



Α.Π.: 61048
Αθήνα, 19/12/24

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς:
τα Μέλη ΔΕΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ


Σας προσκαλούμε στην εξέταση-παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υποψήφιου Διδάκτορα κ. **ΚΟΥΡΚΟΥΜΠΑ Δημήτριου-Σωτήριου**, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού του ΕΜΠ και κατόχου Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης του ΔΠΜΣ «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας» του ΕΜΠ, με τον τίτλο:

Στα Αγγλικά: «**Evaluation of sustainable energy routes, under a circular economy framework, using life cycle analysis principles in a multi-parametric approach**»

Στα Ελληνικά: «**Αξιολόγηση βιώσιμων ενεργειακών οδών στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας εφαρμόζοντας τις αρχές της ανάλυσης κύκλου ζωής με πολύ-παραμετρική προσέγγιση**»

Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί τη *Δευτέρα 13 Ιανουαρίου 2025* και ώρα *11:00 – 14:00*, στο *Αμφιθέατρο Πολυμέσων του Κτηρίου Βιβλιοθήκης του Ε.Μ.Π.*

Ο Κοσμήτορας της Σχολής



Ι. Αντωνιάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

PhD Thesis

Evaluation of sustainable energy routes, under a circular economy framework, using life cycle analysis principles in a multi-parametric approach

Διδακτορική Διατριβή

Αξιολόγηση βιώσιμων ενεργειακών οδών στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας εφαρμόζοντας τις αρχές της ανάλυσης κύκλου ζωής με πολύ-παραμετρική προσέγγιση

Σύνοψη

Στόχος της διδακτορικής διατριβής είναι να παρέχει μια ολιστική προσέγγιση ως οδηγό για τη συστηματική οικοδόμηση γνώσεων σχετικά με τα μεθοδολογικά πλαίσια της ανάλυσης κύκλου ζωής (AKZ) προς λήψη αποφάσεων σε τομείς ενέργειας και υλικών, καθώς και να παρέχει συστάσεις για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της εφαρμογής τους σε περιβαλλοντικό και οικονομικό επίπεδο, προκειμένου να υποστηρίξει την ανάπτυξη πλαισίων πολιτικής από τη σκοπιά της κυκλικής οικονομίας.

Η διδακτορική διατριβή πραγματοποιεί μια συγκριτική ανάλυση των υφιστάμενων οδηγιών που συνδέθηκαν με άμεσο ή έμμεσο τρόπο με τις τεχνικές AKZ. Συγκεκριμένα, διερευνώνται διεξοδικά η Οδηγία για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, το Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα Προϊόντος και η Περιβαλλοντική Δήλωση Προϊόντος. Σύμφωνα με την οδηγία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας η περιβαλλοντική αξιολόγηση των βιοκαυσίμων βασίζεται σε προκαθορισμένους περιβαλλοντικούς δείκτες. Ωστόσο, συνιστάται η διεξαγωγή λεπτομερούς Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για ολόκληρη την αλυσίδα αξίας των βιοκαυσίμων. Επιπλέον, δίνεται έμφαση στην αξιολόγηση των βιογενών εκπομπών CO₂ και στη μεθοδολογία ενσωμάτωσής τους σε σενάρια που ερευνώνται. Ο καθορισμός των ορίων, καθώς επίσης και η συνεκτίμηση της εξοικονόμησης εκπομπών που συνδέονται με ισοδύναμα συμβατικά ενδιάμεσα ή/και τελικά προϊόντα αποτελούν τις κύριες παραμέτρους. Επιπλέον, θα μπορούσαν επίσης να ληφθούν υπόψη οι αποφευχθείσες εκπομπές με τη χρήση βιοενέργειας/ΑΠΕ κατά τη διάρκεια της ανάλυσης ολόκληρου του κύκλου ζωής. Επιπλέον, προτείνονται βασικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) για τα ενεργειακά συστήματα, προκειμένου να εναρμονιστούν με τις ανάγκες και το ενδιαφέρον των εμπλεκόμενων φορέων. Οι δείκτες απόδοσης κατηγοριοποιούνται ανά στάδιο του κύκλου ζωής, δηλαδή στάδιο κατασκευής, στάδιο λειτουργίας, στάδιο τέλους ζωής.

Η διδακτορική διατριβή διερευνά περαιτέρω το πλαίσιο Κοστολόγησης Κύκλου Ζωής (KKZ) για κυκλικά ενεργειακά συστήματα. Γίνεται συγκριτική ανάλυση των υφιστάμενων πλαισίων KKZ.

Επιπλέον, αναπτύσσεται ένα συγκεκριμένο πλαίσιο ΚΚΖ για όλα τα στάδια του κύκλου. Το πλαίσιο αυτό έχει αναπτυχθεί σε συνάρτηση με τον χρόνο, προκειμένου να παρέχει αξιολόγηση καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του εξεταζόμενου συστήματος. Έμφαση δίνεται στον υπολογισμό του εξωτερικού κόστους, το οποίο υπολογίζεται σύμφωνα με την τυποποιημένη μεθοδολογία των Περιβαλλοντικών Τιμών. Ωστόσο, θα πρέπει να δοθεί προσοχή στις διαδικασίες που θα συμπεριληφθούν, ώστε να αποφευχθούν υπολογισμοί που περιλαμβάνουν διεργασίες που είτε έχουν ήδη ληφθεί είτε δεν απαιτείται να χρησιμοποιηθούν, ιδίως σε περιπτώσεις εκμετάλλευσης υποπροϊόντων. Όπως πραγματοποιήθηκε και στο πλαίσιο της ΑΚΖ, παρέχονται σχετικοί δείκτες απόδοσης για κάθε στάδιο του κύκλου ζωής, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες και οι απαιτήσεις των εμπλεκόμενων φορέων στην εξεταζόμενη αλυσίδα αξίας. Οι δείκτες απόδοσης έχουν δημιουργηθεί με βάση την ενσωμάτωση δεικτών της ανάλυσης κύκλου ζωής.

Επιπλέον, η διατριβή προτείνει ένα πλαίσιο Πολυκριτηριακής Λήψης Αποφάσεων (MCDM) για την ολιστική αξιολόγηση των εξεταζόμενων διεργασιών στο πλαίσιο των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Καταρχάς παρουσιάζεται συγκριτική ανάλυση των τρεχουσών μεθοδολογιών MCDM δίνοντας έμφαση στον τομέα που μπορούν να βρουν εφαρμογή. Προς αυτή την κατεύθυνση, παρέχονται πλεονεκτήματα και περιορισμοί της κάθε μεθοδολογίας με έμφαση στην εφαρμογή, τις απαιτήσεις δεδομένων, την αβεβαιότητα και τη διαφάνεια. Με βάση τα παραπάνω, προτείνεται ένας συνδυασμός δύο μεθοδολογιών AHP-TOPSIS, προκειμένου να εφαρμοστεί σε συστήματα κυκλικής οικονομίας. Τα κριτήρια που ορίζονται σε αυτό το πλαίσιο είναι περιβαλλοντικά, οικονομικά και τεχνικά. Η μέθοδος AHP εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό των σχετικών βαρών των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία επιλογής, ενώ η τεχνική TOPSIS χρησιμοποιεί αυτά τα βάρη της AHP για να ιεραρχήσει τις εναλλακτικές λύσεις.

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής δόθηκε έμφαση σε πέντε (5) τομείς της κυκλικής οικονομίας. Οι εξεταζόμενοι τομείς είναι: Παραγωγή βιοκαυσίμων για εφαρμογή στην αεροπορία/ναυτιλία, μετασκευή βιομηχανικών με χρήση βιοενέργειας, χρήση βιογενών εκπομπών CO₂ για παραγωγή προϊόντων προστιθέμενης αξίας, παραγωγή και χρήση ανανεώσιμων αερίων με έμφαση στο βιοαέριο/βιομεθάνιο και σχετικές ολοκληρωμένες αλυσίδες αξίας και διαχείριση των αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης της αναερόβιας χώνευσης, κομποστοποίηση, ανακύκλωση, αποτέφρωση απορριπτόμενων καυσίμων (RDF)/Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ). Ειδικότερα, όσον αφορά την παραγωγή βιοκαυσίμων προς χρήση του σε τομείς, όπως η αεροπορία/ναυτιλία, τα αποτελέσματα της ΑΚΖ δείχνουν ότι η αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων με τα παραγόμενα βιοκαύσιμα θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές GHG έως 85%. Για δείκτες όπως η κλιματική αλλαγή και η πρωτογενή ενέργεια, η διαδικασία της προεπεξεργασίας φαίνεται να έχει την κύρια συμβολή. Μελλοντική αύξηση της διεύθυνσης ΑΠΕ θα μπορούσε να μειώσει περαιτέρω τις εκπομπές έως και 70%. Όσον αφορά την περίπτωση μετασκευής μονάδας βιοαιθανόλης για βιώσιμη παραγωγή αεροπορικών

καυσίμων, τα υπολογισμένα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μετασκευή υφιστάμενης εγκατάστασης αιθανόλης IG έχει καλύτερες περιβαλλοντικές επιδόσεις από τη χωριστή λειτουργία της υπάρχουσας μονάδας παραγωγής βιοαιθανόλης και μιας νέας κατασκευής αυτόνομης μονάδας αεροπορικών καυσίμων. Ο κύριος αντίκτυπος της επίπτωσης στο φαινόμενο του θερμοκηπίου συνδέεται με τη λειτουργία του συστήματος συμπαραγωγής (~42 %) όσο και των λεβήτων φυσικού αερίου (~25 %) για την κάλυψη των απαιτήσεων θερμότητας και ισχύος της εγκατάστασης βιοαιθανόλης. Επιπλέον, διενεργήθηκε αξιολόγηση κύκλου ζωής για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης, της διαδικασίας της συν-επεξεργασίας χρησιμοποιημένου μαγειρικού ελαίου (UCO) με ορυκτό ελαφρύ πετρέλαιο εσωτερικής καύσης σε τρέχουσα μονάδα υδροεπεξεργασίας ντίζελ σε διυλιστήριο. Σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (περίπου 7,7%) θα επιφέρει η αντικατάσταση του συμβατικού ορυκτού καυσίμου ντίζελ με το ντίζελ HVO λαμβάνοντας υπόψιν και το UCO. Μια νέα μονάδα διύλισης που χρησιμοποιεί αποκλειστικά μαγειρικό έλαιο ως πρώτη ύλη θα μπορούσε να αυξήσει περαιτέρω την εξοικονόμηση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως και 93%. Σχετικά με τα ανανεώσιμα αέρια, τα αποτελέσματα της AKZ αποδεικνύουν την προτεραιότητα της χρήσης κοπριάς/κτηνοτροφικών αποβλήτων αντί για καλλιέργειες σύμφωνα με τις οδηγίες του RePower 2030. Εξετάζονται διάφορες τεχνολογίες αναβάθμισης βιοαερίου, π.χ. μεμβράνες, χρήση αμινών και προσρόφηση ταλάντωσης πίεσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της AKZ, η χρήση αμινών παρουσιάζει το (ελαφρώς) υψηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα όσον αφορά την υπερθέρμανση του πλανήτη. Τα αποτελέσματα Κοστολόγησης Κύκλου Ζωής κυμαίνονται από 40-86 €/MWh βιομεθανίου ανάλογα με την τεχνολογία και την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται. Αναφέρεται ότι σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί το οργανικό κλάσμα των Αστικών Απορριμμάτων, εφαρμόζεται τέλος εισόδου, οπότε μειώνεται το αντίστοιχο κόστος κύκλου ζωής. Σε ορισμένες περιπτώσεις με υψηλή χωρητικότητα βιοαερίου και χρήση οργανικού κλάσματος, το συνολικό κόστος βάσει των αρχών της KKZ εκτιμάται χαμηλότερο από 30€/MWh. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με προτεινόμενο μηχανισμό στήριξης για επενδύσεις βιομεθανίου στην Ελλάδα, καταλήγοντας στην οικονομική τους βιωσιμότητα. Επιπλέον ολοκληρωμένες αλυσίδες αξίας βιομεθανίου, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης των υποπροϊόντων (βιογενές CO₂ και χωνεμένου υλικού) και της υγροποίησης του βιομεθανίου, αξιολογήθηκαν με βάση το πλαίσιο ανάλυσης κύκλου ζωής που αναπτύχθηκε σε αυτήν τη διδακτορική διατριβή. Το αποτέλεσμα της AKZ δείχνει ότι η συνολική αλυσίδα αξίας έχει αρνητικές εκπομπές λόγω της αποφυγής ισοδύναμων βιοχημικών (ενδιάμεσο προϊόν) και υπολείμματος (τελικό προϊόν) που κυμαίνονται από -2 kgCO_{2eq}/Nm³ βιομεθάνιο έως -2,4 kg CO_{2eq}/Nm³ βιομεθάνιο. Βάσει της KKZ, το συνολικό κόστος υπολογίζεται στα 75-160€/MWh βιομεθάνιο ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται και την εφαρμοσμένη τεχνολογία (χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν το επιτόκιο αναγωγής). Επιπλέον βάσει των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για πολυκριτηριακή ανάλυση προτείνονται σενάρια που δίνουν βαρύτητα σε

τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια. Σχετικά με τον τομέα της διαχείρισης απορριμμάτων, φαίνεται ότι ο καθορισμός των ορίων που συνδέονται με την εξοικονόμηση και την αποφυγή εκπομπών διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο για την περιβαλλοντική αξιολόγηση. Συνεπώς, η σύγκριση μεταξύ αναερόβιας χώνευσης και κομποστοποίησης αποδεικνύει ότι η αναερόβια χώνευση παρουσιάζει αρνητικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα λόγω της υποκατάστασης της ενέργειας που παράγεται από τα ορυκτά καύσιμα/το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η σύγκριση της αεριοποίησης σε συνδυασμό με την ανάκτηση πλαστικού/χαρτιού με τη διάθεση σε χώρους ταφής αποδεικνύει τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις της τελευταίας. Η σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων αποτέφρωσης RDF και σύμμεικτων αστικών απορριμμάτων (ΑΣΑ) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αποτέφρωση RDF έχει μικρότερη επίδραση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου από την αποτέφρωση ΑΣΑ. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας βασισμένη σε διαφορετικές διαμορφώσεις ρύθμισης για τον διαχωρισμό χαρτιού και πλαστικού στη μονάδα MBT. Τα αποτελέσματα επικυρώνουν τις προτεραιότητες της ιεραρχίας διαχείρισης απορριμμάτων, καθώς τα σενάρια με υψηλό διαχωρισμό πολύτιμων υλικών, όπως χαρτί και πλαστικά, ήταν πιο φιλικά προς το περιβάλλον όσον αφορά τον αντίκτυπο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η ανάλυση ευαισθησίας που βασίζεται στη μεταβολή του ποσοστού ανάκτησης δείχνει μια περίπου γραμμική σχέση αντίστροφης μεταξύ του ποσοστού ανάκτησης και των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τέλος, παρέχεται τεχνοοικονομική αξιολόγηση για ολοκληρωμένο σενάριο κλιμάκωσης για εφαρμογή σε μεγάλους δήμους. Εξετάζονται κρίσιμες παράμετροι, όπως η τιμή πώλησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το τέλος εισόδου και το σχέδιο χρηματοδότησης, προκειμένου να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες για επενδύσεις στον τομέα διαχείρισης απορριμμάτων σε αντίστοιχους δήμους. Όπως παρουσιάζεται, το τέλος εισόδου αποτελεί την πλέον κρίσιμη παράμετρο για τη βιωσιμότητα αντίστοιχων επενδύσεων.

Η διδακτορική διατριβή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κατευθυντήριος οδηγός για την ανάλυση βιωσιμότητας των εξεταζόμενων ενεργειακών οδών κυκλικής οικονομίας. Τα πλαίσια ανάλυσης κύκλου ζωής και κοστολόγησης κύκλου ζωής έχουν καθοριστεί ενσωματώνοντας με εκτεταμένα όρια το υπάρχον πλαίσιο που βρίσκεται στις οδηγίες της ΕΕ. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης βιωσιμότητας των εξεταζόμενων οδών κυκλικής οικονομίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους αντίστοιχους τομείς, προκειμένου να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με την επιλογή των πιο κατάλληλων οδών και προτάσεις για βελτίωση από περιβαλλοντική και οικονομική πλευρά.

Summary

The aim of this PhD thesis is to provide a holistic approach as a guide for systematically building knowledge about LCA and LCC methodological frameworks for sustainable decision-making in key sectors, as well as provide recommendations for addressing the challenges of their joint application, in order to support the development/proposal of policies frameworks from a circular economy perspective.

First of all, the PhD thesis conducts a comparative analysis of the existing directives that linked with direct or indirect way with the LCA techniques. In specific, the Renewable Energy Directive, the Product Environmental Footprint and the Environmental Product Declaration are investigated in detail. The main gap especially in Renewable Energy Directive for biofuels is that the environmental assessment is based on pre-defined environmental indicators. However, a detailed LCA analysis is suggested to be carried out for the whole value chain of the biofuels. In addition, emphasis is given in the evaluation of the biogenic CO₂ emissions and how those emissions can be integrated in the investigated scenarios. The definition of the boundaries is the main parameter, as well as the consideration of the saving emissions linked with equivalent conventional intermediate and/or final products. In addition, avoided emissions by the use of bioenergy/RES during the whole life cycle analysis could be considered as well. Furthermore, a list of integrated key performance indicators (KPIs) for the energy systems is proposed in order to adapt the needs of the stakeholders accordingly. The KPIs are categorized per stage of life cycle, i.e manufacturing stage, operation stage, end-of life stage.

The PhD thesis further investigates the Life Cycle Costing (LCC) framework for circular energy systems. A comparative analysis of the existing LCC frameworks is carried out. In addition, a specific LCC framework for all the stages is developed. The developed LCC framework is dynamic, since the operational life cycle cost components is in function with time. Emphasis is given in the calculation of the external cost. This cost category is calculated according to the standardized methodology of the Environmental Prices. However, attention should be given in the processes to be included, in order to avoid duplicated calculations especially in cases with exploitation of by-products. Similarly, to LCA framework, relevant KPIs are provided for each stage of the life cycle, in order to meet the needs of the stakeholders involved in the examined value chain. The KPIs have been built based on integration of life cycle indicators.

Furthermore, the thesis proposes a Multicriteria Decision Making (MCDM) framework for the holistic evaluation of concepts based on circular economy principles. A comparative analysis of the current MCDM methodologies is provided by giving emphasis to the sector that they can find application. To this direction, advantages and limitations of each methodology are provided with emphasis to the applicability, data requirements, handling uncertainty and transparency. Based on the given background, a

combination of two methodologies AHP-TOPSIS is proposed, in order to find application in the circular economy concepts. The criteria set up in that framework are environmental, economic and technical. The AHP method is implemented to determine the relative weights of the criteria used in the selection process, while the TOPSIS technique utilizes these AHP weights to prioritize the alternatives.

The present PhD thesis focuses on the following five (5) sectors under a circular economy approach. The examined sectors are: Biofuel production for application in aviation/maritime, bioenergy retrofitting, utilization of biogenic CO₂ emissions towards production of added value products, renewable gases with emphasis in biogas/biomethane and relevant integrated value chains and waste management, including anaerobic digestion, composting, recycling, incineration of Refused Derived Fuels (RDF)/Municipal Solid Waste (MSW). In specific, regarding the biofuel production towards its use in sectors, such as aviation/maritime, the LCA results show that replacing conventional fuels with the biofuels produced could reduce GHG emissions by 85 %. For both climate change and primary energy, the process of pretreatment seems to have the main contribution. Future increase RES penetration could further decrease emissions by up to 70%. Regarding the case for retrofitting a bioethanol plant for sustainable aviation fuel production, calculated results show that the retrofit of an existing 1G ethanol facility has better environmental performance than the separate operation of the existing bioethanol and a new-build stand-alone jet fuel plant. The main GHG impact is associated with the operation of both the cogeneration system (~42 %) and the natural gas boilers (~25 %) to cover the heat and power requirements of the bioethanol facility. In addition, a Life Cycle Assessment to evaluate the environmental performance, in terms of GHG emissions, of co-processing Used Cooking Oil (UCO) with fossil light gas oil into a current diesel hydrotreater unit at an industrial refinery was carried out. A considerable GHG emissions reduction (about 7.7%) will be incurred by the substitution of conventional fossil diesel fuel with the HVO blended diesel one. A newbuild refining facility using exclusively used cooking oil as feedstock could further increase the GHG emission savings up to 93%, indicating that additional research is required regarding the environmental performance of sustainable fuel production processes. Regarding the renewable gases, LCA results prove the priority of the use of manure/livestock waste instead of crops in line with the directives of RePower 2030. Different technologies of biogas upgrading are examined, i.e. membrane technique, amino washing and Pressure Swing Adsorption. According to the LCA results, the amino washing presents the (slightly) highest environmental footprint in terms of global warming. The LCC results range from 40-86 €/MWh_{biomethane} depending on the technology and the feedstock used. It is mentioned that in case that the organic fraction of MSW is used then a gate fee is applied, so the respective LCC cost is reduced. In some cases with high capacity of biogas and use of organic fraction, the overall LCC is estimated lower than 30€/MWh. The results are compared with the indicative proposed feed-in mechanisms tariffs for biomethane investments in Greece concluding to their economic

sustainability. In accordance with the sector of biogenic CO₂ utilization, the integrated biomethane value chains, including the use of the by-products (biogenic CO₂ and digestate) and liquefaction of biomethane, were evaluated based on the life cycle analysis framework developed within that PhD thesis. The LCA result show that the overall value chain has negative emissions due to the avoidance of equivalent biochemicals (intermediate product) and digestate (final product) ranging from -2 kgCO_{2eq}/Nm³ biomethane to -2.4 kg CO_{2eq}/Nm³ biomethane. The relevant LCC is estimated at 75-160€/MWh_{biomethane} without taking into consideration the interest rate depending on the feedstock used and applied technology. Next to that, calculations based on AHP-TOPSIS methodology have been carried based on a set of technical, environmental and economic criteria. Regarding waste management sector, it seems that the setup of boundaries linked with the saving and avoided emissions plays a critical role for the environmental assessment. Hence, the comparison between anaerobic digestion and composting proves that the anaerobic digestion presents negative environmental footprint due to the substitution of the energy produced by fossil fuels/electricity grid. The comparison of gasification integrated with recovery of plastic/paper with the landfill proves the environmental burdens of the latter one. The comparison between the two methods of incineration of RDF and MSW leads to the conclusion that the incineration of RDF has less impact on the greenhouse effect than the incineration of MSW. A sensitivity analysis based on different configurations for paper and plastic separation in the MBT plant was carried out. The results validate the priorities of waste management hierarchy, since the scenarios with high separation of valuable materials, such as paper and plastics, were environmentally friendlier in terms of GWP impact. The sensitivity analysis based on the change of the recovering rate shows an approximately linear relation of inverse proportion between recovering rate and total environmental impact. Finally, an in depth techno-economic assessment for integrated scale up scenario for application in high population municipalities is provided. Critical parameters, such as the selling price of electricity production, the gate fee and the funding scheme are examined in order to conclude to the optimum conditions for investments in waste management sector at high population cities. It seems that the gate fee plays a significant role for the viability of such of the investments.

This PhD thesis can be used as guideline for the sustainability analysis of energy circular economy routes. LCA/LCC frameworks have been defined by integrating with extended boundaries the existing framework found in EU directives. The results of the sustainability analysis of the examined energy sustainability routes can be used in the respective sectors, in order to take decisions concerning the selection of pathways and suggestions for improvement in environmental and economic terms.