τη στρατηγική «20 20 έως το 2020, Η ευκαιρία της Ευρώπης για την κλιματική αλλαγή»[24]. Συγκεκριμένα αποφασίστηκε ότι ανεξάρτητα από την επίτευξη παγκόσμιας συμφωνίας για τους στόχους μείωσης των εκπομπών ΑΦΘ μετά το 2012, η Ευρώπη πρέπει να δεσμευτεί να επιτύχει φιλόδοξους στόχους και να αποτελέσει παράδειγμα σε παγκόσμιο επίπεδο.

Οι βασικοί στόχοι που τέθηκαν από το Συμβούλιο για το 2020 ήταν:

- Μείωση τουλάχιστον 20% των εκπομπών ΑΦΘ σε σχέση με τα επίπεδα του 1990
- 20% συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην κατανάλωση ενέργειας
- 20% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης

Μεταξύ των μέτρων που τέθηκαν για την υλοποίηση των ανωτέρω στόχων ήταν:

Μείωση εκπομπών ΑΦΘ:

Η ανανέωση του Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών (Emissions Trading System, ETS) ώστε να λαμβάνει υπόψη και άλλα ΑΦΘ εκτός από το CO_2 και η αντικατάσταση των εθνικών σχεδίων κατανομής εκπομπών από σχήματα επιμερισμού σε Ευρωπαϊκό επίπεδο. Ο στόχος για τους τομείς που καλύπτονται από το ETS (μονάδες μεγάλης κλίμακας που δραστηριοποιούνται στους τομείς παραγωγής ενέργειας και βιομηχανίας, τομέας των αερομεταφορών) ήταν η μείωση των εκπομπών κατά 21% έως το 2020, σε σχέση με τα επίπεδα του 2005.

Η επέκταση των μέτρων μείωσης των ΑΦΘ σε κλάδους που δεν καλύπτονται από το ETS, δεδομένου ότι το τελευταίο καλύπτει μόνο το 45% των εκπομπών ΑΦΘ της ΕΕ. Αυτοί οι τομείς είναι τα κτίρια, οι μεταφορές (εκτός των αεροπορικών), η γεωργία, η διαχείριση αποβλήτων και οι βιομηχανικές μονάδες που είναι κάτω από το όριο του ETS. Ο στόχος για τους τομείς αυτούς ήταν η μείωση των εκπομπών κατά 10% σε επίπεδο ΕΕ έως το 2020, σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, με συγκεκριμένους στόχους για κάθε χώρα (-4% για την Ελλάδα). Αυτό υλοποιήθηκε με την Απόφαση της ΕΕ για τον Επιμερισμό των προσπαθειών μείωσης των εκπομπών ΑΦΘ στα κράτη μέλη της ΕΕ (Effort Sharing Decision 406/2009/EC).

Αύξηση μεριδίου ανανεώσιμης ενέργειας:

Για την προώθηση του στόχου για τις ανανεώσιμες πηγές, η Επιτροπή εξέδωσε την Οδηγία 2009/28/ΕΕ (Renewable Energy Directive, RED) με την οποία ορίζει επιμέρους στόχους για κάθε χώρα της ΕΕ σχετικά με το μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας το 2020 (για την Ελλάδα ο στόχος είναι 18% ενώ το 2005 ήταν 6.9%).

[23] COM(2007) 2 final. Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius The way ahead for 2020 and beyond
[24] COM(2008) 30 final 20 20 by 2020 Europe's climate change opportunity

Επίσης, αναγνωρίζοντας τη σημαντική συνεισφορά των μεταφορών στη συνολική κατανάλωση ενέργειας, η Οδηγία ορίζει το κατώτερο όριο του 10% για το μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε όλες τις μορφές μεταφοράς το 2020, για όλες τις χώρες τις ΕΕ. Επιπρόσθετα, ορίζει κριτήρια αειφορίας για την ενέργεια που προέρχεται από βιοκαύσιμα και βιορευστά, προκειμένου να προσμετρώνται στους εθνικούς στόχους. Τα κριτήρια αυτά ορίζουν ότι από τον Απρίλιο του 2013 πρέπει να επιτυγχάνεται τουλάχιστον 35% μείωση των εκπομπών ΑΦΘ από τον κύκλο ζωής των καυσίμων αυτών σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα αναφοράς (βενζίνη και πετρέλαιο για την περίπτωση των βιοκαυσίμων). Από 1/2017 η μείωση αυτή πρέπει να είναι τουλάχιστον 50% και από 1/2018 πρέπει να είναι τουλάχιστον 60% για εγκαταστάσεις των οποίων η παραγωγή ξεκίνησε από 1/2017 και μετά. Την ίδια στιγμή, η Οδηγία για την Ποιότητα των καυσίμων 2009/30/ΕΕ (Fuel Quality Directive) ορίζει ως στόχο τη σταδιακή μείωση κατά 6% της έντασης ΑΦΘ κύκλου ζωής των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στις οδικές μεταφορές και σε κινητά μηχανήματα έως το 2020, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες εκπομπές από το μέσο όρο των ορυκτών καυσίμων το 2010. Οι Οδηγίες αυτές μεταφέρθηκαν στο Ελληνικό δίκαιο το 2012 (Νόμος 4062/2012), ενώ οι απαιτήσεις για τη συμμόρφωση με τα κριτήρια αειφορίας τέθηκαν το 2016.

Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης:

Η Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση 2012/27/ΕΕ θέτει μια σειρά από δεσμευτικά μέτρα για να βοηθήσει την ΕΕ να επιτύχει το στόχο ενεργειακής απόδοσης για το 2020. Με την Οδηγία αυτή προβλέπεται όλες οι χώρες της ΕΕ να χρησιμοποιούν την ενέργεια πιο αποδοτικά σε όλα τα στάδια της ενεργειακής αλυσίδας, συμπεριλαμβανομένων της παραγωγής ενέργειας, της μεταφοράς, της διανομής και της τελικής κατανάλωσης.

2.4.3 Πλαίσιο πολιτικής ΕΕ για το κλίμα και την ενέργεια από το 2020 έως το 2030

Το 2014, η Επιτροπή εξέδωσε την ανακοίνωση «Ένα πλαίσιο πολιτικής για το κλίμα και την ενέργεια από το 2020 έως το 2030»[25], στην οποία αρχικά γίνεται ανασκόπηση της προόδου των υφιστάμενων πολιτικών για την ενέργεια και το κλίμα για τα 2020, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Οι εκπομπές ΑΦΘ το 2012 μειώθηκαν κατά 18% σε σχέση με τις εκπομπές το 1990 και αναμένονται να μειωθούν περαιτέρω κατά 24% και 32% έως το 2020 και το 2030 αντίστοιχα, σε σχέση με το 1990.
- Το μερίδιο της ανανεώσιμης ενέργειας αυξήθηκε στο 13% το 2012 της τελικής κατανάλωσης ενέργειας και αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω στο 21% το 2020 και 24% το 2030.

Αναγνωρίζεται ότι παρόλο που φαίνεται να είναι ικανοποιητική η πρόοδος επίτευξης των στόχων προς το 2020, είναι απαραίτητο να υπάρξει δέσμευση για περαιτέρω μειώσεις των εκπομπών ΑΦΘ σε συμφωνία και με την ανακοίνωση της ΕΕ «Χάρτης πορείας για μια ανταγωνιστική, χαμηλού άνθρακα οικονομία το 2050»[26], αλλά και να γίνει αυτό έγκαιρα για τις επερχόμενες διαπραγματεύσεις για μια παγκόσμια συμφωνία για το κλίμα.

Το πλαίσιο για την ενέργεια και την κλίμα για την περίοδο 2020-2030, σύμφωνα με την Ανακοίνωση[25] προβλέπει την αύξηση των στόχων σε σχέση με τους αντίστοιχους για το 2020. Στη συνέχεια, το 2018

[25] COM(2014) 15 final A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030
[26] COM(2011) 112 A Roadmap for moving to a competitive, low-carbon economy in 2050

ορισμένοι στόχοι αυξήθηκαν περαιτέρω, λαμβάνοντας υπόψη τις νέες δεσμεύσεις της ΕΕ για το κλίμα σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά και τις εξελίξεις σε Ευρωπαϊκό επίπεδο.

Ειδικότερα οι στόχοι για το 2030 διαμορφώθηκαν ως εξής:

- Τουλάχιστον 40% μείωση των εκπομπών ΑΦΘ έως το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990
- Τουλάχιστον 27% συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην κατανάλωση ενέργειας έως το 2030. Ο στόχος αυτός αυξήθηκε στο 32% το 2018.
- Τουλάχιστον 27% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης έως το 2030. Ο στόχος αυτός αυξήθηκε στο 32.5% το 2018.

Μεταξύ των μέτρων που τέθηκαν για την υλοποίηση των ανωτέρω στόχων ήταν:

Μείωση εκπομπών ΑΦΘ:

Προβλέπεται ότι ο στόχος αυτός θα μοιραστεί μεταξύ του Συστήματος Εμπορίας Ρύπων (ETS) και των τομέων που δεν καλύπτονται από το ETS. Συγκεκριμένα ορίζεται ότι απαιτείται μείωση 43% των εκπομπών ΑΦΘ το 2030 από τους τομείς του ETS και 30% από τους τομείς εκτός ETS, σε σχέση με το 2005. Ο δεύτερος στόχος επιμερίστηκε στα Κράτη Μέλη σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΕ) 2018/842[27], ο οποίος και ορίζει για την Ελλάδα τον αντίστοιχο εθνικό δεσμευτικό στόχο μείωσης κατά 16%. Το 2019, η Επιτροπή με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (βλ. ενότητα 2.5) προβλέπει την περαιτέρω αύξηση του Ευρωπαϊκού στόχου από 40% σε τουλάχιστον 50% και προς το 55%.

Αύξηση μεριδίου ανανεώσιμης ενέργειας:

Θεωρείται ότι από μόνος του ο στόχος μείωσης των εκπομπών ΑΦΘ, μπορεί να βοηθήσει στην επίτευξη μεγαλύτερου μεριδίου ανανεώσιμης ενέργειας στη ΕΕ. Επομένως δεν τίθενται νέοι στόχοι στο αρχικό (2014) πλαίσιο για την περίοδο 2020-2030, όσον αφορά την ανανεώσιμη ενέργεια ή την ένταση ΑΦΘ των καυσίμων μεταφορών μετά το 2020. Ωστόσο, διακρίνονται κάποια θέματα τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη στην επόμενη αναθεώρηση της σχετικής νομοθεσίας, όπως η διακοπή της στήριξης των βιοκαυσίμων 1ης γενιάς (συμβατικά βιοκαύσιμα), λόγω των εκπομπών που προκύπτουν από την έμμεση αλλαγή χρήσης γης για την καλλιέργειά τους, καθώς και η προώθηση ενός μίγματος εναλλακτικών καυσίμων στον τομέα των μεταφορών, τα οποία αναφέρονται ως προηγμένα (advanced) βιοκαύσιμα (ή βιοκαύσιμα 2ης και 3ης γενιάς) (για περισσότερες πληροφορίες βλ. ενότητα 3.1).

Στην κατεύθυνση αυτή, εκδίδεται το 2015 η Οδηγία (ΕΕ) 2015/1513 για την έμμεση αλλαγή χρήσης γης (Indirect Land Use Change, ILUC), η οποία τροποποιεί την Οδηγία για την Ανανεώσιμη Ενέργεια 2009/28/ΕΕ, προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα ανωτέρω. Η νέα Οδηγία θέτει ανώτατο όριο για τα βιοκαύσιμα 1ης γενιάς 7% όσον αφορά τη συνεισφορά τους στη συνολική κατανάλωση ενέργειας για τις μεταφορές το 2020. Ειδικότερα, τα βιοκαύσιμα 1ης γενιάς περιλαμβάνουν σύμφωνα με την Οδηγία, τα βιοκαύσιμα που παράγονται από σιτηρά και άλλες καλλιέργειες πλούσιες σε άμυλο, σάκχαρα και έλαια, καθώς και από φυτά που καλλιεργούνται σε γεωργική γη κυρίως για ενεργειακούς σκοπούς.

Από την άλλη πλευρά, ένας ενδεικτικός αλλά μη δεσμευτικός υπο-στόχος 0.5% ορίζεται όσον αφορά τη συνεισφορά των βιοκαυσίμων 2ης γενιάς στις μεταφορές, ενώ παράλληλα ορίζεται ότι το ενεργειακό τους περιεχόμενο θα προσμετράται διπλά στο στόχο του 10% για τα ανανεώσιμα καύσιμα στις μεταφορές (της Οδηγίας RED).

[27] Regulation (EU) 2018/842 - Binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030 contributing to climate action to meet commitments under the Paris Agreement and amending Regulation (EU) No 525/2013

Μετά τη Συμφωνία του Παρισιού, η Επιτροπή εξέδωσε την Ανακοίνωση «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους»[28], με την οποία διατυπώθηκε η πρόθεση να τεθούν πιο φιλόδοξοι στόχοι για την ανανεώσιμη ενέργεια προκειμένου η Ευρώπη να συνεχίσει να αποτελεί παγκόσμιο ηγέτη στον τομέα αυτό, αλλά και γενικότερα, για να βοηθήσει την Ευρώπη να τηρήσει τις δεσμεύσεις της προς τη Συμφωνία του Παρισιού για μείωση των εκπομπών ΑΦΘ. Στο πλαίσιο αυτό, τέθηκε σε ισχύ στα τέλη του 2018 η αναθεωρημένη Οδηγία (ΕΕ) για την Ανανεώσιμη Ενέργεια 2018/2001 (REDII), η οποία αντικατέστησε την Οδηγία 2009/28.

Η νέα Οδηγία αυξάνει το στόχο του μεριδίου ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στη συνολική κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ σε τουλάχιστον 32% το 2030, ενώ αφήνει ανοιχτό το ενδεχόμενο περαιτέρω αύξησής του το 2023, εφόσον αυτό κριθεί απαραίτητο. Αυτός ο στόχος ωστόσο δεν μεταφράζεται σε επιμέρους δεσμευτικούς στόχους για κάθε Κράτος Μέλος. Αντίθετα, προβλέπεται ότι τα Κράτη Μέλη θα κοινοποιούν τη συνεισφορά τους στην επίτευξη του Ευρωπαϊκού στόχου, μέσω των ενοποιημένων εθνικών σχεδίων για την ενέργεια και το κλίμα, όπως προβλέπεται από το νέο Κανονισμό (ΕΕ) 2018/1999 για τη Διακυβέρνηση της Ενεργειακής Ένωσης και της Δράσης για το Κλίμα.

Η Οδηγία 2018/2001, αυξάνει το ελάχιστο ποσοστό ανανεώσιμης ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας στον τομέα των μεταφορών σε 14% έως το 2030 (από 10% για το 2020). Όσον αφορά τα βιοκαύσιμα, η Οδηγία ορίζει δεσμευτικό στόχο για τη συνεισφορά των προηγμένων βιοκαυσίμων και του βιοαερίου στο ελάχιστο ποσοστό ανανεώσιμης ενέργειας στις μεταφορές, τουλάχιστον 0.2% το 2022, 1% το 2025 και 3.5% το 2030, ενώ το ενεργειακό τους περιεχόμενο συνεχίζει να προσμετράται διπλά στο στόχο. Επομένως, ο στόχος αυτός είναι πλέον δεσμευτικός και όχι προαιρετικός, όπως ήταν μέχρι πρότινος. Τέλος, ορίζει ότι η εξοικονόμηση εκπομπών ΑΦΘ από τη χρήση ανανεώσιμων υγρών και αέριων καυσίμων μεταφορών μη-βιολογικής προέλευσης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 70% από το 2021.

Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης:

Το 2018, σε συνέχεια της Ανακοίνωσης «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους»[28], εκδόθηκε η νέα τροποποιητική Οδηγία για την Ενεργειακή Απόδοση (2018/2002) προκειμένου να συμπεριληφθεί το πλαίσιο πολιτικής για το 2030 και μετά. Το κύριο στοιχείο αυτής της Οδηγίας είναι αύξηση του στόχου σε 32.5% για το 2030, σε σχέση με τις προβλέψεις του 2007 για το μέλλον, ενώ αφήνει ανοιχτό το ενδεχόμενο περαιτέρω αύξησής του το 2023, εφόσον αυτό κριθεί απαραίτητο.

Σχετικά με το νέο Κανονισμό 2018/1999, αυτός έχει ως στόχο την καθιέρωση ενός μηχανισμού διακυβέρνησης για την υλοποίηση στρατηγικών και μέτρων που έχουν σκοπό την επίτευξη των στόχων της Ενεργειακής Ένωσης, των στόχων για την ενέργεια και το κλίμα για το 2030, καθώς και των μακροπρόθεσμων δεσμεύσεων μείωσης εκπομπών ΑΦΘ σύμφωνα με τη Συμφωνία του Παρισιού.

2.4.4 Μακροπρόθεσμη στρατηγική ΕΕ για το 2050

Το Νοέμβρη του 2018 η Επιτροπή εξέδωσε μια στρατηγική με τίτλο « Ένας καθαρός πλανήτης για όλους - Ένα Ευρωπαϊκό στρατηγικό μακροπρόθεσμο όραμα για μια ευημερούσα, σύγχρονη, ανταγωνιστική και κλιματικά ουδέτερη οικονομία»[29]. Η στρατηγική αυτή βγήκε προκειμένου να προτείνει δραστικές και άμεσες λύσεις στις ανησυχητικές κλιματικές εξελίξεις που δημοσιεύτηκαν το 2018 από την Ειδική Έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC, 2018).

[28] COM(2016)860 Clean Energy For All Europeans

[29] COM(2018) 773 A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy

Συγκεκριμένα στην Έκθεση αυτή παρουσιάζονται οι επιπτώσεις της αύξησης της θερμοκρασίας κατά 1.5°C πάνω από τα προ-βιομηχανικά επίπεδα και τα σχετικά μονοπάτια (pathways) εκπομπών ΑΦΘ. Η Έκθεση δείχνει ότι η ανθρωπογενής παγκόσμια θέρμανση έχει φτάσει ήδη τον 1°C πάνω από τα προ-βιομηχανικά επίπεδα και αυξάνεται με ρυθμό περίπου 0.2°C ανά δεκαετία. Εάν δεν επιταχυνθεί η κλιματική δράση, η αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας θα μπορούσε να φτάσει τους 1.5°C μεταξύ του διαστήματος 2030-2052 και σύντομα μετά το 2060 να αγγίξει τους 2°C. Ωστόσο, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αναμένεται να είναι πολύ πιο έντονες και δυσμενείς στην περίπτωση της αύξησης 2°C σε σχέση με την αύξηση 1.5°C, για αυτό τονίζεται ότι είναι σημαντικό να μειωθούν οι εκπομπές πολύ πιο δραστικά από ότι αρχικά υπολογιζόταν.

Σύμφωνα με τα σενάρια τα οποία βασίζονται στον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας στους 1.5°C, οι παγκόσμιες καθαρές ανθρωπογενείς εκπομπές CO_2 μειώνονται κατά περίπου 45% σε σχέση με τα επίπεδα του 2010 έως το 2030 και μηδενίζονται περίπου το 2050 και επιτυγχάνεται κλιματική ουδετερότητα. Αντίστοιχα, για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας κάτω από τους 2°C, οι παγκόσμιες καθαρές ανθρωπογενείς εκπομπές CO_2 μειώνονται κατά περίπου 25% σε σχέση με τα επίπεδα του 2010 έως το 2030 και μηδενίζονται περίπου το 2070. Για την επίτευξη των μηδενικών καθαρών εκπομπών, πρέπει οι όποιες εναπομείνουσες εκπομπές από κάποιους κλάδους να αντισταθμιστούν από απορρόφηση της ίδιας ποσότητας από άλλους κλάδους.

Η Έκθεση σημειώνει ότι τα σενάρια, σύμφωνα με τα οποία η παγκόσμια θέρμανση περιορίζεται στους 1.5°C, απαιτούν δραστικές αλλαγές στους τομείς της ενέργειας, χρήσης γης, αστικού σχεδιασμού και υποδομών (συμπερ. των μεταφορών και των κτιρίων) και της βιομηχανίας. Οι απαιτούμενες μεταβάσεις σίγουρα δεν έχουν προηγούμενο όσον αφορά την κλίμακα, αλλά όχι απαραίτητα όσον αφορά την ταχύτητα, ενώ προϋποθέτουν μεγάλες μειώσεις σε όλους τους κλάδους, ένα ευρύ φάσμα επιλογών πολιτικών μετριασμού των εκπομπών και μια σημαντική κλιμάκωση των επενδύσεων σε αυτές τις πολιτικές.

Σε απάντηση λοιπόν σε αυτές τις εξελίξεις, η ΕΕ με τη Στρατηγική αυτή ανακοινώνει την απόφασή της να θέσει στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, μέσω μιας κοινωνικά δίκαιης μετάβασης και με ένα οικονομικά αποτελεσματικά τρόπο. Η στρατηγική αναγνωρίζει τις ευκαιρίες και τις προκλήσεις για την επίτευξη του στόχου αυτού και θέτει την κατεύθυνση της μελλοντικής πολιτικής της ΕΕ για την ενέργεια και το κλίμα.

Η Στρατηγική περιγράφει τα κύρια σημεία των οικονομικών και κοινωνικών αλλαγών που απαιτούνται, εμπλέκοντας όλους τους τομείς της οικονομίας και της κοινωνίας. Η δραστική αυτή μετάβαση προϋποθέτει την κλιμάκωση των τεχνολογικών καινοτομιών που απαιτούνται στους τομείς της ενέργειας, των κτιρίων, των μεταφορών, της βιομηχανίας και της γεωργίας. Αυτή μπορεί να επιταχυνθεί από σημαντικά άλματα στην ψηφιοποίηση, τις πληροφορίες και τις επικοινωνίες, την τεχνητή νοημοσύνη και τη βιοτεχνολογία.

Για την επίτευξη των στόχων αυτών, η Στρατηγική εξετάζει τις διαθέσιμες επιλογές, οι οποίες βασίζονται σε υφιστάμενες, αλλά και ορισμένες φορές, σε αναδυόμενες λύσεις. Το σημείο αναφοράς των εξεταζόμενων σεναρίων περιλαμβάνει τις πολιτικές για την ενέργεια και το κλίμα για το 2030. Αυτές περιλαμβάνουν το αναθεωρημένο σύστημα εμπορίας εκπομπών, τους εθνικούς στόχους μείωσης εκπομπών, τη νομοθεσία για τη διατήρηση των εδαφών και δασών που απορροφούν το CO_2, τους στόχους για το 2030 για την ανανεώσιμη ενέργεια και την ενεργειακή απόδοση, καθώς και την προτεινόμενη νομοθεσία για τη βελτίωση των εκπομπών CO_2 από τα αυτοκίνητα και τα φορτηγά. Αυτές οι πολιτικές και οι στόχοι προβλέπεται να επιτύχουν περίπου 45% μείωση των εκπομπών έως το 2030 και 60% έως το 2050, το οποίο όμως δεν είναι αρκετά ικανοποιητικό.

Η αξιολόγηση των εναλλακτικών επιλογών υποδεικνύει ότι η υιοθέτηση αναμφιβόλως θετικών (no-regret) επιλογών όπως οι ανανεώσιμες συμπεριλαμβανομένων των βιώσιμων προηγμένων καυσίμων,

της ενεργειακής απόδοσης, της ώθησης προς την κυκλική οικονομία, μαζί με μεμονωμένες επιλογές όπως ο εξηλεκτρισμός, το υδρογόνο και τα εναλλακτικά καύσιμα ή οι νέες προσεγγίσεις για την κινητικότητα, μπορούν να οδηγήσουν σε μείωση μόνο 80% έως το 2050. Ο συνδυασμός όλων των ανωτέρω επιλογών μπορεί να μειώσει τις καθαρές εκπομπές περίπου στο 90%, αλλά κάποιες εκπομπές ΑΦΘ θα παραμένουν πάντα, ιδιαίτερα στον τομέα της γεωργίας. Η επίτευξη μηδενικών καθαρών εκπομπών απαιτεί την μεγιστοποίηση του δυναμικού των τεχνολογικών επιλογών και των επιλογών κυκλικής οικονομίας, την εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα φυσικών καταβοθρών άνθρακα, καθώς και αλλαγές στα πρότυπα κινητικότητας.

Ο δρόμος προς μια οικονομία μηδενικών εκπομπών θα μπορούσε να βασιστεί στην ανάληψη κοινής δράσης πάνω σε επτά κύριους στρατηγικούς άξονες:

1. Μεγιστοποίηση των ωφελειών της ενεργειακής απόδοσης, συμπερ. των κτιρίων μηδενικών εκπομπών
2. Μεγιστοποίηση της χρήσης ανανεώσιμων και ηλεκτρισμού
3. Καθαρή, ασφαλής και συνδεδεμένη κινητικότητα
4. Ανταγωνιστική βιομηχανία και κυκλική οικονομία
5. Βιο-οικονομία και δημιουργία δεξαμενών άνθρακα
6. Έξυπνο δίκτυο υποδομών και διασυνδέσεων
7. Δέσμευση και αποθήκευση εναπομένοντα άνθρακα

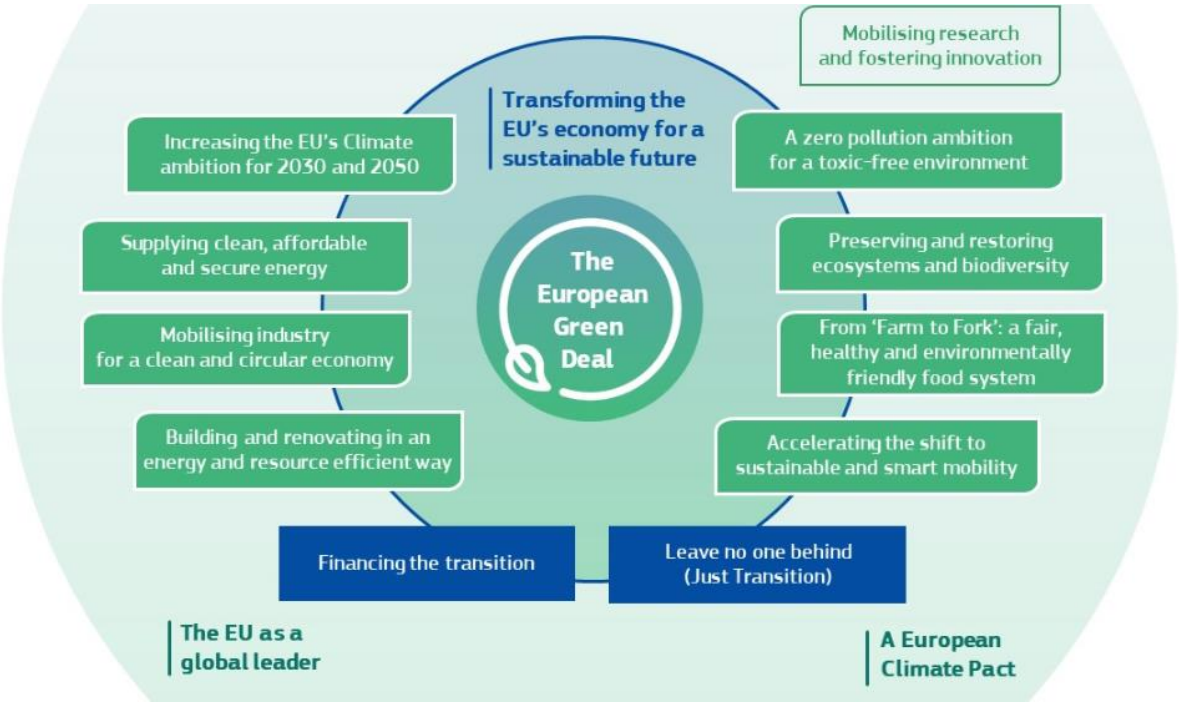
Όσον αφορά τον άξονα 3, προτείνονται κυρίως τα ηλεκτρικά οχήματα ενώ εξετάζονται και τα καύσιμα για άλλα μέσα μεταφοράς, με τα βιοκαύσιμα να προτείνονται για τις αερομεταφορές, τις θαλάσσιες μεταφορές μεγάλων αποστάσεων καθώς και τα βαρέα οχήματα.

2.5 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία

Το 2019 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε μια Ανακοίνωση με τίτλο «Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία» [30] με σκοπό τη συνολική και αποφασιστική αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και της περιβαλλοντικής υποβάθμισης, μέσα από μια νέα στρατηγική ανάπτυξης.

Ειδικότερα, η στρατηγική αυτή στοχεύει στο μετασχηματισμό της ΕΕ σε μια δίκαιη και ευημερούσα κοινωνία, με μια σύγχρονη, ανταγωνιστική και αποδοτική ως προς τη χρήση των πόρων οικονομία, όπου έχει επιτευχθεί κλιματική ουδετερότητα το 2050 και όπου η οικονομική ανάπτυξη έχει αποσυνδεθεί από την κατανάλωση πόρων. Η στρατηγική αυτή επίσης στοχεύει στην προστασία, διατήρηση και ενίσχυση του φυσικού κεφαλαίου της ΕΕ και στην προστασία της υγείας και της ευημερίας των πολιτών, ενώ παράλληλα λαμβάνει μέριμνα ώστε η μετάβαση αυτή να είναι δίκαιη και χωρίς αποκλεισμούς. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία παρέχει ένα χάρτη πορείας με δράσεις σε ένα ευρύ φάσμα πολιτικών, όπως παρουσιάζεται και στην ακόλουθη εικόνα.

[30] COM(2019) 640 final The European Green Deal



Σχήμα 27: Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία

Στη συνέχεια δίνονται περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα πεδία πολιτικής που άπτονται περισσότερο της παρούσας διατριβής, όπως ο μετριασμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τα βιώσιμα καύσιμα μεταφορών και η κυκλική οικονομία.

- Αύξηση του κλιματικού στόχου της ΕΕ για το 2030 και το 2050

Την περίοδο 1990-2018, η ΕΕ εκσυγχρόνισε και μετασχημάτισε την οικονομία της προκειμένου να αποσυνδεθεί από τις εκπομπές ΑΦΘ, με αποτέλεσμα να μειωθούν οι εκπομπές κατά 23% ενώ η οικονομία αναπτύχθηκε κατά 61%. Ωστόσο οι υφιστάμενες πολιτικές αναμένεται να μειώσουν τις εκπομπές κατά 60% έως το 2050, ενώ η Επιτροπή έχει πιο φιλόδοξους στόχους τους οποίους για να επιτύχει ετοιμάζει εντατικές δράσεις για το κλίμα για τη δεκαετία που έρχεται. Έως το καλοκαίρι του 2020 αναμένεται να παρουσιάσει ένα σχέδιο για την αύξηση του στόχου μείωσης των εκπομπών για το 2030 σε 50-55% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Στο πλαίσιο αυτό, η Επιτροπή θα αξιολογήσει και θα προτείνει την αναθεώρηση, όπου αυτή είναι απαραίτητη, της σχετικής κλιματικής πολιτικής έως το καλοκαίρι του 2021.

Σε συνέχεια του στρατηγικού μακροπρόθεσμου οράματος της ΕΕ για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050[31], η Επιτροπή προαναγγέλλει τη θέσπιση του πρώτου «Ευρωπαϊκού Κλιματικού Νόμου», ο οποίος θα κατοχυρώσει νομοθετικά το στόχο της κλιματικής ουδετερότητας για το 2050. Συγκεκριμένα, η πρόταση για το Νόμο αυτό ανακοινώθηκε το Μάρτιο του 2020[32] και προβλέπει το νομοθετικά δεσμευτικό στόχο μηδενικών καθαρών εκπομπών έως το 2050, καθώς και τα απαραίτητα βήματα για την επίτευξή του. Επίσης περιλαμβάνει μέτρα για την παρακολούθηση της προόδου σε εθνικό επίπεδο και την ανάλογη προσαρμογή των δράσεων, με αξιολόγηση της προόδου κάθε πέντε έτη.

- Επιτάχυνση της στροφής προς τη βιώσιμη και έξυπνη κινητικότητα

[31] A Clean Planet for all - A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy COM (2018) 773

[32] Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law) COM(2020) 80 final

Η Επιτροπή αναγνωρίζει ότι πρέπει να επιταχυνθεί η παραγωγή και χρήση βιώσιμων εναλλακτικών καυσίμων για μεταφορές. Στο πλαίσιο αυτό ανακοινώνεται μεταξύ άλλων ότι η Επιτροπή θα εξετάσει νομοθετικές επιλογές για την προώθηση της παραγωγής και χρήσης βιώσιμων εναλλακτικών καυσίμων στα διαφορετικά μέσα μεταφοράς.

- Κινητοποίηση της βιομηχανίας για μια καθαρή και κυκλική οικονομία

Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία θα υποστηρίξει και επιταχύνει τη μετάβαση της Ευρωπαϊκής βιομηχανίας σε ένα βιώσιμο μοντέλο ανάπτυξης χωρίς αποκλεισμούς, το οποίο μαζί με το νέο σχέδιο για την κυκλική οικονομία (2020) θα συμβάλλει στον εκσυγχρονισμό της Ευρωπαϊκής οικονομίας και θα αξιοποιήσει τις ευκαιρίες που προσφέρει η κυκλική οικονομία σε εγχώριο και παγκόσμιο επίπεδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Τα βιοκαύσιμα ως λύση στο πρόβλημα

Στο κεφάλαιο αυτό αναδεικνύονται οι ευκαιρίες και τα εμπόδια για την επιστράτευση των βιοκαυσίμων από απόβλητα στην αντιμετώπιση του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής αλλά και της διαχείρισης των αποβλήτων. Ειδικότερα, γίνεται περαιτέρω ανάλυση για τα βιοκαύσιμα όσον αφορά την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τους, τα μίγματα συμβατικών καυσίμων με βιοκαύσιμα που υπάρχουν στην αγορά και το μερίδιο τους στην αγορά. Επίσης παρουσιάζεται η εξοικονόμηση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής στον τομέα των μεταφορών λόγω της εισχώρησης των βιοκαυσίμων, ενώ στο τέλος παρουσιάζονται τα εμπόδια για την περαιτέρω εμπορική τους αξιοποίηση.

Σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28 (RED) ως βιοκαύσιμα ορίζονται τα υγρά ή αέρια καύσιμα κίνησης τα οποία παράγονται από βιομάζα, ενώ η νέα Οδηγία 2018/2001 (REDII) εξαιρεί τα αέρια καύσιμα από τον ορισμό αυτό.

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή στρατηγική για τα εναλλακτικά καύσιμα[33], μια στρατηγική προσέγγιση για την επίτευξη των μακροπρόθεσμων αναγκών για όλους τους τύπους μεταφοράς πρέπει να βασίζεται σε ένα ευρύ μίγμα εναλλακτικών καυσίμων, χωρίς να δίνεται ιδιαίτερη προτίμηση σε κάποιο συγκεκριμένο καύσιμο προκειμένου να διατηρείται τεχνολογική ουδετερότητα. Συγκεκριμένα για τα (υγρά) βιοκαύσιμα, αναγνωρίζεται ότι μπορούν να καλύψουν όλους τους τύπους μεταφορών και τις αποστάσεις, σε αντίθεση με άλλα εναλλακτικά καύσιμα.

Πίνακας 1: Κάλυψη τύπων μεταφοράς και εύρος διανυόμενης απόστασης για τα κύρια εναλλακτικά καύσιμα [33]

Fuel / Mode		Road-passenger			Road-freight			Air	Rail	Water		
Range		short	medium	long	short	medium	long			inland	short-sea	maritime
LPG		■	■	■	■	■	■			■	■	
Natural Gas	LNG	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■
	CNG	■	■	■	■	■						
Electricity		■			■				■			
Biofuels (liquid)		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Hydrogen		■	■	■	■	■			■	■		

3.1 Πρώτη ύλη

Η πρώτη ύλη για τα βιοκαύσιμα μπορεί να παραχθεί είτε από γη που έχει μετατραπεί απευθείας από άλλη χρήση γης σε γεωργική χρήση, είτε να καλλιεργηθεί σε υφιστάμενη γεωργική γη, με αποτέλεσμα να αντικαταστήσει την παραγωγή άλλης καλλιέργειας. Ειδικότερα, η αλλαγή χρήσης γης από την παραγωγή τροφίμων και ζωοτροφών σε παραγωγή καυσίμων, μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγή της ζήτησης για γεωργικά προϊόντα και τα υποκατάστατά τους στις παγκόσμιες αγορές. Αυτό μπορεί να επιφέρει αλλαγές στις τιμές αλλά και σε αλλαγή συμπεριφοράς, όπως η εντατικοποίηση της χρήσης γεωργικής γης για την αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών και η μετατροπή γης σε γεωργική γη σε κάποιο άλλο μέρος (έμμεση αλλαγή χρήσης γης) (COM(2012)595)[34]. Στην περίπτωση μάλιστα που αυτό

[33] COM(2013) 17 Clean Power for Transport: A European alternative fuels strategy
[34] COM(2012) 595 Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 98/70/EC relating to

οδηγήσει στη μετατροπή γης με υψηλό απόθεμα άνθρακα, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές εκπομπές ΑΦΘ.

Η Οδηγία 2015/1513 (ILUC) αναφέρει ότι σύμφωνα με προβλέψεις για τη ζήτηση των βιοκαυσίμων από τις Ευρωπαϊκές χώρες και εκτιμήσεις της έμμεσης αλλαγής χρήσης γης όσον αφορά την παραγωγή πρώτης ύλης για τα διαφορετικά βιοκαύσιμα[35], σχεδόν όλη η παραγωγή βιοκαυσίμων το 2020 προβλεπόταν ότι θα προέλθει από καλλιέργειες οι οποίες προορίζονται για την αγορά τροφίμων και ζωοτροφών. Επομένως θεωρείται αρκετά πιθανό ότι οι εκπομπές ΑΦΘ που σχετίζονται με την έμμεση αλλαγή χρήσης γης είναι σημαντικές και ότι θα μπορούσαν να αντισταθμίσουν τις εξοικονομήσεις εκπομπών ΑΦΘ από τα βιοκαύσιμα. Παράλληλα, αυτό είχε ήδη αρχίσει να επιφέρει αυξήσεις στις παγκόσμιες τιμές των αγαθών αυτών, επισιτιστική ανασφάλεια για τους φτωχούς, ενώ προώθησε τη δημιουργία πολύ μεγάλων αγροτεμαχίων και την εκμετάλλευση «οριακής» γης σε αναπτυσσόμενες χώρες.

Για τους ανωτέρω λόγους στο πλαίσιο της Οδηγίας ILUC θεωρήθηκε απαραίτητο να γίνει διαχωρισμός μεταξύ των ομάδων καλλιεργειών που περιέχουν έλαια, σάκχαρα καθώς και των σιτηρών και άλλων πλούσιων σε άμυλο καλλιεργειών, των οποίων η υποστήριξη για την παραγωγή βιοκαυσίμων (1ης γενιάς βιοκαύσιμα) πρέπει να περιοριστεί και να προωθηθούν άλλες καλλιέργειες οι οποίες δεν ανταγωνίζονται τις εδώδιμες καλλιέργειες.

Στην κατεύθυνση αυτή, η Οδηγία αναφέρει τα προηγμένα καύσιμα (advanced biofuels), όπως αυτά που παράγονται από απόβλητα και φύκη, τα οποία εξασφαλίζουν σημαντική μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ενώ παράλληλα ενέχουν χαμηλό κίνδυνο πρόκλησης έμμεσης αλλαγής της χρήσης γης, και δεν είναι ανταγωνιστικά απευθείας για τη χρήση γεωργικής γης για παραγωγή τροφίμων και ζωοτροφών. Συνεπώς θεωρείται σκόπιμο να ενθαρρυνθεί η περαιτέρω έρευνα, ανάπτυξη και παραγωγή τέτοιων προηγμένων βιοκαυσίμων, τα οποία επί του παρόντος δεν είναι εμπορικά διαθέσιμα σε μεγάλες ποσότητες, εν μέρει λόγω του ανταγωνισμού με τις καθιερωμένες τεχνολογίες βιοκαυσίμων 1ης γενιάς, για την εξασφάλιση δημόσιων επιδοτήσεων.

Στο Παράρτημα IX της Οδηγίας παρουσιάζεται η λίστα των προηγμένων βιοκαυσίμων, ήτοι των πρώτων υλών και των καυσίμων, των οποίων η συνεισφορά στην επίτευξη του στόχου 10% του 2020 στον τομέα των μεταφορών (Οδηγία 2009/28), θα προσμετράται διπλά όσον αφορά το ενεργειακό τους περιεχόμενο. Στον κατάλογο αυτό περιλαμβάνονται πρώτες ύλες βιομάζας από φύκη, αστικά και βιομηχανικά απόβλητα, αγροτικά και δασοκομικά προϊόντα, παραπροϊόντα, κατάλοιπα και απόβλητα, βακτήρια και δεσμευμένος άνθρακας από ανανεώσιμη ενέργεια, καθώς και ανανεώσιμα καύσιμα μη βιολογικής προέλευσης. Η πλήρης λίστα παρέχεται στη συνέχεια:

- Φύκη, εφόσον καλλιεργούνται στην ξηρά σε τεχνητές λίμνες ή φωτοβιοαντιδραστήρες.
- Κλάσματα βιομάζας των μεικτών αστικών αποβλήτων, αλλά όχι των διαχωριζόμενων οικιακών απορριμμάτων, για τα οποία ισχύουν στόχοι ανακύκλωσης σύμφωνα με την οδηγία 2008/98/ΕΚ.
- Βιολογικά απόβλητα σύμφωνα με την Οδηγία 2008/98/ΕΚ από νοικοκυριά, τα οποία συλλέγονται χωριστά σύμφωνα με την ίδια οδηγία.
- Κλάσματα βιομάζας των βιομηχανικών αποβλήτων που δεν είναι κατάλληλα για χρήση στην τροφική αλυσίδα των ανθρώπων και των ζώων.
- Άχυρο.
- Ζωική κοπριά και λυματολάσπη; Λύματα μονάδων παραγωγής φοινικέλαιου και τσαμπιά άδειων καρπών ελαιούχων φοινίκων; Πίσσα ταλλελαίου; Ακατέργαστη γλυκερίνη; Βαγάσση; Στέμφυλα σταφυλιών και οινολάσπη.

the quality of petrol and diesel fuels and amending Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources

[35] COM(2010) 811 Report on indirect land-use change related to biofuels and bioliquids

- Κελύφη καρπών; Φλοιοί; Σπάδικες αραβοσίτου χωρίς πυρήνες.
- Κλάσματα βιομάζας αποβλήτων και καταλοίπων που προέρχονται από τη δασοκομία και τις συναφείς βιομηχανίες.
- Άλλες μη εδώδιμες κυτταρινούχες ύλες (δλδ. πρώτες ύλες που αποτελούνται κυρίως από κυτταρίνη και ημικυτταρίνη και η περιεκτικότητά τους σε λιγνίνη είναι χαμηλότερη σε σχέση με αυτή των λιγνοκυτταρινούχων υλών, όπως τα κατάλοιπα φυτών που καλλιεργούνται ως τρόφιμα και ζωοτροφές, τα φυτά ενεργειακών χορτοκαλλιεργειών με χαμηλή περιεκτικότητα σε άμυλο, τα βιομηχανικά κατάλοιπα καθώς και ύλες από βιολογικά απόβλητα)
- Άλλες λιγνοκυτταρούχες ύλες (δλδ. οι ύλες που συντίθενται από λιγνίνη, κυτταρίνη και ημικυτταρίνη, όπως η βιομάζα που προέρχεται από τα δάση, οι ξυλώδεις ενεργειακές καλλιέργειες, καθώς και τα κατάλοιπα και τα λύματα των δασοπονικών βιομηχανιών), πλην των σανιδοκορμών και της πριστής ξυλείας.
- Υγρά και αέρια καύσιμα κίνησης από ανανεώσιμες πηγές μη βιολογικής προέλευσης.
- Δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα και χρήση στις μεταφορές, εάν η πηγή ενέργειας είναι ανανεώσιμη.
- Βακτήρια, εάν η πηγή ενέργειας είναι ανανεώσιμη.
- Χρησιμοποιημένα μαγειρικά έλαια.
- Ζωικά λίπη των κατηγοριών 1 και 2 σύμφωνα με τον κανονισμό (ΕΚ) αριθ. 1069/2009

Από την ανωτέρω λίστα προκύπτει ότι η αξιοποίηση των αποβλήτων για την παραγωγή βιοκαυσίμων κατέχει εξέχουσα θέση στην πολιτική προώθησης των προηγμένων βιοκαυσίμων. Η μείωση της συνεισφοράς των βιοκαυσίμων πρώτης γενιάς στο μελλοντικό μίγμα καυσίμων κίνησης, θα δημιουργήσει σημαντική ευκαιρία για την αύξηση της παραγωγής των βιοκαυσίμων δεύτερης γενιάς στην Ευρώπη και κατ'επέκταση στην Ελλάδα.

3.2 Μίγματα συμβατικών καυσίμων με βιοκαύσιμα

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή στρατηγική για τα εναλλακτικά καύσιμα[36], τα υγρά βιοκαύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας ή σε ανάμειξη με συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Αυτά περιλαμβάνουν τη βιοαιθανόλη, τη βιομεθανόλη και ανώτερες βιοαλκοόλες, το βιοντίζελ (μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων/ fatty-acid methyl ester, FAME), αμιγή φυτικά έλαια, το διμεθυλαιθέρα (dimethyl ether, DME) και οργανικές ενώσεις.

Τα κύρια βιοκαύσιμα 1ης γενιάς είναι η βιοαιθανόλη που προέρχεται από καλλιέργειες ζαχαρότευτλων και δημητριακών και χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει τη βενζίνη και το βιοντίζελ που προέρχεται κυρίως από φυτικά έλαια και χρησιμοποιείται για να αντικαταστήσει το πετρέλαιο.

Η Οδηγία 98/70/ΕΕ για την ποιότητα των καυσίμων όπως τροποποιήθηκε από τη 2009/30/ΕΕ, ορίζει σε σχέση με το περιεχόμενο των συμβατικών καυσίμων σε βιοκαύσιμο, ότι τα Κράτη Μέλη της ΕΕ θα απαιτήσουν από τους προμηθευτές να διασφαλίσουν την προμήθεια στην αγορά βενζίνης με μέγιστο περιεχόμενο αιθανόλης 5-10% μέχρι το 2013 και ότι θα διασφαλίσουν την κατάλληλη ενημέρωση των καταναλωτών σχετικά με το περιεχόμενο σε βιοκαύσιμο και με την κατάλληλη χρήση διαφορετικών μιγμάτων βενζίνης. Όσον αφορά το περιεχόμενο σε βιοκαύσιμο του πετρελαίου, ορίζει ως ανώτερο όριο στις περιβαλλοντικές προδιαγραφές συγκέντρωση 7% FAME, αλλά παράλληλα ορίζει ότι τα Κράτη Μέλη μπορούν να επιτρέψουν και μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Σημειώνεται ότι η πρόσμειξη της

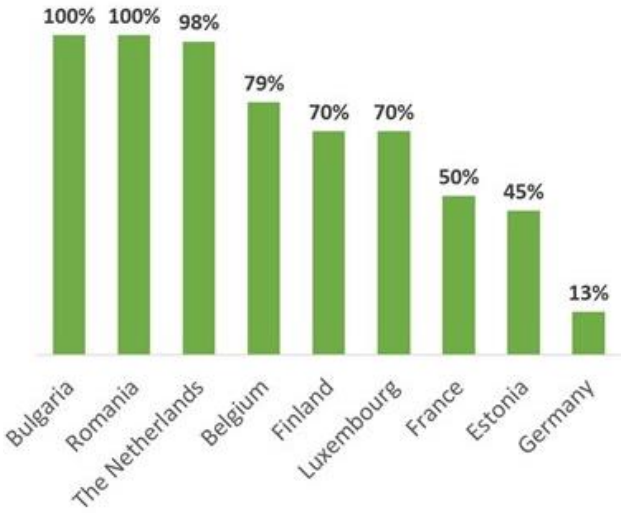
[36] COM(2013) 17 Clean Power for Transport: A European alternative fuels strategy

αιθανόλης στη βενζίνη αυξάνει την τάση των ατμών στο καύσιμο που προκύπτει και επομένως πρέπει να ελέγχεται η τάση αυτή προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι εκπομπές αέριων ρυπαντών.

Τα μείγματα βιοκαυσίμων με συμβατικά ορυκτά καύσιμα είναι συμβατά με τις υφιστάμενες υποδομές καυσίμων και τα περισσότερα οχήματα και σκάφη είναι συμβατά με χαμηλά μίγματα βενζίνης με 5- 10% περιεχόμενο σε βιοαιθανόλη (E5, E10) σύμφωνα με το πρότυπο EN228, ή, χαμηλά μίγματα ντίζελ με έως 7% (B7) περιεχόμενο σε FAME βιοντίζελ, σύμφωνα με το πρότυπο EN 14078.

Ειδικότερα για την αιθανόλη, στην Ευρώπη όλα τα βενζινοκίνητα οχήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν καύσιμα με περιεκτικότητα έως και 5% αιθανόλη και περισσότερα από 90% των οχημάτων που κατασκευάστηκαν μετά το 2000 είναι συμβατά με καύσιμα E10. Σχεδόν όλα τα οχήματα που κατασκευάστηκαν μετά το 2000 είναι συμβατά με καύσιμα E10[42]. Υψηλότερες προσμίξεις βιοκαυσίμων μπορεί να απαιτούν μικρές προσαρμογές των συστημάτων κίνησης των οχημάτων, ενώ θα πρέπει να αναπτυχθούν τα αντίστοιχα πρότυπα καυσίμων. Υψηλό περιεχόμενο αιθανόλης στο μίγμα βενζίνης, όπως τα μίγματα E85 (85% αιθανόλη), χρησιμοποιείται σε λίγες μόνο χώρες της ΕΕ σε οχήματα ευέλικτου καυσίμου (flexible fuel vehicles, FFVs) τα οποία μπορούν να χρησιμοποιήσουν επίσης χαμηλότερα μίγματα.

Στην ΕΕ, το μίγμα E5 είναι αυτό που χρησιμοποιείται από την πλειοψηφία των κρατών μελών μέχρι στιγμής, ενώ κάποιες χώρες έχουν ξεκινήσει να μεταβαίνουν στο E10. Το E10 εξαπλώνεται σταδιακά στην αγορά της ΕΕ από το 2009 και είναι διαθέσιμο σε 13 χώρες μέχρι στιγμής: Βέλγιο, Βουλγαρία, Δανία, Εσθονία, Φινλανδία, Γαλλία, Γερμανία, Ουγγαρία, Λιθουανία, Λουξεμβούργο, Ολλανδία, Ρουμανία και Σλοβακία[37]. Σε ορισμένες χώρες μάλιστα το E10 έχει εισχωρήσει 100% στην αγορά (βλ. Σχήμα 28). Στις ΗΠΑ έχουν από το 2011 αρχίσει να μεταβαίνουν στο E15 ενώ στη Βραζιλία η υποχρεωτική πρόσμιξη αιθανόλης στο μίγμα βενζίνης αυξήθηκε στο 25% από το 2013[38]. Ωστόσο, η κυκλοφορία πολλών μιγμάτων αιθανόλης-βενζίνης μπορεί να οδηγήσει σε κατακερματισμό της αγοράς, σύγχυση των καταναλωτών και αυξημένα κόστη για τη διανομή των καυσίμων [39,40].



Σχήμα 28: Μερίδιο του μίγματος E10 στην αγορά σε επιλεγμένες χώρες της ΕΕ (Πηγή: Epure[41])

37 COM(2019) 561 final Ποιότητα καυσίμων βενζίνης και ντίζελ που χρησιμοποιούνται για τις οδικές μεταφορές στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Έκθεση για το έτος 2017)

38 http://www.etipbioenergy.eu/value-chains/products-end-use/products/conventional-ethanol

39 SWD(2017) 178 final Evaluation of Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council relating to the quality of petrol and diesel fuels ('Fuel Quality Directive')

40 https://www.epure.org/about-ethanol/fuel-market/fuel-blends/

41 https://www.epure.org/about-ethanol/fuel-market/fuel-blends/

Η αιθανόλη είναι πιο ενεργειακά αποδοτική σε σχέση με τη βενζίνη. Κατεβάζει τη θερμοκρασία των κινητήρων δύο φορές περισσότερο σε σχέση με τη βενζίνη όταν ατμοποιείται και παρέχει περισσότερα οκτάνια. Ειδικότερα, η αιθανόλη έχει αξιολογηθεί με 107 οκτάνια, περισσότερα σε σχέση με αυτά της απλής βενζίνης (95) και της premium βενζίνης (98). Επιπρόσθετα ενισχύει την αντίσταση του καυσίμου στην επιβλαβή πρόωρη καύση και μειώνει την κατανάλωση καυσίμου σε βελτιστοποιημένους κινητήρες[42].

Η βιοαιθανόλη μπορεί να περιέχεται στη βενζίνη και με τη μορφή αιθέρων, όπως οι αιθυλο-τριτο-βουτυλ-αιθέρες (ETBE) και οι τεταρτ-αμυλο-αιθυλαιθέρες (TAEE). Ο ETBE παράγεται από αιθανόλη και ισοβουτυλένιο μέσω καταλυτικής αντίδρασης. Η προσθήκη ETBE βελτιώνει τα χαρακτηριστικά καύσης της βενζίνης και βελτιώνει την ατμοσφαιρική ποιότητα. Επίσης ο ETBE είναι πιο συμβατός με τους αγωγούς και τους κινητήρες σε σχέση με την αιθανόλη. Σύμφωνα με την Οδηγία 98/70, το μέγιστο προβλεπόμενο επίπεδο πρόσμιξης στη βενζίνη για τον ETBE είναι 22% για μίγματα E10 και 17% για το E5. Ο βιο-ETBE (nETBE από βιοαιθανόλη) χρησιμοποιείται εκτενώς στην ΕΕ σε συμβατικά καύσιμα και συστήματα διανομής καυσίμων, απαιτώντας ελάχιστες επενδύσεις για την προσαρμογή του τελευταίου. Μέχρι στιγμής, ο βιο-ETBE αποτελεί την πλειοψηφία της βιοαιθανόλης που προορίζεται για την αγορά βενζίνης στην ΕΕ[43].

Το 2019 ολοκληρώθηκε έρευνα που διεξήχθη για λογαριασμό της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την Προτυποποίηση – CEN (NEN, 2019) προκειμένου να εξετάσει τα κόστη και τα οφέλη από την εισαγωγή ενός μίγματος βενζίνης με υψηλότερο ποσοστό ανάμιξης βιοαιθανόλης, E20/25. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής σκοπό έχουν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη νέων προτύπων για τα καύσιμα αυτά. Το συμπέρασμα της μελέτης ήταν ότι όλα τα οχήματα που κυκλοφόρησαν μετά το 2011 θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν καύσιμα με έως 20% αιθανόλη (E20), ενώ η υφιστάμενη συμβατότητα του E25 είναι αμφισβητήσιμη. Καθώς τα περισσότερα οχήματα που κυκλοφορούν σήμερα μπορούν να χρησιμοποιήσουν E10, μπορούν να μεταβούν σε E20 με κάποια βαθμονόμηση ή με αναβαθμίσεις χαμηλού κόστους (λίγων εκατοντάδων ευρώ). Το E20 μπορεί να παραχθεί με τις υφιστάμενες υποδομές διυλιστηρίων, οι οποίες θα απαιτούσαν ελάχιστες προσαρμογές. Ωστόσο το κόστος του καυσίμου για τους καταναλωτές κυρίως εξαρτάται από τη μεταβαλλόμενη τιμή στην αγορά του πετρελαίου και της αιθανόλης, σε συνδυασμό με το φόρο που επιβάλλεται από ορισμένες χώρες. Στην παρούσα φάση η αιθανόλη κοστίζει ελαφρά περισσότερο από τη βενζίνη, αλλά πολλές χώρες δεν επιβάλλουν φόρους στα καύσιμα αιθανόλης (Horizon magazine, 2020).

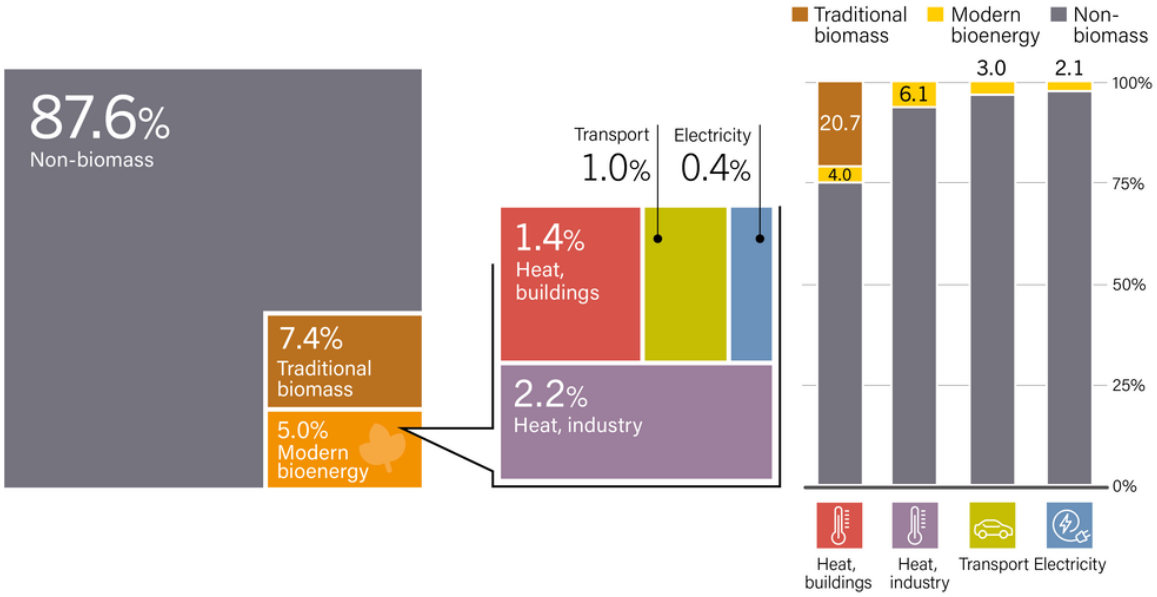
Η ανάμιξη βενζίνης υψηλών οκτανίων, ενός καυσίμου που είναι πιο ανθεκτικό σε σκληρότερες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης κινητήρα, με 20% αιθανόλη και η επίτευξη 102 οκτανίων, μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον εξοικονόμηση έως και 7% στις εκπομπές CO_2 σε βελτιστοποιημένους κινητήρες σε σχέση με το E10[44].

3.3 Αποτύπωση της αγοράς

Η βιοενέργεια αποτελεί τη μεγαλύτερη συνεισφορά ανανεώσιμης ενέργειας στη συνολική παραγωγή ενέργειας παγκοσμίως. Μαζί με τη παραδοσιακή χρήση της βιομάζας, η βιοενέργεια συμμετείχε περίπου 12.4% (46 exajoules, EJ) στη συνολική κατανάλωση ενέργειας το 2017. Η σύγχρονη βιώσιμη βιοενέργεια (μη συμπεριλαμβανομένης της παραδοσιακής χρήσης της βιομάζας παρείχε περίπου το μισό της ανανεώσιμης ενέργειας στη συνολική κατανάλωση. Συγκεκριμένα, το 2017 η σύγχρονη βιοενέργεια συνεισέφερε κατά 5% στη συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας, 5% στην συνολική

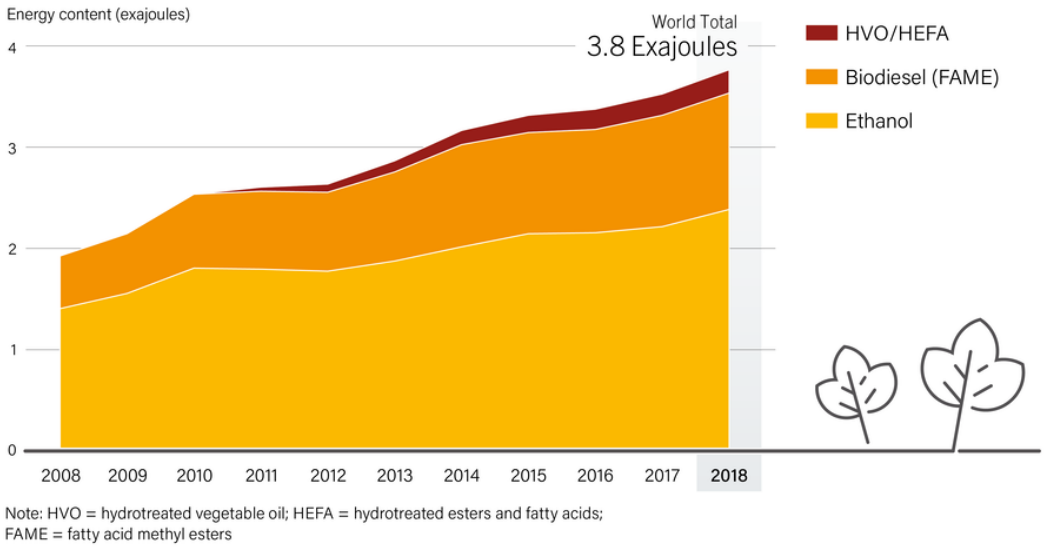
[42] https://ethanolfacts.eu/question-post/will-ethanol-hurt-my-cars-engine/
[43] http://www.etipbioenergy.eu/value-chains/products-end-use/products/etbe
44 https://www.epure.org/about-ethanol/fuel-market/fuel-blends/

παροχή θέρμανσης, 3% στις μεταφορές και 2.1% στην παροχή ηλεκτρισμού παγκοσμίως. Η σύγχρονη βιοενέργεια αυξάνεται πιο γρήγορα στον τομέα του ηλεκτρισμού (~9% ετησίως) σε σχέση με τον τομέα των μεταφορών (~7%), ενώ στον τομέα της θέρμανσης αυξάνεται με πιο αργούς ρυθμούς (1.8%) (REN21, 2019).



Σχήμα 29: Εκτιμώμενη συνεισφορά της βιοενέργειας στη συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας ανά τελικό χρήστη-τομέα, 2017 (REN21, 2019)

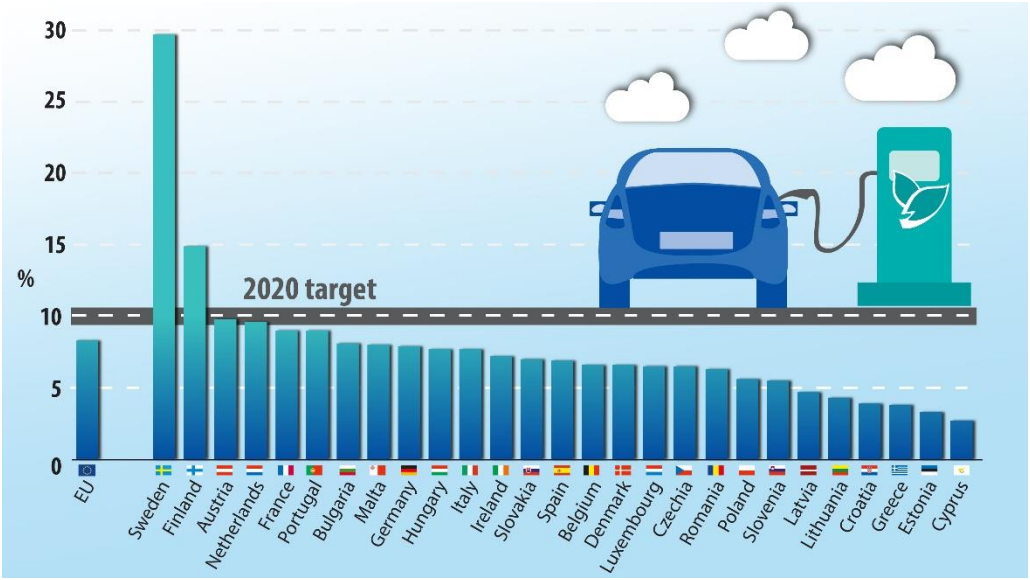
Η ανανεώσιμη ενέργεια κάλυψε περίπου 3.7% της ζήτησης καυσίμων στις μεταφορές παγκοσμίως το 2018, με περίπου 4 exajoules (EJ) κατανάλωση. Τα βιοκαύσιμα παρήχαν 93% της ανανεώσιμης ενέργειας, με το υπόλοιπο της ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμο ηλεκτρισμό. Η συνολική παραγωγή βιοκαυσίμων το 2018 ανήλθε σε 154 δισεκατομμύρια λίτρα καταγράφοντας την υψηλότερη αύξηση των τελευταίων πέντε ετών. Στη συνολικά παραγόμενη ποσότητα, η αιθανόλη συμμετείχε με 71.5%, το βιοντίζελ και τα υδρογονομένα φυτικά έλαια (HVO) συμμετείχαν με 27.6%, ενώ το υπόλοιπο περίπου 0.9% προήλθε από καινοτόμα προηγμένα βιοκαύσιμα (από τεχνολογίες που δεν είναι ακόμα πλήρως εμπορικές). Τα προηγμένα βιοκαύσιμα συμμετείχαν περίπου 9% στη συνολική παραγωγή και περιλάμβαναν κυρίως βιοντίζελ και HVO από απόβλητα λίπη, έλαια και λιπαντικά (IEA, 2019). Σε όρους ενεργειακού περιεχομένου, η αιθανόλη συμμετείχε κατά 63% στην παραγωγή βιοκαυσίμων, το FAME βιοντίζελ κατά 31% και τα HVO κατά 6% (REN21, 2019).



Σχήμα 30: Παγκόσμια παραγωγή αιθανόλης, βιοντίζελ και HVO/HEFA με βάση το ενεργειακό τους περιεχόμενο 2008-2018 (Πηγή: REN21, 2019)

Οι ΗΠΑ και η Βραζιλία ήταν οι μεγαλύτεροι παραγωγοί βιοκαυσίμων, παράγοντας μαζί 69% της συνολικής παραγωγής, ακολουθούμενοι από την Κίνα (3.4%), τη Γερμανία (2.9%) και την Ινδονησία (2.7%). Όσον αφορά την παγκόσμια ετήσια παραγωγή αιθανόλης το 2018, αυτή ανήλθε στα 112 δις λίτρα, μια αύξηση 7% σε σχέση με το 2017. Η παραγωγή αιθανόλης είναι επίσης συγκεντρωμένη στις ΗΠΑ και τη Βραζιλία (83%), με την Κίνα, τον Καναδά, την Ταϋλάνδη και την Ινδία να ακολουθούν (REN21, 2019).

Στην ΕΕ, το μέσο μερίδιο συνεισφοράς ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στις μεταφορές αυξήθηκε από 1.4% το 2004 σε 8.3% το 2018, με τα υψηλότερα μερίδια να καταγράφονται για τη Σουηδία (29.7%) και τη Φινλανδία (14.9%) ενώ τα χαμηλότερα μερίδια καταγράφονται για την Ελλάδα (3.8%), την Εσθονία (3.3%) και την Κύπρο (2.7%), όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



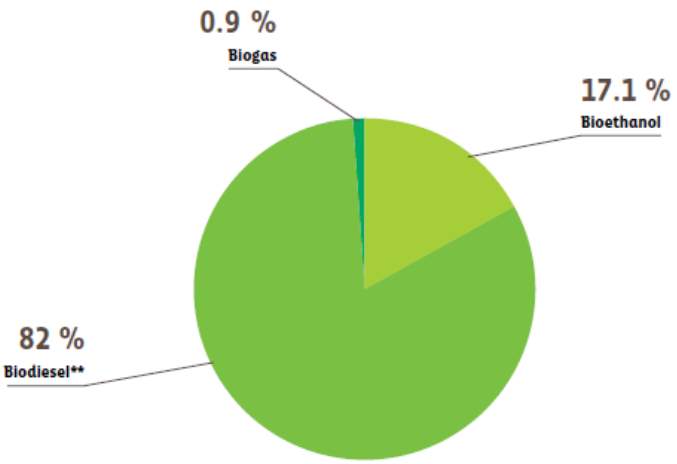
Σχήμα 31: Μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στις μεταφορές, 2018, σε % της ακαθάριστης συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Πηγή: Eurostat, 2020β (nrg_ind_ren)

Η συμμετοχή των βιοκαυσίμων στη συνολική ανανεώσιμη ενέργεια που καταναλώθηκε στον τομέα των μεταφορών το 2018 ήταν 89% στην ΕΕ σύμφωνα με το ενεργειακό τους περιεχόμενο, με το υπόλοιπο να προέρχεται από ανανεώσιμο ηλεκτρισμό. Όσον αφορά τα προηγμένα βιοκαύσιμα (όπως αυτά

ορίζονται στο Παράρτημα IX Οδηγίας 2015/1513), αυτά συμμετείχαν με ποσοστό 24% στο σύνολο των βιοκαυσίμων (χωρίς τον υπολογισμό των συντελεστών που πριμοδοτούν την παραγωγή τους) (Eurostat, 2020β).

Το 2018 σύμφωνα με το EurObserv'ER (2019), το βιοντίζελ (FAME, HVO) αποτελούσε το 82% της κατανάλωσης βιοκαύσιμων στις μεταφορές στην ΕΕ όσον αφορά το ενεργειακό περιεχόμενο και 17% η βιοαιθανόλη, ενώ το υπόλοιπο 1% αποτελείτο από το βιοαέριο (βλ. Σχήμα 32 και Σχήμα 33). Η συνολική κατανάλωση βιοκαυσίμων ανήλθε στα 17.0 Mtoe, μια αύξηση 10% σε σχέση με το 2017. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 33, η Ελλάδα είναι 16η στην κατάταξη της ΕΕ με συνολική παραγωγή 169 ktoe βιοκαυσίμων το 2018, η οποία αποτελείτο από 100% βιοντίζελ (FAME), ενώ πριν το 2016 η ποσότητα των πιστοποιημένων βιοκαυσίμων ήταν πολύ χαμηλή.

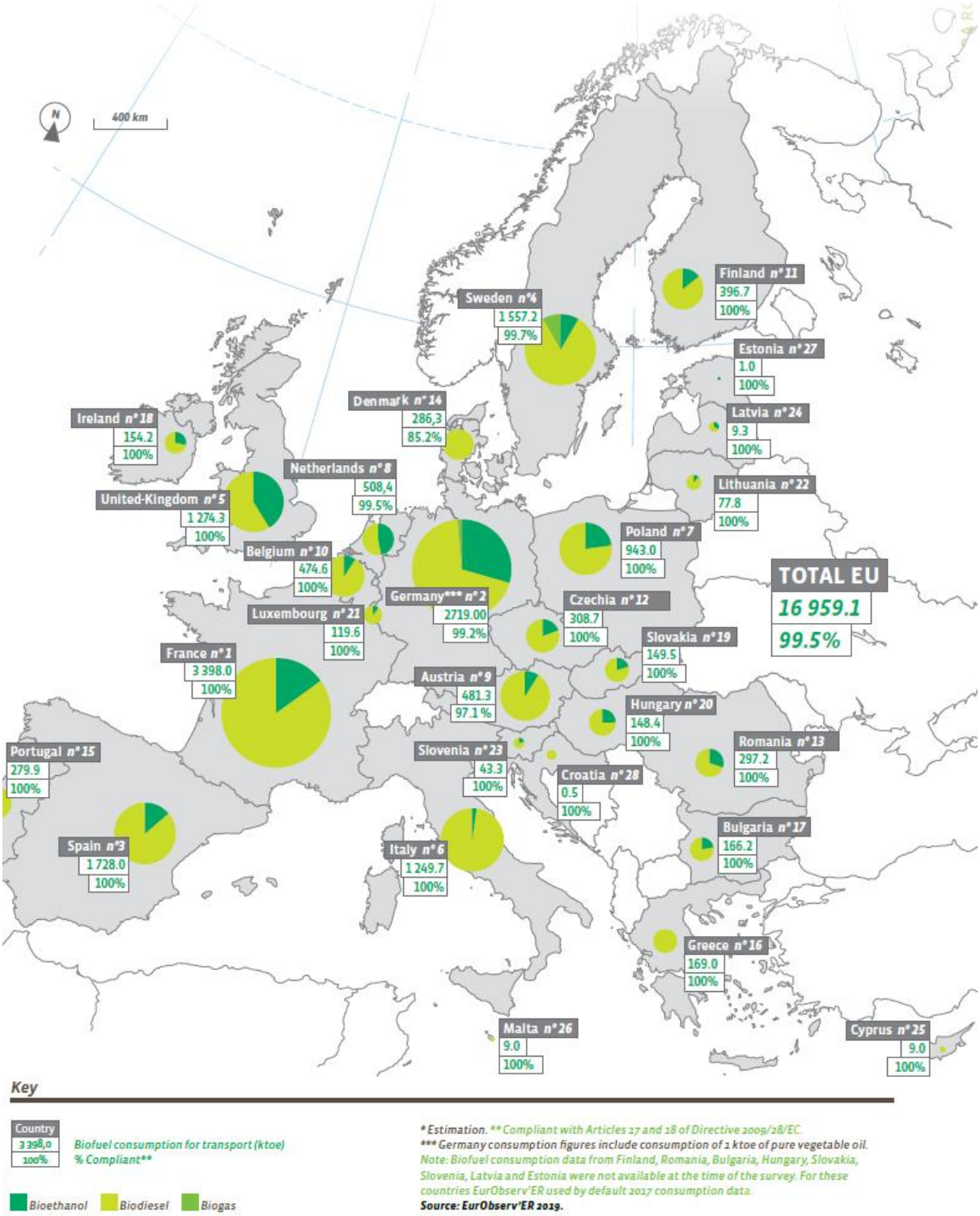
Σύμφωνα με την τελευταία έκθεση της Επιτροπής για την πρόοδο της ανανεώσιμης ενέργειας[45], το 2016 η βιοαιθανόλη παράχθηκε κυρίως στην Ευρώπη (65%) με το ποσοστό αυτό να προέρχεται από σιτάρι (25%), καλαμπόκι (22%) και ζαχαρότευτλα (17%) και μόνο ένα μικρό ποσοστό από κυτταρινική αιθανόλη (~1%).



** το βιοντίζελ περιλαμβάνει αμιγή φυτικά έλαια

*Σχήμα 32: Συνεισφορά σε ενεργειακό περιεχόμενο των διαφορετικών τύπων βιοκαυσίμων στη συνολική κατανάλωση βιοκαυσίμων στην ΕΕ για τις μεταφορές το 2018, * Εκτίμηση (Πηγή: EurObserv'ER, 2019)*

[45] COM(2019) 225 final Renewable Energy Progress Report

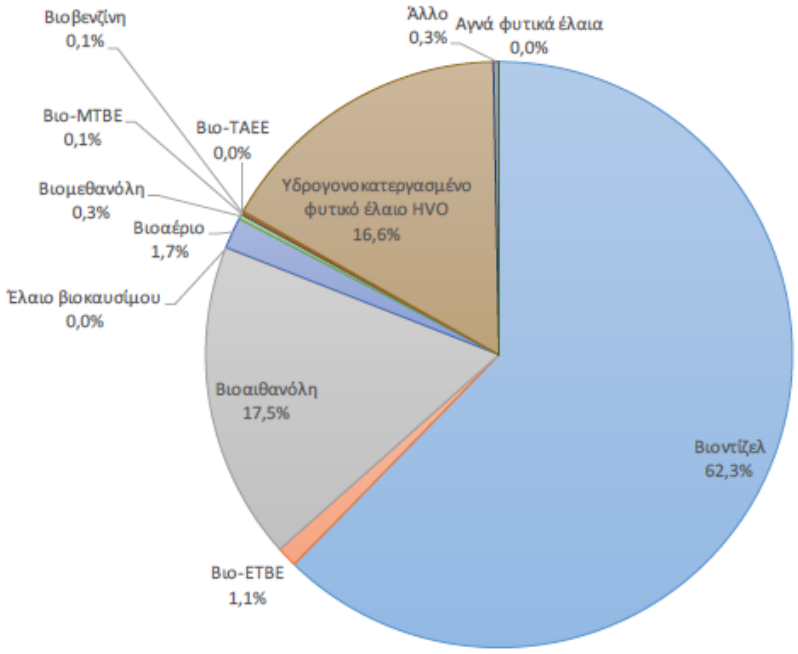


Σχήμα 33: Κατανάλωση βιοκαυσίμων στις μεταφορές στις χώρες της ΕΕ σε ktoe, εκτίμηση για το 2018 (Πηγή: EurObserv'ER, 2019)

Σύμφωνα με την τελευταία έκθεση της Επιτροπής για τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις οδικές μεταφορές[46], 95.5 % της συνολικής δηλωθείσας ποσότητας καυσίμων το 2017 προερχόταν από ορυκτά καύσιμα, και το 4.5 % από βιοκαύσιμα. Η κατανάλωση βιοκαυσίμων στα 22 κράτη μέλη που υπέβαλαν εκθέσεις κυριαρχούσε το βιοντίζελ (μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων, FAME) (62.3%), ακολουθούμενο από

[46] COM(2019) 561 final Ποιότητα καυσίμων βενζίνης και ντίζελ που χρησιμοποιούνται για τις οδικές μεταφορές στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Έκθεση για το έτος 2017)

τη βιοαιθανόλη (17.5%) και το υδρογονοκατεργασμένο φυτικό έλαιο (HVO· 16.6%). Ο βιο-αιθυλο-τριτο-βουτυλ-αιθέρας (βιο-ETBE) και το βιοαέριο αντιστοιχούν σχεδόν στο 3%. Η συμμετοχή όλων των βιοκαυσίμων παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 34: Μερίδια στην προμήθεια ενέργειας από βιοκαύσιμα για χρήση στις οδικές μεταφορές για τα 22 Κ-Μ που υπέβαλλαν εκθέσεις, 2017 [46]

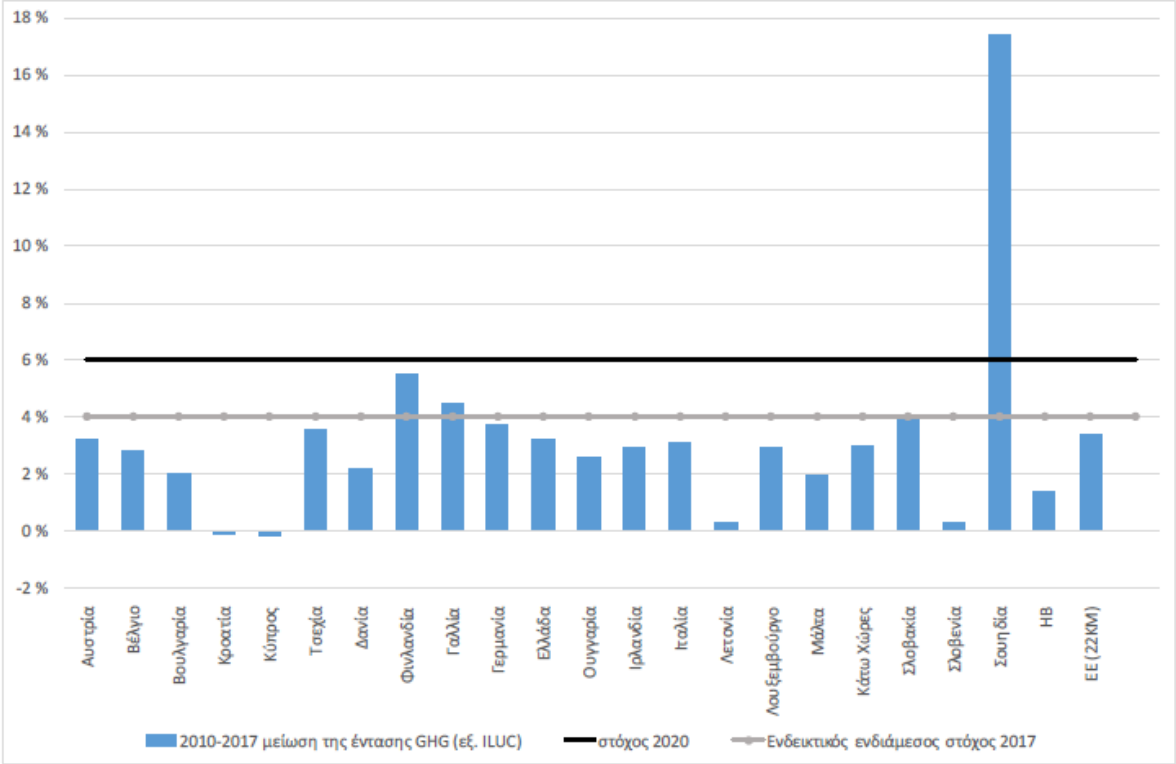
3.4 Εξοικονόμηση εκπομπών στον τομέα των μεταφορών

Σύμφωνα με πληροφορίες που αναφέρονται από τα Κράτη-Μέλη της ΕΕ, η συνολική εξοικονόμηση εκπομπών από τη χρήση βιοκαυσίμων στις μεταφορές ανήλθες σε 33.2 Mtonne CO_2eq το 2016. Λαμβάνοντας υπόψη τις εκπομπές ILUC, η συνολική εξοικονόμηση μειώνεται στους 11.8 Mtonnes CO_2eq [47].

Σύμφωνα με στοιχεία από τις 22 χώρες που υπέβαλλαν εκθέσεις για την ποιότητα των καυσίμων, η μέση ένταση των εκπομπών ΑΦΘ από τα καύσιμα το 2017 ήταν κατά 3.4% χαμηλότερη από τη βάση αναφοράς του 2010, το οποίο αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση 29 Mt ισοδυνάμου διοξειδίου του άνθρακα (CO_2 eq) [46].

Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί, τα περισσότερα από τα Κράτη-Μέλη βρίσκονται πίσω ως προς το στόχο μείωσης της έντασης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των καυσίμων κίνησης κατά 6% έως το 2020, σε σύγκριση με το 2010, με εξαίρεση τη Σουηδία που τον έχει ήδη ξεπεράσει, αλλά και τη Φιλανδία και τη Γαλλία που έχουν ξεπεράσει τον ενδιάμεσο στόχο για το 2017.

[47] COM(2019) 225 final Renewable Energy Progress Report



Σχήμα 35: Μείωση της έντασης των εκπομπών ΑΦΘ από τα καύσιμα για τα 22 κράτη μέλη της ΕΕ για το έτος 2017, σε σχέση με το 2010 [46]

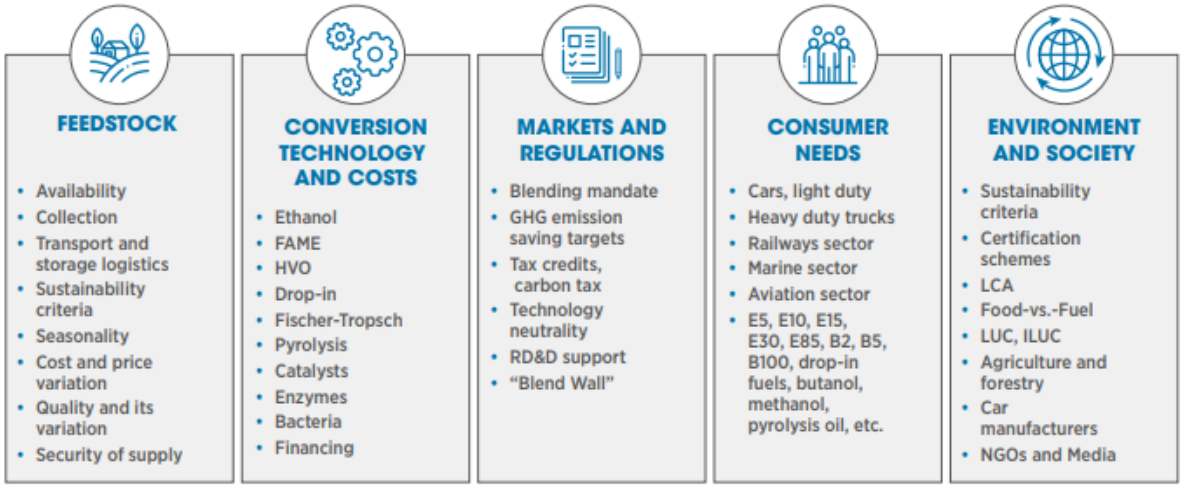
3.5 Εμπόδια για την εμπορική αξιοποίηση

Οι τεχνολογίες παραγωγής προηγμένης βιοαιθανόλης είναι ακόμα υπό συνεχή τεχνολογική ανάπτυξη, όμως οι προσδοκίες είναι υψηλές καθώς διαχειρίζονται πρώτη ύλη χαμηλής ποιότητας και κόστους, η οποία είναι διαθέσιμη σε μεγάλες ποσότητες και δεν ανταγωνίζεται άλλες καλλιέργειες, όπως τα αγροτικά και δασικά υπολείμματα αλλά και τα αστικά απόβλητα.

Η τεχνολογική υστέρηση ωστόσο μεταφράζεται σε υψηλά κεφαλαιουχικά κόστη τα οποία αντισταθμίζουν το χαμηλό κόστος της πρώτης ύλης. Η τεχνολογία παραγωγής κυτταρινικής αιθανόλης αναμένεται να ωριμάσει πιο γρήγορα και να μειωθεί σημαντικά το κόστος επένδυσης έως το 2030 (S&T² Consultants Inc., 2018).

Σύμφωνα με τη μελέτη του IRENA (2019), η ανάπτυξη της παραγωγής κυτταρινικής αιθανόλης ήταν αργή και αντιμετώπισε πολλά εμπόδια, με το πρώτο κύμα των επενδύσεων να καταλήγει σε πολλές τεχνικές και εμπορικές αποτυχίες τόσο στις ΗΠΑ όσο και στην Ευρώπη. Περισσότερες από τις μισές μονάδες παραγωγής προηγμένων βιοκαυσίμων στις ΗΠΑ απέτυχαν μέχρι το 2015 (Withers, 2016) και πολλές επιχειρήσεις χρεωκόπησαν, σταμάτησαν τη λειτουργία ή άλλαξαν αντικείμενο. Το 2018, λειτουργούσαν 12 βιοδιϋλιστήρια παγκοσμίως σε εμπορικό επίπεδο με μέση ετήσια παραγωγή περίπου 10 εκατομμύρια λίτρα προηγμένης κυτταρινικής αιθανόλης.

Όπως φαίνεται από το ακόλουθο σχήμα, η αλυσίδα αξίας των προηγμένων βιοκαυσίμων χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη πολυπλοκότητα, καθώς περιλαμβάνει πολυάριθμα εμπλεκόμενα μέρη αλλά και μεγάλη και πολλές φορές ανταγωνιστική ποικιλία των διαθέσιμων επιλογών σε κάθε στάδιο. Το γεγονός αυτό έχει δημιουργήσει αρκετά εμπόδια στην ανάπτυξη των βιοκαυσίμων.



Σχήμα 36: Πολυπλοκότητα και ανταγωνιστικότητα επιλογών στην αλυσίδα αξίας των προηγμένων βιοκαυσίμων (Πηγή: IRENA, 2019)

Η ανάπτυξη των προηγμένων βιοκαύσιμων υστερείται κυρίως όσον αφορά την εμπορική αξιοποίηση της τεχνολογίας και την έλλειψη των επενδύσεων σε μονάδες μεγάλης κλίμακας παραγωγής. Τα εμπόδια που αναγνωρίστηκαν από τις διάφορες μελέτες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα στο αντικείμενο αυτό, ιεραρχήθηκαν από ένα αριθμό αντιπροσώπων της βιομηχανίας του κλάδου, στο πλαίσιο της έρευνας που διεξήχθη για τη μελέτη του IRENA (2019) . Η ιεράρχηση των εμποδίων παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.

Σχήμα 37: Ιεράρχηση εμποδίων για την ανάπτυξη των προηγμένων βιοκαυσίμων με βάση τη σπουδαιότητά τους (Πηγή: IRENA, 2019)

Τα κύρια συμπεράσματα της μελέτης όσον αφορά τα εμπόδια ήταν τα ακόλουθα:

- Η νομοθετική αβεβαιότητα σε σχέση με την αειφορική χρήση της πρώτης ύλης, τη βιωσιμότητα των τεχνολογιών παραγωγής των βιοκαυσίμων και τα προτεινόμενα επίπεδα ανάμιξης με τα συμβατικά καύσιμα, ξεχωρίζει ως το πιο σημαντικό εμπόδιο για την επένδυση στα προηγμένα βιοκαύσιμα
- Η πολιτική για την αποδέσμευση του τομέα των μεταφορών από τον άνθρακα προκρίνει την υιοθέτηση πολλών εναλλακτικών καυσίμων ταυτόχρονα αντί για τη στόχευση και προώθηση ενός συγκεκριμένου εναλλακτικού καυσίμου

- Τα χαμηλά επίπεδα επιδότησης, τα υψηλά επίπεδα απαιτούμενης χρηματοδότησης και η περιορισμένη χρηματοδοτική δυνατότητα θεωρούνται από πολλούς επενδυτές τα βασικά εμπόδια της αγοράς
- Εάν δεν θεσμοθετηθούν ειδικά μέτρα προώθησης της κυτταρινικής αιθανόλης, θα υπάρξει άνιση ανταγωνιστικότητα κόστους από τους παραγωγούς 1ης γενιάς σε μια φθίνουσα αγορά.
- Η αποδοχή των βιοκαυσίμων από τους καταναλωτές η οποία παρεμποδίζεται από την έλλειψη συντονισμένης και επαρκούς ενημέρωσης σε επίπεδο κυβέρνησης κατά την εισαγωγή των μειγμάτων αυτών

Τέλος, σημειώνεται ότι υπάρχει αργή πρόοδος όσον αφορά την ανάπτυξη τεχνολογιών για την παραγωγή καυσίμων για άλλους τύπους μεταφοράς όπως των αερομεταφορών, ενώ υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον από την αγορά αυτή (REN21,2019).

Β’ ΜΕΡΟΣ: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Τεχνολογίες Διαχείρισης ΑΣΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι τεχνολογίες διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων ως προς τις επιμέρους λειτουργίες και διεργασίες που περιλαμβάνουν και στη συνέχεια προσδιορίζονται οι άμεσες και έμμεσες πηγές εκπομπών ΑΦΘ που προκύπτουν από την εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών.

Η κατηγοριοποίηση των εκπομπών ΑΦΘ παρουσιάζεται με βάση το γενικό πλαίσιο που συστάθηκε από τους Gentil et al. (2009). Ειδικότερα, οι εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση αποβλήτων περιλαμβάνουν τις άμεσες εκπομπές από τη μονάδα διαχείρισης αποβλήτων, ενώ οι έμμεσες εκπομπές περιλαμβάνουν αυτές που λαμβάνουν χώρα ανάντη της μονάδας διαχείρισης αποβλήτων, όπως η παραγωγή της ενέργειας και των υλικών που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία της μονάδας διαχείρισης αποβλήτων (έμμεσες προγενέστερες εκπομπές) και τις έμμεσες εκπομπές ή εξοικονομήσεις που λαμβάνουν χώρα κατάντη της μονάδας διαχείρισης αποβλήτων και σχετίζονται με τα προϊόντα που παράγονται (έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές).

4.1 Τελική Διάθεση – Ταφή

Η μέθοδος της ταφής ως τρόπος διαχείρισης των στερεών αποβλήτων είναι από τις παλαιότερες μεθόδους. Στο παρελθόν, ο όρος "υγειονομική ταφή" αναφερόταν σε Χώρους Διάθεσης Αποβλήτων (ΧΔΑ), στους οποίους τα αποτιθέμενα απόβλητα επικαλύπτονταν στο τέλος κάθε ημέρας. Πλέον ο ίδιος όρος αφορά εγκαταστάσεις απόθεσης ΑΣΑ σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις στη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Μερικοί όροι που συχνά χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα μέρη ενός ΧΔΑ παρουσιάζονται παρακάτω.

Ο όρος κελί χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον όγκο του υλικού που τοποθετείται σε ένα ΧΔΑ μια ορισμένη χρονική περίοδο, συνήθως μια μέρα. Ένα κελί περιλαμβάνει τα εναποτιθέμενα απόβλητα καθώς και το υλικό επικάλυψης που τα περιβάλει. Η ημερήσια επικάλυψη αποτελείται από χώμα από τη γύρω περιοχή ή από άλλα υλικά επικάλυψης, όπως κομπόστ, άμμος χυτηρίου ή τεμαχισμένα ξηρά υπολείμματα. Διαχρονικά, η επικάλυψη σε καθημερινή βάση γινόταν για την αποφυγή τρωκτικών, εντόμων και άλλων φορέων ασθενειών από την είσοδο ή την έξοδό τους από το ΧΔΑ. Πλέον, η επικάλυψη χρησιμοποιείται πρωτίστως για την αποφυγή αυτανάφλεξης των αποβλήτων, τη μείωση των οσμών και τον έλεγχο των εισερχόμενων υδάτων κατά τη διάρκεια λειτουργίας του (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Ένα επίπεδο (lift) είναι ένα ολοκληρωμένο στρώμα από κελιά στην ενεργό περιοχή του ΧΔΑ. Τυπικά, οι ΧΔΑ περιλαμβάνουν σειρές από επίπεδα. Η επένδυση στεγανοποίησης των ΧΔΑ αποτελείται από υλικά, φυσικά ή τεχνητά, που χρησιμοποιούνται για τη στεγανοποίηση του πυθμένα και των πλαϊνών του χώρου κάτω από το έδαφος. Συνήθως αποτελείται από διαδοχικά στρώματα πεπιεσμένου αργίλου ή/και γεωσυνθετικά υλικά σχεδιασμένα να αποτρέπουν τη διαρροή στραγγισμάτων και αερίων στη γύρω περιοχή. Το τελικό στρώμα επικάλυψης εφαρμόζεται πάνω από ολόκληρη την επιφάνεια του ΧΔΑ, μετά το πέρας όλων των εργασιών, αποτρέποντας όχι μόνο τη μόλυνση του περιβάλλοντος αλλά και την εισροή υδάτων στο χώρο (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Τα υγρά που συγκεντρώνονται στον πυθμένα των ΧΔΑ ονομάζονται στραγγίσματα. Γενικά, τα στραγγίσματα προέρχονται από τη διείσδυση των κατακρημνίσεων, ανεξέλεγκτες απορροές και ύδατα άρδευσης του ΧΔΑ. Τα στραγγίσματα επίσης περιλαμβάνουν υγρά τα οποία περιέχονται στα απόβλητα. Περιλαμβάνουν μια πληθώρα χημικών ενώσεων που προέρχονται από τη διαλυτοποίηση (solubilization) των εναποτιθέμενων υλικών και από τα προϊόντα χημικών και βιοχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα μέσα στον ΧΔΑ (Tchobanoglous & Kreith, 2002).

Ο κύριος όγκος των αερίων μέσα σε ένα ΧΔΑ αποτελείται από μεθάνιο (CH_4) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), που είναι τα βασικά προϊόντα της αποσύνθεσης σε αναερόβιες συνθήκες του βιοαποδομήσιμου κλάσματος των ΑΣΑ μέσα σε ένα χώρο ταφής.

Αναλόγως την τεχνολογία που χρησιμοποιούν, οι ΧΔΑ διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες σύμφωνα με τους Manfredi et al. (2009):

ΧΑΔΑ-ανοιχτές χωματερές:

Πρόκειται για χώρους όπου καταλήγουν απορρίμματα διαφόρων ειδών χωρίς να υπάρχει σχεδιασμός ως προς τη διαχείρισή τους, χωρίς μέτρα πρόληψης αέριων εκπομπών και στραγγισμάτων προς το περιβάλλον και χωρίς επικάλυψη των αποβλήτων. Οι χωματερές δεν θεωρούνται πλέον αποδεκτός τρόπος διαχείρισης αποβλήτων αλλά χαρακτηρίζεται ως η χείριστη περίπτωση, αφού οι ΧΑΔΑ χρησιμοποιούνται ακόμα σε κάποιες περιπτώσεις. Τα στραγγίσματα από τα νερά της βροχής μεταφέρονται στο έδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα κάτω από τη χωματερή. Οι αέριες εκπομπές που δημιουργούνται από την αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων θεωρείται ότι απελευθερώνονται απευθείας στην ατμόσφαιρα. Οι απώλειες σε άνθρακα είναι λόγω του διαλυμένου άνθρακα στα στραγγίσματα καθώς και λόγω του μεθανίου και του διοξειδίου του άνθρακα στις αέριες εκπομπές. Οι πτητικές οργανικές ενώσεις στις αέριες εκπομπές μπορεί να συμβάλλουν και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, π.χ. οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs).

Συμβατική ταφή (ΧΥΤΑ):

Οι Χώροι Υγειονομικής Ταφής Αποβλήτων (ΧΥΤΑ) είναι χώροι ταφής που περιλαμβάνουν τεχνικά μέτρα συλλογής και διαχείρισης των στραγγισμάτων και των αέριων εκπομπών που παράγονται. Όσον αφορά τη διαχείριση των στραγγισμάτων, συνήθως πρόκειται για μεμβράνες στο κάτω μέρος και στα πλαϊνά του χώρου ταφής με σύστημα συλλογής και επεξεργασίας των στραγγισμάτων πριν τη διάθεσή τους στα επιφανειακά ύδατα. Όσον αφορά τη διαχείριση των αέριων εκπομπών, τα αντίστοιχα μέτρα περιλαμβάνουν σύστημα συλλογής των αερίων, καύση και πιθανή επικάλυψη του εδάφους για το μετριασμό των μη συλλεγέντων αερίων που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Αυτός ο τύπος ταφής αναφέρεται ως "συμβατικός" λόγω του γεγονότος ότι δεν λαμβάνονται μέτρα για την ενίσχυση της αποδόμησης των αποβλήτων (πχ ανακύκλωση των στραγγισμάτων, προσθήκη νερού, ενέσεις αέρα κα). Το περιεχόμενο οργανικό φορτίο είναι σημαντικό και η αποδόμηση μπορεί να διαρκέσει μεγάλες περιόδους, από μερικά χρόνια έως δεκαετίες για τις περισσότερες βιοαποδομήσιμες ενώσεις, έως και πάνω από έναν αιώνα για τα λιγότερο βιοαποδομήσιμα υλικά (αδρανή).

Η κατασκευή και λειτουργία των συμβατικών ΧΥΤΑ συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου με τη χρήση υλικών (π.χ. μονωτικά υλικά), καυσίμων που χρησιμοποιούν τα μηχανήματα εκσκαφής, επικάλυψης και συμπίεσης των αποβλήτων, καθώς και την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται στους εσωτερικούς χώρους (πχ εγκαταστάσεις διαχείρισης, ο φωτισμός, η διαχείριση στραγγισμάτων και οι αντλίες αερίων). Ο μετριασμός των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου επιτυγχάνεται μέσω της καύσης των αερίων σε πυρσούς και μέσω της πιθανής οξείδωσης του μεθανίου στα ανώτερα στρώματα. Βασικός παράγοντας είναι το σύστημα συλλογής του αερίου.

ΧΥΤΑ με ενεργειακή ανάκτηση:

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες όσον αφορά την υγειονομική ταφή, συμπεριλαμβανόμενων των βιοαντιδραστήρων και των ημι-αερόβιων χώρων ταφής. Επιπλέον των τεχνικών που εφαρμόζονται στους συμβατικούς ΧΥΤΑ, αυτές οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν δραστικά μέτρα για την ενίσχυση της διαδικασίας της βιοδιάσπασης, ώστε να γίνει ταχύτερη και πιο αποδοτική. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερους ρυθμούς παραγωγής αερίου στα πρώτα στάδια λειτουργίας του ΧΥΤΑ (πιο νωρίς σε σχέση με τους συμβατικούς ΧΥΤΑ), γεγονός που κάνει πιο

αποδοτική τη συλλογή και αξιοποίηση του αερίου π.χ. με την παραγωγή ηλεκτρισμού ή με τη συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ενέργειας.

Οι βιοαντιδραστήρες των ΧΥΤΑ ουσιαστικά ανακυκλοφορούν τα στραγγίσματα στη μάζα των αποβλήτων. Αυτό κρατά τα επίπεδα υγρασίας υψηλά και παρέχει συνεχή προμήθεια υγρασίας και θρεπτικών με αποτέλεσμα την ενίσχυση του αναερόβιου μικροβιακού περιβάλλοντος. Οι flushing βιοαντιδραστήρες ανακυκλώνουν τα στραγγίσματα μαζί με επιπρόσθετες ποσότητες νερού ώστε να ξεπλύνουν τα διαλυτά συστατικά των αποβλήτων. Αυτό συχνά συνδυάζεται με μέτρα πρόληψης της υψηλής περιεκτικότητας των στραγγισμάτων σε αμμωνία. Οι ημι-αερόβιοι χώροι ταφής βασίζονται σε μια υβριδική ακολουθία αερόβιας και αναερόβιας αποδόμησης. Η αναερόβια φάση προηγείται και διακόπτεται με ένεση αέρα όταν η απόδοση μεθανίου είναι πολύ χαμηλή για να δικαιολογήσει τη διαχείριση αέριων εκπομπών (συνήθως μετά από 5-10 χρόνια). Η φάση της αερόβιας αποδόμησης σταθεροποιεί γρήγορα τα απόβλητα, σταματώντας, θεωρητικά τουλάχιστον, την παραγωγή μεθανίου.

ΧΥΤΥ (για χαμηλό οργανικό φορτίο):

Η ταφή των οργανικών αποβλήτων έχει μειωθεί σε ένα βαθμό λόγω της σχετικής Οδηγίας της ΕΕ (1999). Μια πληθώρα καθιερωμένων τεχνικών είναι διαθέσιμες για τη διαχείριση των οργανικών αποβλήτων, αλλά ακόμα σε πολλές χώρες η ταφή αποβλήτων με χαμηλό οργανικό φορτίο είναι αναπόφευκτη. Αντίστοιχα με τους ΧΥΤΑ, οι ΧΥΤΥ υιοθετούν τεχνικές για τη συλλογή και διαχείριση των παραγόμενων στραγγισμάτων. Η διαχείριση του αερίου όμως δεν είναι απλή, αφού η αποδόμηση αποβλήτων χαμηλού οργανικού φορτίου δεν παράγει ικανή ποσότητα μεθανίου (ουσιαστικά κάτω από 10-15m3CH_4/tn συγκριτικά με 60-90m3CH_4/tn) οπότε δεν δικαιολογείται πάντα η επένδυση σε τεχνολογίες διαχείρισης αερίου. Η τεχνολογία που χρησιμοποιούν για το αέριο είναι καύση ή οξείδωση του μεθανίου στα ανώτερα στρώματα του εδάφους.

4.1.1 Λειτουργία

Σύμφωνα με το UNEP (2005), ένας ΧΥΤΑ λειτουργεί όπως ένας βιοχημικός αντιδραστήρας, με βασικό ρεύμα εισόδου τα στερεά απόβλητα και νερό και ρεύμα εξόδου τα στραγγίσματα και τις αέριες εκπομπές. Τα απόβλητα που εναποτίθενται σε ΧΥΤΑ, όταν δεν προηγείται επεξεργασία αυτών, περιέχουν οργανικό βιοαποδομήσιμο κλάσμα και άλλα ανόργανα συστατικά Η παραγωγή των αερίων μέσα σε ένα ΧΥΤΑ συντελείται σε 5 διαδοχικές φάσεις και μπορεί να περιγραφεί με την γενική αντίδραση:

$$\begin{aligned} &\textit{Οργανικό υλικό} + \mathrm{H_2 0} + \textit{θρεπτικά} \\ &\rightarrow \textit{Νέα κύτταρα} + \textit{Ανθεκτικό οργανικό υλικό} + CO_2 + CH_4 + NH_3 + H_2S \\ &+ \textit{Θερμότητα} \end{aligned}$$

Η 1η φάση είναι η «αρχική προσαρμογή», κατά την οποία ξεκινά η βιοαποδόμηση των οργανικών συστατικών των ΑΣΑ σύντομα μετά την ταφή τους. Σε αυτή τη φάση, επικρατούν αερόβιες συνθήκες λόγω παγιδευμένων ποσοτήτων αέρα στα απόβλητα. Βασική πηγή τόσο των αερόβιων όσο και των αναερόβιων μικροοργανισμών, που ευθύνονται για την αποδόμηση των οργανικών, είναι το υλικό επικάλυψης που χρησιμοποιείται για την καθημερινή και τελική επικάλυψη. Επίσης πηγή μπορεί να αποτελέσει και η σταθεροποιημένη ιλύς που διατίθεται σε κάποιους ΧΔΑ καθώς και η ανακύκλωση των στραγγισμάτων που είναι επίσης προαιρετική.

Η 2η φάση είναι η «μεταβατική φάση», όπου έχει καταναλωθεί το οξυγόνο και αναπτύσσονται προοδευτικά αναερόβιες συνθήκες. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα νιτρικά και θειικά, που μπορούν να λειτουργήσουν ως δέκτες ηλεκτρονίων στις αντιδράσεις βιολογικής μετατροπής, συχνά ανάγονται σε

αέριο άζωτο και υδρόθειο. Η μέτρηση του δυναμικού οξειδοαναγωγής μπορεί να υποδείξει την αρχή αναερόβιων συνθηκών. Όσο το δυναμικό οξειδοαναγωγής αυξάνεται, οι μικροοργανισμοί που ουσιαστικά παράγουν μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα, ξεκινούν μια διαδικασία 3 σταδίων κατά την οποία η πολύπλοκη οργανική ύλη μετατρέπεται σε οργανικά οξέα και άλλα ενδιάμεσα προϊόντα, όπως περιγράφεται παρακάτω. Στη 2η φάση, το pH των στραγγισμάτων μειώνεται σταδιακά λόγω της παρουσίας των οργανικών οξέων και την απορρόφηση από τα στραγγίσματα του CO_2 που παράγεται.

Η 3η φάση είναι η «όξινη φάση», όπου η βακτηριακή δραστηριότητα επιταχύνεται με την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων οργανικών οξέων και λιγότερων ποσοτήτων αέριου υδρογόνου. Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας αυτής περιλαμβάνει την ενζυμική μετατροπή (υδρόλυση) συστατικών και ενώσεων μεγαλύτερου μοριακού βάρους (όπως λιπίδια, οργανικά πολυμερή και πρωτεΐνες) σε ενώσεις κατάλληλες για να αξιοποιηθούν από τους μικροοργανισμούς ως πηγή ενέργειας και στοιχειακού άνθρακα. Το δεύτερο στάδιο της διαδικασίας (οξεογένεση) περιλαμβάνει τη διάσπαση των ενώσεων που προκύπτουν από το πρώτο στάδιο σε χαμηλότερου μοριακού βάρους ενώσεις, όπως το οξικό οξύ. Το CO_2 είναι το βασικό αέριο προϊόν της 3ης φάσης, ενώ παράγονται και μικρότερες ποσότητες αέριου υδρογόνου. Οι μικροοργανισμοί που εμπλέκονται στις παραπάνω μετατροπές είναι προαιρετικά ή υποχρεωτικά αναερόβιοι και αναφέρονται συνήθως στη βιβλιογραφία ως «μετατροπείς οξέων» ή «οξεογενείς».

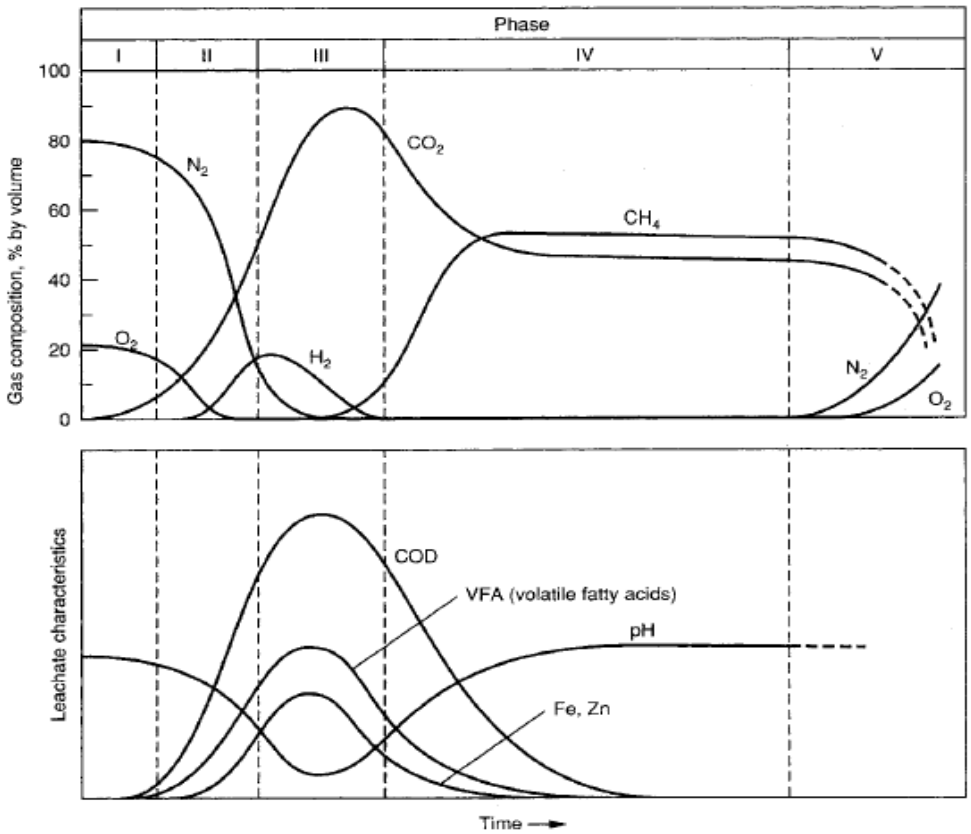
Λόγω των οξέων που παράγονται στην 3η φάση, το pH των στραγγισμάτων θα μειωθεί σημαντικά. Ενώ παράλληλα θα αυξηθούν οι συγκεντρώσεις του βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD_5), του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) και η αγωγιμότητα των στραγγισμάτων, λόγω της διάλυσης οργανικών οξέων μέσα στα στραγγίσματα. Επίσης, λόγω του χαμηλού pH, στην 3η φάση διαλυτοποιείται πλήθος οργανικών συστατικών και θρεπτικά συστατικά παρασύρονται στα στραγγίσματα. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει ανακύκλωση των στραγγισμάτων, τα θρεπτικά αυτά συστατικά θα χαθούν από το σύστημα.

Η 4η φάση είναι η φάση ζύμωσης του μεθανίου. Εδώ, μια δεύτερη ομάδα μικροοργανισμών επικρατεί, που ευθύνεται για την μετατροπή του οξικού οξέος και του υδρογόνου που παράχθηκαν στην προηγούμενη φάση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι μικροοργανισμοί αυτοί αρχίζουν να αναπτύσσονται στα τελευταία στάδια της 3ης φάσης, είναι αυστηρώς αναερόβιοι και αποκαλούνται μεθανογόνοι. Σε αυτή τη φάση η ζύμωση για την παραγωγή μεθανίου και η όξινη ζύμωση εξελίσσονται ταυτόχρονα, ωστόσο ο ρυθμός της όξινης ζύμωσης έχει μειωθεί αισθητά.

Λόγω της ζύμωσης των οξέων και του αερίου υδρογόνου της 3ης φάσης, σε CH_4 και CO_2 στην 4η φάση, το pH μέσα στον ΧΔΑ θα αυξηθεί σε πιο ουδέτερα επίπεδα. Αντίστοιχα, θα αυξηθεί και το pH των στραγγισμάτων, ενώ, η συγκέντρωση του βιοχημικά και χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (BOD_5 και COD, αντίστοιχα) καθώς και η αγωγιμότητα των στραγγισμάτων θα μειωθούν. Όσο αυξάνει η τιμή του pH, τόσο μικρότερες ποσότητες ανόργανων συστατικών θα διαλυτοποιούνται στα στραγγίσματα, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η συγκέντρωσή τους σε αυτά.

Η 5η φάση είναι η «φάση ωρίμανσης». Εδώ το άμεσα διαθέσιμο οργανικό υλικό έχει ήδη καταναλωθεί στην προηγούμενη φάση και έχει μετατραπεί σε CH_4 και CO_2. Ωστόσο, λόγω της υγρασίας που συνεχίζει να μεταφέρεται ανάμεσα στα απόβλητα, ποσότητες οργανικών υλικών που δεν ήταν μέχρι αυτή τη φάση διαθέσιμες, αρχίζουν να μετατρέπονται. Ο ρυθμός παραγωγής αερίων μειώνεται αισθητά καθώς τα περισσότερα διαθέσιμα θρεπτικά υλικά έχουν απομακρυνθεί στις προηγούμενες φάσεις μέσω των στραγγισμάτων και τα υπολείμματα αυτών βιοαποδομούνται με αργούς ρυθμούς. Τα βασικά αέρια προϊόντα της 5ης φάσης είναι τα CH_4 και CO_2, ωστόσο, μπορεί να συνυπάρχουν και μικρές ποσότητες οξυγόνου και αζώτου, γεγονός που εξαρτάται από τις συνθήκες παύσης λειτουργίας του ΧΔΑ. Κατά τη φάση ωρίμανσης, τα στραγγίσματα περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις χουμικού και φουλβικού οξέος, τα οποία δύσκολα επιδέχονται περαιτέρω βιολογική επεξεργασία.

Η διάρκεια των ξεχωριστών φάσεων κατά την παραγωγή αερίων ποικίλει ανάλογα με την κατανομή των βιοαποδομήσιμων υλικών, τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών, την περιεκτικότητα των αποβλήτων σε υγρασία, τη μεταφορά της υγρασίας μέσα στα απόβλητα και την αρχική συμπίεση των αποβλήτων. Μελέτες σε δείγματα ΧΔΑ υποδεικνύουν ότι η παραγωγή μεθανίου παρουσιάζει αυξητικές τάσεις όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα των αποβλήτων σε υγρασία, ανεξάρτητα από την ηλικία, τη πυκνότητα και τη σύνθεση των αποβλήτων. Ενώ, το ιδανικό pH για τη δράση των μεθανογόνων μικροοργανισμών είναι μεταξύ 6.8 και 7.4. Η συλλογή, ουδετεροποίηση και επανακυκλοφορία των στραγγισμάτων μέσα στον ΧΔΑ έχει αποδειχτεί ότι έχει θετική επίδραση στη συνεχή παραγωγή μεθανίου. Τέλος, όταν πρόκειται για μικρούς ή σχετικά ρηχούς ΧΔΑ, σημαντικό ρόλο έχουν και οι κλιματικές συνθήκες. Έχει αποδειχθεί ότι, οι μεθανογόνοι μικροοργανισμοί δρουν σε θερμοκρασίες από 5°C - 40°C. Έτσι, οι ρυθμοί παραγωγής μεθανίου, για αυτούς τους ΧΔΑ, μειώνονται από τα τέλη του φθινοπώρου έως τις αρχές της άνοιξης, λόγω χαμηλών θερμοκρασιών (UNEP, 2005).



Σχήμα 38: Διαδοχικές φάσεις παραγωγής βιοαερίου σε ΧΔΑ (I-Αρχική προσαρμογή, II-Μεταβατική φάση, III-Όξινη φάση, IV-Φάση ζύμωσης μεθανίου, V-Φάση ωρίμανσης). Πρωτεύον διάγραμμα: σύνθεση αερίων ανά φάση, Δευτερεύον διάγραμμα: χαρακτηριστικά στραγγισμάτων. (G. Tchobanoglous & F. Kreith, 2002)

Τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων και οι επικρατούσες συνθήκες ποικίλουν από περιοχή σε περιοχή, με αποτέλεσμα οι ρυθμοί και οι παραγόμενες ποσότητες βιοαερίου να παρουσιάζουν μεγάλο εύρος τιμών. Ωστόσο, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αύξηση των ρυθμών παραγωγής εμφανίζονται κατά τα 5 πρώτα χρόνια που ακολουθούν την κατανάλωση του περιεχόμενου οξυγόνου, ενώ οι μεγαλύτερες ποσότητες μεθανίου παράγονται 20 έτη μετά την παύση λειτουργίας του ΧΔΑ. Η παραγωγή βιοαερίου μπορεί να συνεχιστεί, με μειούμενους ρυθμούς μέχρι τα επόμενα 50 έτη (UNEP, 2005).

4.1.2 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ

Όπως παρουσιάστηκε και ανωτέρω, οι κύριες άμεσες εκπομπές ΑΦΘ από την ταφή είναι το μεθάνιο που παράγεται από την αναερόβια αποδόμηση των αποβλήτων στο χώρο ταφής. Το μεθάνιο που

μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα έχει ΔΠΘ ίσο με μηδέν, καθώς θεωρούμε ότι οι εκπομπές βιογενούς CO_2 είναι ουδέτερες. Οι απώλειες άνθρακα σχετίζονται με τις αέριες εκπομπές και σε μικρότερο βαθμό με την έκπλυση του διαλυμένου οργανικού άνθρακα. Άμεσες εκπομπές προκύπτουν επίσης από την καύση ντήζελ στις μπουλντόζες, τους συμπιεστές και άλλα οχήματα που χρησιμοποιούνται σε ένα χώρο ταφής (Manfredi et al., 2009).

Οι έμμεσες εκπομπές ΑΦΘ περιλαμβάνουν τις προγενέστερες συνεισφορές που σχετίζονται με την παραγωγή και παροχή ντήζελ για τις εδαφικές εργασίες για την κατασκευή του χώρου ταφής, και τις υπόλοιπες καθημερινές εργασίες που εκτελούνται από τα ειδικά οχήματα στο χώρο ταφής, καθώς με την παροχή ηλεκτρισμού για το φωτισμό, τους ανεμιστήρες και τις αντλίες στις εγκαταστάσεις και τα διοικητικά κτήρια. Οι έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές περιλαμβάνουν την παραγωγή ηλεκτρισμού και/ή θερμότητας από τη μετατροπή του παραγόμενου βιοαερίου, με τις σχετικές αποδόσεις να κυμαίνονται μεταξύ 25–35% για τον ηλεκτρισμό και 40–50% για τη θερμότητα. Ωστόσο, το πιο συνηθισμένο είναι η παραγωγή ηλεκτρισμού, καθώς η ζήτηση για θερμότητα στην περιοχή κοντά στο χώρο ταφής συνήθως είναι χαμηλή και δεν υπάρχουν συχνά οι σχετικές υποδομές. Η πίστωση του παραγόμενου ηλεκτρισμού σχετίζεται με τον ηλεκτρισμό που υποκαθίσταται, η οποία μπορεί να είναι υψηλή εάν προέρχεται από ενεργειακό μίγμα υψηλό σε ορυκτά καύσιμα (Manfredi et al., 2009).

4.2 Μηχανική Επεξεργασία

Οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές σε μια μονάδα μηχανικής επεξεργασίας και διαλογής των αποβλήτων εξαρτώνται από το είδος του εισερχόμενου ρεύματος, αν προέρχονται από διαλογή στην πηγή (ΔσΠ), αν είναι σύμμεικτα ή και τα δύο. Επίσης, εξαρτώνται από τη φύση και την χρησιμότητα των ανακτώμενων υλικών. Ο διαχωρισμός των αποβλήτων μπορεί να γίνεται χειρωνακτικά και/ή μηχανικά, ενώ επίσης μπορεί να διακριθεί σε αρνητικό και θετικό. Ο αρνητικός διαχωρισμός αναφέρεται στην απομάκρυνση των ξένων προς το ρεύμα προσμίξεων, για τον καθαρισμό του, ενώ ο θετικός διαχωρισμός αναφέρεται στη συγκομιδή από το κυρίως ρεύμα των υλικών – στόχων (UNEP, 2005).

Χειρωνακτικός διαχωρισμός: Στην περίπτωση επεξεργασίας σύμμεικτων αποβλήτων, τα ογκώδη αντικείμενα και συγκεκριμένες προσμίξεις (π.χ. επικίνδυνα απόβλητα) συνήθως απομακρύνονται χειροκίνητα από το ρεύμα των αποβλήτων που οδηγείται σε μηχανική επεξεργασία. Σε μικρής δυναμικότητας εγκαταστάσεις, όπου το ρεύμα εισόδου αποτελείται από ανακυκλώσιμα με ΔσΠ, μπορεί να υιοθετηθεί αποκλειστικά αύτη η μέθοδος, χωρίς να παρεμβάλλεται κάποιο άλλο είδος μηχανικού διαχωρισμού. Ο εξοπλισμός του χειρωνακτικού διαχωρισμού μπορεί να είναι ένας ιμάντας μεταφοράς ή ένα τραπέζι, με τους διαλογείς στη μία ή και στις δύο πλευρές του. Σε κοντινή απόσταση από τους διαλογείς τοποθετούνται χοάνες ή μεγάλοι κάδοι για τη συλλογή των διαχωρισθέντων υλικών (UNEP, 2005).

Μηχανικός διαχωρισμός: Ο μηχανικός διαχωρισμός περιλαμβάνει συνήθως τη χρήση διαφόρων μηχανημάτων επεξεργασίας. Οι συνηθέστερες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι οι ακόλουθες: μείωση μεγέθους, αεροδιαχωρισμός, κοσκίνισμα, μαγνητικός διαχωρισμός, διαχωρισμός γυαλιού, διαχωρισμός μη σιδηρούχων, συμπίεση – δεματοποίηση. Η ακολουθία και η χρήση των διαδικασιών για την επεξεργασία των σύμμεικτων ποικίλει. Ωστόσο, η μείωση μεγέθους ή μια προκαταρκτική διαλογή είναι το πρώτο βήμα (UNEP, 2005).

Μείωση μεγέθους

Η μείωση μεγέθους μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους όπως τεμαχισμός (shredding) και άλεσμα (grinding). Ο τεμαχισμός αφορά κυρίως σε σύμμεικτα απόβλητα, ενώ όταν πρόκειται για απόβλητα με

ΔσΠ χρησιμοποιούνται κυρίως κοκκοποιητές (granulators) και μύλοι (grinders), για συγκεκριμένα είδη πλαστικών και γυαλιών, αντίστοιχα. Η μείωση μεγέθους είναι ένα βασικό βήμα στη μηχανική επεξεργασία των σύμμεικτων αποβλήτων. Κατά τη διαδικασία αυτή, ογκώδη αντικείμενα τεμαχίζονται έτσι ώστε το μέγεθός τους να είναι συμβατό με τις προδιαγραφές του εξοπλισμού. Ταυτόχρονα, επιτυγχάνεται ομοιομορφία ως προς το μέγεθος των υλικών, που είναι απαραίτητη για κάποια συστήματα μηχανικής διαλογής. Τα υλικά που προέρχονται από ΔσΠ έχουν συνήθως σχετικά μικρό μέγεθος ή μικρές διαφορές στο μέγεθος των σωμάτων ή και τα δύο. Έτσι, η μείωση μεγέθους δεν είναι απαραίτητο στάδιο πριν τη διαλογή. Σε αρκετές περιπτώσεις, τα διαχωρισμένα υλικά υπόκεινται μείωση μεγέθους μετά τη διαλογή, για την προετοιμασία τους για διάθεση στην αγορά (UNEP, 2005).

Αεροδιαχωρισμός

Ο αεροδιαχωρισμός είναι μια διαδικασία διαχωρισμού σε κατηγορίες υλικών με βάση τις διαφορές των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών τους. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι συνάρτηση του μεγέθους, του σχήματος και της πυκνότητάς τους. Η διαδικασία στηρίζεται στην αλληλεπίδραση ενός ρεύματος αέρα, των τεμαχισμένων υλικών και της βαρυτικής δύναμης, σε έναν περιορισμένο όγκο. Εδώ, η ελκτική και η βαρυτική δύναμη ασκούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις πάνω στα υλικά. Αποτέλεσμα αυτού είναι να αιωρούνται τα σώματα εκείνα που παρουσιάζουν μεγάλο λόγο ελκτικής προς βαρυτική δύναμη (ελαφρύ κλάσμα), ενώ αντίθετα, αυτά που παρουσιάζουν μικρό λόγο τείνουν να καθιζάνουν εκτός του ρεύματος αέρα (βαρύ κλάσμα). Στον αεροδιαχωρισμό των τεμαχισμένων σύμμεικτων ΑΣΑ, το χαρτί και τα πλαστικά υλικά τείνουν να συγκεντρώνονται στο ελαφρύ κλάσμα, ενώ τα μέταλλα και το γυαλί είναι τα κύρια συστατικά στο βαρύ κλάσμα. Ωστόσο, ο αεροδιαχωρισμός επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία που μπορεί να περιέχεται στο μίγμα. Έτσι, είναι πολύ πιθανό να βρεθούν υλικά όπως χαρτί ή απόβλητα φαγητού, με μεγάλα ποσοστά υγρασίας, στο βαρύ κλάσμα (UNEP, 2005).

Κοσκίνισμα

Τα κόσκινα χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό σωματιδίων βάσει του μεγέθους τους. Ο διαχωρισμός οδηγεί, θεωρητικά, στη δημιουργία δύο ρευμάτων, όπου το ελάχιστο μέγεθος του πρώτου είναι μεγαλύτερο από τα ανοίγματα του κόσκινου, ενώ το μέγιστο του δεύτερου είναι μικρότερο από τα ανοίγματα αυτά. Το πρώτο ρεύμα συγκρατείται πάνω ή μέσα στο κόσκινο, ενώ το δεύτερο διαπερνά το κόσκινο και συλλέγεται σε άλλο χώρο. Από το διαχωρισμό αυτό μπορεί να προκύπτουν περισσότερα από δύο ρεύματα αποβλήτων διαφορετικής τάξης μεγέθους, στην περίπτωση που τοποθετηθούν δύο ή περισσότερα κόσκινα, με διαφορετικού μεγέθους ανοίγματα, στη σειρά. Κατά κύριο λόγο, χρησιμοποιούνται τρεις τύποι κοσκίνων από τη βιομηχανία επεξεργασίας στερεών αποβλήτων, τόσο σύμμεικτων όσο και προδιαλεγμένων: κόσκινο επίπεδης κλίνης, κυκλικό κόσκινο και περιστρεφόμενο κόσκινο. Το τελευταίο έχει αποδειχθεί αποτελεσματικότερο για το διαχωρισμό των σύμμεικτων ΑΣΑ και μιγμάτων που περιέχουν μεγάλα επίπεδα υλικά και αδρανή. Έτσι αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική. Οι άλλοι δύο τύποι κοσκίνων χρησιμοποιούνται κυρίως για προδιαλεγμένα υλικά. Ο διαχωρισμός υλικών με παρόμοιες διαστάσεις ή υλικών που έχουν την τάση δημιουργίας συσσωματωμάτων, απαιτεί συνεχή ανάδευση για καλύτερη απόδοση (UNEP, 2005).

Μαγνητικός διαχωρισμός

Ο μαγνητικός διαχωρισμός χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό μαγνητικών (σιδηρούχων) μετάλλων από μίγμα διαφόρων υλικών, όπως σύμμεικτα απόβλητα, ανάμεικτα μέταλλα, γυαλιά και πλαστικά δοχεία. Η διαδικασία είναι τεχνικά απλή και σχετικά χαμηλού κόστους. Οι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι είτε μόνιμοι ή ηλεκτρομαγνήτες. Υπάρχουν τρεις τύποι μαγνητικών διαχωριστών: τροχαλία μαγνητικής κεφαλής, τύμπανο και μαγνητικός ιμάντας (UNEP, 2005).

Διαχωρισμός αλουμινίου και γυαλιού

Πολλές τεχνολογικά πολύπλοκες διαδικασίες έχουν χρησιμοποιηθεί ή προταθεί για τον διαχωρισμό των μη σιδηρούχων μετάλλων και του γυαλιού. Το βασικό μη σιδηρούχο μέταλλο που περιέχεται στα ΑΣΑ και συνήθως αποτελεί στόχο ανάκτησης, είναι το αλουμίνιο. Αυτό μπορεί να διαχωριστεί με διαχωριστή επαγωγικών ρευμάτων (ή Eddy Current διάταξη). Κατά το διαχωρισμό, προκαλείται ηλεκτρομαγνητικό ρεύμα που διαπερνά τον όγκο των αποβλήτων, απομακρύνοντας τα μεταλλικά σωματίδια από τα υπόλοιπα απόβλητα. Προσμίξεις άλλων μη σιδηρούχων μετάλλων στο ανακτώμενο αλουμίνιο, εξαρτώνται κυρίως από την συγκέντρωσή τους στα ΑΣΑ, την κατανομή μεγέθους των υλικών στο ρεύμα των αποβλήτων και τις συνθήκες λειτουργίας του διαχωριστή. Για την απομάκρυνση του γυαλιού χρησιμοποιείται τόσο η μέθοδος της επίπλευσης όσο και ο οπτικο-ηλεκτρονικός διαχωρισμός (UNEP, 2005).

Ξήρανση και συμπύκνωση

Η ξήρανση χρησιμοποιείται συνήθως σε εγκαταστάσεις παραγωγής καυσίμων από τα απόβλητα, τα λεγόμενα «καύσιμα προερχόμενα από απορρίμματα» (refuse derived fuels, RDF). Ο στόχος της ξήρανσης είναι η απομάκρυνση της υγρασίας και η παροχή καυσίμου. Η συμπύκνωση και η δεματοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του όγκου των απορριμμάτων που οδηγούνται σε ταφή (εξοικονόμηση χώρου, δηλαδή, στους ΧΥΤΑ). Η συμπύκνωση χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή στερεού καυσίμου από το ελαφρύ (εύφλεκτο) κλάσμα των ΑΣΑ ή από διάφορα κλάσματα χαρτιού. Τέλος, η συμπύκνωση μπορεί να χρησιμοποιείται στη δεματοποίηση αλουμινένιων και χαλύβδινων δοχείων και δοχείων φαγητού, για συγκεκριμένες αγορές (UNEP, 2005).

4.2.1 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ

Οι πηγές αέριων εκπομπών στην περίπτωση της μηχανικής επεξεργασίας των αποβλήτων αφορά άμεσες και έμμεσες εκπομπές σε σχέση με τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα διαχείρισης. Περιλαμβάνουν τις άμεσες διαδικασίες που εκτελούνται εντός της μονάδας και τις έμμεσες προγενέστερες διαδικασίες που επηρεάζονται από την λειτουργία της μονάδας. Τα περισσότερα αέρια δημιουργούνται από τη χρήση ενέργειας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, είτε μέσω της καύσης τους εντός της μονάδας (άμεσες), είτε μέσω της χρήσης τους για την παροχή ενέργειας στη μονάδα (προγενέστερες). Ειδικότερα, στις μονάδες μηχανικής επεξεργασίας των αποβλήτων, καταναλώνεται ενέργεια (ηλεκτρισμός και καύσιμα) για τη διαχείριση και τη μηχανική επεξεργασία των αποβλήτων.

4.3 Ανακύκλωση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι διεργασίες και οι αντίστοιχες πηγές εκπομπών ΑΦΘ που αφορούν τη διαχείριση των ανακυκλώσιμων αποβλήτων, οι οποίες περιλαμβάνουν τόσο τις διεργασίες διαλογής τους όσο και τις διεργασίες ανακύκλωσής τους για τη δευτερογενή παραγωγή πρώτων υλών. Ειδικότερα, στην αρχή γίνεται αναφορά στη λειτουργία των Κέντρων Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών, ενώ στην συνέχεια παρουσιάζονται οι σχετικές διεργασίες και πηγές εκπομπών ανά ανακυκλώσιμο υλικό (χαρτί/χαρτόνι, πλαστικό, γυαλί, μέταλλα).

4.3.1 Κέντρα Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών

Σϋμφωνα με τους *Pressley et al.* (2015), τα Κέντρα Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών (ΚΔΑΥ) ταξινομούνται σε 3 είδη, ανάλογα με το είδος και το πλήθος των εισερχόμενων ρευμάτων αποβλήτων. Έτσι, προκύπτουν τα ΚΔΑΥ σύμμεικτων ανακυκλώσιμων (οργανικά και ξηρά ανακυκλώσιμα), σύμμεκτων ξηρών ανακυκλώσιμων και χωριστά διαλεγμένων ξηρών ανακυκλώσιμων (π.χ. χαρτί, γυαλί, μέταλλο, πλαστικό). Στην Ελλάδα, τα ΚΔΑΥ εντάσσονται μέχρι στιγμής σε αυτά που δέχονται

σύμμεικτα ξηρά ανακυκλώσιμα απόβλητα, καθώς δεν υπάρχει σύστημα διαλογής στην πηγή των ξηρών ανακυκλώσιμων υλικών σε περαιτέρω ρεύματα.

Τα όρια του συστήματος διαλογής υλικών ξεκινούν από την παράδοση των υλικών στο χώρο του ΚΔΑΥ, ενώ αέριες εκπομπές αναμένονται λόγω της παροχής και καύσης ορυκτών καυσίμων, καθώς και από την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για την λειτουργία του μηχανολογικού εξοπλισμού των ΚΔΑΥ καθώς και των οχημάτων που μπορεί να λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία διαλογής. Έτσι, βασικό ζητούμενο είναι ο καθορισμός του εξοπλισμού που διαθέτουν τα ΚΔΑΥ. Ανάλογα την εγκατάσταση του ΚΔΑΥ και τα ρεύματα ανακυκλώσιμων υλικών των οποίων στοχεύεται να ανακτηθούν, διαφέρει και ο μηχανολογικός εξοπλισμός.

4.3.2 Ανακύκλωση χαρτιού – χαρτονιού

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διεργασία της ανακύκλωσης αποβλήτων χαρτιού και χαρτονιού, η διεργασία της πρωτογενούς παραγωγής χαρτιού που υποκαθίσταται από την ανακύκλωση, καθώς και οι εκπομπές ΑΦΘ που προκύπτουν από τα διάφορα στάδια της ανακύκλωσης, σύμφωνα με τους *Merrild et al.* (2009).

Το χαρτί και το χαρτόνι αποτελεί ένα μεγάλο τμήμα των αστικών στερεών αποβλήτων, το οποίο αποτελείται κυρίως από έντυπο χαρτί και συσκευασίες. Χαρτί και χαρτόνι ως απόβλητα μπορούν να αποτελούν ένα ρεύμα προς επεξεργασία ή να διαχωρίζονται, ανάλογα με την ποιότητα χαρτιού που πρέπει να παραχθεί. Εκτός από το χαρτί πολύ υψηλής ποιότητας, όλα τα υπόλοιπα είδη μπορούν να παραχθούν αποκλειστικά από ανακύκλωση χαρτιού. Έτσι, τα προδιαλεγμένα ρεύματα μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω και να ανακυκλωθούν. Η ανακτημένη ίνα προτιμάται ως πρώτη ύλη για τις βιομηχανίες χαρτοπολτού τόσο λόγω της νομοθετικής προώθησης της ανακύκλωσης όσο και την ανταγωνιστικής τιμής του έναντι των καθαρών πρώτων υλών.

Η διαχείριση αποβλήτων χαρτιού συνεισφέρει στις αέριες εκπομπές έμμεσα με την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων κατά τη λειτουργία των ΚΔΑΥ και άμεσα από την επεξεργασία τους, όπως μηχανική ή/και χημική πολτοποίηση. Η μηχανική επεξεργασία χρησιμοποιείται για χαρτί χαμηλότερης ποιότητας όπως είδη χαρτονιού, ενώ η μηχανική-χημική διεργασία, που περιλαμβάνει στάδιο απομάκρυνσης του μελανιού, χρησιμοποιείται για ανώτερης ποιότητας όπως το χαρτί εκτύπωσης, τα περιοδικά και τα χαρτομάντηλα. Όσον αφορά στις αέριες εκπομπές, οι διάφορες τεχνολογίες ποικίλουν κυρίως ως προς την κατανάλωση ενέργειας.

Στο σημείο αυτό κρίνεται χρήσιμη μια σύντομη επισκόπηση των τεχνολογιών ανακύκλωσης χαρτιού καθώς και οι διεργασίες και ενεργειακές απαιτήσεις για την παραγωγή χαρτιού από καθαρές πρώτες ύλες. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, όσον αφορά την παραγωγή χαμηλής ποιότητας χαρτιού, η χρήση ανακυκλωμένου χαρτιού επαρκεί. Όμως όταν απαιτείται υψηλότερη ποιότητα, μπορεί να κριθεί αναγκαία η επικουρική χρήση καθαρών πρώτων υλών για να αναβαθμίσουν τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Αυτό παρατηρείται διότι, κάθε φορά που υπόκειται σε επεξεργασία ανακύκλωσης το χαρτί, μειώνεται η ποιότητα του. Έτσι σπάνια χρησιμοποιείται αποκλειστικά ανακυκλωμένος χαρτοπολτός ως πρώτη ύλη.

Υπάρχουν δύο τρόποι μετατροπής του χαρτιού σε χαρτοπολτό, ο μηχανικός και ο χημικός μηχανικός. Στην πρώτη περίπτωση, η παραγωγή χαρτιού βασίζεται στη μηχανική επαναπολτοποίηση και περιέχει συνήθως τις ακόλουθες διεργασίες: επαναπολτοποίηση, μηχανική αφαίρεση των ογκωδών προσμίξεων, εξευγενισμός μέσω πλύσης, διαχωρισμός και άλεσμα, μηχανική απομάκρυνση των προσμίξεων μικρότερου μεγέθους, ενίσχυση, προαιρετική λεύκανση και τέλος ξήρανση. Στην περίπτωση της χημικής-μηχανικής επεξεργασίας, περιλαμβάνεται το επιπρόσθετο στάδιο του αποχρωματισμού. Ο αποχρωματισμός γίνεται για τη λεύκανση του πολτού έτσι ώστε να

χρησιμοποιηθεί σε ποιότητες χαρτιού, όπως το χαρτί εκτύπωσης, όπου είναι σημαντική η καθαρότητα. Ο αποχρωματισμός περιλαμβάνει ένα χημικό και ένα μηχανικό στάδιο. Στο χημικό στάδιο προστίθενται παράγοντες αποχρωματισμού στον πολτό, στάδιο που πραγματοποιείται συνήθως κατά τη διάρκεια της πολτοποίησης. Το μελάνι απομακρύνεται μηχανικά μέσω επίπλευσης. Το στάδιο αυτό συνήθως γίνεται μετά το στάδιο εξευγενισμού.

Στην μηχανική πολτοποίηση οι ίνες του ξύλου διαχωρίζονται μεταξύ τους μηχανικά. Με τη διεργασία αυτή προκύπτει ένα μείγμα ινών και μεγαλύτερων θραυσμάτων. Η χημική πολτοποίηση περιλαμβάνει επεξεργασία με καυστικό νάτριο (NaOH) και θειικά (SO_4^{-2}) ή θειώδη (SO_3^{-2}) για την απομάκρυνση ινών κυτταρίνης από τη λιγνίνη και άλλες ακαθαρσίες κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας υπό υψηλή πίεση. Τα κομμάτια του ξύλου αποδομούνται μερικώς για να αποδυναμωθούν οι δεσμοί μεταξύ των ινών και της λιγνίνης. Τα κομμάτια μετά επεξεργάζονται σε ραφινιέρα. Η χημική πολτοποίηση δεν έχει μεγάλο βαθμό απόδοσης, ωστόσο είναι πιο αποδοτική σε σχέση με τη μηχανική όταν πρόκειται για μακριές ίνες. Η πιο διαδεδομένη διαδικασία χημικής πολτοποίησης στη παραγωγή είναι με τη χρήση θειικών, που αποκαλείται επίσης και μέθοδος Kraft. Η πολτοποίηση με θειικά χρησιμοποιείται για ποιότητα χαρτιού όπως είναι πάνελ επένδυσης ή χαρτί συσκευασίας τροφίμων, ενώ τα θειώδη χρησιμοποιούνται για παραγωγή χαρτιού χαμηλότερης ανθεκτικότητας. Λόγω των χημικών αντιδράσεων ο χαρτοπολτός γίνεται πιο σκουρόχρωμος από ότι με το ξύλο και έτσι συνήθως υπόκειται σε λεύκανση. Η χημική πολτοποίηση έχει μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω της φάσης υψηλής πίεσης. Ωστόσο, το κομμάτι των κορμών που δεν καταλήγουν ως ίνες και το «μαύρο υγρό» που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως εναλλακτική πηγή ενέργειας, κάνουν τους μύλους χημικής πολτοποίησης λιγότερο εξαρτώμενους από εξωτερικές πηγές ηλεκτρισμού.

Όταν ανακυκλώνεται το χαρτί υπάρχει τόσο απώλεια υλικού, όσο και απώλεια ποιότητας του υλικού κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Η απώλεια υλικού σημαίνει ότι ένας τόνος εισερχόμενων αποβλήτων χαρτιού δεν δίνει έναν τόνο εξερχόμενου χαρτιού και αυτή η απώλεια είναι συγκεκριμένη για κάθε εγκατάσταση και κυμαίνεται από 2% έως 18% (Merrild et al. 2008). Η απώλεια ποιότητας υλικού οφείλεται στην επανεπεξεργασία του χαρτιού λόγω του ότι οι ίνες σε κάθε επεξεργασία χάνουν μήκος και πρέπει να προστεθούν νέες ίνες για να διατηρήσουν την ίδια ποιότητα χαρτιού. Αυτό σημαίνει ότι η αναλογία υποκατάστασης ανάμεσα στο ανακυκλωμένο και στο καθαρό χαρτί είναι συνήθως λιγότερο από 1 : 1. Η αναλογία υποκατάστασης ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα του χαρτιού που συλλέγεται και την ποιότητα του χαρτιού που παράγεται. Σύμφωνα με τους Schmidt & Stromberg (2006) η απώλεια ποιότητας για χαρτί εφημερίδας και για χαρτί περιοδικού είναι αμελητέα ενώ για χαρτί συσκευασίας, χαρτόνι συσκευασίας, χαρτί εκλεκτής ποιότητας και ανάμεικτο χαρτί είναι περίπου 10%.

4.3.2.1 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ

Οι πηγές αέριων εκπομπών στην περίπτωση της διαχείρισης των αποβλήτων χαρτιού αφορά άμεσες και έμμεσες εκπομπές σε σχέση με τις δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα διαχείρισης. Περιλαμβάνουν τις άμεσες διαδικασίες που εκτελούνται εντός του ΚΔΑΥ και τις έμμεσες προγενέστερες και μεταγενέστερες διαδικασίες που επηρεάζονται από την λειτουργία των ΚΔΑΥ. Για την διαχείριση αποβλήτων χαρτιού οι αέριες εκπομπές συνδέονται άμεσα με την κατανάλωση ενέργειας.

Έμμεσες προγενέστερες εκπομπές:

Οι προγενέστερες διεργασίες σε ένα ΚΔΑΥ περιλαμβάνουν κυρίως την παροχή ηλεκτρισμού, φυσικού αερίου και υγρού καυσίμου. Η παροχή των πόρων αυτών σχετίζονται αμεσα με την κατανάλωση στο ΚΔΑΥ και σε ένα βαθμό με την ποσότητα του χαρτιού που διαχειρίζεται.

Άμεσες εκπομπές:

Τα στοιχεία, που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία, καλύπτουν την κατανάλωση καυσίμων ντίζελ από τους ανυψωτές και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων για την θέρμανση των κτιρίων. Οι

άμεσες εκπομπές από τις διεργασίες αυτές είναι λίγες καθώς οι περισσότερες εκπομπές εμφανίζονται προγενέστερα στο σύστημα (Merrild et al. 2009).

Έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές:

Αυτές προκαλούνται από τη χρήση των αποβλήτων χαρτιού στη παραγωγή χαρτιού και χαρτονιού αλλά και στην επεξεργασία των υπολειμμάτων από το ΚΔΑΥ. Ανάλογα με το σύστημα μπορούν να προσμετρηθούν και η εξοικονόμηση ενέργειας από την υποκατάσταση πρωτογενών πρώτων υλών αλλά και η διατήρηση των δασών. Επίσης μπορεί να προσμετρηθεί η δέσμευση του άνθρακα από τα δάση και η υποκατάσταση παραγωγής ενέργειας από τη χρήση βιομάζας για παραγωγή ενέργειας.

4.3.3 Ανακύκλωση πλαστικού

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διεργασία της ανακύκλωσης αποβλήτων πλαστικού, καθώς και οι εκπομπές ΑΦΘ που προκύπτουν από τα διάφορα στάδια της ανακύκλωσης, σύμφωνα με τους *Astrup et al.* (2009).

Περίπου το 11% κατά βάρος των ΑΣΑ μπορεί να είναι απόβλητα πλαστικού (Delgado et al. 2007). Πολυαιθυλένιο (χαμηλής και υψηλής πυκνότητας, LDPE και HDPE) και πολυπροπυλένιο (PP) είναι σημαντικά πολυμερή, αλλά το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) και πολυστυρένιο (PS) εμφανίζονται επίσης (Delgado et al. 2007). Τα πλαστικά αντικείμενα στα απόβλητα μπορεί να είναι είτε καθαρά πλαστικά ενός τύπου (όπως μπουκάλια νερού) ή βρώμικα ενός τύπου (όπως αντικείμενα συσκευασίας αλλά και σακούλες απορριμμάτων) και σύμμεικτα πλαστικά για τη συσκευασία τροφίμων (όπως κρέατος και λαχανικών) καθώς και πλαστικά συνδυασμένα με άλλα υλικά (νάυλον, μέταλλα και χαρτόνι) όπως είναι τα παιχνίδια και τα εργαλεία.

Οι διεργασίες που σχετίζονται με τη διαχείριση αποβλήτων πλαστικού περιλαμβάνουν την παραλαβή και επεξεργασία τους στο ΚΔΑΥ, και στη συνέχεια τη μεταφορά τους στη βιομηχανία προς παραγωγή νέων προϊόντων ή για χρήση ως καύσιμα. Καθώς η ποιότητα του πλαστικού μειώνεται κάθε φορά που υπόκειται σε επεξεργασία, είναι απαραίτητη η προσθήκη καθαρών πρώτων υλών για την παραγωγή υψηλής ποιότητας πλαστικού έτσι ώστε να διασφαλιστούν οι επιθυμητές ιδιότητες. Θεωρούμε ότι η παραγωγή πλαστικού από αποκλειστικά ανακυκλωμένο υλικό, αντικαθιστά πλαστικό παραγόμενο αποκλειστικά από καθαρές πρώτες ύλες ή από καθαρό ξύλο, όταν πρόκειται για προϊόντα χαμηλής ανθεκτικότητας. Επίσης είναι δυνατό να υποκαθιστούνται και άλλα υλικά πέρα από το ξύλο.

Υψηλής ποιότητας απόβλητα πλαστικού που περιέχουν μόνο ενός τύπου πλαστικό (HDPE, PP, PET) μπορούν να οδηγηθούν κατευθείαν στην παραγωγή όπως γίνεται με τις καθαρές πρώτες ύλες. Ωστόσο λεπτά κόσκινα μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση μικρών ακαθαρσιών που παραμένουν στο ρευστό πλαστικό πριν τη δημιουργία του νέου προϊόντος. Η ποσότητα των ακαθαρσιών που απομακρύνεται είναι συνήθως πολύ μικρή αλλά καθοριστική για την ποιότητα του προϊόντος.

4.3.3.1 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ

Για τη διαχείριση αποβλήτων πλαστικού, οι άμεσες εκπομπές σχετίζονται με τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα ΚΔΑΥ, ενώ οι έμμεσες καλύπτουν τις προγενέστερες και μεταγενέστερες διεργασίες που επηρεάζονται από την λειτουργία των ΚΔΑΥ. Οι αέριες εκπομπές επηρεάζονται κυρίως από τη χρήση ενέργειας.

Έμμεσες προγενέστερες εκπομπές:

Αυτές σχετίζονται με ένα εύρος διεργασιών, ωστόσο μόνο λίγες θεωρούνται σημαντικές και ειδικότερα, η ομάδα δραστηριοτήτων που αφορούν την παροχή ηλεκτρισμού, ντίζελ, προσθετικών υλικών και υλικών συσκευασίας.

Άμεσες εκπομπές:

Οι άμεσες εκπομπές σχετίζονται με τις διεργασίες μετατροπής του πλαστικού σε προϊόν που να μπορεί να πουληθεί στη βιομηχανία πλαστικού. Βασικός παράγοντας είναι η λειτουργία του ΚΔΑΥ. Στα ΚΔΑΥ καταναλώνεται ενέργεια (ηλεκτρισμός και καύσιμα) για την διαχείριση και τη μηχανική επεξεργασία των πλαστικών και καύσιμα για τα οχήματα. Η κατανάλωση ηλεκτρισμού είναι σημαντική. Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας προσμετράται ως διεργασία εκτός του συστήματος διαχείρισης και θεωρείται ως προγενέστερη πηγή αέριων εκπομπών. Μπορεί επίσης να γίνεται και κατανάλωση φυσικού αερίου ή πετρελαίου, για παράδειγμα για τη ξήρανση πριν το διαχωρισμό. Η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων από τα ΚΔΑΥ προκαλεί άμεσες αέριες εκπομπές, ενώ η παροχή των καυσίμων θεωρείται ως έμμεση προγενέστερη εκπομπή.

Έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές:

Αυτές σχετίζονται με την επανεπεξεργασία των πλαστικών κόκκων ή τη χρήση των αποβλήτων ως καύσιμα. Για τη μεταγενέστερη συμβολή λαμβάνονται υπόψη τρεις βασικές εναλλακτικές: η ανακύκλωση καθαρού πλαστικού ενός τύπου, η ανακύκλωση αναμειγμένου πλαστικού με προσμίξεις και η χρήση του πλαστικού ως καυσίμου. Οι δύο πρώτες εναλλακτικές περιλαμβάνουν ανακύκλωση υλικών και συνήθως περιγράφονται στη βιβλιογραφία ως μηχανική ανακύκλωση. Η πρώτη περίπτωση περιλαμβάνει την υποκατάσταση καθαρού πλαστικού, ενώ στη δεύτερη αντικαθίσταται ξύλο. Στην τρίτη περίπτωση αντικαθίσταται η χρήση άλλων καυσίμων. Και στις τρεις περιπτώσεις οι έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές αντιστοιχούν σε εξοικονόμηση λόγω υποκατάστασης.

4.3.4 Ανακύκλωση γυαλιού

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διεργασία της ανακύκλωσης αποβλήτων γυαλιού, η διεργασία της πρωτογενούς παραγωγής του γυαλιού που υποκαθίσταται από την ανακύκλωση καθώς και οι εκπομπές ΑΦΘ που προκύπτουν από τα διάφορα στάδια της ανακύκλωσης, σύμφωνα με τους *Larsen et al.* (2009).

Το γυαλί και η συσκευασία γυαλιού αποτελεί ένα σημαντικό μέρος των ΑΣΑ. Αυτά τα προϊόντα αγγίζουν το 82% της παραγωγής γυαλιού στην Ευρώπη (IPCC, 2001a). Βασικά συστατικά του γυαλιού είναι ο χαλαζίας (SiO_2), το οξείδιο του νατρίου (Na_2O) και το οξείδιο του ασβεστίου (CaO).

Τα απόβλητα γυαλιού δεν αποσυντίθενται κατά την καύση ή την ταφή και προσθέτουν όγκο στα υπολείμματα αυτών των διεργασιών. Επίσης, δεν είναι δυνατή η ενεργειακή αξιοποίηση του γυαλιού και έτσι προκύπτει ότι η ανακύκλωσή του είναι η προτιμότερη διαδικασία για την επεξεργασία του. Η ανακύκλωση των αποβλήτων γυαλιού μπορεί να ακολουθήσει δύο κύριες οδούς:

1. Θραύση και τήξη των θραυσμάτων

Τα απόβλητα γυαλιού υπόκεινται σε θραύση για την παραγωγή νέων γυάλινων συσκευασιών με την παράλληλη απομάκρυνση προσμίξεων. Παράλληλα μπορεί να γίνεται και διαχωρισμός των θραυσμάτων με βάση το χρώμα. Η χρήση των θραυσμάτων αυτών ως πρώτη ύλη στη βιομηχανία γυαλιού μπορεί να εξοικονομήσει στη χρήση φυσικών πόρων καθώς και στην κατανάλωση ενέργειας. Για την τήξη του υαλοθραύσματος, οι βιομηχανίες γυαλιού παραλαμβάνουν το υαλόθραυσμα από τα ΚΔΑΥ και το χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη. Πριν τη χρησιμοποίησή του, το υαλόθραυσμα υπόκειται σε επαναλαμβανόμενες διαδικασίες διαχωρισμού για την απομάκρυνση τυχόν προσμίξεων, έτσι ώστε να μπορεί να παραχθεί καθαρή πρώτη ύλη. Είναι πιθανή και η περαιτέρω θραύση του. Ο μηχανολογικός

εξοπλισμός είναι ίδιος με αυτόν των ΚΔΑΥ. Η τροφοδοσία για την παραγωγή γυάλινων συσκευασιών μπορεί να αποτελείται και ως 90% από υαλόθραυσμα όσον αφορά το χρωματιστό γυαλί (IPCC, 2001a). Ένα μεγάλο πλεονέκτημα στη χρήση υαλοθραύσματος είναι η χαμηλότερες απαιτήσεις σε ενέργεια όσον αφορά τους φούρνους, όπου για κάθε 10% υαλόθραυσμα στην πρώτη ύλη η κατανάλωση μειώνεται κατά 2-3%.

2. Διαχωρισμός και πλύση γυάλινων συσκευασιών, κυρίων φιαλών, για επαναχρησιμοποίηση

Το συγκεκριμένο ρεύμα αποβλήτων διαχειρίζονται συνήθως μέσω προγραμμάτων επιστροφής οι ίδιες οι βιομηχανίες που χρησιμοποιούν τις συσκευασίες αυτές για την εμφιάλωση των προϊόντων τους. Σε αυτή τη περίπτωση, η επαναχρησιμοποίηση υποκαθιστά τη παραγωγή νέου προϊόντος.

Η επαναχρησιμοποίηση του γυαλιού αφορά κυρίως γυάλινες συσκευασίες ποτών, διότι απαντώνται σε μεγάλες ποσότητες και χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες προδιαγραφές. Η επαναχρησμοποίηση περιλαμβάνει δύο κύριες διεργασίες: τον διαχωρισμό και την πλύση. Οι φιάλες που δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν μετατρέπονται σε υαλόθραυσμα και μεταπωλούνται. Ο διαχωρισμός μπορεί να αφορά τόσο το σχήμα όσο και το χρώμα. Για την πλύση χρησιμοποιούνται καυτό νερό και σόδα για την απομάκρυνση βρωμιάς και ετικετών. Στη συνέχεια τα δοχεία «στεγνώνουν» και συσκευάζονται. Η διαδικασία περιλαμβάνει εξοπλισμό διαχωρισμού όπως των ΚΔΑΥ και μηχανήματα για την πλύση, τα οποία πιθανώς να ακολουθούνται από μηχανισμό καθαρισμού των υγρών αποβλήτων στην εγκατάσταση.

4.3.4.1 Πρωτογενής παραγωγή γυαλιού

Στο παρόν κείμενο παρουσιάζεται η διαδικασία της παραγωγής γυάλινων συσκευασιών (βάσει του IPCC, 2001 και IPCC, 2006) λόγω της συνάφειας με την ανακύκλωση γυάλινων συσκευασιών.

Οι πιο βασικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή γυαλιού είναι η άμμος (SiO_2), το ανθρακικό νάτριο ($NaCO_3$) και ο ασβεστόλιθος ($CaCO_3$), καθώς και άλλα υλικά σε μικρότερες ποσότητες. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιείται και πληθώρα υγρών και αέριων υλικών κατά τη διαδικασία.

Τα υλικά τροφοδοτούνται σε ένα λουτρό στον κλίβανο όπου μέσω χημικών διεργασιών δημιουργείται το γυαλί. Κατά τη διάρκεια της ρευστοποίησης απελευθερώνεται διοξείδιο του άνθρακα από τα ανθρακικά άλατα, και δημιουργούνται οξείδια που είναι το βασικό συστατικό του γυαλιού. Οι απώλειες σε αέρια αγγίζουν το 20% της συνολικής μάζας. Το ρευστοποιημένο γυαλί μετά τον κλίβανο, μέσω διαδοχικών διαδικασιών θέρμανσης και ψύξης, μετατρέπεται στα τελικά προϊόντα. Η θερμοκρασία μέσα στον κλίβανο φτάνει τους 1650°C, και η θερμότητα προσφέρεται συμβατικά με καύση ορυκτών καυσίμων και φυσικού αερίου ενώ υπάρχει και κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος. Λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε ενέργεια, η ανάκτηση θερμότητας από την καύση αερίου είναι κρίσιμη, για την υψηλή ενεργειακή απόδοση. Η παραγωγική διαδικασία είναι συνεχής και ένας κλίβανος μπορεί να λειτουργεί συνεχόμενα για 12 έτη. Έως το 75% της κατανάλωσης ενέργειας αποδίδεται στον κλίβανο, ενώ το υπόλοιπο 25% αποδίδεται κυρίως σε διαδικασίες θέρμανσης και ψύξης.

Εάν θέλουμε να συμπεριλάβουμε το μεταγενέστερο όφελος της ανακύκλωσης, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την ακριβή ποσότητα που αντικαθίσταται λόγω της ανακύκλωσης. Μια μικρή ποσότητα υλικού χάνεται στη διαδικασία της ανακύκλωσης και έτσι το γυαλί δεν μπορεί να ανακυκλώνεται επ' άπειρο. Ωστόσο, η ποιότητα του γυαλιού δεν αλλοιώνεται, ανεξάρτητα των διαδικασιών ανακύκλωσης που θα υποστεί, εάν το υαλόθραυσμα είναι αυστηρώς διαχωρισμένο ανά χρώμα.

4.3.4.2 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ

Οι πιθανές, έμμεσες και άμεσες πηγές από τη διαλογή και ανακύκλωση των αποβλήτων γυαλιού περιγράφονται στη συνέχεια.

Προγενέστερες έμμεσες εκπομπές:

Η προγενέστερη συμβολή στις αέριες εκπομπές από την ανακύκλωση γυαλιού σχετίζονται με τις προβλεπόμενες ανάγκες σε ηλεκτρισμό, καύσιμα, νερό και βοηθητικά μέσα της εγκατάστασης ανακύκλωσης και την παροχή και καύση ορυκτών καυσίμων, κυρίως ντήζελ για τη συλλογή και μεταφορά των αποβλήτων γυαλιού

Άμεσες εκπομπές:

Η διαχείριση αποβλήτων γυαλιού καθορίζεται εδώ ως οι διαδικασίες που σχετίζονται με τη μετατροπή των αποβλήτων αυτών σε νέα προϊόντα, που μπορούν να αξιοποιηθούν από άλλες βιομηχανίες. Το κέντρο διαχωρισμού είναι βασικό σε αυτό το πλαίσιο. Η βασικότερη πηγή άμεσων εκπομπών σε μια τέτοια εγκατάσταση είναι η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων από τα οχήματα μεταφοράς των αποβλήτων μέσα στην εγκατάσταση.

Μεταγενέστερες έμμεσες εκπομπές:

Η προσθήκη υαλοθραύσματος στην παραγωγή γυαλιού σχετίζεται με την αποφυγή αέριων εκπομπών. Παρά το γεγονός ότι ο διαχωρισμός του υαλοθραύσματος απαιτεί κατανάλωση ενέργειας, η προσθήκη του ως πρώτη ύλη μειώνει το σημείο τήξης και έτσι μειώνει τις ενεργειακές ανάγκες στη βιομηχανία παραγωγής γυαλιού. Οι ενεργειακές απαιτήσεις καλύπτονται από ηλεκτρισμό, φυσικό αέριο ή υγρά καύσιμα των οποίων η παραγωγή και χρήση προκαλούν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Η διάσπαση των ανθρακικών και η πύρωσή τους κατά τη διαδικασία παραγωγής γυαλιού, απελευθερώνουν διοξείδιο του άνθρακα. Η προσθήκη υαλοθραύσματος στην παραγωγή γυαλιού υποκαθιστά τη χρήση ανθρακικών αλάτων και έτσι αποφεύγονται οι αέριες εκπομπές.

Με την ανακύκλωση αποφεύγονται η εξόρυξη, ο τεμαχισμός και η διαλογή φυσικών πόρων όπως η άμμος, το αμμοχάλικο και ο ασβεστόλιθος. Οι αέριες εκπομπές που αποφεύγονται σχετίζονται με την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων από τον εξοπλισμό και τα οχήματα κατά τις διαδικασίες αυτές.

4.3.5 Ανακύκλωση μετάλλων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η διεργασία της ανακύκλωσης αποβλήτων μετάλλων, η διεργασία της πρωτογενούς παραγωγής χάλυβα και αλουμινίου που υποκαθίσταται από την ανακύκλωση, καθώς και οι εκπομπές ΑΦΘ που προκύπτουν από τα διάφορα στάδια της ανακύκλωσης, σύμφωνα με τους *Damgaard et al.* (2009).

Τα μέταλλα, ως μέρος των ΑΣΑ, είναι κυρίως ρεύμα των αποβλήτων συσκευασίας. Χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα σιδηρούχα (σίδηρος και ατσάλι) και τα μη σιδηρούχα μέταλλα (που περιλαμβάνουν όλα τα υπόλοιπα, όπως αλουμίνιο, χαλκός, μόλυβδος, χρώμιο και πολύτιμα μέταλλα).

Ο κύριος λόγος ανακύκλωσης των μετάλλων είναι οι μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις κατά την παραγωγή των μετάλλων από πρωτογενείς πρώτες ύλες, ενώ η επανεπεξεργασία των αποβλήτων μετάλλου έχει πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Για παράδειγμα, η ανακύκλωση του αλουμινίου απαιτεί μόλις το 5% της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη παραγωγή του από πρωτογενείς πρώτες ύλες (IPCC, 2001b). Ένας ακόμη λόγος για την ανακύκλωση των μετάλλων είναι οι περιορισμένοι

φυσικοί πόροι και το ορυκτό μετάλλευμα που γίνεται ολοένα πιο σπάνιο και πιο δαπανηρό στην εκμετάλλευση.

4.3.5.1 Ανακύκλωση και πρωτογενής παραγωγή χάλυβα

Η επικρατέστερη διαδικασία για την ανακύκλωση χάλυβα είναι η χρήση κάμινων ηλεκτρικού τόξου (Electric Arc Furbance- EAF) που δέχεται το 100% των αποβλήτων χάλυβα (IISI 2005). Τα κύρια μέρη αυτής της διεργασίας είναι τα ακόλουθα. Τα απόβλητα αρχικά προθερμαίνονται με τα αέρια που δημιουργούνται στο τελευταίο στάδιο της διεργασίας για εξοικονόμηση ενέργειας (μπορεί όμως να χρησιμοποιηθούν και ορυκτά καύσιμα). Στη συνέχεια φορτώνονται σε κάδους μαζί με ανθρακικά, που χρησιμεύουν ως ρευστοποιητές. Οι άνοδοι της καμίνου βυθίζονται στη συνέχεια μέσα στα απόβλητα. Η αρχική ενέργεια των τόξων είναι χαμηλή, μέχρι να βυθιστούν εξ ολοκλήρου στο μίγμα, οπότε και αυξάνεται η ενέργεια μέχρι να λιώσουν πλήρως. Στα πρώτα στάδια μπορεί να προστεθεί και οξυγόνο για την επιτάχυνση της διαδικασίας. Όταν επιτευχθεί η τελική θερμοκρασία και ο χάλυβας έχει ρευστοποιηθεί πλήρως, το μίγμα τοποθετείται σε κουτιά όπου προστίθενται και κράματα και αντιοξειδωτικές ενώσεις. Στη συνέχεια ο χάλυβας οδηγείται στην παραγωγή νέου προϊόντος.

Για την πρωτογενή παραγωγή χάλυβα, το μετάλλευμα σιδήρου αρχικά ρευστοποιείται σε υψικάμινο για να τροφοδοτηθεί σε κάμινο βασικού οξυγόνου (basic oxygen furnace -BOF) προκειμένου να μετατραπεί σε χάλυβα. Το μετάλλευμα σιδήρου αναμειγνύεται με ρευστοποιητές και οπτάνθρακα (coke) και φορτώνεται στο επάνω μέρος της υψικαμίνου. Ο κλίβανος θερμαίνεται μέσω εστιών που φτάνουν τους 1100-1500°C ενώ προωθείται ψυχρός αέρας που διαπερνά τις εστίες αυτές και έτσι τροφοδοτείται η κάμινος με θερμό αέρα θερμοκρασίας 900-1300 °C (IPCC 2008). Έτσι αντιδρούν τα οξείδια μετάλλου με τον οπτάνθρακα και η σκωρία με τον λιωμένο σίδηρο απομακρύνονται από τον κλίβανο από το κάτω μέρος του. Η σκωρία απομακρύνεται στη συνέχεια από τον λιωμένο σίδηρο με τη χρήση «εξαφριστήρα» (skimmer) και το λιωμένο σίδερο είτε χυτεύεται ή αποστέλλεται για την παραγωγή χάλυβα σε κάδους τορπιλών (torpedo ladles) ή οχήματα μεταφοράς. Εάν ο λιωμένος σίδηρος πρόκειται να οδηγηθεί για την παραγωγή χάλυβα θα προεπεξεργαστεί για την απομάκρυνση προσμίξεων θείου, φωσφόρου και σιλικόνης. Μετά θα σταλεί σε BOF όπου θα προστεθεί στο μίγμα οξυγόνο για την οξείδωσή του. Όταν επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία θα τοποθετηθεί σε κάδους και θα προστεθούν στο μίγμα κράματα και αντιοξειδωτικά. Μετά από αυτό το στάδιο το μίγμα θα σταλεί για χύτευση.

4.3.5.2 Ανακύκλωση και πρωτογενής παραγωγή αλουμινίου

Η ανακύκλωση αλουμινίου γίνεται συνήθως σε περιστροφικούς ή αναστρεφόμενους κλιβάνους, ενώ για μεγαλύτερη καθαρότητα μπορεί να χρησιμοποιηθούν και επαγωγικοί κλίβανοι οι οποίοι όμως δεν είναι ευρέως διαδεδομένοι. Για το αλουμίνιο από τα ΑΣΑ, όπως τα αλουμινένια δοχεία και τα λεπτά φύλλα, απαιτείται προεργασία για την απομάκρυνση των προσμίξεων, όπως ετικέτες και λεκέδες λαδιού, αναλόγως με την πηγή των αποβλήτων. Αυτό βελτιώνει τη θερμική απόδοση της ανακύκλωσης και μειώνει τις αέριες εκπομπές από την τήξη. Τα απόβλητα στη συνέχεια οδηγούνται στους κλιβάνους. Υπάρχει πληθώρα ρυθμίσεων για τους κλιβάνους ανάλογα με την ποιότητα των αποβλήτων αλουμινίου. Το ρευστοποιημένο αλουμίνιο μετά οδηγείται είτε απευθείας στην παραγωγή ή σε άλλους φούρνους για την δημιουργία κραμάτων. Σε αυτή τη διαδικασία το αλουμίνιο εκκαθαρίζεται για την απομάκρυνση και των τελευταίων προσμίξεων. Η ανακύκλωση του αλουμινίου χρησιμοποιεί μόλις το 5% της ενέργειας που χρειάζεται για την παραγωγή αλουμινίου από καθαρές πρώτες ύλες (EEA, 2008).

Η πρωτογενής παραγωγή του αλουμινίου περιλαμβάνει την εξόρυξη βωξίτη, την παραγωγή αλουμίνας, την παραγωγή άνθρακα ανόδου, την τήξη αλουμινίου και τη χύτευση ράβδων. Ο βωξίτης μετατρέπεται σε αλουμίνα μέσω της διεργασίας Bayer, κατά την οποία καυστικό νάτριο χρησιμοποιείται για την εκχύλιση της αλουμίνας. Αυτό παράγει μία λάσπη πλούσια σε νάτριο του αλουμινίου και σε μείγμα οξειδίων των μετάλλων. Τα οξείδια των μετάλλων απομακρύνονται και το διάλυμα αλουμίνας ψύχεται και εμφυτεύεται με αλουμίνα για την κρυσταλλοποίηση της ένυδρης αλουμίνας. Η αλουμίνα διαλύεται

σε ένα λουτρό με φθοριούχο νάτριο του αλουμινίου και μέσω ηλεκτρόλυσης μετατρέπεται σε αλουμίνιο. Η διαδικασία Hall-Heroult είναι πολύ ενεργοβόρα και είναι η κύρια πηγή αέριων εκπομπών κατά την παραγωγή αλουμινίου. Το τηγμένο αλουμίνιο αποσύρεται από τα κελιά μετατροπής και μεταφέρεται στα εργοστάσια χύτευσης, όπου προστίθεται κράμα προσθετικών και ακολουθεί η παραγωγή νέων προϊόντων.

4.3.5.3 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ

Οι πηγές αέριων εκπομπών από την ανακύκλωση χάλυβα και αλουμινίου είναι τόσο άμεσες όσο και έμμεσες.

Οι κύριες έμμεσες προγενέστερες εκπομπές σχετίζονται με το ΚΔΑΥ και περιλαμβάνουν την παροχή ηλεκτρισμού, φυσικού αερίου και καυσίμων.

Για τη διαχείριση αποβλήτων μετάλλου οι άμεσες εκπομπές αφορούν στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο ΚΔΑΥ. Για τη διαχείριση του ανακτημένου χάλυβα και αλουμινίου η βασική πηγή αέριων εκπομπών είναι η κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, παράγεται διοξείδιο του άνθρακα από τις διεργασίες οξείδωσης όπου αντιδρά το οξυγόνο με τον άνθρακα. Υπερφθοράνθρακες (PFC) όπως το CF_4 και το C_2F_6 παράγονται κατά τη διάρκεια της ηλεκτρόλυσης (IPCC, 2001b), τα οποία αποτελούν αρκετά επιβλαβή αέρια του θερμοκηπίου.

Η US EPA (2006) έχει καταγράψει απώλεια υλικού για την ανακύκλωση του αλουμινίου 7% ενώ η Ευρωπαϊκή Ένωση αλουμινίου (EAA 2008) καταγράφει τιμές 2-3% για συσκευασία και 4-6% για παλιά μέταλλα γενικότερα. Επιπρόσθετα φάνηκε ότι κατά την προεπεξεργασία και τον διαχωρισμό του αλουμινίου στα ΚΔΑΥ υπάρχει απώλεια υλικού περίπου 5% πριν την ανακύκλωση (EAA 2008). Άρα η συνολική απώλεια αλουμινίου από τη στιγμή που εισέρχεται στο ΚΔΑΥ μέχρι την παραγωγή των τελικών ράβδων είναι περίπου 10%.

Η απώλεια υλικού στην ανακύκλωση χάλυβα είναι 5% σύμφωνα με την US EPA (2006), το οποίο συμφωνεί με τα στοιχεία από την EcoInvent (Classen et al., 2007). Η απώλεια χάλυβα στο ΚΔΑΥ είναι σχεδόν αμελητέα, αφού από τις πηγές φαίνεται να είναι 1-2% (US EPA 2006, Classen et al. 2007).

Οι έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές προκύπτουν από την αξιοποίηση του ανακτημένου μετάλλου στα χυτήρια και από τη διαχείριση των υπολειμμάτων από τα ΚΔΑΥ. Οι εκπομπές αυτές περιλαμβάνουν επίσης τις αποφευχθείσες εκπομπές από την παραγωγή των υποκατεστημένων προϊόντων που παράγονται από παρθένο μετάλλευμα και βωξίτη.

4.4 Κομποστοποίηση

Η κομποστοποίηση είναι μια ακόμα μέθοδος ανακύκλωσης. Είναι αερόβια διαδικασία όπου τα βιοαποδομήσιμα υλικά αποδομούνται για να σχηματίσουν ένα σταθερό, κοκκώδες υλικό, μέσω της θερμότητας. Η διαδικασία είναι μια σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ των αποβλήτων και των μικροοργανισμών που αναπτύσσονται σε αυτά. Οι μικροοργανισμοί που συμμετέχουν σε αυτή τη διαδικασία χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: βακτήρια, μύκητες και ακτινομύκητες. Οι ακτινομύκητες είναι ένα είδος μυκήτων-όπως τα βακτήρια, μικροσκοπικοί οργανισμοί που αποδομούν την οργανική ύλη.

Κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης συντελούνται πολυάριθμες χημικές αντιδράσεις και αναπτύσσονται και δραστηριοποιούνται διαφορετικοί μικροοργανισμοί. Η διαδικασία της κομποστοποίησης θεωρείται ότι συντελείται σε 4 διαδοχικές φάσεις, οι οποίες διακρίνονται ανάλογα με το ύψος της θερμοκρασίας και παρουσιάζονται στη συνέχεια (ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014).

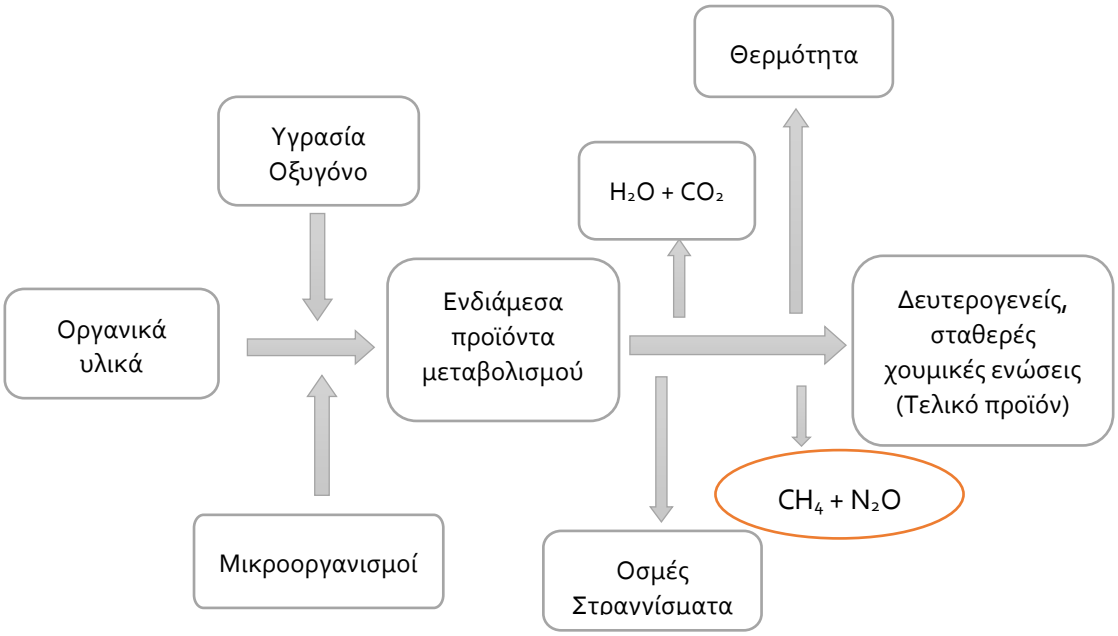
Η 1η φάση, «ψυχροφιλική», διαρκεί 1-2 ημέρες και αφορά σε θερμοκρασίες έως 22°C. Σε αυτή τη φάση γίνεται αποικισμός του υλικού με μικροοργανισμούς απαραίτητους για την κομποστοποίηση. Ουσιαστικά σε αυτή τη φάση διαμορφώνονται οι σωροί των βιοαποβλήτων όπου θα γίνει η κομποστοποίηση.

Η 2η φάση, «πρώτη μεσοφιλική», διαρκεί 3-4 ημέρες και κατά τη διάρκειά της αναπτύσσονται θερμοκρασίες 22°C – 40°C. Ως αποτέλεσμα της αύξησης της θερμοκρασίας, αναπτύσσεται και πολλαπλασιάζεται ο πληθυσμός των μικροοργανισμών στα απόβλητα. Στη φάση αυτή αναπτύσσονται μεσόφιλοι μικροοργανισμοί, όπως βακτήρια, μύκητες και ακτινοβακτήρια. Οι μικροοργανισμοί αυτοί αποσυνθέτουν με ταχείς ρυθμούς τις εύκολα διασπάσιμες ουσίες, όπως πρωτεΐνες, αμινοξέα, λιπίδια και υδατάνθρακες μικρού μοριακού βάρους. Στη φάση αυτή μπορούμε να πούμε ότι γίνεται έναρξη της ενεργούς βιοαποδόμησης.

Η 3η φάση, «θερμοφιλική» διαρκεί 15-20 ημέρες και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι 40°C – 60°C. Εδώ, με την αύξηση της θερμοκρασίας άνω των 40°C γίνεται παράλληλα αντικατάσταση των μεσόφιλων από θερμόφιλους μικροοργανισμούς, οι οποίοι διασπούν ταχύτερα πρωτεΐνες, λίπη και σύνθετους υδατάνθρακες, όπως κυτταρίνες και ημικυτταρίνες. Με την αύξηση της θερμοκρασίας σε επίπεδα άνω των 55°C καταστρέφονται παθογόνοι μικροοργανισμοί και σπόροι ζιζανίων, επιτυγχάνοντας έτσι την υγειονοποίηση του υλικού. Ωστόσο, άνοδος της θερμοκρασίας άνω των 65°C μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή χρήσιμων για την κομποστοποίηση μικροοργανισμών και να μειώσει τους ρυθμούς αποδόμησης του υλικού. Η φάση αυτή αποτελεί ουσιαστικά την ενεργό βιοαποδόμηση.

Η 4η και τελευταία φάση της κομποστοποίησης, «δεύτερη μεσοφιλική», διαρκεί πάνω από 30 ημέρες και η θερμοκρασία αρχίζει να μειώνεται από τους 40°C έως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Εδώ, η βιολογική δραστηριότητα στο υλικό μειώνεται. Μεσοφιλικοί μικροοργανισμοί, που είτε προϋπάρχουν στο υλικό είτε προστίθενται σε αυτό, αποικοδομούν ουσίες όπως το άμυλο και την κυτταρίνη. Εδώ λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις που κάνουν την οργανική ύλη πιο σταθερή και κατάλληλη για χρήση. Το τελικό προϊόν περιέχει, κατά αυτό το τρόπο, ουσίες που δεν επιδέχονται περαιτέρω διάσπαση. Η φάση αυτή αποκαλείται και φάση ωρίμανσης.

Συνολικά η διαδικασία της κομποστοποίησης μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά από το Σχήμα 39, που ακολουθεί.



Σχήμα 39: Συνοπτική περιγραφή διεργασιών κομποστοποίησης και ενδιάμεσων προϊόντων της. Πηγή: ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές και εξοπλισμοί για τη διαδικασία της κομποστοποίησης, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από το είδος του υλικού και τον απαιτούμενο χρόνο για τη διαδικασία. Η γενική πείρα υποδεικνύει ότι η παροχή οξυγόνου είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας και ως εκ τούτου ο σχεδιασμός του εξοπλισμού τείνει να επικεντρώνεται στην αποτελεσματική μεταφορά του σε όλο το υλικό (Dubois et al. 2004).

Windrows (αναδευόμενα σειράδια)

Η μέθοδος των αναδευόμενων σειραδιών είναι ένα σύστημα που απαιτεί ελάχιστο εξοπλισμό. Πρόκειται για έναν παραδοσιακό τρόπο κομποστοποίησης, όπου το υλικό τοποθετείται σε μακριές σωρούς ή σειρές (σειράδια), συνήθως ύψους 2-3m και πλάτους 3-4m. Ο αερισμός των σειραδιών επιτυγχάνεται με ανάδευση του υλικού. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οχήματα εμπρόσθιας ανύψωσης ή άλλου είδους μηχανήματα. Αν πρόκειται για διαφορετικών ειδών υλικά, θα πρέπει να προηγηθεί ανάδευση και στη συνέχεια να τοποθετηθούν σε σειράδια. Η διαδικασία της κομποστοποίησης είναι ταχύτερη στο εσωτερικό των σειραδιών όπου η θερμοκρασία είναι υψηλότερη. Έτσι, με τη διαδικασία της ανάδευσης, όπου μεταφέρεται υλικό από το εσωτερικό των σειραδιών προς το εξωτερικό και αντίστροφα, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ομοιομορφία. Απαιτείται η πάροδος 10 μηνών για τη δημιουργία κομπόστ με αυτή τη διαδικασία. Στη συνέχεια το κομπόστ οδηγείται προς ξήρανση (curing) και αποθήκευση για ακόμα 40 ημέρες (Richard & Walker, 1990).

Aerated piles (αεριζόμενοι στατικοί σωροί/σειράδια)

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα βελτιωμένων μηχανικών συστημάτων κομποστοποίησης, που αποσκοπούν στη βελτίωση του τρόπου αερισμού, έτσι ώστε να διατηρούνται βέλτιστες συνθήκες στο σύστημα κομποστοποίησης. Οι αεριζόμενοι σωροί χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά αέρα μέσα στη σωρό. Όταν η θερμοκρασία της σωρού υπερβαίνει το βέλτιστο, ένας θερμοστάτης ενεργοποιεί το σύστημα αερισμού (συνήθως ένα είδος ανεμιστήρα) παρέχοντας ταυτόχρονα και την απαραίτητη ποσότητα οξυγόνου στη σωρό. Επειδή δεν περιλαμβάνεται μηχανισμός ανάδευσης του υλικού, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για ομογενή υλικά, όπως η ιλύς. Όταν αυτά τα υλικά αναμειγνύονται με ένα ξηρό πορώδες υπόστρωμα, όπως κομμάτια ξύλου (ροκανίδια), σχηματίζουν ένα λεπτό υγρό φίλμ στο οποίο μπορεί να γίνει αποσύνθεση (Richard & Walker, 1990).

Enclossed vessels – invessels (Κλειστές δεξαμενές/κλειστά συστήματα)

Σαν τεχνολογία κομποστοποίησης χρησιμοποιούνται επίσης οι κλειστές δεξαμενές. Η δεξαμενή ή το δοχείο μπορεί να είναι οτιδήποτε, από ένα σιλό μέχρι και ένα όρυγμα με συγκεκριμένη επένδυση. Μέσα σε αυτά τα συστήματα είναι δυνατό να συλλέγονται και να επεξεργάζονται οι οσμές από υλικά όπως η ιλύς και τα ΑΣΑ. Συνήθως χρησιμοποιείται μηχανικός αερισμός, όπως και στις αεριζόμενες σωρούς. Διαφορετικά συστήματα τύπου σιλό είναι αυτά που βασίζονται στην βαρύτητα για την ανάδευση του υλικού μέσα στη δεξαμενή, τα οποία όμως προτιμώνται για την επεξεργασία μόνο ομογενών υλικών, όπως η ιλύς. Η αναδευόμενη κλίνη είναι ένα ακόμα είδος κλειστής δεξαμενής. Εδώ το περιεχόμενο υλικό στη δεξαμενή αναδεύεται φυσικά, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα τόσο της μεθόδου των σειραδιών όσο και των αεριζόμενων σωρών. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι σε γενικές γραμμές ταχεία, μπορεί να διαρκέσει λίγες μέρες (Richard & Walker, 1990).

4.4.1 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ

Για τον υπολογισμό των αέριων εκπομπών που προκαλούνται από την κομποστοποίηση πρέπει να ληφθούν υπόψη η παροχή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και καυσίμων, οι αέριες εκπομπές μεθανίου και υποξειδίου του αζώτου από την διαδικασία της κομποστοποίησης καθώς και η αποφυγή εκπομπών από τη χρήση του τελικού προϊόντος. Οι εκπομπές διαφέρουν αναλόγως το είδος των αποβλήτων, την τεχνολογία που χρησιμοποιείται καθώς και την αποτελεσματικότητα του εξαερισμού,

όταν πρόκειται για κλειστά συστήματα. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις αέριες εκπομπές δεν προσμετράται το παραγόμενο CO_2 από τη διαδικασία της κομποστοποίησης καθώς είναι βιογενές και κατατάσσεται στον φυσικό κύκλο του άνθρακα, ως μέρος της αλλαγής χρήσης γης και των δασών, και όχι στις αέριες εκπομπές από τα απόβλητα (IPCC, 2006).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαφορετικές πηγές εκπομπών ΑΦΘ που σχετίζονται με την κομποστοποίηση σύμφωνα με τους Boldrin et al. (2009a).

Προγενέστερες έμμεσες εκπομπές

Οι έμμεσες προγενέστερες εκπομπές οφείλονται στην παροχή ορυκτών καυσίμων και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παροχή καυσίμων λογίζονται η παραγωγή και μεταφορά τους. Η κατανάλωση ηλεκτρισμού ποικίλει αναλόγως με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την κομποστοποίηση. Γενικά, ανοιχτές τεχνικές καταναλώνουν μικρότερες ποσότητες ηλεκτρισμού σε σχέση με κλειστού τύπου.

Άμεσες εκπομπές

Οι άμεσες εκπομπές συνδέονται με την διαδικασία της κομποστοποίησης και την αποσύνθεση των αποβλήτων. Οι εκπομπές αυτές μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες: εκπομπές λόγω κατανάλωσης καυσίμων από τον μηχανολογικό εξοπλισμό και αέριες εκπομπές λόγω δράσης μικροοργανισμών για την αποσύνθεση της οργανικής ύλης. Γενικά, τεχνολογίες ανοιχτού τύπου παρουσιάζουν μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τις κλειστού τύπου (0.4-6 lt ντήζελ/ tn ww και 0.13-3 lt ντήζελ/ tn ww αντίστοιχα). Οι κύριες αέριες εκπομπές από την διεργασία της κομποστοποίησης είναι το βιογενές CO_2, που όπως προαναφέρθηκε δεν συνυπολογίζεται στις αέριες εκπομπές, καθώς και μικρότερες ποσότητες CH_4 και N_2O. Οι εκπομπές των αερίων αυτών εξαρτώνται από τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, το είδος των εισερχόμενων αποβλήτων και την συνολική διαχείριση της επεξεργασίας.

Μεταγενέστερες έμμεσες εκπομπές

Το τελικό προϊόν της κομποστοποίησης, κομπόστ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό επίχωσης ή ως υποκατάστατο λιπασμάτων. Για την Ελλάδα δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τη χρήση του κομπόστ που παράγεται σε επίπεδο ΕΜΑΚ ως λιπάσματος. Αντίθετα υπάρχουν ενδείξεις ελλιπούς ζήτησης στην αγορά και διάθεσή του αποκλειστικά ως υλικό κάλυψης σε ΧΥΤΑ.

Το κομπόστ περιέχει οργανική ύλη που μπορεί να χαρακτηριστεί ως αποδομήσιμη με ταχείς ρυθμούς, αποδομήσιμη με βραδείς ρυθμούς και ως σταθεροποιημένη οργανική ύλη. Όταν η οργανική ύλη αποδομείται, εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα ποσότητες CO_2. Η διάσπαση όμως της σταθεροποιημένης οργανικής ύλης μπορεί να διαρκέσει από 100 – 1000 έτη. Έτσι, ο περιεχόμενος άνθρακας σε αυτήν δεσμεύεται για το διάστημα αυτό στο έδαφος (Smith et al. 2001, Favoino & Hogg 2008). Αυτή η δέσμευση του άνθρακα ισοδυναμεί με απομάκρυνσή του από την ατμόσφαιρα και έτσι μπορεί να θεωρηθεί ως αποφυγή εκπομπής του που προσμετράται στον τομέα των αποβλήτων (Favoino &Hogg, 2008).

4.5 Αναερόβια χώνευση

Η διεργασία της αναερόβιας χώνευσης (ΑΧ) αναφέρεται στην αναερόβια αποδόμηση των οργανικών αποβλήτων, η οποία παράγει βιοαέριο και μια υδαρής εκροή, το χώνευμα (digestate). Η ΑΧ αποτελείται από τέσσερα στάδια τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Κατά το πρώτο στάδιο της υδρόλυσης, υδρολυτικά βακτήρια που εκκρίνουν ένζυμα μετατρέπουν τα οργανικά μακρομόρια σε μικρότερα μέρη, όπως υδρογονάνθρακες, λιπίδια και πρωτεϊνες σε σάκχαρα, λιπαρά οξέα και αμινοξέα αντίστοιχα (Li et al., 2011), τα οποία θα μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν από μικροοργανισμούς (Meegoda et al., 2018). Ορισμένα υποστρώματα ωστόσο όπως η λιγνίνη, η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη λόγω των σύνθετων δομών τους, απαιτούν την προσθήκη επιπρόσθετων ενζύμων για να υδρολυθούν (Lin et al., 2010).

Κατά το δεύτερο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης, την οξεογένεση ή ζύμωση, οξεογόνοι ζυμωτικοί μικροοργανισμοί μετατρέπουν τα διαλυτά προϊόντα της υδρόλυσης σε ενώσεις όπως πτητικά λιπαρά οξέα (volatile fatty acids – VFAs), αλκοόλες, γαλακτικό οξύ, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο, αμμωνία και υδρόθειο (Merlin Christy et al. 2014; Náthia-Neves et al., 2018). Η μετατροπή της οργανικής ύλης σε οργανικά οξέα μειώνει το pH του συστήματος, γεγονός το οποίο ευνοεί τη δράση οξεογόνων και ακετογόνων μικροοργανισμών (Náthia-Neves et al., 2018). Κατά το στάδιο αυτό, τα VFAs που παράγονται περιέχουν οξικά άλατα τα οποία καθιστούν ένα μέρος του υποστρώματος κατάλληλο για μεθανογένεση (Fournier et al., 2008). Όμως η πλήρης ακετογένεση επιτυγχάνεται στο επόμενο στάδιο (Meegoda et al., 2018).

Το τρίτο στάδιο της ΑΧ, η ακετογένεση, περιλαμβάνει την μετατροπή των ανώτερων VFAs και άλλων ενδιάμεσων προϊόντων όπως των αλκοόλων σε οξικό άλας, με την παραγωγή επίσης υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα (Hansen & Cheong, 2013; Náthia-Neves et al., 2018).

Στο τελευταίο στάδιο της ΑΧ, τη μεθανογένεση, παράγεται μεθάνιο από μεθανογενή βακτήρια είτε με τη διάσπαση των μορίων οξικού οξέος για την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου, ή με την μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα και του υδρογόνου σε μεθάνιο (Mes et al., 2003; Ferry, 2010).

Η λειτουργία μιας μονάδας ΑΧ περιλαμβάνει τα ακόλουθα κύρια στάδια: μηχανική προεπεξεργασία των αποβλήτων για τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων και την ανάμιξη τους, ζύμωση των αποβλήτων στον αντιδραστήρα, διαχείριση του παραγόμενου βιοαερίου και διαχείριση του χωνεύματος.

Η διεργασία της ΑΧ μπορεί να χαρακτηριστεί ως ξηρή ή υγρή με βάση το περιεχόμενο σε υγρασία στον αντιδραστήρα (ξηρή: <75%, υγρή: >90%) , το οποίο ορίζεται σε σημαντικό βαθμό από την υγρασία του εισερχόμενου αποβλήτου. Η παραγωγή βιοαερίου μπορεί να επιτευχθεί σε διαφορετικές θερμοκρασίες, με τις συνηθέστερες να είναι μεσοφιλικές (~35°C) ή θερμοφιλικές (53–55°C). Στα περισσότερα συστήματα ΑΧ όλη η διεργασία της χώνευσης λαμβάνει χώρα στις ίδιες συνθήκες (ενός σταδίου) και στον ίδιο αντιδραστήρα (μιας φάσης). Υπάρχουν ωστόσο και συστήματα δύο σταδίων και δύο φάσεων, τα οποία είναι λίγα λόγω των σχετικών τεχνικών δυσκολιών και του υψηλού κόστους (Møller et al., 2009).

4.5.1 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ

Οι αέριες εκπομπές ΑΦΘ από τη διεργασία της ΑΧ μπορούν να διακριθούν σε άμεσες και έμμεσες προγενέστερες και μεταγενέστερες σύμφωνα με τους *Møller et al.* (2009), ως εξής:

Οι άμεσες εκπομπές περιλεμβάνουν τις εκπομπές που σχετίζονται άμεσα με τις δραστηριότητες της μονάδας ΑΧ και περιλαμβάνουν την καύση υγρών και αέριων καυσίμων, τις διαφεύγουσες εκπομπές αερίου στον αντιδραστήρα, τις εκπομπές από την αξιοποίηση του βιοαερίου για την παραγωγή ενέργειας στη μονάδα ή για την αναβάθμιση του βιοαερίου σε καύσιμο μεταφοράς. Η καύση ορυκτών καυσίμων σχετίζεται με την λειτουργία των φορτηγών και των κινητών μηχανημάτων για τη διαχείριση των αποβλήτων και του χωνεύματος, όπως ο εξοπλισμός τεμαχισμού ή αφυδάτωσης. Οι εκπομπές από την παραγωγή ενέργειας στη μονάδα σχετίζονται κυρίως με το άκαυστο μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου που παράγεται κατά την καύση.

Οι προγενέστερες έμμεσες εκπομπές προκύπτουν από την παροχή ενέργειας με τη μορφή καυσίμων, ηλεκτρισμού και θερμότητας και την παραγωγή υλικών που χρησιμοποιούνται στη μονάδα.

Οι έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές μπορούν να διαχωριστούν (α) στις αποφευχθείσες εκπομπές από την υποκατάσταση ενέργειας από την ενέργεια που ανακτάται στη μονάδα ΑΧ (συμπεριλαμβανομένου του καυσίμου) και (β) στις εκπομπές από τη χρήση του χωνεύματος.

Στην πρώτη περίπτωση, ο παραγόμενος ηλεκτρισμός μπορεί να διανεμηθεί στο δίκτυο ενώ αν παράγεται παράλληλα και θερμότητα, αυτή χρησιμοποιείται εσωτερικά στη μονάδα ΑΧ για να καλύψει τις ανάγκες της μονάδας. Στην περίπτωση που παράγεται πλεονάζουσα θερμότητα η οποία μπορεί να διανεμηθεί μέσω ενός συστήματος τηλεθέρμανσης είτε σε γειτονικές βιομηχανίες, το σύστημα πιστώνεται για την υποκατάσταση της παραγωγής θερμότητας. Για τη χρήση του βιοαερίου σε οχήματα, το βιοαέριο πρέπει να εξευγενιστεί και αναβαθμιστεί, δηλαδή να απομακρυνθεί το CO_2, να περιέχει χαμηλά επίπεδα προσμίξεων και να εμπλουτιστεί σε μεθάνιο (> 95%).

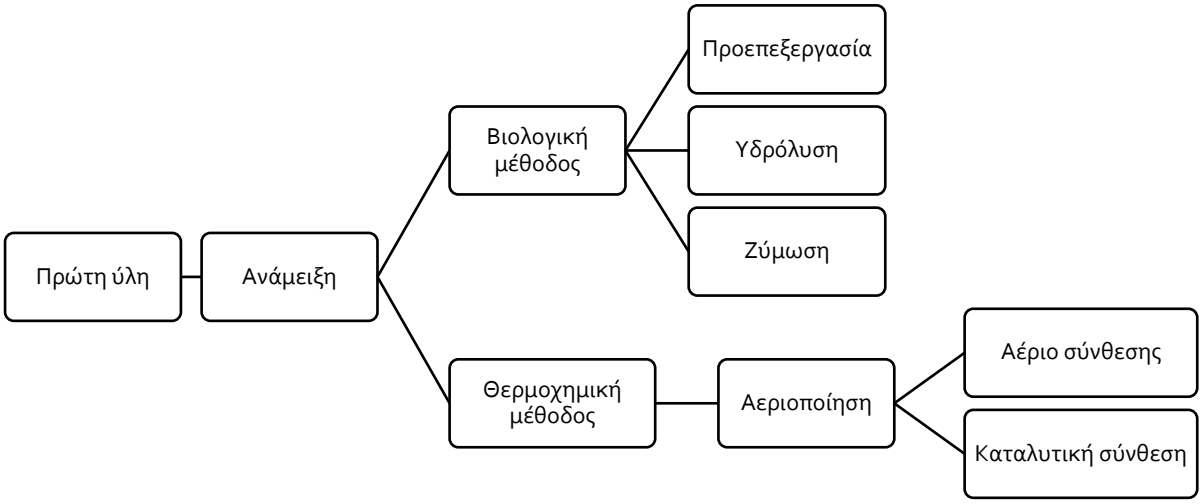
Στη δεύτερη περίπτωση, οι εκπομπές από τη χρήση του χωνεύματος σχετίζονται με την παροχή και καύση ντίζελ στα φορτηγά για την μεταφορά του και την εφαρμογή του στο έδαφος, την αποδόμηση του χωνεύματος στο έδαφος, τις αποφευχθείσες εκπομπές από την προσωρινή αποθήκευση άνθρακα στο έδαφος (στο πλαίσιο των 100 ετών) και τις αποφευχθείσες εκπομπές από την υποκατάσταση ανόργανων λιπασμάτων, δηλαδή την υποκατάσταση της παραγωγής τους λόγω της χρήσης του χωνεύματος ως εδαφοβελτιωτικό ή λίπασμα. Εάν το περιεχόμενο σε υγρασία του χωνεύματος είναι υψηλό, προκύπτουν σημαντικές εκπομπές κατά τη μεταφορά του λόγω των μεγάλων ποσοτήτων που μεταφέρονται. Η υποκατάσταση των ανόργανων λιπασμάτων εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα και την ποσότητα των θρεπτικών στο χώνευμα, καθώς επίσης και από την ποσότητα που εφαρμόζεται από τους αγρότες. Επίσης, απαιτείται γνώση του εδαφικού τύπου, της αμεψεισποράς και του κλίματος για τον υπολογισμό των εκπομπών από την αποδόμηση του χωνεύματος και την έκπλυση των θρεπτικών.

4.6 Επεξεργασία οργανικών αποβλήτων για την παραγωγή βιοαιθανόλης

Οι προτεινόμενες συμβατικές μέθοδοι για την επεξεργασία αυτού του ρεύματος αποβλήτων είναι οι βιολογικές μέθοδοι που αναφέρονται στις ενότητες 4.4και 4.5, εκ των οποίων μέχρι στιγμής στην Ελλάδα εφαρμόζεται μόνο η μέθοδος της κομποστοποίησης. Δεδομένου ότι η κομποστοποίηση παράγει ένα προϊόν, το κόμποστ, του οποίου η ζήτηση είναι πεπερασμένη και τοπική (π.χ. αγροτικές περιοχές), θα μπορούσαν να εφαρμοστούν συμπληρωματικά άλλες μέθοδοι για την επεξεργασία αυτού του ρεύματος, πάντα σε συμφωνία με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της βιοοικονομίας. Τέτοιες μέθοδοι, εκτός από την αναερόβια χώνευση, είναι η επεξεργασία για την παραγωγή βιοαιθανόλης, η οποία αποτελεί αντικείμενο μεταξύ άλλων και στην παρούσα διατριβή.

Η βιοαιθανόλη μπορεί να παραχθεί από πρώτη ύλη η οποία περιέχει γλυκόζη, άμυλο ή/και κυτταρίνη (IEA, 2008). Τα απόβλητα τροφίμων και τα πράσινα απόβλητα είναι μια πολύ καλή πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαιθανόλης καθώς θεωρούνται πρώτη ύλη 2^{ης} γενιάς η οποία δεν ανταγωνίζεται τις καλλιέργειες.

Η βιοαιθανόλη μπορεί να παραχθεί μέσω δύο βασικών μεθόδων μετατροπής της βιομάζας, τη βιολογική και τη θερμοχημική μέθοδο, όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 40: Βασικές μέθοδοι παραγωγής βιοαιθανόλης (Valta et al., 2019)

Η παραγωγή βιοαιθανόλης μέσω βιοχημικών διεργασιών περιλαμβάνει τρία στάδια, την προεπεξεργασία, την υδρόλυση και τη ζύμωση, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Προεπεξεργασία: Διάφορες τεχνικές προεπεξεργασίας εφαρμόζονται προκειμένου να διευκολυνθεί η αποδόμηση της κυτταρίνης και της ημικυτταρίνης από τα ένζυμα στο επόμενο στάδιο της υδρόλυσης. Οι τεχνικές αυτές διακρίνονται σε χημικές, φυσικές, βιολογικές ή συνδυασμός αυτών (Vohra et al., 2014). Κάθε τεχνική έχει συγκεκριμένη επίπτωση στο κλάσμα της κυτταρίνης, ημικυταρρίνης και λιγνίνης στη βιομάζα. Η φυσική (μηχανική) επεξεργασία αυξάνει τη διαθέσιμη επιφάνεια μέσω της μείωσης του όγκου των σωματιδίων της βιομάζας (Maurya & Singla, 2015). Η χημική επεξεργασία περιλαμβάνει τη χρήση αραιωμένων οξέων (πχ. θειικού ή υδροχλωρικού οξέως), αλκαλίων (π.χ. υδροξείδιο του ασβεστίου) ή υγρής αμμωνίας. Η βιολογική επεξεργασία χρησιμοποιεί μικροοργανισμούς και ένζυμα για την αποδόμηση της βιομάζας.

Υδρόλυση: Η υδρόλυση διασπά τους πολυσακχαρίτες σε μονοσακχαρίτες, το οποίο είναι απαιτούμενο για τη χρήση τους από τους μικροοργανισμούς στο επόμενο στάδιο. Δύο είναι οι βασικές μέθοδοι υδρόλυσης, η υδρόλυση με αραιωμένο οξύ και η υδρόλυση με ένζυμα. Η πρώτη μέθοδος υλοποιείται με τη χρήση ανόργανων οξέων όπως το H_2SO_4 ή το HCl σε θερμοκρασίες περίπου 160°C και πίεση περίπου 10 atm (Sun & Cheng, 2002). Η ενζυματική υδρόλυση βασίζεται στη χρήση ενζύμων και απαιτεί ηπιότερες συνθήκες αντίδρασης.

Ζύμωση: Οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούνται κυρίως για την μετατροπή των σακχάρων σε αιθανόλη είναι ο ζυμομύκητας *Saccharomyces cerevisiae* και το βακτήριο *Zymomonas mobilis* (Aditiya et al., 2016). Ο *S. cerevisiae* είναι η πρώτη επιλογή για τη βιομηχανική παραγωγή αιθανόλης λόγω της υψηλής ικανότητας ζύμωσης και της σχετικής ανθεκτικότητας σε χαμηλές τιμές pH και σε υψηλές συγκεντρώσεις σακχάρων και αιθανόλης. Επίσης, μπορεί να αντισταθεί ικανοποιητικά σε αναστολείς που βρίσκονται στην υδρολυμένη βιομάζα και αναπτύσσεται σε αναερόβιες συνθήκες που λαμβάνουν χώρα στους θαλάμους ζύμωσης (Nevoigt, 2008).

Υπάρχουν δύο κύριες εναλλακτικές διεργασίες για την παραγωγή αιθανόλης, η ξεχωριστή υδρόλυση και ζύμωση (separate hydrolysis and fermentation, SHF) και η ταυτόχρονη σακχαροποίηση και ζύμωση (simultaneous saccharification and fermentation, SSF). Στην περίπτωση της SHF, γίνεται συσσώρευση των σακχάρων στα ξεχωριστά στάδια της προ-υδρόλυσης και υδρόλυσης τα οποία αναστέλλουν τη δραστηριότητα των ενζύμων. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται σε σημαντικό βαθμό κατά την SSF όπου η γλυκόζη που σχηματίζεται μετατρέπεται συνεχώς σε αιθανόλη και η αιθανόλη απομακρύνεται

συνεχώς κατά τη ζύμωση (Viikari et al., 2012). Μετά την παραγωγή της αιθανόλης απαιτείται διαχωρισμός από το υπόλοιπο μείγμα και καθαρισμός, συνήθως μέσω απόσταξης-διύλισης-αφυδάτωσης (Vohra M., 2014).

Η διεργασία **θερμοχημικής μετατροπής** για την παραγωγή βιοαιθανόλης αποτελεί μια εναλλακτική στην κλασική διεργασία της βιομετατροπής. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη μετατροπή της πρώτης ύλης σε αέριο σύνθεσης μέσω της αεριοποίησης κατά την οποία επιτυγχάνεται πλήρης αποπολυμερισμός της βιομάζας σε συνθήκες περιορισμένου οξυγόνου και υψηλής θερμοκρασίας (συνήθως πάνω από 850 ^{o}C) σε ένα αέριο ενδιάμεσο προϊόν, το αέριο σύνθεσης. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα καταλυτική σύνθεση της αιθανόλης με χρήση του αερίου σύνθεσης (Foust et al., 2009).

4.6.1 Πηγές εκπομπών ΑΦΘ

Οι εκπομπές ΑΦΘ από τη διεργασία αυτή αποτελούνται από τη διεργασία της μετατροπής των αποβλήτων για την παραγωγή αιθανόλης μπορούν να διακριθούν σε άμεσες και έμμεσες προγενέστερες και μεταγενέστερες, ως εξής:

Οι άμεσες εκπομπές περιλεμβάνουν τις εκπομπές που σχετίζονται άμεσα με τις δραστηριότητες της μονάδας και περιλαμβάνουν την καύση καυσίμων για τη λειτουργία των φορτηγών και των μηχανημάτων.

Οι προγενέστερες έμμεσες εκπομπές προκύπτουν από την παροχή ενέργειας με τη μορφή καυσίμων, ηλεκτρισμού και θερμότητας και την παραγωγή υλικών που χρησιμοποιούνται στη μονάδα.

Οι έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές περιλαμβάνουν τις αποφευχθείσες εκπομπές από την υποκατάσταση συμβατικών καυσίμων μεταφοράς (βενζίνη) με την παραγόμενη αιθανόλη. Οι εκπομπές από τη χρήση της αιθανόλης ως καύσιμο δεν προσμετρώνται καθώς προέρχονται από βιογενή άνθρακα (οργανικά απόβλητα).

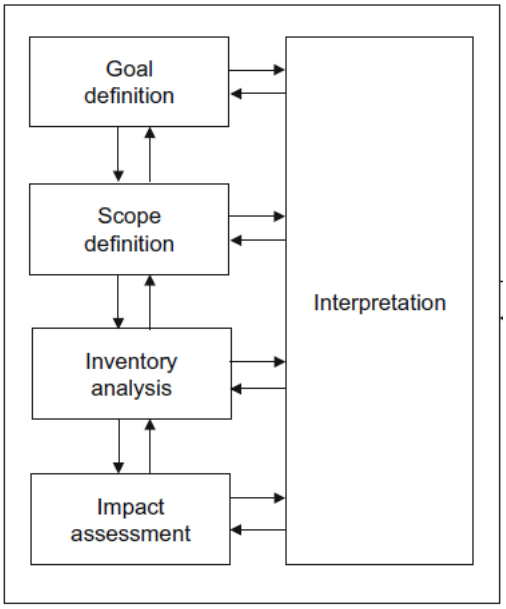
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Παρόλο που πολλές μεθοδολογικές πτυχές της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) είναι ακόμα υπό συζήτηση μέχρι σήμερα, η βασική δομή παρέμεινε σταθερή από την κυκλοφορία του πρώτου προτύπου ISO 14040 το 1997. Οι οδηγίες ΑΚΖ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής που παρέχονται μέσα από το Εγχειρίδιο του Διεθνούς Συστήματος Αναφοράς για τα Δεδομένα Κύκλου Ζωής (International Reference Life Cycle Data System, ILCD) (EC-JRC, 2010a) βασίζονται στο πλαίσιο και τις μεθοδολογικές απαιτήσεις των προτύπων ISO 14040 και 14044 (ISO, 2006a;b) και επιπλέον παρέχουν καθοδήγηση επί της μεθοδολογίας σε μεγαλύτερο επίπεδο λεπτομέρειας. Στο πλαίσιο αυτό, το παρόν κεφάλαιο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις δύο αυτές πηγές, ήτοι τα πρότυπα ISO και το Εγχειρίδιο ILCD.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται περιληπτικά τα κύρια στάδια της μεθοδολογίας της ΑΚΖ σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040 (ISO, 2006a) και τα κύρια στοιχεία του κάθε σταδίου, ενώ στη συνέχεια δίνονται περισσότερες λεπτομέρειες για το καθένα από τα στάδια αυτά.

Τα αποτελέσματα του κάθε σταδίου αξιολογούνται και βελτιώνονται μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία, η οποία είναι θεμελιώδης για τη διεξαγωγή μιας επιτυχημένης ΑΚΖ. Σύμφωνα με το ISO 14040, μια ΑΚΖ υλοποιείται μέσα από τα ακόλουθα στάδια:

- ***Προσδιορισμός του σκοπού και πεδίου εφαρμογής***: Στο στάδιο αυτό διατυπώνονται οι παράμετροι της μελέτης ΑΚΖ, καθορίζοντας το λόγο διεξαγωγής και το σκοπό για τον οποίο προορίζεται η μελέτη, καθώς και το πλαίσιο αποφάσεων. Επίσης προσδιορίζεται το πεδίο εφαρμογής της μελέτης, όπως το υπό εξέταση σύστημα, οι εξεταζόμενες επιπτώσεις στο περιβάλλον, η μεθοδολογική προσέγγιση της μοντελοποίησης και το χρονικό και γεωγραφικό πεδίο αναφοράς.
- ***Απογραφή δεδομένων***: Στο στάδιο αυτό συλλέγονται πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές ροές του συστήματος όσον αφορά τους εισερχόμενους πόρους, τα υλικά, τα ενδιάμεσα προϊόντα και τα τελικά προϊόντα, τις εξερχόμενες εκπομπές, τα απόβλητα και τα χρήσιμα προϊόντα του συστήματος.
- ***Εκτίμηση των επιπτώσεων***: Στο στάδιο αυτό χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα του προηγούμενου σταδίου, μεταφράζοντας τις φυσικές ροές και τις παρεμβάσεις στο περιβάλλον (εκπομπές, άντληση πόρων) από το σύστημα σε επιπτώσεις στο περιβάλλον, με βάση την διαθέσιμη γνώση για τους περιβαλλοντικούς μηχανισμούς αιτίου-αποτελέσματος και τη χρήση σχετικών μοντέλων
- ***Ερμηνεία των αποτελεσμάτων***: Στο στάδιο αυτό ερμηνεύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα προηγούμενα στάδια και αξιολογούνται λαμβάνοντας υπόψη την πληρότητα και συνέπεια των δεδομένων, καθώς και το επίπεδο αβεβαιότητας και της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια παρέχονται συμπεράσματα και προτάσεις ενώ αναγνωρίζονται τυχόν περιορισμοί της εφαρμογής τους.



Σχήμα 41: Πλαίσιο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ISO, 2006a)

5.1 Προσδιορισμός σκοπού και πεδίου εφαρμογής

Μια ΑΚΖ ξεκινάει με τον σαφή προσδιορισμό του σκοπού της μελέτης, ο οποίος πρέπει να απαντάει στις ερωτήσεις σχετικά με το λόγο για τον οποίο διεξάγεται η μελέτη, τις ερωτήσεις που σκοπεύει να απαντήσει και σε ποιον απευθύνεται. Ο προσδιορισμός του σκοπού θέτει το πλαίσιο της μελέτης ΑΚΖ και επηρεάζει σημαντικά την ΑΚΖ καθώς οι αποφάσεις που λαμβάνονται στα επόμενα στάδια της ΑΚΖ πρέπει να είναι συνεπείς με τον σκοπό.

5.1.1 Ορισμός πεδίου εφαρμογής

Το πεδίο εφαρμογής πρέπει να ορίζει τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Λειτουργική μονάδα. Η λειτουργική μονάδα περιγράφει με ποσοτικό τρόπο τη λειτουργία ή την υπηρεσία για την οποία διεξάγεται η ανάλυση και αποτελεί τη βάση του προσδιορισμού της ροής αναφοράς του προϊόντος η οποία στη συνέχεια θέτει την κλίμακα της συλλογής δεδομένων στο επόμενο στάδιο της ΑΚΖ, την απογραφή δεδομένων.
- Σύστημα. Το υπό εξέταση σύστημα πρέπει να προσδιορίζεται με σαφήνεια προκειμένου να είναι διακριτό ποιες δραστηριότητες και διεργασίες περιλαμβάνει.
- Κατηγορίες επίπτωσης. Οι κατηγορίες επίπτωσης οι οποίες εξετάζονται στην εν λόγω ανάλυση καθώς και η μέθοδος με την οποία εκτιμώνται πρέπει επίσης να ορίζονται στο στάδιο αυτό.
- Καθορισμός του γεωγραφικού και χρονικού πεδίου ανάλυσης καθώς και περιγραφή της σχετικής τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του προϊόντος.
- Επιλογή της προσέγγισης για τη μοντελοποίηση του συστήματος (συνεπαγωγική ή χαρακτηριστική) και τρόπος χειρισμού των πολύ-λειτουργικών συστημάτων

Κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη ο σκοπός και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης, καθώς σχετίζονται με τις επιλογές που ορίζουν τη συλλογή των δεδομένων και τον τρόπο μοντελοποίησης και αξιολόγησης του συστήματος και κατ' επέκταση με τα αποτελέσματα της ΑΚΖ. Επομένως, παίζουν σημαντικό ρόλο στην εγκυρότητα των συμπερασμάτων και των προτάσεων της ΑΚΖ.

5.1.2 Ορολογία και κύριες έννοιες

Προτού επεξηγηθούν περαιτέρω τα εννέα στοιχεία του πεδίου, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί η σχετική ορολογία και οι κύριες έννοιες.

Μοναδιαία διεργασία και ροές

Η μοναδιαία διεργασία (unit process) είναι το μικρότερο στοιχείο που λαμβάνεται υπόψη σε ένα μοντέλο απογραφής κύκλου ζωής για το οποίο ποσοτικοποιούνται εισερχόμενες και εξερχόμενες ροές (input and output flows). Έτσι οι μοναδιαίες διεργασίες μπορούν να θεωρηθούν ως τα θεμέλια της απογραφής κύκλου ζωής τα οποία αποτελούνται από δεδομένα για τις εισερχόμενες και εξερχόμενες ροές, οι οποίες ομαδοποιούνται σε έξι κατηγορίες φυσικών ροών. Ειδικότερα οι εισερχόμενες ροές αποτελούνται από τα υλικά, της ενέργεια και τους πόρους, ενώ οι εξερχόμενες ροές από τα προϊόντα, τα απόβλητα προς διαχείριση και τις εκπομπές.

Οι εξερχόμενες ροές του προϊόντος ή της διαχείρισης αποβλήτων από μια μοναδιαία διεργασία δύναται να είναι εισερχόμενες ροές σε άλλες μοναδιαίες διεργασίες. Με αυτό τον τρόπο συνδέονται οι μοναδιαίες διεργασίες σε ένα μοντέλο απογραφής κύκλου ζωής. Από την άλλη, οι πόροι και οι ροές εκπομπών ορίζονται ως στοιχειώδεις ροές (elementary flows) και δεν συνδέονται μέσω των μοναδιαίων διεργασιών. Συγκεκριμένα η στοιχειώδης ροή περιγράφεται σύμφωνα με το ISO ως η μεμονωμένη ουσία ή ενέργεια η οποία εισέρχεται στο/εξέρχεται από το εξεταζόμενο σύστημα, η οποία έχει αντληθεί από την οικόσφαιρα χωρίς περαιτέρω μετατροπή από τον άνθρωπο (Bjørn et al., 2018a).

Τεχνόσφαιρα και οικόσφαιρα

Η ΑΚΖ διαιρεί τον κόσμο σε τεχνόσφαιρα και οικόσφαιρα. Η τεχνόσφαιρα νοείται ως οτιδήποτε είναι εκ προθέσεως «ανθρωπογενές» περιλαμβάνοντας επίσης διεργασίες που είναι φυσικής προέλευσης αλλά ελέγχονται από τους ανθρώπους, όπως για παράδειγμα η φωτοσύνθεση σε ένα γεωργικό σύστημα. Όλες οι μοναδιαίες διεργασίες ενός μοντέλου ΑΚΖ ανήκουν στην τεχνόσφαιρα. Η οικόσφαιρα αναφέρεται ορισμένες φορές ως το «περιβάλλον» ή η «φύση» σε απλούς όρους και μπορεί να νοηθεί ως οτιδήποτε που είναι εκ προθέσεως «ανθρωπογενές». Οι στοιχειώδεις ροές είναι εξ ορισμού οι μοναδικές ροές οι οποίες διασχίζουν τα όρια μεταξύ της τεχνόσφαιρας και της οικόσφαιρας.

Σύστημα προσκηνίου και παρασκηνίου

Συχνά εκατοντάδες διεργασιών απαιτούνται για την παραγωγή του προϊόντος που μελετάται με μια ΑΚΖ. Για το λόγο αυτό είναι χρήσιμο να διαχωρίζονται οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο προσκήνιο (foreground) και στο παρασκήνιο (background). Το σύστημα προσκηνίου περιλαμβάνει τις διεργασίες αυτές ενός συστήματος προϊόντος που αφορούν συγκεκριμένα το σύστημα αυτό. Αυτές οι διεργασίες αφορούν τυπικά μερικούς από τους προμηθευτές πρώτης βαθμίδας, αλλά μπορεί να αφορούν επίσης προμηθευτές μετά την πρώτη βαθμίδα της εφοδιαστικής αλυσίδας (δεύτερη ή τρίτη βαθμίδα), εφόσον αυτές είναι γνωστές από τον παραγωγό. Το σύστημα προσκηνίου μοντελοποιείται κατά κύριο λόγο με τη χρήση πρωτογενών δεδομένων. Αντίθετα, το σύστημα παρασκηνίου ορίζεται από τις διεργασίες ενός συστήματος οι οποίες δεν αφορούν συγκεκριμένα το σύστημα αυτό, αλλά περιλαμβάνονται σε διάφορα συστήματα πέρα από το μελετώμενο σύστημα, όπως για παράδειγμα η παροχή ηλεκτρισμού. Τα προϊόντα αυτών των διεργασιών συνήθως προμηθεύονται από μια αγορά χωρίς να υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ συγκεκριμένων διαφορετικών προμηθευτών. Το σύστημα παρασκηνίου συνήθως μοντελοποιείται με τη χρήση βάσεων δεδομένων, οι οποίες περιέχουν μέσες τιμές από δεδομένα βιομηχανιών τα οποία είναι αντιπροσωπευτικά της διεργασίας σε συγκεκριμένες χώρες ή περιφέρειες (Bjørn et al., 2018a).

Λειτουργική μονάδα

Προκειμένου η σύγκριση εναλλακτικών τρόπων παροχής ενός προϊόντος να είναι δίκαιη και συγκρίσιμη ποσοτικά, πρέπει η γνώση των προϊόντων που παρέχονται από εναλλακτικά συστήματα να χρησιμοποιηθεί για να οριστεί η λειτουργική μονάδα. Μια λειτουργική μονάδα ορίζει τις ποιοτικές πτυχές και ποσοτικοποιεί τις ποσοτικές πτυχές του προϊόντος.

Δύο έννοιες σχετικά με την ανάπτυξη του προϊόντος είναι χρήσιμες, οι υποχρεωτικές ιδιότητες και οι ιδιότητες θέσης. Οι υποχρεωτικές ιδιότητες είναι χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένα προϊόν προκειμένου οποιοσδήποτε χρήστης να το αντιλαμβάνεται ως προϊόν και μπορεί επίσης να περιλαμβάνει νομικώς απαιτούμενα χαρακτηριστικά. Από την άλλη πλευρά, οι ιδιότητες θέσης είναι προαιρετικά χαρακτηριστικά ενός προϊόντος τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να το κάνουν πιο ελκυστικό προς τον καταναλωτή σε σχέση με άλλα προϊόντα. Χρήσιμο είναι να λαμβάνεται υπόψη η γνώμη των καταναλωτών κατά τον ορισμό της λειτουργικής μονάδας προκειμένου να αντικατοπτρίζει την αντίληψή τους για τη λειτουργικότητα του προϊόντος (Bjørn et al., 2018a).

Ροές αναφοράς

Μετά τον ορισμό της λειτουργικής μονάδας ακολουθεί ο προσδιορισμός των ροών αναφοράς. Μια ροή αναφοράς είναι η ροή του προϊόντος πάνω στην οποία πρέπει να συσχετιστούν ποσοτικά όλες οι εισερχόμενες και εξερχόμενες ροές των διεργασιών του συστήματος. Με άλλα λόγια, η ροή αναφοράς είναι η ποσότητα του προϊόντος που απαιτείται για τη λειτουργική μονάδα.

5.1.3 Πλαίσιο μοντελοποίησης

Στον προσδιορισμού του πεδίου επίσης περιλαμβάνεται και η επιλογή του κατάλληλου πλαισίου μοντελοποίησης της ΑΚΖ και των τρόπων χειρισμού των πολυλειτουργικών διεργασιών. Οι επιλογές αυτές πρέπει να γίνονται σε συμφωνία με τον ορισμό του σκοπού της μελέτης και ειδικότερα του πλαισίου απόφασης (βλέπε Ενότητα 5.1.1). Οι επιλογές αυτές επηρεάζουν σημαντικά το στάδιο της απογραφής δεδομένων, τα αποτελέσματα της ΑΚΖ και την ερμηνεία τους.

5.1.3.1 Δευτερεύουσες λειτουργίες και πολυλειτουργικές διεργασίες

Συχνά ένα σύστημα προϊόντος μπορεί να παρέχει και άλλες λειτουργίες πέρα από τις κύριες λειτουργίες που ορίζονται από τις υποχρεωτικές ιδιότητες και τις ιδιότητες θέσης. Αυτές είναι οι δευτερεύουσες λειτουργίες, οι οποίες είναι ακούσιες και έχουν μικρό ή κανένα ενδιαφέρον για τους χρήστες του προϊόντος, δηλαδή δεν συνεισφέρουν στις υποχρεωτικές ιδιότητες και τις ιδιότητες θέσης. Αντιθέτως, οι δευτερεύουσες λειτουργίες είναι σχετικές με άλλα συστήματα της τεχνόσφαιρας με τα οποία αλληλοεπιδρά το εξεταζόμενο σύστημα.

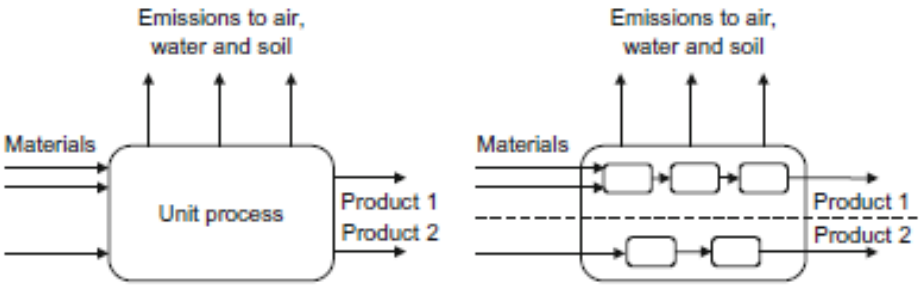
Ένα σύστημα με δευτερεύουσες λειτουργίες θεωρείται πολυλειτουργικό, καθώς παρέχει πάνω από μια λειτουργία. Τα πολυλειτουργικά συστήματα αποτελούν πρόκληση σε μια ΑΚΖ, καθώς με την ΑΚΖ αναλύονται διαφορετικά συστήματα με βάση τις κύριες λειτουργίες που παρέχουν, προκειμένου να προσδιοριστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από το προϊόν. Όμως στην πραγματικότητα σπάνια υπάρχει σύστημα που είναι ανεξάρτητο από άλλα συστήματα, καθώς μόλις παραχθεί ένα παραπροϊόν από μια πολυλειτουργική διεργασία, είναι λογικό από οικονομικής άποψης να αξιοποιηθεί, συχνά σε διαφορετικό σύστημα από αυτό που αναλύεται στην ΑΚΖ. Αυτό συνεπάγεται ότι η διεργασία γίνεται μέρος και ενός άλλου συστήματος και επομένως οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη διεργασία δεν μπορούν πλέον να αποδοθούν αποκλειστικά στο μελετώμενο σύστημα.

Το πρότυπο ISO 14044 θέτει μια ιεραρχία λύσεων για την επίλυση των θεμάτων που προκύπτουν στα πολυλειτουργικά συστήματα. Αυτές οι λύσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καταστήσουν

διαφορετικά συστήματα λειτουργικά συγκρίσιμα αλλά και για να απομονώσουν ένα σύστημα για την ανάλυση των κρίσιμων σημείων. Τα επίπεδα της ιεραρχίας παρουσιάζονται στη συνέχεια ενώ στο Σχήμα 44 παρουσιάζεται η ιεραρχία σε μορφή δέντρου αποφάσεων.

Υποδιαίρεση μοναδιαίας διεργασίας (subdivision)

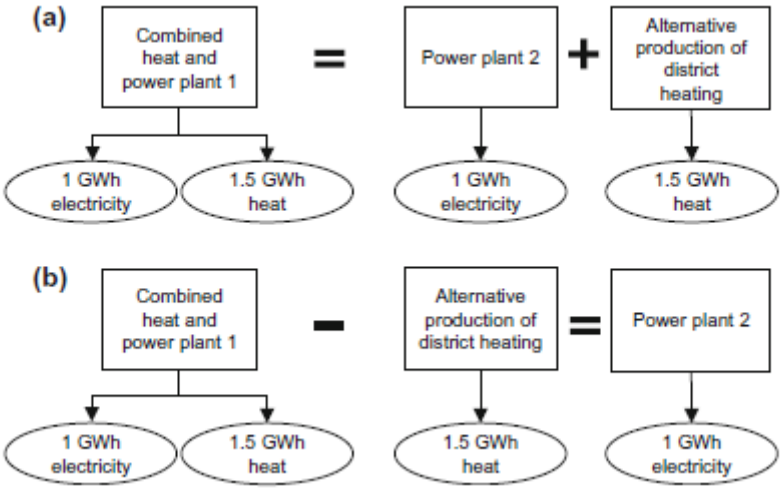
Η πρώτη επιλογή είναι να επιλυθεί το πρόβλημα μέσω της αύξησης της ανάλυσης της μοντελοποίησης διαιρώντας την πολυλειτουργική μοναδιαία διεργασία σε μικρότερες μονάδες προκειμένου να διερευνηθεί εάν είναι δυνατό με αυτό τον τρόπο να διαχωριστεί η παραγωγή του προϊόντος από την παραγωγή του παραπροϊόντος, και αν γίνεται, τότε να εξαιρεθούν από το σύστημα οι υποδιεργασίες που παρέχουν επιπρόσθετες λειτουργίες (Bjørn et al., 2018b) (βλ. Σχήμα 42).



Σχήμα 42: Επίλυση του προβλήματος της πολυλειτουργικότητας με υποδιαίρεση (Πηγή: Bjørn et al., 2018b)

Επέκταση του συστήματος (system expansion)

Εφόσον η υποδιαίρεση δεν λύσει το πρόβλημα της πολυλειτουργικότητας, το πρότυπο ISO προτείνει την επέκταση του συστήματος. Ειδικότερα, η λύση αυτή περιλαμβάνει την επέκταση της απλής διεργασίας με τον πιο πιθανό εναλλακτικό τρόπο παροχής της δευτερεύουσας λειτουργίας της πολυλειτουργικής διεργασίας (Σχήμα 43). Η επέκταση του απλού συστήματος με τον εναλλακτικό τρόπο παραγωγής της δευτερεύουσας λειτουργίας είναι ισοδύναμο της αφαίρεσης του εναλλακτικού τρόπου από την πολυλειτουργική διεργασία. Αυτό επίσης αποκαλείται «πίστωση» του συστήματος με τις εισροές και τις εκροές που αποφεύγονται όταν η δευτερεύουσα λειτουργία αντικαθιστά τον εναλλακτικό τρόπο παραγωγής (Bjørn et al., 2018b).



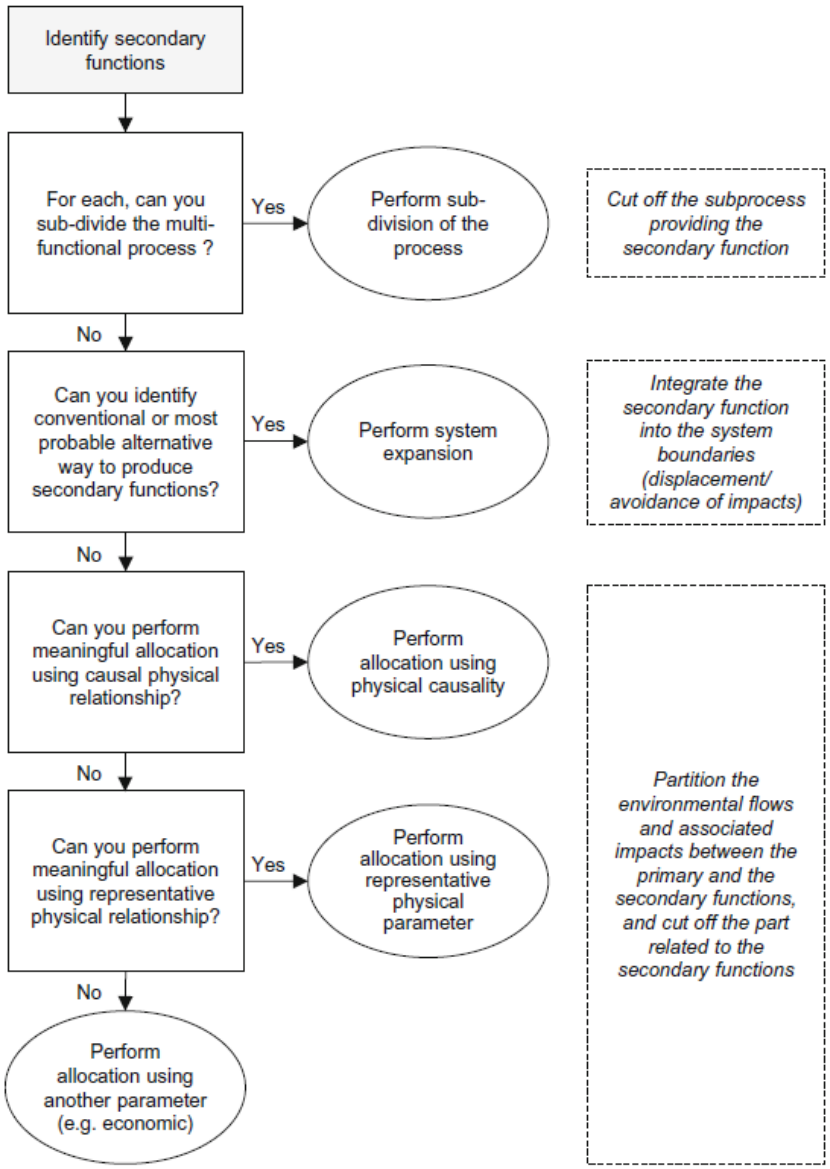
Σχήμα 43: Επίλυση του προβλήματος της πολυλειτουργικότητας με επέκταση του συστήματος (a) και πίστωση (b) (Πηγή: Bjørn et al., 2018b)

Επιμερισμός (allocation)

Μερικές φορές δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί μέσω της επέκτασης του συστήματος απόλυτη λειτουργική ισοδυναμία μεταξύ των συγκρινόμενων συστημάτων ή να απομονωθεί η κύρια λειτουργία μιας διεργασίας από τις δευτερεύουσες λειτουργίες. Αυτό μπορεί να ισχύει όταν δεν υπάρχει κάποιος εναλλακτικός τρόπος παραγωγής της δευτερεύουσας λειτουργίας ή όταν ο πιο πιθανός εναλλακτικός τρόπος έχει επίσης δευτερεύουσες λειτουργίες, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά εκτεταμένες επεκτάσεις του συστήματος και κατά συνέπεια το διευρυμένο σύστημα μπορεί να γίνει ιδιαίτερα περίπλοκο.

Στη περιπτώσεις αυτές που η επέκταση του συστήματος δεν είναι εφικτή, ή όταν δεν υπάρχει συμφωνία με τον ορισμό του σκοπού, το πρότυπο ISO 14044 προτείνει τον επιμερισμό των εισροών και των εκροών της πολυλειτουργικής διεργασίας ή συστήματος μεταξύ των διαφορετικών προϊόντων ή λειτουργιών.

Όπου δυνατό, ο επιμερισμός πρέπει να γίνεται σε συμφωνία με τις υποκείμενες αιτιώδεις φυσικές σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών προϊόντων ή λειτουργιών, αντανακλώντας τον τρόπο με τον οποίο οι ποσότητες εισροών και εκροών επηρεάζονται από τις αλλαγές στις ποσότητες των προϊόντων ή λειτουργιών που παρέχονται από τη διεργασία ή το σύστημα (Bjørn et al., 2018b).



Σχήμα 44: Ιεραρχία του ISO για την επίλυση της πολυλειτουργικότητας (Πηγή: Bjørn et al., 2018b)

5.1.3.2 Χαρακτηριστική και συνεπαγωγική ΑΚΖ

Υπάρχουν δύο πλαίσια μοντελοποίησης της ΑΚΖ, η χαρακτηριστική (attributional) και η συνεπαγωγική (consequential) μοντελοποίηση. Η κατανόηση των διαφορών μεταξύ της χαρακτηριστικής και της συνεπαγωγικής μοντελοποίησης και πότε χρησιμοποιούμε ποια, είναι μία από τις πιο δύσκολες πλευρές της ΑΚΖ, καθώς ακόμα δεν υπάρχει ομοφωνία στο θέμα αυτό στην κοινότητα της ΑΚΖ (Ekvall et al., 2016).

Το πλαίσιο της χαρακτηριστικής μοντελοποίησης ΑΚΖ, το οποίο αποτελούσε και τη μοναδική πρακτική όταν πρωτοεμφανίστηκε η ΑΚΖ, έχει ως στόχο την αναπαράσταση ενός συστήματος προϊόντος σε απομόνωση από την υπόλοιπη τεχνόσφαιρα ή την οικονομία. Η ερώτηση που απαντάται μέσα από τη χαρακτηριστική ΑΚΖ αναφέρεται στο «*Ποιες είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αποδίδονται στο προϊόν Χ;*» ή «*Για ποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι υπεύθυνο το προϊόν Χ;*». Στην προσπάθεια όμως να διαχωρίσουμε τεχνητά ένα σύστημα προϊόντος από την υπόλοιπη οικονομία ενέχεται ο κίνδυνος της υποκειμενικότητας. Ο διαχωρισμός αυτός είναι τεχνητός γιατί πολλά, αν όχι τα περισσότερα, συστήματα προϊόντων αλληλοεπιδρούν με άλλα συστήματα προϊόντων μέσω πολυλειτουργικών

διεργασίων, καθώς δεν μπορούν να περιγραφούν ως φυσικές οντότητες σε απομόνωση (Bjørn et al., 2018b).

Πριν τις οδηγίες ILCD (EC-JRC, 2010a), η χαρακτηριστική μοντελοποίηση γενικά συσχετιζόταν με τον επιμερισμό ως προσέγγιση για την επίλυση των πολυλειτουργικών διεργασιών, εφόσον η υποδιαίρεση δεν είναι εφικτή. Αντιθέτως, οι οδηγίες ILCD σε ορισμένες περιπτώσεις προτείνουν την επίλυση των πολυλειτουργικότητας με επέκταση του συστήματος στο πλαίσιο της χαρακτηριστικής μοντελοποίησης (Πίνακας 2). Εκτός από το θέμα της πολυλειτουργικότητας, η χαρακτηριστική ΑΚΖ επίσης συσχετίζεται με τη χρήση μέσων διεργασιών στο σύστημα παρασκηνίου, αντικατοπτρίζοντας έτσι μια μέση εφοδιαστική αλυσίδα. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιείται ένα μείγμα της αγοράς (Bjørn et al., 2018b).

Η συνεπαγωγική μοντελοποίηση ΑΚΖ εμφανίστηκε γύρω στο 2000 για να αντιμετωπίσει την αδυναμία της χαρακτηριστικής μοντελοποίησης, η οποία προκύπτει λόγω της τεχνητής απομόνωσης ενός προϊόντος από την υπόλοιπη οικονομία. Ο κύριος σκοπός της είναι να περιγράψει τις αλλαγές στην οικονομία που προκαλούνται από την εισαγωγή του εξεταζόμενου προϊόντος, δηλαδή τη συνέπεια του προϊόντος αυτού. Η συνεπαγωγική μοντελοποίηση επομένως στοχεύει να απαντήσει την ερώτηση «*Ποιες είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την κατανάλωση του προϊόντος Χ;*». Αυτή είναι μια πολύ διαφορετική προσέγγιση από αυτή της χαρακτηριστικής μοντελοποίησης, καθώς ένα σύστημα που ενσωματώνει μια αλλαγή στην οικονομία μπορεί να είναι πολύ διαφορετικό σε σχέση με ένα απομονωμένο σύστημα. Για την ενσωμάτωση στο σύστημα των αλλαγών στην οικονομία είναι απαραίτητο να γίνει επέκταση του συστήματος. Επίσης, η συνεπαγωγική μέθοδος προϋποθέτει πολύ καλή κατανόηση και ικανότητα μοντελοποίησης της δυναμικής του οικονομικού μηχανισμού, το οποίο απαιτεί πολύ διαφορετικό τρόπο σκέψης από αυτόν της μηχανικής αντίληψης που υιοθετείται συνήθως στην ΑΚΖ για τις εφοδιαστικές αλυσίδες των προϊόντων (Bjørn et al., 2018b).

Αντίθετα με την χαρακτηριστική ΑΚΖ, η συνεπαγωγική ΑΚΖ δεν σχετίζεται με τη χρήση μέσων διεργασιών για τη μοντελοποίηση του συστήματος παρασκηνίου, αλλά με τη χρήση οριακών διεργασιών. Αυτές είναι οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται ή παύουν να χρησιμοποιούνται ως συνέπεια μιας αύξησης ή μείωσης της ζήτησης για ένα προϊόν, αντίστοιχα. Οι σχετικές οριακές διεργασίες που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην ΑΔΚΖ δεν είναι πάντα αυτές που επηρεάζονται από την άμεση συνέπεια μιας απόφασης όπως οι βραχυπρόθεσμες οριακές διεργασίες. Οι μακροπρόθεσμες οριακές διεργασίες μπορεί να είναι πιο σχετικές εάν μια απόφαση οδηγεί σε μεγάλες αλλαγές στην προσφορά ή στην ζήτηση. Οι μακροπρόθεσμες οριακές διεργασίες αντιπροσωπεύουν αλλαγές στην εγκατεστημένη παραγωγική ικανότητα ως συνέπεια της προβλεπόμενης αλλαγής στη ζήτηση. Δεδομένου ότι συχνά είναι δύσκολο να επιλεχθεί μία μοναδική μακροπρόθεσμη οριακή διεργασία, συνήθως χρησιμοποιείται ένα μείγμα δυνητικών μακροπρόθεσμων οριακών διεργασιών (Bjørn et al., 2018b).

Σημειώνεται ότι ενώ το σύστημα παρασκηνίου μοντελοποιείται διαφορετικά στη χαρακτηριστική και τη συνεπαγωγική ΑΚΖ, το σύστημα προσκηνίου μοντελοποιείται γενικά με τον ίδιο τρόπο, με μόνη εξαίρεση το χειρισμό των πολυλειτουργικών διεργασιών.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστική και συνεπαγωγική μοντελοποίηση και χειρισμός της πολυλειτουργικότητας (Πηγή: Bjørn et al.,

2018b)

LCI modelling framework	Question to be answered	Handling of multifunctional processes when subdivision is not possible		Modelling of background system
		Before ILCD	ILCD	
Attributional	What environmental impact can be attributed to product X?	Allocation	System expansion or allocation	Average processes
Consequential	What are the environmental consequences of consuming X?	System expansion	System expansion	Marginal processes

5.1.4 Όρια συστήματος

Τα όρια του συστήματος διαχωρίζουν το αναλυόμενο σύστημα από την τεχνόσφαιρα και την οικόσφαιρα. Το σύστημα πρέπει να πλήρες, δηλαδή να περιλαμβάνει στα όρια του όλες τις διεργασίες οι οποίες είναι απαραίτητες για να είναι σε συμφωνία με το σκοπό της μελέτης. Ο καθορισμός των ορίων του συστήματος μπορεί να έχει μεγάλη επιρροή στα αποτελέσματα της ΑΚΖ, καθώς ορίζει τις μοναδιαίες διεργασίες για τις οποίες θα ποσοτικοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα ιδανικά όρια συστήματος περιλαμβάνουν όλες τις μοναδιαίες διεργασίες που χρησιμοποιούνται για να παραχθούν οι ροές αναφοράς, με την παραγωγή ενέργειας και προϊόντων (υλικά για άλλες μοναδιαίες διεργασίες) και τη διαχείριση ροών αποβλήτων έως το σημείο όπου οι μόνες εκροές είναι οι εκπομπές (Bjørn et al., 2018b).

5.1.5 Αντιπροσωπευτικότητα δεδομένων

Δεδομένου ότι σκοπός της ΑΚΖ είναι να αναπαραστήσει την πραγματικότητα, οι μοναδιαίες διεργασίες που χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν το σύστημα προϊόντος πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικές των διεργασιών που χρησιμοποιούνται στην πραγματικότητα στο εξεταζόμενο σύστημα (για την περίπτωση της χαρακτηριστικής ΑΚΖ) ή των διεργασιών που επηρεάζονται από την εισαγωγή του εξεταζόμενου συστήματος στην αγορά (για την περίπτωση της συνεπαγωγικής ΑΚΖ). Γενικά, ένα μέρος του συστήματος προσκηνίου βασίζεται σε δεδομένα που συλλέγονται από πρώτο χέρι από αυτόν που διεξάγει την ΑΚΖ. Αυτά τα πρωτογενή δεδομένα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά της συγκεκριμένης διεργασίας για το διάστημα που συλλέχθηκαν τα δεδομένα. Άλλα μέρη του συστήματος προσκηνίου και ολόκληρο το σύστημα παρασκηνίου κατασκευάζονται από τρίτες πηγές δεδομένων. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό οι βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται να είναι αντιπροσωπευτικές του γεωγραφικού πεδίου, του χρόνου και της τεχνολογίας αναφοράς.

5.2 Απογραφή Δεδομένων Κύκλου Ζωής

Στο στάδιο της απογραφής δεδομένων (ΑΔΚΖ) συλλέγεται η πληροφορία σχετικά με όλες τις φυσικές ροές που περιλαμβάνονται στα όρια του εξεταζόμενου συστήματος προϊόντος, δηλαδή τις εισροές

πρώτων υλών, υλικών, ημι-προϊόντων και προϊόντων και τις εκροές εκπομπών, αποβλήτων και χρήσιμων προϊόντων. Οι ροές προσαρμόζονται σε τέτοια κλίμακα ώστε να είναι σε συμφωνία με τη ροή αναφοράς του προϊόντος που ορίζεται από τη λειτουργική μονάδα. Το αποτέλεσμα της απογραφής είναι ένας κατάλογος δεδομένων κύκλου ζωής που περιλαμβάνει ποσοτικοποιημένες φυσικές στοιχειώδεις ροές του συστήματος προϊόντος που σχετίζεται με την παροχή της υπηρεσίες ή της λειτουργίας που περιγράφεται από τη λειτουργική μονάδα.

Τα δεδομένα που συλλέγονται πρέπει να περιλαμβάνουν τον πλήρη κύκλο λειτουργίας των διεργασιών, καθώς επίσης και των προπαρασκευαστικών δράσεων. Αυτό συνεπάγεται ότι η συλλογή δεδομένων πρέπει να λαμβάνει υπόψη μια μεγαλύτερη περίοδο λειτουργίας, ιδανικά αρκετών παραγωγικών κύκλων. Μερικές φορές παίζουν σημαντικό ρόλο και οι επιπτώσεις από το στάδιο της κατασκευής και της διαχείρισης στο τέλος του κύκλου ζωής και για αυτό πρέπει να συμπεριλαμβάνονται και αυτά τα δεδομένα.

Το πρώτο βήμα αυτού του σταδίου περιλαμβάνει τη συγκεκριμενοποίηση του αρχικού γενικού διαγράμματος του συστήματος με έμφαση στη διασφάλιση των σχετικών απαιτήσεων πληρότητας. Αποτέλεσμα αυτού του σταδίου είναι η λεπτομερής περιγραφή του συστήματος προσκηνίου, δηλαδή των διεργασιών που το απαρτίζουν και των συνδέσεων τους, καθώς και των διεργασιών του συστήματος παρασκηνίου που πλαισιώνει το σύστημα προσκηνίου, όπου γίνονται και οι συνδέσεις με τις βάσεις δεδομένων ΑΔΚΖ. Οι βάσεις δεδομένων ΑΔΚΖ χρησιμοποιούνται επίσης για το σύστημα προσκηνίου στην περίπτωση που δεν υπάρχει πρόσβαση σε πιο λεπτομερή δεδομένα (Bjørn, 2018c).

Μόλις συλλεχθούν όλα τα απαραίτητα δεδομένα ή τα σύνολα δεδομένων προκειμένου να αποτυπωθούν οι μοναδιαίες διεργασίες του συστήματος, κατασκευάζεται το μοντέλο ΑΚΖ. Κάθε μοναδιαία διεργασία αποτυπώνεται ως ένα «δομικό στοιχείο» στο μοντέλο, το μέγεθος του οποίου ορίζεται από τη ροή αναφοράς. Στην πράξη, η μοντελοποίηση γίνεται με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών τα οποία υποστηρίζουν τόσο την κατασκευή του μοντέλου του συστήματος, τη σύνδεση των σχετικών μοναδιαίων διεργασιών, τη σύνδεση με τις διαθέσιμες βάσεις δεδομένων και την αποθήκευση των διεργασιών, όσο και τη σύνδεση των στοιχειακών ροών στα αποτελέσματα της ΑΔΚΖ με τους σχετικούς παράγοντες χαρακτηρισμού για την εκτίμηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής.

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των λογισμικών εργαλείων έγκειται στο εύρος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που περιλαμβάνονται στην ανάλυση. Επίσης, τα εργαλεία ΑΚΖ συνήθως περιλαμβάνουν πολλές μεθόδους ΑΕΚΖ, γεγονός το οποίο καθιστά δυνατή την εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας και την επιλογή μεταξύ διαφορετικών προσεγγίσεων για την μοντελοποίηση των επιπτώσεων.

Τα αποτελέσματα της ΑΔΚΖ προκύπτουν από τη σύνθεση των στοιχειακών ροών από όλες τις διεργασίες του συστήματος. Ειδικότερα τα αποτελέσματα προκύπτουν από το άθροισμα όλων των πόρων και των εκπομπών από όλες τις διεργασίες.

5.2.1 Βάσεις δεδομένων

Υπάρχει πλήθος διαθέσιμων βάσεων δεδομένων και κάποιες από αυτές περιλαμβάνουν υψηλής ποιότητας δεδομένα για συγκεκριμένες διεργασίες, τεχνολογίες ή βιομηχανικούς κλάδους. Στην συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες από τις βάσεις δεδομένων που είναι διαθέσιμες παγκοσμίως.

ELCD (European Platform on Life Cycle Assessment): Η βάση αυτή αναπτύχθηκε από το Joint Research Institute (JRC) της ΕΕ και περιέχει σύνολα δεδομένων για 330 διεργασίες που αφορούν τους τομείς της ενέργειας, παραγωγής υλικών, μεταφορών αλλά και διεργασίες που αφορούν διαχείριση προϊόντων

στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Η ELCD σταμάτησε να ενημερώνεται από τον Ιούνιο του 2018 και πλέον επαφίεται στους παρόχους δεδομένων να δημιουργούν και συντηρούν τους δικούς τους κόμβους και να μοιράζονται τα δεδομένα μέσω του Life Cycle Data Network (LCDN) του JRC, το οποίο εγκαινιάστηκε το 2014. Το LCDN έχει ως στόχο την παροχή μιας παγκοσμίως χρήσιμης υποδομής για την κοινοποίηση ποιοτικά διασφαλισμένων συνόλων δεδομένων ΑΚΖ από διαφορετικούς οργανισμούς. Μέχρι τον Απρίλιο του 2018 τα δεδομένα έπρεπε να πληρούν τις σχετικές απαιτήσεις του ILCD, ενώ από τότε δημιουργήθηκε ένας νέος κόμβος ο οποίος φιλοξενεί πακέτα δεδομένων σε συμφωνία με το πλαίσιο του Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος για Οργανισμούς και Προϊόντα (Product and Organisation Environmental Footprint, PEF/OEF).

Ecoinvent: Η βάση αυτή περιέχει περίπου 12,500 διεργασίες κατηγοριοποιημένες σε διαφορετικά θέματα όπως μεταφορές, ενέργεια, παραγωγή υλικών γεωργία κτλ. Όλες οι διεργασίες είναι διαθέσιμες ως μοναδιαίες διεργασίες και ως διεργασίες συστημάτων, με παγκόσμιο γεωγραφικό εύρος αναφοράς. Συχνή ενημέρωση [48].

GaBi: Διαφορετικές βάσεις δεδομένων πρωτογενούς συλλογής δεδομένων για ένα έυρος τομέων από τη γεωργία, τη βιομηχανία, τη λιανική πώληση και τις υπηρεσίες, με πάνω από 12,500 διεργασίες και παγκόσμια κάλυψη. Συχνή ενημέρωση.

Probas: Η βάση αυτή αποτελείται από περίπου 8,000 σύνολα δεδομένων σχετικά με την ενέργεια, την παραγωγή υλικών, τη βιομηχανία και τη διάθεση αποβλήτων. Αφορά κυρίως διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στη Γερμανία.

U.S. Life Cycle Inventory Database: Μια ανοιχτή βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε από το NREL (National Renewable Energy Laboratory) των ΗΠΑ και η οποία παρέχει δεδομένα ΑΚΖ αναφορικά με τις ροές ενέργειας και υλικών από την παραγωγή υλικών, εξαρτημάτων ή προϊόντων στις ΗΠΑ (NREL, 2012).

Agri-footprint: Η βάση αυτή περιέχει δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής σχετικά με ζωοτροφές, τρόφιμα και βιομάζα, με περίπου 3,500 προϊόντα και διεργασίες.

LCA Food: Η βάση αυτή περιέχει 600 σύνολα δεδομένων ΑΚΖ για τη Δανία που αφορούν βασικά τρόφιμα και σχετικές διεργασίες από τους τομείς της γεωργίας, ιχθυοκαλλιέργειας, αλιείας, βιομηχανίας, χοντρικής και λιανικής πώλησης, καθώς και των σχετικών διεργασιών διαχείρισης αποβλήτων. Ανοιχτή βάση, ωστόσο δεν έχει ενημερωθεί από τη δημιουργία της.

ESU world food LCA database: Η βάση αυτή περιλαμβάνει περίπου 1,900 σύνολα δεδομένων ΑΚΖ που αφορούν τη γεωργική παραγωγή και τα τρόφιμα, σε παγκόσμιο επίπεδο.

AGRIBALYSE agricultural database: Μια Γαλλική γεωργική βάση δεδομένων για ΑΚΖ και συγκριτική αξιολόγηση στον τομέα των τροφίμων. Τα δεδομένα παραγωγής αφορούν την περίοδο 2005-2009.

5.3 Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής

Η Εκτίμηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής, ΕΕΚΖ (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) είναι ένα στάδιο ΑΚΖ το οποίο έχει ως στόχο να αξιολογήσει το μέγεθος της συνεισφοράς κάθε στοιχειώδους ροής (δλδ. των εκπομπών ή της χρήσης πόρων ενός συστήματος προϊόντος) σε μια επίπτωση στο περιβάλλον. Η περιβαλλοντική επίπτωση ορίζεται ως ένα σύνολο περιβαλλοντικών αλλαγών, θετικών ή αρνητικών,

[48] https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/, https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/

λόγω μιας ανθρώπινης παρέμβασης. Η εκτίμηση των επιπτώσεων γίνεται εξετάζοντας το σύστημα προϊόντος από μια περιβαλλοντική οπτική χρησιμοποιώντας κατηγορίες επιπτώσεων και κατηγορικούς δείκτες σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα της ανάλυσης απογραφής δεδομένων. Το στάδιο αυτό παρέχει χρήσιμη πληροφορία για το στάδιο της ερμηνείας.

Το στάδιο ΕΕΚΖ είναι σημαντικό καθώς μετατρέπει τις στοιχειώδεις ροές από την απογραφή δεδομένων σε δυνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Αυτό είναι απαραίτητο καθώς οι στοιχειώδεις ροές είναι απλά ποσότητες που εκπέμπονται ή χρησιμοποιούνται αλλά δεν είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους όσον αφορά τη σημαντικότητα της επίπτωσής τους. Οι μέθοδοι χαρακτηρισμού ΕΕΚΖ στην ουσία μοντελοποιούν τον περιβαλλοντικό μηχανισμό κάθε κατηγορίας επίπτωσης ως μια αλυσίδα αιτίου-αποτελέσματος ξεκινώντας από την παρέμβαση στο περιβάλλον (εκπομπή ή χρήση πόρου) έως την τελική επίπτωση. Τα αποτελέσματα αυτού του σταδίου είναι βαθμολογίες που αξιολογούν τα δυνητικά αποτελέσματα, όπως εξηγείται περαιτέρω και στη συνέχεια (Rosenbaum et al., 2018a).

Το ISO 14040/14044 (ISO, 2006a; b) προβλέπει τα εξής στοιχεία που απαρτίζουν το στάδιο ΕΕΚΖ, εκ των οποίων τα τρία πρώτα είναι υποχρεωτικά και τα τρία επόμενα προαιρετικά:

1. **Επιλογή** των κατηγοριών επίπτωσης οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις παραμέτρους αξιολόγησης που επιλέχθηκαν στο στάδιο του προσδιορισμού του πεδίου μελέτης καθώς και των αντίστοιχων δεικτών επίπτωσης και μοντέλων χαρακτηρισμού.
2. **Κατηγοριοποίηση** των στοιχειωδών ροών από την απογραφή δεδομένων στις κατηγορίες επίπτωση σύμφωνα με την ικανότητα τους να συνεισφέρουν στην συγκεκριμένη κατηγορία.
3. **Χαρακτηρισμός** με τη χρήση περιβαλλοντικών μοντέλων για κάθε κατηγορία επίπτωσης προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η ικανότητα κάθε στοιχειώδους ροής να επηρεάσει το δείκτη της κατηγορίας επίπτωσης
4. **Κανονικοποίηση** προκειμένου να εκφραστεί το σχετικό μέγεθος καθεμίας από τις χαρακτηρισμένες τιμές των δεικτών όλων των κατηγοριών επίπτωσης σε σχέση με ένα σύστημα αναφοράς
5. **Ομαδοποίηση** για την άθροιση διαφόρων δεικτών επίπτωσης σε μία ή περισσότερες ομάδες και την πιθανή ιεράρχησή τους
6. **Στάθμιση** με τη χρήση συντελεστών βαρύτητας σε κάθε κατηγορία επίπτωσης και πιθανώς **συνυπολογισμός** με την άθροιση ορισμένων ή περισσότερων δεικτών

5.3.1 Επιλογή

Ο στόχος της επιλογής κατηγοριών επίπτωσης, κατηγορικών δεικτών και μοντέλων χαρακτηρισμού είναι να χρησιμοποιηθούν οι πιο χρήσιμες και απαραίτητες για ένα συγκεκριμένο σκοπό. Η συλλογή των δεδομένων απογραφής για τις σχετικές στοιχειώδεις ροές καθοδηγείται από τον προσδιορισμό του σκοπού της μελέτης, ο οποίος ορίζει τι θα αξιολογηθεί τελικά.

Στην πράξη, ένας αριθμός κατηγοριών επίπτωσης που βασίζεται σε συγκεκριμένα μοντέλα χαρακτηρισμού συνδυάζεται σε προκαθορισμένα σύνολα ή μεθόδους, τα οποία αναφέρονται ως μέθοδοι ΕΕΚΖ (EC-JRC, 2011a; Hauschild et al., 2013) και τα οποία είναι διαθέσιμα στα λογισμικά ΑΚΖ. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων είναι τα ακόλουθα: ReCiPe, CML, TRACI, EDIP, LIME, IMPACT 2002+, κτλ. Επομένως, η επιλογή των κατηγοριών επίπτωσης, κατηγορικών δεικτών και των μοντέλων χαρακτηρισμού συνήθως καταλήγει στην επιλογή μιας μεθόδου ΕΕΚΖ από αυτές που είναι διαθέσιμες στην έκδοση του λογισμικού που χρησιμοποιεί ο μελετητής.

Τα ISO 14040/14044 δεν παρέχουν συστάσεις σχετικά με το ποια μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιείται, αλλά κάποιοι οργανισμοί συστήνουν τη χρήση κάποιας συγκεκριμένης μεθόδου ΕΕΚΖ ή μέρος αυτής. Η

Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε ειδικές συστάσεις για την επιλογή κατηγοριών επίπτωσης ενδιάμεσου και τελικού σημείου με τη συστηματική σύγκριση και αξιολόγηση όλων των σχετικών προσεγγίσεων ανά κατηγορία, οδηγώντας στην υπόδειξη της καλύτερης διαθέσιμης προσέγγισης (EC-JRC, 2011a). Αυτή η προσπάθεια οδήγησε σε ένα σύνολο συντελεστών χαρακτηρισμού, το οποίο είναι διαθέσιμο άμεσα σε όλα τα βασικά λογισμικά ΑΚΖ, ως μέθοδος ILCD.

Οι προτεινόμενες κατηγορίες επίπτωσης σύμφωνα με τη μέθοδο ILCD και οι σχετικοί συντελεστές χαρακτηρισμού παρουσιάζονται αναλυτιικά στο Κεφάλαιο 8.4.

5.3.2 Κατηγοριοποίηση

Στο στάδιο της κατηγοριοποίησης (classification) οι στοιχειώδεις ροές της ΑΔΚΖ επιμερίζονται στις κατηγορίες επίπτωσης στις οποίες συνεισφέρουν. Αυτό ενέχει κάποια πολυπλοκότητα, καθώς κάποιες από τις εκπεμπόμενες ουσίες μπορεί να έχουν πολλαπλές επιπτώσεις σε δύο επίπεδα:

- Παράλληλα: μια ουσία έχει διάφορες παράλληλες επιπτώσεις (π.χ. το SO2 προκαλεί οξίνιση και είναι τοξικό στους ανθρώπους όταν εισπνέεται.
- Διαδοχικά: μια ουσία έχει μια δυσμενή επίδραση η οποία γίνεται αιτία πρόκλησης κάποιας άλλης επίπτωσης (π.χ. το SO2 που προκαλεί οξίνιση, μπορεί να ενεργοποιήσει τα βαρέα μέταλλα στο έδαφος που είναι τοξικά στους ανθρώπους και τα οικοσυστήματα)

Αυτό το στάδιο τυπικά εκτελείται αυτόματα από το λογισμικό ΑΚΖ, καθώς απαιτεί χρόνο και εμπειρογνωμοσύνη όσον αφορά τους περιβαλλοντικούς μηχανισμούς των κατηγοριών επίπτωσης προκειμένου να εκτελεστεί με απόλυτη ακρίβεια από τον μελετητή.

5.3.3 Ομαδοποίηση

Αυτό το στάδιο περιλαμβάνει την τοποθέτηση των κατηγοριών επιπτώσεων σε μία ή περισσότερες ομάδες και την ταξινόμηση ή ιεράρχηση, με την εφαρμογή μιας από τις δύο πιθανές μεθόδους (ISO, 2006b):

- Ταξινόμηση και ομαδοποίηση των κατηγοριών ενδιάμεσου σημείου με βάση τα χαρακτηριστικά τους π.χ. εκπομπές και πόροι, χωρική κλίμακα.
- Ιεράρχηση των κατηγοριών επιπτώσεων με βάση ορισμένη σειρά προτεραιότητας.

5.3.4 Χαρακτηρισμός

Το στάδιο του χαρακτηρισμού (characterization) περιλαμβάνει τη χρήση περιβαλλοντικών μοντέλων για κάθε κατηγορία επίπτωσης, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί ο βαθμός επιρροής καθεμίας από τις στοιχειώδεις ροές σε μια κατηγορία επίπτωσης. Οι τιμές που προκύπτουν για την καθεμία ροή εκφράζονται σε μια κοινή μονάδα μέτρησης για την κατηγορία, το οποίο επιτρέπει την άθροιση όλων των συνεισφορών σε μία τιμή, αντιπροσωπεύοντας τη συνολική επίπτωση που έχει το σύστημα σε κάθε κατηγορία.

Για να γίνει αυτό όλες οι στοιχειώδεις ροές E οι οποίες λαμβάνονται υπόψη σε μια κατηγορία επίπτωσης c πολλαπλασιάζονται με τον αντίστοιχο συντελεστή χαρακτηρισμού CF και αθροίζονται για όλες τις σχετικές παρεμβάσεις στο περιβάλλον i (εκπομπές ή άντληση πόρων), με αποτέλεσμα τη βαθμολογία επίπτωσης IS για την κάθε κατηγορία επίπτωσης σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\mathrm{IS}_c = \sum_i (\mathrm{CF}_i \cdot E_i)$$

Ο συντελεστής χαρακτηρισμού αντιπροσωπεύει τη συνεισφορά ανά ποσότητα μιας στοιχειώδους ροής σε μια συγκεκριμένη κατηγορία επίπτωσης. Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μοντέλα που περιγράφουν με το πιο ρεαλιστικό τρόπο τον περιβαλλοντικό μηχανισμό της πιθανής αλυσίδας αιτίου-αποτελέσματος των γεγονότων που οδηγούν στις επιπτώσεις στο περιβάλλον για όλες τις στοιχειώδεις ροές που συνεισφέρουν στην επίπτωση. Η μονάδα του συντελεστή χαρακτηρισμού είναι κοινή για όλες τις στοιχειώδεις ροές που λαμβάνονται υπόψη σε μια επίπτωση. Ο συντελεστής αυτό μπορεί να εκφράζει τις επιπτώσεις άμεσα σε απόλυτους όρους (π.χ. αριθμός περιστατικών ασθένειας/μονάδα τοξικής εκπομπής) ή έμμεσα μέσω της συσχέτισής τους με την επίπτωση μιας στοιχειώδους ροής αναφοράς (π.χ. ισοδύναμα CO_2/μονάδα εκπομπής ΑΦΘ).

Για τον υπολογισμό των συντελεστών χαρακτηρισμού γίνονται πολλές θεωρήσεις και αναπτύσσονται διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις, το οποίο μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το αποτέλεσμα με αποκλίσεις μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων Εκτίμησης Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (LCIA), το οποίο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το στάδιο της ερμηνείας των αποτελεσμάτων.

Για την επιλογή του δείκτη επίπτωσης, υπάρχουν δύο εναλλακτικές:

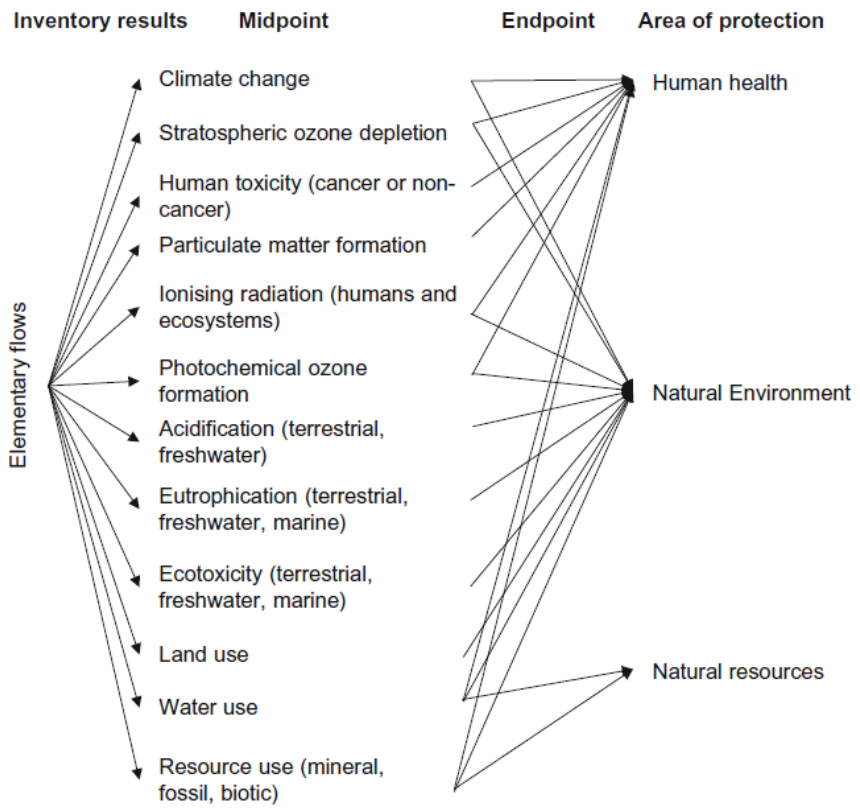
i. Επιλογή του δείκτη στα πρώτα στάδια της αλυσίδας αιτίου-αποτελέσματος του περιβαλλοντικού μηχανισμού, δίνοντας έτσι ένα πιο μετρήσιμο αποτέλεσμα αλλά με μικρότερη περιβαλλοντική σχετικότητα και πιο απομακρυσμένο από τις τελικές επιπτώσεις που προκαλούνται στο περιβάλλον.
ii. Επιλογή του δείκτη κατάντη του περιβαλλοντικού μηχανισμού, δίνοντας πιο σχετική αλλά λιγότερο βεβαιώσιμη πληροφορία (π.χ. υποβαθμισμένα οικοσυστήματα, επηρεαζόμενος ανθρώπινος χρόνος ζωής).

Για το λόγο αυτό καθιερώθηκαν δύο διαφορετικοί τύποι κατηγοριών επίπτωσης, χρησιμοποιώντας δείκτες σε δύο διαφορετικά επίπεδα του περιβαλλοντικού μηχανισμού: **οι δείκτες επίπτωσης ενδιάμεσου σημείου** (περίπτωση i) και οι **δείκτες επίπτωσης τελικού σημείου** (περίπτωση ii).

Όταν η εκτίμηση επιπτώσεων βασίζεται σε δείκτες ενδιάμεσου σημείου, κατηγοριοποιούνται τα αποτελέσματα της απογραφής σε ομάδες ροών που συνεισφέρουν στην ίδια περιβαλλοντική επίπτωση, και εφαρμόζονται οι συντελεστές χαρακτηρισμού που έχουν αναπτυχθεί για την επίπτωση αυτή. Ο χαρακτηρισμός ενδιάμεσου σημείου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία προφίλ για το ενδιάμεσο σημείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το τελικό αποτέλεσμα της ΕΕΚΖ. ενώ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την προετοιμασία του χαρακτηρισμού των επιπτώσεων στο τελικό σημείο.

Προκειμένου να επεκταθούν ή να συνδεθούν οι δείκτες ενδιάμεσου σημείου με έναν ή περισσότερους δείκτες τελικού σημείου (οι οποίοι ορισμένες φορές αναφέρονται ως δείκτες βλάβης ή δριμύτητας) απαιτείται επιπρόσθετη μοντελοποίηση. Αυτοί οι δείκτες είναι αντιπροσωπευτικοί διαφορετικών θεματικών περιοχών ή «Περιοχών Προστασίας» (Areas of Protection, AoP) οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις προτεραιότητες μας ως κοινωνία σε σχέση με την ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα ή τις υποστηρικτικές λειτουργίες για τη ζωή στον πλανήτη, όπως οι υπηρεσίες των οικοσυστημάτων και οι πόροι.

Οι πολυάριθμοι δείκτες ενδιάμεσου σημείου συνεισφέρουν σε ένα σχετικά μικρό αριθμό δεικτών τελικού σημείου. Οι πιο τυπικοί δείκτες τελικού σημείου αναφέρονται στην ανθρώπινη υγεία, την ποιότητα των οικοσυστημάτων και το φυσικό περιβάλλον.



Σχήμα 45: Πλαίσιο χαρακτηρισμού ILCD για τη σύνδεση των στοιχειώδων ροών, των δεικτών ενδιάμεσου και τελικού σημείου και των τριών περιοχών προστασίας (Rosenbaum et al., 2018a; EC-JRC, 2010b)

5.3.5 Κανονικοποίηση

Η κανονικοποίηση (Normalization) χρησιμοποιείται προκειμένου να αποδοθεί το σχετικό μέγεθος των χαρακτηρισμένων τιμών για τις διαφορετικές κατηγορίες επίπτωσης, εκφράζοντας τες σε σχέση προς μια κοινή μονάδα αναφοράς. Καθώς οι τιμές των δεικτών ενδιάμεσου σημείου για τις διαφορετικές κατηγορίες επίπτωσης εκφράζεται σε διαφορετικές μονάδες, δεν είναι δυνατό να συσχετιστούν μεταξύ τους και να διακριθεί π.χ. σε ποια κατηγορία επίπτωσης παρουσιάζεται η χειρότερη περιβαλλοντική απόδοση και σε ποια η καλύτερη, σε σχέση με ένα σύστημα αναφοράς.

Το στάδιο αυτό είναι προαιρετικό σύμφωνα με το ISO 14044:2006 και υποστηρίζει το ακόλουθο στάδιο της ερμηνείας.

Αυτό εξυπηρετεί κυρίως τρεις σκοπούς: (1) να κατανοήσουν καλύτερα οι αρμόδιοι λήψης αποφάσεων το μέγεθος των χαρακτηρισμένων αποτελεσμάτων, συγκρίνοντάς τα με μια κοινή μονάδα αναφοράς που τους είναι πιο οικεία, (2) να γίνει έλεγχος για τυχόν λάθη στην αξιολόγηση σε μη δικαιολογημένα υψηλές ή χαμηλές κανονικοποιημένες τιμές στα αποτελέσματα ορισμένων κατηγοριών επίπτωσης και (3) να προετοιμάσει το δρόμο για το επόμενο στάδιο της ερμηνείας.

Ως τυπικές αναφορές χρησιμοποιούνται οι συνολικές επιπτώσεις ανά κατηγορία επίπτωσης ανά:

- Γεωγραφική ζώνη (παγκόσμια, ηπειρωτική, εθνική, περιοχική ή τοπική)
- Κάτοικο γεωγραφικής ζώνης (εκφράζοντας τον «περιβαλλοντικό χώρο» που καταλαμβάνεται από τον μέσο κάτοικο)

- Βιομηχανικό κλάδο μιας γεωγραφικής ζώνης (εκφράζοντας τον «περιβαλλοντικό χώρο» που καταλαμβάνεται από το σύστημα του εξεταζόμενου προϊόντος συγκριτικά με παρόμοιες βιομηχανικές δραστηριότητες)
- Σενάριο βάσης/αναφοράς, όπως ένα άλλο σύστημα προϊόντος (εκφράζοντας τον «περιβαλλοντικό χώρο» που καταλαμβάνεται από αυτό το σύστημα προϊόντος σε σχέση με ένα άλλο παρόμοιο σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιεί τη βέλτιστη διαθέσιμη τεχνολογία)

Η χρήση ενός από τα τρία πρώτα συστήματα αναφοράς, αποκαλείται εξωτερική κανονικοποίηση. Η χρήση του τελευταίου συστήματος αναφοράς αποκαλείται εσωτερική κανονικοποίηση όταν το σενάριο αναφοράς είναι μία από τις συγκρινόμενες εναλλακτικές. Οι κανονικοποιημένες τιμές των επιπτώσεων όταν χρησιμοποιείται εσωτερική κανονικοποίηση μπορούν επίσης να εκφραστούν και ως ποσοστά των αντίστοιχων τιμών του συστήματος αναφοράς.

Η κανονικοποίηση γίνεται με τη χρήση συντελεστών κανονικοποίησης (normalization factors, NF). Αυτοί υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τις παρεμβάσεις στο περιβάλλον E από όλες τις στοιχειώδεις ροές i για το σύστημα αναφοράς και πολλαπλασιάζοντας με τους συντελεστές χαρακτηρισμού CF για κάθε στοιχειώδη ροή i, αντίστοιχα, για κάθε κατηγορία επίπτωσης c. Η αναφορά κανονικοποίησης συνήθως διαιρείται με τον πληθυσμό P της περιοχής αναφοράς r, προκειμένου να υπολογιστεί ο NF ανά μέσο κάτοικο της περιοχής αναφοράς (επιπτώσεις ανά κάτοικο ή ισοδύναμα ατόμου).

$$\mathrm{NF}_c = \left(\frac{\sum_i (\mathrm{CF}_i \cdot E_i)}{P_r} \right)^{-1}$$

Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η συνολική επίπτωση του συστήματος αναφοράς ανά κατηγορία επίπτωσης. Η μονάδα αναφοράς που χρησιμοποιείται από την προτεινόμενη μέθοδο EEKZ του ILCD αλλά και στην παρούσα διατριβή, είναι το Ισοδύναμο Ατόμου (Person Equivalent, PE).

Μια κανονικοποιημένη βαθμολογία NS μιας επίπτωσης για ένα σύστημα προϊόντος υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη βαθμολογία της επίπτωσης IS για το σύστημα με το σχετικό NF ανά κατηγορία επίπτωσης c:

$$\mathrm{NS}_c = \mathrm{IS}_c \cdot \mathrm{NF}_c$$

5.3.6 Στάθμιση (και συνυπολογισμός)

Η στάθμιση και ο συνυπολογισμός (weighting and aggregation) εφαρμόζονται προκειμένου να προσδιοριστεί ποιες επιπτώσεις είναι πιο σημαντικές και πόσο σημαντικές είναι. Αυτό το στάδιο μπορεί να λάβει χώρα μόνο μετά το στάδιο της κανονικοποίησης και περιλαμβάνει την ιεράρχηση των κατηγοριών επιπτώσεων εφαρμόζοντας διαφορετικές ή ίσες βαρύτητες στους δείκτες κάθε κατηγορίας, οι οποίες εκφράζουν τη σχετική σημασία τους. Επίσης μπορεί να περιλαμβάνει την άθροιση των σταθμισμένων τιμών των δεικτών από επιλεγμένες ή όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, με αποτέλεσμα τον υπολογισμό ενός μικρότερου αριθμού δεικτών ή ακόμα και μίας μοναδικής τιμής δείκτη.

Ακόμα και όταν δεν εφαρμόζεται ξεκάθαρα κάποιος συντελεστής βαρύτητας, αθροίζοντας τις τιμές των επιπτώσεων στην ομαδοποίηση, εφαρμόζεται έμμεσα ίση βαρύτητα στις επιπτώσεις. Η στάθμιση θεωρείται προαιρετικό στάδιο κατά το ISO 14044:2006 και υποστηρίζει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η στάθμιση όπως και η ομαδοποίηση μπορεί να είναι χρήσιμη για:

- Το συνυπολογισμό των τιμών των διαφορετικών κατηγοριών επίπτωσης σε έναν αριθμό δεικτών ή σε ένα μοναδικό δείκτη
- Τη σύγκριση μεταξύ των κατηγοριών επιπτώσεων
- Την επικοινωνία των αποτελεσμάτων εφαρμόζοντας μια ιεράρχηση αξιών

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει επιστημονική ομοφωνία ή αντικειμενική βάση για το στάδιο αυτό. Αυτό σημαίνει ότι ανεξάρτητα από ποια μέθοδος στάθμισης θα εφαρμοστεί, θα βασίζεται πάντα στις υποκειμενικές επιλογές ενός ατόμου ή μιας ομάδας ατόμων (Bjørn et al., 2018; Rosenbaum et al., 2018a).

5.4 Ερμηνεία

Η ερμηνεία (Interpretation) είναι το τελικό στάδιο μιας ΑΚΖ κατά το οποίο λαμβάνονται υπόψη τα αποτελέσματα από τα άλλα στάδια συνολικά και αναλύονται κάτω από τις όποιες αβεβαιότητες των χρησιμοποιούμενων δεδομένων και τις θεωρήσεις που έγιναν και καταγράφηκαν σε όλη τη μελέτη (Hauschild et al., 2018).

Η διαδικασία της ερμηνείας ξεκινάει με τον προσδιορισμό των δυνητικά σημαντικών θεμάτων στα προηγούμενα στάδια του προσδιορισμού του σκοπού και του πεδίου μελέτης, της απογραφής δεδομένων και της εκτίμησης επιπτώσεων. Η σημαντικότητα τότε αξιολογείται ελέγχοντας την πληρότητα, την ευαισθησία και τη συνέπεια για καθένα από τα προσδιορισμένα θέματα. Το αποτέλεσμα χρησιμοποιείται για να ενημερώσει τα προηγούμενα στάδια όσον αφορά τις ανάγκες για την ενδυνάμωση της βάσης δεδομένων της μελέτης, και όπου αυτό δεν είναι δυνατό, να επανεξεταστεί ο προσδιορισμός του σκοπού και του πεδίου μελέτης. Στο τέλος, παρέχονται οδηγίες για το πώς θα αντληθούν συμπεράσματα και χαρακτηρίζονται ποιοτικά τα αποτελέσματα με βάση την αξιοπιστία τους, ενώ παράλληλα παρέχονται συστάσεις με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης (Hauschild et al., 2018).

Ο σκοπός του πρώτου στοιχείου του σταδίου της ερμηνείας είναι η ανάλυση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων σταδίων της ΑΚΖ προκειμένου να προσδιοριστούν τα πιο σημαντικά σημεία από περιβαλλοντική άποψη, δηλαδή τα σημεία αυτά που έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν τα τελικά αποτελέσματα της ΑΚΖ. Τα σημαντικά σημεία μπορεί να περιλαμβάνουν μεθοδολογικές επιλογές και τις θεωρήσεις, τα δεδομένα απογραφής για σημαντικές διεργασίες, και/ή τους συντελεστές χαρακατηρισμού/κανονονικοποίησης/στάθμισης που χρησιμοποιήθηκαν (Hauschild et al., 2018).

Το στοιχείο της αξιολόγησης θέτει τη βάση για τα συμπεράσματα και τις συστάσεις και εκτελείται μέσω της διαδοχικής αλληλεπίδρασης με τον προσδιορισμό των σημαντικών σημείων. Το αποτέλεσμα της αξιολόγησης είναι σημαντικό για τον προσδιορισμό της ισχύος των συμπερασμάτων και των συστάσεων και πρέπει να παρουσιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει τη σαφή κατανόηση του αποτελέσματος (Hauschild et al., 2018).

Η αξιολόγηση περιλαμβάνει τον έλεγχο της πληρότητας, την ανάλυση της ευαισθησίας σε συνδυασμό με την ανάλυση αβεβαιότητας και τον έλεγχο συνέπειας. Οι έλεγχοι πληρότητας λαμβάνουν χώρα κατά το στάδιο της απογραφής και της εκτίμησης επιπτώσεων, προκειμένου να προσδιοριστεί ο βαθμός στον οποίο τα διαθέσιμα δεδομένα είναι πλήρη για τις διεργασίες και τις επιπτώσεις αυτές οι οποίες έχουν αναγνωριστεί ως σημαντικά σημεία. Ο έλεγχος ευαισθησίας στοχεύει στον προσδιορισμό των βασικών διεργασιών και των πιο σημαντικών στοιχειωδών ροών ως τα στοιχεία αυτά που συνεισφέρουν περισσότερο στις συνολικές επιπτώσεις του συστήματος προϊόντος. Ο έλεγχος συνέπειας πραγματοποιείται προκειμένου να διερευνηθεί εάν οι θεωρήσεις, οι μέθοδοι και τα δεδομένα , τα οποία

χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη, είναι συνεπή με το σκοπό και το πεδίο της μελέτης (Hauschild et al., 2018).

Το τελευταίο στοιχείο της ερμηνείας αντλεί συμπεράσματα, αναγνωρίζει τους περιορισμούς της μελέτης και δίνει συστάσεις στο κοινό της μελέτης. Οι συστάσεις με βάση τα τελικά συμπεράσματα θα πρέπει να είναι λογική απόρροια των συμπερασμάτων (Hauschild et al., 2018).

Η διαχείριση αβεβαιότητας (uncertainty management) και η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) διεξάγεται ως μέρος του σταδίου της ερμηνείας για να καθοδηγήσει την άντληση συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα, να αξιολογήσει την αξιοπιστία των συμπερασμάτων και να αναγνωρίσει τα σημεία που θα πρέπει να διεξαχθεί επιπλέον δουλειά για να ισχυροποιήσει τα συμπεράσματα (Rosenbaum et al., 2018b).

Προκειμένου να διευκρινιστεί ο όρος αβεβαιότητα, χρησιμοποιείται ο ορισμός των Rosenbaum et al. (2018) ο οποίος περιλαμβάνει οτιδήποτε δεν γνωρίζουμε και εκφράζεται ως η πιθανότητα ή βεβαιότητα να συμβεί ένα γεγονός. Η ευαισθησία ενός μοντέλου περιγράφει το βαθμό στον οποίο η διακύμανση μιας παραμέτρου ή επιλογής (π.χ. ο χρονικός ορίζοντας) οδηγεί σε διακύμανση στο τελικό αποτέλεσμα. Μερικοί θεωρούν ότι η ευαισθησία περιλαμβάνει την αβεβαιότητα και επομένως περιλαμβάνει το εύρος της διακύμανσης των παραμέτρων εισόδου ως συνάρτηση της αβεβαιότητάς τους, μεταβάλλοντάς τες όλες την ίδια στιγμή. Αυτό αναφέρεται επίσης και ως παγκόσμια ανάλυση ευαισθησίας και αποτελεί στην ουσία αυτό που αναφέρεται αυτή η ενότητα με τον όρο αβεβαιότητα. Άλλοι ορίζουν την ευαισθησία μόνο ως το αποτέλεσμα μιας συγκεκριμένης αλλαγής, εφαρμόζοντας μια προκαθορισμένη διακύμανση χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα. Αυτή η ανάλυση γίνεται μεταβάλλοντας μια παράμετρο τη φορά και αποκαλείται τοπική ανάλυση ευαισθησίας, η οποία αποτελεί και την πιο συνήθη πρακτική (Rosenbaum et al., 2018b).

Η ανάλυση ευαισθησίας επισημαίνει αυτές τις παραμέτρους εισόδου οι οποίες έχουν σημαντική επίδραση στο αποτέλεσμα, ενώ η ανάλυση αβεβαιότητας πληροφορεί σχετικά με το εύρος του αποτελέσματος λόγω του εύρους των εισερχόμενων δεδομένων και άλλων πηγών αβεβαιότητας. Μια παράμετρος εισόδου μπορεί να είναι πολύ αβέβαια, αλλά αν το αποτέλεσμα του μοντέλου δεν είναι ευαίσθητο σε αυτή την παράμετρο, η αβεβαιότητα της παραμέτρου εισόδου δεν επηρεάζει αυτή του αποτελέσματος (Rosenbaum et al., 2018b).

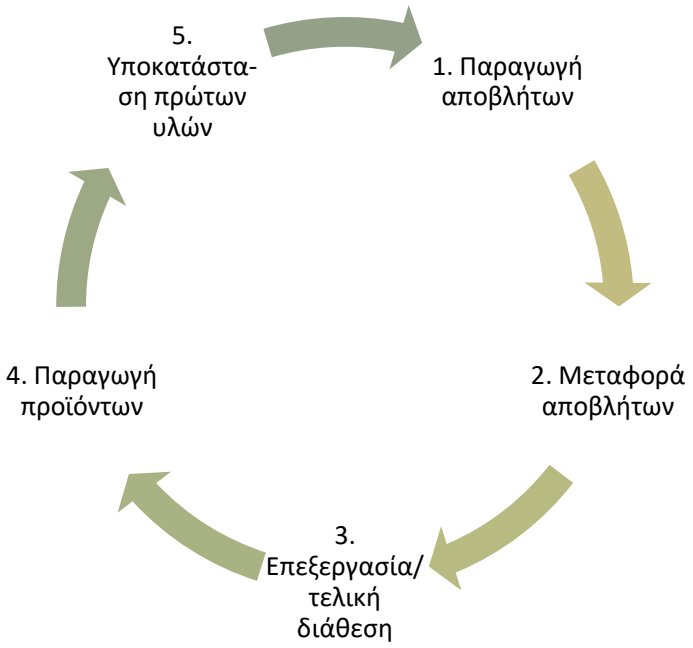
Μια κατηγοριοποίηση των τύπων αβεβαιότητας που χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορα πεδία εφαρμογής διακρίνει τρεις διαφορετικούς τύπους: (i) την αβεβαιότητα παραμέτρων, (ii) την αβεβαιότητα μοντέλου και (iii) την αβεβαιότητα σεναρίου. Η αβεβαιότητα παραμέτρων περιλαμβάνει τη μεταβλητότητα και την αβεβαιότητα των παραμέτρων εισόδου στο μοντέλο. Η αβεβαιότητα μοντέλου αναφέρεται στην αβεβαιότητα του ίδιου του μοντέλου λόγω του στησίματος, των αρχικών συνθηκών και των προσδιορισμένων ορίων, των μεταβλητών και των δεικτών που λαμβάνονται υπόψη και τις εξισώσεις που χρησιμοποιούνται. Η αβεβαιότητα του σεναρίου μπορεί να ερμηνευτεί ως η αβεβαιότητα της εφαρμογής και χρήσης του μοντέλου και των αποτελεσμάτων κάτω από προκαθορισμένες συνθήκες και θεωρήσεις. Παρόλο που μόνο η αβεβαιότητα των παραμέτρων και του μοντέλου συμβάλλουν στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων, η αβεβαιότητα του σεναρίου μπορεί επίσης να συμβάλει στην αβεβαιότητα κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Για διάφορους λόγους, ο τύπος της αβεβαιότητας που εξετάζεται στην ΑΚΖ είναι η αβεβαιότητα και μεταβλητότητα των παραμέτρων (Rosenbaum et al., 2018b).

Η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας αναφέρεται στη χρήση ενός ποσοτικού μέτρου της αβεβαιότητας για (i) μια συγκεκριμένη πηγή αβεβαιότητας στην ΑΚΖ (π.χ. μια μέση τιμή, τυπική απόκλιση και είδος κατανομής για μια παράμετρο) και (ii) τη συνολική αβεβαιότητα της ΑΚΖ ως αποτέλεσμα του

συνδυασμού των συγκεκριμένων πηγών αβεβαιότητας. Το τελευταίο επιτυγχάνεται με τη χρήση μεθόδων διάδοσης αβεβαιότητας (uncertainty propagation). Η πιο διαδεδομένη μέθοδος ποσοτικοποίησης των στοιχείων αβεβαιότητας μιας ΑΚΖ είναι η μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo, η οποία χρησιμοποιείται σε λογισμικά LCA, όπως το SimaPro, το GaBi και το openLCA (Rosenbaum et al., 2018b).

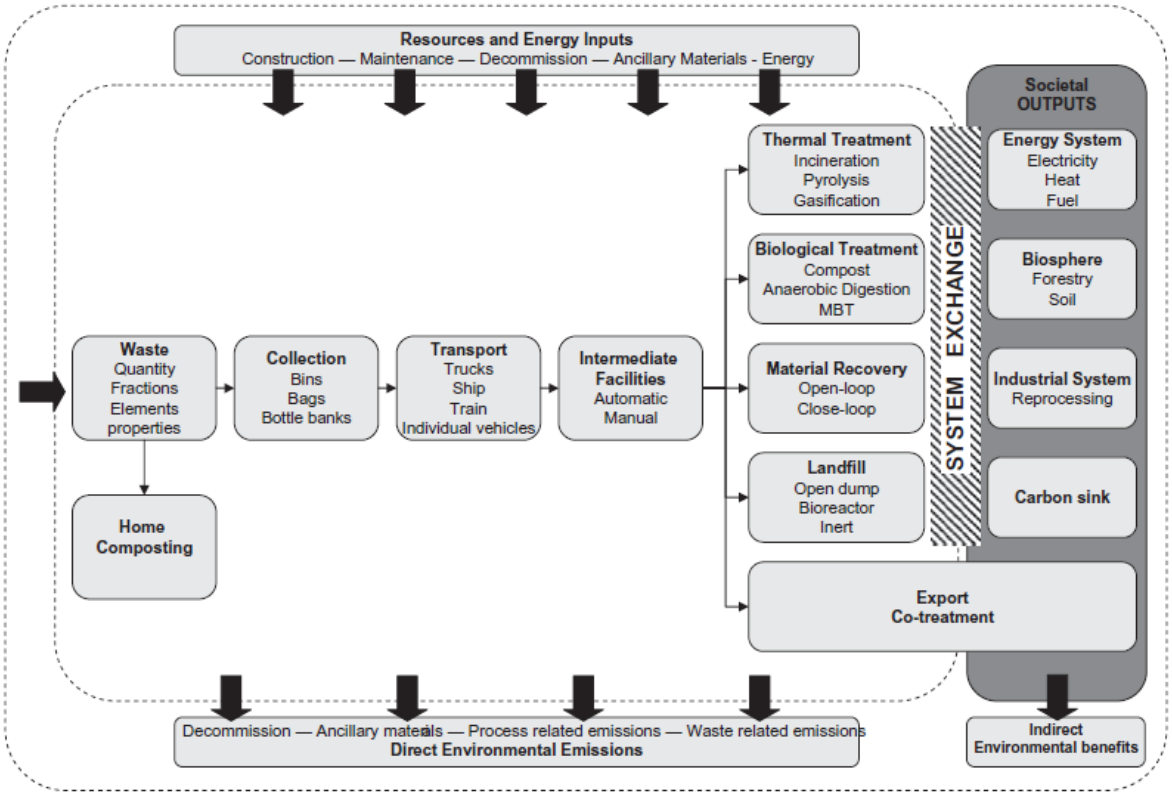
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Εφαρμογή ανάλυσης κύκλου ζωής για τη διαχείριση αποβλήτων

Με την εφαρμογή της ΑΚΖ για την περίπτωση της διαχείρισης των αποβλήτων, στην ουσία η αξιολόγηση εστιάζει στην σύγκριση μεταξύ διαφορετικών επιλογών διαχείρισης και όχι στην κάλυψη ολόκληρου του κύκλου ζωής των προϊόντων, τα οποία έγιναν απόβλητα (EC-JRC, 2011b). Επομένως, η έμφαση δίνεται κυρίως στο τέλος του κύκλου ζωής των προϊόντων, σε αντίθεση με την ΑΚΖ των προϊόντων των οποίων η προσοχή εστιάζεται στην παραγωγή και τη φάση της χρήσης τους. Σε πολλές μελέτες τέτοιου είδους σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων, η μελέτη ξεκινά από τη στιγμή που το προϊόν καθίσταται ως απόβλητο, επομένως τα στάδια της παραγωγής και της χρήσης του προϊόντος εξαιρούνται από τη μελέτη.



Ενώ με τις γενικές ΑΚΖ συνήθως μοντελοποιείται ένα προϊόν «από την κούνια έως τον τάφο» (cradle-to-grave), μια ΑΚΖ για τη διαχείριση αποβλήτων αξιολογεί τη διαχείριση ενός πολύ ετερογενούς υλικού το οποίο αποτελείται από ένα αριθμό διαφορετικών κλασμάτων αποβλήτων (προϊόντα στο τέλος του κύκλου ζωής τους), από το τέλος του κύκλου ζωής έως το τάφο ή την ανακύκλωση. Αυτά τα κλάσματα αποβλήτων έχουν σημαντική διαφοροποίηση στις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες (Riber et al., 2007), και ως αποτέλεσμα ο βέλτιστος χειρισμός διαφέρει σημαντικά μεταξύ των κλασμάτων. Ο διαχωρισμός των αποβλήτων σε διαφορετικές ροές, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της διαλογής στην πηγή, και η παρακολούθηση των ποσοτήτων και των ουσιών στα επακόλουθα σχήματα διαχείρισης είναι κρίσιμα σημεία για τη διαχείριση αποβλήτων (Clavreul et al., 2014).

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά η δομή και τα όρια του συστήματος ΑΚΖ ενός τυπικού ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης αποβλήτων.



Σχήμα 46: Τυπικό ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης αποβλήτων. Η εξωτερική διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην ευρύτερη κοινωνία (σύστημα γης και τεχνόσφαιρα). Η εσωτερική διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων τα οποία εκπροσωπούνται από έναν αριθμό τεχνολογιών διαχείρισης αποβλήτων (Gentil et al., 2010)

Σε μια ΑΚΖ για τη διαχείριση αποβλήτων, η λειτουργική μονάδα γενικά περιλαμβάνει τα απόβλητα υπό μελέτη που διαχειρίζονται μέσω ενός συστήματος διαχείρισης αποβλήτων σε μια συγκεκριμένη περίοδο (συνήθως ένα έτος) σε μια περιοχή μελέτης. Η λειτουργική μονάδα εκφράζεται κυρίως με τους ακόλουθους τρόπους: (1) με βάση τη μονάδα, π.χ. διαχείριση ενός τόνου αστικών στερεών αποβλήτων, (2) με βάση την παραγωγή, π.χ. διαχείριση των αποβλήτων που παράγονται σε μια υπό μελέτη περιοχή στην περίοδο ενός έτους, (3) με βάση την είσοδο, π.χ. διαχείριση της ποσότητας αποβλήτων που εισέρχεται σε μια μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων, (4) με βάση την παραγωγή, π.χ. παραγωγή μιας ποσότητας ενέργειας από μια μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων (Bakas et al., 2018).

Τα ανάντη όρια αφορούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συσχετίζονται με την εξόρυξη, την κατασκευή, τη διανομή και τη χρήση ενός προϊόντος πριν το τέλος της ζωής του. Όταν μοντελοποιούνται συστήματα διαχείρισης αποβλήτων, υιοθετείται η προσέγγιση «Μηδενικού βάρους» (zero burden), η οποία ορίζει ότι τα απόβλητα δεν περιλαμβάνουν ενσωματωμένες επιπτώσεις. Οι ενσωματωμένες επιπτώσεις είναι όλες οι επιπτώσεις που δημιουργούνται από την παραγωγή ενός προϊόντος προτού γίνει απόβλητο.

Τα όρια του συστήματος μεταξύ των σημαντικών και αμελητέων μερών σε ένα σύστημα διαχείρισης αποβλήτων ορίζονται από τους κανόνες αποκλεισμού (cut-off). Σύμφωνα με το ISO 14040 (ISO, 2006a), οι κανόνες ορίζουν την ποσότητα της ροής υλικού ή ενέργειας ή του επιπέδου περιβαλλοντικής σημασίας μια μοναδιαίας διεργασίας ή ενός συστήματος που πρόκειται να αποκλειστεί από τα όρια συστήματος μια μελέτης.

Ο χρονικός ορίζοντας παίζει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα μιας ΑΚΖ για τη διαχείριση αποβλήτων. Ο χρονικός ορίζοντας είναι κυρίως σχετικός για την μοντελοποίηση της ταφής και σε μικρότερο βαθμό

για την εφαρμογή στο έδαφος των βιοεπεξεργασμένων υλικών, καθώς οι εκπομπές από τις άλλες τεχνολογίες διαχείρισης αποβλήτων είναι άμεσες. Η επιλογή του χρονικού ορίζοντα μπορεί να επηρεάσει σημαντικά το αποτέλεσμα, εάν οι εκπομπές υπολογιστούν για ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (μικρότερο ή ίσο με 100 έτη) ή για ένα μακροπρόθεσμο ορίζοντα (μερικές χιλιάδες έτη). Για παράδειγμα, αυτό είναι σημαντικό στην περίπτωση των εκπομπών που λαμβάνουν χώρα σε πολύ μικρές ποσότητες για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα, όπως η έκπλυση μετάλλων από τους χώρους ταφής. Ειδικότερα, εάν επιλεχθεί ένας μακροπρόθεσμος χρονικός ορίζοντας, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό πολύ υψηλών και μη ρεαλιστικών επιπτώσεων στις σχετικές κατηγορίες επιπτώσεων κύκλου ζωής, ενώ αν επιλεχθεί ο χρονικός ορίζοντας των 100 ετών, τότε δεν λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές που λαμβάνουν χώρα μετά το διάστημα αυτό (Bakas et al., 2015; 2018). Ένα άλλο πολύ σημαντικό ζήτημα που σχετίζεται με το χρονικό ορίζοντα είναι ο υπολογισμός του οφέλους από την προσωρινή αποθήκευση βιογενούς άνθρακα και των σχετικών μελλοντικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Η γνώση της σύστασης του αποβλήτου παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο σε μια μελέτη ΑΚΖ καθώς τα επιμέρους κλάσματα που απαρτίζουν το απόβλητο έχουν διαφορετικές χημικές και φυσικές ιδιότητες και μπορούν να οδηγηθούν σε διαφορετικές διεργασίες στο σύστημα διαχείρισης. Ενώ η κλασματική σύσταση του αποβλήτου ορίζεται συνήθως από το χρήστη, η στοιχειακή σύσταση είναι ενσωματωμένη τις περισσότερες φορές στο μοντέλο και ο χρήστης δεν έχει δυνατότητα να τροποποιήσει τα δεδομένα. Αναφορικά με τις διεργασίες βιοεπεξεργασίας, η μοντελοποίηση μεταξύ των μοντέλων μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το αν οι σχετικές επιπτώσεις υπολογίζονται με βάση τη σύσταση των αποβλήτων, καθώς στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα είναι πιο ρεαλιστικά και πιο ακριβή.

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφορετικών διεργασιών διαχείρισης αποβλήτων από διαφορετικά μοντέλα ΑΚΖ, θα πρέπει να έχουν δίνεται σημασία στις παραδοχές που γίνονται στα διάφορα στάδια (π.χ. είδος ενέργειας που υποκαθίσταται, λόγος υποκατάστασης υλικών), το είδος των τεχνολογιών, καθώς και των βάσεων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιηθούν οι εισροές (π.χ. διαφορετικά γεωγραφικά πεδία αναφοράς συνεπάγονται διαφορετικά δεδομένα απογραφής).

Η επιλογή του ηλεκτρικού μίγματος επηρεάζει και αυτή με τη σειρά της τα αποτελέσματα μιας ΑΚΖ για τα απόβλητα (Curran et al., 2005; Finnveden et al., 2005). Τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν είτε γιατί η παροχή ενέργειας μπορεί να προέρχεται από διαφορετικές πηγές, είτε γιατί τα δεδομένα για την ίδια πηγή ενέργειας μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία.

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση της επανεπεξεργασίας των υλικών για την ανακύκλωσή τους, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η αναλογία υποκατάστασης των παρθένων από τα ανακυκλωμένα υλικά (Wenzel and Villanueva, 2006).

Η μοντελοποίηση των διεργασιών αυτών διαφοροποιείται επίσης βάσει των παραδοχών που γίνονται για τη δέσμευση βιογενή άνθρακα. Ειδικότερα, ο βιογενής άνθρακας που περιέχεται στα απόβλητα μπορεί να θεωρηθεί είτε ως ουδέτερος προς, είτε ότι συνεισφέρει στην κλιματική αλλαγή, ανάλογα με την προσέγγιση που υιοθετείται στη μελέτη ΑΚΖ. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή αυτή πρέπει να είναι συνεπής σε όλη τη μελέτη. Συγκεκριμένα, εφόσον θεωρηθεί ο βιογενής άνθρακας ουδέτερος ως προς το ΔΠΘ, τότε θα πρέπει να πιστωθεί το σύστημα διαχείρισης για την αποθήκευση βιογενούς άνθρακα στο χώρο ταφής και σε εδάφη που εφαρμόζεται κόμποστ ή χώνευμα από την επεξεργασία των αποβλήτων. Παράλληλα, ο ορυκτός άνθρακας πρέπει να έχει ΔΠΘ όταν απελευθερώνεται ως διοξείδιο του άνθρακα, αλλά να έχει ουδέτερο ΔΠΘ όταν αποθηκεύεται σε ένα χώρο ταφής (Christensen et al. 2009). Η λογική σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται η προσωρινή αποθήκευση του βιογενή άνθρακα έγκειται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης δεν εκπέμπεται CO_2 και επομένως δεν διαταράσσεται το ισοζύγιο της ακτινοβολίας (radiative forcing).

Σύμφωνα με το *ILCD Handbook* (EC-JRC, 2010a), η προσωρινή αποθήκευση του άνθρακα δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ΑΚΖ, παρά μόνο αν δίνεται έμφαση στην αξιολόγηση των επιπτώσεων στο εγγύς μέλλον (έως 100 έτη), καθώς μετά από αυτή την περίοδο ο εναπομείναντας άνθρακας θα εκπεμφθεί τελικά στην ατμόσφαιρα και θα ασκήσει πλήρως την επίδραση του στο ισοζύγιο της ακτινοβολίας. Για να υπολογιστεί η ποσότητα του CO_2 που απομακρύνεται προσωρινά από την ατμόσφαιρα λόγω της αποθήκευσης βιογενή άνθρακα σε βιο-προϊόντα με μεγάλο χρόνο ζωής ή σε χώρους ταφής, εφαρμόζονται ειδικές διορθωτικές στοιχειακές ροές και οι αντίστοιχοι συντελεστές ΔΠΘ100 του IPCC. Συγκεκριμένα 1kg CO_2 που αποθηκεύεται για 100 έτη έχει ΔΠΘ100 ίσο με -1kg CO_2 – eq. Οι εκπομπές που λαμβάνουν χώρα μετά την περίοδο των 100 ετών απογράφονται ξεχωριστά ως «μακροπρόθεσμες εκπομπές» και δεν λαμβάνονται υπόψη στις εκπομπές που απογράφονται για την περίοδο των 100 ετών.

Η υπόθεση ότι οι βιογενείς εκπομπές CO_2 έχουν μηδενικό ΔΠΘ βασίζεται στις οδηγίες του IPCC (2006) για την απογραφή των ΑΦΘ από τη βιολογική διαχείριση των αποβλήτων, όπου ορίζεται ότι μακροπρόθεσμα όλη η οργανική ύλη που εναποτίθεται για ταφή θεωρείται ότι αποδομείται πλήρως και επομένως οι βιογενείς εκπομπές CO_2 εξισορροπούνται από μια ισόποση πρόσληψη CO_2 από τα φυτά κατά την ανάπτυξή τους. Ωστόσο, σύμφωνα με τους *Manfredi & Christensen* (2009) φαίνεται ότι ένα σημαντικό μέρος (50-58%) του άνθρακα που βρίσκεται στα απόβλητα κατά την εναπόθεσή τους στο χώρο ταφής και το οποίο αποτελείται σχεδόν εξολοκλήρου από βιογενή άνθρακα, δεν αποδομείται στο τέλος του χρονικού ορίζοντα των 100 ετών και επομένως παραμένει αποθηκευμένο στο χώρο ταφής, ενώ θα εκπεμφθεί ως CO_2 μετά τα 100 έτη. Αυτή η ποσότητα του δεσμευμένου άνθρακα μπορεί να πιστωθεί στο σύστημα ως εξοικονόμηση εκπομπών CO_2, αφαιρώντας το ΔΠΘ της ποσότητας αυτής από το συνολικό ΔΠΘ του συστήματος που προκύπτει στο διάστημα των 100 ετών. Αυτό ωστόσο μειώνει σημαντικά τις επιπτώσεις για τη μέθοδο της ταφής. Θεωρητικά θα μπορούσε να επιλεχθεί ένας μεγαλύτερος χρονικός ορίζοντας, όπως ορισμένες χιλιετίες, μέσα στο οποίο όλο το οργανικό περιεχόμενο των αποβλήτων θα αποδομούνταν πλήρως και θα μετατρεπόταν σε βιογενές CO_2. Με τον τρόπο αυτό κλείνει το ισοζύγιο βιογενούς άνθρακα, με το εκπεμπόμενο CO_2 να εξισορροπεί όλη την προσλαμβανόμενη ποσότητα CO_2 κατά την ανάπτυξη των φυτών (Manfredi & Christensen, 2009).

Μέχρι στιγμής δεν έχει υπάρξει ομοφωνία σχετικά με τον τρόπο αξιολόγησης στο πλαίσιο της ΑΚΖ του δυναμικού μετριασμού της κλιματικής αλλαγής λόγω της προσωρινής αποθήκευσης άνθρακα (Brandão et al., 2012; Jørgensen and Hauschild, 2013; Guest et al., 2013). Η επιλογή ενός περιορισμένου χρονικού ορίζοντα (π.χ. 100 έτη) πέρα από τον οποίο δεν λαμβάνονται υπόψη οι επιπτώσεις, παραβιάζει την αρχή της ισότητας μεταξύ των γενεών και της βιώσιμης ανάπτυξης, δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στις αρχικές εκπομπές ΑΦΘ και πριμοδοτεί λιγότερο βιώσιμες πρακτικές. Από την άλλη πλευρά, η επιλογή ενός πολύ μεγάλου χρονικού ορίζοντα δεν λαμβάνει υπόψη την επείγουσα ανάγκη για μείωση των εκπομπών ΑΦΘ προτού υπερβληθούν τα κρίσιμα σημεία όσον αφορά την κλιματική αλλαγή (Brandão et al. 2013).

Τα κρίσιμα σημεία (tipping points) είναι τα σημεία όπου συμβαίνει μια δομική αλλαγή στο σύστημα η οποία ξεκινάει μια αλυσιδωτή αντίδραση. Η υπέρβαση των σημείων αυτών εκτιμάται ότι μπορεί να οδηγήσει σε δραματικές, μη αναστρέψιμες αλλαγές στο κλιματικό σύστημα (Meehl et al., 2007). Δεδομένου ότι η πολιτική για την κλιματική αλλαγή έχει κλιμακωθεί τα τελευταία έτη με σκοπό να αποφευχθεί μια αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας πέρα από 1.5°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα (βλ. ενότητα 2.4), ακόμα και μια προσωρινή λύση όπως η αποθήκευση άνθρακα μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην αποφυγή ή την αναβολή της υπέρβασης των κρίσιμων σημείων, μέχρι να βρεθούν πιο μόνιμες λύσεις (Jørgensen et al. 2015).

6.1 Λογισμικά ΑΚΖ για τη διαχείριση αποβλήτων

Υπάρχουν λογισμικά ΑΚΖ τα οποία είναι γενικής χρήσης, όπως τα SimaPro (Pre Consultants), Gabi (Thinkstep), OpenLCA (GreenDelta) και Umberto (Ifu Hamburg), αλλά και άλλα τα οποία έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη διαχείριση αποβλήτων.

Τα γενικά μοντέλα ΑΚΖ συχνά περιλαμβάνουν λεπτομερείς βάσεις δεδομένων, αλλά δεν μπορούν πάντα να υποστηρίξουν τη μοντελοποίηση συγκεκριμένων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων και δεν είναι πλήρως κατάλληλα να απεικονίσουν συγκεκριμένες εθνικές ή περιφερειακές συνθήκες. Ακόμα και αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα απογραφής ειδικά για τα απόβλητα, τα μοντέλα διαχειρίζονται τα απόβλητα σαν ένα σύνολο ξεχωριστών κλασμάτων και όχι συνολικά, το οποίο σημαίνει ότι το λογισμικό δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στη σύσταση των αποβλήτων και δεν λαμβάνει υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των κλασμάτων αποβλήτων μετά την ανάμειξή τους (Gentil et al., 2010).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ειδικότερα στοιχεία για επιλεγμένα ειδικά μοντέλα ΑΚΖ για τη διαχείριση αποβλήτων, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα από τη βιβλιογραφία.

Wisard

Το μοντέλο Wisard (Waste-Integrated Systems for Assessment of Recovery and Disposal) είχε πρωτοαναπτυχθεί το 1994 από την Ecobilan που δραστηριοποιείτο στη Γαλλία. Στη συνέχεια το 1999 διατέθηκε στην αγορά του Ηνωμένου Βασιλείου από την αντίστοιχη εταιρεία εκεί, την Ecobalance, για λογαριασμό της Υπηρεσίας Περιβάλλοντος του ΗΒ. Σκοπός του μοντέλου ήταν η αξιολόγηση και σύγκριση της περιβαλλοντικής απόδοσης διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης οικιακών αποβλήτων. Το μοντέλο πέρασε στην ιδιοκτησία της PricewaterhouseCoopers (PWC) η οποία εξαγόρασε την Ecobalance, ωστόσο δεν φαίνεται να είναι διαθέσιμο πλέον από την εταιρεία, ούτε να έχει αντικατασταθεί από κάποιο πιο πρόσφατο μοντέλο ΑΚΖ για τη διαχείριση αποβλήτων.

IWM

Το μοντέλο ΑΔΚΖ για την Ολοκληρωμένη Διαχείριση Αποβλήτων IWM (Life Cycle Inventory model for Integrated Waste Management) εκδόθηκε για πρώτη φορά το 1995 και αποτελεί ένα από τα πρώτα μοντέλα ΑΚΖ για τη διαχείριση αποβλήτων. Η εταιρεία Procter & Gamble πήρε την πρωτοβουλία για την ανάπτυξη του μοντέλου αυτού, καθώς ως παραγωγός στερεών αποβλήτων μέσω των προϊόντων της και των συσκευασιών τους, επιθυμούσε να συμβάλλει στη βελτιστοποίηση ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων. Το μοντέλο παρέχει μια προσέγγιση μοντελοποίησης ολόκληρου του συστήματος διαχείρισης αποβλήτων, καθώς και συνδυασμού των σχετικών μεθόδων, για την αξιολόγηση της συνολικής περιβαλλοντικής και οικονομικής του απόδοσης. Το μοντέλο είχε ευρεία ανταπόκριση και για το λόγο αυτό η εταιρεία ανέπτυξε το 2008 μια βελτιωμένη έκδοση του μοντέλου, το IWM-2. Η νέα έκδοση έχει ως σκοπό να βελτιώσει συγκεκριμένες πλευρές του μοντέλου, να συμπεριλάβει πιο πρόσφατα δεδομένα και να διευρύνει το πεδίο αναφοράς τους (παγκόσμιο επίπεδο αντί για αποκλειστικά Ευρωπαϊκό).

Το μοντέλο υπολογίζει την παραγωγή αποβλήτων με βάση δεδομένα που εισάγει ο χρήστης σχετικά με τον αριθμό των κατοίκων στην περιοχή μελέτης, την ποσότητα που παράγεται ανά κάτοικο και έτος, τη σύνθεση των αποβλήτων στην περιοχή, ενώ παρέχονται και προκαθορισμένα δεδομένα για ορισμένες χώρες. Τα όρια του συστήματος για την ανάκτηση υλικών περιλαμβάνουν τη μονάδα ανάκτησης υλικών

αλλά δεν περιλαμβάνουν τα επόμενα στάδια της μεταφοράς, προετοιμασίας και επανεπεξεργασίας των ανακτημένων υλικών επομένως δεν λαμβάνονται υπόψη πιστώσεις λόγω της ανακύκλωσης.

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις εκπομπές στον αέρα και τα νερά και υπολογίζει τις επιπτώσεις που σχετίζονται με την κατηγορία της Παγκόσμιας θέρμανσης (Kulczycka et al., 2015). Όσον αφορά τον υπολογισμό του ισοζυγίου άνθρακα, το μοντέλο δεν διαχωρίζει μεταξύ βιογενή και ορυκτού άνθρακα, καθώς και δεν υπολογίζει τυχόν δέσμευση άνθρακα από το έδαφος (Gentil et al., 2010).

ORWARE

Το μοντέλο ORWARE (ORganic WAste REsearch) αναπτύχθηκε μέσα από τη συνεργασία τεσσάρων διαφορετικών ερευνητικών ινστιτούτων της Σουηδίας (KTH—Royal Institute of Technology, IVL—Swedish Environmental Research Institute, JTI—Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering, SLU—Swedish University for Agricultural Sciences). Το μοντέλο σχεδιάστηκε για την ΑΚΖ διεργασιών διαχείρισης στερεών αποβλήτων αλλά και λυμάτων (Dalemo et al., 1997; Eriksson et al., 2002).

Στη συνέχεια δίνεται μια περιεκτική περιγραφή του μοντέλου σύμφωνα με τους Όλες οι φυσικές ροές αποβλήτων περιγράφονται μέσα από 43 διαφορετικές παραμέτρους. Για τον υπολογισμό των εκπομπών, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη δύο χρονικούς ορίζοντες, εκ των οποίων ο πρώτος περιλαμβάνει τις εκπομπές κατά τα πρώτα 100 έτη και ο δεύτερος τις εκπομπές μετά τα 100 έτη (έως το άπειρο) (Dalemo et al., 1997; Eriksson et al., 2002; Gentil et al., 2010).

EPIC/SCR

Το εν λόγω μοντέλο αναπτύχθηκε για λογαριασμό δύο Καναδικών ενώσεων βιομηχανιών (CSR: Corporations Supporting Recycling & EPIC: the Environment and Plastics Industry Council) και έχει ως στόχο να παρέχει στους δήμους του Καναδά ένα εργαλείο για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κύκλου ζωής συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων. Το μοντέλο έχει σχεδιαστεί σε Excel και διατίθεται άνευ χρέωσης μέσω του Πανεπιστημίου του Waterloo, μετά από αίτημα στον ακόλουθο σύνδεσμο https://uwaterloo.ca/integrated-waste-management-model-for-municipalities/.

Σύμφωνα με τον Haight (2004), το μοντέλο υπολογίζει συγκεκριμένους δείκτες οι οποίοι είναι ενδεικτικοί για κάποιες επιπτώσεις, όπως για την εξάντληση των πόρων (ενεργειακή κατανάλωση), την παγκόσμια θέρμανση (εκπομπές CO_2 και CH_4), την οξύνιση (εκπομπές NOx, SO2 και HCl), την αστική αιθαλομίχλη (εκπομπές NOx, PM-10 και VOCs), τον κίνδυνο για την υγεία (εκπομπές βαρέων μετάλλων), την ποιότητα του νερού (BOD) και τη διαταραχή χρήσεων γης (υπολειμματικά στερεά απόβλητα).

LCA-IWM

Το μοντέλο LCA-IWM αποτελεί ένα εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση αποβλήτων σε επίπεδο δήμου, το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου «Use of Life Cycle Assessment Tool for the Development of Integrated Waste Management Strategies for Cities and Regions with Rapid Growing Economies (LCA-IWM)». Το LCA-IWM βασίζεται στη μέθοδο αξιολόγησης επιπτώσεων CML 2001 (Guinee et al., 2001) και ειδικότερα τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται με βάση έξι βασικές (baseline) κατηγορίες επιπτώσεων (Den Boer et al., 2007).

WRATE

Το εργαλείο WRATE (Waste and Resources Assessment Tool for the Environment) αρχικά αναπτύχθηκε για λογαριασμό της Υπηρεσίας Περιβάλλοντος της Αγγλίας και Ουαλίας, της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος της Σκοτίας και του Τμήματος Περιβάλλοντος της Βόρειας Ιρλανδίας. Το εργαλείο αυτό είναι πλέον διαθέσιμο (http://www.wrate.co.uk/) από την εταιρία Golder Associates και έχει ως σκοπό να παρέχει πληροφορίες κύκλου ζωής σε δήμους, την κεντρική κυβέρνηση και άλλους φορείς οι οποίοι ενδιαφέρονται για την ανάπτυξη πιο βιώσιμων και ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης δημοτικών αποβλήτων. Στη συνέχεια παρατίθενται ειδικότερες πληροφορίες σχετικά με το εργαλείο σύμφωνα με τον Gentil (2006).

Η βάση για τη διαχείριση αποβλήτων περιλαμβάνει δεδομένα για πάνω από 160 διεργασίες, ενώ συμπεριλαμβάνει επίσης δεδομένα για την κατασκευή, συντήρηση και παροπλισμό των μονάδων επεξεργασίας. Επίσης περιέχει πολύ εκτενή πληροφορία σχετικά με τους κάδους αποβλήτων (34 είδη) καθώς και τις εισροές και εκροές κατά την κατασκευή, το χρόνο ζωής των κάδων και τις ανάγκες συντήρησης, όπως η ποσότητα των απορρυπαντικών για το πλύσιμο των κάδων και η διαχείριση στο τέλος ζωής τους. Ο χρονικός ορίζοντας για τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις θεωρείται ως άπειρος προκειμένου να υπολογιστεί το 90% των εκπομπών.

Όσον αφορά τη σύνθεση του αποβλήτου, η βάση δεδομένων περιλαμβάνει προκαθορισμένη στοιχειακή σύσταση για κάθε κλάσμα αποβλήτου, προκαθορισμένη σύνθεση αποβλήτου, θερμογόνο δύναμη, περιεκτικότητα σε υγρασία και τέφρα. Οι χρήστες μπορούν να επιλέξουν τη δική τους σύνθεση αποβλήτου αλλά δεν μπορούν να τροποποιήσουν τη στοιχειακή σύσταση αυτού. Επίσης το μοντέλο παρέχει ξεχωριστά δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής για το βιογενή και τον ορυκτό άνθρακα και υπολογίζει τις επιπτώσεις από τις εκπομπές που σχετίζονται με τον ορυκτό άνθρακα.

Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί κατά κύριο λόγο στο Ηνωμένο Βασίλειο και σε μικρότερο βαθμό στην υπόλοιπη Ευρωπαϊκή Ένωση.

MSW-DST

Η Αρχή Προστασίας Περιβάλλοντος των ΗΠΑ (US EPA) ηγήθηκε της ανάπτυξης του εργαλείου MSW-DST για την υποστήριξη λήψης αποφάσεων στον τομέα της διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων. Η ανάπτυξη του εργαλείου έγινε σε συνεργασία με το ερευνητικό ινστιτούτο RTI International (μη κερδοσκοπικός φορέας), πανεπιστήμια και ιδιωτικούς φορείς. Το εργαλείο επίσης αξιολογήθηκε από ομοσπονδιακούς, πολιτειακούς και τοπικούς κυβερνητικούς φορείς, ερευνητικά ιδρύματα, βιομηχανίες και μη κυβερνητικούς οργανισμούς (Thorneloe et al., 2007).

Το εργαλείο έχει ως στόχο την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής και οικονομικής απόδοσης ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης ΑΣΑ. Η ανάπτυξη του εργαλείου ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του '90, ωστόσο από την πρώτη έκδοση έχουν βγει μεταγενέστερες εκδόσεις, με την τελευταία ενημέρωση να ανακοινώνει την έκδοση ενός εργαλείου 2ης γενιάς για το 2018, το οποίο θα έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση της ανάκτησης πόρων και ενέργειας από τα ΑΣΑ (Thorneloe, 2016). Το εργαλείο είναι διαθέσιμο δωρεάν από το 2012 στην ακόλουθη διεύθυνση http://webdstmsw.rti.org/ όπου παρέχεται και σχετικό υποστηρικτικό υλικό.

Το λογισμικό περιλαμβάνει 26 ροές αποβλήτων και πάνω από 40 μοναδιαίες διεργασίες διαχείρισης αποβλήτων. Τα μοντέλα διεργασιών υπολογίζουν το κόστος, την κατανάλωση ενέργειας και της εκπομπές απογραφής κύκλου ζωής από 32 ρύπους για κάθε διεργασία με βάση την ποσότητα και τη σύνθεση των επεξεργαζόμενων αποβλήτων. Για οποιαδήποτε είδους ανάκτηση, το μοντέλο υπολογίζει

τις αντισταθμίσεις που προκύπτουν από την πιθανή εξοικονόμηση εκπομπών λόγω της υποκατάστασης της χρήσης παρθένων πρώτων υλών (Thorneloe et al., 2007).

Όσον αφορά τις διεργασίες βιοεπεξεργασίας αποβλήτων, το μοντέλο αρχικά περιλάμβανε μόνο την κομποστοποίηση, καθώς η αναερόβια χώνευση δεν ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένη τότε ενώ προβλέπεται να συμπεριληφθεί στο εργαλείο 2^{ης} γενιάς. Το μοντέλο περιλαμβάνει τυπικές συστάσεις κόμποστ μεταξύ των οποίων μπορεί να επιλέξει ο χρήστης. Ωστόσο, δεν περιλαμβάνεται η υποκατάσταση υλικών και προϊόντων (π.χ. λίπασμα) καθώς τα απόβλητα που μοντελοποιούνται με το MSW-DST δεν παρήγαν υλικό καλής ποιότητας για την υποκατάσταση λιπασμάτων Gentil et al. (2010).

Όσον αφορά τη διεργασία της ταφής αποβλήτων, το μοντέλο παρέχει τρεις χρονικούς ορίζοντες για τη μοντελοποίηση της παραγωγής εκπομπών από τους οποίους μπορεί να επιλέξει ο χρήστης, ένα βραχυπρόθεσμο ορίζοντα (20 έτη) ο οποίος αντιστοιχεί στην περίοδο της ενεργής αποδόμησης, ένα ενδιάμεσο ορίζοντα (100 έτη) και ένα μακροπρόθεσμο (500 έτη) Gentil et al. (2010)..

EASETECH

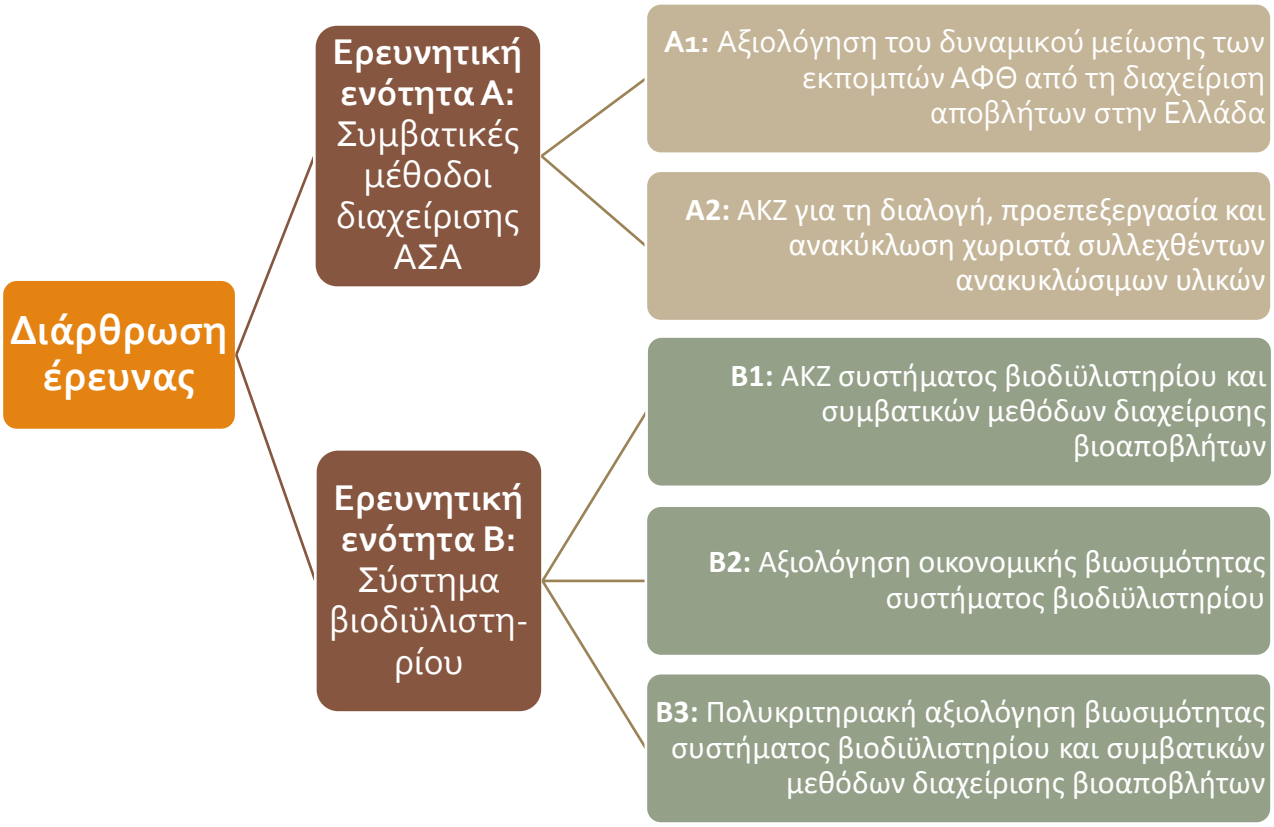
Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο DTU της Δανίας και κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 2004 ως EASEWASTE (Environmental Assessment of Solid Waste Systems and Technologies), ενώ κυκλοφόρησαν και ενημερωμένες εκδόσεις αυτού το 2008 και το 2012. Ο στόχος του μοντέλου ήταν η αξιολόγηση της συνολικής κατανάλωσης πόρων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τα συστήματα διαχείρισης στερεών αποβλήτων με τη χρήση ΑΚΖ (Kirkeby et al., 2006). Το 2014 κυκλοφόρησε το DTU ένα νέο εργαλείο, το EASETECH, με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε από την ανάπτυξη του EASEWASTE. Το EASETECH έχει σκοπό να καταστήσει εφικτή τη μοντελοποίηση πιο σύνθετων συστημάτων διαχείρισης και νέων τεχνολογιών, να είναι πιο ευέλικτο ώστε να δίνει τη δυνατότητα καλύτερης μοντελοποίησης των διεργασιών και να παρέχει δυνατότητα ανάλυσης ευαισθησίας και αβεβαιότητας (Clavreul et al., 2014). Το μοντέλο έκτοτε έχει χρησιμοποιηθεί από ερευνητές του DTU για να μοντελοποιήσουν τη διαχείριση των υγρών αποβλήτων, τη διαχείριση ιλύος καθώς και τεχνολογίες παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, τα οποία δεν ήταν εφικτά με το προηγούμενο μοντέλο. Το μοντέλο διατίθεται στους ενδιαφερόμενους από το DTU με την προϋπόθεση ότι θα παρακολουθήσουν κάποιο από τα σεμινάρια που προσφέρουν για την εκπαίδευση στη χρήση του.

Το μοντέλο αυτό αποτελεί και το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτό δίνονται στην Ενότητα 8.2.

Γ’ ΜΕΡΟΣ: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. Γενική μεθοδολογία

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία της έρευνας για κάθε ερευνητική ενότητα ξεχωριστά. Ειδικότερα, η έρευνα διαχωρίζεται σε δύο ερευνητικές ενότητες, με την πρώτη να εστιάζει στις συμβατικές μεθόδους διαχείρισης των ΑΣΑ και τη δεύτερη σε ένα εναλλακτικό σύστημα βιοδιϋλιστηρίου για τη διαχείριση των βιοαποβλήτων. Η κάθε ερευνητική ενότητα διαχωρίζεται σε επιμέρους ενότητες, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία της έρευνας για τις επιμέρους ερευνητικές ενότητες.

7.1 Ερευνητική ενότητα Α1: Αξιολόγηση του δυναμικού μείωσης των εκπομπών ΑΦΘ από τη διαχείριση αποβλήτων στην Ελλάδα

Στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής ενότητας υπολογίζονται οι εκπομπές αερίων φαινομένου του θερμοκηπίου (ΑΦΘ) που παράγονται από το υφιστάμενο σύστημα διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) στην Ελλάδα και στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση του δυναμικού μείωσης των εκπομπών ΑΦΘ με την υλοποίηση των στόχων αύξησης του ποσοστού ξεχωριστής διαλογής και επεξεργασίας των ΑΣΑ για το 2020, σύμφωνα με τον αναθεωρημένο Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων, ΕΣΔΑ (ΥΠΕΚΑ, 2015).

Ειδικότερα, οι υφιστάμενες μέθοδοι διαχείρισης στερεών αποβλήτων που μελετήθηκαν ήταν η ταφή (υγειονομική ταφή και ανεξέλεγκτη διάθεση σε χωματερές), η κομποστοποίηση (κλειστού τύπου και

οικιακή κομποστοποίηση), η διαλογή των ανακυκλώσιμων υλικών συσκευασίας σε ειδικά κέντρα (ΚΔΑΥ) και η ανακύκλωση των ανακτημένων υλικών (χαρτί, γυαλί, πλαστικό, αλουμίνιο, σίδηρος).

Ο υπολογισμός των εκπομπών ΑΦΘ για τις διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων βασίστηκε καταρχάς στην κατηγοριοποίηση των εκπομπών με βάση το στάδιο κατά το όποιο λαμβάνουν χώρα, σύμφωνα με το γενικό πλαίσιο που συστάθηκε από τους Gentil et al. (2009). Ειδικότερα, οι εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση αποβλήτων διαχωρίστηκαν στις άμεσες εκπομπές από τη μονάδα διαχείρισης αποβλήτων και στις έμμεσες εκπομπές οι οποίες περιλαμβάνουν αυτές που λαμβάνουν χώρα ανάντη της μονάδας διαχείρισης αποβλήτων, όπως η παραγωγή της ενέργειας και των υλικών που είναι απαραίτητα για τη λειτουργία της μονάδας διαχείρισης αποβλήτων (έμμεσες προγενέστερες εκπομπές) και τις έμμεσες εκπομπές ή εξοικονομήσεις που λαμβάνουν χώρα κατάντη της μονάδας διαχείρισης αποβλήτων και σχετίζονται με τα προϊόντα που παράγονται (έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές).

Οι άμεσες εκπομπές ΑΦΘ από τη διεργασία της ταφής υπολογίστηκαν με τη μέθοδο *First Order Decay (FOD)* του IPCC και το μοντέλο IPCC Waste Model (excel) το οποίο εφαρμόζει τη μέθοδο αυτή (περισσότερα για το μοντέλο βλέπε ενότητα 8.1). Το IPCC waste model έτρεξε ξεχωριστά για κάθε ΧΔΑ της Ελλάδας για την περίοδο λειτουργίας του. Για τη σύσταση, λήφθηκε υπόψη η σύσταση που δίνεται σε περιφερειακό επίπεδο από τον ΕΣΔΑ (ΥΠΕΚΑ, 2015). Όσον αφορά τα κλιματικά δεδομένα που απαιτούνται ως είσοδος στο μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν μέσοι όροι για κάθε περιφέρεια.

Δεδομένου ότι κατά το διάστημα που διεξήχθη αυτή η έρευνα δεν υπήρχε στη διάθεση του εργαστηρίου της ΜΠΕΤ, κάποιο άλλο μοντέλο υπολογισμού εκπομπών ή βάση δεδομένων, ο υπολογισμός έγινε με τη χρήση ισοζυγίων μάζας και ενέργειας για τις άμεσες εκπομπές της κομποστοποίησης αλλά και για την παραγωγή ενέργειας από το βιοαέριο που παράγεται από την ταφή. Για τις έμμεσες εκπομπές από όλες τις υπό μελέτη διεργασίες, χρησιμοποιήθηκαν σχετικοί συντελεστές εκπομπών από τη βιβλιογραφία.

Για τον υπολογισμό των συνολικών εκπομπών από την υφιστάμενη διαχείριση, συλλέχθησαν οι ετήσιες ποσότητες που διαχειρίστηκαν για την κάθε μέθοδο διαχείρισης για το διάστημα από το 1994 έως το 2015, για το οποίο και υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία. Πηγές άντλησης των στοιχείων αυτών ήταν τόσο το τμήμα Διαχείρισης Αποβλήτων του Υπουργείου Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ), όσο η Ελληνική Εταιρεία Αξιοποίησης Ανακύκλωσης (ΕΕΑΑ) και ο Εθνικός Οργανισμός Ανακύκλωσης (ΕΟΑΝ).

Για την εξέλιξη της διάθεσης αποβλήτων σε Χώρους Υγειονομικής Ταφής, πηγή πληροφοριών αποτέλεσε η Αναθεώρηση του Εθνικού Σχεδίου Διαχείρισης Αποβλήτων (2013), όπου βρέθηκαν οι ποσότητες ανά μέθοδο διαχείρισης και ανά Περιφέρεια, για τα έτη 2010 και 2011. Επίσης, παραχωρήθηκαν στοιχεία για την υφιστάμενη κατάσταση σε επίπεδο χώρας, όσον αφορά τη διάθεση σε ΧΥΤΑ, για το έτος 2013, από το αρμόδιο Υπουργείο (ΥΠΕΚΑ) κατόπιν προσωπικού αιτήματος. Συγκεκριμένα έγινε καταγραφή όλων των χώρων υγειονομικής αλλά και ανεξέλεγκτης ταφής αποβλήτων (ΧΥΤΑ, ΧΑΔΑ) και των κέντρων διαλογής ανακυκλώσιμων υλικών (ΚΔΑΥ) που λειτουργούσαν από το 1994 έως και το 2015 στην Ελλάδα.

Από τα δεδομένα αυτά, υπολογίστηκε η ανά κάτοικο ποσότητα αποβλήτων που οδηγείται σε ταφή, για το αντίστοιχο έτος. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ποσοστιαία μεταβολή της παραγωγής αποβλήτων ανά κάτοικο, σύμφωνα με στοιχεία της Eurostat. Για τα έτη που δεν υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία έγινε εκτίμηση της μεταβολής σε συνάρτηση με την υπαρκτή ή εκτιμώμενη μεταβολή του πληθυσμού της χώρας, με πηγή τα αποτελέσματα των απογραφών της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ) σε επίπεδο νομού/περιφερειακής ενότητας για τα έτη 1991, 2001 και 2011 και τις εκτιμήσεις της Eurostat έως το έτος 2050. Η ίδια ποσοστιαία μεταβολή εφαρμόστηκε και στις ποσότητες των συνολικά παραγόμενων ΑΣΑ, θεωρώντας ότι ακολουθούν ανάλογη μεταβολή.

Εκτιμήσεις έγιναν και για τις λοιπές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων για τα έτη που δεν υπήρχαν καταγεγραμμένες ποσότητες αλλά υπήρχαν επίσημα έγγραφα που πιστοποιούσαν την ύπαρξη και λειτουργία τους. Τα περισσότερα στοιχεία αντλήθηκαν από τις Αναθεωρήσεις Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων που διατίθενται στο Πρόγραμμα «Διαύγεια» του Υπουργείου Διοικητικής Ανασυγκρότησης και τις εκθέσεις τόσο των Συλλογικών Συστημάτων Εναλλακτικής Διαχείρισης όσο και τις ετήσιες εκθέσεις του Εθνικού Οργανισμού Ανακύκλωσης (ΕΟΑΝ). Τέλος, για στοιχεία που δεν ήταν δυνατό να αντληθούν με κάποιον από τους ανωτέρω τρόπους, χρησιμοποιήθηκαν ισοζύγια μάζας βασιζόμενα στις ποσότητες που μπόρεσαν να εκτιμηθούν και με κριτήριο τη συμφωνία τους με τα στοιχεία της Eurostat.

Οι ποσότητες αποβλήτων ανά υλικό και οι μέθοδοι διαχείρισής τους το 2020, υπολογίστηκαν με βάση στόχους ξεχωριστής διαλογής και επεξεργασίας των ΑΣΑ για το 2020, σύμφωνα με τον αναθεωρημένο Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΥΠΕΚΑ, 2015). Ειδικότερα, για τον υπολογισμό των ποσοτήτων των αποβλήτων που θα οδηγηθούν προς ανακύκλωση το 2020, υπολογίζονται τα ποσοστά συνολικής ανάκτησης από την προδιαλογή και από την επεξεργασία των σύμμεικτων. Για τον υπολογισμό της ποσότητας και σύστασης των αποβλήτων που θα οδηγηθούν το 2020 για ταφή, χρησιμοποιήθηκαν τα ποσοστά της διάθεσης αποβλήτων μετά τη μηχανική επεξεργασία των σύμμεικτων αποβλήτων. Επίσης, οι συνολικές ποσότητες αποβλήτων συσκευασίας που προβλέπεται να ανακτηθούν το 2020, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης στα ΚΔΑΥ. Οι προβλεπόμενοι στόχοι του ΕΣΔΑ για το 2020 για τα υπό εξέταση ρεύματα συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3: Σχεδιασμός διαχείρισης ΑΣΑ για το έτος 2020, τόνοι (και % επί της παραγωγής). Πηγή: ΥΠΕΚΑ, 2015

<table>
<tr><th>Υλικό</th><th>Παραγωγή</th><th colspan="2">Ανάκτηση με προδιαλογή</th><th colspan="2">Ανάκτηση από μηχανική διαλογή συμμείκτων</th><th>Συνολική ανάκτηση</th><th>Διάθεση</th></tr>
<tr><td>Οργανικά</td><td>2,560,500</td><td colspan="2">1,024,200 (40%)</td><td colspan="2">1,024,200 (40%)</td><td>2,048,400</td><td>512,100 (20%)</td></tr>
<tr><td>Χαρτί/χαρτόνι</td><td>1,283,200</td><td rowspan="4">1,664,325 (65%)</td><td>750,600</td><td rowspan="4">256,050 (10%)</td><td>134,700</td><td>885,300</td><td rowspan="4">640,125 (25%)</td></tr>
<tr><td>Πλαστικό</td><td>803,400</td><td>590,275</td><td>35,394</td><td>625,669</td></tr>
<tr><td>Μέταλλο</td><td>225,400</td><td>133,550</td><td>73,480</td><td>207,030</td></tr>
<tr><td>Γυαλί</td><td>248,500</td><td>189,900</td><td>12,476</td><td>202,376</td></tr>
</table>

7.2 Ερευνητική ενότητα Α2: ΑΚΖ για τη διαλογή, προεπεξεργασία και ανακύκλωση χωριστά συλλεχθέντων ανακυκλώσιμων υλικών

Στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας μελετήθηκαν οι διαφορετικές μέθοδοι ανακύκλωσης των ξηρών ανακυκλώσιμων αποβλήτων και πραγματοποιήθηκε έρευνα για την υλοποίηση ενός συστήματος διαλογής στην πηγή σε τέσσερα ρεύματα των ανακυκλώσιμων αποβλήτων (χαρτί, πλαστικό, γυαλί, μέταλλο), όπως προβλέπεται από τον τελευταίο σε ισχύ Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΥΠΕΚΑ, 2015).

Τα όρια του συστήματος ξεκινούν από το σημείο όπου συλλέγονται τα χωριστά συλλεχθέντα ανακυκλώσιμα ρεύματα αποβλήτων με το σύστημα διαλογής στην πηγή, και περιλαμβάνουν το στάδιο της περαιτέρω διαλογής τους, την προετοιμασία για ανακύκλωση (ή αλλιώς προεπεξεργασία), την ανακύκλωση σε νέα προϊόντα και υλικά, την ταφή των υπολειμμάτων, καθώς και τις αντίστοιχες διεργασίες για την παραγωγή των ανακυκλωμένων προϊόντων και υλικών από παρθένες πρώτες ύλες.

Το σύστημα διαχείρισης αποβλήτων που εξετάζεται είναι πολυλειτουργικό, δεδομένου ότι πέρα από τη διαχείριση των αποβλήτων ως κύρια υπηρεσία, περιλαμβάνει την παραγωγή προϊόντων (προϊόντα από την ανακύκλωση). Η πολυλειτουργικότητα στο πλαίσιο της παρούσας ΑΚΖ μοντελοποιείται με την επέκταση των ορίων του συστήματος προκειμένου να συμπεριληφθεί ο συμβατικός τρόπος για την παραγωγή αυτών των προϊόντων και να πιστωθεί το σύστημα με τις αποφευχθείσες εισροές και εκροές από την υποκατάσταση των αντίστοιχων συμβατικών προϊόντων.

Τα δεδομένα για τη σύσταση των αποβλήτων που εισέρχονται στο υπό εξέταση σύστημα είναι με βάση τα αποτελέσματα του συγχρηματοδοτούμενου Ευρωπαϊκού έργου LIFE "Επίδειξη της αποδοτικότητας των πόρων μέσω καινοτόμων, ολοκληρωμένων συστημάτων ανακύκλωσης απόβλητων για τις απομακρυσμένες περιοχές" με ακρωνύμιο «PAVEtheWAySTE» (Demonstrating resource efficiency through innovative, integrated waste recycling schemes for remote areas). Ειδικότερα, τα δεδομένα προέρχονται από τις μετρήσεις των χωριστά συλλεχθέντων ανακυκλώσιμων αποβλήτων (χαρτί, πλαστικό, γυαλί, μέταλλο) που εισήλθαν στο σύστημα των Πράσινων Περιπτέρων που εγκαταστάθηκε στις Τοπικές Κοινότητες Κουφονήσια, Ηρακλειά και Σχοινούσα του Δήμου Νάξου και Μικρών Κυκλάδων και λειτούργησε για 2 περίπου έτη (καλοκαίρι 2018-καλοκαίρι 2020).

Το σύστημα των Πράσινων Περιπτέρων επιλέχθηκε ως πηγή για τα δεδομένα εισερχόμενων αποβλήτων στο υπό εξέταση σύστημα συλλογής και επεξεργασίας 4 ρευμάτων ανακυκλώσιμων αποβλήτων, δεδομένου ότι δεν υπάρχει ακόμα σε λειτουργία σύστημα χωριστής συλλογής των ανακυκλώσιμων στην Ελλάδα, παρά μόνο το σύστημα σύμμεικτης συλλογής ανακυκλώσιμων (σύστημα μπλε κάδου). Επομένως, θεωρείται ότι τα δεδομένα αυτά προσεγγίζουν καλύτερα τα επίπεδα καθαρότητας και ανάκτησης ενός συστήματος χωριστής διαλογής σε σχέση με τα διαθέσιμα δεδομένα από την υφιστάμενη σύμμεικτη συλλογή των ανακυκλώσιμων.

Όσον αφορά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τις εισροές και εκροές στο υπό εξέταση σύστημα (π.χ. μείγμα ηλεκτρισμού, καύσιμα κίνησης, καύσιμα θέρμανσης) επιλέχθηκαν μέσοι όροι αγοράς σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, με έτος αναφοράς το τελευταίο διαθέσιμο από τη βάση δεδομένων ELCD. Για τη μοντελοποίηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το εξειδικευμένο λογισμικό ΑΚΖ για τη διαχείριση στερεών αποβλήτων, EASETECH, το οποίο παρουσιάζεται στην Ενότητα 8.2. Η μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων και οι σχετικές περιβαλλοντικές κατηγορίες επιπτώσεων που επιλέχθηκαν να εξεταστούν στην παρούσα ΑΚΖ είναι αυτές που προτείνονται από το ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b) και στην τελική επιλογή των μεθόδων που περιγράφονται στους Hauschild et al. (2012). Οι κατηγορίες των επιπτώσεων της μεθόδου ILCD, παρουσιάζονται στην Ενότητα 8.4

Στο πλαίσιο της λειτουργίας των Πράσινων περιπτέρων, τα προδιαλεγμένα υλικά που προσκόμιζαν οι πολίτες στα συστήματα εξετάζονταν από τον χειριστή ως προς την ποσότητα, την καθαρότητα και καταγράφονταν δεδομένα σχετικά με το είδος του υλικού, το βάρος και την ποιότητά του. Ο χειριστής καταχωρούσε ξεχωριστά τις προσμίξεις που αφαιρούσε από το εισερχόμενο ρεύμα ανακυκλώσιμων. Τα δεδομένα για τις προσμίξεις σχετίζονται με το επίπεδο καθαρότητας των ανακυκλώσιμων υλικών καθώς και το επίπεδο ανάκτησης.

Σύμφωνα με τη σχετική έκθεση του έργου LIFE PAVEtheWAySTE (2020), προκειμένου να καταστεί δυνατή η συσχέτιση της καθαρότητας με την ανάκτηση των υλικών, επιλέχθηκε μία θεωρητική-ποιοτική προσέγγιση. Αρχικά, η καθαρότητα εκφράσθηκε ποιοτικά με βάση τον χαρακτηρισμό της ποιότητας των εισερχόμενων υλικών ως Άριστη, Καλή, Μέτρια και Κακή και στη συνέχεια κάθε χαρακτηρισμός αντιστοιχήθηκε σε ένα ποσοστό, το οποίο αντιπροσωπεύει το μέρος του υλικού που

ανακτάται. Η κλίμακα καθαρότητας για την αξιολόγηση της ποιότητας των υλικών ήταν Κακή (50%), Μέτρια (70%), Καλή (85%) Και Άριστη (100%). Για την κατηγορία Χαρτόνι υπάρχει ξεχωριστή ταξινόμηση καθώς θεωρείται ότι, όσον αφορά το επίπεδο της καθαρότητας είναι Άριστης ποιότητας και έτσι αρκεί η καταχώρηση σύμφωνα με το μέγεθος. Αντίστοιχα, για να υπολογισθούν τα ποσοστά ανάκτησης των εισερχόμενων ανακυκλώσιμων υλικών που μπορούν επιτευχθούν, υπολογίζεται η ανάκτηση για κάθε υλικό ως το άθροισμα των ποσοτήτων ανά ποιοτική κατηγορία πολλαπλασιασμένες με έναν συντελεστή καθαρότητας, δια του συνόλου της ποσότητα του υλικού που συλλέχθηκε. Κατ' αυτόν τον τρόπο έστω ότι:

- x, ποσότητα Άριστης ποιότητας
- y, ποσότητα Καλής ποιότητας
- z, ποσότητα Μέτριας ποιότητας
- k, ποσότητα Κακής ποιότητας
- l, συνολική ποσότητα υλικού

$$Ανάκτηση = \frac{(x \cdot 1) + (y \cdot 0{,}85) + (z \cdot 0{,}7) + (k \cdot 0{,}5)}{l}\ x100\%$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συνολικές ποσότητες ανακυκλώσιμων υλικών που ανακτήθηκαν ανά ρεύμα υλικού, η σύσταση και το επίπεδο καθαρότητας τους.

Πίνακας 4: Ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα για την συνολική διάρκεια της μελετώμενης περιόδου για το σύνολο των Τοπικών Κοινοτήτων του Δήμου Νάξου και Μικρών Κυκλάδων

Υλικό	Συλλεχθείσα ποσότητα (kg)	Σύσταση	Καθαρότητα
Χαρτόνι	35551	62%	100,0%
Χαρτί	2503	4%	88,3%
Πλαστικό	7732	13%	88,2%
Γυαλί	9831	17%	92,6%
Μέταλλο	2034	4%	90,2%
Σύνολο	**57651**	**100%**	**96,3%**

Με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα από Κέντρα Διαλογής Ανακυκλώσιμων Υλικών (ΚΔΑΥ) στην Ελλάδα, η σύσταση αυτή των εισερχόμενων ρευμάτων προσομοιάζει τα αντίστοιχα δεδομένα από άλλα ΚΔΑΥ σε νησιά της Ελλάδας (π.χ. ΚΔΑΥ Θήρας, Μύκονου, Κώ), καθώς παρουσιάζει για παράδειγμα μεγαλύτερη συγκέντρωση σε απόβλητα γυαλιού σε σχέση με το μέσο όρο των ΚΔΑΥ της Ελλάδας.

Για την επιμέρους σύσταση ορισμένων ρευμάτων υλικών τα οποία ακολουθούν ξεχωριστή πορεία ανακύκλωσης (π.χ. μέταλλο: σιδηρούχα και μη σιδηρούχα μέταλλα, πλαστικό: PET, HDPE, PP), χρησιμοποιήθηκαν άλλες πηγές δεδομένων. Ειδικότερα, για το μέταλλο χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος της επιμέρους σύστασης των εν λόγω ρευμάτων από τα ΚΔΑΥ στις νησιωτικές περιοχές (23% μη σιδηρούχα μέταλλα, 77% σιδηρούχα μέταλλα). Για την επιμέρους σύσταση των πλαστικών, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από μετρήσεις που είχε στείλει το ΚΔΑΥ Νάξου για τα υλικά που είχαν σταλεί από τα Πράσινα Περίπτερα (70%PET-20%HDPE- 5%PP- 5% ανάμεικτα πλαστικά).

7.3 Ερευνητική ενότητα Β1: ΑΚΖ συστήματος βιοδιϋλιστηρίου και συμβατικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται έρευνα για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εφαρμογή σε πλήρη κλίμακα ενός εναλλακτικού συστήματος διαχείρισης των αστικών βιοαποβλήτων για την παραγωγή αιθανόλης το οποίο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου LIFE "Waste2bio - Ανάπτυξη και επίδειξη μιας καινοτόμου μεθόδου παραγωγής βιοαιθανόλης από απόβλητα" (LIFE11 ENV/GR/000949). Ο προσδιορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, με την οποία μελετήθηκε πλήθος εναλλακτικών συστημάτων παραγωγής αιθανόλης από βιοαπόβλητα, όσον αφορά τα πιθανά προϊόντα της διεργασίας, βασικές παραμέτρους λειτουργίας και μέρη του συστήματος.

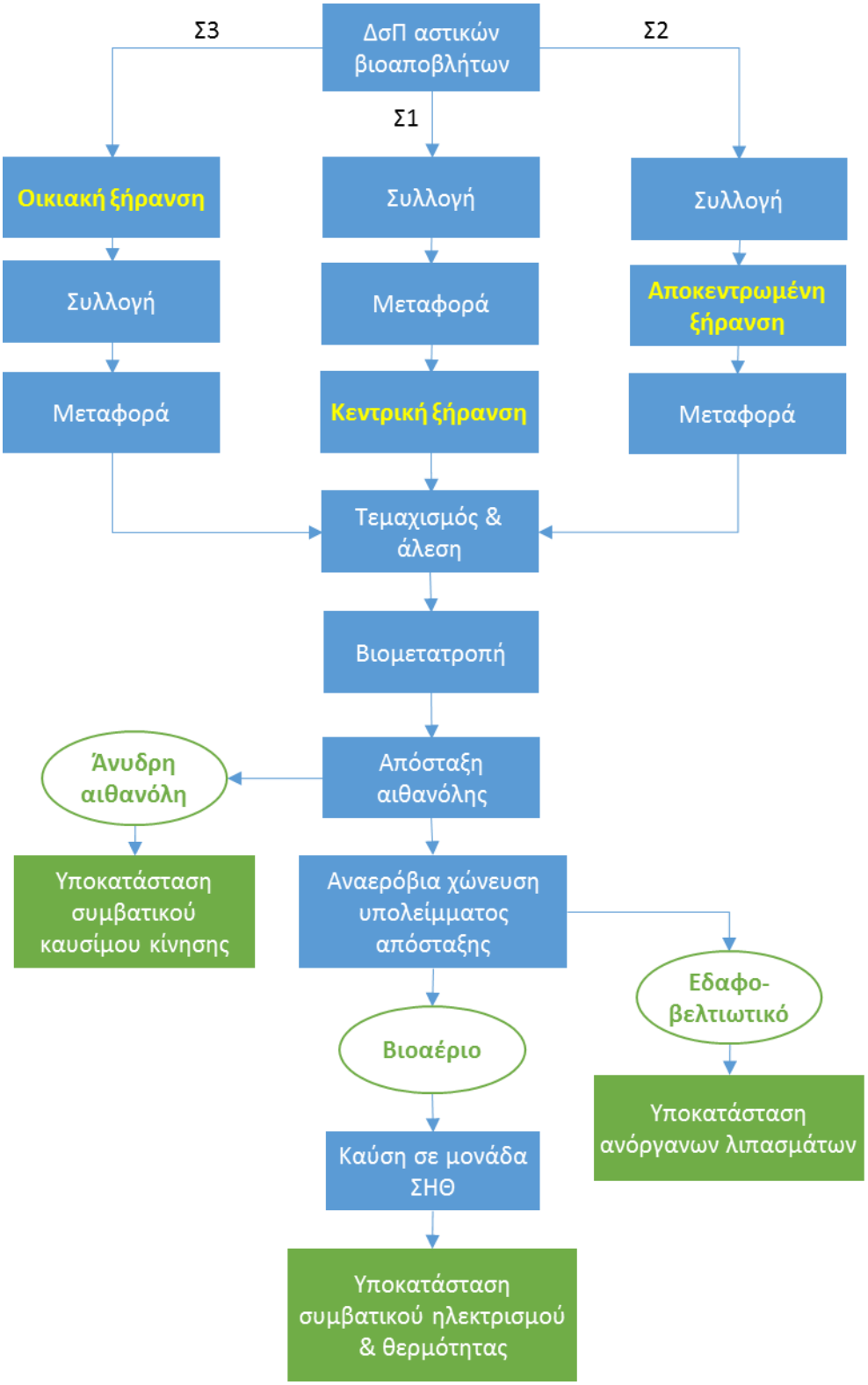
Το βασικό σύστημα παραγωγής αιθανόλής (Σ1) περιλαμβάνει τη μονάδα προετοιμασίας και ξήρανσης του αποβλήτου, τη μονάδα βιομετατροπής, τη μονάδα απόσταξης της αιθανόλης, τη μονάδα αναερόβιας χώνευσης του υπολείμματος της απόσταξης και τη μονάδα καύσης του βιοαερίου. Το σύστημα παραγωγής βιοαιθανόλης λειτουργεί στην ουσία ως βιοδιϋλιστήριο καθώς παράγει πέρα από τη βιοαιθανόλη, ενέργεια (ηλεκτρισμός, θερμότητα) από το βιοαέριο και εδαφοβελτιωτικό από την αξιοποίηση του χωνεύματος της αναερόβιας χώνευσης. Συγκεκριμένα, τρία επίπεδα ξήρανσης των βιοαποβλήτων εξετάστηκαν: α) ξήρανση σε κεντρικό επίπεδο, ήτοι στη μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης Σ1, β) αποκεντρωμένη ξήρανση σε επίπεδο δήμου ή δήμων Σ2 και γ) ξήρανση σε επίπεδο οικίας Σ3.

Το σύστημα παραγωγής αιθανόλης με την κεντρική ξήρανση των βιοαποβλήτων (Σ1) αποτελεί το βασικό σύστημα αναφοράς με το οποίο συγκρίνονται οι παραλλαγές του συστήματος. Οι παραλλαγές του συστήματος αφορούν την παραγωγή εναλλακτικών ή/και επιπρόσθετων προϊόντων, όπως η ζωοτροφή (Σ1Α), το μεθάνιο από το βιοαέριο για χρήση ως καύσιμο κίνησης (Σ1Β) και, η ένυδρη αιθανόλη για χρήση ως καύσιμο θέρμανσης (Σ1Γ). Επίσης, διεξάγεται ανάλυση ευαισθησίας για τη διερεύνηση της επίδρασης, θετικής ή αρνητικής, της μεταβολής ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων στην περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος. Ειδικότερα, στο πλαίσιο αυτό μελετάται (i) η χρήση βιοαποβλήτων από υπηρεσίες εστίασης ως υπόστρωμα για τη διεργασία βιομετατροπής (Σ1Δ), (ii) η μεταβολή της δοσολογίας των ενζύμων (Σ1Ε), (iii) ο διαχωρισμός του στερεού υπολείμματος της απόσταξης προκειμένου να οδηγηθεί σε μονάδα καύσης για την παραγωγή ενέργειας (Σ1Ζ), (iv) η καύση μέρους του ξηρού βιοαποβλήτου που παράγεται κατά την αποκεντρωμένη ξήρανση για την κάλυψη των αναγκών θερμότητας της μονάδας ξήρανσης (Σ2Α) και (v) η χρήση φωτοβολταϊκών για την τροφοδότηση με ηλεκτρισμό των οικιακών ξηραντήρων (Σ3Α).

Τέλος, η περιβαλλοντική απόδοση του βασικού συστήματος παραγωγής βιοαιθανόλης συγκρίνεται με τις υφιστάμενες μεθόδους διαχείρισης βιοαποβλήτων, όπως η ταφή (υφιστάμενη μέθοδος διαχείρισης σύμμεικτων αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα) – ΥΜ1, η κομποστοποίηση (υφιστάμενη μέθοδος διαχείρισης βιοαποβλήτων στην Ελλάδα)-ΥΜ2 αλλά και με άλλες μεθόδους που εφαρμόζονται εκτός Ελλάδας, όπως η αναερόβια χώνευση - ΥΜ3 και η καύση – ΥΜ4.

Λειτουργική μονάδα του συστήματος αποτελεί η διαχείριση ενός τόνου νωπών αστικών βιοαποβλήτων, επομένως όλες οι εισροές και εκροές του συστήματος ορίζονται με βάση τη μονάδα αυτή. Δεδομένου ότι το σύστημα παραγωγής αιθανόλης είναι πολυλειτουργικό, καθώς περιλαμβάνει την παραγωγή περισσοτέρων του ενός προϊόντων και υπηρεσιών (π.χ. διαχείριση αποβλήτων, παραγωγή αιθανόλης, ενέργειας και εδαφοβελτιωτικού), ακολουθείται η ιεραρχία λύσεων που προβλέπεται από το ISO 14044 για τον ορθό υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην περίπτωση της πολυλειτουργικότητας. Σύμφωνα με την ιεραρχία αυτή, η ορθότερη διαχείριση των πολυλειτουργικών διεργασιών, εφόσον δεν είναι δυνατή η υποδιαίρεσή τους σε ξεχωριστές διεργασίες οι οποίες παράγουν το κάθε προϊόν/υπηρεσία, επιτυγχάνεται με την «επέκταση του συστήματος». Ειδικότερα, τα όρια του

συστήματος επεκτείνονται προκειμένου να συμπεριληφθεί ο επικρατέστερος συμβατικός τρόπος παραγωγής του προϊόντος, ενώ το σύστημα πιστώνεται με τις εισροές και εκροές οι οποίες αποφεύγονται όταν το προϊόν του συστήματος υποκαθιστά τον συμβατικό τρόπο παραγωγής του προϊόντος αυτού. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της παραγωγής και χρήσης ενός κιλού εδαφοβελτιωτικού (οργανικού λιπάσματος), αφαιρούνται οι σχετικές εισροές και εκπομπές από την παραγωγή και χρήση αντίστοιχης ποσότητας ανόργανου λιπάσματος. Στο Σχήμα 47 απεικονίζονται τα όρια του συστήματος παραγωγής αιθανόλης που λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα ΑΚΖ για τα τρία διαφορετικά επίπεδα ξήρανσης, στα οποία περιλαμβάνονται και οι διεργασίες υποκατάστασης των συμβατικών προϊόντων από τα βιοπροϊόντα του εξεταζόμενου συστήματος (βλ. πράσινα κουτιά).



Σχήμα 47: Όρια συστήματος παραγωγής βιοαιθανόλης από αστικά βιοαπόβλητα για τα τρία επίπεδα ξήρανσης (Σ1-Σ3)

Το πλαίσιο μοντελοποίησης ΑΚΖ που κρίθηκε καταλληλότερο για την παρούσα μελέτη είναι το «χαρακτηριστικό» (attributional). Σύμφωνα με το πλαίσιο αυτό, όσον αφορά το βασικό σύστημα μελέτης – *foreground system* (ξήρανση, βιομετατροπή, αναερόβια χώνευση) χρησιμοποιούνται πραγματικά δεδομένα για την ποσότητα των εισροών και εκροών του πιλοτικού συστήματος παραγωγής αιθανόλης Waste2Bio, ενώ για το υποστηρικτικό σύστημα – *background system* (παροχή

ενέργειας, απόσταξη, καύση βιοαερίου, χρήση εδαφοβελτιωτικού) χρησιμοποιούνται μέσοι όροι της αγοράς ή/και βιβλιογραφικά δεδομένα των επικρατέστερων τεχνολογιών και πρακτικών.

Ειδικότερα, για την ικανοποίηση των αναγκών του συστήματος σε ηλεκτρισμό χρησιμοποιήθηκε ως πηγή ηλεκτρισμού το μίγμα καυσίμων που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του ηλεκτρισμού που παρέχεται στην αγορά από το δίκτυο, ενώ για τις ανάγκες του συστήματος σε θερμότητα χρησιμοποιήθηκε ως πηγή το φυσικό αέριο. Σημειώνεται ότι για την καταναλισκόμενη ενέργεια στο βασικό σύστημα χρησιμοποιούνται οι εκτιμώμενες ποσότητες κατανάλωσης σε μια αντίστοιχη μονάδα πλήρους κλίμακας, λαμβάνοντας υπόψη την εφαρμογή μέσων και πρακτικών (π.χ. μόνωση, αξιοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας) για την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης. Όσον αφορά την ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας η οποία χρησιμοποιείται για ιδιοκατανάλωση εντός του συστήματος παραγωγής αιθανόλης, αυτή θεωρείται ότι υποκαθιστά την ίδια πηγή ενέργειας με αυτή που χρησιμοποιείται στο σύστημα, προκειμένου το ισοζύγιο να είναι ουδέτερο.

Για την περίπτωση της παρούσας ερευνητικής ενότητας χρησιμοποιήθηκε το εξειδικευμένο λογισμικό AKZ για τη μοντελοποίηση συστημάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων, EASETECH (βλ. Ενότητα 8.2). Ως βάση δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η Ecoinvent 3.3, η οποία περιλαμβάνει μια ευρεία γκάμα δεδομένων τόσο σε Ευρωπαϊκό επίπεδο (μέσοι όροι) όσο και σε εθνικό επίπεδο (Ελλάδα), τα οποία και χρησιμοποιήθηκαν όπου ήταν δυνατό. Περισσότερα για τη βάση δεδομένων αυτή δίνονται στην Ενότητα 8.3.

Η μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων και οι σχετικές περιβαλλοντικές κατηγορίες επιπτώσεων που επιλέχθηκαν να εξεταστούν στην παρούσα AKZ είναι αυτές που προτείνονται από το ILCD Handbook (EC-JRC, 2010b) και στην τελική επιλογή των μεθόδων που περιγράφονται στους Hauschild et al. (2012). Επιπρόσθετα, λαμβάνεται υπόψη και η κατηγορία Εξάντληση Αβιοτικών Πόρων από τη μέθοδο CML. Οι μονάδες κανονικοποίησης που χρησιμοποιούνται είναι από το πρόγραμμα Prosuite, το οποίο αναπτύχθηκε ειδικά για τη μέθοδο ILCD (Laurent et al., 2013) και παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 5: Κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και μονάδες χαρακτηρισμού και κανονικοποίησης (Laurent et al., 2013)

Κατηγορία επίπτωσης	**Μέθοδος**	**Συντομογραφία**	**Αναφορά κανονικοποίησης**	**Μονάδα χαρακτηρισμού**
Climate Change	IPCC 2007	GWP100	8096	kg CO_2-eq./PE/year
Stratospheric Ozone Depletion	WMO 1999	ODP	$4.14*10^{-2}$	kg CFC11-eq./PE/year
Human Toxicity, Cancer Effect[1]	USEtox	HT-C	$5.42*10^{-5}$	CTUh /PE/year
Human Toxicity, non-Cancer Effect[1]	USEtox	HT-NC	$1.10*10^{-3}$	CTUh/PE/year
Particulate Matter	Humbert	PM	2.76	kg PM 2.5/PE/year
Ionizing Radiation, Human Health	Dreicer		$1.33*10^{3}$	kBq U-235 air-eq/person
Photochemical Ozone Formation	ReCiPe midpoint		56.7	kg-NMVOCeq/person
Terrestrial Acidification	Accumulated Exceedance	AP	49.6	AE/PE/year
Terrestrial Eutrophication	Accumulated Exceedance	TEP	115	AE/PE/year

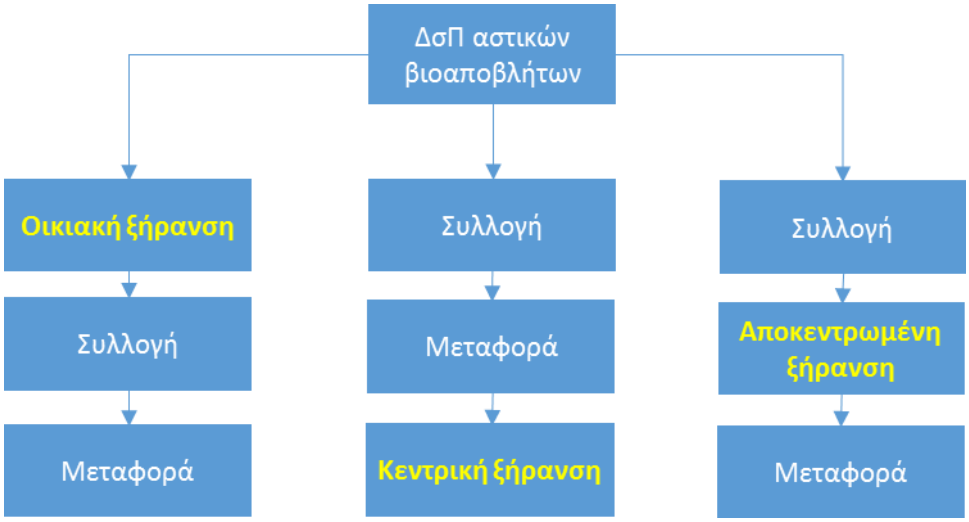
Κατηγορία επίπτωσης	Μέθοδος	Συντομογραφία	Αναφορά κανονικοποίησης	Μονάδα χαρακτηρισμού
Freshwater Eutrophication	ReCiPe midpoint	FEP	0.62	kg P-eq./PE/year
Marine Eutrophication	ReCiPe midpoint	FEP	9.38	kg N-eq./PE/year
Freshwater Ecotoxicity[2]	USEtox	ET	665	CTUe/PE/year
Depletion of Abiotic Resources-Fossil (Reserve base)	CML	ADP-F	$6.24*10^4$	MJ/PE/year
Depletion of Abiotic Resources-Elements (Reserve base)	CML	ADP-E	$3.43*10^{-2}$	kg Sb-eq./PE/year
[1] CTU_h comparative toxic unit for humans. [2] CTU_e - comparative toxic unit for ecosystem.				

7.4 Ερευνητική ενότητα Β2: Αξιολόγηση οικονομικής βιωσιμότητας συστήματος βιοδιϋλιστηρίου

Στο πλαίσιο της ενότητας αυτής γίνεται αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας της εφαρμογής του συστήματος βιοδιϋλιστηρίου σε πλήρη κλίμακα. Η οικονομική βιωσιμότητα αξιολογείται με τη μέθοδο της χρηματοοικονομικής ανάλυσης και τη χρήση οικονομικών δεικτών οι οποίοι υπολογίζονται επί των χρηματικών ροών της επένδυσης για το εν λόγω σύστημα, όπως η Καθαρά Παρούσα Αξία, ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης και η Περίοδος Αποπληρωμής.

Ειδικότερα, διεξάγεται λεπτομερής ανάλυση του συστήματος βιοδιϋλιστηρίου για τα τρία διαφορετικά σενάρια όσον αφορά τη ξήρανση, ήτοι (i) ξήρανση σε οικιακό επίπεδο, (ii) ξήρανση σε επίπεδο δήμων και (iii) ξήρανση σε επίπεδο κεντρικής μονάδας. Επίσης για κάθε σενάριο εξετάζονται διαφορετικά υποσενάρια ανά περίπτωση όσον αφορά το κόστος ή/και τη δοσολογία των ενζύμων, την τιμή πώλησης της βιοαιθανόλης, το ύψος δανειοδότησης και τη διάρκεια του δανείου.

Στην πρώτη περίπτωση, η ξήρανση γίνεται στα σπίτια τα οποία έχουν προμηθευτεί οικιακούς ξηραντήρες και στη συνέχεια τα ξηρά βιοαπόβλητα (ΒΑΑ) συλλέγονται και μεταφέρονται στη μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης. Στην δεύτερη περίπτωση, τα νωπά ΒΑΑ συλλέγονται και οδηγούνται σε μονάδες ξήρανσης στους δήμους όπου ξηραίνονται και στη συνέχεια οδηγούνται στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης. Τέλος, στην τρίτη περίπτωση, τα νωπά ΒΑΑ συλλέγονται και οδηγούνται κατευθείαν στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης όπου και ξηραίνονται προτού εισέλθουν στη διεργασία. Στην περίπτωση της οικιακής και της αποκεντρωμένης ξήρανσης υπάρχει και εξοικονόμηση στα έξοδα για τη συλλογή και μεταφορά των ΒΑΑ, τα οποία μειώνονται λόγω της μείωσης της μάζας των ΒΑΑ. Στο Σχήμα 48 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής για τα τρία διαφορετικά επίπεδα ξήρανσης.



Σχήμα 48: Διάγραμμα ροής για τα τρία επίπεδα ξήρανσης (οικιακή, αποκεντρωμένη, κεντρική)

Η χρηματοοικονομική ανάλυση αποσκοπεί στον υπολογισμό των ταμειακών ροών που προκύπτουν από την υλοποίηση του επενδυτικού σχεδίου. Η ταμειακές ροές ορίζονται σε ετήσια βάση από τη διαφορά των ταμειακών εισροών μείον τις ταμειακές εκροές. Για τη χρηματοοικονομική αξιολόγηση της επένδυσης δημιουργείται πίνακας των ετήσιων ταμειακών ροών για όλη τη διάρκεια ζωής της επένδυσης. Τα μεγέθη που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό των ταμειακών ροών είναι το συνολικό κεφάλαιο της επένδυσης (κεφαλαιουχικό κόστος), οι ετήσιες δαπάνες (σταθερά και μεταβλητά λειτουργικά κόστη, τόκοι, χρεολύσια, φόρος εισοδήματος), τα ετήσια έσοδα και οι ετήσιες αποσβέσεις.

Η ταμειακή ροή της επένδυσης ορίζεται ως το αλγεβρικό άθροισμα των ταμειακών ροών όλων των ετών ζωής της επένδυσης. Δεδομένου ότι οι χρηματικές ροές πραγματοποιούνται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές είναι απαραίτητο να γίνει πρώτα η αναγωγή τους στο παρόν. Το ετήσιο κεφαλαιουχικό κόστος υπολογίζεται από το κόστος της επένδυσης για το βασικό εξοπλισμό της επένδυσης καθώς και για τον περιφερειακό εξοπλισμό που είναι απαραίτητος για τη λειτουργία της μονάδας, ανηγμένο στην ετήσια παραγωγή. Το ετήσιο λειτουργικό κόστος καλύπτει τόσο τις δαπάνες προσωπικού, συντήρησης και άλλες έμμεσες δαπάνες (σταθερά λειτουργικά κόστη) όσο και τις δαπάνες για την προμήθεια των πρώτων υλών της παραγωγικής διαδικασίας και άλλες σχετικές δαπάνες που μεταβάλλονται ανάλογα με τον όγκο της παραγωγής (μεταβλητά λειτουργικά κόστη. Τα ετήσια έσοδα υπολογίζονται από το γινόμενο της τιμής πώλησης των προϊόντων επί της αντίστοιχης ετήσιας παραγωγής.

Οι αποσβέσεις είναι η λογιστική αποτύπωση της μείωσης της αξίας των παγίων στοιχείων μιας επένδυσης, λόγω φυσικής φθοράς ή λόγω τεχνολογικής απαξίωσης. Για τον υπολογισμό των αποσβέσεων αφαιρείται σε ετήσια βάση ένα ποσό από τα μεικτά κέρδη, μέχρις ότου το άθροισμα των ετήσιων αποσβέσεων γίνει ίσο με την αξία αγοράς των παγίων στοιχείων.

Οι τόκοι αναφέρονται στο κόστος του δανειακού κεφαλαίου για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο και υπολογίζονται με βάση το ύψος του δανείου, το επιτόκιο δανεισμού και τη διάρκεια του δανείου. Τα χρεολύσια αναφέρονται στην ετήσια δόση αποπληρωμής του κεφαλαίου. Οι φόροι υπολογίζονται επί του φορολογητέου εισοδήματος, ενώ αν υπάρχει ζημιά οι φόροι αυτοί είναι μηδενικοί.

Τα δύο βασικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της επένδυσης στην παρούσα μελέτη είναι η Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value) και ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return). Η περίοδος αποπληρωμής (Payback Period) του αρχικού κεφαλαίου επένδυσης αποτελεί συμπληρωματικό κριτήριο αξιολόγησης.

Η Καθαρά Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) ορίζεται ως η διαφορά του αθροίσματος των ετήσιων καθαρών ταμειακών ροών μετά φόρων μείον το κόστος της αρχικής επένδυσης, σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$KΠA = \sum_{\tau=1}^{\nu} \frac{KTP_\tau}{(1+\varepsilon)^\tau} - E_0$$

Όπου:

ΚΠΑ: η Καθαρά Παρούσα Αξία της επένδυσης

KTP_τ : η Καθαρή Ταμειακή Ροή το έτος τ

E_o : η αρχική επένδυση το χρόνο τ=ο

ν : η διάρκεια ζωής της επένδυσης

ε : το επιτόκιο προεξόφλησης

Ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (ΕΒΑ) ορίζεται ως το επιτόκιο προεξόφλησης που μηδενίζει την καθαρά παρούσα αξία, είναι δηλαδή εκείνο το επιτόκιο προεξόφλησης που εξισώνει την αρχική επένδυση με την αξία όλων των μελλοντικών ταμειακών ροών. Το επιτόκιο προεξόφλησης εξαρτάται από το κόστος του κεφαλαίου και είναι συνάρτηση του σχήματος της χρηματοδότησης και του κινδύνου που ενέχει η συγκεκριμένη επένδυση. Ο ΕΒΑ ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$KΠA = 0 = \sum_{\tau=1}^{\nu} \frac{KTP_\tau}{(1+EBA)^\tau} - E_0$$

Η περίοδος αποπληρωμής αφορά τον αριθμό των ετών που απαιτούνται για την αποπληρωμή της αρχικής επένδυσης, δηλαδή την περίοδο που απαιτείται προκειμένου το άθροισμα των καθαρών ταμειακών ροών να εξισωθεί με το ποσό της αρχικής επένδυσης.

Προκειμένου να κριθεί οικονομικά βιώσιμη μια επένδυση, εξετάζεται αν πληρούνται οι κάτωθι όροι:

- ✓ ΚΠΑ > ο
- ✓ ΕΒΑ > ε

Όταν πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ δύο ή περισσότερων εναλλακτικών επενδύσεων οι οποίες πληρούν τα ανωτέρω κριτήρια, προκρίνεται η επένδυση που εμφανίζει την υψηλότερη ΚΠΑ ή τον υψηλότερο ΕΒΑ. Αν και τα δύο κριτήρια είναι ίσα, τότε προκρίνεται η επένδυση με την μικρότερη περίοδο αποπληρωμής.

7.5 Ερευνητική ενότητα Β3: Πολυκριτηριακή αξιολόγηση βιωσιμότητας συστήματος βιοδιϋλιστηρίου και συμβατικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η μεθολογία της πολυκριτηριακής ανάλυσης (Multicriteria Analysis, MCA) που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκριτική αξιολόγηση της συνολικής βιωσιμότητας των

υφιστάμενων μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων με το εναλλακτικό σύστημα διαχείρισης βιοαποβλήτων για την παραγωγή αιθανόλης και άλλων προϊόντων. Οι μέθοδοι που επιλέχθηκαν για τη συγκριτική αξιολόγηση περιλαμβάνουν αυτές που εφαρμόζονται σε πλήρη κλίμακα στην Ελλάδα αλλά και παγκοσμίως τόσο για την επεξεργασία των προδιαλεγμένων, ήτοι η κομποστοποίηση και η αναερόβια χώνευση, όσο και τις μεθόδους για τη διαχείριση των μη προδιαλεγμένων βιοαποβλήτων, όπως η ταφή και η καύση.

Η αξιολόγηση γίνεται υπό ένα ευρύτερο πρίσμα το οποίο ενσωματώνει τους τρεις βασικούς άξονες της αειφορίας, ήτοι το περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.

Σχήμα 49: Άξονες αειφορίας

Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε ένας αριθμός περιβαλλοντικών, οικονομικών και κοινωνικών κριτηρίων τα οποία κρίθηκαν κατάλληλα για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας των εναλλακτικών συστημάτων διαχείρισης βιοαποβλήτων. Για τη συνολική αξιολόγηση των κριτηρίων αυτών, χρησιμοποιείται η μέθοδος της πολυκριτηριακής ανάλυσης και ειδικότερα το εργαλείο πολυκριτηριακής ανάλυσης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου LIFE Waste2Bio.

Δεδομένου ότι οι αρχικές μονάδες βαθμολόγησης διαφέρουν για τα περισσότερα κριτήρια με αποτέλεσμα να μην είναι συγκρίσιμες οι βαθμολογίες μεταξύ των κριτηρίων, έγινε κανονικοποίηση όλων των τιμών σε μια κλίμακα 0-100, όπου το 0 αντιπροσωπεύει την λιγότερο ελκυστική επιλογή και το 100 την πιο ελκυστική επιλογή. Η μέθοδος κανονικοποίησης που επιλέχθηκε είναι η min-max (OECD, 2008), με βάση την οποία αφαιρείται από την εκάστοτε τιμή η ελάχιστη τιμή και διαιρείται με το εύρος των τιμών της αρχικής κλίμακας, με αποτέλεσμα οι τιμές να κανονικοποιούνται στην κλίμακα 0-1. Στη συνέχεια η τιμή αυτή πολλαπλασιάζεται με το εύρος της νέας κλίμακας (100) προκειμένου να προσαρμοστούν οι τιμές στην κλίμακα αυτή. Η συνολική εξίσωση για την προσαρμογή σε οποιαδήποτε νέα κλίμακα τιμών δίνεται ακολούθως.

$$v' = \frac{v - min_F}{max_F - min_F}(new_max_F - new_min_F) + new_min_F$$

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή βαρυτήτων στα κριτήρια και τον υπολογισμό της συνολικής βαθμολογίας για μια μέθοδο A_i, είναι το μοντέλο του Σταθμισμένου Αθροίσματος (Weighted Sum Model) το οποίο ορίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$A_i = \sum_{j=1}^{n} w_j a_{ij}$$

Όπου W_j συμβολίζει τη βαρύτητα του κριτηρίου C_i και a_{ij} είναι η βαθμολόγηση της εναλλακτικής A_i για το κριτήριο C_j.

7.5.1 Κριτήρια αξιολόγησης

Τα περιβαλλοντικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την εν λόγω πολυκριτηριακή αξιολόγηση προέκυψαν από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για τα διαφορετικά συστήματα διαχείρισης βιοαποβλήτων. Από τις κατηγορίες επιπτώσεων που αξιολογήθηκαν με την ΑΚΖ επιλέχθηκαν οι κατηγορίες της κλιματικής αλλαγής, της οικοτοξικότητας και της εξάντλησης των αβιοτικών ορυκτών πόρων, οι οποίες και παρουσιάσαν τις υψηλότερες (θετικές ή αρνητικές) κανονικοποιημένες επιπτώσεις για την πλειοψηφία των εξεταζόμενων συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων. Δεν επιλέχθησαν περισσότερες κατηγορίες γιατί έτσι θα υποβαθμιζόταν η συνεισφορά των κατηγοριών που εμφανίζουν υψηλές επιπτώσεις. Το ορθότερο σε αυτή την περίπτωση θα ήταν να εφαρμοζόντουσαν βαρύτητες στην κάθε κατηγορία επίπτωσης, το οποίο όμως δεν έγινε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής καθώς αυτό αποτελεί ένα θέμα υποκειμενικό, το οποίο είναι καλύτερο να κάνουν οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων.

Η βαθμολόγηση του οικονομικού κριτηρίου γίνεται με τη χρήση βασικών οικονομικών μεγεθών, όπως κεφαλαιουχικό κόστος (CAPEX), λειτουργικό κόστος (OPEX) και έσοδα/τέλη διαχείρισης. Τα τρία αυτά μεγέθη χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή χρηματοοικονομικής ανάλυσης και τον προσδιορισμό του ελάχιστου κόστους που καλείται να πληρώσει ένας δήμος για τη διαχείριση των βιοαποβλήτων με τις υπό εξέταση μεθόδους. Τα οικονομικά μεγέθη για την περίπτωση του συστήματος βιοδιϋλιστηρίου, για την κεντρική, την αποκεντρωμένη και την οικιακή ξήρανση, αντλήθηκαν από την παρούσα μελέτη (ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12). Για την περίπτωση των υπολοίπων μεθόδων για το CAPEX και το OPEX χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για την Ελλάδα από τη μελέτη των ARCADIS/Eunomia (2009). Για τις μεθόδους διαχείρισης που δεν έχουν εφαρμογή στην Ελλάδα (π.χ. καύση, αναερόβια χώνευση), η μελέτη των ARCADIS/Eunomia (2009) χρησιμοποιεί συνδυαστικά μέσους όρους της Ευρώπης (π.χ. για το κόστος κατασκευής) και δεδομένα για την Ελλάδα (π.χ. μισθοί).

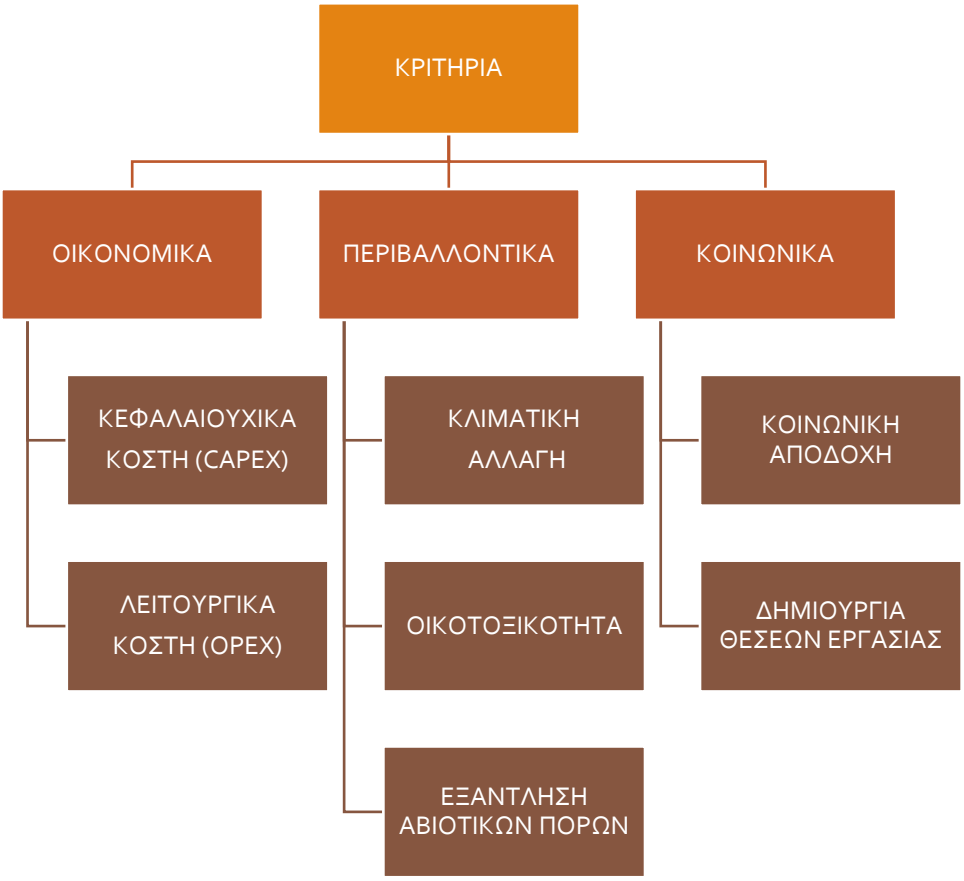
Προκειμένου τα ετήσια κεφαλαιουχικά κόστη για τις διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης των βιοαποβλήτων να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους υπολογίστηκαν από την αρχή με βάση την [Εξίσωση 12-2 και τα στοιχεία που δίνονται στην έκθεση ARCADIS/Eunomia (2009), ήτοι αρχικό κόστος επένδυσης, διάρκεια ζωής της επένδυσης και επιτόκιο προεξόφλησης σύμφωνα με το ιδιωτικό μέτρο κόστους (private cost metric) που προτείνεται στην έκθεση (Πίνακας 91). Για την περίπτωση του συστήματος βιοδιϋλιστηρίου, το οποίο δεν περιλαμβάνεται στις εξεταζόμενες μεθόδους διαχείρισης ΒΑΑ της έκθεσης, χρησιμοποιήθηκε διάρκεια ζωής επένδυσης και επιτόκιο προεξόφλησης ίδιο με αυτό της μεθόδου της καύσης, πάλι για λόγους συγκρισιμότητας.

Τα κοινωνικά οφέλη από ένα σύστημα διαχείρισης αποβλήτων μπορεί να έγκεινται στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, στα μειωμένα τέλη καθαριότητας του δήμου, στη μείωση της οπτικής όχλησης και των οσμών και γενικότερα στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των δημοτών. Δεδομένου ότι τα περισσότερα από τα οφέλη αυτά δεν είναι εύκολο να αποτιμηθούν, στην παρούσα ανάλυση γίνεται αποτίμηση του κοινωνικού οφέλους από τη δημιουργία θέσεων εργασίας ενώ για τα υπόλοιπα οφέλη, χρησιμοποιήθηκε ένα ευρύτερο κριτήριο, αυτό της κοινωνικής αποδοχής.

Η βαθμολόγηση του κριτηρίου «Δημιουργία θέσεων εργασίας» έγινε με βάση το ποσοστό του κόστους εργασίας στα κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη, το οποίο δίνεται στην έκθεση ARCADIS/Eunomia (2009) ενώ για το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου υπολογίζεται με αντίστοιχο τρόπο από τα δεδομένα της

παρούσας μελέτης. Η βαθμολόγηση του κριτηρίου «Κοινωνική αποδοχή» προέκυψε έπειτα από έρευνα που διεξήχθη με χρήση ερωτηματολογίων.

Οι ομάδες κριτηριών και τα κριτήρια τα οποία περιλαμβάνει η καθεμία από τις ομάδες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 50: Κριτήρια πολυκριτηριακής αξιολόγησης μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Μεθοδολογικά εργαλεία

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα μεθοδολογικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της έρευνας αυτής, όπως το IPCC waste model που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των εκπομπών ΑΦΘ από την ταφή των αποβλήτων, το εξειδικευμένο μοντέλο AKZ για τη διαχείριση αποβλήτων EASETECH, η βάση δεδομένων Ecoinvent και οι κατηγορίες Εκτίμησης Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής της μεθόδου ILCD.

8.1 IPCC waste model

Για την εκτίμηση των εκπομπών ΑΦΘ από τη μέθοδο της ταφής χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο IPCC Waste Model (excel) το οποίο εφαρμόζει τη μέθοδο *First Order Decay (FOD)* του IPCC. Βασικές παράμετροι για την εκτίμηση των εκπομπών, για τη συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι η ετήσια παραγωγή και η σύσταση των αποβλήτων που οδηγούνται σε ταφή. Η σύσταση των αποβλήτων επηρεάζει τις εκπομπές ΑΦΘ, καθώς διαφορετικά είδη αποβλήτων περιέχουν διαφορετικά ποσά βιοδιασπώμενου οργανικού άνθρακα (DOC) και ορυκτού άνθρακα. Από το μοντέλο δίνονται προκαθορισμένες τιμές για απόβλητα κουζίνας, απόβλητα κήπων, χαρτί κ.α.

Βασική εισαγωγή στο μοντέλο του IPCC είναι η ποσότητα οργανικού υλικού που περιέχεται στα απόβλητα που οδηγούνται προς διάθεση. Αυτό υπολογίζεται με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες ως προς το ποσοστό κάθε κατηγορίας αποβλήτου που οδηγείται προς διάθεση καθώς και το είδος των αποβλήτων (φαγητό, χαρτί, ξύλο κτλ.).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες από το περιβάλλον εργασίας του εν λόγω μοντέλου.

Parameters

Country: GREECE

Region: Europe: Southern

Please enter parameters in the yellow cells. f no national data are available, copy the IPCC default value.
Help on parameter selection can be found in the 2006 IPCC guidelines

	IPCC default value		Country-specific parameters	
			Value	Reference and remarks
Starting year		1950	1950	
DOC (Degradable organic carbon)	Waste by composition			
(weight fraction, wet basis)	Range	Default		
Food waste	0.08-0.20	0.15	0.15	
Garden	0.18-0.22	0.2	0.2	
Paper	0.36-0.45	0.4	0.4	
Wood and straw	0.39-0.46	0.43	0.43	
Textiles	0.20-0.40	0.24	0.24	
Disposable nappies	0.18-0.32	0.24	0.24	
Sewage sludge	0.04-0.05	0.05	0.05	
Industrial waste	0-0.54	0.15	0.15	
DOCf (fraction of DOC dissimilated)		0.5	0.6	
Methane generation rate constant (k)	Dry temperate			

MSW activity data

Enter population, waste per capita and MSW waste composition into the yellow cells.
Help and default regional values are given in the 2006 IPCC Guidelines.
Industrial waste activity data must be entered separately starting in Column Q.
IPCC Regional defaults

		520		85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
					Composition of waste going to solid waste disposal sites							
Year	Population	Waste per capita	Total MSW	% to SWDS	Food	Garden	Paper	Wood	Textile	Nappies	Plastics, other inert	Total
	millions	kg/cap/yr	Gg	%	%	%	%	%	%	%	%	(=100%)
1983	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
1984	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
1985	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
1986	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
1987	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
1988	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
1989	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
1990	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
1991	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
1992	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
1993	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%
1994	10	520	5200	85%	37%	0%	17%	11%	0%	0%	36%	100%

Methane Recovery and methane oxidised in top layer (OX)

Enter the total amount of methane recovered
from all SWDS.

	Amount of Methane Recovered from SWDS	References / remarks	Fraction recovered methane	Methane oxidised (OX)
IPCC default	0			0
Year	Gg			Fraction
1950	0.0		0.00	0.10
1951	0.0		0.00	0.10
1952	0.0		0.00	0.10
1953	0.0		0.00	0.10
1954	0.0		0.00	0.10
1955	0.0		0.00	0.10
1956	0.0		0.00	0.10
1957	0.0		0.00	0.10

Results

Country
GREECE

Enter starting year, industrial waste disposal data and methane recovery into the yellow cells.
MSW activity data is entered on MSW sheet

	Methane generated											
Year	Food	Garden	Paper	Wood	Textile	Nappies	Sludge	MSW	Industrial	Total	Methane recovery	Methane emission
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M = (K-L)*(1-OX)
	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg
1950	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
1951	4	0	3	1	0	0	0		1	10	0	9
1952	8	0	7	2	0	0	0		2	19	0	17
1953	11	0	10	3	0	0	0		3	27	0	25
1954	15	0	13	4	0	0	0		4	36	0	32
1955	18	0	15	5	0	0	0		5	43	0	39
1956	21	0	18	6	0	0	0		6	51	0	46
1957	24	0	21	7	0	0	0		6	58	0	52
1958	26	0	23	8	0	0	0		7	65	0	58

Country	GREECE

Long-term stored C in SWDS

In this sheet carbon long-term stored C in SWDS is calculated.

DOC:					
MSW	0	Food wast	0.15	Nappies	0.24
Paper	0.4	Garden	0.2	Sludge	0.05
Wood	0.43	Textiles	0.24	Industry	0.15

Year	MSW	Food	Garden	Paper	Wood	Textiles	Nappies	Sludge	C, Industry	Paper, industry subtotal	Wood, industry subtotal	Long-term stored C	Long-term stored C accumulated
	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg	Gg
1950	0	69	0	85	57	0	0	0	21	0	0	232	232
1951	0	69	0	85	57	0	0	0	21	0	0	232	464
1952	0	69	0	85	57	0	0	0	21	0	0	232	696
1953	0	69	0	85	57	0	0	0	21	0	0	232	928
1954	0	69	0	85	57	0	0	0	21	0	0	232	1,160
1955	0	69	0	85	57	0	0	0	21	0	0	232	1,392
1956	0	69	0	85	57	0	0	0	21	0	0	232	1,624
1957	0	69	0	85	57	0	0	0	21	0	0	232	1,856
1958	0	69	0	85	57	0	0	0	21	0	0	232	2,088

Εικόνα 1: Φύλλα εργασίας του IPCC waste model

8.2 Μοντέλο EASETECH

Στην ενότητα αυτή κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί σε μεγαλύτερη ανάλυση το μοντέλο EASETECH με βάση τους Clavreul et al. (2014), καθώς αποτελεί το μοντέλο AKZ που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή.

Με το μοντέλο EASETECH η ροή αναφοράς δεν ορίζεται σαν ένα μοναδικό υλικό αλλά ως σύνθεση ενός αριθμού διαφορετικών κλασμάτων αποβλήτων, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα να παρακολουθείται η διαδρομή και το ισοζύγιο μάζας τους καθενός από αυτά μέσα στο σύστημα. Στο μοντέλο αυτό επομένως δίνεται έμφαση στον εντοπισμό των ουσιών των διαφορετικών κλασμάτων των ροών υλικών, από την παραγωγή τους έως την τελική απελευθέρωσή τους στο περιβάλλον. Οι ροές αποτελούνται από ένα πίνακα ιδιοτήτων υλικών που έχουν οριστεί για ένα μεγάλο αριθμό κλασμάτων υλικών, ο οποίος είναι διαθέσιμος για κάθε εισροή και εκροή από μια διεργασία. Αυτό επιτρέπει στο χρήστη να εντοπίσει τις διαφορετικές ροές ουσιών μέσα σε ολόκληρο το σύστημα, αλλά επίσης και να δημιουργήσει διαγράμματα Sankey για την ανάλυση της ροής των υλικών και να συσχετίσει τις εκπομπές με τις διαφορετικές ροές υλικών.

Η μοντελοποίηση των διαφορετικών τεχνολογιών στο μοντέλο EASETECH βασίζεται στη χρήση μιας εργαλειοθήκης πρότυπων διεργασιών υλικών. Οι διεργασίες που διαχειρίζονται ροές στο μοντέλο ονομάζονται διεργασίες υλικών. Η εργαλειοθήκη διαθέτει ένα σύνολο από γενικές διεργασίες για τη δημιουργία, την τροποποίηση και το διαχωρισμό των ροών. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνει πιο ειδικές διεργασίες υλικών για τη μοντελοποίηση της αναερόβιας χώνευσης, της παραγωγής βιοαερίου και στραγγισμάτων από ΧΥΤΑ και της εφαρμογής κόμποστ και χωνεύματος σε γεωργική γη. Όλα τα πρότυπα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μοντελοποιηθούν νέες τεχνολογίες με την προσαρμογή των σχετικών παραμέτρων. Το μοντέλο παρέχει πρότυπα για όλες τις ευρέως εφαρμοσμένες τεχνολογίες διαχείρισης στερεών αποβλήτων (συλλογή, μεταφορά, ανάκτηση υλικών, ανακύκλωση υλικών, ταφή, κομποστοποίηση, αναερόβια χώνευση, θερμική επεξεργασία). Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες αποτελούνται από ομαδοποιημένες διεργασίες υλικών οι οποίες διαμορφώνουν τις εν λόγω τεχνολογίες. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των τεχνολογιών αυτών βασίζονται σε δημοσιευμένη έρευνα.

Για τη συλλογή και τη μεταφορά των αποβλήτων, το μοντέλο απαιτεί από το χρήστη να εισάγει μόνο μια κατανάλωση καυσίμου, η οποία υπολογίζεται ως l/t (συλλογή) και ως l/km/t (μεταφορά). Διάκριση γίνεται στην προέλευση των αποβλήτων (μονοκατοικίες, πολυκατοικίες, εμπορικές περιοχές) η οποία επηρεάζει τον τύπο των οχημάτων, το δρομολόγιο συλλογής και κατ'επέκταση την κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές.

Για το στάδιο της διαλογής των ανακυκλώσιμων υλικών, το μοντέλο περιλαμβάνει συντελεστές απόδοσης διαχωρισμού των ανακυκλώσιμων οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη την ποσότητα και τη σύσταση του απορριπτόμενου υλικού. Η διεργασία της διαλογής έχει σχεδιαστεί για συγκεκριμένο αριθμό εκροών και συγκεκριμένη κατανάλωση ενέργειας, ο χρήστης ωστόσο μπορεί να αλλάξει την κατανάλωση ενέργειας ώστε να αντικατοπτρίσει την προσθήκη μηχανημάτων. Για την ανακύκλωση, το μοντέλο περιλαμβάνει 11 μονάδες ανακύκλωσης και τις βάσεις δεδομένων τους. Ο λόγος υποκατάστασης είναι προκαθορισμένος ωστόσο μπορεί να τροποποιηθεί από το χρήστη.

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, το μοντέλο παρέχει βάσεις δεδομένων για ενεργειακά μίγματα τα οποία περιλαμβάνουν την αποδοτικότητα παραγωγής ενέργειας, τις απώλειες μεταφοράς και όλες τις πηγές των ενεργειακών παρόχων κάθε βάσης. Επίσης δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιούνται διαφορετικά μίγματα ή καύσιμα για θέρμανση και ηλεκτρισμό ταυτόχρονα. Όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας, γίνεται διάκριση μεταξύ της θερμότητας και του ηλεκτρισμού που παράγεται από τις μονάδες διαχείρισης αποβλήτων, το οποίο αντικατοπτρίζεται στις διαφορετικές αποδόσεις παραγωγής. Η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να αντικαταστήσει οποιοδήποτε ενεργειακό μίγμα ή πηγή.

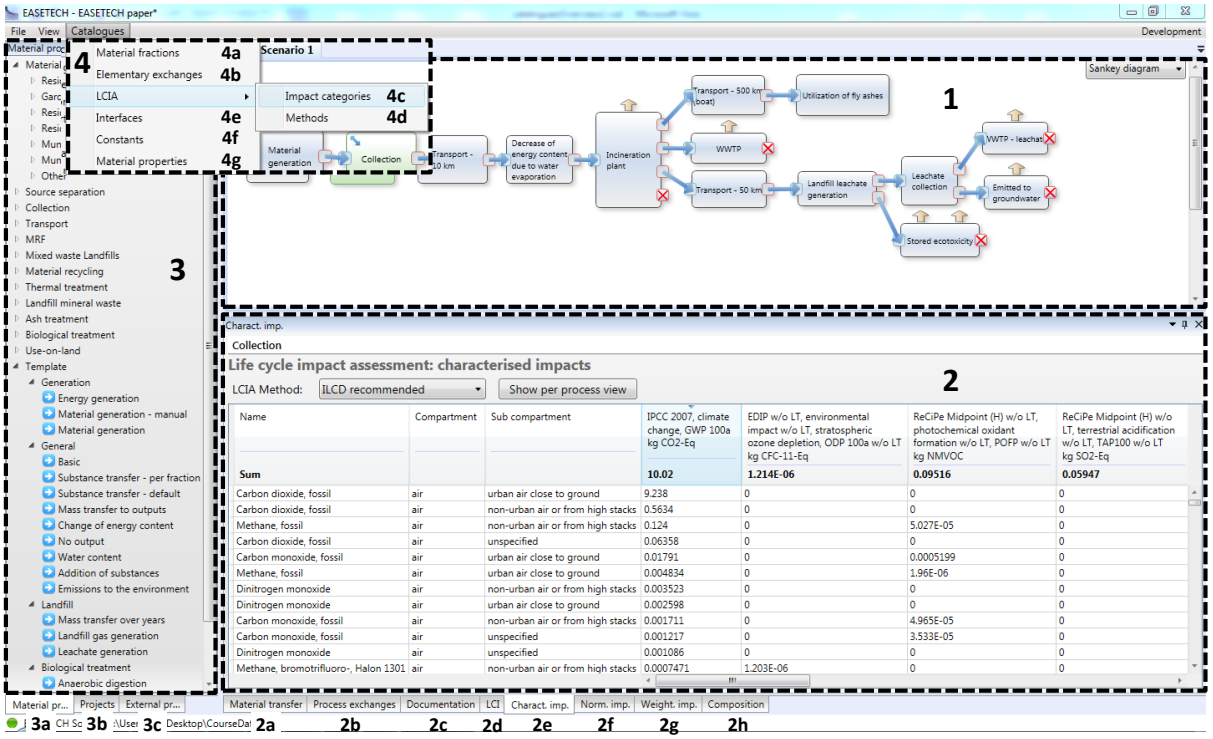
Για τις διεργασίες καύσης λαμβάνεται υπόψη η στοιχειακή σύσταση και ο χρήστης μπορεί να εισάγει τιμές για κάθε τύπο αποβλήτου. Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη έχει προσδιοριστεί από την ανάλυση της ΚΘΔ σε 48 κλάσματα αποβλήτου (Riber et al., 2009) και τον υπολογισμό της συνδυασμένης ΚΘΔ με βάση τη κλασματική σύσταση του αποβλήτου. Για τις εκπομπές που δεν σχετίζονται με μέταλλα, το μοντέλο περιλαμβάνει εκπομπές που σχετίζονται με τη διεργασία, αναλογικές της εισερχόμενης ποσότητας αποβλήτου, με βάση μετρήσεις αλλά και βιβλιογραφικά δεδομένα (Riber et al., 2008). Η περιβαλλοντική απόδοση της καύσης επηρεάζεται επίσης από τις παραδοχές μοντελοποίησης για τον υπολογισμό της ποσότητας της ιπτάμενης τέφρας και της τέφρας πυθμένα που παράγεται, τη χημική τους σύσταση και τους συγκεκριμένους συντελεστές μεταφοράς των ρυπαντών μεταξύ της τέφρας πυθμένα, της ιπτάμενης τέφρας, των υγρών αποβλήτων και των άμεσων εκπομπών (Riber et al., 2008). Το μοντέλο επίσης περιλαμβάνει τη διεργασία της σταθεροποίησης της τέφρας πριν την τελική της απόθεση.

Για τις βιολογικές επεξεργασίες, το μοντέλο χρησιμοποιεί τα πτητικά στερεά και το συντελεστή αποδόμησής τους για κάθε κλάσμα αποβλήτου για να υπολογίσει την ποσότητα του άνθρακα που εκπέμπεται ως CO_2 ή CH_4, ανάλογα τη διεργασία και τον τύπο διαχείρισης. Οι εκπομπές CO_2 βασίζονται στην ποσότητα του αποδομημένου άνθρακα (υπολογισμένη τιμή ή τιμή χρήστη) ενώ οι εκπομπές CH_4 υπολογίζονται ως ποσοστό του μεθανίου που παράγεται από τον αποδομημένο άνθρακα. Το μοντέλο επίσης περιλαμβάνει και τις εκπομπές N2O από τις μονάδες κομποστοποίησης. Με βάση τη στοιχειακή σύσταση του αποβλήτου και τους συντελεστές μεταφοράς υπολογίζεται η κατανομή των στοιχείων σε κάθε περιβαλλοντικό αποδέκτη. Το μοντέλο θεωρεί ότι όλα τα βαρέα μέταλλα που περιέχονται στο απόβλητο μεταφέρονται στο κόμποστ/χώνευμα. Οι κύριες παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο υπολογισμό της σύστασης των βιοδιαχειριζόμενων υλικών (κόμποστ/χώνευμα) περιλαμβάνουν συγκεκριμένες ιδιότητες των αποβλήτων, όπως το περιεχόμενο σε C, N, P, K, το οποίο χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς για τη διαχείριση του άνθρακα και την υποκατάσταση του λιπάσματος. Ειδικότερα, το μοντέλο περιλαμβάνει μια εφαρμογή η οποία ορίζει το αγρονομικό προφίλ στο σημείο όπου εφαρμόζεται το βιοδιαχειριζόμενο υλικό στο έδαφος με βάση διαφορετικά είδη εδαφών και καλλιεργειών, τον προσδιορισμό της κατανομής του αζώτου και τις ιδιότητες δέσμευσης του άνθρακα.

Η ποσότητα του βιογενούς άνθρακα που δεσμεύεται εκτιμάται μεταξύ 10-15% σε βάθος χρόνου 100 ετών, με βάση τον τύπο του εδάφους.

Όσον αφορά την ταφή, το μοντέλο συσχετίζει άμεσα την ποσότητα του μεθανίου που παράγεται με το δυναμικό μεθανίου του απόβλητου που εναποτίθεται προς ταφή. Η σύσταση του βιοαερίου ορίζεται με βάση τυπικές τιμές για κάθε περίοδο, ενώ ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαλέξει τον τρόπο διαχείρισής του. Το μοντέλο περιλαμβάνει την απόδοση απομάκρυνσης των συλλεγόμενων και επεξεργαζόμενων στραγγισμάτων. Η ποσότητα παραγωγής στραγγισμάτων ορίζεται με βάση τυπικές τιμές οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις υδρολογικές συνθήκες σε μια περιοχή. Η δέσμευση άνθρακα υπολογίζεται στο μοντέλο ως η διαφορά της συνολικής ποσότητας του βιογενούς άνθρακα που εισέρχεται στο χώρο ταφής και στο βιογενή άνθρακα που εκπέμπεται μέσα σε ένα διάστημα 100 ετών. Γενικά, ο χρονικός ορίζοντας των εκπομπών θεωρείται ότι είναι τα 100 έτη, το οποίο ωστόσο μπορεί να τροποποιηθεί από το χρήστη. Το μοντέλο επίσης περιλαμβάνει τις πιο μακροπρόθεσμες εκπομπές με βάση τη θεωρία της αποθηκευμένης τοξικότητας για τα βαρέα μέταλλα. Αυτό βασίζεται στο δυναμικό έκπλυσης των βαρέων μετάλλων ανάλογα με τη σύσταση και την ποσότητα των αποβλήτων, το οποίο υπολογίζεται για τα πρώτα 100 έτη. Το υπόλοιπο ή αποθηκευμένο δυναμικό τοξικότητας θα απελευθερωθεί τελικά στο περιβάλλον, αλλά παραμένει στο χώρο ταφής για ένα απροσδιόριστο διάστημα (Hauschild et al., 2008).

Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή όλων των καταλόγων, διεργασιών και σεναρίων (νο. 4, 3 και 1 αντίστοιχα στο Σχήμα 51) από τα οποία απαρτίζεται το μοντέλο.



Σχήμα 51: Περιβάλλον EASETECH

Κατάλογοι

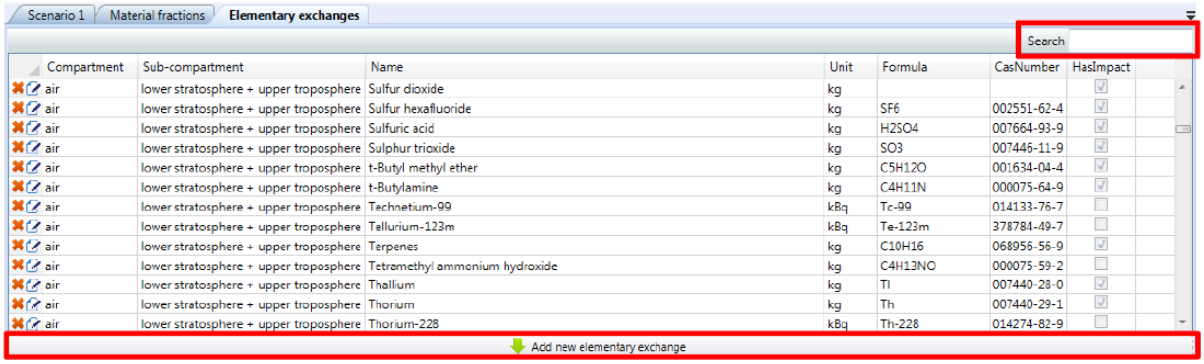
Κλάσματα υλικών (material fractions). Ο κατάλογος των κλασμάτων υλικών περιλαμβάνει πληροφορίες για τη χημική σύσταση των διαφορετικών κλασμάτων υλικών. Τα κλάσματα αυτά χρησιμοποιούνται σαν εισροή στις διεργασίες παραγωγής υλικών και ενέργειας στην αρχή κάθε σεναρίου. Οι πληροφορίες αυτές βασίζονται σε διάφορες μελέτες χαρακτηρισμού αποβλήτων, ωστόσο

ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τη χημική σύσταση των υφιστάμενων κλασμάτων ή να προσθέσει καινούρια κλάσματα για τα οποία διαθέτει δεδομένα για τη χημική τους σύσταση.

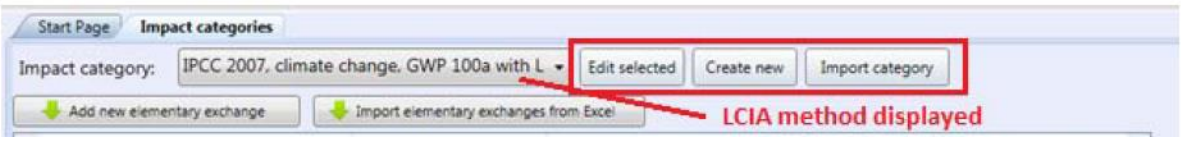
Fraction name	Total Wet Weight (kg)	TS (kg)	Water (kg)	VS (kg)	Ash (kg)	Energy (MJ)	C bio (kg)	C bio and (kg)	C fossil (kg)	Ca (kg)
Sum	**1000**	**540.3**	**459.8**	**405.2**	**135**	**9380**	**175.8**	**78.67**	**55.49**	**12.48**
Vegetable food waste	352.8	81.144	271.6	76.92	4.219	1485	38.54	34.32	0.1939	0.4503
Animal food waste	111.1	47.66	63.48	43.52	4.147	1170	26.4	17.16	0.5386	1.949
Magazines	24	22.512	1.488	14.86	7.654	258.2	7.654	1.801	0.0385	2.274
Newsprints	7.996	6.96	1.036	6.389	0.5707	118.8	3.104	0.5081	0.01559	0.07726
Advertisements	40.02	36.52	3.5	26.51	10.01	476.586	12.56	4.565	0.06318	1.315
Books, phone books	1	0.955	0.045	0.785	0.17	14.38	0.3858	0.2044	0.001939	0.03877
Office paper	6.003	5.478	0.525	4.344	1.134	68.64	2.043	1.128	0.0103	0.4256
Other clean paper	0.9997	0.926	0.0737	0.765	0.161	12.18	0.3528	0.2028	0.001778	0.04065
Paper and carton containers	9.996	7.77	2.226	6.729	1.041	116.3	3.178	1.173	0.01601	0.2036
Other clean cardboard	30.006	25.05	4.956	21.543	3.507	377.754	10.2	3.808	0.05135	0.774
Milk cartons (carton/plastic)	12	9.984	2.021	9.864	0.1198	212.9	4.593	1.048	0.627	0.007258
Juice cartons (carton/plastic/aluminium)	4.002	3.356	0.6456	3.034	0.3222	79.74	1.698	0.292	0.03457	0.02624
Kitchen towels	38.98	20.709	18.28	20.15	0.5591	351.4	9.257	5.219	0.0936	0.08139

Στοιχειακές ανταλλαγές (elementary exchanges). Αυτός ο κατάλογος περιέχει όλες τις στοιχειακές ανταλλαγές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Ο κατάλογος ορίζει τις εκπομπές σε όλους τους περιβαλλοντικούς αποδέκτες (αέρας, έδαφος, ύδατα, φυσικοί πόροι). Όλες οι εκπομπές κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε υποπεδία (π.χ. επιφανειακά/υπόγεια/θαλάσσια ύδατα, γεωργικά/δασικά/βιομηχανικά εδάφη, επιμέρους ατμοσφαιρικά στρώματα κ.α.) τα οποία χρησιμοποιούνται για το στάδιο της εκτίμησης επιπτώσεων.

Η έκδοση 2.9.7 του μοντέλου περιέχει σχεδόν 6000 στοιχειακές ανταλλαγές ενώ είναι δυνατό να προστεθούν από το χρήστη και νέες ανταλλαγές.



Κατηγορίες επιπτώσεων (Impact categories). Ο κατάλογος αυτός περιλαμβάνει όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων και τους σχετικούς συντελεστές κανονικοποίησης που χρησιμοποιούνται στις μεθόδους EEKZ για την αξιολόγηση των επιπτώσεων ενός συστήματος. Κάθε κατηγορία επίπτωσης περιλαμβάνει μια λίστα στοιχειακών ανταλλαγών και τους συντελεστές κανονικοποίησης που αφορούν την εν λόγω κατηγορία.



Μέθοδοι ΕΕΚΖ (LCIA methods). Αυτός ο κατάλογος περιέχει όλες τις μεθόδους ΕΕΚΖ οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των επιπτώσεων των σεναρίων στο EASETECH. Οι μέθοδοι ΕΕΚΖ δημιουργούνται από την ομαδοποίηση των επιμέρους κατηγοριών επίπτωσης. Η έκδοση 2.9.7 του μοντέλου περιέχει τις ακόλουθες μεθόδους ΕΕΚΖ:

- EDIP 2003 (Hauschild and Potting, 2004)
- CML2001 (Guinée et al., 2002)
- USEtox (Rosenbaum et al., 2008)
- IPCC 2007 (Solomon et al., 2007), IPCC 2013 (Stocker et al., 2013)
- ILCD2011 (Hauschild et al., 2013)
- Recipe (Goedkoop et al., 2009)

Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν τους πιο πρόσφατους συντελεστές κανονικοποίησης που είναι διαθέσιμοι στη βιβλιογραφία. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει μια νέα μέθοδο συμπληρώνοντας τα απαραίτητα πεδία ή να εισάγει κατευθείαν τη σχετική πληροφορία από συμβατά αρχεία.

Διεπαφές (interfaces). Αυτός ο κατάλογος χρησιμοποιείται για να συνδέσει τη φυσική ροή μιας ουσίας με τους περιβαλλοντικούς αποδέκτες. Έτσι, όταν ο χρήστης ορίζει το συντελεστή μεταφοράς/μετατροπής μιας ουσίας προς ένα αποδέκτη σε μια διεργασία (π.χ. kg ορυκτού C σε kg CO_2), το μοντέλο γνωρίζει πώς να μετατρέψει τη μάζα της ουσίας στην είσοδο σε μια στοιχειακή ανταλλαγή.

Σταθερές και παράμετροι (constants and parameters). Ο κατάλογος των σταθερών περιλαμβάνει όλες τις σταθερές τιμές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλα τα πεδία εισαγωγής δεδομένων (π.χ. κατώτερη θερμογόνος δύναμη του μεθανίου, μοριακή μάζα του άνθρακα). Οι παράμετροι είναι παρόμοιες με τις σταθερές αλλά συγκεκριμένες για ένα σενάριο και χρησιμοποιούνται για να διεξαχθεί μια ανάλυση αβεβαιότητας/ευαισθησίας.

Ιδιότητες υλικών (material properties). Οι ιδιότητες των υλικών είναι όλες οι ιδιότητες που υπολογίζονται μέσα από τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας και μπορούν να παρακολουθούνται σε κάθε στάδιο σε όλη τη ροή του συστήματος

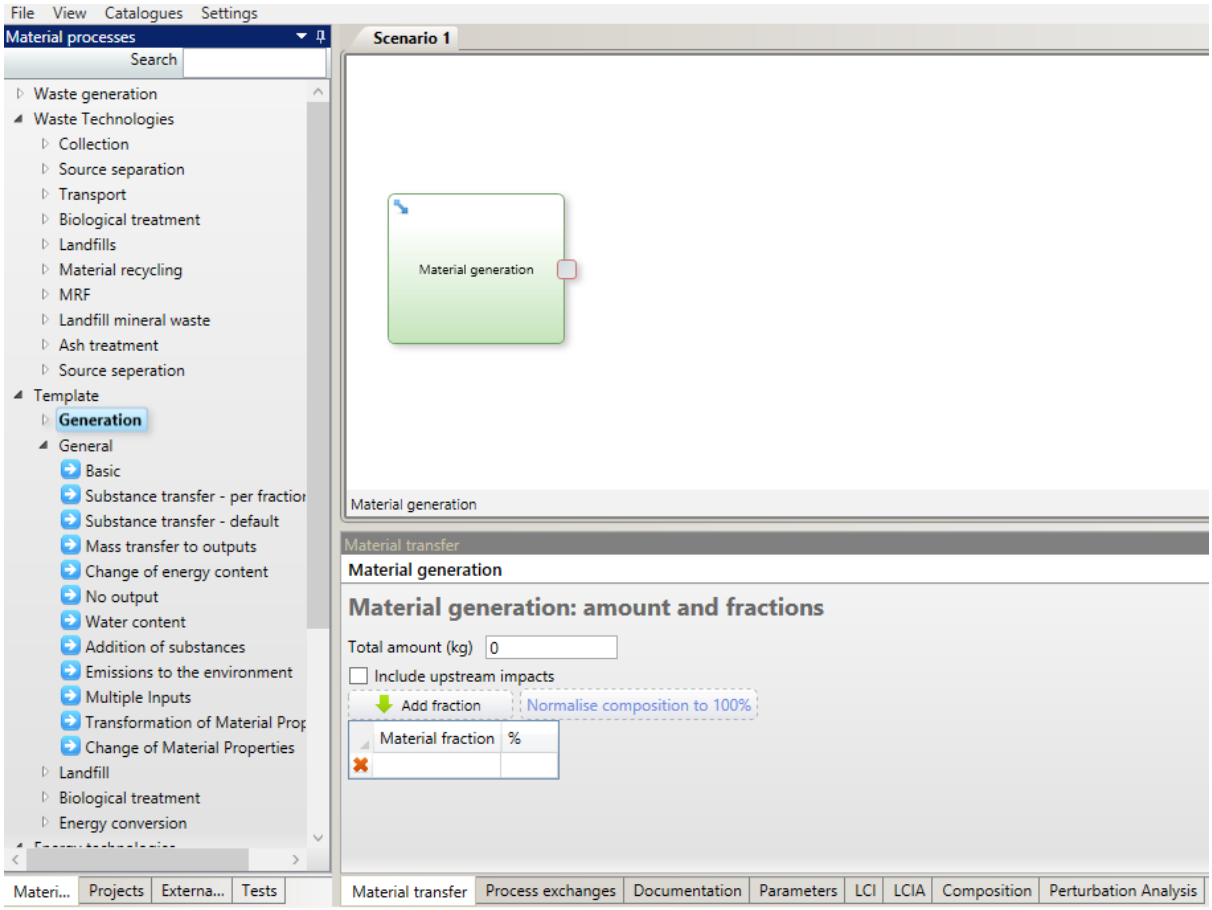
Scenario 1 | Material properties

Name	Unit	Comment	Selected for calculation	Display - default	Display - gas	Display - liquid	Display - solids
TS	kg	Calculated as VS+Ash	✓	✓	☐	✓	✓
Water	kg		✓	✓	☐	✓	✓
VS	kg		✓	✓	☐	✓	✓
Ash	kg		✓	✓	☐	✓	✓
Total Wet Weight	kg	Calculated as H2O+VS+Ash	✓	✓	☐	✓	✓
Energy	MJ	Lower heating value (dry) for solids	✓	✓	✓	✓	✓
CH4 potential	m^3		☐	☐	☐	☐	☐
C bio	kg		✓	✓	✓	✓	✓
C bio and	kg	C bio anaerobically degradable	✓	✓	☐	☐	☐

Διεργασίες

Εξωτερικές διεργασίες (external processes). Η λίστα των εξωτερικών διεργασιών περιέχει όλες τις διεργασίες δεύτερου επιπέδου (ή παρασκηνίου) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις διεργασίες υλικών. Η μοντελοποίηση των διεργασιών υλικών περιλαμβάνει τη χρήση βοηθητικών υλικών και ενέργειας, η παραγωγή των οποίων συνεπάγεται εκπομπές, οι οποίες ονομάζονται «ανάντη επιπτώσεις». Οι διεργασίες που παρέχουν αυτές τις υπηρεσίες ονομάζονται εξωτερικές διεργασίες στο EASETECH. Κάθε εξωτερική διεργασία περιέχει όλες τις στοιχειακές ανταλλαγές που σχετίζονται με την παραγωγή μιας λειτουργικής μονάδας υλικού ή ενέργειας. Το μοντέλο περιέχει μια λίστα βασικών εξωτερικών διεργασιών, με τα σχετικά μεταδεδομένα και τις πηγές να παρέχονται για λόγους διαφάνειας καθώς και για έλεγχο της συνέπειας των στοιχείων.

Διεργασίες υλικών (material processes). Η βιβλιοθήκη των διεργασιών υλικών περιέχει δύο είδη διεργασιών: τα πρότυπα και τις προκαθορισμένες διεργασίες υλικών. Τα πρότυπα είναι διεργασίες υλικών χωρίς δεδομένα οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάση για τη δημιουργία νέων διεργασιών. Οι προκαθορισμένες διεργασίες έχουν διαμορφωθεί ήδη για να μοντελοποιήσουν διεργασίες διαχείρισης και επεξεργασίας ενός υλικού. Το παράθυρο Ανταλλαγές διεργασιών (Process exchanges) περιλαμβάνει όλες τις στοιχειακές ανταλλαγές και τις εξωτερικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται στη διεργασία. Το παράθυρο Τεκμηρίωση (Documentation) περιέχει λεπτομερή πληροφορία αναφορικά με τον τρόπο συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων και παρέχει αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων.



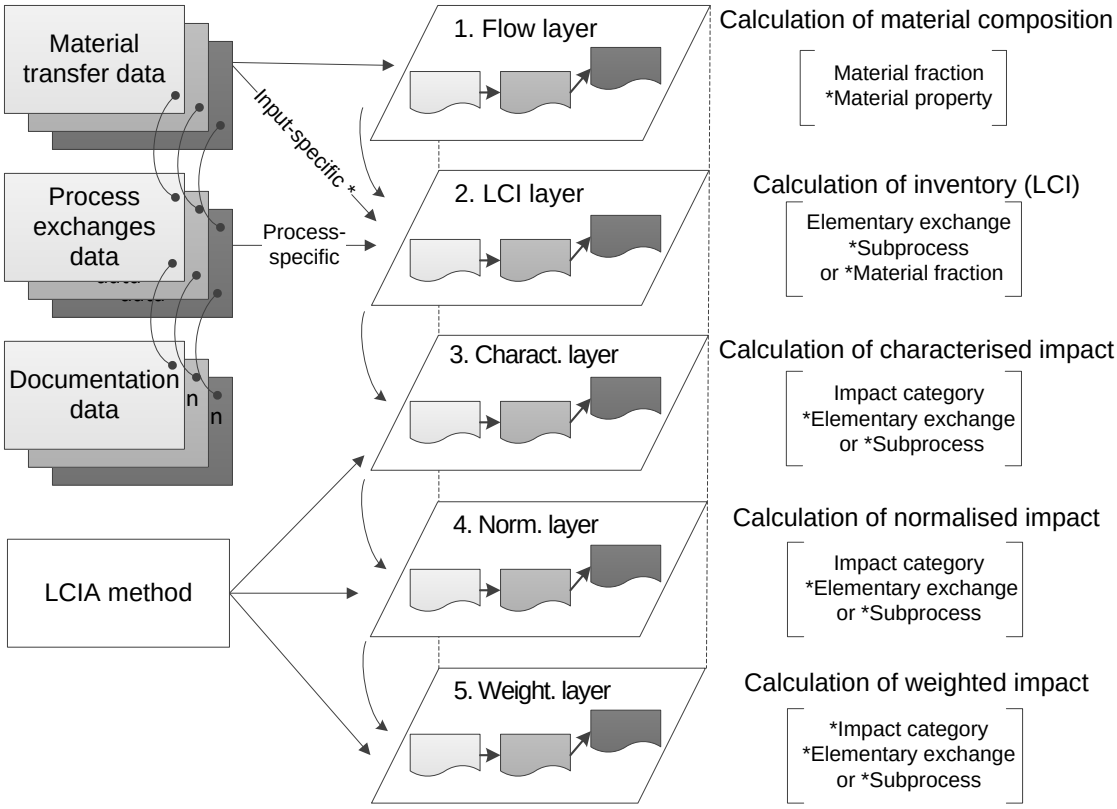
Σενάρια

Ένα σενάριο πάντα ξεκινά με μια διεργασία παραγωγής υλικού ή ενέργειας η οποία αναφέρεται στη λειτουργική μονάδα του σεναρίου. Από το σημείο αυτό ο χρήστης συνδέει τις εκροές σε εισροές μέχρι να συνδεθούν όλες οι διεργασίες και να μην υπάρχει κάποια εκροή που δεν διαχειρίζεται. Η τελική διεργασία μπορεί είτε να αφορά την τελική εναπόθεση ενός υλικού (ταφή) ή την μετατροπή του υλικού πέρα από τα όρια του συστήματος (ανακύκλωση).

Υπολογισμοί

Το μοντέλο EASETECH χρησιμοποιεί δεδομένα που περιέχονται στους καταλόγους και στο σενάριο και υπολογίζει τα αποτελέσματα σε πέντε διαφορετικά επίπεδα: ροή υλικών, ανάλυση απογραφής κύκλου ζωής, χαρακτηρισμός, κανονικοποίηση και στάθμιση των επιπτώσεων. Η δομή των υπολογισμών στο μοντέλο παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα. Οι υπολογισμοί στα διαφορετικά επίπεδα είναι

διαδοχικοί, με τα αποτελέσματα του ενός επιπέδου να χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του επόμενου επιπέδου.



Σχήμα 52: Δεδομένα και υπολογισμοί στα διαφορετικά επίπεδα αποτελεσμάτων. Τα βέλη δείχνουν τις ροές της απαιτούμενης πληροφορίας

Το πρώτο επίπεδο της ροής υλικών παρακολουθεί όλες τις ροές μάζας και ουσιών. Κάθε πρότυπο διεργασίας υλικών έχει ένα ξεχωριστό παράθυρο για τον υπολογισμό της μεταφοράς υλικών (material transfer), το οποίο ορίζει πώς υπολογίζεται η σύσταση της εκροής με βάση τα δεδομένα που εισάγονται από το χρήστη. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών του πρώτου επιπέδου αποτελούν τη σύσταση της ροής του υλικού.

Το δεύτερο επίπεδο περιλαμβάνει τον υπολογισμό της ΑΔΚΖ όλων των διεργασιών υλικών χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από το προηγούμενο επίπεδο και τα σχετικά δεδομένα ΑΔΚΖ. Ο υπολογισμός της ΑΔΚΖ περιλαμβάνει τον καθορισμό για κάθε στοιχειακή ανταλλαγή *i*, την ποσότητα των εκπομπών Q_i ή την κατανάλωση πόρων. Στην περίπτωση που οι στοιχειακές ανταλλαγές προκύπτουν από τη χρήση μιας εξωτερικής διεργασίας παραγωγής ενός υλικού ή ενέργειας, για κάθε εξωτερική διεργασία k η ΑΔΚΖ είναι το γινόμενο της ΑΔΚΖ της διεργασίας k, της ποσότητας k που χρησιμοποιείται στη διεργασία και της ποσότητας των σχετικών ουσιών στην είσοδο της διεργασίας. Στην περίπτωση που οι στοιχειακές ανταλλαγές προκύπτουν από μια εκπομπή από την ίδια τη διεργασία, το μοντέλο διαχωρίζει μεταξύ των εκπομπών που σχετίζονται με τη διεργασία (process-specific) και αυτών που σχετίζονται με την εισροή (input-specific).

Για τις εκπομπές διεργασίας, η ποσότητα Q_i υπολογίζεται για κάθε στοιχειακή ανταλλαγή *i* ως το γινόμενο της εκπομπής *i* στη διεργασία επί την ποσότητα της εισερχόμενης ουσίας. Οι εκπομπές εισροής είναι στοιχειακές ανταλλαγές που προκύπτουν από τη μεταφορά ουσιών κατά τη ροή των υλικών στους περιβαλλοντικούς αποδέκτες.

Επομένως η ΑΔΚΖ μιας διεργασίας υλικού ορίζεται ως το άθροισμα της συνεισφοράς όλων των εξωτερικών διεργασιών, των εκπομπών διεργασίας και των εκπομπών εισροής:

$$LCI_{Materialprocess} = \sum_{k=externalprocess} LCI_k + LCI_{process-specific} + LCI_{input-specific} \quad \text{(Εξ. 1)}$$

Το τρίτο επίπεδο περιλαμβάνει τους υπολογισμούς των χαρακτηρισμένων επιπτώσεων (IP) από όλες τις διεργασίες, με βάση τα αποτελέσματα της ΑΔΚΖ και τη χρήση των συντελεστών χαρακτηρισμού (CF) που περιέχονται στην επιλεγμένη μέθοδο ΕΕΚΖ για την κάθε κατηγορία επίπτωσης j (εξίσωση 2). Οι χαρακτηρισμένες επιπτώσεις (NIP) παρουσιάζονται με βάση τη συνεισφορά των διαφορετικών στοιχειακών ανταλλαγών αλλά και με βάση τη συνεισφορά των διαφορετικών υποδιεργασιών του συστήματος.

Στο τέταρτο επίπεδο υπολογίζονται οι κανονικοποιημένες επιπτώσεις με βάση την εξίσωση 3. Τέλος, στο πέμπτο επίπεδο υπολογίζονται οι σταθμισμένες επιπτώσεις (WIP) με βάση την εξίσωση 4.

$$IP(j) = \sum_i Q_i * CF(j)_i \quad \text{(Εξ. 2)}$$

$$NIP(j) = \frac{IP(j)}{NF(j)} \quad \text{(Εξ. 3)}$$

$$WIP(j) = NIP(j) * WF(j) \quad \text{(Εξ. 4)}$$

Ανάλυση αβεβαιότητας

Το μοντέλο επιτρέπει τη χρήση παραμέτρων ή εξισώσεων με παραμέτρους σε όλα τα πεδία εισαγωγής δεδομένων. Για κάθε παράμετρο ο χρήστης μπορεί να ορίσει μια τιμή, μια λίστα τιμών ή μια κατανομή πιθανότητας. Αυτό επιτρέπει στο χρήστη να ελέγξει διαφορετικές παραδοχές (ανάλυση ευαισθησίας). Για την εκτίμηση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων, το μοντέλο αναπαριστά τις αβεβαιότητες των παραμέτρων ως κατανομές πιθανότητας και διάδοσης με προσομοίωση Monte Carlo simulation (Clavreul et al., 2012).

8.3 Βάση δεδομένων Ecoinvent

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε τόσο η βάση δεδομένων ELCD όσο και η Ecoinvent. Δεδομένου ότι έχει αναπτυχθεί ειδικό μεθοδολογικό πλαίσιο για τη δεύτερη, το οποίο έχει άμεση σχέση με μοντελοποίηση συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί στη συνέχεια.

Η Ecoinvent (version 3) διαθέτει τρεις διαφορετικές εκδοχές για καθεμία μοναδιαία διεργασία ανάλογα με το πλαίσιο μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται, ήτοι:

i. η εκδοχή για το μοντέλο συστήματος «Επιμερισμός στο σημείο της υποκατάστασης» (Allocation at the point of substitution, APOS),
ii. η εκδοχή για το μοντέλο συστήματος «Επιμερισμός, αποκοπή με ταξινόμηση» (Allocation, cut-off by classification)
iii. η εκδοχή για το μοντέλο συστήματος «Υποκατάσταση, συνεπαγωγική, μακροπρόθεσμα» (substitution, consequential, long-term)

i. Επιμερισμός στο σημείο της υποκατάστασης

Η εκδοχή αυτή είναι η προκαθορισμένη μέθοδος της Ecoinvent, το όνομα της οποίας όμως τροποποιήθηκε μετά την έκδοση 3.2 όταν προστέθηκαν και οι άλλες εκδοχές. Η εκδοχή αυτή ακολουθεί τη χαρακτηριστική προσέγγιση σύμφωνα με την οποία τα βάρη αποδίδονται αναλογικά στις συγκεκριμένες διεργασίες. Κατά τη σύνδεση των διεργασιών, όλες οι εκροές προς διαχείριση (materials for treatment) μεταφέρονται στις εισροές των διεργασιών που τις παράγουν, με αρνητικό πρόσημο. Τότε όλες οι εισροές και οι εκροές (προϊόντα και υλικά προς διαχείριση) συνδέονται με τις αντίστοιχες διεργασίες αγοράς (market activities). Όλα τα εμπορεύσιμα παραπροϊόντα που προκύπτουν από τη διαχείριση των υλικών προς διαχείριση μεταφέρονται ως εκροές στις διεργασίες που παράγουν τα υλικά προς διαχείριση. Στη συνέχεια, όλες οι πολυλειτουργικές διεργασίες επιμερίζονται στο σημείο της υποκατάστασης και τα εμπορεύσιμα παραπροϊόντα από τις διεργασίες επεξεργασίας επιμερίζονται στις διεργασίες στις οποίες μεταφέρθηκαν. Μετά τον επιμερισμό, όλες οι διεργασίες που παράγουν το ίδιο εμπορεύσιμο παραπροϊόν από μια διεργασία επεξεργασίας ομαδοποιούνται σε ένα σύνολο δεδομένων, με την ονομασία της εν λόγω διεργασίας επεξεργασίας.

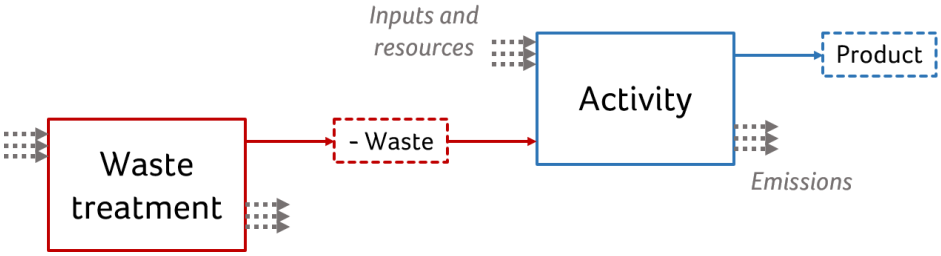
ii. Επιμερισμός, αποκοπή με ταξινόμηση

Η προσέγγιση αυτής της εκδοχής είναι ότι η αρχική παραγωγή των προϊόντων αποδίδεται πάντα στον αρχικό χρήστη του προϊόντος, ενώ στην περίπτωση που ένα υλικό ανακυκλώνεται, δεν αποδίδεται στον αρχικό παραγωγό πίστωση για την παροχή των ανακυκλώσιμων υλικών. Ως εκ τούτου, τα ανακυκλώσιμα υλικά εισέρχονται χωρίς βάρη στις διεργασίες ανακύκλωσης, δηλαδή *αποκόπτονται* στο σημείο πριν την ανακύκλωση, και τα δευτερεύοντα (ανακυκλωμένα) υλικά φέρουν μόνο τις επιπτώσεις από τις διεργασίες ανακύκλωσης (συμπεριλαμβανομένων των διεργασιών συλλογής και μεταφοράς των ανακυκλώσιμων υλικών). Επιπρόσθετα, οι παραγωγοί των αποβλήτων δεν λαμβάνουν κάποια πίστωση για την ανακύκλωση ή επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων που προκύπτουν από τη διαχείριση των αποβλήτων. Αυτή η προσέγγιση αποτελούσε και τη μοναδική εκδοχή στις προηγούμενες εκδόσεις της Ecoinvent.

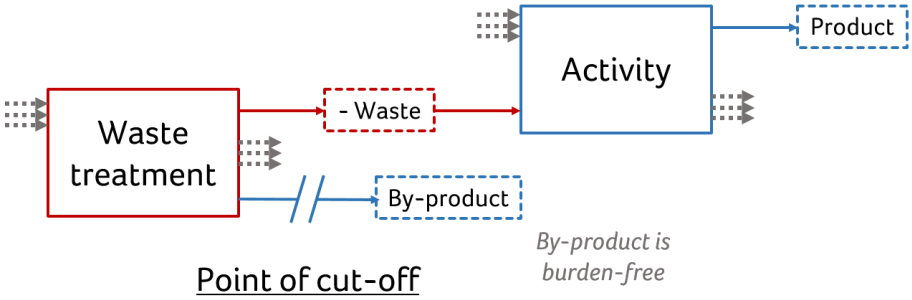
Αντίθετα, με την εκδοχή του επιμερισμού στο σημείο της υποκατάστασης, ένα μέρος των επιπτώσεων ΑΚΖ που δημιουργήθηκαν από την παραγωγή και χρήση των ανακυκλώσιμων υλικών επιμερίζεται στα δευτερεύοντα ανακυκλωμένα υλικά.

Σύμφωνα με την εκδοχή του επιμερισμού με αποκοπή, όλες οι ενδιάμεσες ροές ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: κοινό παραπροϊόν, ανακυκλώσιμο υλικό και απόβλητο. Με βάση αυτή την ταξινόμηση επιλέγεται ο τρόπος χειρισμού τους κατά τον επιμερισμό. Τα κοινά παραπροϊόντα είναι η πιο συνηθισμένη κατηγορία στη βάση δεδομένων καθώς τα περισσότερα παραγόμενα αγαθά εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία. Τα ανακυκλώσιμα υλικά είναι υλικά με καμία ή μικρή οικονομική αξία που μπορούν να αποτελέσουν εισροή σε μια διεργασία ανακύκλωσης. Τα απόβλητα είναι υλικά με καμία οικονομική αξία και κανένα ενδιαφέρον για τη συλλογή τους χωρίς αντίτιμο.

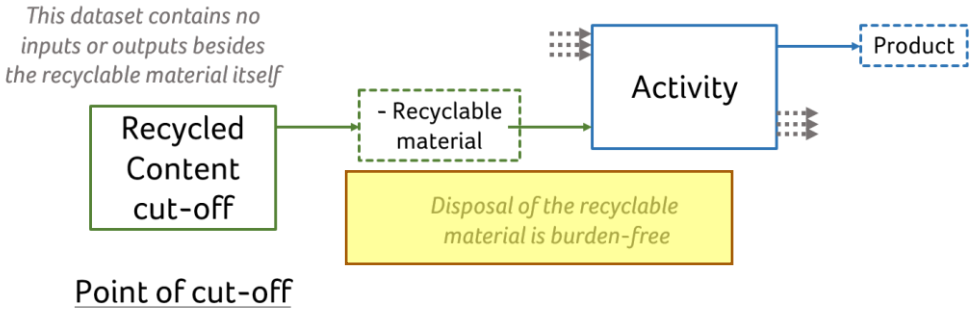
<u>Χειρισμός προϊόντων αποβλήτων</u>. Η διαχείριση των απόβλητων παραπροϊόντων επιβαρύνει εξολοκλήρου τη διεργασία που παράγει το απόβλητο. Για το λόγο αυτό τα απόβλητα θεωρούνται ως εισροή στη διεργασία με αρνητικό πρόσημο, δείχνοντας ότι η διεργασία αυτή συνεπάγεται τη διαχείριση των αποβλήτων που παράγει και επιβαρύνεται με τις σχετικές επιπτώσεις.



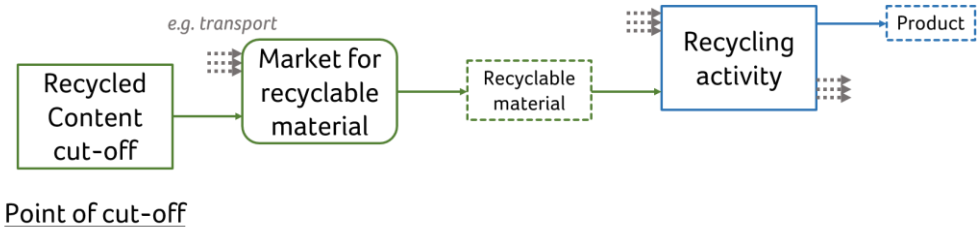
Οποιοδήποτε παραπροϊόν από την επεξεργασία αποβλήτων που δεν είναι απόβλητο αποκόπτεται μετά το στάδιο της επεξεργασίας. Το παραπροϊόν αυτό δεν επιβαρύνει τη διεργασία που το παράγει και παράλληλα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εισροή σε άλλες διεργασίες ελεύθερο από βάρη.



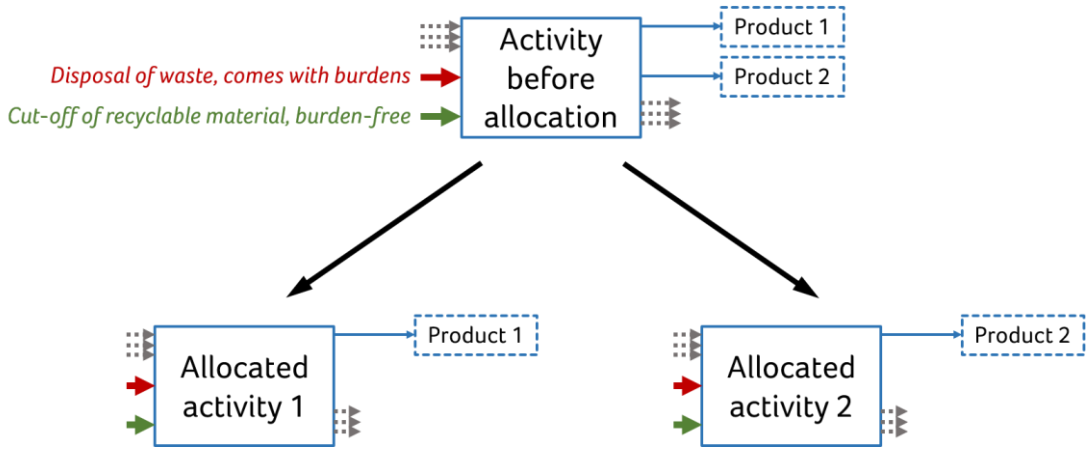
Χειρισμός ανακυκλώσιμων υλικών. Τα ανακυκλώσιμα υλικά αποκόπτονται από τις διεργασίες που τα παράγουν και επομένως οι σχετικές επιπτώσεις είναι απαλλαγμένες από βάρη. Τα υλικά αυτά θεωρούνται ως εισροές με αρνητικό πρόσημο στη διεργασία που τα παράγει, όπως και στην περίπτωση των αποβλήτων, με τη διαφορά ότι αυτά δεν συνδέονται με κάποια διεργασία επεξεργασίας και επομένως δεν συνεπάγονται άλλες εισροές και εκροές.



Το σημείο της αποκοπής βρίσκεται στο τέλος της διεργασίας που παράγει το ανακυκλωμένο υλικό. Ο δευτερεύων κύκλος χρήσης ξεκινάει με τη συλλογή του υλικού από τον παραγωγό. Η μεταφορά στο σημείο επεξεργασίας αποτελεί την αρχή της εφοδιαστικής αλυσίδας για τη δευτερεύουσα χρήση.



Χειρισμός κοινών παραπροϊόντων. Οι επιπτώσεις που δημιουργούνται από τις διεργασίες που παράγουν κοινά παραπροϊόντα, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων που σχετίζονται με τα διαχείριση των ανακυκλώσιμων υλικών και των αποβλήτων, επιμερίζονται μεταξύ των κοινών παραπροϊόντων με βάση τους εκάστοτε παράγοντες επιμερισμού.



iii. Υποκατάσταση, συνεπαγωγική, μακροπρόθεσμα

Η εκδοχή αυτή που ονομάζεται απλούστερα και συνεπαγωγική, χρησιμοποιεί διαφορετικές θεωρήσεις για να αξιολογήσει τις επιπτώσεις μιας αλλαγής σε ένα υπάρχον σύστημα, σύμφωνα με το ομώνυμο πλαίσιο μοντελοποίησης (βλέπε 5.1.3.2). Κατά τη σύνδεση των διεργασιών στην εκδοχή αυτή, όλα τα παραπροϊόντα μεταφέρονται στις εισροές των διεργασιών που τις παράγουν, με αρνητικό πρόσημο. Το αρνητικό πρόσημο χρησιμοποιείται για να αντικατοπτρίσει τη μείωση της ζήτησης στην αγορά για το προϊόν αυτό. Στη συνέχεια όλα τα προϊόντα συνδέονται με τις αντίστοιχες αγορές τους και οι αγορές προσφέρουν τις απαιτούμενες εισροές των προϊόντων τους. Τέλος, όλοι οι οριακοί προμηθευτές συνδέονται με την αγορά.

8.4 Μέθοδος ILCD - Κατηγορίες επιπτώσεων κύκλου ζωής

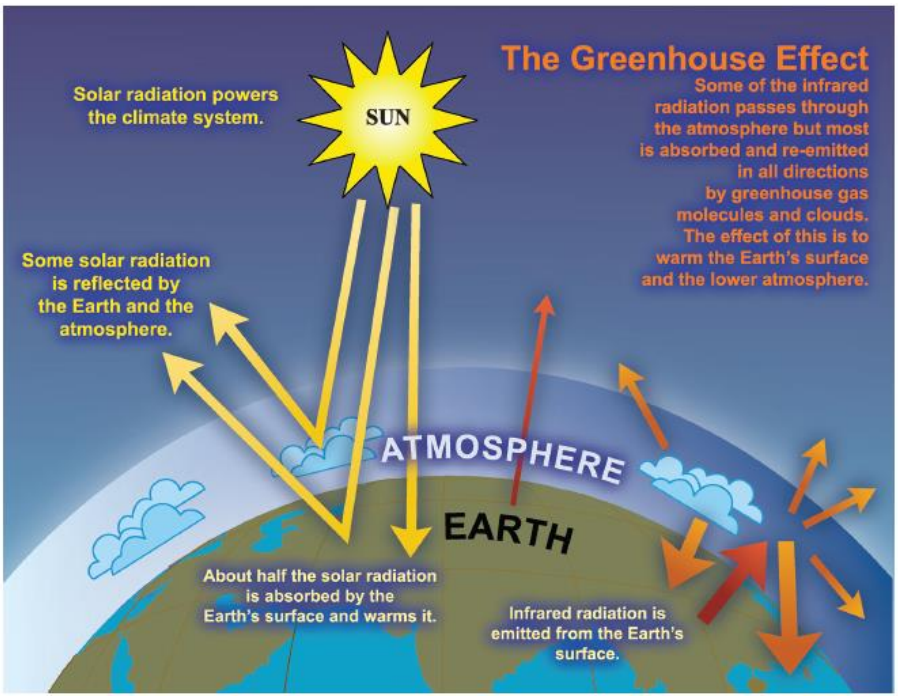
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κατηγορίες επιπτώσεων κύκλου ζωής που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή και οι σχετικοί συντελεστές χαρακτηρισμού. Ειδικότερα, για καθεμία κατηγορία επίπτωσης παρουσιάζεται ο μηχανισμός λειτουργίας τους και οι επιπτώσεις που αυτές προκαλούν στο περιβάλλον, τα οικοσυστήματα και την υγεία.

8.4.1 Κλιματική αλλαγή (Global warming)

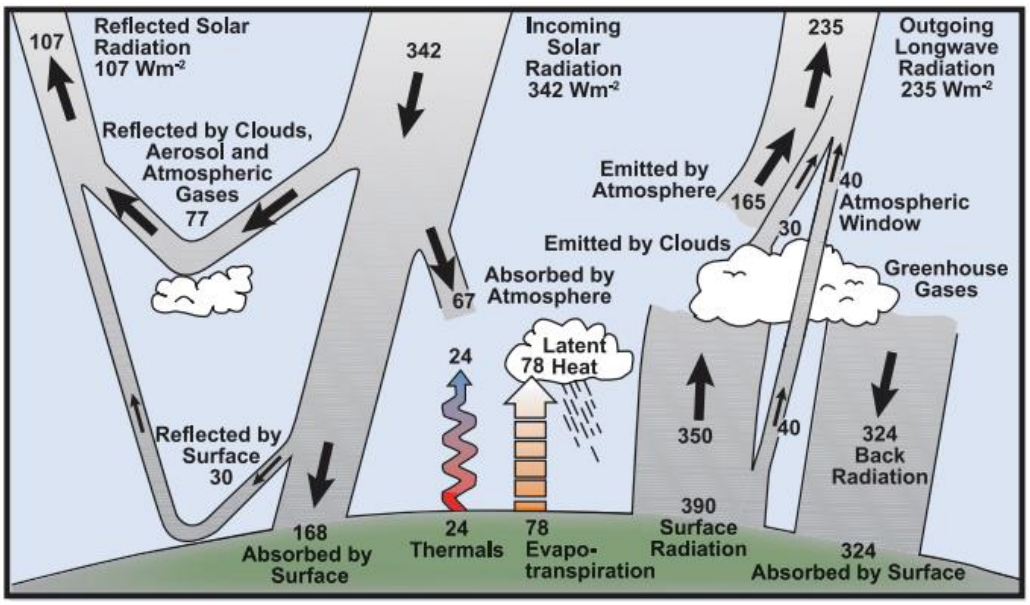
Η Γη λαμβάνει ενέργεια από τον ήλιο με τη μορφή της υπεριώδους, της ορατής και της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Από το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία προσεγγίζει την ατμόσφαιρα, περίπου το μισό απορροφάται από την επιφάνεια της Γης, το ένα τρίτο ανακλάται πίσω στο διάστημα, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από την ατμόσφαιρα. Από την ανακλώμενη ποσότητα της ακτινοβολίας, περίπου τα δύο τρίτα ανακλώνται από τα σύννεφα και από μικρά σωματίδια της ατμόσφαιρας, τα οποία είναι γνωστά ως αερολύματα. Το υπόλοιπο ένα τρίτο ανακλάται από επιφάνειες της Γης με ανοιχτά χρώματα, όπως περιοχές με χιόνι, πάγο και ερήμους (Le Treut et al., 2007).

Για να εξισορροπηθεί η εισερχόμενη ενέργεια στην ατμόσφαιρα της Γης, η Γη εκπέμπει κατά μέσο όρο την ίδια ποσότητα ενέργειας πίσω στο διάστημα με τη μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η επιφάνεια της Γης επανεκπέμπει την απορροφώμενη ενέργεια θερμαίνοντας τον αέρα που έρχεται σε επαφή με την επιφάνειά της, μέσω της εξατμισοδιαπνοής, καθώς και με τη μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Το μεγαλύτερο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας απορροφάται από τα θερμοκηπιακά αέρια της

ατμόσφαιρας και τα σύννεφα, τα οποία εμποδίζουν την υπέρυθρη ακτινοβολία να διαφύγει προς το διάστημα. Καθώς η υπέρυθρη ακτινοβολία απορροφάται από τα αέρια, αυξάνει την κινητική τους ενέργεια, με αποτέλεσμα να συγκρούονται με τα γειτονικά μόρια οξυγόνου και αζώτου του αέρα. Εξαιτίας των συγκρούσεων αυτών αυξάνεται η μέση κινητική ενέργεια του αέρα και η θερμοκρασία του, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της κατώτερης ατμόσφαιρας. Τα αέρια αυτά επανεκπέμπουν μέρος της απορροφώμενης υπέρυθρης ακτινοβολίας προς όλες τις κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα ένα μέρος αυτής να φθάνει στην επιφάνεια της γης και να απορροφάται από το έδαφος, θερμαίνοντάς το. Με τη σειρά της η γη εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία προς τα επάνω, θερμαίνοντας την κατώτερη ατμόσφαιρα (Ahrens, 2007). Για το λόγο αυτό, το φυσικό αυτό φαινόμενο παρομοιάζεται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπου οι γυάλινοι τοίχοι εγκλωβίζουν την ακτινοβολία και αυξάνουν την εσωτερική θερμοκρασία.



Σχήμα 53: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου (Πηγή: Le Treut et al., 2007)



Σχήμα 54: Εκτίμηση του ετήσιου μέσου παγκόσμιου ισοζυγίου ενέργειας της Γης. Πηγή: Kiehl and Trenberth (1997)

Τα κυριότερα αέρια που συμβάλλουν στο φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα και οι υδρατμοί. Τα αέρια αυτά δεν απορροφούν καθόλου ακτινοβολίες με μήκη κύματος που ανήκουν στο ορατό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με αποτέλεσμα να επιτρέπουν να εισέλθει η ηλιακή ακτινοβολία στην γη. Άλλα αέρια που συμβάλλουν σε μικρότερο βαθμό στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι το μεθάνιο, το υποξείδιο του αζώτου, το τροποσφαιρικό όζον και διάφορα άλλα αέρια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα σε μικρότερες ποσότητες αλλά είναι αρκετά ισχυρά, όπως ορισμένες αλογονούχες ενώσεις. Τα σύννεφα συνεισφέρουν επίσης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου αλλά ταυτόχρονα λειτουργούν και ως μηχανισμοί ανάδρασης στο φαινόμενο αυτό. Τα σύννεφα απορροφούν την υπέρυθρη ακτινοβολία θερμαίνοντας έτσι τη Γη αλλά και ανακλούν στο διάστημα την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ψυχραίνοντας τη Γη (Le Treut et al., 2007).

Η ύπαρξη των θερμοκηπιακών αερίων που οδηγούν στο φυσικό αυτό φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ζωτικής σημασίας για το πλανήτη, καθώς διατηρεί τη μέση θερμοκρασία της γης στους 15°C αντί των –18°C που θα επικρατούσαν σε περίπτωση απουσίας αυτών, θερμοκρασία που θα καθιστούσε αδύνατη την ύπαρξη ζωής στο πλανήτη μας (Ahrens, 2007).

Οι παράγοντες που διαταράσσουν το ισοζύγιο ακτινοβολίας συνεισφέρουν σε διαφορετικό βαθμό ο καθένας στην αλλαγή του κλίματος. Για τη σύγκριση των κλιματικών επιπτώσεων των διάφορων παραγόντων γίνεται κανονικοποίηση ως προς ένα αέριο αναφοράς, το οποίο είναι συνήθως το CO_2. Το Δυναμικό Θέρμανσης του Πλανήτη, ΔΘΠ (Global Warming Potential, GWP) αποτελεί πλέον τον κοινώς αποδεκτό δείκτη για την μετατροπή των εκπομπών διαφορετικών αερίων σε μια κοινή κλίμακα, τις ισοδύναμες εκπομπές CO_2. Το ΔΘΠ μπορεί να ερμηνευτεί ως η συνολική θερμότητα που παγιδεύει ένας παράγοντας στην ατμόσφαιρα, ή αλλιώς, η συνολική ενέργεια που προστίθεται στο κλιματικό σύστημα από τον υπό εξέταση παράγοντα σε σχέση με αυτή που προστίθεται από το CO_2 (Myhre et al.,2013).

Το ΔΘΠ εξαρτάται από την απορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας από το συγκεκριμένο παράγοντα, τη φασματική θέση των απορροφητικών μηκών κύματος και το χρόνο ζωής του παράγοντα στην ατμόσφαιρα. Επομένως ένα υψηλό ΔΘΠ συσχετίζεται με υψηλή απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας και ένα μεγάλο χρόνο ζωής. Όσον αφορά το φάσμα απορρόφησης της ακτινοβολίας, το ΔΘΠ είναι υψηλό εφόσον ο παράγοντας αυτός απορροφά ακτινοβολία σε μήκη κύματος όπου η ατμόσφαιρα δεν απορροφά ήδη την περισσότερη ακτινοβολία (Myhre et al.,2013). Ωστόσο σημειώνεται ότι το ΔΘΠ δεν ισοδυναμεί με αλλαγές στη θερμοκρασία ή άλλες κλιματικές παραμέτρους οπότε ο όρος αυτός ίσως να είναι λίγο παραπλανητικός.

Το ΔΘΠ υπολογίζεται για κάθε αέριο σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta\Theta\Pi_i = \frac{\int_0^T a_i \times C_i(t)dt}{\int_0^T a_{CO_2} \times c_{CO2}(t)dt}$$ όπου

a_i : η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας έπειτα από αύξηση μιας μονάδας της συγκέντρωσης του αερίου i

$C_i(t)$: απομένουσα συγκέντρωση του αερίου i στο χρόνο t μετά την εκπομπή

T : χρονικός ορίζοντας για τον οποίο υπολογίζονται οι εκπομπές

Οι χρονικοί ορίζοντες που συνήθως λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό του ΔΘΠ είναι τα 20, 100 και 500 έτη, χωρίς ωστόσο να σηματοδοτούν κάτι συγκεκριμένο από επιστημονική άποψη (Houghton et al., 1990). Το ΔΘΠ για τα 100 έτη υιοθετήθηκε αργότερα ως δείκτης στο πλαίσιο του Πλαισίου Σύμβασης για την Κλιματική Αλλαγή των Ηνωμένων Εθνών και στο Πρωτόκολλο του Κυότο (Myhre et al.,2013).

Όπως φαίνεται και στην ανωτέρω εξίσωση, είναι ο λόγος της μεταβολής ακτινοβολίας (radiative forcing) από ένα αέριο του θερμοκηπίου προς την αντίστοιχη μεταβολή του CO_2 στα 100 έτη, ο οποίος

εκφράζεται ως kg CO_2-eq/kg GHG. Επομένως το ΔΘΠ του CO_2 είναι 1, ενώ για το μεθάνιο είναι 28 kg CO_2-eq/kg CH_4 (βλέπε Πίνακα 6), το οποίο σημαίνει ότι το μεθάνιο είναι 28 φορές πιο ισχυρό σε σχέση με το CO_2. Η διαφορά στα 20 και στα 100 έτη οφείλεται στο γεγονός ότι το μεθάνιο έχει σχετικά μικρό χρόνο ατμοσφαιρικής ζωής (12 έτη) σε σύγκριση με το χρόνο ζωής του ο οποίος είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερος, το οποίο σημαίνει ότι το ΔΘΠ του μεθανίου μικραίνει όσο μεγαλύτερος είναι ο χρονικός ορίζοντας αναφοράς. Από την άλλη, ένα πιο επίμονο ΑΦΘ όπως το οξείδιο του αζώτου με χρόνο ζωής 121 έτη έχει παρόμοια τιμή στα 20 και στα 100 έτη αναφοράς (Myhre et al.,2013).

Πίνακας 6: Χρόνοι ζωής, ικανότητα απορρόφησης ακτινοβολίας και ΔΘΠ των κύριων ΑΦΘ (Myhre et al. 2013)

ΑΦΘ	Χρόνος ζωής (έτη)	Ικανότητα απορρόφησης ακτινοβολίας (W m^{-2} ppb^{-1})	$ΔΘΠ_{20}$ (kg CO2-eq/kg)	$ΔΘΠ_{100}$ (kg CO2-eq/kg)
Διοξείδιο του άνθρακα CO2	*	1.37E-5	1	1
Μεθάνιο CH4	12.4	3.63E-4	84	28
Υποξείδιο του αζώτου N2O	121	3.00E-3	264	265

** Δεν μπορεί να δοθεί μια μοναδική τιμή για το CO2*

Μέχρι στιγμής το ΔΘΠ αποτελεί το δείκτη κλιματικής αλλαγής ενδιάμεσου επιπέδου που χρησιμοποιείται ομόφωνα στην ΑΚΖ. Το ΔΘΠ-100 έτη χρησιμοποιείται στην ΑΔΚΖ ως συντελεστής χαρακτηρισμού.

8.4.2 Εξάντληση του όζοντος της στρατόσφαιρας (Stratospheric ozone depletion)

Η συγκέντρωση όζοντος στην στρατόσφαιρα προκύπτει από την ισορροπία μεταξύ τη δημιουργία και την καταστροφή όζοντος κάτω από την επιρροή την ηλιακής υπεριώδους ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της παρουσίας άλλων χημικών. Ο ετήσιος κύκλος της καταστροφής όζοντος στην περιοχή των πόλων αναπτύσσεται κάτω από την παρουσία διαφόρων παραγόντων, με την έντασή του να εξαρτάται άμεσα από τη συνδυασμένη ένταση των παραγόντων αυτών: (i) μετεωρολογικοί παράγοντες (δλδ. ισχυροί άνεμοι στην στρατόσφαιρα και χαμηλή θερμοκρασία) και (ii) παρουσία χημικών που καταστρέφουν το όζον (Rosenbaum et al., 2018a).

Οι μετεωρολογικοί παράγοντες περιλαμβάνουν τη δημιουργία του πολικού στρόβιλου (polar vortex), ένα παραπόλιο φαινόμενο στρατοσφαιρικού ανέμου τις πολικές νύχτες κατά τη διάρκεια του πολικού χειμώνα, όταν δεν φτάνει σχεδόν καθόλου ηλιακό φως στους πόλους. Αυτός ο στρόβιλος απομονώνει τον αέρα στα πολικά γεωγραφικά πλάτη από την υπόλοιπη ατμόσφαιρα της Γης, αποτρέποντας την είσοδο του όζοντος και άλλων μορίων. Καθώς συνεχίζει το σκοτάδι, ο αέρας μέσα στον στρόβιλο ψυχραίνει πολύ, με τις θερμοκρασίες να πέφτουν κάτω από τους −80 °C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες ένα μια ειδική μορφή νεφών ξεκινά να σχηματίζεται, τα Πολικά Στρατοσφαιρικά Νέφη (ΠΣΝ). Αυτά τα νέφη αποτελούνται από σωματίδια τρι-ενυδατωμένου νιτρικού οξέος, τα οποία μπορούν να σχηματίσουν μεγαλύτερα σωματίδια πάγου που θα περιέχουν διαλυμένο νιτρικό οξύ στον πυρήνα τους όσο η θερμοκρασία συνεχίζει να πέφτει. Η παρουσία των ΠΣΝ είναι καθοριστική για την επιταχυμένη εξάντληση του όζοντος πάνω από τις πολικές περιοχές καθώς δημιουργούν μια στερεά φάση στον κατά τα άλλα καθαρό στρατοσφαιρικό αέρα, στον οποίο λαμβάνουν χώρα πιο αποτελεσματικά οι διεργασίες καταστροφής του όζοντος (Rosenbaum et al., 2018a).

Οι χημικοί παράγοντες περιλαμβάνουν την παρουσία ενώσεων χλωρίου και βρωμίου στην ατμόσφαιρα. Η πλειοψηφία των ενώσεων χλωρίου και οι μισές από τις ενώσεις βρωμίου που φτάνουν στην στρατόσφαιρα πηγάζουν από ανθρώπινες δραστηριότητες. Λόγω της ιδιαίτερης σταθερότητάς τους, οι χλωροφθοράνθρακες δεν αποδομούνται στην τροπόσφαιρα αλλά μεταφέρονται με τα χρόνια στην στρατόσφαιρα. Εκεί, διασπώνται σε δραστικές ρίζες χλωρίου κάτω από την επιρροή της ενεργειακά πλούσιας υπεριώδους ακτινοβολίας στα ανώτερα στρώματα της στιβάδας του όζοντος. Ένα άτομο χλωρίου μπορεί να διασπάσει πολύ μεγάλο αριθμό μορίων όζοντος, πριν να αδρανοποιηθεί τελικά μέσω της αντίδρασης με οξείδια αζώτου και το μεθάνιο στην στρατόσφαιρα (Rosenbaum et al., 2018a).

Αυτές οι σταθερές μορφές χλωρίου και βρωμίου, όταν απομονώνονται στον πολικό στρόβιλο και υπό την παρουσία των ΠΣΝ, έρχονται σε επαφή με ετερογενείς φάσεις (αέρια/υγρή ή αέρια/στερεή) στην επιφάνεια των σωματιδίων που σχηματίζουν τα ΠΣΝ, και διασπώνται απελευθερώνοντας το ενεργοποιημένο ελεύθερο χρώμιο και βρώμιο, που είναι γνωστά ως «ενεργές» ουσίες που καταστρέφουν το όζον (Ozone Depleting Substances - ODS). Αυτές οι αντιδράσεις είναι πολύ γρήγορες και ενισχύονται από την παρουσία των ΠΣΝ. Η μείωση της στοιβάδας του όζοντος οδηγεί σε αυξημένη ένταση της UVB ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης, η οποία μπορεί να προκαλέσει επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (καρκίνος δέρματος, καταρράκτη, καταστολή του ανοσοποιητικού συστήματος) και στα οικοσυστήματα (Rosenbaum et al., 2018a).

Ο ενδιάμεσος δείκτης που χρησιμοποιείται σε όλες τις μεθόδους Εκτίμησης Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής (Life Cycle Impact Assessment) για το χαρακτηρισμό της επίπτωσης είναι το Δυναμικό Εξάντλησης του Όζοντος (Ozone Depletion Potential - ODP). Το ODP αξιολογεί το δυναμικό ενός χημικού να καταστρέψει τη στοιβάδα του όζοντος με βάση ένα μοντέλο του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (WMO, 2014). Το ODP εκφράζει την παγκόσμια μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος λόγω μιας ουσίας i που καταστρέφει το όζον (ODS) σε σχέση με τη σχετική μείωση της συγκέντρωσης όζοντος στην στρατόσφαιρα C_{O_3} από 1kg CFC-11 ($CFCl_3$), και επομένως εκφράζεται σε ισοδύναμα CFC-11:

$$\mathrm{ODP}_i = \frac{\Delta C_{O_3}(i)}{\Delta C_{O_3}(\mathrm{CFC}-11)}$$

Οι ενώσεις αλογόνων στην στρατόσφαιρα προέρχονται κυρίως από πολύ σταθερά βιομηχανικά αέρια αλογονονθράκων που χρησιμοποιούνται ως διαλύτες ή ψυκτικά μέσα (χλωριωμένοι CFCs, φρέον), ή ως πυροσβεστήρες (τα βρωμιούχα αλογόνα). Οι κύριες χρήσεις των ODS κατά τον τελευταίο αιώνα ήταν: συστήματα πυρόσβεσης, πλαστικοί αφροί, προωθητικά αέρια σε δοχεία ψεκασμού, καπνιστικά και παρασιτοκτόνα, δοσιμετρικές συσκευές εισπνοής, ψύξη και κλιματισμός και διαλύτες απολίπανσης. Φυσικές ουσίες που εξαντλούν το όζον είναι τα CH_4, N2O, H_2O και οι αλογονούχες ενώσεις με επαρκή σταθερότητα και/ή ρυθμούς απελευθέρωσης προκειμένου να φτάσουν στην στρατόσφαιρα (Rosenbaum et al., 2018a).

8.4.3 Φωτοχημικός σχηματισμός όζοντος/οξειδωτικών (Photochemical Ozone/Oxidant Formation)

Ο φωτοχημικός σχηματισμός του όζοντος και άλλων δραστικών ενώσεων οξυγόνου στην τροπόσφαιρα από εκπομπές VOCs και NOx βασίζονται σε σχετικά σύνθετες αντιδράσεις, οι οποίες εξαρτώνται από τη φύση της συγκεκριμένης οργανικής ένωσης που εκπέμπεται. Οι αντιδράσεις αυτές μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα στάδια (Rosenbaum et al., 2018a):

1. Τα VOCs ή CO αντιδρούν με ρίζες υδροξυλίου στην τροπόσφαιρα και σχηματίζουν ρίζες υπεροξυλίου
2. Οι ρίζες υπεροξυλίου οξειδώνουν το NO σε NO2
3. Το NO2 διασπάται από το ηλιακό φως και σχηματίζεται NO ενώ απελευθερώνονται ελεύθερα άτομα οξυγόνου
4. Τα ελεύθερα άτομα οξυγόνου αντιδρούν με το μοριακό οξυγόνο για να σχηματίσουν όζον.

Τόσο οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) όσο και τα οξείδια του αζώτου είναι απαραίτητα για το φωτοχημικό σχηματισμό του όζοντος και συνεισφέρουν στο σχηματισμό και άλλων οξειδωτικών. Οι εκπομπές VOCs περιλαμβάνουν εκατοντάδες διαφορετικές οργανικές ενώσεις, ανάλογα με τη φύση της πηγής και τη δραστηριότητα που προκαλεί την εκπομπή. Αυτό σημαίνει ότι σε επίπεδο περιφέρειας, ο φωτοχημικός σχηματισμός του όζοντος είναι μη-γραμμικός και δυναμικός με την επιρροή μετεωρολογικών συνθηκών και, κυρίως με την αλληλεπίδραση των διαφορετικών VOCs από ανθρωπογενείς και φυσικές πηγές (όπως τα δάση), και ενός μεγάλου αριθμού προϊόντων των αντιδράσεων.

Τα NO μπορούν να αντιδράσουν με το σχηματισμένο όζον, αφαιρώντας ένα άτομο οξυγόνου για να δώσουν οξυγόνο και NO2. Αυτό σημαίνει ότι ανάλογα με τις συνθήκες, το NO μπορεί τοπικά να έχει ένα αρνητικό δυναμικό σχηματισμού όζοντος και επομένως ένα αρνητικό συντελεστή χαρακτηρισμού για αυτή την κατηγορία επίπτωσης. Αυτή η αντίδραση στην ουσία οδηγεί στη γεωγραφική μετατόπιση του σχηματισμού όζοντος, καθώς το NO2 που δημιουργείται μπορεί αργότερα να προκαλέσει ξανά το σχηματισμό όζοντος σε διαφορετική τοποθεσία (Rosenbaum et al., 2018a).

Τα ζώα και οι άνθρωποι εκτίθενται κυρίως στα φωτοχημικά οξειδωτικά μέσω της εισπνοής του αέρα και επομένως οι επιπτώσεις εμφανίζονται στα αναπνευστικά όργανα. Το όζον εντοπίζεται από τη μυρωδιά του σε μια συγκέντρωση πάνω από 20 ppb σε καθαρό αέρα, αλλά μόνο σε σχετικά υψηλότερες συγκεντρώσεις αρχίζουν να εμφανίζονται έντονα συμπτώματα όπως αυξημένη δυσκολία αναπνοής και ενόχληση στα μάτια, ενώ οι πιο σοβαρές επιπτώσεις περιλαμβάνουν πνευμονικό οίδημα. Τα επεισόδια φωτοχημικού νέφους με ιδιαίτερα υψηλές συγκεντρώσεις φωτοχημικών οξειδωτικών σε αστικές περιοχές προκαλούν αυξημένη θνησιμότητα. Οι μακροχρόνιες εκθέσεις σε φωτοχημικά οξειδωτικά μπορούν να προκαλέσουν χρόνιες παθήσεις του αναπνευστικού (Rosenbaum et al., 2018a).

Τα φυτά βασίζονται στη συνεχή ανταλλαγή αέρα μεταξύ των φωτοσυνθετικών τους στελεχών και της ατμόσφαιρας για την απορρόφηση διοξειδίου του άνθρακα. Το όζον και άλλα φωτοχημικά οξειδωτικά εισέρχονται μαζί με τον αέρα στα φυτά και μέσω των οξειδωτικών τους ιδιοτήτων καταστρέφουν τα φωτοσυνθετικά οργανίδια, οδηγώντας σε μείωση της ανάπτυξής τους (Rosenbaum et al., 2018a).

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι εκπομπές των επιμέρους ουσιών είναι γνωστή, αλλά στην περίπτωση των προϊόντων πετρελαίου αποτελούνται από πολλές διαφορετικές ουσίες οι οποίες προσδιορίζονται ως VOCs ή nmVOCs (VOC χωρίς μεθάνιο, καθώς αυτό υπολογίζεται ξεχωριστά στην κατηγορία Κλιματική αλλαγή λόγω της φύσης του ως ισχυρό ΑΦΘ) και μερικές φορές ως HCs ή nmHCs (HC χωρίς μεθάνιο). Οι πιο σημαντικές ανθρωπογενείς εκπομπές VOCs προέρχονται από την οδική κυκλοφορία και τη χρήση οργανικών διαλυτών, οι οποίοι την περίοδο 2000-2010 ήταν υπεύθυνοι για το 40% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών nmVOCs στην Ευρώπη. Οι βιομηχανικές διεργασίες είναι υπεύθυνες για ένα 7% και οι διαφεύγουσες εκπομπές για ένα 10% (Laurent and Hauschild, 2014). Οι VOCs εκπέμπονται επίσης σε μεγάλες ποσότητες από τη βλάστηση, και συγκεκριμένα τα δάση, αλλά υπολογίζονται στην απογραφή δεδομένων κύκλου ζωής, μόνο στην περίπτωση που επηρεάσει τις εκπομπές ένας ανθρώπινος χειρισμός του φυσικού συστήματος.

Το μονοξείδιο του άνθρακα παράγεται από τις διεργασίες καύσης με ανεπαρκή παροχή οξυγόνου. Αυτές περιλαμβάνουν την οδική κυκλοφορία και τις διάφορες μορφές ατελούς καύσης ορυκτών καυσίμων ή

βιομάζας. Από τις διεργασίες καύσης στις μεταφορές αλλά και σε συστήματα ενέργειας και καύσης αποβλήτων εκπέμπονται επίσης οξείδια αζώτου.

Στη παρούσα διατριβή, ο συντελεστής χαρακτηρισμού ενδιάμεσου σημείου του φωτοχημικού σχηματισμού όζοντος είναι kg NMVOC eq. σύμφωνα με τη μέθοδο μοντελοποίησης που προτείνεται από τους van Zelm et al. (2008). Η μέθοδος αυτή μοντελοποιεί την τροποσφαιρική αύξηση του όζοντος και χρησιμοποιείται επίσης από τη μέθοδο ReCiPe.

8.4.4 Οξίνιση (Acidification)

Η οξίνιση του εδάφους ή των υδατικών οικοσυστημάτων μπορεί να οριστεί ως μια επίπτωση που οδηγεί στη μείωση της ικανότητας εξουδετέρωσης οξέων ενός συστήματος (acid neutralising capacity - ANC), δηλαδή στη μείωση της ποσότητας των ουσιών σε ένα σύστημα που είναι ικανά να εξουδετερώσουν τα ιόντα υδρογόνου που προστίθενται. Η ANC μπορεί να μειωθεί από (i) την προσθήκη ιόντων υδρογόνου τα οποία παίρνουν τη θέση άλλων κατιόντων τα οποία εκπλένονται από το σύστημα και (ii) την πρόσληψη των κατιόντων από φυτά ή άλλη βιομάζα η οποία συλλέγεται και απομακρύνεται από το σύστημα. Το σημείο (i) είναι ιδιαίτερα σχετικό για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων οξίνισης σε μια AKZ (Rosenbaum et al., 2018a).

Η οξίνιση συμβαίνει φυσικά με τον χρόνο αλλά αυξάνεται σημαντικά από την ανθρωπογενή προσθήκη ιόντων υδρογόνου στο έδαφος και τη βλάστηση. Η κύρια πηγή είναι οι αέριες εκπομπές αερίων που απελευθερώνουν υδρογόνο όταν αποδομούνται στην ατμόσφαιρα ή μετά την επικάθιση στο έδαφος, τη βλάστηση ή το νερό. Η επικάθιση αυξάνεται κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης όπου τα αέρια διαλύονται στο νερό της βροχής, η οποία μπορεί να γίνει ιδιαίτερα όξινη με τιμές pH 3–4 σε περιπτώσεις υψηλής αέριας ρύπανσης. Οι πιο σημαντικές ανθρωπογενείς οξεοποιητικές ενώσεις είναι (Rosenbaum et al., 2018a):

- Τα οξείδια του θείου, SO_2 και SO_3 (ή SOx), οι ανυδρίτες θειώδους και θειικού οξέος H2SO3 και H2SO4. Με την προσρόφηση νερού από την ατμόσφαιρα σχηματίζουν αυτά τα πολύ ισχυρά οξέα τα οποία απελευθερώνουν δύο ιόντα υδρογόνου όταν επικάθονται.
- Οξείδια του αζώτου, NO και NO2 (ή NOx), τα οποία είναι επίσης όξινοι ανυδρίτες καθώς μπορούν να μετατραπούν σε νιτρικά και νιτρώδη οξέα με οξείδωση στην τροπόσφαιρα. Το NO οξειδώνεται σε NO2 κυρίως μέσω της αντίδρασης με το όζον. Το NO2 μπορεί να οξειδωθεί σε νιτρικό οξύ.
- Η αμμωνία η οποία είναι από μόνη της βάση αλλά με την πλήρη οξείδωση μέσω NO_2^+ σε NO_3^-, απελευθερώνει ένα καθαρό πρωτόνιο.
- Ισχυρά οξέα όπως το υδροχλωρικό οξύ HCl ή το θειικό οξύ H2SO4, τα οποία απελευθερώνουν το περιεχόμενό τους σε ιόντα υδρογόνου μόλις διαλυθούν στο νερό και επομένως είναι ιδιαίτερα οξεοποιητικά.

Λόγω της υψηλής τους υδατοδιαλυτότητας, ο χρόνος παραμονής στην ατμόσφαιρα αυτών των οξεοποιητικών ουσιών περιορίζεται σε λίγες μέρες, και επομένως η οξίνιση είναι ένα περιοχικό φαινόμενο με το εύρος του να περιορίζεται στην περιοχή γύρω από την εκπομπή.

Όταν οι οξεοποιητικές ενώσεις επικάθονται στα φύλλα ή τις βελόνες των φυτών και μπορούν να βλάψουν τα φυτά. Όταν οι ενώσεις αυτές φτάσουν στο έδαφος, τα πρωτόνια απελευθερώνονται στο έδαφος όπου μπορούν να μειώσουν το pH του εδαφικού νερού και να προκαλέσουν την απελευθέρωση μεταλλικών ιόντων από το έδαφος. Μερικά από αυτά τα μέταλλα είναι τοξικά και άλλα είναι ευεργετικά για την ανάπτυξη των φυτών, αλλά μετά την απελευθέρωσή τους, εκπλένονται και η διαθεσιμότητα τους για τα φυτά μπορεί να γίνει περιοριστική για την ανάπτυξή τους. Οι λίμνες επίσης εκτίθενται στην

οξίνιση, ιδιαίτερα μέσω του οξινισμένου εδαφικού νερού που εκπλένεται στη λίμνη. Όταν το pH μιας λίμνης πέφτει, η διαθεσιμότητα του άνθρακα στο νερό στην κυρίαρχη μορφή του σε ουδέτερο pH (HCO3) μετατρέπεται σε διαλυμένο CO_2. Η διαλυτότητα των τοξικών μετάλλων αυξάνεται με επιπτώσεις στην χλωρίδα αλλά και στην πανίδα. Τα χουμικά οξέα που δίνουν στο νερό της λίμνης το καφέ χρώμα καθιζάνουν και οι οξινισμένες λίμνες φαίνονται καθαρές και μπλε. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις CO_2 στην ατμόσφαιρα μπορούν να προκαλέσουν οξίνιση των ωκεανών μέσω της διάλυσης του CO_2 στο θαλασσινό νερό, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μια μικρή μείωση του pH στον ανοιχτό ωκεανό. Η διάλυση του CO_2 στο νερό παράγει ανθρακικό οξύ, ένα σχετικά αδύναμο οξύ το οποίο απελευθερώνει πρωτόνια. Η μείωση του pH είναι καταστροφική για τους κοραλλιογενείς ύφαλους. Τα διοξείδια του θείου και τα οξείδια του αζώτου είναι οι κύριες ανθρωπογενείς πηγές που συνεισφέρουν περισσότερο στο φαινόμενο της οξίνισης. Ιστορικά, τα μεταλλουργεία της εξορυκτικής βιομηχανίας υπήρξαν σημαντικές πηγές τοπικής οξίνισης με μεγάλες τοπικές εκπομπές οξειδίων του θείου. Σήμερα οι κύριες πηγές των SOx και NOx είναι οι διεργασίες καύσης σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι μηχανές καύσης, οι μονάδες καύσης αποβλήτων και οι αποκεντρωμένες κάμινοι. Το επίπεδο εκπομπών οξειδίων του θείου εξαρτάται από το περιεχόμενο σε θείο των καυσίμων. Καθώς το άζωτο είναι άφθονο στην ατμόσφαιρα και σε όλες τις διεργασίες καύσης που χρησιμοποιούν αέρα, οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου καθορίζονται κυρίως από τις συνθήκες της καύσης και την επεξεργασία των καυσαερίων με καταλύτες και φίλτρα. Λόγω των σοβαρών προβλημάτων με την οξίνιση στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική στο παρελθόν, η νομοθεσία πλέον διασφαλίζει ότι το περιεχόμενο σε θείο απομακρύνεται από τα καύσιμα, ότι στις σημαντικές διεργασίες καύσης εξουδετερώνονται τα καυσαέρια προτού απελευθερωθούν, και ότι οι μηχανές καύσης έχουν καταλύτες (Rosenbaum et al., 2018a).

Οι κύριες εκπομπές αμμωνίας συνδέονται με την χρήση της στη γεωργία σαν λίπασμα και στην κτηνοτροφία, με τις εκπομπές να προέρχονται από τους στάβλους και την διασπορά κοπριάς.

Ο συντελεστής χαρακτηρισμού ενδιάμεσου σημείου της κατηγορίας οξίνισης που επιλέγεται στην παρούσα διατριβή είναι τα mol H+ eq. (Posch et al., 2008), με βάση τη μέθοδο της συσσωρευμένης υπέρβασης (accumulated exceedance, AE), η οποία ενσωματώνει τόσο την έκταση υπέρβασης όσο και την ποσότητα υπέρβασης (Seppälä et al., 2006). Ο συντελεστής είναι χωρικά-εξαρτώμενος και έχει υπολογιστεί για 35 Ευρωπαϊκές χώρες (συμπ. της Ελλάδας). Ειδικότερα, ο δείκτης AE σχετίζεται με τη συνάρτηση του κρίσιμου φορτίου οξίνισης από την εναπόθεση αζώτου και θείου και την απαιτούμενη μείωση του φορτίου για την αποκατάσταση της υπέρβασης.

8.4.5 Ευτροφισμός (Eutrophication)

Ο ευτροφισμός ουσιαστικά περιγράφει τον εμπλουτισμό των υδατικού περιβάλλοντος με θρεπτικά άλατα οδηγώντας σε αυξημένη παραγωγή βιομάζας από φύκη, ζελατινώδους ζωοπλαγκτόν και ανώτερων υδατικών φυτών, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση την ποιότητας του νερού, τη διατάραξη της σύνθεσης των ειδών του οικοσυστήματος και την ανάπτυξη τοξικού φυτοπλαγκτόν, κυανοβακτηρίων ή μπλε-πράσινων φυκών. Επομένως, μειώνεται η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου με συνέπεια την απώλεια βιοποικιλότητας.

Για τα χερσαία οικοσυστήματα, το πιο σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα σε σχέση με τα φορτία αζώτου είναι οι αλλαγές στη λειτουργία και τη σύνθεση των ειδών σε φτωχά σε άζωτο οικοσυστήματα. Για τον ευτροφισμό των υδατικών οικοσυστημάτων, το εναρκτήριο σημείο της αλυσίδας αιτίου-αποτελέσματος είναι η εκπομπή μιας ένωσης που περιέχει άζωτο ή φώσφορο. Η αυξημένη διαθεσιμότητα των θρεπτικών αυξάνουν την ανάπτυξη φυκών και φυτών, ειδικά το καλοκαίρι με το άφθονο φως. Τα φύκη βυθίζονται στην πυθμένα όπου αποδομούνται με την κατανάλωση οξυγόνου στο

κατώτερο στρώμα. Καθώς το ηλιακό φως δεν μπορεί να φτάσει στα βαθύτερα στρώματα νερού, η συσσώρευση της θερμοκρασίας στα ανώτερα στρώματα, δημιουργεί στρωματοποίηση τους καλοκαιρινούς μήνες. Στο θαλάσσιο περιβάλλον, η στρωματοποίηση καθορίζεται από τις διαφορές πυκνότητας μεταξύ του θαλασσινού νερού και του υφάλμυρου νερού από τα ποτάμια και τα φιορδ. Η στρωματοποίηση εμποδίζει την αποτελεσματική ανάμειξη της υδάτινης στήλης. Εάν δεν φτάσει στα κατώτερα στρώματα φρέσκο νερό, πλούσιο σε οξυγόνο από την επιφάνεια, το οξυγόνο στον πυθμένα θα μειωθεί σταδιακά και οι οργανισμοί που διαβιούν εκεί θα φύγουν ή θα πεθάνουν. Καθώς η συγκέντρωση οξυγόνου πλησιάζει το μηδέν, σχηματίζονται δηλητηριώδεις ουσίες οι οποίες σκοτώνουν τους οργανισμούς που εκτίθενται σε αυτές (Rosenbaum et al., 2018a).

Λόγω της χρήσης ανόργανων λιπασμάτων και κοπριάς, η γεωργία είναι μια σημαντική πηγή εκπομπών φωσφόρου και αζώτου, οι οποίες επηρεάζουν τα υπόγεια ύδατα μέσω της διήθησης και τα επιφανειακά ύδατα μέσω της απορροής και της έκπλυσης. Η γεωργία ευθύνεται επίσης για τις εκπομπές αμμωνίας στον αέρα οι οποίες στην συνέχεια επικάθονται σε έδαφος κοντά σε ύδατα. Οξείδια αζώτου μπορεί να εκπέμπονται από διεργασίες καύσης. Σημαντικές πηγές φωσφόρου και νιτρικών μπορεί να είναι σημειακές πηγές όπως μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων από οικίες (από τα οικιακά απορρυπαντικά) και τη βιομηχανία, αλλά και οι ιχθυοκαλλιέργειες. Εκτός από τις ανθρωπογενείς εκπομπές, οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν την έκπλυση και απορροή αζώτου και φωσφορικών. Η φυσική προσθήκη θρεπτικών σε χερσαίες περιοχές θεωρείται ότι περιλαμβάνει κυρίως στην επικάθιση από την ατμόσφαιρα οξειδίων του αζώτου και αμμωνίας, ενώ μερικά φυσικά είδη φυτών επίσης έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν το ατμοσφαιρικό άζωτο.Οι εκπομπές οργανικών υλικών μπορεί να οδηγήσουν σε κατανάλωση οξυγόνου από τα βακτήρια που αποδομούν το οργανικό υλικό, συνεισφέροντας έτσι στην εξάντληση του οξυγόνου παρόμοια με αυτό που παρατηρείται ως αποτέλεσμα του θρεπτικού εμπλουτισμού των υδάτων (Rosenbaum et al., 2018a).

Ο συντελεστής χαρακτηρισμού ενδιάμεσου σημείου της κατηγορίας χερσαίος ευτροφισμός που επιλέγεται στην παρούσα διατριβή είναι τα mol N eq. (Posch et al., 2008), με βάση τη μέθοδο της συσσωρευμένης υπέρβασης (accumulated exceedance, AE), η οποία ενσωματώνει τόσο την έκταση υπέρβασης όσο και την ποσότητα υπέρβασης (Seppälä et al., 2006). Ειδικότερα, ο δείκτης AE σχετίζεται με τη συνάρτηση του κρίσιμου φορτίου ευτροφισμού από την εναπόθεση θρεπτικού αζώτου (NOx, NH3) και την απαιτούμενη μείωση του φορτίου για την αποκατάσταση της υπέρβασης.

Για την περίπτωση του ευτροφισμού στα γλυκά και θαλάσσια ύδατα χρησιμοποιείται η μέθοδος ενδιάμεσου σημείου του ReCiPe (Struijs et al., 2009). Η μέθοδος αυτή αφορά το χρόνο παραμονής των P και N στα γλυκά και θαλάσσια ύδατα και εκφράζεται ως kg P eq. και kg N eq. αντίστοιχα.

8.4.6 Οικοτοξικότητα (Ecotoxicity)

Κάθε ουσία που εκπέμπεται μπορεί να οδηγήσει σε τοξικές επιπτώσεις ανάλογα με ένα αριθμό παραγόντων, όπως η εκπεμπόμενη ποσότητα, η κινητικότητα, η επιμονή, τα πρότυπα έκθεσης και βιοδιαθεσιμότητας και η τοξικότητα. Οι χημικές εκπομπές στο περιβάλλον επηρεάζουν τα χερσαία, υδάτινα, θαλάσσια και αέρια οικοσυστήματα ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στο μέρος κατά το χρόνο της εκπομπής και τα χαρακτηριστικά της εκπεμπόμενης ουσίας. Μπορούν να επηρεάσουν τους φυσικούς οργανισμούς με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, προκαλώντας αυξημένη θνησιμότητα, μειωμένη κινητικότητα, μειωμένους ρυθμούς ανάπτυξης ή αναπαραγωγής, μεταλλάξεις, συμπεριφορικές αλλαγές, αλλαγές στη βιομάζα ή στη φωτοσύνθεση κτλ. Ο περιβαλλοντικός μηχανισμός για τις οικοτοξικές επιπτώσεις των χημικών στην AKZ μπορεί να περιγραφεί σε τέσσερα στάδια (Rosenbaum et al., 2018a):

i. Μοντελοποίηση της πορείας (fate modelling) μιας ουσίας για την εκτίμηση της αύξησης της συγκέντρωσης σε ένα περιβαλλοντικό μέσο λόγω μιας συγκεκριμένης ποσότητας εκπομπής.
ii. Μοντελοποίηση της έκθεσης (exposure modelling) για την ποσοτικοποίηση της βιοδιαθεσιμότητας του χημικού στο περιβαλλοντικό μέσο με τον προσδιορισμό του βιοδιαθέσιμου κλάσματος στη συνολική συγκέντρωση.
iii. Το μοντέλο επίπτωσης (effect model) συσχετίζει τη διαθέσιμη ποσότητα με την επίπτωση σε ένα οικοσύστημα (δείκτης ενδιάμεσου σημείου).
iv. Το μοντέλο βλάβης (damage model) μεταφράζει τις επιπτώσεις στο οικοσύστημα στην αλλαγή του πληθυσμού του οικοσυστήματος (βιοποικιλότητα) στο χρόνο και το χώρο.

Το μοντέλο πορείας προβλέπει τη συμπεριφορά/κατανομή των χημικών στο περιβάλλον λαμβάνοντας υπόψη τα διάφορα μέσα και τη χωρική μεταφορά τους μεταξύ των περιβαλλοντικών τμημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μοντελοποίηση θερμοδυναμικών διεργασιών ανταλλαγής καθώς και διεργασιών βιοτικής ή αβιοτικής αποδόμησης ή ταφής σε ιζήματα. Η αποδόμηση είναι μια σημαντική διεργασία εξασθένησης για τις περισσότερες οργανικές ουσίες, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσει και σε δημιουργία τοξικών ενώσεων. Ο ρυθμός με τον οποίο συμβαίνει η αποδόμηση βασίζεται στο χρόνο ημιζωής της ουσίας στο μέσο και εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες της ουσίας όσο και σε περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, η έκθεση στο φως ή η παρουσία αντιδραστικών παραγόντων. Η βασική αρχή πίσω από το μοντέλο πορείας είναι το ισοζύγιο μάζας για κάθε τμήμα το οποίο οδηγεί σε ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων (Rosenbaum et al., 2018a).

Ως έκθεση θεωρείται η επαφή μεταξύ του οργανισμού δέκτη και του ρυπαντή για μια ορισμένη διάρκεια και συχνότητα. Το μοντέλο έκθεσης λαμβάνει υπόψη ότι δεν είναι απαραίτητα διαθέσιμη προς έκθεση στους οργανισμούς όλη η χημική συγκέντρωση στο περιβάλλον. διάφοροι παράγοντες και διεργασίες όπως η προσρόφηση, η διάλυση, η διάσπαση και η συσσώρευση μπορούν να επηρεάσουν τη διαθέσιμη ποσότητα για την έκθεση του οικοσυστήματος. Το μοντέλο επίπτωσης χαρακτηρίζει το σύνολο των ειδών σε ένα οικοσύστημα που θα επηρεαστεί από μία συγκεκριμένη χημική έκθεση. Οι επιπτώσεις περιγράφονται ποσοτικά μέσα από εργαστηριακές δοκιμές οι οποίες παράγουν καμπύλες συγκέντρωσης-απόκρισης που συσχετίζουν τη συγκέντρωση ενός χημικού με το ποσοστό μιας δοκιμαστικής ομάδας που επηρεάζεται. Ένα μοντέλο βλάβης, το οποίο ενσωματώνει τη σοβαρότητα της επίπτωσης, πηγαίνει ακόμα πιο μακριά από την αλυσίδα αιτίου-αποτελέσματος και ποσοτικοποιεί πόσα είδη εξαφανίζονται από ένα οικοσύστημα (Rosenbaum et al., 2018a).

Τα χημικά είναι ο κύριος πυλώνας της βιομηχανοποιημένης μας οικονομίας, χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλα τα προϊόντα παγκοσμίως και επομένως είναι πολυάριθμα, χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες και εκπέμπονται από σχεδόν όλες τις διεργασίες. Οι κατηγορίες τοξικότητας (οικοτοξικότητα, τοξικότητα στον άνθρωπο) είναι διαφορετικές από κάθε άλλη κατηγορία επίπτωσης, καθώς ενώ σε καμία άλλη κατηγορία οι στοιχειώδεις ροές δεν υπερβαίνουν τις 100, στις κατηγορίες αυτές πρέπει να χαρακτηριστούν δεκάδες χιλιάδες χημικών με μεγάλες διαφορές στην ικανότητά τους να προκαλέσουν τοξικές επιπτώσεις.

Η μέθοδος χαρακτηρισμού για την κατηγορία οικοτοξικότητας που επιλέγεται στα πλαίσια της διατριβής αυτής βασίζεται στο μοντέλο USEtox (Rosenbaum et al., 2008) το οποίο προτείνεται από κεντρικούς παγκόσμιους οργανισμούς όπως το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (United Nations Environment Program – UNEP), την Κοινωνία Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας (Society of Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC), την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ για το χαρακτηρισμό της οικοτοξικότητας και της τοξικότητας για τον άνθρωπο στην ΕΕΚΖ (LCIA).

Η μονάδα χαρακτηρισμού του δείκτη οικοτοξικότητας είναι η Συγκριτική Μονάδα Τοξικότητας για οικοσυστήματα (Comparative Toxic Unit for ecosystems, CTUe). Η οικοτοξικότητα προς το παρόν

υπολογίζεται μόνο για τα υδρόβια είδη των γλυκών υδάτων, ενώ δεν υπολογίζεται για άλλα οικοσυστήματα και για τα ιζήματα.

8.4.7 Τοξικότητα στον άνθρωπο (Human toxicity)

Η τοξικότητα στον άνθρωπο εξαρτάται από την εκπεμπόμενη ποσότητα της ουσίας, την κινητικότητα, την επιμονή, τα πρότυπα έκθεσης και το επίπεδο τοξικότητας για τον άνθρωπο. Η χημική έκθεση των ανθρώπων μπορεί να προκύψει από εκπομπές στο περιβάλλον που επηρεάζουν όλο τον πληθυσμό, αλλά επίσης από τα πολλά χημικά συστατικά στα προϊόντα που απελευθερώνονται κατά την παραγωγή, χρήση ή τη διαχείριση κατά το τέλος του κύκλου ζωής τους, επηρεάζοντας έτσι τους εργάτες ή τους καταναλωτές. Η χημικές εκπομπές είναι υπεύθυνες για, ή συνεισφέρουν σε, τόσες πολλές επιπτώσεις για την υγεία όπως μια ευρεία ποικιλία μη καρκινικών ασθενειών αλλά και σε αυξημένους κινδύνους καρκίνου για αυτά τα χημικά τα οποία είναι καρκινογόνα (Rosenbaum et al., 2018a).

Η μοντελοποίηση των τοξικολογικών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία ενός χημικού που εκπέμπεται στο περιβάλλον, είτε αυτό απελευθερώνεται εσκεμμένα (π.χ. παρασιτοκτόνα στη γεωργία), σαν παραπροϊόν από βιομηχανικές διεργασίες, ή από ατύχημα, προκαλεί μια αλυσίδα αιτίου-αποτελέσματος, συνδέοντας τις εκπομπές και τις επιπτώσεις. Η αλυσίδα συνδέει τις εκπομπές στο περιβάλλον και την πρόσληψη της ουσίας από τον πληθυσμό μέσω των τροφίμων και της αναπνοής με ένα αριθμό κινδύνων για την ανθρώπινη υγεία με βάση τη σχέση δόσης-απόκρισης για το χημικό και τελικά τη βλάβη στην υγεία όλου του πληθυσμού. Το μοντέλο πορείας είναι ίδιο με αυτό που περιγράφεται στην κατηγορία επίπτωσης Οικοτοξικότητα (Ενότητα 8.4.6) και για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζεται ξανά εδώ. Το μοντέλο έκθεσης συσχετίζει την ποσότητα των χημικών σε συγκεκριμένο περιβαλλοντικό τμήμα με την χημική πρόσληψη από τους ανθρώπους. Μπορεί να διαφοροποιηθεί στην άμεση πρόσληψη (π.χ. από τον αέρα και την πόσιμο νερό), την έμμεση πρόσληψη μέσω διεργασιών βιοσυγκέντρωσης σε δερματικούς ιστούς ζώων (κρέας, ψάρι και γάλα) και την πρόσληψη με δερματική επαφή. Το μοντέλο επίπτωσης συσχετίζει την ποσότητα της χημικής πρόσληψης από τον πληθυσμό μέσω ενός συγκεκριμένου μονοπατιού έκθεσης με τις τοξικές επιπτώσεις του χημικού μόλις εισέλθει στον ανθρώπινο οργανισμό και μπορεί να μεταφραστεί ως η αύξηση στον αριθμό των περιστατικών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία του εκτιθέμενου πληθυσμού ανά μονάδα πρόσληψης (Rosenbaum et al., 2018a).

Οι σχετικές εκπομπές και οι κύριες πηγές για την κατηγορία αυτή είναι ίδιες με αυτές της κατηγορίας οικοτοξικότητας (Ενότητα 8.4.6) και για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζονται ξανά εδώ.

Ο συντελεστής χαρακτηρισμού του ενδιάμεσου σημείου της τοξικότητας για τον άνθρωπο εκφράζει την τοξική επίπτωση στον παγκόσμιο ανθρώπινο πληθυσμό ανά μονάδα μάζας που εκπέμπεται στο περιβάλλον (αριθμός περιστατικών/kg εκπεμπόμενης ουσίας) και μπορεί να ερμηνευτεί ως η αύξηση του κινδύνου για τον πληθυσμό περιστατικών ασθενειών λόγω της εκπομπής. Με το USEtox, η μονάδα ενδιάμεσου σημείου των δύο δεικτών ανθρώπινης τοξικότητας (καρκινικοί και μη καρκινικοί) είναι η Συγκριτική Μονάδα Τοξικότητας για τους ανθρώπους (Comparative Toxic Unit for humans, CTUh [disease cases]).

Ο συντελεστής χαρακτηρισμού του τελικού σημείου ποσοτικοποιεί την επίπτωση στην ανθρώπινη υγεία του ανθρώπινου πληθυσμού παγκοσμίως σε έτη ζωής, υπολογιζόμενα σε συνάρτηση με τις δυσχέρειες που επιφέρει η ασθένεια στην υγεία (Disability-Adjusted Life Years- DALYs) ανά μονάδα μάζας που εκπέμπεται στο περιβάλλον. Τα DALY είναι ένα στατιστικό μέτρο του πληθυσμού σε έτη ζωής που χάθηκαν ή που επηρεάστηκαν από την ασθένεια (ή τις ασθένειες) και χρησιμοποιείται μεταξύ άλλων από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας. Με το USEtox, η μονάδα τελικού σημείου των δύο

δεικτών είναι η Συγκριτική Μονάδα Ζημιάς για την ανθρώπινη υγεία (Comparative Damage Unit for human health, CDUh [DALY]).

8.4.8 Αιωρούμενα σωματίδια (Particulate matter)

Το μονοπάτι επίπτωσης για τις επιπτώσεις στην υγεία από τις εκπομπές αιωρούμενων σωματιδίων (particulate matter, PM) ξεκινάει από τις πρωταρχικές εκπομπές PM ή τις δευτερεύουσες πρόδρομες ουσίες PM που εκπέμπονται στον αέρα. Οι εκπομπές εκφράζονται ως μάζα PM ή πρόδρομων ουσιών που απελευθερώνονται στον αέρα. Από εκεί, το μονοπάτι επίπτωσης ακολουθεί διαφορετικές διεργασίες διασποράς στον αέρα και μεταξύ διαφορετικών περιοχών (εσωτερικοί/εξωτερικοί χώροι, αγροτικές/αστικές περιοχές κτλ.) καταλήγοντας σε μια ποσότητα PM στο χρόνο σε διαφορετικές περιοχές. Ένα κλάσμα αυτής της ποσότητας PM στη συνέχεια εισπνέεται από ένα εκτιθέμενο ανθρώπινο πληθυσμό. Η εισπνοή PM μπορεί τότε να οδηγήσει σε σωρευτικό κίνδυνο για τον πληθυσμό, ο οποίος αναφέρεται ως αναμενόμενα περιστατικά ασθενειών στο εκτιθέμενο πληθυσμό και τυπικά αξιολογείται με βάση τη συγκέντρωση PM στον αέρα. Τέλος, τα περιστατικά ασθενειών μεταφράζονται σε βλάβες στην ανθρώπινη υγεία λαμβάνοντας υπόψη την σοβαρότητα της ασθένειας εκφραζόμενη ως Έτη ζωής αναπροσαρμοσμένα με βάση τις δυσχέρειες που επιφέρει η ασθένεια στην υγεία (disability-adjusted life years, DALY) και περιλαμβάνουν επιπτώσεις θνησιμότητας και νοσηρότητας (Rosenbaum et al., 2018a). Η έκθεση στα PM συσχετίζεται στις επιδημιολογικές και τις τοξικολογικές μελέτες με διάφορες δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία και τη μείωση του προσδόκιμου ζωής (Fantke et al. 2015).

Τα PM μπορούν να διαφοροποιηθούν ανάλογα με τρόπο εκπομπής τους, όπως τα πρωτογενή που εκπέμπονται άμεσα από τις οδικές μεταφορές, τις μονάδες παραγωγής ενέργειας (από άνθρακα/αέριο), την εσωτερική καύση στερεών καυσίμων ή από γεωργικές δραστηριότητες και τα δευτερογενή που αναφέρονται σε οργανικά και ανόργανα σωματίδια που δημιουργούνται μέσω αντιδράσεις πρόδρομων ουσιών (NOx, SOx, NH3, VOC). Τα δευτερογενή σωματίδια (θειικά, νιτρικά και οργανικά ανθρακούχα υλικά) ευθύνονται για το 50% των περιβαλλοντικών συγκεντρώσεων PM. Επίσης τα PM ταξινομούνται ανάλογα με την αεροδυναμική τους διάμετρο, με τις πιο συνηθισμένες κατηγορίες τα εισπνεόμενα χονδρόκοκκα σωματίδια με διάμετρο ίση ή μικρότερη από 10 μm (PM_{10}) και τα λεπτόκοκκα σωματίδια με διάμετρο ίση ή μικρότερη από 2.5 μm ($PM_{2.5}$) (Rosenbaum et al., 2018a).

Στην ΕΕΚΖ, χρησιμοποιούνται συνήθως αρχέτυπα σενάρια εκτίμησης επιπτώσεων (π.χ. αστικά, αγροτικά) αντί για χωρικά σενάρια, ειδικά όταν οι τοποθεσίες των εκπομπών είναι άγνωστες ή όταν τα δεδομένα δεν επιτρέπουν για χωρική διαφοροποίηση. Μια τέτοια προσέγγιση προτείνεται και από τους Humbert et al. (2011), κατά την οποία η πληθυσμιακή πυκνότητα και το ύψος της εκπομπής είναι οι κύριοι παράγοντες προσδιορισμού των επιπτώσεων των PM και των πρόδρομων ουσιών.

Ο συντελεστής χαρακτηρισμού ενδιάμεσου σημείου που χρησιμοποιείται και στην παρούσα διατριβή είναι το εισερχόμενο κλάσμα λεπτόκοκκων PM (kg εισπνεόμενων PM/kg εκπεμπόμενων PM, kg PM eq.) με βάση τον Humbert (2009).

8.4.9 Εξάντληση αβιοτικών πόρων (Depletion of abiotic resources)

Με έμφαση στη διαθεσιμότητα των πόρων για τις παρούσες και τις μελλοντικές γενιές, ο περιβαλλοντικός μηχανισμός αυτής της κατηγορίας βασίζεται στην υπόθεση ότι αντλούνται πρώτα οι πόροι με εύκολη και/ή φθηνή πρόσβαση και με υψηλή διαθεσιμότητα ή ποιότητα. Συνεπώς, η σημερινή άντληση πόρων θα οδηγήσει τις επόμενες γενιές να αντλήσουν μικρότερες ποσότητες ή χαμηλότερης

ποιότητας πόρους. Αυτό έχει ως συνέπεια επιπρόσθετες προσπάθειες για την άντληση της ίδιας ποσότητας του πόρου, το οποίο μεταφράζεται σε υψηλότερα ενεργειακά κόστη. Το τελικό σημείο (endpoint) του μονοπατιού αυτής της επίπτωσης συχνά θεωρείται ότι είναι οι μελλοντικές συνέπειες από την άντληση των πόρων (Rosenbaum et al., 2018a).

Οι πόροι μπορούν να διαχωριστούν με βάση την προέλευσή τους σε αβιοτικούς πόρους (ανόργανα υλικά όπως νερό και μέταλλα, ή οργανικά υλικά που δεν είναι ζωντανά τη στιγμή της εξόρυξης όπως οι ορυκτοί πόροι) και σε βιοτικούς πόρους (πόροι προερχόμενοι από τη βιομάζα), οι οποίοι είναι ζωντανοί τουλάχιστον την ώρα της άντλησής τους από το περιβάλλον. Επίσης μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω με βάση την ικανότητα του πόρου να αναγεννηθεί και το ρυθμό με τον οποίο μπορεί να συμβεί αυτό. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται ως εξής (Rosenbaum et al., 2018a):

- **Αποθεματικοί (stock) πόροι** που υπάρχουν ως πεπερασμένη και σταθερή ποσότητα (reserve) στην οικόσφαιρα και δεν αναγεννώνται (μεταλλεύματα) ή αναγεννώνται τόσο αργά που για πρακτικούς λόγους αγνοείται η αναγέννηση (ορυκτοί πόροι).
- **Ταμειακοί (fund) πόροι** οι οποίοι αναγεννώνται αλλά είναι δυνατό να εξαντληθούν, στην περίπτωση που ο ρυθμός εκμετάλλευσης υπερβεί το ρυθμό αναγέννησης. Η εξάντληση μπορεί να είναι προσωρινή εφόσον επιτραπεί στον πόρο να επανέλθει, αλλά μπορεί να είναι επίσης μόνιμη στην περίπτωση που τα είδη των βιοτικών ταμειακών πόρων εξαφανιστούν.
- **Ρέοντες (flow) πόροι** οι οποίοι παρέχονται ως ροή (π.χ. ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος και σε ένα βαθμό τα ύδατα), οι οποίοι μπορούν να αντληθούν την ώρα της ροής. Οι ρέοντες πόροι δεν μπορούν να εξαντληθούν παγκοσμίως αλλά μπορεί να υπάρξει τοπική ή προσωρινή χαμηλή διαθεσιμότητα (όπως στην περίπτωση των υδάτων).

Οι αποθεματικοί πόροι αποκαλούνται επίσης και ως μη ανανεώσιμοι πόροι, ενώ οι ταμειακοί και οι ρέοντες πόροι αποκαλούνται μαζί ως ανανεώσιμοι πόροι. Άλλος περαιτέρω διαχωρισμός αυτής της κατηγορίας μπορεί γίνει με βάση τη λειτουργία που προσφέρουν στην ανθρωπότητα. Στην θεωρία αυτές οι κατηγορίες θα έπρεπε να βασίζονται στην δυνατότητα για υποκατάσταση, ενώ στην πράξη δημιουργούνται ευρύτερες κατηγορίες οι οποίες λαμβάνουν υπόψη μόνο μερικώς την υποκατάσταση. Οι κατηγορίες αυτές περιλαμβάνουν (Oers et al., 2002):

i. Στοιχεία και ενώσεις (elements and compounds) και
ii. Ορυκτά καύσιμα/ενεργειακούς παρόχους (fossils/energy carriers).

Τα στοιχεία και οι ενώσεις είναι μια ετερογενής κατηγορία με μια ποικιλία λειτουργιών και επομένως το απόθεμά τους εκφράζεται ξεχωριστά για κάθε στοιχείο (kg στοιχείου). Το αντιμόνιο (Sb) είναι η ουσία αναφοράς στην περίπτωση αυτή σύμφωνα με τον Guinée (1995). Από την άλλη, οι λειτουργίες που επιτελούνται από τους ενεργειακούς παρόχους είναι αμοιβαία υποκαταστάσιμες και επομένως το απόθεμά τους υπολογίζεται από τη συνολικά διαθέσιμη ποσότητα, η οποία εκφράζεται σε MJ.

Επίσης, έχει προκύψει μια διαφωνία σχετικά με τη διαθεσιμότητα των πόρων, καθώς με τη στενή έννοια αναφέρεται στην άντληση του πόρου από το περιβάλλον, ενώ με την ευρύτερη έννοια αναφέρεται στη διαθεσιμότητα των πόρων ως αποθέματα στο περιβάλλον αλλά και στην οικονομία. Σύμφωνα με τους Oers et al. (2002), προτείνεται ο ακόλουθος διαχωρισμός:

- **Τελικό απόθεμα (ultimate reserve)**: Η ποσότητα ενός πόρου που είναι τελικά διαθέσιμη και η οποία υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη μέση φυσική συγκέντρωση του πόρου στο πρωταρχικό μέσο άντλησης με τη μάζα ή τον όγκο αυτού του μέσου (Guinée and Heijungs, 1995).
- **Απόθεμα βάσης (reserve base)**: Μέρος ενός προσδιορισμένου πόρου που ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένα ελάχιστα φυσικά και χημικά κριτήρια. Το απόθεμα βάσης μπορεί να περιλαμβάνει αυτά τα μέρη των πόρων τα οποία έχουν ένα εύλογο δυναμικό να γίνουν

οικονομικά διαθέσιμα πέρα από τους ορίζοντες προγραμματισμού με βάση την αποδεδειγμένη τεχνολογία και την τρέχουσα οικονομία.

- **Οικονομικό απόθεμα (economic reserve)**: Το φυσικό απόθεμα βάσης που μπορεί να αντληθεί οικονομικά την περίοδο του προσδιορισμού.

Για το χαρακτηρισμό του αποθέματος των αβιοτικών πόρων χρησιμοποιείται η μέθοδος CML (Oers et al., 2002; Guinée et al., 2002), η οποία ορίζει το δυναμικό εξάντλησης τους με συντελεστή χαρακτηρισμού που βασίζεται στον ετήσιο ρυθμό άντλησης και τις εκτιμήσεις των αποθεμάτων. Στην αρχική μέθοδο μόνο τα τελικά αποθέματα μεταλλευμάτων και ορυκτών καυσίμων λαμβάνονταν υπόψη, ενώ αργότερα προστέθηκαν και συντελεστές χαρακτηρισμού με βάση τις εκτιμήσεις για τα αποθέματα βάσης και τα οικονομικά αποθέματα.

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί τα αποθέματα βάσης είναι αυτή που προτείνεται στο εγχειρίδιο ILCD (EC-JRC, 2011a). Στην παρούσα διατριβή, υιοθετείται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε και στους Laurent et al. (2013), με βάση την οποία η εξάντληση των αβιοτικών πόρων για τα αποθέματα βάσης διαχωρίζεται σε ορυκτά και στοιχεία, σύμφωνα με το μοντέλο CML και την ενημερωμένη βάση δεδομένων του 2016 (Oers and Guinée, 2016). Ο συντελεστής χαρακτηρισμού για τα στοιχεία εκφράζεται σε ισοδύναμα kg αντιμονίου (kg Sb eq.) και για τα ορυκτά σε MJ.

Δ' ΜΕΡΟΣ: ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ & ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. Ερευνητική ενότητα Α1: Αξιολόγηση δυναμικού μείωσης εκπομπών ΑΦΘ από τη διαχείριση αποβλήτων στην Ελλάδα

Στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής ενότητας υπολογίζονται οι εκπομπές αερίων φαινομένου του θερμοκηπίου (ΑΦΘ) που παράγονται από το υφιστάμενο σύστημα διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) στην Ελλάδα και στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση του δυναμικού μείωσης των εκπομπών ΑΦΘ με την υλοποίηση των στόχων αύξησης του ποσοστού ξεχωριστής διαλογής και επεξεργασίας των ΑΣΑ για το 2020, σύμφωνα με τον αναθεωρημένο Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων, ΕΣΔΑ (ΥΠΕΚΑ, 2015).

9.1 Υπολογισμός εκπομπών ΑΦΘ από την ταφή

Για τον υπολογισμό των εκπομπών ΑΦΘ από την ταφή χρησιμοποιήθηκε το IPCC Waste Model. Βασικές παράμετροι για την εκτίμηση των εκπομπών είναι η ετήσια παραγωγή και η σύσταση των αποβλήτων που οδηγούνται σε ταφή.

Η μέθοδος FOD θεωρεί ότι το βιοδιασπώμενο ρεύμα των ΑΣΑ (DOC) διασπάται αργά μέσα σε λίγες δεκαετίες και παράγεται μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Εάν οι συνθήκες είναι σταθερές, η παραγωγή του ρεύματος μεθανίου εξαρτάται μόνο από το ποσό του εναπομείναντος άνθρακα στα απόβλητα. Έτσι, οι εκπομπές μεθανίου από τους χώρους διάθεσης των αποβλήτων είναι μεγαλύτερες στη διάρκεια των πρώτων ετών μετά την διάθεση, στη συνέχεια μειώνονται σταδιακά καθώς ο βιοδιασπώμενος άνθρακας καταναλώνεται από τα βακτήρια που ευθύνονται για τη διάσπαση.

Οι εκπομπές μεθανίου από χώρους διάθεσης στερεών αποβλήτων για ένα έτος μπορούν να υπολογιστούν από την εξίσωση 1. Το μεθάνιο παράγεται ως αποτέλεσμα της αποδόμησης του οργανικού υλικού σε αναερόβιες συνθήκες. Μέρος του παραγόμενου μεθανίου οξειδώνεται στα ανώτερα στρώματα του ΧΔΑ ή μπορεί να συλλεχθεί για παραγωγή ενέργειας ή για καύση. Συνεπώς, το ποσό μεθανίου που εκπέμπεται από έναν ΧΔΑ θα είναι κατά πολύ μικρότερο από το ποσό που παράγεται.

Εξίσωση 1

$$Εκπομπές\ CH_4 = [\sum_x CH_4 παραγόμενο_{x,T} - R_T] \cdot (1 - OX_T)$$

Όπου

Εκπομπές CH_4: εκπομπές CH_4 στον χρόνο T, σε Gg

T : έτος αναφοράς

X : κατηγορία ή είδος αποβλήτου

R_T : ποσότητα ανακτημένου CH_4 στο έτος αναφοράς, σε Gg

OX_T : ποσότητα που οξειδώθηκε το έτος αναφοράς

Ο συντελεστής οξείδωσης OX αντιστοιχεί στο κλάσμα του μεθανίου που οξειδώνεται στο έδαφος ή σε επαφή με άλλο υλικό που καλύπτει τα απόβλητα. Εάν ο OX είναι ο, τότε δεν λαμβάνει χώρα οξείδωση, ενώ αν είναι 1 τότε όλο το μεθάνιο οξειδώνεται. Οι μελέτες δείχνουν ότι στους ΧΥΤΑ συνήθως υπάρχει μεγαλύτερη οξείδωση σε σχέση με τις ανεξέλεγκτες χωματερές. Για παράδειγμα, ο συντελεστής

οξείδωσης σε χώρους ταφής που υπάρχει κάλυψη με παχύ και καλά αεριζόμενο υλικό μπορεί να διαφέρει σημαντικά σε σχέση με χώρους οι οποίοι δεν έχουν επιφανειακή κάλυψη ή με χώρους όπου το μεθάνιο μπορεί να διαφύγει από σχισμές στο κάλυμμα. Στην πραγματικότητα, μόνο ένα μέρος του παραγόμενου μεθανίου διαφεύγει από ένα τόσο ομογενές υλικό. Ένα άλλο μέρος διαφεύγει από σχισμές ή από πλευρική διάχυση χωρίς να οξειδωθεί. Γενικά, στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες με καλά ελεγχόμενους χώρους ταφής χρησιμοποιείται συντελεστής οξείδωσης ίσος με 0.1, ενώ στις αναπτυσσόμενες χώρες όπου η διάθεση γίνεται πιο ανεξέλεγκτα η μέση τιμή είναι πιο κοντά στο 0. Η ποσότητα CH_4 που συλλέγεται θα πρέπει να αφαιρεθεί από την παραγόμενη ποσότητα, καθώς μόνο μέρος του CH_4 που δεν συλλέχθηκε μπορεί να οξειδωθεί.

Παραγωγή μεθανίου

Το δυνητικά παραγόμενο CH_4 από τα απόβλητα που διατίθενται θα μειωθεί σταδιακά με την πάροδο μερικών δεκαετιών. Έτσι, και η παραγωγή μεθανίου από τη συγκεκριμένη ποσότητα αποβλήτων θα μειωθεί σταδιακά. Η μέθοδος FOD βασίζεται σε έναν εκθετικό παράγοντα που περιγράφει το ποσοστό του βιοδιασπώμενου υλικού που διασπάται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα κάθε χρόνο.

Η συνολική ποσότητα CH_4 που παράγεται σε δεδομένη χρονική περίοδο υπολογίζεται με βάση τις ποσότητες και τη σύνθεση των αποβλήτων που διατίθενται στους ΧΔΑ καθώς και τις μεθόδους διαχείρισης που χρησιμοποιούνται στους χώρους διάθεσης. Βάση για τους υπολογισμούς αποτελεί το ποσοστό οργανικού άνθρακα στο βιοαποδομήσιμο κλάσμα των αποβλήτων που βιοδιασπάται (Decomposable Degradable Organic Carbon - DDOCm). Το DDOCm είναι ουσιαστικά το μέρος του οργανικού άνθρακα που θα διασπαστεί υπό αναερόβιες συνθήκες στους ΧΔΑ και υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

Εξίσωση 2

$$DDOCm = W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF$$

Όπου:

DDOCm: η μάζα του βιοαποδομήσιμου DOC που διατίθεται, σε Gg

W : η μάζα των αποβλήτων που οδηγείται σε διάθεση, σε Gg

DOC : βιοδιασπώμενος οργανικός άνθρακας στο έτος διάθεσης, κλάσμα, Gg C/ Gg αποβλήτων

DOC_f : κλάσμα του DOC που μπορεί ναι αποδομηθεί

MCF : διορθωτικός παράγοντας του CH_4 για την αναερόβια βιοδιάσπαση στο έτος διάθεσης

Ειδικότερα, το MCF λαμβάνει υπόψη ότι κατά την ανεξέλεγκτη διάθεση των αποβλήτων παράγεται λιγότερο μεθάνιο από μια δεδομένη ποσότητα αποβλήτων σε σχέση με την ελεγχόμενη διάθεση, καθώς μεγαλύτερο κλάσμα αποβλήτων βιοαποδομείται αερόβια στα επιφανειακά στρώματα των χωματερών ανεξέλεγκτης διάθεσης.

Η δυνητικά παραγόμενη ποσότητα CH_4, L_0, ισούται με την συγκέντρωση CH_4 στο βιοαέριο (F) και το λόγο των μοριακών βαρών μεθανίου προς άνθρακα (16/12).

Εξίσωση 3

$$L_0 = DDOCm \cdot F \cdot \frac{16}{12}$$

Όπου

L_0: δυνητική παραγωγή CH_4, σε Gg CH_4

DDOCm : η μάζα του βιοαποδομήσιμου DOC, σε Gg

F : το κλάσμα CH_4 στο παραγόμενο βιοαέριο (κλάσμα όγκου)

16/12: λόγος μοριακών βαρών CH_4/C

Το συσσωρευμένο DDOCm στον ΧΔΑ στο τέλος του έτους και το DDOCm που διασπάστηκε μέσα στο έτος υπολογίζεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

Εξίσωση 4

$$DDOCma_T = DDOCmd_T + \left(DDOCma_{T-1} \cdot e^{-k}\right)$$

Εξίσωση 5

$$DDOCm\ decomp_T = DDOCma_{T-1} \cdot \left(1 - e^{-k}\right)$$

Όπου

T : έτος αναφοράς

$DDOCma_T$: το συσσωρευμένο DDOCm στον ΧΔΑ στο τέλος του έτους T, σε Gg

$DDOCma_{T-1}$: το συσσωρευμένο DDOCm στον ΧΔΑ στο τέλος του έτους (T-1), σε Gg

$DDOCmd_T$: το DDOCm που εναποτέθηκε στον ΧΔΑ το έτος T, σε Gg

DDOCm $decomp_T$: το DDOCm που διασπάστηκε το έτος T, σε Gg

k : σταθερά αντίδρασης, $k=\ln(2)/t_{1/2}$ σε y^{-1}

$t_{1/2}$: χρόνος ημιζωής σε y

Παραγόμενο CH_4 από το εύκολα διασπάσιμο DDOCm

Η ποσότητα παραγόμενου CH_4 από το αποδομήσιμο υλικό μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας το κλάσμα του CH_4 στο παραγόμενο βιοαέριο με το λόγο των μοριακών βαρών CH_4/C.

Εξίσωση 6

$$CH_4\ generatedT = DDOCm\ decompT \bullet F \bullet 16/12$$

Όπου

CH_4 $generated_T$: η ποσότητα CH_4 που παράχθηκε από αποδομήσιμα υλικά

DDOCm $decomp_T$: DDOCm που διασπάστηκε κατά το έτος T, σε Gg

F : το κλάσμα του CH_4 , κατ' όγκο, στο παραγόμενο βιοαέριο

16/12 : λόγος μοριακών βαρών CH_4/C

Επίσης, για την περίπτωση των ΧΔΑ όπου γινόταν συλλογή και ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου, υπολογίστηκε ξεχωριστά η παραγόμενη ενέργεια με βάση την παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου, το ρυθμό ανάκτησης αυτού, την εγκατεστημένη ισχύ των μηχανών καύσης του βιοαερίου και τους σχετικούς συντελεστές απόδοσης. Ειδικότερα, ο ρυθμός παραγωγής μεθανίου υπολογίστηκε με βάση την ακόλουθη εξίσωση :

$$Q_{CH4} = Q_{LFG} \cdot C_{CH4}$$

Όπου το Q_{LFG} αντιστοιχεί στο ρυθμό ανάκτησης του βιοαερίου σε Nm^3/h και το C_{CH4} στην ογκομετρική αναλογία του CH_4 στο βιοαέριο.

Το δυναμικό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την ανάκτηση του βιοαερίου υπολογίστηκε με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

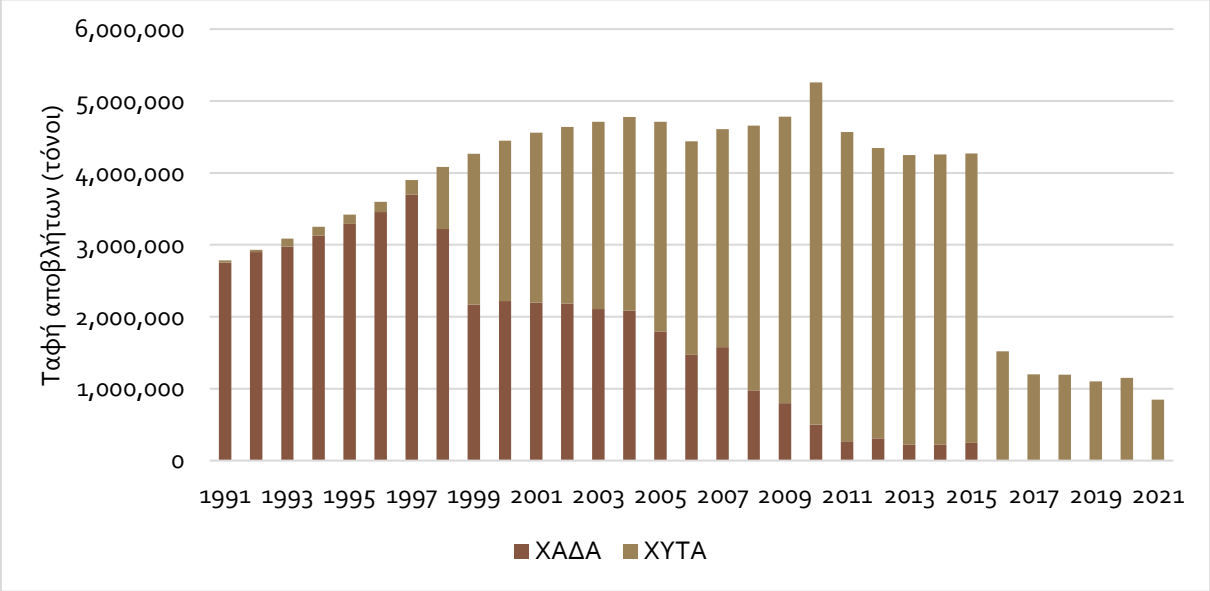
$$E_{\eta\lambda} = Q_{CH4} \cdot LHV \cdot \eta_{\eta\lambda}$$

Όπου το $E_{\eta\lambda}$ υπολογίζεται σε kWh, το $\eta_{\eta\lambda}$ αφορά την απόδοση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο και LHV είναι η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του μεθανίου.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θεωρήθηκε ότι υποκαθιστά την παραγωγή ηλεκτρισμού από συμβατικά καύσιμα στην Ελλάδα και οι σχετικές εκπομπές αφαιρέθηκαν από τις συνολικές εκπομπές της ταφής.

9.1.1 Αποτελέσματα

Στο Σχήμα 55 παρουσιάζονται ξεχωριστά οι συνολικές ποσότητες που οδηγούνται σε ΧΥΤΑ και ΧΑΔΑ την περίοδο 1991-2015, καθώς και οι αντίστοιχες προβλεπόμενες ποσότητες διάθεσης το 2020 σύμφωνα με τους στόχους του ΕΣΔΑ (2015) σε επίπεδο Ελλάδας. Θεωρείται ότι την περίοδο 2015-20 λειτουργούν μόνο όσοι ΧΥΤΑ συνεχίζουν να έχουν άδεια σύμφωνα με τις σχετικές ΑΕΠΟ, ενώ για τους υπόλοιπους θεωρείται ότι κλείνουν και επομένως σταματάει και η διάθεση σε αυτούς. Όσον αφορά τους ΧΑΔΑ, θεωρείται ότι όλοι παύουν να λειτουργούν μετά το 2015. Επίσης παρατηρείται ότι ενώ το 1991 η διάθεση αποβλήτων σε ΧΑΔΑ αποτελούσε τον αποκλειστικό σχεδόν τρόπο διάθεσης (99%), άρχισε σταδιακά να μειώνεται η αναλογία καθώς άρχισαν να λειτουργούν περισσότεροι ΧΥΤΑ, ώσπου το 2000 η αναλογία διάθεσης αποβλήτων σε ΧΑΔΑ και ΧΥΤΑ ήταν 50%-50% και στη συνέχεια εξακολουθεί να μειώνεται.

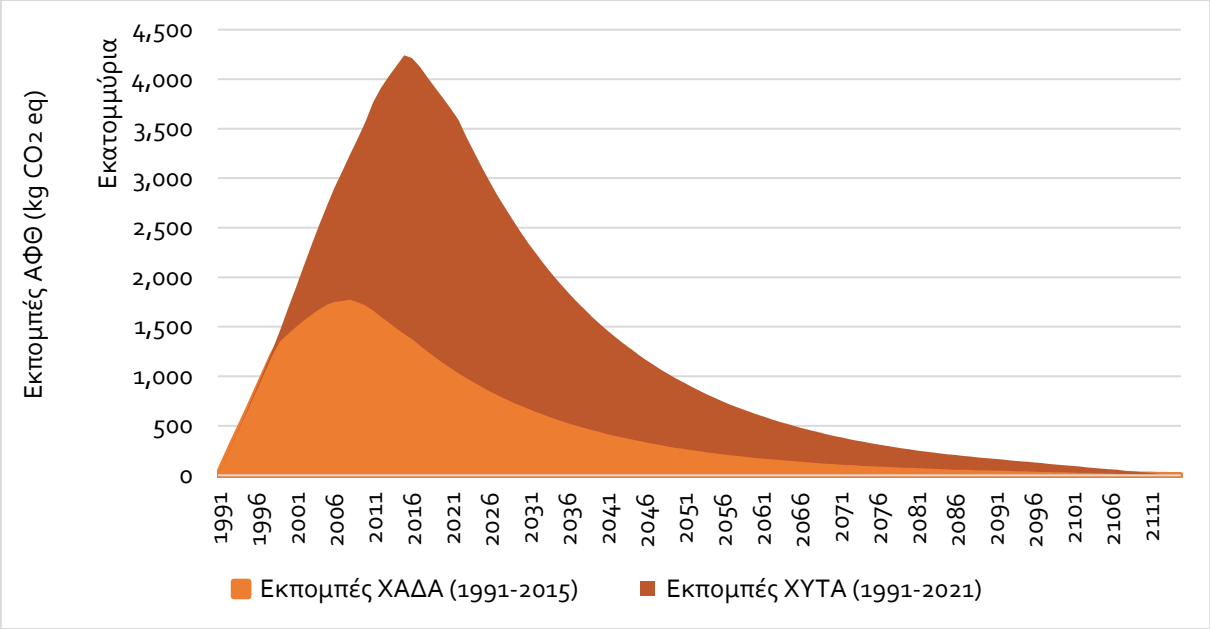


Σχήμα 55: Συνολικές ποσότητες αποβλήτων που οδηγούνται σε ΧΑΔΑ και ΧΥΤΑ την περίοδο 1991-2015 και το 2020, σε επίπεδο Ελλάδας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εκπομπών ΑΦΘ από την απόθεση των αποβλήτων σε ΧΑΔΑ και ΧΥΤΑ εκείνη την περίοδο. Η σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου θεωρείται ότι αποτελείται κατά 50% μεθάνιο και 50% διοξείδιο του άνθρακα. Για την περίπτωση των ΧΥΤΑ έχει

ληφθεί υπόψη συντελεστής οξείδωσης ΟΧ ίσος με 0.1 και συντελεστής διόρθωσης του παραγόμενου μεθανίου MCF ίσος με 1. Για την περίπτωση των ΧΑΔΑ, ο ΟΧ είναι ίσος με 0 και ο MCF ίσος με 0.8.

Στο Σχήμα 56 παρουσιάζονται ξεχωριστά οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη βιοαποδόμηση των αποβλήτων που αποτέθηκαν σε ΧΥΤΑ και ΧΑΔΑ για την περίοδο 1991-2021, σε επίπεδο χώρας. Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι μέγιστες ετήσιες εκπομπές από τους ΧΑΔΑ (1,800,000 tn CO_2 eq.) παρατηρούνται το έτος 2008, με την κορύφωση της διάθεσης αποβλήτων σε ΧΑΔΑ να λαμβάνει χώρα το 1997, σύμφωνα με το προηγούμενο σχήμα. Για την περίπτωση των ΧΥΤΑ, οι εκπομπές έχουν έντονα αυξητική τάση την περίοδο 2000-2015 με τις μέγιστες ετήσιες εκπομπές (2,800,000 tn CO_2 eq.) να υπολογίζονται για το έτος 2015, και τη μέγιστη ποσότητα αποβλήτων που διατέθηκε σε ετήσια βάση να λαμβάνει χώρα το 2010, σύμφωνα πάλι με το προηγούμενο σχήμα. Επομένως, οι μέγιστες συνολικές ετήσιες εκπομπές από την ταφή αποβλήτων (4,240,000 tn CO_2 eq.) προκύπτουν για το έτος 2015. Παρόλο που οι εκπομπές από την ταφή των αποβλήτων αφορούν τα απόβλητα που οδηγήθηκαν για ταφή την περίοδο 1991-2021, συνεχίζουν να εκλύονται σε χρονικό ορίζοντα 100ετίας, με τις ποσότητες εκπομπών να μειώνονται με χαμηλότερους ρυθμούς σε σχέση με τους ρυθμούς αύξησής τους μέχρι το 2015. Ειδικότερα σημειώνεται ότι κατά την περίοδο απόθεσης των αποβλήτων εκπέμπεται περίπου το 1/3 των συνολικών εκπομπών, ενώ μετά το πέρας της απόθεσης τους εκπέμπονται τα υπόλοιπα 2/3.



Σχήμα 56: Αθροιστικές εκπομπές ΑΦΘ από τη διάθεση αποβλήτων σε ΧΥΤΑ και σε ΧΑΔΑ την περίοδο 1991-2015, σύνολο Ελλάδας

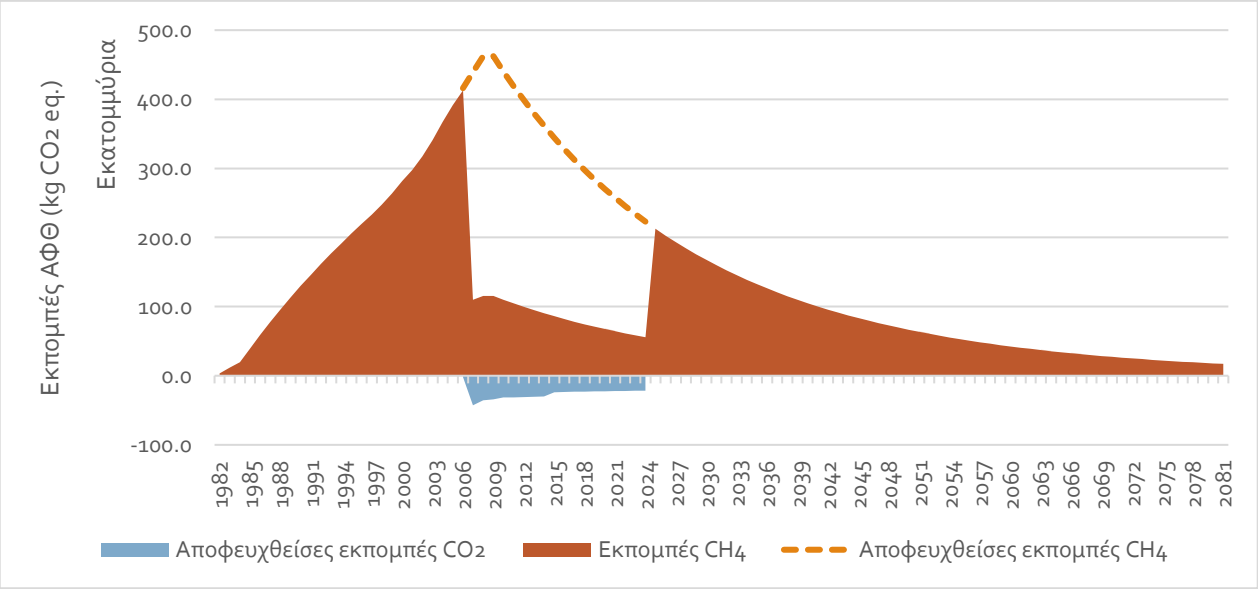
Από το σχήμα παρατηρείται επίσης ότι οι συνολικές εκπομπές ΑΦΘ για την περίπτωση των ΧΑΔΑ είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των ΧΥΤΑ. Αυτό οφείλεται αρχικά στο γεγονός ότι οι συνολικές ποσότητες που αποτέθηκαν σε ΧΑΔΑ τη συγκεκριμένη περίοδο είναι μικρότερες από αυτές που αποτέθηκαν σε ΧΥΤΑ, με μία αναλογία περίπου 43% και 57% αντίστοιχα. Οι συνολικές εκπομπές ΑΦΘ σε περίοδο 100ετίας που αντιστοιχούν στις αποτιθέμενες ποσότητες είναι 61.7 δις kg CO_2eq. για την περίπτωση των ΧΑΔΑ και 96.0 δις kg CO_2eq. για την περίπτωση των ΧΥΤΑ, συνεισφέροντας κατά 39% και 61% αντίστοιχα στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ. Παρατηρείται επομένως ότι η αναλογία των συνολικά εκπεμπόμενων ποσοτήτων ΑΦΘ από τους ΧΑΔΑ και τους ΧΥΤΑ δεν είναι ευθέως ανάλογη με την αναλογία των αποτιθέμενων αποβλήτων σε αυτούς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στους ΧΑΔΑ λαμβάνει χώρα μικρότερη παραγωγή μεθανίου λόγω της αερόβιας αποδόμησης του οργανικού υλικού στα επιφανειακά στρώματα των ΧΑΔΑ, καθώς δεν υπάρχει επιφανειακή κάλυψη ($MCF_{ΧΑΔΑ}$=0.8, $MCF_{ΧΥΤΑ}$=1). Η επίδραση αυτή περιορίζεται ωστόσο από το γεγονός ότι στους ΧΥΤΑ θεωρείται ότι

λαμβάνει χώρα μεγαλύτερη οξείδωση του παραγόμενου μεθανίου, π.χ. λόγω των διαρροών μεθανίου από τις σχισμές του επιφανειακού καλύμματος ($OX_{XAΔA}$=0, OX_{XYTA}=0.1).

Σημειώνεται ότι σε ορισμένους ΧΥΤΑ υπάρχει συλλογή και καύση ή ενεργειακή αξιοποίηση του παραγόμενου μεθανίου, και επομένως το δεσμευόμενο μεθάνιο δεν εκλύεται στην ατμόσφαιρα αλλά οξειδώνεται σε διοξείδιο του άνθρακα. Ωστόσο αυτό δεν έχει ληφθεί υπόψη στην παρούσα διατριβή, λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων, αλλά και γιατί η εγκατάσταση των αγωγών συλλογής έχει γίνει σχετικά πρόσφατα στις περισσότερες των περιπτώσεων, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ακόμα επαρκής ροή παραγόμενου βιοαερίου για τη λειτουργία των μηχανών καύσης. Οι μελλοντικές εκπομπές ωστόσο, όταν θα υπάρχει επαρκής ροή βιοαερίου η οποία και θα καίγεται ή θα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας, αναμένεται ότι θα είναι μειωμένες σε σχέση με τις υπολογιζόμενες.

Στη συνέχεια παρατίθεται ένα παράδειγμα από τις υπολογιζόμενες εκπομπές ΑΦΘ από το χώρο ταφής στην περιοχή των Ταγαράδων Θεσσαλονίκης, ο οποίος δεχόταν απόβλητα την περίοδο 1981-2008 και στον οποίο εγκαταστάθηκε σύστημα συλλογής και αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ειδικότερα, εν λόγω χώρος δεχόταν από το 1981 τα απόβλητα από τις ανατολικές συνοικίες της Θεσσαλονίκης και από το 1984 από όλη τη Θεσσαλονίκη (κατά μέσο όρο 1300 τόνους/ημέρα) έως και το 2008 όπου σταμάτησε η απόθεση αποβλήτων σε αυτόν. Στον χώρο αυτό εγκαταστάθηκε από το τέλος του 2006 σύστημα συλλογής και αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει ισχύ 5 MW (4 ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ισχύος 1,262 kW έκαστο). Θεωρείται ότι η απόδοση συλλογής του παραγόμενου βιοαερίου είναι 75%, ενώ το υπόλοιπο 25% εκλύεται στην ατμόσφαιρα. Με μία υπολογιζόμενη ετήσια διαθεσιμότητα λειτουργίας περίπου 90% και μια απόδοση παραγωγής ηλεκτρισμού περίπου 30%, υπολογίζεται ότι παραγόταν κατά μέσο όρο 37,000 MWh ετησίως μέχρι και το 2024, όπου η παραγωγή του βιοαερίου υπολογίζεται ότι θα είναι μικρότερη από τη συνολική υφιστάμενη δυναμικότητα των μηχανών (2800 m^3/h), αλλά και δεν θα είναι σταθερή καθώς θα έχουν περάσει αρκετά έτη από το έτος τελευταίας απόθεσης. Ο συντελεστής εκπομπών για την παραγωγή ηλεκτρισμού από το ενεργειακό μίγμα στην Ελλάδα την περίοδο αυτή θεωρήθηκε ίσος με 0.9 kg CO_2 eq./kWh.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται οι εκπομπές ΑΦΘ από τον εν λόγω χώρο ταφής, οι οποίες περιλαμβάνουν τόσο τις πραγματικές εκπομπές μεθανίου, όσο και τις αποφευχθείσες εκπομπές λόγω της συλλογής και ανάκτησης του παραγόμενου βιοαερίου, αλλά και λόγω της υποκατάστασης της παραγωγής ηλεκτρισμού από το μίγμα καυσίμων στην Ελλάδα την περίοδο αυτή (κυρίως ορυκτά καύσιμα) με τον παραγόμενο ηλεκτρισμό από το συλλεγόμενο βιοαέριο.

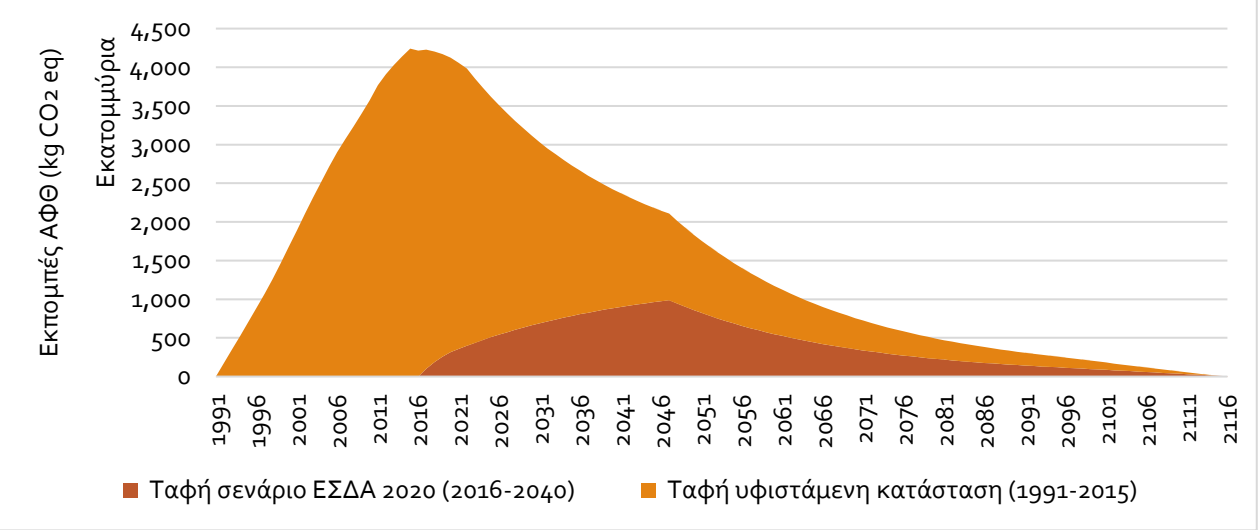


Σχήμα 57: Εκπομπές ΑΦΘ από το χώρο ταφής αποβλήτων στους Ταγαράδες Θεσσαλονίκης για την περίοδο 1981-2081

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 57, με τη συλλογή του παραγόμενου βιοαερίου αποφεύγεται καταρχάς η έκλυση σημαντικού μέρους των παραγόμενων εκπομπών ΑΦΘ. Λαμβάνοντας υπόψη και τις αποφευχθείσες εκπομπές λόγω της υποκατάστασης παραγωγής ηλεκτρισμού από ορυκτά καύσιμα, οι καθαρές εκπομπές μειώνονται περαιτέρω σε επίπεδα αισθητά χαμηλότερα από τα αρχικά, γεγονός που δείχνει την ιδιαίτερη σημασία της συλλογής και αξιοποίησης του βιοαερίου για τη μείωση των εκπομπών ΑΦΘ από την ταφή των αποβλήτων.

Στο Σχήμα 58 παρουσιάζονται οι συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από την απόθεση αποβλήτων σε ΧΥΤΑ και ΧΑΔΑ την περίοδο 1991-2015 (υφιστάμενη κατάσταση) και οι ποσότητες των εκπομπών που αναμένεται να εκλυθούν από τα απόβλητα που θα οδηγηθούν σε ΧΥΤ μετά το 2015, με βάση τους στόχους του ΕΣΔΑ. Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα, λήφθηκε χρονοσειρά από το 2016 και για περίοδο ίση με 24 έτη, ίση με αυτή της υφιστάμενης κατάστασης. Για τη δεύτερη περίπτωση, οι ποσότητες των αποβλήτων που αποτίθενται σε χώρους ταφής θεωρούνται ότι μειώνονται σταδιακά από το 2016 έως το 2020 όπου επιτυγχάνονται οι στόχοι του ΕΣΔΑ (Πίνακας 3), ενώ μετά θεωρείται ότι παραμένουν σταθερές. Τα απόβλητα που οδηγούνται πλέον στους χώρους ταφής θεωρείται ότι έχουν υποστεί επεξεργασία και επομένως αποκαλούνται υπολείμματα, με τους αντίστοιχους χώρους ταφής να ονομάζονται Χώροι Υγειονομικής Ταφής Υπολειμμάτων (ΧΥΤΥ). Επίσης, στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι γίνεται συλλογή και καύση του παραγόμενου βιοαερίου σε ποσοστό 50%.

Οι συνολικές ποσότητες που οδηγούνται προς ταφή την περίοδο 1991-2015 (υφιστάμενη κατάσταση) ανέρχονται σε περίπου 110 εκατομμύρια τόνους, με τις αντίστοιχες συνολικές ποσότητες που οδηγούνται σε ΧΥΤΥ την περίοδο 2016-2040 να ανέρχονται σε περίπου 41 εκατομμύρια τόνους. Οι συνολικές εκπομπές ΑΦΘ σε ορίζοντα 100ετίας για τη δεύτερη περίπτωση υπολογίζονται σε 40.9 δισεκ. kg CO_2eq., δηλαδή περίπου 26% των αντίστοιχων εκπομπών της υφιστάμενης κατάστασης. Παρατηρείται επομένως ότι μειώνοντας τα βιοαποδομήσιμα υλικά στους ΧΥΤ (απόβλητα τροφίμων, πράσινα και χαρτί) καθώς και με την καύση μέρους του παραγόμενου βιοαερίου μειώνονται δραστικά οι εκπομπές ΑΦΘ από τη διάθεση αποβλήτων. Ειδικότερα, ενώ οι μέγιστες ετήσιες εκπομπές από την ταφή για την υφιστάμενη κατάσταση υπολογίζονται σε 4,200 εκατομ. kg CO_2 eq., οι αντίστοιχες μέγιστες ετήσιες εκπομπές σύμφωνα με το σενάριο του ΕΣΔΑ είναι περίπου 4 φορές μικρότερες (1,000 εκατομ. kg CO_2 eq.).



Σχήμα 58: Αθροιστικές εκπομπές ΑΦΘ από την τελική διάθεση αποβλήτων, υφιστάμενη κατάσταση (1991-2015) και σενάριο ΕΣΔΑ (2016-2040), σύνολο Ελλάδας

9.2 Υπολογισμός εκπομπών ΑΦΘ από την κομποστοποίηση

Οι έμμεσες προγενέστερες εκπομπές ΑΦΘ για την επεξεργασία αποβλήτων σε μονάδες κομποστοποίησης θεωρούνται η παροχή και κατανάλωση ορυκτών καυσίμων καθώς και η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στην εγκατάσταση.

Οι συντελεστές εκπομπής που αφορούν τα ΑΦΘ δίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 7: Συντελεστές εκπομπής ΑΦΘ ανά είδος διεργασίας. Πηγή: Fruergaard et al. 2009

Είδος διεργασίας	Παράγοντας εκπομπής
Παροχή καυσίμων	0,45 kg CO_2-eq / lt ντήζελ
Κατανάλωση καυσίμων	2,7 kg CO_2-eq / lt ντήζελ
Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας	0,1-0,9 kg CO_2-eq / kWh

Επειδή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα γίνεται σε μεγάλο ποσοστό από λιγνίτη, επιλέγεται συντελεστής εκπομπής ίσος με 0,9 kg CO_2-eq / kWh.

Στην οικιακή κομποστοποίηση δεν υπάρχουν έμμεσες προγενέστερες εκπομπές, καθώς δεν χρησιμοποιείται μηχανολογικός εξοπλισμός και δεν υπάρχουν εκπομπές ΑΦΘ για την παροχή και κατανάλωση ορυκτών καυσίμων και ηλεκτρισμού.

Όσον αφορά, τις άμεσες εκπομπές της κομποστοποίησης, οι ποσότητες άνθρακα και αζώτου που εκπέμπονται στο περιβάλλον κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης υπολογίζονται με βάση τον εισερχόμενο άνθρακα και άζωτο και τα ποσοστά απωλειών και για τα δύο, όπως φαίνεται στις παρακάτω εξισώσεις:

$$C_{release} = C_{input} \cdot C_{loss,\%}$$

όπου,

$C_{release}$, είναι ο άνθρακας που απελευθερώνεται

C_{input}, είναι ο εισερχόμενος άνθρακας στο σύστημα από τα απόβλητα

$C_{loss,\%}$, είναι το ποσοστό απώλειας για τον άνθρακα, το ποσοστό που διασπάται

$$N_{release} = N_{input} \cdot N_{loss,\%}$$

Όπου,

$N_{release}$, είναι το άζωτο που απελευθερώνεται

N_{input}, είναι το εισερχόμενο άζωτο στο σύστημα από τα απόβλητα

$N_{loss,\%}$, είναι το ποσοστό απώλειας για το άζωτο.

Η μεγαλύτερη ποσότητα άνθρακα που αποσυντίθεται μετατρέπεται σε βιογενές CO_2, ενώ ένα μικρό μέρος αυτού μετατρέπεται σε CH_4 σε περιοχές όπου υπάρχει έλλειψη οξυγόνου. Σε κλειστές εγκαταστάσεις κομποστοποίησης, η εκπομπή ποσοτήτων CH_4 στο περιβάλλον περιορίζεται με την παρουσία βιόφιλτρων, τα οποία βοηθούν στην οξείδωση του CH_4 σε CO_2.

Οι συνολικές εκπομπές CH_4 υπολογίζονται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$CH_{4,\ release} = C_{\ release} \cdot CH_{4,\ emitted} \cdot (1 - n) \cdot (16/12)$$

όπου,

$CH_{4,\ release}$ είναι η ποσότητα μεθανίου που απελευθερώνεται στο περιβάλλον

$C_{\ release}$ είναι η συνολική ποσότητα άνθρακα που διασπάται κατά την κομποστοποίηση

$CH_{4,\ emitted}$ είναι το ποσοστό των απωλειών σε μορφή μεθανίου

n είναι ο συντελεστής απόδοσης του βιόφιλτρου, όσον αφορά την οξείδωση του μεθανίου.

Το υποξείδιο του αζώτου δημιουργείται σε περιοχές που επικρατούν αναερόβιες συνθήκες (Beck-Friis et al., 2000) ως ένα υποπροϊόν τόσο της διαδικασίας νιτροποίησης όσο και της απονιτροποίησης (IPCC, 2006) παράγεται κυρίως στα τελευταία στάδια της κομποστοποίησης όπου ο διαθέσιμος άνθρακας έχει ήδη καταναλωθεί (He et al. 2000). Οι εκπομπές N_2O, υπολογίζονται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$N_2O_{\ release} = N_{\ release} \cdot N_2O_{\ emitted} \cdot (1 - n) \cdot (44/28)$$

όπου,

$N_2O_{release}$ είναι η ποσότητα N_2O που απελευθερώνεται στο περιβάλλον

$N_{release}$ είναι η ποσότητα αζώτου που διασπάται κατά την κομποστοποίηση

$N_2O_{emitted}$ είναι το ποσοστό απωλειών σε υποξείδιο του αζώτου

n είναι ο συντελεστής απόδοσης του βιόφιλτρου.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι αέριες εκπομπές από την κομποστοποίηση βιοαποβλήτων και αποβλήτων κήπων. Οι τιμές αυτές εξαρτώνται, όπως φαίνεται κατά πολύ από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την κομποστοποίηση.

Πίνακας 8: Αέριες εκπομπές από την κομποστοποίηση οργανικών αποβλήτων. Πηγή: Boldrin et al. (2009)

Αέριο	**Τεχνολογία**	**Είδος αποβλήτου**	**Διάσπαση**	**Εκπομπές**
			(% εισερχόμενου C)	**(kg CO_2 /tn ww)**
CO_2	Ανοιχτή	Απόβλητα κήπου	56-83	118-413
		Βιοαπόβλητα	50-66	43-173
	Κλειστή	Βιοαπόβλητα	50-60	250-390
	Οικιακή κομπ.	Βιοαπόβλητα	50-60	139-215
			(% διασπώμενου C)	**(kg CH_4 /tn ww)**
CH_4	Ανοιχτή	Απόβλητα κήπου	2.1-2.7	0.05-6.8
		Βιοαπόβλητα	0.8-2.5	0.03-1.5
	Κλειστή	Βιοαπόβλητα	2.4-3.0	0.02-1.8
	Οικιακή κομπ.	Βιοαπόβλητα	2.0-3.6	0.8-2.2
N_2O			**(% εισερχόμενου N)**	**(kg N_2O /tn ww)**

Αέριο	Τεχνολογία	Είδος αποβλήτου	Διάσπαση	Εκπομπές
			(% εισερχόμενου C)	(kg CO_2 /tn ww)
CO_2	Ανοιχτή	Απόβλητα κήπου	56-83	118-413
		Βιοαπόβλητα	50-66	43-173
	Κλειστή	Βιοαπόβλητα	50-60	250-390
	Οικιακή κομπ.	Βιοαπόβλητα	50-60	139-215
	Ανοιχτή	Απόβλητα κήπου	0.5-1.8	25-178
		Βιοαπόβλητα	0.1-0.7	7.5-252
	Κλειστή	Βιοαπόβλητα	1.8	10-120
	Οικιακή κομπ.	Βιοαπόβλητα	0.95-1.25	192-454

Στην Ελλάδα λειτουργούν 4 Εγκαταστάσεις Μηχανικής Ανακύκλωσης Κομποστοποίησης (ΕΜΑΚ) ενώ έχουν μοιραστεί και κάδοι οικιακής κομποστοποίησης. Προγράμματα οικιακής κομποστοποίησης καταγράφονται επίσημα από το έτος 2007, με αναφορές όμως και σε προγενέστερη εφαρμογή της μεθόδου (ΕΠΠΕΡΑΑ, 2012). Έτσι, γίνεται η παραδοχή ότι προγράμματα οικιακής κομποστοποίησης λειτουργούν και καταγράφονται από το 2005.

Οι συνολικές ποσότητες αστικών οργανικών αποβλήτων που διαχειρίστηκαν την υφιστάμενη περίοδο στην Ελλάδα με τη μέθοδο της κομποστοποίησης, προκύπτουν από τις χρονοσειρές δεδομένων που παρέχει η Eurostat (2020a) σε συνδυασμό με τα σχετικά δεδομένα που παρέχονται από τον ΕΣΔΑ (ΥΠΕΚΑ, 2015) για τα έτη 2011-2012 και για την αναλογία οικιακής-κεντρικής κομποστοποίησης για τα έτη αυτά.

Τόσο η κομποστοποίηση σε ΕΜΑΚ όσο και σε κάδους οικιακής κομποστοποίησης θεωρούνται τεχνικές κλειστού τύπου, καθώς πραγματοποιείται σε κλειστούς χώρους ή κάδους (ΕΠΠΕΡΑΑ, 2014). Ωστόσο, καθώς στην περίπτωση της οικιακής κομποστοποίησης δεν λαμβάνεται υπόψη κατανάλωση ενέργειας και καυσίμων, γίνονται χωριστοί υπολογισμοί των εκπεμπόμενων ΑΦΘ. Όσον αφορά τις εισροές ενέργειας στην κλειστή κομποστοποίηση, λαμβάνεται υπόψη η παροχή και καύση 1L diesel/tn ww και παροχή ηλεκτρισμού 40kWh/tn ww.

Όσον αφορά το ποσοστό του εισερχόμενου C που διασπάται, τόσο στην κλειστή όσο και στην οικιακή κομποστοποίηση, επιλέχθηκε η ανώτερη τιμή του εύρους που δίνεται για τα βιοαπόβλητα (60%) στον ανωτέρω πίνακα, δεδομένου ότι δεν αφορά μόνο βιοαπόβλητα αλλά και απόβλητα κήπου, τα οποία φαίνεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσοστά διάσπασης C. Για τα ποσοστά CH_4 και N_2O επιλέχθηκαν οι μέσοι όροι του εύρους που δίνεται για τα βιοαπόβλητα, ήτοι 2.7% και 1.8% για την κλειστή κομποστοποίηση και 2.8% και 1.15% για την οικιακή κομποστοποίηση, αντίστοιχα.

Όσον αφορά το συντελεστή απόδοσης του βιόφιλτρου για την περίπτωση της κλειστής κομποστοποίησης θεωρήθηκε ίσος με 95% για το CH_4 και 90% για το N_2O. Για την οικιακή κομποστοποίηση, δεν λαμβάνεται υπόψη η χρήση βιόφιλτρου.

Κοινό στοιχείο των δύο μεθόδων κομποστοποίησης είναι η σύσταση των αποβλήτων που οδηγούνται σε κομποστοποίηση και ο περιεχόμενος άνθρακας και άζωτο ανά τόνο αποβλήτων. Η περιεκτικότητα των αποβλήτων κουζίνας και κήπου σε άνθρακα και άζωτο, δίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 9: Περιεκτικότητα των εισερχόμενων βιοαποβλήτων σε άνθρακα και άζωτο (kg/tn ww) . Πηγή: Boldrin et al. (2009)

Συστατικό	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Μ.Ο.
Αποβλήτα κουζίνας	100 kg C	365 kg C	232.5 kg C
	3.7 kg N	13 kg N	8.3 kg N
Απόβλητα κήπου	93 kg C	250 kg C	171.5 kg C
	2.3 kg N	17 kg N	9.6 kg N

Δεδομένου ότι η μέση σύσταση των βιοαποβλήτων που περιέχονται στα ΑΣΑ είναι 76% απόβλητα κουζίνας και 24% απόβλητα κήπων (ΕΠΠΕΡΑΑ, 2012), οι ποσότητες εισερχόμενου άνθρακα και άζωτου υπολογίζονται ως εξής:

Cinput = 0.76 · 232.5 + 0.24 · 171.5 = 217.9 kg C /tn ww

N input = 0.76 · 8.3 + 0.24 · 9.6 = 8.7 kg N /tn ww

Οι ποσότητες CH_4 και N_2O που απελευθερώνονται κατά τη διάσπαση της οργανικής ύλης για 1 tn οργανικής ύλης για την περίπτωση της οικιακής κομποστοποίησης είναι:

Εξίσωση ΙΙ-1: $C_{release}$ = 217,9· 60% = 130,74 kg / tn·ww

Εξίσωση ΙΙ-3: $CH_{4,\ release}$ = 130,74 · 2,8% · (1 – 0) · (16/12) = 4,88 kg / tn·ww

Εξίσωση ΙΙ-5: $N_2O_{release}$ = 8,7 · 1,15% · (1 – 0) · (44/28) = 0,16 kg / tn·ww

Οι ποσότητες CH_4 και N_2O που απελευθερώνονται κατά τη διάσπαση της οργανικής ύλης για 1 tn οργανικής ύλης για την περίπτωση της κεντρικής κομποστοποίησης (κλειστού τύπου) είναι:

Εξίσωση ΙΙ-3: $CH_{4,\ release}$ = 130,74 · 2,7% · (1 – 0,95) · (16/12) = 0,24 kg / tn·ww

Εξίσωση ΙΙ-5: $N_2O_{release}$ = 8,7 · 1,8% · (1 – 0,90) · (44/28) = 0,02 kg / tn·ww

Οι έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές περιλαμβάνουν τις αποφευχθείσες εκπομπές από την αξιοποίηση του παραγόμενου κόμποστ ως εδαφοβελτιωτικό και την υποκατάσταση της παραγωγής ανόργανων λιπασμάτων. Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του κόμποστ που παράγεται από τις ΕΜΑΚ στην Ελλάδα δεν προέρχεται από προδιαλεγμένα οργανικά απόβλητα αλλά από την ανάκτηση των οργανικών αποβλήτων από τα σύμμεικτα απόβλητα, θεωρείται χαμηλότερης ποιότητας και η αξιοποίηση του ως εδαφοβελτιωτικό είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον ως υλικό επίχωσης σε χώρους ταφής αποβλήτων, για το οποίο δεν υπολογίζονται αποφευχθείσες εκπομπές.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, θεωρείται ότι μόνο 20% της παραγόμενης ποσότητας κόμποστ από τις ΕΜΑΚ χρησιμοποιείται ως λίπασμα, ενώ το παραγόμενο κόμποστ από την οικιακή κομποστοποίηση λόγω της καλύτερης ποιότητάς του, θεωρείται ότι αξιοποιείται 100% ως λίπασμα. Το 2020 όπου προβλέπεται ότι θα υπάρχει διαλογή στην πηγή του οργανικού κλάσματος, θεωρείται ότι η ποιότητα του παραγόμενου κόμποστ από τις κεντρικές μονάδες θα είναι καλή και επομένως θα αξιοποιείται 100%.

Όταν το προϊόν της κομποστοποίησης εφαρμόζεται στο έδαφος, ένα μέρος του διασπώμενου άνθρακα δεσμεύεται στο έδαφος για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο δεσμευμένος άνθρακας μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$CO_{2,\ bind} = C_{input} \cdot C_{bind} \cdot (44/12)$$

όπου,

$CO_{2,\ bind}$ είναι η δεσμευμένη ποσότητα CO_2

C_{input} είναι ο περιεχόμενος άνθρακας στο κομπόστ

C_{bind} είναι το κλάσμα του δεσμευμένου άνθρακα στο έδαφος.

Το μέγεθος C_{bind} είναι το ποσοστό του άνθρακα που δεσμεύεται στο τελικό προϊόν και υπολογίζεται ως ποσοστό του εισερχόμενου άνθρακα. Έτσι, με βάση την περιεκτικότητα του εισερχόμενου κομπόστ καθώς και το εύρος τιμών που δίνεται από τη βιβλιογραφία για τις τιμές του C_{bind}, που είναι 2-10% (Smith *et al.*, 2001) υπολογίζεται ο δεσμευόμενος άνθρακας ως εξής:

$CO_{2,\ bind} = 217{,}9 \cdot 6\% \cdot (44/12) = 47{,}9$ kg / tn·ww

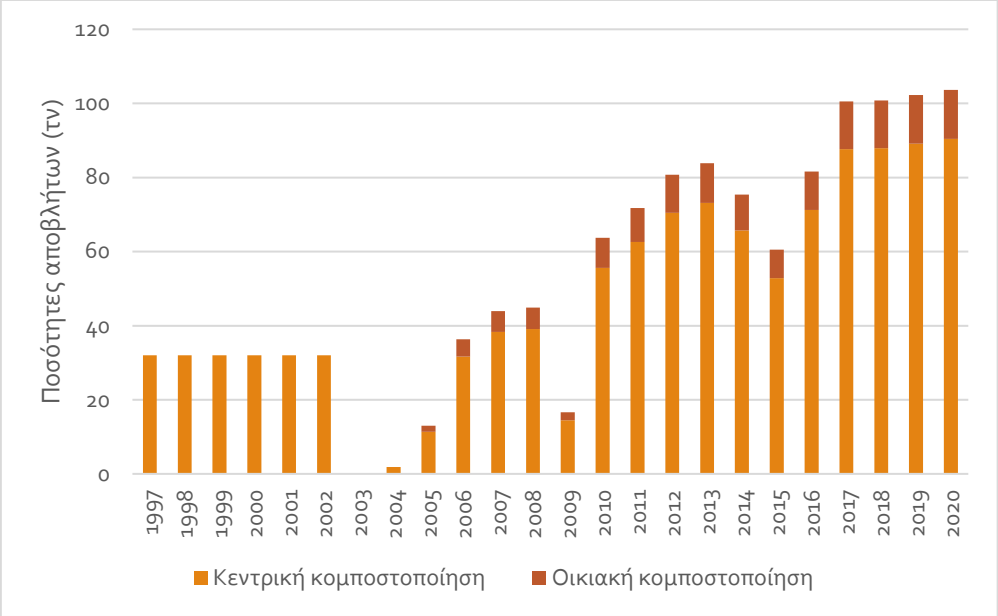
Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται ειδικότερα οι εισροές και εκροές που λήφθηκαν υπόψη (μέσος όρος) κατά το στάδιο της εφαρμογής του κόμποστ στη γη και οι συνολικές έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές, για την οικιακή και την κλειστή κομποστοποίηση.

Πίνακας 10: Εισροές και εκροές κατά το στάδιο της εφαρμογής του κόμποστ στη γη (ανά τόνο ww) και έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές. Πηγή: Boldrin et al. (2009)

	Οικιακή κομποστοποίηση	**Κλειστή κομποστοποίηση**
Καύση ντήζελ	-	0,2 – 0,6 L
Υποκατάσταση λιπάσματος	(-) 0,5 – 5,2 kg N (-) 0.6 – 2.8 kg P (-) 2.4 – 9.7 kg K	(-) 0,5 – 5,2 kg N (-) 0.6 – 2.8 kg P (-) 2.4 – 9.7 kg K
Εκπομπές N2O	-0,14 – 0,3 kg	-0,14 – 0,3 kg
Δέσμευση άνθρακα	(-) 1 – 22 kg	(-) 1 – 22 kg
Συνολικός συντελεστής εκπομπών ΑΦΘ	-146 – 17 kg CO2 –eq./tn ww	-145 – 19 kg CO2 –eq./tn ww

9.2.1 Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι εκπομπές ΑΦΘ από την επεξεργασία του οργανικού κλάσματος των αστικών αποβλήτων με τη μέθοδο της κομποστοποίησης σε επίπεδο Ελλάδας. Οι ποσότητες που διαχειρίστηκαν την περίοδο αναφοράς (1997-2015) αλλά και αυτές που προβλέπονται από τον ΕΣΔΑ να διαχειριστούν το 2020, με οικιακή και κεντρική κομποστοποίηση, παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί. Όπως φαίνεται, οι ποσότητες που αντιστοιχούν στην οικιακή κομποστοποίηση είναι πολύ μικρές σε σχέση με αυτές που διαχειρίζονται κεντρικά, και ανέρχονται στο 5% των συνολικά διαχειριζόμενων ποσοτήτων.



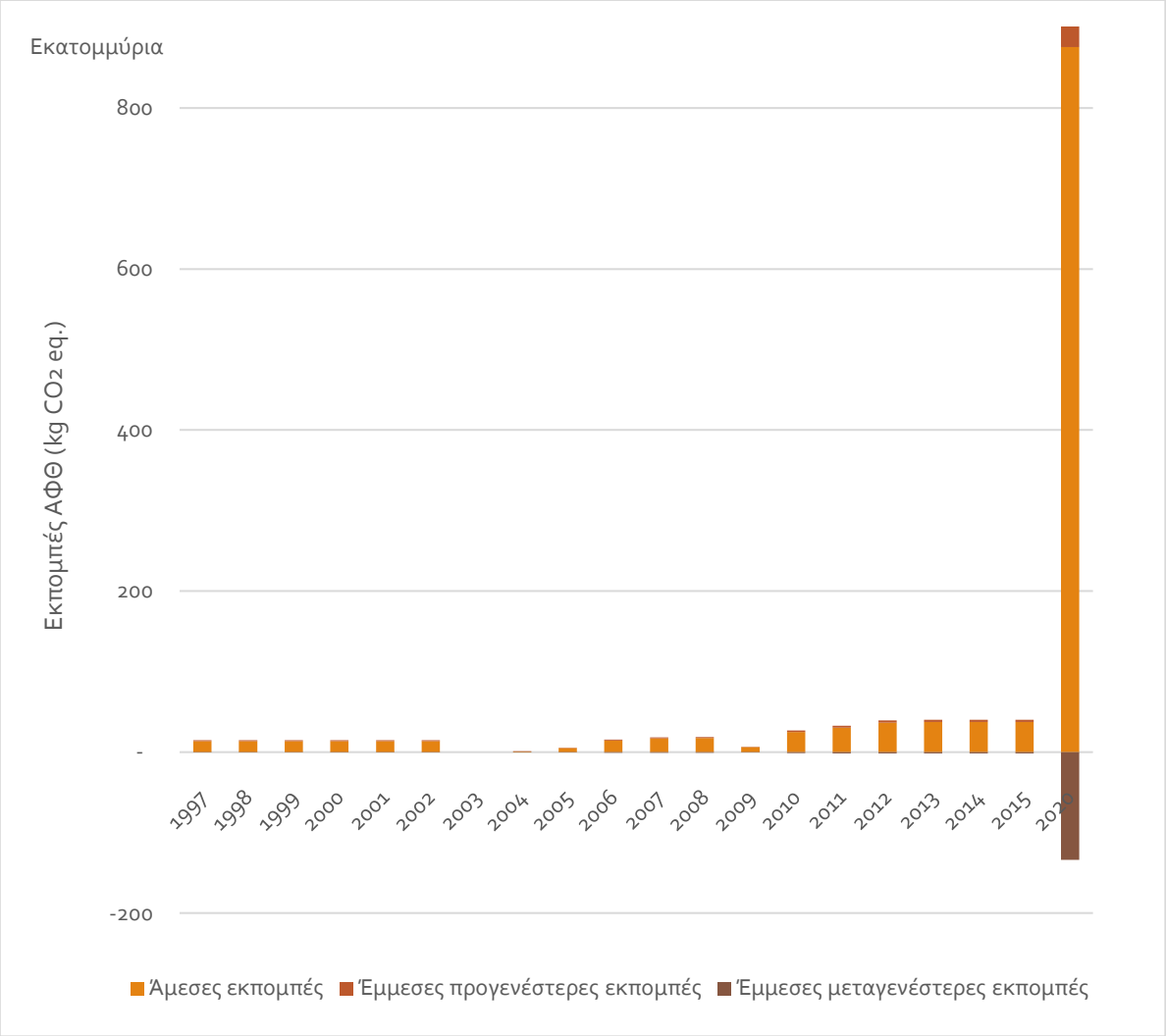
Σχήμα 59: Διαχειριζόμενες ποσότητες οργανικών αποβλήτων αστικής προέλευσης με τη μέθοδο της οικιακής και κεντρικής κομποστοποίησης την περίοδο 1997-2015 και το 2020, επίπεδο Ελλάδας

Στο Σχήμα 60 παρουσιάζονται οι συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από την κομποστοποίηση οργανικών αποβλήτων, οικιακά αλλά και κεντρικά στις ΕΜΑΚ, για την περίοδο από το 1997 όταν ξεκίνησε η κεντρική κομποστοποίηση μέχρι και το 2015 (υφιστάμενη κατάσταση), αλλά και για το 2020 σύμφωνα με τον στόχο του ΕΣΔΑ για το 2020 όσον αφορά την ανάκτηση των οργανικών αποβλήτων και την κομποστοποίηση.

Κατά μέσο όρο την περίοδο αυτή, οι άμεσες εκπομπές από τη διεργασία της κομποστοποίησης αποτελούν το 83% των συνολικών εκπομπών, οι έμμεσες προγενέστερες εκπομπές συνεισφέρουν κατά 7%, ενώ οι έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές από την υποκατάσταση της παραγωγής ανόργανων λιπασμάτων (με αρνητικό πρόσημο) συμμετέχουν κατά 10% στις συνολικές εκπομπές.

Ειδικότερα, οι μέσες ετήσιες καθαρές εκπομπές από την κομποστοποίηση την περίοδο 1997-2015 υπολογίζονται σε 18.8 εκατομμύρια kg CO_2 eq. και αντιστοιχούν στη διαχείριση περίπου 46,000 τόνων οργανικών αποβλήτων/έτος κατά μέσο όρο, το οποίο ισοδυναμεί με 409 kg CO_2 eq./τόνο αποβλήτων. Το έτος 2020 όπου προβλέπεται σύμφωνα με το στόχο του ΕΣΔΑ η επεξεργασία 2,048,000 τόνων με κομποστοποίηση (ποσότητα περίπου 45 φορές μεγαλύτερη από τον υφιστάμενο μέσο όρο), οι αντίστοιχες εκπομπές υπολογίζονται σε 812.3 εκατομμύρια kg CO_2 eq., οι οποίες αντιστοιχούν σε 383 εκατομμύρια kg CO_2 eq./τόνο αποβλήτων. Οι εκπομπές ανά τόνο αποβλήτων είναι ελαφρώς χαμηλότερες από την υφιστάμενη περίοδο, λόγω του γεγονότος ότι το παραγόμενο κόμποστ θεωρείται ότι υποκαθιστά 100% την παραγωγή ανόργανων λιπασμάτων.

Η οικιακή κομποστοποίηση λόγω της μικρής συμμετοχής που έχει στις συνολικές ποσότητες που διαχειρίζονται, συνεισφέρει μόνο 1.2% στις συνολικές εκπομπές.



Σχήμα 60: Συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από την οικιακή και κεντρική κομποστοποίηση οργανικών αποβλήτων, σε επίπεδο Ελλάδας, 1997-2015 και 2020

9.3 Υπολογισμός εκπομπών ΑΦΘ από την ανακύκλωση

Ο υπολογισμός των εκπομπών ΑΦΘ από την επεξεργασία και ανακύκλωση των συλλεγόμενων ανακυκλώσιμων αποβλήτων που βρίσκονται στα αστικά απόβλητα, βασίζεται και εδώ στην κατηγοριοποίηση των εκπομπών με βάση το στάδιο κατά το οποίο προκύπτουν, ήτοι έμμεσες προγενέστερες, άμεσες και έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές. Οι εισροές στο κάθε στάδιο και οι αντίστοιχοι συντελεστές εκπομπών που χρησιμοποιήθηκαν για την κάθε κατηγορία προκύπτουν από το μέσο όρο των σχετικών τιμών που δίνονται στους *Merrild et al.* (2009), *Astrup et al.* (2009), *Larsen et al.* (2009), *Damgaard et al.* (2009), και παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Σημειώνεται ωστόσο ότι για την περίπτωση του ηλεκτρισμού ο οποίος καταναλώνεται στα ΚΔΑΥ (έμμεσες προγενέστερες εκπομπές), χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρισμού σε ετήσια βάση, τα οποία ανάχθηκαν ανά τόνο διαχειριζόμενου αποβλήτου (kWh/tn αποβλήτου), και τα οποία χορηγήθηκαν από την ΕΕΑΑ.

Πίνακας 11: Εισροές και συντελεστές εκπομπών για την επεξεργασία και ανακύκλωση ανακυκλώσιμων αστικών αποβλήτων,

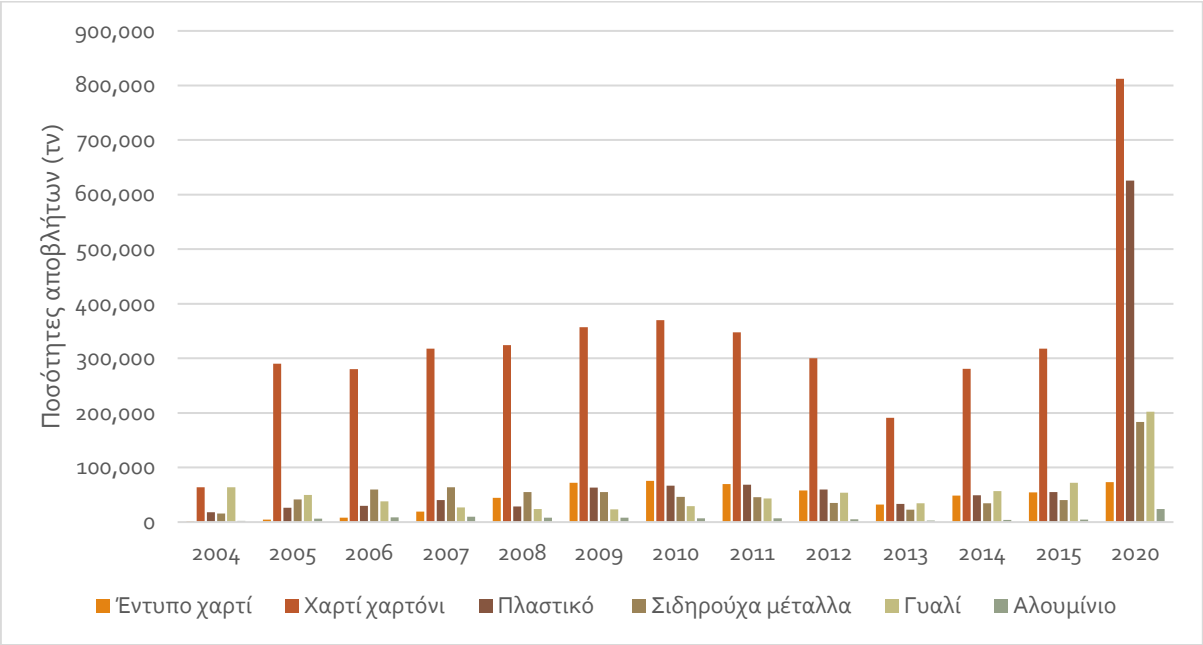
ανά τόνο απόβλητου

Υλικό	Έμμεσες προγενέστερες εκπομπές	Άμεσες εκπομπές	Έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές
Χαρτί	Παροχή ντήζελ: 0.7-1L (0.3-0.5kg CO_2eq.)	Καύση ντήζελ σε ανυψωτικά οχήματα: 0.7-1L (1.9-2.7kg CO_2eq.)	Επανεπεξεργασία 976kg διαλεγμένου απόβλητου χαρτιού για την υποκατάσταση χαρτιού από παρθένες πρώτες ύλες: -1269 έως 390 kg CO_2eq.
	Παροχή υγρού καύσιμου ή φυσικού αερίου: 15-87MJ (0.1-1.2kg CO_2eq.)	Καύση υγρού καύσιμου ή φυσικού αερίου: 15-87MJ (0.8-6.7kg CO2eq.)	
	Παροχή ηλεκτρισμού: 9-30kWh (0.9-27kg CO_2eq.)		
Πλαστικό	Παροχή φυσικού αερίου: 0-25Nm3 (0.1-1.2kg CO_2eq.)	Καύση ντήζελ: 0-1L (0-2.7kg CO_2eq.)	Υποκατάσταση πλαστικού από παρθένες πρώτες ύλες (απώλεια υλικού 3%, απώλεια ποιότητας: 20%): -1260 έως -838kg CO_2eq.
	Παροχή υγρού καύσιμου: 0-1L (0-0.5kg CO_2eq.)	Καύση φυσικού αερίου: 0-25Nm3 (0-55kg CO_2eq.)	
	Παροχή ντήζελ: 0-1L (0-0.5kg CO_2eq.)	Καύση υγρού καύσιμου: 0-1L (0-2.7kg CO_2eq.)	
	Παροχή ηλεκτρισμού: 25-600kWh (23-540kg CO_2eq.)		
	Παροχή νερού: 0-2m3 (0-0.4kg CO_2eq.)		
Γυαλί	Παροχή ηλεκτρισμού: 12-20kWh (1.2-18kg CO_2eq.)	Καύση φυσικού αερίου για τα μηχανήματα και τη θέρμανση κτιρίων: 0-4.3Nm3 (0-9.5kg CO_2eq.)	Λιώσιμο των υαλοθραυσμάτων για την υποκατάσταση ενός τόνου γυαλιού από παρθένες πρώτες ύλες: Χρήση ενέργειας στην κάμινο: ? Έως 1.9GJ (-176 έως -115kg CO_2eq.) Ασβεστοποίηση: -200kg CO_2eq. Παροχή πρώτων υλών: -1200kg (-130 kg CO_2eq.)
	Παροχή φυσικού αερίου: 0-4.3Nm3 (0-1.3kg CO_2eq.)		
Αλουμίνιο	Παροχή ηλεκτρισμού: 50kWh (5-44.5kg CO_2eq.)	Καύση ντήζελ: 2.5L (6.8kg CO_2eq.)	Επανεπεξεργασία και υποκατάσταση παραγωγής 950kg αλουμινίου από παρθένες πρώτες ύλες: -5040 έως -19340kg CO_2eq.
	Παροχή ντήζελ: 2.5L (1-1.3kg CO_2eq.)		
Σιδηρούχα μέταλλα	Παροχή ηλεκτρισμού: 50kWh (5-44.5kg CO_2eq.)	Καύση ντήζελ: 2.5L (6.8kg CO_2eq.)	Επανεπεξεργασία και υποκατάσταση παραγωγής 980kg ατσαλιού από παρθένες πρώτες ύλες: -560 έως -2360kg CO_2eq.
	Παροχή ντήζελ: 2.5L (1-1.3kg CO_2eq.)		

Από τον πίνακα φαίνεται ότι οι υψηλότερες εκπομπές σχετίζονται με το στάδιο της ανακύκλωσης των αποβλήτων και της υποκατάστασης της παραγωγής των αντίστοιχων υλικών από παρθένες πρώτες ύλες (έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές), οι οποίες έχουν αρνητικό πρόσημο καθώς αφορούν αποφευχθείσες εκπομπές. Μεταξύ των εξεταζόμενων ρευμάτων ανακυκλώσιμων αποβλήτων, οι υψηλότερες αποφευχθείσες εκπομπές (ανά τόνο αποβλήτου) σχετίζονται με την ανακύκλωση των αποβλήτων αλουμινίου.

9.3.1 Αποτελέσματα

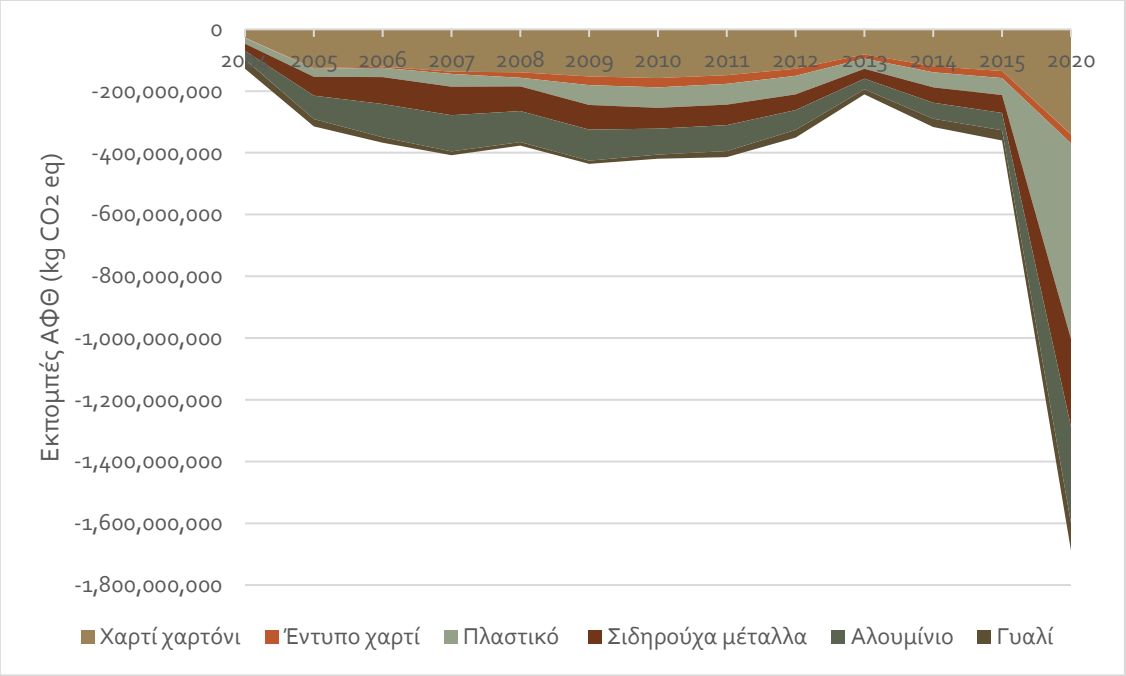
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται αρχικά οι ποσότητες αποβλήτων που επεξεργάστηκαν τα ΚΔΑΥ ανά ρεύμα την περίοδο από το 2004, όταν ξεκίνησε η λειτουργία τους, έως το 2015 (υφιστάμενη περίοδος) με βάση τις ετήσιες εκθέσεις της ΕΕΑΑ, αλλά και η αντίστοιχη ποσότητα για το 2020 σύμφωνα με το στόχο του ΕΣΔΑ (2015) για την ανάκτηση ανακυκλώσιμων αποβλήτων (Σχήμα 61). Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση των αντίστοιχων ποσοτήτων αποβλήτων για την ίδια περίοδο (Σχήμα 62).



Σχήμα 61: Ποσότητες διαχειριζόμενων ανακυκλώσιμων αποβλήτων ανά ρεύμα την περίοδο 2004-2015 και το 2020 (στόχος), επίπεδο Ελλάδας

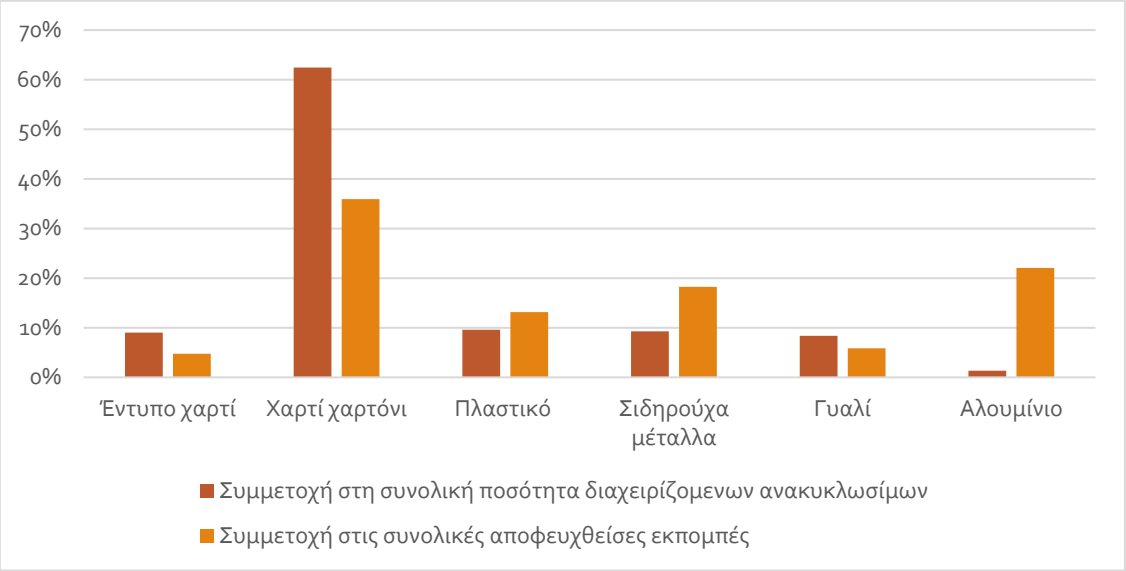
Από το προηγούμενο σχήμα φαίνεται καταρχάς μια μικρή αύξηση της ποσότητας των διαχειριζόμενων αποβλήτων διαχρονικά όσον αφορά την υφιστάμενη περίοδο, με εξαίρεση την περίοδο 2010-2013 όπου η ανακύκλωση παρουσιάζει μείωση, λόγω της οικονομικής κρίσης (ΕΟΑΝ, 2014). Επίσης, την περίοδο 2010-2013 έγινε παύση της λειτουργίας σε 2 ΚΔΑΥ, το ΚΔΑΥ Φυλής και το ΚΔΑΥ Αμαρουσίου τα οποία διαχειρίζονταν σημαντικές ποσότητες αποβλήτων. Για το έτος 2020, οι προβλεπόμενες διαχειριζόμενες ποσότητες είναι πολύ υψηλότερες σε σχέση με το μέσο όρο της υφιστάμενης περιόδου, ιδιαίτερα για το πλαστικό όπου οι προβλεπόμενες ποσότητες είναι 13 φορές μεγαλύτερες. Για τα υπόλοιπα ρεύματα αποβλήτων, οι προβλεπόμενες διαχειριζόμενες ποσότητες για το 2020 είναι κατά μέσο όρο 4 φορές μεγαλύτερες σε σχέση με την υφιστάμενη περίοδο.

Οι συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από την επεξεργασία και ανακύκλωση αποβλήτων για την χρονική περίοδο 2004-2015, παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί. Όπως φαίνεται, οι καθαρές εκπομπές ΑΦΘ από την ανακύκλωση όλων των υλικών είναι αρνητικές, καθώς οι αποφευχθείσες εκπομπές ΑΦΘ λόγω της υποκατάστασης της παραγωγής των αντίστοιχων υλικών από παρθένες πρώτες ύλες (έμμεσες μεταγενέστερες εκπομπές) και οι οποίες αφαιρούνται από το σύνολο των προγενέστερων και των άμεσων εκπομπών, είναι σημαντικά μεγαλύτερες. Κατά μέσο όρο την υφιστάμενη περίοδο οι συνολικές εκπομπές είναι -342 εκατομμύρια kg CO_2 eq. (-736 kg CO_2 eq./τόνο αποβλήτου), ενώ για το 2020 υπολογίζονται σε -1689 εκατομμύρια kg CO_2 eq. (-879 kg CO_2 eq./τόνο αποβλήτου). Οι συνολικές αποφευχθείσες εκπομπές το 2020 είναι περίπου 5 φορές μεγαλύτερες σε σχέση με την υφιστάμενη περίοδο, ενώ οι αντίστοιχες ανηγμένες εκπομπές ανά τόνο αποβλήτων είναι μόνο ελαφρώς μεγαλύτερες.



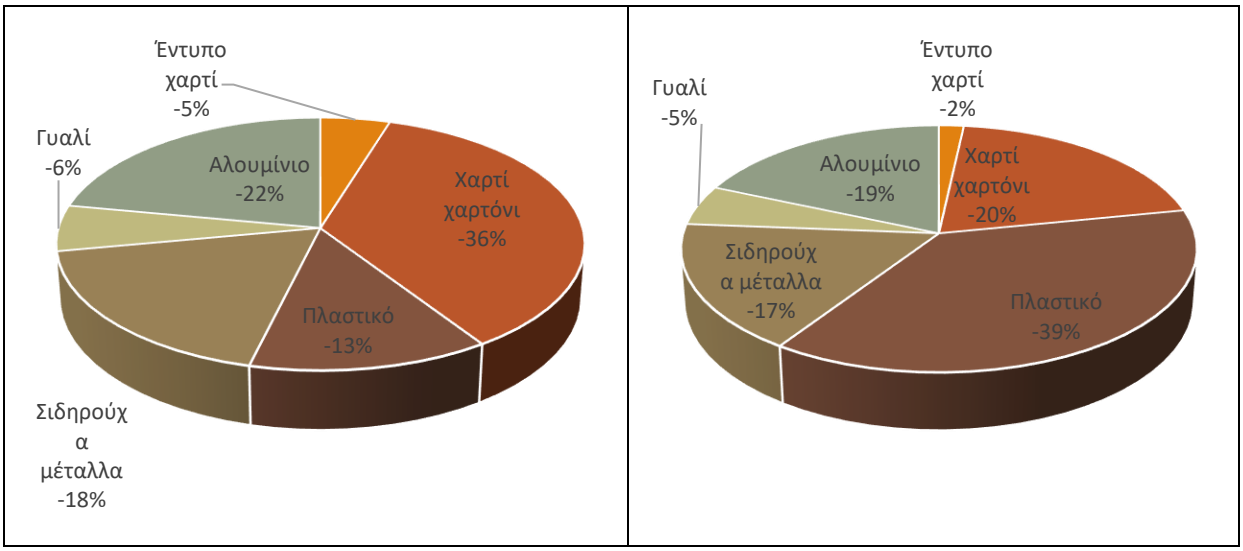
Σχήμα 62: Συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από την ανακύκλωση αποβλήτων ανά υλικό για την περίοδο 2004-2015 & για το έτος-στόχο 2020 (kg CO2 eq.)

Από το προηγούμενο σχήμα φαίνεται ότι μεγαλύτερη συμμετοχή στις συνολικές αποφευχθείσες εκπομπές της υφιστάμενης περιόδου έχει το ρεύμα χαρτιού/χαρτονιού, το οποίο οφείλεται στη μεγάλη συγκέντρωση του ρεύματος αυτού στα συνολικά διαχειριζόμενα απόβλητα (62%), όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 63: Ποσοστιαία συμμετοχή των ρευμάτων αποβλήτων στη συνολική ποσότητα των διαχειριζόμενων ανακυκλώσιμων αποβλήτων και στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείρισή τους, μ.ο. 2004-2015

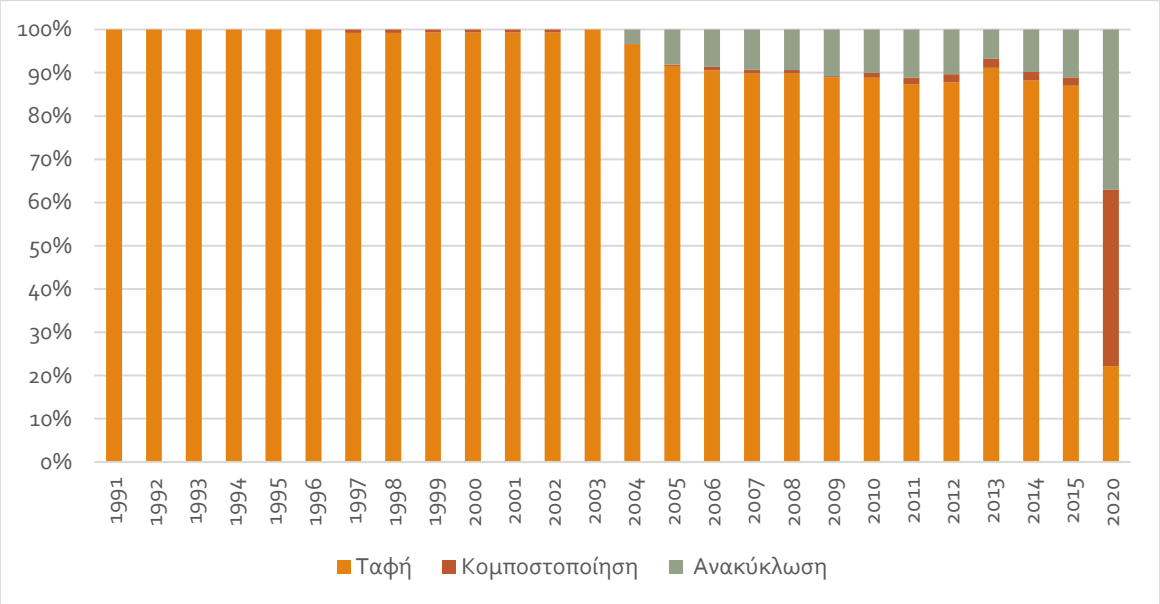
Το γεγονός ότι οι αποφευχθείσες εκπομπές ανά τόνο αποβλήτων είναι ελαφρώς μεγαλύτερες το 2020 σε σχέση με την υφιστάμενη περίοδο αποδίδεται στη διαφορετική σύσταση των διαχειριζόμενων αποβλήτων. Ειδικότερα, στη σύσταση των ανακτημένων ανακυκλώσιμων αποβλήτων το 2020 σύμφωνα με τους στόχους του ΕΣΔΑ (2015), έχουν μεγαλύτερη συμμετοχή ρεύματα αποβλήτων με υψηλότερες αποφευχθείσες εκπομπές λόγω ανακύκλωσης, π.χ. μεγαλύτερη συμμετοχή του πλαστικού και μικρότερη του χαρτιού. Η συμμετοχή του κάθε ρεύματος στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ για την υφιστάμενη περίοδο και το 2020 παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 64: Συμμετοχή ρευμάτων ανακυκλώσιμων αποβλήτων στις συνολικές εκπομπές, 2004-2015 (αριστερά) και 2020 (δεξιά)

9.4 Συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση ΑΣΑ στην Ελλάδα

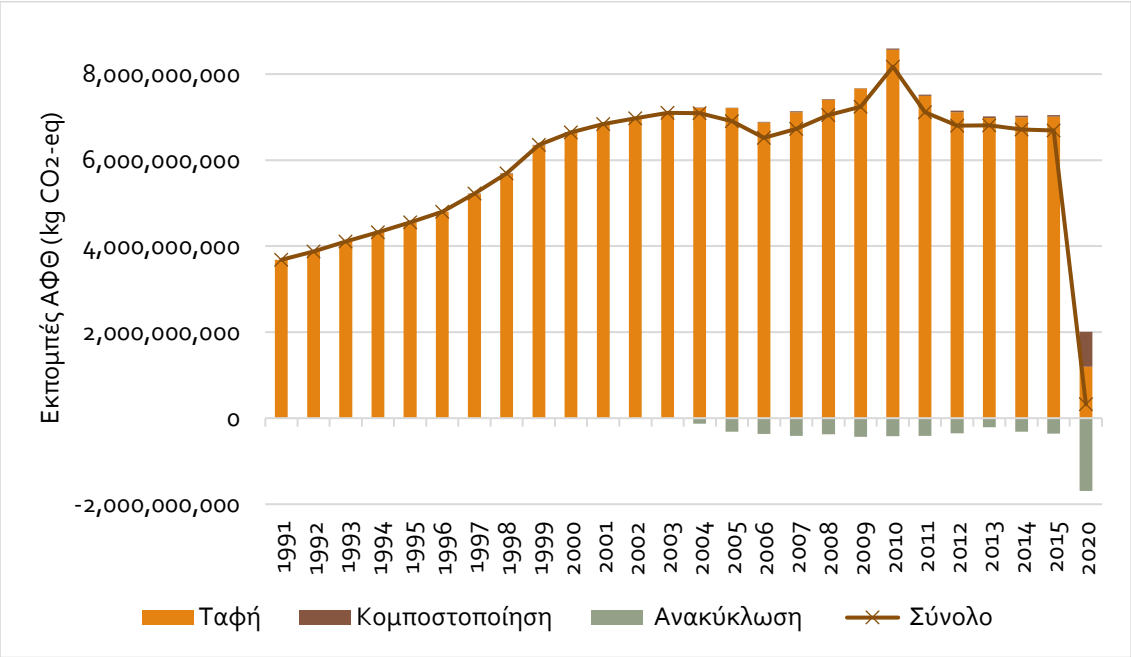
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα, τόσο για την υφιστάμενη περίοδο όσο και για το έτος 2020 για το οποίο θέτει στόχους ο ΕΣΔΑ (2015) για υψηλότερα ποσοστά ανάκτησης των οργανικών και ανακυκλώσιμων αποβλήτων. Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί συνολικά η κατάσταση όσον αφορά τη διαχείριση των αστικών αποβλήτων για την περίοδο αυτή και σε σύγκριση με την προβλεπόμενη κατάσταση το 2020. Όπως φαίνεται από το ακόλουθο σχήμα, ενώ για την υφιστάμενη περίοδο η κυρίαρχη μέθοδος διαχείρισης των αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα είναι η ταφή (>85%), για το έτος 2020 προβλέπεται ριζική αλλαγή με μόνο 22% των αστικών αποβλήτων να οδηγείται για ταφή και το υπόλοιπο 78% να κατανέμεται σχεδόν ισομερώς μεταξύ της ανακύκλωσης και της κομποστοποίησης.



Σχήμα 65: Ποσοστιαία κατανομή των μεθόδων διαχείρισης των αστικών αποβλήτων για την περίοδο 1991-2015 και το έτος-στόχο 2020, επίπεδο Ελλάδας

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των καθαρών εκπομπών ΑΦΘ από τη διαχείριση των αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα ανά μέθοδο διαχείρισης για την περίοδο 1991-2015 και το έτος-στόχο 2020. Καθώς στην περίπτωση της ταφής των αποβλήτων οι σχετικές εκπομπές συνεχίζουν να εκλύονται για πολλά έτη μετά το έτος της απόθεσης, υπολογίστηκαν αρχικά σε ορίζοντα 100ετίας και στη συνέχεια επιμερίστηκαν στα έτη των εξεταζόμενων περιόδων ανάλογα με τις αποτιθέμενες ποσότητες, προκειμένου να είναι συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες των υπολοίπων μεθόδων διαχείρισης. Για το έτος 2020, θεωρείται ότι γίνεται συλλογή και καύση του παραγόμενου βιοαερίου σε ποσοστό 50%. Για την υφιστάμενη περίοδο δεν υπολογίζεται συλλογή του παραγόμενου βιοαερίου.

Από το σχήμα φαίνεται ότι οι συνολικές εκπομπές από τη διαχείριση των αποβλήτων στην Ελλάδα την υφιστάμενη περίοδο είναι αρκετά υψηλές καθώς καθορίζονται κατά κύριο λόγο από τις εκπομπές της ταφής, με την υψηλότερη τιμή να καταγράφεται το 2010 (περίπου 8,200 εκατομμύρια kg CO_2eq.), ενώ τα επόμενα έτη οι εκπομπές είναι ελαφρώς χαμηλότερες, το οποίο αποδίδεται κυρίως στη χαμηλότερη παραγωγή αποβλήτων λόγω της οικονομικής κρίσης. Το 2020, οι καθαρές εκπομπές υπολογίζονται σε περίπου 300 εκατομμύρια kg CO_2eq., ποσότητα 25 φορές μικρότερη σε σχέση με το 2010, για μια διαχειριζόμενη ποσότητα αποβλήτων μόνο ελαφρώς μικρότερη (-12%) σε σχέση με το 2010. Στις εκπομπές αυτές του 2020, συμμετέχουν με ποσοστό 32% οι εκπομπές από την ταφή (που προέρχονται από το 22% των ΑΣΑ), με ποσοστό 22% οι εκπομπές από την κομποστοποίηση (41% των ΑΣΑ), και τέλος, με ποσοστό 46% οι εκπομπές από την ανακύκλωση (37% των ΑΣΑ). Ωστόσο, καθώς οι καθαρές εκπομπές από την ανακύκλωση είναι αρνητικές, αφαιρούνται από τις υπόλοιπες εκπομπές.



Σχήμα 66: Συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τις διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων για την περίοδο 1991-2015 και για το έτος-στόχο 2020, επίπεδο Ελλάδας

Εάν είχε υπολογιστεί για την περίπτωση της ταφής και η αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου για την παραγωγή ενέργειας και η υποκατάσταση της παραγωγής και χρήσης ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, οι συνολικές καθαρές εκπομπές το 2020 θα ήταν ακόμα χαμηλότερες και, ενδεχομένως, αρνητικές.

Επιπλέον, όπως φαίνεται από το ανωτέρω σχήμα η κομποστοποίηση μειώνει σημαντικά τις εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση των οργανικών αποβλήτων. Ωστόσο θα μπορούσαν να εξεταστούν και άλλες μέθοδοι διαχείρισης του ρεύματος αυτού, οι οποίες παράγουν και άλλα προϊόντα εκτός από εδαφοβελτιωτικό (π.χ. ενέργεια), και επομένως έχουν μεγαλύτερο δυναμικό περιορισμού των σχετικών εκπομπών, όπως η αναερόβια χώνευση. Επίσης, δεν είναι σίγουρο ότι το παραγόμενο

εδαφοβελτιωτικό θα μπορούσε να υποκαταστήσει σε ποσοστό 100% την παραγωγή και χρήση ανόργανων λιπασμάτων, όπως έχει θεωρηθεί στην παρούσα μελέτη, καθώς οι παραγόμενες ποσότητες θα είναι αρκετά μεγάλες το 2020 και η ζήτηση από τους αγρότες μπορεί να είναι μικρότερη από την προσφορά. Αυτό εξαρτάται τόσο από την πραγματική ανάγκη για χρήση λιπασμάτων και από την προτίμηση που θα δείξουν οι αγρότες στο προϊόν αυτό. Για παράδειγμα, κάποιοι αγρότες μπορεί να μην εμπιστεύονται την ποιότητα ή την αποτελεσματικότητα του παραγόμενου εδαφοβελτιωτικού και έτσι να μην το χρησιμοποιούν ή να το χρησιμοποιούν σε συνδυασμό με τα ανόργανα λιπάσματα. Σημαντικό παράγοντα για την ευρύτερη αποδοχή του προϊόντος αυτού αποτελεί η ενημέρωση και εκπαίδευση των αγροτών, καθώς και η πιστοποίηση των προϊόντων αυτών.

Τέλος, όσον αφορά την ανακύκλωση, σημαντικό ρόλο παίζει η καθαρότητα των ανακτημένων ανακυκλώσιμων αποβλήτων, η οποία μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της ανακύκλωσης και το βαθμό υποκατάστασης της πρωτογενούς παραγωγής προϊόντων. Για τη μεγιστοποίηση της καθαρότητας των συλλεγμένων αποβλήτων, είναι σημαντικό να υπάρχει επαρκής ενημέρωση και εκπαίδευση των πολιτών για τη διαλογή στην πηγή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10. Ερευνητική ενότητα Α2: ΑΚΖ για την ανακύκλωση χωριστά συλλεχθέντων ξηρών ανακυκλώσιμων αποβλήτων

Στο πλαίσιο της παρούσας ενότητας παρουσιάζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε για την υλοποίηση ενός συστήματος διαλογής στην πηγή σε τέσσερα ρεύματα των ανακυκλώσιμων αποβλήτων (χαρτί, πλαστικό, γυαλί, μέταλλο), όπως προβλέπεται από τον τελευταίο σε ισχύ Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων (ΥΠΕΚΑ, 2015).

10.1 Στάδιο διαλογής και προεπεξεργασίας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τις διεργασίες και τα δεδομένα εισόδου στα στάδια της διαλογής και προεπεξεργασίας των χωριστά συλλεχθέντων ανακυκλώσιμων αποβλήτων για κάθε ρεύμα αποβλήτων. Γενικά παρατηρείται ότι λόγω της προδιαλογής των ανακυκλώσιμων αποβλήτων στην πηγή, τα ποσοστά καθαρότητας των ρευμάτων αποβλήτων καθώς και τα ποσοστά ανάκτησης των υλικών στα ΚΔΑΥ είναι σημαντικά μεγαλύτερα, με αποτέλεσμα μια συνολική ανάκτηση των υλικών σε επίπεδο 94% σε σχέση με τα αντίστοιχα μέσα επίπεδα ανάκτησης στα υφιστάμενα ΚΔΑΥ (~60%) που υποδέχονται σύμμεικτα ανακυκλώσιμα απόβλητα.

10.1.1 Χαρτί/χαρτόνι

Σκοπός του σταδίου διαλογής και προετοιμασίας του προδιαλεγμένου ρεύματος των αποβλήτων χαρτιού και χαρτονιού στο ΚΔΑΥ είναι η χειρωνακτική απομάκρυνση των προσμίξεων και η δεματοποίησή τους. Η κατανάλωση ενέργειας περιλαμβάνει κυρίως τον ιμάντα μεταφοράς του απόβλητου και τη συμπίεσή του (Rigamonti et al., 2009).

Η καθαρότητα του εισερχόμενου ρεύματος θεωρείται ίση με 100% για το χαρτόνι και 88% για το χαρτί, ενώ το ποσοστό ανάκτησης στο ΚΔΑΥ είναι ίσο με 100% για το χαρτόνι και 99% για το χαρτί. Η συνολική ανάκτηση υπολογίζεται σε 100% για το χαρτόνι και 88*99= 87% για το χαρτί και σε 99% και για τα δύο μαζί, με βάση την αναλογία τους στο εν λόγω ρεύμα. Το υπόλοιπο 1% του εισερχόμενου ρεύματος είναι υπόλειμμα του σταδίου αυτού και στέλνεται για ταφή. Η κατανάλωση ενέργειας της διεργασίας αυτής υπολογίζεται με βάση τους *Arena et al.* (2004), ενώ το ποσοστό ανάκτησης είναι σύμφωνα με τους *Pressley et al.* (2015).

Πίνακας 12. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της διαλογής και προεπεξεργασίας των αποβλήτων χαρτιού-χαρτονιού

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Κατανάλωση ηλεκτρισμού στο ΚΔΑΥ	0.0059	kWh
Ταφή υπολειμμάτων	1.0-0.99= 0.1	kg

10.1.2 Πλαστικό

Σε αυτό το στάδιο, το προδιαλεγμένο ρεύμα των αποβλήτων πλαστικού αρχικά διαχωρίζεται σε ΚΔΑΥ στα επιμέρους υλικά-στόχους και στη συνέχεια τα επιμέρους υλικά υφίστανται προεπεξεργασία προκειμένου να είναι κατάλληλα για ανακύκλωση. Συγκεκριμένα, ο διαχωρισμός γίνεται με οπτικούς διαχωριστές NIR (near infra-red) για την ανάκτηση του PET (Πολυτερεφθαλικό αιθυλένιο), του HDPE (πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας) και του PP (πολυπροπυλένιο). Στη συνέχεια γίνεται χειρωνακτικός

διαχωρισμός των PET και HDPE για την αύξηση της απόδοσης της ανάκτησής τους σε επίπεδα 90-100% (Morrish et al., 2010; Rigamonti et al., 2014). Τα διαχωρισμένα υλικά οδηγούνται στη συνέχεια ξεχωριστά για προεπεξεργασία προκειμένου να προετοιμαστούν για ανακύκλωση. Η προεπεξεργασία περιλαμβάνει χειρωνακτικό διαχωρισμό, ηλεκτρομαγνητικό διαχωρισμό για την απομάκρυνση άλλων πλαστικών, μαγνητικό διαχωρισμό των μετάλλων, άλεση και διήθηση/κοσκίνισμα (Rigamonti et al., 2009).

Σύμφωνα με τους Rigamonti et al. (2014), κάθε οπτικός διαχωριστής καταναλώνει 12kwh ανά διερχόμενο τόνο αποβλήτου, με βάση το μέσο όρο από τις τιμές που αναφέρονται στη μελέτη της WRAP (Shonfield,2008). Επομένως, με βάση την επιμέρους σύσταση του εισερχόμενου ρεύματος πλαστικών (70%PET-20%HDPE- 5%PP- 5% ανάμεικτα πλαστικά) συμπεραίνεται ότι η συνολική κατανάλωση στους οπτικούς διαχωριστές είναι 19.2 kwh/tn. Οι υπόλοιπες διεργασίες προεπεξεργασίας υπολογίζεται ότι καταναλώνουν περίπου 76kWh/tn εισερχόμενου υλικού, με βάση τους *Rigamonti et al.* (2009). Σημειώνεται ότι ενώ η προεπεξεργασία των PET και HDPE υπολογίζεται σε αυτό το στάδιο, για το PP λαμβάνεται υπόψη στο στάδιο της ανακύκλωσης, λόγω έλλειψης διακριτών δεδομένων για την προεπεξεργασία και την ανακύκλωση του PP.

Η καθαρότητα του εισερχόμενου ρεύματος θεωρείται ίση με 88%, ενώ το ποσοστό ανάκτησης στο ΚΔΑΥ είναι ίσο με 95% για το PET και το HDPE και 67.5% για το PP (Morrish et al., 2010). Η συνολική ανάκτηση υπολογίζεται σε 84% για το για το PET/HDPE και σε 59% για το PP, το οποίο ισοδυναμεί με 77% για όλα μαζί, με βάση την αναλογία τους στο εν λόγω ρεύμα. Το υπόλοιπο 23% του εισερχόμενου ρεύματος είναι υπόλειμμα του σταδίου αυτού και στέλνεται για ταφή.

Πίνακας 13. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της διαλογής και προεπεξεργασίας των αποβλήτων πλαστικού

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Ηλεκτρισμός για τον οπτικό διαχωρισμό στο ΚΔΑΥ	0.0192	kWh
Ηλεκτρισμός για την προεπεξεργασία PET/HDPE	0.076*(0.88*0.95)	kWh
Καύσιμο diesel για την προεπεξεργασία PET/HDPE	0.351*(0.88*0.95)	MJ
Ταφή υπολειμμάτων	1.0-0.77= 0.23	kg

10.1.3 Γυαλί

Σκοπός της διαλογής και προετοιμασίας του προδιαλεγμένου ρεύματος των αποβλήτων γυαλιού στο ΚΔΑΥ είναι η θραύση τους, ο καθαρισμός τους από προσμίξεις και ο διαχωρισμός τους σε τρία επιμέρους ρεύματα με βάση το χρώμα τους (διάφανο, καφέ, πράσινο). Η διεργασία που επιλέγεται για αυτό το σκοπό είναι αυτή που περιγράφεται στο ΚΔΑΥ διπλού ρεύματος των *Pressley et al.* (2015). Ειδικότερα, το γυαλί όπως εισέρχεται στη γραμμή διαλογής περνάει πρώτα από ένα κόσκινο όπου υφίσταται θραύση και τα υαλοθραύσματα περνάνε μέσα από το κόσκινο μαζί με άλλα σωματίδια μικρής διαμέτρου. Το γυαλί και τα μικρά σωματίδια περνάνε από μαχαίρια αέρα (air knives) τα οποία διαχωρίζουν τα μικρά σωματίδια και άλλα ελαφριά υλικά από το γυαλί. Το γυαλί περνάει στη συνέχεια από οπτικό διαχωριστή, όπου διαχωρίζεται ανάλογα με το χρώμα. Το διαχωρισμένο γυαλί στο τέλος περνάει από χειρωνακτική διαλογή για την απομάκρυνση κεραμικών και άλλων προσμίξεων.

Η καθαρότητα του εισερχόμενου ρεύματος θεωρείται ίση με 93% και το ποσοστό ανάκτησης στο ΚΔΑΥ ίσο με 93.5% (Pressley et al., 2015; Rigamonti et al., 2009), ενώ η συνολική ανάκτηση θεωρείται ίση με 93x93.5=87%. Το υπόλοιπο 13% του εισερχόμενου ρεύματος είναι υπόλειμμα του σταδίου αυτού και στέλνεται για ταφή. Η κατανάλωση ενέργειας της διεργασίας αυτής καθώς και το ποσοστό ανάκτησης είναι σύμφωνα με τους *Pressley et al.* (2015).

Πίνακας 14. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της διαλογής και προεπεξεργασίας των αποβλήτων γυαλιού

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Κατανάλωση ηλεκτρισμού στο ΚΔΑΥ	0.0148	kWh
Ταφή υπολειμμάτων	1.0-(0.93*0.935)= 0.13	kg

Στην περίπτωση της διαλογής των αποβλήτων γυαλιού σε ΚΔΑΥ, δεν συνηθίζεται να διαχωρίζονται οι ακέραιες φιάλες με σκοπό την προετοιμασία για επαναχρησιμοποίηση, καθώς αυτό απαιτεί χειρωνακτική διαλογή για τον ποιοτικό έλεγχο, η οποία μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος και το χρόνο της διεργασίας. Επιπλέον, η συλλογή των αποβλήτων γυαλιού σε κάδους και η μεταφορά τους σε σακούλες ή χύμα, έχει ως αποτέλεσμα να σπάει το γυαλί και έτσι αυξάνει το ποσοστό των μη κατάλληλων φιαλών, με συνέπεια την περαιτέρω μείωση της βιωσιμότητας της διεργασίας.

10.1.4 Μέταλλα

Το προδιαλεγμένο ρεύμα αποβλήτων μετάλλων διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους ρεύματα στο στάδιο αυτό, τα σιδηρούχα και τα μη σιδηρούχα μέταλλα. Αναλυτικότερα, οι διεργασίες που ακολουθούνται παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1.1.1. *Σιδηρούχα μέταλλα*

Τα προδιαλεγμένα απόβλητα προϊόντων μετάλλων εισέρχονται αρχικά σε ένα ΚΔΑΥ όπου με ένα μαγνήτη γίνεται διαχωρισμός των μη σιδηρούχων μετάλλων και ανάκτηση των σιδηρούχων μετάλλων, ενώ στο τέλος γίνεται συμπίεση και δεματοποίηση (Pressley et al., 2015). Στη συνέχεια το ρεύμα σιδηρούχων μετάλλων μεταφέρεται σε άλλη μονάδα όπου προετοιμάζεται για την ανακύκλωσή του. Συγκεκριμένα, η προετοιμασία περιλαμβάνει τον τεμαχισμό και την απομάκρυνση των προσμίξεων (χαρτί, πλαστικά, μη σιδηρούχα μέταλλα) με μαγνήτη, προκειμένου να καθαριστεί περαιτέρω το ρεύμα και να είναι έτοιμο να σταλθεί στο χυτήριο για ανακύκλωση (Rigamonti et al., 2009). Η κατανάλωση ηλεκτρισμού στο ΚΔΑΥ και στη μονάδα προεπεξεργασίας βασίζεται στους Pressley et al. (2015) και Rigamonti et al. (2009), αντίστοιχα.

Η καθαρότητα του εισερχόμενου ρεύματος θεωρείται ίση με 90% και το ποσοστό ανάκτησης στο ΚΔΑΥ ίσο με 97% (Pressley et al., 2015), ενώ η συνολική ανάκτηση θεωρείται ίση με 90x97=87%. Το υπόλοιπο 13% του εισερχόμενου ρεύματος είναι υπόλειμμα του σταδίου αυτού και στέλνεται για ταφή.

Πίνακας 15. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της διαλογής και προεπεξεργασίας των σιδηρούχων μετάλλων

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Κατανάλωση ηλεκτρισμού στο ΚΔΑΥ	0.0078	kWh

Κατανάλωση ηλεκτρισμού στη μονάδα προεπεξεργασίας	0.071*(0.90*0.97)= 0.062	kWh
Ταφή υπολειμμάτων	1.0-(0.90*0.97)= 0.13	kg

1.1.2. *Μη σιδηρούχα μέταλλα*

Τα προδιαλεγμένα απόβλητα προϊόντων μετάλλων εισέρχονται αρχικά σε ένα ΚΔΑΥ όπου γίνεται απομάκρυνση των σιδηρούχων μετάλλων με μαγνήτη και ανάκτηση των μη σιδηρούχων μετάλλων με μαγνητικούς διαχωριστές τύπου eddy current, ενώ στο τέλος γίνεται συμπίεση και δεματοποίηση (Pressley et al., 2015). Στη συνέχεια το ρεύμα μη σιδηρούχων μετάλλων (αλουμίνιο) μεταφέρεται σε άλλη μονάδα όπου προετοιμάζεται για την ανακύκλωσή του. Συγκεκριμένα, η προετοιμασία περιλαμβάνει την απομάκρυνση τυχόν προσμίξεων με μαγνήτη και την προεπεξεργασία μέσω πυρόλυσης, προκειμένου να είναι κατάλληλο το ρεύμα να εισέλθει στην κάμινο για ανακύκλωση (Rigamonti et al., 2009). Η κατανάλωση ενέργειας στο ΚΔΑΥ και στη μονάδα προεπεξεργασίας βασίζεται στους *Pressley et al.* (2015) και *Rigamonti et al.* (2009), αντίστοιχα.

Η καθαρότητα του εισερχόμενου ρεύματος θεωρείται ίση με 90% και το ποσοστό ανάκτησης στο ΚΔΑΥ ίσο με 96% (Pressley et al., 2014), ενώ η συνολική ανάκτηση θεωρείται ίση με 90x96=86%. Το υπόλοιπο 14% του εισερχόμενου ρεύματος είναι υπόλειμμα του σταδίου αυτού και στέλνεται για ταφή.

Πίνακας 16. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της διαλογής και προεπεξεργασίας των σιδηρούχων μετάλλων

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Κατανάλωση ηλεκτρισμού στο ΚΔΑΥ	0.0061	kWh
Κατανάλωση ηλεκτρισμού στη μονάδα προεπεξεργασίας	0.069*(0.90*0.96)= 0.059	kWh
Κατανάλωση θερμικής ενέργειας (φυσικό αέριο) στη μονάδα προεπεξεργασίας	0.845*(0.90*0.96)= 0.73	MJ
Ταφή υπολειμμάτων	1.0 - (0.90*0.96)= 0.14	kg

10.2 Στάδιο ανακύκλωσης

Κατά το συγκεκριμένο στάδιο μελετώνται οι διεργασίες ανακύκλωσης κάθε υλικού ξεχωριστά στις αντίστοιχες εταιρίες ανακύκλωσης, με βάση τον τύπο των υλικών προς ανακύκλωση καθώς επίσης την επιθυμητή ποιότητα των προϊόντων που θα παραχθούν. Λόγω έλλειψης ελληνικής βιβλιογραφίας σχετικά με τη διαδικασία της ανακύκλωσης των υλικών στις Ελληνικές Βιομηχανίες, καθώς επίσης λόγω του ότι δεν υπάρχουν βιομηχανίες ανακύκλωσης για ορισμένα υλικά στην Ελλάδα επιλέχθηκαν τυπικές ευρωπαϊκές τιμές για τις ανακυκλώσεις των υλικών, λαμβάνοντας ακόμη υπόψιν ότι πάνω από το 50% των ανακυκλώσιμων αποβλήτων που παράγονται στην Ελλάδα, στέλνεται για ανακύκλωση εκτός της χώρας (ΥΠΕΚΑ, 2015). Εν συνεχεία, παρουσιάζονται αναλυτικά οι διεργασίες ανακύκλωσης για κάθε κατηγορία αποβλήτων που λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα μελέτη.

10.2.1 Χαρτί/Χαρτόνι

Το συγκεκριμένο ρεύμα των προδιαλεγμένων ανακυκλώσιμων υλικών διαχωρίζεται από το χειριστή στο περίπτερο σε δύο επιμέρους ρεύματα, τις συσκευασίες χαρτιού και χαρτονιού και το έντυπο χαρτί, το καθένα από τα οποία ακολουθεί διαφορετική πορεία ανακύκλωσης μετά το περίπτερο. Αναλυτικότερα:

Συσκευασίες χαρτιού και χαρτονιού:

Η διεργασία ανακύκλωσης που μοντελοποιείται στην περίπτωση αυτή είναι από μια μονάδα ανακύκλωσης που παράγει μεταξύ άλλων χαρτόνι. Η διεργασία που ακολουθείται περιλαμβάνει την ανάμειξη της εισερχόμενης ανακυκλώσιμης πρώτης ύλης χάρτου με νερό σε πολτοποιητές. Το μίγμα καθαρίζεται από οποιαδήποτε πρόσμειξη και στη συνέχεια προστίθενται χημικά. Μετά το μείγμα οδηγείται στις μηχανές παραγωγής χάρτου, ενώ ακολουθεί ξήρανση στους 100°C προκειμένου τα ολικά στερεά (TS) να φτάσουν το 90%.

Η διεργασία διαχωρίζεται επιμέρους στην καθαυτή διεργασία της ανακύκλωσης, την υποκαθιστούμενη διεργασία όπου παράγεται το εν λόγω προϊόν από παρθένα πρώτη ύλη και τη διεργασία της ταφής για τη διαχείριση των υπολειμμάτων της διεργασίας. Τα υπολείμματα της διεργασίας ορίζονται σε 2% του εισερχόμενου ρεύματος, ενώ θεωρείται ότι το παραγόμενο προϊόν υποκαθιστά σε βαθμό 90% την παραγωγή του εν λόγω προϊόντος από παρθένα πρώτη ύλη (λόγος υποκατάστασης) στην αγορά.

Πίνακας 17. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης συσκευασιών χαρτιού και χαρτονιού σε χαρτόνι

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Ηλεκτρισμός	0.32	kWh
Φυσικό αέριο	0.000092	kg
Νερό	10	kg
Υποκατάσταση παραγωγής χαρτονιού από παρθένα πρώτη ύλη	-0.90*0.98=-0.882	kg
Ταφή υπολειμμάτων	0.02	kg

Έντυπο χαρτί:

Η διεργασία ανακύκλωσης που μοντελοποιείται στην περίπτωση αυτή είναι από μια μονάδα ανακύκλωσης που παράγει χαρτί εφημερίδας από έντυπο χαρτί (εφημερίδες και περιοδικά) και βασίζεται στις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές της ΕΕ (EC-JRC, 2015). Τα δεδομένα αφορούν μέσους όρους από μια πληθώρα περιπτώσεων.

Η διεργασία διαχωρίζεται επιμέρους στην καθαυτή διεργασία της ανακύκλωσης, την υποκαθιστούμενη διεργασία όπου παράγεται το εν λόγω προϊόν από παρθένα πρώτη ύλη και τη διεργασία της ταφής για τη διαχείριση των υπολειμμάτων της διεργασίας. Τα υπολείμματα της διεργασίας ορίζονται σε 10% του εισερχόμενου ρεύματος, ενώ θεωρείται ότι το παραγόμενο προϊόν υποκαθιστά σε βαθμό 100% την παραγωγή του εν λόγω προϊόντος από παρθένα πρώτη ύλη στην αγορά (λόγος υποκατάστασης).

Πίνακας 18. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης συσκευασιών έντυπου χαρτιού σε χαρτί εφημερίδας

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Ηλεκτρισμός	0.42	kWh
Νερό	21	kg
Φυσικό αέριο	0.00011	kg
Καύσιμο (diesel)	0.003	kg
Καύσιμο (μαζούτ)	0.024	kg
Ξύλο (έλατο)	0.161	kg
Χημικός πολτός (με θείο)	0.0089	kg
Υποκατάσταση παραγωγής χαρτιού εφημερίδας από παρθένα πρώτη ύλη	-1.0*0.90= -0.90	kg
Ταφή υπολειμμάτων	0.10	kg

10.2.2 Πλαστικό

Το συγκεκριμένο ρεύμα των προδιαλεγμένων ανακυκλώσιμων υλικών διαχωρίζεται από το χειριστή στο περίπτερο σε τρία επιμέρους ρεύματα, το Πολυτερεφθαλικό αιθυλένιο (PET), το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE) και το πολυπροπυλένιο (PP), καθένα από τα οποία ακολουθεί διαφορετική πορεία ανακύκλωσης μετά το περίπτερο. Αναλυτικότερα:

Πολυτερεφθαλικό αιθυλένιο (PET):

Η μονάδα ανακύκλωσης του τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου περιλαμβάνει την επανεπεξεργασία του εισερχόμενου επανακυκλώσιμου πλαστικού αποβλήτου, με στόχο την υποκατάσταση της παραγωγής του πλαστικού από καθαρές πρώτες ύλες και τελικό προϊόν το άμορφο κοκκοποιημένο πλαστικό αυτού του είδους. Η διεργασία της ανακύκλωσης περιλαμβάνει την πλύση με ζεστό νερό και καυστικό νάτριο για τον καθαρισμό των προσμίξεων (κόλλες, άλλα πλαστικά), την επίπλευση για το διαχωρισμό των πλαστικών με βάση την πυκνότητα, τη ξήρανση και το κοσκίνισμα, ενώ στη συνέχεια εγχέεται και κοκκοποιείται.

Η κατανάλωση ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου για τη δευτερογενή παραγωγή PET υπολογίστηκαν από τους *Rigamonti et al.* (2014) ως ο μέσος όρος από διαφορετικές πηγές (ηλεκτρισμός 0.24-0.47 kWh/kg ανακυκλωμένου PET; φυσικό αέριο 2.29—2.90 MJ /kg ανακυκλωμένου PET) (Torregosa et al., 2005; Perugini et al., 2005; Frankiln Associated, 2010). Η κατανάλωση νερού και καυστικού νατρίου βασίζεται στους *Perugini et al.* (2011).

Η διεργασία διαχωρίζεται επιμέρους στην καθαυτή διεργασία της ανακύκλωσης, την υποκαθιστούμενη διεργασία όπου παράγεται το εν λόγω προϊόν από παρθένα πρώτη ύλη και τη διεργασία της ταφής για τη διαχείριση των υπολειμμάτων της διεργασίας. Τα υπολείμματα της διεργασίας ορίζονται σε 4% του εισερχόμενου ρεύματος, ενώ θεωρείται ότι το παραγόμενο προϊόν υποκαθιστά σε βαθμό 81% την πρωτογενή παραγωγή του εν λόγω προϊόντος στην αγορά, σύμφωνα με τους *Rigamonti et al.* (2014).

Πίνακας 19. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης αποβλήτων PET σε κοκκοποιημένο PET

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**

Ατμός από φυσικό αέριο	1.92	MJ
Ηλεκτρισμός	0.24	kWh
Καυστικό νάτριο (NAOH)	2.25E-03	kg
Νερό	2.22	kg
Υποκατάσταση παραγωγής PET από παρθένα πρώτη ύλη	-0.96*0.81= -0.78	kg
Ταφή υπολειμμάτων	0.04	kg

Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE):

Η μονάδα ανακύκλωσης του πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας περιλαμβάνει την επανεπεξεργασία του εισερχόμενου ανακυκλώσιμου πλαστικού αποβλήτου, με στόχο την υποκατάσταση της παραγωγής του πλαστικού από καθαρές πρώτες ύλες και τελικό προϊόν το κοκκοποιημένο πλαστικό αυτού του είδους. Η διεργασία της ανακύκλωσης περιλαμβάνει την πλύση με ζεστό νερό και καυστικό νάτριο για τον καθαρισμό των προσμίξεων (κόλλες, άλλα πλαστικά), την επίπλευση για το διαχωρισμό των πλαστικών με βάση την πυκνότητα, τη ξήρανση, το κοσκίνισμα, ενώ στη συνέχεια εγχέεται και κοκκοποιείται.

Η κατανάλωση ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου για τη δευτερογενή παραγωγή HDPE υπολογίστηκαν από τους *Rigamonti et al.* (2014) ως ο μέσος όρος από διαφορετικές πηγές (ηλεκτρισμός 0.20-0.56 kWh/kg ανακυκλωμένου HDPE; φυσικό αέριο 0.27—0.65 MJ /kg ανακυκλωμένου HDPE) (Torregosa et al. 2005; Arena et al. 2003; Perugini et al. 2005; Frankiln Associated, 2010). Η κατανάλωση νερού και καυστικής σόδας βασίζεται στους *Perugini et al.* (2011).

Η διεργασία διαχωρίζεται επιμέρους στην καθαυτή διεργασία της ανακύκλωσης, την υποκαθιστούμενη διεργασία όπου παράγεται το εν λόγω προϊόν από παρθένα πρώτη ύλη και τη διεργασία της ταφής για τη διαχείριση των υπολειμμάτων της διεργασίας. Τα υπολείμματα της διεργασίας ορίζονται σε 2% του εισερχόμενου ρεύματος, ενώ θεωρείται ότι το παραγόμενο προϊόν υποκαθιστά σε βαθμό 81% την πρωτογενή παραγωγή του εν λόγω προϊόντος στην αγορά, σύμφωνα με τους *Rigamonti et al.* (2014).

Πίνακας 20. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης αποβλήτων HDPE σε κοκκοποιημένο HDPE

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Ηλεκτρισμός	0.40	kWh
Ατμός από φυσικό αέριο	0.46	MJ
Νερό	1.60	kg
Υποκατάσταση παραγωγής HDPE από παρθένα πρώτη ύλη	-0.98*0.81= -0.79	kg
Ταφή υπολειμμάτων	0.02	kg

Πολυπροπυλένιο (PP):

Η μονάδα ανακύκλωσης του πολυπροπυλενίου περιλαμβάνει την επανεπεξεργασία του εισερχόμενου ανακυκλώσιμου πλαστικού αποβλήτου, με στόχο την υποκατάσταση της παραγωγής του εν λόγω πλαστικού από καθαρές πρώτες ύλες και τελικό προϊόν το κοκκοποιημένο πλαστικό αυτού του είδους.

Συγκεκριμένα, το εισερχόμενο πλαστικό τεμαχίζεται, πλένεται, αλέθεται και ξηραίνεται και στη συνέχεια εγχέεται και κοκκοποιείται.

Η διεργασία διαχωρίζεται επιμέρους στην καθαυτή διεργασία της ανακύκλωσης, την υποκαθιστούμενη διεργασία όπου παράγεται το εν λόγω προϊόν από παρθένα πρώτη ύλη και τη διεργασία της ταφής για τη διαχείριση των υπολειμμάτων της διεργασίας. Τα υπολείμματα της διεργασίας ορίζονται σε 2% του εισερχόμενου ρεύματος, ενώ το παραγόμενο προϊόν θεωρείται ότι υποκαθιστά σε βαθμό 90% την πρωτογενή παραγωγή του εν λόγω προϊόντος στην αγορά, σύμφωνα με τη βάση δεδομένων EDIP.

Πίνακας 21. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης αποβλήτων PP σε κοκκοποιημένο PP

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Ηλεκτρισμός	0.76	kWh
Καύσιμο diesel	0.00047	kg
Νερό	2.6	kg
Ατμός από φυσικό αέριο	0.89	MJ
Υποκατάσταση παραγωγής PP από παρθένα πρώτη ύλη	0.8*0.90=0.72	kg
Ταφή υπολειμμάτων	-0.02	kg

10.2.3 Γυαλί

Το συγκεκριμένο ρεύμα των προδιαλεγμένων ανακυκλώσιμων υλικών διαχωρίζεται με βάση τη δυνατότητα για επαναχρησιμοποίηση των γυάλινων φιαλών από τις ίδιες εταιρείες που τα χρησιμοποιούν για τη συσκευασία των προϊόντων τους. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει τέτοιο σύστημα σε εφαρμογή, τα γυάλινα δοχεία θρυμματίζονται και οδηγούνται για την παραγωγή νέων προϊόντων γυαλιού. Αναλυτικότερα:

Γυάλινες φιάλες

Η εν λόγω διεργασία ανακύκλωσης αναφέρεται στον καθαρισμό προδιαλεγμένων ανακυκλώσιμων γυάλινων δοχείων αναψυκτικών. Ειδικότερα, τα μπουκάλια πλένονται με καυστικό νάτριο σε καυτό νερό. Στη συνέχεια, τα καθαρά μπουκάλια χρησιμοποιούνται για επαναπλήρωση.

Η διεργασία διαχωρίζεται επιμέρους στην καθαυτή διεργασία της ανακύκλωσης και την υποκαθιστούμενη διεργασία όπου παράγεται το εν λόγω προϊόν από παρθένα πρώτη ύλη. Δεδομένου ότι έχει προηγηθεί διαλογή των δοχείων σε προηγούμενο στάδιο, δεν προκύπτουν υπολείμματα διεργασίας στο στάδιο αυτό. Το παραγόμενο προϊόν μπορεί να υποκαταστήσει 100% την παραγωγή νέων γυάλινων μπουκαλιών, καθώς δεν υπάρχει απώλεια της ποιότητας του υλικού κατά τη διεργασία αυτή (λόγος υποκατάστασης 1:1).

Τα δεδομένα προέρχονται από έρευνα που διενεργήθηκε από την Αρχή Προστασίας Περιβάλλοντος της Δανίας το 2000 και αντιπροσωπεύουν το μέσο όρο από τρεις μονάδες που εφαρμόζουν τη διεργασία αυτή.

Πίνακας 22. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της επεξεργασίας των γυάλινων δοχείων για επαναχρησιμοποίηση

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Φυσικό αέριο	0.018	kg
Ηλεκτρισμός	0.038	kWh
Καυστικό νάτριο	0.0043	kg
Νερό	2.9	kg
Υποκατάσταση παραγωγής γυάλινων φιαλών από παρθένα πρώτη ύλη	-1	kg

Υαλόθραυσμα

Η μονάδα ανακύκλωσης του υαλοθραύσματος σε νέο γυαλί περιλαμβάνει την επανεπεξεργασία του εισερχόμενου υαλοθραύσματος, με στόχο την υποκατάσταση της παραγωγής γυαλιού από καθαρές πρώτες ύλες και τελικό προϊόν την παραγωγή νέων γυάλινων δοχείων. Συγκεκριμένα, το υαλόθραυσμα που έχει προηγουμένως διαχωριστεί με βάση το χρώμα του στο στάδιο της προεπεξεργασίας, εισέρχεται σε μια μονάδα παραγωγής γυαλιού, για την παραγωγή νέων γυάλινων δοχείων μαζί με παρθένες πρώτες ύλες (πυρίτιο, ανθρακικό ασβέστιο, καυστικό νάτριο, πρόσθετα). Η παρουσία του υαλοθραύσματος το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης σε σχέση με τις παρθένες πρώτες ύλες, επιτρέπει τη λειτουργία του κλιβάνου σε χαμηλότερη θερμοκρασία (Rigamonti et al., 2009).

Η διεργασία διαχωρίζεται επιμέρους στην καθαυτή διεργασία της ανακύκλωσης και την υποκαθιστούμενη διεργασία όπου παράγεται το εν λόγω προϊόν από παρθένα πρώτη ύλη. Δεδομένου ότι έχει προηγηθεί διαχωρισμός του υαλοθραύσματος σε προηγούμενο στάδιο, δεν προκύπτουν υπολείμματα διεργασίας στο στάδιο αυτό. Σύμφωνα με τον FEVE (2016), ένας τόνος υαλοθραύσματος υποκαθιστά 1.2 τόνους παρθένων πρώτων υλών για την παραγωγή γυαλιού. Επιπλέον για την παραγωγή ενός τόνου γυαλιού, απαιτείται 83% υαλόθραυσμα και 17% παρθένα πρώτη ύλη (Rigamonti et al., 2009). Τα παραπάνω αντισταθμίζονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα ο συνολικός λόγος υποκατάστασης να ισούται με 100% (1:1).

Πίνακας 23. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης υαλοθραύσματος σε καινούριο γυαλί

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Βαρύ καύσιμο μαζούτ	0.0661	kg
Ελαφρύ καύσιμο μαζούτ	0.0684	kg
Υποκατάσταση παραγωγής γυαλιού από παρθένα πρώτη ύλη	-1	kg

10.2.4 Μέταλλο

Τα συλλεγόμενα ανακυκλώσιμα υλικά από μέταλλο ανάλογα με την μέθοδο ανακύκλωσης που θα υποστούν, διαχωρίζονται σε δύο ρεύματα: το αλουμίνιο και χάλυβα.

Αλουμίνιο

Το αλουμίνιο μετά την προεπεξεργασία υφίσταται τήξη σε περιστροφικό κλίβανο ο οποίος τροφοδοτείται από φυσικό αέριο ενώ στη συνέχεια ψύχεται και στερεοποιείται. Το ανακυκλωμένο αλουμίνιο παράγεται σε μορφή ράβδων οι οποίες στέλνονται σε ειδικά χυτήρια προς ανάτηξη για την παραγωγή νέων προϊόντων αλουμινίου. Τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας προέρχονται από τους *Rigamonti et al.* (2009).

Η διεργασία διαχωρίζεται επιμέρους στην καθαυτή διεργασία της ανακύκλωσης, την υποκαθιστούμενη διεργασία όπου παράγεται το εν λόγω προϊόν από παρθένα πρώτη ύλη και τη διεργασία της ταφής για τη διαχείριση των υπολειμμάτων της διεργασίας. Η ανάκτηση αλουμινίου από τον κλίβανο υπολογίζεται σε 93% του εισερχόμενου ρεύματος σύμφωνα με τους *Rigamonti et al.* (2009), με αποτέλεσμα να προκύπτουν 7% υπολείμματα διεργασίας. Το παραγόμενο προϊόν θεωρείται ότι υποκαθιστά σε βαθμό 100% την πρωτογενή παραγωγή του εν λόγω προϊόντος στην αγορά.

Πίνακας 24. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης αλουμινίου

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Ατμός από φυσικό αέριο	3.8	MJ
Ηλεκτρισμός	0.001	kWh
Υποκατάσταση παραγωγής αλουμινίου από παρθένα πρώτη ύλη	-1.0*0.93	kg
Ταφή υπολειμμάτων	0.07	kg

Χάλυβας

Το απόβλητα χάλυβα μετά την προεπεξεργασία τους στέλνονται σε καμίνους ηλεκτρικού τόξου για τήξη ενώ στη συνέχεια ο παραγόμενος χάλυβας χυτεύεται σε φύλλα για την μετέπειτα παραγωγή άλλων προϊόντων. Η κάμινος ηλεκτρικού τόξου έχει απόδοση 84%, επομένως το υπόλοιπο 16% του εισερχόμενου ρεύματος θεωρείται υπόλειμμα της διεργασίας. Τα δεδομένα προέρχονται από τους *Rigamonti et al.* (2009).

Η διεργασία διαχωρίζεται επιμέρους στην καθαυτή διεργασία της ανακύκλωσης, την υποκαθιστούμενη διεργασία όπου παράγεται το εν λόγω προϊόν από παρθένα πρώτη ύλη και τη διεργασία της ταφής για τη διαχείριση των υπολειμμάτων της διεργασίας. Το παραγόμενο προϊόν θεωρείται ότι υποκαθιστά σε βαθμό 100% την πρωτογενή παραγωγή του εν λόγω προϊόντος στην αγορά.

Πίνακας 25. Απογραφή δεδομένων για το στάδιο της ανακύκλωσης χάλυβα

Είσοδος	**Ποσότητα**	**Μονάδα (ανά kg εισερχόμενου αποβλήτου)**
Ηλεκτρισμός	0.5	kWh

Υποκατάσταση παραγωγής χάλυβα από παρθένα πρώτη ύλη	-1.0*0.84	kg
Ταφή υπολειμμάτων	0.16	kg

10.3 Ταφή υπολειμμάτων

Τα δεδομένα απογραφής για την ταφή των υπολειμμάτων των επιμέρους διεργασιών αντιπροσωπεύουν ένα τυπικό χώρο υγειονομικής ταφής ΑΣΑ σε επίπεδο ΕΕ-27. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε είναι η ELCD και το έτος αναφοράς είναι το 2006. Τα δεδομένα των εκπομπών διαφοροποιούνται ανάλογα με το είδος των εισερχόμενων αποβλήτων (χαρτί, πλαστικό, μέταλλο, γυαλί), ενώ δεν περιλαμβάνεται η συλλογή, μεταφορά και προεπεξεργασία των αποβλήτων.

Ο χώρος ταφής διαθέτει επιφανειακή και βασική μόνωση με βάση τα Ευρωπαϊκά επιτρεπτά όρια εκπομπών, διαχείριση του παραγόμενου βιοαερίου, του στραγγίσματος καθώς και της ιλύος από τη διαχείριση του στραγγίσματος. Τα δεδομένα απογραφής περιλαμβάνουν τα υλικά μόνωσης (χαλίκι, άμμο, άργιλο, μεμβράνη πολυαιθυλενίου) και την κατανάλωση καυσίμου για τη συμπίεση των αποβλήτων. Από το παραγόμενο βιοαέριο, το 22% καίγεται σε πυρσούς, το 28% αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού και το υπόλοιπο 50% διαφεύγει στην ατμόσφαιρα.

Τα κλιματικά δεδομένα στην ευρύτερη περιοχή του χώρου ταφής τα οποία επηρεάζουν την παραγωγή των στραγγισμάτων ορίζονται από μια ετήσια βροχόπτωση ύψους 660mm και λόγο εξατμισοδιαπνοής προς απορροή ίσο με 60%. Θεωρείται ότι 70% των στραγγισμάτων κατακρατείται στο χώρο ταφής και οδηγείται προς επεξεργασία, η οποία περιλαμβάνει ενεργό άνθρακα και επίπλευση, καθίζηση. Σημειώνεται ότι λαμβάνονται υπόψη μόνο οι σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε χρονικό ορίζοντα 100 ετών.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται συγκεντρωτικά το ποσοστό των εισερχόμενων ανακυκλώσιμων αποβλήτων που καταλήγει ως υπόλειμμα διεργασίας από τα στάδια διαλογής, προεπεξεργασίας και ανακύκλωσης και οδηγείται προς ταφή.

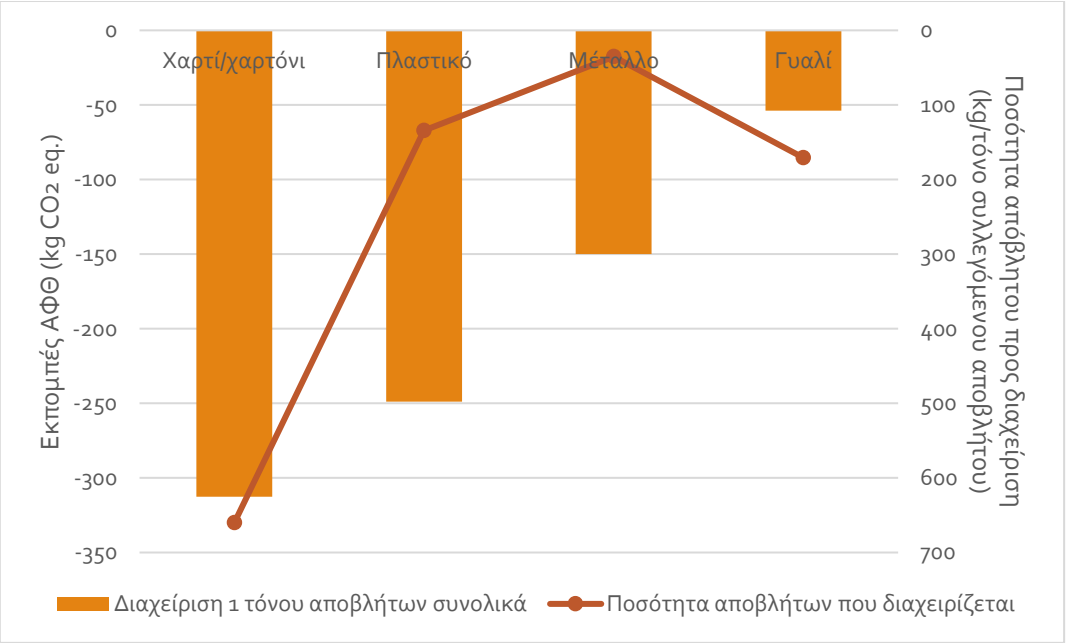
Πίνακας 26: Ποσοστό εισερχόμενου στο σύστημα αποβλήτου που οδηγείται προς ταφή (υπολείμματα διεργασίας)

Ρεύμα αποβλήτου	**Υλικό**	**Ποσοστό εισερχόμενου αποβλήτου προς ταφή**
Χαρτί/χαρτόνι	Χαρτόνι/χαρτοκιβώτια	2%
	Έντυπο Χαρτί	22%
Πλαστικό	PET	20%
	HDPE	18%
	PP	42%
	Άλλα πλαστικά	100%
Μέταλλο	Μη σιδηρούχα	19%
	Σιδηρούχα	27%
Γυαλί	Γυαλί	13%

10.4 Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ΑΚΖ για τις εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση των χωριστά συλλεχθέντων ανακυκλώσιμων αποβλήτων. Τα δεδομένα έχουν αναχθεί για λόγους συγκρισιμότητας στη διαχείριση ενός τόνου αποβλήτων, με βάση τη σύσταση που παρουσιάζεται στην Ενότητα 7.2.

Όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί, οι εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση των ανακυκλώσιμων αποβλήτων είναι αρνητικές, το οποίο σημαίνει ότι οι αποφευχθείσες εκπομπές λόγω της υποκατάστασης της παραγωγής υλικών από παρθένες πρώτες ύλες (οι οποίες υπολογίζονται με αρνητικό πρόσημο), είναι μεγαλύτερες από τις εκπομπές από τα υπόλοιπα στάδια της διαλογής, προεπεξεργασίας και ταφής των υπολειμμάτων. Οι μεγαλύτερες αρνητικές εκπομπές παρατηρούνται στην περίπτωση του χαρτιού/χαρτονιού (-313kg CO_2 eq.), το οποίο οφείλεται κυρίως στη μεγάλη συμμετοχή του ρεύματος αυτού στα συλλεχθέντα ανακυκλώσιμα απόβλητα. Στη συνέχεια, οι αμέσως επόμενες χαμηλότερες αρνητικές εκπομπές συνδέονται με τη διαχείριση των αποβλήτων πλαστικού και μετάλλου (-249kg CO_2 eq. και -150 kg CO_2 eq., αντίστοιχα). Τέλος, οι χαμηλότερες αρνητικές εκπομπές παρατηρούνται για την περίπτωση της διαχείρισης αποβλήτων γυαλιού (-54 kg CO_2 eq.).



Σχήμα 67: Καθαρές εκπομπές ΑΦΘ (kg CO2 eq.) από τη διαχείριση 1 τόνου συλλλεχθέντων ανακυκλώσιμων αποβλήτων ανά ρεύμα αποβλήτου (μπάρες) και ποσότητα αποβλήτου προς διαχείριση (kg/τόνο συλλεγόμενου αποβλήτου) (γραμμή)

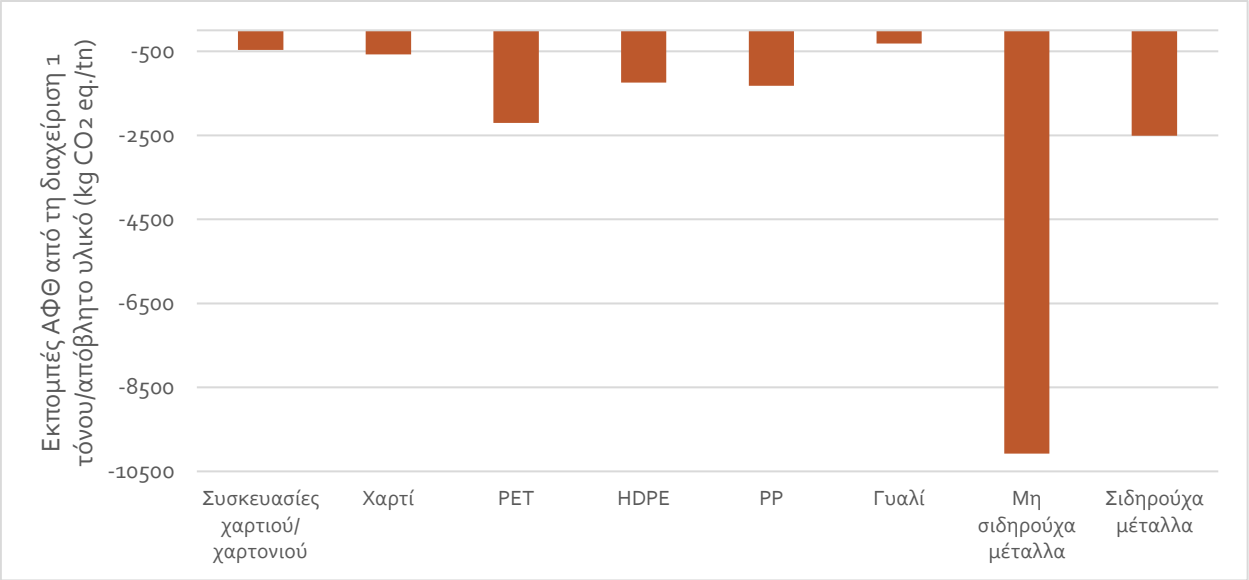
Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εκπομπές ΑΦΘ αναλυτικά, τόσο για τα επιμέρους υλικά-στόχους, όσο και για κάθε στάδιο διαχείρισης.

Πίνακας 27: Εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση ενός τόνου ανακυκλώσιμων αποβλήτων ανά υλικό και στάδιο διαχείρισης (kg CO2 eq.)

Στάδια	**Συσκευασίες χαρτιού/ χαρτονιού**	**Χαρτί**	**PET**	**HDPE**	**PP**	**Μη σιδηρούχα μέταλλα**	**Σιδηρούχα μέταλλα**	**Γυαλί**
Διαλογή και προετοιμασία για ανακύκλωση	1.7	2.6	3.9	1.1	0.3	0.3	0.9	1.2

Στάδια	**Συσκευασίες χαρτιού/ χαρτονιού**	**Χαρτί**	**PET**	**HDPE**	**PP**	**Μη σιδηρούχα μέταλλα**	**Σιδηρούχα μέταλλα**	**Γυαλί**
Ανακύκλωση ανακτημένων υλικών	292.9	32.2	26.7	6.3	3.0	2.5	6.4	118.4
Υποκατάσταση παραγωγής υλικών από παρθένες πρώτες ύλες	-592.9	-63.7	-239.0	-41.2	-12.1	-84.4	-75.6	-173.7
Ταφή υπολειμμάτων	10.8	4.0	1.3	0.3	0.0	0.0	0.1	0.3
Σύνολο	**-287.6**	**-24.9**	**-207.1**	**-33.4**	**-8.9**	**-81.7**	**-68.2**	**-53.8**

Προκειμένου να έχουμε συγκριτική εικόνα των αντίστοιχων εκπομπών από τη διαχείριση ίσης ποσότητας αποβλήτων ανά υλικό, τα δεδομένα ανήχθησαν στη διαχείριση 1 τόνου ανά υλικό. Από το σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ότι οι υψηλότερες αρνητικές καθαρές εκπομπές (-10,080 kg CO_2 eq./tn) προκύπτουν από τη διαχείριση μη σιδηρούχων μετάλλων (αλουμινίου), ενώ ακολουθούν με σημαντική διαφορά οι καθαρές εκπομπές από τη διαχείριση των σιδηρούχων μετάλλων (-2,508 kg CO_2 eq./tn) και των πλαστικών (-1,248 έως -2,205 kg CO_2 eq./tn). Η διαχείριση ενός τόνου αποβλήτων γυαλιού επιφέρει τις χαμηλότερες σχετικές καθαρές εκπομπές (-316 kg CO_2 eq./tn), με τις εκπομπές από τη διαχείριση ίσης ποσότητας αποβλήτων χαρτιού και χαρτονιού να κυμαίνονται επίσης σε χαμηλά επίπεδα (-466 έως -575 kg CO_2 eq./tn).

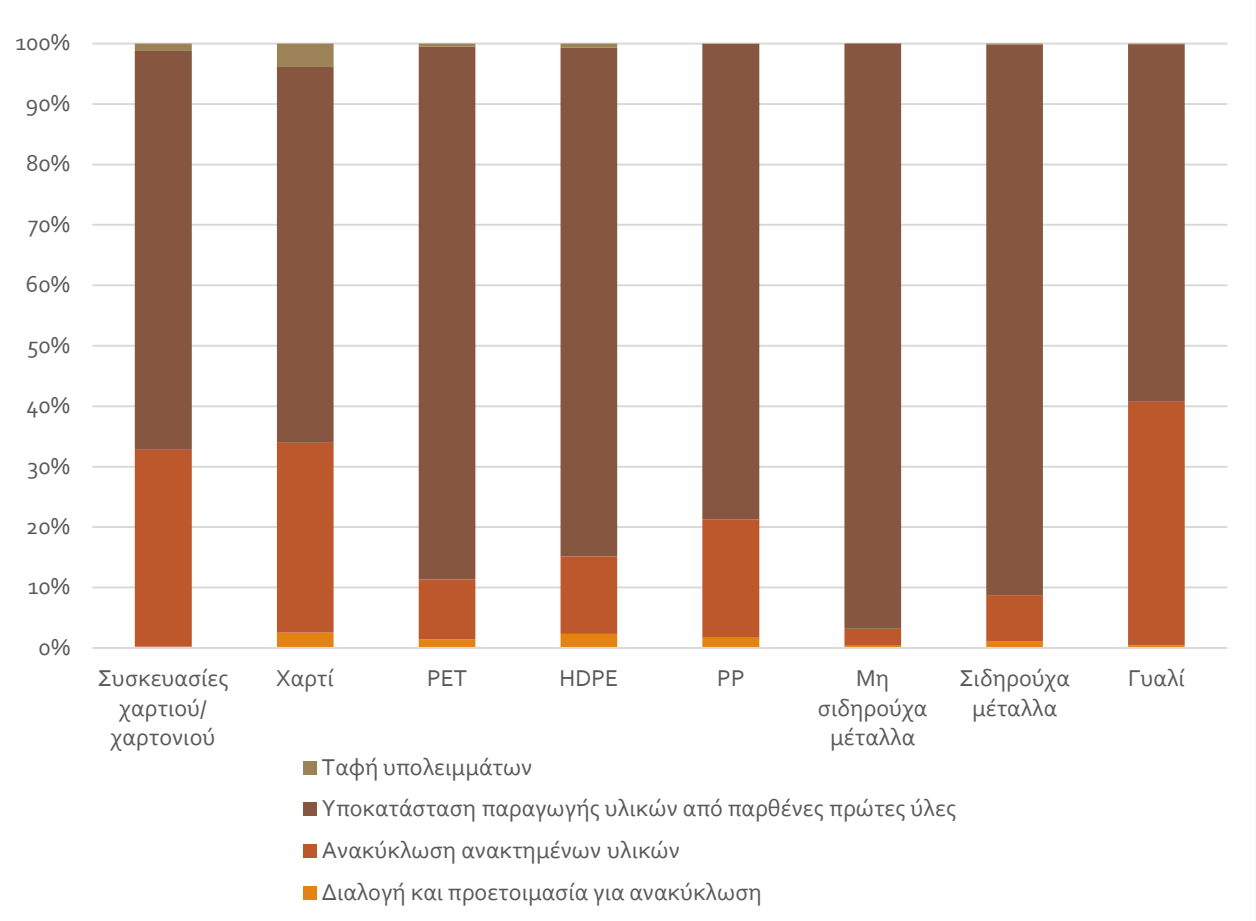


Σχήμα 68: Εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση 1 τόνου/υλικό (σε kg CO2 eq./tn)

Τα αποτελέσματα αυτά δικαιολογούνται από το γεγονός ότι η πρωτογενής παραγωγή μετάλλων έχει πολύ υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, ενώ η επανεπεξεργασία και ανακύκλωση των αποβλήτων μετάλλου έχει σχετικά πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, υψηλής καθαρότητας απόβλητα πλαστικού που περιέχουν μόνο ενός τύπου πλαστικό (HDPE, PP, PET) μπορούν να οδηγηθούν κατευθείαν στην παραγωγή όπως γίνεται με τις καθαρές πρώτες ύλες, ενώ η ποσότητα των ακαθαρσιών μπορεί να είναι καθοριστική για την ποιότητα του προϊόντος. Από την άλλη, παρόλο που τα οφέλη από την ανακύκλωση των αποβλήτων γυαλιού είναι σχετικά χαμηλά, τα απόβλητα γυαλιού δεν αποσυντίθενται κατά την καύση ή την ταφή και προσθέτουν όγκο στα υπολείμματα αυτών των

διεργασιών. Επίσης, η ενεργειακή αξιοποίηση του γυαλιού δεν είναι δυνατή και έτσι προκύπτει ότι η ανακύκλωσή του είναι η προτιμότερη διαδικασία για την επεξεργασία του. Το χαρτί και το χαρτόνι μπορεί να αποφέρει σημαντικά οφέλη από την ανακύκλωσή του, καθώς αποτελεί ένα μεγάλο τμήμα των αστικών στερεών αποβλήτων, ενώ παράλληλα συνεισφέρει στη διατήρηση των δασών τα οποία απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Επίσης, το ρεύμα αυτό έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε βιοαποδομήσιμο άνθρακα και επομένως κατά την ταφή του βιοαποδομείται με υψηλούς ρυθμούς παράγοντας σημαντικές ποσότητες μεθανίου, οι οποίες μπορούν να αποφευχθούν με την ανακύκλωσή του. Ωστόσο, οι ίνες κυτταρίνης φθείρονται από τη χρήση και την ανακύκλωση, με αποτέλεσμα να περιορίζεται ο αριθμός των δυνατών ανακυκλώσεών τους και να απαιτείται σταθερή εισροή παρθένων ινών κυτταρίνης.

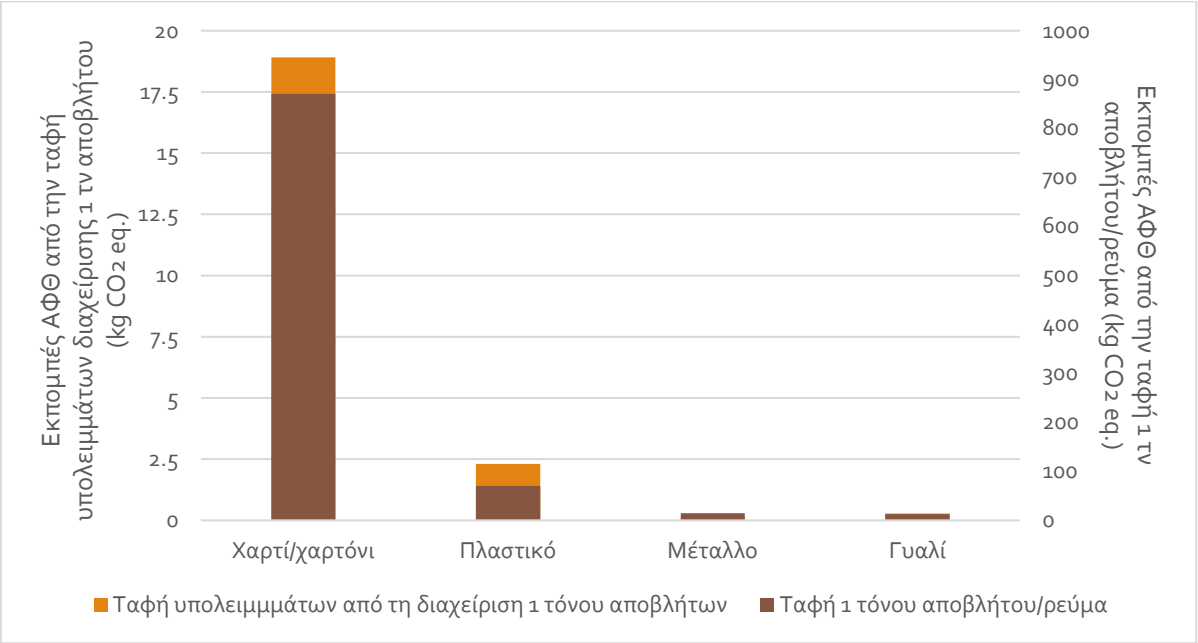
Κατά μέσο όρο από όλα τα επιμέρους υλικά-στόχους, το στάδιο της ανακύκλωσης ανακτημένων υλικών συνεισφέρει 20% στις συνολικές εκπομπές από τη διαχείριση των ανακυκλώσιμων αποβλήτων, η υποκατάσταση συνεισφέρει 78%, ενώ τα στάδια της διαλογής και προεπεξεργασίας και της ταφής συνεισφέρουν το καθένα κατά 1%. Η ποσοστιαία συνεισφορά κάθε σταδίου στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ από τη διαχείριση των ανακυκλώσιμων υλικών, παρουσιάζεται στο Σχήμα 69.



Σχήμα 69: Ποσοστιαία συνεισφορά των επιμέρους σταδίων διαχείρισης των ανακυκλώσιμων υλικών στις συνολικές εκπομπές ΑΦΘ

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εκπομπές ΑΦΘ από την ταφή των υπολειμμάτων διαχείρισης ενός τόνου ανακυκλώσιμων αποβλήτων και από την ταφή ενός τόνου αποβλήτου. Όπως φαίνεται, η ταφή των αποβλήτων χαρτιού και χαρτονιού έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά μεγαλύτερες εκπομπές ΑΦΘ σε σχέση με τα υπόλοιπα ρεύματα, τα οποία έχουν χαμηλό περιεχόμενο σε οργανικό άνθρακα. Και πάλι, οι ποσότητες των υπολειμμάτων προς ταφή από τη διαχείριση χαρτιού είναι σχετικά μικρές στην περίπτωση της χωριστής διαλογής του εν λόγω ρεύματος (22%, Πίνακας 26), με

αποτέλεσμα η μέγιστη συνεισφορά του σταδίου της ταφής που προκύπτει από τη διαχείριση των αποβλήτων χαρτιού, να ανέρχεται στο 4% των συνολικών εκπομπών της διαχείρισης αυτού του υλικού, σύμφωνα με το προηγούμενο σχήμα.



Σχήμα 70: Εκπομπές ΑΦΘ από την ταφή των υπολειμμάτων διαχείρισης 1 τόνου ανακυκλώσιμων αποβλήτων (πρωτεύων κάθετος άξονας-αριστερά) και από την ταφή 1 τόνου αποβλήτου (δευτερεύων κάθετος άξονας- δεξιά) (kg CO2 eq.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11. Ερευνητική ενότητα Β1: ΑΚΖ συστήματος βιοδιϋλιστηρίου και συμβατικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την εφαρμογή σε πλήρη κλίμακα ενός εναλλακτικού συστήματος βιοδιϋλιστηρίου για τη διαχείριση των αστικών βιοαποβλήτων και την παραγωγή αιθανόλης και άλλων προϊόντων.

11.1 Απογραφή δεδομένων – Μέρος Ι: Σύστημα βιοδιϋλιστηρίου και παραλλαγές

11.1.1 Παραγωγή και ΔσΠ αστικών βιοαποβλήτων

Το πρώτο στάδιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής περιλαμβάνει την παραγωγή των αστικών βιοαποβλήτων στον κάθε δήμο. Επίσης το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τη χωριστή συλλογή του κλάσματος αυτού σε ξεχωριστούς κάδους/σακούλες εντός της οικίας και σε εξωτερικούς μεγαλύτερους κάδους αποκομιδής προκειμένου να διαχωρίζονται από τα άλλα ρεύματα αποβλήτων.

Αναφορικά με τα ποσοτικά στοιχεία παραγωγής αστικών αποβλήτων, σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα δεδομένα του Δήμου, η συνολική παραγωγή ΑΣΑ το 2014 υπολογίστηκε στους 20,390 τόνους. Πιο αναλυτικά, στον μπλε κάδο ανακύκλωσης διαχωρίστηκαν 2,055 τόνοι ενώ στον πράσινο κάδο κατέληξαν 18,320 τόνοι σύμμεικτων ΑΣΑ. Αντίστοιχα, στο δήμο Ασπρόπυργου για το έτος 2015 η συνολική παραγωγή ΑΣΑ υπολογίζεται στους 28,940 τόνους, εκ των οποίων οι 600 τόνοι διαχωρίστηκαν στους μπλε κάδους και 16,686 τόνοι κατέληξαν στους κάδους σύμμεικτης συλλογής ΑΣΑ.

Με βάση το ποσοστό των βιοαποβλήτων στο σύνολο των ΑΣΑ για την Περιφέρεια Αττικής το οποίο υπολογίζεται στο 43.6% κ.β. (ΥΠΕΚΑ, 2015), το ποσοστό των ΒΑΑ που συλλέγονται με τα σύμμεικτα ΑΣΑ στο δήμο Παπάγου-Χολαργού ανέρχεται στο 48.6% κ.β., δεδομένου ότι ποσοστό 10% περίπου των ΑΣΑ εκτρέπεται στους μπλε κάδους για ανακύκλωση. Αντίστοιχα, το ποσοστό των ΒΑΑ στα ΑΣΑ του δήμου Ασπρόπυργου ανέρχεται στο 45.2% κ.β., δεδομένου ότι ποσοστό 3% περίπου των παραγόμενων ΑΣΑ εκτρέπεται στους μπλε κάδους για ανακύκλωση.

Δεδομένου ότι η λειτουργική μονάδα της εν λόγω ΑΚΖ είναι 1 τόνος νωπών ΒΑΑ, οι παραγόμενες ποσότητες από τον κάθε δήμο κανονικοποιούνται προκειμένου να αθροίζουν στον 1 τόνο, στον οποίο η συνεισφορά του Δήμου Ασπρόπυργου υπολογίζεται στο 45.9% και του Δήμου Παπάγου-Χολαργού στο 54.1%.

Πίνακας 28: Ποσότητες παραγόμενων ΑΣΑ και ΒΑΑ στους υπό εξέταση δήμους

	Δήμος Ασπρόπυργου	**Δήμος Παπάγου-Χολαργού**
Μάζα σύμμεικτων ΑΣΑ (τν/έτος)	17,286	20,390
Μάζα νωπών ΒΑΑ (τν/έτος)	7,545	8,900

11.1.2 Οικιακή ξήρανση (Σ3)

Σε αυτό το στάδιο (μόνο για το επίπεδο ξήρανσης Σ3) γίνεται ξήρανση σε επίπεδο οικίας των ξεχωριστά διαλεχθέντων βιοαποβλήτων, μέσω της απομάκρυνσης της περιεχόμενης σε αυτά υγρασίας με τη χρήση οικιακού ξηραντήρα.

Εικόνα 2 : Οικιακός ξηραντήρας

Η ενέργεια που καταναλώνεται προκειμένου να ξηραθεί ποσότητα υλικού ίση με ένα κιλό νωπού ΒΑΑ είναι 1 kWh/kg. Το ποσοστό μείωσης της μάζας του νωπού βιοαπόβλητου ανέρχεται σε 68% κ.β. (Waste2bio, Παραδοτέο 3.3) και η περιεχόμενη υγρασία μειώνεται από 78.5% σε 33%.

Πίνακας 29: Εισροές στο στάδιο της οικιακής ξήρανσης

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Ηλεκτρισμός από δίκτυο διανομής για τη λειτουργία του οικιακού ξηραντήρα	1	kWh/ kg νωπού βιοαπόβλητου

11.1.3 Συλλογή και μεταφορά ΒΑΑ

Το στάδιο αυτό διαχωρίζεται σε δύο μέρη, (i) τη συλλογή των αποβλήτων από τους κάδους με τα απορριμματοφόρα (δρομολόγια εντός δήμου) και (ii) τη μεταφορά των αποβλήτων στη μονάδα επεξεργασίας ή στο χώρο τελικής διάθεσης. Για λόγους απλότητας, θεωρήθηκε ότι η εκάστοτε μονάδα επεξεργασίας/τελικής διάθεσης βρίσκεται στο ίδιο μέρος που βρίσκεται και ο ΧΥΤΑ Φυλής.

Για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από το στάδιο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από το υφιστάμενο σύστημα συλλογής και μεταφοράς των σύμμεικτων αποβλήτων στον κάθε δήμο, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά στις ενότητες 11.1.3.1 και 11.1.3.2. Ειδικότερα, καταγράφηκαν ο αριθμός δρομολογίων, το συλλεγόμενο φορτίο και τα διανυόμενα χιλιόμετρα ανά δρομολόγιο, ο τύπος των απορριμματοφόρων και η κατανάλωση καυσίμου ανά απορριμματοφόρο. Στη συνέχεια, από τα στοιχεία αυτά υπολογίστηκε για κάθε δήμο η κατανάλωση καυσίμου ανά τόνο αποβλήτου για τη συλλογή των σύμμεικτων αποβλήτων, η οποία χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να υπολογιστεί η κατανάλωση καυσίμου για τη συλλογή των ΒΑΑ στα εξεταζόμενα σενάρια.

Ο δήμος Παπάγου-Χολαργού καταναλώνει 3.1L diesel και ο δήμος Ασπρόπυργου 4.5L diesel ανά τόνο συλλεγόμενου αποβλήτου. Αυτές οι τιμές είναι παρόμοιες των τιμών που έχουν μετρηθεί και σε αστικές-πυκνοκατοικημένες περιοχές και ημιαστικές-αραιοκατοικημένες περιοχές (Larsen et al., 2009) όπως είναι ο δήμος Παπάγου-Χολαργού και Ασπρόπυργου αντίστοιχα.

11.1.3.1 Δήμος Παπάγου-Χολαργού

Η συλλογή των σύμμεικτων ΑΣΑ στο Δήμο Παπάγου – Χολαργού (~350 τόνοι/εβδομάδα) γίνεται με 14 απορριμματοφόρα, τα οποία μεταφορτώνουν τα απορρίμματα σε 2 φορτηγά μεταφόρτωσης (τράκτορες). Τα τελευταία μεταφέρουν τα απορρίμματα από το δήμο στο ΧΥΤΑ Φυλής. Ο αριθμός των κυλιόμενων κάδων για τη συλλογή των ΑΣΑ είναι 1,210 και των σταθερών κάδων 1,578.

Έξι από τα απορριμματοφόρα έχουν μύλο ενώ τα υπόλοιπα οχτώ έχουν συμπιεστή τύπου πρέσσας. Δέκα από τα απορριμματοφόρα έχουν μικτό βάρος (Μ.Β.) 19 τόνους και ωφέλιμο φορτίο (Ω.Φ.) 6-8 τόνους, δύο έχουν Μ.Β. 13.5 τόνους και Κ.Β. 5 τόνους, ένα έχει Μ.Β. 26 τόνους και Ω.Φ. 11 τόνους και ένα Μ.Β. 8 τόνους και Ω.Φ. 2 τόνους. Σχετικά με τα φορτηγά μεταφόρτωσης, αυτά είναι Μ.Β. 40 τόνων, με το ένα να έχει ωφέλιμο φορτίο 16 τόνους και το άλλο 20 τόνους.

Σχετικά με την κατηγορία ορίων εκπομπών (Euro class I-VI) στην οποία ανήκουν τα απορριμματοφόρα με βάση την εκάστοτε Ευρωπαϊκή νομοθεσία, αυτή υπολογίστηκε με βάση την ημερομηνία κυκλοφορίας τους. Από τα 16 απορριμματοφόρα και φορτηγά μεταφόρτωσης του Δήμου, 4 ανήκουν στην κατηγορία I, 3 στην κατηγορία II, 5 στην κατηγορία III, 2 στην κατηγορία IV και 1 στην κατηγορία V. Για λόγους απλότητας, για την ανάλυση κύκλου ζωής χρησιμοποιήθηκε ο σταθμισμένος μέσος όρος αυτών, ήτοι η κατηγορία III. Η καταγραφή της κατάταξης των απορριμματοφόρων ανάλογα με την κατηγορία Euro στην οποία ανήκουν είναι απαραίτητη στα πλαίσια διεξαγωγής της ΑΚΖ καθώς οι κατηγορίες αυτές παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τα ανώτερα επιτρεπτά όρια εκπομπών που προβλέπονται από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία για τα βαρέα οχήματα, με βάση την ημερομηνία κυκλοφορίας τους. Σημειώνεται ότι τα όρια εκπομπών που προβλέπουν οι διαφορετικές κλάσεις Euro I-VI, μειώνονται σταδιακά από το Euro I (αρχικά όρια; ημερομηνία έναρξης ισχύος: 1992) έως το Euro VI (τα τελευταία όρια που ισχύουν έως και σήμερα; ημερομηνία έναρξης ισχύος: 2013). Ελλείψει δεδομένων εκπομπών από το κάθε απορριμματοφόρο, ως εκπομπές από αυτά λαμβάνονται οι ανώτερες επιτρεπόμενες από την εκάστοτε νομοθεσία που ίσχυε κατά την ημερομηνία κυκλοφορίας τους.

Καθημερινώς εκτελούνται περίπου 11 δρομολόγια εντός των ορίων του Δήμου, το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου ένα δρομολόγιο ανά απορριμματοφόρο την ημέρα (με εξαίρεση 3 απορριμματοφόρα τα οποία κάνουν ένα αντί για πέντε δρομολόγια Δευτέρα-Παρασκευή). Τα φορτηγά μεταφόρτωσης κάνουν συνολικά 15 δρομολόγια προς το ΧΥΤΑ τις καθημερινές, το οποίο αντιστοιχεί σε 1-2 δρομολόγια ανά φορτηγό την ημέρα.

Τα Σάββατα πραγματοποιείται 1 δρομολόγιο από 1 απορριμματοφόρο εντός του Δήμου το οποίο στη συνέχεια μεταφορτώνει στους 2 τράκτορες οι οποίοι μεταφέρουν τα απορρίμματα στο ΧΥΤΑ (ένα δρομολόγιο ανά φορτηγό μεταφόρτωσης).

Τέλος, τις Κυριακές πραγματοποιούνται 7 δρομολόγια από 7 απορριμματοφόρα εντός του Δήμου τα οποία στη συνέχεια μεταφορτώνουν στους 2 τράκτορες οι οποίοι μεταφέρουν τα απορρίμματα στο ΧΥΤΑ (ένα δρομολόγιο ανά φορτηγό μεταφόρτωσης).

Συνολικά πραγματοποιούνται 66 δρομολόγια από τα απορριμματοφόρα στο δήμο και 18 δρομολόγια προς το ΧΥΤΑ από τα φορτηγά μεταφόρτωσης μέσα στην εβδομάδα. Η μέση χιλιομετρική απόσταση που διανύουν τα απορριμματοφόρα ανά δρομολόγιο είναι 28 km και η μέση διάρκεια του δρομολογίου είναι 3.5-4 ώρες. Η συνολική απόσταση που διανύουν τα απορριμματοφόρα και τα φορτηγά μεταφόρτωσης στη διάρκεια της εβδομάδας είναι 3,470 km και η συνολική κατανάλωση καυσίμου υπολογίζεται στα 2,319 L.

Τα ανωτέρω στοιχεία παρουσιάζονται αναλυτικά στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 30: Στόλος οχημάτων και πραγματοποιούμενα δρομολόγια για τη συλλογή των σύμμεικτων ΑΣΑ στο Δήμο Παπάγου-Χολαργού

Μάρκα & μοντέλο οχήματος	Αριθμός κυκλοφορίας	Τύπος απορριμματοφόρου	Μικτό Βάρος (kg)	Ωφέλιμο φορτίο (kg)	Ετος κυκλοφορίας	Αριθμός δρομολογίων την εβδομάδα	Συνολικά διανυόμενη απόσταση την εβδομάδα (km)
MERCEDES 816	KHH4780	Μύλος	8000	2060	2010	5	150
MERCEDES 1318	KHH5931	Μύλος	13500	5012	2003	5	150
MERCEDES 1318	KHI5746	Μύλος	13500	5012	2003	2	98
MERCEDES 1922	KHH5907	Μύλος	19000	8020	1992	5	135
MERCEDES 2024	KHO5800	Πρέσσα	19000	6740	1994	1	25
MERCEDES 2024	KHO5975	Μύλος	19000	7930	1996	6	138
MERCEDES 2024	KHO6256	Πρέσσα	19000	6460	1997	6	170
MERCEDES 2024	KHO6317	Πρέσσα	19000	6470	1999	6	126
MERCEDES 1831	KHO6360	Μύλος	19000	7550	2000	6	162
MERCEDES 1823	KHO6476	Πρέσσα	19000	6850	2003	6	168
VOLVO	KHI5816	Πρέσσα	19000	7020	2004	5	140
MERCEDES 1832	KHI6672	Πρέσσα	19000	5760	2006	6	192
MERCEDES 1832	KHI6687	Πρέσσα	19000	5760	2007	6	186
MERCEDES	KHH3972	Πρέσσα	26000	10912	1993	1	10
ΤΡΑΚΤΟΡΑΣ ACTROS+ 2 ΠΡΕΣΣΕΣ	KHI5756	Τράκτορας	40000	16230	2003	14	880
ΤΡΑΚΤΟΡΑΣ MERCEDES ACTROS	KHI6547	Τράκτορας	40000	20030	2004	10	740

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του σταδίου της συλλογής και μεταφοράς των ΒΑΑ για το Δήμο Παπάγου-Χολαργού.

Πίνακας 31: Εισροές στο στάδιο της συλλογής & μεταφοράς ΒΑΑ για το Δήμο Παπάγου-Χολαργού

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Κατανάλωση diesel από απορριμματοφόρο όχημα συλλογής Euro III	3.09	L/ tn βιοαπόβλητου

Μέση διανυόμενη απόσταση ανά δρομολόγιο από απορριμματοφόρα μεταφόρτωσης (14-20t, Euro III) προς τη μονάδα επεξεργασίας	34	km

11.1.3.2 Δήμος Ασπρόπυργου

Η συλλογή των σύμμεικτων ΑΣΑ στον δήμο Ασπρόπυργου (~320 τόνοι/εβδομάδα) γίνεται με 8 απορριμματοφόρα, τα οποία στη συνέχεια μεταφέρουν τα απορρίμματα από το δήμο στο ΧΥΤΑ Φυλής. Ο αριθμός των κάδων για τη συλλογή των σύμμεικτων ΑΣΑ ανέρχεται στους 1,000.

Τα απορριμματοφόρα έχουν μικτό βάρος (Μ.Β.) 18.5-19 τόνους και ωφέλιμο φορτίο (Ω.Φ.) 7-8.4 τόνους. Σχετικά με την κατηγορία ορίων εκπομπών (Euro class I-VI) στην οποία ανήκουν τα απορριμματοφόρα του δήμου, 1 ανήκει στην κατηγορία I, 1 στην κατηγορία II, 4 στην κατηγορία III και 2 στην κατηγορία IV.

Κάθε απορριμματοφόρο εκτελεί ένα δρομολόγιο την ημέρα από Δευτέρα έως Παρασκευή, ενώ το Σαββατοκύριακο δεν εκτελούνται δρομολόγια. Συνολικά πραγματοποιούνται 40 δρομολόγια από το απορριμματοφόρα εντός του δήμου και προς το ΧΥΤΑ. Η μέση χιλιομετρική απόσταση που διανύουν τα απορριμματοφόρα εντός του δήμου ανά δρομολόγιο είναι 50 km ενώ η απόσταση από το δήμο έως το ΧΥΤΑ συμπεριλαμβανομένης της επιστροφής με άδειο φορτίο είναι 10 km.

Η συνολική απόσταση που διανύουν τα απορριμματοφόρα στη διάρκεια της εβδομάδας είναι 2,400 km και η συνολική κατανάλωση καυσίμου υπολογίζεται στα 2,400 L.

Τα ανωτέρω στοιχεία παρουσιάζονται αναλυτικά στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 32: Στόλος οχημάτων και πραγματοποιούμενα δρομολόγια για τη συλλογή των σύμμεικτων ΑΣΑ στο Δήμο Ασπρόπυργου

Αριθμός κυκλοφορίας	Μικτό Βάρος (kg)	Ωφέλιμο φορτίο (kg)	Έτος κυκλοφορίας	Αριθμός δρομολογίων την εβδομάδα	Συνολικά διανυόμενη απόσταση την εβδομάδα (km)
ΚΗΟ 5310	19000	8000	1995	5	300
ΚΗΟ 5419	19000	7050	2000	5	300
ΚΗΟ 5488	19000	8000	2003	5	300
ΚΗΟ 5487	19000	8000	2003	5	300
ΚΗΟ 5444	18600	8400	2001	5	300
ΚΗΟ 5445	18500	8400	2001	5	300
ΚΗΟ 3224	19000	8000	2008	5	300
ΚΗΟ 3223	19000	8000	2008	5	300

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του σταδίου της συλλογής και μεταφοράς των ΒΑΑ για το Δήμο Ασπρόπυργου.

Πίνακας 33: Εισροές στο στάδιο της συλλογής & μεταφοράς ΒΑΑ για το Δήμο Ασπρόπυργου

Εισροή	**Ποσότητα**	**Μονάδα μέτρησης**
Κατανάλωση diesel από απορριμματοφόρο όχημα συλλογής Euro III	4.5	L/ tn βιοαπόβλητου
Μέση διανυόμενη απόσταση ανά δρομολόγιο από απορριμματοφόρα μεταφόρτωσης (7.5-12t, Euro III) προς τη μονάδα επεξεργασίας	5	km

11.1.4 Κεντρική και Αποκεντρωμένη ξήρανση (Σ1&Σ2)

Σε αυτό το στάδιο, το συλλεγόμενο νωπό βιοαπόβλητο μεταφέρεται σε κεντρική μονάδα ξήρανσης (επίπεδο ξήρανσης Σ1) ή σε αποκεντρωμένη μονάδα ξήρανσης σε επίπεδο ενός ή περισσότερων δήμων (επίπεδο ξήρανσης Σ2) προκειμένου να μειωθεί το περιεχόμενο σε υγρασία από 78.5% κ.β. σε 15% κ.β.. Η κατανάλωση θερμότητας για τη ξήρανση του βιοαποβλήτου από 21.5% ΞΥ σε 85% ΞΥ ανά κιλό νωπού βιοαποβλήτου υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση.

$$E = L \times n \times \left[1 - \left(C_{\Xi Y,1} + \frac{C_{YΓ,2} \times C_{\Xi Y,1}}{C_{\Xi Y,2}}\right)\right] \qquad \text{(Εξίσωση 11-1)}$$

Όπου:

E: απαιτούμενη θερμότητα για τη ξήρανση (MJ/kg νωπού βιοαποβλήτου)

L: λανθάνουσα θερμότητα του νερού (2.44 MJ/kg στους 25°C)

η: συντελεστής απόδοσης (1.35)

$C_{ΞΥ,1}$: αρχική συγκέντρωση ξηρής ύλης (%)

$C_{ΞΥ,2}$: τελική συγκέντρωση ξηρής ύλης (%)

$C_{ΥΓ,2}$: τελική συγκέντρωση υγρασίας (%)

Οι εισροές στο στάδιο της κεντρικής και αποκεντρωμένης ξήρανσης που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση της ΑΚΖ παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 34: Εισροές στο στάδιο της κεντρικής και αποκεντρωμένης ξήρανσης

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Θερμότητα από φυσικό αέριο για τη ξήρανση του νωπού βιοαπόβλητου ή Θερμότητα από ξηρό βιοαπόβλητο*	2.47	MJ/ kg νωπού βιοαπόβλητου

** Αυτό εξετάζεται στην ανάλυση ευαισθησίας, κεφάλαιο 11.3.5.4*

11.1.5 Μονάδα παραγωγής αιθανόλης από αστικά βιοαπόβλητα

Ως σημείο βάσης για τη μοντελοποίηση της ΑΚΖ της μονάδας παραγωγής αιθανόλης αποτέλεσε η μέση βιοχημική σύσταση του υποστρώματος, ήτοι των αστικών βιοαποβλήτων (οργανικά οικιακά απόβλητα και πράσινα δήμου) που συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν στο πλαίσιο του έργου Waste2bio από τους δήμους Παπάγου-Χολαργού και Ασπρόπυργου. Ειδικότερα, δύο διαφορετικά υποστρώματα μοντελοποιήθηκαν: (i) των βιοαποβλήτων από το Δήμο Ασπρόπυργου που υποβλήθηκαν σε ξήρανση μετά τη συλλογή και μεταφορά τους στις εγκαταστάσεις της ΜΠΕΤ στο ΕΜΠ (κεντρική/αποκεντρωμένη ξήρανση, επίπεδο Σ1&Σ2 – Υπόστρωμα Α), και (ii) των βιοαποβλήτων από το Δήμο Παπάγου-Χολαργού που υποβλήθηκαν σε ξήρανση σε επίπεδο οικίας πριν τη συλλογή και μεταφορά τους (οικιακή ξήρανση – επίπεδο Σ3 – Υπόστρωμα Β). Επίσης, υπολογίστηκε η θεωρητική βιοχημική σύσταση ενός υποστρώματος οργανικών αποβλήτων από υπηρεσίες εστίασης έπειτα από ξήρανση (υπόστρωμα Γ) προκειμένου να εξεταστεί κατά την ανάλυση ευαισθησίας (κεφάλαιο 11.3.5.1). Η βιοχημική σύσταση των διαφορετικών υποστρωμάτων που εξετάστηκαν παρουσιάζεται στον Πίνακας 35.

Πίνακας 35: Βιοχημική σύσταση εξεταζόμενων υποστρωμάτων διεργασίας

Σύσταση (% ΞΒ)	Κεντρική/αποκεντρωμένη ξήρανση βιοαποβλήτων - Υπόστρωμα Α	Οικιακή ξήρανση βιοαποβλήτων - Υπόστρωμα Β	Βιοαπόβλητα από υπηρεσίες εστίασης - Υπόστρωμα Γ
Σακχαρόζη	2.47	4.19	4.47
Γλυκόζη	2.37	4.56	1.21
Άμυλο	14.33	13.03	21.95
Λιγνίνη	2.19	0.98	1.12
Πρωτεΐνες	10.51	11.07	15.77

Λιπαρά	11.91	11.63	15.53
Κυτταρίνη	13.26	18.29	7.16
Ημικυτταρίνη	10.74	7.54	6.84
Πηκτίνη	3.91	3.68	4.98
Τέφρα	11.02	9.87	11.16
Άλλα Πτητικά Στερεά	17.30	15.17	9.81

Όπως φαίνεται από τον προηγούμενο Πίνακα, το υπόστρωμα Β είναι πλουσιότερο σε σακχαρόζη και γλυκόζη από το υπόστρωμα Β κατά 80% κατά μέσο όρο, το οποίο αποδίδεται στο γεγονός ότι η άμεση ξήρανση σε επίπεδο οικίας διατηρεί τα ελεύθερα σάκχαρα του αποβλήτου, τα οποία στην περίπτωση της κεντρικής/αποκεντρωμένης ξήρανσης έχουν σε μεγάλο βαθμό αποδομηθεί. Επίσης, το περιεχόμενο σε σακχαρόζη, άμυλο και πρωτεΐνες στην περίπτωση των οργανικών αποβλήτων από υπηρεσίες εστίασης – Υπόστρωμα Γ είναι υψηλότερο κατά 82%, 53% και 50% αντίστοιχα σε σχέση με το Υπόστρωμα Α.

Ο άνθρακας, η ανώτερη και κατώτερη θερμογόνος δύναμη του υποστρώματος σε ξηρή βάση ($ΑΘΔ_{ΞΒ}$ και $ΚΘΔ_{ΞΒ}$) υπολογίστηκαν μέσω συσχέτισης με τη βιοχημική σύσταση του υποστρώματος με βάση τις Εξισώσεις (Εξίσωση 11-2 -(Εξίσωση 11-4, προκειμένου να υπάρχει συνέπεια μεταξύ αυτών. Σημειώνεται ότι στις εξισώσεις, τα "άλλα ΠΣ" (Πτητικά Στερεά τα οποία δεν περιλαμβάνονται στις βιοχημικές παραμέτρους $ΒΠ_i$) υπολογίζονται με βάση το περιεχόμενο C και την ΑΘΔ της σακχαρόζης προκειμένου να κλείσει το ισοζύγιο μάζας.

$$\boldsymbol{C = \sum_{i=1}^{n} BΠ_i \times C_i + (1 - \sum_{i=1}^{n} BΠ_i) \times C_{σακχ}} \qquad kg\ C/kg\ ΞΥ \qquad (Εξίσωση\ 11\text{-}2)$$

$$\boldsymbol{ΑΘΔ = \sum_{i=1}^{n} BΠ_i \times ΑΘΔ_i + (1 - \sum_{i=1}^{n} BΠ_i) \times ΑΘΔ_{σακχ}} \qquad MJ/kg\ ΞΥ \qquad (Εξίσωση\ 11\text{-}3)$$

$$ΚΘΔ = ΑΘΔ - 2.442 \times H \times 8.936 \qquad MJ/kg\ ΞΥ \qquad (Εξίσωση\ 11\text{-}4)$$

Όπου

$\boldsymbol{BΠ_i}$: *βιοχημική παράμετρος* i *, π.χ. κυτταρίνη, σακχαρόζη, άμυλο κτλ. (kg* $ΒΠ_i$*/kg ΞΥ)*

$\boldsymbol{C_i}$: *περιεχόμενο άνθρακα βιοχημικής παραμέτρου* i *(kg C/kg ΞΥ)*

H, πρωτεΐνες, σακχ *: περιεχόμενο σε υδρογόνο, πρωτεΐνες, σακχαρόζη (kg/kg ΞΥ)*

Με βάση τη βιοχημική σύσταση των υποστρωμάτων και λεπτομερειακούς υπολογισμούς ισοζυγίων μάζας, ουσιών και ενέργειας υπολογίστηκαν και επαληθεύτηκαν η παραγωγή ενέργειας και καυσίμων (βιοαιθανόλη, βιοαέριο) καθώς και η ποσότητα και σύσταση των παραγόμενων προϊόντων. Για τη μοντελοποίηση των διεργασιών της μονάδας παραγωγής βιοαιθανόλης χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τη λειτουργία της πιλοτικής μονάδας παραγωγής βιοαιθανόλης Waste2bio, όπως η απόδοση των διεργασιών της βιομετατροπής και της αναερόβιας χώνευσης, ενώ για άλλες διεργασίες οι οποίες δεν λαμβάνουν χώρα στη μονάδα Waste2bio, χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα.

11.1.5.1 Τεμαχισμός και άλεση

Για την προετοιμασία του υποστρώματος προς επεξεργασία, αρχικά τα ξηραμένα βιοαπόβλητα υπόκεινται σε κονιορτοποίηση με τεμαχιστή και στη συνέχεια σε άλεση για την περαιτέρω μείωση του μεγέθους των σωματιδίων στα 3mm. Η κατανάλωση ηλεκτρισμού για την κονιορτοποίηση εκτιμάται σε περίπου 2.5 kWh/tn ΞΥ με βάση τους *Tumuluru et al.* (2014) και για την άλεση σε περίπου 40 kWh/tn ΞΥ με βάση τους *Miao et al.* (2011) και *Mani et al.* (2004).

Τα δεδομένα εισροών που χρησιμοποιήθηκαν για το στάδιο του τεμαχισμού και της άλεσης των ξηρών ΒΑΑ παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 36: Εισροές στο στάδιο τεμαχισμού και άλεσης

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Ηλεκτρισμός από δίκτυο διανομής	0.0425	kWh/ kg TS

11.1.5.2 Βιομετατροπή

Η διεργασία βιομετατροπής των αστικών βιοαποβλήτων σε αιθανόλη που λαμβάνει χώρα στη μονάδα Waste2bio περιλαμβάνει τα στάδια της θερμοχημικής προκατεργασίας, της ενζυμικής υδρόλυσης και της ταυτόχρονης σακχαροποίησης και ζύμωσης, όπως αυτά περιγράφονται αναλυτικά στο Παραδοτέο B2.3 του Waste2bio.

Η διεργασία βιομετατροπής είναι διαλείποντος έργου (fed-batch) όπου σύμφωνα με τις βέλτιστες συνθήκες προστίθεται υπόστρωμα συγκέντρωσης 30% w/w. Σύμφωνα με το παραδοτέο B.2.3r του Waste2bio, η μέγιστη παραγωγή αιθανόλης (147.7 g EtOH/kg ΞΥ) προκύπτει από την προσθήκη 48.4g κυτταρινάσης/kg ΞΥ και 3.1g γλυκοαμυλάσης/kg ΞΥ (5.1% συγκέντρωση ενζύμων στο ξηρό υλικό), η οποία έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη αποδόσεων υδρόλυσης 96.2% και 99.2% για την κυτταρίνη και το άμυλο αντίστοιχα. Η απόδυση της υδρόλυσης της σακχαρόζης ανέρχεται στο 99%, ενώ η ημικυτταρίνη δεν υδρολύεται καθόλου (απόδοση 0%). Η απόδοση της ζύμωσης των σακχάρων ανέρχεται στο 84%. Ωστόσο, η δοσολογία των ενζύμων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη είναι περίπου 7 φορές μικρότερη (4.0g κυτταρινάσης/kg ΞΥ και 3.1g γλυκοαμυλάσης/kg ΞΥ, 0.7% συγκέντρωση στο ξηρό υλικό) προκειμένου να επιτευχθεί μείωση καταρχήν του κόστους των ενζύμων και κατά δεύτερον της συνεισφοράς των ενζύμων στην περιβαλλοντική επιβάρυνση της διεργασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη αποδόσεων υδρόλυσης 8.0% και 84.4% για την κυτταρίνη και το άμυλο αντίστοιχα και την παραγωγή 82.6 g EtOH/kg ΞΥ. Η μείωση της απόδοσης της υδρόλυσης του αμύλου μειώνεται παρά το γεγονός ότι η δοσολογία της γλυκοαμυλάσης παραμένει σταθερή, καθώς το σκεύασμα κυτταρινάσης που χρησιμοποιείται έχει και αμυλολυτικές ιδιότητες και επομένως, η μείωση της δοσολογίας του ενζύμου αυτού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση και της υδρόλυσης του αμύλου.

Η μοντελοποίηση της διαδικασίας παραγωγής βιοαιθανόλης από τα αστικά βιοαπόβλητα βασίζεται στις εξισώσεις Εξ. 5-6 για το στάδιο της ενζυμικής υδρόλυσης, Εξ. 7-8 για τη ζύμωση και Εξ. 9-15 για το υπόλειμμα της διεργασίας.

Ενζυμική υδρόλυση υδατανθράκων σε C5 και C6 σάκχαρα:

$$\boldsymbol{C6_{\upsilon\delta\rho o} = \sigma\alpha\kappa\chi \times n_{\sigma\alpha\kappa\chi} \times 1.05 + \acute{\alpha}\mu\upsilon\lambda o \times \eta_{\alpha\mu\upsilon} \times 1.1 + K\Upsilon T \times n_{K\Upsilon T} \times 1.1} \quad kg\ C6/kg\ \Xi\Upsilon \quad (\text{Εξίσωση } 11\text{-}5)$$

$$\boldsymbol{C5_{\upsilon\delta\rho o} = HK \times \eta_{HK} \times 1.136} \qquad kg\ C5/kg\ \Xi Y \qquad (Εξίσωση\ 11\text{-}6)$$

Όπου

$\boldsymbol{C6_{\upsilon\delta\rho o}}$*: παραγωγή C6 σακχάρων μέσω της υδρόλυσης (kg C6/kg ΞΥ)*

$\boldsymbol{C5_{\upsilon\delta\rho o}}$*: παραγωγή C5 σακχάρων μέσω της υδρόλυσης (kg C5/kg ΞΥ)*

ΚΥΤ *: περιεχόμενο σε κυτταρίνη (kg/kg ΞΥ)*

ΗΚ *: περιεχόμενο σε ημικυτταρίνη (kg/kg ΞΥ)*

$\boldsymbol{n_{\sigma\alpha\kappa\chi}}$*: απόδοση υδρόλυσης της σακχαρόζης (%)*

$\boldsymbol{n_{\alpha\mu\upsilon}}$*: απόδοση υδρόλυσης του αμύλου (%)*

$\boldsymbol{n_{KYT}}$*: απόδοση υδρόλυσης της κυτταρίνης (%)*

$\boldsymbol{n_{HK}}$*: απόδοση υδρόλυσης της ημικυτταρίνης (%)*

1.05*: συντελεστής μετατροπής της σακχαρόζης σε C6 σάκχαρα*

1.1*: συντελεστής μετατροπής της κυτταρίνης και του αμύλου σε C6 σάκχαρα*

1.136*: συντελεστής μετατροπής της ημικυτταρίνης σε C5 σάκχαρα*

Ζύμωση σακχάρων για την παραγωγή βιοαιθανόλης:

$$\boldsymbol{Βιοαιθανόλη = C6_{\upsilon\delta\rho o} \times 0.511 \times \eta_{C6} + C5_{\upsilon\delta\rho o} \times 0.505 \times \eta_{C5}} \qquad kg\ EtOH/kg\ \Xi Y \qquad (Εξίσωση\ 11\text{-}7)$$

$$\boldsymbol{CO_2 = Βιοαιθανόλη \times 44/46} \qquad kg\ CO_2/kg\ \Xi Y \qquad (Εξίσωση\ 11\text{-}8)$$

Όπου

$\boldsymbol{\eta_{C6}}$*: απόδοση παραγωγής βιοαιθανόλης από τα C6 σάκχαρα (%)*

$\boldsymbol{\eta_{C5}}$*: απόδοση παραγωγής βιοαιθανόλης από τα C5 σάκχαρα (%)*

0.511*: θεωρητικός συντελεστής μετατροπής C6 σακχάρων σε βιοαιθανόλη*

0.505*: θεωρητικός συντελεστής μετατροπής C5 σακχάρων σε βιοαιθανόλη*

Οι εισροές χημικών στη διεργασία βιομετατροπής για την παραγωγή 82.6g EtOH/kg ΞΥ παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 37: Ποσότητες χημικών που εισέρχονται στη μονάδα βιομετατροπής

Πρώτη ύλη	**Ποσότητα**
H2SO4 (g) 95%	9.7 gr/kg ΞΥ
NaOH 1N	2.7 gr/kg ΞΥ

Spirizyme Fuel (γλυκοαμυλάση)	3.1	gr/kg ΞΥ
Cellic Ctec 2 (κυτταρινάση)	4.0	gr/kg ΞΥ
Ζυμομύκητας (Saccharomyces cerevisiae)	10	gr/kg ΞΥ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των ενζύμων και του ζυμομύκητα, σύμφωνα με τους *Duhn et al.* (2012).

Πρώτη ύλη	**Ενέργεια**	
Κυτταρινάση	47	MJ/kg
Γλυκοαμυλάση	102	MJ/kg
Ζυμομύκητας	43	MJ/kg

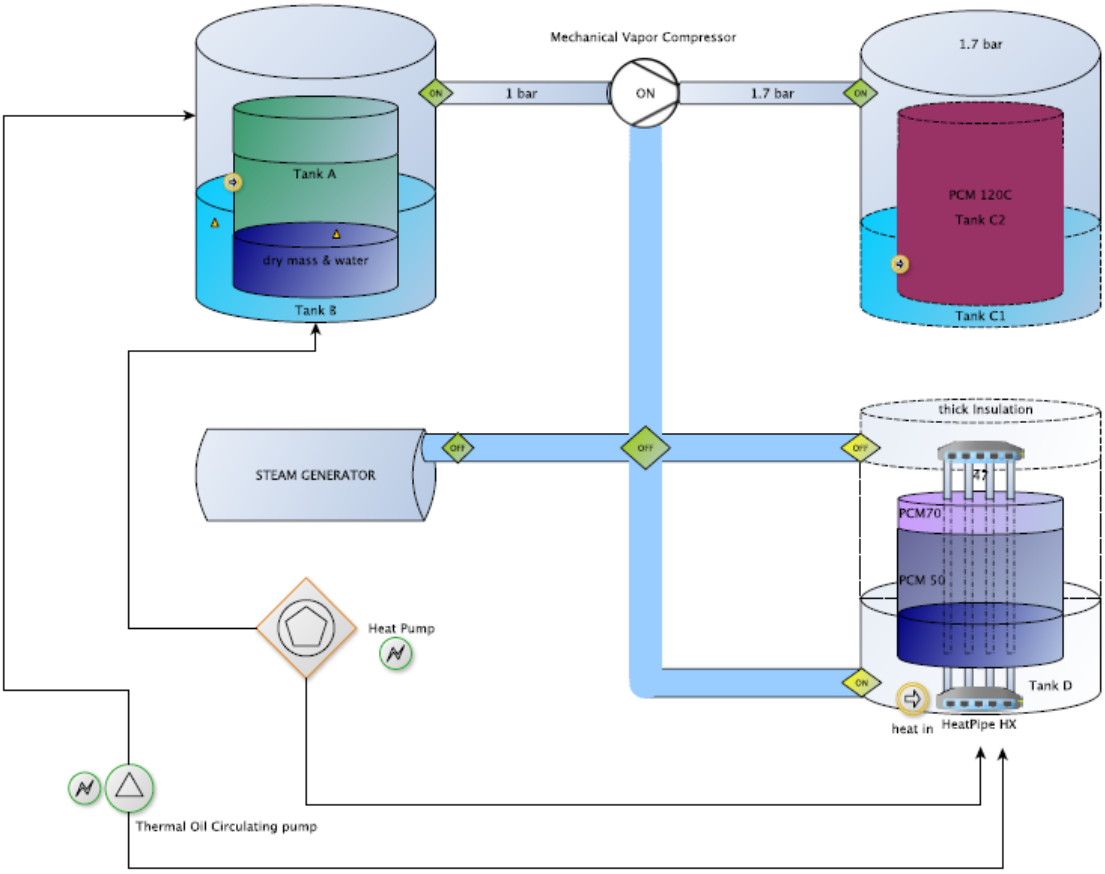
Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας για τη λειτουργία του βιοαντιδραστήρα προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές θερμοκρασίες για τους προκαθορισμένους χρόνους παραμονής σύμφωνα τις βέλτιστες συνθήκες που περιγράφονται στο παραδοτέο Β.2.3r του Waste2Bio, σχεδιάστηκε μια μονάδα στην οποία πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας μεταξύ των δοχείων για τη μέγιστη ενεργειακή εξοικονόμηση. Τα δοχεία του βιοαντιδραστήρα και η λογική λειτουργίας τους για τη μεταφορά θερμότητας παρουσιάζονται στη συνέχεια (βλ. επίσης Σχήμα 71).

- Δοχείο Α: Το βασικό δοχείο της διεργασίας
- Δοχείο Β: Ο μανδύας-εναλλάκτης που εμπεριέχει το Α
- Δοχείο C1: Ο μανδύας-εναλλάκτης που εμπεριέχει το δοχείο θερμικής αδράνειας (C2) υψηλής Θερμοκρασίας (120 °C)
- Δοχείο C2: Το δοχείο θερμικής αδράνειας με PCM120 (Phase Change Material)
- Δοχείο D: Το δεύτερο δοχείο θερμικής αδράνειας με PCM50&70 (με εναλλάκτη heat pipe) χαμηλής Θερμοκρασίας (50°C & 70°C)

Αρχικά τα θερμοδοχεία C1 και C2 είναι φορτισμένα με θερμότητα 23kWh (θερμοδυναμική ισορροπία 2bar, 120°C). Το θερμοδοχείο PCM50&70 είναι φορτισμένο με θερμότητα 9.5 kWh (λανθάνουσα θερμότητα τήξεως στους 50°C&70°C).

Από το δοχείο PCM50&70 με άνοιγμα βαλβίδας και 25min λειτουργία αντλίας θερμελαίου, θερμότητα 9.5 kWh μεταφέρεται στα δοχεία Α και Β που αποκτούν σταδιακά θερμοκρασία 500C και έπειτα 70°C. Από το δοχείο C1 με άνοιγμα βαλβίδας και 10min λειτουργία του συμπιεστή υδρατμών (2.7 kWh electrical), μάζα ατμού (22 kg - 16kWh) μεταφέρεται στο δοχείο Β, ενώ θερμότητα (11kWh από τα 16 kWh) μεταφέρεται με συναγωγή στο δοχείο Α (γεμάτο με υλικό). Η θερμότητα στα δοχεία φθάνει τους 1200C (2bar, παραμονή 1h). Από το δοχείο Β με άνοιγμα της βαλβίδας και 10min λειτουργία του συμπιεστή υδρατμών (2.7 kWh electrical), μάζα ατμού 22 kg μεταφέρεται στο δοχείο C1 (16kWh). Τα δοχεία Α και Β αποκτούν θερμοκρασία 850C. Με άνοιγμα βαλβίδας και 25min λειτουργία της αντλίας θερμελαίου (0.3 kWh electrical) θερμότητα 4.7 kWh μεταφέρεται & αποθηκεύεται στο PCM50 (δοχείο D). Τα δοχεία Α και Β αποκτούν θερμοκρασία 50°C. Με άνοιγμα βαλβίδας και 25min λειτουργία της αντλίας θερμότητας (1 kWh electrical), θερμότητα 4.8 kWh μεταφέρεται & αποθηκεύεται στο PCM70 (δοχείο D). Τα δοχεία Α και Β αποκτούν θερμοκρασία 30°C.

Συνολικά ανά κύκλο παραγωγής η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια υπολογίζεται στα 7.92 kWh/batch και αφορά στην ηλεκτρική κατανάλωση των κινητήρων (αντλίας & συμπιεστών) που επιπλέον μετατρέπεται σε ωφέλιμη θερμότητα καλύπτοντας πιθανές απώλειες ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Για την εκκίνηση του κύκλου παραγωγής (πριν το πρώτο batch) απαιτείται επιπλέον θερμική ενέργεια 23 kWh. Η ενέργεια αυτή μπορεί να επιμεριστεί στο σύνολο των κύκλων ανά προγραμματισμένη εκκίνηση. Στην περίπτωση συστηματικής παραγωγής (συνεχών κύκλων batches) η ενέργεια αυτή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.



Σχήμα 71: Απεικόνιση διάταξης δοχείων για τη διεργασία της βιομετατροπής

Τα δεδομένα εισροών που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της διεργασίας βιομετατροπής παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Πίνακας 38: Εισροές στο στάδιο βιομετατροπής

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Ηλεκτρισμός από το δίκτυο διανομής για την παραγωγή ενζύμων και ζυμομύκητα	0.26	kWh/ kg TS
Ηλεκτρισμός από το δίκτυο διανομής για τη λειτουργία του αντιδραστήρα	0.198	kWh/ kg TS
Παραγωγή θειικού οξέος (H_2SO_4)	9.7/1000	kg/ kg TS
Παραγωγή υδροξειδίου του νατρίου (NaOH)	2.7/1000	kg/ kg TS

11.1.5.3 Απόσταξη βιοαιθανόλης

Το προϊόν της ζύμωσης έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε βιοαιθανόλη και γι' αυτό πρέπει να καθαριστεί από προσμίξεις, προκειμένου να μπορεί να αναμιχθεί με βενζίνη. Η επιτυχής ανάμιξη απαιτεί υψηλή καθαρότητα αιθυλικής αλκοόλης (~99,5%), καθώς διαλύματα χαμηλότερης περιεκτικότητας δεν είναι αναμείξιμα με τη βενζίνη.

Η διαδικασία μέσω της οποίας παράγεται διάλυμα υψηλής περιεκτικότητας αιθανόλης είναι αυτή της απόσταξης. Η απόσταξη πραγματοποιείται σε δύο στήλες. Στην πρώτη απομακρύνεται το διαλυμένο CO_2 και το περισσότερο νερό. Στη δεύτερη στήλη συμπυκνώνεται η βιοαιθανόλη σε ένα σχεδόν αζεοτροπικό μίγμα (~92.5%).

Μέσω της απόσταξης, μπορεί να παραχθεί μίγμα αιθανόλης - ύδατος σε ογκομετρική αναλογία 94-95% και 5-4% αντιστοίχως (ένυδρη αιθανόλη). Η αναλογία αυτή όμως, συνθέτει την αζεοτροπική ένωση αιθανόλης - ύδατος. Το αζεοτροπικό μίγμα παρουσιάζει ομοιογενή φυσικοχημική συμπεριφορά, με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτός ο περαιτέρω διαχωρισμός των δύο ουσιών με συμβατική απόσταξη. Για το λόγο αυτό το αζεοτροπικό μίγμα επεξεργάζεται περαιτέρω με μοριακά κόσκινα για την παραγωγή άνυδρης αιθανόλης. Με τη μέθοδο αυτή το αζεοτροπικό μίγμα διέρχεται μοριακών κοσκίνων, δηλαδή φίλτρων ζεολίθων. Κατά τη διέλευση του αζεοτροπικού μίγματος, τα μόρια του νερού προσροφώνται στα τοιχώματα των πόρων, με αποτέλεσμα να προκύπτει άνυδρη αιθανόλη κατά το πέρας της διέλευσης.

Η κατανάλωση ενέργειας για την απόσταξη άνυδρης αιθανόλης με μοριακά κόσκινα κυμαίνεται σε τιμές μεταξύ 3.6 και 5.5 MJ ανά λίτρο βιοαιθανόλης (Saffy et al., 2015; Vane, 2008; Madson, 2005), ενώ για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης επιλέχθηκε η τιμή 4.3MJ/L, η οποία προκύπτει ως μέσος όρος των τιμών που δίνονται στην ανωτέρω βιβλιογραφία. Σύμφωνα με τους *Saffy et al.* (2015), για την απόσταξη ένυδρης αιθανόλης σε συγκέντρωση 91% απαιτείται 83% περίπου της ενέργειας σε σχέση με την άνυδρη αιθανόλη. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε η κατανάλωση 3.6 MJ/L για την ένυδρη αιθανόλη. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται μόνο στην περίπτωση που εξετάζεται η παραγωγή ένυδρης αιθανόλης ως εναλλακτικό προϊόν της άνυδρης αιθανόλης σε συνδυασμό με την παραγωγή καυσίμου θέρμανσης και την υποκατάσταση συμβατικού καύσιμου θέρμανσης (βλ. κεφάλαιο 11.1.5.9.3).

Πίνακας 39: Εισροές στο στάδιο της απόσταξης της βιοαιθανόλης

Εισροή	**Ποσότητα**	**Μονάδα μέτρησης**
Θερμότητα από φυσικό αέριο για την απόσταξη άνυδρης αιθανόλης	4.3	MJ/L EtOH προς απόσταξη
Θερμότητα από φυσικό αέριο για την απόσταξη ένυδρης αιθανόλης*	3.6	MJ/L EtOH προς απόσταξη

** Μόνο στην περίπτωση της παραγωγής καυσίμου θέρμανσης (κεφ. 11.1.5.9.3)*

11.1.5.4 Αναερόβια χώνευση

Τα μη υδρολημένα και τα μη ζυμωμένα σάκχαρα μαζί με τα μη μετατρεμμένα λιπαρά, πρωτεΐνες και λιγνίνη οδηγούνται στο υπολειμματικό ρεύμα της απόσταξης, το οποίο μεταφέρεται σε μονάδα αναερόβιας χώνευσης για να επεξεργαστεί. Η τεχνολογία που εφαρμόζεται είναι η υγρή μεσοφιλική αναερόβια χώνευση δύο σταδίων. Η μονάδα παράγει βιοαέριο και χώνευμα. Οι βασικές παράμετροι που μοντελοποιήθηκαν ήταν (i) το δυναμικό μεθανίου και η απόδοση και (ii) η απαιτούμενη επιπλέον ενέργεια –εκτός από την παραγόμενη- για τη λειτουργία της μονάδας.

Το θεωρητικό δυναμικό μεθανίου ($CH_{4\delta\upsilon\nu}$) του υγρού κλάσματος των υπολειμμάτων της διεργασίας βιομετατροπής υπολογίστηκε με βάση το περιεχόμενο σε υδατάνθρακες, λιπαρά κτλ με βάση την Εξ. 11 (εξίσωση *Buswell*) και διασταυρώθηκε με αποτελέσματα από BMP tests που παρουσιάζονται στο παραδοτέο Β.3.3 του Waste2Bio. Όσον αφορά την πραγματική απόδοση μεθανίου (δλδ το ποσοστό του θεωρητικού δυναμικού μεθανίου που θα παραγόταν στην πράξη σε πλήρη κλίμακα), θεωρήθηκε ίση με 70% με βάση βιβλιογραφικές εκτιμήσεις (Angelidaki & Batstone 2010).

Η μάζα, η συγκέντρωση σε σάκχαρα και το θεωρητικό δυναμικό μεθανίου του υπολείμματος της απόσταξης υπολογίζονται με βάση τα ισοζύγια μάζας των Εξισώσεων 9-11.

Μάζα, συγκέντρωση σακχάρων και θεωρητικό δυναμικό μεθανίου στο υπόλειμμα της απόσταξης (ΥΑ):

$$\boldsymbol{C6_{YA} = \left[\left(C6_{\upsilon\delta\rho o} - C6_{EtOH} - C6_{CO_2}\right) \times \eta_{\delta\iota\alpha\chi,C6}\right]/YA}$$ *kg C6/kg ΞΥ* *(Εξίσωση 11-9)*

$$\boldsymbol{C5_{YA} = \left[\left(C5_{\upsilon\delta\rho o} - C5_{EtOH} - C5_{CO_2}\right) \times \eta_{\delta\iota\alpha\chi,C5}\right]/YA}$$ *kg C5/kg ΞΥ* *(Εξίσωση 11-10)*

$$\boldsymbol{CH_{4_{\delta\upsilon\nu}} = \frac{1.014 \times \Lambda\Pi_{YK} + 0.496 \times \Pi P_{YK} + 0.797 \times \Lambda\Gamma_{YK} + 0.415 \times (C6_{YK} + C5_{YK} + \acute{\alpha}\lambda\lambda\alpha\Pi\Sigma_{YK})}{\Pi\Sigma_{YK}}}$$

L/kg ΠΣ *(Εξίσωση 11-11)*

Όπου

$\eta_{\delta\iota\alpha\chi,C6}$: απόδοση διαχωρισμού για τα C6 σάκχαρα (%)

$\eta_{\delta\iota\alpha\chi,C5}$: απόδοση διαχωρισμού για τα C5 σάκχαρα (%)

$\eta_{\delta\iota\alpha\chi,\Xi Y}$: απόδοση διαχωρισμού για τη ΞΥ (%)

$C6_{YK}$: C6 στο υγρό κλάσμα (kg C6/kg ΞΥ)

$C5_{YK}$: C5 στο υγρό κλάσμα (kg C5/kg ΞΥ)

$C6_{EtOH}$: C6 που μετατρέπονται σε EtOH (kg C6)

$C5_{EtOH}$: C5 που μετατρέπονται σε EtOH (kg C5)

$C6_{CO_2}$: C6 που μετατρέπονται σε CO_2 (kg C6)

$C5_{CO_2}$: C5 που μετατρέπονται σε CO_2 (kg C5)

$\Lambda\Gamma_{YK}$: λιγνίνη στο υγρό κλάσμα (kg λιγνίνης)

$\Lambda\Pi_{YK}$: λιπαρά στο υγρό κλάσμα (kg λιπαρών)

$\acute{A}\lambda\lambda\alpha\Pi\Sigma_{YK}$: άλλα πτητικά στερεά στο υγρό κλάσμα (συμπλήρωμα στο 100%) (kg ΠΣ)

ΠP_{YK}: πρωτεΐνες στο υγρό κλάσμα (kg πρωτεϊνών)

Υπολειμματικά στερεά: υπολειμματικά στερεά μετά τη ζύμωση (=είσοδος – EtOH - CO_2) (kg ΞΥ)

Όσον αφορά την εκτίμηση της κατανάλωσης ηλεκτρισμού και θερμότητας για τη λειτουργία της μονάδας ΑΧ, αυτή βασίστηκε σε τυπικές επιδόσεις μονάδων αναερόβιας χώνευσης (Hamelin et al., 2011). Η κατανάλωση θερμότητας υπολογίστηκε με βάση την απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την αύξηση της θερμοκρασίας του υποστρώματος από τους 18°C (μέση ετήσια θερμοκρασία στην Ελλάδα) στους 37 °C που είναι η απαιτούμενη μεσοφιλική θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η

ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού ($4.2 \cdot 10^{-3}$ MJ kg^{-1} K^{-1}) και των στερεών ($3 \cdot 10^{-3}$ MJ kg^{-1} K^{-1}). Ο ηλεκτρισμός που απαιτείται για τη λειτουργία των αντλιών, του αναδευτήρα και του εξαεριστήρα υπολογίζεται σε 18.3 kWh/tn και για τη θέρμανση του αντιδραστήρα σε 30.6 kWh/tn.

Οι διαφεύγουσες (διάχυτες) εκπομπές μεθανίου εκτιμήθηκαν στο 1% του παραγόμενου μεθανίου, με την προϋπόθεση ότι εφαρμόζονται οι βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές (ΒΔΤ) σύμφωνα και με σχετικές μελέτες AKZ (Hamelin et al., 2011; De Vries et al., 2012; Tonini et al., 2012; Hamelin et al., 2014).

Πίνακας 40: Εισροές στο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Θερμότητα από φυσικό αέριο για την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού (80% ww) στους 37°C από τους 18 °C	$(37-18)*4.2*10^{-3}*0.8$	MJ/kg
Θερμότητα από φυσικό αέριο για την αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών (20% ww) στους 37°C από τους 18 °C	$(37-18)*3*10^{-3}*0.2$	MJ/kg
Ηλεκτρισμός από δίκτυο διανομής για τη λειτουργία των αντλιών, αναδευτήρα, εξαεριστήρα και τη θέρμανση του αντιδραστήρα	0.049	kWh/kg
Κατανάλωση καυσίμου diesel για τη λειτουργία του φορτωτή	0.0009	L/kg

11.1.5.5 Διαχωρισμός στερεού κλάσματος της απόσταξης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διεργασίες οι οποίες λαμβάνουν χώρα στην περίπτωση που επιθυμείται να διαχωριστεί το στερεό κλάσμα της απόσταξης προκειμένου να οδηγηθεί προς καύση και να παραχθεί ενέργεια. Η πρακτική αυτή συνηθίζεται σε περιπτώσεις όπου το υπόστρωμα περιέχει σημαντικές συγκεντρώσεις λιγνίνης, όπως η ξυλώδης βιομάζα, σε αντίθεση με το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα μελέτη, το οποίο προέρχεται κυρίως από βιοαπόβλητα κουζίνας και είναι φτωχό σε λιγνίνη. Παρόλα αυτά, το σενάριο αυτό μελετάται στο πλαίσιο της ανάλυσης ευαισθησίας (κεφάλαιο 11.3.5.3) προκειμένου να διερευνηθεί αν οδηγεί σε καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση.

Ο διαχωρισμός γίνεται με φυγοκέντριση του υπολείμματος της απόσταξης και στη συνέχεια οδηγείται προς ξήρανση προκειμένου να μειωθεί το περιεχόμενο του σε υγρασία προτού οδηγηθεί για καύση. Τα στάδια αυτά παρουσιάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

11.1.5.5.1 Φυγοκέντριση

Το υπόλειμμα της απόσταξης διαχωρίζεται στο υγρό κλάσμα (το οποίο περιλαμβάνει τα υδρολυμένα αλλά μη ζυμωμένα σάκχαρα) και το στερεό κλάσμα (το οποίο περιλαμβάνει λιγνίνη και άλλα μη υδρολυμένα σάκχαρα) μέσω φυγοκέντρισης.

Η μάζα, η συγκέντρωση σακχάρων και η Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη σε ξηρά βάση ($ΚΘΔ_{ΞΒ}$) του στερεού κλάσματος υπολογίζονται με βάση τα ισοζύγια μάζας των Εξισώσεων 12-16.

Θεωρήθηκε ότι όλα τα υδρολυμένα C5 και C6 σάκχαρα καταλήγουν στο υγρό κλάσμα. Η ανάκτηση πρωτεϊνών, λιπαρών και λιγνίνης στο υγρό κλάσμα εκτιμήθηκε στο 23%, 30% και 7% αντίστοιχα, με βάση μετρήσεις που διεξήχθησαν στο πλαίσιο του έργου Waste2bio.

Το περιεχόμενο του στερεού κλάσματος σε ξηρή ύλη μετά τη φυγοκέντριση ισούται με 40% (βάσει επιδόσεων εμπορικών συστημάτων φυγοκέντρισης). Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη

φυγοκέντριση θεωρείται ότι ανέρχεται στις 0.018 kWh/kg με βάση το μέσο όρο των τιμών που δίνονται από τις εταιρείες GEA και Huber (Rak, 2011; Huber).

Μάζα, συγκέντρωση σακχάρων και Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη σε ξηρά βάση ($ΚΘΔ_{ΞΒ}$) στο στερεό βιοκαύσιμο (ΣΒ):

$$\boldsymbol{\upsilon\gamma\rho\acute{o}\ \kappa\lambda\acute{\alpha}\sigma\mu\alpha = \upsilon\pi o\lambda\epsilon\iota\mu\mu\alpha\tau\iota\kappa\acute{\alpha}\ \sigma\tau\epsilon\rho\epsilon\acute{\alpha}\ \times \eta_{\delta\iota\alpha\chi,\Xi Y}}$$ *kg ΞΥ* *(Εξίσωση 11-12)*

$$\Sigma B = \Upsilon\pi o\lambda\epsilon\iota\mu\mu\alpha\tau\iota\kappa\acute{\alpha}\ \sigma\tau\epsilon\rho\epsilon\acute{\alpha} - \Upsilon\gamma\rho\acute{o}\ \kappa\lambda\acute{\alpha}\sigma\mu\alpha$$ *kg ΞΥ* *(Εξίσωση 11-13)*

$$C6_{\Sigma B} = (C6_{\upsilon\delta\rho o} - C6_{EtOH} - C6_{CO2})\ x\ (1 - \eta_{\delta\iota\alpha\chi,\ C6})$$ *kg C6* (Εξίσωση 11-14)

$$C5_{\Sigma B} = (C5_{\upsilon\delta\rho o} - C5_{EtOH} - C5_{CO2})\ x\ (1 - \eta_{\delta\iota\alpha\chi,\ C5})$$ *kg C5* (Εξίσωση 11-15)

$$K\Theta\Delta_{\Sigma B} = [K\Theta\Delta_{\upsilon\pi o\sigma\tau\rho}\ x\ \upsilon\pi\acute{o}\sigma\tau\rho\omega\mu\alpha\ x\ k_{\upsilon\delta\rho o} - K\Theta\Delta_{C6}\ x\ (C6_{EtOH} + C6_{CO2} + C6_{\Upsilon K}) - K\Theta\Delta_{C5}\ x\ (C5_{EtOH} + C5_{CO2} + C5_{\Upsilon K}) - K\Theta\Delta_{\Pi P}\ x\ \Pi P_{\Upsilon K} - K\Theta\Delta_{\Lambda\Pi}\ x\ \Lambda\Pi_{\Upsilon K} - K\Theta\Delta_{\Lambda\Gamma}\ x\ \Lambda\Gamma_{\Upsilon K} - K\Theta\Delta_{\acute{\alpha}\lambda\lambda\alpha\Pi\Sigma}\ x\ \acute{\alpha}\lambda\lambda\alpha\Pi\Sigma_{\Upsilon K}]/\Sigma B$$ *MJ/kg ΞΥ* (Εξίσωση 11-16)

Όπου

$C6_{\Sigma B}$: C6 στο στερεό βιοκαύσιμο (kg C6)

$C5_{\Sigma B}$: C5 στο στερεό βιοκαύσιμο (kg C5)

$K\Theta\Delta_{\upsilon\pi o\sigma\tau\rho}$: ΚΘΔ του υποστρώματος εισόδου (MJ/kg ΞΥ)

ΥΚ: υγρό κλάσμα από φυγοκέντριση υπολείμματος διεργασίας (kg ΞΥ)

$k_{\upsilon\delta\rho o}$: σταθμισμένος μέσος των συντελεστών μετατροπής για τα υδρολυμένα σάκχαρα (Εξ. 5-6)

Τα δεδομένα εισροών που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση της φυγοκέντρισης παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 41: Εισροές στο στάδιο του διαχωρισμού του υπολείμματος της διεργασίας βιομετατροπής

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Ηλεκτρισμός από δίκτυο διανομής για το διαχωρισμό στερεών/υγρών με φυγοκέντριση	0.018	kWh/ kg υπολείμματος

11.1.5.5.2 Ξήρανση

Το στερεό κλάσμα της φυγοκέντρισης (40% ξηρή ύλη) ξηραίνεται (90% ξηρή ύλη) προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Η κατανάλωση θερμότητας για τη ξήρανση από 40% ΞΥ σε 90% ΞΥ υπολογίζεται από τη λανθάνουσα θερμότητα του νερού (2.44 MJ/kg στους 25°C) πολλαπλασιαζόμενη με το συντελεστή απόδοσης 1.35.

2.44 x 1.35 = 3.3 MJ θερμότητας / kg εξατμιζόμενου νερού

Πίνακας 42: Εισροές στο στάδιο της ξήρανσης

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης

Θερμότητα από φυσικό αέριο για τη ξήρανση του στερεού κλάσματος της φυγοκέντρισης	3.3*(0.9-0.4)	MJ/ kg στερεού κλάσματος

11.1.5.6 Χρήση χωνεύματος ως εδαφοβελτιωτικό

Η ποσότητα και η σύσταση του χωνεύματος από την αναερόβια χώνευση υπολογίστηκε με βάση το ισοζύγιο μάζας, ως η διαφορά από τα αρχικά θρεπτικά και την ξηρά ύλη που εισήλθαν στην αναερόβια χώνευση και την ποσότητα που μεταφέρθηκε στο βιοαέριο.

Το εργαλείο EASETECH υπολογίζει τις εκπομπές στον αέρα, τα επιφανειακά ύδατα, τα υπόγεια ύδατα και τη συσσώρευση στο έδαφος από τη χρήση του χωνεύματος στο έδαφος ως εδαφοβελτιωτικό με βάση το περιεχόμενο του χωνεύματος σε άζωτο, φώσφορο και άνθρακα καθώς και με βάση προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί με το αγρονομικό μοντέλο Daisy. Το ποσοστό του C που εισήχθη στο έδαφος και που εκπέμφθηκε ως CO_2 προσδιορίστηκε σύμφωνα με τις μετρήσεις των Bruun et al. (2006). Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι 90% του αρχικού C που χρησιμοποιείται στο έδαφος ως λίπασμα εκπέμπεται ως CO_2 μετά από 100 έτη.

Η διεργασία αποδόμησης του χωνεύματος που εφαρμόζεται στο έδαφος μοντελοποιήθηκε με χρήση κινητικής πρώτης τάξης και ρυθμό αποδόμησης (k) ίσο με 0.023 έτη, σύμφωνα με τα αποτελέσματα που αναφέρονται στους Bruun et al. (2006) για βιολογικά υπολείμματα αναερόβιας χώνευσης αστικών οργανικών αποβλήτων. Η κατανάλωση καυσίμου για την εφαρμογή του χωνεύματος στο έδαφος λήφθηκε επίσης υπόψη.

Το παραγόμενο χώνευμα θεωρείται ότι υποκαθιστά ανόργανα λιπάσματα (ουρία –N λιπάσματα, φωσφορικό διαμμώνιο – P λιπάσματα, χλωριούχο κάλιο – K λιπάσματα), το οποίο αντικατοπτρίζεται στο αρνητικό πρόσημο των αντίστοιχων ποσοτήτων των εισροών, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί.

Ο υπολογισμός της ποσότητας των ανόργανων λιπασμάτων που υποκαθιστούνται από τη χρήση του χωνεύματος ως οργανικού λιπάσματος βασίζεται στην Ευρωπαϊκή νομοθεσία για την εφαρμογή οργανικού λιπάσματος (EC, 1991), η οποία θέτει ανώτατα όρια για την ποσότητα του N που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Από την άλλη οι ποσότητες P και K δεν έχουν περιορισμό, ωστόσο οι ποσότητες που αποφεύγονται λόγω υποκατάστασης δεν περιλαμβάνουν τα τυχόν πλεονάσματα P και K (Hamelin et al., 2011).

Πίνακας 43: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης του λιπάσματος

Εισροή	**Ποσότητα**	**Μονάδα μέτρησης**
Κατανάλωση diesel σε τρακτέρ για τη εφαρμογή του χωνεύματος στο έδαφος	0.00057	L/kg χωνεύματος
Υποκατάσταση μέσου ανόργανου N λιπάσματος	-0.4	Kg/kg N στο χώνευμα
Υποκατάσταση μέσου ανόργανου K λιπάσματος	-1	Kg/kg K στο χώνευμα
Υποκατάσταση μέσου ανόργανου P λιπάσματος	-1	Kg/kg P στο χώνευμα

11.1.5.7 Χρήση αιθανόλης ως καύσιμο κίνησης

Η παραγόμενη βιοαιθανόλη θεωρείται ότι χρησιμοποιείται ως καύσιμο κίνησης σε οχήματα Euro V. Οι αέριες εκπομπές από τον αγωγό εξαγωγής (καυσαέρια) λόγω της καύσης βιοαιθανόλης στα οχήματα υπολογίζονται σύμφωνα με τους *Patterson et al.* (2008).

Η παραγόμενη αιθανόλη θεωρείται ότι υποκαθιστά την παραγωγή και κατανάλωση συμβατικού καυσίμου κίνησης (βενζίνη), το οποίο αντικατοπτρίζεται στο αρνητικό πρόσημο των αντίστοιχων ποσοτήτων των εισροών, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί. Ο λόγος υποκατάστασης υπολογίζεται με βάση την παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα βιοκαυσίμου ($ΚΘΔ_{EtOH,αν}$ 26.8 MJ/kg) σε σχέση με τη βενζίνη ($ΚΘΔ_{βενζ}$ 42.9 MJ/kg).

Πίνακας 44: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης του καύσιμου κίνησης/θέρμανσης

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Καύση άνυδρης βιοαιθανόλης σε όχημα	$ΚΘΔ_{EtOH,αν}$	MJ/kg EtOH
Υποκατάσταση καύσης βενζίνης σε όχημα (συμπ. παραγωγής) από άνυδρη βιοαιθανόλη	- $ΚΘΔ_{EtOH,αν}$/ $ΚΘΔ_{βενζ}$	MJ/kg EtOH

11.1.5.8 Παραγωγή και χρήση ενέργειας

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η παραγωγή και χρήση ενέργειας από (α) το βιοαέριο που παράγεται από την αναερόβια χώνευση και (β) το στερεό βιοκαύσιμο που προκύπτει στην περίπτωση που το υπόλειμμα της απόσταξης διαχωριστεί με φυγοκέντριση, σύμφωνα με το κεφάλαιο 11.1.5.5.

11.1.5.8.1 Βιοαέριο

Το βιοαέριο που παράγεται από την αναερόβια χώνευση θεωρείται ότι καίγεται σε μονάδα ΣΗΘ με καθαρή απόδοση ηλεκτρισμού και θερμότητας ίση με 30% και 55% αντίστοιχα, σε σχέση με την ΚΘΔ του βιοαερίου. Οι σχετικές αέριες εκπομπές υπολογίστηκαν με βάση τους Nielsen et al. (2010).

Η παραγόμενη θερμότητα θεωρείται ότι καταναλώνεται εντός της κεντρικής μονάδας για την κάλυψη των αναγκών σε θερμότητα και υποκαθιστά την κατανάλωση φυσικού αερίου, ενώ το τυχόν πλεόνασμα δεν μπορεί να πωληθεί καθώς δεν υπάρχει δίκτυο τηλεθέρμανσης στην περιοχή της Αττικής. Γενικά, οι ανάγκες της μονάδας παραγωγής αιθανόλης σε θερμότητα είναι μεγαλύτερες από την παραγόμενη θερμότητα, λόγω των υψηλών αναγκών της κεντρικής μονάδας ξήρανσης σε θερμότητα, με αποτέλεσμα το σύνολο της παραγόμενης θερμότητας να θεωρείται ότι υποκαθιστά την κατανάλωση φυσικού αερίου. Ωστόσο, στην περίπτωση που η ξήρανση γίνεται σε επίπεδο δήμων ή οικίας (συστήματα Σ2&Σ3), δηλαδή η μονάδα ξήρανσης βρίσκεται σε διαφορετική τοποθεσία από τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης, δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί το σύνολο της παραγόμενης θερμότητας στη μονάδα για ιδιοκατανάλωση, με αποτέλεσμα μεγάλο μέρος της θερμότητας να χάνεται (85-86%). Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός θεωρείται ότι καλύπτει τις ανάγκες τις μονάδας σε ηλεκτρισμό, ενώ το πλεόνασμα διατίθεται στο δίκτυο της ΔΕΗ υποκαθιστώντας το μίγμα ηλεκτρισμού που διατίθεται από το δίκτυο διανομής της ΔΕΗ.

Η υποκατάσταση ηλεκτρισμού και θερμότητας αντικατοπτρίζεται στο αρνητικό πρόσημο των αντίστοιχων ποσοτήτων των εισροών, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 45: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από το βιοαέριο

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Υποκατάσταση ηλεκτρισμού από δίκτυο διανομής	$-(ΚΘΔ_{CH4,\ δυν}/3.6)*0.30$	kWh/ m^3 CH_4
Υποκατάσταση θερμότητας από φυσικό αέριο (κεντρική ξήρανση Σ1)	$-(ΚΘΔ_{CH4,\ δυν}/3.6)*0.55$	kWh/ m^3 CH_4
Υποκατάσταση θερμότητας από φυσικό αέριο (αποκεντρωμένη ξήρανση Σ2)	$-(ΚΘΔ_{CH4,\ δυν}/3.6)*0.55*0.14$	kWh/ m^3 CH_4
Υποκατάσταση θερμότητας από φυσικό αέριο (οικιακή ξήρανση Σ3)	$-(ΚΘΔ_{CH4,\ δυν}/3.6)*0.55*0.15$	kWh/ m^3 CH_4

11.1.5.8.2 Στερεό βιοκαύσιμο

Το στερεό βιοκαύσιμο που ανακτάται από το υπόλειμμα της απόσταξης έπειτα από ξήρανση καίγεται στη μονάδα ΣΗΘ με καθαρή απόδοση ηλεκτρισμού και θερμότητας ίση με 30% και 55% αντίστοιχα, σε σχέση με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του στερεού βιοκαύσιμου η οποία υπολογίζεται με βάση τα ισοζύγια μάζας. Οι σχετικές αέριες εκπομπές υπολογίστηκαν με βάση τους Nielsen et al. (2010), όπου η καύση ξυλώδους βιομάζας σε αποκεντρωμένες μονάδες ΣΗΘ χρησιμοποιήθηκε ως πιο σχετική αναφορά. Η τέφρα πυθμένα από την καύση των στερεών βιοκαύσιμων θεωρείται ότι στέλνεται για ταφή, ενώ η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιείται για την επίχωση αλατωρυχείων, με αμελητέες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Fruergaard et al., 2010).

Η παραγόμενη θερμότητα θεωρείται ότι καταναλώνεται εντός της κεντρικής μονάδας για την κάλυψη των αναγκών σε θερμότητα και υποκαθιστά την κατανάλωση φυσικού αερίου, ενώ το τυχόν πλεόνασμα δεν μπορεί να πωληθεί καθώς δεν υπάρχει δίκτυο τηλεθέρμανσης στην περιοχή της Αττικής. Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός θεωρείται ότι καλύπτει τις ανάγκες τις μονάδας σε ηλεκτρισμό, ενώ το πλεόνασμα διατίθεται στο δίκτυο της ΔΕΗ υποκαθιστώντας το μίγμα ηλεκτρισμού που διατίθεται από το δίκτυο διανομής της ΔΕΗ.

Η υποκατάσταση ηλεκτρισμού και θερμότητας αντικατοπτρίζεται στο αρνητικό πρόσημο των αντίστοιχων ποσοτήτων των εισροών, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 46: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από το στερεό βιοκαύσιμο

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Υποκατάσταση ηλεκτρισμού από δίκτυο διανομής	$-(ΚΘΔ_{ΣΒ}/3.6)*0.30$	kWh/kg ΣΒ
Υποκατάσταση θερμότητας από φυσικό αέριο	$-ΚΘΔ_{ΣΒ}*0.55$	MJ/kg ΣΒ

11.1.5.9 Εναλλακτικά/επιπρόσθετα προϊόντα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται παραλλαγές του βασικού σεναρίου οι οποίες αφορούν την παραγωγή εναλλακτικών ή/και επιπρόσθετων προϊόντων, όπως η ένυδρη αιθανόλη για χρήση ως καύσιμο θέρμανσης, το μεθάνιο από το βιοαέριο για χρήση ως καύσιμο κίνησης και, η ζωοτροφή από το υπόλειμμα της απόσταξης.

11.1.5.9.1 Ζωοτροφή (Σ1Α)

Το υγρό κλάσμα της απόσταξης έχει σημαντικό ενεργειακό και πρωτεϊνικό περιεχόμενο. Για το λόγο αυτό εξετάζεται η χρήση του ως ζωοτροφή και η υποκατάσταση συμβατικής ζωοτροφής αντίστοιχης

διατροφικής αξίας. Στην περίπτωση αυτή 40% του υπολείμματος της απόσταξης εκτρέπεται από το ρεύμα που οδηγείται προς αναερόβια χώνευση προκειμένου να αξιοποιηθεί ως ζωοτροφή.

Για τον υπολογισμό της διατροφικής αξίας του ρεύματος αυτού, χρησιμοποιούνται οι Σκανδιναβικές Μονάδες Ζωοτροφής (Scandinavian Feed Units, SFU). Η προσέγγιση αυτή είναι εντελώς θεωρητική και μόνο για το σκοπό της παρούσας ΑΚΖ, καθώς δεν υπάρχουν οδηγίες για τη χρήση τροφικών βιοαποβλήτων στις ζωοτροφές. Σημειώνεται ότι δεν υπολογίζονται οι σχετικές εκπομπές από την εκτροφή ζώων καθώς θεωρούνται ίσες με αυτές από την αποφευχθείσα/υποκαθιστάμενη ζωική τροφή.

Πίνακας 47: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της ζωοτροφής

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Υποκατάσταση συμβατικής ζωοτροφής (αραβόσιτος)	-1.06/1.21	kg/kg ΞΥ

11.1.5.9.2 Μεθάνιο (Σ1Β)

Στην περίπτωση αυτή δεν παράγεται ηλεκτρισμός και θερμότητα από το βιοαέριο όπως στις υπόλοιπες περιπτώσεις, αλλά αποκλειστικά μεθάνιο. Η αναβάθμιση του βιοαερίου σε μεθάνιο γίνεται με χρήση τεχνολογίας απομάκρυνσης CO_2 (προσρόφηση εναλλαγής πίεσης), με βάση τους *Jungbluth et al.* (2007). Ο ηλεκτρισμός που απαιτείται ισούται με 0.5 kWh/Nm^3 βιοαερίου (ή 0.014kWh/MJ βιοαερίου). Στη συνέχεια το αναβαθμισμένο βιοαέριο (99% CH_4, 1% CO_2) υφίσταται συμπίεση στα 40 bar προκειμένου να διανεμηθεί στο δίκτυο βιοαερίου. Οι απώλειες μεθανίου κατά τη διανομή υπολογίζονται σε 2%. Ο ηλεκτρισμός που απαιτείται για τη συμπίεση ισούται με 0.13 kWh/Nm^3 βιοαερίου.

Το βιοαέριο αναβαθμίζεται σε μεθάνιο για να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο κίνησης. Οι αέριες εκπομπές από τον αγωγό εξαγωγής λόγω της καύσης μεθανίου στα οχήματα θεωρήθηκαν ίσες με αυτές από την καύση φυσικού αερίου στα οχήματα. Το παραγόμενο βιοκαύσιμο κίνησης θεωρείται ότι υποκαθιστά την παραγωγή και κατανάλωση οριακού συμβατικού καυσίμου κίνησης (βενζίνη), το οποίο αντικατοπτρίζεται στο αρνητικό πρόσημο των αντίστοιχων ποσοτήτων των εισροών, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί. Ο λόγος υποκατάστασης υπολογίζεται με βάση την παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα βιοκαυσίμου ($ΚΘΔ_{CH_4}$ 50 MJ/kg) σε σχέση με το πετρέλαιο ($ΚΘΔ_{βενζ}$ 42.9 MJ/kg).

Πίνακας 48: Εισροές στο στάδιο αναβάθμισης & συμπίεσης βιοαερίου

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Ηλεκτρισμός από δίκτυο διανομής για την αναβάθμιση του βιοαερίου	0.5	kWh/m^3 βιοαερίου
Ηλεκτρισμός από δίκτυο διανομής για τη συμπίεση του αναβαθμισμένου βιοαερίου	0.13	kWh/m^3 βιοαερίου
Καύση μεθανίου σε όχημα	$ΚΘΔ_{CH_4}$	MJ/kg CH_4
Υποκατάσταση καύσης βενζίνης σε όχημα (συμπ. παραγωγής) από μεθάνιο	$-ΚΘΔ_{CH_4}$/ $ΚΘΔ_{βενζ}$	MJ/kg CH_4

11.1.5.9.3 Καύσιμο θέρμανσης (Σ1Γ)

Στην περίπτωση αυτή παράγεται ένυδρη αιθανόλη αντί για άνυδρη αιθανόλη, καθώς η απόσταξη διεξάγεται μέχρι να επιτευχθεί συγκέντρωση 91% αιθανόλης (βλ. κεφάλαιο 0). Η παραγόμενη ένυδρη αιθανόλη χρησιμοποιείται ως καύσιμο θέρμανσης και θεωρείται ότι υποκαθιστά την παραγωγή και κατανάλωση συμβατικού καυσίμου θέρμανσης (ξύλο), το οποίο αντικατοπτρίζεται στο αρνητικό πρόσημο των αντίστοιχων ποσοτήτων των εισροών, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί. Ο λόγος υποκατάστασης υπολογίζεται με βάση την παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα βιοκαυσίμου ($ΚΘΔ_{EtOH,εν}$ 24.99 MJ/kg) σε σχέση με το ξύλο ($ΚΘΔ_{ξυλ}$ 16 MJ/kg).

Πίνακας 49: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης του καύσιμου θέρμανσης

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Καύση ένυδρης βιοαιθανόλης για θέρμανση	$ΚΘΔ_{EtOH,εν}$	MJ/kg EtOH
Υποκατάσταση καύσης ξύλου για θέρμανση από ένυδρη βιοαιθανόλη	- $ΚΘΔ_{EtOH,εν}$/ $ΚΘΔ_{ξυλ}$	MJ/kg EtOH

11.2 Απογραφή δεδομένων – Μέρος ΙΙ: Υφιστάμενες μέθοδοι διαχείρισης βιοαποβλήτων

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των υφιστάμενων μεθόδων διαχείρισης αστικών βιοαποβλήτων, ήτοι Ταφή, Κομποστοποίηση, Αναερόβια χώνευση και Καύση, καθώς και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό.

Ως χαρακτηριστικά του εισερχόμενου βιοαποβλήτου σε κάθε μία από αυτές τις τεχνολογίες χρησιμοποιήθηκαν μέσοι όροι από τις στοιχειακές αναλύσεις που έγιναν στα πλαίσια του έργου Waste2bio για πλήθος δειγμάτων αστικών βιοαποβλήτων που συλλέχθηκαν από τους δήμους Παπάγου-Χολαργού και Ασπρόπυργου.

Πίνακας 50: Βασικά χαρακτηριστικά και στοιχειακή ανάλυση εισερχόμενου αστικού βιοαποβλήτου (μέσος όρος)

Κατηγορία	Συγκέντρωση	Κατηγορία	Συγκέντρωση
Νερό (%)	78.5	S (%TS)	0.19
TS (%)	21.5	Al (%TS)	1.84E-01
VS (%TS)	90.1	As (%TS)	2.62E-05
Ash (%TS)	4.15	Cd (%TS)	1.70E-05
ΚΘΔ (MJ/kg TS)	18.46	Cr (%TS)	9.05E-04
C βιογ. (%TS)	49.87	Cu (%TS)	1.10E-03
C ορυκτ. (%TS)	0.25	Fe (%TS)	7.27E-02
O (%TS)	36.51	Hg (%TS)	2.00E-06
H (%TS)	6.19	Mg (%TS)	1.03E-01
Ca (%TS)	1.13	Mn (%TS)	4.34E-03
Cl (%TS)	0.59	Mo (%TS)	9.38E-05
F (%TS)	0.02	Ni (%TS)	1.25E-03

K (%TS)	0.83	Pb (%TS)	7.18E-04
N (%TS)	2.88	Si (%TS)	2.90E-01
Na (%TS)	0.62	Zn (%TS)	5.00E-03
P (%TS)	0.25		

Τα στάδια της παραγωγής και διαλογής στην πηγή των βιοαποβλήτων και της συλλογής και μεταφοράς τους προς τη μονάδα διαχείρισης παραμένουν ίδια με αυτά του βασικού συστήματος αναφοράς Σ1 (βλ. κεφάλαια 11.1.1 και 11.1.3) και για το λόγο αυτό δεν επαναλαμβάνονται εδώ.

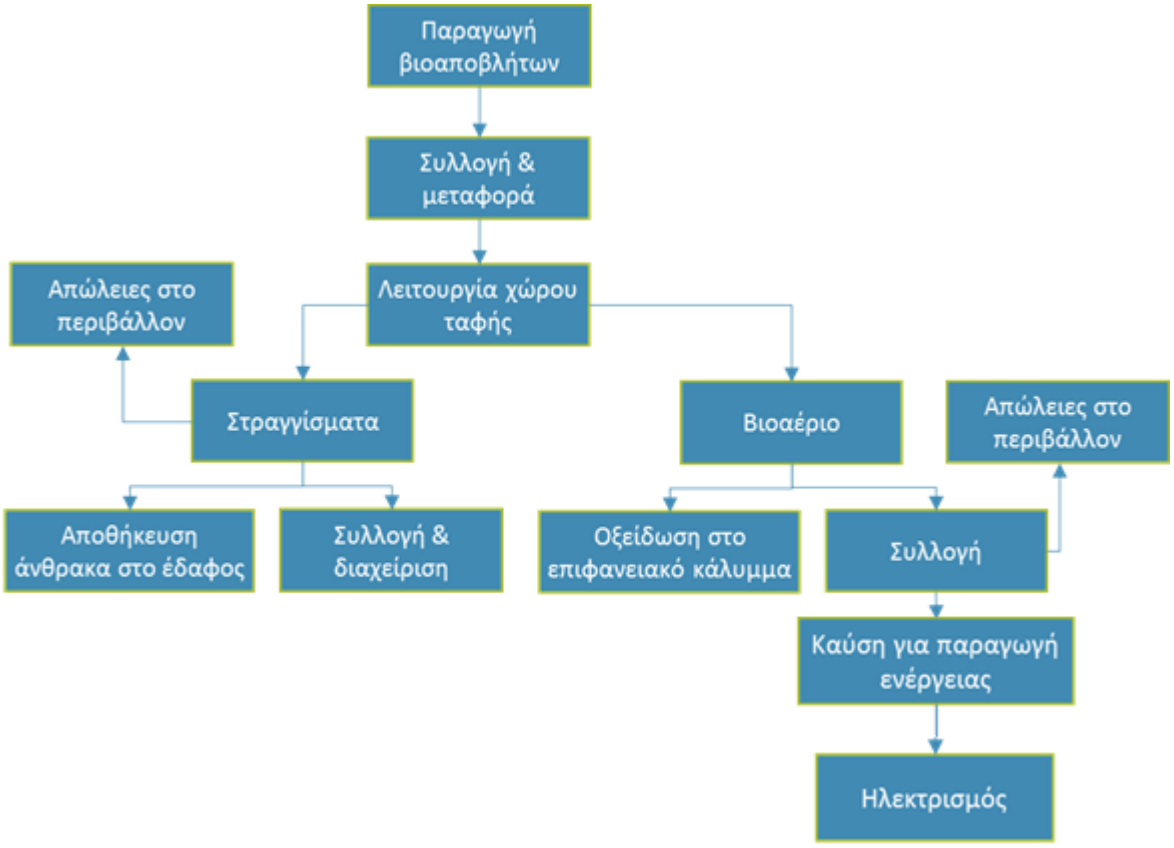
11.2.1 Ταφή

Η τεχνολογία της ταφής που μοντελοποιείται στο πλαίσιο αυτής της ΑΚΖ, είναι αυτή που υλοποιείται για την πλειοψηφία των αποβλήτων στην Περιφέρεια Αττικής (και για τους δήμους Ασπρόπυργου και Παπάγου-Χολαργού), ήτοι Υγειονομική Ταφή με ανάκτηση ενέργειας και διαχείριση των στραγγισμάτων.

11.2.1.1 Διεργασία ταφής

Γενικά η Υγειονομική Ταφή περιλαμβάνει τεχνικά μέτρα για τη συλλογή και διαχείριση των στραγγισμάτων και του βιοαερίου. Τα τεχνικά μέτρα αφορούν τη μεμβράνη πυθμένα, το σύστημα συλλογής στραγγισμάτων και τη διαχείρισή τους πριν τη διάθεσή τους σε επιφανειακά υδάτινα σώματα, υλικό επικάλυψης της επιφάνειας, σύστημα συλλογής βιοαερίου, καύση βιοαερίου και αξιοποίηση βιοαερίου για την ανάκτηση ενέργειας σε μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ). Η μοντελοποίηση της διεργασίας έγινε με βάση τους Manfredi & Christensen (2009) και τους Manfredi et al. (2009). Το διάγραμμα ροής της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 72.

Σχετικά με τη διεργασία αποδόμησης, θεωρείται ότι η ποσότητα του βιογενή άνθρακα στα απόβλητα μειώνεται σταδιακά σε ορίζοντα χρόνου 100 έτη, λόγω των εκπομπών αερίων και στραγγισμάτων. Το ποσοστό του βιογενή άνθρακα που μεταφέρεται στις αέριες εκπομπές εκφράζεται από το συντελεστή D_{LFG} και με το συντελεστή $D_{στραγ}$ αυτό που μεταφέρεται στα στραγγίσματα. Γενικά θεωρείται D_{LFG} ίσο με 50% και $D_{στραγ}$ ίσο με 2%, σύμφωνα με IPCC (2006).



Σχήμα 72: Διάγραμμα ροής για το σύστημα διαχείρισης βιοαποβλήτων με υγειονομική ταφή & καύση βιοαερίου για παραγωγή ενέργειας

Με βάση το περιεχόμενο του αποβλήτου σε βιογενή άνθρακα (C, kg/tn ww) και θεωρώντας ότι 55% του άνθρακα κ.β. μετατρέπεται σε CH_4 και 45% σε CO_2, η συνολική ποσότητα μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται σε 100 έτη αποδόμησης (GCH_4, m3 CH_4/tn ww; GCO_2, m3 CO_2/tn ww) εκτιμάται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$G_{CH4} = C \times D_{LFG} \times \frac{55}{100} \times \frac{16}{12} \times 1.40 \qquad \text{(Εξίσωση 11-17)}$$

$$G_{CO2} = \frac{45}{55} \times G_{CH4} \qquad \text{(Εξίσωση 11-18)}$$

Όπου 1.40 είναι ο όγκος (m3) που καταλαμβάνεται από 1kg μεθανίου σε ΚΣ.

Οι συνολικές εκπομπές μεθανίου υπολογίζονται από τις διαφυγούσες εκπομπές από την επιφάνεια ($CH_{4,\,διαφ}$, m3 CH_4/tn ww) και από τη μονάδα παραγωγής ενέργειας ($CH_{4,ΣΗΘ}$, m3 CH_4/tn ww). Επομένως οι εκπομπές μεθανίου εξαρτώνται από την απόδοση οξείδωσης (β) και από την ανάκτηση στη μονάδα ΣΗΘ (η):

$$CH_{4,διαφ} = G_{CH4} \times (1-\varepsilon) \times (1-\beta) \qquad \text{(Εξίσωση 11-19)}$$

Παρομοίως, οι συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα εντός των 100 ετών υπολογίζεται από τις διαφυγούσες εκπομπές από το κάλυμμα της επιφάνειας ($CO_{2,\,διαφ}$, m3 CO2/tn ww) και από τη μονάδα ΣΗΘ ($CO_{2,ΣΗΘ}$, m3 CO2/tn ww). Οι $CO_{2,\,διαφ}$ περιλαμβάνουν τόσο τις άμεσες εκπομπές CO_2 όσο και τις έμμεσες εκπομπές CO_2 από την οξείδωση του CH_4. Οι $CO_{2,ΣΗΘ}$ περιλαμβάνουν τις άμεσες εκπομπές από τη μονάδα ΣΗΘ και από τη μετατροπή του CH_4 στη ΣΗΘ.

$$CO_{2,διαφ} = G_{CO2} \times (1-\varepsilon) + G_{CH4} \times (1-\varepsilon) \times \beta \qquad \text{(Εξίσωση 11-20)}$$

$$CO_{2,ΣΗΘ} = G_{CO2} \times \varepsilon + G_{CH4} \times \varepsilon \times \eta \qquad \text{(Εξίσωση 11-21)}$$

Ο βιογενής άνθρακας που δεν μετατρέπεται σε αέριο ή εκπλένεται θεωρείται ότι κατακρατείται στο χώρο ταφής.

Το βιοαέριο που παράγεται υπολογίζεται σύμφωνα με το IPCC (2006) με χρήση κινητικής πρώτης τάξης και ρυθμό αποδόμησης k=0.06 (τιμή που αντιστοιχεί στις ακόλουθες παραμέτρους: απόβλητα τροφίμων, ξηρό κλίμα MAP/PET<1, εύκρατο κλίμα MAT≤20°C). Η μέση απόδοση συλλογής του βιοαερίου είναι 50-80%, ενώ από την ποσότητα που συλλέγεται 2% διαρρέει από τους σωλήνες. Η συλλογή θεωρείται ότι σταματάει μετά τα 55 έτη.

Τα απόβλητα καλύπτονται μόλις ολοκληρωθεί η εναπόθεση προκειμένου να οξειδωθεί μερικώς το μη συλλεγόμενο βιοαέριο. Οι αποδόσεις οξείδωσης για το μεθάνιο θεωρούνται ίσες με 10% για την καθημερινή επικάλυψη, 20% για την ενδιάμεση επικάλυψη και 36% για την τελική επικάλυψη.

Σχετικά με τη συλλογή στραγγισμάτων, θεωρήθηκε απόδοση που προσομοιάζει καλύτερα σε περιοχές με μέτρια βροχόπτωση, ήτοι 99.9% για τα 80 πρώτα έτη και 87% για τα επόμενα 20 έτη.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι εισροές για τη λειτουργία του χώρου υγειονομικής ταφής.

Πίνακας 51: Εισροές στο στάδιο της ταφής

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Κατανάλωση ηλεκτρισμού από δίκτυο διανομής	0.008	kWh/kg αποβλήτου
Κατανάλωση καυσίμου diesel για τη λειτουργία των φορτωτών	0.2	kg/kg αποβλήτου

11.2.1.2 Αξιοποίηση ηλεκτρισμού

Η απόδοση ανάκτησης ενέργειας από το συλλεγόμενο βιοαέριο στη μονάδα καύσης θεωρείται ίση με 30%, η οποία αναφέρεται στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Κατά την καύση, 98% του μεθανίου στο βιοαέριο μετατρέπεται σε αέριες εκπομπές CO_2.

Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός θεωρείται ότι καλύπτει τις ανάγκες τις μονάδας σε ηλεκτρισμό, ενώ το πλεόνασμα διατίθεται στο δίκτυο της ΔΕΗ υποκαθιστώντας το μίγμα ηλεκτρισμού που διατίθεται από το δίκτυο διανομής της ΔΕΗ. Η υποκατάσταση ηλεκτρισμού αντικατοπτρίζεται στο αρνητικό πρόσημο της αντίστοιχης ποσότητας εισροής, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 52: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της ενέργειας από την ταφή

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Υποκατάσταση ηλεκτρισμού από δίκτυο διανομής	$-(K\Theta\Delta_{CH_4}/3.6)*0.30$	kWh/ m^3 CH_4

11.2.2 Σύστημα κομποστοποίησης

Η τεχνολογία κομποστοποίησης προδιαλεγμένων αστικών βιοαποβλήτων που μοντελοποιείται στο παρόν κεφάλαιο αφορά τόσο τα ανοιχτά όσο και κλειστά σύστημα κομποστοποίησης, για λόγους

συγκρισιμότητας. Αναλυτικότερες πληροφορίες για τα στάδια της κομποστοποίησης και της αξιοποίησης των προϊόντων της διεργασίας παρουσιάζεται στις ακόλουθες υποενότητες.

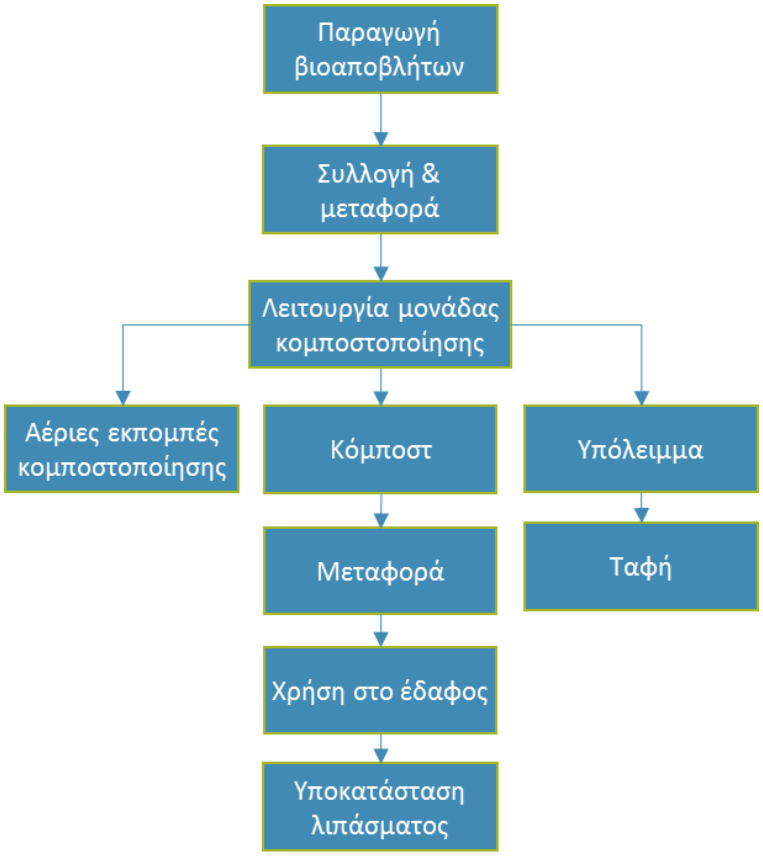
11.2.2.1 Διεργασία κομποστοποίησης

Στην περίπτωση του ανοιχτού συστήματος, η κομποστοποίηση γίνεται σε ανοιχτό χώρο και ειδικότερα σε σειράδια τα οποία αναδεύονται τακτικά προκειμένου να αερίζονται. Όλες οι εκπομπές διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα. Άλλες επεξεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι το κοσκίνισμα του κομπόστ μετά το τέλος της διεργασίας. Με την τεχνολογία αυτή παράγεται υψηλής ποιότητας κόμποστ κατάλληλο για εφαρμογή στο έδαφος ως λίπασμα. Στο κλειστό σύστημα, η κύρια διαφορά είναι ότι τα σειράδια βρίσκονται εντός κλειστής μονάδας, η οποία διαθέτει σύστημα αερισμού και συγκέντρωσης των απαερίων σε βιοφίλτρο.

Η ποσότητα του παραγόμενου κόμποστ αντιστοιχεί στο 95% της εισερχόμενης ποσότητας βιοαποβλήτων, ενώ το 5% είναι τα υπολείμματα της διεργασίας που οδηγούνται προς ταφή. Το κόμποστ προτού μεταφερθεί υφίσταται μείωση της υγρασίας του προκειμένου να φτάσει το 40%.

Τα δεδομένα για τη μοντελοποίηση της διεργασίας βασίζονται στους Boldrin et al. (2009; 2011), Ham & Komilis (2000; 2003) και Komilis & Ham (2004). Το διάγραμμα ροής της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 73.

Στη μονάδα καταναλώνεται καύσιμο (diesel) κυρίως από τους τεμαχιστές, τους φορτωτές και το μηχανισμό ανάδευσης. Οι τυπικές τιμές κατανάλωσης σε ανοιχτά συστήματα κυμαίνονται από 0.4-6.0 L diesel/tn, αλλά στις περισσότερες των περιπτώσεων χρησιμοποιείται μια μέση κατανάλωση 3 L diesel/tn. Η ποσότητα του ηλεκτρισμού που χρησιμοποιείται στις εγκαταστάσεις μπορεί να διαφέρει σημαντικά μεταξύ των μονάδων, με τις τιμές που αναφέρονται για τις ανοιχτές τεχνολογίες στους Boldrin et al. (2009) να κυμαίνονται από 0.023-19.7 kWh/tn. Όσον αφορά τις εισροές ενέργειας στην κλειστή κομποστοποίηση, λαμβάνεται υπόψη η παροχή και καύση 1L diesel/tn ww και παροχή ηλεκτρισμού 37kWh/tn ww.



Σχήμα 73: Διάγραμμα ροής για το σύστημα διαχείρισης βιοαποβλήτων με κομποστοποίηση

Πίνακας 53: Εισροές στο στάδιο της ανοιχτής κομποστοποίησης

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Ηλεκτρισμός από δίκτυο διανομής για τη λειτουργία της μονάδας	9.9/1000	kWh/kg εισερχόμενου αποβλήτου
Καύση diesel για τη μεταφορά, τεμαχισμό και ανάδευση των αποβλήτων	0.003	L/kg εισερχόμενου αποβλήτου

Πίνακας 54: Εισροές στο στάδιο της κλειστής κομποστοποίησης

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Ηλεκτρισμός από δίκτυο διανομής για τη λειτουργία της μονάδας	37/1000	kWh/kg εισερχόμενου αποβλήτου
Καύση diesel για τη μεταφορά, τεμαχισμό και ανάδευση των αποβλήτων	1/1000	L/kg εισερχόμενου αποβλήτου

11.2.2.2 Αέριες εκπομπές

Οι εκπομπές CO_2 και CH_4 υπολογίζονται σε σχέση με την ποσότητα του άνθρακα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Η εκπεμπόμενη ποσότητα CO_2 υπολογίζεται από την ποσότητα του αποδομούμενου

άνθρακα ($C_{αερ}$) μείον το κλάσμα του άνθρακα που εκπέμπεται ως CH_4. Στην παρούσα ερευνητική ενότητα θεωρείται ότι 98% του αποδομούμενου άνθρακα εκπέμπεται ως CO_2 και 2% ως CH_4.

Όσον αφορά το ποσοστό του εισερχόμενου C που διασπάται, επιλέχθηκε η τιμή 60% για την κλειστή κομποστοποίηση και η τιμή 75% για την ανοιχτή κομποστποίηση. Για τα ποσοστά εκπομπών CH_4 και N_2O επιλέχθηκαν οι μέσοι όροι του εύρους που δίνεται για τα βιοαπόβλητα, ήτοι 2.7% του διασπώμενου C και 1.8% του εισερχόμενου N για την κλειστή κομποστοποίηση και 1.6% και 0.7% για την ανοιχτή κομποστοποίηση, αντίστοιχα.

Όσον αφορά το συντελεστή απόδοσης του βιόφιλτρου για την περίπτωση της κλειστής κομποστοποίησης θεωρήθηκε ίσος με 95% για το CH_4 και 90% για το N_2O, ενώ για την ανοιχτή κομποστοποίηση, δεν λαμβάνεται υπόψη η χρήση βιόφιλτρου.

Η μοντελοποίηση των αέριων εκπομπών ΑΦΘ από την κομποστοποίηση γίνεται με βάση τις εξισώσεις που δίνονται στην Ενότητα 9.2.

11.2.2.3 Εφαρμογή του κόμποστ

Τα θρεπτικά στο κόμποστ είναι μερικώς δεσμευμένα στην οργανική ύλη και επομένως είναι μερικώς μόνο διαθέσιμα στα φυτά. Αυτό μειώνει τον κίνδυνο της άμεσης απώλειας, αλλά καθώς τα οργανικά αποδομούνται, τα θρεπτικά απελευθερώνονται στο περιβάλλον και αν δεν προσροφηθούν από τα φυτά χάνονται. Αντίθετα, τα εμπορικά λιπάσματα αποτελούνται από ανόργανα θρεπτικά τα οποία είναι άμεσα διαθέσιμα στα φυτά, αλλά μπορούν να απελευθερωθούν στο περιβάλλον πιο γρήγορα.

Το σύνολο των βαρέων μετάλλων στο κόμποστ θεωρείται ότι παραμένει στο έδαφος και αφαιρείται από το περιεχόμενο σε βαρέα μέταλλα των υποκαθιστάμενων λιπασμάτων.

Η κατανομή του άνθρακα, του άζωτου και του φώσφορου από το κόμποστ στα φυτά και το περιβάλλον παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί. Για την κατάληξη του άνθρακα και του αζώτου από το κόμποστ χρησιμοποιούνται αποτελέσματα μοντελοποίησης αγρονομικού μοντέλου (Bruun et al., 2006; Hansen et al., 2012).

Πίνακας 55: Κατανομή του άνθρακα, του άζωτου και του φώσφορου από το κόμποστ στα φυτά και το περιβάλλον

	Άνθρακας %	**Άζωτο %**	**Φώσφορος %**
Αέρας	CO_2: 87 CH_4: 0.0	N_2: 30.29 N_2O: 1.5 NH_3: 0.21	
Αποθήκευση στο έδαφος	C: 13	N: 31	P: 100
Απόπλυση στα υπόγεια νερά		NO_3: 31	PO_3: 0
Απορροή στη επιφανειακά ύδατα		NO_3: 0	PO_3: 0
Απορρόφηση από τα φυτά		N: 6	P: 0

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εισροές για το στάδιο αυτό.

Πίνακας 56: Εισροές στο στάδιο της εφαρμογής του κόμποστ

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Κατανάλωση diesel σε τρακτέρ για τη εφαρμογή του κόμποστ στο έδαφος	0.00057	L/kg κόμποστ

11.2.2.4 Υποκατάσταση λιπάσματος

Ο υπολογισμός της ποσότητας των ανόργανων λιπασμάτων που υποκαθιστούνται από τη χρήση του κόμποστ ως οργανικού λιπάσματος βασίζεται στην Ευρωπαϊκή νομοθεσία για την εφαρμογή οργανικού λιπάσματος (ΕΚ, 1991), η οποία θέτει ανώτατα όρια για την ποσότητα του N που μπορεί να χρησιμοποιηθεί (20%). Από την άλλη οι ποσότητες P και K δεν έχουν περιορισμό, ωστόσο οι ποσότητες που αποφεύγονται λόγω υποκατάστασης δεν περιλαμβάνουν τα τυχόν πλεονάσματα P και K (Hamelin et al., 2011).

Το παραγόμενο κόμποστ θεωρείται ότι υποκαθιστά ανόργανα λιπάσματα (ουρία –N λιπάσματα, φωσφορικό διαμμώνιο – P λιπάσματα, χλωριούχο κάλιο – K λιπάσματα), το οποίο αντικατοπτρίζεται στο αρνητικό πρόσημο των αντίστοιχων ποσοτήτων των εισροών, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 57: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης του κόμποστ

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Υποκατάσταση μέσου ανόργανου N λιπάσματος	-0.2	Kg/kg N στο κομποστ
Υποκατάσταση μέσου ανόργανου K λιπάσματος	-1	Kg/kg K στο κομποστ
Υποκατάσταση μέσου ανόργανου P λιπάσματος	-1	Kg/kg P στο κομποστ

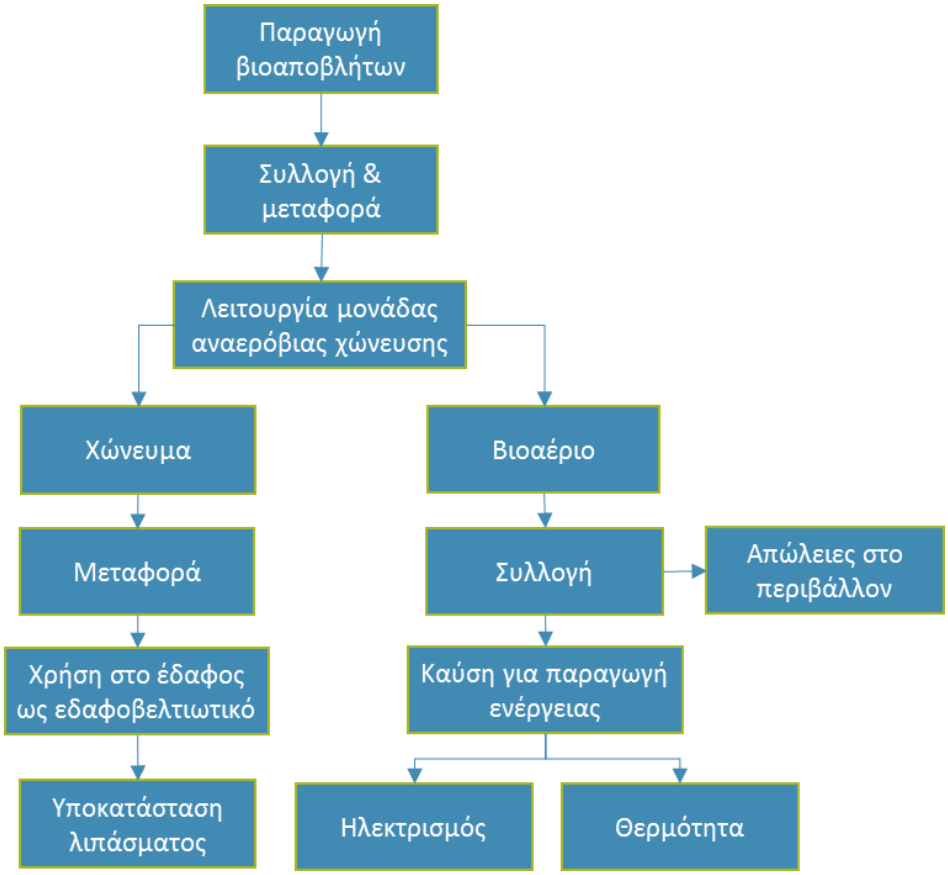
11.2.3 Σύστημα αναερόβιας χώνευσης

Η τεχνολογία αναερόβιας χώνευσης προδιαλεγμένων αστικών βιοαποβλήτων που μοντελοποιείται στο παρόν κεφάλαιο αναφέρεται σε μονάδα υγρής θερμοφιλικής αναερόβιας χώνευσης (ΑΧ) ενός σταδίου. Αναλυτικότερες πληροφορίες για τα στάδια της διεργασίας και της αξιοποίησης των προϊόντων της παρουσιάζονται στις ακόλουθες υποενότητες.

11.2.3.1 Διεργασία αναερόβιας χώνευσης

Στη διεργασία ενός σταδίου, η αρχική υδρόλυση και οξύνιση λαμβάνουν χώρα στον ίδιο βιοαντιδραστήρα με την παραγωγή μεθανίου. Η διεργασία απαιτεί υγρασία 90% και γι' αυτό προστίθεται στο απόβλητο νερό. Η θερμοκρασία στη θερμοφιλική χώνευση είναι γενικά περίπου 53-55°C. Από την ΑΧ παράγεται βιοαέριο και χώνευμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λίπασμα. Η μοντελοποίηση της διεργασίας έγινε με βάση τους Boldrin et al. (2011). Το διάγραμμα ροής της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 74.

Η μοντελοποίηση λαμβάνει υπόψη επίσης την ενέργεια που χρησιμοποιείται για να θερμανθεί ο αντιδραστήρας στη θερμοφιλική θερμοκρασία, το καύσιμο (diesel) για τη λειτουργία της μονάδας και τον ηλεκτρισμό που καταναλώνεται για τη λειτουργία των αντλιών, των αναδευτήρων κτλ. Τα δεδομένα προέρχονται από μονάδες ΑΧ στην Ευρώπη και θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν μια υποθετική μέση μονάδα ΑΧ της Ευρώπης (Møller et al., 2010).



Σχήμα 74: Διάγραμμα ροής για το σύστημα διαχείρισης βιοαποβλήτων με αναερόβια χώνευση

Η παραγωγή μεθανίου εξαρτάται από το δυναμικό μεθανίου και την απόδοση (ανακτώμενο κλάσμα) του δυναμικού CH_4 του αποβλήτου και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$CH_{4,\pi\alpha\rho} = M \times TS \times VS \times CH_{4,\delta\upsilon\upsilon} \times CH_{4,\alpha\pi o\delta} \qquad \mathrm{m^3\ CH_4} \qquad \text{(Εξίσωση 11-22)}$$

Όπου:

$CH_{4,\pi\alpha\rho}$: ποσότητα παραγόμενου μεθανίου (m3 CH_4)

M: η μάζα του εισερχόμενου αποβλήτου (kg)

TS: κλάσμα ξηρής ύλης (0-1)

VS: ο ρυθμός αποδόμησης (0-1)

$CH_{4,\delta\upsilon\upsilon}$: δυναμικό μεθανίου (0-1)

$CH_{4,\alpha\pi o\delta}$: απόδοση μεθανίου (0-1)

Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρήθηκε δυναμικό μεθανίου ίσο με 0.45 m3/kg VS για το εξεταζόμενο βιοαπόβλητο και απόδοση ανάκτησης CH_4 ίση με 70%. Ένα μέρος του παραγόμενου CH_4 εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα λόγω των διαφευγουσών απωλειών από τους σωλήνες, τις βαλβίδες, κτλ., το οποίο σε αυτή την περίπτωση θεωρείται 10%. Η εκπεμπόμενη ποσότητα CH_4 στον αέρα υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$CH_{4,\alpha\varepsilon\rho} = CH_{4,\pi\alpha\rho\alpha\gamma} \times CH_{4,\delta\iota\alpha\varphi} \times \frac{MB_CH_4}{O\gamma\kappa_\iota\delta_\alpha\varepsilon\rho} \qquad \mathrm{kg\ CH_4} \qquad \text{(Εξίσωση 11-23)}$$

Όπου:

$CH_{4,\alpha\varepsilon\rho}$: ποσότητα αέριων εκπομπών CH_4 (kg CH_4)

$CH_{4,\pi\alpha\rho\alpha\gamma}$: ποσότητα CH_4 που παράγεται (m^3)

$CH_{4,\delta\iota\alpha\varphi}$: κλάσμα παραγόμενου CH_4 που δεν ανακτάται (0-1)

MB_CH4: το μοριακό βάρος του CH_4 (g/mole)

Ογκ_ιδ_αερ: όγκος 1 mole ιδανικού αερίου σε ΚΣ (m^3/mole)

Ο αποδομούμενος άνθρακας κατά την ΑΧ εξέρχεται από τη διεργασία ως βιοαέριο, είτε ως CO_2 είτε ως CH_4. Η ποσότητα αυτή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παραγωγή μεθανίου και τη συγκέντρωση CH_4 στο βιοαέριο, με εφαρμογή της ακόλουθης εξίσωσης:

$$C_{\alpha\varepsilon\rho} = \frac{CH_{4,\pi\alpha\rho\alpha\gamma}}{\frac{CH_{4,\%\beta\iota o\alpha\acute{\varepsilon}\rho\iota o}}{100} \times O\gamma\kappa_\iota\delta_\alpha\varepsilon\rho} \times MB_C \qquad \text{kg C}$$

(Εξίσωση 11-24)

Όπου:

$C_{\alpha\varepsilon\rho}$: ποσότητα αέριων εκπομπών C (kg C)

$CH_{4,\pi\alpha\rho\alpha\gamma}$: ποσότητα CH_4 που παράγεται (m3)

$CH_{4,\%\beta\iota o\alpha\acute{\varepsilon}\rho\iota o}$: κλάσμα CH_4 στο βιοαέριο (0-1)

Ογκ_ιδ_αερ: όγκος 1 mole ιδανικού αερίου σε ΚΣ (m3/mole)

MB_C: μοριακό βάρος του C (g/mole)

Το διοξείδιο του άνθρακα παράγεται κατά τη διεργασία ΑΧ (στο βιοαέριο) και από την καύση του βιοαερίου. Επομένως υπολογίζεται από τον αποδομούμενο άνθρακα μείον τον άνθρακα που περιέχεται στις διαφευγούσες εκπομπές CH_4 από τον αντιδραστήρα. Η εκπεμπόμενη ποσότητα CO_2 στην ατμόσφαιρα υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$CO_{2,\alpha\varepsilon\rho} = \left(\frac{C_{\alpha\varepsilon\rho}}{MB_C} - \frac{CH_{4,\alpha\varepsilon\rho}}{MB_CH4}\right) \times MB_CO2 \qquad \text{kg CO2}$$

(Εξίσωση 11-25)

Όπου:

$CO_{2,\alpha\varepsilon\rho}$: ποσότητα αέριων εκπομπών CO_2 (kg CO_2)

$C_{\alpha\varepsilon\rho}$: ποσότητα αέριων εκπομπών C (kg C)

$CH_{4,\alpha\varepsilon\rho}$: ποσότητα αέριων εκπομπών CH_4 (kg CH_4)

MB_C, CO_2,CH_4: μοριακό βάρος των C, CO_2,CH_4 (g/mole)

Η κατανάλωση θερμότητας υπολογίστηκε με βάση την απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την αύξηση της θερμοκρασίας του υποστρώματος από τους 18°C (μέση ετήσια θερμοκρασία στην Ελλάδα) στους 37

°C που είναι η απαιτούμενη μεσοφιλική θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού ($4.2 \cdot 10^{-3}$ MJ kg^{-1} K^{-1}) και των στερεών ($3 \cdot 10^{-3}$ MJ kg^{-1} K^{-1}). Ο ηλεκτρισμός που απαιτείται για τη λειτουργία των αντλιών, του αναδευτήρα και του εξαεριστήρα υπολογίζεται σε 18.3 kWh/tn και για τη θέρμανση του αντιδραστήρα σε 30.6 kWh/tn.

Πίνακας 58: Εισροές στο στάδιο της αναερόβιας χώνευσης

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Ηλεκτρισμός από φυσικό αέριο για τη λειτουργία των αντλιών, αναδευτήρα, εξαεριστήρα και τη θέρμανση του αντιδραστήρα	0.049	kWh/kg
Κατανάλωση καυσίμου diesel για τη λειτουργία του φορτωτή	0.0009	L/kg

11.2.3.2 Αξιοποίηση βιοαερίου

Το βιοαέριο που παράγεται αξιοποιείται για την παραγωγή ενέργειας. Η ενέργεια που ανακτάται από το βιοαέριο εξαρτάται από την ποσότητα και το ενεργειακό περιεχόμενο του ανακτώμενου CH_4 από την ΑΧ και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Ενέργεια_{ανακτ} = CH_{4,παραγ} \times (1 - CH_{4,διαφ}) \times Ενέργεια_{CH_4} \quad \text{MJ} \qquad \text{(Εξίσωση 11-26)}$$

Όπου:

$Ενέργεια_{ανακτ}$: ανακτώμενη ενέργεια από το βιοαέριο (MJ)

$CH_{4,παραγ}$: ποσότητα CH_4 που παράγεται (m^3)

$CH_{4,διαφ}$: κλάσμα παραγόμενου CH_4 που δεν ανακτάται (0-1)

$Ενέργεια_{CH_4}$: ενεργειακό περιεχόμενο του μεθανίου (MJ/m^3, ΚΣ)

Το βιοαέριο που παράγεται από την αναερόβια χώνευση θεωρείται ότι καίγεται σε μονάδα ΣΗΘ με καθαρή απόδοση ηλεκτρισμού και θερμότητας ίση με 30% και 55% αντίστοιχα, σε σχέση με την ΚΘΔ του βιοαερίου. Θεωρείται ότι κατά την καύση, 98% του μεθανίου στο βιοαέριο μετατρέπεται σε αέριες εκπομπές CO_2 ενώ 100% του CO_2 στο βιοαέριο μετατρέπεται σε αέριες εκπομπές CO_2.

Η παραγόμενη θερμότητα θεωρείται ότι καταναλώνεται εντός της κεντρικής μονάδας για την κάλυψη των αναγκών σε θερμότητα και υποκαθιστά την κατανάλωση φυσικού αερίου, ενώ το τυχόν πλεόνασμα δεν μπορεί να πωληθεί καθώς δεν υπάρχει δίκτυο τηλεθέρμανσης στην περιοχή της Αττικής. Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός θεωρείται ότι καλύπτει τις ανάγκες τις μονάδας σε ηλεκτρισμό, ενώ το πλεόνασμα διατίθεται στο δίκτυο της ΔΕΗ υποκαθιστώντας το μίγμα ηλεκτρισμού που διατίθεται από το δίκτυο διανομής της ΔΕΗ.

Η υποκατάσταση ηλεκτρισμού και θερμότητας αντικατοπτρίζεται στο αρνητικό πρόσημο των αντίστοιχων ποσοτήτων των εισροών, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 59: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από την αναερόβια χώνευση

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης

Υποκατάσταση ηλεκτρισμού από δίκτυο διανομής	-(ΚΘΔ$_{CH4}$/3.6)*0.30	kWh/ m^3 CH_4
Υποκατάσταση θερμότητας από φυσικό αέριο	-(ΚΘΔ$_{CH4}$/3.6)*0.55	kWh/ m^3 CH_4

11.2.3.3 Εφαρμογή χωνεύματος

Η ποσότητα και η σύσταση του υγρού κλάσματος του χωνεύματος από την αναερόβια χώνευση υπολογίστηκε με βάση το ισοζύγιο μάζας, ως η διαφορά από τα αρχικά θρεπτικά και την ξηρά ύλη που εισήλθαν στην αναερόβια χώνευση και την ποσότητα που μεταφέρθηκε στο βιοαέριο και το ανακτημένο στερεό κλάσμα.

Η κατανομή του άνθρακα, του άζωτου και του φώσφορου από το χώνευμα στα φυτά και το περιβάλλον παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί. Για την κατάληξη του άνθρακα και του αζώτου από το χώνευμα χρησιμοποιούνται αποτελέσματα μοντελοποίησης αγρονομικού μοντέλου (Bruun et al., 2006; Hansen et al., 2012).

Πίνακας 60: Κατανομή του άνθρακα, του άζωτου και του φώσφορου από το χώνευμα στα φυτά και το περιβάλλον

	Άνθρακας %	**Άζωτο %**	**Φώσφορος %**
Αέρας	CO_2: 90 CH_4: 0	N_2: 46.52 N_2O: 1.5 NH_3: 0.98	
Αποθήκευση στο έδαφος	C: 10	N: 22.5	P: 100
Απόπλυση στα υπόγεια νερά		NO_3: 22.5	
Απορροή στα επιφανειακά ύδατα		NO_3: 0	
Προσρόφηση από τα φυτά		N: 6	

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εισροές για το στάδιο αυτό.

Πίνακας 61: Εισροές στο στάδιο της εφαρμογής του χωνεύματος

Εισροή	**Ποσότητα**	**Μονάδα μέτρησης**
Κατανάλωση diesel σε τρακτέρ για τη εφαρμογή του χωνεύματος στο έδαφος	0.00057	L/kg χωνεύματος

11.2.3.4 Υποκατάσταση λιπάσματος

Ο υπολογισμός της ποσότητας των ανόργανων λιπασμάτων που υποκαθιστούνται από τη χρήση του χωνεύματος ως οργανικού λιπάσματος βασίζεται στην Ευρωπαϊκή νομοθεσία για την εφαρμογή

οργανικού λιπάσματος (ΕΚ, 1991), η οποία θέτει ανώτατα όρια για την ποσότητα του N που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Από την άλλη οι ποσότητες P και K δεν έχουν περιορισμό, ωστόσο οι ποσότητες που αποφεύγονται λόγω υποκατάστασης δεν περιλαμβάνουν τα τυχόν πλεονάσματα P και K (Hamelin et al., 2011).

Το σύνολο των βαρέων μετάλλων στο χώνευμα θεωρείται ότι παραμένει στο έδαφος και αφαιρείται από το περιεχόμενο σε βαρέα μέταλλα των υποκαθιστάμενων λιπασμάτων.

Το παραγόμενο χώνευμα θεωρείται ότι υποκαθιστά ανόργανα λιπάσματα (ουρία –N λιπάσματα, φωσφορικό διαμμώνιο – P λιπάσματα, χλωριούχο κάλιο – K λιπάσματα), το οποίο αντικατοπτρίζεται στο αρνητικό πρόσημο των αντίστοιχων ποσοτήτων των εισροών, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 62: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης του χωνεύματος

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Κατανάλωση diesel σε τρακτέρ για τη εφαρμογή του χωνεύματος στο έδαφος	0.00057	L/kg χωνεύματος
Υποκατάσταση μέσου ανόργανου N λιπάσματος	-0.4	Kg/kg N στο χώνευμα
Υποκατάσταση μέσου ανόργανου K λιπάσματος	-1	Kg/kg K στο χώνευμα
Υποκατάσταση μέσου ανόργανου P λιπάσματος	-1	Kg/kg P στο χώνευμα

11.2.4 Σύστημα καύσης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικές πληροφορίες για τα στάδια της καύσης και της αξιοποίησης των προϊόντων της διεργασίας.

11.2.4.1 Διεργασία καύσης

Η μοντελοποίηση της καύσης λαμβάνει υπόψη τις αέριες εκπομπές που σχετίζονται με την εφαρμοζόμενη τεχνολογία και με τις εκπομπές από τα απόβλητα. Οι πρώτες είναι σταθερές τιμές ανά τόνο αποβλήτου που επεξεργάζεται και από τη λειτουργία της μονάδας, π.χ. NOx, HCl, διοξίνες ενώ οι δεύτερες είναι εκπομπές που σχετίζονται με το συντελεστής μεταφοράς του κάθε στοιχείου που περιέχεται στο απόβλητο (π.χ. άνθρακας, βαρέα μέταλλα) στον αέρα. Τα ενεργειακά προϊόντα, ήτοι ο ηλεκτρισμός και η θερμότητα, προσδιορίζονται ως ποσοστά της ΚΘΔ του αποβλήτου, η οποία υπολογίζεται από τη σύνθεση του αποβλήτου και τα χαρακτηριστικά του (Riber et al., 2008; Riber et al., 2009). Η μοντελοποίηση της διεργασίας έγινε με βάση τους Riber et al. (2008) και τους Astrup et al. (2009). Το διάγραμμα ροής της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 75.

Ο υπολογισμός της μάζας στην έξοδο M_E θεωρείται ως το γινόμενο της ποσότητας του αποβλήτου που εισέρχεται στη μονάδα με το περιεχόμενο σε ξηρή ύλη (Σ, %) επί την ποσότητα της ξηρής ύλης (ΞΥ) επί το συντελεστή μεταφοράς (ΣΜ) του κάθε στοιχείου του αποβλήτου στις ροές εξόδου. Η ποσότητα της τέφρας που παράγεται από την καύση υπολογίζεται επίσης με την ίδια εξίσωση, η οποία παρατίθεται ακολούθως.

$$M_E = M \times \Sigma \times \Xi Y \times \Sigma M \qquad \text{(Εξίσωση 11-27)}$$

Τα απαέρια της καύσης καθαρίζονται προτού ελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα. Τα υπολείμματα από τον έλεγχο της αέριας ρύπανσης (Air Pollution Control) σταθεροποιούνται και χρησιμοποιούνται ως υλικό επίχωσης σε αλατωρυχεία, αντικαθιστώντας το χαλίκι. Η τέφρα πυθμένα θεωρείται ότι στέλνεται σε χώρο ταφής ανόργανων υλικών.

Σχήμα 75: Διάγραμμα ροής για το σύστημα διαχείρισης βιοαποβλήτων με καύση και παραγωγή ενέργειας

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εισροές για το στάδιο αυτό.

Πίνακας 63: Εισροές στο στάδιο της καύσης

Εισροή	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Υδροξείδιο του νατρίου (NaOH)	2.4E-05	kg/kg αποβλήτου
Ενεργός άνθρακας	0.00104	kg/kg αποβλήτου
Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας, κόκκοι (PE-HD)	6E-07	kg/kg αποβλήτου
Ενυδατωμένο υδροξείδιο του ασβεστίου, CaOH2	0.00034	kg/kg αποβλήτου
Υδροχλωρικό οξύ (HCl), αέριο	5.6E-06	kg/kg αποβλήτου
Νερό	0.397	kg/kg αποβλήτου
Ανθρακικό ασβέστιο, CaCO3	0.00567	kg/kg αποβλήτου
TMT 15	0.000395	kg/kg αποβλήτου
Αμμωνία (NH3)	0.00153	kg/kg αποβλήτου

11.2.4.2 Αξιοποίηση ενέργειας

Ο ηλεκτρισμός και η θερμότητα που ανακτάται (E_{Π}) υπολογίζεται από την ΚΘΔ του εισερχόμενου αποβλήτου και τον συντελεστή ανάκτησης ενέργειας (nE), που ορίζεται ως ποσοστό της ΚΘΔ (Εξίσωση 11-28). Η Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη υπολογίζεται από το γινόμενο της ποσότητας του αποβλήτου

(M) με την ΚΘΔ της ξηρής ύλης και την ποσότητα της ξηρής ύλης (TS). Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του περιεχόμενου νερού (2.435 MJ/kg στους 25 °C) στο απόβλητο αφαιρείται προκειμένου να υπολογιστεί η ΚΘΔ του νωπού απόβλητου.

$$E_{\Pi} = M \times (K\Theta\Delta \times TS - 2.435 \times H_2O) \times n_E \quad \text{(Εξίσωση 11-28)}$$

Η καθαρή απόδοση της ανάκτησης ενέργειας για τον ηλεκτρισμό θεωρείται ίση με 30% της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του αποβλήτου.

Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός θεωρείται ότι καλύπτει τις ανάγκες τις μονάδας σε ηλεκτρισμό, ενώ το πλεόνασμα διατίθεται στο δίκτυο της ΔΕΗ υποκαθιστώντας το μίγμα ηλεκτρισμού που διατίθεται από το δίκτυο διανομής της ΔΕΗ.

Η υποκατάσταση ηλεκτρισμού αντικατοπτρίζεται στο αρνητικό πρόσημο των αντίστοιχων ποσοτήτων των εισροών, όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 64: Εισροές στο στάδιο της αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από την καύση

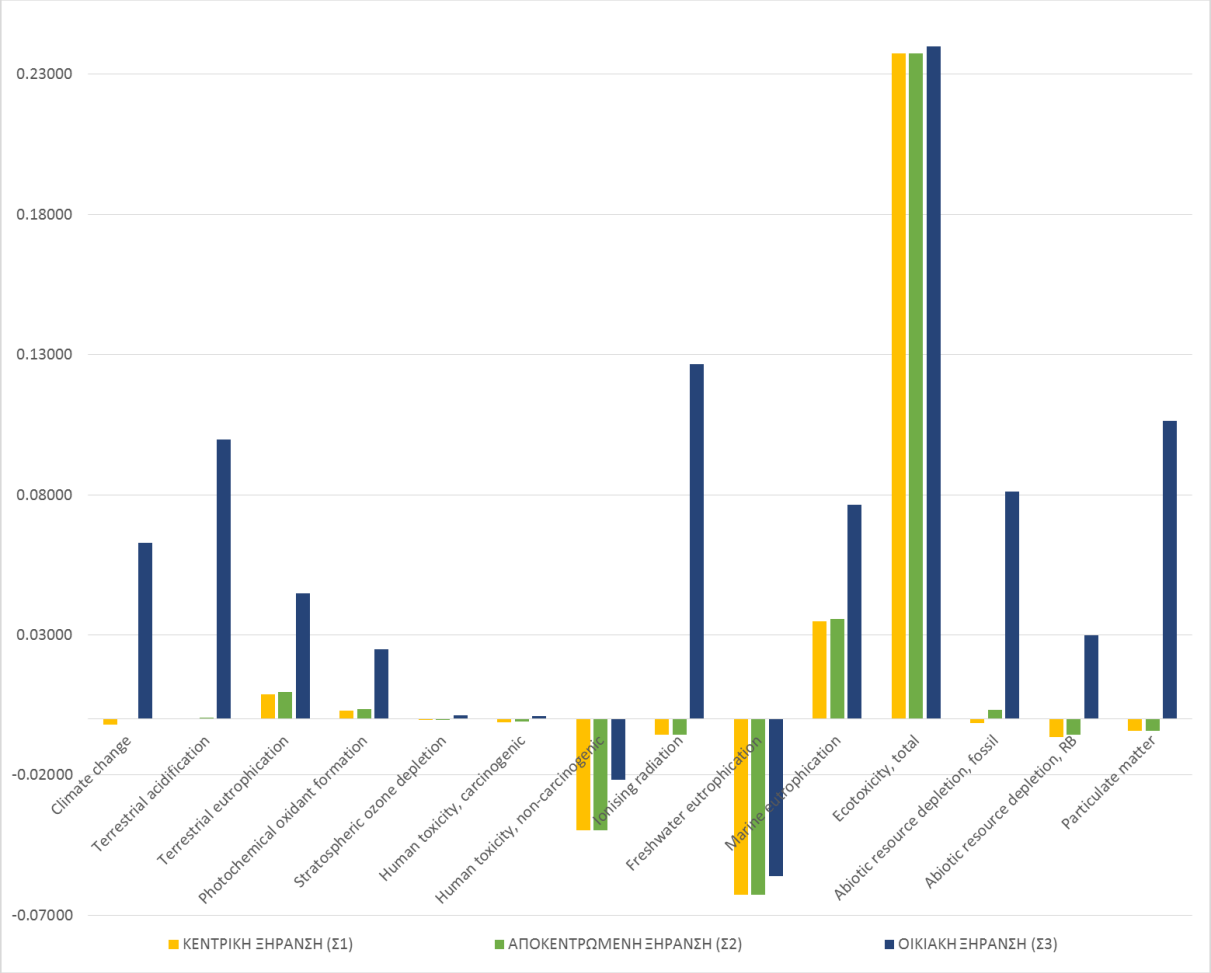
Εισροή	**Ποσότητα**	**Μονάδα μέτρησης**
Υποκατάσταση ηλεκτρισμού από δίκτυο διανομής	-(ΚΘΔ/3.6)*0.30	kWh/kg ξηρού αποβλήτου

11.3 Αποτελέσματα ΑΚΖ: Ερμηνεία & σχολιασμός

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ΑΚΖ για το σύστημα παραγωγής αιθανόλης από βιοαπόβλητα, για τα τρία επίπεδα ξήρανσης καθώς και για όλες τις παραλλαγές του συστήματος που εξετάστηκαν αλλά και για τις υφιστάμενες μεθόδους διαχείρισης των αστικών βιοαποβλήτων που δεν περιλαμβάνουν την παραγωγή αιθανόλης. Προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα για όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, έγινε κανονικοποίηση στη μονάδα «Ισοδύναμα Ατόμου» (ΙΑ).

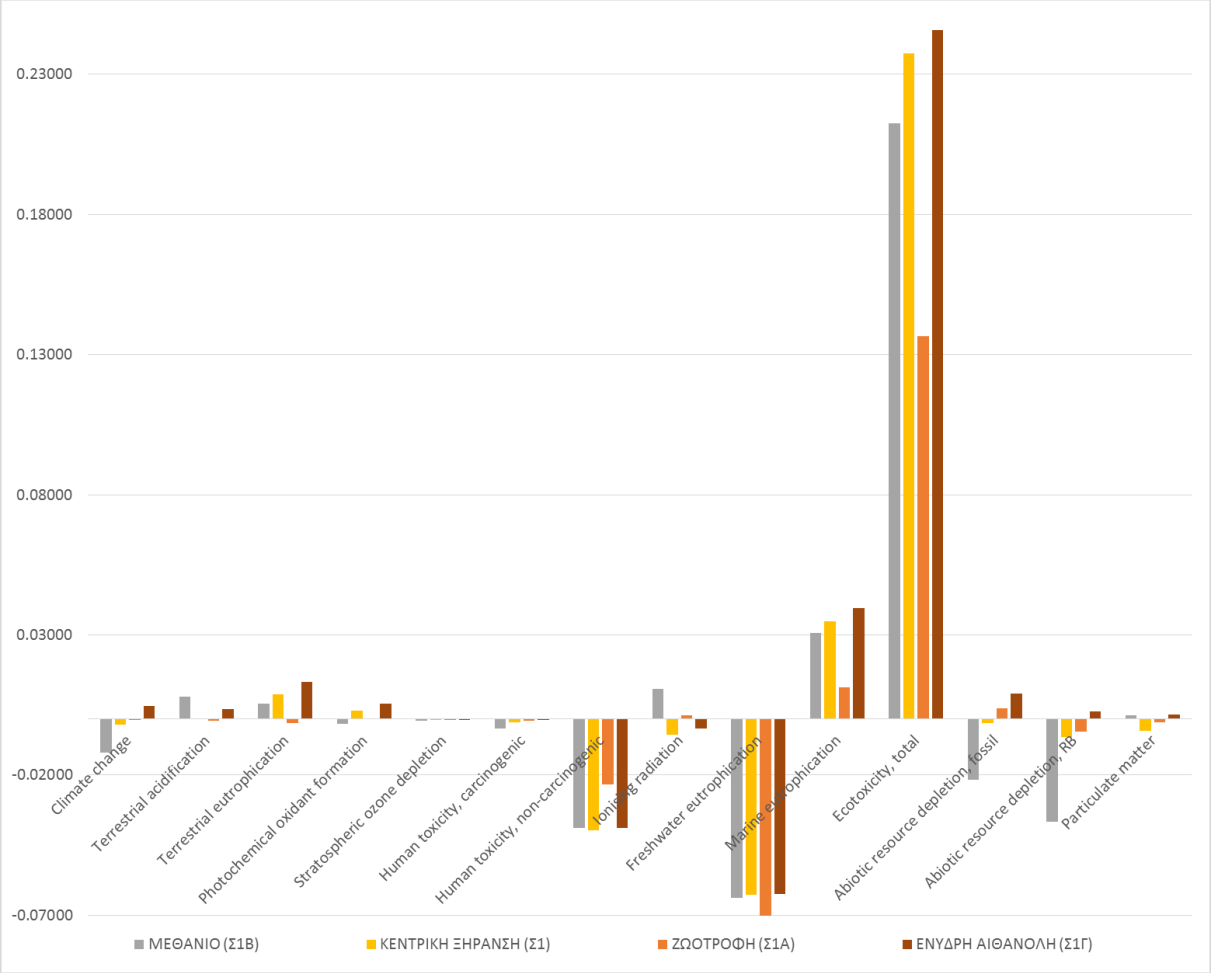
Τα αποτελέσματα της ΑΚΖ δείχνουν ότι το σύστημα παραγωγής αιθανόλης με κεντρική ξήρανση (σύστημα αναφοράς Σ1) παρουσιάζει πολύ καλή περιβαλλοντική απόδοση. Ειδικότερα, οι καθαρές εκπομπές στο περιβάλλον, δηλαδή οι εκπομπές με θετικό πρόσημο μείον τις αποφευχθείσες εκπομπές από την υποκατάσταση της παραγωγής και χρήσης προϊόντων (με αρνητικό πρόσημο) είναι σχετικά χαμηλές και στις περισσότερες κατηγορίες περιπτώσεων είναι αρνητικές, δηλαδή υπάρχει καθαρό όφελος για το περιβάλλον. Για παράδειγμα, οι καθαρές εκπομπές του Σ1 στην κατηγορία «Κλιματική αλλαγή» είναι -16 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ. Οι μεγαλύτερες θετικές καθαρές εκπομπές παρατηρούνται στις κατηγορίες «Οικοτοξικότητα», «Ευτροφισμός, θάλασσα» και «Ευτροφισμός, έδαφος», οι οποίες οφείλονται στις εκπομπές που σχετίζονται με το στάδιο της εφαρμογής στο έδαφος του χωνεύματος που παράγεται από την αναερόβια χώνευση, το οποίο είναι κοινό στάδιο στα περισσότερα εξεταζόμενα συστήματα παραγωγής αιθανόλης.

Το σύστημα παραγωγής αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση των βιοαποβλήτων σε επίπεδο δήμου ή δήμων (Σ2) παρουσιάζει χαμηλές αλλά θετικές εκπομπές στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων, το οποίο αποδίδεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι η θερμότητα που παράγεται στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της ξήρανσης, καθώς η τελευταία γίνεται σε άλλο μέρος. Οι εκπομπές του Σ2 όσον αφορά την κατηγορία της κλιματικής αλλαγής είναι κατά 17kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ μεγαλύτερες σε σχέση με το σύστημα Σ1. Το σύστημα παραγωγής αιθανόλης με οικιακή ξήρανση των βιοαποβλήτων (Σ3) παρουσιάζει υψηλότερες εκπομπές σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, με τις περισσότερες κατηγορίες οι εκπομπές να είναι σημαντικά υψηλότερες, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι οι οικιακοί ξηραντήρες καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια και δη ηλεκτρισμό, σε αντίθεση με την κεντρική και αποκεντρωμένη ξήρανση η οποία χρησιμοποιεί απευθείας θερμότητα (βλ. Σχήμα 76).



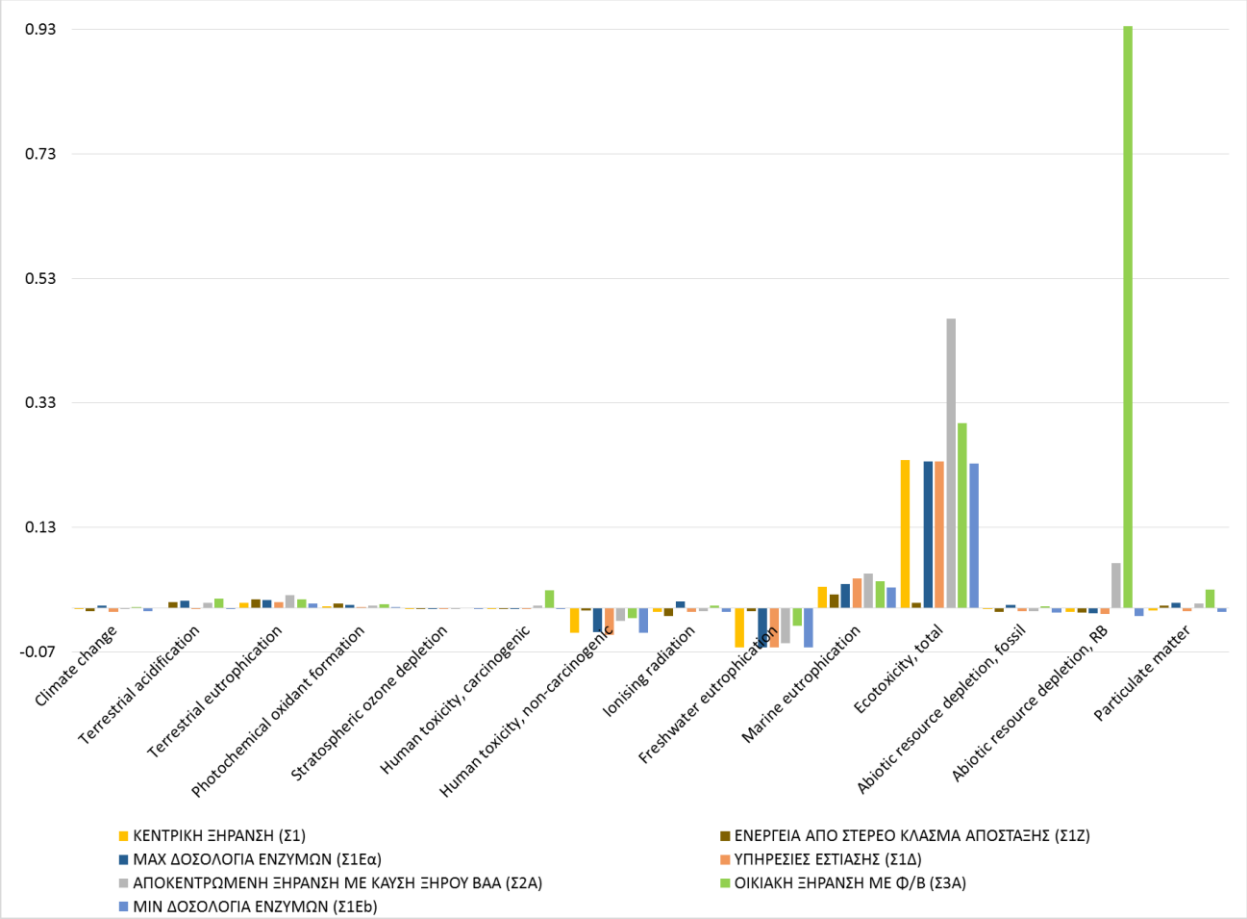
Σχήμα 76: ΑΚΖ για τα συστήματα Σ1, Σ2 και Σ3: επίπεδο ξήρανσης (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

Όσον αφορά τα εναλλακτικά/επιπρόσθετα προϊόντα του συστήματος παραγωγής αιθανόλης από βιοαπόβλητα, διαπιστώνεται ότι η παραγωγή μεθανίου ως καύσιμο κίνησης (σύστημα Σ1Β) παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση σε σχέση με το Σ1 σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, με 80 kg CO_{2eq} / τόνο νωπού ΒΑΑ μεγαλύτερη εξοικονόμηση εκπομπών στην κατηγορία της κλιματικής αλλαγής σε σχέση με το Σ1. Η παραγωγή ένυδρης αιθανόλης ως καύσιμο θέρμανσης παρουσιάζει χειρότερη απόδοση σε σχέση με το Σ1 σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, ενώ η παραγωγή ζωοτροφής παρουσιάζει χειρότερη απόδοση σε ορισμένες κατηγορίες επιπτώσεων και καλύτερη σε κάποιες άλλες (βλ. Σχήμα 77).



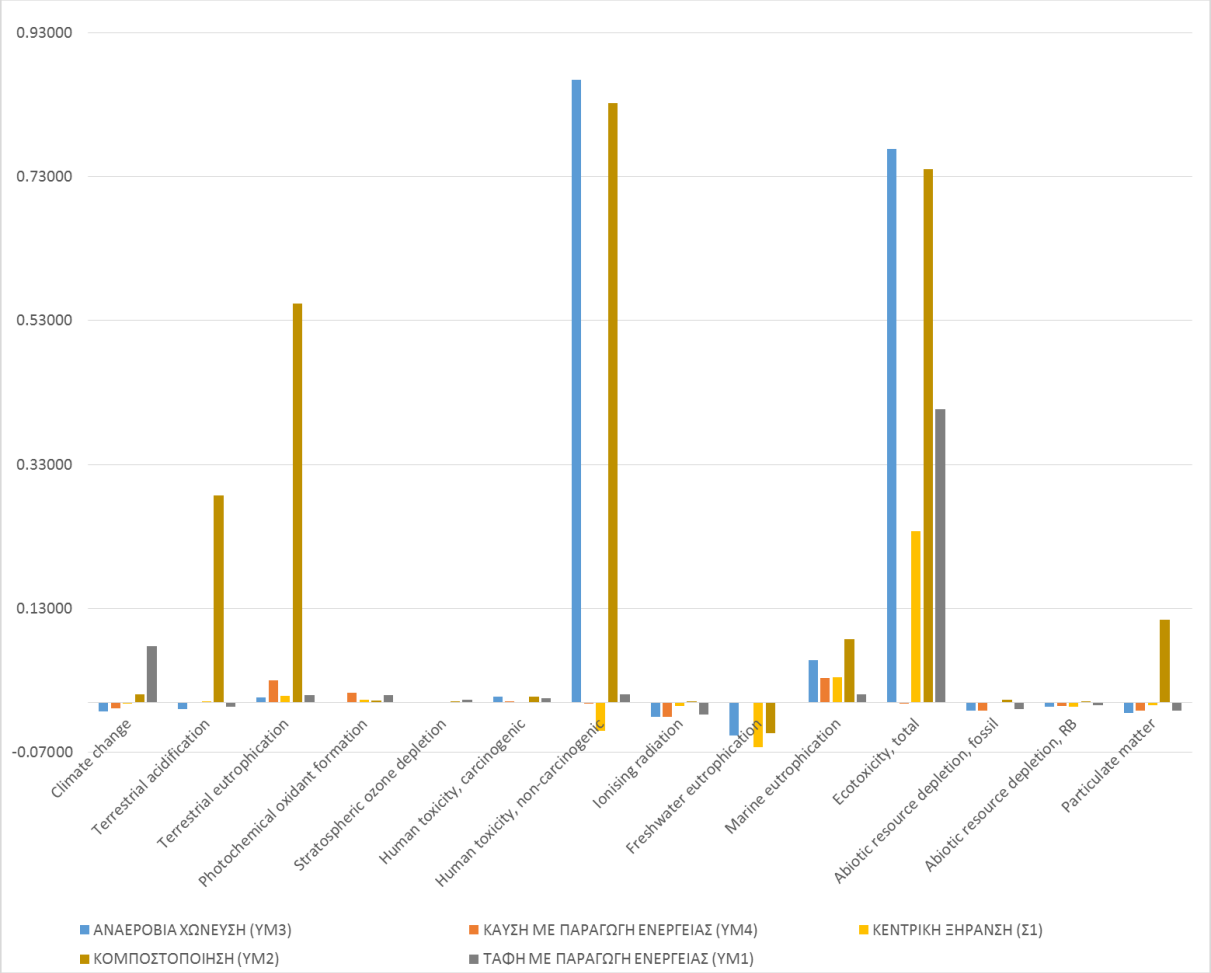
Σχήμα 77: ΑΚΖ για τα σύστημα αναφοράς Σ1 και τις παραλλαγές Σ1Α-Σ1Γ: εναλλακτικά/επιπρόσθετα προϊόντα (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

Όσον αφορά την ανάλυση ευαισθησίας, αυτή έδειξε ότι η χρήση βιοαποβλήτων από υπηρεσίες εστίασης ως υπόστρωμα (Σ1Δ) και η μείωση της δοσολογίας των ενζύμων λόγω βελτίωσης της δραστικότητάς τους (Σ1Εβ) οδηγεί σε περαιτέρω εξοικονομήσεις εκπομπών, όπως ήταν αναμενόμενο. Η παραγωγή ενέργειας από την καύση του στερεού κλάσματος του υπολείμματος της απόσταξης (Σ1Ζ) επίσης παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε αρκετές κατηγορίες επιπτώσεων σε σχέση με το Σ1. Η αύξηση της δοσολογίας των ενζύμων για την επίτευξη της μέγιστης παραγωγής αιθανόλης (Σ1Εα) παρουσιάζει χειρότερη απόδοση στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων. Η παραγωγή ενέργειας από τα ξηρά ΒΑΑ στην αποκεντρωμένη ξήρανση (Σ2Α) και η οικιακή ξήρανση με χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ (Σ3Α) παρουσιάζουν καλύτερες αποδόσεις σε ορισμένες κατηγορίες σε σχέση με το Σ2 και Σ3 αντίστοιχα, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζουν υψηλότερες εκπομπές σε κάποιες άλλες κατηγορίες (βλ. Σχήμα 78).



Σχήμα 78: ΑΚΖ για τα σύστημα αναφοράς Σ1 και τις παραλλαγές Σ1Δ, Σ1Εα&β, Σ1Ζ, Σ2Α & Σ3Α: ανάλυση ευαισθησίας (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 79, το σύστημα παραγωγής αιθανόλης Σ1 σε σχέση με τις υφιστάμενες μεθόδους διαχείρισης των αστικών βιοαποβλήτων (ΥΜ1-ΥΜ4) παρουσιάζει γενικά πολύ καλή επίδοση σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων ή είναι πολύ κοντά στις καλύτερες επιδόσεις των άλλων μεθόδων. Όσον αφορά τις επιπτώσεις στην κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», οι καλύτερες αποδόσεις παρατηρούνται για την αναερόβια χώνευση, την καύση και το σύστημα Σ1 όπου πραγματοποιούνται εξοικονομήσεις, ενώ η χειρότερη απόδοση με επιβαρύνσεις παρατηρείται για τη μέθοδο της ταφής, η οποία παράγει 647 kg CO_{2eq} / τόνο νωπού ΒΑΑ περισσότερα σε σχέση με το Σ1. Η κύρια συνεισφορά της μεθόδου της ταφής στην επίπτωση της «Κλιματικής αλλαγής» αποδίδεται στις εκπομπές μεθανίου από το βιοαέριο που διαφεύγει από το ανώτερο στρώμα κάλυψης και το οποίο δεν οξειδώνεται. Όσον αφορά τις υπόλοιπες κατηγορίες επιπτώσεων, σχετικά υψηλές τιμές παρατηρούνται για την κομποστοποίηση στις κατηγορίες «Οξύνιση, έδαφος», «Ευτροφισμός, έδαφος» και «Αιωρούμενα σωματίδια» οι οποίες σχετίζονται με τις αέριες εκπομπές κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης καθ'αυτή, για την αναερόβια χώνευση και την κομποστοποίηση στην κατηγορία «Ανθρώπινη τοξικότητα, μη καρκινογενής» και για όλες τις μεθόδους πλην της καύσης στην κατηγορία «Οικοτοξικότητα», οι οποίες σχετίζονται με τις εκπομπές κατά το στάδιο της χρήσης του παραγόμενου εδαφοβελτιωτικού ή με τις εκπομπές από τη διάθεση των επεξεργασμένων στραγγισμάτων της ταφής στα επιφανειακά νερά.



Σχήμα 79: ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και τις υφιστάμενες μεθόδους διαχείρισης βιοαποβλήτων ΥΜ1-ΥΜ4 (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα της ΑΚΖ για τα συστήματα παραγωγής αιθανόλης που εξετάστηκαν αλλά και για τις υφιστάμενες μεθόδους διαχείρισης των αστικών βιοαποβλήτων.

11.3.1 Κεντρική ξήρανση (Σ1)

Το βασικό σύστημα παραγωγής αιθανόλης από βιοαπόβλητα με κεντρική ξήρανση (σύστημα αναφοράς Σ1) γενικά παρουσιάζει καλές επιδόσεις σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, με τα μεγαλύτερα καθαρά οφέλη (αποφευχθείσες εκπομπές > θετικές εκπομπές) να σημειώνονται στις κατηγορίες επιπτώσεων «Ευτροφισμός – Γλυκά ύδατα» και «Ανθρώπινη τοξικότητα – καρκινογενής», και τις μεγαλύτερες καθαρές επιβαρύνσεις (θετικές εκπομπές > αποφευχθείσες εκπομπές) να παρατηρούνται στις κατηγορίες «Οικοτοξικότητα» και «Ευτροφισμός – θάλασσα» (Σχήμα 80).

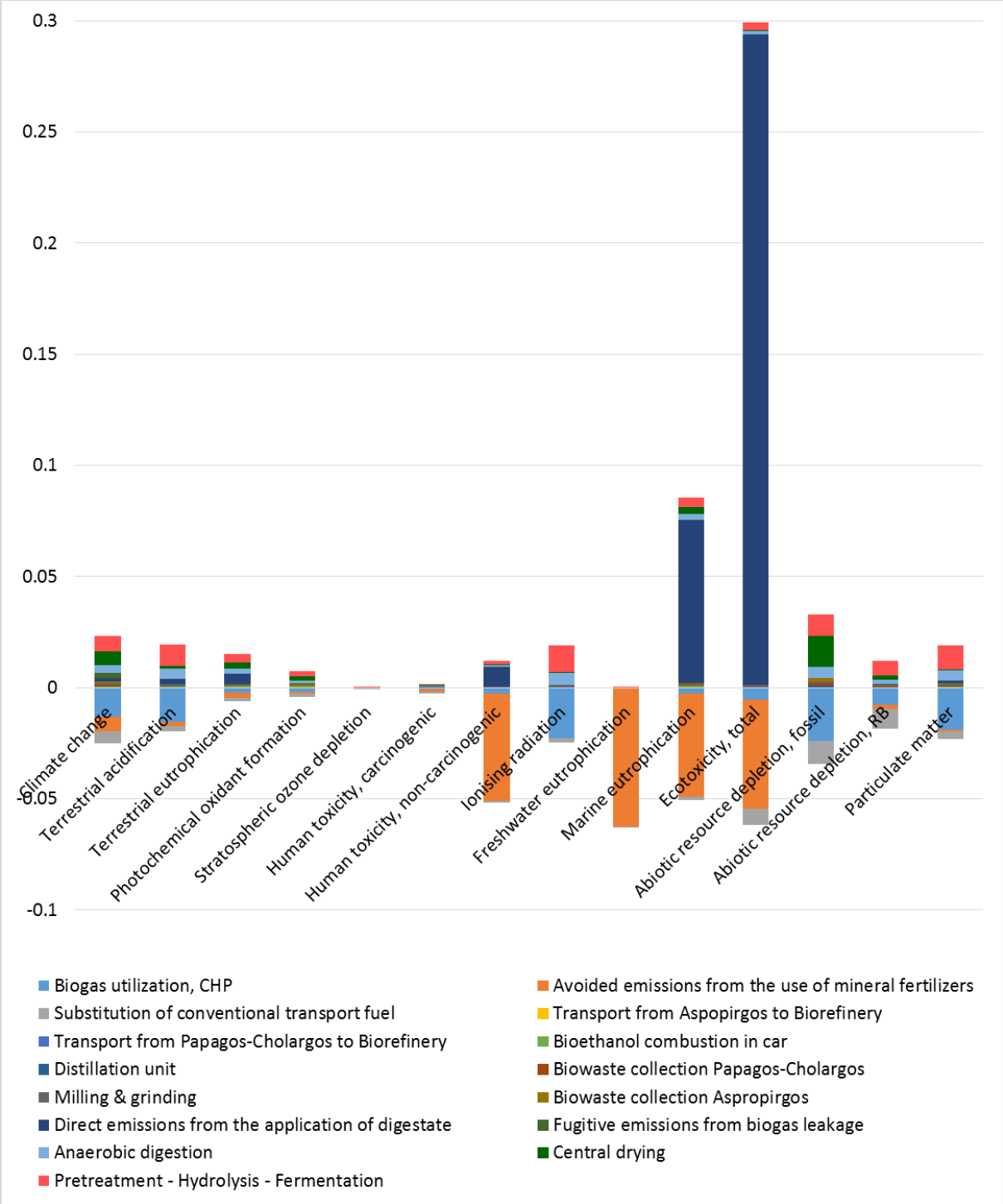
Τα κυριότερα οφέλη προκύπτουν κυρίως για τις κατηγορίες επιπτώσεων «Οικοτοξικότητα», «Ευτροφισμός – θάλασσα», «Ευτροφισμός – γλυκά ύδατα» και «Ανθρώπινη τοξικότητα – καρκινογενής» λόγω της υποκατάστασης των ανόργανων λιπασμάτων από το παραγόμενο εδαφοβελτιωτικό και για τις κατηγορίες «Εξάντληση αβιοτικών πόρων», «Αιωρούμενα σωματίδια» και «Κλιματική αλλαγή» λόγω της υποκατάστασης συμβατικής ενέργειας και καυσίμου κίνησης από το βιοαέριο και την αιθανόλη (Σχήμα 81).

Η κυριότερη επιβάρυνση παρατηρείται στην κατηγορία επίπτωσης «Οικοτοξικότητα», όπου το μεγαλύτερο μέρος των επιπτώσεων (97.8%) οφείλεται στις εκπομπές από το στάδιο της διάθεσης του χωνεύματος στο έδαφος, ενώ οι υπόλοιπες προέρχονται κυρίως από το στάδιο της διεργασίας βιομετατροπής (1.1%), το στάδιο της αναερόβιας χώνευσης (0.45%) και το στάδιο της κεντρικής ξήρανσης (0.16%) (Σχήμα 81). Παρόμοια είναι και η κατανομή των επιβαρύνσεων για την κατηγορία «Ευτροφισμός-θάλασσα» (Σχήμα 82).

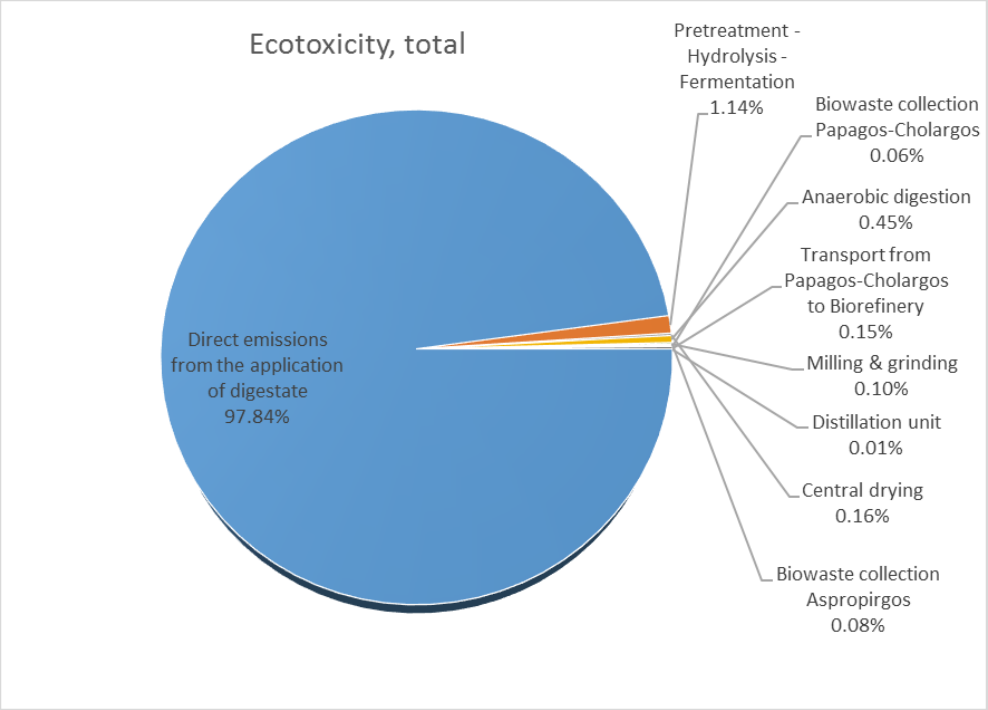
Όσον αφορά την κατηγορία επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή», οι κυριότερες επιβαρύνσεις προκύπτουν από το στάδιο της διεργασίας βιομετατροπής (29.8%), το στάδιο της κεντρικής ξήρανσης των ΒΑΑ (26.5%), το στάδιο της αναερόβιας χώνευσης (15.0%), και από τις διαφεύγουσες εκπομπές κατά τη διοχέτευση του βιοαερίου στη μονάδα καύσης (10.9%) (Σχήμα 83). Παρόμοια είναι και η κατανομή των επιβαρύνσεων για την κατηγορία «Εξάντληση αβιοτικών πόρων».

Τα κυριότερα οφέλη από την κατηγορία επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή» , όπου το μεγαλύτερο μέρος των αποφευχθείσων εκπομπών (51.5%) προέρχεται από την υποκατάσταση ηλεκτρισμού και θερμότητας λόγω της αξιοποίησης του παραγόμενου βιοαερίου, την υποκατάσταση των ανόργανων λιπασμάτων από το παραγόμενο εδαφοβελτιωτικό (26.3%) και από την υποκατάσταση συμβατικών καυσίμων κίνησης από την παραγόμενη αιθανόλη (Σχήμα 84).

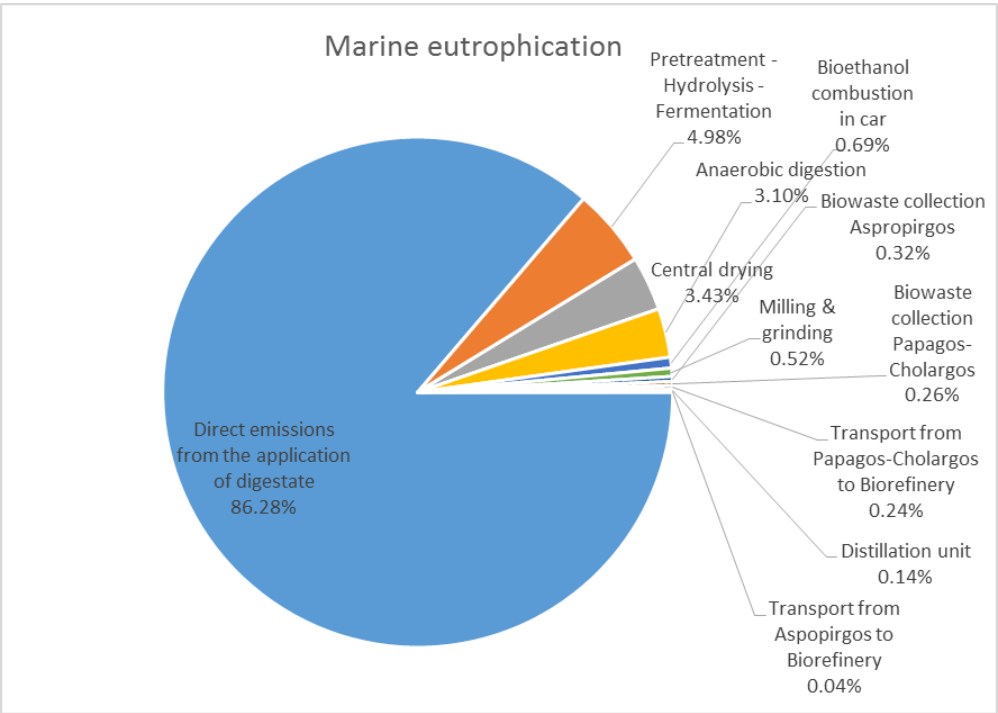
Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την κατηγορία αυτή ανέρχονται στα -16 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ.



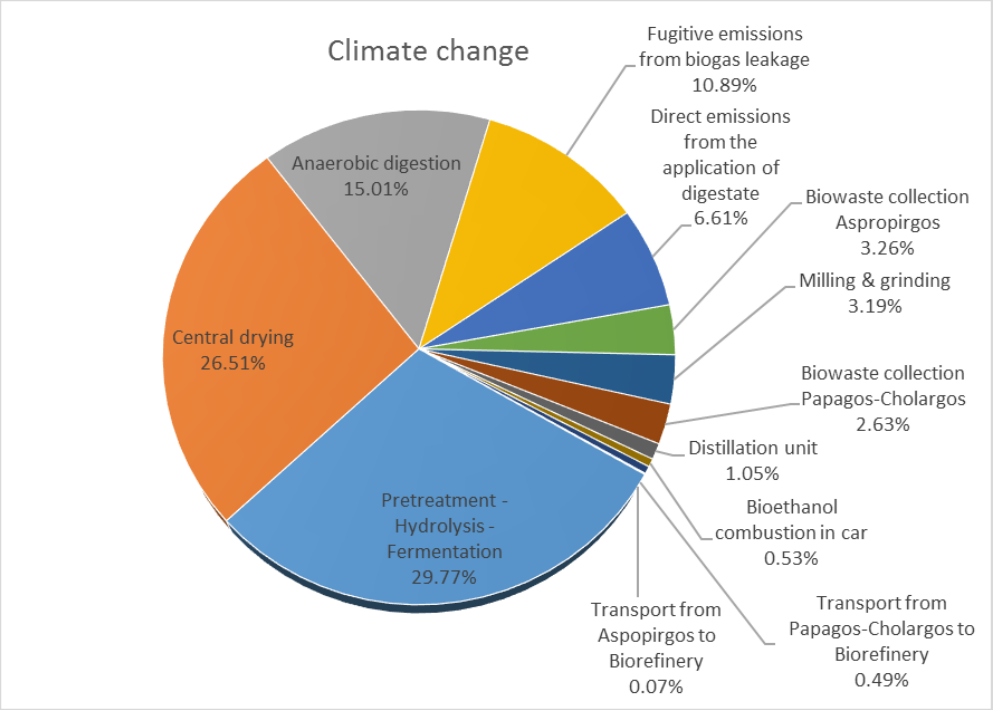
Σχήμα 80: Αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 (ΙΑ)



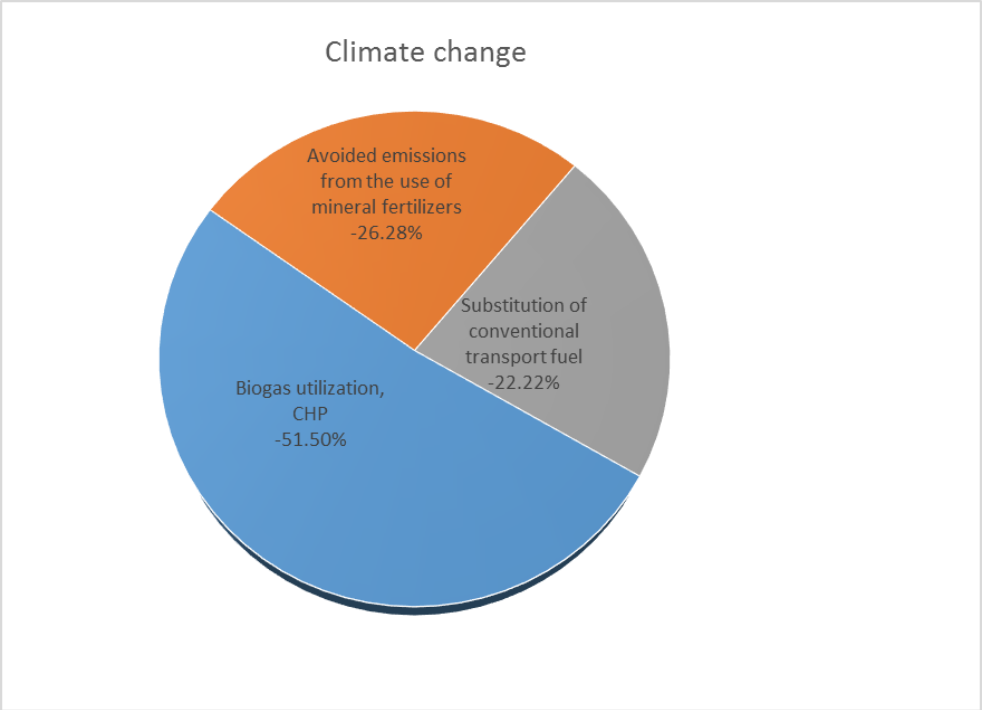
Σχήμα 81: Συνεισφορά σταδίων συστήματος Σ1 στις θετικές εκπομπές (επιβαρύνσεις) της κατηγορίας επιπτώσεων «Οικοτοξικότητα» (%)



Σχήμα 82: Συνεισφορά σταδίων συστήματος Σ1 στις θετικές εκπομπές (επιβαρύνσεις) της κατηγορίας επιπτώσεων «Ευτροφισμός - θάλασσα» (%)



Σχήμα 83: Συνεισφορά σταδίων συστήματος Σ1 στις θετικές εκπομπές (επιβαρύνσεις) της κατηγορίας επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή» (%)



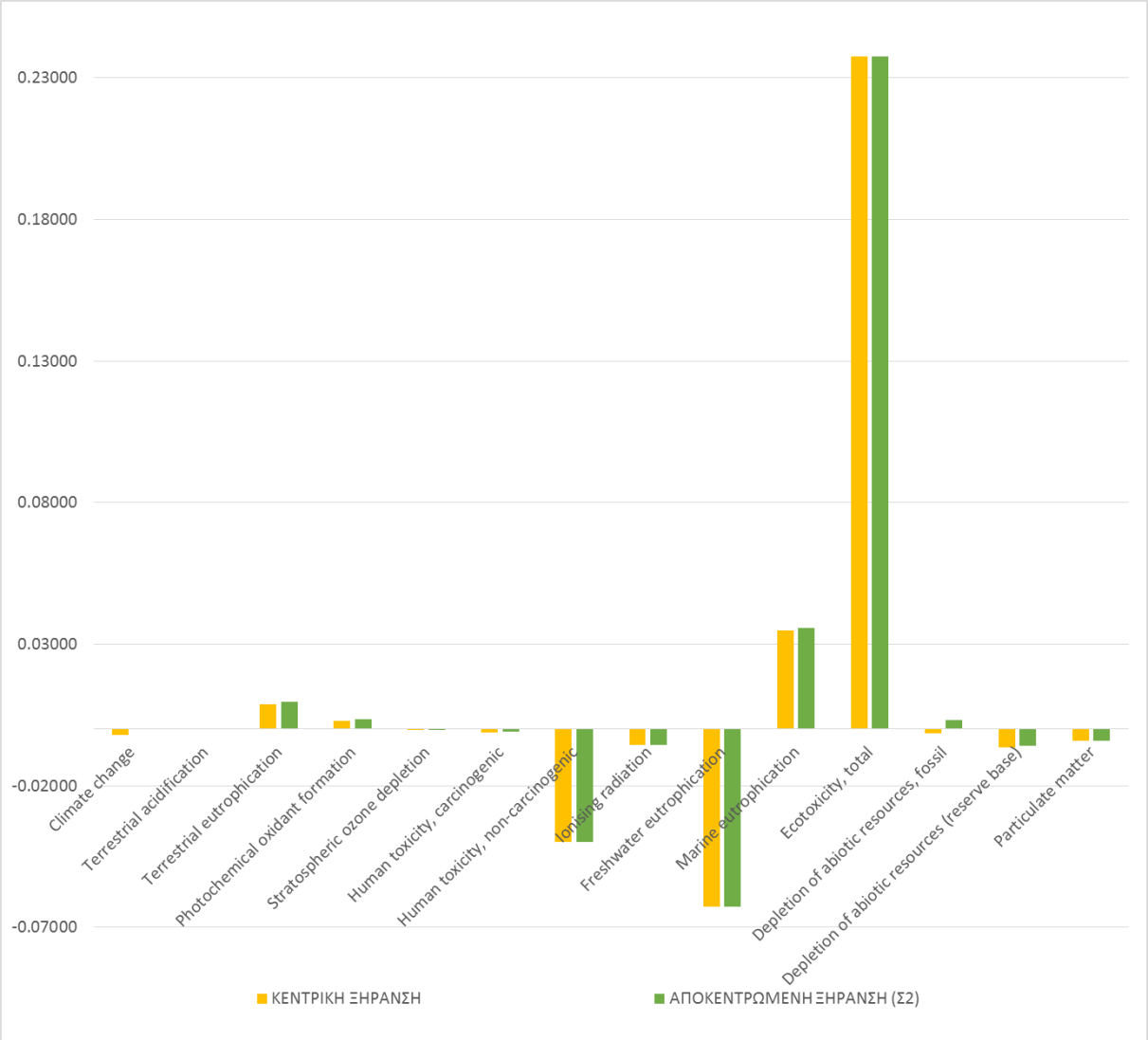
Σχήμα 84: Συνεισφορά σταδίων συστήματος Σ1 στις αποφευχθείσες εκπομπές (οφέλη) της κατηγορίας επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή» (%)

11.3.2 Αποκεντρωμένη ξήρανση (Σ2)

Η βασική διαφορά του συστήματος της αποκεντρωμένης ξήρανσης σε επίπεδο δήμων (Σ2) σε σχέση με την κεντρική ξήρανση στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης (Σ1) έγκειται στο γεγονός ότι στην περίπτωση της αποκεντρωμένης ξήρανσης δεν υπάρχει δυνατότητα αξιοποίησης της θερμότητας που παράγεται

από το βιοαέριο για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της μονάδας ξήρανσης όπως γίνεται στο σύστημα Σ1, λόγω της διαφορετικής τοποθεσίας των μονάδων ξήρανσης και αναερόβιας χώνευσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπολογίζονται τα αντίστοιχα οφέλη από την υποκατάσταση του φυσικού αερίου και να παρατηρείται μια μικρή αύξηση των εκπομπών σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, με τις κατηγορίες «Κλιματική αλλαγή» και «Εξάντληση αβιοτικών ορυκτών πόρων» να σημειώνονται μεγαλύτερες αυξήσεις (Σχήμα 85). Το γεγονός ότι στην αποκεντρωμένη ξήρανση μειώνεται η συνεισφορά του σταδίου της μεταφοράς στη μονάδα αιθανόλης λόγω της μείωσης της μάζας και του όγκου των αποβλήτων παίζει μικρό ρόλο στη διαμόρφωση των συνολικών αποτελεσμάτων, δεδομένου ότι η συνεισφορά των μεταφορών στις συνολικές επιβαρύνσεις είναι πολύ μικρή και στις δύο περιπτώσεις (<1%).

Ειδικότερα, στην κατηγορία επίπτωσης «Κλιματική αλλαγή» οι καθαρές εκπομπές από αρνητικές στην κεντρική ξήρανση γίνονται θετικές στην αποκεντρωμένη ξήρανση. Οι συνολικές καθαρές εκπομπές της αποκεντρωμένης ξήρανσης (Σ2) για την κατηγορία κλιματική αλλαγή ανέρχονται στο 1 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ, δηλαδή 17 kg CO_{2eq} περισσότερα σε σχέση με την κεντρική ξήρανση (Σ1).



Σχήμα 85: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για τα συστήματα Σ1 και Σ2 (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

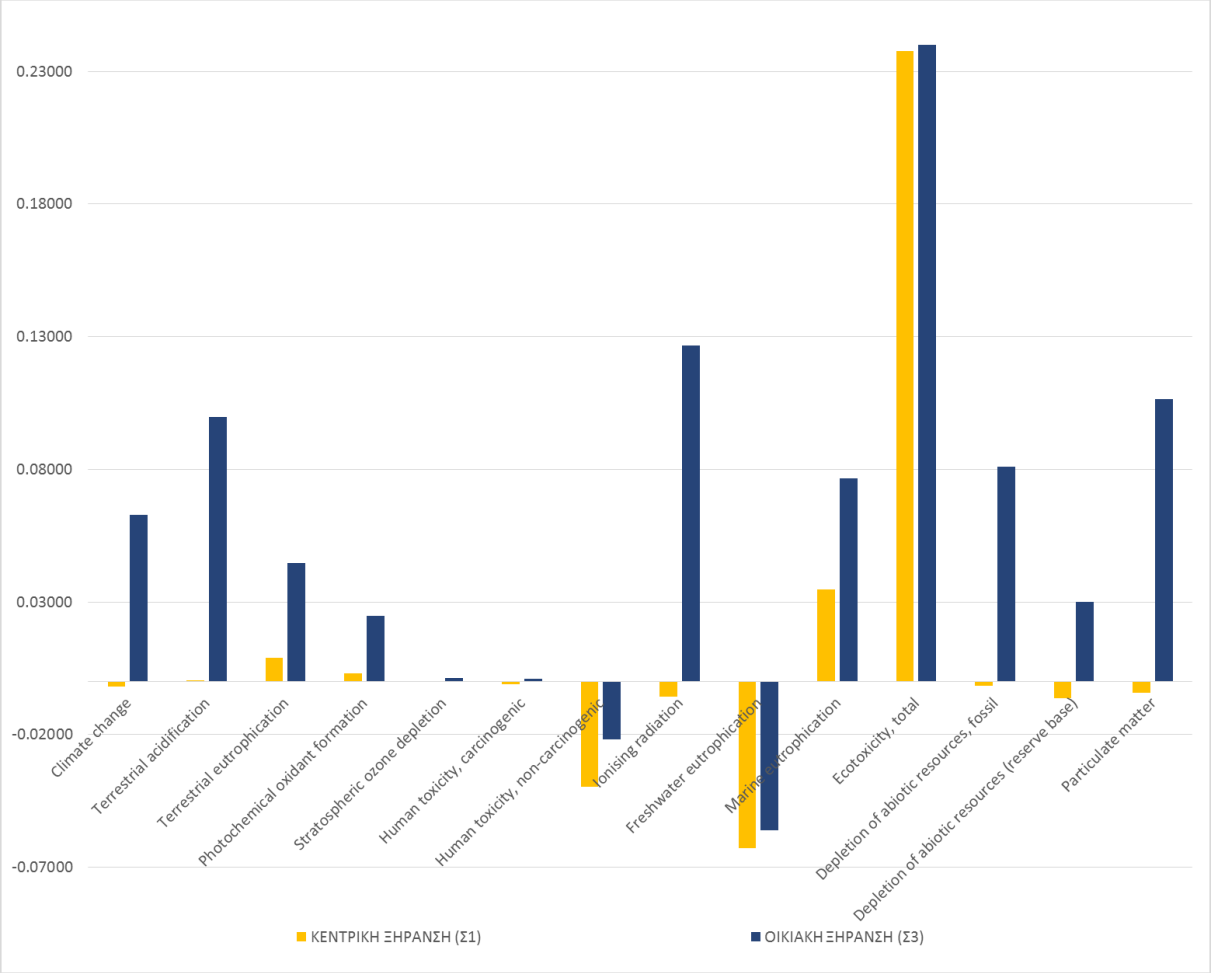
11.3.3 Οικιακή ξήρανση (Σ3)

Πέρα από τη βασική διαφορά του συστήματος Σ1 με το Σ3 η οποία αφορά το επίπεδο ξήρανσης, υπάρχουν και άλλες μικρότερες διαφορές μεταξύ των σεναρίων όπως το γεγονός ότι το υπόστρωμα στο σύστημα Σ3 είναι πλουσιότερο σε ελεύθερα σάκχαρα καθώς η άμεση ξήρανση τα διατηρεί προτού αποδομηθούν, με αποτέλεσμα να έχει 16% μεγαλύτερο ενεργειακό περιέχομενο στην περίπτωση της βιοαιθανόλης και επομένως αυξάνει το δυναμικό υποκατάστασης συμβατικού καυσίμου κίνησης και τα σχετικά οφέλη από το στάδιο αυτό. Επιπλέον, δεδομένου ότι η μάζα και ο όγκος των βιοαποβλήτων μειώνεται πριν τη συλλογή και μεταφορά τους μειώνει περαιτέρω τη συνεισφορά των σταδίων αυτών στη συνολική περιβαλλοντική επιβάρυνση.

Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι τα επίπεδα υγρασίας είναι υψηλότερα στην οικιακή ξήρανση σε σχέση με την κεντρική και την αποκεντρωμένη ξήρανση, η κατανάλωση ενέργειας του οικιακού ξηραντήρα είναι υψηλότερη (3.6MJ/kg αντί για 2.5MJ/kg). Επίσης, το γεγονός ότι στην οικιακή ξήρανση χρησιμοποιείται ηλεκτρισμός ενώ στην κεντρική/αποκεντρωμένη ξήρανση χρησιμοποιείται απευθείας θερμότητα, αυξάνει τις επιβαρύνσεις σε διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων. Τέλος, στην περίπτωση της κεντρικής ξήρανσης υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης της παραγόμενης θερμότητας από το βιοαέριο, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η συνολική επιβάρυνση.

Σαν αποτέλεσμα, η οικιακή ξήρανση παρουσιάζει αρκετά μεγαλύτερες εκπομπές στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων σε σχέση με την κεντρική ξήρανση, όπως στις κατηγορίες «Κλιματική αλλαγή», «Οξύνιση – έδαφος», «Ιονίζουσα ακτινοβολία», «Εξάντληση αβιοτικών πόρων» και «Αιωρούμενα σωματίδια» (Σχήμα 86).

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές της οικιακής ξήρανσης (Σ3) για την κατηγορία κλιματική αλλαγή ανέρχονται στα 509 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ, δηλαδή 525 kg CO_{2eq} περισσότερα σε σχέση με την κεντρική ξήρανση (Σ1).



Σχήμα 86: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για τα συστήματα Σ1 και Σ3 (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

11.3.4 Εναλλακτικά/επιπρόσθετα προϊόντα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ΑΚΖ για τις παραλλαγές του συστήματος αναφοράς Σ1 οι οποίες αφορούν την παραγωγή εναλλακτικών ή/και επιπρόσθετων προϊόντων, όπως η ζωοτροφή από το υπόλειμμα της απόσταξης (Σ1Α), το μεθάνιο από το βιοαέριο για χρήση ως καύσιμο κίνησης (Σ1Β) και η ένυδρη αιθανόλη για χρήση ως καύσιμο θέρμανσης (Σ1Γ).

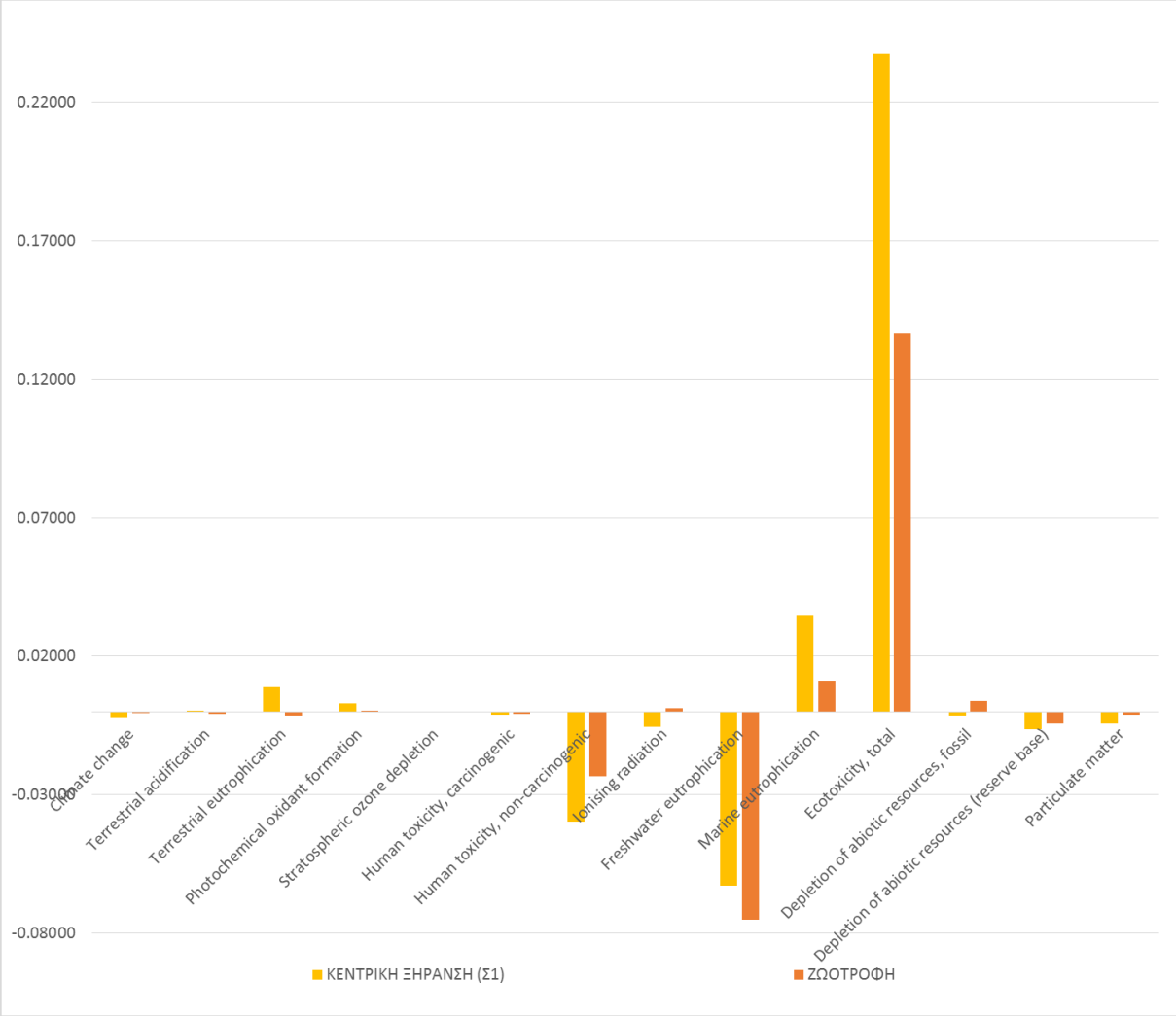
11.3.4.1 Ζωοτροφή (Σ1Α)

Στην περίπτωση της παραγωγής ζωοτροφής ως επιπρόσθετο προϊόν (Σ1Α) παρατηρούνται τόσο αυξήσεις των εκπομπών σε ορισμένες κατηγορίες επιπτώσεων (π.χ. «Κλιματική αλλαγή», «Εξάντληση αβιοτικών πόρων», «Ανθρώπινη τοξικότητα», «Αιωρούμενα σωματίδια») και μειώσεις των εκπομπών σε κάποιες άλλες κατηγορίες επιπτώσεων («Οξύνιση – έδαφος», «Ευτροφισμός – έδαφος», «Ευτροφισμός – γλυκά ύδατα», «Ευτροφισμός – θάλασσα», «Οικοτοξικότητα») σε σχέση με το σύστημα αναφοράς Σ1 (Σχήμα 87).

Η μείωση των εκπομπών οφείλεται κατά κύριο λόγο στη μείωση της ποσότητας του υπολείμματος της απόσταξης που οδηγείται για αναερόβια χώνευση (-40%) και κατ' επέκταση στη μείωση της ποσότητας του χωνεύματος που χρησιμοποιείται στο έδαφος και των σχετικών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Η αύξηση των εκπομπών οφείλεται στη μείωση της ποσότητας του παραγόμενου βιοαερίου και κατ'επέκταση στη μείωση της υποκατάστασης της συμβατικής παραγωγής ενέργειας. Η παραγωγή

ζωοτροφής δεν έχει σημαντική επιρροή στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος, διότι η συνεισφορά της υποκατάστασης της καλλιέργειας αραβόσιτου από την παραγόμενη ζωοτροφή στις αποφευχθείσες εκπομπές (-26.67 kg CO_{2eq}) είναι μικρότερη από τη μείωση της συνεισφοράς της υποκατάστασης της συμβατικής παραγωγής ενέργειας από βιοαέριο (-42.14 kg CO_{2eq}).

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την παραλλαγή Σ1Α του συστήματος αναφοράς όσον αφορά την κατηγορία κλιματική αλλαγή ανέρχονται στα -4 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ, δηλαδή 12 kg CO_{2eq} περισσότερα σε σχέση με το Σ1.



Σχήμα 87: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Α (παραγωγή ζωοτροφής) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

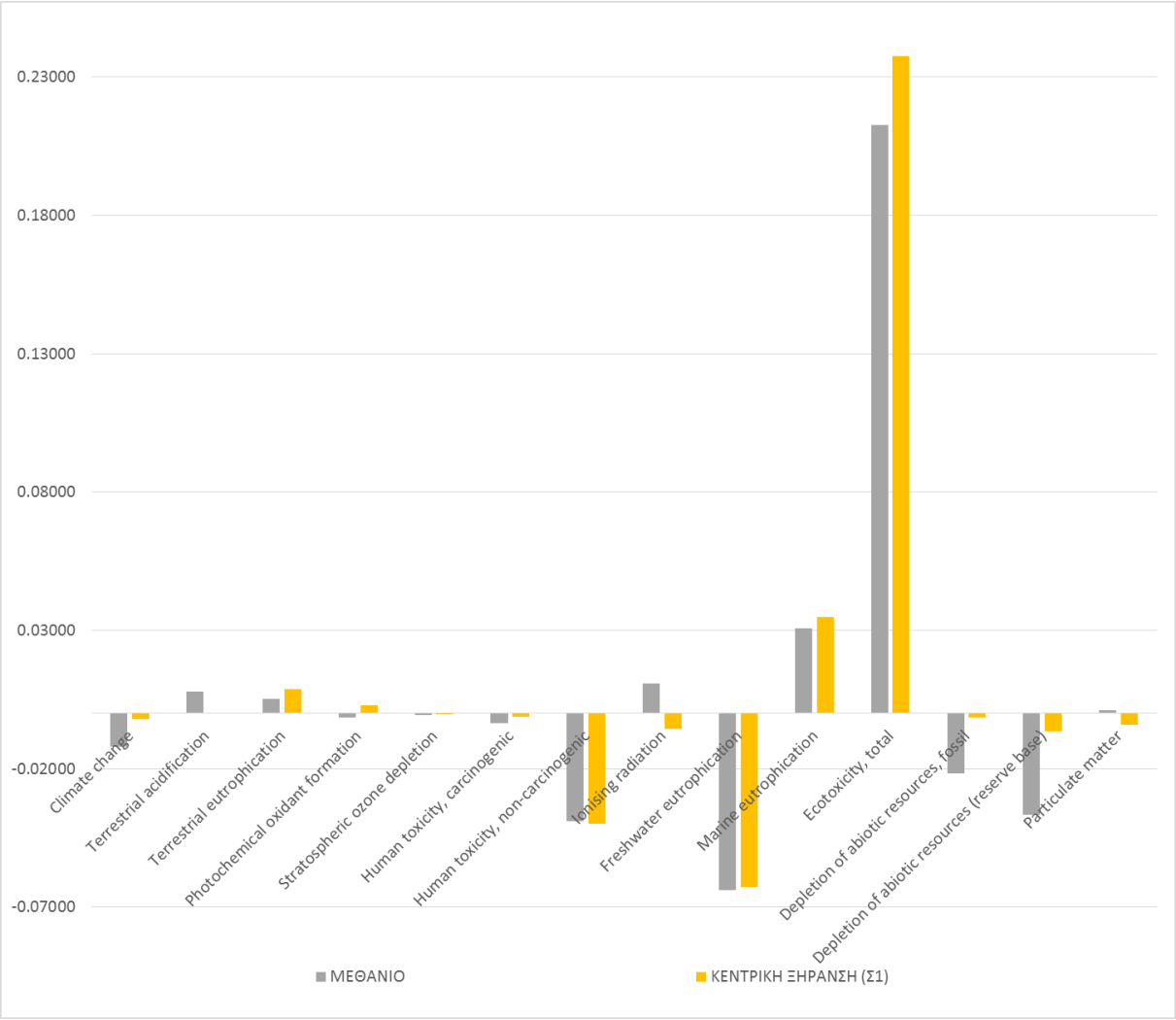
11.3.4.2 Μεθάνιο (Σ1Β)

Η αναβάθμιση του βιοαερίου για την παραγωγή μεθανίου ως καύσιμο κίνησης (Σ1Β) αντί της παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας στο σύστημα αναφοράς Σ1 έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών σε ορισμένες κατηγορίες επιπτώσεων (π.χ. «Κλιματική αλλαγή», «Ευτροφισμός – έδαφος», «Εξάντληση αβιοτικών πόρων») και την αύξηση των εκπομπών σε άλλες κατηγορίες επιπτώσεων (π.χ. «Οξύνιση – έδαφος», «Ιονίζουσα ακτινοβολία», «Αιωρούμενα σωματίδια»).

Η μείωση των εκπομπών οφείλεται στη συνεισφορά της υποκατάστασης των συμβατικών καυσίμων κίνησης από το παραγόμενο μεθάνιο στις συνολικές αποφευχθείσες εκπομπές, η οποία είναι

μεγαλύτερη από τη συνεισφορά της υποκατάστασης ενέργειας από το βιοαέριο. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση της κατηγορίας «Κλιματική αλλαγή» οι αποφευχθείσες εκπομπές λόγω αξιοποίησης του μεθανίου είναι -200 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ ενώ οι αντίστοιχες αποφευχθείσες εκπομπές λόγω αξιοποίησης της ενέργειας από το βιοαέριο στο σύστημα Σ1 είναι -105 kg CO_{2eq}. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση των εκπομπών οφείλεται στις εκπομπές που προέρχονται από το στάδιο της αναβάθμισης του βιοαερίου.

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την παραλλαγή Σ1Β του συστήματος αναφοράς όσον αφορά την κατηγορία κλιματική αλλαγή ανέρχονται στα -96 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ, δηλαδή 80 kg CO_{2eq} χαμηλότερες σε σχέση με το Σ1.



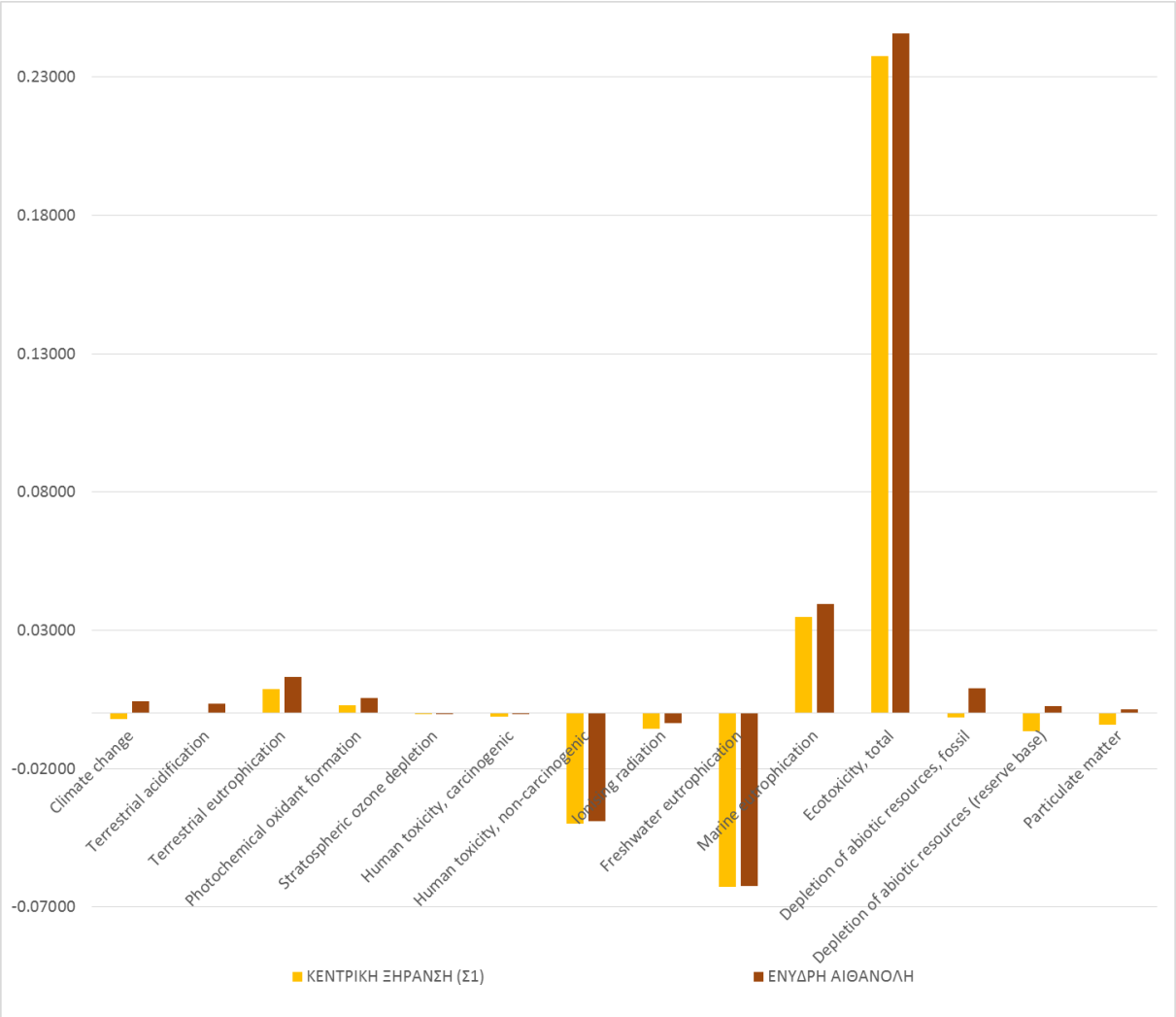
Σχήμα 88: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Β (παραγωγή μεθανίου) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

11.3.4.3 Καύσιμο θέρμανσης (Σ1Γ)

Στην περίπτωση της παραλλαγής του Σεναρίου Σ1 για την παραγωγή ένυδρης αιθανόλης αντί για άνυδρη και την υποκατάσταση αντίστοιχα καυσίμου θέρμανσης αντί καυσίμου κίνησης (Σ1Γ), παρατηρούνται χαμηλότερες επιδόσεις σε όλες σχεδόν τις εξεταζόμενες κατηγορίες επιπτώσεων. Παρόλο που η κατανάλωση ενέργειας για την απόσταξη της ένυδρης αιθανόλης σε σχέση με την άνυδρη αιθανόλη είναι λιγότερη (3.6MJ/L αντί για 4.3MJ/L), υπερτερεί το γεγονός ότι η ένυδρη αιθανόλη είναι

κατώτερη ενεργειακά και ποιοτικά της άνυδρης, το οποίο ισχύει και για τα προϊόντα που υποκαθιστούν οι δύο αυτοί τύποι αιθανόλης.

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την παραλλαγή Σ1Γ του συστήματος αναφοράς όσον αφορά την κατηγορία κλιματική αλλαγή ανέρχονται στα 36 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ, δηλαδή 52 kg CO_{2eq} περισσότερα σε σχέση με το Σ1.



Σχήμα 89: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Γ (παραγωγή ένυδρης αιθανόλης) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

11.3.5 Ανάλυση ευαισθησίας

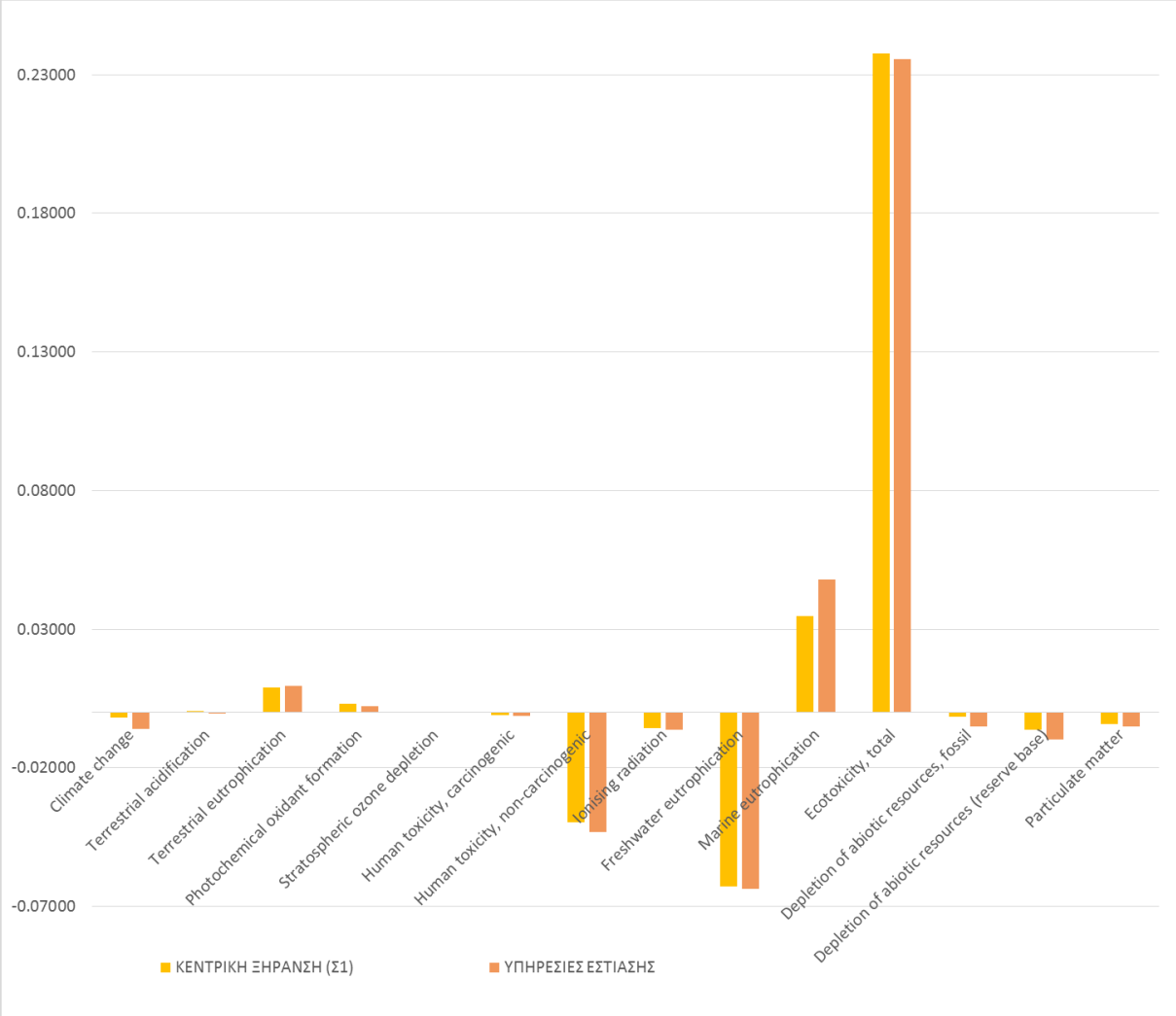
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τη διερεύνηση της επίδρασης, θετικής ή αρνητικής, της μεταβολής ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων στην περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος. Ειδικότερα, οι παράμετροι που μελετώνται είναι (i) η χρήση βιοαποβλήτων από υπηρεσίες εστίασης ως υπόστρωμα για τη διεργασία βιομετατροπής (Σ1Δ), (ii) η μεταβολή της δοσολογίας των ενζύμων (Σ1Ε), (iii) ο διαχωρισμός του στερεού υπολείμματος της απόσταξης προκειμένου να οδηγηθεί σε μονάδα καύσης για την παραγωγή ενέργειας (Σ1Ζ), (iv) η καύση μέρους του ξηρού βιοαποβλήτου που παράγεται κατά την αποκεντρωμένη ξήρανση για την κάλυψη των αναγκών θερμότητας της μονάδας ξήρανσης (Σ2Α) και (v) η χρήση φωτοβολταϊκών για την τροφοδότηση με ηλεκτρισμό των οικιακών ξηραντήρων (Σ3Α).

11.3.5.1 Χρήση υποστρώματος από βιοαπόβλητα υπηρεσιών εστίασης (Σ1Δ)

Η παράμετρος που μεταβάλλεται στην παρούσα ενότητα αφορά το περιεχόμενο του υποστρώματος που χρησιμοποιείται στη διεργασία. Σύμφωνα με τη σύσταση των βιοαποβλήτων από υπηρεσίες εστίασης που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 11.1.5, το ενεργειακό περιεχόμενο για την παραγωγή αιθανόλης είναι αυξημένο κατά 44% σε σχέση με τα οικιακά βιοαπόβλητα που χρησιμοποιούνται στο σύστημα αναφοράς Σ1. Παράλληλα, η χρήση αυτού του υποστρώματος έχει ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση της ποσότητας και της σύστασης του υπολείμματος της απόσταξης, καθώς και την παραγωγή περισσότερου εδαφοβελτιωτικού και αντίστοιχα την υποκατάσταση μεγαλύτερης ποσότητας ανόργανων λιπασμάτων, λόγω του μεγαλύτερου περιεχομένου σε άζωτο.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 90, η χρήση του υποστρώματος αυτού παρουσιάζει καλύτερη επίδοση στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων, με εξαίρεση τις κατηγορίες «Ευτροφισμός – έδαφος» και «Ευτροφισμός – θάλασσα», όπου παρατηρούνται υψηλότερες εκπομπές κυρίως λόγω των αυξημένων εκπομπών από τη χρήση του εδαφοβελτιωτικού στο έδαφος, οι οποίες οφείλονται στην μεγαλύτερη παραγωγή εδαφοβελτιωτικού. Η αύξηση των αποφευχθείσων εκπομπών για παράδειγμα στην κατηγορία «Κλιματική αλλαγή» οφείλεται κατά κύριο λόγο στην αύξηση της υποκατάστασης των συμβατικών καυσίμων κίνησης (39%) και της υποκατάστασης των ανόργανων λιπασμάτων (61%).

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την παραλλαγή Σ1Δ του συστήματος αναφοράς ανέρχονται στα -47.5 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ για την κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», δηλαδή 31.5 kg CO_{2eq} λιγότερα σε σχέση με το Σ1.



Σχήμα 90: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Δ (χρήση υποστρώματος από υπηρεσίες εστίασης) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

11.3.5.2 Μεταβολή της δοσολογίας των ενζύμων (Σ1Ε)

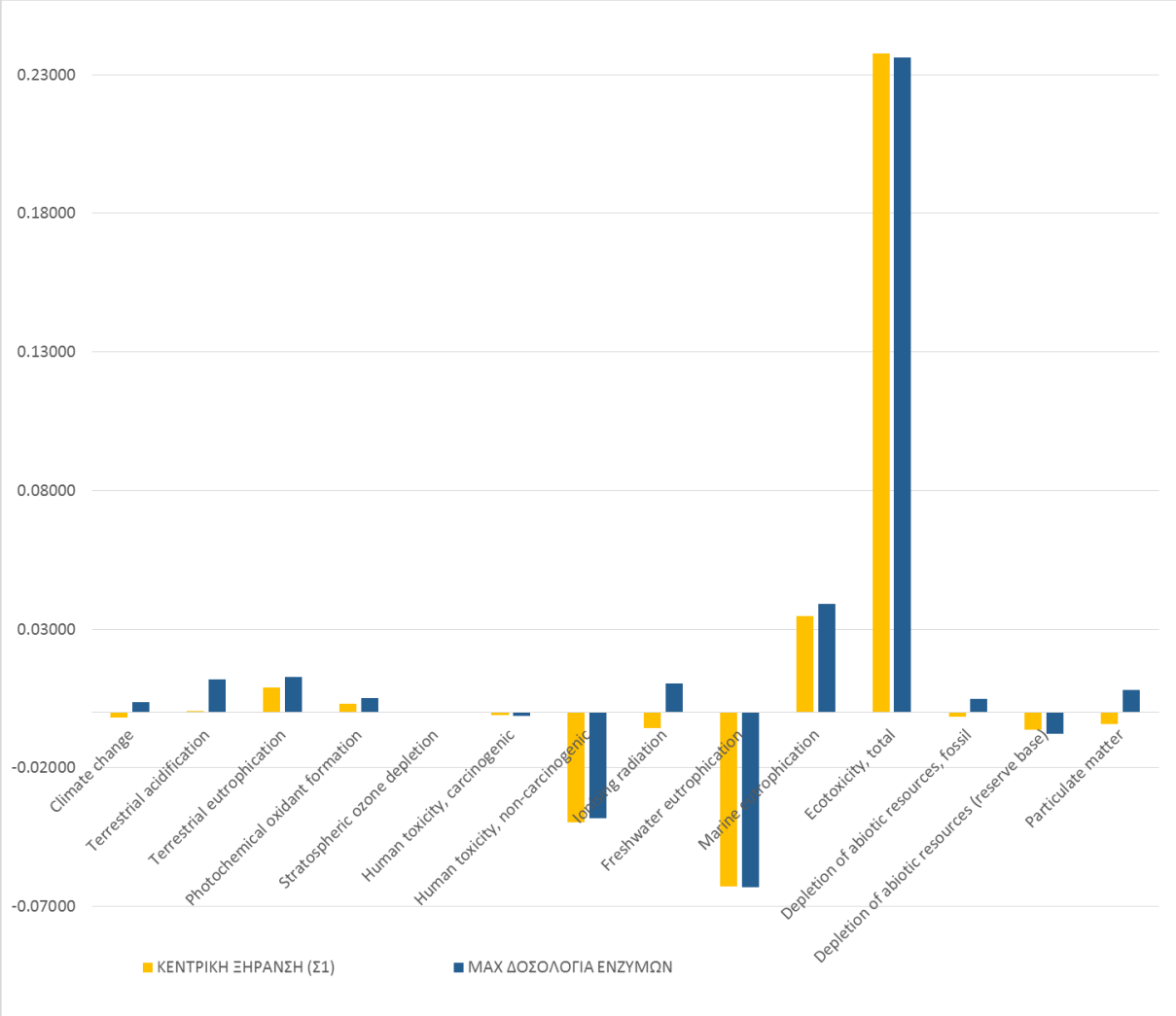
Η παράμετρος που μεταβάλλεται στην παρούσα ενότητα σε σχέση με το σύστημα αναφοράς Σ1 αφορά τη δοσολογία των ενζύμων που χρησιμοποιείται κατά το στάδιο της βιομετατροπής. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση (α) της αύξησης της δοσολογίας των ενζύμων προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη παραγωγή αιθανόλης και (β) της μείωσης της δοσολογίας των ενζύμων λόγω αυξημένης δραστικότητας.

Ειδικότερα όσον αφορά το (α), στο σύστημα Σ1 η δοσολογία των ενζύμων που χρησιμοποιήθηκε είναι περίπου 7 φορές μικρότερη (7g /kg ΞΥ) από αυτήν που αναφέρεται στο παραδοτέο Β.2.3r του Waste2bio (51g /kg ΞΥ) για την επίτευξη της μέγιστης παραγωγής αιθανόλης (147.7 g EtOH/kg ΞΥ αντί 82.6 g EtOH/kg ΞΥ), προκειμένου να βελτιωθεί το κόστος των ενζύμων και να μειωθεί η συνεισφορά τους στην περιβαλλοντική επιβάρυνση της διεργασίας. Στο πλαίσιο της ανάλυσης ευαισθησίας μελετάται η περιβαλλοντική απόδοση του συστήματος στην περίπτωση που υιοθετείτο η μέγιστη δοσολογία των ενζύμων.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι στην περίπτωση αυτή οι επιδόσεις σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων είναι χειρότερες σε σχέση με το σύστημα Σ1 (Σχήμα 91), το οποίο οφείλεται στην αύξηση της δοσολογίας των ενζύμων. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση των αποφευχθεισών εκπομπών λόγω

της αυξημένης υποκατάστασης των συμβατικών καυσίμων κίνησης από την αυξημένη παραγωγή αιθανόλης έχει μικρότερη επίδραση στα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα για την κατηγορία «Κλιματική αλλαγή» οι εκπομπές από το στάδιο της βιομετατροπής αυξάνονται από 56 kg CO_{2eq} στο σύστημα Σ1 σε 125 kg CO_{2eq} , ενώ οι αποφευχθείσες εκπομπές από την υποκατάσταση συμβατικών καυσίμων κίνησης αυξάνονται από -45 kg CO_{2eq} στο σύστημα Σ1 σε -81 kg CO_{2eq} στην υπό μελέτη περίπτωση.

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την παραλλαγή Σ1Ε του συστήματος αναφοράς ανέρχονται στα 29 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ για την κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», δηλαδή 45 kg CO_{2eq} περισσότερα σε σχέση με το Σ1.

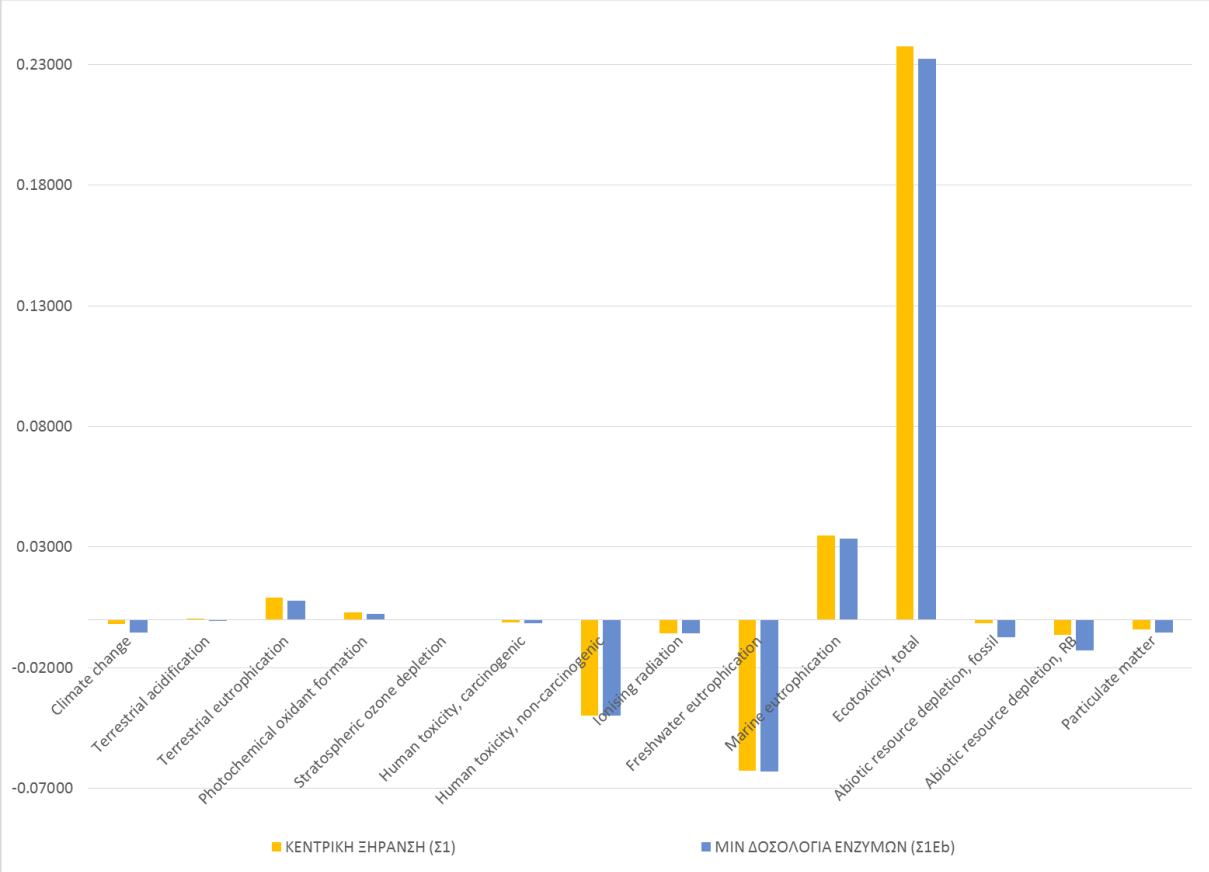


Σχήμα 91: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Εα (μέγιστη δοσολογία ενζύμων) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

Όσον αφορά το (β), μελετάται η επίδραση της μείωσης της δοσολογίας των ενζύμων λόγω της αύξησης της δραστικότητας τους, δεδομένου ότι η έρευνα για τη βελτίωση των ενζύμων είναι σε εξέλιξη και συνεχώς πραγματοποιείται πρόοδος στο πεδίο αυτό. Συγκεκριμένα, η ομάδα του έργου έχει ήδη προμηθευτεί νέα μη εμπορικά σκευάσματα ενζύμων από την εταιρεία Novozymes, τα οποία δοκίμασε στο πλαίσιο νέου κύκλου πειραμάτων και διαπίστωσε την αύξηση περίπου 30% της απόδοσης. Στην παρούσα ανάλυση ευαισθησίας μελετάται η μείωση της δοσολογίας στο 80% της αρχικής και για τα δύο ένζυμα (κυτταρινάση και γλυκοαμυλάση), το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρισμού για την παραγωγή τους από 0.14 kWh/kg ΞΥ σε 0.11 kWh/kg ΞΥ.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα που ακολουθεί, η μείωση της δοσολογίας των ενζύμων έχει σημαντική θετική επίδραση σε ορισμένες κατηγορίες επιπτώσεων, όπως στις κατηγορίες «Κλιματική αλλαγή» και

«Εξάντληση αβιοτικών πόρων». Ειδικότερα, για την περίπτωση της κλιματικής αλλαγής οι συνολικές καθαρές εκπομπές μειώνονται περαιτέρω κατά 28 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ (από -16 kg CO_{2eq} σε -44 kg CO_{2eq}).



Σχήμα 92: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Εβ (μείωση δοσολογίας ενζύμων) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

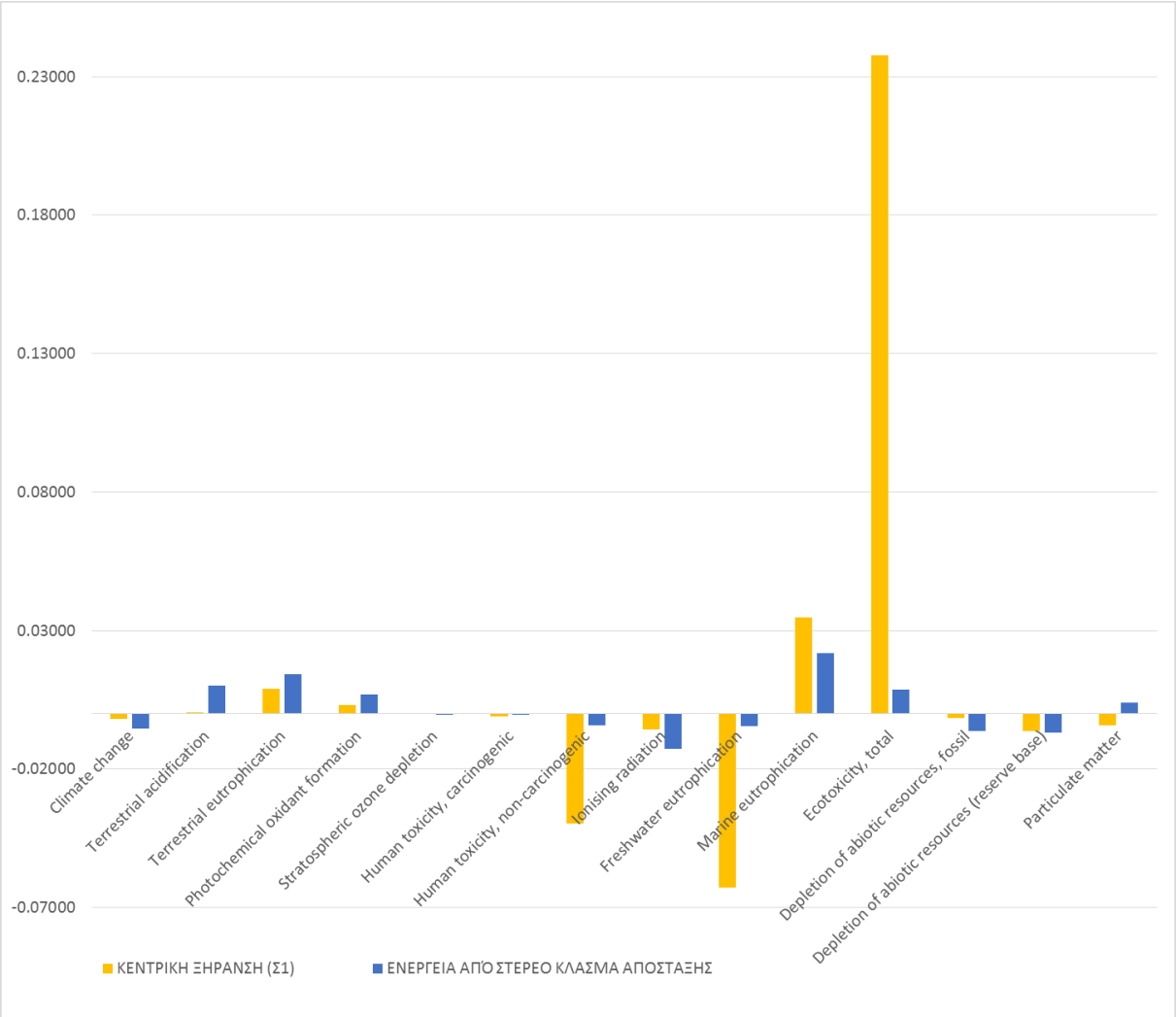
11.3.5.3 Παραγωγή ενέργειας από στερεό υπόλειμμα απόσταξης (Σ1Ζ)

Η παράμετρος που μεταβάλλεται στην παρούσα ενότητα σε σχέση με το σύστημα αναφοράς Σ1 αφορά το διαχωρισμό του στερεού υπολείμματος της απόσταξης προκειμένου να οδηγηθεί προς καύση και να παραχθεί ενέργεια (Σ1Ζ). Στην περίπτωση αυτή και όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 11.1.5.5, αρχικά γίνεται φυγοκέντριση του υπολείμματος και το στερεό κλάσμα οδηγείται προς ξήρανση προτού διοχετευτεί στη μονάδα καύσης για την παραγωγή ενέργειας. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση αυτή, το υπολειμματικό ρεύμα που οδηγείται προς αναερόβια χώνευση είναι μειωμένο σε σχέση με το σύστημα αναφοράς Σ1.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 93, στην περίπτωση αυτή παρατηρούνται χαμηλότερες εκπομπές στις κατηγορίες επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή», «Ιονίζουσα ακτινοβολία», «Ευτροφισμός – θάλασσα», «Οικοτοξικότητα» και «Εξάντληση αβιοτικών πόρων». Από την άλλη πλευρά, παρατηρούνται υψηλότερες εκπομπές στις κατηγορίες «Οξύνιση – έδαφος», «Ευτροφισμός – έδαφος», «Ευτροφισμός – γλυκά ύδατα», «Ανθρώπινη τοξικότητα» και «Αιωρούμενα σωματίδια». Οι χαμηλότερες εκπομπές στην κατηγορία της κλιματικής αλλαγής οφείλονται στην μεγαλύτερη υποκατάσταση της συμβατικής παραγωγής ενέργειας λόγω της παραγωγής ενέργειας από την καύση των στερεών, ενώ στις κατηγορίες «Οικοτοξικότητα» και «Ευτροφισμός – θάλασσα» οφείλονται στη μικρότερη παραγωγή χωνεύματος και κατ'επέκταση στις χαμηλότερες εκπομπές από τη χρήση του στο έδαφος. Οι

υψηλότερες εκπομπές στις κατηγορίες «Οξύνιση – έδαφος» και «Αιωρούμενα σωματίδια» οφείλονται στο διοξείδιο του θείου που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα (35% του S) κατά το στάδιο καθαρισμού των απαερίων της μονάδας καύσης, ενώ οι υψηλότερες εκπομπές στις κατηγορίες «Ευτροφισμός – έδαφος» και «Φωτοχημικό νέφος» οφείλονται στο στάδιο της καύσης των στερεών υπολειμμάτων της διεργασίας κατά την οποία εκλύονται στον αέρα οξείδια του αζώτου.

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την παραλλαγή Σ1Ζ του συστήματος αναφοράς ανέρχονται στα -43.5 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ για την κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», δηλαδή 27.5 kg CO_{2eq} λιγότερα σε σχέση με το Σ1.



Σχήμα 93: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για το σύστημα αναφοράς Σ1 και την παραλλαγή Σ1Ζ (παραγωγή ενέργειας από στερεό υπόλειμμα απόσταξης) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

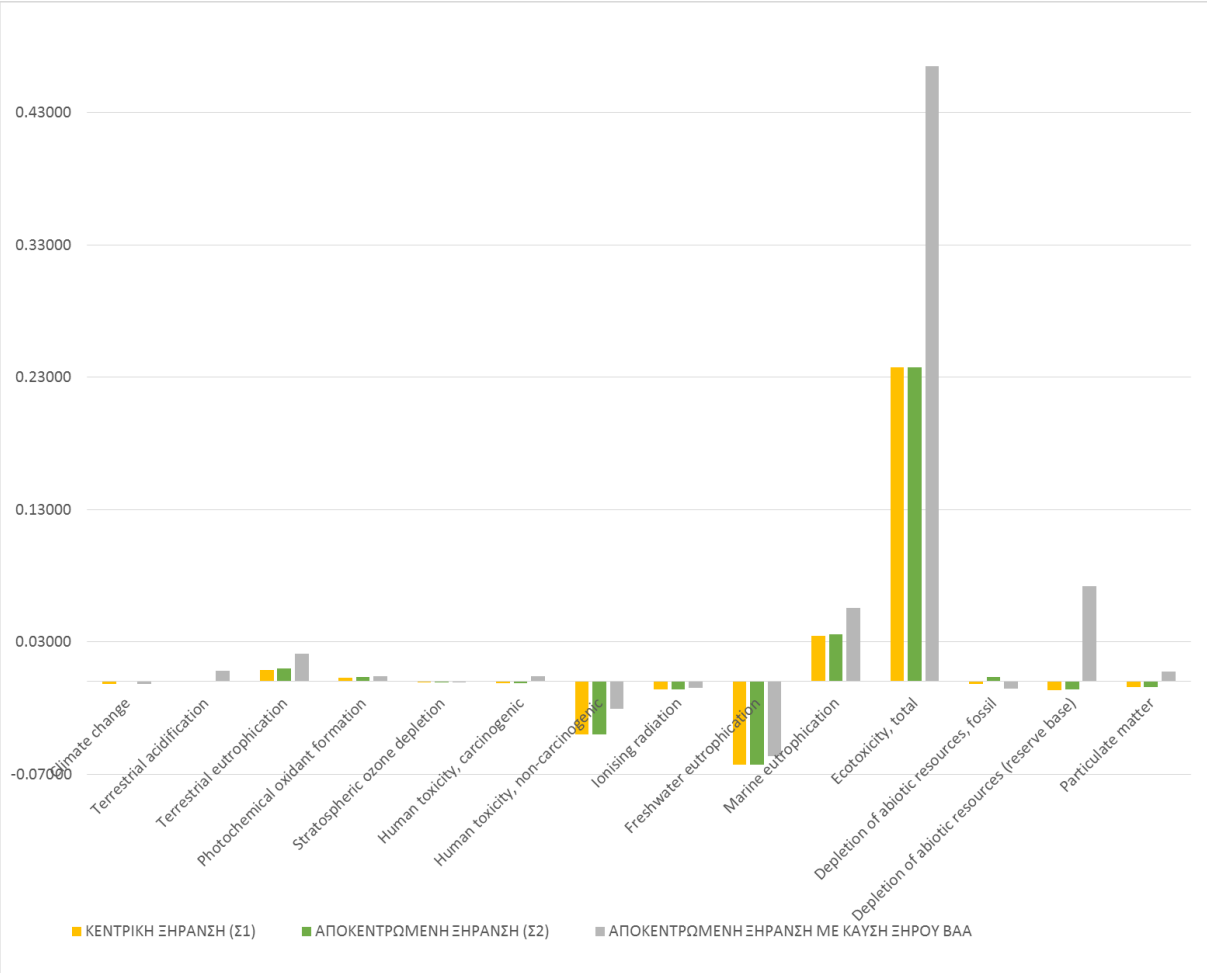
11.3.5.4 Παραγωγή ενέργειας από ξηρό βιοαπόβλητο (Σ2Α)

Η παράμετρος που μεταβάλλεται στην παρούσα ενότητα αφορά το σύστημα της αποκεντρωμένης ξήρανσης Σ2 και τη χρήση μέρους των παραγόμενων ξηρών ΒΑΑ που παράγονται κατά την αποκεντρωμένη ξήρανση ως καύσιμο για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας ξήρανσης σε θερμότητα (σύστημα Σ2Α). Αυτό εξετάζεται προκειμένου να διερευνηθεί εάν υπάρχει τρόπος να βελτιωθεί η περιβαλλοντική απόδοση της αποκεντρωμένης ξήρανσης, καθώς στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει δυνατότητα αξιοποίησης της θερμότητας που παράγεται από το βιοαέριο για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της μονάδας ξήρανσης, όπως γίνεται στο σύστημα Σ1, με αποτέλεσμα να μην

υπολογίζονται τα αντίστοιχα οφέλη από την υποκατάσταση του φυσικού αερίου και να παρατηρείται μια αύξηση των εκπομπών σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 93, το σύστημα Σ2Α παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε σχέση με το σύστημα Σ2 στην κατηγορία επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή» καθώς και καλύτερη απόδοση σε σχέση με το σύστημα Σ1 και Σ2 στην κατηγορία «Εξάντληση αβιοτικών ορυκτών πόρων», λόγω της αποφυγής χρήσης ορυκτών καυσίμων για τη ξήρανση. Ειδικότερα για την κατηγορία της κλιματικής αλλαγής, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την καύση των βιοαποβλήτων θεωρούνται ουδέτερες ως προς το φαινόμενο του θερμοκηπίου (παράγοντας χαρακτηρισμού: 0), διότι ο άνθρακας αυτός είναι βιογενούς προέλευσης (δεν είναι ορυκτός). Οι χειρότερες αποδόσεις στις υπόλοιπες κατηγορίες επιπτώσεων αποδίδονται σε άλλες εκπομπές που προκύπτουν από την καύση των βιοαποβλήτων.

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την παραλλαγή Σ2Α ανέρχονται στα -12.7 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ για την κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», δηλαδή 3.4 kg CO_{2eq} περισσότερα σε σχέση με το Σ1 και 14 kg CO_{2eq} λιγότερα σε σχέση με το Σ2.



Σχήμα 94: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για τα συστήματα Σ1, Σ2 και την παραλλαγή Σ2Α (παραγωγή ενέργειας από στερεό υπόλειμμα απόσταξης) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

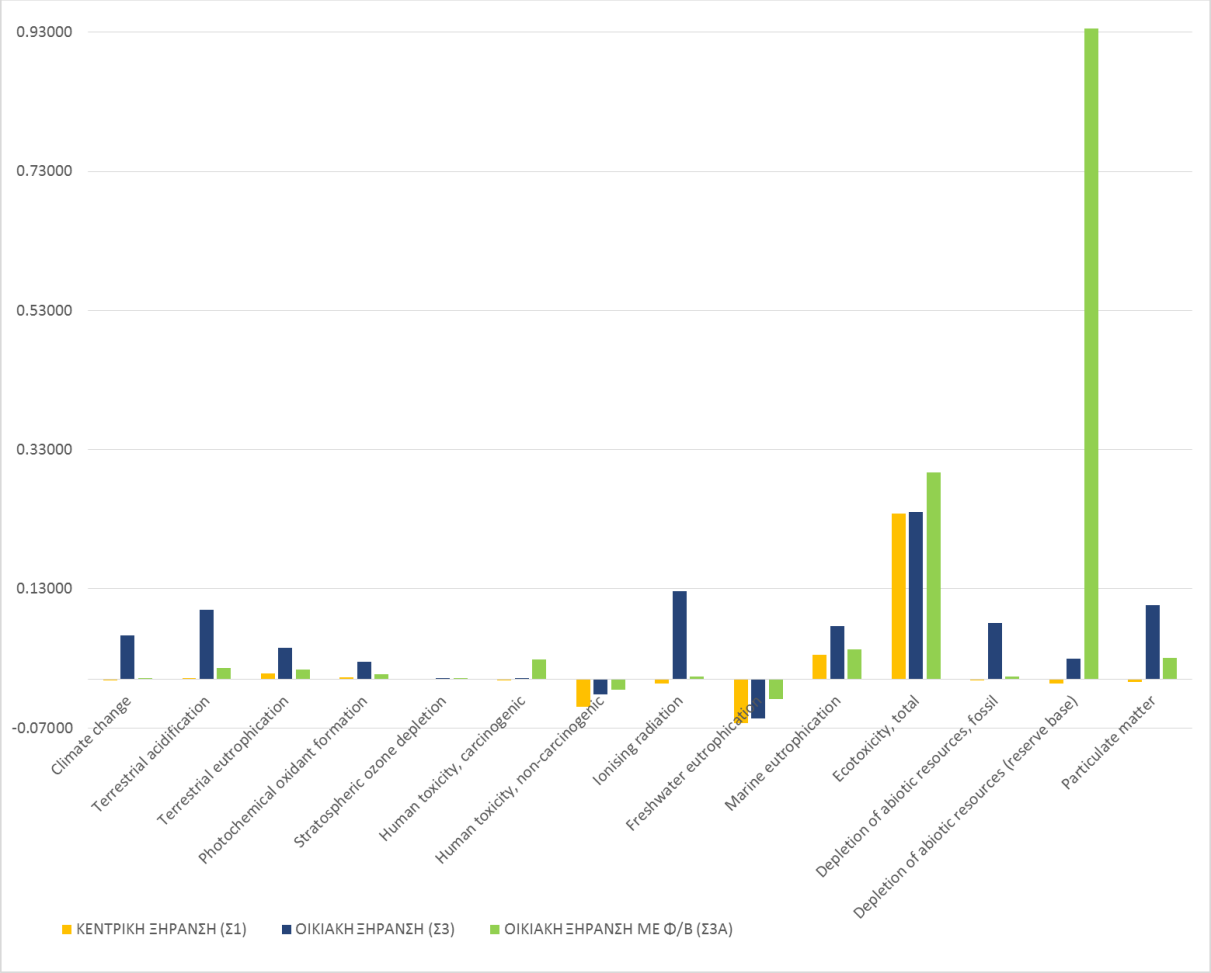
11.3.5.5 Χρήση φωτοβολταϊκών για την οικιακή ξήρανση (Σ3Α)

Η παράμετρος που μεταβάλλεται στην παρούσα ενότητα σε σχέση με το σύστημα οικιακής ξήρανσης Σ3 αφορά την πηγή ηλεκτρισμού για τη λειτουργία των οικιακών ξηραντήρων, η οποία στο σύστημα Σ3Α προέρχεται από φωτοβολταϊκά πάνελ. Η κατανάλωση ηλεκτρισμού από το δίκτυο διανομής της ΔΕΗ

για τη ξήρανση των βιοαποβλήτων στο σπίτι, αυξάνει σημαντικά τις επιβαρύνσεις σε διάφορες κατηγορίες επιπτώσεων σε σχέση με το σύστημα αναφοράς Σ1 και την κεντρική ξήρανση. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η χρήση ανανεώσιμης πηγής ενέργειας (φωτοβολταϊκά) για την τροφοδότηση των οικιακών ξηραντήρων, προκειμένου να διερευνηθεί αν μπορεί να βελτιωθεί έτσι σημαντικά η περιβαλλοντική απόδοση της οικιακής ξήρανσης προκειμένου να είναι ανταγωνιστική του συστήματος αναφοράς Σ1.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 95, το σύστημα Σ3Α παρουσιάζει σημαντικά καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση σε σχέση με το Σ3 στις κατηγορίες επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή», «Οξύνιση – έδαφος», «Ευτροφισμός – έδαφος», «Φωτοχημικό νέφος», «Ιονίζουσα ακτινοβολία», «Ευτροφισμός – θάλασσα», «Εξάντληση αβιοτικών ορυκτών πόρων» και «Αιωρούμενα σωματίδια», η οποία οφείλεται στην αποφυγή κατανάλωσης ηλεκτρισμού από το δίκτυο διανομής. Ωστόσο, παρατηρούνται και ιδιαίτερα σημαντικές επιβαρύνσεις σε σχέση και με τα δύο συστήματα (Σ1&Σ3) στις κατηγορίες «Εξάντληση αβιοτικών πόρων, αποθέματα», «Ανθρώπινη τοξικότητα», «Ευτροφισμός – γλυκά ύδατα» και «Οικοτοξικότητα», οι οποίες οφείλονται στις εκπομπές εξασθενούς χρώμιου, χαλκού, αρσενικού κ.α. λόγω της χρήσης φωτοβολταϊκών.

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την παραλλαγή Σ3Α ανέρχονται στα 18 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ για την κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», δηλαδή 34 kg CO_{2eq} περισσότερα σε σχέση με το Σ1 και 491 kg CO_{2eq} λιγότερα σε σχέση με το Σ3.



Σχήμα 95: Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ για τα συστήματα Σ1, Σ3 και την παραλλαγή Σ3Α (οικιακή ξήρανση με Φ/Β) (καθαρές επιπτώσεις, ΙΑ)

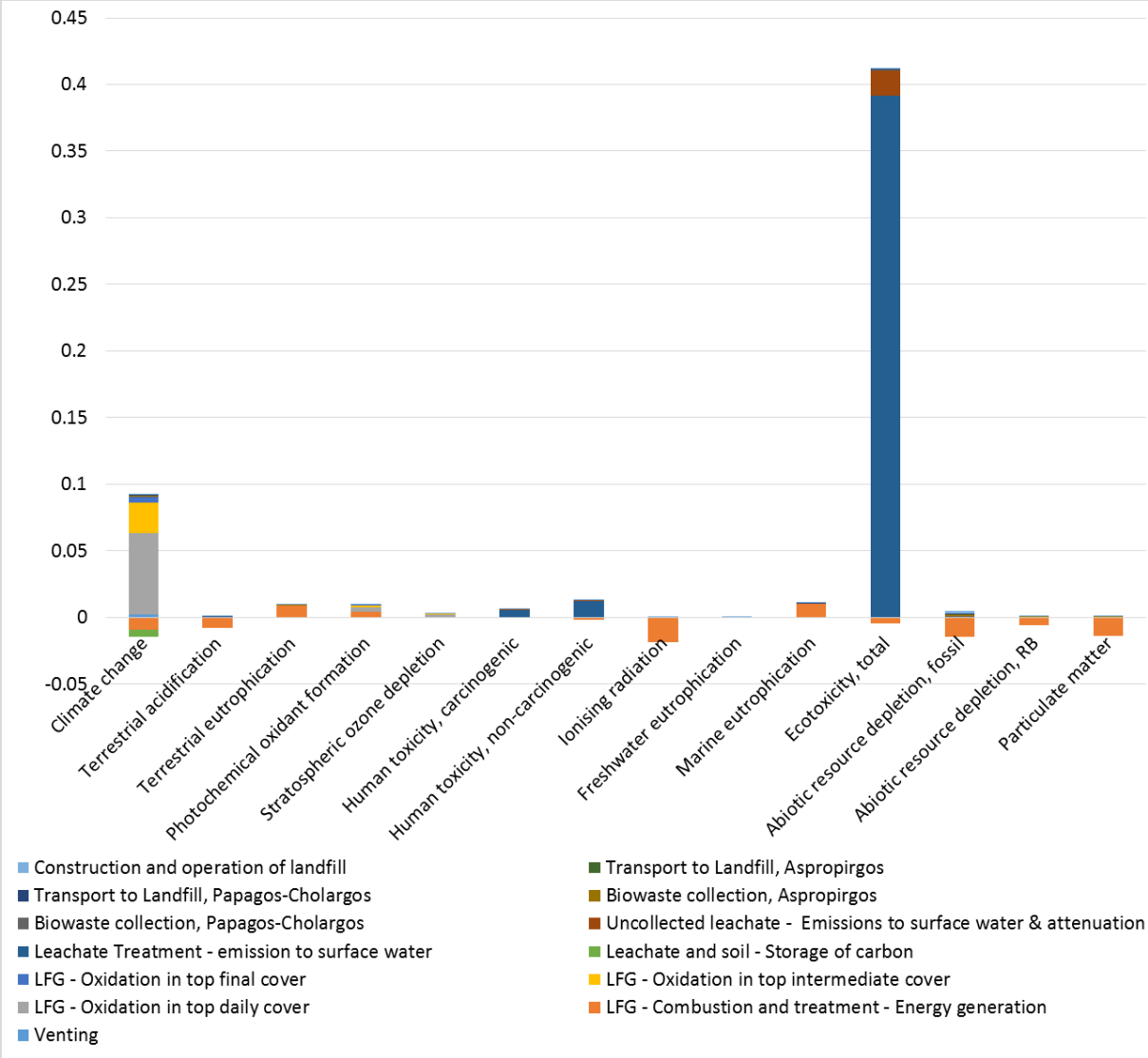
11.3.6 Συμβατικές/υφιστάμενες μέθοδοι διαχείρισης βιοαποβλήτων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής για τις υφιστάμενες μεθόδους διαχείρισης βιοαποβλήτων, ήτοι για την ταφή, την κομποστοποίηση, την αναερόβια χώνευση και την καύση.

11.3.6.1 Μέθοδος ΥΜ1: Ταφή με παραγωγή ενέργειας

Η ταφή με παραγωγή ενέργειας – Μέθοδος ΥΜ1 παρουσιάζει καθαρές θετικές τιμές (επιβαρύνσεις) στις κατηγορίες επιπτώσεων, με τις μεγαλύτερες να παρατηρούνται στην κατηγορία «Οικοτοξικότητα», οι οποίες σχετίζονται με τη διάθεση των επεξεργασμένων στραγγισμάτων στα επιφανειακά νερά, καθώς και στην κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», οι οποίες σχετίζονται με την οξείδωση του βιοαερίου στο επιφανειακό κάλυμμα του χώρου ταφής. Σε σχέση με την πρώτη κατηγορία, οι σημαντικότερες εκπομπές είναι οι εκπομπές ψευδάργυρου, νικελίου, αρσενικού, χαλκού, χρωμίου VI και βαρίου στα επιφανειακά νερά, ενώ για τη δεύτερη κατηγορία οι κυριότερες εκπομπές είναι οι εκπομπές μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα. Αρνητικές καθαρές τιμές (οφέλη) παρατηρούνται στις κατηγορίες «Οξύνιση – έδαφος», «Ιονίζουσα ακτινοβολία», «Ευτροφισμός – γλυκά ύδατα», «Εξάντληση αβιοτικών πόρων» και «Αιωρούμενα σωματίδια», οι οποίες οφείλονται κυρίως στην παραγωγή ενέργειας από το βιοαέριο και την υποκατάσταση του συμβατικού ηλεκτρισμού (Σχήμα 96).

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την ΥΜ1 ανέρχονται στα 631 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ για την κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», δηλαδή 647 kg CO_{2eq} περισσότερα σε σχέση με το Σ1.



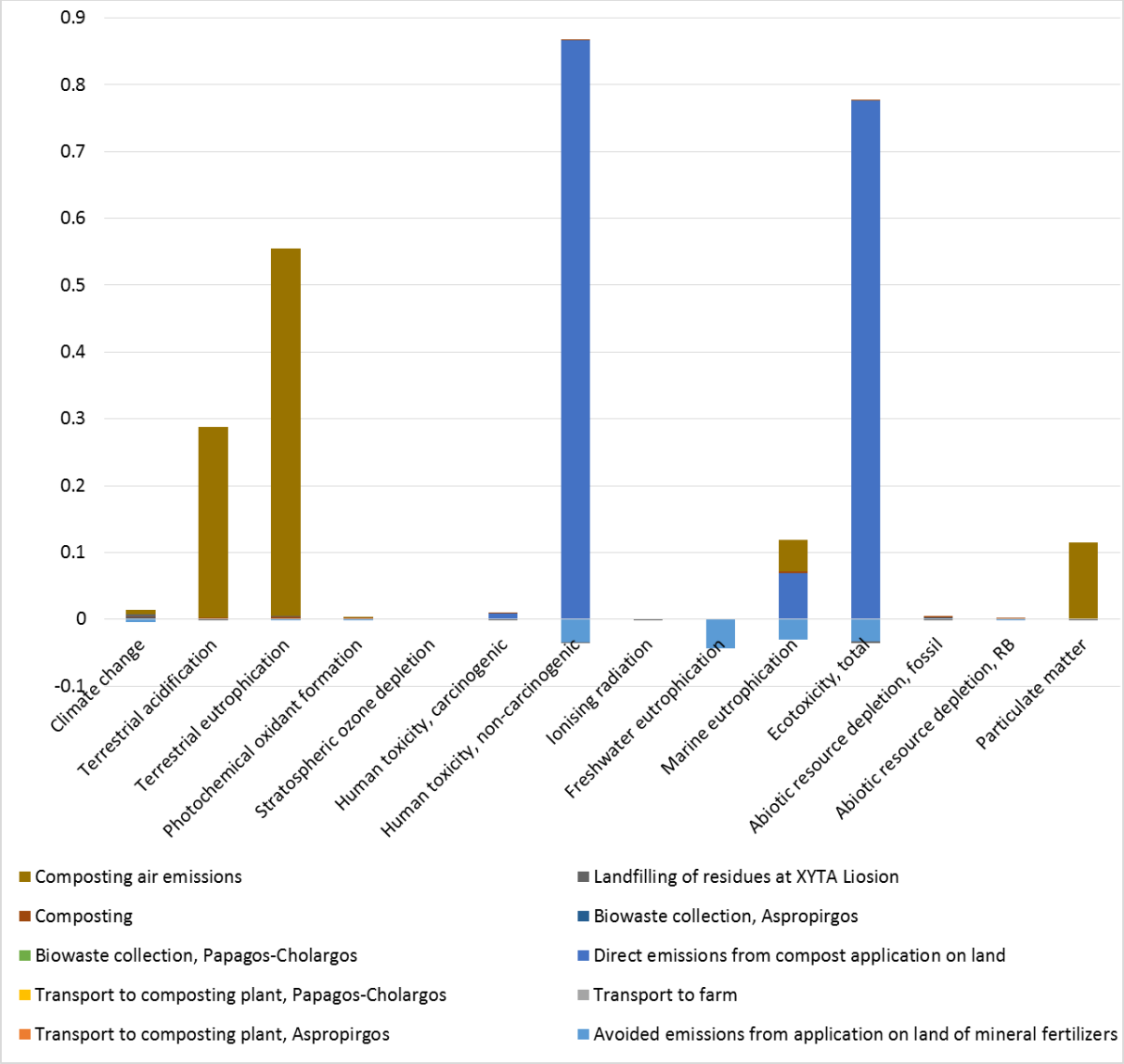
Σχήμα 96: Αποτελέσματα ΑΚΖ για τη μέθοδο ΥΜ1: Ταφή (ΙΑ)

11.3.6.2 Μέθοδος ΥΜ2: Κομποστοποίηση

Η κλειστή κομποστοποίηση – Μέθοδος ΥΜ2 γενικά παρουσιάζει πολύ χαμηλές θετικές τιμές στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, ωστόσο παρουσιάζει υψηλές τιμές στις κατηγορίες «Ευτροφισμός, έδαφος», «Οξύνιση, έδαφος» και «Αιωρούμενα σωματίδια» οι οποίες οφείλονται κυρίως στις αέριες εκπομπές αμμωνίας από τη διεργασία της κομποστοποίησης, αλλά και στις κατηγορίες «Ανθρώπινη τοξικότητα – μη καρκινογενής», «Οικοτοξικότητα» και «Ευτροφισμός, θάλασσα», οι οποίες οφείλονται κυρίως στις εκπομπές βαρέων μετάλλων από τη χρήση του παραγόμενου κόμποστ στο έδαφος. Οι αρνητικές εκπομπές (οφέλη) προκύπτουν από την υποκατάσταση των ανόργανων λιπασμάτων από το κόμποστ (Σχήμα 97).

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την ΥΜ2 ανέρχονται στα 96 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ για την κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», δηλαδή 110 kg CO_{2eq} περισσότερα σε σχέση με το Σ1. Η ανοιχτή κομποστοποίηση παρουσιάζει παρόμοιο προφίλ, με τη διαφορά ότι έχει υψηλότερες εκπομπές στην κατηγορία της κλιματικής αλλαγής σε σχέση με την κλειστή κομποστοποίηση δεδομένου ότι δεν

υπάρχουν βιοφιλτρα για την κατακράτηση των εκπομπών. Από την άλλη, στην περίπτωση της κλειστής κομποστοποίησης έχουμε υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 97: Αποτελέσματα ΑΚΖ για τη μέθοδο ΥΜ2: Κομποστοποίηση (ΙΑ)

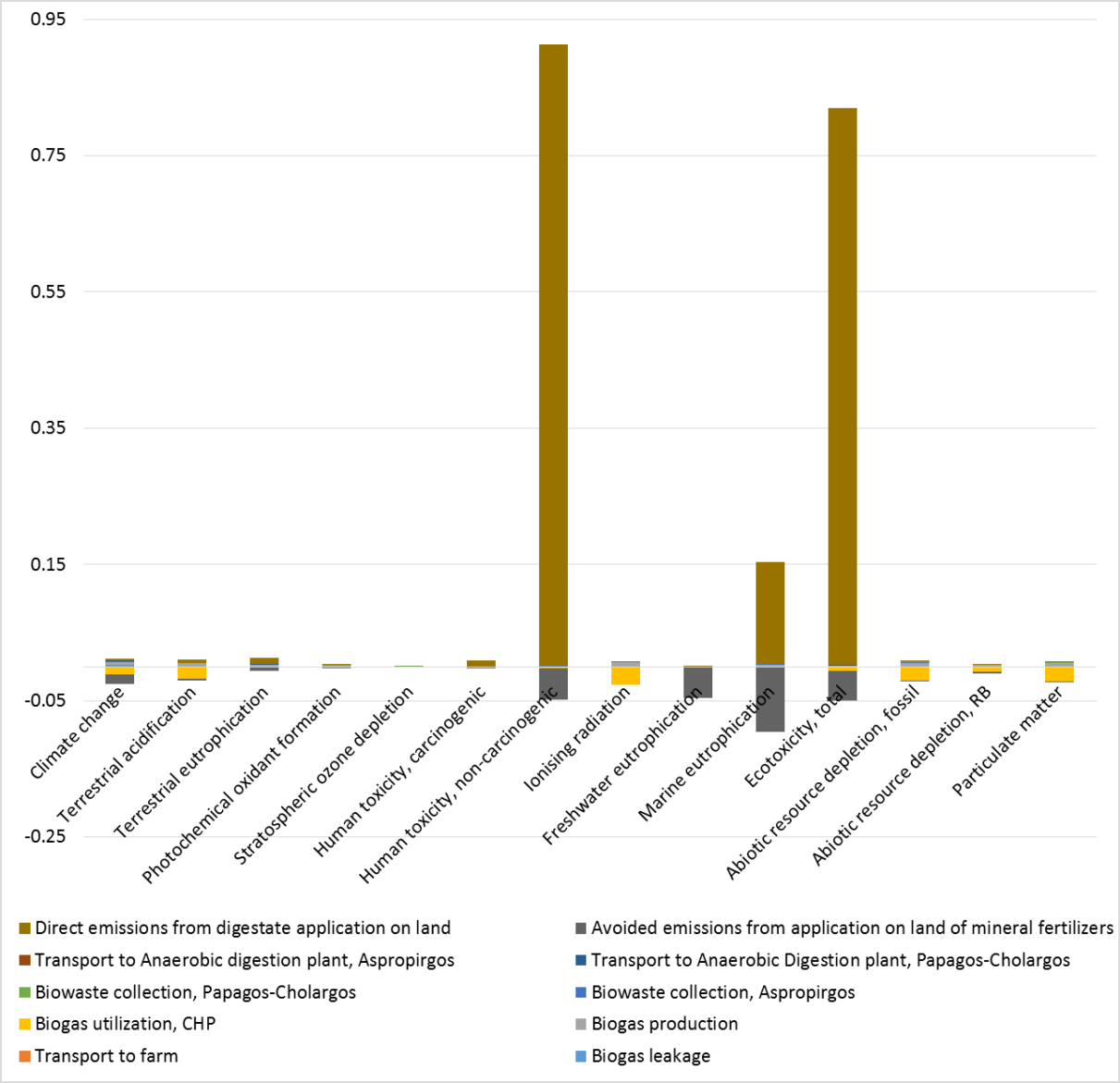
11.3.6.3 Μέθοδος ΥΜ3: Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια χώνευση – Μέθοδος ΥΜ3 παρουσιάζει καθαρό όφελος στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων, αλλά παρουσιάζει ταυτόχρονα και συγκριτικά μεγάλες επιπτώσεις σε κάποιες άλλες κατηγορίες («Ανθρώπινη τοξικότητα, μη καρκινογενής», «Οικοτοξικότητα», «Ευτροφισμός, θάλασσα»), οι οποίες σχετίζονται με το στάδιο της εφαρμογής στο έδαφος του χωνεύματος.

Οι κύριες εκπομπές που σχετίζονται με την κατηγορία «Ανθρώπινη τοξικότητα, μη καρκινογενής» είναι οι εκπομπές στο έδαφος ψευδάργυρου, μόλυβδου και υδράργυρου, οι κύριες εκπομπές της κατηγορίας «Οικοτοξικότητα» είναι οι εκπομπές στο έδαφος ψευδάργυρου, χαλκού και νικέλιου και οι κύριες εκπομπές της κατηγορίας «Ευτροφισμός, θάλασσα» είναι οι εκπομπές νιτρικών στα ύδατα και οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου στον αέρα.

Οι αρνητικές εκπομπές (οφέλη) προκύπτουν από την υποκατάσταση των ανόργανων λιπασμάτων από το κόμποστ και από την υποκατάσταση συμβατικής ενέργειας με την ενέργεια που παράγεται από το βιοαέριο (Σχήμα 98).

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την μέθοδο ΥΜ3 ανέρχονται στα -106 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ για την κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», δηλαδή 90 kg CO_{2eq} λιγότερα σε σχέση με το Σ1.



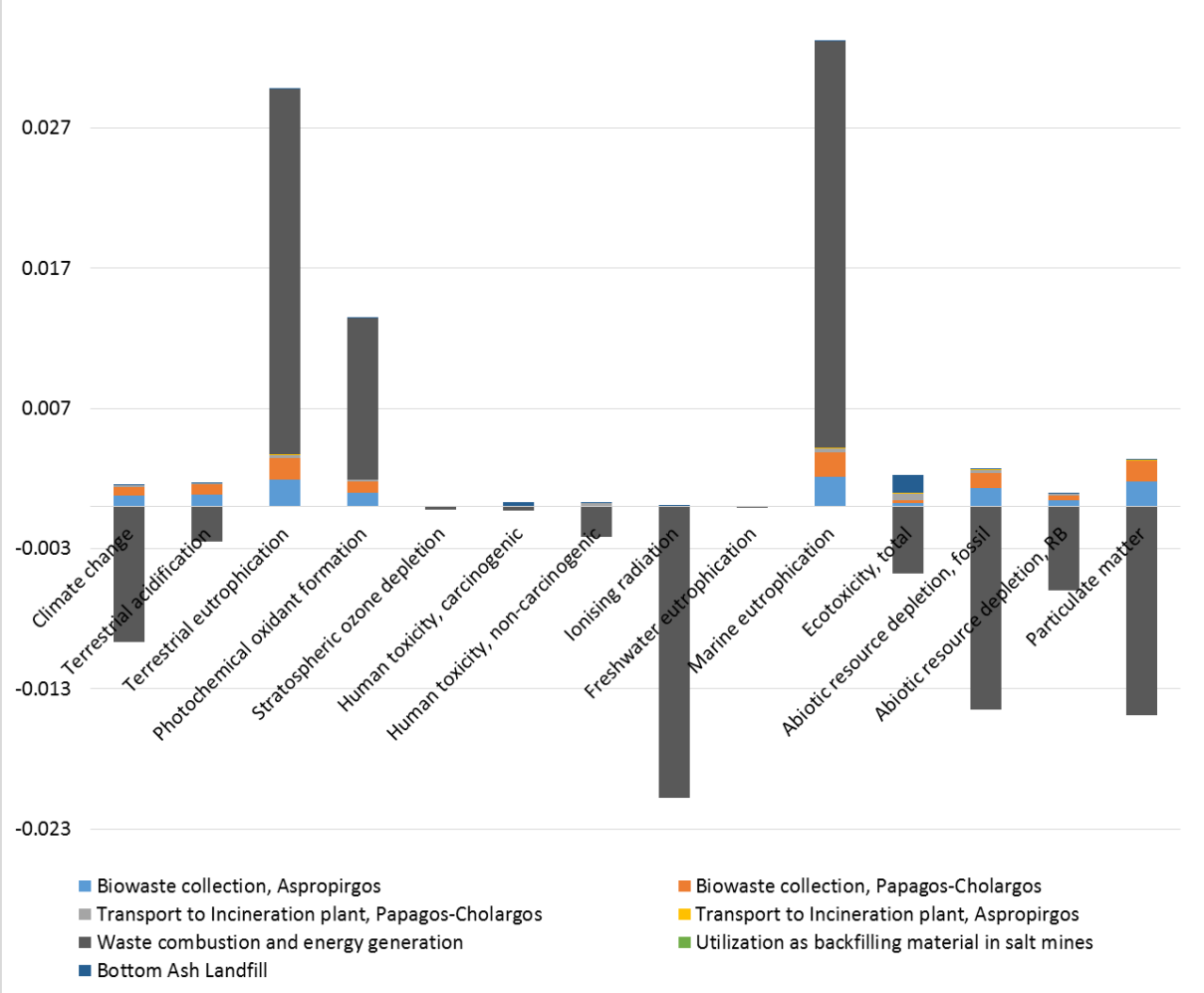
Σχήμα 98: Αποτελέσματα ΑΚΖ για τη μέθοδο ΥΜ3: Αναερόβια χώνευση (ΙΑ)

11.3.6.4 Μέθοδος ΥΜ4: Καύση με παραγωγή ενέργειας

Η καύση με παραγωγή ενέργειας – Μέθοδος ΥΜ4 γενικά παρουσιάζει καλές επιδόσεις σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, με καθαρό όφελος στις περισσότερες από αυτές. Οι κυριότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις παρατηρούνται στην κατηγορία «Ευτροφισμός – έδαφος», «Ευτροφισμός – θάλασσα» και «Φωτοχημικό νέφος», οι οποίες οφείλονται στις εκπομπές οξειδίων του αζώτου που σχετίζονται με τη διεργασία της καύσης.

Οι αποφευχθείσες εκπομπές σχετίζονται με την υποκατάσταση συμβατικού ηλεκτρισμού λόγω της παραγωγής ηλεκτρισμού από την καύση των βιοαποβλήτων.

Οι συνολικές καθαρές εκπομπές για την ΥΜ4 ανέρχονται στα -65 kg CO_{2eq} ανά τόνο νωπού ΒΑΑ για την κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», δηλαδή 49 kg CO_{2eq} λιγότερα σε σχέση με το Σ1.



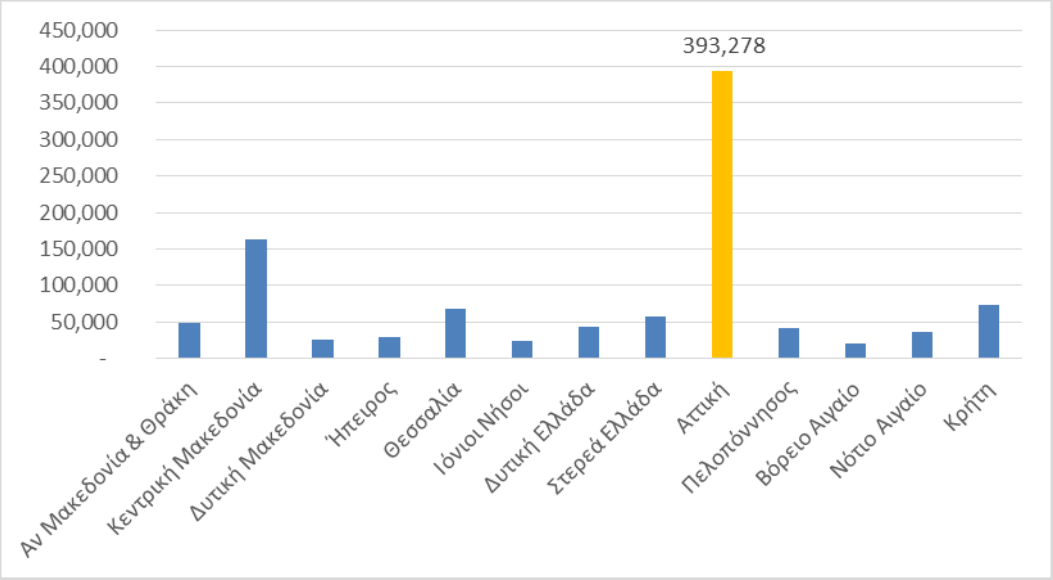
Σχήμα 99: Αποτελέσματα ΑΚΖ για τη μέθοδο ΥΜ4: Καύση (ΙΑ)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12. Ερευνητική ενότητα Β.2: Αξιολόγηση οικονομικής βιωσιμότητας συστήματος βιοδιϋλιστηρίου

Πρώτο και απαραίτητο βήμα για τη χρηματοοικονομική ανάλυση είναι ο προσδιορισμός της δυναμικότητας του συστήματος, δηλαδή ο προσδιορισμός της ποσότητας των βιοαποβλήτων που θα διαχειρίζεται το σύστημα. Η δυναμικότητα αυτή ωστόσο θα πρέπει να είναι συμβατή με τη διαθεσιμότητα των παραγόμενων βιοαποβλήτων, τους στόχους προδιαλογής και τις προγραμματισμένες μεθόδους διαχείρισης των ΒΑΑ στην Ελλάδα, σύμφωνα με τον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Αποβλήτων (ΥΠΕΚΑ, 2015).

Σύμφωνα με τον ΕΣΔΑ, το 2020 στην Ελλάδα εκτιμάται ότι θα παράγονται 2,560,500 τόνοι οργανικών αποβλήτων στο ρεύμα των ΑΣΑ (Αστικά Στερεά Απόβλητα), ενώ στόχος είναι να ανακτάται το 40% της παραγωγής μέσω χωριστής συλλογής (προδιαλογής) και επεξεργασίας. Για το λόγο αυτό κάθε περιφέρεια της Ελλάδας μέσα από τους Περιφερειακούς Σχεδιασμούς Διαχείρισης Αποβλήτων (ΠΕΣΔΑ), έχει θέσει τους αντίστοιχους στόχους ανάκτησης και προβλέπει τη δημιουργία υποδομών για τη χωριστή συλλογή και επεξεργασία των οργανικών αποβλήτων. Δεδομένου ότι (α) η κομποστοποίηση αποτελεί την προβλεπόμενη κεντρική μέθοδο επεξεργασίας των οργανικών αποβλήτων, και ότι (β) η εφαρμογή του εξεταζόμενου συστήματος διαχείρισης των βιοαποβλήτων για την παραγωγή αιθανόλης δεν θα λειτουργήσει ανταγωνιστικά αλλά συμπληρωματικά του προβλεπόμενου σχεδιασμού, η μέγιστη δυναμικότητα του εξεταζόμενου συστήματος θεωρείται ίση με περίπου 20% της παραγωγής των οργανικών (ή αλλιώς, 50% του στόχου ανάκτησης), ήτοι 512,100 τόνοι. Λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της εγγύτητας και της ελαχιστοποίησης των μεταφορών, καθώς και το γεγονός ότι η μεγαλύτερη ποσότητα των αποβλήτων παράγεται στην Περιφέρεια Αττικής, η μονάδα θα μπορούσε να εγκατασταθεί εντός ή πλησίον της Περιφέρειας Αττικής και να διαχειρίζεται κατά κύριο λόγο μέρος των οργανικών αποβλήτων που παράγονται στην Περιφέρεια αυτή. Η επιλογή της Περιφέρειας Αττικής αιτιολογείται επίσης για άλλο ένα λόγο, καθώς οι παραγόμενες ποσότητες κόμποστ από την κομποστοποίηση του 40% των οργανικών αποβλήτων θα είναι πολύ μεγάλες, και δεδομένου ότι στην Περιφέρεια δεν υπάρχουν σημαντικές γεωργικές εκτάσεις, η τοπική αγορά (ζήτηση) του κόμποστ θα είναι κορεσμένη.

Σύμφωνα με το Σχήμα 100 όπου απεικονίζονται οι στόχοι ανάκτησης των οργανικών αποβλήτων για τις Περιφέρειες της Ελλάδας, το 50% του στόχου ανάκτησης για την Περιφέρεια Αττικής είναι περίπου 200,000 τόνοι. Με βάση τα παραπάνω, θεωρείται ότι η μέγιστη ποσότητα ΒΑΑ που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή αιθανόλης στην Ελλάδα ανέρχεται στους 300,000-350,000 τόνους νωπών ΒΑΑ/έτος (78% υγρασία) ή περίπου **85,000 τόνους ξηρών ΒΑΑ /έτος** (15% υγρασία).



Σχήμα 100: Στόχοι ανάκτησης οργανικών αποβλήτων στις Περιφέρειες της Ελλάδας, σε τόνους (ΥΠΕΚΑ, 2015)

Πίνακας 65: Δυναμικότητα μονάδας παραγωγής βιοαιθανόλης

Δυναμικότητα παραγωγής	85,000	τόνοι ξηρών ΒΑΑ/έτος
	0.070	τόνοι αιθανόλης/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	5,967	τόνοι αιθανόλης/έτος

Για τον υπολογισμό του κεφαλαιουχικού κόστους (CAPEX) της μονάδας, χρησιμοποιήθηκε ως βάση η οικονομική ανάλυση που δίνεται από τους *Humbird et al.* (2011) για μια μονάδα παραγωγής αιθανόλης με βιοχημική μετατροπή λιγνοκυτταρινούχου βιομάζας. Η μονάδα αυτή είναι παρόμοια με την προτεινόμενη μονάδα παραγωγής αιθανόλης από βιοαπόβλητα – Waste2bio, όσον αφορά τις διεργασίες που εφαρμόζονται και τα μέρη από τα οποία αποτελείται. Η κύρια διαφορά αφορά τη δυναμικότητα της μονάδας, η οποία είναι σημαντικά μεγαλύτερη (700,000τν βιομάζας/έτος). Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάλυση κόστους για τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης με βάση τους *Humbird et al.* (2011).

Πίνακας 66: Υπολογισμός συνολικού κεφαλαιουχικού κόστους για μονάδα παραγωγής αιθανόλης 700,000τν βιομάζας/έτος με βάση τους Humbird et al. *(2011)*

Εξοπλισμός μονάδας	**Κόστος (€)**
Βιομετατροπή	48,075,000
Απόσταξη	14,216,250
Επεξεργασία υγρών αποβλήτων	37,050,000
Αποθήκευση	3,750,000
Καυστήρας/γεννήτρια	42,075,000
Βοηθητικά μέρη	5,175,000
Συνολικό κόστος εγκατεστημένου εξοπλισμού	**150,341,250**
Άλλα άμεσα & έμμεσα κόστη (55% ΣΚΚ)	183,750,417

Συνολικό κεφαλαιουχικό κόστος (ΣΚΚ)	**334,091,667**

Προκειμένου να προσαρμοστεί το κεφαλαιουχικό κόστος στη δυναμικότητα της δικής μας μονάδας, χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη εξίσωση εκθετικής κλιμάκωσης:

$$Νέο\ κόστος = (Κόστος\ βάσης)\left(\frac{Νέο\ μέγεθος}{Μέγεθος\ βάσης}\right)^n \qquad \text{[Εξίσωση 12-1]}$$

Όπου *n* είναι ο παράγοντας κλιμάκωσης και ο οποίος κυμαίνεται τυπικά μεταξύ 0.6 και 0.7 (στην παρούσα ανάλυση υιοθετήθηκε n=0.6). Σημειώνεται ότι στη δική μας μονάδα εισέρχονται 85,000 τν ξηρών ΒΑΑ/έτος, ενώ στη μονάδα βιομετατροπής προστίθεται νερό για τις ανάγκες της διεργασίας προκειμένου να επιτευχθεί η αρχική περίπου υγρασία. Επομένως, το μέγεθος βάσης στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται με βάση την ποσότητα ΒΑΑ σε νωπή βάση, ήτοι 336,101 τόνοι νωπών ΒΑΑ/έτος. Με εφαρμογή της ανωτέρω εξίσωσης, το κεφαλαιουχικό κόστος για τη δική μας μονάδα υπολογίζεται στα **215,085,130€**. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη μελέτη αυτή όσον αφορά το κεφαλαιουχικό κόστος των μονάδων ξήρανσης, έχουν δοθεί από τον εκπρόσωπο της εταιρείας *ecoVRS - Vekkos Recycling Solutions*.

Για τον υπολογισμό των προϊόντων κάθε διεργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα ισοζύγιας μάζας και ενέργειας που δημιουργήθηκαν με τη χρήση του εργαλείου ανάλυσης κύκλου ζωής EASETECH που χρησιμοποιήθηκε στο παραδοτέο B4.2 του Waste2bio.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές αγοράς και πώλησης που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους και των εσόδων της μονάδας παραγωγής αιθανόλης και της μονάδας ξήρανσης.

Πίνακας 67: Τιμές αγοράς και πώλησης για υπολογισμό λειτουργικού κόστους και εσόδων

Προϊόν	**Τιμή**	
Αγορά		
Καύσιμο θέρμανσης - Φυσικό αέριο	0.01	€/MJ
Καύσιμο κίνησης – diesel	1.3	€/L
Ηλεκτρισμός (οικιακό νυχτερινό τιμολόγιο ΔΕΗ)	66.1	€/MWh
Πώληση		
Ένζυμα	4	€/L
Αιθανόλη	0.6	€/L
Ηλεκτρισμός από βιοαέριο	99.45	€/MWh
Κόμποστ (40% υγρασία)	25	€/τόνο

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι χρηματοοικονομικές παράμετροι της επένδυσης για τη μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την χρηματοοικονομική ανάλυση.

Πίνακας 68: Χρηματοοικονομικά στοιχεία επένδυσης για τη μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης

Διάρκεια ζωής επένδυσης	25 έτη
Απόσβεση	10 έτη
Επιτόκιο προεξόφλησης (ε)	15% (μονάδα αιθανόλης) 10% (ξηραντήρας)
Φόρος	29%
Ποσοστό δανειοδότησης	70%
Επιτόκιο δανεισμού	3%
Διάρκεια δανείου	15 έτη

Για τον υπολογισμό του κεφαλαιουχικού κόστους σε ετήσια βάση χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη εξίσωση:

$$A = P\frac{\varepsilon(1+\varepsilon)^n}{(1+\varepsilon)^n - 1} \qquad \text{[Εξίσωση 12-2]}$$

Όπου *P* είναι το ποσό της αρχικής επένδυσης, *n* είναι η διάρκεια της επένδυσης και *ε* το επιτόκιο προεξόφλησης.

Στη συνέχεια και με σημείο βάσης τη δυναμικότητα, πρέπει να εξεταστούν παράλληλα και άλλοι παράγοντες που έχουν σημαντική επίδραση στη βιωσιμότητα του προτεινόμενου συστήματος, όπως:

- **Το επίπεδο ξήρανσης** (οικιακό, (δια)δημοτικό, κεντρικό) που εφαρμόζεται. Το επίπεδο ξήρανσης επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τα κόστη για τη μονάδα αιθανόλης και τους δήμους.
- **Ο τρόπος χρηματοδότησης της μονάδας** (ποσοστό δανειοδότησης και ιδίας συμμετοχής, διάρκεια δανείου). Στο πλαίσιο της μελέτης αυτής εξετάζονται ενδεικτικά ποσοστά δανειοδότησης 50%, 70% και 85% του αρχικού κεφαλαίου και διάρκεια δανείου τα 10 και 15 έτη.
- **Το κόστος των ενζύμων** που χρησιμοποιούνται. Το κόστος των ενζύμων μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το αν τα ένζυμα αγοράζονται από εταιρεία ή παράγονται εντός της μονάδας αιθανόλης (επιτόπια παραγωγή-πιο οικονομική εναλλακτική). Το κόστος αγοράς των ενζύμων ανέρχεται σε περίπου 24€/τόνο ξηρής ουσίας ΒΑΑ (4€/Lt), ενώ θεωρείται ότι αν γίνεται επιτόπια ή συνδυασμένη παραγωγή των ενζύμων, το σχετικό κόστος μπορεί να μειωθεί στο 80% περίπου (19€/τόνο ξηρής ουσίας ή 3.2€/lt), σύμφωνα και με τον Johnson (2016).
- **Η τιμή πώλησης της αιθανόλης**. Ως τιμή πώλησης της αιθανόλης (τιμή παραγωγού) θεωρείται τα 0.60€/λίτρο η οποία είναι η επικρατούσα τιμή στην αγορά (EC-JRC, 2015), ωστόσο καθώς η τιμή πώλησης παίζει σημαντικό ρόλο στη βιωσιμότητα του συστήματος, στο πλαίσιο της μελέτης αυτής εξετάζονται και υψηλότερες τιμές (π.χ. 0.65€/λίτρο), οι οποίες μπορούν να επιτευχθούν μέσω κρατικής ενίσχυσης αλλά και χαμηλότερες τιμές (π.χ. 0.50€/λίτρο) λόγω διακυμάνσεων της τιμής του πετρελαίου στην αγορά.

Αναφορικά με το επίπεδο ξήρανσης, κυρίαρχο ρόλο για την εξέταση της βιωσιμότητας του συστήματος παίζουν οι δήμοι. Θα πρέπει επομένως να εξεταστεί ποιο από τα προτεινόμενα συστήματα ξήρανσης συμφέρει οικονομικά τους δήμους να επιλέξουν. Για το λόγο αυτό, στις επόμενες ενότητες εξετάζονται

τα πιθανά εναλλακτικά χαρακτηριστικά της επένδυσης για καθένα από τα διαφορετικά επίπεδα ξήρανσης.

12.1.1 Αποκεντρωμένη ξήρανση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα στοιχεία της επένδυσης τόσο για τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης όσο και για τους δήμους που αποφασίζουν να ξηράνουν τα βιοαπόβλητα που συλλέγουν σε αποκεντρωμένη μονάδα ξήρανσης προτού τα στείλουν στην κεντρική μονάδα παραγωγής αιθανόλης.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι ποσότητες των παραγόμενων προϊόντων στη μονάδα αιθανόλης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των εσόδων από την πώλησή τους για την περίπτωση του ηλεκτρισμού, της αιθανόλης και του κόμποστ ή των εξόδων για την περίπτωση της θερμότητας.

Πίνακας 69: Ισοζύγιο προϊόντων στη μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης (ΑΞ)

	Ηλεκτρισμός (MJ/τόνο νωπών ΒΑΑ)	**Θερμότητα (MJ/τόνο νωπών ΒΑΑ)**	**Αιθανόλη (kg/ τόνο νωπών ΒΑΑ)**	**Κόμποστ (kg/ τόνο νωπών ΒΑΑ)**
Κατανάλωση	350	165	-	-
Παραγωγή	655	1200	17.8	118
Πλεόνασμα (+) / Έλλειμμα (-)	**305**	**1035**	**17.8**	**118**

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της μονάδας παραγωγής αιθανόλης από ξηρά βιοαπόβλητα στην περίπτωση της αποκεντρωμένης ξήρανσης, όσον αφορά τα κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη καθώς και τα έσοδα αυτής.

Πίνακας 70: Κεφαλαιουχικά κόστη, λειτουργικά κόστη και έσοδα μονάδας παραγωγής αιθανόλης, αποκεντρωμένη ξήρανση (ΑΞ)

Δυναμικότητα παραγωγής	Εισερχόμενη πρώτη ύλη	85,000	τόνοι ξηρών ΒΑΑ (85% ΞΥ)/έτος
	Παραγωγή αιθανόλης	5,967	τόνοι αιθανόλης/έτος
Κεφαλαιουχικό κόστος	Κόστος εγκατεστημένου εξοπλισμού και Άλλα άμεσα & έμμεσα κόστη	**215,085,130**	**€**
Σταθερά λειτουργικά κόστη	Μισθοδοσία	924,000	€/έτος
	Εργατικό δυναμικό	55	άτομα
	Έμμεσες δαπάνες	1,320,000	€/έτος
	Συντήρηση (0.5% της επένδυσης)	1,075,426	€/έτος
	Σύνολο	**39**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**
Μεταβλητά λειτουργικά κόστη	Προμήθεια ενζύμων	22.8	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Άλλα μεταβλητά κόστη	8.3	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Σύνολο	**31.1**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**
Έσοδα	Αιθανόλη	53.4	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ

	Ηλεκτρισμός	33.3	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Κόμποστ	11.6	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Τέλη διαχείρισης ΒΑΑ	241	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
		61	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
	Σύνολο	**339.5**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**

Με βάση τα δεδομένα του πίνακα αυτού διεξάγεται χρηματοοικονομική ανάλυση της επένδυσης για τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση (Πίνακας 76). Τα τέλη διαχείρισης των ΒΑΑ (241 €/τόνο ξηρών ΒΑΑ) ορίζονται από την ανάλυση αυτή ως η ελάχιστη τιμή η οποία μπορεί να χρεώσει η μονάδα αιθανόλης το δήμο για τη διαχείριση των εισερχόμενων ξηρών ΒΑΑ, προκειμένου η επένδυση να είναι βιώσιμη (ΚΠΑ>0, ΕΒΑ>ε).

Για την περίπτωση της αποκεντρωμένης ξήρανσης σε επίπεδο ενός ή περισσότερων δήμων, επιλέχθηκε ξηραντήρας μεγάλης δυναμικότητας (100 τόνοι/ημέρα), προκειμένου να υπάρχει οικονομία κλίμακας. Τα οικονομικά στοιχεία (σταθερό και λειτουργικό κόστος) της ξήρανσης σε επίπεδο δήμων παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 71: Οικονομικά στοιχεία αποκεντρωμένης ξήρανσης σε επίπεδο δήμων

Δυναμικότητα ξηραντήρα	36,500	τόνοι νωπών ΒΑΑ/έτος
Απαιτούμενος αριθμός ξηραντήρων	9	ξηραντήρες
Συνολική δυναμικότητα ξηραντήρων	**336,101**	**τόνοι νωπών ΒΑΑ/έτος**
Κόστος ξηραντήρα	6,041,000	€/ξηραντήρα
Συνολικό κόστος ξηραντήρων	55,627,055	€
Άλλα άμεσα και έμμεσα κόστη (40%)	22,250,822	€
Κεφαλαιουχικό κόστος (CAPEX)	**77,877,877**	**€**
	9,708,578*	€/έτος
	28.9	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
Απαιτούμενο προσωπικό	174	άτομα
Μισθοδοσία	2,505,338	€/έτος
Συντήρηση	278,135	€/έτος
Σταθερό λειτουργικό κόστος	**8.3**	**€/τόνο νωπών ΒΑΑ**
Φυσικό αέριο	24.7	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
Τέλη διάθεσης ξηρών ΒΑΑ	61	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
Μεταβλητό λειτουργικό κόστος	**85.7**	**€/τόνο νωπών ΒΑΑ**
Λειτουργικό κόστος (OPEX)	**93.9**	**€/τόνο νωπών ΒΑΑ**
Συνολικό κόστος	**122.8**	**€/τόνο νωπών ΒΑΑ**

** υπολογίζεται με βάση την* [Εξίσωση 12-2] *και διάρκεια επένδυσης 17 έτη*

Σύμφωνα με τον ανωτέρω πίνακα, το συνολικό κόστος των δήμων για τη διαχείριση βιοαποβλήτων στην περίπτωση της αποκεντρωμένης ξήρανσης ανέρχεται σε **122.8€/τόνο νωπού αποβλήτου**. Το

κόστος αυτό είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κόστος για την κεντρική ξήρανση (κεφάλαιο 12.1.3), κυρίως λόγω του γεγονότος ότι η παραγόμενη θερμότητα από το βιοαέριο στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης δεν αξιοποιείται για την ικανοποίηση (μέρους) των ενεργειακών αναγκών της ξήρανσης στην περίπτωση που αυτή πραγματοποιείται αλλού (αποκεντρωμένα), με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος διαχείρισης των δήμων με το αντίστοιχο ποσό για την αγορά φυσικού αερίου και την κάλυψη του ενεργειακού ελλείμματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που διεξήχθη στο πλαίσιο της μελέτης αυτής προκειμένου να διερευνηθεί το εύρος της επίδρασης της μεταβολής ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης στο κόστος διαχείρισης των βιοαποβλήτων του δήμου.

Πίνακας 72: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους διαχείρισης δήμων για τη μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης παραγωγής αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση

Μεταβλητές παράμετροι	Κόστος ενζύμων (€/τόνο ξηρού ΒΑΑ)	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	18.2	22.8	18.2
	Τιμή πώλησης αιθανόλης (€/L)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.65	0.6	0.5	0.65
	Ποσοστό δανειοδότησης	70%	85%	50%	70%	70%	70%	70%	85%
	Διάρκεια δανείου	15	15	15	10	15	15	15	15
Αποτελέσματα	Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)	437	702	218	12	691	745	1960	1264
	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (ΕΒΑ)	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	16%
	Περίοδος Αποπληρωμής	6.3	6.6	6.2	8.4	15	6.2	6.1	6.5
	Τέλος εισόδου στη μονάδα αιθανόλης (€/τόνο νωπού ΒΑΑ)	61	53	74	69	6.2	60	64	51
	Κόστη διαχείρισης για το δήμο (€/τόνο νωπού ΒΑΑ)	**122.8**	**114.8**	**135.8**	**130.8**	**121.8**	**121.8**	**125.8**	**112.8**

Όπως φαίνεται από την ανάλυση ευαισθησίας, το συνολικό κόστος διαχείρισης για το δήμο κυμαίνεται από 112.8 €/τόνο νωπού ΒΑΑ στην περίπτωση που ισχύουν ταυτόχρονα οι ευνοϊκότερες συνθήκες για το δήμο (τελευταία στήλη πίνακα) έως 135.8 €/τόνο νωπού ΒΑΑ, όπου το ποσοστό δανειοδότησης έχει μειωθεί στο 50%.

12.1.1.1 Αποκεντρωμένη ξήρανση με καύση ξηρών ΒΑΑ (ΑΞκ)

Προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα να μειωθεί το κόστος διαχείρισης στην αποκεντρωμένη ξήρανση σε σχέση με την περίπτωση της κεντρικής ξήρανσης, εξετάζεται το σενάριο κατά το οποίο μέρος των παραγόμενων ξηρών ΒΑΑ χρησιμοποιείται ως καύσιμο για τη λειτουργία της μονάδας αποκεντρωμένης ξήρανσης, προκειμένου ο δήμος να απαλλαχθεί από το κόστος αυτό. Στην περίπτωση αυτή ωστόσο αυξάνεται το κεφαλαιουχικό κόστος της μονάδας ξήρανσης, όσον αφορά το κόστος του εξοπλισμού καύσης και παραγωγής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, η δυναμικότητα της μονάδας παραγωγής αιθανόλης μειώνεται δεδομένου ότι πλέον ένα μέρος των ξηρών ΒΑΑ δεν θα χρησιμοποιείται για την παραγωγή αιθανόλης.

Το σενάριο αυτό παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση σε σχέση με την αποκεντρωμένη ξήρανση στις κατηγορίες επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή» και «Εξάντληση αβιοτικών ορυκτών πόρων», λόγω της αποφυγής χρήσης ορυκτών καυσίμων για τη ξήρανση (Ενότητα 11.3.5.4). Ωστόσο

πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η ανάκτηση ενέργειας από τα απόβλητα είναι λιγότερο επιθυμητή μέθοδος διαχείρισης σε σχέση με την ανακύκλωση, σύμφωνα με την ιεράρχηση των μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Απόβλητα 2008/98/ΕΚ (βλ. ενότητα 2.1.3), καθώς επιτυγχάνεται εξοικονόμηση πόρων λόγω της υποκατάστασης της παραγωγής ανόργανων λιπασμάτων. Αυτό αντικατοπτρίζεται στην κατηγορία επίπτωσης «Εξάντληση αβιοτικών πόρων-Στοιχεία και ενώσεις», όπου η αποκεντρωμένη ξήρανση με καύση εμφανίζει επιβαρύνσεις, σε αντίθεση με την κεντρική και την αποκεντρωμένη ξήρανση, όπου έχουμε εξοικονόμηση πόρων. Αυτό αποδίδεται κυρίως στο γεγονός ότι παράγεται λιγότερο λίπασμα, λόγω της καύσης μέρους των ΒΑΑ και έτσι οι εξοικονομήσεις είναι μικρότερες από τις επιβαρύνσεις.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της μονάδας παραγωγής αιθανόλης από ξηρά βιοαπόβλητα στην περίπτωση της αποκεντρωμένης ξήρανσης με καύση ξηρών ΒΑΑ.

Πίνακας 73: Κεφαλαιουχικά κόστη, λειτουργικά κόστη και έσοδα μονάδας παραγωγής αιθανόλης, αποκεντρωμένη ξήρανση (ΑΞκ)

Δυναμικότητα παραγωγής	Εισερχόμενη πρώτη ύλη	21,404	τόνοι ξηρών ΒΑΑ (85% ΞΥ)/έτος
	Παραγωγή αιθανόλης	1,503	τόνοι αιθανόλης/έτος
Κεφαλαιουχικό κόστος	**Κόστος εγκατεστημένου εξοπλισμού και Άλλα άμεσα & έμμεσα κόστη**	**94,043,440**	**€**
Σταθερά λειτουργικά κόστη	Μισθοδοσία	705,600	€/έτος
	Εργατικό δυναμικό	42	άτομα
	Έμμεσες δαπάνες	1,008,000	€/έτος
	Συντήρηση (0.5% της επένδυσης)	470,217	€/έτος
	Σύνολο	**26**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**
Μεταβλητά λειτουργικά κόστη	Προμήθεια ενζύμων	22.8	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Άλλα μεταβλητά κόστη	8.3	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Σύνολο	**31.1**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**
Έσοδα	Αιθανόλη	13.4	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Ηλεκτρισμός	33.3	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Κόμποστ	11.6	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Τέλη διαχείρισης ΒΑΑ	538	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
		136	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
	Σύνολο	**560.9**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**

Με βάση τα δεδομένα του πίνακα αυτού διεξάγεται χρηματοοικονομική ανάλυση της επένδυσης για τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση μέρους των ξηρών ΒΑΑ (Πίνακας 77). Τα τέλη διαχείρισης των ΒΑΑ (538 €/τόνο ξηρών ΒΑΑ) ορίζονται από την ανάλυση αυτή ως η ελάχιστη τιμή η οποία μπορεί να χρεώσει η μονάδα αιθανόλης το δήμο για τη διαχείριση των ξηρών ΒΑΑ, προκειμένου η επένδυση να είναι βιώσιμη (ΚΠΑ>0, ΕΒΑ>ε). Τονίζεται ότι η τιμή αυτή αφορά τα

εισερχόμενα βιοαπόβλητα στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης και όχι τη συνολική ποσότητα βιοαποβλήτων που διαχειρίζονται οι δήμοι, καθώς μέρος αυτών καίγεται για την παραγωγή ενέργειας και τροφοδότηση των μονάδων ξήρανσης. Επομένως, το κόστος διαχείρισης της συνολικής ποσότητας ΒΑΑ σε επίπεδο δήμων είναι κατά πολύ χαμηλότερο.

Τα οικονομικά στοιχεία (σταθερό και λειτουργικό κόστος) της αποκεντρωμένης ξήρανσης σε επίπεδο δήμων με καύση των ξηρών ΒΑΑ παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 74: Οικονομικά στοιχεία αποκεντρωμένης ξήρανσης σε επίπεδο δήμων με καύση ξηρών ΒΑΑ

Δυναμικότητα ξηραντήρα	36,500	τόνοι νωπών ΒΑΑ/έτος
Απαιτούμενος αριθμός ξηραντήρων	9	ξηραντήρες
Συνολική δυναμικότητα ξηραντήρων	**336,101**	**τόνοι νωπών ΒΑΑ/έτος**
Κόστος ξηραντήρα (συμπ. ηλεκτρογεννήτριας)	7,841,000	€/μονάδα
Συνολικό κόστος μονάδων	72,201,910	€
Άλλα άμεσα και έμμεσα κόστη (40%)	28,880,764	€
Κεφαλαιουχικό κόστος (CAPEX)	**101,082,674**	**€**
	12,601,384*	€/έτος
	37.5	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
Απαιτούμενο προσωπικό	221	άτομα
Μισθοδοσία	3,182,372	€/έτος
Συντήρηση	361,010	€/έτος
Σταθερό λειτουργικό κόστος	**10.5**	**€/τόνο νωπών ΒΑΑ**
Διάθεση ξηρών ΒΑΑ	11,509,993	€/έτος
Μεταβλητό λειτουργικό κόστος	**34.2**	**€/τόνο νωπών ΒΑΑ**
Λειτουργικό κόστος (OPEX)	**44.8**	**€/τόνο νωπών ΒΑΑ**
Συνολικό κόστος	**82.3**	**€/τόνο νωπών ΒΑΑ**

** υπολογίζεται με βάση την εξίσωση [2] και διάρκεια επένδυσης 17 έτη*

Σύμφωνα με τον ανωτέρω πίνακα, το συνολικό κόστος των δήμων για τη διαχείριση βιοαποβλήτων στην περίπτωση της αποκεντρωμένης ξήρανσης με καύση μέρους των ΒΑΑ ανέρχεται σε **82.3€/τόνο νωπού αποβλήτου,** το οποίο είναι **κατά 41€ μικρότερο** σε σχέση με την αποκεντρωμένη ξήρανση χωρίς την καύση ΒΑΑ, αλλά και **κατά 22€ μικρότερο** σε σχέση με την κεντρική ξήρανση (Ενότητα 12.1.3).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που διεξήχθη στο πλαίσιο της μελέτης αυτής προκειμένου να διερευνηθεί το εύρος της επίδρασης της μεταβολής ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης στο κόστος διαχείρισης των βιοαποβλήτων του δήμου.

Πίνακας 75: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους διαχείρισης δήμων για τη μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης παραγωγής αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση ξηρών ΒΑΑ

Μεταβλητές παράμετροι	Κόστος ενζύμων (€/τόνο ξηρού ΒΑΑ)	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	18.2	22.8	18.2
	Τιμή πώλησης αιθανόλης (€/L)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.65	0.6	0.5	0.65
	Ποσοστό δανειοδότησης	70%	85%	50%	70%	70%	70%	70%	85%
	Διάρκεια δανείου	15	15	15	10	15	15	15	15
Αποτελέσματα	Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)	177	238	251	41	241	255	49	379
	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (ΕΒΑ)	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
	Περίοδος Αποπληρωμής	6.3	6.6	6.2	8.3	6.3	6.3	6.3	6.6
	Τέλος εισόδου στη μονάδα αιθανόλης (€/τόνο νωπού ΒΑΑ)	136	122	159	150	135	135	138	120
	Κόστη διαχείρισης για το δήμο (€/τόνο νωπού ΒΑΑ)	**82.3**	**78.8**	**88.1**	**85.8**	**82.0**	**82.0**	**82.8**	**78.3**

Όπως φαίνεται από την ανάλυση ευαισθησίας, το κόστος διαχείρισης για το δήμο κυμαίνεται από 78.3 €/τόνο νωπού ΒΑΑ στην περίπτωση που ισχύουν ταυτόχρονα οι ευνοϊκότερες συνθήκες για το δήμο (τελευταία στήλη πίνακα) έως 88,1 €/τόνο νωπού ΒΑΑ, όπου όπου το ποσοστό δανειοδότησης έχει μειωθεί στο 50%.

Πίνακας 76: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση σε επίπεδο δήμων, τέλος διαχείρισης ξηρών ΒΑΑ 241€/ τόνο, κόστος ενζύμων 22.8€/τόνο ξηρών ΒΑΑ, τιμή αιθανόλης 0.60€/λίτρο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 85,000 τν/έτος

σε '000 €	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Επενδύσεις	**64526**																									
Έσοδα		**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**	**28860**
Βιοαιθανόλη		4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538
Διαχείριση αποβλήτων		20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502	20502
Ηλεκτρισμός		2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832
Κόμποστ		989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989
Έξοδα		**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**	**5960**
Σταθ. λειτ. κόστη		3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319	3319
Προμ. χημικών		2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641
Μεικτά κέρδη		**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**
Αποσβέσεις		21509	21509	21509	21509	21509	21509	21509	21509	21509	21509															
Τόκοι		4517	4274	4024	3766	3501	3227	2946	2656	2357	2050	1733	1406	1070	724	367										
Φορολ. εισόδημα		**-3125**	**-2882**	**-2632**	**-2375**	**-2109**	**-1836**	**-1554**	**-1264**	**-966**	**-658**	**21167**	**21494**	**21830**	**22176**	**22533**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**	**22900**
Φόροι		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6139	6233	6331	6431	6535	6641	6641	6641	6641	6641	6641	6641	6641	6641	6641
Καθαρά κερδη		-3125	-2882	-2632	-2375	-2109	-1836	-1554	-1264	-966	-658	15029	15261	15499	15745	15998	16259	16259	16259	16259	16259	16259	16259	16259	16259	16259
Χρεολύσια		8095	8338	8588	8846	9111	9384	9666	9956	10255	10562	10879	11205	11542	11888	12245										
Καθαρές Ταμειακές Ροές	**-64526**	**10288**	**10288**	**10288**	**10288**	**10288**	**10288**	**10288**	**10288**	**10288**	**10288**	**4150**	**4055**	**3958**	**3857**	**3754**	**16259**	**16259**	**16259**	**16259**	**16259**	**16259**	**16259**	**16259**	**16259**	**16259**

Καθαρή Παρούσα Αξία	437
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	15%
Περίοδος αποπληρωμής	6.3

Πίνακας 77: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση σε επίπεδο δήμων και καύση ξηρών ΒΑΑ, τέλος διαχείρισης ξηρών ΒΑΑ 474€/ τόνο, κόστος ενζύμων 22.8€/τόνο ξηρών ΒΑΑ, τιμή αιθανόλης 0.60€/λίτρο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 21,404 τν/έτος

σε '000 €	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Επενδύσεις	**28213**																									
Έσοδα		**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**	**12859**
Βιοαιθανόλη		1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143	1143
Διαχείριση αποβλήτων		11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510	11510
Ηλεκτρισμός		144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144
Κόμποστ		63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
Έξοδα		**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**	**2849**
Σταθ. λειτ. κόστη		2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184	2184
Προμ. χημικών		665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665	665
Μεικτά κέρδη		**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**
Αποσβέσεις		9404	9404	9404	9404	9404	9404	9404	9404	9404	9404															
Τόκοι		1975	1869	1759	1647	1531	1411	1288	1161	1031	896	758	615	468	317	161										
Φορολ. εισόδημα		**-1369**	**-1263**	**-1153**	**-1040**	**-924**	**-805**	**-682**	**-555**	**-424**	**-290**	**9253**	**9396**	**9543**	**9694**	**9850**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**	**10011**
Φόροι		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2683	2725	2767	2811	2856	2903	2903	2903	2903	2903	2903	2903	2903	2903	2903
Καθαρά κερδη		-1369	-1263	-1153	-1040	-924	-805	-682	-555	-424	-290	6570	6671	6775	6883	6993	7107	7107	7107	7107	7107	7107	7107	7107	7107	7107
Χρεολύσια		3539	3646	3755	3868	3984	4103	4226	4353	4484	4618	4757	4899	5046	5198	5354										
Καθαρές Ταμειακές Ροές	**-28213**	**4496**	**4496**	**4496**	**4496**	**4496**	**4496**	**4496**	**4496**	**4496**	**4496**	**1813**	**1771**	**1729**	**1685**	**1640**	**7107**	**7107**	**7107**	**7107**	**7107**	**7107**	**7107**	**7107**	**7107**	**7107**

Καθαρή Παρούσα Αξία	177
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	15%
Περίοδος αποπληρωμής	6.3

12.1.2 Οικιακή ξήρανση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα στοιχεία της επένδυσης τόσο για τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης όσο και για τους δήμους όπου τα βιοαπόβλητα ξηραίνονται από τους δημότες στο σπίτι με οικιακούς ξηραντήρες και στη συνέχεια συλλέγονται και μεταφέρονται από το δήμο στην κεντρική μονάδα παραγωγής αιθανόλης.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι ποσότητες των παραγόμενων προϊόντων στη μονάδα αιθανόλης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των εσόδων από την πώλησή τους για την περίπτωση του ηλεκτρισμού, της αιθανόλης και του κόμποστ ή των εξόδων για την περίπτωση της θερμότητας.

Πίνακας 78: Ισοζύγιο προϊόντων στη μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης-ΟΞ

	Ηλεκτρισμός (MJ/τόνο νωπών ΒΑΑ)	**Θερμότητα (MJ/τόνο νωπών ΒΑΑ)**	**Αιθανόλη (kg/ τόνο νωπών ΒΑΑ)**	**Κόμποστ (kg/ τόνο νωπών ΒΑΑ)**
Κατανάλωση	355	179	-	-
Παραγωγή	639	1172	20.6	113
Πλεόνασμα (+) / Έλλειμμα (-)	**284**	**993**	**20.6**	**113**

Η διαφορά στο ισοζύγιο του ανωτέρω πίνακα με το αντίστοιχο της αποκεντρωμένης ξήρανσης (κεφάλαιο 12.1.1) προκύπτει από το γεγονός ότι το υπόστρωμα που προέρχεται από την οικιακή ξήρανση είναι πιο πλούσιο σε σάκχαρα λόγω της άμεσης ξήρανσης και της μείωσης της αποδόμησης τους, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη παραγωγή αιθανόλης και τη μικρότερη παραγωγή των υπόλοιπων προϊόντων.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι με την οικιακή ξήρανση θεωρείται ότι η υγρασία στα ξηραμένα ΒΑΑ ανέρχεται στο 33%, ενώ στην αποκεντρωμένη/κεντρική ξήρανση η υγρασία είναι 15%. Προκειμένου να υπάρχει κοινή βάση σύγκρισης των ποσοτήτων, προσαρμόζεται η ποσότητα των ξηραμένων ΒΑΑ ενώ η ποσότητα των νωπών ΒΑΑ παραμένει σταθερή (336,100 τόνοι). Δεδομένου ότι αυξάνεται η ποσότητα των ξηραμένων ΒΑΑ που εισέρχονται στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης, προσαρμόζεται αντίστοιχα και το κόστος αυτής με βάση την εξίσωση [1].

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της μονάδας παραγωγής αιθανόλης από ξηρά βιοαπόβλητα στην περίπτωση της οικιακής ξήρανσης, όσον αφορά τα κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη καθώς και τα έσοδα αυτής.

Πίνακας 79: Κεφαλαιουχικά κόστη, λειτουργικά κόστη και έσοδα μονάδας παραγωγής αιθανόλης, οικιακή ξήρανση (ΟΞ)

Δυναμικότητα παραγωγής	Εισερχόμενη πρώτη ύλη	108,056	τόνοι ξηρών ΒΑΑ (67% ΞΥ)/έτος
	Παραγωγή αιθανόλης	6,926	τόνοι αιθανόλης/έτος
Κεφαλαιουχικό κόστος	**Κόστος εγκατεστημένου εξοπλισμού και Άλλα άμεσα & έμμεσα κόστη**	**215,085,130**	**€**
Σταθερά λειτουργικά κόστη	Μισθοδοσία	1,024,800	€/έτος
	Εργατικό δυναμικό	61	άτομα
	Έμμεσες δαπάνες	1,464,000	€/έτος

	Συντήρηση (0.5% της επένδυσης)	1,075,426	€/έτος
	Σύνολο	**33**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**
Μεταβλητά λειτουργικά κόστη	Προμήθεια ενζύμων	20.9	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Άλλα μεταβλητά κόστη	5.2	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Σύνολο	**27.7**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**
Έσοδα	Αιθανόλη	48.7	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Ηλεκτρισμός	24.4	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Κόμποστ	8.8	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Τέλη διαχείρισης ΒΑΑ	193	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
		62	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
	Σύνολο	**274.8**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**

Με βάση τα δεδομένα του πίνακα αυτού διεξάγεται χρηματοοικονομική ανάλυση της επένδυσης για τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης στην περίπτωση που η πρώτη ύλη προέρχεται από οικιακή ξήρανση (Πίνακας 82). Τα τέλη διαχείρισης των ΒΑΑ (193 €/τόνο εισερχόμενων στη μονάδα αιθανόλης ξηρών ΒΑΑ) ορίζονται από την ανάλυση αυτή ως η ελάχιστη τιμή η οποία μπορεί να χρεώσει η μονάδα αιθανόλης το δήμο για τη διαχείριση των ΒΑΑ, προκειμένου η επένδυση να είναι βιώσιμη (ΚΠΑ>0, ΕΒΑ>ε).

Στην περίπτωση της ξήρανσης σε επίπεδο οικίας, οι δήμοι θα πρέπει να προμηθεύσουν οικιακούς ξηραντήρες σε κάθε οικία του δήμου. Τα οικονομικά στοιχεία (σταθερό και λειτουργικό κόστος) της οικιακής ξήρανσης παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 80: Οικονομικά στοιχεία οικιακής ξήρανσης

Δυναμικότητα οικ. ξηραντήρα	0.67	τόνοι νωπών ΒΑΑ/έτος
Απαιτούμενος αριθμός οικ. ξηραντήρων	505,415	τεμάχια
Συνολική δυναμικότητα οικ. ξηραντήρων	**336,101**	**τόνοι νωπών ΒΑΑ/έτος**
Κόστος οικ. ξηραντήρα	150	€
Κεφαλαιουχικό κόστος (CAPEX)	**75,812,256**	**€**
	14,067,208 *	€/έτος
	41.9	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
Εξοικονόμηση καυσίμου	-5.8	L/τόνο νωπών ΒΑΑ
	-7.5	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
Κατανάλωση ηλεκτρισμού	1	MWh/τόνο νωπών ΒΑΑ
	66.1	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
Τέλη διάθεσης ξηρών ΒΑΑ	62	€/τόνο νωπών ΒΑΑ

Λειτουργικό κόστος (OPEX)	**120.6**	**€/τόνο νωπών ΒΑΑ**
Συνολικό κόστος	**162.5**	**€/τόνο νωπών ΒΑΑ**

** υπολογίζεται με βάση την εξίσωση [2] και διάρκεια επένδυσης 7 έτη*

Σύμφωνα με τον ανωτέρω πίνακα, το συνολικό κόστος των δήμων για τη διαχείριση βιοαποβλήτων στην περίπτωση της οικιακής ξήρανσης ανέρχεται σε **162.5€/τόνο νωπού αποβλήτου**, το οποίο είναι υψηλότερο σε σχέση με το κόστος της αποκεντρωμένης ή της κεντρικής ξήρανσης σε επίπεδο δήμων. Ωστόσο, δεδομένου ότι το κόστος συλλογής και μεταφοράς των βιοαποβλήτων μειώνεται αναλογικά με τη μείωση της μάζας των ΒΑΑ λόγω της οικιακής ξήρανσης (περίπου στο ένα τρίτο), επιτυγχάνεται μια εξοικονόμηση στα μεταφορικά της τάξης των 7.5€/τόνο νωπών ΒΑΑ, με αποτέλεσμα να μειώνεται αντίστοιχα και το συνολικό κόστος της οικιακής ξήρανσης (**155€/τόνο νωπού αποβλήτου)**.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που διεξήχθη στο πλαίσιο της μελέτης αυτής προκειμένου να διερευνηθεί το εύρος της επίδρασης της μεταβολής ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης στο κόστος διαχείρισης των βιοαποβλήτων του δήμου για την περίπτωση της οικιακής ξήρανσης.

Πίνακας 81: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους διαχείρισης δήμων για τη μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης παραγωγής αιθανόλης με οικιακή ξήρανση

Μεταβλητές παράμετροι	Κόστος ενζύμων (€/τόνο ξηρού ΒΑΑ)	20.9	20.9	20.9	20.9	20.9	16.7	20.9	20.9	16.7
	Τιμή πώλησης αιθανόλης (€/L)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.65	0.6	0.5	0.6	0.65
	Ποσοστό δανειοδότησης	70%	85%	50%	70%	70%	70%	70%	70%	85%
	Διάρκεια δανείου	15	15	15	10	15	15	15	15	15
	Κόστος οικ. ξηραντήρα (€)	150	150	150	150	150	150	150	100	150
Αποτελέσματα	Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)	1833	67	1278	1140	423	502	590	1833	1389
	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (ΕΒΑ)	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	16%
	Περίοδος Αποπληρωμής	6.1	6.7	6.1	8.2	6.3	6.3	6.3	6.1	6.4
	Τέλος εισόδου στη μονάδα αιθανόλης (€/τόνο νωπού ΒΑΑ)	62	53	75	70	60	60	64	62	51
	Κόστη διαχείρισης για το δήμο (€/τόνο νωπού ΒΑΑ)	**162.5**	**153.5**	**175.5**	**170.5**	**160.5**	**160.5**	**164.5**	**148.5**	**151.5**

Όπως φαίνεται από την ανάλυση ευαισθησίας, το κόστος διαχείρισης για το δήμο κυμαίνεται από 151.5 €/τόνο νωπού ΒΑΑ στην περίπτωση που ισχύουν ταυτόχρονα οι ευνοϊκότερες συνθήκες για το δήμο (τελευταία στήλη πίνακα) έως 175.5 €/τόνο νωπού ΒΑΑ, το οποίο αναμένεται στην περίπτωση που η το ποσοστό δανειοδότησης μειωθεί στο 50%. Δεδομένου ότι το κόστος προμήθειας των οικιακών ξηραντήρων παίζει σημαντικό ρόλο στο κόστος διαχείρισης του δήμου, διερευνάται επίσης η πιθανότητα να μειωθεί το κόστος στα 100€/ξηραντήρα. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι για τη μείωση των 50€ στο κόστος του ξηραντήρα, αναμένεται μείωση περίπου 14€ στο συνολικό κόστος διαχείρισης του δήμου.

Πίνακας 82: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας αιθανόλης με ξήρανση ΒΑΑ σε οικιακό επίπεδο, τέλος διαχείρισης ξηρών ΒΑΑ 184€/ τόνο, κόστος ενζύμων 20.9€/τόνο ξηρών ΒΑΑ, τιμή αιθανόλης 0.60€/λίτρο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 85,000 τν/έτος

σε '000 €	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Επενδύσεις	**64526**																									
Έσοδα		**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**	**29691**
Βιοαιθανόλη		5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267	5267
Διαχείριση αποβλήτων (fees)		20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838	20838
Ηλεκτρισμός		2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633	2633
Κόμποστ		952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952	952
Έξοδα		**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**	**6560**
Σταθ. λειτ. κόστη		3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564	3564
Προμ. χημικών		2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996	2996
Μεικτά κέρδη		**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**
Αποσβέσεις		21509	21509	21509	21509	21509	21509	21509	21509	21509	21509															
Τόκοι		4517	4274	4024	3766	3501	3227	2946	2656	2357	2050	1733	1406	1070	724	367										
Φορολ. εισόδημα		**-2894**	**-2651**	**-2401**	**-2144**	**-1878**	**-1605**	**-1323**	**-1033**	**-735**	**-427**	**21398**	**21725**	**22061**	**22407**	**22764**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**	**23131**
Φόροι		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6206	6300	6398	6498	6601	6708	6708	6708	6708	6708	6708	6708	6708	6708	6708
Καθαρά κερδη		-2894	-2651	-2401	-2144	-1878	-1605	-1323	-1033	-735	-427	15193	15425	15663	15909	16162	16423	16423	16423	16423	16423	16423	16423	16423	16423	16423
Χρεολύσια		8095	8338	8588	8846	9111	9384	9666	9956	10255	10562	10879	11205	11542	11888	12245										
Καθαρές Ταμειακές Ροές	**-64526**	**10519**	**10519**	**10519**	**10519**	**10519**	**10519**	**10519**	**10519**	**10519**	**10519**	**4314**	**4219**	**4122**	**4021**	**3918**	**16423**	**16423**	**16423**	**16423**	**16423**	**16423**	**16423**	**16423**	**16423**	**16423**

Καθαρή Παρούσα Αξία	1833
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	15%
Περίοδος αποπληρωμής	6.1

12.1.3 Κεντρική ξήρανση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα στοιχεία της επένδυσης για τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης στην οποία θα πραγματοποιείται επίσης η ξήρανση των νωπών βιοαποβλήτων. Στην περίπτωση αυτή, η μονάδα αναλαμβάνει το κόστος της ξήρανσης ενώ οι δήμοι πληρώνουν στη μονάδα ένα τέλος διαχείρισης των νωπών ΒΑΑ.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι ποσότητες των παραγόμενων προϊόντων στη μονάδα αιθανόλης, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των εσόδων από την πώλησή τους για την περίπτωση του ηλεκτρισμού, της αιθανόλης και του κόμποστ ή των εξόδων για την περίπτωση της θερμότητας.

Πίνακας 83: Ισοζύγιο προϊόντων στη μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης-ΚΞ

	Ηλεκτρισμός (MJ/τόνο νωπών ΒΑΑ)	**Θερμότητα (MJ/τόνο νωπών ΒΑΑ)**	**Αιθανόλη (kg/ τόνο νωπών ΒΑΑ)**	**Κόμποστ (kg/ τόνο νωπών ΒΑΑ)**
Κατανάλωση	350	2630	-	-
Παραγωγή	655	1200	17.8	118
Πλεόνασμα (+) / Έλλειμμα (-)	**305**	**-1430**	**17.8**	**118**

Η μοναδική διαφορά στο ισοζύγιο του ανωτέρω πίνακα με το αντίστοιχο της αποκεντρωμένης ξήρανσης (κεφάλαιο 12.1.1) προκύπτει από το γεγονός ότι η παραγόμενη θερμότητα από το βιοαέριο στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης δεν επαρκεί πλέον για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της μονάδας λόγω των αυξημένων αναγκών της ξήρανσης, με αποτέλεσμα το ενεργειακό έλλειμμα να καλύπτεται με την αγορά φυσικού αερίου. Τα βασικά χαρακτηριστικά της μονάδας παραγωγής αιθανόλης όσον αφορά τα κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη καθώς και τα έσοδα αυτής παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 84: Κεφαλαιουχικά κόστη, λειτουργικά κόστη και έσοδα μονάδας παραγωγής αιθανόλης περιλ. ξήρανσης (ΚΞ), δυναμικότητα 85,000 τν ξηρών ΒΑΑ/έτος

Δυναμικότητα παραγωγής	Εισερχόμενη πρώτη ύλη	336,101	τόνοι νωπών ΒΑΑ/έτος
		85,000	τόνοι ξηρών ΒΑΑ/έτος
	Παραγωγή αιθανόλης	5,967	τόνοι αιθανόλης/έτος
Κεφαλαιουχικό κόστος	Κόστος εγκατεστημένου εξοπλισμού μονάδας αιθανόλης και Άλλα άμεσα & έμμεσα κόστη	215,085,130	€
	Κόστος ξηραντήρων & Άλλα άμεσα και έμμεσα κόστη ξήρανσης (20%)	77,877,877	€
	Σύνολο	**292,963,006**	**€**
Σταθερά λειτουργικά κόστη	Μισθοδοσία	3,262,316	€/έτος
	Εργατικό δυναμικό	194	άτομα
	Έμμεσες δαπάνες	4,660,451	€/έτος
	Συντήρηση (0.5% της επένδυσης)	1,464,815	€/έτος

	Σύνολο	**110**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**
Μεταβλητά λειτουργικά κόστη	Προμήθεια ενζύμων	22.8	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Προμήθεια φυσικού αερίου	56.5	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Άλλα μεταβλητά κόστη	8.3	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Σύνολο	**87.6**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**
Έσοδα	Αιθανόλη	53.0	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Ηλεκτρισμός	33.3	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Κόμποστ	11.6	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Τέλη διαχείρισης ΒΑΑ	411	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
		104	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
	Σύνολο	**509.6**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**

Με βάση τα δεδομένα του πίνακα αυτού διεξάγεται χρηματοοικονομική ανάλυση της επένδυσης για τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης με κεντρική ξήρανση (Πίνακας 88). Τα τέλη διαχείρισης των ΒΑΑ ορίζονται από την ανάλυση αυτή ως η ελάχιστη τιμή η οποία μπορεί να χρεώσει η μονάδα αιθανόλης το δήμο για τη διαχείριση των ΒΑΑ, προκειμένου η επένδυση να είναι βιώσιμη (ΚΠΑ>0, ΕΒΑ>ε). Σύμφωνα με τον ανωτέρω πίνακα, το συνολικό κόστος των δήμων για τη διαχείριση βιοαποβλήτων στην περίπτωση της κεντρικής ξήρανσης ανέρχεται σε **104€/τόνο νωπού αποβλήτου** (411€/τόνο ξηρού ΒΑΑ). Το κόστος αυτό είναι μικρότερο από το αντίστοιχο κόστος για την αποκεντρωμένη ξήρανση (κεφάλαιο 12.1.3), κυρίως λόγω του γεγονότος ότι η παραγόμενη θερμότητα από το βιοαέριο στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης αξιοποιείται για την ικανοποίηση (μέρους) των ενεργειακών αναγκών της ξήρανσης, σε αντίθεση με την περίπτωση που αυτή πραγματοποιείται αλλού (αποκεντρωμένα), με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος διαχείρισης των δήμων με το αντίστοιχο ποσό για την αγορά φυσικού αερίου και την κάλυψη του ενεργειακού ελλείμματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που διεξήχθη στο πλαίσιο της μελέτης αυτής προκειμένου να διερευνηθεί το εύρος της επίδρασης της μεταβολής ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης στο κόστος διαχείρισης των βιοαποβλήτων του δήμου.

Πίνακας 85: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους διαχείρισης δήμων για τη μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης παραγωγής αιθανόλης με κεντρική ξήρανση, δυναμικότητα 85,000 τν ξηρών ΒΑΑ/έτος

Μεταβλητές παράμετροι	Κόστος ενζύμων (€/τόνο ξηρού ΒΑΑ)	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	18.2	22.8	18.2
	Τιμή πώλησης αιθανόλης (€/L)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.65	0.6	0.5	0.65
	Ποσοστό δανειοδότησης	70%	85%	50%	70%	70%	70%	70%	85%
	Διάρκεια δανείου	15	15	15	10	15	15	15	15
Αποτελέσματα	Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)	1154	1306	1174	646	1408	1462	646	1868
	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (ΕΒΑ)	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	16%
	Περίοδος Αποπληρωμής	6.2	6.5	6.1	8.3	6.2	6.2	6.3	6.4
	Κόστος διαχείρισης για το δήμο/Τέλος εισόδου στη μονάδα αιθανόλης (€/τόνο νωπού ΒΑΑ)	**104**	**93**	**122**	**115**	**103**	**103**	**106**	**91**

Όπως φαίνεται από την ανάλυση ευαισθησίας, το κόστος διαχείρισης για το δήμο κυμαίνεται από 91 €/τόνο νωπού ΒΑΑ στην περίπτωση που ισχύουν ταυτόχρονα οι ευνοϊκότερες συνθήκες για το δήμο (τελευταία στήλη πίνακα) έως 122 €/τόνο νωπού ΒΑΑ, όπου το ποσοστό δανειοδότησης έχει μειωθεί στο 50%.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της μονάδας παραγωγής αιθανόλης στην περίπτωση που η δυναμικότητα της μονάδας ήταν η μισή της δυναμικότητας αναφοράς, ήτοι 40,000 τόνοι ξηρών ΒΑΑ/έτος (~160,000 τόνοι νωπών ΒΑΑ/έτος) αντί 85,000 τόνων ξηρών ΒΑΑ/έτος (~340,000 τόνοι νωπών ΒΑΑ/έτος).

Πίνακας 86: Κεφαλαιουχικά κόστη, λειτουργικά κόστη και έσοδα μονάδας παραγωγής αιθανόλης περιλ. ξήρανσης (ΚΞ), δυναμικότητα 40,000 τν ξηρών ΒΑΑ/έτος

Δυναμικότητα παραγωγής	Εισερχόμενη πρώτη ύλη	158,165	τόνοι νωπών ΒΑΑ/έτος
		40,000	τόνοι ξηρών ΒΑΑ/έτος
	Παραγωγή αιθανόλης	2,808	τόνοι αιθανόλης/έτος
Κεφαλαιουχικό κόστος	Κόστος εγκατεστημένου εξοπλισμού μονάδας αιθανόλης και Άλλα άμεσα & έμμεσα κόστη	137,809,389	€
	Κόστος ξηραντήρων & Άλλα άμεσα και έμμεσα κόστη ξήρανσης (20%)	36,648,413	€
	Σύνολο	**174,457,802**	**€**
Σταθερά λειτουργικά κόστη	Μισθοδοσία	2,076,019	€/έτος
	Εργατικό δυναμικό	124	άτομα
	Έμμεσες δαπάνες	2,965,741	€/έτος

	Συντήρηση (0.5% της επένδυσης)	872,289	€/έτος
	Σύνολο	**148**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**
Μεταβλητά λειτουργικά κόστη	Προμήθεια ενζύμων	22.8	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Προμήθεια φυσικού αερίου	56.5	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Άλλα μεταβλητά κόστη	8.3	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Σύνολο	**87.6**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**
Έσοδα	Αιθανόλη	53.0	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Ηλεκτρισμός	33.3	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Κόμποστ	11.6	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
	Τέλη διαχείρισης ΒΑΑ	546	€/τόνο ξηρών ΒΑΑ
		138	€/τόνο νωπών ΒΑΑ
	Σύνολο	**644.0**	**€/τόνο ξηρών ΒΑΑ**

Με βάση τα δεδομένα του πίνακα αυτού διεξάγεται χρηματοοικονομική ανάλυση της επένδυσης για τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης με κεντρική ξήρανση και δυναμικότητα 40,000 τν ξηρών ΒΑΑ/έτος (Πίνακας 89). Τα τέλη διαχείρισης των ΒΑΑ ορίζονται από την ανάλυση αυτή ως η ελάχιστη τιμή η οποία μπορεί να χρεώσει η μονάδα αιθανόλης το δήμο για τη διαχείριση των ΒΑΑ, προκειμένου η επένδυση να είναι βιώσιμη (ΚΠΑ>0, ΕΒΑ>ε). Σύμφωνα με τον ανωτέρω πίνακα, το συνολικό κόστος των δήμων για τη διαχείριση βιοαποβλήτων στην περίπτωση της κεντρικής ξήρανσης με δυναμικότητα 40,000 τν ξηρών ΒΑΑ/έτος ανέρχεται σε **138€/τόνο νωπού αποβλήτου** (546€/τόνο ξηρού ΒΑΑ).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας που διεξήχθη στο πλαίσιο της μελέτης αυτής προκειμένου να διερευνηθεί το εύρος της επίδρασης της μεταβολής ορισμένων κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης στο κόστος διαχείρισης των βιοαποβλήτων του δήμου.

Πίνακας 87: Ανάλυση ευαισθησίας κόστους διαχείρισης δήμων για τη μεταβολή κρίσιμων παραμέτρων της επένδυσης παραγωγής αιθανόλης με κεντρική ξήρανση, δυναμικότητα 40,000 τν ξηρών ΒΑΑ/έτος

Μεταβλητές παράμετροι	Κόστος ενζύμων (€/τόνο ξηρού ΒΑΑ)	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	18.2	22.8	18.2
	Τιμή πώλησης αιθανόλης (€/L)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.65	0.6	0.5	0.65
	Ποσοστό δανειοδότησης	70%	85%	50%	70%	70%	70%	70%	85%
	Διάρκεια δανείου	15	15	15	10	15	15	15	15
Αποτελέσματα	Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ)	521	535	8	313	641	666	282	799
	Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (ΕΒΑ)	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
	Περίοδος Αποπληρωμής	6.3	6.6	6.2	8.3	6.2	6.2	6.3	6.5
	Κόστος διαχείρισης για το δήμο/Τέλος εισόδου στη μονάδα αιθανόλης (€/τόνο νωπού ΒΑΑ)	**138**	**124**	**160**	**152**	**137**	**137**	**140**	**122**

Όπως φαίνεται από την ανάλυση ευαισθησίας, το κόστος διαχείρισης για το δήμο κυμαίνεται από 122 €/τόνο νωπού ΒΑΑ στην περίπτωση που ισχύουν ταυτόχρονα οι ευνοϊκότερες συνθήκες για το δήμο (τελευταία στήλη πίνακα) έως 160 €/τόνο νωπού ΒΑΑ, όπου το ποσοστό δανειοδότησης έχει μειωθεί στο 50%.

Πίνακας 88: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας παραγωγής αιθανόλης με κεντρική ξήρανση, τέλος διαχείρισης νωπών ΒΑΑ 104€/τν, τιμή αιθανόλης 0.60€/λίτρο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 336,101 τν/έτος

σε '000 €	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Επενδύσεις	**87889**																									
Έσοδα		**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**	**43313**
Βιοαιθανόλη		4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538	4538
Διαχείριση αποβλήτων		34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955	34955
Ηλεκτρισμός		2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832	2832
Κόμποστ		989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989	989
Έξοδα		**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**	**12028**
Σταθ. λειτ. κόστη		9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388	9388
Προμ. χημικών		2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641	2641
Μεικτά κέρδη		**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**
Αποσβέσεις		29296	29296	29296	29296	29296	29296	29296	29296	29296	29296															
Τόκοι		6152	5821	5481	5130	4768	4396	4013	3618	3211	2792	2360	1916	1458	986	500										
Φορολ. εισόδημα		**-4164**	**-3833**	**-3493**	**-3142**	**-2780**	**-2408**	**-2025**	**-1630**	**-1223**	**-804**	**28924**	**29369**	**29827**	**30298**	**30784**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**	**31284**
Φόροι		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8388	8517	8650	8786	8927	9072	9072	9072	9072	9072	9072	9072	9072	9072	9072
Καθαρά κερδη		-4164	-3833	-3493	-3142	-2780	-2408	-2025	-1630	-1223	-804	20536	20852	21177	21512	21857	22212	22212	22212	22212	22212	22212	22212	22212	22212	22212
Χρεολύσια		11026	11357	11698	12049	12410	12782	13166	13561	13968	14387	14818	15263	15721	16192	16678										
Καθαρές Ταμειακές Ροές	**-87889**	**14106**	**14106**	**14106**	**14106**	**14106**	**14106**	**14106**	**14106**	**14106**	**14106**	**5718**	**5589**	**5456**	**5319**	**5179**	**22212**	**22212**	**22212**	**22212**	**22212**	**22212**	**22212**	**22212**	**22212**	**22212**

Καθαρή Παρούσα Αξία	1154
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	15%
Περίοδος αποπληρωμής	6.2

Πίνακας 89: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας παραγωγής αιθανόλης με κεντρική ξήρανση, τέλος διαχείρισης νωπών ΒΑΑ 138€/τν, τιμή αιθανόλης 0.60€/λίτρο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 158,165 τν νωπών ΒΑΑ/έτος

σε '000 €	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Επενδύσεις	**52337**																									
Έσοδα		**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**	**25760**
Βιοαιθανόλη		2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135	2135
Διαχείριση αποβλήτων		21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827	21827
Ηλεκτρισμός		1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333	1333
Κόμποστ		465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465	465
Έξοδα		**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**	**7158**
Σταθ. λειτ. κόστη		5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915	5915
Προμ. χημικών		1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243	1243
Μεικτά κέρδη		**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**
Αποσβέσεις		17446	17446	17446	17446	17446	17446	17446	17446	17446	17446															
Τόκοι		3664	3467	3264	3055	2840	2618	2389	2154	1912	1662	1405	1141	868	587	298										
Φορολ. εισόδημα		**-2507**	**-2310**	**-2107**	**-1898**	**-1683**	**-1461**	**-1233**	**-998**	**-756**	**-506**	**17197**	**17461**	**17734**	**18015**	**18304**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**	**18602**
Φόροι		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4987	5064	5143	5224	5308	5395	5395	5395	5395	5395	5395	5395	5395	5395	5395
Καθαρά κερδη		-2507	-2310	-2107	-1898	-1683	-1461	-1233	-998	-756	-506	12210	12398	12591	12791	12996	13208	13208	13208	13208	13208	13208	13208	13208	13208	13208
Χρεολύσια		6566	6763	6966	7175	7390	7612	7840	8075	8318	8567	8824	9089	9362	9642	9932										
Καθαρές Ταμειακές Ροές	**-52337**	**8373**	**8373**	**8373**	**8373**	**8373**	**8373**	**8373**	**8373**	**8373**	**8373**	**3386**	**3309**	**3230**	**3148**	**3064**	**13208**	**13208**	**13208**	**13208**	**13208**	**13208**	**13208**	**13208**	**13208**	**13208**

Καθαρή Παρούσα Αξία	521
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	15%
Περίοδος αποπληρωμής	6.3

12.2 Υλοποίηση σε πλήρη κλίμακα του προτεινόμενου συστήματος & Ανάλυση SWOT

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε περιγραφή της εφαρμογής του προτεινόμενου συστήματος διαχείρισης βιοαποβλήτων σε πλήρη κλίμακα στους δήμους. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε η απαιτούμενη ελάχιστη δυναμικότητα του συστήματος και ανάλογα του επιπέδου ξήρανσης, μελετήθηκαν τα εναλλακτικά σχήματα διαχείρισης, οι βέλτιστες τιμές πώλησης των προϊόντων και το ανώτερο κόστος που μπορούν να επωμιστούν τόσο οι δήμοι όσο και η μονάδα παραγωγής βιοαιθανόλης προκειμένου το σύστημα να είναι βιώσιμο.

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου γίνεται λόγος για το σχετικό πλαίσιο πολιτικής και τον προγραμματισμό στην Ελλάδα, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει και να ενισχύσει ή ακόμα να θέσει εμπόδια στην υλοποίηση του εν λόγω συστήματος.

Ο υφιστάμενος Εθνικός Σχεδιασμός Διαχείρισης Αποβλήτων (ΥΠΕΚΑ, 2015) και οι επιμέρους Περιφερειακοί Σχεδιασμοί Διαχείρισης Αποβλήτων που καταρτίστηκαν με βάση τις επιταγές του Ευρωπαϊκού πλαισίου πολιτικής για τα απόβλητα (2008/98/ΕΚ). Ειδικότερα, τόσο το Ευρωπαϊκό όσο και το εθνικό και περιφερειακό πλαίσιο πολιτικής στην Ελλάδα για τα απόβλητα προβλέπει τη χωριστή διαλογή των βιοαποβλήτων. Το σημείο αυτό είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος διαχείρισης των βιοαποβλήτων. Ωστόσο, η προτεινόμενη μέθοδος διαχείρισης των βιοαποβλήτων σε κεντρικό επίπεδο στην Ελλάδα στον υφιστάμενο σχεδιασμό είναι η κομποστοποίηση. Δεδομένου όμως ότι ο σχεδιασμός αυτός προβλέπεται να αναθεωρείται κάθε πέντε έτη, το προτεινόμενο σύστημα διαχείρισης βιοαποβλήτων θα μπορούσε να ενταχθεί στην αναθεώρηση του σχεδιασμού, ως συμπληρωματική μέθοδος διαχείρισης των βιοαποβλήτων.

Λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο της εγγύτητας και της ελαχιστοποίησης των μεταφορών, καθώς και το γεγονός ότι η μεγαλύτερη ποσότητα των αποβλήτων παράγεται στην Περιφέρεια Αττικής, η μονάδα παραγωγής αιθανόλης θα μπορούσε να εγκατασταθεί εντός ή πλησίον της Περιφέρειας Αττικής και να διαχειρίζεται κατά κύριο λόγο μέρος των οργανικών αποβλήτων που παράγονται στην Περιφέρεια αυτή.

Η επιλογή της Περιφέρειας Αττικής αιτιολογείται επίσης για άλλο ένα λόγο, καθώς οι παραγόμενες ποσότητες κόμποστ από την κομποστοποίηση του 40% των οργανικών αποβλήτων (στόχος ανάκτησης) θα είναι πολύ μεγάλες, και δεδομένου ότι στην Περιφέρεια δεν υπάρχουν σημαντικές γεωργικές εκτάσεις, η τοπική αγορά (ζήτηση) του κόμποστ θα είναι κορεσμένη.

Στη συνέχεια συνοψίζονται τα δυνατά σημεία, οι αδυναμίες, οι ευκαιρίες και οι απειλές που έχουν εντοπιστεί από την ομάδα του έργου Waste2bio για την προώθηση της προτεινόμενης μεθόδου και την υλοποίησή της σε πλήρη κλίμακα μέσα από μια ανάλυση SWOT (Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats).

	Παράγοντες επιτυχίας	**Παράγοντες αποτυχίας**
	ΔΥΝΑΤΑ ΣΗΜΕΙΑ	**ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ**
Εσωτερικοί παράγοντες	– Παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας από διατροφικά απόβλητα – Υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο του υποστρώματος (βιοαπόβλητα) – Υψηλή διαθεσιμότητα υποστρώματος λόγω της μεγάλης και συνεχούς (ολόχρονης) παραγωγής βιοαποβλήτων – Αμελητέος ανταγωνισμός ως προς τις εναλλακτικές χρήσεις του υποστρώματος (βιοαποβλήτων) – Εγγύτητα στα σημεία παραγωγής του υποστρώματος – Ανταγωνιστικότερο κόστος διαχείρισης βιοαποβλήτων σε σχέση με την υφιστάμενη εναλλακτική διαχείρισης (ταφή) – Υψηλότερα έσοδα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους διαχείρισης βιοαποβλήτων (πώληση αιθανόλης) – Έσοδα για τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης από τα τέλη διαχείρισης βιοαποβλήτων σε αντίθεση με το κόστος για την προμήθεια βιομάζας ή ενεργειακών καλλιεργειών – Καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση σε σχέση με τις περισσότερες υφιστάμενες εναλλακτικές μεθόδους διαχείρισης βιοαποβλήτων με βάση ανάλυση κύκλου ζωής – Μηδενική περιβαλλοντική επιβάρυνση από το στάδιο της καλλιέργειας των βιοκαυσίμων για τα βιοαπόβλητα – Διατήρηση ενεργειακού περιεχομένου υποστρώματος λόγω ξήρανσης – δεν απαιτείται άμεση επεξεργασία, δυνατότητα για αποθήκευση	– Υψηλό κεφαλαιουχικό και λειτουργικό κόστος (π.χ. ένζυμα) – Ωριμότητα τεχνολογίας. Ελάχιστες μονάδες παραγωγής βιοαιθανόλης χρησιμοποιούν ως υπόστρωμα απόβλητα – Πιθανότητα παρουσίας προσμίξεων στο υπόστρωμα (λόγω μη ικανοποιητικής διαλογής στην πηγή) μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του συστήματος. Περαιτέρω επενδύσεις μπορούν να γίνουν για απομάκρυνση προσμίξεων, εκπαίδευση πολιτών – Αναγκαιότητα εγκαθίδρυσης συστήματος διαλογής στην πηγή και ενεργής συμμετοχή των πολιτών – Μεταβαλλόμενη απόδοση στην παραγωγή αιθανόλης λόγω διαφοροποίησης στη σύσταση των βιοαποβλήτων – Αναγκαιότητα συνδυασμού με άλλες τεχνολογίες για την επεξεργασία των υπολειμμάτων της διεργασίας

	ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ	ΑΠΕΙΛΕΣ
Εξωτερικοί παράγοντες	– Συνεισφορά στην επίτευξη των στόχων της νομοθεσίας για τη συμμετοχή των βιοκαύσιμων στο ενεργειακό μίγμα των μεταφορών – Υψηλότερη συμμετοχή βιοκαυσίμων 2ης γενιάς στις μεταφορές δεδομένου ότι η διαθεσιμότητα γης και βιομάζας για παραγωγή βιοκαυσίμων 1ης γενιάς στην Ελλάδα είναι περιορισμένη – Συμβολή στην επίτευξη των στόχων της νομοθεσίας για τη διαχείριση των αποβλήτων (εκτροπή από την ταφή, ανάκτηση και ανακύκλωση βιοαποβλήτων) – Προώθηση της κυκλικής οικονομίας και της βιοοικονομίας – Δυνατότητα αξιοποίησης και άλλων ρευμάτων διατροφικών αποβλήτων, όπως από τη βιομηχανία τροφίμων, υπολείμματα βιομάζας και υπηρεσίες εστίασης – Δυνατότητα περαιτέρω αύξησης της απόδοσης και ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής αιθανόλης (π.χ. ανάπτυξη νεών ενζυμικών σκευασμάτων μέσω συνεργασίας ΕΜΠ και NOVOZYMES). Τα πρώτα αποτελέσματα των πειραμάτων στο ΕΜΠ το αποδεικνύουν (παραδοτέο Β3.3) – Δυνατότητα παραγωγής και άλλων προϊόντων προστιθέμενης αξίας στο πλαίσιο του βιοδιϋλιστηρίου όπως βουτανόλη, βιοπολυμερή, PHA – Μεγάλο δυναμικό της αγοράς και εύρος εφαρμογών για την παραγόμενη βιοαιθανόλη (π.χ. καύσιμο κίνησης, διαλύτης)	– Απουσία πρόβλεψης συμπερίληψης της προτεινόμενης μεθόδου διαχείρισης βιοαποβλήτων στα υφιστάμενα σχέδια και στρατηγικές διαχείρισης αποβλήτων – Εμπόδια στην απορρόφηση από την αγορά της αιθανόλης από βιοαπόβλητα σε βιομηχανικές εφαρμογές π.χ. βιομηχανία τροφίμων – Έλλειψη συνεκτικού κανονιστικού πλαισίου με βάση το οποίο θα καθίστανται δυνατές οι εναλλακτικές χρήσεις της αιθανόλης από βιοαπόβλητα και των υπολειμμάτων της διεργασίας – Ανταγωνισμός με άλλες μεθόδους διαχείρισης βιοαποβλήτων που είναι πιο ώριμες (π.χ. αναερόβια χώνευση) και λιγότερο κοστοβόρες (π.χ. κομποστοποίηση) – Υψηλή εξάρτηση της αγοράς αιθανόλης από τις διακυμάνσεις των τιμών του πετρελαίου – Απουσία κινήτρου για τη μετατροπή των κινητήρων και της σχετικής υποδομής για τη χρήση μιγμάτων καυσίμων υψηλής συγκέντρωσης σε αιθανόλη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13. Ερευνητική ενότητα Β3: Πολυκριτηριακή αξιολόγηση βιωσιμότητας συστήματος βιοδιϋλιστηρίου και συμβατικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το εργαλείο πολυκριτηριακής ανάλυσης (Multicriteria Analysis, MCA) που αναπτύχθηκε για τη συγκριτική αξιολόγηση της συνολικής βιωσιμότητας των μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων σε σχέση με το υπό μελέτη σύστημα βιοδιϋλιστηρίου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ομάδες κριτηρίων αξιολόγησης που επιλέχθηκαν καθώς και οι βαθμολογίες που έλαβε η κάθε μέθοδος διαχείρισης αποβλήτων, ενώ στο τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης για τέσσερα διαφορετικά σενάρια, στα οποία μεταβάλλεται η βαρύτητα που λαμβάνει η κάθε ομάδα κριτηρίων.

13.1 Παρουσίαση εργαλείου πολυκριτηριακής ανάλυσης

Το εργαλείο πολυκριτηριακής ανάλυσης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της έρευνας αυτής έχει ως σκοπό την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση των βιοαποβλήτων σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο. Το εργαλείο είναι κατάλληλο και για γενική χρήση, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιονδήποτε ενδιαφέρεται να διερευνήσει τις επιδόσεις της κάθε μεθόδου ή συνδυασμού μεθόδων (εναλλακτικά σενάρια) ως προς τα εξεταζόμενα κριτήρια.

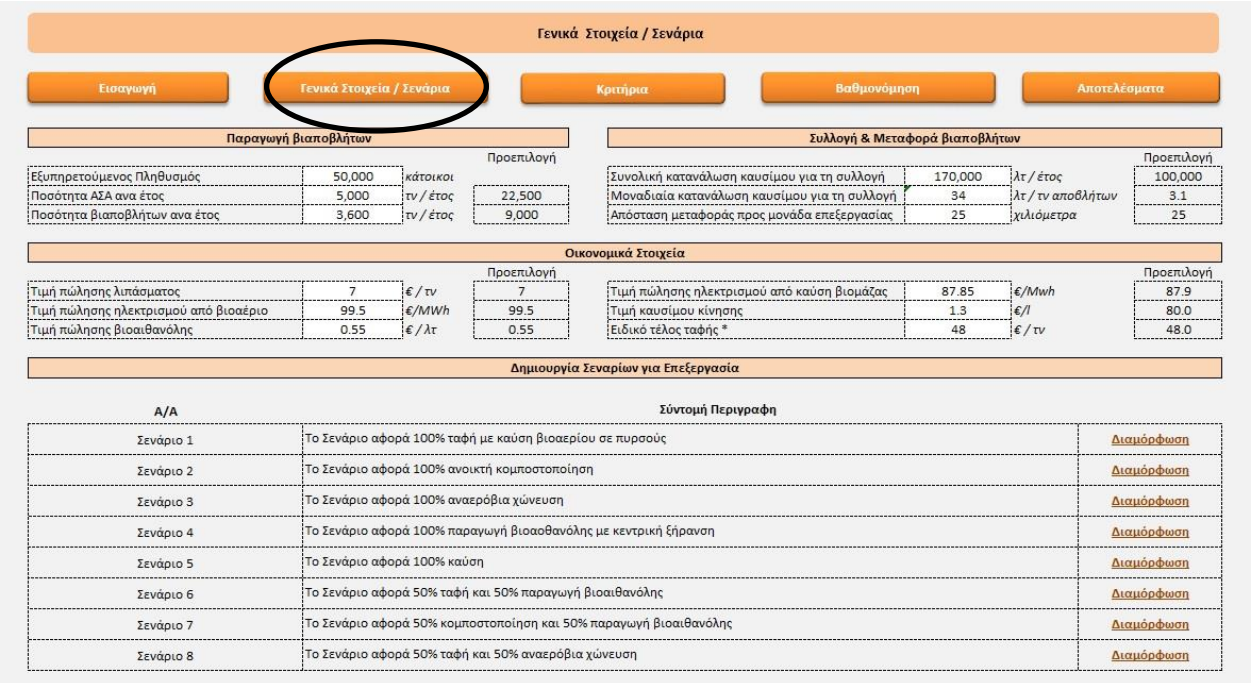
Εν γένει στόχος του εργαλείου είναι η αντιμετώπιση ζητημάτων σχετιζόμενων με θέματα διαχείρισης απορριμμάτων, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα εμπλεκόμενα μέρη και τους παράγοντες που τα επηρεάζουν. Το εν λόγω εργαλείο παρέχει τη δυνατότητα ανάδειξης της βέλτιστης επιλογής-λύσης συνυπολογίζοντας πλήθος κριτηρίων των οποίων η σημαντικότητα μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του εκάστοτε ενδιαφερόμενου φορέα.

Η αξιολόγηση των μεθόδων βασίζεται στην προσέγγιση της *Ανάλυσης Κύκλου Ζωής* καθώς λαμβάνει υπόψη όλο το σύστημα διαχείρισης, από την παραγωγή και τη μεταφορά των αποβλήτων έως την επεξεργασία ή τελική διάθεση των αποβλήτων και την αξιοποίηση των πιθανών προϊόντων. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι προσαρμοσμένα στον ελλαδικό χώρο, όπου αυτό είναι δυνατό.

Το εργαλείο δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα εισαγωγής πλήθους στοιχείων προκειμένου να προσδιοριστεί με τον ακριβέστερο τρόπο οι ανάγκες και οι απαιτήσεις των ενδιαφερόμενων μερών, ώστε να αναδειχθούν με μεγαλύτερη ρεαλιστικότητα οι δυνητικές εναλλακτικές λύσεις.

Ο χρήστης, ανοίγοντας το εργαλείο βρίσκεται στην αρχική καρτέλα όπου εμφανίζονται οι επιλογές 1 έως 7, όπως αυτές παρουσιάζονται στην ακόλουθη εικόνα. Οι επιλογές 1 – 5 δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να περιηγηθεί σε όλες τις καρτέλες του εργαλείου. Οι επιλογές 6 και 7 παραπέμπουν σε βίντεο οδηγιών και στο εγχειρίδιο χρήσεως του εργαλείου, αντίστοιχα.

Η καρτέλα «ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ/ΣΕΝΑΡΙΑ» περιέχει πεδία σχετικά με αρχικά στοιχεία που ο χρήστης μπορεί να εισάγει καθώς και στη διαμόρφωση των σεναρίων.



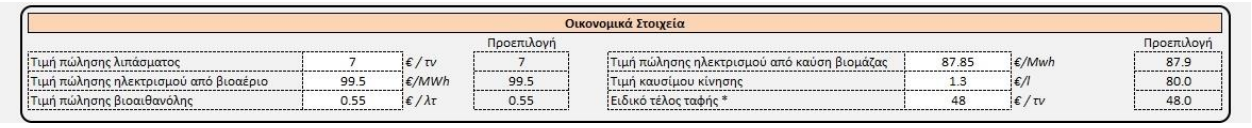
Στο πεδίο «Παραγωγή βιοαποβλήτων» ο χρήστης μπορεί να εισάγει στοιχεία σχετικά με τη συνολική παραγωγή αποβλήτων.

Το πρώτο πεδίο αφορά στο πληθυσμό των κατοίκων, το δεύτερο στην ποσότητα ΑΣΑ ανά έτος ενώ στο τρίτο η ποσότητα βιοαποβλήτων ανά έτος. Το πεδίο «προεπιλογή» αφορά στις προεπιλεγμένες τιμές το εργαλείου.

Στο πεδίο «Συλλογή & Μεταφορά βιοαποβλήτων» εισάγονται από το χρήστη στοιχεία που σχετίζονται με τη συλλογή και μεταφορά. Ο χρήστης συμπληρώνει σε αυτό το πεδίο στοιχεία όπως η συνολική κατανάλωση καυσίμου υπολογιζόμενη σε λίτρα ανά έτος (λτ/έτος), η μοναδιαία κατανάλωση καυσίμου για τη συλλογή υπολογιζόμενη σε λίτρα ανά τόνο αποβλήτων (λτ/τν αποβλήτων) καθώς και την απόσταση προς τη μονάδα επεξεργασίας υπολογιζόμενη σε χιλιόμετρα (χλμ).

Το πεδίο «Οικονομικά Στοιχεία» παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής στοιχείων όπως :

- Τιμή πώλησης λιπάσματος (€/τν)
- Τιμή πώλησης ηλεκτρισμού από βιοαέριο (€/Mwh)
- Τιμή πώλησης βιοαιθανόλης (€/λτ)
- Τιμή πώλησης ηλεκτρισμού από καύση βιομάζας (€/Mwh)
- Τιμή καυσίμου κίνησης (€/λτ)
- Ειδικό τέλος ταφής (€/τν)



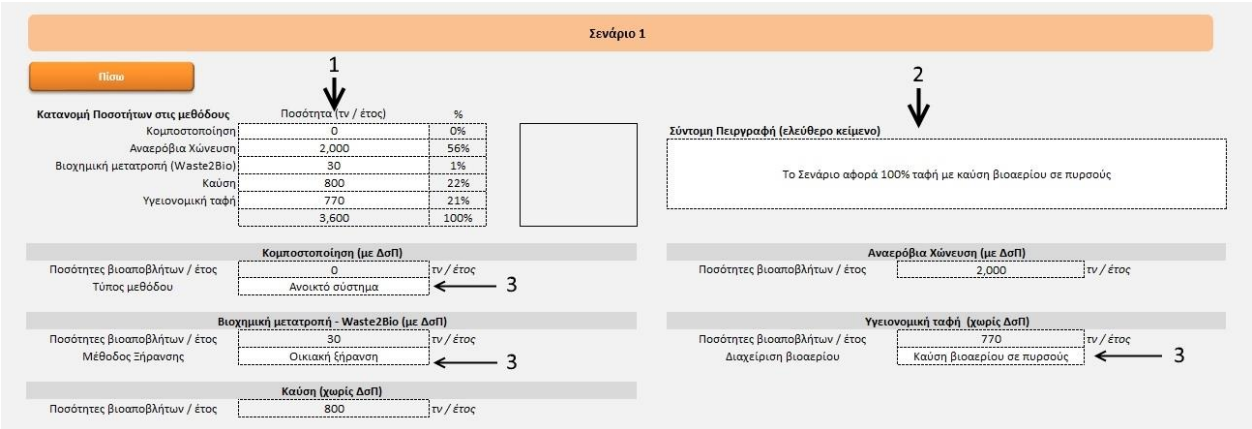
Στο πεδίο «Δημιουργία Σεναρίων για Επεξεργασία» δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει σενάρια και να τα επεξεργαστεί. Εδώ ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τις μεθόδους διαχείρισης απορριμμάτων που επιθυμεί να συγκρίνει. Βάσει των υφιστάμενων διαθέσιμων μεθόδων του εργαλείου, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει ένα πλήθος παραμέτρων για την καθεμιά ξεχωριστά. Στο συγκεκριμένο πεδίο ξεκινώντας από τα αριστερά και καταλήγοντας στα δεξιά παρατηρούνται τρεις στήλες. Στην πρώτη παρατίθενται με τη σειρά τα σενάρια. Ακριβώς δίπλα ακολουθεί σύντομη περιγραφή του εκάστοτε σεναρίου ενώ στην τρίτη και τελευταία στήλη υπάρχει η επιλογή «Διαμόρφωση» η οποία παραπέμπει στην καρτέλα επεξεργασίας του εκάστοτε σεναρίου.

Δημιουργία Σεναρίων για Επεξεργασία

Α/Α	Σύντομή Περιγραφη	
Σενάριο 1	Το Σενάριο αφορά 100% ταφή με καύση βιοαερίου σε πυρσούς	Διαμόρφωση
Σενάριο 2	Το Σενάριο αφορά 100% ανοικτή κομποστοποίηση	Διαμόρφωση
Σενάριο 3	Το Σενάριο αφορά 100% αναερόβια χώνευση	Διαμόρφωση
Σενάριο 4	Το Σενάριο αφορά 100% παραγωγή βιοαιθανόλης με κεντρική ξήρανση	Διαμόρφωση
Σενάριο 5	Το Σενάριο αφορά 100% καύση	Διαμόρφωση
Σενάριο 6	Το Σενάριο αφορά 50% ταφή και 50% παραγωγή βιοαιθανόλης	Διαμόρφωση
Σενάριο 7	Το Σενάριο αφορά 50% κομποστοποίηση και 50% παραγωγή βιοαιθανόλης	Διαμόρφωση
Σενάριο 8	Το Σενάριο αφορά 50% ταφή και 50% αναερόβια χώνευση	Διαμόρφωση

Η καρτέλα επεξεργασίας, όπως αυτή παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, απαρτίζεται από τα εξής κύρια πεδία εισαγωγής δεδομένων:

1. Εισαγωγή ποσοτήτων (τν/έτος) για τις διάφορες μεθόδους επεξεργασίας
2. Εισαγωγή σύντομης περιγραφής σεναρίου (ελεύθερο κείμενο)
3. Επιλογή τύπου μεθόδου

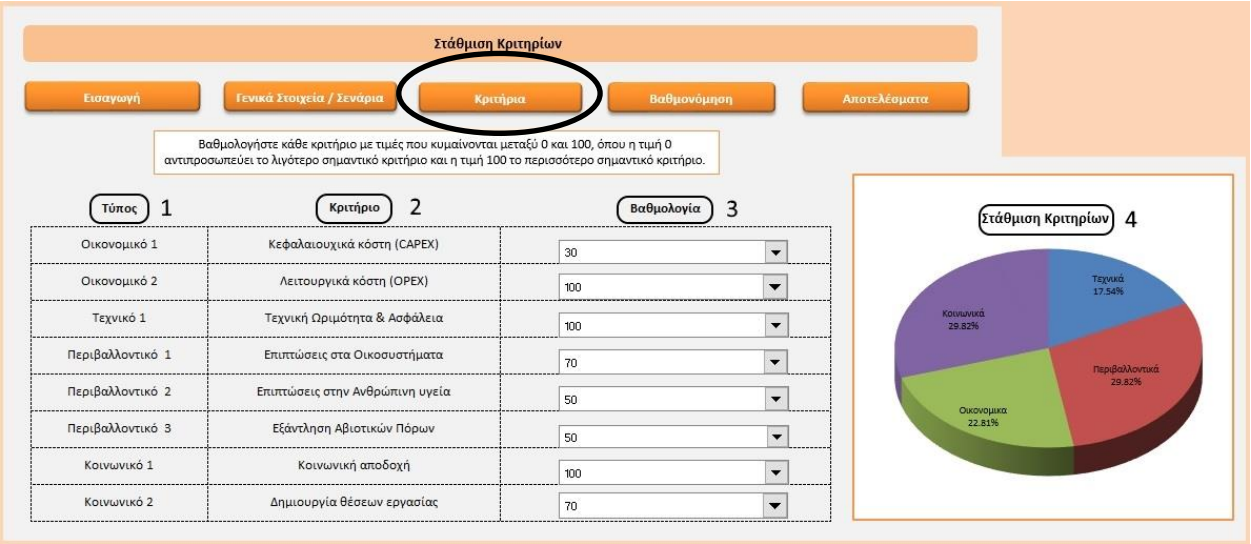


**Στο πεδίο 1 υπολογίζεται επίσης το άθροισμα των ποσοτήτων που εισάγονται στο σύστημα ενώ ταυτόχρονα σε διπλανή στήλη παρουσιάζεται το ποσοστό επί τοις εκατό (%) της κάθε μεθόδου επί του συνόλου των ποσοτήτων.*

Στα υπόλοιπα πεδία παρουσιάζονται οι μέθοδοι (με ή χωρίς ΔσΠ). Στις μεθόδους της κομποστοποίησης, της βιοχημικής μετατροπής και της υγειονομικής ταφής ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ διάφορων επιλογών από αναπτυσσόμενη λίστα διαθέσιμων επιλογών. Αναλυτικά οι επιλογές:

- Κομποστοποίηση: Ανοικτό σύστημα - Κλειστό σύστημα
- Βιοχημική μετατροπή: Οικιακή ξήρανση - Κεντρική ξήρανση
- Υγειονομική ταφή: Καύση βιοαερίου σε πυρσούς - Παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο

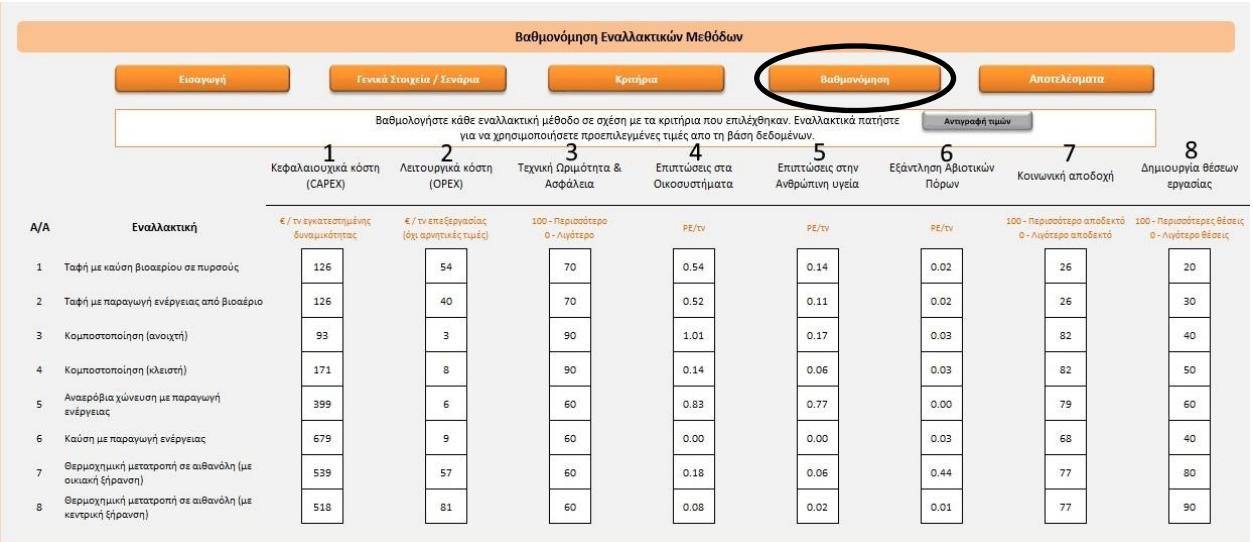
Στην καρτέλα «ΚΡΙΤΗΡΙΑ» ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαμορφώσει τη βαρύτητα των κριτηρίων δίνοντας τιμές από το 0 έως το 100.



Η συγκεκριμένη καρτέλα περιέχει τρεις στήλες (1, 2, 3) και ένα διάγραμμα τύπου πίτας (4).

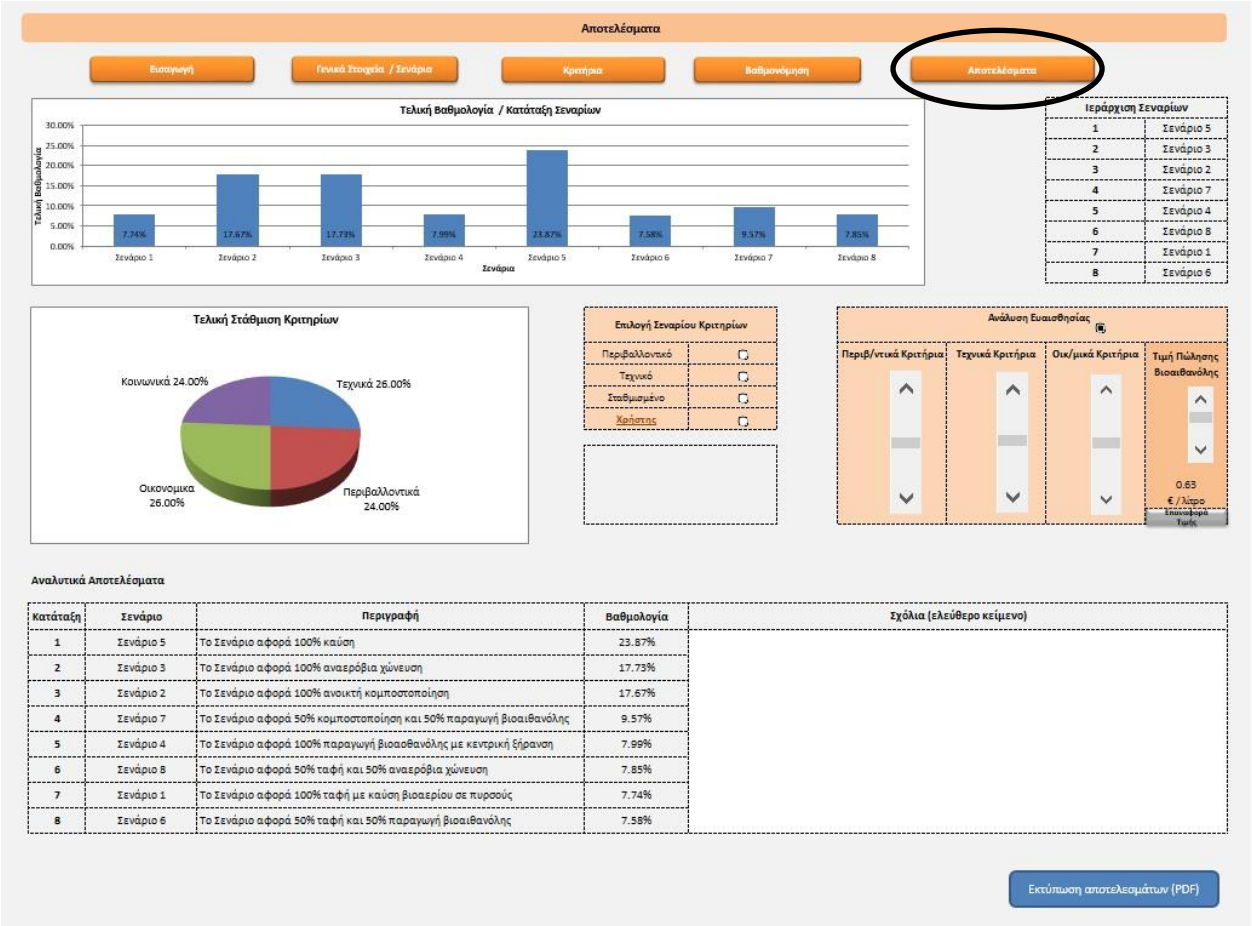
1. Κατηγορία κριτηρίου
2. Υποκατηγορία κριτηρίου
3. Πεδία ορισμού της βαρύτητας του εκάστοτε κριτηρίου *(ο χρήστης ορίζει την τιμή σημαντικότητας κάθε κριτηρίου. Πατώντας το βέλος στη δεξιά πλευρά του πλαισίου αναπτύσσεται λίστα με προεπιλεγμένες τιμές από τις οποίες ο χρήστης επιλέγει αυτή που επιθυμεί)*
4. Διάγραμμα τύπου πίτας που παρουσιάζεται η στάθμιση των κριτηρίων *(υπολογίζεται αυτόματα με αναγωγή των τιμών βαρύτητας του κάθε κριτηρίου σε ποσοστά επί τοις εκατό του συνόλου των τιμών όλων των κριτηρίων)*

Στην συγκεκριμένη καρτέλα «Βαθμονόμηση» γίνεται η εισαγωγή των τιμών του εκάστοτε κριτηρίου για κάθε μέθοδο επεξεργασίας.



Α/Α	Εναλλακτική	1 Κεφαλαιουχικά κόστη (CAPEX)	2 Λειτουργικά κόστη (OPEX)	3 Τεχνική Ωριμότητα & Ασφάλεια	4 Επιπτώσεις στα Οικοσυστήματα	5 Επιπτώσεις στην Ανθρώπινη υγεία	6 Εξάντληση Αβιοτικών Πόρων	7 Κοινωνική αποδοχή	8 Δημιουργία θέσεων εργασίας
		€ / τν εγκατεστημένης δυναμικότητας	€ / τν επεξεργασίας (όχι αρνητικές τιμές)	100 - Περισσότερο 0 - Λιγότερο	PE/τν	PE/τν	PE/τν	100 - Περισσότερο αποδεκτό 0 - Λιγότερο αποδεκτό	100 - Περισσότερες θέσεις 0 - Λιγότερο θέσεις
1	Ταφή με καύση βιοαερίου σε πυρσούς	126	54	70	0.54	0.14	0.02	26	20
2	Ταφή με παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο	126	40	70	0.52	0.11	0.02	26	30
3	Κομποστοποίηση (ανοιχτή)	93	3	90	1.01	0.17	0.03	82	40
4	Κομποστοποίηση (κλειστή)	171	8	90	0.14	0.06	0.03	82	50
5	Αναερόβια χώνευση με παραγωγή ενέργειας	399	6	60	0.83	0.77	0.00	79	60
6	Καύση με παραγωγή ενέργειας	679	9	60	0.00	0.00	0.03	68	40
7	Θερμοχημική μετατροπή σε αιθανόλη (με οικιακή ξήρανση)	539	57	60	0.18	0.06	0.44	77	80
8	Θερμοχημική μετατροπή σε αιθανόλη (με κεντρική ξήρανση)	518	81	60	0.08	0.02	0.01	77	90

Τέλος, στην καρτέλα «Αποτελέσματα» παρατίθενται τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Το περιβάλλον της εν λόγω καρτέλας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Στο πεδίο «Τελική Βαθμολογία/Κατάταξη Σεναρίων» παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμολογίας κάθε σεναρίου με μορφή ραβδογράμματος. Η επιλογή του σεναρίου γίνεται από το πεδίο «Επιλογή Σεναρίου Κριτηρίων».

Στο πεδίο «Ιεράρχηση Σεναρίων» παρουσιάζεται η ιεράρχηση των σεναρίων βάσει της επιλογής του χρήστη στο πεδίο «Επιλογή Σεναρίου Κριτηρίων».

Στο πεδίο «Επιλογή Σεναρίου Κριτηρίων» ο χρήστης επιλέγει μεταξύ των σεναρίων κριτηρίων κάνοντας αριστερό κλικ εντός του ανάλογου πεδίου.

Στο πεδίο «Τελική στάθμιση Κριτηρίων» παρουσιάζεται η τελική στάθμιση των κριτηρίων σε γράφημα τύπου πίτας συναρτήσει της επιλογής του χρήστη στο πεδίο «Επιλογή Σεναρίου Κριτηρίων».

Στο πεδίο «Ανάλυση Ευαισθησίας» ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ενεργοποιήσει την ανάλυση ευαισθησίας βάσει της οποίας ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τις τιμές των παραμέτρων που απεικονίζονται και ταυτόχρονα να παρατηρήσει τη μεταβολή των αποτελεσμάτων.

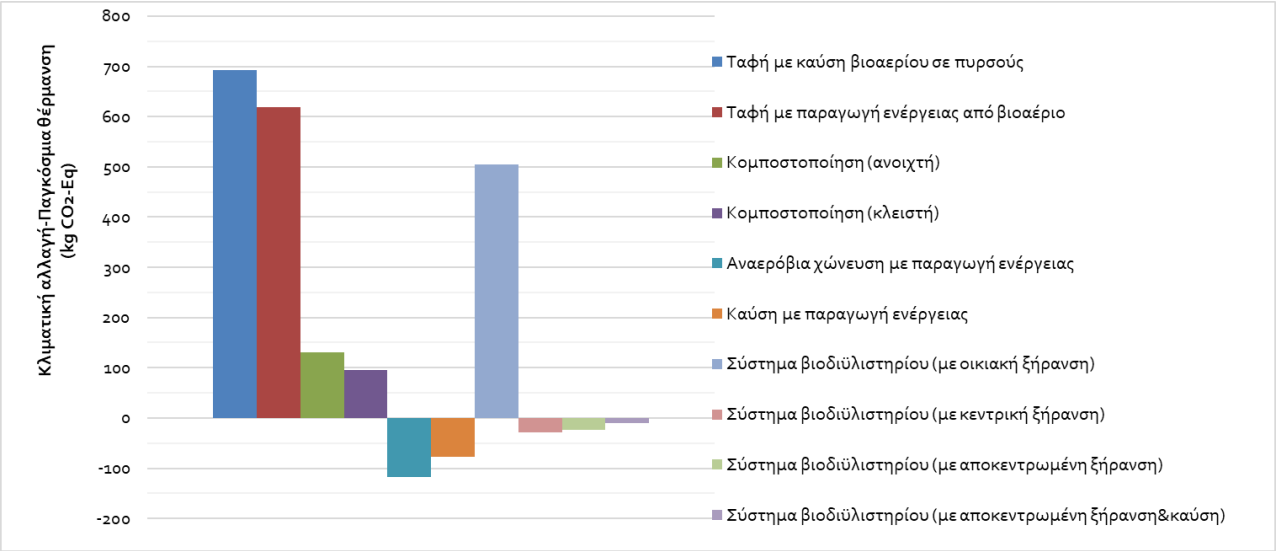
Στο πεδίο «Αναλυτικά Αποτελέσματα» εμφανίζονται συγκεντρωτικά και με αναλυτικό τρόπο τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Συγκεκριμένα εμφανίζεται η ιεράρχηση των σεναρίων, η γενική περιγραφή για το καθένα και η τελική βαθμολογία τους.

13.2 Βαθμολόγηση κριτηρίων αξιολόγησης

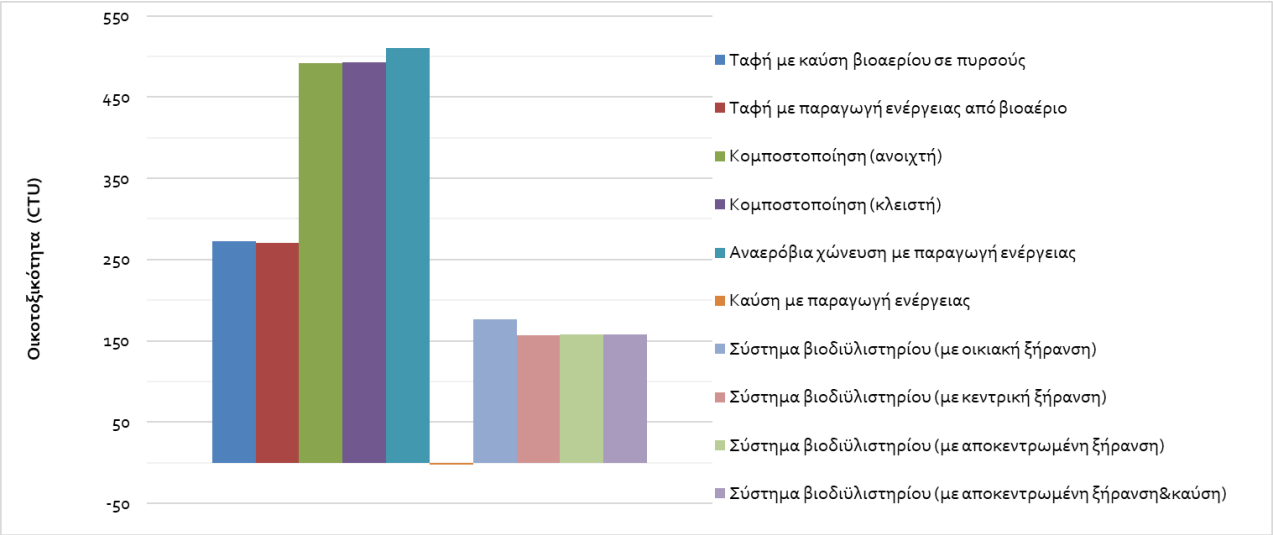
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κριτήρια που επιλέχθηκαν για την πολυκριτηριακή αξιολόγηση καθώς και οι βαθμολογίες που έλαβε η κάθε μέθοδος για καθένα από τα κριτήρια. Σημειώνεται ότι η κλίμακα βαθμονόμησης ήταν 0-100, ενώ όπου η βαθμονόμηση ήταν σε άλλη κλίμακα έγινε κανονικοποίηση στην κλίμακα 0-100, με το 0 να αντιπροσωπεύει τη χαμηλότερη επίδοση και το 100 την καλύτερη δυνατή επίδοση.

13.2.1 Περιβαλλοντικά κριτήρια

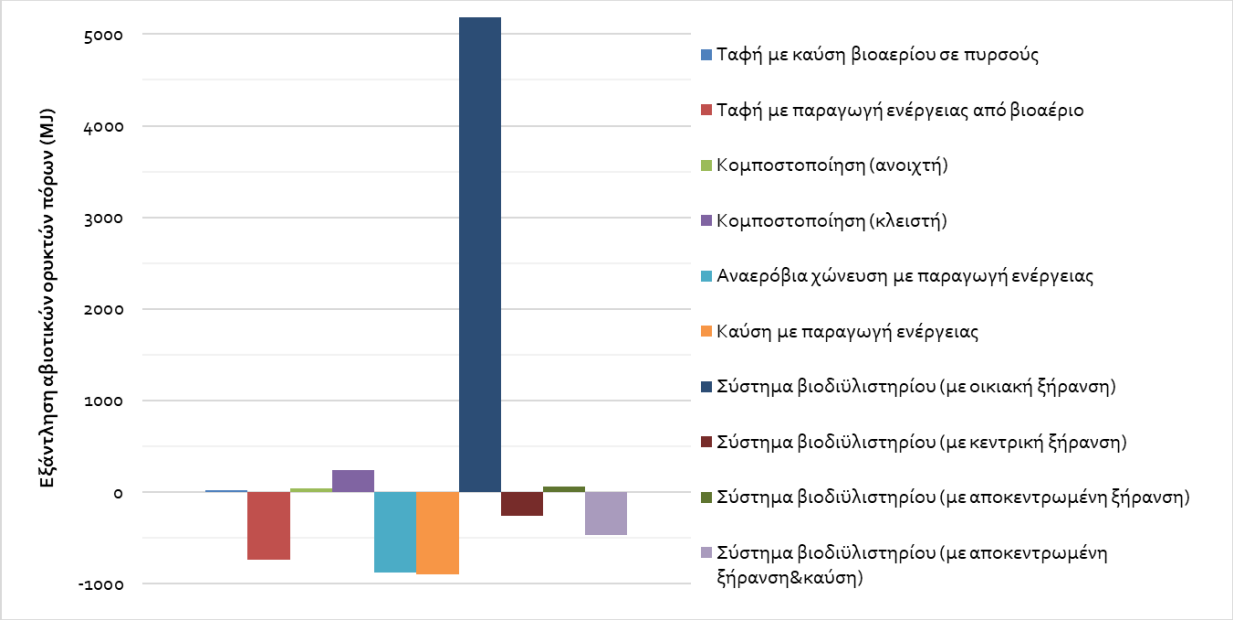
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η βαθμολόγηση των διαφορετικών συστημάτων διαχείρισης αποβλήτων για τα περιβαλλοντικά κριτήρια των κατηγοριών επίπτωσης κύκλου ζωής Κλιματική αλλαγή, Οικοτοξικότητα και Εξάντληση αβιοτικών ορυκτών πόρων.



Σχήμα 101: Επίδοση μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων στην κατηγορία επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή» (kg CO_{2-eq}/ανά τόνο ΒΑΑ)



Σχήμα 102: Επίδοση μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων στην κατηγορία επιπτώσεων «Οικοτοξικότητα» (CTU/ανά τόνο ΒΑΑ)



Σχήμα 103: Επίδοση μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων στην κατηγορία επιπτώσεων «Εξάντληση αβιοτικών ορυκτών πόρων» (MJ/ανά τόνο ΒΑΑ)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές για τις εν λόγω κατηγορίες επιπτώσεων για καθένα από τα εξεταζόμενα συστήματα, οι οποίες έχουν κανονικοποιηθεί στην κλίμακα 0-100 (όπου 100 η καλύτερη περιβαλλοντικά επιλογή), με βάση τη μέθοδο κανονικοποίησης min-max. Όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί, ο μέσος όρος των περιβαλλοντικών κριτηρίων (κατηγοριών επίπτωσης) που εξετάζονται, αναδεικνύει την καύση με παραγωγή ενέργειας ως την καλύτερη περιβαλλοντικά μέθοδο, ακολουθούμενη από το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με κεντρική/αποκεντρωμένη ξήρανση. Η αναερόβια χώνευση παρουσιάζει την καλύτερη επίδοση σε σχέση με την επίπτωση της κλιματικής αλλαγής και τη δεύτερη καλύτερη επίδοση στην κατηγορία επίπτωσης εξάντληση αβιοτικών πόρων, καθώς παρουσιάζει τις υψηλότερες εξοικονομήσεις (αρνητικές καθαρές εκπομπές), ωστόσο παράλληλα εμφανίζει τη χειρότερη επίδοση στην επίπτωση της οικοτοξικότητας λόγω των άμεσων εκπομπών που προκύπτουν κατά το στάδιο της εφαρμογής στο έδαφος του χωνεύματος.

Πίνακας 90: Κανονικοποιημένες τιμές για τις εξεταζόμενες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τα συστήματα διαχείρισης βιοαποβλήτων (κλίμακα 0-100), Περιβαλλοντικό κριτήριο

Σύστημα διαχείρισης	**Κλιματική αλλαγή**	**Οικο-τοξικότητα**	**Εξάντληση αβιοτ. πόρων**	**Μέσος όρος**
Ταφή με καύση βιοαερίου σε πυρσούς	0	46	85	44
Ταφή με παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο	9	47	97	51
Κομποστοποίηση (ανοιχτή)	69	4	85	52
Κομποστοποίηση (κλειστή)	74	4	81	53
Αναερόβια χώνευση με παραγωγή ενέργειας	100	0	99.7	67
Καύση με παραγωγή ενέργειας	95	100	100	98
Βιοδιϋλιστήριο (οικιακή ξήρανση)	23	65	0	29
Βιοδιϋλιστήριο (κεντρική ξήρανση)	89	69	89	82
Βιοδιϋλιστήριο (αποκεντρωμένη ξήρανση)	87	69	84	80

Σύστημα διαχείρισης	Κλιματική αλλαγή	Οικο-τοξικότητα	Εξάντληση αβιοτ. πόρων	Μέσος όρος
Βιοδιϋλιστήριο (αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση)	88	39	93	74

13.2.2 Οικονομικά κριτήρια

Προκειμένου τα ετήσια κεφαλαιουχικά κόστη για τις διαφορετικές μεθόδους διαχείρισης των βιοαποβλήτων να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους υπολογίστηκαν από την αρχή με βάση την [Εξίσωση 12-2 και τα στοιχεία που δίνονται στην έκθεση ARCADIS/Eunomia (2009), ήτοι αρχικό κόστος επένδυσης, διάρκεια ζωής της επένδυσης και επιτόκιο προεξόφλησης σύμφωνα με το ιδιωτικό μέτρο κόστους (private cost metric) που προτείνεται στην έκθεση (Πίνακας 91). Σημειώνεται ότι η διάρκεια ζωής της επένδυσης σε μια μονάδα υγειονομικής ταφής των αποβλήτων είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της παραγωγής ενέργειας, δεδομένου ότι τα πρώτα έτη της λειτουργίας το παραγόμενο βιοαέριο είναι πολύ μικρό για να είναι αξιοποιήσιμο, ενώ επαρκές βιοαέριο για την παραγωγή ενέργειας παράγεται και μετά το τέλος της απόθεσης αποβλήτων. Για το λόγο αυτό, παρατείνεται η διάρκεια ζωής της επένδυσης για άλλα 5 έτη μετά το τέλος λειτουργίας της μονάδας ως χώρος ταφής. Για την περίπτωση του συστήματος βιοδιϋλιστηρίου, το οποίο δεν περιλαμβάνεται στις εξεταζόμενες μεθόδους διαχείρισης ΒΑΑ της έκθεσης, χρησιμοποιήθηκε διάρκεια ζωής επένδυσης και επιτόκιο προεξόφλησης ίδιο με αυτό της μεθόδου της καύσης, πάλι για λόγους συγκρισιμότητας.

Πίνακας 91: Διάρκεια ζωής επένδυσης και επιτόκιο προεξόφλησης (ιδιωτικό μέτρο κόστους) για τις μεθόδους διαχείρισης βιοαποβλήτων, σύμφωνα με ARCADIS/Eunomia (2009)

Μέθοδος διαχείρισης βιοαποβλήτων	Διάρκεια ζωής επένδυσης	Επιτόκιο προεξόφλησης
Ταφή με καύση βιοαερίου σε πυρσούς	15	10%
Ταφή με παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο	20	10%
Κομποστοποίηση (ανοιχτή)	15	10%
Κομποστοποίηση (κλειστή)	20	10%
Αναερόβια χώνευση με παραγωγή ενέργειας	20	12%
Καύση με παραγωγή ενέργειας	25	15%

Τα έσοδα από την πώληση των προϊόντων καθώς και τα μεταφορικά υπολογίστηκαν με βάση τις παραγόμενες ποσότητες των προϊόντων που προκύπτουν από την Ανάλυση Κύκλου Ζωής και τις τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 92: Δεδομένα υπολογισμού εσόδων μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων

Περιγραφή	Τιμή
Αέρια εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής, με εγκατεστημένη ισχύ > 2 MW Βιοαέρια από Βιομάζα (συμπεριλαμβανομένου και του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αποβλήτων), με εγκατεστημένη ισχύ > 2 MW	99.45 €/MWh (Διασυνδεδεμένο Σύστημα, Τιμολόγιο ΑΠΕ ΔΕΗ)

Λοιπές ΑΠΕ (συμπεριλαμβανομένων και των σταθμών ενεργειακής αξιοποίησης του βιοαποδομήσιμου κλάσματος αστικών αποβλήτων που πληρούν τις προδιαγραφές τις Ευρωπαϊκής νομοθεσίας τις εκάστοτε αυτές ισχύουν)	87.85 €/MWh (Διασυνδεδεμένο Σύστημα, Τιμολόγιο ΑΠΕ ΔΕΗ)
Άνυδρη αιθανόλη	0.60€/λίτρο
Κόμποστ	25 €/τόνο
Καύσιμο κίνησης – diesel (για τις μεταφορές)	1.3 €/lt
Φόρος ταφής (Μ.Ο. 2016-2021)	47.5 €/τν αποβλήτων
Τέλος ταφής επικινδύνων (τέφρα πυθμένα)	180 €/τν αποβλήτων (ARCADIS/Eunomia, 2009)

Τα κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη καθώς και τα άλλα έσοδα/τέλη για τις υπό μελέτη μεθόδους διαχείρισης βιοαποβλήτων παρουσιάζονται αναλυτικά στους πίνακες που ακολουθούν. Για τις περιπτώσεις της οικιακής και της αποκεντρωμένης ξήρανσης, όπου προκύπτουν ξεχωριστά κόστη για τους δήμους, αυτά παρουσιάζονται σε ξεχωριστές στήλες από τα κόστη για τη μονάδα βιοδιϋλιστηρίου.

Όπως παρατηρείται στους πίνακες που ακολουθούν, τα υψηλότερα κόστη σχετίζονται με τα εναλλακτικά συστήματα βιοδιϋλιστηρίου, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς περιλαμβάνουν πιο σύνθετες διεργασίες, και απαιτούν ειδικό εξοπλισμό, ακριβότερες πρώτες ύλες (π.χ. ένζυμα) και πιο εξειδικευμένο προσωπικό. Ωστόσο τα συστήματα βιοδιϋλιστηρίου παράγουν και τα υψηλότερα καθαρά έσοδα, καθώς εκτός από την πώληση του παραγόμενου πλεονάζοντος ηλεκτρισμού και του εδαφοβελτιωτικού, υπάρχουν και σημαντικά έσοδα από την πώληση της παραγόμενης αιθανόλης.

Πίνακας 93: Κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη των συμβατικών μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων (€/τόνο αποβλήτου). Πηγή: ARCADIS/Eunomia, 2009

	Δυναμικότητα (τόνοι/έτος)	**Αρχική επένδυση**	**Ετήσιο κεφαλαιουχικό κόστος**	**Κόστος λειτουργίας και συντήρησης**
Ταφή με καύση βιοαερίου σε πυρσούς	250,000	126	17	12.3
Ταφή με παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο	250,000	126	15	12.3
Κομποστοποίηση (ανοιχτή)	20,000	93	12	8.8
Κομποστοποίηση (κλειστή)	30,000	171	20	19.6
Αναερόβια χώνευση με παραγωγή ενέργειας	25,000	399	53	47.0
Καύση με παραγωγή ενέργειας	200,000	679	105	49.1

Πίνακας 94: Κεφαλαιουχικά και λειτουργικά κόστη για τα εναλλακτικά σενάρια συστήματος βιοδιϋλιστηρίου (€/τόνο αποβλήτου)

	Αρχική επένδυση			**Ετήσιο κεφαλαιουχικό κόστος**			**Κόστος λειτουργίας και συντήρησης**		
	Βιοδιϋλι-στήριο	**Δήμος**	**Σύνολο**	**Βιοδιϋλι-στήριο**	**Δήμος**	**Σύνολο**	**Βιοδιϋ-λιστήριο**	**Δήμος**	**Σύνολο**
Βιοδιϋλιστήριο (οικιακή ξήρανση)	640	226	866	99	42	141	20	59	78
Βιοδιϋλιστήριο (κεντρική ξήρανση)	872	-	872	84	-	84	50	-	50
Βιοδιϋλιστήριο (αποκεντρωμένη ξήρανση)	640	232	872	99	29	128	18	33	51
Βιοδιϋλιστήριο (αποκεντρωμένη ξήρανση & καύση)	280	301	581	43	37	81	4	11	14

**Οι τιμές για το βιοδιϋλιστήριο έχουν αναχθεί στη συνολικά διαχειριζόμενη ποσότητα σε νωπή βάση (336,101 τν ΒΑΑ) για λόγους συγκρισιμότητας*

Πίνακας 95: Έσοδα από την πώληση των παραγόμενων προϊόντων και έξοδα από τη διάθεση αποβλήτων για τα εξεταζόμενα συστήματα διαχείρισης αποβλήτων (ανά τόνο αποβλήτων)

Μέθοδος διαχείρισης	**Διάθεση αποβλήτων**			**Πώληση εδαφοβελτιωτικού**			**Πώληση αιθανόλης**			**Πώληση πλεονάζοντος ηλεκτρισμού**			**Έξοδα-Έσοδα (€)**
	Ποσότητα (kg)	**Τέλος (€/τν)**	**Σύνολο (€)**	**Ποσότητα (kg)**	**Τιμή (€/τν)**	**Σύνολο (€)**	**Ποσότητα (lt)**	**Τιμή (€/lt)**	**Σύνολο (€)**	**Ποσότητα (kWh/tn)**	**Τιμή (€/MWh)**	**Σύνολο (€)**	
Ταφή με καύση βιοαερίου σε πυρσούς	1000	47.5	47.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47.5
Ταφή με παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο	1000	47.5	47.5	-	-	-	-	-	-	124	99.45	12	35
Κομποστοποίηση (ανοιχτή)	50	47.5	2.4	112	25	2.8	-	-	-	-	-	0	-0.4
Κομποστοποίηση (κλειστή)	50	47.5	2.4	115	25	2.9	-	-	-	-	-	0	-0.5
Αναερόβια χώνευση με παραγωγή ενέργειας	50	47.5	2.4	135	25	3.4	-	-	-	164	99.45	16	-17.3
Καύση με παραγωγή ενέργειας	19	180	3.4	-	-	0.0	-	-	-	171	87.85	15	-11.6
Βιοδιϋλιστήριο (οικιακή ξήρανση)	50	47.5	2.4	113	25	2.8	26.1	0.6	16	79	99.45	8	-24.0
Βιοδιϋλιστήριο (κεντρική/αποκεντρω-μένη ξήρανση)	50	47.5	2.4	118	25	2.9	22.5	0.6	14	85	99.45	8	-22.5
Βιοδιϋλιστήριο (αποκεντρωμένη ξήρανση&καύση)	13	47.5	0.6	17	25	0.4	5.7	0.6	3	17	99.45	2	-4.9

Με βάση τα ανωτέρω δεδομένα, διεξήχθη χρηματοοικονομική ανάλυση για τον προσδιορισμό του ελάχιστου τέλους διαχείρισης που πρέπει να πληρώσει ο δήμος στις μονάδες συμβατικής επεξεργασίας βιοαποβλήτων, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται για την κάθε μέθοδο ξεχωριστά στους Πίνακες 97-102. Για τα εναλλακτικά συστήματα βιοδιϋλιστηρίου, χρησιμοποιείται το ελάχιστο τέλος διαχείρισης στη μονάδα βιοαιθανόλης, το οποίο προσδιορίστηκε από τη χρηματοοικονομική ανάλυση που διεξήχθη στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το συνολικό κόστος διαχείρισης για το δήμο ορίζεται ως το άθροισμα του κόστους προεπεξεργασίας (ξήρανσης) των αποβλήτων σε επίπεδο δήμου (για την περίπτωση της οικιακής και της αποκεντρωμένησης ξήρανσης) και του ελάχιστου τέλους εισόδου στη μονάδα διαχείρισης των αποβλήτων. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα σχετικά δεδομένα, ενώ στην τελευταία στήλη παρουσιάζονται τα αντίστοιχα συνολικά κόστη τα οποία έχουν κανονικοποιηθεί στην κλίμακα 0-100 (όπου 100 η καλύτερη οικονομικά επιλογή), με βάση τη μέθοδο κανονικοποίησης min-max. Όπως φαίνεται, η προτιμώτερη οικονομικά μέθοδος είναι αυτή της κομποστοποίησης (92-100), ενώ ακολουθεί η ταφή με βαθμολογία 66-70 στα 100 και η αναερόβια χώνευση με βαθμολογία 74/100. Η καύση και το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση ισοβαθμούν με βαθμολογία 55/100.

Πίνακας 96: Συγκεντρωτικά οικονομικά στοιχεία για τα εξεταζόμενα συστήματα διαχείρισης βιοαποβλήτων (€/τόνο), Οικονομικό κριτήριο

	Κόστος προεπεξεργασίας αποβλήτων στο δήμο (€/τόνο νωπού ΒΑΑ)	**Τέλος εισόδου σε μονάδα διαχείρισης αποβλήτων (€/τόνο νωπού ΒΑΑ)**	**Συνολικό κόστος διαχείρισης για το δήμο (€/τόνο νωπού ΒΑΑ)**	**Συνολικό κόστος διαχείρισης για το δήμο (κανονικ.)**
Ταφή με καύση βιοαερίου σε πυρσούς	-	67 (19+47.5*)	67	66
Ταφή με παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο	-	61 (13+47.5*)	61	70
Κομποστοποίηση (ανοιχτή)	-	16	16	100
Κομποστοποίηση (κλειστή)	-	28	28	92
Αναερόβια χώνευση με παραγωγή ενέργειας	-	54	54	74
Καύση με παραγωγή ενέργειας	-	82	82	55
Βιοδιϋλιστήριο (οικιακή ξήρανση)	100	62	162	0
Βιοδιϋλιστήριο (κεντρική ξήρανση)	-	104	104	40
Βιοδιϋλιστήριο (αποκεντρωμένη ξήρανση)	62	61	123	27
Βιοδιϋλιστήριο (αποκεντρωμένη ξήρανση & καύση)	48	34	82	55

**Φόρος ταφής*

Πίνακας 97: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας ταφής με καύση βιοαερίου, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 19€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 250,000 τν/έτος

σε '000 €	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Επενδύσεις	**9450**															
Έσοδα		**4750**	**4750**	**4750**	**4750**	**4750**	**4750**	**4750**	**4750**	**4750**	**4750**	**4750**	**4750**	**4750**	**4750**	**4750**
Διαχείριση αποβλήτων		4750	4750	4750	4750	4750	4750	4750	4750	4750	4750	4750	4750	4750	4750	4750
Έξοδα		**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**
Σταθ. λειτ. κόστη		1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475
Μεικτά κέρδη		**3275**	**3275**	**3275**	**3275**	**3275**	**3275**	**3275**	**3275**	**3275**	**3275**	**3275**	**3275**	**3275**	**3275**	**3275**
Αποσβέσεις		3150	3150	3150	3150	3150	3150	3150	3150	3150	3150					
Τόκοι		662	626	589	552	513	473	431	389	345	300	254	206	157	106	54
Φορολ. εισόδημα		**-537**	**-501**	**-464**	**-427**	**-388**	**-348**	**-306**	**-264**	**-220**	**-175**	**3021**	**3069**	**3118**	**3169**	**3221**
Φόροι		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	876	890	904	919	934
Καθαρά κερδη		-537	-501	-464	-427	-388	-348	-306	-264	-220	-175	2145	2179	2214	2250	2287
Χρεολύσια		1186	1221	1258	1295	1334	1374	1416	1458	1502	1547	1593	1641	1690	1741	1793
Καθαρές Ταμειακές Ροές	**-9450**	**1428**	**1428**	**1428**	**1428**	**1428**	**1428**	**1428**	**1428**	**1428**	**1428**	**552**	**538**	**524**	**509**	**494**

Καθαρή Παρούσα Αξία	93
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	10%
Περίοδος αποπληρωμής	6.6

Πίνακας 98: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας ταφής με παραγωγή ενέργειας, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 13€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 250,000 τν/έτος

σε '000 €	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Επενδύσεις	**9450**																				
Έσοδα		**3250**	**3250**	**3250**	**3250**	**3250**	**6331**	**6331**	**6331**	**6331**	**6331**	**6331**	**6331**	**6331**	**6331**	**6331**	**3081**	**3081**	**3081**	**3081**	**3081**
Διαχείριση αποβλήτων		3250	3250	3250	3250	3250	3250	3250	3250	3250	3250	3250	3250	3250	3250	3250					
Ηλεκτρισμός		0	0	0	0	0	3081	3081	3081	3081	3081	3081	3081	3081	3081	3081	3081	3081	3081	3081	3081
Έξοδα		**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**	**1475**					
Σταθ. λειτ. κόστη		1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475					
Μεικτά κέρδη		**1775**	**1775**	**1775**	**1775**	**1775**	**4856**	**4856**	**4856**	**4856**	**4856**	**4856**	**4856**	**4856**	**4856**	**4856**	**3081**	**3081**	**3081**	**3081**	**3081**
Αποσβέσεις		3150	3150	3150	3150	3150	3150	3150	3150	3150	3150										
Τόκοι		662	626	589	552	513	473	431	389	345	300	254	206	157	106	54	0	0	0	0	0
Φορολ. εισόδημα		**-2037**	**-2001**	**-1964**	**-1927**	**-1888**	**1234**	**1275**	**1318**	**1361**	**1406**	**4603**	**4651**	**4700**	**4750**	**4803**	**3081**	**3081**	**3081**	**3081**	**3081**
Φόροι		0	0	0	0	0	358	370	382	395	408	1335	1349	1363	1378	1393	894	894	894	894	894
Καθαρά κερδη		-2037	-2001	-1964	-1927	-1888	876	905	935	966	998	3268	3302	3337	3373	3410	2188	2188	2188	2188	2188
Χρεολύσια		1186	1221	1258	1295	1334	1374	1416	1458	1502	1547	1593	1641	1690	1741	1793	54	0	0	0	0
Καθαρές Ταμειακές Ροές	**-9450**	**-72**	**-72**	**-72**	**-72**	**-72**	**2652**	**2640**	**2627**	**2615**	**2602**	**1675**	**1661**	**1647**	**1632**	**1617**	**2134**	**2188**	**2188**	**2188**	**2188**

Καθαρή Παρούσα Αξία	849
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	9%
Περίοδος αποπληρωμής	8.7

Πίνακας 99: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας ταφής ανοιχτής κομποστοποίησης, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 16€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 20,000 τν/έτος

σε '000 €	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
Επενδύσεις	**558**															
Έσοδα		**376**	**376**	**376**	**376**	**376**	**376**	**376**	**376**	**376**	**376**	**376**	**376**	**376**	**376**	**376**
Διαχείριση αποβλήτων		320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320
Κόμποστ		56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Έξοδα		**168**	**168**	**168**	**168**	**168**	**168**	**168**	**168**	**168**	**168**	**168**	**168**	**168**	**168**	**168**
Σταθ. λειτ. κόστη		120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Ταφή υπολειμμάτων		48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Μεικτά κέρδη		**208**	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**	**208**
Αποσβέσεις		186	186	186	186	186	186	186	186	186	186					
Τόκοι		39	37	35	33	30	28	25	23	20	18	15	12	9	6	3
Φορολ. εισόδημα		**-17**	**-15**	**-12**	**-10**	**-8**	**-6**	**-3**	**-1**	**2**	**5**	**193**	**196**	**199**	**202**	**205**
Φόροι		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	56	57	58	59	60
Καθαρά κερδη		-17	-15	-12	-10	-8	-6	-3	-1	1	3	137	139	141	143	146
Χρεολύσια		70	72	74	76	79	81	84	86	89	91	94	97	100	103	106
Καθαρές Ταμειακές Ροές	**-558**	**99**	**99**	**99**	**99**	**99**	**99**	**99**	**99**	**99**	**98**	**43**	**42**	**42**	**41**	**40**

Καθαρή Παρούσα Αξία	112
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	14%
Περίοδος αποπληρωμής	5.6

Πίνακας 100: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας κλειστής κομποστοποίησης, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 28€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 30,000 τν/έτος

σε '000 €	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Επενδύσεις	**1539**																				
Έσοδα		**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**	**927**
Διαχείριση αποβλήτων		840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840	840
Κόμποστ		87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87
Έξοδα		**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**	**410**
Σταθ. Λειτ. Κόστη		339	339	339	339	339	339	339	339	339	339	339	339	339	339	339	339	339	339	339	339
Ταφή υπολειμμάτων		71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
Μεικτά κέρδη		**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**
Αποσβέσεις		513	513	513	513	513	513	513	513	513	513										
Τόκοι		108	102	96	90	83	77	70	63	56	49	41	34	26	17	9					
Φορολ. εισόδημα		**-104**	**-99**	**-93**	**-87**	**-80**	**-74**	**-67**	**-60**	**-53**	**-46**	**475**	**483**	**491**	**499**	**508**	**516**	**516**	**516**	**516**	**516**
Φόροι		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	138	140	142	145	147	150	150	150	150	150
Καθαρά κερδη		-104	-99	-93	-87	-80	-74	-67	-60	-53	-46	337	343	348	354	360	367	367	367	367	367
Χρεολύσια		193	199	205	211	217	224	231	237	245	252	259	267	275	284	292					
Καθαρές Ταμειακές Ροές	**-1539**	**215**	**215**	**215**	**215**	**215**	**215**	**215**	**215**	**215**	**215**	**78**	**75**	**73**	**71**	**68**	**367**	**367**	**367**	**367**	**367**

Καθαρή Παρούσα Αξία	225
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	12%
Περίοδος αποπληρωμής	7.1

Πίνακας 101: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας αναερόβιας χώνευσης, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 54€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 25,000 τν/έτος

σε '000 €	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Επενδύσεις	**2993**																				
Έσοδα		**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**	**1841**
Διαχείριση αποβλήτων		1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
Ηλεκτρισμός		407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407	407
Κόμποστ		84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84	84
Έξοδα		**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**	**834**
Σταθ. Λειτ. Κόστη		775	775	775	775	775	775	775	775	775	775	775	775	775	775	775	775	775	775	775	775
Ταφή υπολειμμάτων		59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
Μεικτά κέρδη		**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**
Αποσβέσεις		998	998	998	998	998	998	998	998	998	998										
Τόκοι		209	198	187	175	162	150	137	123	109	95	80	65	50	34	17					
Φορολ. εισόδημα		**-200**	**-189**	**-177**	**-165**	**-153**	**-140**	**-127**	**-114**	**-100**	**-86**	**926**	**942**	**957**	**973**	**990**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**	**1007**
Φόροι		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	269	273	278	282	287	292	292	292	292	292
Καθαρά κερδη		**-200**	**-189**	**-177**	**-165**	**-153**	**-140**	**-127**	**-114**	**-100**	**-86**	**658**	**669**	**680**	**691**	**703**	**715**	**715**	**715**	**715**	**715**
Χρεολύσια		375	387	398	410	423	435	448	462	476	490	505	520	535	551	568					
Καθαρές Ταμειακές Ροές	**-2993**	**422**	**422**	**422**	**422**	**422**	**422**	**422**	**422**	**422**	**422**	**153**	**149**	**144**	**140**	**135**	**715**	**715**	**715**	**715**	**715**

Καθαρή Παρούσα Αξία	31
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	12%
Περίοδος αποπληρωμής	7.1

Πίνακας 102: Χρηματοοικονομική ανάλυση μονάδας καύσης με παραγωγή ενέργειας, τέλος διαχείρισης ΒΑΑ 82€/ τόνο, 70% δανειοδότηση, διάρκεια δανείου 15 έτη, δυναμικότητα 200,000 τν/έτος

σε '000 €	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Επενδύσεις	**40740**																									
Έσοδα		**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**	**19401**
Διαχείριση αποβλήτων		16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400	16400
Ηλεκτρισμός		3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001	3001
Έξοδα		**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**	**4838**
Σταθ. λειτ. κόστη		4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160	4160
		678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678	678
Μεικτά κέρδη		**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**
Αποσβέσεις		13580	13580	13580	13580	13580	13580	13580	13580	13580	13580															
Τόκοι		2852	2698	2541	2378	2210	2038	1860	1677	1488	1294	1094	888	676	457	232										
Φορολ. εισόδημα		**-1869**	**-1715**	**-1557**	**-1395**	**-1227**	**-1055**	**-877**	**-694**	**-505**	**-311**	**13469**	**13675**	**13887**	**14106**	**14331**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**	**14563**
Φόροι		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3906	3966	4027	4091	4156	4223	4223	4223	4223	4223	4223	4223	4223	4223	4223
Καθαρά κερδη		-1869	-1715	-1557	-1395	-1227	-1055	-877	-694	-505	-311	9563	9709	9860	10015	10175	10340	10340	10340	10340	10340	10340	10340	10340	10340	10340
Χρεολύσια		5111	5264	5422	5585	5753	5925	6103	6286	6475	6669	6869	7075	7287	7506	7731										
Καθαρές Ταμειακές Ροές	**-40740**	**6600**	**6600**	**6600**	**6600**	**6600**	**6600**	**6600**	**6600**	**6600**	**6600**	**2694**	**2634**	**2573**	**2509**	**2444**	**10340**	**10340**	**10340**	**10340**	**10340**	**10340**	**10340**	**10340**	**10340**	**10340**

Καθαρή Παρούσα Αξία	907
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης	15%
Περίοδος αποπληρωμής	6.2

13.2.3 Κοινωνικά κριτήρια

Στο πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται ο υπολογισμός του εργατικού κόστους για καθένα από τα εξεταζόμενα συστήματα διαχείρισης, ενώ στην τελευταία στήλη παρουσιάζονται οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες τιμές στην κλίμακα 0-100, όπου 100 το υψηλότερο εργατικό κόστος, δηλαδή η μεγαλύτερη βαθμολόγηση του κριτηρίου «Δημιουργία θέσεων εργασίας». Όπως παρατηρείται, το χαμηλότερο εργατικό κόστος αναφέρεται στο σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με οικιακή ξήρανση, καθώς σε αυτή την περίπτωση η διεργασία της ξήρανσης εκτελείται από τους πολίτες. Στον υπολογισμό αυτό ωστόσο δεν λαμβάνεται υπόψη η παραγωγή των οικιακών ξηραντήρων, το οποίο μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις θέσεις εργασίας. Γενικά το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου παρουσιάζει χαμηλές τιμές, καθώς η μονάδα βιοδιϋλιστηρίου είναι μικρότερης δυναμικότητας σε σχέση με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες μονάδες, ενώ οι μονάδες ξήρανσης δεν απαιτούν ιδιαίτερα υψηλά εργατικά κόστη και μεγάλη εξειδίκευση, όπως και οι μονάδες κομποστοποίησης.

Πίνακας 103: Υπολογισμός εργατικού κόστους για τα εξεταζόμενα συστήματα διαχείρισης βιοαποβλήτων, κριτήριο «Δημιουργία θέσεων εργασίας»

Μέθοδος διαχείρισης	**% CAPEX**	**% OPEX**	**Σύνολο (€/τόνο)**	**Σύνολο (κανονικ.)**
Ταφή με καύση βιοαερίου σε πυρσούς	20	50	10	27
Ταφή με παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο	20	50	10	27
Κομποστοποίηση (ανοιχτή)	17	21	4	4
Κομποστοποίηση (κλειστή)	25	15	9	22
Αναερόβια χώνευση με παραγωγή ενέργειας	25	30	29	100
Καύση με παραγωγή ενέργειας	16	21	28	96
Σύστημα βιοδιϋλιστηρίου (οικιακή ξήρανση)			3.0	0
Σύστημα βιοδιϋλιστηρίου (κεντρική ξήρανση)			9.7	26
Σύστημα βιοδιϋλιστηρίου (αποκεντρωμένη ξήρανση)			10.2	28
Βιοδιϋλιστήριο (αποκεντρωμένη ξήρανση & καύση)			11.6	33

Η βαθμολόγηση του κριτηρίου «Κοινωνική αποδοχή» προέκυψε έπειτα από έρευνα που διεξήχθη με χρήση ερωτηματολογίων. Σύμφωνα με τον Καλογιάννη (2016), όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής, στην ερώτηση 1 σχετικά με την ικανοποίηση από το υφιστάμενο σύστημα διαχείρισης αποβλήτων η οποία βαθμολογήθηκε στην κλίμακα 1-5, η μέση τιμή των απαντήσεων ήταν 1.7, τιμή αρκετά χαμηλή, το οποίο είναι και αναμενόμενο από ένα δείγμα με έστω και βασικό επίπεδο ενημέρωσης όσον αφορά τα θέματα διαχείρισης αποβλήτων.

Στην ερώτηση 2 σχετικά με την περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση στο θέμα της ορθής διαχείρισης των αποβλήτων, οι ερωτηθέντες σχεδόν στο σύνολό τους (97.5%) απάντησαν θετικά (ΝΑΙ) και μόνο 2.5% αυτών απάντησε "ΙΣΩΣ".

Στην ερώτηση 3 σχετικά με το αν οι ερωτηθέντες διαχωρίζουν τα ανακυκλώσιμα στο σπίτι, το 85.8% απάντησε θετικά, ενώ οι υπόλοιποι που απάντησαν αρνητικά το αιτιολόγησαν λόγω της απουσίας ή της μακρινής απόστασης των μπλε κάδων στην περιοχή κατοικίας τους.

Στην ερώτηση 4, ποσοστό 68.1% απάντησε θετικά στην εφαρμογή ενός αναλογικού συστήματος δημοτικών τελών με βάση την απορριπτόμενη ποσότητα σύμμεικτων αποβλήτων, 17.7% απάντησε ΙΣΩΣ και το υπόλοιπο απάντησε αρνητικά. Οι προβληματισμοί των ερωτηθέντων σχετικά με την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος σχετιζόταν με την αποτελεσματικότητα του συστήματος αλλά και με την απροθυμία τους να επωμιστούν ενδεχομένως υψηλότερα τέλη.

Στην ερώτηση 5 σχετικά με την προθυμία για χωριστή διαλογή των απορριμάτων και την παράλληλη παροχή οικονομικών κινήτρων, η πλειοψηφία των ερωτηθέντων απάντησε θετικά (91.7%), 2.5% εμφανίστηκε επιφυλακτικό και το υπόλοιπο 5.8% ήταν αρνητικό.

Συνολικά από τις απαντήσεις στις παραπάνω ερωτήσεις, προκύπτει ότι το δείγμα είναι περιβαλλοντικά ευαισθητοποιημένο και ότι πιθανότατα θα συμμετέχει ενεργά σε ένα σύστημα διαλογής στην πηγή των βιοαπολήτων, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει τη βιωσιμότητα των μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων που βασίζονται στη χωριστή διαλογή του ρεύματος αυτού.

Όσον αφορά την τελευταία ερώτηση για την αξιολόγηση των διαφορετικών μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων, η τελική βαθμολογία προέκυψε από τον υπολογισμό του μέσου όρου των βαθμολογιών των συμμετεχόντων και παρουσιάζεται στον πίνακα που ακολουθεί. Όπως φαίνεται από τις βαθμολογίες που δώθηκαν, την μεγαλύτερη αποδοχή απολαμβάνει η μέθοδος της κομποστοποίησης και την μικρότερη η μέθοδος της ταφής. Για την περίπτωση του συστήματος βιοδιϋλιστηρίου με καύση μέρους των ΒΑΑ για παραγωγή ενέργειας η οποία δεν περιλαμβανόταν στο ερωτηματολόγιο, χρησιμοποιήθηκε ως βαθμολογία ο μέσος όρος των βαθμολογιών για το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου και την καύση με παραγωγή ενέργειας.

Πίνακας 104: Βαθμολόγηση κριτηρίου «Κοινωνική αποδοχή»

Μέθοδος διαχείρισης βιοαποβλήτων	**Βαθμολογία (κλίμακα 1-5)**	**Βαθμολογία (κλίμακα 0-100)**
Ταφή	1.3	7.5
Κομποστοποίηση	4.1	77.3
Αναερόβια χώνευση με παραγωγή ενέργειας	3.9	73.3
Καύση με παραγωγή ενέργειας	3.4	59.5
Σύστημα βιοδιϋλιστηρίου	3.9	73.3
Σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με καύση	3.7	66.3

Για την αξιολόγηση της κοινωνικής πτυχής, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των δύο προαναφερθέντων κοινωνικών κριτηρίων, της δημιουργίας θέσεων εργασίας και της κοινωνικής αποδοχής. Όπως φαίνεται και στον πίνακα που ακολουθεί, σύμφωνα με το μέσο όρο των κοινωνικών κριτηρίων καλύτερη μέθοδος αναδεικνύεται η αναερόβια χώνευση, ακολοθούμενη από την καύση και το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με αποκεντρωμένη ξήρανση, χωρίς και με καύση.

Πίνακας 105: Μέσος όρος βαθμολόγησης κοινωνικών κριτηρίων για τα συστήματα διαχείρισης βιοαποβλήτων,

κανονικοποιημένες τιμές (κλίμακα 0-100)

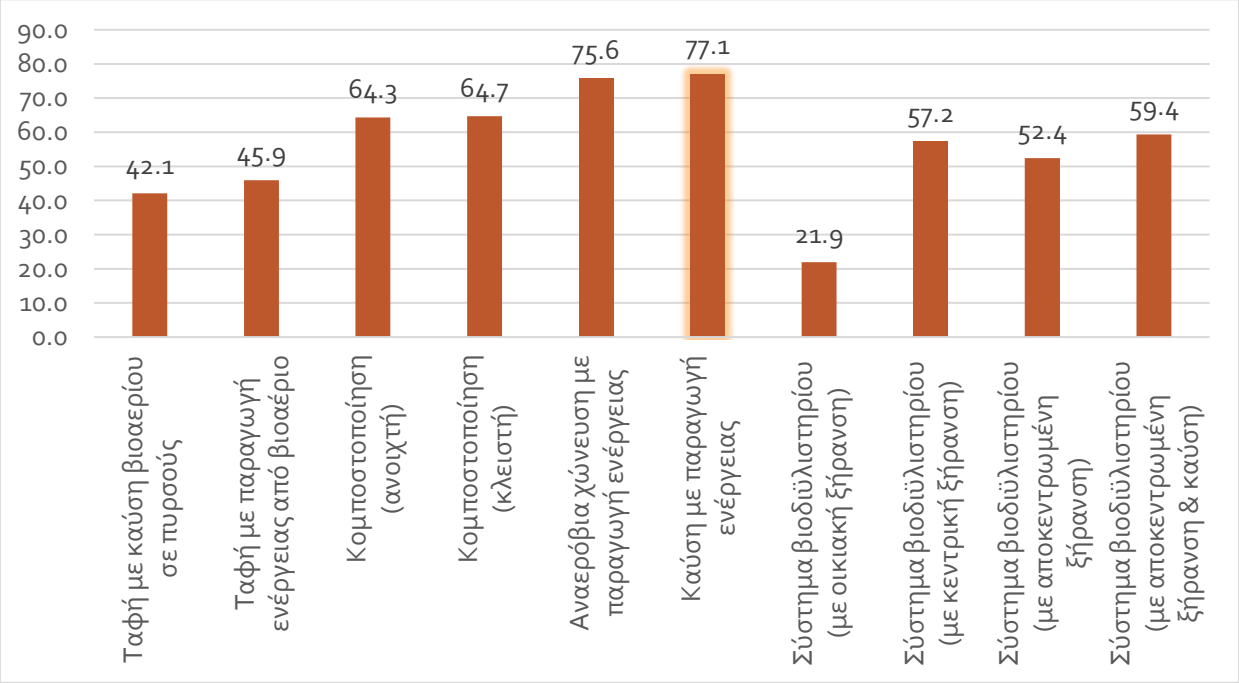
Μέθοδος διαχείρισης	**Δημιουργία θέσεων εργασίας (κανονικ.)**	**Κοινωνική αποδοχή (κανονικ.)**	**Μέσος όρος (κανονικ.)**
Ταφή με καύση βιοαερίου σε πυρσούς	27	7.5	17.1
Ταφή με παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο	27	7.5	17.1
Κομποστοποίηση (ανοιχτή)	4	77.5	40.5
Κομποστοποίηση (κλειστή)	22	77.5	49.5
Αναερόβια χώνευση με παραγωγή ενέργειας	100	72.5	86.3
Καύση με παραγωγή ενέργειας	96	60.0	77.9
Σύστημα βιοδιϋλιστηρίου (οικιακή ξήρανση)	0	72.5	36.3
Σύστημα βιοδιϋλιστηρίου (κεντρική ξήρανση)	26	72.5	49.3
Σύστημα βιοδιϋλιστηρίου (αποκεντρωμένη ξήρανση)	28	72.5	50.2
Βιοδιϋλιστήριο (αποκεντρωμένη ξήρανση & καύση)	33	66.3	49.8

13.3 Αποτελέσματα πολυκριτηριακής αξιολόγησης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης για τις μεθόδους διαχείρισης βιοαποβλήτων, με βάση τη βαθμολογία που πήρε η κάθε μέθοδος σε καθένα από τα αξιολογούμενα κριτήρια. Η ανάλυση γίνεται για τέσσερα εναλλακτικά σενάρια, στα οποία μεταβάλλεται η βαρύτητα που λαμβάνει η κάθε ομάδα κριτηρίων. Συγκεκριμένα, τα σενάρια πολυκριτηριακής ανάλυσης παρουσιάζονται στη συνέχεια:

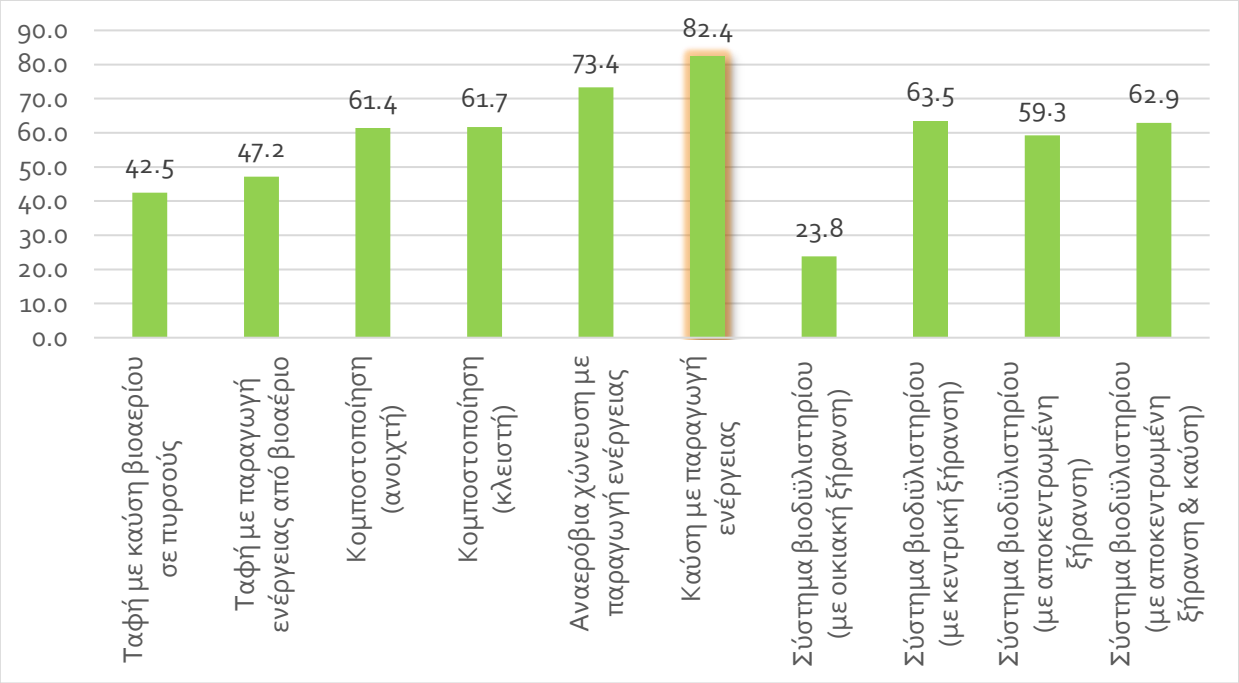
- **Σταθμισμένο σενάριο:** Όλα τα κριτήρια λαμβάνουν ίση βαρύτητα
- **Περιβαλλοντικό σενάριο:** Το περιβαλλοντικό κριτήριο λαμβάνει μεγαλύτερη βαρύτητα (50%) ενώ τα οικονομικά και κοινωνικά κριτήρια λαμβάνουν ίση βαρύτητα (25%)
- **Οικονομικό σενάριο:** Το οικονομικό κριτήριο λαμβάνει μεγαλύτερη βαρύτητα (50%) ενώ τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια λαμβάνουν ίση βαρύτητα (25%)
- **Κοινωνικό σενάριο:** Το κοινωνικό κριτήριο λαμβάνει μεγαλύτερη βαρύτητα (50%) ενώ τα οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια λαμβάνουν ίση βαρύτητα (25%)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βαθμολογίες των μεθόδων για καθένα από τα εξεταζόμενα σενάρια. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 104, τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης για το σταθμισμένο σενάριο αναδεικνύουν την καύση ως τη μέθοδο με τη μεγαλύτερη βαθμολογία (77.1%), ακολουθούμενη από την αναερόβια χώνευση (75.6%) και την κομποστοποίηση (~64.5%). Από τα συστήματα βιοδιϋλιστηρίου, την καλύτερη βαθμολογία εμφανίζει το σύστημα με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση (59.4%) και της κεντρικής ξήρανσης (57.2%).



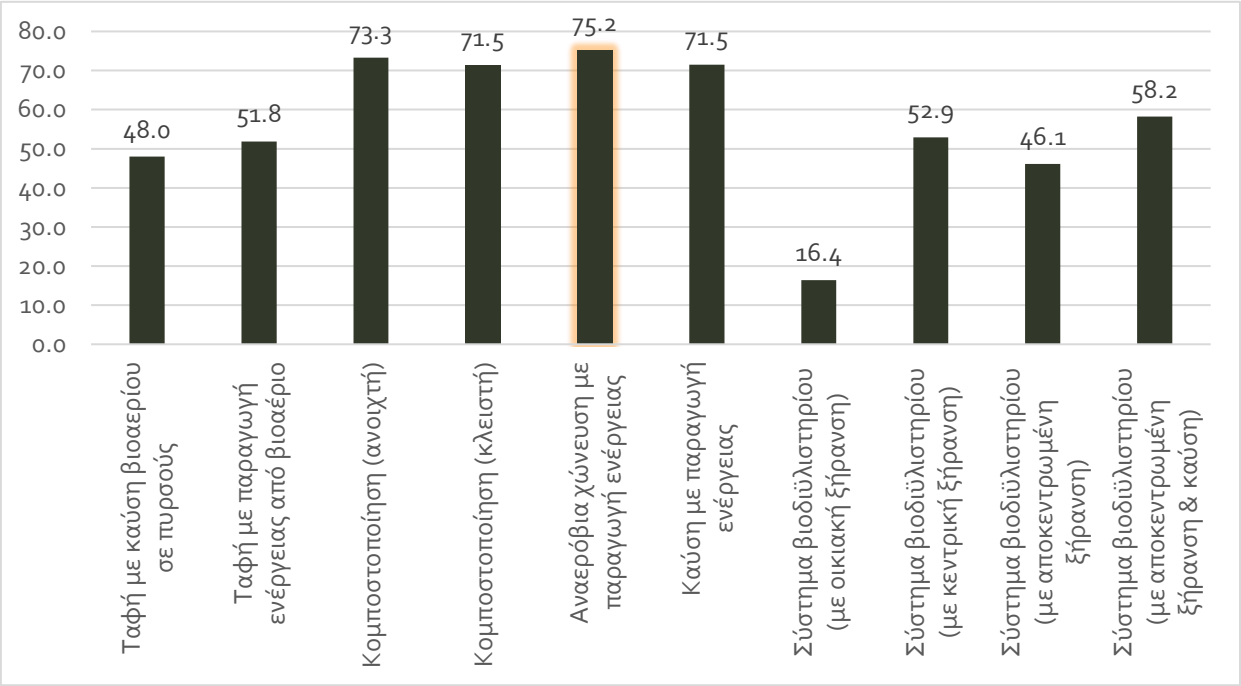
Σχήμα 104: Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης για το σταθμισμένο σενάριο (ίση βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 105, τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το περιβαλλοντικό σενάριο αναδεικνύουν την καύση με παραγωγή ενέργειας ως τη μέθοδο με τη μεγαλύτερη βαθμολογία (82.4%), ακολουθούμενο από την αναερόβια χώνευση (73.4%) αλλά και το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με κεντρική ξήρανση (63.5%) και με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση (62.9%).



Σχήμα 105: Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης για το περιβαλλοντικό σενάριο (Περιβαλλοντικά: 50%, Οικονομικά: 25%, Κοινωνικά: 25%)

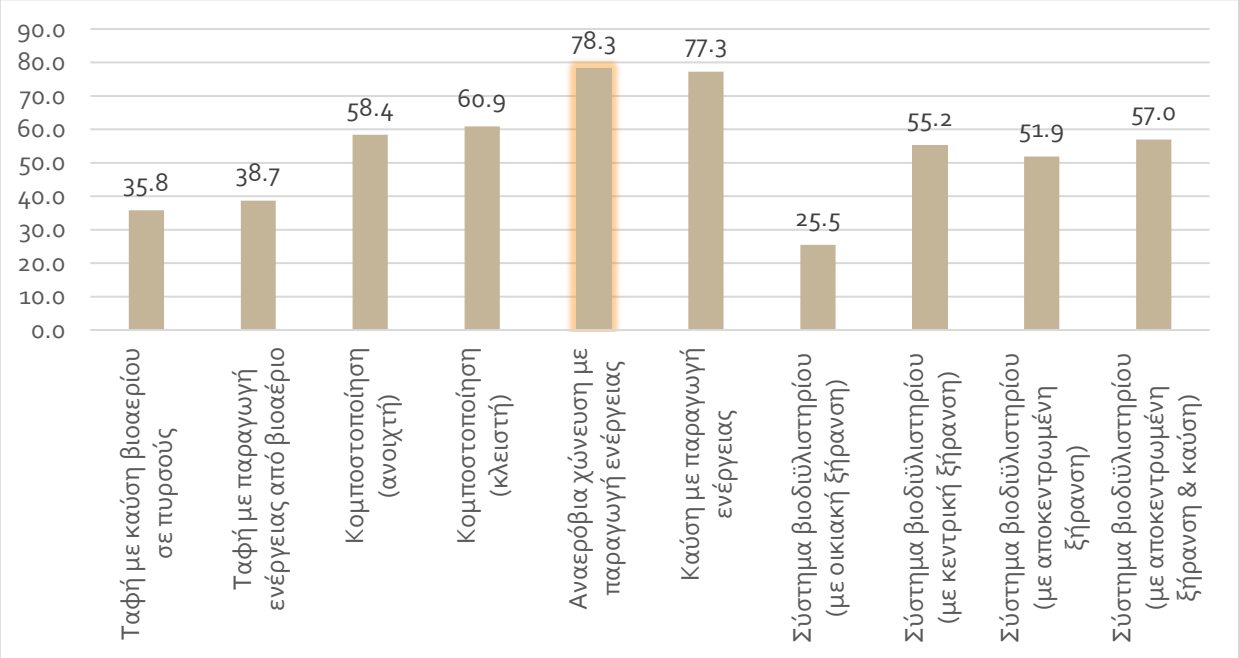
Όσον αφορά το οικονομικό σενάριο, τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης αναδεικνύουν την αναερόβια χώνευση ως την καλύτερη οικονομικά μέθοδο (75.2%), ακολουθούμενη από την ανοιχτή κομποστοποίηση (73.3%), ενώ στη τρίτη θέση ισοβαθμούν η κλειστή κομποστοποίηση και η καύση με παραγωγή ενέργειας (71.5%). Από τα συστήματα βιοδιϋλιστηρίου, την καλύτερη βαθμολογία εμφανίζει το σύστημα με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση (58.2%).



Σχήμα 106: Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης για το οικονομικό σενάριο (Περιβαλλοντικά: 25%, Οικονομικά: 50%, Κοινωνικά: 25%)

Τέλος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 107, τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το κοινωνικό σενάριο αναδεικνύουν την αναερόβια χώνευση ως την προτεινόμενη επιλογή (78.3%), ακολουθούμενη από την

καύση (77.3%) και την κομποστοποίηση (~59%). Από τα συστήματα βιοδιϋλιστηρίου, την καλύτερη βαθμολογία εμφανίζει το σύστημα με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση (57%) και της κεντρικής ξήρανσης (55.2%).



Σχήμα 107: Αποτελέσματα πολυκριτηριακής ανάλυσης για το κοινωνικό σενάριο (Περιβαλλοντικά: 25%, Οικονομικά: 25%, Κοινωνικά: 50%)

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω, η μέθοδος της καύσης είναι η προτιμότερη μέθοδος τόσο σύμφωνα με το σταθμισμένο σενάριο όπου δίνεται ίση βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια, όσο και με το περιβαλλοντικό σενάριο, όπου δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στα περιβαλλοντικά κριτήρια. Η μέθοδος της αναερόβιας χώνευσης αναδεικνύεται ως η καλύτερη μέθοδος σύμφωνα τόσο με το οικονομικό σενάριο, όσο και με το κοινωνικό σενάριο. Η κομποστοποίηση σε όλα τα σενάρια εκτός από το περιβαλλοντικό, βρίσκεται μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης θέσης. Σύμφωνα με το περιβαλλοντικό σενάριο, στην τρίτη θέση βρίσκεται το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με κεντρική ξήρανση, αλλά και το αντίστοιχο σύστημα με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση. Γενικά, τα δύο αυτά συστήματα βιοδιϋλιστηρίου υπερτερούν σε σχέση με τα συστήματα βιοδιϋλιστηρίου με ξήρανση σε αποκεντρωμένο και οικιακό επίπεδο, σε όλα τα σενάρια. Η μέθοδος της ταφής με καύση του βιοαερίου και με παραγωγή ενέργειας αλλά και το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με οικιακή ξήρανση καταλαμβάνουν τις τελευταίες θέσεις σε όλα τα σενάρια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14. Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η αξιολόγηση του δυναμικού αξιοποίησης των αστικών αποβλήτων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος από τη διαχείριση αποβλήτων. Περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από το υφιστάμενο σύστημα διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα και τη διερεύνηση του δυναμικού περιορισμού των επιπτώσεων αυτών με τις διαθέσιμες εναλλακτικές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων, αλλά και με άλλες προηγμένες μεθόδους διαχείρισης, οι οποίες στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της αξιοποίησης των πόρων στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Επίσης περιλαμβάνει την αξιολόξηση της οικονομικής και συνολικής βιωσιμότητας των μεθόδων αυτών, προκειμένου να υποστηρίξει τη λήψη ενημερωμένων αποφάσεων για τη διαχείριση αποβλήτων σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.

Στο πλαίσιο της ερευνητικής ενότητας Α1 υπολογίζονται οι εκπομπές αερίων φαινομένου του θερμοκηπίου (ΑΦΘ) που παράγονται από το υφιστάμενο σύστημα διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) στην Ελλάδα και στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση του δυναμικού μείωσης των εκπομπών ΑΦΘ με την υλοποίηση των στόχων αύξησης του ποσοστού ξεχωριστής διαλογής και επεξεργασίας των ΑΣΑ για το 2020, σύμφωνα με τον αναθεωρημένο ΕΣΔΑ. Για την υφιστάμενη περίοδο η κυρίαρχη μέθοδος διαχείρισης των αστικών αποβλήτων στην Ελλάδα είναι η ταφή (>85%), ενώ για το έτος 2020 προβλέπεται ριζική αλλαγή με μόνο 22% των αστικών αποβλήτων να οδηγείται για ταφή και το υπόλοιπο 78% να κατανέμεται σχεδόν ισομερώς μεταξύ της ανακύκλωσης και της κομποστοποίησης. Από τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι οι συνολικές εκπομπές από τη διαχείριση των αποβλήτων στην Ελλάδα την υφιστάμενη περίοδο είναι αρκετά υψηλές καθώς καθορίζονται κατά κύριο λόγο από τις εκπομπές της ταφής, ενώ τα επόμενα έτη οι εκπομπές είναι ελαφρώς χαμηλότερες, το οποίο αποδίδεται κυρίως στη χαμηλότερη παραγωγή αποβλήτων λόγω της οικονομικής κρίσης. Το 2020, οι καθαρές εκπομπές υπολογίζονται σε περίπου 300 εκατομμύρια kg CO_2eq., ποσότητα 25 φορές μικρότερη σε σχέση με το 2010, για μια διαχειριζόμενη ποσότητα αποβλήτων μόνο ελαφρώς μικρότερη (-12%) σε σχέση με το 2010. Στις εκπομπές αυτές του 2020, συμμετέχουν με ποσοστό 32% οι εκπομπές από την ταφή (που προέρχονται από το 22% των ΑΣΑ), με ποσοστό 22% οι εκπομπές από την κομποστοποίηση (41% των ΑΣΑ), και τέλος, με ποσοστό 46% οι εκπομπές από την ανακύκλωση (37% των ΑΣΑ).

Όσον αφορά την κομποστοποίηση, προτείνεται και η εξέταση άλλων μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων οι οποίες παράγουν και άλλα προϊόντα εκτός από εδαφοβελτιωτικό (π.χ. ενέργεια), και επομένως έχουν μεγαλύτερο δυναμικό περιορισμού των σχετικών εκπομπών, όπως η αναερόβια χώνευση. Επίσης, δεν είναι σίγουρο ότι το παραγόμενο εδαφοβελτιωτικό θα μπορούσε να υποκαταστήσει σε ποσοστό 100% την παραγωγή και χρήση ανόργανων λιπασμάτων, όπως έχει θεωρηθεί στην παρούσα μελέτη, καθώς οι παραγόμενες ποσότητες θα είναι αρκετά μεγάλες το 2020 και η ζήτηση από τους αγρότες μπορεί να είναι μικρότερη από την προσφορά. Τέλος, όσον αφορά την ανακύκλωση, σημαντικό ρόλο παίζει η καθαρότητα των ανακτημένων ανακυκλώσιμων αποβλήτων, η οποία μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα της ανακύκλωσης και το βαθμό υποκατάστασης της πρωτογενούς παραγωγής προϊόντων. Για τη μεγιστοποίηση της καθαρότητας των συλλεγμένων αποβλήτων, είναι σημαντικό να υπάρχει επαρκής ενημέρωση και εκπαίδευση των πολιτών για τη διαλογή στην πηγή.

Στην ερευνητική ενότητα Α2 διεξάγεται ΑΚΖ για τη διαλογή, προεπεξεργασία και ανακύκλωση χωριστά συλλεχθέντων ανακυκλώσιμων υλικών. Στο πλαίσιο αυτό μελετήθηκαν οι διαφορετικές μέθοδοι ανακύκλωσης των ξηρών ανακυκλώσιμων αποβλήτων και πραγματοποιήθηκε έρευνα για την υλοποίηση ενός συστήματος διαλογής στην πηγή σε τέσσερα ρεύματα των ανακυκλώσιμων αποβλήτων (χαρτί, πλαστικό, γυαλί, μέταλλο). Γενικά παρατηρείται ότι λόγω της προδιαλογής των ανακυκλώσιμων αποβλήτων στην πηγή, τα ποσοστά καθαρότητας των ρευμάτων αποβλήτων καθώς και τα ποσοστά

ανάκτησης των υλικών στα ΚΔΑΥ είναι σημαντικά μεγαλύτερα, με αποτέλεσμα μια συνολική ανάκτηση των υλικών σε επίπεδο 94% σε σχέση με τα αντίστοιχα μέσα επίπεδα ανάκτησης στα υφιστάμενα ΚΔΑΥ (~60%) που υποδέχονται σύμμεικτα ανακυκλώσιμα απόβλητα. Τα αποτελέσματα δείχνουν τις μεγελύτερες εξοικονομήσεις εκπομπών ΑΦΘ ανά μονάδα αποβλήτου για την περίπτωση των μετάλλων. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η πρωτογενής παραγωγή μετάλλων έχει πολύ υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις, ενώ η επανεπεξεργασία και ανακύκλωση των αποβλήτων μετάλλου έχει σχετικά πολύ μικρότερη κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, υψηλής καθαρότητας απόβλητα πλαστικού που περιέχουν μόνο ενός τύπου πλαστικό (HDPE, PP, PET) μπορούν να οδηγηθούν κατευθείαν στην παραγωγή όπως γίνεται με τις καθαρές πρώτες ύλες, ενώ η ποσότητα των ακαθαρσιών μπορεί να είναι καθοριστική για την ποιότητα του προϊόντος. Από την άλλη, παρόλο που τα οφέλη από την ανακύκλωση των αποβλήτων γυαλιού είναι σχετικά χαμηλά, τα απόβλητα γυαλιού δεν αποσυντίθενται κατά την καύση ή την ταφή και προσθέτουν όγκο στα υπολείμματα αυτών των διεργασιών. Επίσης, η ενεργειακή αξιοποίηση του γυαλιού δεν είναι δυνατή και έτσι προκύπτει ότι η ανακύκλωσή του είναι η προτιμότερη διαδικασία για την επεξεργασία του. Το χαρτί και το χαρτόνι μπορεί να αποφέρει σημαντικά οφέλη από την ανακύκλωσή του, καθώς αποτελεί ένα μεγάλο τμήμα των αστικών στερεών αποβλήτων, ενώ παράλληλα συνεισφέρει στη διατήρηση των δασών τα οποία απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Επίσης, το ρεύμα αυτό έχει μεγάλη περιεκτικότητα σε βιοαποδομήσιμο άνθρακα και επομένως κατά την ταφή του βιοαποδομείται με υψηλούς ρυθμούς παράγοντας σημαντικές ποσότητες μεθανίου, οι οποίες μπορούν να αποφευχθούν με την ανακύκλωσή του. Ωστόσο, οι ίνες κυτταρίνης φθείρονται από τη χρήση και την ανακύκλωση, με αποτέλεσμα να περιορίζεται ο αριθμός των δυνατών ανακυκλώσεών τους και να απαιτείται σταθερή εισροή παρθένων ινών κυτταρίνης.

Τα αποτελέσματα της ΑΚΖ δείχνουν ότι το σύστημα παραγωγής αιθανόλης παρουσιάζει πολύ καλή περιβαλλοντική απόδοση. Ειδικότερα, οι καθαρές εκπομπές στο περιβάλλον είναι σχετικά χαμηλές και στις περισσότερες κατηγορίες περιπτώσεων είναι αρνητικές, δηλαδή υπάρχει καθαρό όφελος για το περιβάλλον. Οι μεγαλύτερες θετικές καθαρές εκπομπές παρατηρούνται στις κατηγορίες «Οικοτοξικότητα», «Ευτροφισμός, θάλασσα» και «Ευτροφισμός, έδαφος», οι οποίες αποδίδονται στις εκπομπές που σχετίζονται με το στάδιο της εφαρμογής στο έδαφος του χωνεύματος που παράγεται από την αναερόβια χώνευση, το οποίο είναι κοινό στάδιο στα περισσότερα εξεταζόμενα συστήματα παραγωγής αιθανόλης.

Το σύστημα παραγωγής αιθανόλης με αποκεντρωμένη ξήρανση των βιοαποβλήτων σε επίπεδο δήμου ή δήμων παρουσιάζει χαμηλές αλλά θετικές εκπομπές στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων, το οποίο αποδίδεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι η θερμότητα που παράγεται στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της ξήρανσης, καθώς η τελευταία γίνεται σε άλλο μέρος. Το σύστημα παραγωγής αιθανόλης με οικιακή ξήρανση των βιοαποβλήτων παρουσιάζει υψηλότερες εκπομπές σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, με τις περισσότερες κατηγορίες οι εκπομπές να είναι σημαντικά υψηλότερες, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι οι οικιακοί ξηραντήρες καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια και δη ηλεκτρισμό, σε αντίθεση με την κεντρική και αποκεντρωμένη ξήρανση η οποία χρησιμοποιεί απευθείας θερμότητα.

Όσον αφορά τα εναλλακτικά/επιπρόσθετα προϊόντα του συστήματος παραγωγής αιθανόλης από βιοαπόβλητα, διαπιστώνεται ότι η παραγωγή από το βιοαέριο μεθανίου ως καύσιμο κίνησης αντί για ηλεκτρισμό και θερμότητα, παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση σε σχέση με το σύστημα αναφοράς σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων. Η παραγωγή ένυδρης αιθανόλης για χρήση ως καύσιμο θέρμανσης αντί για άνυδρη αιθανόλη ως καύσιμο κίνησης παρουσιάζει χειρότερη απόδοση σε σχέση με το σύστημα αναφοράς σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, ενώ η εκτροπή μέρους του υπολείμματος της απόσταξης για την παραγωγή ζωοτροφής παρουσιάζει χειρότερη απόδοση σε ορισμένες κατηγορίες επιπτώσεων και καλύτερη σε κάποιες άλλες.

Όσον αφορά την ανάλυση ευαισθησίας, αυτή έδειξε ότι η χρήση βιοαποβλήτων από υπηρεσίες εστίασης ως υπόστρωμα και η μείωση της δοσολογίας των ενζύμων λόγω βελτίωσης της δραστικότητάς τους οδηγεί σε περαιτέρω εξοικονομήσεις εκπομπών, όπως ήταν αναμενόμενο. Η παραγωγή ενέργειας από την καύση του στερεού κλάσματος του υπολείμματος της απόσταξης επίσης παρουσιάζει καλύτερη απόδοση σε αρκετές κατηγορίες επιπτώσεων σε σχέση με το σύστημα αναφοράς. Η αύξηση της δοσολογίας των ενζύμων για την επίτευξη της μέγιστης παραγωγής αιθανόλης παρουσιάζει χειρότερη απόδοση στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων.

Το βασικό σύστημα παραγωγής αιθανόλης σε σχέση με τις υφιστάμενες μεθόδους διαχείρισης των αστικών βιοαποβλήτων παρουσιάζει γενικά πολύ καλή επίδοση σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων ή είναι πολύ κοντά στις καλύτερες επιδόσεις των άλλων μεθόδων. Όσον αφορά τις επιπτώσεις στην κατηγορία «Κλιματική αλλαγή», οι καλύτερες επιδόσεις παρατηρούνται για την αναερόβια χώνευση, την καύση και το σύστημα αναφοράς όπου πραγματοποιούνται εξοικονομήσεις, ενώ η χειρότερη απόδοση με επιβαρύνσεις παρατηρείται για τη μέθοδο της ταφής. Όσον αφορά τις υπόλοιπες κατηγορίες επιπτώσεων, σχετικά υψηλές τιμές παρατηρούνται για την κομποστοποίηση στις κατηγορίες «Οξύνιση, έδαφος», «Ευτροφισμός, έδαφος» και «Αιωρούμενα σωματίδια» οι οποίες σχετίζονται με τις αέριες εκπομπές κατά τη διεργασία της κομποστοποίησης καθαυτή, για την αναερόβια χώνευση και την κομποστοποίηση στην κατηγορία «Ανθρώπινη τοξικότητα, μη καρκινογενής» και για όλες τις μεθόδους πλην της καύσης στην κατηγορία «Οικοτοξικότητα», οι οποίες σχετίζονται με τις εκπομπές κατά το στάδιο της χρήσης του παραγόμενου εδαφοβελτιωτικού ή με τις εκπομπές από τη διάθεση των επεξεργασμένων στραγγισμάτων της ταφής στα επιφανειακά νερά.

Στη συνέχεια, έγινε αξιολόγηση της βιωσιμότητας της εφαρμογής του συστήματος διαχείρισης των βιοαποβλήτων για την παραγωγή αιθανόλης σε πλήρη κλίμακα. Ειδικότερα, διεξήχθη λεπτομερής χρηματοοικονομική ανάλυση της μονάδας μετατροπής των βιοαποβλήτων για την παραγωγή αιθανόλης για τρία διαφορετικά σενάρια όσον αφορά τη ξήρανση, ήτοι (i) ξήρανση σε οικιακό επίπεδο, (ii) ξήρανση σε επίπεδο δήμων και (iii) ξήρανση σε επίπεδο κεντρικής μονάδας. Για κάθε σενάριο εξετάστηκαν διαφορετικά υποσενάρια ανά περίπτωση όσον αφορά το κόστος ή/και τη δοσολογία των ενζύμων, την τιμή πώλησης της βιοαιθανόλης, το ύψος δανειοδότησης και τη διάρκεια του δανείου.

Η χρηματοοικονομική ανάλυση για τα διαφορετικά σενάρια ξήρανσης ανέδειξε μεταξύ άλλων το κατώτερο τέλος διαχείρισης των βιοαποβλήτων για τους δήμους το οποίο είναι παράλληλα βιώσιμο και για τη μονάδα παραγωγής αιθανόλης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι το σύστημα διαχείρισης των βιοαποβλήτων με κεντρική ξήρανση για την παραγωγή αιθανόλης είναι το πιο οικονομικό για τους δήμους (κόστος διαχείρισης για τους δήμους: 91-122€/τόνο νωπού βιοαπόβλητου) σε σύγκριση με την αποκεντρωμένη ξήρανση (κόστος διαχείρισης για τους δήμους: 113-136€/τόνο νωπού βιοαποβλήτου). Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του γεγονότος ότι η παραγόμενη θερμότητα από το βιοαέριο στη μονάδα παραγωγής αιθανόλης δεν αξιοποιείται για την ικανοποίηση (μέρους) των ενεργειακών αναγκών της ξήρανσης στην περίπτωση που αυτή πραγματοποιείται αλλού (αποκεντρωμένα), με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος διαχείρισης των δήμων με το αντίστοιχο ποσό για την αγορά φυσικού αερίου και την κάλυψη των ενεργειακού ελλείμματος. Στην περίπτωση που μέρος των ξηρών βιοαποβλήτων που παράγονται από την αποκεντρωμένη ξήρανση χρησιμοποιηθούν προκειμένου να παραχθεί ενέργεια μέσω της καύσης τους για να τροφοδοτήσει την ξήρανση, τότε το κόστος διαχείρισης για το δήμο μπορεί να μειωθεί περαιτέρω (78-88€/τόνο νωπού βιοαποβλήτου). Το σύστημα αποκεντρωμένης ξήρανσης με καύση παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση σε σχέση με την αποκεντρωμένη ξήρανση στις κατηγορίες επιπτώσεων «Κλιματική αλλαγή» και «Εξάντληση αβιοτικών ορυκτών πόρων», λόγω της αποφυγής χρήσης ορυκτών καυσίμων για τη ξήρανση, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής. Ωστόσο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η ανάκτηση ενέργειας από τα απόβλητα είναι λιγότερο επιθυμητή μέθοδος διαχείρισης σε σχέση με την ανακύκλωση σύμφωνα με την ιεράρχηση των μεθόδων διαχείρισης αποβλήτων της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Απόβλητα, καθώς επιτυγχάνεται εξοικονόμηση πόρων λόγω

της υποκατάστασης της παραγωγής ανόργανων λιπασμάτων. Αυτό αντικατοπτρίζεται στην κατηγορία επίπτωσης «Εξάντληση αβιοτικών πόρων-Στοιχεία και ενώσεις», όπου η αποκεντρωμένη ξήρανση με καύση εμφανίζει επιβαρύνσεις, σε αντίθεση με τις άλλες δύο περιπτώσεις όπου έχουμε εξοικονόμηση πόρων. Αυτό αποδίδεται κυρίως στο γεγονός ότι παράγεται λιγότερο λίπασμα, λόγω της καύσης μέρους των ΒΑΑ και έτσι οι εξοικονομήσεις είναι μικρότερες από τις επιβαρύνσεις. Τέλος, η ανάλυση έδειξε ότι η ξήρανση σε επίπεδο οικίας δεν είναι οικονομική (κόστος διαχείρισης για τους δήμους: 152-176€/τόνο νωπού βιοαποβλήτου), κυρίως λόγω του υψηλού κόστους για την αγορά των οικιακών ξηραντήρων και των υψηλής κατανάλωσης ενέργειας για ξήρανση (και δη ηλεκτρισμού) σε σχέση με τα άλλα σενάρια. Ωστόσο, η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι μια μείωση του κόστους του οικιακού ξηραντήρα κατά 50€ (100€ από 150€) μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μείωση περίπου 14€ στο συνολικό κόστος διαχείρισης του δήμου.

Στο τελευταίο μέρος της διατριβής αυτής, παρουσιάζεται το εργαλείο πολυκριτηριακής ανάλυσης (Multicriteria Analysis, MCA) που αναπτύχθηκε για τη συγκριτική αξιολόγηση της συνολικής βιωσιμότητας των μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων και του συστήματος βιοδιϋλιστηρίου. Η αξιολόγηση γίνεται με βάση ένα αριθμό σχετικών οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών κριτηρίων. Το εργαλείο πολυκριτηριακής ανάλυσης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της έρευνας αυτής έχει ως σκοπό την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση των βιοαποβλήτων σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο. Το εργαλείο είναι κατάλληλο και για γενική χρήση, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιονδήποτε ενδιαφέρεται να διερευνήσει τις επιδόσεις της κάθε μεθόδου ή συνδυασμού μεθόδων (εναλλακτικά σενάρια) ως προς τα εξεταζόμενα κριτήρια. Το συγκεκριμένο εργαλείο παρέχει τη δυνατότητα ανάδειξης της βέλτιστης επιλογής-λύσης συνυπολογίζοντας πλήθος κριτηρίων των οποίων η σημαντικότητα μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του εκάστοτε ενδιαφερόμενου φορέα.

Σύμφωνα με τον μέσο όρο των περιβαλλοντικών κριτηρίων (κατηγοριών επίπτωσης) που εξετάζονται, η καύση με παραγωγή ενέργειας αναδεικνύεται ως η καλύτερη περιβαλλοντικά μέθοδος, ακολουθούμενη από το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με κεντρική/αποκεντρωμένη ξήρανση. Σύμφωνα με το οικονομικό κριτήριο, προτιμώτερη οικονομικά μέθοδος είναι αυτή της κομποστοποίησης, ενώ ακολουθεί η ταφή και η αναερόβια χώνευση. Η καύση και το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση ισοβαθμούν στην πέμπτη θέση. Τα υψηλότερα κόστη σχετίζονται με τα εναλλακτικά συστήματα βιοδιϋλιστηρίου, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς περιλαμβάνουν πιο σύνθετες διεργασίες, και απαιτούν ειδικό εξοπλισμό, ακριβότερες πρώτες ύλες (π.χ. ένζυμα) και πιο εξειδικευμένο προσωπικό. Ωστόσο τα συστήματα βιοδιϋλιστηρίου παράγουν και τα υψηλότερα καθαρά έσοδα, καθώς εκτός από την πώληση του παραγόμενου πλεονάζοντος ηλεκτρισμού και του εδαφοβελτιωτικού, προκύπτουν και σημαντικά έσοδα από την πώληση της παραγόμενης αιθανόλης. Σύμφωνα με το μέσο όρο των κοινωνικών κριτηρίων της κοινωνικής αποδοχής και της δημιουργίας θέσεων εργασίας, καλύτερη μέθοδος αναδεικνύεται η αναερόβια χώνευση, ακολοθούμενη από την καύση και το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με αποκεντρωμένη ξήρανση, χωρίς και με καύση. Στη συνέχεια εξετάστηκαν με την πολυκριτηριακή ανάλυση τέσσερα εναλλακτικά σενάρια, όπου στα τρία πρώτα δινόταν μεγαλύτερη βαρύτητα σε διαφορετική ομάδα κριτηρίων (περιβαλλοντικό, οικονομικό, κοινωνικό σενάριο), ενώ στο τέταρτο δινόταν ίση βαρύτητα σε όλες τις ομάδες κριτηρίων (ισοσταθμισμένο). Τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης έδειξαν ότι η μέθοδος της καύσης είναι η προτιμότερη μέθοδος τόσο σύμφωνα με το σταθμισμένο σενάριο όπου δίνεται ίση βαρύτητα σε όλα τα κριτήρια, όσο και με το περιβαλλοντικό σενάριο, όπου δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στα περιβαλλοντικά κριτήρια. Η μέθοδος της αναερόβιας χώνευσης αναδεικνύεται ως η καλύτερη μέθοδος σύμφωνα τόσο με το οικονομικό σενάριο, όσο και με το κοινωνικό σενάριο. Η κομποστοποίηση σε όλα τα σενάρια εκτός από το περιβαλλοντικό, βρίσκεται μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης θέσης. Σύμφωνα με το περιβαλλοντικό σενάριο, στην τρίτη θέση βρίσκεται το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με κεντρική ξήρανση, αλλά και το αντίστοιχο σύστημα με αποκεντρωμένη ξήρανση και καύση. Γενικά, τα

δύο αυτά συστήματα βιοδιϋλιστηρίου υπερτερούν σε σχέση με τα συστήματα βιοδιϋλιστηρίου με ξήρανση σε αποκεντρωμένο και οικιακό επίπεδο, σε όλα τα σενάρια. Η μέθοδος της ταφής με καύση του βιοαερίου και με παραγωγή ενέργειας αλλά και το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου με οικιακή ξήρανση καταλαμβάνουν τις τελευταίες θέσεις σε όλα τα σενάρια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 15. Προτάσεις

Με βάση τα αποτελέσματα της διατριβής αυτής και των συμπερασμάτων που προέκυψαν, μπορούν να προταθούν τα ακόλουθα:

- Δεδομένου ότι τα συστήματα της αναερόβιας χώνευσης και της καύσης έχουν πολύ καλή επίδοση στα περισσότερα από τα εξεταζόμενα κριτήρια, θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν στις μεθόδους διαχείρισης που προβλέπονται στον Εθνικό Σχεδιασμό Διαχείρισης Αποβλήτων, καθώς μέχρι στιγμής συμπεριλαμβάνεται μόνο η κομποστοποίηση, η οποία γενικά έχει χαμηλότερη επίδοση στα περισσότερα κριτήρια. Ένα πιο διαφοροποιημένο σύστημα διαχείρισης αποβλήτων θα είχε ως αποτέλεσμα να αξιοποιούνται περισσότερο τα οφέλη και να περιορίζονται οι αδυναμίες συγκεκριμένων μεθόδων.

- Παρόλο που το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου δεν αποτελεί την καλύτερη λύση σε σχέση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές μεθόδους διαχείρισης αποβλήτων, συνεισφέρει στη μείωση των εκπομπών ΑΦΘ από τον τομέα των μεταφορών, ο οποίος έχει μεγάλη συνεισφορά στις συνολικές εκπομπές ΑΘΦ (23%) . Επίσης παράγει παράλληλα πολλά προϊόντα και προσφέρει πολλές εναλλακτικές σε αντίθεση με τις υπόλοιπες λύσεις και έτσι μπορεί να αντισταθμίσει τις αρνητικές επιπτώσεις των λύσεων αυτών. Το σύστημα βιοδιϋλιστηρίου μπορεί να παραμείνει ανταγωνιστικό οικονομικά σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους διαχείρισης, ανάλογα με τις εκάστοτε τιμές της αγοράς. Στην ίδια κατεύθυνση, προτείνεται να αξιολογηθεί η παροχή οικονομικών κινήτρων στους παραγωγούς για την πώληση της αιθανόλης.

- Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής και ειδικότερα της πολυκριτηριακής αξιολόγησης όσον αφορά τη βιωσιμότητα των μεθόδων διαχείρισης βιοαποβλήτων, δεν εφαρμόστηκαν βαρύτητες στα επιλεγμένα κριτήρια, ενώ τα αποτελέσματα της ΑΚΖ από ορισμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων δεν χρησιμοποιήθηκαν καθόλου (μηδενική βαρύτητα), προκειμένου να δοθεί περισσότερη έμφαση στις κατηγορίες για τις οποίες υπολογίζονται οι υψηλότερες επιπτώσεις στις περισσότερες μεθόδους. Αυτό ωστόσο μπορεί να οδηγήσει στην παράβλεψη ορισμένων σημαντικών επιπτώσεων για κάποιες μεθόδους. Δεδομένου ότι τόσο η επιλογή των κριτηρίων όσο και των βαρών που δίνονται σε αυτές, ενέχει μεγάλο βαθμό υποκειμενικότητας, προτείνεται να γίνει από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, καθώς θα τους δώσει τη δυνατότητα να προσαρμόσουν την αξιολόγηση στις πραγματικές τους απαιτήσεις και ανάγκες.

- Σύμφωνα με τη διατριβή αυτή, η χρήση βιοαποβλήτων από υπηρεσίες εστίασης ως υπόστρωμα στη διεργασία παραγωγής αιθανόλης, μπορεί να αυξήσει το ενεργειακό περιεχόμενο για την παραγωγή αιθανόλης κατά 44% σε σχέση με τα οικιακά βιοαπόβλητα, το οποίο μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μεταξύ άλλων μια σχεδόν ανάλογη αύξηση των αποφευχθείσων εκπομπών στην κατηγορία «Κλιματική αλλαγή» λόγω της υποκατάστασης των συμβατικών καυσίμων κίνησης και της υποκατάστασης των ανόργανων λιπασμάτων. Δεδομένου του σημαντικού αυτού δυναμικού, προτείνεται η εξέταση της παράλληλης χρήσης και άλλων πλούσιων ενεργειακά υποστρωμάτων για την παραγωγή αιθανόλης, τα οποία ανάλογα με την περίσταση μπορεί να μην έχουν ανταγωνιστικές χρήσεις και να διατίθενται δωρεάν ή σε πολύ χαμηλή τιμή. Παραδείγματα τέτοιων βιοαποβλήτων είναι τα απόβλητα τροφίμων από φούρνους, τα υπολείμματα καφέ, αγροτικά υπολείμματα καθώς και τα απόβλητα από βιομηχανίες τροφίμων, όπως από την παραγωγή χυμών, μπύρας και την επεξεργασία της πατάτας.

- Η αύξηση της δραστικότητας των ενζύμων και της ενεργειακής έντασης για την παραγωγή τους μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω σημαντικές εξοικονομήσεις εκπομπών στην παραγωγή αιθανόλης από βιοαπόβλητα, σύμφωνα πάλι με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας

στην ερευνητική ενότητα Β.1. Η αύξηση της δραστικότητας των ενζύμων αποτελεί προτεραιότητα επίσης και για την βιομηχανία των ενζύμων, η οποία έχει βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των ενζύμων τα τελευταία έτη. Για το λόγο αυτό προτείνεται περαιτέρω μελέτη της χρήσης νέων προηγμένων ενζύμων στη διεργασία παραγωγής αιθανόλης, προκειμένου να αξιολογηθεί πώς αυτό επηρεάζει τη συνολική βιωσιμότητα των εξεταζόμενων συστημάτων βιοδϊυλιστηρίου.

Βιβλιογραφία

1. (S&T)² Consultants Inc. (2018), Description and data collection on biofuel technologies (draft). Available at https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/renewable_fuels_technology_catalogue_revised_draft_report.docx
2. Aditiya, H. B., Mahlia, T. M. I., Chong, W. T., Nur, H., & Sebayang, A. H. (2016). Second generation bioethanol production: A critical review. Renewable and sustainable energy reviews, 66, 631-653.
3. Ahrens D. (2007). Essential of meteorology. An invitation to the atmosphere. Thomson Learning Inc.
4. Amores, M. J., Meneses, M., Pasqualino, J., Antón, A., & Castells, F. (2013). Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. Journal of Cleaner Production, 43, 84-92.
5. Andersen, M. S., Blake, D. R., Rowland, F. S., Hurley, M. D., & Wallington, T. J. (2009). Atmospheric Chemistry of Sulfuryl Fluoride: Reaction with OH Radicals, Cl Atoms and O 3, Atmospheric Lifetime, IR Spectrum, and Global Warming Potential. Environmental science & technology, 43(4), 1067-1070.
6. Angelidaki, I., & Batstone, D. J. (2011). Anaerobic digestion: process. In Solid Waste Technology and Management (pp. 583-600). Wiley.
7. ARCADIS/Eunomia (2009). Assessment of the options to improve the management of bio-waste in the European Union. Annex E: Approach to estimating costs (project assigned by the EC-DG Environment)
8. Arena, U., Mastellone, M. L., & Perugini, F. (2003). Life cycle assessment of a plastic packaging recycling system. The international journal of life cycle assessment, 8(2), 92.
9. Arena, U., Mastellone, M. L., Perugini, F., & Clift, R. (2004). Environmental assessment of paper waste management options by means of LCA methodology. *Industrial & engineering chemistry research*, *43*(18), 5702-5714.
10. Arnold, T., Harth, C. M., Mühle, J., Manning, A. J., Salameh, P. K., Kim, J., ... & Baggenstos, D. (2013). Nitrogen trifluoride global emissions estimated from updated atmospheric measurements. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(6), 2029-2034.
11. Astrup, T., Fruergaard, T., & Christensen, T. H. (2009). Recycling of plastic: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. Waste management & research, 27(8), 763-772.
12. Bakas, I., Laurent, A., Clavreul, J., Bernstad Saraiva, A., Niero, M., Gentil, E. & Hauschild, M.Z. (2018) LCA of Solid Waste Management Systems. In: Hauschild M., Rosenbaum R., Olsen S. (eds) Life Cycle Assessment. Springer, Cham
13. Bakas, I., Hauschild, M. Z., Astrup, T. F., & Rosenbaum, R. K. (2015). Preparing the ground for an operational handling of long-term emissions in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *20*(10), 1444-1455.
14. Betts, R. A. (2001). Biogeophysical impacts of land use on present-day climate: near-surface temperature change and radiative forcing. Atmospheric Science Letters, 2(1-4), 39-51.
15. Bjørn A., Moltesen, A., Laurent, A., Owsianiak, M., Corona, A., Birkved, M. & Hauschild, M.Z. (2018c) Life Cycle Inventory Analysis. In: Hauschild M., Rosenbaum R., Olsen S. (eds) Life Cycle Assessment. Springer, Cham
16. Bjørn A., Laurent A., Owsianiak M., Olsen S.I. (2018a) Goal Definition. In: Hauschild M., Rosenbaum R., Olsen S. (eds) Life Cycle Assessment. Springer, Cham
17. Bjørn A., Owsianiak M., Laurent A., Olsen S.I., Corona A., Hauschild M.Z. (2018b) Scope Definition. In: Hauschild M., Rosenbaum R., Olsen S. (eds) Life Cycle Assessment. Springer, Cham
18. Bogdanovic, J., Wilts, H., Galinski, L., Marin, G., Paleari, S., & Zoboli, R. (2017). Assessment of waste incineration capacity and waste shipments in Europe. European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy, European Environment Agency

19. Boldrin, A., Andersen, J.K., Moller, J., Favoino, E., Christensen, T.H. (2009). Composting and compost utilization: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. Waste Management and Research 27, 800–812
20. Boldrin, A., Neidel, T. L., Damgaard, A., Bhander, G. S., Møller, J., & Christensen, T. H. (2011). Modelling of environmental impacts from biological treatment of organic municipal waste in EASEWASTE. *Waste Management*, *31*(4), 619-630.
21. Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., ... & Rasch, P. (2013). Clouds and aerosols. In Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 571-657). Cambridge University Press.
22. Bounoua, L., DeFries, R., Collatz, G. J., Sellers, P., & Khan, H. (2002). Effects of land cover conversion on surface climate. Climatic Change, 52(1-2), 29-64.
23. Brandão, M., Levasseur, A., Kirschbaum, M. U., Weidema, B. P., Cowie, A. L., Jørgensen, S. V., ... & Chomkhamsri, K. (2013). Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting. The International Journal of Life Cycle Assessment, 18(1), 230-240.
24. Browne, J. D., Allen, E., & Murphy, J. D. (2013). Evaluation of the biomethane potential from multiple waste streams for a proposed community scale anaerobic digester. Environmental technology, 34(13-14), 2027-2038.
25. 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.
26. Christensen, T. H., Gentil, E., Boldrin, A., Larsen, A. W., Weidema, B. P., & Hauschild, M. (2009). C balance, carbon dioxide emissions and global warming potentials in LCA-modelling of waste management systems. *Waste Management & Research*, *27*(8), 707-715.
27. Classen, M., Althaus, H.-J., Blaser, S., Scharnhorst, W., Tuchschmid, M. & Jungbluth, N. (2007). Life Cycle Inventories of Metals. Final report Ecoinvent v2.0 No. 10, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Duebendorf, Switzerland
28. Clavreul, J., Baumeister, H., Christensen, T. H., & Damgaard, A. (2014). An environmental assessment system for environmental technologies. *Environmental modelling & software*, *60*, 18-30.
29. Clavreul, J., Guyonnet, D., & Christensen, T. H. (2012). Quantifying uncertainty in LCA-modelling of waste management systems. *Waste Management*, *32*(12), 2482-2495.
30. Curran, M.A., Mann, M., Norris, G. (2005). The international workshop on electricity data for life cycle inventories. Journal of Cleaner Production 13, 853–862
31. Dalemo, M., Sonesson, U., Björklund, A., Mingarini, K., Frostell, B., Jönsson, 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*(1), 17-37.
32. De Vries, J. W., Vinken, T. M. W. J., Hamelin, L., & De Boer, I. J. M. (2012). Comparing environmental consequences of anaerobic mono-and co-digestion of pig manure to produce bio-energy–a life cycle perspective. Bioresource technology, 125, 239-248.
33. Delgado, C., Barruetabeña, L., Salas, O. & Wolf, O. (ed.) (2007). Assessment of the Environmental Advantages and Drawbacks of Existing and Emerging Polymers Recovery Processes. Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre, European Commission.
34. Den Boer, J., Den Boer, E., & Jager, J. (2007). LCA-IWM: a decision support tool for sustainability assessment of waste management systems. *Waste management*, *27*(8), 1032-1045.
35. Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M., & Dickinson, R. E. Coauthors, 2007: Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, 499-587.

36. Dubois, M., González, A. M. M., Knadel, M., & Lystbæk, C. (2004). Municipal solid waste treatment in the EU. Environmental Studies, Aarhus University.
37. Dunn, J. B., Mueller, S., Wang, M., & Han, J. (2012). Energy consumption and greenhouse gas emissions from enzyme and yeast manufacture for corn and cellulosic ethanol production. *Biotechnology letters*, *34*(12), 2259-2263.
38. EAA (2008). Environmental Profile Report for the European Aluminum Industry. Life Cycle Inventory Data for Aluminum Production and Transformation Processes in Europe. European Aluminum Association. April 2008.
39. EC, 2015. Circular Economy factsheet: Closing the loop. European Commission. https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/circular-economy-factsheet-general_en.pdf
40. EC-JRC (2010a). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook—General Guide for Life Cycle Assessment—Detailed guidance. European Commission—Joint Research Centre—Institute for Environment and Sustainability: First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union.
41. EC-JRC (2010b). International Life Cycle Data System (ILCD) Handbook—Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators, 1st edn. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Italy
42. EC-JRC (2011a). International Reference Life Cycle Data System (ILCD): Handbook—Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context—Based on Existing Environmental Impact Assessment Models and Factors, 1st edn 2011, EUR 24571 EN. European Commission-Joint Research Centre—Institute for Environment and Sustainability, Publication Office of the European Union, Luxemburg
43. EC-JRC (2011b). Supporting Environmentally Sound Decisions for Waste Management—A Technical Guide to Life Cycle Thinking (LCT) and Life Cycle Assessment (LCA) for Waste Experts and LCA Practitioners. EUR 24916 EN. European Commission—Joint Research Centre—Institute for Environment and Sustainability. Publications Office of the European Union, Luxembourg
44. EC-JRC (2015). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board.
45. EEA (2020). Atmospheric greenhouse gas concentrations, Indicator Assessment - Data and maps. European Environment Agency. Denmark
46. Ekvall, T., Azapagic, A., Finnveden, G., Rydberg, T., Weidema, B. P., & Zamagni, A. (2016). Attributional and consequential LCA in the ILCD handbook. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21(3), 293-296.
47. EPRS (2016). Briefing January 2016 Closing the loop New circular economy package. EPRS | European Parliamentary Research Service Author: Didier Bourguignon. Members' Research Service PE 573.899
48. Eriksson, O., Frostell, B., Björklund, A., Assefa, G., Sundqvist, J. O., Granath, J., Carlsson, M., Baky, A., Thyselius, L. (2002). ORWARE—a simulation tool for waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, *36*(4), 287-307.
49. EurObserv'ER (2019). Biofuels barometer.
50. EuropaBio (2016). EuropaBio Report, Jobs and growth generated by industrial biotechnology in Europe. European Association for Bioindustries, Brussels.
51. EC-JRC (2015). EU Agricultural Outlook Prospects for EU agricultural markets and income 2015–2025. Report. Directorate-General for Agriculture and Rural Development and Joint Research Centre's Institute for Prospective Technological Studies (JRC IPTS).
52. Eurostat, 2020. SHARES summary results 2018 (nrg_ind_ren). Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares
53. Eurostat, 2020a. Municipal waste by waste management operations [env_wasmun]

54. Eurostat/EEA, 2020. Greenhouse gas emissions by source sector (source: EEA) [env_air_gge]
55. Fantke, P., Jolliet, O., Evans, J. S., Apte, J. S., Cohen, A. J., Hänninen, O. O., ... & Loh, M. M. (2015). Health effects of fine particulate matter in life cycle impact assessment: findings from the Basel Guidance Workshop. The International Journal of Life Cycle Assessment, 20(2), 276-288.
56. Favoino, E. & Hogg, D. (2008). The potential role of compost in reducing greenhouse gases. Waste Management & Research, 26, 61–69.
57. Ferry, J. G. (2010). The chemical biology of methanogenesis. Planetary and Space Science, 58(14-15), 1775-1783.
58. FEVE (2010). Recycling. Why Glass Always Has a Happy CO_2 Ending. Available online: http://feve.org/wpcontent/uploads/2016/04/FEVE-brochure-Recycling-Why-glass-always-has-a-happy-CO2-ending-.pdf
59. Finnveden, G., Johansson, J., Lind, P., Moberg, A. (2005). Life cycle assessment of energy from solid waste-part 1: general methodology and results. Journal of Cleaner Production 13, 213–229.
60. Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Dorland, R. Van (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing., in: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [**Solomon**, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, Tignor, M. and H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
61. Fournier, G. P., & Gogarten, J. P. (2008). Evolution of acetoclastic methanogenesis in Methanosarcina via horizontal gene transfer from cellulolytic Clostridia. Journal of bacteriology, 190(3), 1124-1127.
62. Foust, T. D., Aden, A., Dutta, A. & Phillips, S. (2009). An economic and environmental comparison of a biochemical and a thermochemical lignocellulosic ethanol conversion processes. Cellulose (2009), Volume 16, p. 547–565.
63. Franklin Associated (2010). Life cycle inventory of 100% postconsumer HDPE and PET recycled resin from postconsumer containers and packaging. Final report prepared for The Plastics Division of the American Chemistry Council
64. Frischknecht, R., Jolliet, O. (2016). Global guidance for life cycle impact assessment indicators 166. https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.22.120501.134539
65. Fruergaard, T., Hyks, J., Astrup, T. (2010). Life-cycle assessment of selected management options for air pollution control residues from waste incineration. Science of the Total Environment, 408, 4672–4680
66. Gentil, E. (2006). WRATE: Waste LCA for Municipal Waste Strategies. *Nottinghamshire: Golder Associates, no date*.
67. Gentil, E. C., Damgaard, A., Hauschild, M., Finnveden, G., Eriksson, O., Thorneloe, S., Kaplan, P.O., Barlaz, M., Muller, O., Matsui, Y., Ii, R., Christensen, T.H. (2010). Models for waste life cycle assessment: review of technical assumptions. *Waste Management*, *30*(12), 2636-2648.
68. Gentil, E., Christensen, T. H., & Aoustin, E. (2009). Greenhouse gas accounting and waste management. Waste Management & Research, 27(8), 696-706.
69. Giugliano, M., Cernuschi, S., Grosso, M., & Rigamonti, L. (2011). Material and energy recovery in integrated waste management systems. An evaluation based on life cycle assessment. Waste Management, 31(9-10), 2092-2101.
70. Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., Schryver, A. De, Struijs, J., Zelm, R. Van (2009). ReCiPe 2008. Potentials 1–44.
71. Guest, G., Cherubini, F., Strømman, A.H. (2013). Global warming potential of carbon dioxide emissions from biomass stored in the anthroposphere and used for bioenergy at end of life. J Indust Ecol 17:20–30

72. Guinée, J.B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., De Koning, A., Van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., De Bruijn, H., Huijbregts, M.A.J., Lindeijer, E., Roorda, A.A.H., Van der Ven, B.L., Weidema, B.P. (2001). Handbook on Life Cycle Assessment; Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
73. Guinée, J. B., & Heijungs, R. (1995). A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment. Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal, 14(5), 917-925.
74. Haight, M. (2004). Integrated Solid Waste Management Model. Technical Report. University of Waterloo, School of Planning, Waterloo, Canada, p. 101.
75. Ham, R.K. & Komilis, D.P. (2003). A Laboratory Study to Investigate Gaseous Emissions and Solids Decomposition During Composting of Municipal Solid Wastes. EPA-600/R-03/004. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
76. Ham, R.K., Komilis, D.P. (2000). Life cycle inventory and cost model for mixed municipal and yard waste composting. EPA/R-99/XXX, United States Environmental Protection Agency, Washington, July 2000.
77. Hamelin, L., Naroznova, I., Wenzel, H. (2014). Environmental consequences of different carbon alternatives for increased manure-based biogas. Applied Energy, 114, 774-782.
78. Hamelin, L., Wesnaes, M., Wenzel, H., Petersen, B.M. (2011). Environmental Consequences of Future Biogas Technologies Based on Separated Slurry. Environmental Science & Technology, 45, 5869-5877
79. Hansen, S., Abrahamsen, P., Petersen, C.T., Styczen, M. (2012). Daisy: Model use, calibration, and validation. Transaction of American Society of Agricultural and Biological Engineers 55(4): 1315-1333.
80. Hansen, C. L., & Cheong, D. Y. (2019). Agricultural waste management in food processing. In Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering (pp. 673-716). Academic Press.
81. Hansen, J. & Nazarenko, L. (2004). Soot climate forcing via snow and ice albedos. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 101, 423–428.
82. Hansen, T.L., Bhander, G.S., Christensen, T.H., Bruun, S. & Jensen, L.S. (2006). Life cycle modelling of environmental impacts of application of processed organic municipal solid waste on agricultural land (EASEWASTE). Waste Management & Research, 24, 153.
83. Hauschild, M., & Potting, J. (2005). Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment-The EDIP2003 methodology. Environmental news, 80, 1-195.
84. Hauschild, M. Z., Bonou, A., & Olsen, S. I. (2018). Life Cycle Interpretation. In Life Cycle Assessment (pp. 323-334). Springer, Cham.
85. Hauschild, M. Z., Goedkoop, M., Guinée, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., Margni, M., Schryver, A., Humbert, S., Laurent, A., Sala, S. Pant, R. (2013). Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 18(3), 683-697
86. Hauschild, M.Z., Olsen, S.I., Hansen, E., Schmidt, A. (2008). Gone. . . but not away – addressing the problem of long-term impacts from landfills in LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment 13, 547–554.
87. Horizon magazine (2020). Why raising the alcohol content of Europe's fuels could reduce carbon emissions. Available at https://horizon-magazine.eu/article/why-raising-alcohol-content-europe-s-fuels-could-reduce-carbon-emissions.html
88. Houghton, J. T., G. J. Jenkins, and J. J. Ephraums (eds.) (1990). Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 364 pp.
89. Huber (unknown) Sludge Dewatering. Huber Technology Wastewater Solution. Available at: http://www.huber.de/solutions/energy-efficiency/sludge-treatment/dewatering.html
90. Humbert, S. (2009). Geographically Differentiated Life-cycle Impact Assessment of Human Health. University of California, Berkeley, Berkeley, California, USA

91. Humbert, S., Marshall, J. D., Shaked, S., Spadaro, J. V., Nishioka, Y., Preiss, P., ... & Jolliet, O. (2011). Intake fraction for particulate matter: recommendations for life cycle impact assessment. Environmental science & technology, 45(11), 4808-4816.
92. Humbird, D., Davis, R., Tao, L., Kinchin, C., Hsu, D., Aden, A., ... & Sexton, D. (2011). Process design and economics for biochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol: dilute-acid pretreatment and enzymatic hydrolysis of corn stover (No. NREL/TP-5100-47764). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO.
93. IEA (2019). Renewables 2019 - Market analysis and forecast from 2019 to 2024 - Fuel report. International Energy Agency. Available at: https://www.iea.org/reports/renewables-2019/transport#abstract
94. IEA (2008). From 1st to 2nd generation biofuel technologies - An overview of current industry and R&D activities.
95. IPCC (2006). Biological Treatment of Solid Waste. In: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory. Intergovernmental Panel on Climate Change
96. IPCC (2014a). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E., Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
97. IPCC (2014b). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
98. IPCC (2018). Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.
99. IPPC (2001a). Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Reference Document on Best available Techniques in Glass Manufacturing Industry, December 2001. European Commission. Edificio Expo-WTC, Sevilla, Spain.
100. IPPC (2001b). Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries. December 2001. European Commision, Brussels, Belgium.
101. IPPC (2008). Integrated Pollution Prevention and Control. Draft Reference Document on Best Available Techniques for the Production of Iron and Steel. Draft February 2008. European IPPC Bureau, Seville, Spain.
102. IRENA (2019). Advanced biofuels. What holds them back?, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
103. ISO (2006a). Environmental management—life cycle assessment—principles and framework (ISO 14040). The International Organization for Standardization, Geneva
104. ISO (2006b). Environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines (ISO 14044). The International Organization for Standardization, Geneva
105. Johnson, E. (2016). Integrated enzyme production lowers the cost of cellulosic ethanol. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 10(2), 164-174.

106. Jørgensen, S.V, Hauschild, M.Z. (2013). Need for relevant timescales when crediting temporary carbon storage. Int J Life Cycle Assess 18:747–754
107. Jørgensen, S. V., Hauschild, M. Z., & Nielsen, P. H. (2015). The potential contribution to climate change mitigation from temporary carbon storage in biomaterials. The International Journal of Life Cycle Assessment, 20(4), 451-462.
108. Jungbluth, N., Chudacoff, M., Dauriat, A., Dinkel, F., Doka, G., Faist Emmenegger, M., ... & Stettler, C. (2007). Life cycle inventories of bioenergy. Final report ecoinvent data v2. 0, 17.
109. Kiehl, J. & Trenberth, K. (1997). Earth's annual global mean energy budget. Bull. Am. Meteorol. Soc., 78, 197–206.
110. Kirkeby, J.T., Hansen, T.L., Birgisdottir, H., Bhander, G.S., Hauschild, M.Z., Christensen, T.H. (2006). Environmental assessment of solid waste systems and technologies: EASEWASTE. Waste Manag. Res. 24, 3e15.
111. Komilis, D.P. & Ham, R.K. (2004). Life-Cycle inventory of municipal solid waste and yard waste windrow composting in the United States. Journal of Environmental Engineering, 130, 1390–1400
112. Kulczycka, J., Lelek, L., Lewandowska, A., & Zarebska, J. (2015). Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management--Comparison of Results Using Different LCA Models. *Polish Journal of Environmental Studies*, *24*(1).
113. Lacis, A. A., Wuebbles, D. J., Logan, J. A. (1990). Radiative forcing of climate by changes in the vertical-distribution of ozone, J. Geophys. Res., 95, 9971-9981.
114. Larsen, A. W., Merrild, H., & Christensen, T. H. (2009). Recycling of glass: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. Waste Management & Research, 27(8), 754-762.
115. Larsen, A. W., Vrgoc, M., Lieberknecht, P., & Christensen, T. H. (2009). Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance. *Waste Management & Research*.
116. Laurent, A., Hauschild, M. Z., Golsteijn, L., Simas, M., Fontes, J., & Wood, R. (2013). Normalisation factors for environmental, economic and socio-economic indicators. Development and application of a standardized methodology for the PROspective SUstaInability assessment of TEchnologies (PROSUITE).
117. Laurent, A., & Hauschild, M. Z. (2014). Impacts of NMVOC emissions on human health in European countries for 2000–2010: Use of sector-specific substance profiles. Atmospheric environment, 85, 247-255.
118. Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson T. & Prather, M. (2007). Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
119. Li, Y., Park, S. Y., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Renewable and sustainable energy reviews, 15(1), 821-826.
120. LIFE PAVEtheWAySTE (2020). Παραδοτέο Β.3.1: Έκθεση σχετικά με τη λειτουργία του πρωτότυπου συστήματος. Κωδικός έργου LIFE14 ENV/GR/000722
121. Lin, L., Yan, R., Liu, Y., & Jiang, W. (2010). In-depth investigation of enzymatic hydrolysis of biomass wastes based on three major components: cellulose, hemicellulose and lignin. Bioresource Technology, 101(21), 8217-8223.
122. Madson, P.W. (2005). Alcohol school - Distillation and molecular sieves: a practical viewpoint.
123. Manfredi, S., & Christensen, T. H. (2009). Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. *Waste management*, *29*(1), 32-43.
124. Manfredi, S., Tonini, D., Christensen, T. H., & Scharff, H. (2009). Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. Waste Management & Research, 27(8), 825-836.

125. Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2004). Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and bioenergy*, *27*(4), 339-352.
126. Maurya, D. P. & Singla, A. N. S. (2015). An overview of key pretreatment processes for biological conversion of lignocellulosic biomass to bioethanol. 3 Biotech, 5(5), pp. 597-609.
127. McDougall, F. R., White, P. R., Franke, M., & Hindle, P. (2008). *Integrated solid waste management: a life cycle inventory 2nd edition*. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
128. Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., & Wang, L. B. (2018). A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. *International journal of environmental research and public health*, *15*(10), 2224.
129. Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B.,Watterson, I.G., Weaver, A.J., Zhao, Z.C. (2007). Global Climate Projections. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) Climate change 2007 - The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, pp 747–845
130. Merlin Christy, P., Gopinath, L.R., Divya, D. (2014). A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. Renew Sustain Energy Rev 34:167–173.
131. Merrild, H., Damgaard, A., & Christensen, T. H. (2009). Recycling of paper: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. Waste Management & Research, 27(8), 746-753.
132. Mes, T., Stams, A., Reith, J., Zeeman, G. (2003). Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. Bio-methane and Bio-hydrogen 58–102
133. Miao, Z., Grift, T. E., Hansen, A. C., & Ting, K. C. (2011). Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. *Industrial crops and products*, *33*(2), 504-513.
134. Møller, J., Boldrin, A., & Christensen, T. H. (2009). Anaerobic digestion and digestate use: accounting of greenhouse gases and global warming contribution. *Waste management & research*, *27*(8), 813-824.
135. Møller, J., Jansen, J.L.C., Christensen, T.H., (2010). Digestion: mass balances and products. In: Christensen, T.H. (Ed.), Solid Waste Management and Technologies. Wiley & Sons, London.
136. Montzka, S. A., Dlugokencky, E. J., & Butler, J. H. (2011). Non-CO 2 greenhouse gases and climate change. Nature, 476(7358), 43-50.
137. Morrish, L., Morton, R., Myles, N., & Wilkinson, S. (2010). Good Practice Guidance - Near Infrared sorting of household plastic packaging. WRAP, UK
138. Mühle, J., Huang, J., Weiss, R. F., Prinn, R. G., Miller, B. R., Salameh, P. K., ... & O'Doherty, S. (2009). Sulfuryl fluoride in the global atmosphere. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 114(D5).
139. Myhre, G., Shindell, D., Breon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., Zhang, H. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, in: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia,. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 659–740.
140. Náthia-Neves, G., Berni, M., Dragone, G., Mussatto, S. I., & Forster-Carneiro, T. (2018). Anaerobic digestion process: technological aspects and recent developments. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *15*(9), 2033-2046.
141. Nevoigt, E. (2008). Progress in metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae*. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 72(3), pp. 379-412.
142. Nielsen, M., Nielsen, O., Thomsen, M. (2010). Emissions from decentralised CHP plants 2007. Environmental project no. 07/1882. Project report 5 – Emission factors and emission inventory for

decentralised CHP production. National Environmental Research Institute, Aarhus University, Aarhus, Denmark.
143. NREL (2012). U.S. Life Cycle Inventory Database." (2012). National Renewable Energy Laboratory, 2012.
144. OECD (2008) Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide. Technical Report. Organisation for Economic Co-Operation and Development, Paris: OECD Publishing
145. Patterson, T., Dinsdale, R., Esteves, S. (2008). Review of energy balances and emissions associated with biomass-based transport fuels relevant to the United Kingdom context. Energy and Fuels, 22, 3506-3512.
146. Perugini, F., Mastellone, M. L., & Arena, U. (2005). A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes. Environmental Progress, 24(2), 137-154.
147. Posch, M., Seppälä, J., Hettelingh, J.P., Johansson, M., Margni, M., Jolliet, O. (2008). The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA. Int. J. Life Cycle Assess. 13, 477–486. https://doi.org/10.1007/s11367-008-0025-9
148. PRé Consultants (2000). Eco-indicator 99 - A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Government of the Netherlands, Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment
149. Pressley, P. N., Levis, J. W., Damgaard, A., Barlaz, M. A., & DeCarolis, J. F. (2015). Analysis of material recovery facilities for use in life-cycle assessment. Waste Management, 35, 307-317.
150. Rak, A. (2011). Energy Efficiency in Mechanical Separation. Water Arabia 2011 – Bahrain. GEA Mechanical Equipment / GEA Westfalia Separator Group GmbH
151. Ramaswamy, V., Boucher, O., Haigh, J., Hauglustaine, D., Haywood, J., Myhre, G., et al. (2001). Radiative forcing of climate change. In J. T. Houghton et al. (Eds.), Climate change 2001: The scientific basis—IPCC Working Group I, Third Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 349– 416.
152. REN21 (2019). Renewables 2019 Global Status Report. REN21 Renewables now, Paris. ISBN 978-3-9818911-7-1
153. Riber, C., Bhander, G.S., Christensen, T.H. (2008). Environmental assessment of waste incineration in a life-cycle-perspective (EASEWASTE). Waste Management and Research 26, 96–103.
154. Riber, C., Petersen, C., Christensen, T.H. (2009). Chemical composition of material fractions in Danish household waste. Waste Manag. 29, 1251-1257.
155. Richard, T. L., & Walker, L. P. (1990). Composting trends and technologies. New York's food and life sciences quarterly (USA). Cornell University
156. Rigamonti, L., Grosso, M., & Sunseri, M. C. (2009). Influence of assumptions about selection and recycling efficiencies on the LCA of integrated waste management systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *14*(5), 411-419.
157. Rigamonti, L., Grosso, M., Møller, J., Sanchez, V. M., Magnani, S., & Christensen, T. H. (2014). Environmental evaluation of plastic waste management scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, *85*, 42-53.
158. Rosenbaum, R. K., Georgiadis, S., & Fantke, P. (2018b). Uncertainty Management and Sensitivity Analysis. In Life Cycle Assessment (pp. 271-321). Springer, Cham.
159. Rosenbaum, R. K., Hauschild, M. Z., Boulay, A. M., Fantke, P., Laurent, A., Núñez, M., & Vieira, M. (2018a). Life cycle impact assessment. In Life Cycle Assessment (pp. 167-270). Springer, Cham.
160. Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., Van De Meent, D., Hauschild, M.Z. (2008). USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: Recommended

characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. Int. J. Life Cycle Assess. 13, 532–546. https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4
161. Saffy, H. A., Northrop, W. F., Kittelson, D. B., & Boies, A. M. (2015). Energy, carbon dioxide and water use implications of hydrous ethanol production. Energy Conversion and Management, 105, 900-907.
162. Seppälä, J., Posch, M., Johansson, M., Hettelingh, J.P. (2006). Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator. Int. J. Life Cycle Assess. 11, 403–416. https://doi.org/10.1065/lca2005.06.215
163. Shindell, D., Faluvegi, G., Nazarenko, L., Bowman, K., Lamarque, J. F., Voulgarakis, A., ... & Ruedy, R. (2013). Attribution of historical ozone forcing to anthropogenic emissions. Nature Climate Change, 3(6), 567-570.
164. Shonfield, P. (2008). Final report - LCA of management options for mixed waste plastics. *WRAP, UK*.
165. Skeie, R., T. Berntsen, G. Myhre, K. Tanaka, M. Kvalevag, and C. Hoyle (2011). Anthropogenic radiative forcing time series from pre-industrial times until 2010. Atmos. Chem. Phys., 11, 11827–11857.
166. 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.
167. Søvde, O. A., Hoyle, C. R., Myhre, G., & Isaksen, I. S. (2011). The HNO 3 forming branch of the HO 2+ NO reaction: Pre-industrial-to-present trends in atmospheric species and radiative forcings. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(17), 8929-8943.
168. Struijs, J., Beusen, A., van Jaarsveld, H., Huijbregts, M.A.J. (2009). Aquatic Eutrophication, in: Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M.A.J., De Schryver, A., Struijs, J., Van Zelm, R. (2009). ReCiPe 2008 A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level. Report I: Character
169. Sun, Y. & Cheng, J. (2002). Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. Bioresource technology, pp. 1-11.
170. Tchobanoglous, G. & Kreith, F. (2002). Handbook of Solid Waste Management. 2nd Edition, McGraw Hill Handbooks. New York.
171. Thorneloe, S. A., Weitz, K., & Jambeck, J. (2007). Application of the US decision support tool for materials and waste management. *Waste Management*, *27*(8), 1006-1020.
172. Thorneloe, S. (2016). Development of a 2nd Generation Decision Support Tool to Optimize Resource and Energy Recovery for Municipal Solid Waste. Presented at International Conference on LCA, Cetraro, ITALY, June 05 - 10, 2016.
173. Tonini, D., Hamelin, L., Wenzel, H., Astrup, T. (2012). Bioenergy Production from Perennial Energy Crops: A Consequential LCA of 12 Bioenergy Scenarios including Land Use Changes. Environmental Science & Technology, 46, 13521-13530.
174. Tonini, D., Hamelin, L. and Astrup, T. F. (2016). Environmental implications of the use of agro-industrial residues for biorefineries: application of a deterministic model for indirect land-use changes. GCB Bioenergy, 8: 690–706.
175. Tumuluru, J. S., Tabil, L. G., Song, Y., Iroba, K. L., & Meda, V. (2014). Grinding energy and physical properties of chopped and hammer-milled barley, wheat, oat, and canola straws. *Biomass and bioenergy*, *60*, 58-67.
176. UNEP (2005). Solid Waste Management (Volume I). United Nations Environment Programme
177. UNEP (2010). Waste and Climate Change: Global trends and strategy framework. United Nations Environmental Programme Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre Osaka/Shiga

178. US EPA (2006). Solid Waste Management and Greenhouse Gases – A Life Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd Edition. United States Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.
179. Valta, K., Papadaskalopoulou, C., Dimarogona, M., & Topakas, E. (2019). Bioethanol from Waste–Prospects and Challenges of Current and Emerging Technologies. *Byproducts from Agriculture and Fisheries: Adding Value for Food, Feed, Pharma, and Fuels*, 421-456.
180. Van Oers, L., & Guinée, J. (2016). The abiotic depletion potential: background, updates, and future. Resources, 5(1), 16.
181. Van Oers, L., De Koning, A., Guinée, J. B., & Huppes, G. (2002). Abiotic resource depletion in LCA-Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook. Public Works and Water Management (V&W).
182. van Zelm, R., Huijbregts, M.A.J., den Hollander, H.A., van Jaarsveld, H.A., Sauter, F.J., Struijs, J., van Wijnen, H.J., van de Meent, D. (2008). European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment. Atmos. Environ. 42, 441–453. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.072
183. Vane, L. M. (2008). Separation technologies for the recovery and dehydration of alcohols from fermentation broths. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2(6), 553-588.
184. Viikari, L., Vehmaanpera, J. & Koivula, A. (2012). Lignocellulosic ethanol: from science to industry. Biomass and Bioenergy, pp. 13-24.
185. Vohra, M., Manwar, J., Manmode, R., Padgilwar, S., & Patil, S. (2014). Bioethanol production: Feedstock and current technologies. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2(1), 573-584.
186. Waste2Bio (2015). Έκθεση βελτιστοποίησης της διεργασίας της μονάδας βιομετατροπής - Παραδοτέο Β2.3. Έργο Waste2Bio (LIFE 11 ENV/GR/000949)
187. Waste2Bio (2016). Τεχνική Έκθεση καταγραφής των αποτελεσμάτων της πιλοτικής εφαρμογής - παραδοτέο Β.3.3. Έργο Waste2Bio (LIFE 11 ENV/GR/000949)
188. Weiss, R., J. Muhle, P. Salameh, and C. Harth (2008). Nitrogen trifluoride in the global atmosphere. Geophys. Res. Lett., 35, L20821.
189. Wenzel, H., Villanueva, A. (2006). Environmental Benefits of Recycling. An International Review of Life Cycle Comparisons for Key Materials in the UK Recycling Sector. Lyngby, Denmark, p. 254.
190. Withers, J. (2016). Barriers impacting United States advanced biofuel projects, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
191. WMO (2014). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 55. Geneva, Switzerland
192. Δήμος Ασπρόπυργου (2015). Τοπικό Σχέδιο Διαχείρισης Αστικών Στερεών Αποβλήτων Δήμου Ασπροπύργου – Προσχέδιο. Ελληνική Δημοκρατία
193. Δήμος Παπάγου-Χολαργού (2015). Τοπικό Σχέδιο Αποκεντρωμένης Διαχείρισης Απορριμμάτων του Δήμου Παπάγου-Χολαργού. Ελληνική Δημοκρατία
194. Ecoinvent. Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2016) Ecoinvent database V.3.
195. ΕΠΠΕΡΑΑ (2014). Οδηγός λειτουργίας ανοιχτών εγκαταστάσεων κομποστοποίησης (αερόβια επεξεργασία) προδιαλεγμένων αποβλήτων. Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη.
196. Κωνσταντινίδης, Α. (2012). Οικονομική αποτίμηση ενεργειακής αξιοποίησης βιοαερίου σε χώρους διάθεσης στερεών αστικών αποβλήτων. Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
197. Καλογιάννης, Ν. (2016). Επεξεργασία βιοαποβλήτων με τη μέθοδο της ξήρανσης και εφαρμογή σε επίπεδο δήμων. Μεταπτυχιακή εργασία ΔΠΜΣ Περιβάλλον και Ανάπτυξη, ΕΜΠ.
198. ΥΠΕΚΑ (2013). Αναθεώρηση Εθνικού Σχεδιασμού Διαχείρισης Αποβλήτων: Υφιστάμενη Κατάσταση Διαχείρισης Αποβλήτων και Αξιολόγηση της Υφιστάμενης Κατάστασης. (2°

Παραδοτέο). Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Ειδική Υπηρεσία Διαχείρισης Επιχειρησιακού Προγράμματος «Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη».

199. ΥΠΕΚΑ (2015). *Εθνικό Σχέδιο Διαχείρισης Αποβλήτων (ΕΣΔΑ).* Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, Ειδική Υπηρεσία Διαχείρισης Επιχειρησιακού Προγράμματος «Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη».

Παράρτημα Ι: Σχετικές δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά

1. Valta K., Papadaskalopoulou C., Dimarogona M., Topakas E. (2019) Bioethanol from waste. Chapter in the book 'Byproducts from Agriculture and Fisheries: Adding Value for Food, Feed, Pharma and Fuels', Benjamin K. Simpson, Ebenezer M. Kwofie, Alberta N. Aryee and Fidel Toldra. Wiley-Blackwell, ISBN: 978-1119383970.
2. C. Papadaskalopoulou, A. Sotiropoulos, D. Malamis, D. Kekos, M. Loizidou. (2019) Comparative life cycle assessment of a waste to ethanol biorefinery system versus conventional waste management methods. Resources, Conservation and Recycling, 149, 130-139, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.006
3. Poulikakos, L.D., Papadaskalopoulou, C., Hofko, B., Gschösser, F., Cannone Falchetto, A., Bueno, M., Arraigada, M., Sousa, J., Ruiz, R., Petit, C., Loizidou, M., Partl, M.N. (2017) Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. Resources, Conservation and Recycling, 116, 32-44, http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.008
4. Panaretou, V., Malamis, D., Papadaskalopoulou, C., Sotiropoulos, A., Valta, K., Plevri, A., Margaritis, M., Moustakas, K., Loizidou, M (2017). Implementation and evaluation of an integrated management scheme for MSW in selected communities in Tinos Island, Greece. Waste and Biomass Valorization, 8(5), 1597-1616. DOI: 10.1007/s12649-016-9632-z.
5. D. Malamis, K. Moustakas, A. Bourka, K. Valta, C. Papadaskalopoulou, V. Panaretou, O. Skiadi, A. Sotiropoulos, (2015) Compositional analysis of food waste from study sites in Greek municipalities, Waste and Biomass Valorization, 6 (5), 637-646, DOI: 10.1007/s12649-015-9406-z
6. D. Xevgenos, C. Papadaskalopoulou, V. Panaretou, K. Moustakas, D. Malamis (2015), Success stories for recycling of MSW at municipal level: A review, Waste and Biomass Valorization 6 (5) 657-684, DOI: 10.1007/s12649-015-9389-9