



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Πολυκριτήρια Αξιολόγηση Συστημικών Κυκλικών Λύσεων
σε Πόλεις και Περιφέρειες

Διπλωματική εργασία

Δημήτριος Ψημμένος

Επιβλέπων Καθηγητής: Γεώργιος Αραμπατζής, Αναπληρωτής Καθηγητής

Χανιά, Ιούλιος 2025

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα απ' όλα την οικογένειά μου για τη χωρίς όρια στήριξη, την εμπιστοσύνη και την αγάπη τους καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής μου, και ιδιαίτερα των σπουδών μου. Θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Αραμπατζή, για την εμπιστοσύνη και την υποστηρικτικότητά του καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Ειλικρινά και πολλά ευχαριστώ στην κα. Ευθαλία Κάρκου, για την πολύτιμη καθοδήγησή της, το χρόνο που αφιέρωσε, την ουσιαστική βοήθεια της, την ειλικρίνειά της. Της εύχομαι ολόψυχα καλή σταδιοδρομία και να περνάει καλά. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου τον αδερφικό μου φίλο Βασίλη Κοκοσάλη, στον άνθρωπο που με γνωρίζει καλύτερα από όλους και στέκεται πάντα δίπλα μου - παρών στις καλές όσο και, κυρίως, στις δύσκολες στιγμές που περάσαμε μαζί στα Χανιά. Τον ευχαριστώ για τη φιλία του, την ψυχολογική του στήριξη και τη διαρκή αλληλοενθάρρυνση και πίεση για πρόοδο. Του εύχομαι να πετύχει όλα όσα επιθυμεί στη ζωή του, σε προσωπικό και επαγγελματικό επίπεδο, με υγεία πάνω απ' όλα για τον ίδιο και την οικογένειά του.

Περίληψη

Η επιδεινούμενη περιβαλλοντική κρίση και η υπερκατανάλωση φυσικών πόρων λόγω της αύξησης του πληθυσμού και της υιοθέτησης εντατικών προτύπων ζωής, έχουν καταστήσει αναγκαία την μετάβαση σε ένα κυκλικό μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης. Οι πόλεις, ως βασικοί καταναλωτές πόρων και παραγωγοί αποβλήτων, καλούνται να υιοθετήσουν κυκλικές λύσεις που προάγουν την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των πόρων. Η επιλογή των κατάλληλων κυκλικών λύσεων καθίσταται μια σύνθετη και πολυδιάστατη διαδικασία με πολλαπλά και συχνά αντικρουόμενα κριτήρια αξιολόγησης, εκ των οποίων τα σημαντικότερα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αποτελούν το οικονομικό κόστος, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η κοινωνική αποδοχή, ο βαθμός κυκλικότητας, η τεχνολογική ωριμότητα και το επίπεδο συνεργασίας στο πλαίσιο της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης εντοπίζονται, αναλύονται και περιγράφονται καινοτόμες κυκλικές συστημικές λύσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση υδάτινων αποβλήτων και λυμάτων, κτηνοτροφικών παραπροϊόντων, πολυμερικών υλικών, μπαταριών και οχημάτων. Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας επικεντρώνεται στην ανάπτυξη και εφαρμογή πολυκριτήριας αξιολόγησης όσον αφορά σε συστημικές κυκλικές λύσεις που προτείνονται σε επίπεδο πόλης. Για τη στάθμιση των κριτηρίων και την ποσοτικοποίηση των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος TOPSIS, η οποία αναδεικνύει τη χρησιμότητα της πολυκριτήριας αξιολόγησης ως εργαλείο υποστήριξης της μετάβασης σε ένα πιο βιώσιμο και οικονομικά αποδοτικό μοντέλο σε επίπεδο πόλεων ή και περιφερειών.

Τα αποτελέσματα της έρευνας αναδεικνύουν την ανάγκη για μια ολιστική και ευέλικτη προσέγγιση στην αξιολόγηση κυκλικών συστημικών λύσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις, δυνατότητες και προκλήσεις κάθε πόλης. Βασιζόμενοι στα κριτήρια αξιολόγησης και τη σημαντικότητά τους για κάθε φορέα, η πολυκριτήρια ανάλυση δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης και αξιολόγησης των κυκλικών λύσεων προκειμένου να επιλεγεί η λύση που ανταποκρίνεται βέλτιστα στις ανάγκες, τους περιορισμούς και τις στρατηγικές προτεραιότητες κάθε πόλης, επιβεβαιώνοντας τη χρησιμότητα της μεθοδολογίας ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την αξιολόγηση κυκλικών συστημικών λύσεων σε επίπεδο πόλεων και περιφερειών.

Abstract

The worsening environmental crisis and the overconsumption of natural resources—driven by population growth and the adoption of intensive lifestyles—have rendered the transition to a circular model of production and consumption imperative. Cities, as key consumers of resources and producers of waste, are called upon to adopt circular solutions that promote the recycling and reuse of resources. The selection of appropriate circular solutions constitutes a complex and multidimensional process involving multiple and often conflicting evaluation criteria. According to the literature, the most significant among these are economic cost, environmental impact, social acceptance, degree of circularity, technological maturity, and level of collaboration within the context of sustainable urban development. This study identifies, analyzes, and describes innovative systemic circular solutions related to the management of wastewater and sewage, livestock by-products, polymeric materials, batteries, and vehicles. The aim of this thesis is to develop and apply a multicriteria evaluation framework for systemic circular solutions proposed at the city level. To weigh the criteria and quantify the relevant parameters, the TOPSIS method was employed, demonstrating the value of multicriteria analysis as a decision-support tool in the transition toward a more sustainable and economically efficient model at the urban or regional scale. The research findings highlight the need for a holistic and flexible approach to the evaluation of systemic circular solutions, considering the specific requirements, capabilities, and challenges of each city. Based on the defined evaluation criteria and their importance for each stakeholder, the multicriteria analysis enables the comparison and assessment of circular solutions to identify the option that best meets the needs, constraints, and strategic priorities of each city. This confirms the usefulness of the methodology as a decision-support tool for the assessment of systemic circular solutions at both city and regional levels.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract	4
Περιεχόμενα Εικόνων.....	7
Περιεχόμενα Πινάκων	8
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	9
1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	11
Κεφάλαιο 2. Κυκλικές λύσεις σε επίπεδο πόλης	12
2.1 Η κυκλική οικονομία.....	12
2.2 Βιομηχανική συμβίωση: Πλεονεκτήματα και περιορισμοί.....	16
Κεφάλαιο 3. Πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων	19
3.1 Ορισμός	19
3.2 Διαδικασία λήψης αποφάσεων	21
3.3 Θεωρητικές προσεγγίσεις στην πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων	22
3.4 Σημαντικότερες μέθοδοι πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων	24
3.4.1 Μέθοδος ELECTRE	25
3.4.2 Μέθοδος TOPSIS.....	26
3.4.3 Μέθοδος AHP	26
3.4.4 Μέθοδος PROMETHEE	28
Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία	31
4.1 Δημιουργία αποθετηρίου κυκλικών συστημικών λύσεων	31
4.2 Πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων με τη μέθοδο TOPSIS στις κυκλικές συστημικές λύσεις.....	35
Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα.....	38
5.1 Προτεινόμενες Τεχνολογικές Λύσεις.....	38
5.1.1 Συστημικές κυκλικές λύσεις κτηνοτροφικού τομέα	38
5.1.1.1. Ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από υπολείμματα κοπριάς χοίρων.....	38
5.1.1.2. Επεξεργασία ζωικού αίματος για παραγωγή λιπάσματος εντός σφαγείου	41
5.1.2 Συστημικές κυκλικές λύσεις υδάτινων πόρων.....	44
5.1.2.1. Αποθήκευση βρόχινου νερού και επιφανειακής απορροής για οικιακή και	

γεωργική χρήση	44
5.1.2.2. Επεξεργασία θαλασσινού νερού προς επαναχρησιμοποίηση στην άρδευση	46
5.1.3 Συστημικές κυκλικές λύσεις διαχείρισης αποβλήτων	49
5.1.3.1. Συλλογή και Ανακύκλωση Πανών για την Παραγωγή Υλικών Δόμησης και Πολυεστερικών Προϊόντων	49
5.1.3.2. Παραγωγή Βιοαερίου από αστικά λύματα και λάσπη αποχέτευσης	51
5.1.4 Συστημικές κυκλικές λύσεις οχημάτων	53
5.1.4.1. Λεωφορεία με κυψέλες υδρογόνου	54
5.1.4.2. Μετασχηματισμός οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους σε υλικά, μπαταρίες, εξαρτήματα και ανταλλακτικά υψηλής αξίας	56
5.2 Πολυκριτήρια Αξιολόγηση Συστημικών Κυκλικών Λύσεων	58
Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα	65
Βιβλιογραφία	67

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας (Πηγή: European Parliament, 2023)	14
Εικόνα 2: Το βιομηχανικό μοντέλο συμβίωσης στο Kalundborg, Δανία (Πηγή: http://www.symbiosis.dk/).....	17
Εικόνα 3. Γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο που προτάθηκε από τον Roy (1985).....	19
Εικόνα 4. Θεωρητικά ρεύματα στην επίλυση συνεχών και διακριτών προβλημάτων λήψης αποφάσεων (Δούμπος, 2000).....	24
Εικόνα 5. Ιεραρχική δόμηση του προβλήματος μέσω της μεθόδου AHP (Πηγή: Zahedi, 1986).....	27
Εικόνα 6: Εισαγωγή βαθμού σημαντικότητας στα κριτήρια του 1 ^{ου} σεναρίου.....	60
Εικόνα 7: Κατάταξη των εναλλακτικών του 1 ^{ου} σεναρίου και η αντίστοιχη βαθμολογία τους.....	61
Εικόνα 8: Ραβδόγραμμα κατάταξης εναλλακτικών του 1 ^{ου} σεναρίου.....	61
Εικόνα 9: Εισαγωγή βαθμού σημαντικότητας από φορέα στο 2 ^ο σενάριο.....	63
Εικόνα 10: Νέα κατάταξη των εναλλακτικών του 2 ^{ου} σεναρίου και οι αντίστοιχες βαθμολογίες τους.....	63
Εικόνα 11: Ραβδόγραμμα των εναλλακτικών του 2 ^{ου} σεναρίου.....	64

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Η κλίμακα προτίμησης της μεθόδου ΑΗΡ (Πηγή: Doumpos, Zorounidis 2001).....**Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.**8

Πίνακας 2: Επίπεδα των κριτηρίων αξιολόγησης των προκαθορισμένων κριτηρίων.....33

Πίνακας 3: Συνοπτική παρουσίαση του πίνακα που χρησιμοποιείται για την επίδειξη των κυκλικών λύσεων.....34

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Οι πόλεις και οι περιφέρειες αντιμετωπίζουν αυξανόμενες προκλήσεις που σχετίζονται με την υπερκατανάλωση των φυσικών πόρων, την ενεργειακή κρίση, την αυξανόμενη παραγωγή αποβλήτων και γενικότερα τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Το γραμμικό μοντέλο οικονομίας που κυριαρχεί βασίζεται στη λογική “παραγωγή – κατανάλωση – απόρριψη”. Ωστόσο, αποδεικνύεται μη βιώσιμο τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε κοινωνικοοικονομικό επίπεδο (European Commission, 2020). Μέσω της κυκλικής οικονομίας προτείνεται μια εναλλακτική προσέγγιση, προωθώντας την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση των πόρων, μειώνοντας τη σπατάλη αυτών καθώς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Ellen MacArthur Foundation, 2021).

Οι πόλεις και οι περιφέρειες παράγουν περίπου το 50% των αποβλήτων σε παγκόσμιο επίπεδο και αντιπροσωπεύουν περίπου το 70% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), λόγω του τομέα των μεταφορών, των ενεργειακών απαιτήσεων, τον κατασκευαστικό τομέα, μεταξύ άλλων. Οι πόλεις και οι περιφέρειες ευθύνονται σχεδόν για τα 2/3 της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας με τις ανάγκες για φυσικούς πόρους, νέες υποδομές, υπηρεσίες και στέγαση να αυξάνονται διαρκώς. Σε αυτό το πλαίσιο, αναδεικνύεται η ανάγκη μετάβασης σε ένα πιο βιώσιμο και ανθεκτικό μοντέλο ανάπτυξης. Η αποδοτική χρήση των πόρων, η επαναχρησιμοποίηση προϊόντων, συμπεριλαμβανομένου του νερού, καθώς και ο σχεδιασμός των προϊόντων με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνεται η ανακύκλωσή τους και η επανένταξη των υλικών τους στην αλυσίδα παραγωγής, η μείωση της σπατάλης τροφίμων και των οργανικών αποβλήτων και η ελάττωση της εξάρτησης από τα ιδιωτικά μέσα μεταφοράς, όπως τα αυτοκίνητα, είναι μερικές από τις στρατηγικές του μοντέλου της κυκλικής οικονομίας που προβάλλονται για τη συμβολή πιο ανθεκτικών και βιώσιμων πόλεων (OECD, 2020). Το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας προβάλλεται ως μια ουσιαστική στρατηγική που στοχεύει στη διατήρηση της αξίας των προϊόντων, των υλικών και των πόρων για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ελαχιστοποιώντας την παραγωγή αποβλήτων. Ειδικά για τις πόλεις και τις περιφέρειες, ως πόλος συγκέντρωσης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, δημιουργούνται σημαντικές ευκαιρίες για βελτίωση και εφαρμογή κυκλικών λύσεων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το 20 % της συνολικής τροφής στην ΕΕ χάνεται ή απορρίπτεται πριν φτάσει στον καταναλωτή. Η ανακύκλωση των ηλεκτρονικών αποβλήτων, που αυξάνονται κατά 2% ετησίως, εκτιμάται ότι είναι λιγότερο από 40%. Το 2017 σημειώθηκαν τα υψηλότερα επίπεδα απορριμμάτων συσκευασίας – 173 kg ανά κάτοικο – ενώ η κατανάλωση πλαστικών υλών αναμένεται να διπλασιαστεί δύο δεκαετιών. Η ετήσια παραγωγή αποβλήτων από όλες τις οικονομικές δραστηριότητες στην ΕΕ αντιστοιχεί σε 2,5 δισεκατομμύρια τόνους. Υπό αυτό το πρίσμα, το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας προσφέρει λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν σε πληθώρα τομέων, όπως η διαχείριση αστικών λυμάτων, η επαναχρησιμοποίηση πλαστικών, η αξιοποίηση των βιο-αποβλήτων, η ανάκτηση νερού και η προώθηση οικολογικών υλικών στις κατασκευές (European Commission, 2020). Η υιοθέτηση κυκλικών συστημικών λύσεων σε τομείς που προκαλούν σημαντικές εκπομπές ρύπων, όπως η βιομηχανία τροφίμων, πλαστικών καθώς και ο κατασκευαστικός τομέας, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των αέριων εκπομπών, συμπεριλαμβανομένου των αερίων του θερμοκηπίου. Η αλλαγή αυτή μπορεί να συμβάλει σε

μείωση έως και 9,3 δισεκατομμυρίων τόνων CO₂ ετησίως μέχρι το 2050 (Ellen Macarthur Foundation, 2021). Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των πόλεων και των περιφερειών, καθώς και η πληθώρα εμπλεκόμενων φορέων καθιστούν την επιλογή και υλοποίηση των κατάλληλων τεχνολογικών λύσεων μια πολυσύνθετη διαδικασία.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην έρευνα και αξιολόγηση κυκλικών συστημικών λύσεων που έχουν εφαρμοστεί στο παρελθόν με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία και μπορούν να υιοθετηθούν από άλλες πόλεις και περιφέρειες σε παγκόσμια κλίμακα. Οι συστημικές κυκλικές λύσεις διερευνώνται και αναλύονται με βάση τους στόχους, τα παραπροϊόντα, τους εμπλεκόμενους τομείς, το πεδίο εφαρμογής, την προτεινόμενη τεχνολογική λύση, το επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας, τα κυριότερα αποτελέσματα και τις προκλήσεις και τα εμπόδια που αντιμετωπίστηκαν, ενώ προσφέρεται και σχηματική αναπαράσταση. Οι ενδεικτικές συστημικές κυκλικές λύσεις επικεντρώνονται σε τομείς που αποτελούν αντικείμενο προβληματισμού και απαιτούν την ενίσχυση της βιωσιμότητάς τους, όπως η κτηνοτροφία, η διαχείριση αποβλήτων, η ανάκτηση υλικών, οι υδάτινοι πόροι, οι μπαταρίες και τα οχήματα. Η αξιολόγησή τους βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων, όπως η κυκλικότητα, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα, η οικονομική αποδοτικότητα, ο βαθμός κοινωνικής επιρροής, η ευκολία συνεργασίας και ενσωμάτωσης σε υφιστάμενα συστήματα, καθώς και η τεχνολογική ωριμότητα (European Commission, 2020).

Η αξιολόγηση των υπό μελέτη συστημικών κυκλικών λύσεων πραγματοποιήθηκε με μέθοδο πολυκριτήριας αξιολόγησης, κατατάσσοντάς τις με βάση διαφορετικά και συχνά αντικρουόμενα κριτήρια, των οποίων ο βαθμός σημαντικότητας ορίζεται από τις απόψεις των ενδιαφερόμενων φορέων. Μέσω του εργαλείου της πολυκριτήριας ανάλυσης και συγκεκριμένα της μεθόδου TOPSIS, πραγματοποιείται η διαδικασία λήψης αποφάσεων από την οπτική των ενδιαφερόμενων φορέων, λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις τους σχετικά με τις αναφερόμενες κυκλικές συστημικές λύσεις. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε διάφορους τομείς και είναι ευρέως γνωστή σε διαδικασίες ιεράρχησης στρατηγικών σχεδίων. Στηρίζεται στην λογική ότι η καλύτερη εναλλακτική λύση είναι αυτή που βρίσκεται πιο κοντά στην ιδανική λύση και πιο μακριά από την λιγότερο ιδανική λύση. Πραγματοποιήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB για την πολυκριτήρια αξιολόγηση οκτώ κυκλικών συστημικών λύσεων σε επίπεδο πόλεων και περιφερειών, με στόχο την προσομοίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Επιπλέον, η TOPSIS προϋποθέτει τον καθορισμό της βαρύτητας των κριτηρίων ανάλογα με τις προτεραιότητες και τις προτιμήσεις των ενδιαφερόμενων μερών, προσφέροντας τη δυνατότητα εφαρμογής από πολλούς διαφορετικούς φορείς. Η αξιολόγηση των κυκλικών συστημικών λύσεων βασίζεται σε έξι κριτήρια αξιολόγησης και οδηγεί στην κατάταξή τους με φθίνουσα σειρά επιλογής, προσφέροντας την βέλτιστη λύση που ταιριάζει στις ιδιαιτερότητες και ανάγκες του κάθε φορέα.

Όσον αφορά στη δομή της εργασίας, στο **κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της κυκλικής οικονομίας. Στο **κεφάλαιο 3** αναλύονται διάφορες μεθοδολογίες πολυκριτήριας ανάλυσης. Στο **κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη περιγραφή των κυκλικών συστημικών λύσεων και την πολυκριτήρια αξιολόγηση με τη μέθοδο TOPSIS. Στο **κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται οι οκτώ κυκλικές συστημικές λύσεις και οι πληροφορίες που

συλλέχθηκαν για την αξιολόγησή τους, συνθέτοντας το αποθετήριο των κυκλικών συστημικών λύσεων της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πολυκριτήριας ανάλυσης και η κατάταξη των λύσεων με διαφορετικά σενάρια αποφασιζόντων. Τέλος, στο **κεφάλαιο 6** συζητούνται τα συμπεράσματα της έρευνας και προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

1.1 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εύρεση και αξιολόγηση κυκλικών συστημικών λύσεων που έχουν εφαρμοστεί σε πόλεις και περιφέρειες με τη μέθοδο TOPSIS στη βάση έξι κριτηρίων αξιολόγησης: (1) περιβαλλοντική βιωσιμότητα, (2) οικονομική αποδοτικότητα, (3) κυκλικότητα, (4) τεχνολογική ωριμότητα, (5) κοινωνική επιρροή και (6) επίπεδο συνεργασίας. Η μέθοδος TOPSIS, ως μέθοδος πολυκριτήριας αξιολόγησης, βοηθά κάθε ενδιαφερόμενο στη διαδικασία λήψης στρατηγικών αποφάσεων, κατατάσσοντας τις εναλλακτικές λύσεις ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τις απαιτήσεις του κάθε ενδιαφερόμενου. Απώτερος σκοπός είναι η δημιουργία ενός εργαλείου αξιολόγησης συστημικών κυκλικών λύσεων, προτεινόμενων για εφαρμογή σε επίπεδο πόλεων και περιφερειών.

Κεφάλαιο 2. Κυκλικές λύσεις σε επίπεδο πόλης

2.1 Η κυκλική οικονομία

Η κυκλική οικονομία είναι ένα μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης, το οποίο περιλαμβάνει την αποφυγή παραγωγής και απόρριψης αποβλήτων, την ανακύκλωση, επαναχρησιμοποίηση, επισκευή και ανταλλαγή υλικών και προϊόντων όσο το δυνατόν περισσότερο προκειμένου να παραταθεί ο κύκλος ζωής τους. Ουσιαστικά, το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας στοχεύει στη μείωση των αποβλήτων μέσω της επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης προϊόντων ή υλικών που φτάνουν στο τέλος της ζωής τους, δημιουργώντας προστιθέμενη αξία στο νέο τελικό προϊόν. Το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας στοχεύει στην αντικατάσταση του παραδοσιακού γραμμικού μοντέλου “παραγωγή-κατανάλωση-απόρριψη”, που βασίζεται στη χρήση υπέρογκων ποσοτήτων υλικών και πηγών ενέργειας (European Parliament, 2023).

Η έννοια του κλειστού βρόχου (closed-loop) αποτελεί βασικό στοιχείο της κυκλικής οικονομίας και αναφέρεται σε συστήματα όπου οι πόροι και τα υλικά διατηρούνται εντός του αλυσίδας παραγωγής και κατανάλωσης μέσω επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης ή ανάκτησης, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για πρώτες ύλες και μειώνοντας τα απόβλητα. Η εφαρμογή τους δεν περιορίζεται μόνο σε τεχνικά μέσα, αλλά απαιτεί ολιστική – συστημική προσέγγιση που συνδυάζει κοινωνικούς, τεχνολογικούς, οικονομικούς και θεσμικούς παράγοντες. Οι πρακτικές στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας στοχεύουν στην επέκταση του κύκλου ζωής των προϊόντων, στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων και τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των πόρων (Geissdoerfer et al., 2017).

Οι κυκλικές συστημικές λύσεις αντιμετωπίζουν την οικονομία ως δίκτυο αλληλεξαρτώμενων τομέων και ροών και στοχεύουν στην επανασχεδίαση των αλυσίδων, προκειμένου να ενσωματώσουν την κυκλικότητα σε επίπεδο σχεδιασμού, διακυβέρνησης και συμπεριφοράς των χρηστών (Konietzko et al., 2020). Η αποτελεσματικότητα τέτοιων λύσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διατομεακή συνεργασία και την ικανότητα των τοπικών φορέων να σχεδιάσουν και να εφαρμόσουν κυκλικές λύσεις σε συστημικό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη τις πολυπλοκότητες των κοινωνικοοικονομικών συστημάτων.

Η ενσωμάτωση της βιωσιμότητας στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας στις αστικές περιοχές είναι μείζονος σημασίας (Brown et al., 1987). Βιωσιμότητα ορίζεται ως η κατάσταση στην οποία η ανθρώπινη δραστηριότητα διαδραματίζεται με τρόπο που συντηρεί τη λειτουργία των οικοσυστημάτων της γης (ISO 15392, 2008), μια αλλαγή του τρόπου ζωής των ανθρώπων που βελτιστοποιεί τις πιθανότητες ότι οι συνθήκες διαβίωσης θα συνεχίσουν να υποστηρίζουν την ασφάλεια, την ευημερία και την υγεία, διατηρώντας την προμήθεια των μη-αναπληρώσιμων προϊόντων (McMichael et al., 2003). Οι πόλεις, ως κέντρα οικονομικής δραστηριότητας και υψηλής κατανάλωσης προϊόντων, αγαθών και υπηρεσιών, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη μετάβαση προς την κυκλικότητα, υιοθετώντας καινοτόμες στρατηγικές και λύσεις βασισμένες στη φύση (Ghisellini et al., 2016). Το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας βασίζεται σε τρεις θεμελιώδεις αρχές:

1. **Εξάλειψη** των αποβλήτων και μείωση της ρύπανσης μέσω σχεδιασμού ανθεκτικών προϊόντων με τη δυνατότητα της επισκευής και της ανακύκλωσής τους.
2. **Διατήρηση** προϊόντων και υλικών σε χρήση για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέσω επισκευής, ανακατασκευής, επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης.
3. **Αναγέννηση** των φυσικών συστημάτων με την επαναφορά των οργανικών υλικών στο περιβάλλον και τη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης.

Μέσω της ενσωμάτωσης των αρχών της κυκλικής οικονομίας σε βιώσιμες αστικές πολιτικές, οι πόλεις μπορούν να ενισχύσουν την αποδοτικότητα των πόρων και να συμβάλουν στη μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική ανθεκτικότητα (EMAF, 2015). Η κυκλική οικονομία αρχίζει από τον τρόπο που σχεδιάζεται ένα προϊόν, συνεχίζεται με τη χρήση του και έπειτα με την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των υλικών του, ώστε να επανενταχθούν στην αγορά. Κατά τον κύκλο αυτό, όλα τα στάδια μέχρι το τέλος ζωής ενός προϊόντος επηρεάζουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα του κυκλικού μοντέλου, τα οποία παράλληλα αποτελούν και τις θεμελιώδεις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος περιλαμβάνουν:

1. **Φάση Οικολογικής Σχεδίασης:** Μια σωστή σχεδίαση βελτιώνει την ανθεκτικότητα, τη βιωσιμότητα, την επισκευασιμότητα και την ανακυκλωσιμότητα των προϊόντων και διευκολύνει τους φορείς ανακύκλωσης στη διαδικασία ανάκτησης των υλικών.
2. **Φάση Παραγωγής:** Κρίνεται απαραίτητη η βέλτιστη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων για αποδοτική χρήση τους, η χρήση βιώσιμων πρώτων υλών, λαμβάνοντας υπόψη τον περιβαλλοντικό και κοινωνικό αντίκτυπο της διαδικασίας παραγωγής.
3. **Φάση Κατανάλωσης:** Το προϊόν προσφέρεται από τον παραγωγό και χρησιμοποιείται από τον καταναλωτή με κριτήρια περιβαλλοντικής και οικονομικής βιωσιμότητας. Η διάρκεια ζωής ενός προϊόντος μπορεί να επεκταθεί μέσω αναβάθμισης, επαναχρησιμοποίησης και επισκευής, με στόχο την προστασία της αλόγιστης κατανάλωσης των φυσικών πόρων, του περιβάλλοντος (προστασία της βιοποικιλότητας κ.ο.κ.) και της κοινωνικής ευημερίας.
4. **Φάση Συλλογής και Διαχείρισης Αποβλήτων:** Στο τέλος του κύκλου ζωής ενός προϊόντος χαρακτηρίζεται ως απόβλητο καθώς δεν μπορεί να αναβαθμιστεί, επισκευαστεί ή επαναχρησιμοποιηθεί πλέον για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους. Η διαχείριση και επεξεργασία των αποβλήτων πρέπει να πετυχαίνει υψηλά ποσοστά ανακύκλωσης και ανάκτησης πόρων.
5. **Επανένταξη των Πρώτων Υλών στην Αγορά:** Οι ανακτημένες πρώτες ύλες εισέρχονται ξανά στην αγορά, με στόχο την επανεκκίνηση ενός νέου κύκλου ζωής για ένα νέο προϊόν (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2015).



Εικόνα 1. Το μοντέλο της κυκλικής οικονομίας (Πηγή: European Parliament, 2023)

Η εφαρμογή κυκλικών συστημικών λύσεων αποτελεί βασικό άξονα της μετάβασης προς ένα πιο βιώσιμο και ανθεκτικό μοντέλο ανάπτυξης. Ωστόσο, οι στρατηγικές κυκλικής οικονομίας δεν μπορούν να ακολουθούν ένα καθολικό πρότυπο εφαρμογής, καθώς κάθε γεωγραφικό και κοινωνικό πλαίσιο παρουσιάζει μοναδικά και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη δυνατότητα υλοποίησης και την αποδοτικότητα των προτεινόμενων λύσεων. Η ανάλυση των τοπικών συνθηκών των πόλεων και των περιφερειών είναι κρίσιμη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση κυκλικών στρατηγικών, καθώς ορισμένες λύσεις μπορεί να μην τελεσφορήσουν.

Η διαρκής και μαζική αστικοποίηση, που έχει οδηγήσει σε αύξηση των κτιριακών υποδομών στις πόλεις, επηρεάζουν σημαντικά την εφαρμογή κυκλικών λύσεων. Η αστική εξάπλωση μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της κατανάλωσης των φυσικών πόρων και της παραγωγής αποβλήτων, ωστόσο η πυκνότητα μπορεί να διευκολύνει την εφαρμογή κυκλικών λύσεων λόγω της κοντινής απόστασης των χρηστών και των παρόχων υπηρεσιών (European Commission, 2020). Για παράδειγμα, σε πόλεις όπως το Χονγκ Κονγκ με υψηλή πληθυσμιακή και κτηριακή πυκνότητα, η περιορισμένη διαθεσιμότητα χώρου δυσχεραίνει την επί τόπου ανακύκλωση υλικών κατασκευής και κατεδάφισης (Zhang et al., 2023).

Η ανάπτυξη και ενίσχυση των υποδομών αποτελούν θεμελιώδη στοιχεία για την εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας σε αστικές και περιφερειακές περιοχές. Οι πόλεις πρέπει να διασφαλίσουν ότι οι υποδομές είναι προσβάσιμες σε όλους τους πολίτες, προκειμένου να ενισχυθεί η συμμετοχή και η αποδοχή των κυκλικών πρακτικών (OECD, 2020). Η Ευρωπαϊκή Ένωση παρέχει κατευθυντήριες γραμμές και χρηματοδοτικά εργαλεία για την υποστήριξη των πόλεων και των περιφερειών στην ανάπτυξη και εφαρμογή κυκλικών στρατηγικών (European Commission, 2020).

Το νομοθετικό πλαίσιο επηρεάζει την κυκλική οικονομία με ουσιαστικό τρόπο, καθώς μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως καταλύτης όσο και ως εμπόδιο στη μετάβαση από το γραμμικό στο κυκλικό μοντέλο. Νομοθετικές ρυθμίσεις όπως ο Κανονισμός Οικολογικού Σχεδιασμού (Ecodesign for Sustainable Products Regulation - ESPR) ενθαρρύνουν τις επιχειρήσεις να σχεδιάζουν προϊόντα που διαρκούν περισσότερο, επισκευάζονται ευκολότερα και είναι ανακυκλώσιμα (European

Commission, 2020). Στο πλαίσιο της διευρυμένης ευθύνης του παραγωγού (Extended Producer Responsibility - EPR), που εφαρμόζεται σε τομείς όπως τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά απόβλητα, τα ελαστικά και τα πλαστικά, υποχρεώνει τους παραγωγούς να αναλαμβάνουν την οικονομική και υλική ευθύνη για τη διαχείριση των προϊόντων τους στο τέλος του κύκλου ζωής τους (OECD, 2020).

Η αποτελεσματική υλοποίηση της κυκλικής οικονομίας απαιτεί συντονισμό μεταξύ διαφόρων επιπέδων διακυβέρνησης, καθώς οι αρμοδιότητες και οι πόροι κατανέμονται μεταξύ τοπικών, περιφερειακών και εθνικών αρχών. Η έλλειψη σαφούς κατανομής αρμοδιοτήτων και η απουσία συντονισμού μεταξύ των επιπέδων διακυβέρνησης μπορεί να αποτελέσουν εμπόδιο στην αποτελεσματική εφαρμογή των πολιτικών (OECD, 2020).

Οι επενδύσεις σε έρευνες, υποδομές, τεχνολογίες και ανθρώπινο δυναμικό απαιτεί υψηλούς χρηματοδοτικούς πόρους, τόσο από δημόσιες όσο και από ιδιωτικές πηγές. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, μέσω του Σχεδίου Δράσης για την κυκλική οικονομία, προωθεί τη χρηματοδότηση, που κρίνεται καθοριστική για την υλοποίηση έργων κυκλικής οικονομίας, και ενθαρρύνει παράλληλα τη συμμετοχή του ιδιωτικού τομέα (European Commission, 2020).

Υπάρχουν διάφορες εφαρμογές της κυκλικής οικονομίας παγκοσμίως σε διαφορετικούς τομείς. Οι κυριότερες εφαρμογές αφορούν τον **κατασκευαστικό τομέα**, στον οποίο ανακυκλώνεται και επαναχρησιμοποιείται το τσιμέντο (Adams et al., 2017), τον **αγροτικό τομέα** που παράγονται λιπάσματα από οργανικά απόβλητα (Kirchherr et al., 2017), την **διαχείριση υδάτων και λυμάτων**, από τα οποία ανακτώνται θρεπτικά συστατικά και νερό προς επαναχρησιμοποίηση στη γεωργία (Domenech & Davies, 2011), και τη βιομηχανία, στην οποία βιομηχανίες, όπως η Renault, ασχολούνται με την ανακατασκευή και την επαναχρησιμοποίηση παλιών ανταλλακτικών, ηλεκτρονικών συσκευών, μπαταριών, μεταξύ άλλων (Ghisellini et al., 2016).

Υπάρχουν πολυάριθμα πετυχημένα παραδείγματα υλοποίησης κυκλικών λύσεων σε πόλεις και περιφέρειες. Στο Σαν Φρανσίσκο, Καλιφόρνια (ΗΠΑ), όπου αντιμετωπίζονται σοβαρά προβλήματα ξηρασίας, έχει αναπτυχθεί πρόγραμμα ανακύκλωσης γκρίζου νερού για άρδευση (Onsite Water Reuse), μειώνοντας τη ζήτηση για φρέσκο νερό. Παρά τις προκλήσεις, όπως το κόστος εγκατάστασης, η κοινωνική δυσπιστία και τα νομοθετικά κωλύματα, αυτή η κυκλική λύση έχει συμβάλει σημαντικά στη διατήρηση της γεωργικής παραγωγής κατά τη διάρκεια των περιόδων ξηρασίας (Sheikh et al., 2018).

Το De Ceunel στο Άμστερνταμ (Ολλανδία) αποτελεί ένα πρότυπο αστικής ανάπλασης, καθώς ένα παλιό ναυπηγείο μετατράπηκε σε οικολογικό χώρο γραφείων. Παλαιά πλωτά σπίτια τοποθετήθηκαν σε μολυσμένο έδαφος και μετατράπηκαν σε γραφεία και εργαστήρια, χρησιμοποιώντας τεχνολογικές λύσεις, όπως οι τουαλέτες ξηρής κομποστοποίησης, η ηλιακή ενέργεια και η διήθηση του γκρίζου νερού. Χρησιμοποιήθηκαν χαμηλού κόστους λύσεις, καθιστώντας το έργο οικονομικά αποδοτικό. Η κατανάλωση του νερού μειώθηκε κατά 75% σε σύγκριση με τους συμβατικούς χώρους εργασίας και το έργο συνέβαλε στην απορρύπανση του εδάφους. Ωστόσο η προσωρινή φύση του (10ετή διάρκεια) και η αβεβαιότητα για το μέλλον του χώρου μετά τη λήξη της άδειας περιορίζουν την αποδοτικότητα του έργου (Roest et al., 2016).

2.2 Βιομηχανική συμβίωση: Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Η βιομηχανική συμβίωση αποτελεί βασική στρατηγική εντός της κυκλικής οικονομίας, δίνοντας έμφαση στη συνεργασία μεταξύ βιομηχανιών για την αποτελεσματική αξιοποίηση των αποβλήτων, της ενέργειας και των πόρων τους. Αυτή η προσέγγιση δημιουργεί ένα κλειστό σύστημα όπου τα παραπροϊόντα μιας βιομηχανίας χρησιμεύουν ως πρώτες ύλες σε μια άλλη βιομηχανία (Chertow, 2000). Η βιομηχανική συμβίωση αποτελεί ένα μέσο εφαρμογής της κυκλικής οικονομίας. Τα πλεονεκτήματα ποικίλουν και είναι προς όφελος όλων των εμπλεκόμενων (Neves et al, 2020). Τα κυριότερα είναι:

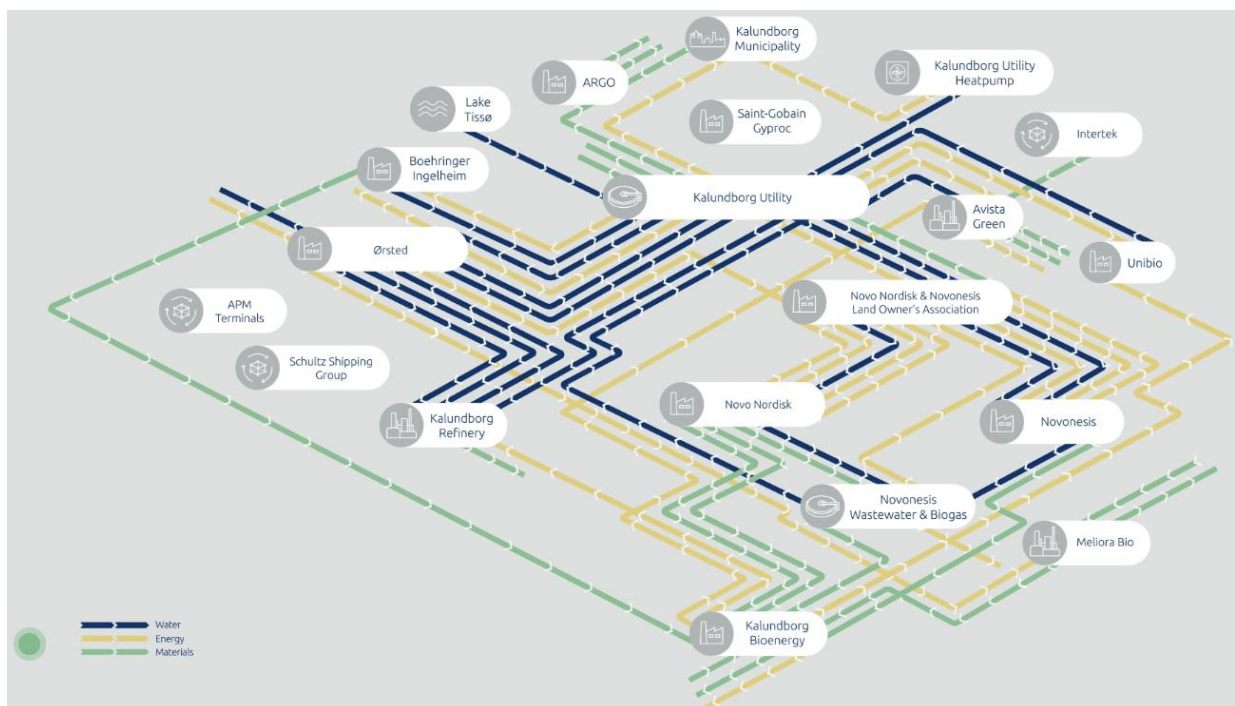
- **Αποτελεσματική αξιοποίηση πόρων:** Η κοινή χρήση υλικών, νερού και ενέργειας βελτιώνει την αποδοτικότητα των πόρων (Domenech & Davies, 2011).
- **Μείωση κόστους:** Οι επιχειρήσεις μειώνουν το κόστος παραγωγής μέσω της αξιοποίησης αποβλήτων και κοινών υποδομών (Fraccascia et al., 2016).
- **Περιβαλλοντικά οφέλη:** Η εξοικονόμηση πόρων και πρώτων υλών, η μείωση εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, μείωση των αποβλήτων που προορίζονται για αποτέφρωση ή στις χωματερές (Dong et al., 2014).
- **Καινοτομία και ανταγωνιστικότητα:** Η συνεργασία ενισχύει τις τεχνολογικές εξελίξεις και την επιχειρηματική καινοτομία (Chertow & Ehrenfeld, 2012).
- **Περιφερειακή ανάπτυξη:** Συνεισφορά στην κοινωνική ανάπτυξη και συμμετοχή της κοινότητας στη βιομηχανική συμβίωση (Harfeldt-Berg et al., 2022).

Ωστόσο, οι προκλήσεις και οι περιορισμοί συνεχίζουν να υπάρχουν και να αποθαρρύνουν την βιομηχανική συμβίωση. Η σύναψη συνεργασιών απαιτεί συμβατές μεταξύ τους βιομηχανίες και δαπανηρές επενδύσεις σε υποδομές (Mathews & Tan, 2011), οι οποίες έρχονται με αβέβαιες μακροπρόθεσμες αποδόσεις (Neves et al., 2019). Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η ύπαρξη διαφάνειας και εμπιστοσύνης μεταξύ των βιομηχανιών για να είναι η συνεργασία τους αποτελεσματική (Chertow, 2007). Η ανεπάρκεια ρυθμιστικών πλαισίων, η έλλειψη γνώσης της έννοιας της ανταλλαγής αποβλήτων και των οφελών της, η απουσία τελών σε χωματερές, η έλλειψη καινοτομίας στον επιχειρηματικό τομέα, τα κοινωνικά εμπόδια, η έλλειψη “πράσινων” τεχνολογιών (Boom-Carcamo et al., 2022), η απροθυμία αλλαγής της υπάρχουσας κουλτούρας των οργανισμών, η έλλειψη και η διστακτικότητα επιχειρηματικής εμπιστευτικότητας για ανταλλαγή γνώσεων και πληροφοριών μεταξύ των βιομηχανιών (Chrysikopoulos et al., 2024) είναι μερικές ακόμα προκλήσεις που εμποδίζουν την ανάπτυξη των βιομηχανικών συμβιώσεων.

Για να ξεπεραστούν τα παραπάνω εμπόδια ακολουθούνται ορισμένες στρατηγικές από τα κράτη, οι οποίες προσπαθούν να προωθήσουν τη βιομηχανική συμβίωση. Μερικές από τις κινήσεις που πραγματοποιούνται είναι η αλλαγή νομοθεσίας και η μείωση της γραφειοκρατίας, η δημιουργία προγραμμάτων χρηματοδότησης για αγορά εξοπλισμού, ο διορισμός ανεξάρτητων οντοτήτων με στόχο τον συντονισμό των δράσεων, προκειμένου να υπάρχει διαφάνεια, εμπιστοσύνη και

συνεργασία μεταξύ των βιομηχανιών, η επένδυση σε έρευνα και ανάπτυξη για την εξέλιξη της τεχνολογίας και η χρήση διαδικτυακών πλατφόρμων για την παροχή κατάλληλων τεχνολογικών εργαλείων (Neves et al., 2019, 2020).

Το Βιομηχανικό Συμβιωτικό Δίκτυο του Kalundborg στη Δανία αποτελεί ένα πρωτοποριακό παράδειγμα βιομηχανικής συμβίωσης και κυκλικής οικονομίας. Η συνεργασία ξεκίνησε το 1960 και περιλαμβάνει τη συνεργασία μεταξύ δημόσιων και ιδιωτικών επιχειρήσεων για την ανταλλαγή υλικών, ενέργειας και νερού, μετατρέποντας τα παραπροϊόντα της μίας βιομηχανίας σε πόρους για μία άλλη. Στον πυρήνα του δικτύου βρίσκεται ο σταθμός παραγωγής ενέργειας Asnæs, ο οποίος προμηθεύει ατμό και θερμότητα στις γειτονικές εγκαταστάσεις, όπως το διυλιστήριο πετρελαίου της Statoil και τη φαρμακευτική εταιρεία Novo Nordisk. Το διυλιστήριο με τη σειρά του παρέχει υποπροϊόντα, όπως το θείο, σε άλλες επιχειρήσεις για περαιτέρω επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση. Αυτές και άλλες ανταλλαγές συμβάλλουν στη μείωση των αποβλήτων και στη βελτίωση της αποδοτικότητας των πόρων. Οι ανταλλαγές περιλαμβάνουν τη χρήση πλεονάζουσας θερμότητας για θέρμανση, την αξιοποίηση υποπροϊόντων όπως ο γύψος και το θείο, καθώς και την ανακύκλωση του νερού (Olesen, 1999, Paché, 2024, Valentine, 2016). Τα πλεονεκτήματα από τις παραπάνω εφαρμογές της κυκλικής οικονομίας είναι πολυάριθμα. Στο Kalundborg της Δανίας απασχολούνται παραπάνω από 5.000 εργαζόμενοι, επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 635.000 τόνους περίπου ετησίως, εξοικονόμηση περίπου 24 εκ. ευρώ για τις συμμετέχουσες εταιρείες, 600.000 m³ νερού και 45.000 τόνοι αερίου ανά χρόνο και παράγονται περίπου 80 εκ. ευρώ ετησίως από τη μετατροπή των υποπροϊόντων σε χρήσιμα προϊόντα, τη μείωση της ρύπανσης και της κατανάλωσης υλικών (Girard & Nocca, 2019).



Εικόνα 2: Το βιομηχανικό μοντέλο συμβίωσης στο Kalundborg, Δανία (Πηγή: <http://www.symbiosis.dk/>)

Το έργο NISP (National Industrial Symbiosis Programme) αποτελεί ένα ακόμα επιτυχημένο

παράδειγμα βιομηχανικής συμβίωσης στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το πρόγραμμα ξεκίνησε το 2003 και είχε ως στόχο την προώθηση συνεργασιών μεταξύ επιχειρήσεων διαφορετικών τομέων και την ανταλλαγή υλικών, ενέργειας, νερού και υποδομών. Η φιλοσοφία του βασιζόταν στην αναγνώριση ότι τα απόβλητα ή τα πλεονάζοντα προϊόντα μιας επιχείρησης μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμες εισροές για μια άλλη. Μέσα σε 5 χρόνια συνεργασίας με 12.500 εταιρίες κατάφεραν να αξιοποιήσουν πάνω από 7 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων, να μειώσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά περίπου 6 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου CO₂, να παραχθούν 176 εκατομμύρια λίρες από πωλήσεις παραγώγων, να μειωθούν τα κόστη των βιομηχανιών κατά 156 εκατομμύρια λίρες, να παραμείνουν και να δημιουργηθούν 8.770 θέσεις εργασίας, να μειώσουν την χρήση νερού για βιομηχανική χρήση κατά 9,6 τόνους και να τερματίσουν τη χρήση 9,7 τόνων φυσικών πόρων (Laybourn & Morrissey, 2009).

Ένα άλλο παράδειγμα βιομηχανικής συμβίωσης σε επίπεδο πόλεων βρίσκεται στο Άμστερνταμ της Ολλανδίας, όπου γίνεται προσπάθεια μεγιστοποίησης της χρησιμότητας των πόρων και ελαχιστοποίησης των αποβλήτων (Thompson et al., 2024). Η στρατηγική περιλαμβάνει πρωτοβουλίες, όπως η προώθηση της ανακύκλωσης, η επαναχρησιμοποίηση οργανικών αποβλήτων στην παραγωγή ενέργειας και η ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων, όπως η χρησιμοποίηση "έξυπνων" λαμπτήρων που λειτουργούν με αιολική και ηλιακή ενέργεια, η δημιουργία υπόγειων εγκαταστάσεων για την αποθήκευση πόσιμου νερού και η κατασκευή ηλιακών πάνελ με δυνατότητα αποθήκευσης της ηλιακής ενέργειας σε μπαταρίες. Η χρησιμοποίηση "πράσινων" μέσων μεταφοράς, όπως τα ηλεκτρικά λεωφορεία, η ανάκτηση υλικών κατεδαφισμένων κτιρίων, η εγκατάσταση κεντρικών συστημάτων ανακύκλωσης βιολογικών αποβλήτων και η βελτιστοποίηση της παροχής νερού στις πισίνες είναι μερικά παραδείγματα υλοποίησης των κυκλικών λύσεων του Άμστερνταμ (Friant et al., 2023). Στο Άμστερνταμ δημιουργήθηκαν περίπου 140.000 θέσεις εργασίας σχετικές με την κυκλική οικονομία, που αντιπροσωπεύει το 11% της συνολικής απασχόλησης της περιοχής. Αυτό το ποσοστό υπερβαίνει τον εθνικό μέσο όρο της Ολλανδίας, που ανέρχεται στο 9% (Amsterdam Economic Board, 2025).

Στο βιομηχανικό πάρκο Ulsan Mipo και Onsan (Νότια Κορέα) έχει εφαρμοστεί πετυχημένα η συνεργασία περίπου 1.000 εταιριών, οι οποίες υπάγονται σε διάφορους τομείς απασχόλησης, όπως η παραγωγή αυτοκινήτων, η ναυπήγηση πλοίων, τα διυλιστήρια πετρελαίου, η μεταλλουργία και οι χημικές διεργασίες (π.χ. λιπάσματα). Απασχολούνται παραπάνω από 100.000 άτομα και εξοικονομούνται περίπου 78,1 εκατομμύρια δολάρια ανά χρόνο από εξοικονόμηση ενέργειας και υλικών και περίπου 65 εκατομμύρια δολάρια ανά χρόνο από την ανακύκλωση των υλικών και από πωλήσεις υποπροϊόντων. Στο διάστημα 2005-2016 έχει σημειωθεί μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 665.712 τόνους, εξοικονομήθηκαν 279.761 τόνοι πετρελαίου προς παραγωγή ενέργειας, 79.357 τόνοι νερού και 40.044 τόνοι υποπροϊόντων (UNIDO, World Bank, GIZ, 2021).

Ωστόσο, η εφαρμογή τέτοιων συνεργατικών κυκλικών συστημικών λύσεων σε αστικό ή περιφερειακό επίπεδο απαιτεί την αξιολόγηση πολλών παραμέτρων, τόσο τεχνικών όσο και κοινωνικοοικονομικών. Η ανάγκη λήψης τεκμηριωμένων αποφάσεων σε ένα σύνθετο πλαίσιο, όπου εμπλέκονται διαφορετικοί φορείς και στόχοι, καθιστά την πολυκριτήρια ανάλυση ένα κατάλληλο εργαλείο προς αξιοποίηση.

Κεφάλαιο 3. Πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων

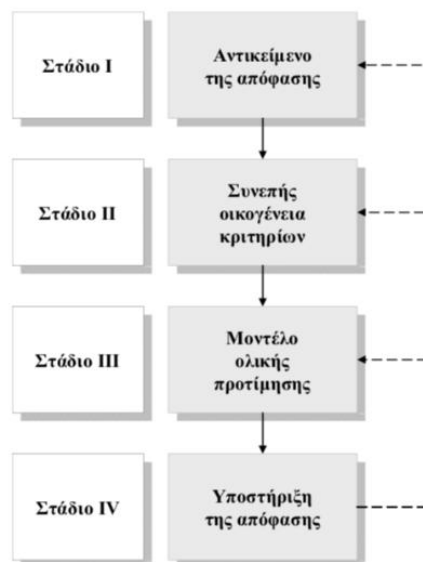
3.1 Ορισμός

Η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων έχει μελετηθεί εκτενώς τις τελευταίες τρεις δεκαετίες τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Η επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μέσω μιας μονόπλευρης ανάλυσης, αλλά πρέπει να ληφθούν υπόψη όλες οι παράμετροι, έτσι ώστε να επιτευχθεί η λήψη ορθολογικών αποφάσεων.

Κατά τον Ζοπουνίδη (1999), πολυκριτήρια ανάλυση ορίζεται ένα σύνολο μεθόδων που βοηθούν στη σύνθεση πολλών κριτηρίων εκτίμησης, έτσι ώστε να καθιστά δυνατή την ταξινόμηση, επιλογή, κατάταξη, και περιγραφή ενός συνόλου εναλλακτικών ενεργειών. Βασικός στόχος της ανάλυσης είναι να παρέχει στον φορέα τα απαραίτητα εργαλεία που θα τον βοηθήσουν στην επίλυση ενός προβλήματος απόφασης και την εύρεση της βέλτιστης λύσης μεταξύ ενός συνόλου λύσεων σύμφωνα με τις προτεραιότητές του, λαμβάνοντας υπόψη τις συχνά αντικρουόμενες και ανταγωνιστικές όψεις του προβλήματος. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι λόγω της υποκειμενικότητας του φορέα, δεν υπάρχει μια μοναδική βέλτιστη κυκλική συστημική λύση. Η πολυκριτήρια ανάλυση έχει τρεις βασικούς στόχους:

1. Την ανάλυση της ανταγωνιστικής φύσης των κριτηρίων.
2. Τη μοντελοποίηση των εναλλακτικών λύσεων.
3. Την επιλογή των πιο κατάλληλων λύσεων.

Ο Roy (1996) πρότεινε ένα γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο που ισχύει για όλες τις διαφορετικές μεθόδους πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων και παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 3. Γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο που προτάθηκε από τον Roy (1985)

1^ο στάδιο: Αντικείμενο της απόφασης

Στο πρώτο στάδιο γίνεται ο καθορισμός του αντικειμένου της απόφασης, δηλαδή το σύνολο των εναλλακτικών $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p\}$, όπου p το σύνολο των εναλλακτικών, καθώς και τη προβληματική της εκάστοτε ανάλυσης. Εναλλακτικές ορίζονται όλες οι πιθανές λύσεις που πρέπει να εκτιμηθούν για την καταλληλότητά τους να ικανοποιήσουν το πρόβλημα. Το σύνολο A πρέπει να είναι καλώς ορισμένο και μπορεί να είναι συνεχές ή διακριτό. Στο συνεχές σύνολο δεν είναι εφικτή η συνεχής καταγραφή του συνόλου των εναλλακτικών, ενώ στο διακριτό σύνολο γίνεται να καταγραφούν όλες οι πιθανές εναλλακτικές δραστηριότητες. Ο καθορισμός της προβληματικής της ανάλυσης αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο θα αξιολογηθούν οι εναλλακτικές, έτσι ώστε να ικανοποιεί τη λύση του προβλήματος. Ο φορέας εξετάζει τις εναλλακτικές μέσω τεσσάρων προβληματικών:

- **Προβληματική α: Επιλογή** μίας βέλτιστης εναλλακτικής λύσης από ένα σύνολο διαθέσιμων επιλογών (choice).
- **Προβληματική β: Ταξινόμηση** των εναλλακτικών λύσεων σε προκαθορισμένες κατηγορίες (classification/sorting).
- **Προβληματική γ: Κατάταξη** των εναλλακτικών λύσεων με αύξουσα ή φθίνουσα σειρά προτίμησης (ranking).
- **Προβληματική δ: Περιγραφή** των εναλλακτικών λύσεων με βάση την απόδοσή τους στα επιμέρους κριτήρια (description).

2^ο στάδιο: Συνεπής οικογένεια κριτηρίων

Στο δεύτερο στάδιο εντοπίζονται όλοι οι παράγοντες που επιδρούν στο αποτέλεσμα της ανάλυσης των εναλλακτικών λύσεων του συνόλου A . Κάθε παράγοντας που επιδρά στη λήψη μιας απόφασης ονομάζεται κριτήριο. Ως κριτήριο ορίζεται μια μονότονη συνάρτηση g που δηλώνει τις προτιμήσεις του φορέα, τέτοια ώστε για οποιαδήποτε από τις δύο εναλλακτικές δράσεις x και x' να ισχύει:

$$g(x) > g(x') \Leftrightarrow x > x'$$

$$g(x) = g(x') \Leftrightarrow x \approx x'$$

όπου $>$ και \approx οι σχέσεις προτίμησης και αδιαφορίας αντίστοιχα, ορισμένες έτσι ώστε:

$$x > x' \Leftrightarrow \text{η εναλλακτική } x \text{ προτιμάται από την εναλλακτική } x',$$

$$x \approx x' \Leftrightarrow \text{η εναλλακτική } x \text{ είναι αδιάφορη σε σχέση με την } x'.$$

Ένα σύνολο κριτηρίων $g = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ θεωρείται ότι διαμορφώνει μια συνεπή οικογένεια κριτηρίων, αν και μόνο αν ικανοποιεί τις παρακάτω ιδιότητες:

1. **Μονοτονία (monotonicity):** Ένα σύνολο κριτηρίων είναι μονότονο αν και μόνο αν για οποιεσδήποτε εναλλακτικές x και x' τέτοιες ώστε $g_i(x) > g_i(x')$ για κάποιο κριτήριο i και $g_j(x) > g_j(x')$ για κάθε άλλο κριτήριο $j \neq i$, συμπαιρένται ότι $x > x'$.
2. **Επάρκεια (exhaustivity):** Ένα σύνολο κριτηρίων θεωρείται επαρκές αν και μόνο αν για οποιεσδήποτε δυο εναλλακτικές x και x' τέτοιες ώστε $g_i(x) = g_i(x')$ για κάθε κριτήριο i ,

συμπεραίνεται ότι $x \approx x'$.

3. **Μη πλεονασμός (non-redundancy):** Ένα σύνολο κριτηρίων θεωρείται ότι διαθέτει την ιδιότητα του μη πλεονασμού αν και μόνο αν η διαγραφή οποιουδήποτε κριτηρίου οδηγεί σε παραβίαση των παραπάνω ιδιοτήτων, δηλαδή της μονοτονίας ή της επάρκειας.

3^ο στάδιο: Μοντέλο ολικής προτίμησης

Στο επόμενο στάδιο πραγματοποιείται η κατασκευή και χρήση ενός μοντέλου ολικής προτίμησης, το οποίο ορίζεται ως η σύνθεση όλων των κριτηρίων, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της ανάλυσης ανάλογα με την προβληματική που έχει επιλεχθεί. Χρησιμοποιείται ως βάση για τον προσδιορισμό της συνολικής αξιολόγησης της κάθε εναλλακτικής, την πραγματοποίηση διμερών συγκρίσεων μεταξύ των εναλλακτικών και τη διερεύνηση του συνόλου των εναλλακτικών λύσεων, αν αυτό είναι συνεχές.

Η ανάπτυξη του μοντέλου ολικής προτίμησης μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους:

1. Αλληλεπιδραστικά μέσω της συνεργασίας αναλυτή-αποφασίζοντα. Ο αποφασίζοντας καθορίζει ένα σύνολο παραμέτρων σχετικών με την πολιτική λήψης των αποφάσεων.
2. Αναλύοντας τις αποφάσεις του αποφασίζοντα, έτσι ώστε να βρεθεί ένα μοντέλο ολικής προτίμησης συμβατό με την πολιτική λήψης που ακολουθεί ο αποφασίζων.

4^ο στάδιο: Υποστήριξη της απόφασης

Στο τελευταίο στάδιο ο αναλυτής πρέπει να εντοπίσει και να οργανώσει όλα τα απαραίτητα στοιχεία που χρειάζεται για να απαντήσει σε τυχόν ερωτήσεις από τους εμπλεκόμενους στη διαδικασία της απόφασης. Ο φορέας καλείται να κατανοήσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης και να λάβει την τελική απόφαση, λαμβάνοντας υπόψη τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή συμπερασμάτων και της σύνθεσης των κριτηρίων (Roy, 1996).

3.2 Διαδικασία λήψης αποφάσεων

Σύμφωνα με τον Simon (1960), η διαδικασία λήψης αποφάσεων χωρίζεται στις παρακάτω φάσεις:

1. **Νοητική Φάση (intelligence phase):** διερεύνηση των καταστάσεων για τις οποίες πρέπει να ληφθεί μια απόφαση.
2. **Σχεδιασμός (design activity):** ανάπτυξη, επινόηση, ανάλυση και έρευνα όλων των πιθανών εναλλακτικών τρόπων δράσης.
3. **Επιλογή (choice activity):** επιλογή της πιο κατάλληλης ακολουθίας ενεργειών μέσα από το σύνολο των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων.
4. **Φάση ολοκλήρωσης (completion phase):** εφαρμογή της επιλεγμένης λύσης.

Σύμφωνα με τον Σίσκο (2008), η λήψη μιας απόφασης είναι το προϊόν της σύγκλισης μιας μεθοδευμένης ακολουθίας ενεργειών, όπως η ανταλλαγή απόψεων, η σύγκρουση συμφερόντων ή η συλλογή πληροφοριών αναφορικά με το πρόβλημα. Για τη λήψη μιας σύνθετης απόφασης πρέπει να ληφθούν υπόψη τέσσερις θεμελιώδεις παράμετροι:

1. Παράμετρος της αβεβαιότητας (uncertainty),
2. Ύπαρξη πολλαπλών κριτηρίων (multiple criteria),
3. Προτιμήσεις (preferences) του αποφασίζοντος,
4. Ύπαρξη πολλαπλών εμπλεκόμενων παραγόντων, εξαιτίας των αλληλεπιδράσεων μεταξύ στόχων και επιδιώξεων.

3.3 Θεωρητικές προσεγγίσεις στην πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές και μεθοδολογίες πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων, οι οποίες διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με τη μορφή των δεδομένων που δημιουργούνται και της διαδικασίας που ακολουθείται για τη δημιουργία των δεδομένων. Η κατηγοριοποίηση των διάφορων μεθοδολογιών και η κατανόηση των κριτηρίων είναι ουσιαστική για την επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας σε ένα πρόβλημα απόφασης. Υπάρχουν 3 κύριες θεωρητικές τάσεις τεχνικών πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων (Siskos & Spyridakos, 1999):

1. **Μέθοδοι βασισμένες στη θεωρία χρησιμότητας (Utility theory methods):** Μέθοδο που χρησιμοποιούν συναρτήσεις αξίας για την ποσοτικοποίηση των προτιμήσεων (π.χ. AHP, TOPSIS).
2. **Μέθοδοι υπεροχής (Outranking methods):** Επικεντρώνονται στις σχέσεις υπεροχής μεταξύ των εναλλακτικών (π.χ. ELECTRE, PROMETHEE).
3. **Αλληλεπιδραστικές μέθοδοι (Interactive methods):** Περιλαμβάνουν τη συνεχή αλληλεπίδραση με τον φορέα για τη διαδικασία σύγκλισης σε μια λύση.

Μια διαφορετική κατηγοριοποίηση των πολυκριτηριακών προσεγγίσεων δίνει βάση τόσο στη μορφή των υποδειγμάτων, όσο και στον τρόπο που πραγματοποιείται η ανάπτυξη τους (Pardalos et al., 1995). Η κατηγοριοποίηση αυτή περιλαμβάνει τις παρακάτω τέσσερις κατηγορίες:

1. **Πολυκριτήριος μαθηματικός προγραμματισμός (multi-objective mathematical programming),** ο οποίος αποτελεί μια επέκταση του μαθηματικού προγραμματισμού, με στόχο την επίλυση προβλημάτων λήψης απόφασης που περιλαμβάνουν πολλές αντικειμενικές συναρτήσεις. Η μέθοδος αυτή επιδιώκει τον προσδιορισμό του συνόλου των μη κυριαρχούμενων (Pareto-βέλτιστων) λύσεων, από το οποίο ο αποφασίζων μπορεί να επιλέξει σύμφωνα με τις προτιμήσεις του. Χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι μια εναλλακτική λύση ***a*** αναπαρίσταται μέσω ενός διανύσματος πραγματικών μεταβλητών ***(x₁, x₂, ..., x_l)***. Το σύνολο ***D*** των εφικτών λύσεων ορίζεται γενικά από ένα σύνολο συνεχών

και διαφορίσιμων περιορισμών:

$$D = \{x \in R^l : Ax \leq b, x \geq 0\}, \quad (1)$$

όπου A είναι πίνακας διαστάσεων $m \times lm \times l$ και b είναι διάνυσμα διαστάσεων $m \times 1m \times 1$.

Η επιλογή του διανύσματος x βασίζεται στη θεώρηση πολλών αριθμητικών κριτηρίων C_1, C_2, \dots, C_m , τα οποία είναι συνεχείς και διαφορίσιμες συναρτήσεις του x (γραμμικές ή μη γραμμικές) (Zorounidis, 1999).

2. **Πολυκριτήρια θεωρία χρησιμότητας (multi-attribute utility theory)**, η οποία έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός συστήματος αξιών με βάση τις προτιμήσεις του φορέα στο σύνολο των κριτηρίων. Οι προτιμήσεις του φορέα εκφράζονται με τη μορφή συνάρτησης χρησιμότητας και τα κριτήρια εκτίμησης:

$$u(\underline{g}) = (g_1, g_2, \dots, g_n), \quad (2)$$

όπου \underline{g} είναι το διάνυσμα των κριτηρίων εκτίμησης g_1, g_2, \dots, g_n . Ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης χρησιμότητας του φορέα διαλέγοντας τη δράση a^* που το πετυχαίνει, δηλαδή:

$$u[g(a^*)] = \max_a \{u[\underline{g}(a)]\}, \quad (3)$$

όπου $\underline{g}(a)$ το διάνυσμα της απόδοσης μιας εναλλακτικής δράσης a στο σύνολο κριτηρίων εκτίμησης \underline{g} . Η πιο διαδεδομένη, σε θεωρητικό επίπεδο, συνάρτηση χρησιμότητας είναι η προσθετική μορφή:

$$u(g_1, g_2, \dots, g_n) = u_1(g_1) + u_2(g_2) + \dots + u_n(g_n), \quad (4)$$

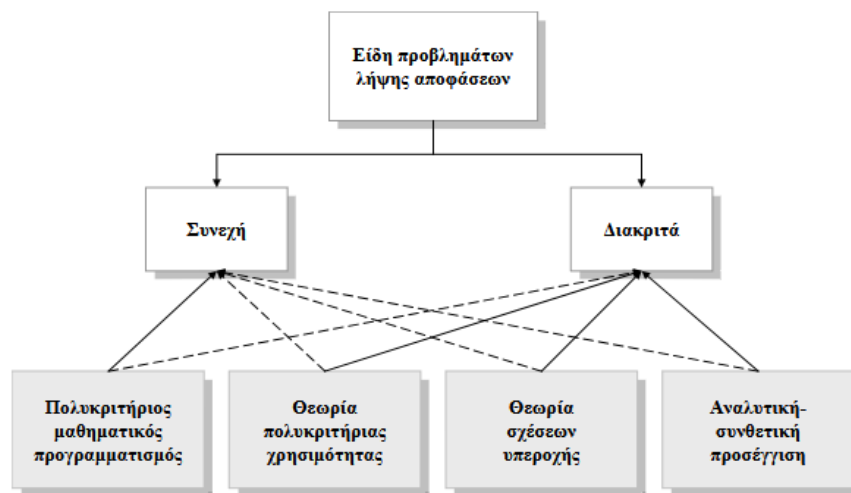
όπου u_1, u_2, \dots, u_n είναι οι συναρτήσεις μερικών χρησιμοτήτων που ορίζονται στις κλίμακες των κριτηρίων (Zorounidis, 1999).

3. **Θεωρία των σχέσεων υπεροχής (outranking relations)**, η οποία έχει ως στόχο τη δημιουργία σχέσεων υπεροχής μεταξύ των εναλλακτικών δράσεων και βασίζεται στη μοντελοποίηση των προτιμήσεων του φορέα. Η σχέση υπεροχής συμβάλει στην εξαγωγή του συμπεράσματος ότι η δράση $a \in A$ (διακριτό σύνολο) υπερτερεί της δράσης $b \in A$ αν δεν υπάρχουν αρκετοί παράμετροι που να επιβεβαιώνουν ότι το a είναι τουλάχιστον όσο καλό είναι και το b , ενώ δεν υπάρχει σοβαρός λόγος να αντικρουσθεί αυτή η δήλωση. (Zorounidis, 1999).
4. **Αναλυτική-συνθετική προσέγγιση (preference disaggregation approach)**, η οποία έχει ως στόχο την ολική διερεύνηση του προβλήματος μέσω της αναζήτησης της συλλογιστικής και των προτιμήσεων του φορέα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί μεθόδους παλινδρόμησης για

να προσδιορίσει την πολιτική αξιολόγησης του φορέα. Για συγκεκριμένο αριθμό προηγούμενων αποφάσεων που σχετίζονται, μπορεί να γενικευθεί σε μια έκφραση γενικής προτίμησης του φορέα. Η απόφαση καθορίζεται μέσα από τη σύνθεση των κριτηρίων και γίνεται αποδεκτό πως η απόφαση και τα κριτήρια είναι αλληλεξαρτώμενα μέσα στο χρόνο (Jacquet-Lagrange & Siskos 1982, 2001). Χρησιμοποιείται συνήθως η προσθετική συνάρτηση χρησιμότητας:

$$u(\underline{g}) = \sum_i p_i u_i(g_i), \quad (5)$$

Όπου $u_i(g_i)$ οι μερικές συναρτήσεις χρησιμότητας και p_i τα βάρη που αποκτήθηκαν από την άμεση εκτίμηση των προτιμήσεων του φορέα (Zorounidis, 1999).



Εικόνα 4. Θεωρητικά ρεύματα στην επίλυση συνεχών και διακριτών προβλημάτων λήψης αποφάσεων (Δούμπος, 2000)

Οι τρεις τελευταίες προσεγγίσεις, δηλαδή η θεωρία πολυκριτήριας χρησιμότητας, η θεωρία των σχέσεων υπεροχής και η αναλυτική-συνθετική προσέγγιση, προορίζονται για διακριτά είδη προβλημάτων λήψης απόφασης. Στόχος είναι η αξιολόγηση ενός πεπερασμένου συνόλου εναλλακτικών μέσα από τη σύνθεση όλων των κριτηρίων, σύμφωνα με τις προβληματικές της επιλογής, κατάταξης ή ταξινόμησης. Από την άλλη, ο πολυκριτήριος μαθηματικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται, όπως ο μαθηματικός προγραμματισμός, σε περιπτώσεις βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων. Ωστόσο, το υπόδειγμα σε συνδυασμό με τις κατάλληλες τεχνικές πολυκριτήριου μαθηματικού προγραμματισμού μπορεί να οδηγήσει τις τρεις πρώτες προσεγγίσεις στην επίλυση συνεχών προβλημάτων και του πολυκριτήριου μαθηματικού προγραμματισμού στην επίλυση διακριτών προβλημάτων.

3.4 Σημαντικότερες μέθοδοι πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων

Οι μέθοδοι πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων παρέχουν τη δυνατότητα ορθολογικής δόμησης της διαδικασίας αξιολόγησης από τον φορέα, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα, τις προτιμήσεις, και τη δυνατότητα ιεράρχησης των κριτηρίων. Η αναγνώριση και ανάλυση των

σημαντικότερων μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης είναι σημαντική για τον σχεδιασμό βιώσιμων λύσεων που ανταποκρίνονται στις πολυδιάστατες απαιτήσεις των σύγχρονων κοινωνιών. Η κατανόηση των διαφορών τους ως προς τη θεωρητική θεμελίωση, την πρακτική εφαρμογή και την ευκολία στη χρήση αποτελεί κρίσιμο βήμα για την επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας που θα επιφέρει τα επιθυμητά αναμενόμενα αποτελέσματα.

3.4.1 Μέθοδος ELECTRE

Η μέθοδος ELECTRE (ELimination and Choice Expressing REality) είναι μια από τις σημαντικότερες μεθόδους σχέσεων υπεροχής, η οποία αναπτύχθηκε αρχικά από τον Roy (1996) στα μέσα της δεκαετίας του 1960. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις που πρέπει να μειωθεί ένας μεγάλος αριθμός εναλλακτικών, ώστε να διευκολυνθεί η αναλυτική ερμηνεία τους.

Έχουν δημιουργηθεί αρκετές παραλλαγές της ELECTRE, όπως η ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV και η ELECTRE TRI, οι οποίες μερικές χρησιμοποιούν τον βασικό κορμό της μεθόδου και άλλες την ίδια μεθοδολογία με κάποιες σημαντικές παραλλαγές. Όλες οι μέθοδοι στηρίζονται στις ίδιες ιδέες όσον αφορά στα απαιτούμενα στοιχεία και στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Η επιλογή μεθόδου γίνεται ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Αναλυτικότερα, η μέθοδος ELECTRE I χρησιμοποιείται για επίλυση προβλημάτων επιλογής, η μέθοδοι ELECTRE II, III και IV για προβλήματα κατάταξης και η ELECTRE TRI για προβλήματα ταξινόμησης (Taherdoost & Madanchian, 2023).

Η γενική μορφή ενός πολυκριτήριου προβλήματος που καλείται να επιλύσει η οικογένεια ELECTRE περιλαμβάνει m εναλλακτικές λύσεις $M_i, i = 1, \dots, m$, n κριτήρια $g_j, j = 1, \dots, n$ και n βάρη $w_j, j = 1, \dots, n$. Είναι υποχρεωτική, ανάλογα με την επιλεγμένη μέθοδο, η κανονικοποίηση των βαρών w , τέτοιων ώστε $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, και η ομαλοποίηση των τιμών των εναλλακτικών σε παρεμφερές εύρος για κάθε κριτήριο (Roy, 1996).

Κατά τη διαδικασία της ομαλοποίησης πρέπει να δοθεί προσοχή στις τυχόν διαφορές στις κλίμακες μέτρησης των τιμών των εναλλακτικών. Αν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε όμοια κλίμακα είναι δυνατό να γίνει χρήση ενός τύπου για ομαλοποίηση. Αν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε διαφορετικές κλίμακες (εκθετική-λογαριθμική) πρέπει να γίνει μετατροπή σε γραμμική κλίμακα και ύστερα να γίνει χρήση τύπου για ομαλοποίηση των τιμών (Triantaphyllou, 2000, Wang & Triantaphyllou 2008).

Η ELECTRE επιτρέπει την ανάλυση προβλημάτων με πολλαπλά και αντικρουόμενα κριτήρια, καθιστώντας την κατάλληλη για σύνθετες αποφάσεις, και έχει εφαρμοστεί σε πολλούς τομείς, όπως η μηχανική, η οικονομία και η περιβαλλοντική διαχείριση, διακρίνοντας την ευελιξία της. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας ποιοτικών και ποσοτικών δεδομένων, προσφέροντας μια ολιστική προσέγγιση στη λήψη αποφάσεων. Όμως, η μέθοδος είναι χρονοβόρα, καθώς απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς, ειδικά όταν αυξάνεται ο αριθμός των κριτηρίων και των εναλλακτικών. Επιπλέον, η υποκειμενικότητα στην επιλογή παραμέτρων μπορεί να επηρεάσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων (Govindan & Jepsen, 2016).

3.4.2 Μέθοδος TOPSIS

Η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) επινοήθηκε από τους ερευνητές Hwang & Yoon (1981) και στηρίζεται στη λογική της ελάχιστης απόστασης από την ιδανική λύση και της μέγιστης απόστασης από τη χειρότερη λύση. Γίνεται η παραδοχή ότι κάθε πρόβλημα απόφασης περιλαμβάνει ένα πεπερασμένο σύνολο εναλλακτικών και ένα πλήθος συγκρίσιμων κριτηρίων απόδοσης. Μέσω της αξιολόγησης κάθε εναλλακτικής ως προς τα κριτήρια, η μέθοδος υπολογίζει την ευκλείδεια απόσταση κάθε λύσης από μία ιδανική (θετική) και μία λιγότερο ιδανική (αρνητική) λύση, καταλήγοντας σε έναν συντελεστή εγγύτητας που επιτρέπει την κατάταξη των επιλογών (Hwang & Yoon 1981, Hwang et al., 1993).

Η μέθοδος TOPSIS προτιμήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη και θα αναλυθεί εκτενέστερα στο υποκεφάλαιο 4.2 επειδή ανήκει στην οικογένεια της προβληματικής γ, δηλαδή πραγματοποιείται κατάταξη των εναλλακτικών από την καλύτερη ως την χειρότερη λύση. Είναι απλή στη σύλληψη και την εφαρμογή της, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα προσιτή για πρακτικά προβλήματα λήψης αποφάσεων (Behzadian et al., 2012), έχει υψηλή υπολογιστική ικανότητα ακόμα και για μεγάλα σύνολα δεδομένων, καθώς η βασική της απαίτηση είναι ο υπολογισμός Ευκλείδειων αποστάσεων (Ghorabae et al., 2016). Η TOPSIS επιτρέπει την αξιολόγηση πολλαπλών εναλλακτικών λύσεων με πολλά κριτήρια, τα οποία είναι συμβατά με ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα, προσφέροντας ευελιξία στη διαδικασία στάθμισης των κριτηρίων. Δεν απαιτείται πολύπλοκη δομή, όπως χρειάζονται ορισμένες άλλες μέθοδοι, όπως οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης. Παρέχει σαφή ερμηνεία μέσω του υπολογισμού της εγγύτητας σε ένα ιδανικό (θετικό) και λιγότερο ιδανικό (αρνητικό) σημείο, προσφέροντας μια ευδιάκριτη μέτρηση της σχετικής προτίμησης (Shih et al., 2007, Lai et al., 1994).

Ωστόσο, η μέθοδος είναι ευαίσθητη στις ακραίες τιμές, διότι η κανονικοποίηση μπορεί να επιφέρει μεγάλες αποκλίσεις (Y. M. Wang & Elhag, 2006). Η διαδικασία ανάθεσής των βαρών παραμένει συχνά υποκειμενική, επηρεάζοντας την τελική κατάταξη (Behzadian et al., 2012) και σε προβλήματα με πολλές εναλλακτικές και κριτήρια, η απόσταση από το ιδανικό σημείο μπορεί να γίνει σχεδόν ισοδύναμη για πολλές επιλογές, μειώνοντας τη διακριτική ικανότητα της μεθόδου (Ghorabae et al., 2016).

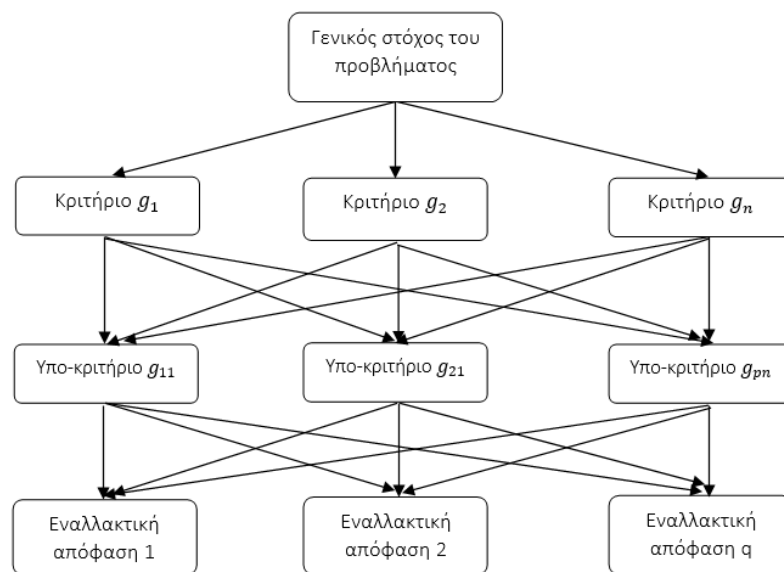
3.4.3 Μέθοδος AHP

Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process – AHP) δημιουργήθηκε από τον Thomas Saaty τη δεκαετία του 1970 και είναι ένα σημαντικό εργαλείο για τη λήψη σύνθετων αποφάσεων. Βοηθά τον φορέα να οργανώσει το πρόβλημα ιεραρχικά, να το αναλύσει σε επίπεδα, να κατανοήσει τις συγκρούσεις μεταξύ των κριτηρίων και να λάβει την απόφαση με τον βέλτιστο συμβιβασμό μεταξύ των εναλλακτικών. Δεδομένου ότι κάποια από τα κριτήρια μπορεί να είναι αντικρουόμενα, η τελική επιλογή δεν είναι απαραίτητα η βέλτιστη ως προς κάθε κριτήριο μεμονωμένα, αλλά είναι συνολικά η περισσότερο αποδεκτή (Saaty, 1987, 2004).

Η μέθοδος AHP ακολουθεί μια τυποποιημένη διαδικασία τεσσάρων σταδίων για την επίλυση ενός πολυκριτηρίου προβλήματος (Dounpros & Zorounidis, 2001):

1) Ιεραρχική δόμηση του προβλήματος

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η ιεραρχική δόμηση του προβλήματος από τον αποφασίζων. Στο πρώτο επίπεδο καθορίζεται ο γενικός στόχος του προβλήματος. Στο δεύτερο επίπεδο καθορίζονται τα κριτήρια απόφασης, τα οποία αναλύονται έκαστα και συνθέτουν τα επιμέρους υπο-κριτήρια (επίπεδο 3). Στο τελευταίο επίπεδο βρίσκονται οι διάφορες εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος απόφασης. Οι λύσεις αυτές συνήθως αναφέρονται σε ένα μερικό σύνολο εναλλακτικών δράσεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις η μέθοδος ουσιαστικά κατατάσσει τις εναλλακτικές δραστηριότητες, ανάλογα με τις προτιμήσεις του φορέα, από τις καλύτερες προς τις χειρότερες.



Εικόνα 5. Ιεραρχική δόμηση του προβλήματος μέσω της μεθόδου AHP (Πηγή: Zahedi, 1986)

2) Εισαγωγή των δεδομένων

Στο δεύτερο στάδιο της μεθόδου ο αποφασίζων εισάγει τα δεδομένα του προβλήματος, εκφράζοντας τις προτιμήσεις του μέσω διμερών συγκρίσεων όλων των στοιχείων κάθε επιπέδου της ιεραρχίας. Συγκρίνει, δηλαδή, ανά δύο όλα τα στοιχεία ενός επιπέδου μεταξύ τους λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά ένα στοιχείο του προηγούμενου επιπέδου της ιεραρχίας. Η διαδικασία τερματίζεται όταν συγκριθούν όλες οι εναλλακτικές αποφάσεις του τελευταίου επιπέδου, σε σχέση με τα στοιχεία του ακριβώς προηγούμενου επιπέδου. Για την έκφραση των προτιμήσεων του φορέα χρησιμοποιείται μια αριθμητική κλίμακα από το 1 έως το 9, η οποία παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1. Η κλίμακα προτίμησης της μεθόδου AHP (Πηγή: Doumpos & Zorounidis 2001)

Αριθμητική τιμή	Επεξήγηση
1	Τα συγκρινόμενα στοιχεία είναι ίσης σημασίας
3	Το ένα στοιχείο είναι ελαφρά πιο σημαντικό από το άλλο
5	Το ένα στοιχείο είναι πολύ πιο σημαντικό από το άλλο
7	Το ένα στοιχείο είναι πάρα πολύ πιο σημαντικό από το άλλο
9	Το ένα στοιχείο είναι απολύτως πιο σημαντικό από το άλλο
2,4,6,8	Ενδιάμεσες τιμές

3) Εκτίμηση των σχετικών βαρών των κριτηρίων απόφασης

Στο τρίτο στάδιο η μέθοδος υπολογίζει τα σχετικά βάρη των στοιχείων ενός επιπέδου σε σχέση με τα στοιχεία του ακριβώς προηγούμενου επιπέδου, βάσει των οποίων έγιναν οι συγκρίσεις.

4) Συνδυασμός των σχετικών βαρών των κριτηρίων, ώστε να αξιολογηθούν οι εναλλακτικές δράσεις

Στο τέταρτο στάδιο γίνεται ο συνδυασμός των σχετικών βαρών των στοιχείων όλων των επιπέδων έτσι ώστε να αξιολογηθούν οι εναλλακτικές αποφάσεις του τελευταίου επιπέδου σε σχέση με το πρώτο επίπεδο που περιλαμβάνει το στόχο του προβλήματος (Doumpos, Zorounidis, 2001).

Η μέθοδος AHP έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως η ευελιξία της, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση και αξιολόγηση ποσοτικών και ποιοτικών δεδομένων, η προσφορά ενός αβίαστα λογικού συστήματος, η ικανότητα της μεθόδου να αναλύει και να δομεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα διαχωρίζοντάς το σε μικρότερα βήματα και η δυνατότητα ενσωμάτωσης υποκειμενικών κρίσεων. Ωστόσο, η AHP παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα. Η μέθοδος απαιτεί υψηλή υπολογιστική ικανότητα ακόμα και για μικρά προβλήματα, το οποίο αυξάνει το χρόνο εκτέλεσης για μεγάλο αριθμό ζευγαρωτών συγκρίσεων, ενώ παράλληλα τα κριτήρια μπορεί να μεταβάλλονται χρονικά και χωρικά, γεγονός που δυσκολεύει τον υπολογισμό των βαρών (Canco et al., 2021, Karthikeyan, 2016).

3.4.4 Μέθοδος PROMETHEE

Η μέθοδος PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) προτάθηκε από τους Brans & Vincke (1985) και ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων σχέσεων υπεροχής. Έχει εφαρμοστεί ευρέως σε τομείς, όπως η μεταφορά, η ενέργεια, η βιομηχανία και η περιβαλλοντική διαχείριση. Η μέθοδος PROMETHEE έχει διάφορες παραλλαγές για την επίλυση διαφορετικών προβλημάτων απόφασης. Πιο συγκεκριμένα, οι παραλλαγές παρουσιάζονται παρακάτω (Bottero et al., 2018):

- PROMETHEE I: Παρέχει μερική κατάταξη των εναλλακτικών σεναρίων.
- PROMETHEE II: Παρέχει πλήρη κατάταξη των εναλλακτικών σεναρίων.

- PROMETHEE III: Επιτρέπει την προσέγγιση των προβλημάτων σε στοχαστικό περιβάλλον απόφασης.
- PROMETHEE IV: Αντιμετωπίζει προβλήματα αξιολόγησης μεγάλου αριθμού εναλλακτικών σεναρίων.
- PROMETHEE V: Αντιμετωπίζει προβλήματα κατανομής πόρων.
- PROMETHEE VI: Διενέργεια αναλύσεων ευαισθησίας.
- PROMETHEE TRI: Οι εναλλακτικές κατανέμονται σε προκαθορισμένες κατηγορίες, όπως "υψηλή", "μεσαία" ή "χαμηλή" προτεραιότητα, με βάση τα χαρακτηριστικά τους.
- PROMETHEE CLUSTER: Για ομαδοποίηση των εναλλακτικών σε ομοιογενείς ομάδες.

Η πιο διαδεδομένη εκδοχή της της οικογένειας PROMETHEE είναι η PROMETHEE II, της οποίας τα βήματα περιγράφονται παρακάτω:

1. Καθορισμός των εναλλακτικών και των κριτηρίων: Αρχικά, ορίζεται το σύνολο των εναλλακτικών λύσεων $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ και το σύνολο των κριτηρίων $G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$, με κάθε κριτήριο να έχει μια συνάρτηση αξιολόγησης $f_k(a_i)$ για κάθε εναλλακτική. Σε αυτό το στάδιο, προσδιορίζονται επίσης τα βάρη w_k για κάθε κριτήριο, τα οποία αντανakλούν τη σχετική σημασία τους στη διαδικασία λήψης απόφασης (Brans & Vincke, 1985).
2. Επιλογή συναρτήσεων προτίμησης: Για κάθε κριτήριο, επιλέγεται μια συνάρτηση προτίμησης $P_k(d)$ που μεταφράζει τη διαφορά $d = f_k(a_i) - f_k(a_j)$ μεταξύ δύο εναλλακτικών σε βαθμό προτίμησης. Η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης εξαρτάται από τη φύση του κάθε κριτηρίου και τις προτιμήσεις του φορέα.
3. Υπολογισμός του δείκτη πολυκριτηριακής προτίμησης: Για κάθε ζεύγος εναλλακτικών (a_i, a_j) υπολογίζεται ο πολυκριτηριακός δείκτης προτίμησης $\pi(a_i, a_j)$ ως το σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους προτιμήσεων:

$$\pi(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^m w_k \cdot P_k(f_k(a_i) - f_k(a_j)), \quad (6)$$

Αυτός ο δείκτης κυμαίνεται μεταξύ του 0 και 1 και εκφράζει το βαθμό προτίμησης της εναλλακτικής a_i έναντι της a_j λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια.

4. Υπολογισμός των ροών υπεροχής: Για κάθε εναλλακτική a_i , υπολογίζονται:

➤ Θετική ροή υπεροχής:

$$\varphi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n \pi(a_i, a_j) \quad (7)$$

➤ Αρνητική ροή υπεροχής:

$$\varphi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n \pi(a_j, a_i) \quad (8)$$

Η θετική ροή εκφράζει τον μέσο βαθμό με τον οποίο η εναλλακτική a_i υπερέχει των άλλων,

ενώ η αρνητική ροή δείχνει τον μέσο βαθμό με τον οποίο υστερεί έναντι των άλλων.

5. Υπολογισμός της καθαρής ροής υπεροχής και κατάταξη: Η καθαρή ροή υπεροχής για κάθε εναλλακτικής υπολογίζεται ως εξής:

$$\varphi(a_i) = \varphi^+(a_i) - \varphi^-(a_i) \quad (9)$$

Η καθαρή ροή κυμαίνεται μεταξύ -1 και 1. Οι εναλλακτικές κατατάσσονται με φθίνουσα σειρά της καθαρής ροής, με τις υψηλότερες τιμές να υποδεικνύουν τις προτιμότερες επιλογές (Behzadian et al., 2010).

Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από την ευκολία εφαρμογής της, καθιστώντας την προσιτή σε ανειδίκευτους χρήστες. Η PROMETHEE επιτρέπει την ενσωμάτωση ποσοτικών και ποιοτικών κριτηρίων χωρίς την ανάγκη κανονικοποίησης των δεδομένων, γεγονός που ενισχύει την ευελιξία της. Επιπλέον, η δυνατότητα επιλογής διαφορετικών συναρτήσεων προτίμησης αυξάνει την προσαρμοστικότητα της μεθόδου στις ιδιαιτερότητες και στις εκάστοτε συνθήκες του κάθε προβλήματος. Έχει αποδειχθεί αποτελεσματική σε πραγματικά προβλήματα λήψης αποφάσεων, όπως η επιλογή των κατάλληλων προμηθευτών και η αξιολόγηση βιωσιμότητας αγροτικών συστημάτων (Brans & Vincke, 1985, Taherdoost, 2023).

Ωστόσο, η μέθοδος παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα. Η διαδικασία καθορισμού των βαρών των κριτηρίων και των παραμέτρων των συναρτήσεων προτίμησης πραγματοποιείται από τον φορέα, επηρεάζοντας σημαντικά τα αποτελέσματα λόγω της υποκειμενικότητας. Επίσης, η αρχική εκδοχή της μεθόδου είχε μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα $O(n^2)$, γεγονός που περιόριζε την εφαρμογή της σε μεγάλα σύνολα δεδομένων (Brans & Vincke, 1985, Taherdoost, 2023).

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

4.1 Δημιουργία αποθετηρίου κυκλικών συστημικών λύσεων

Στο αρχικό στάδιο της μελέτης πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα με σκοπό να δημιουργηθεί ένα **αποθετήριο συστημικών κυκλικών λύσεων**. Η έρευνα διεξήχθη σε δημόσιες βάσεις δεδομένων, επιστημονικές δημοσιεύσεις, ετήσιες εκθέσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης και διεθνείς αναφορές των σχετικών ερευνητικών τομέων, σε στατιστικές εκθέσεις της ΕΕ, της διεθνούς κοινότητας και των επίσημων ιστότοπων των εμπλεκόμενων φορέων.

Η εγκυρότητα και η αξιοπιστία των πληροφοριών διασφαλίζεται μελετώντας τα αποτελέσματα και τα επιτεύγματα των ερευνητικών έργων, τα οποία είναι χρηματοδοτημένα από την ΕΕ και άλλους εθνικούς φορείς, από τα σχετικά παραδοτέα και τα διαδικτυακά σεμινάρια που δημοσιεύτηκαν από τις εκάστοτε ερευνητικές ομάδες.

Οι κύριοι **στόχοι** και επιδιώξεις της ΕΕ αναγράφονται στα σχετικά δημοσιευμένα έγγραφα, κανονισμούς, στρατηγικές και εκθέσεις και αποτέλεσαν βάση για την επιλογή και καταγραφή των **εμπλεκόμενων τομέων** που αναφέρονται οι συστημικές κυκλικές λύσεις. Εξετάζονται τρόποι ενίσχυσης της βιωσιμότητας των μεταφορικών μέσων, λαμβάνοντας υπόψη τις νέες ρυθμιστικές οδηγίες για τα ποσοστά ανακύκλωσης οχημάτων και ηλεκτρικών μερών, του αποτυπώματος άνθρακα και της ασφάλειας του εφοδιασμού και παροχής πρώτων υλών. Για την εξασφάλιση της σωστής διαχείρισης αποβλήτων, έχουν τεθεί μέτρα μείωσης των απορριμμάτων συσκευασίας, της πολυπλοκότητας των υλικών και προώθησης της επαναχρησιμοποίησης και ανακυκλωσιμότητας των καταναλωτικών αγαθών, της χρήσης βιο-αποδομήσιμων πλαστικών υλών και της μέτρησης των μικροπλαστικών που απελευθερώνονται ακούσια. Νέοι και αναθεωρημένοι κανονισμοί ωθούν στην αποδοτική χρήση των υδάτινων πόρων (π.χ. στη βιομηχανική παραγωγή) και την αποτελεσματική ανάκτηση θρεπτικών ουσιών από την επεξεργασία λυμάτων (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).

Στο πλαίσιο αυτό, οι τομείς στους οποίους πραγματοποιήθηκε εντοπισμός, περιγραφή και ανάλυση αφορούν **τον κτηνοτροφικό τομέα, τον τομέα διαχείρισης αποβλήτων, τον τομέα υδάτινων πόρων και τον τομέα των οικολογικών οχημάτων και μπαταριών** και χρίζονται ως κύριας σημασίας για την ενίσχυση της κυκλικότητας και της βιωσιμότητάς τους.

Στο επόμενο στάδιο χαρτογραφούνται τα βασικά στοιχεία που απαιτούνται για την υλοποίηση ενός κυκλικού μοντέλου, τα οποία περιλαμβάνουν τον εντοπισμό **αποβλήτων ή παραπροϊόντων** προς αξιοποίηση, καθώς και το καθορισμό της τελικής εφαρμογής τους. Οι εμπλεκόμενοι φορείς δραστηριοποιούνται συνήθως σε συγκεκριμένους τομείς κατά τη διαδικασία εφαρμογής των κυκλικών λύσεων, δηλαδή καλύπτουν διαφορετικές γεωγραφικές και επιχειρησιακές περιοχές. Οι **περιοχές εφαρμογής** μπορεί να περιλαμβάνουν αγροτικές, αστικές και βιομηχανικές περιοχές, οι οποίες έχουν οριστεί έτσι ώστε να αποσαφηνίζεται η δραστηριότητα των φορέων ανάλογα με τα τοπικά χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητές τους.

Στη συνέχεια, διερευνώνται οι **τεχνολογικές μέθοδοι** που πρόκειται να αξιοποιηθούν σε μια κυκλική λύση. Ακολουθεί η καταγραφή των τεχνολογικών λύσεων και των εργαλείων που

χρησιμοποιήθηκαν, προσφέροντας διαφάνεια και καθοδήγηση στους ενδιαφερόμενους φορείς σχετικά με τον τρόπο υλοποίησης της προτεινόμενης κυκλικής λύσης.

Για να διευκολυνθεί η αναπαράσταση και να αξιολογηθεί η προτεινόμενη τεχνολογική λύση, καταγράφονται και αναλύονται τα **σημαντικότερα αποτελέσματα** (ποσοτικά και ποιοτικά), **το Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας (TRL)** και τα **εμπόδια** που συναντήθηκαν σε κάθε λύση. Τα επιμέρους στοιχεία των κυκλικών λύσεων παρέχουν το απαραίτητο υπόβαθρο στους πιθανούς ενδιαφερόμενους φορείς, έτσι ώστε να αξιοποιηθεί ουσιαστικά η αξιολόγηση των λύσεων, ενισχύοντας την υιοθέτηση και την αναβάθμιση των προτεινόμενων κυκλικών λύσεων.

Το επόμενο βήμα έχει στόχο την κάλυψη των πολυδιάστατων πτυχών της υλοποίησης μιας κυκλικής λύσης και για αυτό το λόγο ορίζονται συναφή **κριτήρια αξιολόγησης**.

Η επιλογή των κριτηρίων αποτελεί κρίσιμο στάδιο στην εφαρμογή της πολυκριτήριας ανάλυσης, καθώς καθορίζει το πλαίσιο εντός του οποίου συγκρίνονται οι εναλλακτικές τεχνολογικές λύσεις. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν σχετίζονται άμεσα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας σε επίπεδο πόλεων και περιφερειών και έχουν στόχο την καταγραφή, εκτίμηση και ολιστική αξιολόγηση των προτεινόμενων λύσεων, με βάση τις φιλοδοξίες, τα συμφέροντα και τις δυνατότητες των εμπλεκόμενων μερών. Οι κατηγορίες των κριτηρίων αξιολόγησης που επιλέχθηκαν περιλαμβάνουν την **περιβαλλοντική βιωσιμότητα**, την **οικονομική αποδοτικότητα**, την **κυκλικότητα**, την **τεχνολογική ωριμότητα**, την **κοινωνική επιρροή** και το **επίπεδο συνεργασίας**.

Η κατηγορία των κριτηρίων αξιολόγησης **“Περιβαλλοντική βιωσιμότητα”** αφορά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κυκλικής λύσης, λαμβάνοντας υπόψη τις εκπομπές ρύπων, την ικανότητα επεξεργασίας/ανακύκλωσης προϊόντων, την ποσότητα χρήσης ή παραγωγής χημικών ή/και τοξικών ουσιών και τις ενεργειακές απαιτήσεις που επιβαρύνουν το περιβάλλον, ανάλογα με τη χρήση και την εξάρτηση σε φυσικούς πόρους.

Η κατηγορία **“Οικονομική αποδοτικότητα”** περιλαμβάνει τα αναμενόμενα έσοδα, το συνολικό κόστος που απαιτείται για επένδυση κατά τη φάση της κατασκευής, λειτουργίας ή συντήρησης μιας κυκλικής λύσης, την αναμενόμενη εμπορική αξία της επένδυσης και την ύπαρξη συνολικού ενδιαφέροντος για χρηματοδότηση ή αγορά των παραγόμενων προϊόντων ή/και υπηρεσιών.

Η κατηγορία **“Κυκλικότητα”** επικεντρώνεται στην ικανότητα μιας τεχνολογίας να ενσωματώνει τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, όπως η ανάκτηση, η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση, η ανακατασκευή και ο επαναπροσδιορισμός των πόρων και προϊόντων. Λαμβάνεται υπόψη, επίσης, η αξιοποίηση των προϊόντων στο τέλος του κύκλου ζωής τους και η ανάκτηση και χρήση συμβατικών και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.






Η κατηγορία **“Τεχνολογική ωριμότητα”** ενημερώνει τα εμπλεκόμενα μέρη για την κλίμακα των εφαρμοζόμενων τεχνολογιών, ανάλογα με την επάρκεια της κυκλικής λύσης, αποκαλύπτοντας πόσο κοντά στην εμπορική αξιοποίηση βρίσκονται, καθώς και τις πιθανόν περιορισμένες δυνατότητες ως προς τη χωρητικότητα, την αποδοτικότητα και τη δυνατότητα εφαρμογής σε άλλες περιπτώσεις. Η αξιολόγηση του κριτηρίου περιλαμβάνει τις στρατηγικές και τα μέτρα οικολογικού σχεδιασμού που μπορούν να διευκολύνουν και να ενισχύσουν την εφαρμογή της κυκλικής λύσης, καθώς και τη γνώση που έχει αποκτηθεί από ήδη υλοποιημένες λύσεις στον πραγματικό κόσμο.

Η κατηγορία “**Κοινωνική επιρροή**” αντικατοπτρίζει την κατανόηση, αποδοχή και διάθεση για ενεργή συμμετοχή των πολιτών στη φάση υλοποίησης της κυκλικής λύσης. Στην αξιολόγηση του κριτηρίου συμπεριλαμβάνεται η πιθανότητα δημιουργίας θέσεων εργασίας, στήριξης των τοπικών επιχειρήσεων και ευεργετικής επίδρασης των προϊόντων ή/και υπηρεσιών στην ποιότητα ζωής των πολιτών.

Η κατηγορία “**Επίπεδο συνεργασίας**” υποδεικνύει τη συνολική προσπάθεια που απαιτείται από τους εμπλεκόμενους φορείς για την ολοκληρωτική εφαρμογή της κυκλικής λύσης, εκτιμώντας την δυνατότητα συνεργασίας, επικοινωνίας και ανταλλαγής γνώσεων. Η προώθηση της συνεργασίας αποτελεί καταλυτικό παράγοντα για την επιτυχή υλοποίηση και διάδοση των πρακτικών της κυκλικής οικονομίας.

Καλύπτοντας τις παραπάνω παραμέτρους, διευκολύνεται η διαδικασία λήψης αποφάσεων των εμπλεκόμενων φορέων που θα υιοθετήσουν την συστημική κυκλική λύση. Η αξιολόγηση των συστημικών κυκλικών λύσεων ως προς τα κριτήρια αξιολόγησης βασίζεται σε 5 επίπεδα βαθμολόγησης και παρουσιάζεται στον Πίνακα 2. Οι ενδιαφερόμενοι φορείς που επιθυμούν να υιοθετήσουν μια από τις προτεινόμενες συστημικές κυκλικές λύσεις καθορίζουν ποια από τα αναφερόμενα κριτήρια αξιολόγησης είναι σημαντικότερα για τις εκάστοτε ιδιαιτερότητες και ανάγκες τους.

Πίνακας 2: Επίπεδα των προκαθορισμένων κριτηρίων αξιολόγησης

Κριτήριο Αξιολόγησης	Επίπεδο	Περιγραφή
Όλα		Χαμηλό
		Καλό
		Μέτριο
		Υψηλό
		Πολύ υψηλό

Τέλος, επικυρώνεται η εφαρμογή των συστημικών κυκλικών λύσεων μέσω της παρουσίασης πραγματικών περιπτώσεων υιοθέτησης και επίδειξης των τεχνολογιών και εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν. Θεωρείται σημαντικό οι πιθανοί ενδιαφερόμενοι να πειστούν, μέσω της παροχής ακριβούς και έγκυρης πληροφόρησης, ότι η προτεινόμενη κυκλική λύση αποτελεί μια εφαρμόσιμη, ωφέλιμη και εφικτή λύση για την περιοχή τους. Για το σκοπό αυτό, παρουσιάζεται μια **πυλοτική εφαρμογή** μαζί με την περιγραφή των βασικών αποτελεσμάτων, των βέλτιστων πρακτικών, εμπειριών και πληροφοριών, καθώς και των εταίρων που συνεργάστηκαν για την υλοποίηση της κυκλικής λύσης. Επίσης, για την απλούστερη κατανόηση και τη σαφήνεια των αλληλεπιδράσεων εντός της κυκλικής λύσης δημιουργείται μια **σχηματική αναπαράσταση**, ενώ παράλληλα αναφέρονται όλα τα υλικά που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν, προκειμένου να παρέχεται η δυνατότητα επικύρωσης και διασταύρωσης.

Οι πληροφορίες που παρέχονται από τις κυκλικές λύσεις και τα επίπεδα τεχνολογικής ετοιμότητας προσφέρουν ουσιαστική υποστήριξη για την αξιολόγηση της ωριμότητας κάθε κυκλικής λύσης και για τη λήψη αποφάσεων από τους εμπλεκόμενους φορείς.

Η σύνοψη όλων των βημάτων για την ανάπτυξη μιας κυκλικής λύσης παρουσιάζεται στη μορφή του πίνακα 3.

Πίνακας 3: Συνοπτική παρουσίαση του πίνακα που χρησιμοποιείται για την επίδειξη των κυκλικών λύσεων.

Στόχος	
Παραπροϊόντα/Πρώτες Ύλες	
Εμπλεκόμενοι τομείς	
Εφαρμογή	
Τεχνολογικές Λύσεις	
Επίπεδο Τεχνολογικής Ετοιμότητας (TRL)	
Κύρια Αποτελέσματα	
Προκλήσεις/Εμπόδια	
Κριτήρια Αξιολόγησης	
Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα	Οικονομική Αποδοτικότητα
	Κυκλικότητα
Τεχνολογική Ωριμότητα	Κοινωνική Επιρροή
	Επίπεδο συνεργασίας
Σχηματική Αναπαράσταση	
Αναφορές	

Η αξιολόγηση των κριτηρίων αποτελεί κρίσιμο στάδιο για τη διαμόρφωση αντικειμενικών και αξιόπιστων αποφάσεων. Η στάθμιση των κριτηρίων πραγματοποιήθηκε έπειτα από τη συλλογή σχετικών πληροφοριών από τις συστημικές κυκλικές λύσεις και την απάντηση σε ειδικά σχεδιασμένες ερωτήσεις. Ειδικότερα, για κάθε κριτήριο στην εκάστοτε συστημική κυκλική λύση ερωτήθηκε:

- 1) **Περιβαλλοντική βιωσιμότητα:** Πόσο μειώνει την εξάντληση των φυσικών πόρων και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου; Μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα;
- 2) **Οικονομική αποδοτικότητα:** Ποιο είναι το αρχικό κόστος επένδυσης ή/και το λειτουργικό κόστος; Υπάρχουν χρηματοδοτικά προγράμματα; Είναι οικονομικά βιώσιμη; Προσφέρεται ικανοποιητική εξοικονόμηση κόστους;
- 3) **Κυκλικότητα:** Πόσο ισχυρή είναι η επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση, ανάκτηση υλικών; Επιτυγχάνει υψηλή περιβαλλοντική αποδοτικότητα; Είναι εύκολη η προσαρμογή της σε ένα σύστημα;
- 4) **Τεχνολογική ωριμότητα:** Πόσο ώριμη και αποδεδειγμένη είναι η τεχνολογία που χρησιμοποιείται; Είναι καινοτόμα λύση; Έχει δοκιμαστεί πλήρως ή μόνο σε μικρή κλίμακα;
- 5) **Κοινωνική επιρροή:** Ενισχύει την κοινωνική συνοχή, την τοπική απασχόληση ή την ευημερία; Υπάρχουν κοινωνικές αντιδράσεις; Έχει κοινωνική αποδοχή;

- 6) **Επίπεδο συνεργασίας:** Πόσο εύκολη είναι η συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων (π.χ. δήμοι, οργανισμοί); Υπάρχει πολυπλοκότητα στις απαιτούμενες συνεργασίες;

4.2 Πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων με τη μέθοδο TOPSIS στις κυκλικές συστημικές λύσεις

Η μοντελοποίηση της διαδικασίας επιλογής μιας απόφασης περιέχει την αξιολόγηση 8 εναλλακτικών συστημικών κυκλικών λύσεων από έναν φορέα ή ομάδα φορέων για κάθε ένα από τα 6 κριτήρια ξεχωριστά. Χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB για την εφαρμογή της μεθόδου TOPSIS με σκοπό να αναδειχθεί η δυνατότητα ευρύτερης χρήσης σε διαφορετικά σενάρια αξιολόγησης από διαφορετικούς φορείς. Οι εκτιμήσεις που δίνονται από τον φορέα εκφράζουν την υποκειμενική τους προτίμηση για την απόδοση κάθε εναλλακτικής στο εκάστοτε κριτήριο. Η μεθοδολογία της μεθόδου TOPSIS υλοποιήθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB και ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Δημιουργία του πίνακα απόφασης:

Αρχικά κατασκευάζεται ο πίνακας απόφασης X , όπου σε αυτόν ορίζονται:

- 8 εναλλακτικές συστημικές κυκλικές λύσεις:

A₁: Ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από υπολείμματα κοπριάς χοίρων,

A₂: Επεξεργασία ζωικού αίματος για παραγωγή λιπάσματος εντός σφαγείου,

A₃: Αποθήκευση βρόχινου νερού και επιφανειακής απορροής για οικιακή και γεωργική χρήση,

A₄: Επεξεργασία θαλασσινού νερού προς επαναχρησιμοποίηση στην άρδευση,

A₅: Συλλογή και Ανακύκλωση Πανών για την Παραγωγή Υλικών Δόμησης και Πολυεστερικών Προϊόντων,

A₆: Παραγωγή Βιοαερίου από αστικά λύματα και λάσπη αποχέτευσης,

A₇: Λεωφορεία με κυψέλες υδρογόνου,

A₈: Μετασχηματισμός οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους σε υλικά, μπαταρίες, εξαρτήματα και ανταλλακτικά υψηλής αξίας.

- 6 κριτήρια αξιολόγησης:

C₁: Περιβαλλοντική βιωσιμότητα,

C₂: Οικονομική αποδοτικότητα,

C₃: Κυκλικότητα,

C₄: Τεχνολογική ωριμότητα,

C_5 : Κοινωνική επιρροή,

C_6 : Επίπεδο συνεργασίας.

➤ Οι αποδόσεις κάθε εναλλακτικής ως προς κάθε κριτήριο x_{ij}

Ο πίνακας έχει τη μορφή:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

όπου:

- $n = 1, \dots, 6$: ο αριθμός των κριτηρίων αξιολόγησης,
- $m = 1, \dots, 8$: ο αριθμός των εναλλακτικών.

2. Κανονικοποίηση του πίνακα (Ευκλείδεια κανονικοποίηση):

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (10)$$

3. Δημιουργία σταθμισμένου πίνακα:

Οι φορείς έχουν τη δυνατότητα να καταχωρήσουν τα βάρη στα κριτήρια αξιολόγησης χωρίς την απαίτηση αθροίσματος σε συγκεκριμένη τιμή (όπως το 1 ή το 100), καθώς στον κώδικα MATLAB έχει προστεθεί κανονικοποίηση στα βάρη προς διευκόλυνση της ποσοτικοποίησης της βαρύτητας των κριτηρίων. Η κανονικοποίηση των βαρών πραγματοποιείται ως εξής:

$$w_j = \frac{w_j^{\alpha\pi}}{\sum_{k=1}^m w_k^{\alpha\pi}} \quad (11)$$

όπου:

- w_j : το κανονικοποιημένο βάρος του κριτηρίου j ,
- $w_j^{\alpha\pi}$: η τιμή που εισάγει ο αποφασίζων για το κριτήριο j ,
- m : το πλήθος των κριτηρίων.

Η κανονικοποίηση εξασφαλίζει ότι το σύνολο των βαρών ισούται με ένα, δηλαδή $\sum w_j = 1$, γεγονός που διευκολύνει την σωστή στάθμιση του πίνακα αποφάσεων και τη σύγκριση των εναλλακτικών.

Η διαδικασία αυτή ενσωματώνεται στον αλγόριθμο ως εξής:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (12)$$

όπου:

- v_{ij} : η σταθμισμένη κανονικοποιημένη τιμή,

- r_{ij} : η κανονικοποιημένη τιμή της εναλλακτικής i ως προς το κριτήριο j ,
- w_j : το κανονικοποιημένο βάρος του κριτηρίου j (Hwang & Yoon, 1981, Hwang et al., 1993).

Με αυτόν τον τρόπο διατηρείται η ευελιξία και η ρεαλιστικότητα της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, καθώς κάθε ενδιαφερόμενος αποφασίζων μπορεί να αποδώσει ελεύθερα τις προτιμήσεις του για κάθε κριτήριο (Behzadian et al., 2012).

4. Προσδιορισμός θετικής και αρνητικής ιδανικής λύσης:

Τα προκαθορισμένα κριτήρια είναι θετικά ορισμένα (κριτήρια ωφέλειας) και, συνεπώς, κατά τη διάρκεια προσδιορισμού της ιδανικής και της λιγότερο ιδανικής λύσης απαιτείται η εύρεση της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής αντίστοιχα για τα εκάστοτε κριτήρια των εναλλακτικών λύσεων (Hwang & Yoon, 1981, Hwang et al., 1993).

$$A^+ = \{max v_{ij}\} \quad (13)$$

$$A^- = \{min v_{ij}\} \quad (14)$$

5. Υπολογισμός αποστάσεων από τις ιδανικές λύσεις:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad (15)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2} \quad (16)$$

6. Συντελεστής εγγύτητας:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (17)$$

Τιμές κοντά στο 1 υποδηλώνουν μεγαλύτερη εγγύτητα στην ιδανική λύση. Συνεπώς, η εναλλακτική συστημική κυκλική λύση που βρίσκεται πιο κοντά στην τιμή 1 αποτελεί την επιθυμητή λύση και αυτή προτείνεται στον ενδιαφερόμενο φορέα (Hwang & Yoon, 1981, Hwang et al., 1993, Olson, 2004).

Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα

5.1 Προτεινόμενες Τεχνολογικές Λύσεις

Η επιλογή και εφαρμογή των κατάλληλων τεχνολογικών λύσεων εντός του πλαισίου της κυκλικής οικονομίας αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, δεδομένης της ποικιλομορφίας των διαθέσιμων τεχνολογιών και των πολυδιάστατων κριτηρίων αξιολόγησης που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Στο πλαίσιο αυτό, το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στην παρουσίαση και ανάλυση προτεινόμενων τεχνολογικών λύσεων που ευθυγραμμίζονται με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και έχουν εφαρμοστεί στον πραγματικό κόσμο. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τεχνολογίες που σχετίζονται με την ανάκτηση πόρων από βιο-απόβλητα και ζωικά απόβλητα, την επαναχρησιμοποίηση πόρων και νερού, την παραγωγή ενέργειας από απόβλητα, την εφαρμογή "πράσινων" πηγών ενέργειας στο μεταφορικό τομέα και την ανακύκλωση μπαταριών και μηχανικών μερών οχημάτων.

5.1.1 Συστημικές κυκλικές λύσεις κτηνοτροφικού τομέα

Ο κτηνοτροφικός τομέας αποτελεί βασικό πυλώνα της αγροτικής οικονομίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, με εκατομμύρια ζώα να εκτρέφονται ετησίως, περιλαμβανομένων χοίρων, βοοειδών, προβάτων και αιγών. Σύμφωνα με την Eurostat, στο τέλος του 2023, ο πληθυσμός των χοίρων στην ΕΕ ανήλθε σε 133 εκατομμύρια, των βοοειδών σε 74 εκατομμύρια και των προβάτων και αιγών σε 68 εκατομμύρια (Eurostat, 2024). Ωστόσο, η εντατική κτηνοτροφία συνδέεται με περιβαλλοντικές προκλήσεις, όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η ρύπανση των υδάτων και η απώλεια θρεπτικών συστατικών. Συνεπώς, η μετάβαση προς ένα κυκλικό μοντέλο στον κτηνοτροφικό τομέα επιδιώκει την ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση υποπροϊόντων, όπως η κοπριά, μετατρέποντάς τα σε πολύτιμους πόρους για τη γεωργία και την ενέργεια (Sadeghpour & Afshar, 2024). Προσφέρονται, ακόμα, οικονομικά οφέλη στους εμπλεκόμενους φορείς, μειώνοντας τα απόβλητα και τη ζήτηση για συμβατικά προϊόντα, προάγοντας βιώσιμες και καινοτόμες πρακτικές διαχείρισης των ζωικών υποπροϊόντων. Για παράδειγμα, η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από την κοπριά μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή βιο-λιπασμάτων, μειώνοντας την ανάγκη για χημικά λιπάσματα και ενισχύοντας την υγεία του εδάφους.

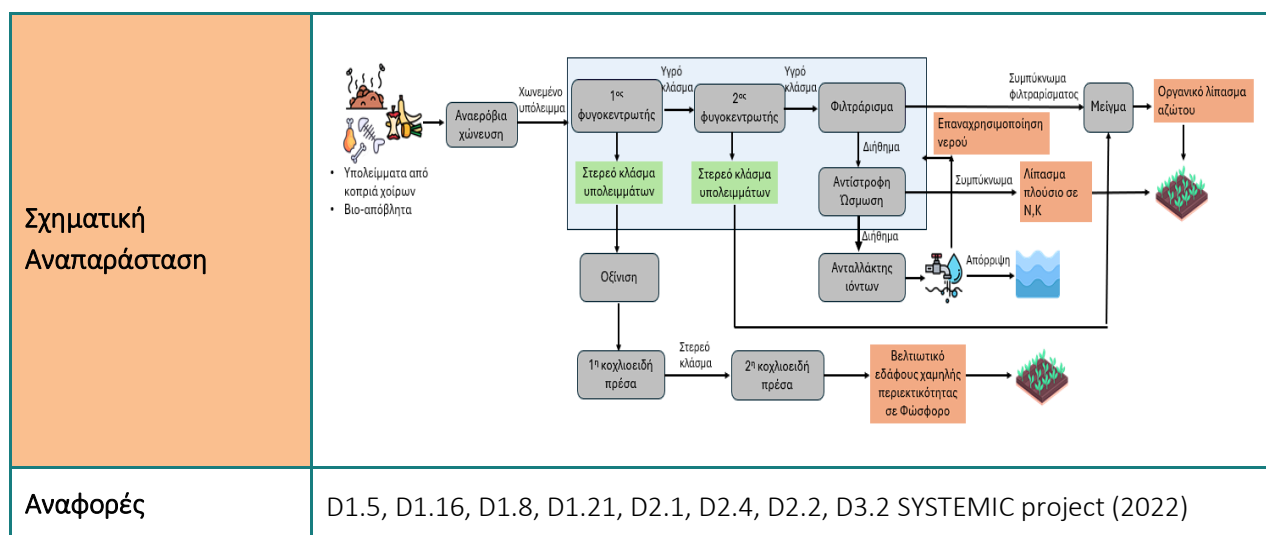
5.1.1.1. Ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από υπολείμματα κοπριάς χοίρων

Η παρούσα μέθοδος εστιάζει στη βιώσιμη ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από υπολείμματα κοπριάς χοίρων και βιο-αποβλήτων (π.χ. υπολείμματα πατάτας, απορριπτόμενη σκόνη γάλακτος), με στόχο τη μετατροπή τους σε πολύτιμους πόρους. Συγκεκριμένα, τα χωνεμένα υπολείμματα υποβάλλονται σε επεξεργασία με δύο αποφρακτικές φυγοκεντρικές διατάξεις, μια μονάδα μικροδιήθησης, αντίστροφης ώσμωσης, ανταλλάκτων ιόντων και δύο κοχλιοειδείς πρέσες για διαδικασία έκπλυσης, προκειμένου να ανακτηθούν άζωτο (N), φώσφορος (P) και κάλιο (K). Τα ανακτηθέντα θρεπτικά συστατικά επαναχρησιμοποιούνται σε γεωργικές εφαρμογές, παράγοντας βιολογικά λιπάσματα και βελτιωτικά εδάφους, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από τα συνθετικά

λιπάσματα και ενισχύοντας την υγεία και τη γονιμότητα του εδάφους.

Στόχος	Η αξιοποίηση του χωνεμένου υπολείμματος για την παραγωγή καθαρού νερού, βιο-λιπασμάτων και βελτιωτικών εδάφους, με σκοπό τη μείωση του κόστους μεταφοράς, των εκπομπών CO ₂ , καθώς και την παραγωγή φιλικών προς το περιβάλλον υποκατάστατων συνθετικών λιπασμάτων αζώτου.
Παραπροϊόντα/ Πρώτες Ύλες	Υπολείμματα από κοπριά χοίρων και βιο-απόβλητα.
Εμπλεκόμενοι τομείς	Διαχείριση αποβλήτων, Γεωργία, Ανάκτηση πόρων.
Εφαρμογή	Αγροτική, Βιομηχανική.
Τεχνολογικές Λύσεις	Τα υπολείμματα από κοπριά χοίρων και τα βιο-απόβλητα υφίστανται αρχικά αναερόβια χώνευση . Το σύστημα διαχωρίζει τα χωνεμένα υπολείμματα σε στερεό και υγρό κλάσμα με τη χρήση δύο φυγοκεντρικών διατάξεων. Στον πρώτο φυγοκεντρωτή, προστίθεται χλωριούχο μαγνήσιο για την αύξηση του φωσφόρου στο στερεό κλάσμα του μείγματος. Το υγρό κλάσμα του πρώτου φυγοκεντρωτή εμπλουτίζεται με πολυμερές και τροφοδοτείται στον δεύτερο φυγοκεντρωτή, ο οποίος παράγει μια λάσπη. Τα στερεά κλάσματα των δύο φυγοκεντρωτών μεταφέρονται σε δεξαμενή οξίνισης . Προστίθεται νερό και καθαρό θειικό οξύ (98%) ώστε να ρυθμιστεί το pH στο 5,5. Το οξινομένο μείγμα περνά από το πρώτο κοχλιοειδές πιεστήριο (πρέσα) . Το στερεό κλάσμα από το πρώτο πιεστήριο αναμιγνύεται με νερό και θειικό οξύ και υφίσταται επεξεργασία στο δεύτερο κοχλιοειδές πιεστήριο. Το τελικό στερεό κλάσμα αποτελεί ένα βελτιωτικό εδάφους χαμηλής περιεκτικότητας σε φωσφόρο. Το υγρό κλάσμα από το πρώτο πιεστήριο περνά από ένα φίλτρο καθαρισμού από έλασμα, στο οποίο αφαιρείται η οργανική ύλη. Στη συνέχεια προστίθεται υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH) ₂) και το υγρό μεταφέρεται σε δεξαμενή καθίζησης . Στον πάτο κατακάθεται ο φώσφορος και έτσι ανακτάται ως άλατα φωσφόρου, τα οποία χρησιμοποιούνται ως λιπάσματα ή ως πρώτη ύλη για παραγωγή κοκκώδους οργανικού λιπάσματος. Το υγρό από τον δεύτερο φυγοκεντρωτή τροφοδοτείται σε μονάδα μικροδιήθησης. Το συμπύκνωμα από τη μονάδα μικροδιήθησης συνδυάζεται με τα στερεά του δεύτερου φυγοκεντρικού για την παραγωγή οργανικού λιπάσματος αζώτου. Το διήθημα από τη μονάδα μικροδιήθησης οδηγείται στη μονάδα αντίστροφης ώσμωσης . Προστίθεται θειικό οξύ και αντιπηκτικό πριν την αντίστροφη ώσμωση. Το συμπύκνωμα από την αντίστροφη ώσμωση αναμιγνύεται με ουρία, νιτρικό αμμώνιο ή θειικό αμμώνιο για την παραγωγή λιπάσματος πλούσιο σε Άζωτο και Κάλιο. Το διήθημα από τη αντίστροφη ώσμωση υποβάλλεται σε επεξεργασία σε μονάδα ανταλλάκτων ιόντων και παράγεται καθαρό νερό. Το καθαρό νερό απορρίπτεται σε επιφανειακά ύδατα ή επαναχρησιμοποιείται στο σύστημα.
TRL	7-8
Κύρια Αποτελέσματα	<ul style="list-style-type: none"> Το 100% των ανακτηθέντων θρεπτικών ουσιών χρησιμοποιείται ως λίπασμα. Ανακτώνται: 0,15 τόνοι στερεού κλάσματος 0,25 τόνοι συμπυκνώματος αντίστροφης ώσμωσης 0,15 τόνοι καθαρού νερού 0,45 τόνοι συμπυκνώματος και στερεού από μικροδιήθηση από τον δεύτερο

	<p>φυγοκεντρωτή. Περιεκτικότητα σε ολικό άζωτο, φώσφορο, ασβέστιο, μαγνήσιο, NH₄-N και κάλιο περίπου 71,6 g/kg, 37,2 g/kg, 49,7 g/kg, 24,3 g/kg, 44,5 g/kg και 32,2 g/kg αντίστοιχα. Περιεκτικότητα σε ξηρά ουσία: 196 g/kg και 313 g/kg στους φυγοκεντρωτές 1 και 2 αντίστοιχα. Το στερεό κλάσμα και τα άλατα φωσφόρου περιέχουν περίπου 9 g/kg και 9,5 g/kg φωσφόρου αντίστοιχα. Το χαμηλό σε φώσφορο βελτιωτικό εδάφους περιέχει περίπου 1,1 g/kg φωσφόρου και υψηλό λόγο οργανικού άνθρακα προς P₂O₅, καθιστώντας ικανό υποκατάστατο της τύρφης. Το υγρό του πρώτου πιεστηρίου περιέχει 2–3 g/L φωσφόρου. Το συμπύκνωμα αντίστροφης ώσμωσης περιέχει περισσότερο από 90% άζωτο και μπορεί να αντικαταστήσει συνθετικά λιπάσματα, με την προσθήκη καλίου.</p> <ul style="list-style-type: none">• Αύξηση κέρδους μέσω μείωσης κόστους μεταφοράς και τοπικής πώλησης. Το μειωμένο νερό μειώνει το βάρος της μεταφοράς. Το εκτιμώμενο κόστος συντήρησης είναι περίπου 250.000 €/έτος, με δυναμικότητα μονάδας περίπου 135.000 τόνοι/έτος. Κατανάλωση ενέργειας περίπου 25 kWh/τόνο, κόστος προσθέτων (θειικό οξύ, πολυμερές) περίπου 2 €/τόνο. Τιμή πώλησης: βελτιωτικό εδάφους 22,5 €/τόνο, άλατα φωσφόρου 9,5 €/τόνο. Η τοξικότητα προς τη χερσαία ζωή μειώνεται κατά 50% λόγω μειωμένων οδικών μεταφορών. Κατανάλωση θειικού οξέος και ασβέστη: περίπου 48 και 28 kg/τόνο στερεού αντίστοιχα. Απλός σχεδιασμός διεργασίας.• Περιβαλλοντικά οφέλη. Υποκαθιστά τα συνθετικά λιπάσματα με βιώσιμο τρόπο. Μειώνει τις εκπομπές CO₂. Χαμηλή χρήση πρόσθετων (πολυμερές, θειικός σίδηρος, χλωριούχος σίδηρος).• Κοινωνικά οφέλη. Οι πελάτες και οι χοιροτρόφοι έχουν τη δυνατότητα να προμηθεύονται οικονομικά λιπάσματα για τη διάθεση της κοπριάς τους. Η σύνθεση των θρεπτικών συστατικών μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες του εκάστοτε πελάτη.	
Προκλήσεις/ Εμπόδια	Δυσκολία στην εύρεση αγοράς για τα προϊόντα. Εξάρτηση από τοπικές μονάδες παραγωγής γαλακτοκομικών προϊόντων. Απρόβλεπτες αλλαγές στη νομοθεσία.	
Κριτήρια Αξιολόγησης		
Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα	Οικονομική Αποδοτικότητα	Κυκλικότητα
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>
Τεχνολογική Ωριμότητα	Κοινωνική Επιρροή	Επίπεδο συνεργασίας
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>



Πιλοτική εφαρμογή: Εγκατάσταση στη μονάδα Groot Zevert Vergisting, Beltrum (Ολλανδία)

Η μονάδα Groot Zevert Vergisting B.V., μια μονάδα αναερόβιας χώνευσης στο Beltrum, βρίσκεται σε περιοχή με έντονη γεωργική δραστηριότητα και πλεόνασμα κοπριάς. Η εφαρμογή του συστήματος ήταν επιτυχής, σε συνεργασία με το έργο του ευρωπαϊκού προγράμματος του Horizon 2020, SYSTEMIC, μειώνοντας τη διάθεση και τη μεταφορά του χωνεμένου υπολείμματος κατά 52%.

Η εγκατάσταση εισήγαγε ένα λίπασμα που παράγεται από το συμπύκνωμα της μονάδας μικροδιήθησης και περιέχει μείγμα N, P και K. Η αποδοτικότητα διαχωρισμού των φυγοκεντρικών διατάξεων ήταν ικανοποιητική·περίπου το 88% του φωσφόρου ανακτήθηκε. Το βελτιωτικό εδάφους χαμηλής περιεκτικότητας σε φώσφορο είχε υψηλή περιεκτικότητα σε ξηρά ουσία (περίπου 17% περισσότερη), γεγονός που το καθιστά πιο αποδοτικό και κερδοφόρο· χρησιμοποιήθηκε ως εναλλακτικό της τύρφης με τιμή περίπου 20–30 €/m³. Σχεδόν το ήμισυ του ιονισμένου νερού επαναχρησιμοποιήθηκε εντός της διεργασίας. Μεγάλη ποσότητα λάσπης από τη διαδικασία μικροδιήθησης απορρίφθηκε τελικά ως κοπριά. Το καθαρισμένο νερό πληροί τα κριτήρια που έχει θέσει το τοπικό συμβούλιο υδάτων, παρόλο που η παραγωγή ήταν χαμηλότερη από την αναμενόμενη· περίπου το 10% του παραγόμενου καθαρού νερού απορρίφθηκε.



Η ετήσια εξοικονόμηση εκπομπών CO₂ ήταν πάνω από 3.000 t CO₂ισοδ. Τα κέρδη προ τόκων, φόρων και αποσβέσεων) ήταν πάνω από τον μέσο όρο (49%) και αποδεικνύει ότι η εγκατάσταση του συστήματος ήταν κερδοφόρα. Το EBIT (κέρδη προ τόκων και φόρων) βελτιώθηκε κατά περισσότερο από 200%. Το CAPEX (κεφαλαιουχική δαπάνη για τον εξοπλισμό του συστήματος) ήταν περίπου 4.000.000€, ενώ το συνολικό κόστος της εγκατάστασης έφτασε τα 20 εκ. ευρώ.

5.1.1.2. Επεξεργασία ζωικού αίματος για παραγωγή λιπάσματος εντός σφαγείου

Η πρακτική αυτή προτείνει τη μετατροπή του ζωικού αίματος, ενός υποπροϊόντος σφαγείου με υψηλή θρεπτική αξία, σε υδρολυμένο αίμα, το οποίο αποτελεί οργανικό λίπασμα. Η διαδικασία περιλαμβάνει συλλογή αίματος, φιλτράρισμα, μηχανική ομογενοποίηση, χημική υδρόλυση, ξήρανση και κοκκοποίηση. Οι κύριοι στόχοι είναι η ενίσχυση της κυκλικότητας, η μείωση της

ανάγκης για συνθετικά λιπάσματα και η αξιοποίηση υποπροϊόντων ζωικής προέλευσης.

Στόχος	Η παραγωγή υδρολυμένου αίματος από αίμα σφαγείου, με σκοπό την Αντιμετώπιση της υποβάθμισης του εδάφους, καθώς και τη μείωση των αποβλήτων και της ρύπανσης από σφαγεία.
Παραπροϊόντα/ Πρώτες Ύλες	Ζωικό αίμα από σφαγεία.
Εμπλεκόμενοι τομείς	Γεωργικός τομέας, τομέας κτηνοτροφίας, χημική βιομηχανία, πάροχοι τεχνολογίας, εγκαταστάσεις ανακύκλωσης, εταίροι εφοδιαστικής αλυσίδας και logistics, λιανικό εμπόριο και υπηρεσίες εστίασης.
Εφαρμογή	Αστική, βιομηχανική.
Τεχνολογικές Λύσεις	<ul style="list-style-type: none"> • Φιλτράρισμα για απομάκρυνση ακαθαρσιών, όπως τρίχες και πετραδάκια, μέσω μεταλλικών φίλτρων, οδηγώντας στην παραγωγή καθαρού αίματος. • Μηχανική ομογενοποίηση (μηχανική λύση) για διάνοξη των μεμβρανών των ερυθρών αιμοσφαιρίων υπό υψηλή πίεση (έως 600 bar) και απελευθέρωση αιμοσφαιρίνης και άλλων ενδοκυτταρικών υλικών. • Χημική υδρόλυση με επεξεργασία αίματος με διάλυμα 2% NaOH στους 60°C για 3–6 ώρες, για διάσπαση των πρωτεϊνών σε αμινοξέα και πεπτίδια και παραγωγή οργανικού λιπάσματος πλούσιου σε άζωτο (έως και 13,2%). • Ξήρανση με χρήση περιστροφικού τυμπάνου ξήρανσης σε ελεγχόμενη θερμοκρασία για διατήρηση της υγρασίας και εξασφάλιση μακροχρόνιας αποθήκευσης. • Ακολουθεί κοκκοποίηση του ξηρού προϊόντος.
TRL	7
Κύρια Αποτελέσματα	<ul style="list-style-type: none"> • Επιτυγχάνεται 100% απόδοση κατά την επεξεργασία αίματος σφαγείου για παραγωγή υδρολυμένου αίματος, το οποίο είναι ωφέλιμο για τη γεωργία λόγω υψηλής περιεκτικότητας σε θρεπτικά στοιχεία (N, P), ιχνοστοιχεία (π.χ. Fe) και ενίσχυσης της γονιμότητας του εδάφους. Το παραγόμενο λίπασμα περιέχει πάνω από 2% άζωτο. Δεν υπάρχει απώλεια μάζας και δεν παράγονται υποπροϊόντα κατά τη διαδικασία. • Μείωση περιβαλλοντικού αποτυπώματος λόγω μείωσης αποβλήτων και ρύπανσης από τα σφαγεία. Παροχή εναλλακτικής λύσης έναντι των συνθετικών λιπασμάτων που ενισχύουν την υγεία του εδάφους. Οι διεργασίες υδρόλυσης και ξήρανσης μπορεί να είναι ενεργειακά απαιτητικές. • Οικονομικά αποδοτική λύση. Η τυπική τιμή βιο-λιπάσματος από αίμα είναι 5 €/L και η πρακτική αυτή μπορεί να αποφέρει έσοδα με περιθώριο κέρδους 30–50% όταν η τιμή του υδρολυμένου αίματος κυμαίνεται στα 0,5–1,0 €/L. • Το τελικό λίπασμα έχει ισορροπημένη αναλογία NPK (Άζωτο-, Φώσφορο-Κάλιο), κατάλληλη για γεωργική χρήση. Οι πρωτεΐνες του αίματος απορροφώνται πιο εύκολα από τα φυτά λόγω της χημικής υδρόλυσης. Λιπάσματα με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο (13,2%) ενισχύουν τη γονιμότητα του εδάφους. • Αποδεδειγμένη οικονομική βιωσιμότητα (κερδοφορία από το δεύτερο έτος

	λειτουργίας, περιθώρια κέρδους 30–50% ανάλογα με την τιμολόγηση) και τεχνική βιωσιμότητα (εξαιρετική θρεπτική σύνθεση, υψηλή ποιότητα κομπόστ με ιδανικούς λόγους C/N, αποδοτική παραγωγή μέσω υδρόλυσης σε λίγες ώρες).		
Προκλήσεις/ Εμπόδια	Εφοδιαστική διαθεσιμότητα για την εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων αίματος.		
Κριτήρια Αξιολόγησης			
Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα	Οικονομική Αποδοτικότητα	Κυκλικότητα	
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	
Τεχνολογική Ωριμότητα	Κοινωνική Επιρροή	Επίπεδο συνεργασίας	
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	
Σχηματική Αναπαράσταση	<div><div><p>Ζωικό αίμα από σφαγείο</p></div><div><div>Φιλτράρισμα</div><div>Μηχανική Ομογενοποίηση</div><div>Χημική Υδρόλυση</div><div>Ξήρανση</div><div>Κοκκοποίηση</div></div><div><div><p>Οργανικό λίπασμα</p></div></div></div>		
Αναφορές	Biliaieva, 2023; Franco et al., 2023; Pekakis et al., 2023; Pérez et al., 2023; Tsouti et al., 2023; Franco et al., 2020; https://waystup.eu/cases/valencia-spa/		

Πιλοτική Εφαρμογή: Επεξεργασία ζωικού αίματος που προέρχεται από σφαγείο για παραγωγή λιπάσματος.

Η συγκεκριμένη συστημική κυκλική λύση εφαρμόζεται στο έργο Horizon 2020, WaysTUP!, το οποίο μετασχηματίζει τα αστικά βιο-απόβλητα σε βιο-προϊόντα υψηλής αξίας. Η κυκλική λύση εξετάζει τη μετατροπή αίματος σφαγείων, το οποίο είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά αλλά εμπεριέχει περιβαλλοντικές προκλήσεις, σε οργανικά λιπάσματα.

Η διαδικασία περιλαμβάνει συλλογή και φιλτράρισμα 4.000 kg αίματος για απομάκρυνση ακαθαρσιών, ακολουθούμενη από μηχανική ομογενοποίηση στα 600 bar για διάνοιξη των μεμβρανών των ερυθρών αιμοσφαιρίων και απελευθέρωση αιμοσφαιρίνης και ενδοκυτταρικών θρεπτικών στοιχείων. Στη συνέχεια, το αίμα υποβάλλεται σε χημική υδρόλυση με χρήση διαλύματος NaOH 2% στους 60°C για 3–6 ώρες, διασπώντας τις πρωτεΐνες σε πεπτίδια και αμινοξέα. Τέλος, το επεξεργασμένο αίμα ξηραίνεται, παράγοντας 4.000 kg λιπάσματος, με συνολική απόδοση 100%.

Η όλη διαδικασία καταναλώνει 104 kWh. Το παραγόμενο οργανικό λίπασμα περιέχει 13,2% άζωτο και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό για τον εμπλουτισμό του εδάφους. Περιέχει επίσης πολύτιμα πεπτίδια και αμινοξέα που ενισχύουν την υγεία του εδάφους και την ανάπτυξη των φυτών. Μέσω της αξιοποίησης του αίματος σφαγείων, η πρακτική λύση περιορίζει τη ρύπανση και τα

προβλήματα της διαχείρισης αποβλήτων και συμβάλλει στη βιώσιμη γεωργία αντικαθιστώντας τα συνθετικά λιπάσματα. Η κυκλική λύση επιδείχθηκε σε ημι-βιομηχανική κλίμακα, αποδεικνύοντας την τεχνική και οικονομική του βιωσιμότητα.

5.1.2 Συστημικές κυκλικές λύσεις υδάτινων πόρων

Ο τομέας των υδατικών πόρων αντιμετωπίζει αυξανόμενες προκλήσεις λόγω της κλιματικής αλλαγής, της υπερεκμετάλλευσης των φυσικών πόρων και της ρύπανσης. Η παραδοσιακή γραμμική προσέγγιση στη διαχείριση του νερού, που βασίζεται στην εξαγωγή, χρήση και απόρριψη, δεν είναι πλέον βιώσιμη. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, εάν συνεχιστεί η σημερινή πορεία, μέχρι το 2030 η παγκόσμια ζήτηση για γλυκό νερό θα υπερβεί τη διαθέσιμη προσφορά κατά 40%(UNEP-DHI, 2024). Η επαναχρησιμοποίηση νερού θα μπορούσε να είναι έως και έξι φορές υψηλότερη από την τρέχουσα κατάσταση. Η κυκλική οικονομία προσφέρει ένα εναλλακτικό μοντέλο που στοχεύει στη διατήρηση, επαναχρησιμοποίηση και ανακύκλωση του νερού, μειώνοντας την εξάρτηση από πρωτογενείς πόρους και ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα (Delgado et al., 2021). Συνεπώς, η εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στον τομέα του νερού μπορεί να συμβάλει στην αντιμετώπιση αυτής της κρίσης, προωθώντας την αποδοτική χρήση των πόρων και την βιωσιμότητα των υδάτινων συστημάτων (UNEP-DHI, 2024).

5.1.2.1. Αποθήκευση βρόχινου νερού και επιφανειακής απορροής για οικιακή και γεωργική χρήση

Πρόκειται για ένα σύστημα συγκομιδής βρόχινου νερού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οικιακή, μη πόσιμη χρήση μέσω ανακύκλωσης του νερού. Μέρος του συγκεντρωμένου βρόχινου νερού επεξεργάζεται μέσω συστήματος αργής διήθησης άμμου, το οποίο είναι κατοικημένο από μικροοργανισμούς και καθαρίζει το νερό για πόσιμη χρήση. Επίσης, η επιφανειακή απορροή συλλέγεται χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό σύστημα αποστράγγισης ανοιχτού καναλιού, φιλτράρεται και αποθηκεύεται στο υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Το συλλεγμένο νερό χρησιμοποιείται για την άρδευση καλλιεργειών.

Στόχος	Ο κύριος στόχος είναι η ανάπτυξη μιας σύγχρονης, αποκεντρωμένης λύσης για τη συγκομιδή, αποθήκευση και ανάκτηση βρόχινου νερού, προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθεί το πλεονάζον νερό από τους χειμερινούς μήνες σε περιπτώσεις έλλειψης νερού.
Παραπροϊόντα/ Πρώτες Ύλες	Οικιακά λύματα, βρόχινο νερό, επιφανειακή απορροή.
Εμπλεκόμενοι τομείς	Επεξεργασία λυμάτων, γεωργία και άρδευση, τουρισμός, ανάκτηση πόρων.
Εφαρμογή	Αστική, αγροτική.
Τεχνολογικές Λύσεις	Το βρόχινο νερό από τις στέγες των κατοικιών αποστέλλεται μέσω ενός φρεατίου σε μια δεξαμενή αποθήκευσης για να επαναχρησιμοποιηθεί για οικιακές μη πόσιμες χρήσεις. Στη συνέχεια, μέρος του νερού καθαρίζεται μέσω

	<p>του συστήματος αργής διήθησης άμμου και αποθηκεύεται σε δεξαμενή αποθήκευσης. Μετά τη διήθηση, είναι δυνατή η μετατροπή του βρόχινου νερού σε πόσιμο προϊόν μέσω διάφορων βιοχημικών διαδικασιών, σε περιπτώσεις όπου η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού και η νομοθεσία το επιτρέπουν. Επίσης, το νερό από την επιφανειακή απορροή αποθηκεύεται, φιλτράρεται και ανακτάται στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Ένα ανοιχτό σύστημα αποστράγγισης γραμμικού καναλιού (bioswale system) επίσης τροφοδοτεί τον υδροφόρο ορίζοντα με βρόχινο νερό που προέρχεται από τα χωράφια, το οποίο επίσης αποτρέπει τις πλημμύρες. Όταν ο υδροφόρος ορίζοντας επαναφορτιστεί στο μέγιστο όριο του, το πλεονάζον νερό αποθηκεύεται σε δεξαμενές και επαναχρησιμοποιείται για άρδευση στις καλλιέργειες, κυρίως κατά τις ξηρές περιόδους.</p>	
TRL	6-7	
Κύρια Αποτελέσματα	<ul style="list-style-type: none">• Ανάκτηση νερού για οικιακές μη πόσιμες χρήσεις. Αποκεντρωμένη λύση για διαθεσιμότητα νερού κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.• Θετική επίδραση στο περιβάλλον. Χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.• Οικονομικά βιώσιμη λύση για πολλά νοικοκυριά.• Κοινωνικά αποδεκτό, οι άνθρωποι νιώθουν ότι έχουν θετική επιρροή στο περιβάλλον με τις καθημερινές τους συνήθειες.• Αναμένονται πάνω από 250 m³/έτος βρόχινο νερό. Περισσότερο από 10 m³/έτος πόσιμο νερό. 200 m³/έτος νερού αποθηκευμένο στον υδροφόρο ορίζοντα. 1000 kg/έτος λεβάντας. 0,2 €/m³ του συγκομισμένου νερού. Ανοιχτό σύστημα αποστράγγισης γραμμικού καναλιού: 500m³/έτος νερού. Εμπεδωμένο νερό: 32m³/έτος.	
Προκλήσεις/ Εμπόδια	<p>Ακραίες κλιματικές συνθήκες (ξηρασία, πλημμύρες, παγωνιά), ασθένειες φυτών, προβλήματα συνδεσιμότητας, αποτυχίες στο σύστημα αργής διήθησης άμμου, αποτυχία αντλίας, ρωγμές στις δεξαμενές λόγω υψηλών θερμοκρασιών, απόφραξη φύλλων και συντριμμιών στην επιφανειακή απορροή, ζημιές σε καλώδια από τρωκτικά.</p>	
Κριτήρια Αξιολόγησης		
Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα	Οικονομική Αποδοτικότητα	Κυκλικότητα
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>
Τεχνολογική Ωριμότητα	Κοινωνική Επιρροή	Επίπεδο συνεργασίας
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>
Σχηματική Αναπαράσταση		

Αναφορές

Castañó-Trias et al., 2020; Fatone et al., 2020; Gattringer et al., 2024; Giannis Vasilakos et al., 2021; Katsou et al., 2023; Noutsopoulos et al., 2024; Tsiropoulos et al., 2019; Dagtzidou, 2024; El-Arabi et al., 2022; Kokkinakis et al., 2023.

Πιλοτική εφαρμογή: Καλλιέργεια λεβάντας στη Μύκονο

Η εφαρμογή της κυκλικής λύσης στη Μύκονο πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με το έργο Horizon 2020, HYDROUSA, τους τοπικούς φορείς και τους αρμόδιους τουριστικού κλάδου. Αναπτύσσεται μια διάταξη του συστήματος που βασίζεται κυρίως στην υπάρχουσα υποδομή, όπως δεξαμενές αποθήκευσης βρόχινου νερού και υπόγεια αποθέματα νερού, προκειμένου να ενισχυθεί το αποθηκευτικό αποτέλεσμα και να επεκταθεί η διαθεσιμότητα νερού προς την ξηρή περίοδο.

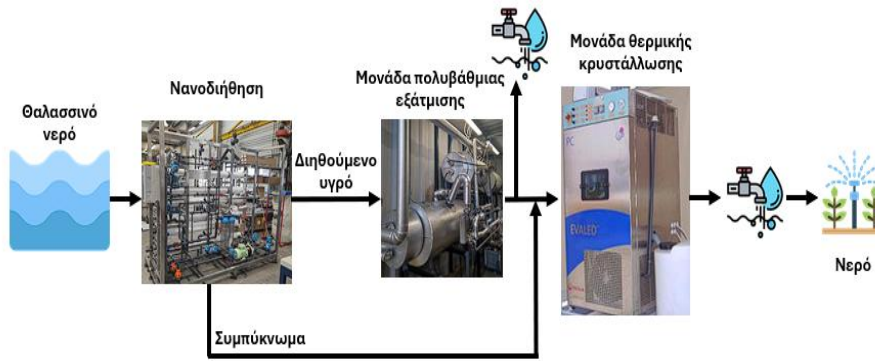
Ο χώρος διαθέτει αρκετά κτήρια με στέγες (περίπου 438 m²), δύο δεξαμενές αποθήκευσης νερού (40 m³ και 70 m³), μία ανοιχτή δεξαμενή (20 m³), τρεις παραδοσιακές πηγάδες και μία γεώτρηση. Υπάρχουν επίσης φυσικά υπόγεια αποθέματα νερού στην περιοχή. Ο υδροφόρος ορίζοντας έχει πάχος 4 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (m_{bgl}) και δυναμική αποθηκευτικής ικανότητας περίπου 1035 m³.

Το ανακτηθέν νερό από τις δεξαμενές θα χρησιμοποιηθεί για οικιακή χρήση (πλύσιμο ρούχων), για αγροτική άρδευση για την καλλιέργεια 0,2 εκταρίων λεβάντας και για πόσιμο νερό (μετά από επεξεργασία). Περισσότερο από 509 m³ βρόχινου νερού συλλέχθηκαν και διοχετεύθηκαν στον υδροφόρο ορίζοντα για επαναφόρτιση. Περίπου 80 m³ επιφανειακής απορροής συλλέχθηκαν κατά τις υγρές περιόδους και αποθηκεύτηκαν στις δεξαμενές. Από τις στέγες συλλέχθηκαν περίπου 153 m³ βρόχινου νερού. Το συλλεγόμενο και ανακτηθέν νερό από το σύστημα αργής διήθησης άμμου ήταν ίσο με 10 L/ημέρα. Το σύστημα αποστράγγισης γραμμικού καναλιού ανάκτησε και αποθήκευσε περισσότερα από 470 m³ βρόχινου νερού στο πεδίο και χρησιμοποιήθηκε για άρδευση, έτσι ώστε να καλλιεργηθούν περισσότερα από 122 kg λεβάντας. Το νερό που συγκομίστηκε από τα σπίτια κάλυψε τις καθημερινές ανάγκες των κατοίκων (πλύσιμο ρούχων). Οι κάτοικοι επίσης εξοικονόμησαν περισσότερα από 300 € ετησίως από την παραγωγή και χρήση του νερού.

5.1.2.2. Επεξεργασία θαλασσινού νερού προς επαναχρησιμοποίηση στην άρδευση

Η εύρεση εναλλακτικών πηγών και τρόπων αξιοποίησης των υδάτινων πόρων για την κάλυψη της ζήτησης σε νερό για βιομηχανική, αγροτική ή άλλη χρήση είναι εσκεμμένη και χρήσιμη, ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένους υδατικούς πόρους. Το θαλασσινό νερό αποτελεί μια πολύτιμη πηγή, η οποία μέσω επεξεργασίας με συμβατικές ή/και προηγμένες τεχνολογικές αλυσίδες μπορεί να οδηγήσει στην ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση υψηλής ποιότητας νερού. Η παρούσα συστημική κυκλική λύση αποσκοπεί στην ανάδειξη μιας αποδοτικής λύσης για την επεξεργασία θαλασσινού νερού με στόχο την επαναχρησιμοποίηση του νερού για άρδευση στον αγροτικό τομέα.

Στόχος	Ανάκτηση νερού από θαλασσινό νερό, κατάλληλου για επαναχρησιμοποίηση για άρδευση στη γεωργία.
Παραπροϊόντα/ Πρώτες Υλεις	Θαλασσινό νερό.
Εμπλεκόμενοι τομείς	Αγροτικός τομέας, Χημική βιομηχανία, Πάροχοι τεχνολογίας, Εγκαταστάσεις ανακύκλωσης, Ερευνητικά κέντρα, Δημόσιες αρχές – Διακυβέρνηση, Συνεργάτες εφοδιαστικής αλυσίδας και μεταφορών, Φορείς χάραξης πολιτικής και νομικού πλαισίου
Εφαρμογή	Αγροτική, αστική, βιομηχανική.
Τεχνολογικές Λύσεις	Αρχικά, πραγματοποιείται νανοδιήθηση για το διαχωρισμό των δισθενών από τα μονοσθενή ιόντα. Το διηθούμενο υγρό, πλούσιο σε μονοσθενή ιόντα, τροφοδοτείται σε μια μονάδα πολυβάθμιας εξάτμισης , η οποία παράγει νερό μέσω εξάτμισης. Το εκρέον προϊόν αναμιγνύεται με το συμπύκνωμα της νανοδιήθησης, πλούσιο σε δισθενή ιόντα, και τροφοδοτείται σε μια θερμική μονάδα κρυστάλλωσης (π.χ. δεξαμενή κρυστάλλωσης) για την παραγωγή υψηλής ποιότητας, σε θεραπευτικά συστατικά, νερού για άρδευση σε καλλιέργειες. Οι μονάδες πολυβάθμιας εξάτμισης και ο θερμικός κρυσταλλωτής λειτουργούν υπό συνθήκες κενού και ανακυκλοφορίας.
TRL	5-7
Κύρια Αποτελέσματα	<ul style="list-style-type: none"> • Η νανοδιήθηση βελτιώνει την απόδοση της μονάδα πολυβάθμιας εξάτμισης, απορρίπτοντας τα διαλυμένα ιόντα (>98% για Mg, Ca, SO₄²⁻). Χαμηλή απώλεια Na, K, Cl. Είναι απαραίτητη η παρακολούθηση της πίεσης, της ροής, της αγωγιμότητας, της θερμοκρασίας και του pH. Ανάκτηση νερού έως και 92%. • Η μονάδα πολυβάθμιας εξάτμισης επιτυγχάνει έως 80% ανάκτηση νερού και παράγει απόσταγμα με πολύ χαμηλή αγωγιμότητα (<30 μS/cm) και χαμηλή περιεκτικότητα σε ολικά διαλυμένα στερεά (TDS). Ο λόγος συμπύκνωσης και η αγωγιμότητα του αποστάγματος κρίνονται καθοριστικής σημασίας για την αξιολόγηση της απόδοσης. • Ο θερμικός κρυσταλλωτής ανακτά 35–65% νερό και μειώνει τα επίπεδα TDS. Είναι κατάλληλος για επεξεργασία μικρότερων ποσοτήτων άλμης με υψηλή συγκέντρωση (άνω του 15% TDS). Κατανάλωση ενέργειας ισοδυναμεί περίπου με 5,6 kWh/m³. • Η σταθερή παρακολούθηση της παροχής θαλασσινού νερού είναι ιδιαίτερα σημαντική για την αποφυγή υπερφόρτωσης. Συνολική ανάκτηση νερού έως και 80% για επαναχρησιμοποίηση στην άρδευση. • Διαδικασία αποδοτική σε πόρους και ενέργεια, με χαμηλές εκπομπές CO₂ και χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, φιλική προς το περιβάλλον. Μηδενική τοξικότητα για τον άνθρωπο και τα οικοσυστήματα. Χαμηλά έσοδα λόγω του υψηλού κόστους. Οι εμπλεκόμενοι φορείς είναι πρόθυμοι να εφαρμόσουν τη λύση.
Προκλήσεις/ Εμπόδια	Πιθανές διαρροές αλατιού μπορεί να προκύψουν στη μονάδα πολυβάθμιας εξάτμισης σε περίπτωση βλάβης σωληνώσεων ή αντλιών.

Κριτήρια Αξιολόγησης		
Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα	Οικονομική Αποδοτικότητα	Κυκλικότητα
■ ■ ■ □ □	■ ■ □ □ □	■ ■ ■ ■ □
Τεχνολογική Ωριμότητα	Κοινωνική Επιρροή	Επίπεδο συνεργασίας
■ ■ □ □ □	■ ■ ■ □ □	■ ■ ■ ■ □
Σχηματική Αναπαράσταση		
	Elahinik et al., 2022; Gaast & Renz, 2023; Ktori et al., 2024; Morgante et al., 2024; Palmeros Parada et al., 2023; Parada et al., 2023; Wilfert et al., 2024; Xevgenos, 2022	

Πιλοτική Εφαρμογή: Επεξεργασία θαλασσινού νερού για παραγωγή νερού άρδευσης

Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Λαμπεντούζα, Ιταλία, σε συνεργασία με διάφορους εμπλεκόμενους φορείς (Sofinter, Thermossol, Lenntech, Technical University of Delft), εγκατέστησε μια προηγμένη μέθοδο αφαλάτωσης για την επεξεργασία 2,2 m³/h θαλασσινού νερού, με σκοπό την παραγωγή υψηλής ποιότητας νερού για οικιακή, πόσιμη, γεωργική ή βιομηχανική χρήση.

Η επεξεργασία του θαλασσινού νερού έγινε σε πιλοτική κλίμακα με 2 μονάδες νανοδιήθησης (2,46 m³/h παροχή, 69% ανάκτηση νερού, ισχύς 3,5 kW και 33 kW αντίστοιχα), μια μονάδα πολυβάθμιας εξάτμισης (χωρητικότητας 2 m³/ημέρα, επεξεργασία ανά παρτίδα, ισχύς περίπου 7 kW) και έναν θερμικό κρυσταλλωτή (χωρητικότητας 0,2 m³/ημέρα). Η αποβαλλόμενη θερμότητα αξιοποιήθηκε για τη μονάδα πολυβάθμιας εξάτμισης, καλύπτοντας έως και το 92% των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων, με λόγο συμπύκνωσης 1,4–3,0.

Επιτυγχάνεται μηδενική ρύπανση της θάλασσας καθώς η ανάκτηση νερού φτάνει έως και 92%. Η απομάκρυνση των ιόντων μέσω νανοδιήθησης ήταν μεγαλύτερη από 97% για Ca²⁺, Mg²⁺ και SO₄²⁻, και έως 19% για Na⁺, K⁺ και Cl⁻. Η κατανάλωση ενέργειας ήταν περίπου ίση με 3,8 GWh/έτος και εκπομπές περίπου 7.500 kton CO₂/έτος. Το κόστος εκτιμάται σε 0,11 €/m³ αποστάγματος, με συνολική απόδοση 17 m³ ανακτηθέντος νερού ανά τόνο ισοδυνάμου CO₂ που εκπέμπεται. Όσον αφορά το κόστος, το λειτουργικό κόστος (OPEX) ήταν περίπου 6 εκατομμύρια €/έτος και το επενδυτικό κόστος (CAPEX) 20–25 εκατομμύρια €.

5.1.3 Συστημικές κυκλικές λύσεις διαχείρισης αποβλήτων


Η παγκόσμια παραγωγή αποβλήτων έφτασε τα 2,2 δισεκατομμύρια τόνους το 2020 και προβλέπεται να αυξηθεί σε 3,88 δισεκατομμύρια τόνους έως το 2050, με το 70% των αστικών στερεών αποβλήτων να καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής, μόνο το 19% να ανακυκλώνεται και το 11% να αξιοποιείται ενεργειακά (World Bank, 2022). Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ανακυκλώνεται μόνο το 38% των αποβλήτων (European Commision, 2024). Η τεράστια συσσώρευση αποβλήτων και αστικών λυμάτων, προερχόμενα από οικιακές και αστικές κυρίως δραστηριότητες, προκαλεί σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, τη δημόσια υγεία και την οικονομία. Υπάρχουν ποικίλες ευκαιρίες και δυνατότητες βελτίωσης των υπαρχουσών και εύρεσης νέων, καινοτόμων τεχνολογιών επεξεργασίας, συλλογής και αξιοποίησης αποβλήτων, όπως η πυρόλυση, που μπορούν να μειώσουν την περιβαλλοντική ρύπανση, τους παθογόνους μικροοργανισμούς και την διαρκή ανάγκη για πρώτες ύλες.

5.1.3.1. Συλλογή και Ανακύκλωση Πανών για την Παραγωγή Υλικών Δόμησης και Πολυεστερικών Προϊόντων

Η αυξανόμενη χρήση πανών δημιουργεί σημαντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις, καθώς αποτελούν μη βιοδιασπώμενα απόβλητα που καταλήγουν ανεκμετάλλευτα σε χωματερές. Τα Απορροφητικά Προϊόντα Υγιεινής (ΑΠΥ) αποτελούν περίπου το 3-4% των συνολικών αστικών αποβλήτων και μέχρι σήμερα έχουν εφαρμοστεί ελάχιστες αντίστοιχες πρακτικές ανακύκλωσης. Τα ΑΠΥ αποτελούνται κυρίως από πλαστικό, κυτταρίνη, υπεραπορροφητικά πολυμερή και μη υφαντά υλικά, πολλά εκ των οποίων μπορούν να ανακτηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν. Η προτεινόμενη κυκλική διαδικασία επικεντρώνεται στην ανακύκλωση χρησιμοποιημένων πανών, με στόχο την ανάκτηση πολύτιμων υλικών όπως η κυτταρίνη, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί στην παραγωγή βιοπλαστικών υλικών δόμησης, κατάλληλων για μια ποικιλία εφαρμογών, όπως φιλμ εδαφοκάλυψης, κάδοι απορριμμάτων και άλλα βιοπλαστικά προϊόντα.

Στόχος	Η ανάπτυξη και εφαρμογή μιας καινοτόμου διαδικασίας ανακύκλωσης χρησιμοποιημένων πανών, μετατρέποντάς τους σε βιοπλαστικά δομικά υλικά, με στόχο τη μείωση των αποβλήτων, τη μείωση εκπομπών CO ₂ και την ενίσχυση της κυκλικότητας.
Παραπροϊόντα/ Πρώτες Ύλες	Χρησιμοποιημένες πάνες, Πλαστικά υλικά, Κυτταρινικές ίνες Υπεραπορροφητικά Πολυμερή
Εμπλεκόμενοι τομείς	Διαχείριση αποβλήτων, παραγωγή βιοπλαστικών, γεωργία.
Εφαρμογή	Αστική, Βιομηχανική.
Τεχνολογικές λύσεις	Τα απόβλητα αποθηκεύονται σε θάλαμο με ελεγχόμενες συνθήκες, σχεδιασμένο να περιορίζει τις οσμές. Αρχικά, τα προϊόντα αποστειρώνονται σε έναν αεροστεγή λέβητα βρασμού, ο οποίος περιστρέφεται σε θερμοκρασίες έως 140°C και πίεση μεταξύ 1 και 3,6 bar. Επιπλέον, προτείνεται επαφή με οξειδωτικό αέριο που περιέχει όζον, σε θερμοκρασίες μεταξύ 60°C και 80°C για επιπρόσθετη αποστείρωση. Στη συνέχεια, τα AHP τεμαχίζονται σε μέγεθος μικρότερο των 3 εκατοστών και αποθηκεύονται σε μονάδα ενδιάμεσης

	αποθήκευσης, η οποία επίσης εξαλείφει τυχόν κατάλοιπα. Το τεμαχισμένο υλικό διοχετεύεται σε έναν στεγνωτήρα τύπου αέρα, όπου οι πάνες θερμαίνονται με τη χρήση θερμού αέρα που παράγεται από μικροκύματα και έναν εναλλάκτη θερμότητας. Οι αποξηραμένες πάνες εισάγονται σε μηχανικούς διαχωριστές, που διαχωρίζουν: 1) την κυτταρίνη από το πλαστικό, 2) την κυτταρίνη από τα υπεραπορροφητικά πολυμερή. Η κυτταρίνη που ανακτάται από τα ΑΠΥ μετατρέπεται σε σάκχαρα μέσω υδρόλυσης. Τα σάκχαρα αυτά υφίστανται ζύμωση με σκοπό την παραγωγή δομικών στοιχείων για τη σύνθεση βιοπλαστικών. Τα δομικά αυτά στοιχεία και τα πολυμερή αξιοποιούνται στην παραγωγή άλλων βιολογικής βάσης πολυεστερικών προϊόντων, όπως φιλμ για συσκευασίες μη διατροφικών προϊόντων, χαρτί υψηλής ποιότητας, κ.ά. Τα υπεραπορροφητικά πολυμερή μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για την παραγωγή νέων απορροφητικών προϊόντων ή να αξιοποιηθούν στη γεωργία.		
TRL	6-8		
Κύρια αποτελέσματα	<ul style="list-style-type: none">Περιβαλλοντικά φιλική λύση, καθώς αποτρέπεται η απόρριψη απορριμμάτων πάνας σε χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών CO₂.Ανακτάται άνω του 95% των υπολειμματικών οργανικών ενώσεων. Η κυτταρίνη αντιπροσωπεύει το 50% των ανακτηθέντων υλικών, ενώ το πλαστικό και το υπεραπορροφητικά πολυμερή αντιστοιχούν από 25% έκαστο. Οι ανακτώμενες φάσεις κυτταρίνης και πλαστικού παρουσιάζουν υψηλό βαθμό καθαρότητας.Σημαντική μείωση σε δύο περιβαλλοντικές κατηγορίες επιπτώσεων: κατά 84% στο Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη (Global Warming Potential) και κατά 41% στη μείωση μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων.Το σύστημα παρουσιάζει αυξημένη βιωσιμότητα, χαμηλό κόστος, δυνατότητα εμπορικής αξιοποίησης και ποιοτικά τελικά προϊόντα. Τα συνολικά οφέλη είναι ακόμη μεγαλύτερα, εφόσον ληφθεί υπόψη η οικονομική εξισορρόπηση μεταξύ κόστους παραγωγής και εσόδων. Η εμπορική διάθεση των παραγόμενων προϊόντων σε συνεργασία με άλλες επιχειρήσεις μπορεί να αυξήσει την κερδοφορία. Δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας και διασφαλίζεται κοινωνική αποδοχή της λύσης.		
Προκλήσεις / Εμπόδια	Ενημέρωση των πολιτών για τη σωστή απόρριψη των προϊόντων. Νομικά εμπόδια σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση των υλικών. Απρόβλεπτοι παράγοντες, όπως πανδημίες, που επηρεάζουν τη συλλογή απορριμμάτων.		
Κριτήρια Αξιολόγησης			
Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα	Οικονομική Αποδοτικότητα	Κυκλικότητα	
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	
Τεχνολογική Ωριμότητα	Κοινωνική Επιρροή	Επίπεδο συνεργασίας	
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	

<p>Σχηματική Αναπαράσταση</p>	
<p>Αναφορές</p>	<p>Vaccaro et al., 2023, Somma et al., 2018, D' Alessio et al., 2020, Laborda et al., 2023, https://cordis.europa.eu/project/id/745746/results</p>

Πιλοτική Εφαρμογή: Ανακύκλωση Πάνων σε 12 Δήμους της Περιφέρειας Τρεβίζο, Ιταλία

Η συλλογή διενεργήθηκε από φορείς διαχείρισης αποβλήτων, είτε από κατοικίες είτε από ιδρύματα (π.χ. νοσοκομεία), μέσω συλλογής από πόρτα σε πόρτα ή με χρήση κάδων δρόμου/έξυπνων κάδων, με ενσωματωμένο σύστημα επιβράβευσης για τους χρήστες. Το σύστημα αυτό λειτουργούσε μέσω ειδικής εφαρμογής, η οποία συνδεόταν με τους έξυπνους κάδους. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με το έργο του ευρωπαϊκού προγράμματος Horizon 2020, EMBRACED, και άλλους φορείς (Fater, Novamont, Contarina).

Πάνω από 6 τόνους αποβλήτων την εβδομάδα συλλέγονται μέσω των έξυπνων κάδων. Η μονάδα έχει ως στόχο την επεξεργασία 10.000 τόνων/έτος αποβλήτων ΑΠΥ. Τα απόβλητα ΑΠΥ πρέπει να είναι συσκευασμένα σε διαφανείς, χρωματιστές σακούλες, να μην περιέχουν επικίνδυνα υλικά και να έχουν μέγιστη περιεκτικότητα σε προσμίξεις έως 2% κατά βάρος. Η ανακτώμενη κυτταρίνη και το πλαστικό παρουσιάζουν καθαρότητα άνω του 99%. Η μετατροπή της κυτταρίνης των ΑΗΡ αποβλήτων σε βιολογικά δομικά συστατικά κρίθηκε επιτυχής τόσο ως προς την ποιότητα, όσο και στην αποδοτικότητα των βιοπολυμερών.

Υπολογίζεται ότι εξοικονομήθηκε πάνω από 270 kg ισοδυνάμου CO₂ (kgCO_{2eq}). Οι εκπομπές CO_{2eq} ανέρχονται σε 66 kg ανά τόνο αποβλήτων ΑΠΥ. Η εφαρμογή του τελικού προϊόντος επιτεύχθηκε επιτυχώς: παρήχθη φιλμ κάλυψης εδάφους από τα παραγόμενα βιοπολυμερή, το οποίο δοκιμάστηκε σε διάφορα είδη καλλιέργειας φρούτων και λαχανικών. Τα αποτελέσματα έδειξαν καλή ανθεκτικότητα και συμμόρφωση με τις καθορισμένες προδιαγραφές. Άλλα τελικά προϊόντα περιλαμβάνουν: ιατρικά εργαλεία από βιοπολυμερή, απορροφητικά υποστρώματα από υπεραπορροφητικά πολυμερή, πλαστικούς κάδους και δοσομετρητές απορρυπαντικών από ανακυκλωμένα πλαστικά, κ.ά.

5.1.3.2. Παραγωγή Βιοαερίου από αστικά λύματα και λάσπη αποχέτευσης

Η παραγωγή βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης αστικών λυμάτων και λάσπης αποχέτευσης αποτελεί μια βιώσιμη τεχνολογική λύση για τη διαχείριση αποβλήτων, τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων και την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Η αναερόβια χώνευση μετατρέπει την οργανική ύλη σε βιοαέριο, κυρίως μεθάνιο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, συμβάλλοντας στην ενεργειακή αυτάρκεια των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων.

Η λύση περιλαμβάνει μια διαδικασία θερμικής υδρόλυσης εντός ενός συστήματος χώνευσης δύο σταδίων για την παραγωγή βιοαερίου. Η παραγόμενη ενέργεια, με τη μορφή βιοαερίου και θερμότητας, επαναχρησιμοποιείται από την ίδια την εγκατάσταση.

Στόχος	Η μέγιστη ανάκτηση ενέργειας από υγρά απόβλητα / ιλύς αποχέτευσης, η μείωση αποβλήτων και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, και η παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι το βιοαέριο.
Παραπροϊόντα/ Πρώτες Ύλες	Αστικά υγρά απόβλητα, λάσπη.
Εμπλεκόμενοι τομείς	Χημική βιομηχανία, εταιρείες ενέργειας, πάροχοι τεχνολογίας, εγκαταστάσεις ανακύκλωσης, ερευνητικά ιδρύματα, δημόσιες αρχές – φορείς διακυβέρνησης, εταίροι στον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας και των μεταφορών, ρυθμιστικές και πολιτικές αρχές.
Εφαρμογή	Αστική, Βιομηχανική.
Τεχνολογικές λύσεις	Η λάσπη που προκύπτει από την επεξεργασία των λυμάτων μεταφέρεται σε ένα σύστημα δύο σταδίων αναερόβιας χώνευσης για τη μείωση της ξηρής ουσίας και την παραγωγή βιοαερίου. Η πρώτη φάση χώνευσης πραγματοποιείται στους 38°C και ακολουθείται Θερμική Υδρόλυση υπό Πίεση (ΘΥΠ) στους 140–180°C με πίεση 5–8 bar για την προ-επεξεργασία της λάσπης. Αυτό συμβαίνει με στόχο τη διάσπαση των οργανικών υλικών και τη βελτίωση της αποδοτικότητας της αναερόβιας χώνευσης. Έπειτα, ακολουθεί το δεύτερο στάδιο χώνευσης (38–53°C), βελτιστοποιώντας τη διαδικασία αναερόβιας χώνευσης για την παραγωγή βιοαερίου. Όλο το παραγόμενο βιοαέριο χρησιμοποιείται για παραγωγή ενέργειας σε μονάδα Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ).
TRL	9
Κύρια αποτελέσματα	<ul style="list-style-type: none"> • Για τη διαδικασία ΘΥΠ απαιτείται βελτιστοποίηση της πίεσης, της θερμοκρασίας και του χρόνου παραμονής. Υψηλό ποσοστό παραγωγής CH₄, ενισχυμένο από την εφαρμογή της ΘΥΠ. Η ΘΥΠ βελτιώνει την απόδοση CH₄ έως και 25% στο δεύτερο στάδιο χώνευσης, καθώς και την ανάκτηση αμμωνίου και φωσφόρου. Επίσης, ενισχύει την αφυδάτωση της ιλύος. Παρατηρείται αύξηση της παραγωγής βιοαερίου έως και 20% λόγω βελτιωμένης διαλυτότητας της ιλύος. • Η απελευθέρωση της διαλυμένης οργανικής ύλης ενισχύει την απόδοση της αναερόβιας χώνευσης και της παραγωγής βιοαερίου. • Μείωση έως και 80% στη ζήτηση εξωτερικής θερμότητας για τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Η αυξημένη θερμοκρασία (από 38°C σε 55°C) στον χωνευτή λόγω της υψηλότερης παραγωγής μεθανίου καθιστά τη μέθοδο αποδοτική. • Υψηλότερη βιο-αποδομησιμότητα επιτυγχάνεται με τη μειωμένη ροή της αφυδατωμένης χωνεμένης λάσπης, μειώνοντας το κόστος διάθεσης. Η εξωτερική θερμότητα μειώνεται έως και 85%. Παρατηρείται αύξηση 10% στην αποδοτικότητα αφυδάτωσης της λάσπης, μειώνοντας το κόστος διάθεσης. • Υψηλό κόστος συντήρησης λόγω της λειτουργίας της ΘΥΠ. Λογικό επενδυτικό κόστος (CAPEX) για μικρές ή μεσαίες μονάδες. • Η ευαισθησία στη θερμοκρασία επηρεάζει την απόδοση. Υπάρχει κίνδυνος διαρροής μεθανίου και απαιτούνται αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας. Οι εποχιακές διακυμάνσεις της ζήτησης θερμότητας αποτελούν επιπλέον πρόκληση.
Προκλήσεις / Εμπόδια	Ενημέρωση των πολιτών για τη σωστή απόρριψη των προϊόντων. Ρυθμιστικά εμπόδια σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση των υλικών. Απρόβλεπτοι

	παράγοντες όπως πανδημίες που επηρεάζουν τη συλλογή απορριμμάτων.		
Κριτήρια Αξιολόγησης			
Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα	Οικονομική Αποδοτικότητα	Κυκλικότητα	
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	
Τεχνολογική Ωριμότητα	Κοινωνική Επιρροή	Επίπεδο συνεργασίας	
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	
Σχηματική Αναπαράσταση	<div><div>Επεξεργασμένη Λάσπη και αστικά λύματα</div><div>→</div><div>1^ο στάδιο αναερόβιας χώνευσης στους 38°C</div><div>→</div><div>Θερμική Υδρόλυση στους 140-180°C υπό πίεση 5-8 bar</div><div>→</div><div>2^ο στάδιο αναερόβιας χώνευσης στους 38-53°C</div><div>→</div><div>Μονάδα Συμπαράγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας</div><div>→</div><div>Βιοαέριο</div></div>		
Αναφορές	Frijns, 2023; Jaunet et al., 2021; Kim et al., 2022; Kleyböcker et al., 2020; Remy et al., 2022; Smith et al., 2021, nextgenwater Braunschweig , D7.6, D1.1, D2.1, D4.2, D5.2, D7.6		

Πιλοτική Εφαρμογή: Διαχείριση αστικών λυμάτων στη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων του Braunschweig

Η περίπτωση της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων του Braunschweig, σε συνεργασία με το έργο του ευρωπαϊκού προγράμματος Horizon 2020, NextGen, επιδεικνύει ένα σύστημα δύο σταδίων αναερόβιας χώνευσης με Θερμική Υδρόλυση υπό Πίεση (ΘΥΠ) μεταξύ των σταδίων, αξιοποιώντας πλήρως το παραγόμενο βιοαέριο. Για τη διάσπαση των οργανικών ενώσεων, η λάσπη θερμαίνεται στους 60–180°C. Η διαδικασία ΘΥΠ χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της αφυδάτωσης (βελτίωση κατά 10%) και της διαλυτότητας της λάσπης, την αύξηση της απόδοσης σε βιοαέριο και τη μείωση του ιξώδους. Η περίσσεια ή αναμειγμένη λάσπη αφυδατώνεται για εξοικονόμηση ενέργειας και αύξηση της διαθεσιμότητας του υποβάθρου για την αναερόβια βιο-αποδόμηση. Η παραγωγή μεθανίου μέσω ΘΥΠ φτάνει κατά μέσο όρο τα 300 m³/h (μέγιστο 330 m³/h). Η παραγωγή βιοαερίου ενισχύεται λόγω της ΘΥΠ και η παραγωγή CH₄ αυξάνεται κατά 1,2 φορές. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε κατά 8%, ενώ η εξωτερική παροχή θερμότητας μειώθηκε κατά 84%. Τα κύρια αποτελέσματα έχουν επίσης αναφερθεί στην πλατφόρμα [Water Europe Marketplace](#).












5.1.4 Συστημικές κυκλικές λύσεις οχημάτων

Η υιοθέτηση της κυκλικής οικονομίας στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των οχημάτων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Ο τομέας των οδικών μεταφορών είναι υπεύθυνος για περίπου το 21% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2022 και παραμένει σε μεγάλο βαθμό εξαρτημένος από ορυκτά καύσιμα (European Environment Agency, 2024) Στρατηγικές όπως η επαναχρησιμοποίηση, η ανακατασκευή και η ανακύκλωση εξαρτημάτων, καθώς και η χρήση ανακυκλώσιμων και βιολογικών υλικών, συμβάλλουν στη μείωση της κατανάλωσης πρώτων υλών και της παραγωγής αποβλήτων.

5.1.4.1. Λεωφορεία με κυψέλες υδρογόνου

Η συστημική κυκλική λύση για λεωφορεία κυψελών καυσίμου επικεντρώνεται στη χρήση οχημάτων που βασίζονται στο υδρογόνο. Η διαδικασία περιλαμβάνει ηλεκτρόλυση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ακολουθούμενη από συμπίεση και αποθήκευση του υδρογόνου, διανομή σε σταθμούς ανεφοδιασμού και τελική χρήση στα λεωφορεία κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Εξασφαλίζεται μετακίνηση χωρίς ρύπους και χωρίς θόρυβο, με ανάκτηση θερμότητας και παραγωγή νερού ως παραπροϊόν. Η κυκλική λύση ενσωματώνει την παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές, αξιοποιώντας τη θερμότητα αποβλήτων των κυψελών καυσίμου από τα αστικά ενεργειακά συστήματα.

Στόχος	Να καταστεί δυνατή η ανεξαρτητοποίηση των δημόσιων μεταφορών από τις συμβατικές μορφές καυσίμου μέσω του υδρογόνου και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
Παραπροϊόντα/ Πρώτες Ύλες	Νερό, ανανεώσιμη ενέργεια.
Εμπλεκόμενοι τομείς	Εταιρείες Ενέργειας, Αυτοκινητοβιομηχανία, Βιομηχανία Παραγωγής, Πάροχοι Τεχνολογίας, Χημική Βιομηχανία, Εγκαταστάσεις Ανακύκλωσης, Συνεργάτες Εφοδιαστικής Αλυσίδας, Ερευνητικά Κέντρα, Δημόσιες Αρχές – Διακυβέρνηση, Πολιτικές και Κανονιστικές Οντότητες, Πολίτες.
Εφαρμογή	Αγροτική, Αστική, Βιομηχανική.
Τεχνολογικές λύσεις	Το νερό υποβάλλεται σε ηλεκτρόλυση με χρήση ανανεώσιμης ενέργειας, παράγοντας υδρογόνο και οξυγόνο. Το υδρογόνο συμπίεζεται σε πιέσεις 350–700 bar για αποθήκευση. Διανέμεται μέσω αγωγών ή φορτηγών και παραδίδεται σε σταθμούς ανεφοδιασμού. Ηλεκτρισμός χρησιμοποιείται για την πρόψυξη του υδρογόνου και την έγχυσή του στα λεωφορεία. Οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM (Proton Exchange Membrane) μετατρέπουν το υδρογόνο και το οξυγόνο σε ηλεκτρική ενέργεια, με ατμό νερού και θερμότητα ως παραγόμενα υποπροϊόντα. Η περίσσεια ενέργεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας την κατανάλωση υδρογόνου. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις κυψέλες καυσίμου τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα, δημιουργώντας κίνηση μηδενικών εκπομπών. Η απορριπτόμενη θερμότητα από τις κυψέλες καυσίμου ανακτάται και επαναχρησιμοποιείται για τη θέρμανση της καμπίνας.
TRL	7-8
Κύρια αποτελέσματα	<ul style="list-style-type: none">• Η ηλεκτρόλυση απαιτεί 9 λίτρα νερού για την παραγωγή 1 κιλού υδρογόνου. Το κόστος εξαρτάται από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας.• 100% μηδενικές εκπομπές (συμπεριλαμβανομένων NO, CO₂, NO_x). Δεν υπάρχει εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα. Σημαντική βελτίωση της ποιότητας του αέρα και μείωση του θορύβου.• Η απόδοση της ηλεκτρόλυσης είναι περίπου 55%. Κατανάλωση 6,3–9 kg/100 km, αντιστοιχεί σε 30 L/100 km. Αυτονομία λεωφορείου 400–700 km ανά ανεφοδιασμό.

	<ul style="list-style-type: none">• Η επένδυση κοστίζει έως 650.000€ ανά λεωφορείο (χωρίς έξτρα εξοπλισμό) ή 1.000.000 € για αρθρωτά λεωφορεία. Χρόνος ζωής περίπου 12 ετών. Μακροχρόνια εξοικονόμηση λειτουργικών εξόδων. Κόστος υδρογόνου <9€/kg. Καθαρότητα υδρογόνου κοντά στο 100%.• Ο χρόνος ανεφοδιασμού είναι αντίστοιχος με τα λεωφορεία diesel και ταχύτερος από τα ηλεκτρικά. Μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και λιγότερο βάρος σε σχέση με τις μπαταρίες (0,2–0,35 kWh/kg).• Υψηλά επίπεδα ικανοποίησης από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς.	
Προκλήσεις / Εμπόδια	Απαιτείται εκπαίδευση οδηγών, τεχνικών συντήρησης, προσωπικού ανεφοδιασμού.	
Κριτήρια Αξιολόγησης		
Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα	Οικονομική Αποδοτικότητα	Κυκλικότητα
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>
Τεχνολογική Ωριμότητα	Κοινωνική Επιρροή	Επίπεδο συνεργασίας
<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div><div></div><div></div></div>
Σχηματική Αναπαράσταση	<div><div><div><div>Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας</div><div></div><div>Ηλεκτρόλυση</div><div>Οξυγόνο</div></div><div><div></div><div>Αέριο Υδρογόνο</div></div><div><div></div><div>Συμπιέση και διανομή</div></div><div><div></div><div>Πρόψυξη</div></div><div><div></div><div>Καύσιμο διανέμεται στα λεωφορεία</div></div><div><div></div><div>Κίνηση λεωφορείων με μηδενικές εκπομπές</div></div><div><div></div><div>Ηλεκτρισμός</div></div><div><div></div><div>Κυψέλες καυσίμου</div></div><div><div></div><div>Παραγόμενος υδρατμός</div></div><div><div></div><div>Απορριπτόμενη θερμότητα</div></div><div><div></div><div>Θέρμανση καμπίνας</div></div></div></div>	
Αναφορές	D4.12, D3.36, D2.2, D4.3, JIVE project, D3.1 JIVE & MEHRLIN project, JIVE JIVE2 ERM presentation, 2024, Stolzenburg et al. 2020, Michael Dolman & Gianluca Galeazzi, 2024.	

Πιλοτική Εφαρμογή: Ηνωμένο Βασίλειο (Aberdeen, Birmingham, London, Crawley)

Η Βρετανία επένδυσε σε 85 λεωφορεία κυψελών καυσίμου υδρογόνου και παρήγγειλε ακόμη 34 με στόχο τον πλήρη στόλο μηδενικών εκπομπών, με τη βοήθεια των ευρωπαϊκών έργων του Horizon 2020, JIVE και JIVE2. Η κατανάλωση κυμάνθηκε μεταξύ 5,5–9 kgH₂/100km, με βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με προηγούμενες γενιές, και πέτυχε τα μίλια των προδιαγραφών. Τα λεωφορεία παρουσίασαν ελάχιστες μεταβολές στην απόδοση σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Τα πρώτα δίδωροφα λεωφορεία κυψελών καυσίμου κατασκευάστηκαν και λειτούργησαν επιτυχώς. Τα λεωφορεία κυψελών υδρογόνου παρουσιάζουν λειτουργική ευελιξία, ενώ ο ανεφοδιασμός ήταν επαρκής και γρήγορος (περίπου 5 λεπτά). Η ανταλλαγή δεδομένων και γνώσης συνέβαλε σημαντικά στην ενίσχυση της τεχνογνωσίας στον τομέα του υδρογόνου. Οι διαχειριστές λεωφορείων δείχνουν έντονο ενδιαφέρον για αυτή την τεχνολογία και συμφωνούν στην επέκταση του στόλου λεωφορείων κυψελών καυσίμου τα επόμενα χρόνια. Συνολικά, η εφαρμογή των

λεωφορείων κυψελών καυσίμου στο Ηνωμένο Βασίλειο υπήρξε επιτυχής, προσελκύοντας πολλούς διεθνείς επισκέπτες με σκοπό την εκμάθηση των τεχνολογιών υδρογόνου, αποδεικνύοντας έτσι ότι κυβερνήσεις, οι τεχνολογικοί φορείς και οι διαχειριστές είναι πρόθυμοι να επενδύσουν σε αυτή την προσπάθεια ανεξαρτητοποίησης από τις συμβατικές μορφές καυσίμου.

5.4.1.2. Μετασχηματισμός οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους σε υλικά, μπαταρίες, εξαρτήματα και ανταλλακτικά υψηλής αξίας

Η ανακύκλωση των αυτοκινήτων ξεκινά όταν τα οχήματα φτάνουν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Αυτά αποσυναρμολογούνται για την απομάκρυνση επικίνδυνων υλικών, όπως τα λάδια, τα ψυκτικά υγρά και οι μπαταρίες. Από τα οχήματα γίνεται να ανακτηθούν επαναχρησιμοποιήσιμα εξαρτήματα, έτσι ώστε να επεκταθεί ο κύκλος ζωής τους και να παραχθεί οικονομική αξία. Μετά την αποσυναρμολόγηση, το υπόλοιπο τμήμα υποβάλλεται σε τεμαχισμό, όπου το διασπά σε μικρότερα θραύσματα επιτρέποντας τον διαχωρισμό μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών. Προηγμένες τεχνολογίες μετα-τεμαχισμού χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των υπολειμμάτων τεμαχισμού, αξιοποιώντας μεθόδους όπως ο διαχωρισμός κατά πυκνότητα, ο αεροδιαχωρισμός και το κοσκίνισμα για την ανάκτηση δευτερογενών πρώτων υλών (πλαστικά, καουτσούκ, μέταλλα, γυαλί και ίνες). Τα επεξεργασμένα υπολείμματα επανεισάγονται στους βιομηχανικούς κύκλους παραγωγής.

Στόχος	Ανακύκλωση οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους με ανάκτηση υλικών υψηλής αξίας, μπαταριών, εξαρτημάτων, ανταλλακτικών και ενέργειας.
Παραπροϊόντα/ Πρώτες Ύλες	Οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους (ΟΚΖ).
Εμπλεκόμενοι τομείς	Αυτοκινητοβιομηχανία, μεταλλευτική βιομηχανία, πάροχοι τεχνολογίας, εγκαταστάσεις ανακύκλωσης, ερευνητικά κέντρα, πολίτες, εταίροι εφοδιαστικής αλυσίδας και μεταφορών, θεσμικοί φορείς και ρυθμιστικές αρχές.
Εφαρμογή	Αστική, Αγροτική, Βιομηχανική.
Τεχνολογικές Λύσεις	<p>Αποσυναρμολόγηση: Τα ΟΚΖ αποσυναρμολογούνται για την ανάκτηση μπαταριών, υγρών (λάδια, ψυκτικά, καύσιμα), ελαστικών και επαναχρησιμοποιήσιμων ανταλλακτικών. Χειροκίνητη αποσυναρμολόγηση: Εργαζόμενοι αφαιρούν επικίνδυνα υλικά (μπαταρίες, λάδια) και διασώζουν επαναχρησιμοποιήσιμα εξαρτήματα. Ημι-αυτόματα συστήματα: Μηχανήματα αφαιρούν με ασφάλεια αερόσακους και ηλεκτρονικά μέρη. Επικίνδυνα υλικά συλλέγονται με ασφάλεια για απόρριψη ή ανακύκλωση. Ανακτώνται εξαρτήματα (κινητήρες, ηλεκτρονικά, ελαστικά) για μεταπώληση ή ανακατασκευή.</p> <p>Τεμαχισμός: Τα αποσυναρμολογημένα αμαξώματα τεμαχίζονται μηχανικά σε μικρά τεμάχια (10–15 εκ.). Τα τεμαχισμένα ελαστικά, πλαστικά και οι ίνες προωθούνται στο επόμενο στάδιο. Οι μεταλλικοί διαχωριστές εξάγουν τα σιδηρούχα μέταλλα. Οι διαχωριστές μετάλλων αφαιρούν τα μη σιδηρούχα μέταλλα. Τα μέταλλα κατευθύνονται σε ροές ανακύκλωσης μετάλλων. Τα τεμαχισμένα υπολείμματα (πλαστικά, καουτσούκ, ίνες και μικρά μεταλλικά σωματίδια) προχωρούν στο επόμενο στάδιο.</p>

	<p>Τεχνολογίες μετα-τεμαχισμού: Διαχωρισμός κατά πυκνότητα, έτσι ώστε να ξεχωριστούν τα βαριά (γυαλί, πέτρες) από τα ελαφρά υλικά(πλαστικά, καουτσούκ). Η αεροταξινόμηση με χρήση ροών αέρα ταξινομεί τα υλικά, βασιζόμενη στο βάρος και την πυκνότητά τους. Οπτικές τεχνολογίες διαχωρισμού (π.χ. με αισθητήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας, φασματοσκοπία διάσπασης με επαγόμενο λέιζερ), αναγνωρίζουν και διαχωρίζουν τα πλαστικά και τις ίνες, παράγοντας ανακυκλωμένα πλαστικά υψηλής ποιότητας για τη βιομηχανική παραγωγή, υλικά από καουτσούκ, γυαλί και άλλα βαρέα υλικά.</p> <p>Χημική επεξεργασία (μπαταρίες, σπάνιες γαίες): Υδρομεταλλουργία: Διάλυση των υλικών για ανάκτηση λιθίου, κοβαλτίου, νικελίου.</p> <p>Πυρομεταλλουργία: Επεξεργασία σε υψηλή θερμοκρασία (1.200–1.600°C) για ανάκτηση μετάλλων, όπως η πλατίνα και το παλλάδιο, από καταλυτικούς μετατροπείς.</p> <p>Ανάκτηση ενέργειας: Η αποτέφρωση με χρήση ανάκτηση ενέργειας από απόβλητα καίει τα υπολείμματα τεμαχισμού των αυτοκινήτων σε υψηλές θερμοκρασίες (>850°C), παράγοντας θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια. Το ανόργανο κλάσμα των υπολειμμάτων τεμαχισμού συν-επεξεργάζεται σε κλιβάνους τσιμέντου, ως εναλλακτικό καύσιμο και ως πρώτη ύλη. Τα οργανικά κατάλοιπα καίγονται πλήρως, ενώ τα ανόργανα συστατικά ενσωματώνονται στον κλίνκερ τσιμέντου, παράγοντας τσιμέντο με ελάχιστα υπολείμματα.</p> <p>Τελική επεξεργασία των ανακτημένων υλικών: Η τήξη και η κραμάτωση των μετάλλων καθαρίζει τα μέταλλα (χάλυβας, αλουμίνιο ανακυκλωμένο από προηγούμενα στάδια). Η κοκκοποίηση πλαστικών μετατρέπει τα διαχωρισμένα πλαστικά σε κόκκους ή σφαιρίδια (pellets) προς βιομηχανική χρήση. Η επανακαουτσουκοποίηση (vulcanisation) μετατρέπει το ανακτημένο καουτσούκ σε νέα εξαρτήματα αυτοκινήτων ή προϊόντα όπως τάπητες και επιφάνειες παιδικών χαρών.</p>
TRL	9 για τις τεχνολογίες μετα-τεμαχισμού και αποσυναρμολόγησης. 6–8 για την υδρομεταλλουργία.
Κύρια Αποτελέσματα	<ul style="list-style-type: none"> Ποσοστό ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης 95% των ΟΚΖ, τηρώντας την ευρωπαϊκή νομοθεσία. Δυσκολία στον διαχωρισμό σύνθετων υλικών (π.χ. πολυστρωματικά πλαστικά). Ανάκτηση μετάλλων (χάλυβας, αλουμίνιο), πλαστικών και καουτσούκ ως ποιοτικές πρώτες ύλες. Χαμηλότερη ζήτηση για πρωτογενείς πόρους. Ελαχιστοποίηση των υπολειμμάτων τεμαχισμού μέσω προηγμένων τεχνολογιών μετα-τεμαχισμού και ανάκτησης ενέργειας. Θετική οικονομική αξία από την παραγωγή δευτερογενών υλών και την ενεργειακή ανάκτηση.
Προκλήσεις/ Εμπόδια	Τα χαμηλά τέλη εισόδου για αποτέφρωση μειώνουν την οικονομική βιωσιμότητα της ανακύκλωσης. Τα τέλη εισόδου για την επεξεργασία των υπολειμμάτων τεμαχισμού είναι συχνά χαμηλότερα του κόστους, προκαλώντας οικονομική πίεση στις μονάδες ανακύκλωσης. Υψηλή περιεκτικότητα σε χαλκό (>3%) στις ίνες δυσχεραίνει την ανακύκλωση και την ποιότητα των υλικών. Υψηλό λειτουργικό κόστος τεχνολογίας μετα-τεμαχισμού και υδρομεταλλουργίας.

Κριτήρια Αξιολόγησης		
Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα	Οικονομική Αποδοτικότητα	Κυκλικότητα
<div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div>	<div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div>	<div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div>
Τεχνολογική Ωριμότητα	Κοινωνική Επιρροή	Επίπεδο συνεργασίας
<div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div>	<div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div>	<div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> </div>
<div> <div>Σχηματική Αναπαράσταση</div> </div>		
Αναφορές	https://arn.nl/en/ , LIFE10-ENV-NL-000027	

Πιλοτική Εφαρμογή: Ανακύκλωση οχημάτων και ανταλλακτικών σε εθνικό επίπεδο – Ολλανδία

Η συστημική κυκλική λύση ανακύκλωσης αυτοκινήτων στην Ολλανδία, με επικεφαλής την ARN Recycling, επεξεργάζεται οχήματα στο τέλος της ζωής τους για την ανάκτηση μπαταριών, ελαίων, ψυκτικών υγρών, ελαστικών και επαναχρησιμοποιήσιμων ανταλλακτικών (κινητήρες, ηλεκτρονικά μέρη). Η συστημική κυκλική λύση επιτυγχάνει ποσοστό επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης 97% κατά βάρος, με 87,7% υλική ανακύκλωση και 9,3% ανάκτηση ενέργειας. Οι βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση μείωσαν την κατανάλωση από 258 kWh σε 150 kWh ανά τόνο υπολειμμάτων τεμαχισμένων αυτοκινήτων. Το κόστος μειώθηκε από 678 €/τόνο (2012) σε 224 €/τόνο (2015). Το ολοκληρωμένο δίκτυο περιλαμβάνει συλλογή από αστικές και αγροτικές περιοχές και πολλούς εταίρους στην αλυσίδα ανακύκλωσης αυτοκινήτων (Stichting Auto & Recycling, BOVAG, RAI Vereniging, Stiba).

5.2 Πολυκριτήρια Αξιολόγηση Συστημικών Κυκλικών Λύσεων

Σκοπός της πολυκριτήριας αξιολόγησης είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός εργαλείου λήψης στρατηγικών αποφάσεων, το οποίο μπορεί να βοηθήσει τους φορείς να επιλέξουν τη βέλτιστη κυκλική συστημική λύση, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές ανάγκες και τα δεδομένα στην περιοχή τους.

Η μέθοδος TOPSIS εφαρμόστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB στις οκτώ

εναλλακτικές κυκλικές συστημικές λύσεις, οι οποίες περιεγράφηκαν λεπτομερώς στο υποκεφάλαιο 5.1. Χρησιμοποιήθηκαν έξι κριτήρια για την αξιολόγησή τους, όπως έχουν οριστεί και επεξηγηθεί στο υποκεφάλαιο 4.1. Ο κώδικας της πολυκριτήριας ανάλυσης βασίζεται στη λογική που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 4.2. Προκειμένου να εξεταστεί η εφαρμογή του, επιλέχθηκαν δύο διαφορετικά υποθετικά σενάρια, ώστε να αποτυπώσουν τα χαρακτηριστικά και τις ανάγκες των τοπικών κοινωνιών με διαφορετικά οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά προφίλ. Σκοπός είναι η εύρεση της βέλτιστης λύσης για τον εκάστοτε φορέα, προκειμένου να επιλεγεί και να υιοθετηθεί η κυκλική συστημική λύση που ταιριάζει στην εκάστοτε πόλη ή και περιφέρεια.

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.2, και με τη χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου MATLAB, αναπτύχθηκε ο αντίστοιχος κώδικας πολυκριτήριας ανάλυσης TOPSIS. Η πολυκριτήρια αξιολόγηση των λύσεων με τη μέθοδο TOPSIS δίνει στον εκάστοτε φορέα την ευελιξία να προσαρμόζει τις προτιμήσεις του και να αξιολογούνται οι εναλλακτικές κυκλικές συστημικές λύσεις με βάση τα κριτήρια αξιολόγησης με τα βάρη που έχει καθορίσει. Ο καθορισμός των βαρών των κριτηρίων από τον εκάστοτε φορέα στηρίζεται στις ιδιαιτερότητες και τις ανάγκες της περιοχής που αναμένεται να εφαρμοστεί η κυκλική συστημική λύση.

Ο κώδικας εφαρμόζεται και παρουσιάζει τα δύο υποθετικά σενάρια που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Για την εφαρμογή του είναι απαραίτητο ο εκάστοτε φορέας να εισάγει το βαθμό σημαντικότητας στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, ανάλογα με τις προτεραιότητες και τις ανάγκες που έχουν τεθεί. Προσφέρεται η δυνατότητα να εισαχθεί οποιαδήποτε τιμή στο βαθμό σημαντικότητας, αφού όπως περιγράφεται και στο υποκεφάλαιο 4.2, υπάρχει κανονικοποίηση στα βάρη των κριτηρίων, με αποτέλεσμα ο φορέας να μπορεί να προσδώσει ακριβώς τις αντιλήψεις όσον αφορά τα προκαθορισμένα κριτήρια. Ο συντελεστής εγγύτητας υπολογίστηκε μέσω της εξίσωσης (17) για κάθε εναλλακτική και οι συστημικές κυκλικές λύσεις κατατάσσονται από τη περισσότερο προτιμητέα ως τη λιγότερο προτιμητέα. Συνεπώς, αναλύονται τα δύο υποθετικά σενάρια στα οποία εφαρμόστηκε η παρούσα έρευνα.

1^ο υποθετικό σενάριο: Εφαρμογή κυκλικής συστημικής λύσης σε αγροτικό Δήμο

Σε έναν ορεινό δήμο του νομού Ηρακλείου οι μόνιμοι κάτοικοι ασχολούνται κυρίως με αγροτικές και κτηνοτροφικές εργασίες, υπάρχει πλούσια χλωρίδα και πανίδα και διαθέτει σημαντικούς φυσικούς πόρους, οι οποίοι απειλούνται από τη ρύπανση. Ο δήμος παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα διαχείρισης των αγροτικών και κτηνοτροφικών αποβλήτων λόγω των ανεξέλεγκτων απορρίψεων και της έλλειψης υποδομών ανακύκλωσης και διαχείρισης λυμάτων. Υπάρχει, επίσης, ανάγκη για εξοικονόμηση ή/και επαναχρησιμοποίηση του νερού λόγω της υψηλής κατανάλωσης για άρδευση σε συνδυασμό με παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας στην περιοχή. Παράλληλα, η υπερβολική χρήση χημικών λιπασμάτων έχει υποβαθμίσει αρκετά την ποιότητα του εδάφους και το πρόβλημα απαιτεί την εύρεση μιας κατάλληλης λύσης.

Η δημοτική αρχή αναγνωρίζει ότι η βιωσιμότητα της τοπικής κοινωνίας και οικονομίας εξαρτάται από την άμεση διευθέτηση των παραπάνω ζητημάτων. Για αυτό, αποφασίζεται η επένδυση σε μια

κυκλική συστημική λύση που να ενσωματώνει τις υπάρχουσες ανάγκες και προτεραιότητες με σκοπό να προωθηθεί η κυκλικότητα και η βιώσιμη ανάπτυξη. Επιπλέον, είναι ανάγκη να μετριάσει η περιβαλλοντική ρύπανση και να αυξηθεί η επαναχρησιμοποίηση των πόρων.

Ο Δήμος αποφασίζει να δώσει μεγάλη βαρύτητα στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα, την οικονομική αποδοτικότητα της λύσης και την κοινωνική επιρροή. Το κόστος είναι σημαντικός παράγοντας και η εγκατάσταση απαιτεί περιορισμένο κόστος εγκατάστασης ή αγοράς εξοπλισμού. Η κυκλική συστημική λύση πρέπει να μειώσει αισθητά τη ρύπανση, να προστατεύσει τους φυσικούς πόρους και να στηρίξει την επαναχρησιμοποίησή τους. Η τεχνολογική ωριμότητα της λύσης θεωρείται σημαντική, αλλά δεν αποτελεί προτεραιότητα, εφόσον μπορεί να υποστηριχθεί σε πιλοτικό επίπεδο. Το επίπεδο συνεργασίας αξιολογείται θετικά, εφόσον είναι απαραίτητο να υπάρχει διαφάνεια, καλή συνεργασία και όφελος μεταξύ των φορέων. Επιπλέον, πρέπει να είναι απλή και εφαρμόσιμη από τους πολίτες και τους τοπικούς παραγωγούς, χωρίς την ανάγκη εξειδικευμένων γνώσεων, για να υπάρχει προθυμία συμμετοχής και υιοθέτησης.

Ο φορέας, σύμφωνα με τις υπάρχουσες ανάγκες και προτεραιότητες του Δήμου, χρησιμοποιεί το εργαλείο της πολυκριτήριας ανάλυσης με τη μέθοδο TOPSIS, προκειμένου να επιλέξει τη βέλτιστη κυκλική συστημική λύση για την περιοχή. Έτσι, εισάγει το βαθμό σημαντικότητας στα έξι κριτήρια που έχουν τεθεί στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, όπως φαίνεται στην Εικ. 6.

Δώσε το βαθμό σημαντικότητας για τα 6 κριτήρια: 1) Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα, 2) Οικονομική Αποδοτικότητα, 3) Κυκλικότητα, 4) Τεχνολογική Ωριμότητα, 5) Κοινωνική Επιρροή, 6) Επίπεδο Συνεργασίας (π.χ. [3 2 1 2 1 1]):
Βαθμός Σημαντικότητας: [13 10 10 3 5 6]

Εικόνα 6: Εισαγωγή βαθμού σημαντικότητας στα κριτήρια του 1^{ου} σεναρίου

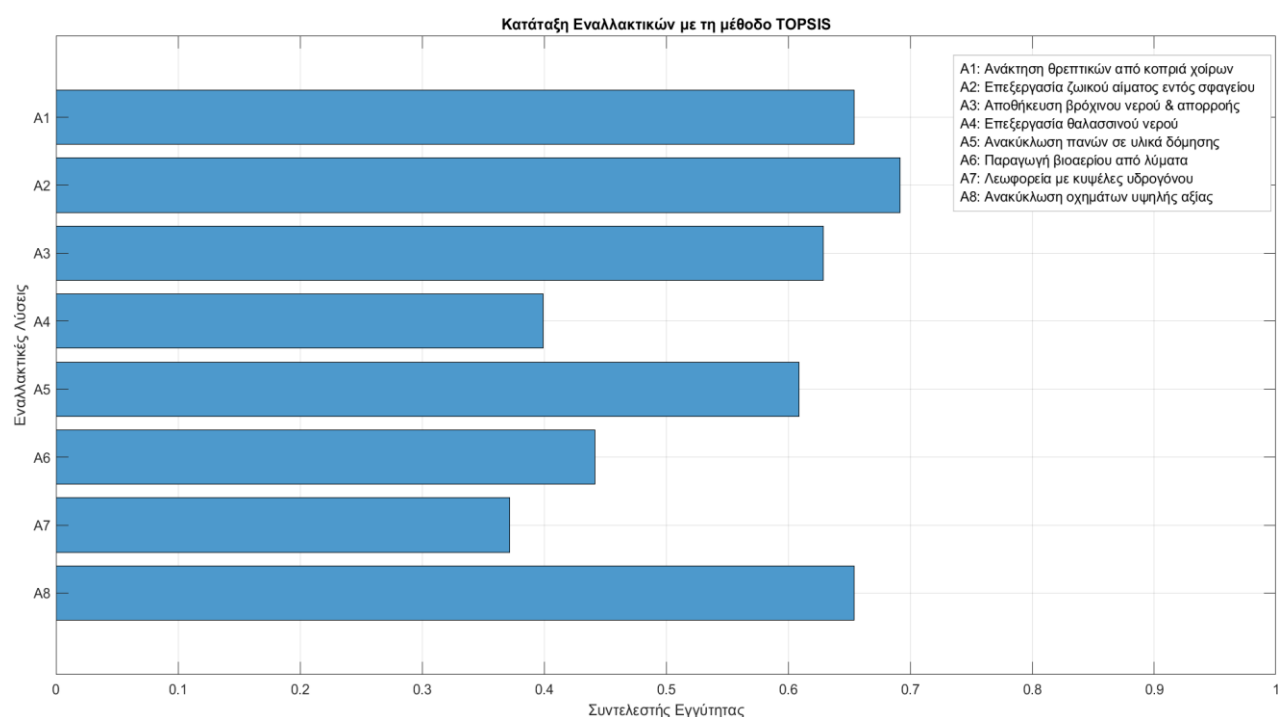
Η Εικόνα 6 εμφανίζει την ανάθεση του βαθμού σημαντικότητας από τον φορέα στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία της μεθόδου TOPSIS, υπολογίστηκε η ιδανική και η λιγότερη ιδανική λύση και πραγματοποιήθηκε κατάταξη των εναλλακτικών από την καλύτερη προς την χειρότερη, με την αντίστοιχη βαθμολογία του συντελεστή εγγύτητας που σημείωσε η κάθε εναλλακτική.

Η Εικόνα 7 παρουσιάζει τα αποτελέσματα που εμφανίζει η μέθοδος TOPSIS στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB. Η κατάταξη πραγματοποιείται κατά φθίνουσα σειρά και σε παρένθεση εμφανίζεται η βαθμολογία της εκάστοτε κυκλικής συστημικής λύσης.

--- Κατάταξη εναλλακτικών σύμφωνα με τη μέθοδο TOPSIS ---
1. Επεξεργασία ζωικού αίματος για παραγωγή λιπάσματος εντός σφαγείου (Βαθμολογία: 0.6916)
2. Ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από υπολείμματα κοπριάς χοίρων (Βαθμολογία: 0.6541)
3. Μετασχηματισμός οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους σε υλικά, μπαταρίες, εξαρτήματα και ανταλλακτικά υψηλής αξίας (Βαθμολογία: 0.6541)
4. Αποθήκευση βρόχινου νερού και επιφανειακής απορροής για οικιακή και γεωργική χρήση (Βαθμολογία: 0.6285)
5. Συλλογή και Ανακύκλωση Πανών για την Παραγωγή Υλικών Δόμησης και Πολυεστερικών Προϊόντων (Βαθμολογία: 0.6090)
6. Παραγωγή Βιοαερίου από αστικά λύματα και λάσπη αποχέτευσης (Βαθμολογία: 0.4416)
7. Επεξεργασία θαλασσινού νερού προς επαναχρησιμοποίηση στην άρδευση (Βαθμολογία: 0.3993)
8. Λεωφορεία με κυψέλες υδρογόνου (Βαθμολογία: 0.3717)

Εικόνα 7: Κατάταξη των εναλλακτικών 1^{ου} σεναρίου και η αντίστοιχη βαθμολογία τους

Τα αποτελέσματα της μεθόδου TOPSIS οπτικοποιούνται μέσω ραβδόγραμματος (Εικ. 8), στο οποίο απεικονίζονται οι κυκλικές συστημικές λύσεις με τις αντίστοιχες βαθμολογίες τους. Η γραφική απεικόνιση βοηθά στην άμεση κατανόηση της κατανομής των εναλλακτικών και στην διευκόλυνση λήψης μιας απόφασης.



Εικόνα 8: Ραβδόγραμμα κατάταξης εναλλακτικών 1^{ου} σεναρίου

Η καλύτερη κυκλική συστημική λύση που προτείνεται στο Δήμο είναι η “Επεξεργασία ζωικού αίματος για παραγωγή λιπάσματος εντός σφαγείου” με συντελεστή εγγύτητας (βαθμολογία) 0.6916 και αυτή πρόκειται να προταθεί στους φορείς του δήμου. Η κυκλική συστημική κυκλική λύση ταιριάζει με τις προτεραιότητες που έχουν τεθεί, καθώς προσφέρει γεωργικά λιπάσματα με ισορροπημένη αναλογία Αζώτου, Φωσφόρου και Καλίου, ενίσχυση της γονιμότητας του εδάφους λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του αίματος σε θρεπτικά στοιχεία (N, P) και ιχνοστοιχεία (π.χ. Fe), μείωση περιβαλλοντικού αποτυπώματος λόγω μείωσης αποβλήτων και ρύπανσης από τα σφαγεία. Η προτεινόμενη τεχνολογική λύση περιλαμβάνει συλλογή αίματος, φιλτράρισμα, μηχανική ομογενοποίηση, χημική υδρόλυση, ξήρανση και κοκκοποίηση. Αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική λύση με αποδεδειγμένη οικονομική βιωσιμότητα, ενισχύει την κυκλικότητα, μειώνει την ανάγκη για συνθετικά λιπάσματα και αξιοποιεί τα παραπροϊόντα ζωικής προέλευσης.

Η χειρότερη λύση αφορά τα “Λεωφορεία με κυψέλες υδρογόνου”, το οποίο είναι λογικό καθώς απέχει αρκετά από τους στόχους που έχουν τεθεί και τις ανάγκες τους. Οι αρμόδιοι φορείς του δήμου, στη συνέχεια, μπορούν να ανατρέξουν στην αναλυτική παρουσίαση της λύσης, όπως έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 5, να ενημερωθούν και να αποφασίσουν εάν η λύση ταιριάζει τελικά στις προτεραιότητες και τις ανάγκες τους.

Η εφαρμογή της λύσης Α2 αξιολογείται θετικά λόγω της άμεσης συνάφειας με τις τοπικές παραγωγικές δραστηριότητες, της χαμηλής απαίτησης σε εξειδικευμένη τεχνογνωσία και του γεγονότος ότι προωθεί την κυκλικότητα και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα μέσω της αξιοποίησης των υπολειμμάτων που τη δεδομένη στιγμή αντιμετωπίζονται ως πρόβλημα.

2° υποθετικό σενάριο: Οικονομικά περιορισμένος Δήμος

Ένας αστικός Δήμος στη Θεσσαλονίκη είναι πυκνοκατοικημένος με την κύρια δραστηριότητα των κατοίκων να επικεντρώνεται κυρίως στους τομείς του τουρισμού και της ελαφριάς βιομηχανίας. Ωστόσο, υπάρχουν αυξανόμενες ανάγκες για ενέργεια και νερό με την παραγωγή των στερεών αποβλήτων και αστικών λυμάτων από τον τουρισμό και τις βιομηχανικές δραστηριότητες να αυξάνεται, ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες. Η υφιστάμενη υποδομή επεξεργασίας αποβλήτων λειτουργεί σε συνεχή λειτουργία και συχνά προσεγγίζει τη μέγιστη χωρητικότητα της εγκατάστασης. Συνεπώς, δεν πραγματοποιείται πάντα σωστή διαχείριση των βιομηχανικών αποβλήτων και των αστικών λυμάτων, ενώ παρατηρείται υπερχειλίση σκουπιδιών στους δημοτικούς κάδους, με αποτέλεσμα την κοινωνική δυσaréσκεια του δήμου.

Οι τοπικοί φορείς έχουν εμπειρία στην υιοθέτηση έξυπνων τεχνολογιών, καθώς έχουν συνεργαστεί αρκετές φορές με ερευνητικά ινστιτούτα και πανεπιστήμια μέσω ευρωπαϊκών προγραμμάτων. Η κοινωνία είναι εξοικειωμένη με τις ψηφιακές και τεχνολογικές λύσεις λόγω των τεχνολογικών εφαρμογών που έχουν υλοποιηθεί στο παρελθόν. Οπότε είναι πρόθυμοι να υιοθετήσουν νέες πρακτικές που θα αποσκοπούν στη βελτίωση της ζωής τους.

Ο Δήμος αποφασίζει, σε συνεργασία με τα τοπικά Πανεπιστήμια, να προχωρήσει στην επιλογή μιας κυκλικής συστημικής λύσης με στόχο την αποδοτικότερη αξιοποίηση των πόρων και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Συγκεκριμένα, επιθυμεί να προωθήσει τρόπους μείωσης της κατανάλωση ενέργειας και νερού, ειδικά στις τουριστικές και βιομηχανικές μονάδες. Η κυκλική συστημική λύση πρέπει να εφαρμοστεί στις υφιστάμενες υποδομές. Δίνεται έμφαση στην τεχνολογική ωριμότητα, καθώς πρέπει να είναι δοκιμασμένη και αξιόπιστη, έτσι ώστε να υιοθετηθεί άμεσα και χωρίς ιδιαίτερες προκλήσεις. Ο βαθμός κυκλικότητας πρέπει να είναι υψηλός, καθώς κύριος στόχος αποτελεί η επαναχρησιμοποίηση των φυσικών πόρων και ουσιαστική και αποδοτική αξιοποίηση των παραπροϊόντων από τις βιομηχανικές και τουριστικές δραστηριότητες. Οι διαθέσιμοι πόροι είναι περιορισμένοι, οπότε η λύση πρέπει να έχει χαμηλό κόστος επένδυσης ή να αποφέρει κέρδος σε βάθος χρόνου. Η κοινωνική αποδοχή θεωρείται σημαντική για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων, αλλά η κοινωνική στήριξη και αποδοχή θεωρείται δεδομένη λόγω των προηγούμενων πετυχημένων υλοποιήσεων κυκλικών συστημικών λύσεων και της ανάγκης για εργασία από μεγάλη μερίδα της κοινωνίας. Οπότε, εξαιτίας της δεδομένης αποδοχής αποφασίζεται να δώσουν μεγαλύτερη βάση στα υπόλοιπα κριτήρια.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αποδίδεται μεγάλη βαρύτητα στην τεχνολογική ωριμότητα και την κυκλικότητα της λύσης, αφού υπάρχει ανάγκη για εξοικονόμηση πόρων, ενέργειας και μείωση της ρύπανσης, ενώ παράλληλα είναι επιθυμητή η τεχνολογική εξέλιξη. Ο φορέας εισάγει το βαθμό

σημαντικότητας στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB (Εικ. 9), σύμφωνα με τις ανάγκες και τα δεδομένα που έχουν τεθεί από το Δήμο και με βάση τα έξι κριτήρια που έχουν οριστεί.

Δώσε το βαθμό σημαντικότητας για τα 6 κριτήρια: 1) Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα, 2) Οικονομική Αποδοτικότητα, 3) Κυκλικότητα, 4) Τεχνολογική Ωριμότητα, 5) Κοινωνική Επιρροή, 6) Επίπεδο Συνεργασίας (π.χ. [3 2 1 2 1 1]):
Βαθμός Σημαντικότητας: [8 7 11 14 4 5]

Εικόνα 9: Εισαγωγή βαθμού σημαντικότητας από φορέα στο 2^ο σενάριο

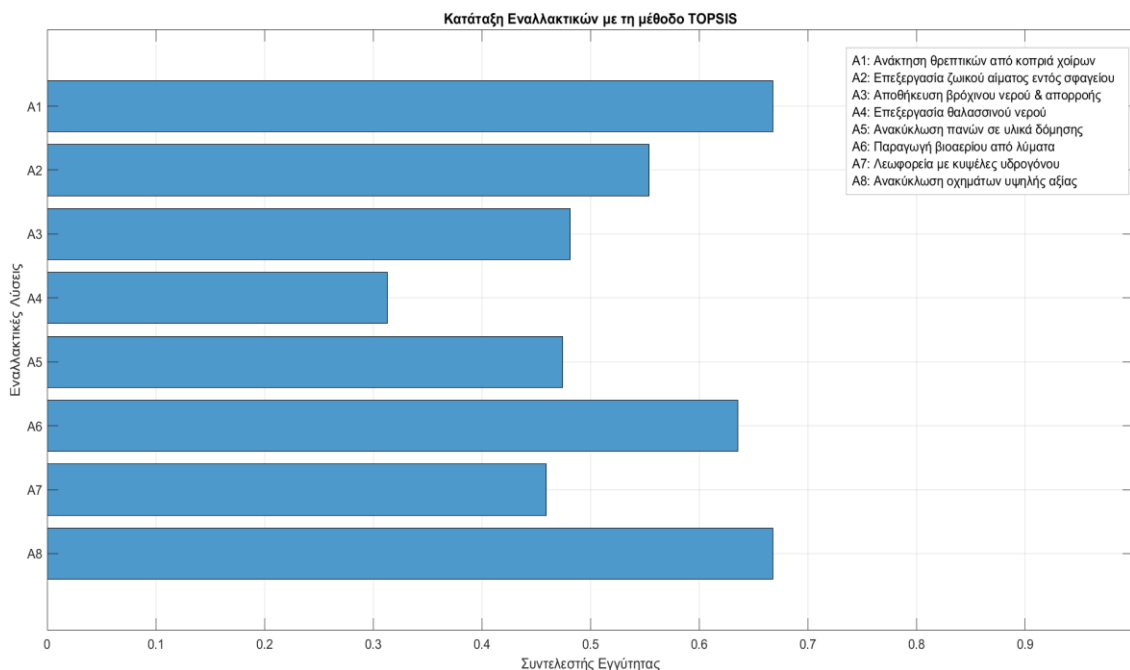
Η Εικόνα 9 εμφανίζει την ανάθεση του βαθμού σημαντικότητας από τον φορέα στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB. Ακολουθώντας εκ νέου την μεθοδολογία και εφαρμόζοντας τον κώδικα TOPSIS, η κατάταξη των εναλλακτικών κυκλικών συστημικών λύσεων με τις αντίστοιχες βαθμολογίες τους παρουσιάζονται παρακάτω (Εικ. 10).

--- Κατάταξη εναλλακτικών σύμφωνα με τη μέθοδο TOPSIS ---

1. Ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από υπολείμματα κοπριάς χοίρων (Βαθμολογία: 0.6682)
2. Μετασχηματισμός οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους σε υλικά, μπαταρίες, εξαρτήματα και ανταλλακτικά υψηλής αξίας (Βαθμολογία: 0.6682)
3. Παραγωγή Βιοαερίου από αστικά λύματα και λάσπη αποχέτευσης (Βαθμολογία: 0.6359)
4. Επεξεργασία ζωικού αίματος για παραγωγή λιπάσματος εντός σφαγείου (Βαθμολογία: 0.5539)
5. Αποθήκευση βρόχινου νερού και επιφανειακής απορροής για οικιακή και γεωργική χρήση (Βαθμολογία: 0.4813)
6. Συλλογή και Ανακύκλωση Πανών για την Παραγωγή Υλικών Δόμησης και Πολυεστερικών Προϊόντων (Βαθμολογία: 0.4745)
7. Λεωφορεία με κυψέλες υδρογόνου (Βαθμολογία: 0.4594)
8. Επεξεργασία θαλασσινού νερού προς επαναχρησιμοποίηση στην άρδευση (Βαθμολογία: 0.3133)

Εικόνα 10: Κατάταξη των εναλλακτικών του 2^{ου} σεναρίου και οι αντίστοιχες βαθμολογίες τους

Το ραβδόγραμμα (Εικ. 11) της κατάταξης των εναλλακτικών συστημικών κυκλικών λύσεων για το δεύτερο υποθετικό σενάριο εμφανίζεται παρακάτω.



Εικόνα 11: Ραβδόγραμμα των εναλλακτικών

Σύμφωνα με την ανάλυση TOPSIS, οι δύο λύσεις με την υψηλότερη τελική βαθμολογία είναι:

- 1) Ανάκτηση θρεπτικών συστατικών από υπολείμματα κοπριάς χοίρων (Βαθμολογία: 0.6682).
- 2) Μετασχηματισμός οχημάτων στο τέλος του κύκλου ζωής τους σε ανταλλακτικά υψηλής αξίας (0.6682).

Αν και τεχνικά αποδοτικές και κυκλικές, οι παραπάνω λύσεις δεν ταιριάζουν απόλυτα με το προφίλ του συγκεκριμένου δήμου, καθώς δεν υπάρχουν προβλήματα από τα υπολείμματα από τον αγροτικό τομέα, ούτε αντιμετωπίζεται μεγάλο πρόβλημα με τα οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Αντιθέτως, η τρίτη κατά σειρά λύση, δηλαδή η “Παραγωγή βιοαερίου από αστικά λύματα και λάσπη αποχέτευσης”, με βαθμολογία 0.6359, ανταποκρίνεται πολύ καλύτερα στις πραγματικές ανάγκες και ιδιαιτερότητες του Δήμου, καθώς λύνει το πρόβλημα των υφιστάμενων αποβλήτων και αστικών λυμάτων, καθώς και της ενέργειας. Αναλυτικότερα, η λύση με την εγκατάσταση ενός συστήματος δύο σταδίων αναερόβιας χώνευσης, παρουσία Θερμικής Υδρόλυσης υπό Πίεση και μια μονάδα Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας υπόσχεται τη μέγιστη ανάκτηση ενέργειας από υγρά απόβλητα / ιλύ αποχέτευσης, μείωση αποβλήτων και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, και παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι το βιοαέριο.

Παρότι δεν έχει την απόλυτη υψηλότερη βαθμολογία, η τρίτη λύση κατά σειρά λύση εμφανίζεται ως η πιο κατάλληλη και εφαρμόσιμη συστημική κυκλική λύση στο αστικό και τουριστικό περιβάλλον του Δήμου, καθώς ευθυγραμμίζεται με το προφίλ της πόλης, τις υποδομές και τις ανάγκες της. Παρότι η μέθοδος TOPSIS προσφέρει ένα σημαντικό εργαλείο ιεράρχησης λύσεων βάσει προκαθορισμένων κριτηρίων, η τελική επιλογή απαιτεί και ποιοτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε συνάρτηση με το εκάστοτε τοπικό πλαίσιο εφαρμογής.

Για λόγους σύγκρισης και σύμφωνα με τις υπάρχουσες ανάγκες και προτεραιότητες που έχουν τεθεί, θα μπορούσε να μελετηθεί και η πέμπτη κατά σειρά συστημική κυκλική λύση που αφορά την “Αποθήκευση βρόχινου νερού και επιφανειακής απορροής για οικιακή και γεωργική χρήση”, με βαθμολογία 0.4813, καθώς θα μπορούσε να στηρίξει την εξοικονόμηση νερού στις θερινές περιόδους που υπάρχει υψηλή τουριστική πίεση και αυξημένες ανάγκες για νερό.

Με την παρουσίαση των δύο σεναρίων, αποδεικνύεται η ικανότητα του εργαλείου να προσαρμόζεται σε διαφορετικές συνθήκες και να προσφέρει τις βέλτιστες κυκλικές συστημικές λύσεις στον εκάστοτε φορέα. Επιπλέον, μέσα από την κατάταξη των λύσεων και τη σύγκρισή τους, αναδεικνύεται η σημασία της ποιοτικής ερμηνείας των ποσοτικών δεδομένων και της προσαρμογής των λύσεων στο συγκεκριμένο τοπικό πλαίσιο εφαρμογής. Το εργαλείο της πολυκριτήριας ανάλυσης συμβάλλει στη βελτίωση της βιωσιμότητας, της περιβαλλοντικής αποδοτικότητας και της κυκλικότητας των συστημικών κυκλικών λύσεων που θα υλοποιηθούν από τους φορείς.

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η κυκλική οικονομία παίζει, πλέον, πρωταρχικό ρόλο στην παγκόσμια κοινότητα, καθώς η μαζική αστικοποίηση, η κλιματική αλλαγή, η συστηματική ρύπανση των υδάτων, του αέρα και του εδάφους αποτελούν μερικά από τα υπαρκτά και σημαντικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι πόλεις και οι περιφέρειες στις μέρες μας. Είναι φανερό η ανάγκη μετάβασης σε ένα πιο βιώσιμο μοντέλο διαβίωσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν και αναλύθηκαν οκτώ συστημικές κυκλικές λύσεις, οι οποίες αφορούσαν στον κτηνοτροφικό τομέα, στον τομέα μπαταριών και οχημάτων, στον τομέα διαχείρισης αποβλήτων και στον τομέα υδάτινων πόρων. Αυτές οι κυκλικές συστημικές λύσεις είναι ήδη εφαρμοσμένες σε πόλεις και περιφέρειες σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία. Προκειμένου να δοθεί μία ολιστική περιγραφή της κάθε κυκλικής συστημικής λύσης, περιγράφονται οι στόχοι, τα χρησιμοποιούμενα παραπροϊόντα, οι εμπλεκόμενοι τομείς στη λύση αυτή, οι απαραίτητες τεχνολογικές λύσεις, οι προκλήσεις και τα εμπόδια που εντοπίστηκαν καθώς και τα κυριότερα αποτελέσματα.

Οι εναλλακτικές συστημικές κυκλικές λύσεις αξιολογήθηκαν βάσει έξι διαφορετικών κριτηρίων: την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, οικονομική αποδοτικότητα, κυκλικότητα, τεχνολογική ωριμότητα, κοινωνική αποδοχή και το επίπεδο συνεργασίας. Κρίνεται σκόπιμη η εξέταση και αξιολόγηση της κάθε κυκλικής συστημικής λύσης από την πλευρά του περιβάλλοντος, της οικονομίας, της κυκλικότητας, της κοινωνίας καθώς και της συνεργατικότητας μεταξύ των διάφορων τομέων που ενδέχεται να συμμετάσχουν στην υλοποίηση της κάθε λύσης. Για αυτό απαιτείται η εξέταση πολλαπλών παραμέτρων.

Η δημιουργία υποθετικών σεναρίων αποσκοπεί στην αξιολόγηση των εναλλακτικών κυκλικών συστημικών λύσεων μέσω της εφαρμογής της πολυκριτήριας ανάλυσης και αξιολόγησης με τη μέθοδο TOPSIS στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB. Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας ανέδειξαν τη σημασία της ενσωμάτωσης της κυκλικής οικονομίας στον αστικό και περιφερειακό σχεδιασμό. Παρουσιάστηκαν δυο αναλυτικά σενάρια πιθανών περιπτώσεων αναζήτησης κυκλικών συστημικών λύσεων, από τα οποία παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος TOPSIS βοηθά στην επισήμανση της πιο κατάλληλης κυκλικής συστημικής λύσης, ωστόσο χρειάζεται κριτική σκέψη, σύμφωνα με τις ανάγκες και τις προτεραιότητες που έχουν τεθεί, για την τελική προτεινόμενη λύση στους ενδιαφερόμενους φορείς. Από την πολυκριτήρια αξιολόγηση γίνεται αντιληπτή η συνεισφορά του εργαλείου αυτού στη διαδικασία λήψης στρατηγικών αποφάσεων, καθώς οι εξεταζόμενες κυκλικές συστημικές λύσεις κατατάσσονται με φθίνουσα σειρά προτίμησης, έχοντας ορίσει τις προτιμήσεις και τις προτεραιότητες των φορέων. Επιβεβαιώνεται, επίσης, η χρησιμότητα της πολυκριτηριακής ανάλυσης για τη λήψη αποφάσεων σε συνθήκες πολυπλοκότητας.

Οι πολιτικές προώθησης της κυκλικής οικονομίας θα πρέπει να βασίζονται σε τεκμηριωμένα δεδομένα, να λαμβάνουν υπόψη τις απόψεις των εμπλεκόμενων φορέων και να υιοθετούν εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων.

Τέλος, ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου, το

οποίο διευκολύνει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων από ενδιαφερόμενους φορείς στον κλάδο των κυκλικών συστημικών λύσεων. Η διαδικασία ανάθεσης και προσαρμογής των βαρών στα κριτήρια αποδεικνύεται απλή και εύκολη, αποτυπώνοντας τις προτιμήσεις και τις προτεραιότητες των ενδιαφερόμενων φορέων και, συνεπώς, πραγματοποιείται μια αξιόπιστη, διαφανή και ευέλικτη αξιολόγηση των αναφερόμενων κυκλικών συστημικών λύσεων, βοηθώντας στη λήψη στρατηγικών αποφάσεων υπό διαφορετικά σενάρια και συνθήκες.

Βιβλιογραφία

- Adams, K. T., Osmani, M., Thorpe, T., & Thornback, J. (2017). Circular economy in construction: Current awareness, challenges and enablers. *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management*, 170(1), 15–24. <https://doi.org/10.1680/jwarm.16.00011>
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., & Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198–215. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021>
- Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Biliaieva, I. (2023). *Deliverable 5.13. Regulatory aspects assessment. WaysTUP! project.* <https://doi.org/10.3030/818308>
- Boom-Cárcamo, E., & Peñabaena-Niebles, R. (2022). Analysis of the Development of Industrial Symbiosis in Emerging and Frontier Market Countries: Barriers and Drivers. *Sustainability (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/su14074223>
- Bottero, M., D’Alpaos, C., & Oppio, A. (2018). Multicriteria evaluation of urban regeneration processes: An application of PROMETHEE method in northern Italy. *Advances in Operations Research*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9276075>
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). Note A PREFERENCE RANKING ORGANISATION METHOD The PROMETHEE Method ... *Management Science*, 31(6), 647–656.
- Calisto Friant, M., Reid, K., Boesler, P., Vermeulen, W. J. V., & Salomone, R. (2023). Sustainable circular cities? Analysing urban circular economy policies in Amsterdam, Glasgow, and Copenhagen. *Local Environment*, 28(10), 1331–1369. <https://doi.org/10.1080/13549839.2023.2206643>
- Canco, I., Kruja, D., & Iancu, T. (2021). Ahp, a reliable method for quality decision making: A case study in business. *Sustainability (Switzerland)*, 13(24), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su132413932>
- Cândido, D., Bolsan, A. C., Hollas, C. E., Venturin, B., Tápparo, D. C., Bonassa, G., Antes, F. G., Steinmetz, R. L. R., Bortoli, M., & Kunz, A. (2022). Integration of swine manure anaerobic digestion and digestate nutrients removal/recovery under a circular economy concept. *Journal of Environmental Management*, 301(May 2021). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113825>
- Castañó-Trias, M., Rodríguez-Mozaz, S., Alonso, L., Santos, L. H., Koukoura, A., Barka, E., Stasinakis, A., Seintos, T., Noutsopoulos, C., Kouris, N., & Buttiglieri, G. (2020). *Deliverable 5.9. Report on monitored micropollutants and pathogens. HYDROUSA project.* <https://doi.org/10.3030/776643>
- Chertow, M., & Ehrenfeld, J. (2012). Organizing Self-Organizing Systems: Toward a Theory of Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 16(1), 13–27. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00450.x>
- Chertow, M. R. (2000). Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25(June), 313–337. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>

- Chertow, M. R. (2007). *"Uncovering " Industrial Symbiosis*. 11(1).
- Chrysikopoulos, S. K., Chountalas, P. T., Georgakellos, D. A., & Lagodimos, A. G. (2024). Modeling Critical Success Factors for Industrial Symbiosis. *Eng*, 5(4), 2902–2919. <https://doi.org/10.3390/eng5040151>
- City of Amsterdam. (2020). *Amsterdam Circular Strategy 2020-2025*. 1–30. <https://www.amsterdam.nl/bestuur-organisatie/volg-beleid/ambities/gezonde-duurzame-stad/amsterdam-circulair-2020-2025/>
- Dagtzidou, P. (2024). *Deliverable 4.4. Development of High Added Value Products*. HYDROUSA project.
- Domenech, T., & Davies, M. (2011). Structure and morphology of industrial symbiosis networks: The case of Kalundborg. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 10(November), 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.01.011>
- Dong, H., Ohnishi, S., Fujita, T., Geng, Y., Fujii, M., & Dong, L. (2014). Achieving carbon emission reduction through industrial & urban symbiosis: A case of Kawasaki. *Energy*, 64, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.005>
- El-Arabi, T., Hindawy, S., Tsianou, E., & Vasilakos, I. (2022). *Deliverable 4.3. Catalogue of selected plants, description, availability and product development options*. HYDROUSA project.
- Ellen MacArthur Foundation. (2021). Completing the Picture: How the circular economy tackles climate change. *Ellen MacArthur Foundation*, 3(26 September), 1–71.
- EMAF. (2015). Growth within: a circular economy vision for a competitive europe. *Ellen MacArthur Foundation*, 100. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>
- Fatone, F., Eusebi, A. L., Cipolletta, G., & Akyo, C. (2020). *Deliverable 7.1. HYDROUSA water loops in the context of the EU and international policy (including Innovation Deal)*. HYDROUSA project. <https://doi.org/10.3030/776643>
- Fraccascia, L., Magno, M., & Albino, V. (2016). Business models for industrial symbiosis: A guide for firms. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 3(2), 83–93.
- Franco, J., Miranda, B., Ample, F., Semper, A., Pastor, P., & Guijarro, J. (2020). *Fertiliser production from blood treatment*. Factsheet WaysTUP! project. <https://doi.org/10.3030/818308>
- Franco, J., Nicolas, M., Larroy, G., Pastor, P., Semper, A., Miranda, B., Guijarro, J. M., Ample, F., & Segarra, S. (2023). *Deliverable 3.10. Report on demonstration of PILOT 1 (Final)*. WaysTUP! project. <https://doi.org/10.3030/818308>
- Gattringer, H., Kisser, J., Charalampopoulou, N. E., Statiris, V., Eleftheriou, A., & Bedau, N. (2024). *Deliverable 4.5. Report on yields, health of crops and derived products*. HYDROUSA project. <https://doi.org/10.3030/776643>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Harfeldt-Berg, L., Broberg, S. & Ericsson, K. (2022). *The Importance of Individual Actor Characteristics and Contextual Aspects for Promoting Industrial Symbiosis Networks*. *Sustainability*, 14(9), 4927. <https://doi.org/10.3390/su14094927>

- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Ghorabae, M. K., Zavadskas, E. K., Amiri, M., & Turskis, Z. (2016). Extended EDAS method for fuzzy multi-criteria decision-making: An application to supplier selection. *International Journal of Computers, Communications and Control*, 11(3), 358–371. <https://doi.org/10.15837/ijccc.2016.3.2557>
- Giannis Vasilakos, Monokrousou, K., Dimitriadis, K., Styllas, M., Eleftheriou, A., Tsianou, E., & Karlsson, P. (2021). *Deliverable 2.2. Raiwater management systems installed and running. HYDROUSA project*. <https://doi.org/10.3030/776643>
- Girard, L. F., & Nocca, F. (2019). Moving towards the circular economy/city model: Which tools for operationalizing this model? *Sustainability (Switzerland)*, 11(22), 1–48. <https://doi.org/10.3390/su11226253>
- Golev, A., Corder, G. D., & Giurco, D. P. (2014). Industrial symbiosis in gladstone: A decade of progress and future development. *Journal of Cleaner Production*, 84(1), 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.054>
- Govindan, K., & Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 1–29. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.019>
- Hwang, C. L., Lai, Y. J., & Liu, T. Y. (1993). A new approach for multiple objective decision making. *Computers and Operations Research*, 20(8), 889–899. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(93\)90109-V](https://doi.org/10.1016/0305-0548(93)90109-V)
- Jacquet-Lagrange, E., & Siskos, J. (1982). Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method. *European Journal of Operational Research*, 10(2), 151–164. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(82\)90155-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(82)90155-2)
- Jacquet-Lagrèze, E., & Siskos, Y. (2001). Preference disaggregation: 20 Years of MCDA experience. *European Journal of Operational Research*, 130(2), 233–245. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00035-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00035-7)
- Kalundborg Symbiosis. (2023). *Kalundborg Symbiosis Surplus from circular production*. 1–2.
- Karthikeyan, R., Venkatesan, K. G. S., & Chandrasekar, A. (2016). A Comparison of Strengths and Weaknesses for Analytical Hierarchy Process. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 9(3), 12–15. www.jchps.com
- Katsou, E., Nika, E., Tsalidis, G., Ghafourian, M., Kassongo, J., & Amoah, E. (2023). *Deliverable 6.1. Functional and Economic indicators. HYDROUSA project*. <https://doi.org/10.3030/776643>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127(September), 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kokkinakis, D., Lamprou, S., Ovadias, E., Siouti, A., & Tsene, L. (2023). *Deliverable 6.2. Social impact assessment models. HYDROUSA project*. <https://doi.org/10.3030/776643>
- Konietzko, J., Bocken, N., & Hultink, E. J. (2020). A Tool to Analyze, Ideate and Develop Circular Innovation Ecosystems. *Sustainability*, 12(1), 417. <https://doi.org/10.3390/su12010417>

- Laborda, E., Del-Busto, F., Bartolomé, C., & Fernández, V. (2023). Analysing the Social Acceptance of Bio-Based Products Made from Recycled Absorbent Hygiene Products in Europe. *Sustainability (Switzerland)*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/su15043008>
- Lai, Y. J., Liu, T. Y., & Hwang, C. L. (1994). TOPSIS for MODM. *European Journal of Operational Research*, 76(3), 486–500. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90282-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90282-8)
- Laybourn, P., & Morrissey, M. (2009). The Pathway to a Low Carbon Sustainable Economy: National Industrial Symbiosis Programme. International Synergies Ltd.
- Mathews, J. A., & Tan, H. (2011). Progress toward a circular economy in China: The drivers (and inhibitors) of eco-industrial initiative. *Journal of Industrial Ecology*, 15(3), 435–457. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00332.x>
- Neves, A., Godina, R., Azevedo, S. G., & Matias, J. C. O. (2020). A comprehensive review of industrial symbiosis. *Journal of Cleaner Production*, 247(November 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119113>
- Neves, A., Godina, R., Azevedo, S. G., Pimentel, C., & Matias, J. C. O. (2019). The Potential of Industrial Symbiosis: Case Analysis and Main Drivers and Barriers to Its Implementation. *Sustainability (Switzerland)*, 11(24), 1–68. <https://doi.org/10.3390/su11247095>
- Noutsopoulos, C., Statiris, V., Seintos, T., Koukoura, A., Monokrousou, K., Eleftheriou, A., Zecca, A., Michailaris, D., Bedau, N., Nyktari, E., & Kouris, N. (2024). *Deliverable 5.1. Pilot Assessment Report. HYDROUSA project*. <https://doi.org/10.3030/776643>
- OECD. (2020). *The Circular Economy in Cities and Regions Synthesis _ brochure*.
- Olesen, M. P. (1999). Industrial symbiosis in Kalundborg. *VGB PowerTech*, 79(10), 52–54.
- Oliveira, M., Miguel, M., van Langen, S. K., Ncube, A., Zucaro, A., Fiorentino, G., Passaro, R., Santagata, R., Coleman, N., Lowe, B. H., Ulgiati, S., & Genovese, A. (2021). Circular Economy and the Transition to a Sustainable Society: Integrated Assessment Methods for a New Paradigm. *Circular Economy and Sustainability*, 1(1), 99–113. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00019-y>
- Olson, D. L. (2004). Comparison of weights in TOPSIS models. *Mathematical and Computer Modelling*, 40(7–8), 721–727. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2004.10.003>
- Paché, G. (2024). *Kalundborg Industrial Symbiosis : Circular Strategy in the Light of Mutualism*. 19(3), 89–97.
- Pekakis, P., Tsouti, C., Valta, K., Zambrana Vasquez, D. A., Pérez Alonso, M., Vaskan, P., del Busto, F., & Andrikopoulos, P. (2023). *Deliverable 1.4. Report on barriers for urban biowaste valorisation for biobased products (state of play). WaysTUP! project*. <https://doi.org/10.3030/818308>
- Pérez, M., Díaz, M., Rodríguez, D., Valta, K., Pekakis, P., García, C., & Elena Laborda. (2023). *Deliverable 1.3. Catalogue of urban biowaste solutions and good practices examples. WaysTUP! project*. <https://doi.org/10.3030/818308>
- OECD, (2020). *Measuring the circular economy in cities and regions*. <https://doi.org/10.1787/16f47a98-en>
- Roest, K., Smeets, P., van den Brand, T., Zwertvaegher, A., Cortial, H., van Odijk, S., & Klaversma, E. (2016). Applicability of decentralized versus centralized drinking water production and wastewater treatment in an office park as example of a sustainable circular economy in

- Amsterdam, The Netherlands. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 3(3–4), 139–148.
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- SAATY, T. L., & KEARNS, K. P. (1985). The Analytic Hierarchy Process. In *Analytical Planning* (Issue July). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-032599-6.50008-8>
- Sadeghpour, A., & Afshar, R. K. (2024). Livestock manure: From waste to resource in a circular economy. *Journal of Agriculture and Food Research*, 17(May), 101255. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101255>
- Sheikh, B., Nelson, K. L., Haddad, B., & Thebo, A. (2018). Grey Water: Agricultural Use of Reclaimed Water in California. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 165(1), 28–41. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2018.03291.x>
- Shih, H. S., Shyr, H. J., & Lee, E. S. (2007). An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7–8), 801–813. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.03.023>
- Siskos, Y., & Spyridakos, A. (1999). Intelligent multicriteria decision support: Overview and perspectives. *European Journal of Operational Research*, 113(2), 236–246. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00213-6)
- Taherdoost, H. (2023). Using PROMETHEE Method for Multi-Criteria Decision Making: Applications and Procedures. *Iris Journal of Economics & Business Management*, 1(1), 1–7. <https://doi.org/10.33552/ijebm.2023.01.000502>
- Thompson, M., Cator, C., Beel, D., Jones, I. R., Jones, M., & Morgan, K. (2024). Amsterdam’s circular economy at a world-ecological crossroads: postcapitalist degrowth or the next regime of capital accumulation? *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 535–550. <https://doi.org/10.1093/cjres/rsae022>
- Tsiropoulos, Z., Anastasiou, E., & Papadogianni, C. (2019). *Deliverable 5.2. User requirements and specifications definition. HYDROUSA project*. <https://doi.org/10.3030/776643>
- Tsouti, C., Papadaskalopoulou, C., Valta, K., Vogiatzidaki, E., Razza, F., & Novelli, A. (2023). *Deliverable 5.11. Report on LCA results of new value chains. WaysTUP! project*. <https://doi.org/10.3030/818308>
- Valavanidis, A. (2018). *Concept and Practice of the Circular Economy Concept and Practice of the Circular Economy*. Athanasios Valavanidis. July, 1–30.
- Valentine, S. V. (2016). Kalundborg Symbiosis: Fostering progressive innovation in environmental networks. *Journal of Cleaner Production*, 118, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.061>
- Voukkali, I., Papamichael, I., Loizia, P., Lekkas, D. F., Rodríguez-Espinosa, T., Navarro-Pedreño, J., & Zorpas, A. A. (2023). Waste metrics in the framework of circular economy. *Waste Management and Research*, 41(12), 1741–1753. <https://doi.org/10.1177/0734242X231190794>
- Wang, X., & Triantaphyllou, E. (2008). Ranking irregularities when evaluating alternatives by using some ELECTRE methods. *Omega*, 36(1), 45–63. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.12.003>
- Wang, Y. M., & Elhag, T. M. S. (2006). Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an

- application to bridge risk assessment. *Expert Systems with Applications*, 31(2), 309–319. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.09.040>
- Warning, E., & Issues, E. (2024). *Water as a Circular Economy Resource*. 1993, 1–9.
- Zhang, N., Gruhler, K., & Schiller, G. (2023). A review of spatial characteristics influencing circular economy in the built environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(19), 54280–54302. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26326-5>
- Zopounidis, C. (1999). Multicriteria decision aid in financial management. *European Journal of Operational Research*, 119(2), 404–415. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00142-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00142-3)
- Άξονες Προώθησης της Κυκλικής Οικονομίας στην Περιφέρεια Κρήτης. (2022). 1–162.
- Εργασία, Δ. (2018). *Σχολή Θετικών Επιστημών Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Διαχείριση Τεχνικών Έργων*.
- Roy, B. (1996) *Multicriteria Methodology Goes Decision Aiding*. Kluwer Academic Publishers, Berlin. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1>
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). A Comprehensive Overview of the ELECTRE Method in Multi Criteria Decision-Making. *Journal of Management Science & Engineering Research*, 6(2), 5–16. <https://doi.org/10.30564/jmser.v6i2.5637>
- D1.5 SYSTEMIC project (2022). Final report on mass and energy balances, product composition and quality and overall technical performance of the demonstration plants. https://systemicproject.eu/wp-content/uploads/D1.5_revised-2022_final.pdf
- D1.6 SYSTEMIC project (2022). Synthesis of the performance of the demonstration plants. https://systemicproject.eu/wp-content/uploads/D1.16_Synthesis-WP1_revised.pdf
- D1.8 SYSTEMIC project (2022). Third annual update of the factsheets with a summary on the performance of the demonstration plants. https://systemicproject.eu/wp-content/uploads/D1.8.Factsheets_for-website.pdf
- D1.21 SYSTEMIC project (2022). Construction, monitoring, and demonstration activities at the demonstration plants. <https://systemicproject.eu/wp-content/uploads/D1.21-Construction-and-monitoring-activities-2021.pdf>
- D2.1 SYSTEMIC project (2022). Report on regulations governing AD and NRR in EU member states. https://systemicproject.eu/wp-content/uploads/D2.1-Report-on-regulations-governing-AD-and-NRR-in-EU-Member-States_final-report-cover.pdf
- D2.4 SYSTEMIC project (2022). Final report on the development and application of economic key performance indicators (KPIs). https://systemicproject.eu/wp-content/uploads/D2.4_KPI_Development_Report_final_200531_rev_201205.pdf
- D2.2 SYSTEMIC project (2022). Business Case Evaluation Report. https://systemicproject.eu/wp-content/uploads/D2.2-Business-Case-Evaluation-Report-vfin3_201203_post-eva_rev_201204.pdf
- D3.2 SYSTEMIC project (2022). Report with scenario's and schemes of proven NRR techniques. https://systemicproject.eu/wp-content/uploads/D3.2-Report-Schemes-and-Scenarios_update2021-2.pdf
- European Parliament (2023). Circular economy: definition, importance and benefits.

- https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2023/5/story/20151201STO05603/20151201STO05603_en.pdf
- Hwang, CL., Yoon, K. (1981). Methods for Multiple Attribute Decision Making. In: Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol 186. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- Eurostat. (2024). Agricultural production - livestock and meat. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Agricultural_production_-_livestock_and_meat
- Auto Recycling Nederland (ARN). Ανακτήθηκε από: <https://arn.nl/en/>
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, 2025. Κυκλική οικονομία: χρησιμοποίησέ το ξανά! | Θέματα <https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20151201STO05603/kukliki-oikonomia-chrisimopoiise-to-xana>
- Zopounidis, C., Doumpos, M. A Multicriteria Decision Aid Methodology for Sorting Decision Problems: The Case of Financial Distress. *Computational Economics* 14, 197–218 (1999). <https://doi.org/10.1023/A:1008713823812>
- K. Zopounidis M. Doumpos. Multicriteria decision making: An introduction to basic concepts, methodologies and applications [gr].
- Σίσκος, Ι., 2008. Μοντέλα αποφάσεων. Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα.
- Pardalos, P.M., Siskos, Y., Zopounidis, C., (1995). Advances in multicriteria analysis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Δούμπος, Μ., 2000. Πολυκριτήριες μέθοδοι ταξινόμησης και εφαρμογές στη χρηματοοικονομική διοίκηση. Διδακτορική Διατριβή. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Δούμπος, Μ., 2009. Πολυκριτήρια συστήματα αποφάσεων. Σημειώσεις μαθήματος. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Evangelos Triantaphyllou, “Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study”, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- Herbert A Simon. The new science of management decision. 1960
- Zahedi, F. (1986) The Analytic Hierarchy Process—A Survey of the Method and Its Applications. *Interfaces*, 16, 96-108. <http://dx.doi.org/10.1287/inte.16.4.96>
- Water Reuse - European Commission (2024). Ανακτήθηκε από https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-reuse_en
- Waste and recycling - European Commission (2024). Ανακτήθηκε από https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling_en
- Elahinik, A., Koller, S., Kanzler, G., Kyriazi, M., Avramidi, M., Novakovic, J., Sbardella, L., & Sapkaite, I. (2022). *Deliverable 6.1. Report on the results of the bench-scale tests. Water mining project.* <https://doi.org/10.3030/869474>
- Gaast, W. van der, & Renz, M. (2023). Deliverable 9.6. Final market system maps - assessments of barriers to WATERMINING technologies and how to clear these. Water mining project. <https://doi.org/10.3030/869474>
- Ktori, R., Parada, M. P., Rodriguez-Pascual, M., Loosdrecht, M. C. M. van, & Xevgenos, D. (2024). A

- Value-Sensitive Approach for Integrated Seawater Desalination and Brine Treatment. *Sustainable Production and Consumption*, 52, 363–377. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.006>
- Morgante, C., Vassallo, F., Cassaro, C., Virruso, G., Diamantidou, D., Van Linden, N., Trezzi, A., Xenogianni, C., Ktori, R., Rodriguez, M., Scelfo, G., Randazzo, S., Tamburini, A., Cipollina, A., Micale, G., & Xevgenos, D. (2024). Pioneering minimum liquid discharge desalination: A pilot study in Lampedusa Island. *Desalination*, 581(117562). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117562>
- Palmeros Parada, M., Randazzo, S., Gamboa, G., Ktori, R., Bouchaut, B., Cipolina, A., Micale, G., & Xevgenos, D. (2023). Resource recovery from desalination, the case of small islands. *Resources, Conservation and Recycling*, 199(107287). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107287>
- Wilfert, P., Loosdrecht, M. van, & Osseweijer, P. (2024). *Deliverable 11.7. Layman's report. Water mining project*. <https://doi.org/10.3030/869474>
- Xevgenos, D. (2022). *Deliverable 3.4. Demo systems used in CS1 and CS2. Water mining project*. <https://doi.org/10.3030/869474>
- Parada, M. P., Gamboa, G., & Bouchaut, B. (2023). *Deliverable 2.7. Update of Info-sheet quick scan VSD for case studies. Water mining project*. <https://doi.org/10.3030/869474>
- European Environment Agency (EEA). (2024). Greenhouse gas emissions from transport in Europe. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport>
- European Commission. (2020). *Circular Economy Action Plan*. <https://environment.ec.europa.eu>
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2015. «Το κλείσιμο του κύκλου – Ένα σχέδιο δράσης της ΕΕ για την κυκλική οικονομία». Βρυξέλλες, COM(2015) 614 final. Ανακτήθηκε από: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52015DC0614&from=EN>
- Amsterdam Economic Board | Circular jobs and skills in the Amsterdam Metropolitan Area, 2025. Ανακτήθηκε από: <https://amsterdameconomicboard.com/en/news/measuring-the-jobs-and-skills-that-are-boosting-amsterdams-circular-economy>
- Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020. «Ένα νέο σχέδιο δράσης για την κυκλική οικονομία. Για μια πιο καθαρή και πιο ανταγωνιστική Ευρώπη». Βρυξέλλες, COM(2020) 98 final. Ανακτήθηκε από: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0098>
- World Bank. 2021. International Framework for Eco-Industrial Parks v.2. Washington,DC: World Bank.
- Vaccaro et al., 2023. Method for sterilizing and decontaminating post-consumer absorbent sanitary products contaminated by organic compounds deriving from human metabolism. <https://patentimages.storage.googleapis.com/45/eb/fd/74d0269cb43129/US20230321289A1.pdf>
- Somma et al., 2018. Sterilizing apparatus for the sterilization of post-consumer absorbent sanitary products. <https://patentimages.storage.googleapis.com/e1/51/c2/375b7ab70c1962/WO2018142234A1.pdf>
- D' Alessio et al., 2020. A method for separating and recovering super-absorbent polymers (SAP) from post-consumer absorbent sanitary products. <https://patents.justia.com/patent/20230339004>

- JIVE Project. (2025). *Lessons learned from fuel cell bus deployment in the UK*. Deliverable D4.12. [D4.12 Lessons learned](#).
- JIVE, MEHRLIN project (2018). Performance Assessment Handbook D3.1 [JIVE MEHRLIN Performance Assessment Handbook](#)
- JIVE Project. (2024). *Potential for hydrogen buses in Europe*. Deliverable D3.36. [D3.36 Potential for hydrogen buses in europe](#).
- JIVE Project. (2024). *Operators guide*. Deliverable D2.2. [D2.2 Operators guide](#).
- JIVE & JIVE2 ERM presentation (2024, July). *Fuel cell electric buses: Overview and lessons learned*. Project presentation. [JIVE JIVE2 presentation 07.2024 FV1.pdf](#)
- JIVE Project. (2018). *Final report on performance assessment of fuel cell bus fleets*. Deliverable D4.3. [D4.3 final.pdf](#)
- Klaus Stolzenburg, Nicole Whitehouse, Simon Whitehouse, Madeline Ojakovoh, Efe Usanmaz, Sabine Skiker. (2020). FUEL CELL BUSES: BEST PRACTICES AND COMMERCIALISATION APPROACHES. [Knowledge Brief- Fuel Cell Buses](#)
- Michael Dolman, Gianluca Galeazzi. (2024). Fuel cell bus deployment in the UK – lessons from JIVE and next steps. [FC bus deployment in the UK](#).