



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ – ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ Β: ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΔΑΤΩΝ
ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΑΡΧΩΝ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

Σταύρος Π. Ηλιάκης

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Επιβλέπων: Καθηγητής Δ. Μαμάης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα	1
Πίνακας εικόνων	3
Περίληψη	4
Abstract.....	5
Εισαγωγή.....	6
Πρόλογος	9
1 Ιστορική εξέλιξη της κυκλικής οικονομίας	10
2 Θεωρητική περιγραφή της κυκλικής οικονομίας.....	14
3 Κυκλική Βιοοικονομία	18
3.1 Ο βιοκύκλος σε μια κυκλική οικονομία στα μεγάλα αστικά κέντρα	22
4 Κυκλική Οικονομία στην Ευρωπαϊκή Ένωση.....	27
5 Εφαρμογές της κυκλικής οικονομίας στην διαχείριση του νερού και των αστικών λυμάτων	36
5.1 Εισαγωγή.....	36
5.2 Επαναχρησιμοποίηση νερού λυμάτων.....	42
5.2.1 Επεξεργασία λυμάτων	43
5.2.2 Επαναχρησιμοποίηση λυμάτων	44
5.2.2.1 Παραδείγματα προγραμμάτων επαναχρησιμοποίησης νερού από όλο τον κόσμο	46
5.2.2.2 Παράγοντες που επιδρούν στην επιτυχή εφαρμογή της επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων	46
5.2.3 Υπάρχουσες εγκαταστάσεις επαναχρησιμοποίησης νερού και τοπική εφαρμογή	50
5.2.3.1 Παραδείγματα εφαρμογής των αρχών της κυκλικής οικονομίας κατά την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων	52
5.3 Ανάκτηση άζωτου και φωσφόρου από τα λυματα.....	57
5.3.1 Δυνατότητες ανάκτησης αζώτου και φώσφορου από τα λύματα	57
5.3.2 Ανάκτηση αζώτου από τα λύματα.....	58
5.3.3 Ανάκτηση φώσφορου από τα λύματα.....	59
5.3.3.1 Ανάκτηση φώσφορου στη μορφή στρουβίτη από την υδάτινη φάση	60
5.3.3.2 Ανάκτηση φώσφορου στη μορφή φωσφορικού οξέος της την τέφρα λυματολάσπης.....	61
5.3.3.3 Σύγκριση των παραπάνω μεθόδων ανάκτησης φώσφορου	61
5.3.3.4 Παραδείγμα εφαρμογής των αρχών της κυκλικής οικονομίας στην ανάκτηση αζώτου και φώσφορου από τα λύματα	63
5.4 Παραγωγή βιοενέργειας από τα λυματα.....	65
5.4.1 Δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας από τα λύματα	65

5.4.2	Ανάκτηση ενέργειας από την ιλύ των λυμάτων	66
5.4.2.1	Ενέργεια από βιοαέριο	66
5.4.2.2	Ενέργεια από βιοκαύσιμα	68
5.4.2.3	Άλλες τεχνικές ανάκτησης ενέργειας.....	69
5.4.2.4	Παραδείγματα εφαρμογών των αρχών της κυκλικής οικονομίας κατά την ανάκτηση ενέργειας από τα λύματα.....	70
5.5	Αξιοποίηση ιλύος επεξεργασμένων λυμάτων	74
5.5.1	Εισαγωγή	74
5.5.2	Χαρακτηρισμός ιλύος	75
5.5.3	Μέθοδοι επεξεργασίας και διάθεσης της ιλύος	77
5.5.4	Μείωση της παραγωγής ιλύος στη γραμμή επεξεργασίας λυμάτων / ιλύος	79
5.5.5	Δυνατότητες αξιοποίησης ιλύος από εελ.....	80
5.5.5.1	Ανάκτηση θρεπτικών	80
5.5.5.2	Ανάκτηση βαρέων μετάλλων.....	81
5.5.5.3	Προσοφητικά	82
5.5.5.4	Υλικά κατασκευής	82
5.5.5.5	Βιοπλαστικά.....	83
5.5.5.6	Πρωτεΐνες	84
5.5.5.7	Ενζυμα.....	84
5.6	Βιοδυλιστήρια.....	85
5.6.1	Μελέτη περίπτωσης: The CAP Group – Μιλάνο, Ιταλία.....	89
5.6.2	Μελέτη περίπτωσης: DSM – καινοτομία στην παραγωγή κυτταρινικής αιθανόλης	90
5.6.3	Μελέτη περίπτωσης: Biopolus	91
5.6.4	Μελέτη περίπτωσης: Ολοκληρωμένο Κέντρο Παροχών - REGENSIA.....	92
5.6.5	Μελέτη περίπτωσης – Βιοδυλιστήριο του Billund	94
5.7	Τεχνητοί υγρότοποι	94
5.8	Επιδημιολογία με βάση τα λύματα	96
5.8.1	Μελέτη περίπτωσης – Σχέδιο «Υπόκοσμοι» (Project “Underworlds”, MIT)	96
6	Συμπεράσματα	98
	Αναφορές.....	100

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 - Απεικόνιση του τρόπου με τον οποίο προϊόντα με βάση τεχνικά και βιολογικά συστατικά "ρέουν" κυκλικά στο οικονομικό σύστημα	14
Εικόνα 2 - Σχηματική αναπαράσταση της κυκλικής οικονομίας	27
Εικόνα 3 – Κατηγορίες δεικτών κυκλικής οικονομίας	29
Εικόνα 4 - Δείκτες παραγωγής και κατανάλωσης σε επίπεδο ΕΕ	30
Εικόνα 5 - Δείκτες παραγωγής και κατανάλωσης σε εθνικό επίπεδο	30
Εικόνα 6 - Δείκτες διαχείρισης λυμάτων σε επίπεδο ΕΕ	31
Εικόνα 7 - Δείκτες διαχείρισης αποβλήτων σε εθνικό επίπεδο	32
Εικόνα 8- Δείκτες ανταγωνιστικότητας και καινοτομίας σε επίπεδο ΕΕ	33
Εικόνα 9 - Δείκτες ανταγωνιστικότητας και καινοτομίας σε εθνικό επίπεδο	33
Εικόνα 10 - Διάγραμμα υδάτινου συστήματος σε μία λεκάνη απορροής	37
Εικόνα 11 – Σχηματική απεικόνιση των στοιχείων ενός δημοτικού συστήματος ύδρευσης	41
Εικόνα 12 - Συμβατική διβάθμια επεξεργασία λυμάτων και εναλλακτικές επιλογές για επαναχρησιμοποίηση λυμάτων	44
Εικόνα 13 - Η προσέγγιση διαχείρισης νερού MLD της Dow	55
Εικόνα 14 - Οι υπάρχουσες τεχνολογίες αιχμής για τον καθαρισμό του νερού περιλαμβάνουν την υπερδιήθηση, την νανοδιήθηση, την αντίστροφη ώσμωση και τις τεχνολογίες ανταλλαγής ιόντων.	56
Εικόνα 15 – Η διαχείριση του φώσφορου σήμερα	63
Εικόνα 16 – Η λύση της Ostara για βιώσιμο κύκλο φώσφορου	64
Εικόνα 17 – Σχηματική αναπαράσταση Σειράς Αντιδραστήρων Μεταβολικού Δικτύου	92
Εικόνα 18 – Σχηματική αναπαράσταση Ολοκληρωμένου Κέντρου Παροχών (IUH)	93
Πίνακας 1 – Προϊόντα που μπορούν εξαχθούν από τα λύματα	26

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας στη διαχείριση των αστικών λυμάτων. Με τις ρίζες της να συναντώνται ήδη από τη δεκαετία του '70, η κυκλική οικονομία αφορά αναγεννησιακά συστήματα τα οποία μέσω μακροχρόνιου σχεδιασμού, συντήρησης, επισκευής, επαναχρησιμοποίησης, ανακατασκευής, ανακαίνισης και ανακύκλωσης, πετυχαίνουν την ελαχιστοποίηση των εισροών πόρων και απωλειών, των εκπομπών και διαρροών ενέργειας με την επιβράδυνση, το κλείσιμο και τη μείωση των βρόχων υλικού και ενέργειας.

Η κυκλική οικονομία βρίσκει άμεση εφαρμογή στη βιοοικονομία. Με τη δημιουργία «βιοκύκλων» δύναται να ανακοπεί η αποσύνδεση των οργανικών ροών ανάμεσα στις πόλεις και την επαρχία και να αξιοποιηθούν τα πολύτιμα στοιχεία που περιέχουν τα απόβλητα και τα λύματα.

Δεδομένης της επιτακτικής ανάγκης της εποχής μας για στροφή σε πιο βιώσιμα μοντέλα ανάπτυξης, εθνικοί αλλά και υπερεθνικοί φορείς έχουν δείξει αυξημένο ενδιαφέρον στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ήδη από το 2015 είχε υιοθετήσει σχέδιο δράσης για την κυκλική οικονομία και συνεχίζει να εκδίδει νομοθετικά πλαίσια προς υποστήριξη των κυκλικών μοντέλων.

Εφαρμόζοντας τις αρχές της κυκλικής οικονομίας στα λύματα, επιτυγχάνουμε την εξαγωγή αξίας από αυτά. Παύουν να αντιμετωπίζονται ως απόβλητα, αλλά γίνονται πηγές καθαρού νερού, αζώτου και φώσφορου, ενέργειας, επεξεργασμένης ιλύος, καθώς και πιο σύνθετων προϊόντων όπως κυτταρίνης, αλγών, εμπορικών χημικών και επιδημιολογικής πληροφορίας. Με την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στη διαχείριση του νερού η ανθρώπινη δραστηριότητα δύναται να ευθυγραμμιστεί με το φυσικό κύκλο του νερού ώστε να μειωθεί η υποβάθμισή του και να καταστεί ευκολότερη η επαναχρησιμοποίησή του, να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας και να καταστεί δυνατή η εκμετάλλευση των θρεπτικών συστατικών που περιέχει. Στις αντίστοιχες ενότητες παρουσιάζονται μέθοδοι και τεχνολογίες ανάκτησης των παραπάνω, καθώς και χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής των σχετικών τεχνολογιών.

Τελικά, οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων έχουν τη δυνατότητα να δράσουν ως ολοκληρωμένα βιοδιυλιστήρια, όπου δέχονται ως εισροές προϊόντα χαμηλής αξίας (λύματα) και δίνουν εκροές πολύτιμα στοιχεία, προστατεύοντας ταυτόχρονα το περιβάλλον από τις αρνητικές συνέπειες της διάθεσης και εξοικονομώντας τους όλο και πιο περιορισμένους φυσικούς πόρους. Με αυτό τον τρόπο γίνονται πραγματικοί κόμβοι κυκλικής διαχείρισης των ροών λυμάτων.

ABSTRACT

This thesis examines the application of the circular economy to urban wastewater management. The concept of the Circular Economy has been gaining momentum since the late 1970s and is defined as a regenerative system in which resource input and waste, emission, and energy leakage are minimized by slowing, closing, and narrowing material and energy loops. This can be achieved through long-lasting design, maintenance, repair, reuse, remanufacturing, refurbishing, and recycling.

The circular economy is immediately applicable to the bioeconomy. The creation of 'biocycles' can eliminate the disconnection of organic flows between cities and the countryside and make valuable use of waste and wastewater.

Given the urgent need of our era to shift to more sustainable growth models, national and supranational actors have shown increased interest in applying the principles of the circular economy. The European Commission has already adopted a circular economy action plan in 2015 and continues to adopt legislative frameworks in support of circular models.

By applying the principles of circular economy to wastewater, we are able to extract value from it. It is no longer treated as waste, but it becomes a source of clean water, nitrogen and phosphorus, energy, processed sludge, and more complex products such as cellulose, algae, commercial chemicals and epidemiologic data. By applying the principles of the circular economy to water management, human activity can be aligned with the natural cycle of water to reduce its degradation and make it more suitable for reusing, utilizing it for energy production and enabling exploitation of the nutrients it contains. The respective sections present relevant methods and technologies for the recovery of the resources mentioned, as well as case studies of the technologies concerned.

Finally, wastewater treatment plants have the potential to act as integrated biorefineries, where they receive low-value inputs (wastewater) and provide high-value inputs, while protecting the environment from the negative externalities of disposal and saving increasingly scarce natural resources. In this way, they become real nodes for the circular management of the sewage flows.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στη διαχείριση των αστικών λυμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια ιστορική επισκόπηση σχετικά με τις σχολές σκέψης που οδήγησαν στην ανάδειξη της εννοίας της Κυκλικής Οικονομίας. Παρά το πρόσφατο της εγκαθίδρυσης της Κυκλικής Οικονομίας ως ιδέα, πολλές από τις έννοιες και ιδέες της είχαν διατυπωθεί μέσω διάφορων συγγενών ιδεών ήδη από την δεκαετία του '70.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, ορίζεται η κυκλική οικονομία και περιγράφονται οι θεωρητικοί άξονές της. Η Κυκλική Οικονομία αποτελεί ένα οικονομικό σύστημα που στοχεύει στην απομάκρυνση από το γραμμικό μοντέλο «παραγωγής – χρήσης – διάθεσης», στην εξάλειψη των αποβλήτων και στη διαρκή χρήση των πρώτων υλών. Τα κυκλικά συστήματα, μέσω μακροχρόνιου σχεδιασμού, συντήρησης, επισκευής, επαναχρησιμοποίησης, ανακατασκευής, ανακαίνισης και ανακύκλωσης, πετυχαίνουν την ελαχιστοποίηση των εισροών πόρων και απωλειών, των εκπομπών και διαρροών ενέργειας με την επιβράδυνση, το κλείσιμο και τη μείωση των βρόχων υλικού και ενέργειας. Οι βασικές αρχές της εντοπίζονται στο σχεδιασμό για την αποφυγή των αποβλήτων, τη διαφοροποίηση μεταξύ των αναλώσιμων και των ανθεκτικών συστατικών των προϊόντων και τη χρήση ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του κυκλικού μοντέλου είναι η εξοικονόμηση πόρων, η μείωση των διακυμάνσεων των τιμών των πρώτων υλών και του ρίσκου ανεφοδιασμού τους, τα δυνητικά οφέλη απασχόλησης από την μετατόπιση της οικονομίας προς την παροχή υπηρεσιών και η μείωση των εξωτερικοτήτων που σχετίζονται με την παραγωγή.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο ρόλος της κυκλικής διαχείρισης των λυμάτων στα πλαίσια της βιοοικονομίας. Οι σύγχρονες γεωργικές πρακτικές αλλά και οι γενικότερες τάσεις της παγκοσμιοποίησης, με χαρακτηριστικότερη την αστικοποίηση, έχουν ως αποτέλεσμα τη διάρρηξη του κύκλου των οργανικών και των θρεπτικών ουσιών, καθώς οι πόλεις συγκεντρώνουν τα βιολογικά και θρεπτικά υλικά από τις αγροτικές περιοχές, αλλά αντί να τα επιστρέφουν, τα απορρίπτουν σε ρεύματα στερεών αποβλήτων ή σε συστήματα αποχετεύσεων. Ως αποτέλεσμα, αφενός κρίνεται επιτακτική η ανάγκη εφαρμογής αρχών κυκλικής οικονομίας στη βιοοικονομία και η δημιουργία «βιοκύκλων» για να αποφευχθούν οι σημερινές αρνητικές επιπτώσεις του γραμμικού μοντέλου, αφετέρου υπάρχουν σημαντικές ευκαιρίες εξαγωγής αξίας μέσω της αξιοποίησης του νερού, της ενέργειας και των θρεπτικών στις οργανικές ροές για την επίτευξη ενός βιωσιμότερου μοντέλου διαχείρισης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δράση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή το 2015 υιοθέτησε ένα σχέδιο δράσης κυκλικής οικονομίας, το οποίο και έθεσε τις βάσεις για τη στροφή προς κυκλικότερα οικονομικά μοντέλα εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Το 2018 & 2019 εξέδωσε επιπλέον νομοθετικά πλαίσια προς υποστήριξη των κυκλικών οικονομικών μοντέλων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εφαρμογές της κυκλικής οικονομίας στη διαχείριση του νερού και των αστικών λυμάτων. Οι βασικοί άξονες εφαρμογής της κυκλικής οικονομίας στη διαχείριση των λυμάτων είναι η επαναχρησιμοποίηση του νερού, η ανάκτηση θρεπτικών στοιχείων (κυρίως άζωτο και φώσφορο), η παραγωγή βιοενέργειας και η αξιοποίηση της ιλύος των επεξεργασμένων λυμάτων.

Η δυνατότητα αξιοποίησης του νερού των λυμάτων εξετάζεται στο κεφάλαιο 5.2. Σήμερα, το συνηθέστερο μοντέλο αξιοποίησης του είναι η «πρόσληψη – χρήση – απόρριψη». Με την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας στη διαχείριση του νερού η ανθρώπινη δραστηριότητα δύναται να ευθυγραμμιστεί με το φυσικό κύκλο του ώστε να μειωθεί η υποβάθμισή του και να καταστεί ευκολότερη η επαναχρησιμοποίησή του, να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας και να καταστεί δυνατή η εκμετάλλευση των θρεπτικών συστατικών που περιέχει. Ως αποτέλεσμα, η επαναχρησιμοποίησή του αποτελεί απάντηση στη διαρκώς αυξανόμενη ανισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης αυτού. Επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση τριτοβάθμιας επεξεργασίας στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων. Είναι γεγονός ότι η μετάβαση σε κυκλικό μοντέλο διαχείρισης αντιμετωπίζει προκλήσεις που σχετίζονται με τεχνικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες, καθώς και με κινδύνους ποιότητας. Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλά επιτυχημένα παραδείγματα επαναχρησιμοποίησης νερού, κάποια από τα οποία παρουσιάζονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Στο κεφάλαιο 5.3 παρουσιάζεται η δυνατότητα ανάκτησης αζώτου και φώσφορου. Η σημασία της είναι μεγάλη, αφενός γιατί μειώνει το κόστος συμμόρφωσης με την περιβαλλοντική νομοθεσία των ΕΕΛ, αφετέρου επειδή επιτρέπει την δημιουργία εσόδων από την οικονομική εκμετάλλευσή τους, κυρίως ως συστατικά λιπασμάτων, την αποφυγή των διακυμάνσεων τιμών τους και τη μείωση του κινδύνου εφοδιασμού τους. Οι βασικοί μέθοδοι ανάκτησης αζώτου συνίστανται στις διαδικασίες νιτροποίησης / απονιτροποίησης, Αμμοιοξ και ιοντοανταλλαγής. Ο φώσφορος ανακτάται με διάφορες μεθόδους, με αποδοτικότερες την ανάκτηση από το στρουβίτη και από την τέφρα λυματολάσπης ως φωσφορικό οξύ.

Στο κεφάλαιο 5.4 επισημαίνεται η δυνατότητα παραγωγής βιοενέργειας από τα λύματα. Η ανάγκη μετάβασης από την παραγωγή ενέργειας μέσω ορυκτών καυσίμων στην παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές καθιστά ελκυστική προοπτική την παραγωγή ενέργειας από τα λύματα και την ιλύ που προκύπτει από την επεξεργασία τους, με πλέον διαδεδομένη τη μέθοδο παραγωγής βιοαερίου μέσω αναερόβιας χώνευσης της ιλύος. Πολλά είναι τα παραδείγματα, σε μικρή ή μεγαλύτερη κλίμακα, όπου η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται με επιτυχία. Σε πιο πρώιμο επίπεδο, ερευνώνται και εναλλακτικές μέθοδοι παραγωγής ενέργειας από τα λύματα και την ιλύ τους, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής βιοκαυσίμου.

Το κεφάλαιο 5.5 αναφέρεται στις μεθόδους αξιοποίησης της λυματολάσσης. Η αυξανόμενη παραγωγή ιλύος από την επεξεργασία λυμάτων και η ανάγκη ασφαλούς διάθεσής της αποτελεί κίνητρο για την εφαρμογή αρχών της κυκλικής οικονομίας στη διαχείρισή της. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί, αφενός με την εφαρμογή τεχνολογιών μείωσης της παραγωγής της, αφετέρου με την χρήση της για παραγωγή ενέργειας μέσω αναερόβιας χώνευσης και με την ανάκτηση πρώτων υλών από αυτήν, δηλαδή θρεπτικών στοιχείων, βαρέων μετάλλων, προσροφητικών, υλικών κατασκευής, βιοπλαστικών, πρωτεϊνών και ενζύμων.

Στη κεφάλαιο 5.6 επισημαίνεται ότι η αντιμετώπιση των ΕΕΛ ως κέντρα καθαρισμού των λυμάτων δε λαμβάνει υπόψη το σύνολο των δυνατοτήτων τους. Μια πιο περιεκτική προσέγγιση αποτελεί η αντιμετώπιση των εγκαταστάσεων ως αυτοδύναμα βιοδιυλιστήρια, όπου δέχονται εισροές χαμηλής αξίας, όπως λύματα ή απόβλητα, και τα μετατρέπουν σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Υπό αυτό το πρίσμα, η παραγωγή πολύτιμων προϊόντων αποτελεί καθοριστικό παράγοντα σχεδιασμού των εγκαταστάσεων και επιδέχεται διερεύνησης η δυνατότητα αξιοποίησης των ροών λυμάτων για την ανάκτηση πιο σύνθετων ουσιών όπως κυτταρίνης και διάφορων εμπορικών χημικών, καθώς και η καλλιέργεια αλγών. Ήδη αναπτύσσονται ολοκληρωμένες λύσεις αξιοποίησης των λυμάτων που παρουσιάζονται στην αντίστοιχη ενότητα.

Στο κεφάλαιο 5.7 γίνεται αναφορά στην αξία της συνεισφοράς των τεχνητών υγροτόπων στη διαχείριση των λυμάτων στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας. Οι τεχνητοί υγρότοποι μπορούν να αποτελέσουν αυτόνομη λύση ή συνδυαστικό κρίκο στην αξιοποίηση των λυμάτων για την επαναχρησιμοποίηση νερού, την ανάκτηση θρεπτικών και την παραγωγή ενέργειας, καθώς και να προσφέρουν υπηρεσίες οικοσυστήματος στα πλαίσια βιώσιμης αστικής ανάπτυξης.

Το κεφάλαιο 5.8 διερευνά μία νέα καινοτόμα μέθοδος παραγωγής αξίας από τα λύματα, την εξαγωγή επιδημιολογικών πληροφοριών προς δημιουργία βάσεων δεδομένων που θα επιτρέψουν την άμεση παρακολούθηση της αστικής υγείας με σκοπό την έγκαιρη πρόληψη και αποτελεσματική αντιμετώπιση των δυνητικών κρουσμάτων ασθενειών.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο αναγράφονται τα συμπεράσματα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Πιο συγκεκριμένα, οι προοπτικές από το «κλείσιμο του κύκλου» των λυμάτων είναι τεράστιες, και για να επιτευχθούν στο έπακρο χρειάζεται μια ευρείας κλίμακας θεσμική στροφή στον τρόπο διαχείρισης των οργανικών ροών και κατ' επέκταση των αστικών λυμάτων.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μετάβαση σε πιο βιώσιμες κοινωνικές και οικονομικές δομές έχει αποτελέσει σημαντικό στόχο για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής για τις τελευταίες δεκαετίες (Meadows et al., 2004; WBCSD, 2010; Seiffert and Loch, 2005; Markard et al., 2012). Η σύγχρονη βιομηχανική οικονομία, παρά την εξέλιξή της, συνεχίζει να ακολουθεί το γραμμικό μοτίβο «εισαγωγή – παραγωγή – διάθεση», όπου τα προϊόντα παρασκευάζονται από πρώτες ύλες, πωλούνται, χρησιμοποιούνται και τελικά απομακρύνονται ως σκουπίδια. Το μοντέλο αυτό αποδείχτηκε εξαιρετικά πετυχημένο όσον αφορά την προσφορά οικονομικών προϊόντων στους καταναλωτές και κατ' επέκταση υλικής ευμάρειας σε δισεκατομμύρια πληθυσμό. Στις ανεπτυγμένες οικονομίες, έχει εκτοπίσει μια πιο «παραδοσιακή» οικονομία η οποία χαρακτηριζόταν από περισσότερη επαναχρησιμοποίηση και αναγέννηση, αλλά απαιτούσε περισσότερη εργασία και απέφερε χαμηλότερη επιστροφή επί της επένδυσης. Πλέον όμως τα μεγέθη παραγωγής που απαιτούνται οδηγούν σε σημαντικές απώλειες αξίας και αρνητικών επιπτώσεων στην αλυσίδα υλικών (EMF, 2013, 2014). Οι αρνητικές επιπτώσεις περιλαμβάνουν περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως απώλεια βιοποικιλότητας, ατμοσφαιρική, υδατική και εδαφική ρύπανση, εξάντληση ορυκτών υλών και υπερεκμετάλλευση γης, τα οποία συμβάλλουν στην εξασθένιση των συστημάτων υποστήριξης της ζωής του πλανήτη (Rockstrom et al., 2009; Jackson, 2009; Meadows et al., 2004; WWF, 2014). Επίσης, προβλήματα δημιουργούνται και στον κοινωνικό ιστό, καθώς το υπάρχον σύστημα δεν δίνει βιώσιμες λύσεις για ζητήματα όπως η υψηλή ανεργία, οι κακές συνθήκες εργασίας, η κοινωνική ευπάθεια, η «παγίδα φτώχειας», καθώς και η ενδογενεακή και διαγενεακή ανισότητα. (Banerjee and Duflo, 2011; Sen, 2001; Prahalad, 2004). Τέλος, καθώς η παγκόσμια μεσαία τάξη προβλέπεται να διπλασιαστεί σε μέγεθος στα σχεδόν 5 δισεκατομμύρια μέχρι το 2030, η κατανάλωση και η ένταση χρήσης υλικών θα αυξηθούν αναλόγως, με συνεπακόλουθη αύξηση του κόστους των πρώτων υλών και της διακύμανσης της τιμής τους, σε μια περίοδο που η πρόσβαση σε νέα αποθέματα πρώτων υλών θα γίνεται όλο και πιο δύσκολη και ακριβή. Τα συμπτώματα αυτών των περιορισμών γίνονται ήδη εμφανή στην προσφορά τροφής και νερού. Το κόστος της μείωσης της εδαφικής ευφορίας υπολογίζεται σε περίπου 35 δις ευρώ παγκοσμίως. (EMF, 2014)

Από την ανάγκη αντιμετώπισης αυτών και άλλων προβλημάτων βιωσιμότητας, ανέκυψε η έννοια της Κυκλικής Οικονομίας. (Brennan et al., 2015). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σχέδιο δράσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την κυκλική οικονομία (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2015), καθώς και ο κινέζικος νόμος προώθησης της κυκλικής οικονομίας (Lieder and Rashid, 2016). Στη συνέχεια, θα εξεταστεί το ιστορικό υπόβαθρο της έννοιας της κυκλικής οικονομίας, πως αυτή ορίζεται σήμερα και ποια είναι τα χαρακτηριστικά της.

1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας μελετήθηκε από τα τέλη της δεκαετίας του '70 (EMF, 2013). Αρκετοί συγγραφείς αποδίδουν την εισαγωγή στην έννοια στους Pears and Turner (1989), οι οποίοι ερεύνησαν τα γραμμικά και ευέλικτα χαρακτηριστικά των σύγχρονων οικονομικών συστημάτων, περιγράφοντας πώς οι φυσικοί πόροι επηρεάζουν την οικονομία παρέχοντας εισροές για παραγωγή και κατανάλωση και χρησιμεύοντας ως αποδέκτης για τις εκροές με τη μορφή αποβλήτων. Η έρευνά τους είχε ως βάση το έργο του Boulding (1966), στο οποίο περιγράφεται η γη ως κλειστό και κυκλικό σύστημα με περιορισμένη αφομοιωτική ικανότητα, από το οποίο συμπεραίνει ότι η οικονομία και το περιβάλλον πρέπει να συνυπάρχουν σε ισορροπία. (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017).

Οι Stahel and Reday (1976) εισήγαγαν χαρακτηριστικά της κυκλικής οικονομίας, με έμφαση στη βιομηχανική οικονομία. Δημιουργήσαν το θεωρητικό υπόβαθρο μιας οικονομίας βρόγχου για να περιγράψουν βιομηχανικές στρατηγικές για την πρόληψη δημιουργίας αποβλήτων, την δημιουργία τοπικών θέσεων εργασίας, την αποδοτικότητα των πόρων και την μείωση των απαιτούμενων πρώτων υλών της βιομηχανικής οικονομίας. Ο Stahel επίσης έδωσε έμφαση στο γεγονός ότι η πώληση της χρήσης αντί της ιδιοκτησίας των αγαθών αποτελεί το πιο σχετικό βιώσιμο επιχειρηματικό μοντέλο για μια οικονομία βρόγχου, καθώς επιτρέπει στις βιομηχανίες να κερδοφορίσουν χωρίς την εξωτερίκευση του κόστους και των κινδύνων που συνδέονται με τα απόβλητα (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017).

Η σύγχρονη έννοια της κυκλικής οικονομίας εξελίχθηκε συμπεριλαμβάνοντας χαρακτηριστικά από ποικιλία εννοιών και ιδεών που μοιράζονται την ιδέα των κλειστών βρόγχων. Μερικές από τις σχετικότερες παρουσιάζονται παρακάτω:

Αναγεννητικός σχεδιασμός: Στη δεκαετία του '70, ένας Αμερικανός καθηγητής με το όνομα John T. Lyle ξεκίνησε μια πρόκληση για μεταπτυχιακούς φοιτητές. Ο Lyle ζήτησε από τους μαθητές να σφυρηλατήσουν ιδέες για μια κοινωνία στην οποία «οι καθημερινές δραστηριότητες βασίζονται στην αξία της διαβίωσης εντός των ορίων των διαθέσιμων ανανεώσιμων πόρων χωρίς υποβάθμιση του περιβάλλοντος». Ο όρος «αναγεννητικός σχεδιασμός» συσχετίστηκε με αυτή την ιδέα, ότι όλα τα συστήματα θα μπορούσαν να εννοχηστρωθούν με στόχο την αναγέννησή τους, δηλαδή οι διαδικασίες να ανανεώνουν ή να αναγεννούν τις πηγές ενέργειας και τα υλικά που καταναλώνουν (Lyle, 1994; EMF, 2013).

Οικονομία απόδοσης: Ο Walter Stahler, αρχιτέκτονας και βιομηχανικός αναλυτής, σχεδίασε το όραμα της οικονομίας σε βρόχους (ή κυκλική οικονομία) και τις επιπτώσεις της στη δημιουργία θέσεων εργασίας, την οικονομική ανταγωνιστικότητα, την εξοικονόμηση πόρων και την πρόληψη δημιουργίας αποβλήτων στην ερευνητική έκθεσή του το 1976 προς την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Η δεξαμενή σκέψης του «The Product-Life Institute» προωθεί τέσσερις κύριους στόχους: επέκταση ζωής προϊόντων, παραγωγή προϊόντων μεγάλου χρόνου ζωής, δραστηριότητες ανακατασκευής και αποφυγή δημιουργίας αποβλήτων. Επίσης, επιμένει στη σημασία της πώλησης υπηρεσιών και όχι προϊόντων, μια ιδέα που αναφέρεται ως

«οικονομία λειτουργικών υπηρεσιών», η οποία τώρα ευθυγραμμίζεται ευρύτερα με την έννοια της «οικονομίας απόδοσης». Ο Stahel υποστηρίζει ότι η κυκλική οικονομία πρέπει να θεωρηθεί ένα πλαίσιο και οι υποστηρικτές της να τη βλέπουν ως ένα συνεκτικό μοντέλο που αποτελεί πολύτιμο μέρος μιας απάντησης στο τέλος της εποχής του χαμηλού κόστους πετρελαίου και άλλων υλικών (Stahel, Reday-Mulvey, 1982; [Performance economy link](#); EMF 2013).

Από Λίκνο σε Λίκνο (Cradle to Cradle): Η φιλοσοφία σχεδιασμού αναπτύχθηκε τη δεκαετία του '90 από το Γερμανό χημικό και οραματιστή Michael Braungart μαζί με τον αρχιτέκτονα Bill McDonough. Σύμφωνα με αυτή, όλα τα υλικά που εμπλέκονται στις βιομηχανικές και εμπορικές διεργασίες είναι θρεπτικά συστατικά, τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τεχνικά και βιολογικά. Το πλαίσιο Από Λίκνο σε Λίκνο εστιάζει στο σχεδιασμό για αποτελεσματικότητα όσον αφορά τις ροές προϊόντων με θετικό αντίκτυπο, γεγονός που το διαφοροποιεί θεμελιωδώς από τον παραδοσιακό σχεδιασμό που αποσκοπεί στη μείωση του αρνητικού αντίκτυπου.

Ο σχεδιασμός Από Λίκνο σε Λίκνο βλέπει τις ασφαλείς και παραγωγικές διεργασίες του φυσικού «βιολογικού μεταβολισμού» ως μοντέλο για την ανάπτυξη μιας «τεχνικής μεταβολικής» ροής βιομηχανικών υλικών. Σε κάποιες περιπτώσεις, η υψηλή αντοχή δεν είναι η βέλτιστη στρατηγική, καθώς κάποια κομμάτια των καταναλωτικών αγαθών καταλήγουν διασκορπισμένα ή είναι εξαιρετικά δύσκολο να ανακτηθούν. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι προτιμότερος ο σχεδιασμός προϊόντων έτσι ώστε να διατηρείται η αγνότητα των υλικών, προκειμένου να καθίσταται ευκολότερη η αποσυναρμολόγηση και η συλλογή των επιμέρους συστατικών. Το πλαίσιο Από Λίκνο σε Λίκνο λαμβάνει υπόψιν και τις εισροές σε ενέργεια και νερό (McDonough and Braungart, 2002; EMF, 2013, 2014).

Βιομηχανική οικολογία: Είναι η μελέτη των ροών υλικών και ενέργειας μέσω βιομηχανικών συστημάτων. Εστιάζοντας στις συνδέσεις μεταξύ των φορέων εντός του «βιομηχανικού οικοσυστήματος», η προσέγγιση αυτή στοχεύει στη δημιουργία διαδικασιών κλειστού βρόχου όπου τα απόβλητα χρησιμεύουν ως εισροές, εξαλείφοντας την έννοια ενός ανεπιθύμητου υποπροϊόντος. Η βιομηχανική οικολογία υιοθετεί μια συστημική άποψη, σχεδιάζοντας τις παραγωγικές διαδικασίες σύμφωνα με τους τοπικούς οικολογικούς περιορισμούς, ενώ παράλληλα εξετάζει την παγκόσμιά τους επιρροή και προσπαθεί να τις διαμορφώσει έτσι ώστε να λειτουργούν όσο το δυνατόν πιο κοντά στα ζωντανά συστήματα. Αυτό το πλαίσιο αναφέρεται μερικές φορές ως «επιστήμη της βιωσιμότητας», δεδομένου του διεπιστημονικού χαρακτήρα του, και οι αρχές του μπορούν να εφαρμοστούν και στον τομέα των υπηρεσιών. Με έμφαση στην αποκατάσταση φυσικού κεφαλαίου, η βιομηχανική οικολογία επικεντρώνεται επίσης στην κοινωνική ευημερία (Graedel and Allenby, 1995; [is4ie.org](#), EMF, 2013).

Μπλε Οικονομία: Προερχόμενη από τον πρώην διευθύνων σύμβουλο (ΔΣ) της Ecover και Βέλγο επιχειρηματία Gunter Pauli, η Μπλε Οικονομία είναι ένα ανοιχτό κίνημα που συγκεράζει μελέτες φυσικών βιολογικών παραγωγικών διαδικασιών. Όπως δηλώνει το

επίσημο μανιφέστο, “χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους πόρους σε διαδοχικά συστήματα, (...) τα απόβλητα του ενός προϊόντος γίνονται εισροές για τη δημιουργία μίας νέας χρηματοροής». Στην παραπάνω έκθεση επίσης περιγράφονται «100 καινοτομίες που μπορούν να δημιουργήσουν 100 εκατομμύρια θέσεις εργασίας στα επόμενα 10 χρόνια» και παρουσιάζονται πολλά παραδείγματα επιτυχημένων σχεδίων, δίνοντας έμφαση στην πρακτική εφαρμογή των ιδεών του (Pauli, 2010; [The Blue Economy](#); EMF, 2013)

Βιομίμηση: Η Janine M. Benyus, συγγραφέας του έργου «Καινοτομία Εμπνευσμένη από τη Φύση» ορίζει τη Βιομίμηση ως «μια νέα σχολή σκέψης που μελετά τις καλύτερες ιδέες της φύσης και στη συνέχεια μιμείται αυτά τα σχέδια και τις διαδικασίες για την επίλυση ανθρώπινων προβλημάτων». Η μελέτη ενός φύλλου για την εφεύρεση ενός καλύτερου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ένα παράδειγμα. Το θεωρεί ως «καινοτομία εμπνευσμένη από τη φύση». Η βιομίμηση βασίζεται σε τρεις αρχές:

- Η φύση ως μοντέλο: Αφορά τη μελέτη των μοντέλων της φύσης και εξομοιώνει τις μορφές, τις διαδικασίες, τα συστήματα και τις στρατηγικές για την επίλυση των ανθρώπινων προβλημάτων.
- Η φύση ως μέτρο σύγκρισης: Αφορά τη χρήση ενός οικολογικού σημείου αναφοράς για την κρίση της βιωσιμότητας των καινοτομιών.
- Η φύση ως μέντορας: Αφορά την οπτική γωνία και την απόδοση αξίας στη φύση όχι με βάση τι ύλες μπορούμε να εξάγουμε από το φυσικό κόσμο, αλλά με βάση τι μπορούμε να μάθουμε από αυτή.

(Benyus, 2002; [Biomimicry Institute](#), 2013; EMF, 2013)

Ο πιο ευρέως διαδεδομένος ορισμός της Κυκλικής Οικονομίας προέρχεται από το Ίδρυμα Ellen MacArthur, το οποίο συστήνει την Κυκλική Οικονομία ως «μία βιομηχανική οικονομία που χαρακτηρίζεται από αποκατάσταση ή αναγέννηση από πρόθεση και (εσκεμμένο) σχεδιασμό» (EMF, 2013). Οι Geng and Doberstein (2008) περιγράφουν την κυκλική οικονομία ως «η πραγματοποίηση ενός κλειστού βρόχου ροής υλικών σε ολόκληρο το οικονομικό σύστημα». Ο Webster (2015) προσθέτει ότι «μία κυκλική οικονομία είναι αποκαταστατική από σχεδιασμού της και στοχεύει στην διατήρηση της υψηλότερης χρησιμότητας και αξίας των προϊόντων, των εξαρτημάτων και των υλικών ανά πάσα στιγμή». Παρομοίως, ο Yuan και άλλοι (2008) ορίζουν ότι «ο πυρήνας της Κυκλικής Οικονομίας είναι η κυκλική (κλειστή) ροή υλικών και η χρήση πρώτων υλών και ενέργειας μέσω πολλαπλών φάσεων». Ο Bocken και άλλοι (2016) κατηγοριοποιούν τα χαρακτηριστικά της κυκλικής οικονομίας ορίζοντας την ως «στρατηγικές σχεδιασμού και επιχειρηματικών μοντέλων που επιβραδύνουν, κλείνουν και περιορίζουν τους βρόχους πόρων». Με βάση τη συμβολή των παραπάνω, ο Geissdoerfer και άλλοι (2017) ορίζουν την κυκλική οικονομία ως «ένα σύστημα αναγέννησης στο οποίο ελαχιστοποιείται η εισροή πόρων και οι απώλειες, οι εκπομπές και η διαρροή ενέργειας με την επιβράδυνση, το κλείσιμο και τη μείωση των βρόχων υλικού και ενέργειας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω μακροχρόνιου σχεδιασμού, συντήρησης, επισκευής, επαναχρησιμοποίησης, ανακατασκευής, ανακαίνισης και ανακύκλωσης.»

Η ιδέα της κυκλικής οικονομίας έχει προσελκύσει αυξημένο ακαδημαϊκό ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, πιο συγκεκριμένα η αξία των κλειστών βρόγχων και οι αλυσίδες αξίας, τα κυκλικά επιχειρηματικά μοντέλα και ο κυκλικός σχεδιασμός προϊόντων. Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στο Ίδρυμα Ellen MacArthur, το οποίο εκτός από μια [σειρά δημοσιεύσεων](#) που έχει εκδόσει σχετικά με το θέμα, λειτουργεί και ως κέντρο συνεργασίας για τις επιχειρήσεις, τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και τον ακαδημαϊκό κόσμο (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017).

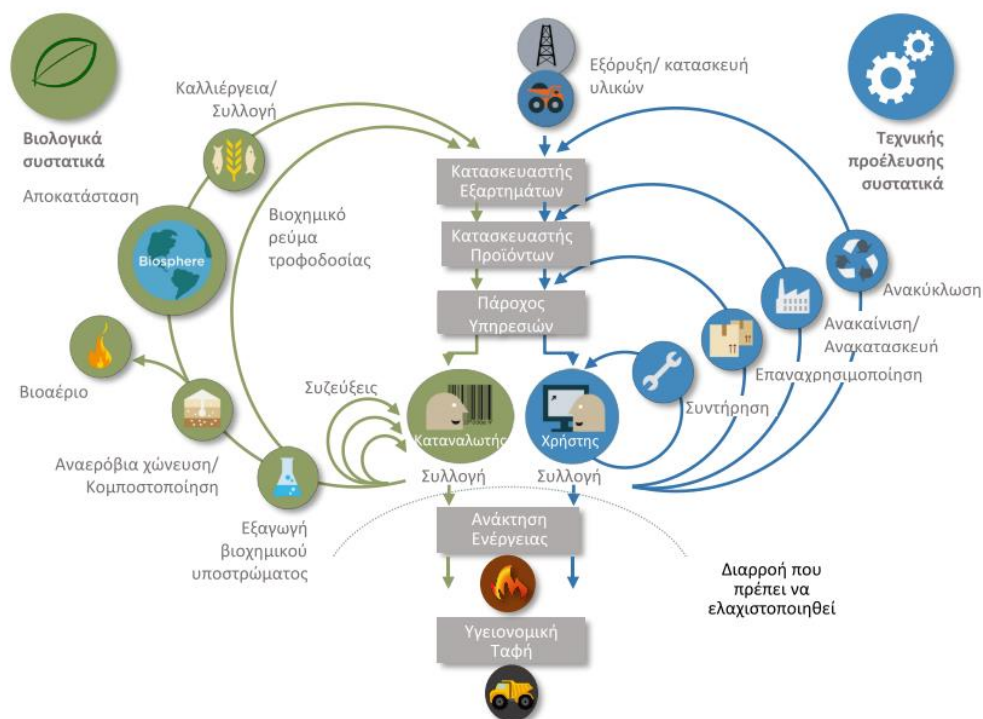
Πέρα από το ακαδημαϊκό ενδιαφέρον όμως, η ιδέα της κυκλικής οικονομίας έχει επηρεάσει και υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, όπως κυβερνήσεις και διακυβερνητικούς οργανισμούς, σε τοπικό, περιφερειακό, εθνικό και διεθνές επίπεδο. Η Γερμανία ήταν πρωτοπόρος στην ενσωμάτωση της κυκλικής οικονομίας στους εθνικούς νόμους ήδη από το 1996, με τη θέσπιση του «Νόμου για τον Κλειστό Κύκλο Ουσιών και την Διαχείριση των Αποβλήτων» (Su et al., 2013). Ακολούθησε η Ιαπωνία το 2002 με τον «Βασικό Νόμο για την Ίδρυση μιας Κοινωνίας που βασίζεται στην Ανακύκλωση» (METI, 2004) και το 2009 η Κίνα με το «Νόμο της Λαϊκής Δημοκρατίας της Κίνας για την Προώθηση της Κυκλικής Οικονομίας» (Lieder and Rashid, 2016). Υπερεθνικοί φορείς έχουν επίσης ενσωματώσει πτυχές της κυκλικής οικονομίας, με πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα τη στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Κυκλική Οικονομία, όπου θα αναφερθούμε εκτενέστερα παρακάτω (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017).

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ

Η ιδέα της κυκλικής οικονομίας βασίζεται σε κάποιες αρχές, οι οποίες είναι (EMF, 2013):

- Σχεδιασμός για αποφυγή αποβλήτων. Τα προϊόντα σχεδιάζονται και βελτιστοποιούνται για κύκλους αποσυναρμολόγησης και επαναχρησιμοποίησης. Αυτό τα διαφοροποιεί από την διάθεση ή ακόμη και από την ανακύκλωση των προϊόντων ενός τυπικού γραμμικού μοντέλου παραγωγής, όπου μεγάλα ποσά ενσωματωμένης ενέργειας και εργασίας χάνονται.
- Διαφοροποίηση μεταξύ αναλώσιμων και ανθεκτικών συστατικών ενός προϊόντος. Τα αναλώσιμα μέρη στην κυκλική οικονομία αποτελούνται από βιολογικά συστατικά που είναι μη τοξικά και μπορούν να επιστρέψουν στη βιόσφαιρα με ασφάλεια. Τα ανθεκτικά εξαρτήματα που είναι κατασκευασμένα από τεχνικής προέλευσης συστατικά, ακατάλληλα για την βιόσφαιρα, όπως το μέταλλο και τα περισσότερα πλαστικά, σχεδιάζονται από την αρχή για επαναχρησιμοποίηση.
- Η ενέργεια που απαιτείται για την τροφοδοσία του κύκλου πρέπει να είναι ανανεώσιμη από τη φύση της. Αυτό οδηγεί στη μείωση της εξάρτησης από τις πρώτες ύλες και στην αύξηση της συστημικής ανθεκτικότητας, για παράδειγμα στις έντονες διακυμάνσεις των τιμών των υλικών.

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τη συνεχή ροή τεχνικών και βιολογικών υλικών μέσω του «κύκλου αξίας».



Εικόνα 1 - Απεικόνιση του τρόπου με τον οποίο προϊόντα με βάση τεχνικά και βιολογικά συστατικά "ρέουν" κυκλικά στο οικονομικό σύστημα (EMF, 2013)

Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής αυτών των αρχών οδηγούν στην παραγωγή αξίας μέσω των παρακάτω «δυνάμεων» (EMF, 2013):

- Τη «δύναμη του εσωτερικού κύκλου», την μειωμένη χρήση υλικών συγκριτικά με ένα γραμμικό σύστημα παραγωγής.
- Τη «δύναμη της μεγαλύτερης κυκλικής ροής», τον αριθμό των διαδοχικών κύκλων και τον χρόνο σε κάθε ένα.
- Τη «δύναμη των επάλληλων χρήσεων», την προοπτική για διαφοροποιημένη επαναχρησιμοποίηση κατά μήκος της αλυσίδας αξίας.
- Τη «δύναμη των καθαρών κύκλων», την ενδεχόμενη αποτελεσματικότητα στην συλλογή και ανακατανομή αμόλυντων ροών υλικού ενώ διατηρείται η ποιότητα.

Τα βασικά δομικά στοιχεία για την μετάβαση σε μια κυκλικότερη οικονομία, σύμφωνα με την έκθεση του Ιδρύματος Ellen MacArthur του 2013, είναι τα παρακάτω:

- Η ανάγκη για κυκλικό σχεδιασμό, βελτιώσεις στην επιλογή των υλικών και το σχεδιασμό των προϊόντων.
- Καινοτόμα επιχειρηματικά μοντέλα, και κυρίως η μετάβαση από τα μοντέλα ιδιοκτησίας σε μοντέλα που βασίζονται στην απόδοση, τα οποία επιτρέπουν στα προϊόντα που προορίζονται για επαναχρησιμοποίηση να αποτελέσουν ελκυστική πρόταση παραγωγής αξίας.
- Βασικές ικανότητες κατά μήκος των κύκλων αναστροφής ροής και επάλληλων κύκλων, που εμπεριέχουν τη δημιουργία οικονομικά αποδοτικών και καλύτερης ποιότητας συλλογής και επεξεργασίας συστημάτων.
- Καταλύτες στη βελτίωση των διακυκλικών και διατομεακών επιδόσεων. Αυτοί περιλαμβάνουν υψηλότερη διαφάνεια, ευθυγράμμιση κινήτρων και καθιέρωση βιομηχανικών προτύπων για καλύτερη συνεργασία μεταξύ αλυσίδων αξίας και βιομηχανικών τομέων, πρόσβαση σε μέσα χρηματοδότησης και διαχείρισης κινδύνων, ανάπτυξη του ρυθμιστικού πλαισίου και των υποδομών και τέλος, εκπαίδευση, τόσο για την αύξηση της ευαισθητοποίησης όσο και για να δημιουργηθεί η βάση δεξιοτήτων που θα οδηγήσει την κυκλική καινοτομία.

Η μετάβαση σε κυκλικότερο μοντέλο συνεπάγεται μεγάλα οφέλη για την οικονομία, όπως ενδεικτικά τα κυριότερα παρουσιάζονται παρακάτω (EMF, 2013):

- Σημαντική εξοικονόμηση πόρων. Η έκθεση του Ιδρύματος Ellen MacArthur (2013) εκτιμά ότι ένα υποσύνολο του μεταποιητικού τομέα της ΕΕ θα μπορούσε να πραγματοποιήσει καθαρή εξοικονόμηση κόστους υλικών από \$340 - \$380 έως \$520 - \$630 δισεκατομμύρια ετησίως μέχρι το 2025.
- Μείωση της διακύμανσης των τιμών και των κινδύνων εφοδιασμού. Η καθαρή εξοικονόμηση υλικών θα οδηγούσε σε ταχύτερη μείωση της καμπύλης κόστους για διάφορες πρώτες ύλες, μειώνοντας παράλληλα τη μεταβλητότητα της ζήτησης.

- Τομεακές μετατοπίσεις και πιθανά οφέλη απασχόλησης. Μία «χρηστοκεντρική οικονομία» θα ενισχύσει τον τριτογενή τομέα και θα οδηγήσει σε υψηλότερα ποσοστά καινοτομίας, απασχόλησης και παραγωγικότητας κεφαλαίου.
- Μειωμένες εξωτερικότητες. Καθώς τα υλικά και τα προϊόντα είναι φορείς ενσωματωμένων εξωτερικών δυσμενών παραγόντων, μία μείωση των όγκων παραγωγής θα έχει ως αποτέλεσμα αντίστοιχη μείωση των σχετικών εξωτερικών αρνητικών επιδράσεων.
- Διαρκή οφέλη για μια πιο ανθεκτική οικονομία. Η κυκλικότητα ως «συσκευή επανεξέτασης» έχει αποδειχτεί ότι είναι ένα ισχυρό νέο πλαίσιο ικανό να προκαλέσει δημιουργικές λύσεις και να τονώσει την καινοτομία.

Επιπλέον, οι επιχειρήσεις μπορούν να αποκομίσουν μία ποικιλία από ενδεχόμενα οφέλη (EMF, 2013):

- Μειωμένοι λογαριασμοί υλικού και κίνδυνοι εγγυήσεων, οι οποίοι μπορούν να επιτευχθούν μέσω της μεταπώλησης, την ανάκτηση εξαρτημάτων και τη σχεδίαση για μακροχρόνια αντοχή.
- Βελτιωμένη αλληλεπίδραση με τους πελάτες και αφοσίωση από αυτούς. Με συμβάσεις χρηματοδοτικής μίσθωσης ή συμβάσεις «απόδοσης», δημιουργείται καλύτερη κατανόηση της βάσης πελατών για βελτιωμένη εξατομίκευση, προσαρμογή και διατήρηση αυτής.
- Μικρότερη πολυπλοκότητα προϊόντων και πιο διαχειρίσιμοι κύκλοι ζωής. Η παροχή σταθερών "πυρήνων" ή σκελετών προϊόντων και η αντιμετώπιση άλλως εξαρτημάτων των προϊόντων ως πρόσθετα στα υφιστάμενα επιτρέπει στις εταιρείες να υπερνικήσουν την πρόκληση των ολοένα και μικρότερων κύκλων ζωής των προϊόντων και να παρέχουν εξαιρετικά προσαρμοσμένες λύσεις διατηρώντας παράλληλα την πολυπλοκότητα του χαρτοφυλακίου προϊόντων τους χαμηλή.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθούν και τα άμεσα σημαντικά πλεονεκτήματα που θα αποκομίσουν οι καταναλωτές από την μετάβαση σε μία κυκλική οικονομία (EMF, 2013).

- Η πρόωρη απαξίωση μειώνεται στα προϊόντα που είναι σχεδιασμένα με μακρύ χρόνο ζωής ή με στόχο την επαναχρησιμοποίηση.
- Η επιλογή και η ικανοποίηση αυξάνονται καθώς οι παραγωγοί μπορούν αν προσαρμόσουν τη διάρκεια, τον τύπο χρήσης και τα εξαρτήματα του προϊόντος στο συγκεκριμένο καταναλωτή.
- Δευτερεύοντα οφέλη προκύπτουν στον καταναλωτή εάν τα προϊόντα προσφέρουν περισσότερες της βασικής τους λειτουργίας, στα πλαίσια των επάλληλων κύκλων χρήσης τους.

Εκτός από τα οφέλη της μετάβασης, υπάρχουν δυνάμεις σε κίνηση που δυσχεραίνουν το σημερινό γραμμικό μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης. Κατ' αρχάς, η σπανιότητα των πόρων και τα αυστηρότερα περιβαλλοντικά πρότυπα θα ανταμείψουν κυκλικές

επιχειρηματικές πρακτικές έναντι των επιχειρηματικών πρακτικών που ακολουθούν το μοτίβο «εισαγωγή – παραγωγή – διάθεση». Επιπλέον, οι εξελίξεις στην τεχνολογία της πληροφορίας μας επιτρέπουν να παρακολουθούμε τα υλικά διαμέσω της αλυσίδας εφοδιασμού, να αναγνωρίζουμε τα κλάσματα προϊόντων και υλικών και να ενημερωνόμαστε για την κατάσταση των προϊόντων κατά τη χρήση τους, καθώς και να αξιοποιήσουμε πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης ως μέσω κινητοποίησης εκατομμυρίων καταναλωτών σχετικά με την ύπαρξη νέων προϊόντων και υπηρεσιών. Τέλος, μια καθολική αλλαγή στη συμπεριφορά των καταναλωτών λαμβάνει χώρα αυτή τη στιγμή. Η οικονομία διαμοιρασμού επεκτείνεται, όπου οι καταναλωτές προτιμούν την πρόσβαση από την ιδιοκτησία (EMF, 2013).

3 ΚΥΚΛΙΚΗ ΒΙΟΟΙΚΟΝΟΜΙΑ

Η βιοοικονομία περιλαμβάνει βιομηχανίες που αξιοποιούν βιολογικά υλικά σε διαφορετικά στάδια των αλυσίδων αξίας. Παραδείγματα βιομηχανιών αποτελούν η γεωργία, η δασοκομία και η αλιεία στον πρωτογενή τομέα, η μεταποίηση τροφίμων, η κλωστοϋφαντουργία και η βιοτεχνολογία στον δευτερογενή τομέα, καθώς και το λιανικό εμπόριο και η διαχείριση των πόρων στα στάδια κατανάλωσης και τέλους χρήσης αντίστοιχα. Με τον όρο κυκλική εστιάζουμε στην οργανική ροή και τις ευκαιρίες για αύξηση της ανάκτησης και της βελτίωσης της χρήσης της εφαρμόζοντας τις αρχές της κυκλικής οικονομίας.

Η κυκλική βιοοικονομία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα παγκόσμια οικονομικά, ανθρώπινα και περιβαλλοντικά συστήματα. Σύμφωνα με το Συνασπισμό για το Φυσικό Κεφάλαιο, οι γεωργοί, οι έμποροι, οι χονδρέμποροι, οι εταιρείες παραγωγής τροφίμων και οι λιανοπωλητές συνθέτουν τον μεγαλύτερο οικονομικό τομέα παγκοσμίως, παράγοντας μια προσεγγιστική παγκόσμια αξία περίπου 12,5 τρισεκατομμυρίων δολαρίων με βάση τα έσοδα ή το 17% του παγκόσμιου ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος (GDP) το 2013. (Natural Capital Coalition, 2016). Στις αναδυόμενες οικονομίες, το ποσοστό της κυκλικής βιοοικονομίας ως προς τη συνολική οικονομία είναι ακόμη σημαντικότερο, για παράδειγμα, ο τομέας της γεωργίας, συμπεριλαμβανομένων των καλλιεργειών και της κτηνοτροφίας, αποτελεί το 21,1% (CEPEA/USP).

Τον Οκτώβριο του 2018 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε Έκθεση με τίτλο [«Βιώσιμη βιοοικονομία για την Ευρώπη: ενίσχυση της σύνδεσης οικονομίας, κοινωνίας και περιβάλλοντος»](#). Ως βιοοικονομία χαρακτηρίζει τους τομείς και τα συστήματα που βασίζονται σε βιολογικούς πόρους, τις διασυνδέσεις με τα χερσαία και θαλάσσια οικοσυστήματα και τις υπηρεσίες που παρέχουν, τους τομείς της πρωτογενούς παραγωγής που παράγουν ή χρησιμοποιούν βιολογικούς πόρους, καθώς και τους βιομηχανικούς τομείς που χρησιμοποιούν βιολογικούς πόρους και διεργασίες για την παραγωγή τροφίμων, ζωοτροφών και προϊόντων ενέργειας και υπηρεσιών. Σε αυτήν αναφέρεται ότι η βιοοικονομία δημιουργεί κύκλο εργασιών ύψους 2,3 τρις ευρώ και αντιστοιχεί στο 8,2% του εργατικού δυναμικού της ΕΕ (18 εκατομμύρια εργαζόμενοι) (Ronzon, M'Varek, 2018). Για την επιτυχία της βιοοικονομίας τονίζεται η ανάγκη υιοθέτησης βιώσιμων και κυκλικών μοντέλων. Όπως χαρακτηριστικά αναγράφεται, η ανάπτυξη της ευρωπαϊκής βιοοικονομίας θα μπορούσε να δημιουργήσει ως και ένα εκατομμύριο νέες θέσεις εργασίας ως το 2030 και να συμβάλει στη διαμόρφωση μελλοντικού ουδέτερου ισοζυγίου άνθρακα, σύμφωνα με τους στόχους της συμφωνίας του Παρισιού για το κλίμα. Με τα κατάλληλα μέτρα, θα στηριχτεί ο εκσυγχρονισμός και θα ενισχυθεί η βιομηχανική βάση της ΕΕ μέσω της δημιουργίας νέων αλυσίδων αξίας και οικολογικότερων και οικονομικά αποδοτικότερων βιομηχανικών διεργασιών. Η βιώσιμη βιοοικονομία υποστηρίζεται ότι αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της κυκλικής οικονομίας, με χαρακτηριστική αναφορά την μείωση των απορριμμάτων τροφίμων έως 50% έως το 2030 μέσω της μετατροπής των βιοαποβλήτων σε πολύτιμους πόρους. Για την επιτυχή μετάβαση της βιοοικονομίας σε κυκλικό μοντέλο,

τονίζεται ότι οι πόλεις θα πρέπει να μετατραπούν σε σημαντικούς κόμβους κυκλικής βιοοικονομίας και προτείνονται σχετικές δράσεις.

Σήμερα, η κυκλική βιοοικονομία αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις. Στις μελλοντικές προκλήσεις περιλαμβάνονται:

- Η αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης τροφίμων, η οποία αναμένεται να αυξηθεί ως και 70% μέχρι το 2050, αυξάνοντας την πίεση στη διαθέσιμη γη. (FAO)
- Αύξηση του ανταγωνισμού για τη διαθέσιμη γη που θα προκύψει από την αυξημένη ζήτηση νέων βιολογικών πρώτων υλών για ποικιλία χρήσεων, συμπεριλαμβανομένων των βιοκαυσίμων, των βιοϋλικών και των φαρμακευτικών προϊόντων.
- Υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους και της παραγωγικότητας της γης ως αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής.

Ακόμη όμως και με τα σημερινά δεδομένα, σημαντικά διαρθρωτικά προβλήματα στη διαχείριση αποβλήτων, απώλειες φυσικού κεφαλαίου και εξωτερικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην τρέχουσα βιοοικονομία πρέπει να αντιμετωπιστούν:

- Περίπου το ένα τρίτο όλων των τροφίμων που παράγονται παγκοσμίως, αξίας περίπου 680 δισεκατομμυρίων δολαρίων σε χώρες υψηλού εισοδήματος και 310 δισεκατομμυρίων δολαρίων σε αναδυόμενες χώρες, χάνεται ή σπαταλάται κάθε χρόνο. (FAO). Ο όγκος των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από τα παγκόσμια απορρίμματα τροφίμων βρίσκεται στην τρίτη θέση πίσω από την Κίνα και τις ΗΠΑ. (FAO)
- Οι γεωργικές δραστηριότητες αντιπροσωπεύουν σχεδόν το 70% των παγκόσμιων προσλήψεων νερού (OECD, Water use in agriculture) αλλά μόνο το 40% αυτού του νερού φθάνει σε φυτά (EEA, 2012).
- Η υποβάθμιση του εδάφους επηρεάζει περίπου το ένα τέταρτο της παγκόσμιας επιφάνειας της γης. Περίπου 75 δισεκατομμύρια τόνοι γόνιμου εδάφους χάνονται κάθε χρόνο, με εκτιμώμενη ετήσια απώλεια 490 δισεκατομμυρίων δολαρίων. (United Nations (2014)).
- Οι βιομηχανοποιημένες γεωργικές πρακτικές κοστίζουν στο περιβάλλον περίπου 3 τρισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ ετησίως (περισσότερο από το ετήσιο ΑΕΠ του Ηνωμένου Βασιλείου) σε αρνητικές περιβαλλοντικές εξωτερικές επιπτώσεις κατά μήκος της αλυσίδας αξίας (FAO). Πολλές γεωργικές βιομηχανίες θα ήταν ασύμφορες αν οι εξωτερικές αυτές επιπτώσεις κοστολογούνταν, καθώς θα υπερέβαιναν τα έσοδα της βιομηχανίας, ενίοτε πολλές φορές παραπάνω. (Trucost, 2013).
- Οι απορροές λιπασμάτων από το γεωργικό σύστημα οδηγούν σε θρεπτικές ουσίες που συσσωρεύονται σε ποτάμια, λίμνες και ωκεανούς και τελικά σε ευτροφισμό, υπερβολικό πολλαπλασιασμό των φυκών και υποξικές νεκρές ζώνες (οι νεκρές ζώνες των ωκεανών τώρα πλήττουν 240.000 τ.χλμ., περιοχή περίπου όση το Ηνωμένο Βασίλειο)(Diaz, R.J. and Rosenberg, R., 2008).

Ένα ακόμη σημαντικό πρόβλημα που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε είναι η διαταραχή της ροής των θρεπτικών στοιχείων. Οι σύγχρονες γεωργικές πρακτικές, όπως η υπερβολική καλλιέργεια και η χρήση βαρέων μηχανημάτων, επιταχύνουν τη διάβρωση και την απορροή νερού, μεταφέροντας θρεπτικά συστατικά από το έδαφος στα υδάτινα συστήματα. Καθώς συγκομίζονται οι καλλιέργειες, αφαιρούνται τα θρεπτικά συστατικά και η οργανική ύλη. Εάν δεν αντικατασταθούν, η γονιμότητα του εδάφους μειώνεται. Η υπερβολική χρήση φυτοφαρμάκων και συνθετικών λιπασμάτων, τα οποία ενδέχεται να μην περιέχουν όλα τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά και οργανική ύλη, μπορεί επίσης να οδηγήσει σε αυξανόμενα επίπεδα τοξικότητας, μειώνοντας την ικανότητα του εδάφους να στηρίζει την ανάπτυξη. Δεδομένου ότι χάνονται όλο και περισσότερες θρεπτικές ουσίες και μειώνεται η ποιότητα του εδάφους, οι γεωργοί στρέφονται αυξανόμενα στη χρήση συνθετικών λιπασμάτων. Η παγκόσμια ζήτηση για λιπάσματα υπολογίστηκε σε 185 εκατομμύρια τόνους το 2014 και προβλέπεται να αυξηθεί κατά 1,6% ετησίως 2015-2019 (FAO, 2016). Η παραγωγή συνθετικών λιπασμάτων συνήθως συνεπάγεται εξόρυξη πεπερασμένων πόρων, όπως πετρωμάτων φωσφορικών αλάτων, απαιτεί σημαντική ενέργεια και παράγει εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Η παραγωγή συνθετικών αζωτούχων λιπασμάτων, για παράδειγμα, καταναλώνει το 2% της παγκόσμιας ενέργειας και το 2007 δημιούργησε 465 εκατομμύρια τόνους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Εκτός από τις γεωργικές πρακτικές, μεγάλες τάσεις όπως η παγκοσμιοποίηση, ο αυξανόμενος πληθυσμός και η αστικοποίηση συμβάλλουν στη διάρρηξη του κύκλου των θρεπτικών ουσιών. Το παγκόσμιο σύστημα διανομής τροφίμων και εμπορικών δικτύων, για παράδειγμα, μπορεί να απαιτεί εξαγμένα θρεπτικά συστατικά να μεταφέρονται σε τεράστιες αποστάσεις από την πηγή τους. Η αστικοποίηση οδηγεί σε συγκέντρωση και εκροή θρεπτικών ουσιών ως απόβλητα τροφίμων σε ρεύματα στερεών αποβλήτων και σε συστήματα αποχέτευσης ως λυματολάσπη. Στην Ευρώπη, η ιλύς περιέχει περίπου τριπλάσιο φωσφόρο από αυτό που βρίσκεται στα στερεά απόβλητα. Η συγκέντρωση και η απόρριψη θρεπτικών ουσιών στα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων μπορούν επίσης να συμβάλουν στο πρόβλημα ευτροφισμού.

Το βασικό ζήτημα λοιπόν είναι ότι τα θρεπτικά συστατικά εξάγονται από τη βιόσφαιρα ως συγκομιδή τροφής και συγκεντρώνονται στις πόλεις, προκαλώντας στη συνέχεια ζημιά εκεί όπου απορρίπτονται, αντί να επιστρέφονται επωφελώς πίσω στο έδαφος. Οι πόλεις συγκεντρώνουν βιολογικά υλικά και θρεπτικά συστατικά από τις αγροτικές περιοχές, αλλά επιστρέφουν λίγα από αυτά στο γεωργικό σύστημα. Το 2050, εκτιμάται ότι πάνω από το 70% των ανθρώπων θα ζουν σε πόλεις, που αντιστοιχούν σε 2,5 δισεκατομμύρια νέους αστικούς κατοίκους. Οι πόλεις καταναλώνουν το 75% των φυσικών πόρων του πλανήτη και το 80% του παγκόσμιου ενεργειακού εφοδιασμού και παράγουν περίπου το 75% των παγκόσμιων εκπομπών άνθρακα (UNEP- DTIE). Από το 2012, οι πόλεις παράγουν περίπου 1,3 δισεκατομμύρια τόνους αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) παγκοσμίως ετησίως, αριθμός που αναμένεται να αυξηθεί σχεδόν κατά 70% σε 2,2 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως έως το

2025, ενώ το 70% αυτών των απορριμμάτων ενδέχεται να δημιουργηθεί στις αναδυόμενες αγορές. (World Bank).

Το οργανικό υλικό αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό (46% κατά μάζα) των ΑΣΑ. Το ποσοστό αυτό ποικίλλει ανά τον κόσμο και είναι γενικά υψηλότερο στις χώρες με χαμηλά εισοδήματα (64%) από τις χώρες υψηλού εισοδήματος (28%). Ωστόσο, αν και το ποσοστό των οργανικών αποβλήτων μπορεί να είναι χαμηλότερο στις χώρες υψηλού εισοδήματος, οι απόλυτοι όγκοι μπορεί να είναι μεγαλύτεροι. Για παράδειγμα, στις χώρες του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ), το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ εκτιμάται ότι είναι 27%, αλλά επειδή οι χώρες αυτές παράγουν το 44% των συνολικών ΑΣΑ στον κόσμο, η απόλυτη ποσότητα οργανικών αποβλήτων είναι μεγαλύτερη από αυτή οποιασδήποτε άλλης ομάδας.

Η ταχεία πληθυσμιακή ανάπτυξη και η αστικοποίηση που αναμένονται στις χώρες χαμηλού εισοδήματος στο εγγύς μέλλον θα οδηγήσουν σε τεράστια αύξηση του όγκου των αστικών απορριμμάτων που παράγονται. Ένα μεγάλο μέρος αυτού θα είναι οργανικά απόβλητα, τα οποία θα οδηγήσουν σε σημαντική αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου εάν απορριφθούν ή αφεθούν να αποσυντεθούν. Η αποσύνθεση των αποβλήτων μετά την κατανάλωση αντιπροσωπεύει το 5% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Η διάσπαση οργανικών αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής αποτελεί μείζονα παράγοντα, υπεύθυνο για το 12% των παγκόσμιων εκπομπών μεθανίου, ένα αέριο με αποτύπωμα στο φαινόμενο θερμοκηπίου 28 φορές μεγαλύτερο από αυτό του διοξειδίου του άνθρακα (IPCC, 2014). Στις αναδυόμενες χώρες, το 80% των συλλεχθέντων αποβλήτων απορρίπτεται σε ανοικτές χωματερές ή σε χώρους μη υγειονομικής ταφής.

Αντί να επιστρέφουν στο έδαφος, τα θρεπτικά συστατικά σε αυτά τα ρεύματα αποβλήτων δεν ανακτώνται. Για παράδειγμα, μεταξύ της ΕΕ-27, το 70% του φωσφόρου στην λυματολάσπη και τα βιοαποικοδομήσιμα στερεά απόβλητα δεν ανακτάται. (EMF et al, 2015).

Εάν μια αξία μπορούσε να συνδεθεί με τους πόρους των λυμάτων, η ιδέα της επεξεργασίας των λυμάτων θα μετατοπιζόταν από ένα ακριβό κέντρο κόστους σε ένα «εργοστάσιο πόρων» που δημιουργεί κέρδη, το οποίο δημιουργεί μια ποικιλία χρήσιμων τελικών προϊόντων. «Τα λύματα είναι η μεγαλύτερη αναξιοποίητη κατηγορία αποβλήτων - τόσο μεγάλη όσο όλες οι κατηγορίες στερεών αποβλήτων που λαμβάνονται από κοινού. Είναι ένα φυσικό σημείο εκκίνησης για την κυκλική επανάσταση», δηλώνει ο Martin Stuchtey στο 'Επανεξέταση του υδάτινου κύκλου' (Stuchtey, M, 2015). Στην κυκλική οικονομία, η ροή των βιολογικών θρεπτικών ουσιών μπορεί να θεωρηθεί ως μια σειρά από βαθμιαία στάδια εξαγωγής αξίας. Με παρόμοιο τρόπο, τα λύματα θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ένα πλούσιο μίγμα ενέργειας, άνθρακα, αζώτου, φωσφόρου και άλλων συστατικών που παράγουν διαφορετικά προϊόντα σε διαφορετικά στάδια. Το τελικό και συχνά πολύτιμο προϊόν θα είναι καθαρό νερό, το οποίο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ή να επιστρέψει με ασφάλεια στην βιόσφαιρα. Μια ουσιαστική ανάλυση που διενεργήθηκε από την Επιτροπή Πράσινης Κορδέλας (Strucker, A, 2016) ως προς την ετήσια παραγωγή λυμάτων του Άμστερνταμ (με

πληθυσμό πόλης περίπου 800.000 κατοίκους) καταδεικνύει τη δυνητική αξία των αστικών λυμάτων:

- Νερό - 72 εκατομμύρια κυβικά μέτρα (2 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα στην Ολλανδία)
- Οργανική ύλη - 40,041 τόνοι
- Φώσφορος - 577 τόνοι
- Άζωτο - 4,140 τόνοι
- Βαρέα μέταλλα - 28,8 τόνοι
- Φαρμακευτικά προϊόντα – 3,1 τόνοι

Παγκοσμίως, οι πόλεις έχουν τεράστιο υδάτινο «αποτύπωμα» - συλλογικά κινούν περίπου 430 δισεκατομμύρια λίτρα την ημέρα μέσω σωλήνων και υδραγωγείων συνολικού μήκους πάνω από 27000 χιλιόμετρα. Ενώ οι πόλεις καταλαμβάνουν μόνο το 1% του εδάφους στον πλανήτη μας, οι υδρολογικές λεκάνες που τους παρέχουν νερό καλύπτουν περίπου το 41%. Για παράδειγμα, η λεκάνη απορροής της Νέας Υόρκης είναι 5200 τετραγωνικά χιλιόμετρα, με μερικές ποσότητες νερού να διανύουν πάνω από 160 χιλιόμετρα μέσω τεράστιων υδραγωγείων πριν εισέλθουν στο σύστημα ύδρευσης της πόλης. Το νερό που τροφοδοτεί το Λος Άντζελες της Καλιφόρνιας διανεύει 370 χιλιόμετρα από την πηγή στην πόλη (Morlet et al., 2017)

3.1 Ο ΒΙΟΚΥΚΛΟΣ ΣΕ ΜΙΑ ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΣΤΑ ΜΕΓΑΛΑ ΑΣΤΙΚΑ ΚΕΝΤΡΑ

Οι πόλεις λειτουργούν ως χώρος συγκέντρωσης οργανικού υλικού, με την ανισορροπία μεταξύ εισρών και εκρών να οδηγούν στη δημιουργία θετικού ισοζυγίου οργανικού υλικού. Αν και αυτό κάνει τις πόλεις πηγή μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων και αρνητικών εξωτερικών επιδράσεων στο σημερινό οικονομικό μοντέλο, αυτές οι ροές πόρων θα προλαμβάνονταν και θα αξιοποιούνταν στο μοντέλο της κυκλικής οικονομίας. Τελικά, μια πόλη πρέπει να λειτουργήσει σαν ένα οικοσύστημα, παρέχοντας υπηρεσίες που δεν διαχωρίζονται από το κοντινό περιβάλλον. Οι πόλεις παρουσιάζουν μια σημαντική ευκαιρία για την εφαρμογή κυκλικών αρχών στην οικονομία των βιοκύκλων λόγω των χαρακτηριστικών τους, τα οποία περιλαμβάνουν μεγάλη κλίμακα προσφοράς, υψηλή εγγύτητα μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών και εξοικειωμένο με την τεχνολογία εργατικό δυναμικό.

Σε ένα κυκλικό σύστημα, όλα τα θρεπτικά συστατικά θα επέστρεφαν στη βιόσφαιρα με τον κατάλληλο τρόπο. Στο αστικό περιβάλλον, αυτό σημαίνει ότι τα θρεπτικά συστατικά δεσμεύονται μέσα από το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ και από τις ροές των λυμάτων και υπόκεινται επεξεργασία ώστε να επιστρέφονται στο έδαφος σε μορφές όπως το οργανικό λίπασμα. Η ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών μετά την κατανάλωση, σε συνδυασμό με

τις ανανεωτικές γεωργικές πρακτικές, θα μείωνε την ανάγκη θρεπτικών συστατικών από μη ανανεώσιμες πηγές, όπως συνθετικά λιπάσματα. Όλα αυτά θα συμβάλουν στην ανάπτυξη ενός αναγεννητικού θρεπτικού κύκλου.

Μια κυκλική πόλη θα λειτουργούσε αποκλειστικά με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ενέργεια που θα παραγόταν από τα υποπροϊόντα επεξεργασίας ανακτηθέντων αστικών οργανικών αποβλήτων θα μπορούσε να συνδυαστεί με άλλες ανανεώσιμες τεχνολογίες, όπως οι ηλιακές φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις και ο άνεμος. Όπως είδαμε παραπάνω, το γενικό πλαίσιο μιας κυκλικής οικονομίας διακρίνει δύο διαφορετικούς κύκλους υλικών: τους βιολογικούς και τους τεχνικούς, όπου στους πρώτους ανήκουν τα υλικά που μπορούν να εισέλθουν και να βγουν με ασφάλεια από τη βιόσφαιρα. Οι ευκαιρίες για μετατόπιση σε ένα κυκλικό μοντέλο, και οι μηχανισμοί για την επίτευξη αυτού του στόχου έχουν μείνει σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητες στην οικονομία των βιοκύκλων.

Πόλεις σε όλο τον κόσμο έχουν αρχίσει να εφαρμόζουν προγράμματα για την ανάκτηση και την αξιοποίηση οργανικών υλικών, όπως εκείνα που απαντώνται στα απορρίμματα τροφίμων και στις ροές των λυμάτων. Ωστόσο, οι προσεγγίσεις για την ανάκτηση και οι όγκοι του ανακτηθέντος υλικού ποικίλλουν σημαντικά. Είναι σαφές ότι υπάρχει μια σημαντική ευκαιρία για την αύξηση της ανάκτησης οργανικών υλικών σε όλους τους τομείς. Καλά σχεδιασμένα και άρτια οργανωμένα συστήματα συλλογής και ανάκτησης αποβλήτων έχουν αποδειχθεί ότι αιχμαλωτίζουν πάνω από το 85% των παραγόμενων οργανικών αποβλήτων. Ωστόσο, οι μέσες τιμές είναι στην πραγματικότητα πολύ κάτω από αυτό. Στις χώρες του ΟΟΣΑ, μόνο 66 εκατομμύρια τόνοι οργανικών αποβλήτων ή 37% των περίπου 180 εκατομμυρίων τόνων που δημιουργήθηκαν το 2013, είτε κομποστοποιήθηκαν είτε υποβλήθηκαν σε αναερόβια χώνευση. (Morlet et al., 2017).

Αν και οι δήμοι θεωρούν σήμερα ότι η διαχείριση των οργανικών αποβλήτων αποτελεί κόστος, θα μπορούσε να αποτελέσει ελκυστική πηγή εσόδων. Μια μελέτη του 2013 του Ίδρυμα Ellen MacArthur, με ανάλυση από την McKinsey & Co., υπογράμμισε από δύο προοπτικές την πιθανή αξία που θα μπορούσε να προκύψει από την επεξεργασία των αποβλήτων τροφίμων με αναερόβια χώνευση: άμβλυνση του προβλήματος της απότομης αύξησης του κόστους υγειονομικής ταφής, καθώς και είσπραξη εσόδων από πωλήσεις παραγωγών προϊόντων και επιδοτήσεων για παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, θα μπορούσε να επιτευχθεί ένα εκτιμώμενο λειτουργικό κέρδος έως 172 δολαρίων ανά τόνο, συμπεριλαμβανομένων 26 δολαρίων από την ηλεκτρική ενέργεια, 18 δολαρίων από τη παραγωγή θερμότητας και 6 δολαρίων από την παραγωγή λιπάσματος. Το τιμολόγιο τροφοδοσίας λήφθηκε στα 64 δολάρια, το κόστος αποφυγής των υγειονομικών ταμείων στα 105 δολάρια και εκτιμήθηκε ένα περιθώριο των 45 δολαρίων για τη διαλογή και την επεξεργασία. (EMF, 2013).

Από το 1995, το Μιλάνο της Ιταλίας συνεργάστηκε με μεγάλους παραγωγούς - όπως εστιατόρια, κυλικεία και παντοπωλεία - για να θεσπίσει το 2012, χωριστή συλλογή οργανικών στερεών αποβλήτων από νοικοκυριά. Το πρόγραμμα συλλογής καλύπτει τώρα

ολόκληρο τον πληθυσμό της πόλης και ανακτά πάνω από 130.000 τόνους οργανικών στερεών αποβλήτων ετησίως, περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη πόλη στον κόσμο με πληθυσμό άνω του 1 εκατομμυρίου. (Milano Recycle City, 2015). Το συλλεγόμενο υλικό χρησιμοποιείται ως εισροή για την αναερόβια χώνευση και για την παραγωγή βιοαερίου και κομπόστ.

Σε άλλες πόλεις, η χωριστή συλλογή οργανικών αποβλήτων βρίσκεται ακόμα στα πρώιμα στάδια της ανάπτυξης. Η Νέα Υόρκη έχει ιδρύσει ένα πιλοτικό πρόγραμμα συλλογής οργανικών προϊόντων από το 2013, το οποίο εξυπηρετεί σήμερα περίπου 270.000 νοικοκυριά. Δύο χρόνια μετά την έναρξη της διαδικασίας, συλλέχθηκαν 15.850 τόνοι οργανικού υλικού, σχεδόν το 7% των 2.2 εκατομμυρίων τόνων που παράχθηκαν κατά την ίδια περίοδο. Το πρόγραμμα αυτό συνεχίζει να αυξάνεται, με στόχο την επίτευξη μηδενικών αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής έως το 2030 (City of New York, 2015). Ωστόσο, ο ρυθμός ανάκτησης των οργανικών υλικών στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι χαμηλός, ενώ ο συντελεστής για τα απόβλητα τροφίμων είναι μόλις 4,8%. Πολλές πόλεις δεν διαθέτουν προγράμματα για την ανάκτηση οργανικών αποβλήτων καθόλου. Ομοίως, στο Ηνωμένο Βασίλειο το 41% των τοπικών αρχών δεν διαθέτουν σύστημα συλλογής απορριμμάτων τροφίμων (WRAP, 2018).

Τα ρεύματα αστικών αποβλήτων αποτελούν σημαντική ευκαιρία για ανάκτηση των θρεπτικών ουσιών και την επιστροφή τους στο έδαφος. Θεωρητικά, η ανάκτηση του 100% του αζώτου, του φωσφόρου και του καλίου στα παγκόσμια ρεύματα αποβλήτων τροφίμων, ζώων και ανθρώπων θα μπορούσε να συνεισφέρει σχεδόν 2,7 φορές τις θρεπτικές ουσίες που περιέχονται στον όγκο των χημικών λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα (EMF, 2013). Λύσεις και τεχνολογίες υπάρχουν ήδη και εφαρμόζονται σε διάφορες τοποθεσίες και σε διαφορετικές κλίμακες σε όλο τον κόσμο. Τέτοιες λύσεις περιλαμβάνουν την κομποστοποίηση ή την κυρίως αερόβια, βιολογική αποσύνθεση των οργανικών υλικών. Σε αυτή τη διαδικασία, οργανισμοί όπως τα σαλιγκάρια, τα σκουλήκια, οι μύκητες και τα βακτήρια συμβάλλουν στη μεταμόρφωση του υλικού με την πάροδο του χρόνου σε χούμο, ένα κρίσιμο συστατικό του υγιούς, εύφορου εδάφους. Μια άλλη λύση είναι η αναερόβια χώνευση, στην οποία οι μικροοργανισμοί διασπούν το βιοαποικοδομήσιμο υλικό απουσία οξυγόνου. Είναι αποτελεσματική στην παραγωγή οργανικών λιπασμάτων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά και οργανική ύλη, καθώς και για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Το κομπόστ και το χωνεμένο προϊόν διαφέρουν ως προς την περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά και τη διαθεσιμότητα αυτών των θρεπτικών ουσιών για απορρόφηση από καλλιέργειες. Τα οφέλη από την εφαρμογή κομποστοποίησης υψηλής ποιότητας στο έδαφος έχουν τεκμηριωθεί ευρέως, περιλαμβάνουν την αύξηση της οργανικής ύλης στο έδαφος, τη βελτίωση της κατακράτησης νερού και την αύξηση της βιολογικής δραστηριότητας. Συγκριτικά λιγότερο καλά χαρακτηρισμένοι είναι οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της εφαρμογής της χωνεμένης ιλύος, μιας πλούσιας σε θρεπτικά ουσίας ουσίας που παραμένει μετά την αναερόβια χώνευση, στην οργανική ύλη και τη δομή του εδάφους. Γενικά, το

κομπόστ θεωρείται ότι έχει ανώτερες εδαφοβελτιωτικές ιδιότητες, ενώ η χωνεμένη ιλύς είναι πιο κατάλληλη ως βιολίπασμα (ISWA, 2015).

Πολλές πόλεις σε ολόκληρο τον κόσμο χρησιμοποιούν αυτές τις διεργασίες για την επεξεργασία συλλεγέντων οργανικών αποβλήτων, με λύσεις που κυμαίνονται από ατομικά και κοινοτικά προγράμματα κομποστοποίησης σε εγκαταστάσεις αναερόβιας χώνευσης μεγάλης κλίμακας. Παραδείγματα περιλαμβάνουν την πόλη της Αδελαΐδας της Αυστραλίας, η οποία κομποστοποιεί περίπου το 70% των οργανικών αποβλήτων της και το Compost Project της Νέας Υόρκης, το οποίο παρέχει εκπαιδευτικό υλικό για την ενθάρρυνση της οικιακής κομποστοποίησης και έχει δημιουργήσει τοποθεσίες απόθεσης για κοινοτική κομποστοποίηση (Morlet et al., 2017).

Ένα άτομο παράγει κάθε χρόνο 500 λίτρα ούρων και περιττωμάτων. Καθώς το ανθρώπινο σώμα δεν μπορεί να απορροφήσει όλα τα θρεπτικά συστατικά από τα καταναλωμένα τρόφιμα, τα αποβαλλόμενα απόβλητα είναι γεμάτα πολύτιμο υλικό. Σε μια μελέτη του 2001, οι Ελβετοί αναλυτές εκτιμούν ότι εάν το 100% αυτών των θρεπτικών ουσιών μπορούσαν να συλλεχθούν στα οικιακά λύματα, θα μπορούσαν να ανακτηθούν συνολικά σχεδόν 30 εκατομμύρια τόνοι αζώτου, 5 εκατομμύρια τόνοι φωσφόρου και 12 εκατομμύρια τόνοι κάλιο, αντιπροσωπεύοντας περίπου το ένα τρίτο της συνολικής ετήσιας παγκόσμιας ζήτησης για λίπασμα (Smil, 2011). Ο Οργανισμός Επιστημονικής και Βιομηχανικής Έρευνας της Κοινοπολιτείας στην Αυστραλία διαπίστωσε ότι «για μια πόλη τεσσάρων εκατομμυρίων ανθρώπων, η συνολική αξία του άνθρακα, της αμμωνίας και του φωσφόρου που θα μπορούσε να ανακτηθεί θα ανερχόταν σε 300 εκατομμύρια δολάρια ετησίως.» (EMF, 2012).

Τα φωσφορικά λιπάσματα είναι απαραίτητα για την αντικατάσταση του φωσφόρου που απομακρύνεται από το έδαφος. Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται, η ζήτηση αυξάνεται σταθερά, το οποίο συνεπάγεται περισσότερες καλλιέργειες και μεγαλύτερη κατανάλωση κρέατος (το οποίο έχει μεγαλύτερο «αποτύπωμα φωσφόρου» από τα λαχανικά). Στο παρελθόν, ο κύκλος του φωσφόρου ήταν κλειστός. Οι άνθρωποι και τα ζώα κατανάλωναν τα τρόφιμα και αποβάλλαν περιττώματα, τα οποία επέστρεφαν στο έδαφος, εμπλουτίζοντάς το και συμβάλλοντας στην ανάπτυξη νέων καλλιεργειών. Με την αλλαγή των δημογραφικών στοιχείων, τις αναπτυσσόμενες πόλεις και τη «σύγχρονη επεξεργασία λυμάτων», ο κύκλος αυτός έχει σπάσει. Τα θρεπτικά συστατικά δεν επιστρέφονται στο έδαφος, αλλά συχνά καταλήγουν σε φυσικά υδατικά συστήματα που προκαλούν ζημιά στα υδρόβια οικοσυστήματα. Ενώ οι εμπειρογνώμονες διαφωνούν ως προς το ύψος των φυσικών αποθεμάτων φωσφορικών, οι περισσότεροι συμφωνούν ότι μειώνονται (ο Οργανισμός Γεωλογικής Έρευνας των Ηνωμένων Πολιτειών υπολογίζει ότι παραμένουν αποθέματα φωσφόρου για 80 χρόνια (MIT, Mission 2016)). Χαρακτηριστική συνέπεια αποτελεί η τιμή του φωσφόρου, η οποία ήταν πολύ ασταθής τα τελευταία χρόνια. Το 2008, αυξήθηκε κατά δέκα τάξεις μέσα σε λίγους μόνο μήνες.

Μια πιο ολιστική προσέγγιση του φωσφόρου απαιτείται για να κλείσει ο βρόχος μεταξύ των τροφίμων, των ανθρώπων και των εδαφών και να αποφευχθεί η διαρροή σε υδατικά

συστήματα. Η ανάκτηση του φωσφόρου από τα λύματα θα μπορούσε να αποτελέσει μέρος αυτής της λύσης.

Ακολουθεί πίνακας όπου παρουσιάζονται τα προϊόντα που μπορούν να εξαχθούν από τα λύματα, σε συνδυασμό με την χρησιμότητά τους.

Πίνακας 1 – Προϊόντα που μπορούν εξαχθούν από τα λύματα

ΕΙΔΟΣ	ΠΡΟΪΟΝΤΑ	ΧΡΗΣΕΙΣ
Νερό	Πόσιμο και μη πόσιμο νερό	Βιομηχανική, ψυκτικό νερό, άρδευση, γεωργία, υδατοκαλλιέργεια
Άζωτο και φώσφορος	Φωσφορικά άλατα, απορρυπαντικά, φωσφορικό οξύ	Λίπασμα
Ενέργεια	Βιοαέριο	Παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού
Επεξεργασμένη υλός	Βιοστερεά, οργανικό κονίαμα, οργανικός ξυλάνθρακας	Εδαφοβελτιωτικό, αποκατάσταση εδαφών, κατασκευαστικά υλικά, θρεπτικά στοιχεία
Κυτταρίνη	Ανακυκλωμένη κυτταρίνη	Πλαστικά, μόνωση, χαρτόνι, κατασκευές
Άλγη	Βιοκαύσιμο, αλγινικά άλατα	Καύσιμα, ζωοτροφές, βιομηχανία χαρτιού, φαρμακευτική, καλλυντική
Εμπορικά χημικά	Ηλεκτρικό οξύ, οξικός αιθυλεστέρας, οξικός μεθυλεστέρας, βουτυρικό οξύ	Βασικά χημικά σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς
Πληροφορία	Βάσεις δεδομένων δημόσιας υγείας	Πρόβλεψη έξαρσης νόσων, υγεία γειτονιάς

3.2 ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΈΝΩΣΗ



Εικόνα 2 - Σχηματική αναπαράσταση της κυκλικής οικονομίας (Εθνικό Κέντρο Τεκμηρίωσης, 2019)

Η πρώτη προσπάθεια ενσωμάτωσης των αρχών της κυκλικής οικονομίας στις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποτελεί η νομοθετική πρόταση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής το 2014 στο θέμα των αποβλήτων, με τίτλο [«Προς μια κυκλική οικονομία: πρόγραμμα μηδενικών αποβλήτων για την Ευρώπη»](#), όπου διατυπώνεται η ανάγκη αποσύνδεσης της οικονομικής ανάπτυξης από την χρήση των πόρων μέσω της διατήρησης της προστιθέμενης αξίας αυτών και της εξάλειψης των αποβλήτων και τίθενται στόχοι μείωσης των παραγόμενων αποβλήτων. Λόγω της αποσπασματικής αντιμετώπισης του οικονομικού κύκλου, η πρόταση αποσύρθηκε, αλλά το 2015 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε ένα ολοκληρωμένο Σχέδιο Δράσης για την κυκλική οικονομία, με τίτλο [«Το κλείσιμο του κύκλου – Ένα σχέδιο δράσης της ΕΕ για την κυκλική οικονομία»](#), το οποίο έθετε απτά προγράμματα δράσης που περιλαμβάνουν όλο τον οικονομικό κύκλο: από την παραγωγή και την κατανάλωση ως τη διαχείριση των αποβλήτων και την αγορά των δευτερογενών πόρων, σε συνδυασμό με αναθεωρημένη νομοθετική πρόταση για τα απόβλητα. Το πρόγραμμα φιλοδοξούσε να ωθήσει την μετάβαση στην κυκλική οικονομία, να ενισχύσει την ανταγωνιστικότητα, να δημιουργήσει βιώσιμη οικονομική ανάπτυξη και να δημιουργήσει νέες θέσεις εργασίας. Περιλάμβανε 54 δράσεις που αποσκοπούσαν στην μετάβαση σε βιωσιμότερο μοντέλο οικονομικής ανάπτυξης, χρηματοδοτούμενες από το πρόγραμμα Ορίζον 2020.

Το 2018 εγκρίθηκε το [αναθεωρημένο νομοθετικό πλαίσιο για τα απόβλητα](#). Έθεσε καθαρούς στόχους για την μείωση των αποβλήτων και έβαλε τα θεμέλια για τη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων και την ανακύκλωση. Βασικοί στόχοι του παρουσιάζονται παρακάτω:

- Κοινός στόχος της ΕΕ για ανακύκλωση του 65% των αστικών αποβλήτων έως το 2035
- Κοινός στόχος της ΕΕ για ανακύκλωση του 70% των απορριμμάτων συσκευασίας έως το 2035, και συγκεκριμένα:
 - Χαρτί και χαρτόνι: 85%
 - Μεταλλικά σιδηρούχα μέταλλα: 80%
 - Αλουμίνιο: 60%
 - Γυαλί: 75%
 - Πλαστικό: 55%
 - Ξύλο: 30%
- Ένας δεσμευτικός στόχος μείωσης της υγειονομικής ταφής σε μέγιστο ποσοστό ίσο με 10% των αστικών αποβλήτων έως το 2035.
- Οι υποχρεώσεις χωριστής συλλογής ενισχύονται και επεκτείνονται στα επικίνδυνα οικιακά απόβλητα (μέχρι το τέλος του 2022), βίο-απόβλητα (μέχρι το τέλος του 2023) και στα προϊόντα κλωστοϋφαντουργίας (μέχρι το τέλος του 2025).
- Καθορίζονται ελάχιστες απαιτήσεις για διευρυμένα συστήματα ευθύνης του παραγωγού για τη βελτίωση της διακυβέρνησής τους και της οικονομικής αποδοτικότητάς τους.
- Οι στόχοι πρόληψης ενισχύονται σημαντικά, και ειδικότερα απαιτούν από τα Κράτη Μέλη να λάβουν ειδικά μέτρα για την αντιμετώπιση των αποβλήτων τροφίμων και των θαλάσσιων απορριμμάτων ως συμβολή στην επίτευξη των δεσμεύσεων της ΕΕ έναντι των [Στόχων Αειφόρου Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών](#).

Το 2018, στα πλαίσια του σχεδίου δράσης για την Κυκλική Οικονομία, πάρθηκαν επιπλέον πολλές πρωτοβουλίες από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Η ανακοίνωση της Επιτροπής για την [«Ευρωπαϊκή στρατηγική για τις πλαστικές ύλες σε μια κυκλική οικονομία»](#) αποσκοπεί στην μεταμόρφωση του τρόπου με τον οποίο τα πλαστικά και τα πλαστικά προϊόντα σχεδιάζονται, παράγονται, χρησιμοποιούνται και ανακυκλώνονται. Σύμφωνα με αυτή, όλες οι πλαστικές συσκευασίες πρέπει να είναι ανακυκλώσιμες μέχρι το 2030, και για την επίτευξη αυτού του στόχου προτείνονται ενέργειες για την βελτίωση των οικονομικών και τις ποιότητας της ανακύκλωσης πλαστικού, για τον περιορισμό των πλαστικών απορριμμάτων, για την αύξηση των επενδύσεων και την προώθηση της καινοτομίας, καθώς και για την εκμετάλλευση της παγκόσμιας δράσης.

Για τον περιορισμό της απόρριψης πλαστικού στο περιβάλλον, η Επιτροπή έχει υιοθετήσει και μια νέα (2018) [πρόταση σχετικά με τις λιμενικές εγκαταστάσεις παραλαβής για την παράδοση αποβλήτων](#), προκειμένου να αντιμετωπίσει τη θαλάσσια ρύπανση. Η παραπάνω πρόταση συνοδεύτηκε από την πρόταση [«σχετικά με τη μείωση των επιπτώσεων ορισμένων πλαστικών προϊόντων στο περιβάλλον»](#), όπου προτείνονται διαφορετικά μέτρα για συγκεκριμένα αντικείμενα που κατασκευάζονται από πλαστικά μιας χρήσης, λαμβάνοντας υπόψιν την καταναλωτική συμπεριφορά, καθώς και τις ανάγκες του καταναλωτή και επιχειρηματικές ευκαιρίες.














Η ανακοίνωση [«σχετικά με την εφαρμογή της δέσμης μέτρων για την κυκλική οικονομία: επιλογές σχετικά με τα θέματα διεπαφής μεταξύ της νομοθεσίας για τα χημικά, τα προϊόντα και τα απόβλητα»](#), αξιολογεί πως σχετίζονται οι κανόνες για τα απόβλητα, τα προϊόντα και τα χημικά.

Στα πλαίσια του σχεδίου δράσης για την κυκλική οικονομία, έχει δημιουργηθεί ένα [«πλαίσιο παρακολούθησης για την κυκλική οικονομία»](#), σε επίπεδο ΕΕ και εθνικό. Αποτελείται από ένα σύνολο δέκα βασικών δεικτών οι οποίοι καλύπτουν κάθε φάση της κυκλικής οικονομίας, όπως παραγωγή, κατανάλωση, διαχείριση αποβλήτων και δευτερογενείς πρώτες ύλες, καθώς επίσης και οικονομικές πτυχές, επενδύσεις, θέσεις εργασίας και καινοτομία. Οι παραπάνω δείκτες και τα δεδομένα στα οποία βασίζονται είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα της EUROSTAT.















Εικόνα 3 – Κατηγορίες δεικτών κυκλικής οικονομίας (EC, Eurostat, 2019)

Ακολουθεί σύγκριση μεταξύ των δεικτών της ΕΕ και της Ελλάδας.

 Production and consumption		
Indicator	Value	Trend
① EU self-sufficiency for raw materials (percentage)  	36.4 [2016]	N/A
① Green public procurement	N/A	N/A
Waste generation		
① Generation of municipal waste per capita (Kg per capita)  	486 [2017]	
① Generation of waste excluding major mineral wastes per GDP unit (Kg per thousand euro, chain linked volumes (2010))  	65 [2016]	
① Generation of waste excluding major mineral wastes per domestic material consumption (percentage)  	13.5 [2016]	
① Food waste (million tonne)	80 [2016]	

Εικόνα 4 - Δείκτες παραγωγής και κατανάλωσης σε επίπεδο ΕΕ (EC, Eurostat, 2019)


 Production and consumption		
Indicator	Value	Trend
① EU self-sufficiency for raw materials (percentage)  	N/A	N/A
① Green public procurement	N/A	N/A
Waste generation		
① Generation of municipal waste per capita (Kg per capita)  	504 [2017]	
① Generation of waste excluding major mineral wastes per GDP unit (Kg per thousand euro, chain linked volumes (2010))  	78 [2016]	
① Generation of waste excluding major mineral wastes per domestic material consumption (percentage)  	11.5 [2016]	
① Food waste (million tonne)	N/A	N/A

Εικόνα 5 - Δείκτες παραγωγής και κατανάλωσης σε εθνικό επίπεδο (EC, Eurostat, 2019)

Ως προς τους δείκτες παραγωγής και κατανάλωσης, παρατηρείται παρόμοια παραγωγή αποβλήτων, τόσο σε επίπεδο ΕΕ, όσο και σε εθνικό επίπεδο.

 Waste Management		
Indicator	Value	Trend
Recycling rates		
ⓘ Recycling rate of municipal waste (percentage)  	46.4 [2017]	
ⓘ Recycling rate of all waste excluding major mineral waste (percentage)  	57 [2016]	
Recycling / recovery for specific waste streams		
ⓘ Recycling rate of overall packaging (percentage)  	67.2 [2016]	
ⓘ Recycling rate of plastic packaging (percentage)  	42.4 [2016]	
ⓘ Recycling rate of wooden packaging (percentage)  	39.8 [2016]	
ⓘ Recycling rate of e-waste (percentage)  	41.2 [2016]	
ⓘ Recycling of biowaste (kg per capita)  	81 [2017]	
ⓘ Recovery rate of construction and demolition waste (percentage)  	89 [2016]	

Εικόνα 6 - Δείκτες διαχείρισης λυμάτων σε επίπεδο ΕΕ (ΕC, Eurostat, 2019)

 Waste Management		
Indicator	Value	Trend
Recycling rates		
① Recycling rate of municipal waste (percentage)  	18.9 [2017]	
① Recycling rate of all waste excluding major mineral waste (percentage)  	N/A	N/A
Recycling / recovery for specific waste streams		
① Recycling rate of overall packaging (percentage)  	66.1 [2016]	
① Recycling rate of plastic packaging (percentage)  	38.2 [2016]	
① Recycling rate of wooden packaging (percentage)  	21.9 [2016]	
① Recycling rate of e-waste (percentage)  	34.2 [2016]	
① Recycling of biowaste (kg per capita)  	21 [2017]	
① Recovery rate of construction and demolition waste (percentage)  	88 [2016]	

Εικόνα 7 - Δείκτες διαχείρισης αποβλήτων σε εθνικό επίπεδο (EC, Eurostat, 2019)

Ως προς τη διαχείριση των αποβλήτων, παρατηρείται ότι η Ελλάδα δεν καταφέρνει να ακολουθήσει την αποδοτικότητα στη διαχείριση σε επίπεδο ΕΕ, με κάποιες κατηγορίες να παρουσιάζουν ιδιαίτερα αρνητική επίδοση. Πιο συγκεκριμένα, η Ελλάδα παρουσιάζει σημαντικά μειωμένο ποσοστό ανακύκλωσης αστικών αποβλήτων, με ποσοστό 18,9% των παραγόμενων έναντι του 46,4% της ΕΕ, ενώ ως προς την ανακύκλωση / ανάκτηση για συγκεκριμένες ροές υλικών, η Ελλάδα υπολείπεται ιδιαίτερα στο ποσοστό ανακύκλωσης ξύλινων συσκευασιών (21,9% έναντι 39,8%), ηλεκτρονικών αποβλήτων (34,2% έναντι 41,2%) και βιοαποβλήτων (21% έναντι 81%). Η διαφορά στην επίδοση στο ποσοστό ανακύκλωσης βιοαποβλήτων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς πρόκειται για το ποσοστό των βιοαποβλήτων που κομποστοποιούνται ή υπόκεινται σε αναερόβια επεξεργασία για την παραγωγή βιοαερίου και έτσι εντάσσονται στην κυκλική οικονομία.



Εικόνα 8- Δείκτες ανταγωνιστικότητας και καινοτομίας σε επίπεδο ΕΕ (EC, Eurostat, 2019)



Εικόνα 9 - Δείκτες ανταγωνιστικότητας και καινοτομίας σε εθνικό επίπεδο (EC, Eurostat, 2019)

Η εικόνα της Ελλάδας ως προς την ανταγωνιστικότητα και την καινοτομία του τομέα της κυκλικής οικονομίας σε σχέση με την ΕΕ κρίνεται αρνητική. Η ακαθάριστη επένδυση σε υλικά αγαθά που σχετίζονται με την κυκλική οικονομία ως ποσοστό του ΑΕΠ είναι πολύ μικρότερη

από αυτή της ΕΕ (0,04% έναντι 0,12%), καθώς και η προστιθέμενη αξία σε τιμές κόστους συντελεστών παραγωγής (τα ακαθάριστα έσοδα από τις δραστηριότητες λειτουργίας μετά τη διόρθωση προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι επιδοτήσεις λειτουργίας και οι έμμεσοι φόροι) ως προς το ΑΕΠ (0,5% έναντι 0,98%). Τέλος, ο αριθμός των ευρεσιτεχνιών που σχετίζονται με την ανακύκλωση και τις δευτερογενείς πρώτες ύλες ανά κάτοικο είναι σημαντικά μικρότερος από αυτόν σε επίπεδο ΕΕ.

Επιπλέον, η Επιτροπή έχει συντάξει [«Έκθεση σχετικά με τις κρίσιμες πρώτες ύλες και την κυκλική οικονομία»](#), όπου υπογραμμίζει τις προοπτικές της αύξησης της κυκλικότητας 27 κρίσιμων για την οικονομία πρώτων υλών.

Σημαντική στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας είναι και η πρόταση για [«Ρύθμιση στις ελάχιστες προδιαγραφές για επαναχρησιμοποίηση νερού»](#), όπου τίθενται οι ελάχιστες προδιαγραφές για την προώθηση της αποτελεσματικής, ασφαλούς και οικονομικά αποδοτικής χρήσης του νερού για άρδευση, όπως προκύπτει από το σχέδιο δράσης της κυκλικής οικονομίας.

Τον Μάρτιο του 2019 η Επιτροπή ανακοίνωσε ότι το Σχέδιο Δράσης για την Κυκλική Οικονομία ολοκληρώθηκε. Στην σχετική έκθεση παρουσιάστηκαν κυριότερα επιτεύγματα στα πλαίσια του Σχεδίου Δράσης και σκιαγραφήθηκαν οι κυριότερες προκλήσεις για τη διαμόρφωση της οικονομίας και τη διάνοιξη του δρόμου προς μια κλιματικά ουδέτερη, κυκλική οικονομία όπου η πίεση στους φυσικούς πόρους και το διαθέσιμο γλυκό νερό, καθώς και στα οικοσυστήματα, ελαχιστοποιείται.

Παρά τα οφέλη που συνδέονται με την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων, δεν υπάρχει ακόμη ευρεία εφαρμογή των μεθόδων επαναχρησιμοποίησης λυμάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Raso, J., 2013). Οι μελέτες σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων δείχνουν ότι οι προκλήσεις για την εφαρμογή περισσότερων εφαρμογών επαναχρησιμοποίησης έγκεινται, μεταξύ άλλων, στο σχεδιασμό θεσμών και δομών διακυβέρνησης για την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων (Raso, J., 2013, Alcalde Sanz, L. et al, 2014, Frijns, J., 2016, Khatib, N.A. et al, 2017, Saldías, C. et al, 2015, Saldías, C. et al, 2015). Σε επίπεδο ΕΕ, δεν είχαν εφαρμοστεί κοινά πρότυπα ή κατευθυντήριες γραμμές για την ποιότητα της επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων έως πρόσφατα. Αντ' αυτού, τα κράτη μέλη αναμενόταν να υιοθετούν τις απαιτήσεις διαφόρων οδηγιών της ΕΕ που συσχετίζονται με τις εφαρμογές για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων λόγω ανησυχιών για την υγεία και το περιβάλλον (Alcalde Sanz, L. et al, 2014, Fawell, J. et al, 2016). Οι κύριες οδηγίες με συνέπειες στην επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων είναι η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα και η Οδηγία για την Επεξεργασία των Αστικών Λυμάτων. Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα θεσπίζει «ένα πλαίσιο δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων και αναγνωρίζει έμμεσα την επαναχρησιμοποίηση ως στρατηγική για την αύξηση της διαθεσιμότητας ύδατος, η οποία έτσι συμβάλλει στην καλή ποιότητα των υδατικών συστημάτων» (Fawell, J. et al, 2016). Η Οδηγία για την Επεξεργασία των Αστικών Λυμάτων αφορά την ποιότητα των λυμάτων που απορρίπτονται στα ύδατα υποδοχής και δηλώνει ότι "τα επεξεργασμένα λύματα πρέπει να

επαναχρησιμοποιούνται όποτε κρίνεται σκόπιμο" (EEC, 1991). Αυτό σημαίνει ότι η "επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων είναι αποδεκτή στο βαθμό που δεν παραβιάζει άλλη νομοθεσία της ΕΕ ή εθνικούς νόμους" (Fawell, J. et al, 2016). Άλλες οδηγίες που περιέχουν διατάξεις σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων περιλαμβάνουν την Οδηγία για τα Υπόγεια Ύδατα, την Οδηγία για το Πόσιμο Νερό, την Οδηγία για την Λυματολάσπη, την Οδηγία για τα Νιτρικά Άλατα, τη Θεματική Στρατηγική για την Προστασία του Εδάφους, την Οδηγία για τα Ύδατα Κολύμβησης, την Οδηγία για τα Ψάρια Γλυκού Νερού, την Οδηγία για τα Οικοσυστήματα και την Οδηγία για τις Βιομηχανικές Εκπομπές (Alcalde Sanz, L. et al, 2014). Είναι αξιοσημείωτο ότι καμία από τις οδηγίες "δεν έχει ως στόχο τη ρύθμιση ή την υποστήριξη της επαναχρησιμοποίησης νερού ως τέτοια" (Fawell, J. et al, 2016). Επιπλέον, η απουσία ύπαρξης κοινών κριτηρίων σε επίπεδο ΕΕ για τη διαχείριση των κινδύνων για την υγεία και το περιβάλλον που συνδέονται με την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων αποτελεί αιτία δυσπιστίας όσον αφορά την ασφάλεια των πρακτικών επαναχρησιμοποίησης των υδάτων και, ως εκ τούτου, ένα από τα κύρια εμπόδια για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων στην Ευρώπη (Fawell, J. et al, 2016, Alcalde Sanz, L. et al, 2017). Η Επιτροπή της ΕΕ επιδιώκει να ξεπεράσει αυτό το εμπόδιο προτείνοντας ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας της ΕΕ για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων στη γεωργική άρδευση και την ανανέωση του υδροφόρου ορίζοντα (Alcalde Sanz, L. et al, 2017). Ωστόσο, οι προτεινόμενες απαιτήσεις συζητούνται ακόμη (Rizzo, L., 2018) και δεν έχουν ακόμη γίνει νομικά δεσμευτικές (Maaß et al, 2018).

4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παγκόσμιο υδατικό σύστημα αντιμετωπίζει σήμερα προκλήσεις κλειδιά που χρίζουν αντιμετώπισης. Υποθέτοντας ότι ο τρόπος με τον οποίο το νερό θα χρησιμοποιείται, θα το διαχειριζόμαστε και θα διαμοιράζεται δε θα αλλάξουν σημαντικά στο μέλλον, η παγκόσμια ζήτηση γλυκού νερού θα υπερβεί τους βιώσιμους πόρους κατά 40% έως το 2030, ενώ μέχρι το 2050 η παραγωγή φαγητού θα χρειαστεί να αυξηθεί κατά 60% για να συμβαδίσει με τον αυξανόμενο πληθυσμό και η ζήτηση για νερό στη μεταποίηση αναμένεται να αυξηθεί κατά 400%. Η γεωργία είναι ο μεγαλύτερος χρήστης νερού ακολουθούμενη από τη βιομηχανία, σε βάρος της διαθεσιμότητας και της ποιότητας του νερού. Η κλιματική αλλαγή και η αύξηση των ρύπων θα μειώσουν περαιτέρω την ποιότητα και την ποσότητα των διαθέσιμων πόρων γλυκού νερού.

Παραδοσιακά, το νερό εξετάζεται με γραμμικό τρόπο. Η συνηθέστερα υιοθετημένη στρατηγική για το νερό είναι η «πρόσληψη-χρήση-απόρριψη», όπου:

1. Το νερό απομακρύνεται από το περιβάλλον (ρέματα, ποτάμια, λίμνες, δεξαμενές, ωκεανούς και υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες, βρόχινα ύδατα).
2. Το νερό χρησιμοποιείται από τη γεωργία, το δήμο, τις βιομηχανίες και το περιβάλλον για καταναλώσιμες και μη καταναλώσιμες χρήσεις.
3. Το μη καταναλισκόμενο χρησιμοποιημένο νερό «επιστρέφεται» στη λεκάνη απορροής απευθείας ή μέσω δημοτικής μονάδας επεξεργασίας. Ύστερα το νερό είτε θα χρησιμοποιηθεί περαιτέρω κατόπιν είτε θα χαθεί στη λεκάνη απορροής.

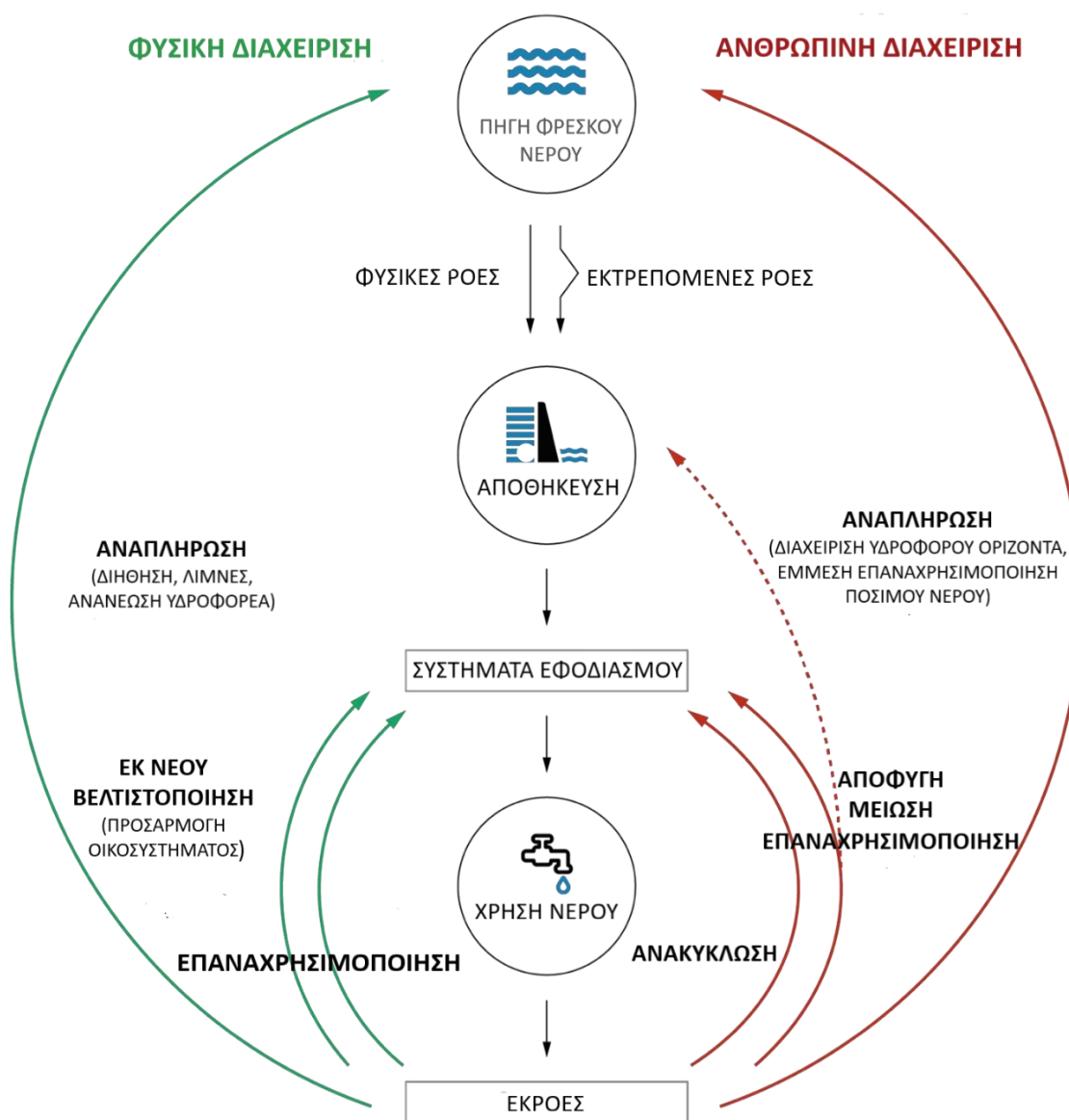
Αντικαθιστώντας το τρέχον γραμμικό και μη βιώσιμο μοντέλο με ένα κυκλικό, δύναται να δημιουργηθεί αξία από την επαναλαμβανόμενη χρήση μέσω κλειστών κυκλικών βρόχων και εξαγωγής πόρων. Ως αποτέλεσμα, το νερό αποτελεί πρωταρχικό στόχο για την εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Η σχέση μεταξύ της κυκλικής οικονομίας και της διαχείρισης των υδατικών συστημάτων περιλαμβάνει τις παρακάτω αρχές:

- Σχεδιασμός για αποφυγή των εξωτερικών επιπτώσεων των αποβλήτων, βελτιστοποιώντας την ποσότητα ενέργειας, ορυκτών και τη χρήση χημικών ουσιών κατά τη λειτουργία των υδατικών συστημάτων σε συνδυασμό με άλλα συστήματα, βελτιστοποιώντας την καταναλώσιμη χρήση του νερού και υποκαθιστώντας τις υπόλοιπες χρήσεις του νερού με ισοδύναμες λύσεις που δεν χρησιμοποιούν νερό.
- Διατήρηση της χρήσης των πόρων, βελτιστοποιώντας την απόδοση των πόρων (χρήση και επαναχρησιμοποίηση νερού, ενέργειας, ορυκτών και χημικών ουσιών) μέσα στα υδάτινα συστήματα, βελτιστοποιώντας την εξαγωγή ενέργειας ή πόρων

από τα υδατικά συστήματα και μεγιστοποιώντας την επαναχρησιμοποίηση τους και βελτιστοποιώντας την αξία που παράγεται στις διασυνδέσεις των υδάτινων συστημάτων με άλλα συστήματα.

- Αποκατάσταση του φυσικού κεφαλαίου μέσω της μεγιστοποίησης των περιβαλλοντικών ροών μειώνοντας τις καταναλισκόμενες και μη καταναλισκόμενες χρήσεις του νερού, της διατήρησης και ενίσχυσης του φυσικού κεφαλαίου και εξασφαλίζοντας την ελάχιστη δυνατή διαταραχή στα φυσικά υδάτινα συστήματα από την ανθρώπινη αλληλεπίδραση και χρήση.

Ένα προσαρμοσμένο διάγραμμα υδάτινων συστημάτων του κύκλου του νερού χωρίζεται στις δύο κατηγορίες «φυσικώς διαχειριζόμενων» και «ανθρωπίνως διαχειριζόμενων» υδάτων (Ellen MacArthur Foundation –EMF & Antea Group – Arup, 2018).



Εικόνα 10 - Διάγραμμα υδάτινου συστήματος σε μία λεκάνη απορροής (Ellen MacArthur Foundation –EMF & Antea Group – Arup, 2018)

Σε μία μεμονωμένη λεκάνη απορροής, ο **φυσικός κύκλος ροής** δρα με τρόπο που να επιτυγχάνεται η εκ νέου βελτιστοποίηση, επαναχρησιμοποίηση και ανεφοδιασμός του νερού:

- Εκ νέου βελτιστοποίηση: Η φύση χρειάζεται συγκεκριμένη παροχή νερού για την διατήρηση του οικοσυστήματος και της βιοποικιλότητας. Αυτή η ποσότητα εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του οικοσυστήματος, το κλίμα και τη γενική ικανότητα προσαρμογής από τα φυτά και τα ζώα σε ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον.
- Επαναχρησιμοποίηση: καθώς το νερό κυκλοφορεί στον κύκλο υφίσταται φυσική επεξεργασία καθώς μετακινείται από υψηλότερα σε χαμηλότερα υψόμετρα και αλληλεπιδρά με τη χλωρίδα και την πανίδα.
- Αναπλήρωση: ο φυσικός κύκλος ολοκληρώνεται με την επιστροφή του νερού στο περιβάλλον μέσω εξατμισοδιαπνοής, διήθησης ή επιφανειακών υδατικών ροών.

Ως προς την **ανθρώπινη διαχείριση**, η κυκλικότητα του νερού επηρεάζεται από την ανθρώπινη δραστηριότητα όταν μεταβάλλουμε τον φυσικό κύκλο του νερού, όπως:

- Αφαιρώντας γλυκό νερό με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτόν αναπλήρωσής του.
- Επιταχύνοντας την απώλεια νερού μέσω μη αποδοτικών μεθόδων άρδευσης και διανομής.
- Ρυπαίνοντας και μολύνοντας το νερό και μειώνοντας την χρησιμότητα του για άλλες χρήσεις.

Αυτά τα αποτελέσματα έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στο φυσικό υδατικό κύκλο του νερού και δύναται να συντελέσουν οικονομικές και περιβαλλοντικές απώλειες ή πρόσθετο κόστος στην κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών (Ellen MacArthur Foundation –EMF & Antea Group – Arup, 2018).

Η **ευκαιρία** με την Κυκλική Οικονομία για το Νερό είναι να ευθυγραμμιστεί καλύτερα ο ανθρώπινος υδατικός κύκλος με τον φυσικό υδατικό κύκλο μέσω των ακόλουθων μέτρων.

- **Αποφυγή χρήσης** – μέσω της επανεξέτασης των προϊόντων και των υπηρεσιών και της εξάλειψης υδατικά αναποτελεσματικών δραστηριοτήτων.
- **Μείωση χρήσης** – μέσω της αποδοτικής χρήσης του νερού και την καλύτερη κατανομή και διαχείριση των υδατικών πόρων.
- **Επαναχρησιμοποίηση** – μέσω την επιδίωξης κάθε και όλων των ευκαιριών για επαναχρησιμοποίηση μέσα σε μια δραστηριότητα (κλειστός βρόγχος) και για εξωτερικές εφαρμογές εντός της γύρω περιοχής ή της κοινότητας.
- **Ανακύκλωση** – εντός εσωτερικών λειτουργιών και για εξωτερικές εφαρμογές.
- **Ανανέωση** – αποδοτική και αποτελεσματική επιστροφή του νερού στις λεκάνες απορροής.

Η λειτουργία της χρήσης νερού σε αυτούς τους βρόγχους μπορεί να έχει πολλαπλές διαστάσεις. Η κατανόηση αυτών είναι θεμελιώδης για την πραγματοποίηση της ευκαιρίας και επιχειρηματικών δυνατοτήτων του νερού και της Κυκλικής Οικονομίας. (Ellen MacArthur Foundation –EMF & Antea Group – Arup, 2018).

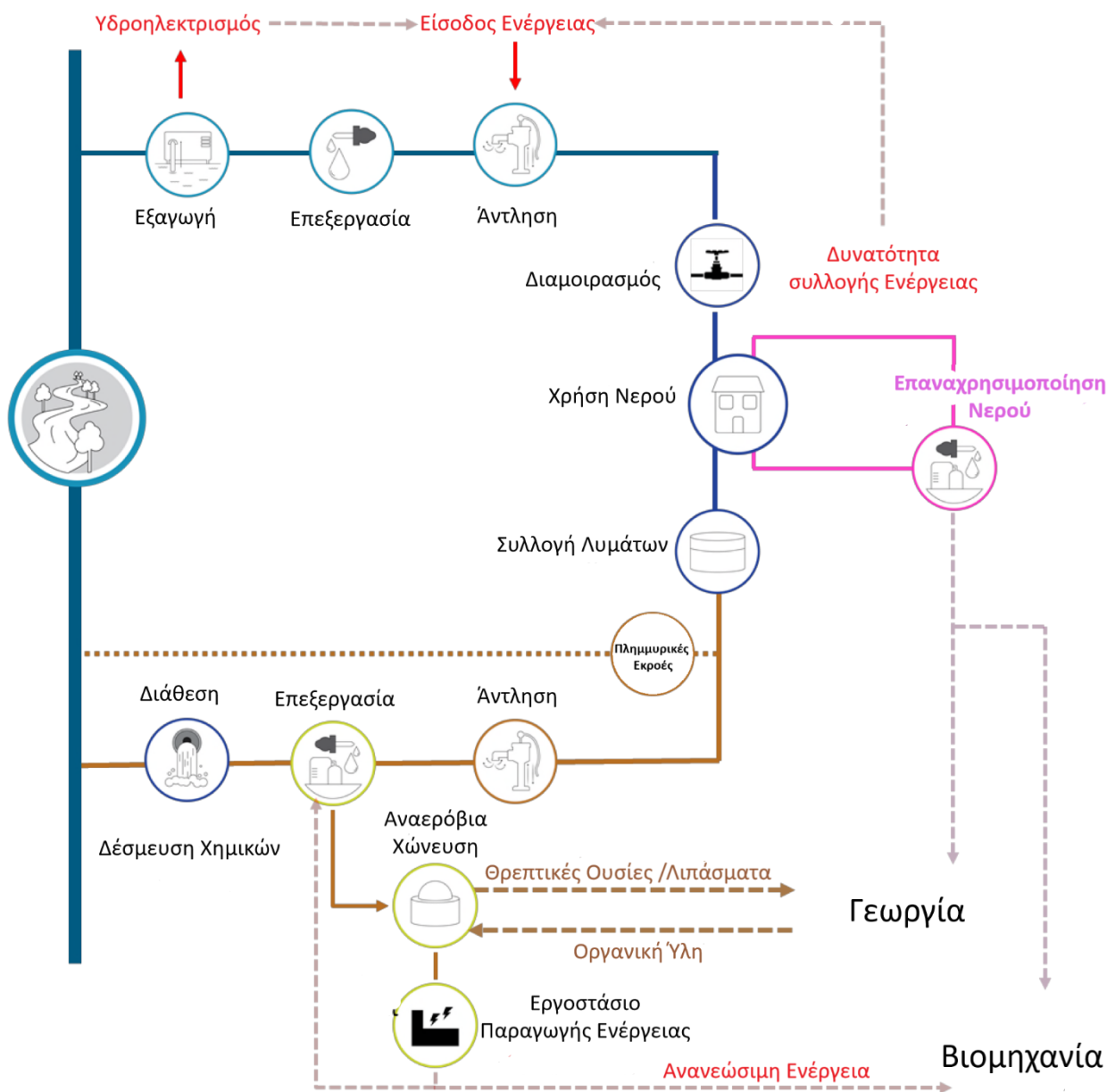
Για την εκμετάλλευση της παραγόμενης αξίας της βελτιστοποιημένης διαχείρισης των υδάτων, μπορούμε να χαρτογραφήσουμε τις «διαστάσεις των υδατικών χρήσεων», ουσιαστικά τους τρόπους με τους οποίους το νερό χρησιμοποιείται και προσφέρει αξία, πέρα από την ιδιότητα του ως θεμελιώδες συστατικό για την επιβίωση των ζωντανών οργανισμών. Αυτές οι διαστάσεις μπορούν να συγκεντρωθούν στις θεματικές ενότητες της Υπηρεσίας, της Ενέργειας και του Φορέα (Ellen MacArthur Foundation –EMF & Antea Group – Arup, 2018).

- Το **νερό ως υπηρεσία** στην καταναλώσιμη χρήση σε οικιστικά και εμπορικά κτίρια και στη χρήση στις διαδικασίες παραγωγής στον τομέα της μεταποίησης. Όταν το νερό δεν διαδραματίζει θεμελιώδη ρόλο στην υπηρεσία, ίσως υπάρχει δυνατότητα υποκατάστασής του.
- Το **νερό ως πηγή ενέργειας** αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο οι ιδιότητές του μπορούν να αξιοποιηθούν ως μία τέτοια. Υδροηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί με την αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στις υδατικές ροές. Η απορροφημένη θερμική ενέργεια από το περιβάλλον ή τις ανθρώπινες δραστηριότητες μπορεί να εξαχθεί. Βιοθερμική ενέργεια μπορεί να δημιουργηθεί μέσω αναερόβιας χώνευσης από λύματα και λάσπη που παράγεται από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.
- Το **νερό ως φορέας** αναφέρεται στη φύση του νερού ώστε να ενεργεί ως φορέας χημικών ουσιών και σωματιδίων που αποτελούν δυνητικό πόρο ή ρύπο. Τα λιπάσματα σε γεωργικά περιβάλλοντα οδηγούν σε νερό πλούσιο σε άζωτο και φώσφορο, ενώ τα ιχνοστοιχεία που χρησιμοποιούνται δημοτικές ή περιβαλλοντικές εγκαταστάσεις δύναται να εντοπιστούν σε επεξεργασμένο νερό. Ο καθαρισμός του νερού συνήθως γίνεται για τη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και την πρόληψη ρύπανσης, αν και μπορεί να γίνει και για οικονομικούς λόγους. Τα πλεονεκτήματα της εξαγωγής αζώτου και φωσφόρου από τις τελικές εκροές των λυμάτων στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων πριν την διάθεση συνίστανται στη βελτίωση της ποιότητας των εκροών ώστε να αυξηθεί η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης τους νερού και να μειωθεί το κόστος επεξεργασίας αυτού για τους χρήστες κατόντη, στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη βελτίωση του φυσικού κεφαλαίου, καθώς και στην ευκαιρία χρήσης τους ως λίπασμα. (Ellen MacArthur Foundation –EMF & Antea Group – Arup, 2018).

Η μεγιστοποίηση της αξίας που δημιουργείται ως αποτέλεσμα της εφαρμογής των αρχών της κυκλικής οικονομίας και της εκτίμησης των επιπτώσεων απαιτεί μια συστημική προσέγγιση. Οι ευκαιρίες κυκλικής οικονομίας υπάρχουν μέσα στο υδάτινο σύστημα καθώς και στην

αλληλεπίδραση με τα περιβαλλοντικά συστήματα, τα γεωργικά συστήματα, τα βιομηχανικά συστήματα και τα δημοτικά συστήματα. Ο τύπος των συστημάτων που είναι πιθανόν να υπάρχουν και η φύση των ευκαιριών που θα μπορούσαν να υπάρξουν για τη δημιουργία πρόσθετης αξίας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του αρχέτυπου της λεκάνης απορροής. Αυτά περιλαμβάνουν τις κλιματικές συνθήκες, την κλίμακα της πόλης και το επίπεδο ανάπτυξης, τον τύπο χρήσης (Περιβαλλοντική, Δημοτική, Βιομηχανική, Γεωργία), καθώς και την τοπογραφία και τη γεωγραφία της λεκάνης. Το χαρτοφυλάκιο λύσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί θα διαφέρει για κάθε συνδυασμό αρχέτυπου πόλης και λεκάνης και θεωρείται ότι η πρόταση αξίας κάθε λύσης θα ήταν επίσης διαφορετική στα διαφορετικά πλαίσια. Για παράδειγμα, μια πόλη σε μια άνυδρη λεκάνη απορροής θα ευνοούσε λύσεις που επαναχρησιμοποιούν και δεσμεύουν νερό, ενώ μια πόλη σε μια καταπράσινη πεδιάδα θα ευνοούσε λύσεις που βελτιστοποιούν τη χρήση του νερού ως υπηρεσία, την επεξεργασία νερού που μεγιστοποιεί τη χρησιμότητα για τους χρήστες κατάντη και την εξαγωγή θρεπτικών ουσιών.

Όσον αφορά τις πόλεις, η προοπτική του Αστικού Υδάτινου Συστήματος αποτελεί βασικό στοιχείο για την επίτευξη μεγαλύτερης κυκλικότητας, δεδομένου ότι οι τρέχουσες προβλέψεις πληθυσμού δείχνουν ότι ο παγκόσμιος πληθυσμός θα αυξηθεί σε 9,1 δισεκατομμύρια το 2050, ενώ το 60% αυτών ζουν σε πόλεις ή κωμοπόλεις. Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει μια απλοποιημένη άποψη των στοιχείων ενός δημοτικού συστήματος ύδρευσης και εντοπίζει μερικές πιθανές ευκαιρίες κυκλικής οικονομίας. Αυτές μπορούν να βρεθούν στη διεπαφή του δημοτικού συστήματος ύδρευσης με τη βιομηχανία, τα ενεργειακά συστήματα, τη γεωργία, την παραγωγή τροφίμων και το ευρύτερο περιβάλλον (Ellen MacArthur Foundation –EMF & Antea Group – Arup, 2018).



Εικόνα 11 – Σχηματική απεικόνιση των στοιχείων ενός δημοτικού συστήματος ύδρευσης (Ellen MacArthur Foundation –EMF & Antea Group – Arup, 2018)

- **Ενέργεια:** Το νερό αποτελεί βασικό στοιχείο στην παραγωγή ενέργειας από υδροηλεκτρικούς και θερμοηλεκτρικούς σταθμούς (φυσικό αέριο, ντίζελ, πυρηνικά). Συνολικά, το 15% της πρόσληψης γλυκού νερού είναι για την παραγωγή ενέργειας, με τοπική μεταβλητότητα. Επιπλέον, η ενέργεια αντιπροσωπεύει έως και το 30% του κόστους λειτουργίας ενός συστήματος ύδρευσης και αποχέτευσης. Υπάρχουν ευκαιρίες για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέσω της αποτελεσματικότερης χρήσης του νερού, καθώς και της χρήσης της ιλύος από την επεξεργασία των λυμάτων για την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας.

- Χρήση νερού: Η μεγαλύτερη απόδοση και η επαναχρησιμοποίηση νερού μπορούν να μειώσουν την ποσότητα προσλαμβανόμενων γλυκών υδάτων, να μειώσουν την απαιτούμενη ενέργεια και να αφήσουν περισσότερο νερό για το περιβάλλον.
- Τρόφιμα: Με την καλλιέργεια τροφής σε τοπικό επίπεδο, η έκταση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μπορεί να μειωθεί. Οι κάθετες γεωργικές εκμεταλλεύσεις στα αστικά θερμοκήπια θα μειώσουν τις προσλήψεις γλυκού νερού για ανοικτές γεωργικές εκτάσεις, οι οποίες υπολογίζονται στο 70% του συνόλου της πρόσληψης γλυκού νερού. Τα δημοτικά απόβλητα αποτελούν επίσης εστία θρεπτικών συστατικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της ποσότητας της παραγωγής λιπασμάτων, καθώς και για τη μείωση του επιπέδου των θρεπτικών ουσιών που απορρίπτονται στο περιβάλλον και το υποβαθμίζουν.
- Βιομηχανία: Οι περισσότερες βιομηχανικές διεργασίες χρησιμοποιούν νερό, είτε άμεσα, ως μέρος του τελικού προϊόντος ή συνιστώσα της παραγωγικής διαδικασίας, είτε έμμεσα, μέσω της χρήσης ενέργειας που παράγεται από αυτό. Τα μέτρα κυκλικής οικονομίας στον βιομηχανικό τομέα έχουν αντίκτυπο στις προσλήψεις νερού, όπως η ενεργειακή απόδοση, η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η αποδοτικότητα των υδάτων, η επαναχρησιμοποίηση του νερού, η απομάκρυνση του νερού από τον κύκλο παραγωγής. Επιπλέον, οι βιομηχανίες μπορούν να χρησιμοποιούν υποπροϊόντα από τα δημοτικά συστήματα ύδρευσης τα οποία υπό άλλες συνθήκες θα απορρίπτονταν στο περιβάλλον. (Ellen MacArthur Foundation – EMF & Antea Group – Arup, 2018).

Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφονται οι δυνατότητες εφαρμογής των αρχών της κυκλικής οικονομίας στη διαχείριση των λυμάτων, καθώς και παραδείγματα εφαρμογής από τη διεθνή βιβλιογραφία.

4.2 ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΛΥΜΑΤΩΝ

Ένα από τα πιο διαδεδομένα προβλήματα που πλήττουν τους ανθρώπους σε όλο τον κόσμο είναι η ανεπαρκής πρόσβαση σε καθαρό νερό και αποχέτευση. Η αυξανόμενη παγκόσμια οικονομία και πληθυσμός συνδυαστικά κάνουν το νερό περιορισμένο πόρο τόσο από άποψη ποσότητας όσο και ποιότητας (Shannon, M. et al, 2008). Το Παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ περιέγραψε την κρίση του νερού ως τον παγκόσμιο κίνδυνο των πιο καταστροφικών επιπτώσεων (WEF, 2015). Στο πλαίσιο αυτό, ο καθαρισμός των υδάτων στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων αποτελεί σημαντικό μέρος της βιώσιμης διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους ευεργετικούς σκοπούς, όπως η γεωργική άρδευση, οι βιομηχανικές διεργασίες, η επαναφόρτιση των υπόγειων υδάτων, ακόμη και για την παροχή πόσιμου νερού μετά από προηγμένη επεξεργασία (Shannon, M. et al, 2008).

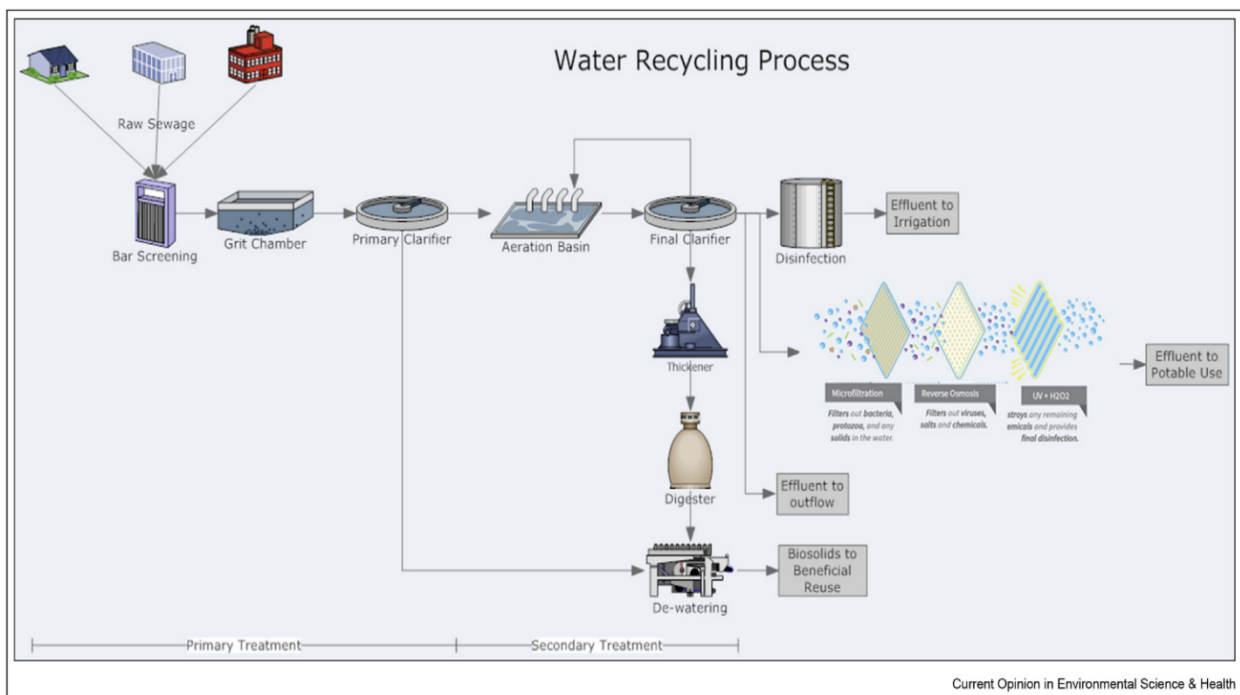
Η μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία θα ενθαρρύνει την αποδοτικότερη χρήση του νερού, και σε συνδυασμό με ισχυρά κίνητρα καινοτομίας, μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα της οικονομίας να αντιμετωπίσει τις απαιτήσεις της αυξανόμενης ανισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης ύδατος (Kearney MS et al, 2014). Αν και η επαναχρησιμοποίηση των υδάτων αντιμετωπίζει πολυάριθμα εμπόδια, από την αντίληψη του κοινού έως την τιμολόγηση και τις τεχνολογικές και ρυθμιστικές προκλήσεις, καθώς και προκλήσεις ασφάλειας, σταδιακά αναπτύσσονται γεωγραφικές και τομεακές στρατηγικές που στηρίζουν την κυκλική οικονομία και έχουν τη δυνατότητα να ανατρέψουν ορισμένα από τα κύρια εμπόδια στην επαναχρησιμοποίηση του νερού (WWI, 2017, Voulvoulis, 2017).

4.2.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΛΥΜΑΤΩΝ

Η συμβατική επεξεργασία λυμάτων αρχίζει με προκαταρκτικό εσχαρωτή - εξαμμωτή, με σκοπό την απομάκρυνση των μεγαλύτερων πλωτών και αιωρούμενων υλικών που θα μπορούσαν να παρεμποδίσουν τη διαδικασία επεξεργασίας (Henry JG et al, 1989). Η πρωτογενής καθίζηση ακολουθεί και αφαιρεί περίπου το 55% των αιωρούμενων στερεών και επειδή ορισμένα από αυτά τα στερεά είναι βιοαποικοδομήσιμα, η βιοχημική ζήτηση οξυγόνου (BOD) μειώνεται συνήθως κατά 35%. Στη συνέχεια, η δευτερογενής επεξεργασία συνήθως περιλαμβάνει μια βιολογική διαδικασία. Οι μικροοργανισμοί σε εναιώρημα (στη διαδικασία "ενεργής ιλύος"), προσκολλημένοι (συστήματα προσκολλημένης βιομάζας, χαλικοδυλιστήρια ή παραλλαγές τους) ή σε λίμνες ή άλλες διαδικασίες χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση βιοαποικοδομήσιμων οργανικών υλικών. Στη διαδικασία ενεργής ιλύος, η πλειονότητα των βιολογικών στερεών που αφαιρούνται από τη δεξαμενή δευτερογενούς καθίζησης ανακυκλώνεται (επιστρεφόμενη ιλύς). Η ανατροφοδότηση των περισσότερων νέων κυττάρων από τη δεξαμενή καθίζησης ενθαρρύνει την ταχεία προσρόφηση των ρύπων από τα εισερχόμενα αποχετευτικά λύματα και χρησιμεύει επίσης στη σταθεροποίηση της λειτουργίας σε ένα ευρύ φάσμα ρυθμών αραιώσης και συγκεντρώσεων υποστρώματος που προκύπτουν από τις διακυμάνσεις της ροής και της ισχύος των λυμάτων. Οι διεργασίες δευτερογενούς επεξεργασίας μπορούν να αφαιρέσουν μέχρι και το 95% του BOD και των αιωρούμενων στερεών που εισέρχονται στη διαδικασία, καθώς και σημαντικές ποσότητες βαρέων μετάλλων και ορισμένων οργανικών ενώσεων που διαφορετικά θα μπορούσαν να προκαλέσουν υποβάθμιση της χημικής και οικολογικής ποιότητας των υδάτων που γίνεται η διάθεση (Chon H-S et al, 2012, NRC, 2012). Η συμβατική επεξεργασία λυμάτων συνήθως ολοκληρώνεται με τη δευτεροβάθμια επεξεργασία η οποία δεν μπορεί να απομακρύνει αποτελεσματικά όλες τις διαφορετικές ενώσεις που απαντώνται στα λύματα και ως εκ τούτου η επεξεργασμένη εκροή είναι μία από τις κύριες πηγές μόνιμων μικρορυπαντών στο περιβάλλον (Al Aukidi M. et al, 2014, Roswell VF et al, 2010).

Για την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων απαιτείται τριτοβάθμια επεξεργασία για την παροχή πρόσθετης απομάκρυνσης ρύπων όπως μικροβιακών παθογόνων, σωματιδίων ή

Θρεπτικών συστατικών και χρησιμοποιούνται προηγμένες διαδικασίες επεξεργασίας όταν τα λύματα πρέπει να επαναχρησιμοποιηθούν ανάλογα με τον τύπο χρήσης και τις απαιτήσεις ποιότητας (Voulvoulis, N., 2018). Φαρμακευτικές ουσίες επίσης συχνά ανιχνεύονται στις εκκροές λυμάτων καθώς και στα ύδατα υποδοχής σε πολλά μέρη του κόσμου (Jones OA, 2007). Υπάρχουν διάφορες επιλογές επεξεργασίας, συμπεριλαμβανομένων μηχανικών και φυσικών διαδικασιών επεξεργασίας, που θα μπορούσαν να μετριάσουν τις μικροβιακές και χημικές προσμίξεις στο ανακτημένο νερό, καθιστώντας δυνατή την ανταπόκριση σε συγκεκριμένους στόχους ποιότητας του νερού. Οι προηγμένες διαδικασίες επεξεργασίας μπορούν επίσης να αντιμετωπίσουν σύγχρονα ζητήματα ποιότητας του νερού που σχετίζονται ακόμη και με επαναχρησιμοποίηση πόσιμου νερού που περιλαμβάνει νεοεμφανιζόμενους παθογόνους παράγοντες ή ίχνη οργανικών χημικών ουσιών (NRC, 2012). Συνολικά, η επαναχρησιμοποίηση νερού απαιτεί διαδικασίες φυσικής και χημικής επεξεργασίας, αγωγούς, μηχανισμούς διάθεσης απορριμμάτων και άλλα συστήματα (Wang H, 2014). Το επίπεδο της επεξεργασίας εξαρτάται από την ποιότητα του νερού που απαιτείται για την προτεινόμενη χρήση (Voulvoulis N, 2018).



Εικόνα 12 - Συμβατική διβάθμια επεξεργασία λυμάτων και εναλλακτικές επιλογές για επαναχρησιμοποίηση λυμάτων (Voulvoulis, N., 2018)

4.2.2 ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΛΥΜΑΤΩΝ

Πολλές πόλεις εξαντλούν τις επιλογές εξασφάλισης νερού και συνειδητοποιούν ότι η επαναχρησιμοποίηση αστικών υδάτων υψηλής ποιότητας είναι πολύ φθηνότερη από τις εναλλακτικές λύσεις (Newcombe R, 2009). Παρά το γεγονός ότι η έλλειψη νερού και οι

απαιτήσεις ύδρευσης στις άνυδρες και ημιάνυδρες περιοχές οδήγησαν στην επαναχρησιμοποίηση ως εναλλακτική παροχή ύδατος, εξακολουθούν να υπάρχουν πολλά προγράμματα επαναχρησιμοποίησης ύδατος, για παράδειγμα στις ΗΠΑ, τα οποία έχουν ξεκινήσει ως απάντηση σε αυστηρές και δαπανηρές απαιτήσεις για την απομάκρυνση των θρεπτικών ουσιών (κυρίως αζώτου και φωσφόρου) από την διάθεση της εκροής των επεξεργασμένων λυμάτων στα επιφανειακά ύδατα, τα οποία θα μπορούσαν ενδεχομένως να περιλαμβάνουν επίσης νεοεμφανιζόμενους ρύπους και μικρορύπους, όταν τα ύδατα υποδοχής προορίζονται για πόσιμη χρήση (Taw W et al, 2016). Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με τις αρνητικές επιπτώσεις από τις αυξανόμενες απορρίψεις θρεπτικών ουσιών στα παράκτια ύδατα οδηγούν σε υποχρεωτικές μειώσεις στον αριθμό των απορρίψεων των ωκεανών στη Φλόριντα και την Καλιφόρνια στις ΗΠΑ, αλλά και σε πολυάριθμες τοποθεσίες στο Ηνωμένο Βασίλειο και στην Ευρώπη (Davidson K et al, 2014). Με την εξάλειψη των διαθέσεων για όλες ή ακόμη και μερικές περιόδους του έτους μέσω της επαναχρησιμοποίησης του νερού, ένας δήμος ή μια εταιρεία νερού μπορεί να αποφύγει ή να μειώσει την ανάγκη δαπανηρών διεργασιών απομάκρυνσης θρεπτικών ουσιών ή να διατηρήσει κατανομές φορτίων (συγκαταθέσεις για τις διαθέσεις εκροών) ενώ αυξάνει τη δυναμικότητά του.

Από την άρδευση έως τις βιομηχανικές χρήσεις και την παροχή πόσιμου νερού, τα λύματα που έχουν υποστεί επεξεργασία με τη σωστή ποιότητα μπορούν να αναπληρώσουν την παροχή νερού και να μειώσουν το κενό ζήτησης / διαθεσιμότητας (IWA, 2015). Στην Ευρώπη, η πρακτική της χρήσης λυμάτων για αρδευτικές καλλιέργειες αυξάνεται και είναι ιδιαίτερα εδραιωμένη σε μεσογειακές χώρες όπως η Ισπανία, η Ιταλία, η Κύπρος και η Ελλάδα (Bixio D. et al, 2006, MED-EUWI, 2007). Για τις νήσους και τις παράκτιες περιοχές, η ανακύκλωση του νερού επιτρέπει εκτεταμένη και συνεπώς πιο αποτελεσματική χρήση του γλυκού νερού, αποφεύγοντας τη διάθεση στη θάλασσα (EEA, 2012). Στην Γκραν Κανάρια, για παράδειγμα, το 20% του νερού που χρησιμοποιείται σε όλους τους τομείς τροφοδοτείται από επεξεργασμένα λύματα, συμπεριλαμβανομένης της άρδευσης 50.000 στρεμμάτων τομάτας και 25.000 στρεμμάτων φυτειών μπανάνας (MED-EUWI, 2007). Στην Κύπρο, οι στόχοι επαναχρησιμοποίησης για το 2014 ισοδυναμούν με το 28% περίπου της γεωργικής ζήτησης νερού το 2008 (EEA, 2012, WDD, 2008).

Ωστόσο, στο Ηνωμένο Βασίλειο, μόνο το 0,16% των 335.191.033 m³ επεξεργασμένων λυμάτων κάθε χρόνο επαναχρησιμοποιούνται (στη βιομηχανία και στην άρδευση των γηπέδων γκολφ). Λαμβάνοντας υπόψη ότι αφαιρούνται 22 δισεκατομμύρια κυβικά νερού κάθε χρόνο, 52% από ποτάμια και λίμνες, 11% από τα υπόγεια ύδατα και περίπου 37% από τα παλιρροϊκά ύδατα (που χρησιμοποιούνται κυρίως για την ψύξη), η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του νερού είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητη (EA, 2009, Voulvoulis N, 2018).

4.2.2.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΟΛΟ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ

- **Διεθνής Διαστημικός Σταθμός:** Τα λύματα ανακυκλώνονται και οι αστροναύτες πίνουν το καθαρό υγρό που προκύπτει στο τέλος της επεξεργασίας.
- **Σιγκαπούρη:** Το πρόγραμμα NEWater προμηθεύει έως και το 40% των υδατικών αναγκών της Σιγκαπούρης. Αρχικά αντιπροσώπευε το 1% της συνολικής ημερήσιας κατανάλωσης πόσιμου νερού (11,4 εκατομμύρια λίτρα την ημέρα), αυξανόμενο σε σχεδόν 2,5% σήμερα.
- **Βερολίνο, Γερμανία:** 248.000 m³ λυμάτων τροφοδοτούν επιφανειακές υδάτινες λίμνες, οι οποίες εμπλουτίζουν τον υδροφόρο ορίζοντα, είτε μέσω τεχνητών λεκανών διήθησης είτε μέσω φιλτραρίσματος από τις όχθες των φυσικών λιμνών. Το υπόγειο αυτό νερό στη συνέχεια αντλείται για να προμηθεύσει 3,4 εκατομμύρια ανθρώπους στο Βερολίνο με πόσιμο νερό χωρίς χλωρίωση.
- **Ισραήλ:** Από το 2010, επεξεργάζεται το 80% των λυμάτων (400 δισεκατομμύρια λίτρα το χρόνο) και το 100% των λυμάτων του Τελ Αβίβ υπόκειται σε επεξεργασία και επαναχρησιμοποιείται ως νερό άρδευσης στη γεωργία και στα δημόσια έργα και χώρους.
- **Βίντχοκ, Ναμίμπια:** Κατασκευάστηκε η πρώτη εγκατάσταση ανάκτησης άμεσα πόσιμου νερού από τα λύματα.
- **Κομητεία Όραντζ, Καλιφόρνια, ΗΠΑ:** Σύστημα εμπλουτισμού υπόγειων υδάτων για έμμεση πόσιμη χρήση. Θεωρείται κορυφαίας τεχνολογίας και περιλαμβάνει τεχνολογίες μικροδιήθησης (προεπεξεργασία), αντίστροφης ώσμωσης, οξειδοαναγωγής / απολύμανσης.
- **Ευρωπαϊκή Ένωση:** Το 2006, το 2,4% των επεξεργασμένων λυμάτων επαναχρησιμοποιήθηκαν. Η **Ισπανία** είναι υπεύθυνη για περίπου το 1/3 αυτών (347 εκατομμύρια κυβικά / χρόνο) και στην **Ιταλία** χρησιμοποιήθηκαν προσεγγιστικά 233 εκατομμύρια κυβικά / χρόνο. **Στη Γαλλία, την Ισπανία, την Ελλάδα και την Κύπρο**, επαναχρησιμοποιήθηκαν το 10,28%, 15,58%, 18,31% και 91,67% των επεξεργασμένων εκρών τους αντίστοιχα. (Voulvoulis, 2017).

4.2.2.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΙΔΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΤΥΧΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

4.2.2.2.1 ΤΕΧΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Η μικροδιήθηση που ακολουθείται από αντίστροφη ώσμωση είναι οι δύο κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων με στόχο την παραγωγή πόσιμου νερό (Drewes JE et al, 2003). Τα δύο βασικά ζητήματα που συνδέονται

με την άμεση επαναχρησιμοποίηση για πόσιμη χρήση είναι οι παθογόνοι οργανισμοί και τα υπολειμματικά οργανικά συστατικά που διέρχονται από συμβατικά και προηγμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων και δημιουργούν ανησυχίες για τη δημόσια υγεία (NRC, 2018). Οι σημαντικότερες ανησυχίες προέρχονται από την παρουσία ρύπων προτεραιότητας, ενώσεων που προκαλούν ενδοκρινικές διαταραχές, φαρμακευτικά δραστικών ενώσεων ή άλλων μη ρυθμισμένων ιχνορυπαντών (Raghu M. et al, 2013). Οι υπολειμματικές οργανικές ενώσεις στο ανακτημένο νερό προέρχονται από ανθρωπογενείς οργανικές ενώσεις που προστίθενται από τους καταναλωτές, φυσικές οργανικές ύλες που υπάρχουν ήδη στο πόσιμο νερό και διαλυτά μικροβιακά προϊόντα που παράγονται κατά τη διαδικασία επεξεργασίας λυμάτων λόγω της αποσύνθεσης του οργανικού υλικού (Jarusutthirak C. et al, 2007). Οι προηγμένες επεξεργασίες μεμβράνης είναι σε θέση να επιτύχουν χαμηλές συνολικές συγκεντρώσεις οργανικού άνθρακα στο νερό της εκροής τους πριν από την συχνή αραιώση με φυσικά υπόγεια ύδατα (NRC, 2012).

Η ταχύτερη ανάπτυξη της παγκόσμιας χρήσης των υδάτων είναι στη μεταποίηση. Παρόλο που πολλές βιομηχανίες εξακολουθούν να κακοδιαχειρίζονται το νερό και τα απόβλητα, άλλες έχουν εξελιχθεί σε πρότυπα κυκλικής οικονομίας με αξιοσημείωτη πρόοδο όσον αφορά την ορθή διαχείριση των υδάτινων πόρων στην αλυσίδα παραγωγής (π.χ. «από το πεδίο στη μόδα» της κλωστοϋφαντουργίας), συμπεριλαμβανομένων των μικρομεσαίων επιχειρήσεων (SME's). Ορισμένες βιομηχανίες έχουν καταδείξει την ικανότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης νερού για να επιτευχθεί μηδενική καθαρή κατανάλωση νερού, ενώ άλλες προσπαθούν να πετύχουν ιστορικό μηδενικής ρύπανσης (SIWI, 2017).

4.2.2.2.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Από τη σκοπιά της κυκλικής οικονομίας, η επαναχρησιμοποίηση του νερού είναι μια καθολικά επικερδής επιλογή. Ο πλήρης κύκλος διαχείρισης των λυμάτων αποτελεί κρίσιμο στοιχείο του κύκλου του νερού και των θρεπτικών ουσιών από την πηγή έως τη διανομή, τη συλλογή (συστήματα αποχέτευσης και επιτόπου εξυγίανσης) και την επεξεργασία για διάθεση και επαναχρησιμοποίηση, συμπεριλαμβανομένης και της ανάκτησης ενέργειας (SIWI, 2017). Η ανακύκλωση των πόρων και η επαναχρησιμοποίηση μπορούν να βοηθήσουν στο κλείσιμο του βρόχου πόρων, παρέχοντας μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στην εξόρυξη παρθένων πόρων. Ωστόσο, εάν οι πόροι είναι φθηνοί, το κίνητρο για τη διατήρηση μιας κοινωνίας «απόρριψης» είναι υψηλότερο, χωρίς να δημιουργείται κίνητρο να γίνουν τέτοιες συνέργειες (Voulvoulis N, 2018).

Το νερό συχνά είναι ελεύθερο, αν και τα αυξανόμενα τέλη υδροληψίας σηματοδοτούν την έλλειψη νερού, αντικατοπτρίζοντας τα δυνητικά οφέλη για διαφορετικούς χρήστες και για διαφορετικούς σκοπούς και το κόστος ευκαιρίας που συνεπάγεται η χρήση του για έναν σκοπό (π.χ. γεωργία) και όχι για κάτι άλλο (π.χ. αστική χρήση ή υδροηλεκτρική παραγωγή). Οι τιμές χρέωσης μπορεί να είναι διαφορετικές μεταξύ των χρηστών των επιφανειακών και

υπογείων υδάτων (π.χ. εάν η στάθμη των τοπικών ποταμών είναι πολύ χαμηλή ή οι υδροφόροι ορίζοντες πέφτουν γρήγορα), αλλά συχνά ισχύουν και για τους δύο, δεδομένου ότι αυτοί οι δύο πόροι είναι αλληλεξαρτώμενοι και πρέπει να αντιμετωπίζονται με ενοποιημένο τρόπο (Winter T. et al, 1998). Οι χρεώσεις ποικίλλουν ανάλογα με την εποχή και με τη διαθεσιμότητα νερού. Το επίπεδο των τελών υδροληψίας εξαρτάται από τις υδρολογικές εκτιμήσεις, τις προβλέψεις της ζήτησης, τις εναλλακτικές χρήσεις, το κόστος ανάπτυξης εναλλακτικών πηγών ύδρευσης κ.λπ. (ΕΕΑ, 2013). Η σημαντική αρχή είναι να αντιμετωπιστούν οι υδρολήπτες με ένα κόστος που συνδέεται με τη χρήση νερού τους, το οποίο είναι αρκετά μεγάλο για να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς τους και ως αποτέλεσμα να αποτελεί παράγοντα στις αποφάσεις τους (GWP, 2017).

Το κατά πόσο η επαναχρησιμοποίηση νερού έχει νόημα για μια περιοχή εξαρτάται εν μέρει από το κόστος της σε σχέση με το κόστος άλλων εφικτών εναλλακτικών λύσεων διαχείρισης του νερού (π.χ. νέες προμήθειες, εκτεταμένες προσπάθειες αποταμίευσης) και το κόστος της μη επιδίωξης αλλαγών στη διαχείριση του νερού (NRC, 2012). Με μια ευρεία ποικιλία διεργασιών επεξεργασίας που ενσωματώνονται ενδεχομένως σε ένα σύστημα επαναχρησιμοποίησης για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων ποιότητας του νερού για τις προβλεπόμενες χρήσεις και για την αντιμετώπιση των τοπικών περιορισμών που σχετίζονται με τον τόπο, είναι δύσκολο να γίνουν γενικές δηλώσεις σχετικά με το κόστος επαναχρησιμοποίησης του νερού. Είτε το χρησιμοποιημένο νερό χρησιμοποιείται για μη πόσιμες είτε για πόσιμες χρήσεις, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος ενός προγράμματος επαναχρησιμοποίησης νερού (EPA, 1998). Αυτές περιλαμβάνουν τη θέση μιας ανακτημένης πηγής νερού (π.χ. την εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων), την υποδομή επεξεργασίας, την ποιότητα των επιφανειακών υδάτων των φυτών, τις απαιτήσεις χρήσης του πελάτη, τις ανάγκες μεταφοράς και άντλησης, τον προγραμματισμό και την αποθήκευση, τις ενεργειακές απαιτήσεις, τη διάθεση των συμπυκνωμάτων, την αδειοδότηση, καθώς και τα κόστη χρηματοδότησης (NRC, 2012).

4.2.2.2.3 ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Οι πρωτοβουλίες επαναχρησιμοποίησης νερού για πόσιμη (κυρίως έμμεση πόσιμη) ή μη πόσιμη χρήση έχουν αντιμετωπίσει την αυξανόμενη αντίθεση του κοινού. Πολλές πρωτοβουλίες υψηλού επιπέδου έχουν σταματήσει μετά από πολλά χρόνια σχεδιασμού και σημαντικών δαπανών. Πέντε αρχές έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα των παραπάνω για την βελτίωση της δημόσιας αντίληψης και συμμετοχής (Harley TW, 2003):

1. Διαχείριση πληροφοριών ώστε να είναι ενήμερα όλα τα ενδιαφερόμενα μέλη.
2. Διατήρηση ατομικών κινήτρων και επίδειξη οργανωσιακής δέσμευσης.
3. Προώθηση επικοινωνίας και δημόσιου διαλόγου.
4. Εξασφάλιση δίκαιης και ορθής διαδικασίας λήψης αποφάσεων, καθώς και αποφάσεις.

5. Δημιουργία και διατήρηση εμπιστοσύνης.

Καθώς το κοινό γίνεται περισσότερο περιβαλλοντικά ευαισθητοποιημένο, η ανακύκλωση των υδάτων γίνεται αντιληπτή όλο και περισσότερο ως εξίσου φυσική με οποιαδήποτε άλλη ανακύκλωση, και περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον από τα μεγάλα φράγματα, την εκτροπή των ποταμών και την αφαλάτωση. Η αντίληψη του κοινού τελικά εξαρτάται από το πόσο ο κόσμος εμπιστεύεται τις κυβερνήσεις για να εγγυηθούν για την ασφάλεια του πόσιμου νερού τους (Jones AQ, 2005). Οι άνθρωποι χρειάζεται να καταλάβουν από πού προέρχεται το νερό και όλα τα στοιχεία που τελικά φιλτράρονται. Η κυβέρνηση της Σιγκαπούρης είχε διαφημιστική καμπάνια για το πρόγραμμα NEWater. Υπήρξε ανησυχία της κοινότητας ότι θα σήμαινε «πίνουμε νερό τουαλέτας». Στο τέλος, στη Σιγκαπούρη, δεν περίμεναν να κερδίσουν το κοινό, απλά προχώρησαν στην υλοποίηση του. Ωστόσο, όταν η NEWater ξεκίνησε την παραγωγή πόσιμου νερού αντιπροσώπευε μόνο το 1% της συνολικής ημερήσιας κατανάλωσης νερού (11,4 εκατομμύρια λίτρα την ημέρα), με αύξηση σε λιγότερο από 2,5% σήμερα, με το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής να προορίζεται σε μη πόσιμες χρήσεις (PUBS, 2017). Επιπλέον, μερικές μελέτες έχουν επίσης αποδείξει ότι ο πραγματικός φραγμός στην επαναχρησιμοποίηση του νερού συχνά δεν είναι δημόσια αντίληψη αλλά η αντίληψη των αρχών για τη δημόσια αντίληψη (Drewes JE, 2003).

4.2.2.2.4 ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΝΕΡΟΥ

Η ενδεχόμενη προώθηση της επαναχρησιμοποίησης λυμάτων από την άποψη της κυκλικής οικονομίας θα μπορούσε επίσης να δημιουργήσει σημαντικούς κινδύνους, ιδίως όσον αφορά την ποιότητα των υδάτων και την ανθρώπινη υγεία. Υπάρχουν πολλές ανησυχίες και ερωτηματικά σχετικά με την επίδραση της ποιότητας του ανακυκλωμένου νερού ανάλογα με τη χρήση του. Για παράδειγμα, τα θέματα ποιότητας του νερού μπορούν να δημιουργήσουν πραγματικά ή αντιλαμβανόμενα προβλήματα στη γεωργία, συμπεριλαμβανομένων των συγκεντρώσεων θρεπτικών ουσιών και νατρίου, των βαρέων μετάλλων (Chon H-S. et al, 2010), της παρουσίας μολυσματικών παραγόντων όπως παθογόνοι παράγοντες για τον άνθρωπο και τα ζώα, των φαρμακευτικών ουσιών (Jones OA. et al, 2007) και των ενδοκρινικών διαταρακτών (Martin OV. et al, 2009), όταν γίνεται άρδευση με επαναχρησιμοποιούμενο νερό. Η κοινωνική στάση απέναντι στη χρήση καλλιεργειών που έχουν αρδευτεί με ανακυκλωμένα νερά και οι επακόλουθες επιπτώσεις στην αγοραία αξία των καλλιεργειών λαμβάνεται επίσης σοβαρά υπόψη (Toze S, 2006).

Η επανεξέταση των υπάρχοντων σχεδίων επαναχρησιμοποίησης και των κανονισμών σχετικά με το απαιτούμενο επίπεδο επεξεργασίας και τα επιτρεπτά επίπεδα για τις μολυσματικές ουσίες στα αποκατεστημένα ύδατα σε ολόκληρο τον κόσμο αποκαλύπτει σημαντικές διακυμάνσεις μεταξύ τους. Οι περισσότεροι κανονισμοί περιορίζονται γύρω από την απαραίτητη ποιότητα του νερού για διαφορετικές τελικές χρήσεις, με κάποιους κανονισμούς να είχαν γραφεί πριν από χρόνια και να χρίζουν ενημέρωσης για να

αντανακλούν την τρέχουσα κρίση των υδάτων, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τις σύγχρονες τεχνολογίες (Voulvoulis N, 2018).

Τα συστήματα επαναχρησιμοποίησης, ιδίως σε εφαρμογές για πόσιμο νερό, θα πρέπει να περιλαμβάνουν ένα πλαίσιο επεξεργασίας πολλαπλών σταδίων που θα αποτελείται από προηγμένες διαδικασίες και θα πρέπει να ενσωματώνει ανθεκτικότητα (δηλαδή ικανότητα προσαρμογής σε ανατροπές), πλεονασμό (δηλαδή συστήματα εφεδρείας) και ευρωστία (π.χ. χαρακτηριστικά που αντιμετωπίζουν ταυτόχρονα πολλαπλούς ρύπους), προκειμένου να επιτύχει (NRC, 2012). Η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση προσφέρουν μια στρατηγική για τη βελτίωση της παροχής νερού μέσω της καλύτερης διαχείρισης των λυμάτων και, ενώ σε ένα πλαίσιο κυκλικής οικονομίας θα μπορούσαν να προωθηθούν μέσω πολιτικών όπως χρεώσεις και διατιμήσεις, αυξάνοντας την χρηματική τους αποδοτικότητα και την δημόσια αποδοχή τους, πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την αντιμετώπιση πραγματικών και αντιλαμβανόμενων ζητημάτων ποιότητας νερού (Molinos-Senante M. et al, 2013).

4.2.3 ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΤΟΠΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Τα υπάρχοντα παγκόσμια συστήματα επαναχρησιμοποίησης ύδατος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν κυρίως ως κεντρικά και αποκεντρωμένα συστήματα. Τα κεντρικά ή μεγάλης κλίμακας συστήματα επωφελούνται από οικονομίες κλίμακας όσον αφορά το κόστος διαχείρισης και επεξεργασίας, αλλά απαιτούν σημαντικές επενδύσεις στα συστήματα διανομής για τη μεταφορά νερού σε μεγάλες αποστάσεις (Hering JG, 2013). Αυτά τα συστήματα μπορούν να εξυπηρετήσουν πολλές πόσιμες και μη πόσιμες εφαρμογές, όπως άρδευση, βιομηχανική ψύξη, επαναχρησιμοποίηση των πόλεων, επαναφόρτιση υπογείων υδάτων και άμεση ενίσχυση της παροχής πόσιμου νερού. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα αποκεντρωμένων συστημάτων ύδρευσης εφαρμόζονται σε μικρότερες αστικές περιοχές, όπως μεμονωμένα νοικοκυριά, ομάδες κτιρίων ή συνοικιών. Χρησιμοποιούν διαφορετικές πηγές νερού, συμπεριλαμβανομένου του βρόχινου νερού και του γκρι νερού, και συνήθως πραγματοποιούνται για μη πόσιμους σκοπούς (π.χ. καζανάκι τουαλέτας, πλύσιμο αυτοκινήτου, άρδευση κήπων) (Hering, JG. et al, 2013, Wilcox, J. et al, 2016). Σε αυτή την κλίμακα έχει προταθεί ένας πολύ σχολαστικός διαχωρισμός των πηγών από τα ρεύματα αποχέτευσης, συμπεριλαμβανομένου και του κίτρινου νερού (δηλ. των ούρων) και του καστανού νερού (δηλ. τα κόπρανα), ώστε να μεγιστοποιηθεί η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και ενέργειας (Langergraber, G. et al, 2005, Lavagnolo, MC. et al, 2017). Τα αποκεντρωμένα συστήματα νερού συχνά θεωρούνται πιο βιώσιμα από τα συγκεντρωτικά συστήματα, διότι αυξάνουν τις δυνατότητες διατήρησης και επαναχρησιμοποίησης των υδάτων, αυξάνουν την ανθεκτικότητα του δικτύου υποδομών ύδατος και μειώνουν το κόστος αντικατάστασης των υποδομών (Makropoulos, CK. et al., 2010).

Οι τοπικοί περιορισμοί, συμπεριλαμβανομένων των οικονομικών, πολιτικών, κοινωνικών, περιβαλλοντικών και τεχνολογικών παραγόντων, συχνά καθορίζουν ποιο σύστημα επαναχρησιμοποίησης νερού είναι το καλύτερο για την εφαρμογή σε διάφορες περιοχές του κόσμου (Wilcox, J. et al, 2016, Hochstrat, R. et al, 2007). Για παράδειγμα, στις άνυδρες περιοχές, το ανακυκλωμένο νερό εφαρμόζεται γενικά στη γεωργία, ενώ σε αστικές περιοχές με χαμηλή διαθεσιμότητα αξιόπιστων πηγών νερού έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης πόσιμου και μη πόσιμου νερού. Συγκεκριμένα, οι πυκνές αστικές περιοχές στην Ιαπωνία και οι κατάλληλες εθνικές πολιτικές απαιτήσεις ευνόησαν την ανάπτυξη καινοτόμων συστημάτων διπλής ανακυκλοφορίας και αποκεντρωμένων συστημάτων επαναχρησιμοποίησης λυμάτων (Asano, T. et al, 2006). Αντίθετα, στην Καλιφόρνια, η υψηλή ζήτηση νερού κατά κεφαλή σε πυκνοκατοικημένες πόλεις έχει οδηγήσει στην εφαρμογή πολλών συγκεντρωτικών συστημάτων έμμεσης επαναχρησιμοποίησης πόσιμου νερού (indirect potable reuse – IPR), όπου τα λύματα που έχουν υποστεί επεξεργασία σύμφωνα με ρυθμιστικά όρια παρόμοια με τα πρότυπα για την παραγωγή πόσιμου νερού έχουν χρησιμοποιηθεί για την επαναφόρτιση των υπόγειων υδάτων ή αναμιγνύονται με επιφανειακά ύδατα και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για πόσιμους σκοπούς (CDPH, 2011 & 2009). Σε άλλες περιπτώσεις, όπως στη Ναμίμπια και στο Τέξας, συστήματα άμεσης επαναχρησιμοποίησης πόσιμου νερού (direct potable reuse – DPR), όπου καθαρό ανακυκλωμένο πόσιμο νερό προστίθεται απευθείας στο δίκτυο διανομής πόσιμου ύδατος, έχουν χρησιμοποιηθεί ή προταθεί για την αύξηση της παροχής πόσιμου νερού λόγω της μείωσης του κόστους που προκύπτει από τη μη αναγκαία ανάπτυξη ενός περιβαλλοντικού ρυθμιστή που είναι χαρακτηριστικός των συστημάτων IPR (Wilcox, J. et al 2016, du Pisani, PL., 2006).

Όσον αφορά τη γεωργία, σε ασφαλείς συνθήκες, η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων προσφέρει μια ευκαιρία να μειωθούν οι απαιτήσεις σε φυσικούς υδάτινους πόρους και η απόρριψη ρύπων σε επιφανειακά υδάτινα σώματα (Aiello, R. Et al, 2007). Επιπλέον, μπορεί να αυξήσει τις αποδόσεις των καλλιεργειών (Bedbabis, S. et al, 2015, Singh, P.K., 2012, Zema, D.A. 2012) και σε ορισμένες περιπτώσεις περιορισμένης άρδευσης να μειώσει τα διακριτά στάδια καθαρισμού και το κόστος επεξεργασίας και διάθεσης των λυμάτων (Harun, 1997, Maaß, O. et al, 2016, Rosenqvist, H. et al, 2005). Δεδομένου ότι τα λύματα τροφοδοτούν τα θρεπτικά συστατικά, μπορούν επίσης να μειώσουν την εφαρμογή ορυκτών λιπασμάτων και να μειώσουν το κόστος λίπανσης (Maaß, O., 2016, Paranychianakis, N.V. et al, 2006). Οι ανησυχίες σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων στη γεωργία περιλαμβάνουν ενδεχόμενους κινδύνους για την υγεία των γεωργών και των καταναλωτών τροφίμων (Pedrero, F. et al, 2010, Maimon, A., 2018), αλάτωση του εδάφους (Muyen, Z., 2011), καθώς και τη συσσώρευση επικίνδυνων ουσιών στο έδαφος και τις καλλιέργειες (Maimon, A. 2018, Fatta-Kassinos, D. Et al, 2011, Khan, S. et al, 2008, Mapanda, F. et al 2005, Pedersen, J.A. et al, 2005, Toze, S., 2006). Κατά την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων για άρδευση, είναι απαραίτητες κατάλληλες στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής κατάλληλων επιπέδων καθαρισμού, περιοδικής παρακολούθησης των ιδιοτήτων

των εδαφών και των καλλιεργειών, καθώς και κατάλληλες πρακτικές άρδευσης, καλλιέργειας και συγκομιδής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι κίνδυνοι για τον άνθρωπο και το περιβάλλον (Aiello, R. et al, 2007, Muyen, Z. et al 2011, Qadir, M. Et al, 2010, Rusan, M.J.M. et al, 2007).

Σε έρευνα που διεξάχθηκε για τον υπολογισμό του κόστους ευκαιρίας της μη μετάβασης σε κυκλικό οικονομικό μοντέλο στον υδατικό τομέα στην Ιορδανία, λήφθηκαν υπόψιν τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη της επεξεργασίας λυμάτων, καθώς και τα σχετιζόμενα λειτουργικά και κεφαλαιακά κόστη. Τα αναλυτικά αποτελέσματα αποκάλυψαν καθαρό κόστος ευκαιρίας των 643 εκατομμυρίων Ιορδανικών δηναρίων (JOD) (816,8 εκατομμύρια ευρώ) αν επιλεγεί η περίπτωση να μη γίνει η μετάβαση σε κυκλικό μοντέλο, με JOD 212 εκατομμύρια (269,2 εκατομμύρια ευρώ) να έχουν ήδη σπαταληθεί. Επιπλέον, εμφανίστηκε ένα μέσο «κόστος κλείσιμου του βρόχου» των JOD 0,70 / m³ (0,9 € / m³), το οποίο αντιπροσωπεύει τη μέση σκιάδιμη τιμή των συναφών περιβαλλοντικών εξωτερικών παραγόντων. Έχοντας έτσι δείξει μια ισχυρή οικονομική υπόθεση για το κυκλικό μοντέλο στη βιομηχανία ύδατος, φαίνονται ιδιαίτερα επιθυμητές οι κινήσεις σε όλους τους οικονομικούς τομείς για την επίτευξη αυτού του στόχου (Abu-Ghunmi, D. et al, 2016).

4.2.3.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΑΡΧΩΝ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

4.2.3.1.1 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΑΓΡΟΤΙΚΗ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΛΥΜΑΤΩΝ – BRAUNSCHWEIG, ΓΕΡΜΑΝΙΑ

Το σύστημα επαναχρησιμοποίησης λυμάτων στον αγροτικό τομέα έχει περάσει από διάφορες αναπτυξιακές φάσεις που έχουν ως αποτέλεσμα τον συνδυασμό της γεωργικής επαναχρησιμοποίησης λυμάτων και ιλύος, της παραγωγής καλλιεργειών και της παραγωγής βιοενέργειας. Το καθεστώς επαναχρησιμοποίησης διαχειρίζεται ο Σύνδεσμος Αποχέτευσης Braunschweig, ο οποίος ιδρύθηκε το 1954 με στόχο την εφαρμογή ενός μεγάλης κλίμακας συστήματος άρδευσης αγροτικών αποβλήτων στην περιοχή του Braunschweig. Έκτοτε, το καθεστώς επαναχρησιμοποίησης έχει εξελιχθεί σε ένα σύνθετο δίκτυο συνδεδεμένων δραστηριοτήτων σε περιφερειακό επίπεδο με διάφορα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη (Maaß, O. et al, 2016). Τα μέλη του συλλόγου είναι η πόλη του Braunschweig, το διοικητικό συμβούλιο για το νερό της γειτονικής πόλης Gifhorn και 90 αγρότες με γεωργική γη στην επικράτεια του συνεταιρισμού (Maaß, O. et all, 2018).

Το σύστημα επεξεργάζεται τα αστικά λύματα των πόλεων Braunschweig και ορισμένων γειτονικών κοινοτήτων. Μια ολοκληρωμένη διαδικασία βιολογικής επεξεργασίας παράγει καθαρισμένα λύματα που παραδίδονται για επαναχρησιμοποίηση από το εργοστάσιο επεξεργασίας σε μια επιλεγμένη περιοχή που καλύπτει μια συνεκτική έκταση 27

τετραγωνικών χιλιομέτρων καλλιεργήσιμων εκτάσεων με εγκαταστάσεις υποδομής για άρδευση (π.χ. δρόμοι, κανάλια, αντλιοστάσια, σωλήνες πίεσης, κρουνοί). Η υποδομή - η οποία έχει σχεδιαστεί για τεχνική δυναμικότητα άρδευσης των δύο τρίτων της περιοχής άρδευσης ταυτόχρονα - λειτουργεί από το προσωπικό της ένωσης, που λαμβάνει καθημερινές αποφάσεις σχετικά με την κατανομή του επεξεργασμένου νερού στις καλλιεργούμενες εκτάσεις του αγρότη. Η συνεχής παροχή νερού μέσω άρδευσης είναι απαραίτητη για την καλλιέργεια στην περιοχή, καθώς τα αμμώδη εδάφη υποφέρουν από έλλειμμα κλιματικού υδάτινου ισοζυγίου (Ahlers, R. et al, 2004) και έχουν χαμηλή ικανότητα συγκράτησης νερού (Ternes, T.A. et al, 2007). Οι κυριότερες καλλιέργειες που καλλιεργούνται από τους αγρότες στην περιοχή άρδευσης είναι ο αραβόσιτος, το σιτάρι, τα ζαχαρότευτλα και η σίκαλη (Maaß, O., 2018).

Η πλούσια σε θρεπτικά συστατικά ιλύς είναι ακόμη ένα προϊόν που προκύπτει μέσω της διαδικασίας επεξεργασίας που προστίθεται στα αρδευόμενα λύματα κατά τη διάρκεια της περιόδου βλάστησης. Η ιλύς που συσσωρεύεται κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου αφυδατώνεται, αποθηκεύεται και διατίθεται ως λίπασμα το καλοκαίρι σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις στην ευρύτερη περιοχή του Braunschweig. Το καθεστώς επαναχρησιμοποίησης περιλαμβάνει μονάδα παραγωγής βιοαερίου που λειτουργεί από την ένωση και η οποία χρησιμοποιεί ενεργειακές καλλιέργειες που παράγονται με λύματα και αφυδατωμένη λάσπη ως πρώτη ύλη για τις εργασίες της (Maaß, O., 2018).

4.2.3.1.2 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: CLEANTECH PLAYGROUND – ΑΜΣΤΕΡΝΤΑΜ, ΟΛΛΑΝΔΙΑ

Η Cleantech Playground είναι ένα πεδίο δοκιμών για καινοτόμες καθαρές τεχνολογίες στο Άμστερνταμ της Ολλανδίας, το οποίο στοχεύει στο να κλείσει όσο το δυνατόν περισσότερο τον κύκλο με βιώσιμο τρόπο. Εδώ βρίσκεται το De Ceunel. Αυτή η βαριά μολυσμένη τοποθεσία περιλαμβάνει μετασκευασμένα πλωτά σπίτια ως γραφεία, τοποθετημένα σε γη, και περιβάλλονται από φυτά που απορρυπαίνουν το έδαφος. Σε αυτό το ολλανδικό έργο οι Waternet, Metabolic, Advanced Waste Water Solutions και το KWR Watercycle Research Institute συνεργάστηκαν για να διερευνήσουν πώς το τοπικό κλείσιμο βρόχου που σχετίζεται με το νερό ταιριάζει σε μια βιώσιμη κυκλική οικονομία. Η ανάγκη ύδατος έχει μειωθεί στο ελάχιστο με την εγκατάσταση τουαλετών ξηρής κομποστοποίησης και την απουσία ντους και πλυντηρίων ρούχων. Ως εκ τούτου, χρειάζονται μόνο πέντε λίτρα κατά κεφαλήν ημερησίως για την κατανάλωση, την παρασκευή τροφίμων και την προσωπική υγιεινή, σε σύγκριση με τον σημερινό μέσο όρο 25 λίτρων σε συμβατικά γραφεία και 128 λίτρων σε νοικοκυριά στην Ολλανδία. Το γκρίζο νερό υφίσταται επεξεργασία με βιολογικά φίλτρα συμπεριλαμβανομένων των φυτών πριν από τη διήθηση, τα οποία αποτελούνται από δύο κιβώτια IBC γεμάτα με στρώματα χαλικιού και χονδρόκοκκο και λεπτή άμμο, φυτεμένα με καλάμια. Επιπλέον, στην τοποθεσία De Ceunel βρίσκεται ένα καφενείο, όπου συλλέγονται τα ούρα ξεχωριστά. Σε κεντρική τοποθεσία στο De Ceunel είναι ένα εργοστάσιο

κομποστοποίησης, ένας αντιδραστήρας στρουβίτη και ένα θερμοκήπιο όπου καλλιεργούνται λαχανικά, ενδεχομένως με το κομπόστ και το στρουβίτη (Roest, K et al, 2016).

Τα καθαρά ούρα από ξηρό ουρητήριο στο Café De Ceuvel χρησιμοποιήθηκαν για την ανάκτηση θρεπτικών ουσιών και για δοκιμές με φαρμακευτικούς μικρο-ρύπους για να διερευνηθεί η μόλυνση των παραγόμενων λιπασμάτων και των τροφίμων (ντομάτες) που αναπτύχθηκαν με αυτά τα ανακτηθέντα λιπάσματα. Αποδεικνύεται ότι οι ντομάτες που έχουν παραχθεί χρησιμοποιώντας λιπάσματα στρουβίτη που παράγεται από τα ούρα είναι ασφαλείς για ανθρώπινη κατανάλωση, αν και πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω η επίδραση των παραπάνω λιπασμάτων στην ποιότητα του εδάφους και σε καλλιέργειες ριζών λαχανικών και φυλλωδών λαχανικών. Επίσης, αποδεικνύεται ότι τα βιολογικά φίλτρα χαμηλής τεχνολογίας που είναι εγκατεστημένα στην τοποθεσία De Ceuvel (συστήματα καθαρισμού των γκρίζων υδάτων) εξασφαλίζουν επαρκή ποιότητα νερού ώστε να απορρίπτεται στο έδαφος χωρίς απειλή για το περιβάλλον, βάσει των ολλανδικών κανονισμών. Παρόλο που είναι δυνατή και η παραγωγή ασφαλούς πόσιμου νερού σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα, η τοπική παραγωγή πόσιμου νερού έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερους κινδύνους και κόστος, με αποτέλεσμα να καθίσταται μη συμφέρουσα (Roest, K et al, 2016).

4.2.3.1.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ ΥΓΡΟΥ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΤΗΣ DOW

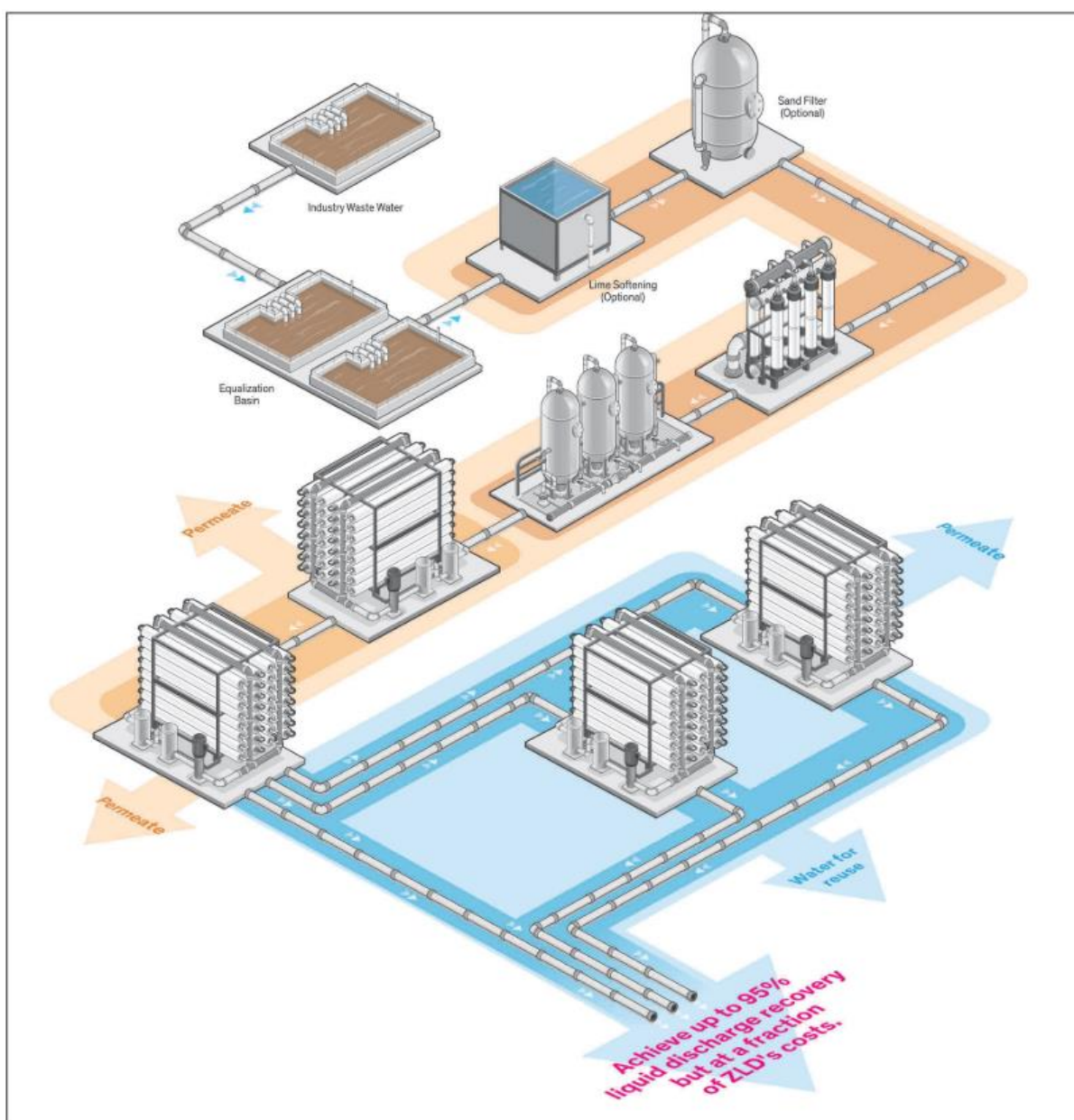
Η προσέγγιση της Dow στο σχεδιασμό συστήματος Ελάχιστης Εκκένωσης Υγρού κλάσματος (Minimal Liquid Discharge – MLD) παρέχει στους βιομηχανικούς και δημοτικούς φορείς την ευκαιρία να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις υδατικού αποτυπώματος και να κινηθούν προς μία κυκλικότερη οικονομία χωρίς να υπερβούν τους προϋπολογισμούς τους (Abu, R. 2018).

Σε περιοχές άνδρες ή περιβαλλοντικά ευαίσθητες, συχνά εφαρμόζονται συστήματα Μηδενικής Εκκένωσης Υγρού κλάσματος (Zero Liquid Discharge - ZLD). Ωστόσο, η επίτευξη της εξάλειψης του τελικού 3% - 5% του υγρού κλάσματος για την ικανοποίηση της ZLD μπορεί να είναι απαγορευτικά δαπανηρή. Με ποσοστό ανάκτησης νερού μέχρι 98%, η προσέγγιση MLD της Dow μπορεί να επιτύχει τα επιθυμητά αποτελέσματα για ένα κλάσμα του κόστους της ZLD (Abu, R. 2018).

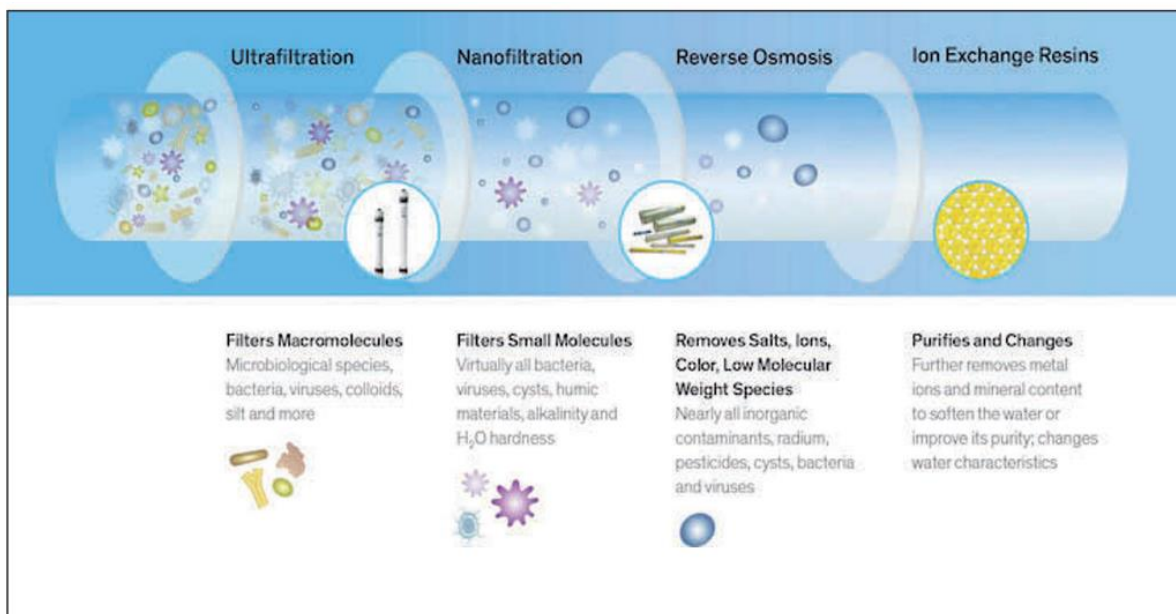
Ο πυρήνας της διαδικασίας MLD της Dow βασίζεται στην ενσωμάτωση μιας σειράς αποδεδειγμένων, υφιστάμενων τεχνολογιών φιλτραρίσματος νερού και διαχωρισμού ιόντων, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες, σε συνδυασμό με καινοτόμο βιομηχανική τεχνολογία. Μια προσέγγιση MLD έχει σχετικώς ελάχιστο κόστος σε σύγκριση με το εκθετικά μεγαλύτερο κεφάλαιο και το λειτουργικό κόστος των συμβατικών εξατμιστών και κρυσταλλωτών που σχετίζονται με το ZLD. (Abu, R. 2018).

Το MLD δεν αποσκοπεί μόνο στην επέκταση της ανάκτησης ύδατος, αλλά περιλαμβάνει την επιλογή ανάκτησης πολύτιμων πόρων από άλμη πριν από τη διάθεση. Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση μεγέθους, ή ακόμη και πλήρη εξάλειψη, των εξατμιστών και των κρυσταλλωτών (Abu, R. 2018).

Η προσέγγιση MLD της Dow ξεκινά με τη διενέργεια ελέγχου νερού για τον εντοπισμό των πηγών και των τύπων των λυμάτων που παράγονται σε μια εγκατάσταση, ειδικά όσον αφορά τη ροή και το συνολικό περιεχόμενο διαλυμένων στερεών. Με την αντιστοίχιση των ροών αποβλήτων και τις κατάλληλες απαιτήσεις για το νερό, το MLD επιτρέπει στους διαχειριστές να εντοπίζουν αποτελεσματικότερα την ποσότητα των αποβλήτων που απαιτούν επεξεργασία και την πιο οικονομική προσέγγιση για την κάλυψη των επιμέρους αναγκών των εγκαταστάσεων.



Εικόνα 13 - Η προσέγγιση διαχείρισης νερού MLD της Dow (Abu, R., & Solutions, W., 2018)



Εικόνα 14 - Οι υπάρχουσες τεχνολογίες αιχμής για τον καθαρισμό του νερού περιλαμβάνουν την υπερδιήθηση, την νανοδιήθηση, την αντίστροφη ώσμωση και τις τεχνολογίες ανταλλαγής ιόντων. (Abu, R., & Solutions, W., 2018)

4.2.3.1.4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: SEWER MINING – ΚΕΡΕΦΥΤ / ΕΥΔΑΠ, ΜΕΤΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΤΤΙΚΗΣ, ΕΛΛΑΔΑ

Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος DESSIN, η ΕΥΔΑΠ (Εταιρεία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Πρωτεύουσας) έχει εγκαταστήσει στο Κέντρο Ερευνητικών Εφαρμογών Υγειονομικής Τεχνολογίας (ΚΕΡΕΦΥΤ) στη Μεταμόρφωση Αττικής μονάδα επαναχρησιμοποίησης με απευθείας άντληση από το αποχετευτικό δίκτυο (sewer mining) (ΕΥΔΑΠ, 2019, Makroulos et al., 2018).

Η μέθοδος sewer mining, που πρωτοεφαρμόστηκε στην Αυστραλία, είναι μια λιγότερο γνωστή επιλογή στην εργαλειοθήκη των αποκεντρωμένων τεχνολογιών επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων σε μια ενδιάμεση (τοπική σε γειτονιά) κλίμακα. Αντλεί λύματα από τις τοπικές αποχετεύσεις, τα επεξεργάζεται στο σημείο της ζήτησης και προμηθεύει τοπικές μη πόσιμες χρήσεις (όπως αστική πράσινη άρδευση) ενώ επιστρέφει τα αποθέματα επεξεργασίας πίσω στο σύστημα αποχέτευσης (Butler and MacCormick, 1996) για τελική επεξεργασία στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη τόσο για τα δαπανηρά συστήματα μεταφοράς από τα τελικά συστήματα επεξεργασίας όσο και για τη διπλή υποδομή δικτύωσης που απαιτεί η αποκεντρωμένη επαναχρησιμοποίηση γκρίζου νερού. Επίσης, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας για τη μεταφορά λυμάτων στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας και στη συνέχεια τη μεταφορά του ανακυκλωμένου νερού στο σημείο χρήσης (Makroulos et al., 2018).

Επιπλέον κοινωνικά και περιβαλλοντικά οφέλη της τεχνολογίας sewer mining αποτελούν:

- Η μείωση των ποσοτήτων των επεξεργασμένων απορροών που διατίθενται σε υδάτινους αποδέκτες.
- Η μείωση της ζήτησης νερού από τους επιφανειακούς και τους υπόγειους υδροφορείς και διατήρηση των αποθεμάτων τους.
- Η δυνατότητα εμπλουτισμού των υπόγειων υδροφορέων.
- Η μείωση κόστους μεταφοράς λυμάτων.
- Η δυνατότητα δημιουργίας και συντήρησης περιοχών αστικού πράσινου, πολύ σημαντικών για την ποιότητα ζωής στην πόλη, χωρίς κατανάλωση πόσιμου νερού για την άρδυσή τους.
- Δυνατότητα παροχής ανακτημένου νερού για χρήσεις άρδευσης σε περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα λειψυδρίας, όπως τα νησιά. (ΕΥΔΑΠ, 2018)

Η μονάδα της ΕΥΔΑΠ αποτελεί πιλοτική εφαρμογή και αποτελείται από δύο υπομονάδες: τον αντιδραστήρα μεμβράνης (MBR) και την μονάδα αντίστροφης ώσμωσης (RO). Η δυναμικότητά της ανέρχεται σε 10 m³ λυμάτων την ημέρα με σκοπό την άρδευση μιας περιοχής επιφάνειας 50 μ². Στόχος του προγράμματος αποτελεί η παρακολούθηση και η εκτίμηση των παρακάτω πτυχών: 1) τα ενδεχόμενα προβλήματα στη λειτουργία της, 2) την ποιότητα των εκροών της και 3) την αξιοπιστία του πληροφοριακού συστήματος παρακολούθησης. Σύμφωνα με τους Makropoulos et al., η μικρή μονάδα αποδίδει ικανοποιητικά σε όλες τις προαναφερόμενες πτυχές και, σε συνδυασμό με την καταλληλότητα διαχείρισής τους από ιδιωτικές μικρές και μικρομεσαίες επιχειρήσεις (SMEs), μπορεί να διαδραματίσει ρηξικέλευθο ρόλο στην αύξηση των επενδύσεων σε περιβαλλοντικά και κοινωνικά φιλικές τεχνολογίες που θα συμβάλλουν στο «κλείσιμο του κύκλου» του νερού στο αστικό περιβάλλον (Makropoulos et al., 2018).

Συνεχίζοντας την αξιοποίηση της τεχνολογίας sewer mining, η ΕΥΔΑΠ συμμετέχει στο χρηματοδοτούμενο Ευρωπαϊκό ερευνητικό έργο NEXTGEN, με παρόμοια μονάδα επαναχρησιμοποίησης στα πλαίσια της ανάπλασης της περιοχής του Ελαιώνα σε συνεργασία με το Δήμο Αθηναίων (ΕΥΔΑΠ, 2018).

4.3 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΑΠΟ ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ

4.3.1 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΑΠΟ ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ

Η ανάκτηση των θρεπτικών ουσιών από τα λύματα όχι μόνο μειώνει το κόστος για τις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων που αντιμετωπίζουν όλο και πιο αυστηρά όρια για την πρόληψη της επιβλαβούς απόρριψης ρυπογόνων θρεπτικών ουσιών σε παρακείμενες υδάτινες οδούς, αλλά βοηθά επίσης αυτές τις εγκαταστάσεις να εξαλείψουν τη συσσώρευση στρουβίτη στους σωλήνες. Αυτό μειώνει το λειτουργικό κόστος και δημιουργεί μια ροή

εσόδων για τον δήμο μέσω πωλήσεων λιπασμάτων υψηλής αξίας (Jedelhauser, Michael and Binder, Claudia R., 2018).

Ενώ η εκτίμηση των δυνητικών επιπτώσεων αυτών των λύσεων είναι δύσκολη, αρκετοί δείκτες δείχνουν την κλίμακα της ευκαιρίας. Στον δήμο του Άμστερνταμ, για παράδειγμα, η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών εκτιμάται ότι έχει πιθανή αξία περίπου 30 εκατ. ευρώ ετησίως. Θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 300.000 τόνους και θα εξοικονομούσε 75.000 τόνους υλικού. (Circle Economy, TNO and FABRIC, 2016).

Στην Αυστραλία, επιπλέον 13 εκατομμύρια τόνοι οργανικών υλικών ετησίως θα μπορούσαν να εκτραπούν από τους χώρους υγειονομικής ταφής της χώρας. Πράγματι, η εκτροπή μόλις 2 εκατομμυρίων τόνων θα αναπλήρωνε 10.000 τόνους ουρίας, 1.000 τόνους φωσφορικών αλάτων και 5.000 τόνους θειικού καλίου, με την ως αποτέλεσμα αύξηση της απόδοσης καλλιέργειας να απέφερε έσοδα ύψους 30 εκατομμυρίων δολαρίων. Επιπλέον, θα αύξανε τον κύκλο εργασιών στη βιομηχανία ανάκτησης οργανικών ενώσεων έως και 400 εκατ. δολάρια, αποφεύγοντας περίπου την εκπομπή 2 εκατ. τόνων διοξειδίου του άνθρακα και απομονώνοντας περίπου 1 εκατομμύριο τόνους στο έδαφος (Australian Organics Recycling Association).

Σύμφωνα με τους Verstraete, Van de Caveye, & Diamantis, σε 1 m³ τυπικών αστικών λυμάτων περιέχεται 0,05 κιλά αζώτου, 0,14 κιλά μεθανίου, 0,10 κιλά οργανικών και 0,01 κιλά φώσφορου. Οι σημερινές τιμές των παραπάνω ανέρχονται σε 1,19 €/m³ νερού (κόστος νερού στο Άμστερνταμ, 2019), 0,28 €/κιλό αζώτου σε μορφή αμμωνίας (USGS, 2019), 0,12 €/κιλό ισοδύναμου φυσικού αερίου (IndexMundi, 2019), 0,20 €/κιλό οργανικού εδαφοβελτιωτικού και 0,35 €/κιλό με βάση το κόστος εξόρυξης ισοδύναμου φωσφωρίτη (IndexMundi, 2019). Ως αποτέλεσμα, το μέγιστο ιδεατό όφελος της πλήρους επαναχρησιμοποίησης 1 m³ αστικών λυμάτων ανέρχεται σε 1,24 €. Με το εκτιμώμενο κόστος επεξεργασίας και εξαγωγής να ανέρχεται από 0,61 – 1,25 € / m³ νερού, υπάρχει σημαντικό περιθώριο κέρδους, λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την εξοικονόμηση ορυκτών πόρων (Verstraete, Van de Caveye, & Diamantis, 2009).

4.3.2 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΖΩΤΟΥ ΑΠΟ ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ

Για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών κινδύνων που προκαλούνται από την απόρριψη λυμάτων (π.χ. υποβάθμιση της ποιότητας του νερού που προκαλείται από την υπερβολική απελευθέρωση N θρεπτικών συστατικών), η ΕΕ έχει θεσπίσει κανονισμούς για τον περιορισμό του επιπέδου N (κάτω των 15 mg / L) που περιέχεται στην εκροή των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ). Υπάρχει μια ποικιλία τεχνολογιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση του αζώτου για την τήρηση αυτών των κανονισμών διάθεσης. Μια από τις συνηθέστερα υιοθετημένες συμβατικές οδούς για την

απομάκρυνση του αζώτου είναι η νιτροποίηση / απονιτροποίηση, όπου μετά την απομάκρυνση του άνθρακα με αερόβια οξείδωση (συνήθως μέσω ενεργής ιλύος) χρησιμοποιείται επαρκής αερισμός για την οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρικά άλατα ακολουθούμενη από αναερόβιο βήμα για τη μετατροπή των νιτρικών σε αβλαβές άζωτο αέριο. Στην περίπτωση λυμάτων που περιέχουν υψηλή περιεκτικότητα αζώτου, απαιτείται η προσθήκη επιπλέον δότη ηλεκτρονίων (Lin, Guo, Shah, & Stuckey, 2016).

Ωστόσο, αυτή η συμβατική τεχνολογία είναι ενεργοβόρα και παράγει μεγάλες ποσότητες ιλύος (Van Hulle et al., 2010). Δεδομένου ότι η διαδικασία Αναμμοξ ανακαλύφθηκε από τους Arnold Mulder et. al. στη δεκαετία του 1990 (Kuenen, 2008), αυτή η πορεία έχει οδηγήσει σε σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες λόγω των οικονομικών και περιβαλλοντικών ωφελειών της. Το Αναμμοξ χαρακτηρίζεται από μερική οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρώδες άλας, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται ως δέκτης ηλεκτρονίων σε αντίδραση αναγωγής και μετατρέπεται σε αέριο άζωτο υπό ανοξικές συνθήκες. Σε σύγκριση με τη συμβατική οδό που συζητήθηκε παραπάνω, το Αναμμοξ απαιτεί λιγότερη ενέργεια και οξυγόνο και δεν χρειάζεται εξωτερικό δότη ηλεκτρονίων. Επιπλέον, από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, η βιομηχανία ΕΕΛ ενδιαφέρεται ολοένα και περισσότερο για ανταλλαγή ιόντων και αυτή η τεχνολογία μπορεί να αφαιρέσει και να ανακτήσει τους πόρους αζώτου από τα λύματα μετά την απομάκρυνση του άνθρακα μέσω αναερόβιας επεξεργασίας με έναν βιοαντιδραστήρα αναερόβιας μεμβράνης (AnMBR). Σύμφωνα με στοιχεία, η ανταλλαγή ιόντων αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που έχει μεγάλες δυνατότητες να επιτύχει υψηλή απόδοση απομάκρυνσης N και να προσφέρει βέλτιστη οικονομική και περιβαλλοντική απόδοση μέσω του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης της διαδικασίας (Lin, Guo, Shah, & Stuckey, 2016).

4.3.3 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΑΠΟ ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ

Ο φώσφορος (P) είναι ένα απαραίτητο και μη υποκαταστάσιμο συστατικό των ζωντανών οργανισμών. Αποτελεί περιοριστικό παράγοντα για την ανάπτυξη των φυτών και η επαρκής προσφορά φωσφόρου στη γεωργία αποτελεί προϋπόθεση για την παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια (Childers et al., 2011). Η τρέχουσα παροχή μας από φώσφορο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από πηγές ορυκτού φωσφόρου, δηλαδή μη ανανεώσιμα φωσφορικά ορυκτά. Περίπου το 90% του ορυκτού φωσφόρου εφαρμόζεται στο παγκόσμιο σύστημα γεωργικών τροφίμων ως μέρος λιπασμάτων και πρόσθετων υλών ζωοτροφών, ενώ το υπόλοιπο 10% χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές εκτός των τροφίμων (Gantner et al., 2014; Scholz et al., 2014). Σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες όπως η Ελβετία, η Ολλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο, ο φώσφορος στα λύματα αντιπροσωπεύει τουλάχιστον το 70% των εισαγωγών φωσφόρου σε ανόργανα λιπάσματα (Jedelhauser and Binder, 2015). Κατά συνέπεια, αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια τεχνολογίες για ανάκτηση φωσφόρου από τα λύματα, τη λυματολάσπη και την τέφρα λυματολάσπης, παρέχοντας μια νέα προσέγγιση για

την επιστροφή του φώσφορου σε γεωργική γη χωρίς τους ανεπιθύμητους ρύπους που περιέχονται στην λυματολάσπη (Jedelhauser, Michael and Binder, Claudia R., 2018)

Στην ΕΕ, ο φώσφορος που ανακτάται από τη λυματολάσπη, το κρέας, τα οστεάλευρα και τα βιοαποικοδομήσιμα στερεά απόβλητα ανέρχεται σχεδόν στο 30% του χρησιμοποιούμενου συνθετικού λιπάσματος φωσφόρου (από το οποίο εισάγεται το 92%) (Faerge, J., Magid, J., Penning de Vries, F.W.T., 2001; EMF et al, 2015).

Τα τελευταία χρόνια, το θέμα αυτό έχει αναληφθεί και από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (ΕΚ) που επιδιώκει να κλείσει τους κύκλους φώσφορου και να μειώσει την εξάρτηση της ΕΕ σε πρωτογενή υλικά (European Commission, 2011, 2015; EMF, 2015). Ως αποτέλεσμα, προκρίθηκε η εφαρμογή των αρχών της Κυκλικής Οικονομίας (CE), η οποία προτείνει την εγκαθίδρυση στρατηγικών για τη μετάβαση από μια γραμμική σε μια κυκλική οικονομία πόρων (EMF 2015; European Commission, 2015; Ghisellini et al., 2016; Hobson, 2016; Iacovidou et al., 2017; Winans et al., 2017; Yuan et al., 2006). Αυτή τη στιγμή, δύο τεχνολογικές λύσεις ανακύκλωσης φώσφορου από τον τομέα των λυμάτων θεωρούνται ιδιαίτερα υποσχόμενες: ο στρουβίτης και το φωσφορικό οξύ. (Jedelhauser, Michael and Binder, Claudia R., 2018). Είναι σημαντικό να σημειωθεί εδώ ότι η τεχνική ανάκτηση φώσφορου δεν είναι ο μοναδικός πυλώνας κυκλικής οικονομίας του φώσφορου. Άλλες προσεγγίσεις ανακύκλωσης όπως ο διαχωρισμός των ούρων καθώς και οι στρατηγικές επάρκειας φώσφορου, π.χ. όσον αφορά τις αλλαγές στην ανθρώπινη διατροφή, αποτελούν επίσης μέρος μίας κυκλικής οικονομίας του φώσφορου. (Jedelhauser et al., 2018; Udert and Wachter, 2012). Επιπλέον, η ανακύκλωση σταθεροποιημένης ιλύος λυμάτων εξακολουθεί να παραμένει ένας σημαντικός κύκλος φώσφορου σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες.

4.3.3.1 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΤΗ ΜΟΡΦΗ ΣΤΡΟΥΒΙΤΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΥΔΑΤΙΝΗ ΦΑΣΗ

Ο στρουβίτης (εναμμώνιο φωσφορικό μαγνήσιο - $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) είναι ένα υλικό που σχηματίζεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επεξεργασίας σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων με ενισχυμένη βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου (EBPR). Ενώ η κατακρήμνιση του στρουβίτη θεωρείται από καιρό ως πρωταρχικό πρόβλημα λειτουργίας στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων που προκαλεί εναποθέσεις σε σωλήνες και σε συστήματα αφυδάτωσης, το υλικό είναι επίσης μια πιθανή πηγή φώσφορου για ανακύκλωση λόγω των υψηλών συγκεντρώσεών του σε φώσφορο και των κατάλληλων ιδιοτήτων για γεωργική εφαρμογή, π.χ. υψηλή διαθεσιμότητα σε φυτά. Έτσι, αναπτύχθηκαν τεχνολογίες που αποφεύγουν την εναπόθεση, μειώνουν το κόστος λειτουργίας και ανακτούν μεταξύ 20% και 45% του συνολικού φώσφορου που εισέρχεται στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, ο οποίος στη συνέχεια μπορεί να πωληθεί ως λίπασμα στρουβίτη (Kraus and Kabbe, 2017; Jedelhauser, Michael and Binder, Claudia R., 2018).

Το 2017 ο στρουβίτης ανακτάτο σε 25 ΕΕΛ στην ΕΕ-28 (Kraus and Kabbe, 2017). Πρόκειται για ένα εμπορεύσιμο προϊόν, το οποίο πληροί όλες τις νομοθετικές προδιαγραφές και μπορεί έτσι να πωληθεί ως λίπασμα. Για παράδειγμα, η δημοτική εταιρεία παραγωγής νερού και λυμάτων στο Βερολίνο πωλεί λιπάσματα που βασίζονται σε στρουβίτη και ονομάζονται «Berliner Pflanze®». Παρόμοια προγράμματα ανακύκλωσης βρίσκονται στην Ολλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο (Kataki et al., 2016). Μια διαφορετική προσέγγιση εφαρμόζεται στο Άμστερνταμ, όπου μια εταιρεία λιπασμάτων χρησιμοποιεί στρουβίτη από την τοπική ΕΕΛ ως συστατικό για την παραγωγή λιπασμάτων (Jedelhauser, Michael and Binder, Claudia R., 2018).

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη περίπτωση του Crutchik et al (2018), από μια δημοτική εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων με συνολικό φορτίο αιωρούμενων στερεών 26 – 30 kg/κεφαλή/έτος και από το υγρό κλάσμα μιας κυρίως κυτταρινικής ζυμωμένης λύσης, υπολογίζεται παραγωγή στρουβίτη στην περιοχή των 0,07 – 0,15 kg/κεφαλή/έτος, το οποίο αντιστοιχίζεται σε έσοδα 0,05 – 0,11 €/κεφαλή/έτος.

4.3.3.2 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΣΤΗ ΜΟΡΦΗ ΦΩΣΦΟΡΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ ΤΗΣ ΤΗΝ ΤΕΦΡΑ ΛΥΜΑΤΟΛΑΣΠΗΣ

Οι τεχνολογίες φωσφορικού οξέος (H_3PO_4) ανακτούν μέχρι και το 95% του φωσφόρου από τέφρα λυματολάσπης χωριστής αποτέφρωσης (mono-incineration) (Egle et al., 2016). Σε αντίθεση με το στρουβίτη, το φωσφορικό οξύ δεν μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας σε γεωργική γη αλλά χρειάζεται περαιτέρω βιομηχανική επεξεργασία. Δεδομένου ότι το δευτερογενές φωσφορικό οξύ είναι ένα ομοιογενές και τυποποιημένο προϊόν, μπορεί να ενσωματωθεί στη βιομηχανία γεωργικών προϊόντων διατροφής, δηλαδή στο λίπασμα, στην παραγωγή τροφίμων και ζωοτροφών, αλλά και σε βιομηχανίες που δεν σχετίζονται με τα τρόφιμα, π.χ. για την απομάκρυνση της σκουριάς ή για τη διάβρωση (Jedelhauser, Michael Binder, Claudia R., 2018).

Μόνο λίγες τεχνολογίες ανάκτησης φωσφορικού οξέος έχουν εφαρμοστεί μέχρι στιγμής. Ένα εργοστάσιο πλήρους κλίμακας κατασκευάζεται επί του παρόντος στη Δουνκέρκη της Γαλλίας, ένα εργοστάσιο επίδειξης λειτουργεί στη Βάρνα της Βουλγαρίας και ένα πιλοτικό έργο βρίσκεται στο Αμβούργο της Γερμανίας (Jedelhauser, Michael Binder, Claudia R., 2018).

4.3.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΦΩΣΦΟΡΟΥ

Στην περίπτωση του στρουβίτη, η ανάκτηση φωσφόρου και η παραγωγή της έτοιμου της εμπορία λιπάσματος λαμβάνει χώρα στο σύστημα αποχέτευσης, δηλαδή στην εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Λόγω της ετερογενούς σύνθεσης και των σχετικά μικρών ποσοτήτων φωσφόρου που ανακτώνται σε κάθε σταθμό επεξεργασίας λυμάτων (χαμηλό ποσοστό

ανάκτησης φώσφορου), υπάρχουν περιορισμοί σε μια μεγάλης κλίμακας διανομή του στρουβίτη μέσω της κεντρικού συστήματος εμπορίας. Αντίθετα, είναι πιθανό ότι οι μονάδες επεξεργασίας λυμάτων ανεξάρτητα ή σε περιφερειακούς συνεταιρισμούς να διανέμουν το προϊόν της σε τοπικούς και περιφερειακούς αγρότες μέσω ενδιάμεσων εμπόρων. Αυτό θα μπορούσε να αντικαταστήσει την τοπική εφαρμογή της λυματολάσπης και να ενθαρρύνει και να συμπληρώσει της πρωτοβουλίες για περιφερειακή προμήθεια τροφίμων και επισιτιστική αυτάρκεια. (Ayres and Bosia, 2011; Feagan, 2007; Sage, 2014). Οι πόλεις θα δημιουργούσαν ένα κλειστό βρόγχο φώσφορου, καταναλώνοντας φώσφορο μέσω τοπικών τροφίμων και παράγοντας τοπικά λιπάσματα. Με τη σειρά της, η ενδοχώρα θα μπορούσε να μειώσει την εξάρτησή της από τα ορυκτά λιπάσματα και να επωφεληθεί από της εισροές φώσφορου από την πόλη.

Στην περίπτωση του φωσφορικού οξέος, η ανάκτηση και η ανακύκλωση του φώσφορου θα απαιτούσε μεγαλύτερη αλυσίδα αξίας με αποτέλεσμα την αύξηση των απόλυτων αποστάσεων των ροών φώσφορου μεταξύ των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων, των μονάδων χωριστής αποτέφρωσης, της ανάκτησης φώσφορου, της επεξεργασίας του οξέος και των αγροτών. Επιπλέον, δεδομένου ότι οι εγκαταστάσεις χωριστής αποτέφρωσης βρίσκονται κυρίως σε μητροπολιτικές περιοχές, οι μικρότερες και πιο περιφερειακές μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, οι οποίες δεν μπορούν να αντέξουν οικονομικά να χτίσουν της δικές της μονάδες αποτέφρωσης, θα πρέπει να μεταφέρουν τη λυματολάσπη της σε μητροπολιτικές περιοχές με διαθέσιμες μονάδες αποτέφρωσης. Στη βιομηχανία λιπασμάτων, αφενός, το φωσφορικό οξύ θα μείωνε της απόλυτες αποστάσεις της προσφοράς φώσφορου, δεδομένου ότι οι παραγωγοί λιπασμάτων θα μπορούσαν να υποκαταστήσουν μερικώς της εισαγωγές ορυκτού φώσφορου από τρίτες χώρες με εγχώριο δευτερογενές φωσφορικό οξύ. Από την άλλη πλευρά, οι απόλυτες αποστάσεις των δευτερογενών ροών φώσφορου στη γεωργία θα είναι μεγαλύτερες από ό, τι με την προσέγγιση του στρουβίτη, επειδή οι εταιρείες λιπασμάτων εμπορεύονται τα προϊόντα της υπερεθνικά. Από μια σχετική προοπτική, η ανακύκλωση φώσφορου μέσω φωσφορικού οξέος θα φέρει πιο κοντά της σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων με της βιομηχανίες χωριστής αποτέφρωσης και επεξεργασίας φώσφορου, δημιουργώντας μια αλυσίδα αξίας από την επεξεργασία των λυμάτων έως τη βιομηχανική επεξεργασία φώσφορου. Ωστόσο, η αντικατάσταση της περιφερειακής εφαρμογής της λυματολάσπης σε γεωργική γη με την κεντρική παραγωγή λιπασμάτων με βάση το δευτερογενές φωσφορικό οξύ θα αυξήσει της σχετικές αποστάσεις μεταξύ των ΕΕΛ και της ενδοχώρας της, θα αποσυνδέσει τα λύματα και το τοπικό γεωργικό σύστημα και θα προωθήσει μια βιομηχανοποιημένη παραγωγή λιπασμάτων σε εθνικό και υπερεθνικό επίπεδο. (Jedelhauser, Michael Binder, Claudia R., 2018).

Επιπλέον, και οι τεχνολογίες στρουβίτη και φωσφορικού οξέος θα μπορούσαν να βασιστούν στα υπάρχοντα υλικά και «θεσμικά» τοπία της επεξεργασίας λυμάτων, της διαχείρισης της ιλύος των λυμάτων και της βιομηχανίας φώσφορου. Ωστόσο, η εφαρμογή των προσεγγίσεων φωσφορικού οξέος ενδέχεται να αντιμετωπίσει προβλήματα δημόσιας αποδοχής, ενώ οι

τεχνολογίες στρουβίτη αναμένεται να προκαλέσουν μικρές επιπτώσεις στο υλικό τοπίο. Οι τεχνολογίες στρουβίτη εγκαθίστανται σε υπάρχοντες σταθμούς καθαρισμού με τεχνολογία ενισχυμένης βιολογικής απομάκρυνσης φώσφορου και κατά συνέπεια δεν αναμένεται να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στο τοπίο. Το ίδιο ισχύει και για την ανάκτηση του φώσφορου από τέφρα μονάδων αποτέφρωσης όταν είναι εφικτό να εγκατασταθούν οι τεχνολογίες ανάκτησης της τύπου των υφιστάμενων μονάδων χωριστής αποτέφρωσης. Ωστόσο, η επέκταση των σημερινών δυνατοτήτων των μονάδων χωριστής αποτέφρωσης είναι πιθανό να προκαλέσει προβλήματα σχετικά με την αποδοχή του κοινού. Ενώ το υλικό τοπίο του υπάρχοντος καθεστώτος επεξεργασίας λυμάτων, ιδιαίτερα των ΕΕΛ, θεωρείται ως «φυσικό» και απαραίτητο στοιχείο του σημερινού συστήματος αποβλήτων και υγιεινής, οι υλικές παρεμβάσεις που υπερβαίνουν αυτή τη βασική υποδομή μπορεί να αμφισβητηθούν από την κοινωνία. Δεδομένου ότι τα λύματα και η λυματολάσπη αντιμετωπίζουν το πρόβλημα του στιγματισμού λόγω της δημόσιας εικόνας της ως ακάθαρτο υλικό το οποίο πρέπει να απορριφθεί (Black and Fawcett, 2010; Jewitt, 2011), οι μεγάλης κλίμακας παρεμβάσεις υποδομής στον τομέα αυτό είναι πιθανό να προκαλέσουν διαμαρτυρίες. Για παράδειγμα, η κατασκευή μονάδας χωριστής αποτέφρωσης στη γερμανική πόλη Mainz καθυστέρησε για αρκετά χρόνια λόγω τοπικών διαμαρτυριών (Erfurth, 2015; Schmidt, 2017; Jedelhauser, Michael Binder, Claudia R., 2018).

4.3.3.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΑΡΧΩΝ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΑΖΩΤΟΥ ΚΑΙ ΦΩΣΦΟΡΟΥ ΑΠΟ ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ

4.3.3.4.1 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΟΥΣΙΩΝ ΤΗΣ OSTARA



Εικόνα 15 – Η διαχείριση του φώσφορου σήμερα (Ostara, 2019)



Εικόνα 16 – Η λύση της Ostara για βιώσιμο κύκλο φώσφορου (Ostara, 2019)

Η εταιρεία Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc., με έδρα τον Καναδά, παρέχει υπηρεσίες υδάτινων πόρων και συγκεκριμένα σχεδιάζει και κατασκευάζει ΕΕΛ και προσφέρει συστήματα διαχείρισης φώσφορου και ανάκτησης θρεπτικών. Η τεχνολογία Pearl είναι ο πυρήνας της λύσης ανάκτησης θρεπτικών ουσιών κλειστού βρόχου που αναπτύχθηκε από την Ostara. Μπορεί να ανακτήσει το 85% του φώσφορου και έως και 15% του αζώτου από τα ρεύματα των αστικών και βιομηχανικών λυμάτων και να τα μετατρέψει σε λίπασμα υψηλής αξίας. Σύμφωνα με την Ostara, τα θρεπτικά συστατικά αποκρυσταλλώνονται σε πολύ καθαρούς κόκκους λιπάσματος και αναπτύσσονται σε διάμετρο μετά την προσθήκη μαγνησίου σε ελεγχόμενο περιβάλλον pH. Μόλις φθάσουν στο μέγεθος που απαιτείται για τα τυποποιημένα μείγματα λιπασμάτων, αυτά συγκομίζονται, στεγνώνουν και συσκευάζονται, έτοιμα για άμεση διανομή και πώληση. Το λίπασμα που ανακτάται από την διαδικασία της Ostara έχει μια χαρακτηριστική κρυσταλλική σύνθεση που απελευθερώνει θρεπτικά συστατικά όταν οξέα εκπέμπονται από τις αναπτυσσόμενες ρίζες των φυτών. Αυτό μεγιστοποιεί την αποτελεσματικότητα της πρόσληψης φώσφορου και ως εκ τούτου ελαχιστοποιεί την έκπλυση και την απορροή αυτού. Η διαδικασία βοηθά να διασφαλιστεί ότι το φυτό απορροφά τα θρεπτικά, συμβάλλοντας έτσι θετικά στον κύκλο ανάπτυξής του, σε αντίθεση με την περίπτωση όπου τα θρεπτικά συστατικά θα χάνονταν στις υδάτινες οδούς. Τα κεφαλαιουχικά έξοδα ανακτώνται σε 5-10 έτη μέσω της ετήσιας εξοικονόμησης σε χημικά, της διάθεσης ιλύος και της συντήρησης, καθώς και των εσόδων από τις πωλήσεις λιπασμάτων «Crystal Green». Επιπλέον, η λύση βοηθά στην προστασία των τοπικών υδάτινων οδών από τη ρύπανση των θρεπτικών ουσιών (μέσω χαμηλότερων ποσοστών διάθεσης, καθώς και χαμηλότερης διαλυτότητας στο νερό) σε μια εποχή όπου τα καθαρά νερά, η επισιτιστική ασφάλεια, η απορροή λιπασμάτων και οι αυξανόμενοι πληθυσμοί αποτελούν ζητήματα για τις κοινότητες σε όλο τον κόσμο. Η χρήση ενός τόνου λιπάσματος “Crystal Green” εξοικονομεί περίπου 10 τόνους εκπομπών διοξειδίων του άνθρακα. Η τεχνολογία WASSTRIP (Απογύμνωση Ενεργούς Ιλύος Λυμάτων για την Αφαίρεση Εσωτερικού Φώσφορου) αποτελεί προστιθέμενη αξία για το Pearl παρέχοντας σημαντικά πλεονεκτήματα

σε εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν αναερόβια χώνευση. Απελευθερώνοντας τον φώσφορο προς τα ανάντη πριν φθάσει στον χωνευτή, η WASSTRIP επιταχύνει την απομάκρυνση και ανάκτηση θρεπτικών ουσιών. Επιπλέον, η διαδικασία προστατεύει τους χωνευτές και τον εξοπλισμό από το στρουβίτη, βελτιώνει την ικανότητα απομάκρυνσης και μειώνει τα βιοστερεά. (Ostara, Morlet et al., 2017).

4.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ

4.4.1 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ

Τα ορυκτά καύσιμα παρέχουν σήμερα περισσότερο από το 60% της ενέργειας που καταναλώνουν οι χώρες του ΟΟΣΑ, ενώ η ενέργεια που παράγεται από τα απόβλητα συμβάλλει μόνο στο 1% (ISWA, Circular Economy: Energy and Fuels, 2015). Περίπου το 10% (50 εκατ.τ.α.ου.λ.) του συνολικού παγκόσμιου πρωτογενούς ενεργειακού εφοδιασμού παρέχεται από τη βιοενέργεια. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενέργειας καταναλώνεται στις αναδυόμενες χώρες για το μαγειρέμα και τη θέρμανση, χρησιμοποιώντας εξαιρετικά αναποτελεσματικές μεθόδους όπως ανοιχτές φωτιές ή απλές εστίες μαγειρέματος, οι οποίες έχουν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία (ρύπανση από καπνό) και στο περιβάλλον (αποδάσωση) (IEA, About bioenergy, 2016). Συνολικά, 370 τεραβατ (TWh) ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από βιοενέργεια παράχθηκε παγκοσμίως το 2012, ποσοστό που αντιστοιχεί μόνο στο 1,5% της συνολικής παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας (IEA, About bioenergy, 2016)

Όχι μόνο τα ορυκτά καύσιμα είναι πεπερασμένοι πόροι, αλλά και οι σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις της παραγωγής ενέργειας από αυτές είναι επίσης καλά κατανοητές και τεκμηριωμένες. Για παράδειγμα, ο άνθρακας αντιπροσωπεύει περίπου το 40% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας (IEA, Energy, Climate Change & Environment: 2016 Insights), και το 2014 ήταν υπεύθυνος για το 46% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Ένας από τους βασικούς στόχους μιας κυκλικής οικονομίας είναι να βασιστεί τελικά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είτε πρόκειται για ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική ή βιοενέργεια. Η μετάβαση από την ενέργεια που παράγεται από ορυκτά καύσιμα προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ήδη σε εξέλιξη. Το 2015, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντιπροσώπευαν περισσότερο από το ήμισυ των συνολικών ετήσιων προσθικών στην παγκόσμια δυναμικότητα, ξεπερνώντας τον άνθρακα σε αθροιστική εγκατεστημένη δυναμικότητα (IEA, Renewable Energy: Medium-Term Market Report, 2016).

Η παραγωγή βιοενέργειας φέρνει μαζί της την ευκαιρία για αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας εκτός δικτύου σε διάφορες κλίμακες. Οι αναδυόμενες αγορές που διαθέτουν

ανεπαρκή κεντρική ενεργειακή υποδομή θεωρούν ότι αυτό αποτελεί ιδιαίτερα ελκυστική προοπτική. Επίδειξη της παραγωγής βιοενέργειας μπορεί να βρεθεί στις αγροτικές περιοχές, για παράδειγμα, το Πρόγραμμα Βιοαερίου του SNV στο Βιετνάμ κατασκεύασε πάνω από 158.000 εγχώριους χωνευτές, παρέχοντας ενέργεια σε περίπου 790.000 κατοίκους της υπαίθρου (SNV Netherlands Development Organisation).

4.4.2 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΙΛΥ ΤΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

4.4.2.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΒΙΟΑΕΡΙΟ

Η αναερόβια χώνευση μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα οργανικών υλικών (π.χ. απορρίμματα τροφίμων), παράγοντας βιοαέριο και χωνεμένη ιλύ. Εκτός από αντιστάθμιση της παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, το χωνεμένο προϊόν επιστρέφει θρεπτικά συστατικά στο έδαφος, μειώνοντας τη χρήση συνθετικών λιπασμάτων. Η έρευνα έχει επίσης υποδείξει ότι το χωνεμένο προϊόν αυξάνει τη βιολογική δραστηριότητα του εδάφους, συμβάλλοντας στην ανασύσταση της ποιότητας του εδάφους (ISWA, Circular Economy: Carbon, Nutrients and Soil, 2015).

Πολλά παραδείγματα δείχνουν πώς χρησιμοποιείται η αναερόβια χώνευση για την επεξεργασία οργανικών αποβλήτων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας:

Το Ηνωμένο Βασίλειο διαθέτει πάνω από 200 μονάδες αναερόβιας χώνευσης, εκ των οποίων οι 83 χρησιμοποιούν δημοτικές ή εμπορικές πρώτες ύλες. Επιπλέον, έχει χορηγηθεί άδεια προγραμματισμού ή έχουν ζητηθεί για επιπλέον 400 μονάδες. Από το 2016, το Ηνωμένο Βασίλειο έχει την ικανότητα αναερόβιας χώνευσης 617 μεγαβάτ ισοδύναμου ηλεκτρικού ρεύματος, αρκετό για να τροφοδοτήσει 800.000 σπίτια και να παράγει 9 TWh βιοαερίου, το οποίο είναι μόνο το 25% των 35 TWh που θα μπορούσαν να δημιουργηθούν εάν όλες οι κατάλληλες πρώτες ύλες χρησιμοποιούνταν με την υπάρχουσα τεχνολογία. Για το 2025-2030, η «Ένωση Αναερόβιας Χώνευσης και Βιολογικών Πρώτων Υλών» εκτιμά ότι η παραγωγική ικανότητα στο Ηνωμένο Βασίλειο, με νέες πρώτες ύλες και βελτιώσεις στις διεργασίες, θα μπορούσε να έχει τη δυνατότητα να παράγει περίπου 78 TWh. Επίσης, σύμφωνα με τους ίδιους, οι αναερόβιοι χωνευτές επεξεργάστηκαν περίπου 2,1 εκατομμύρια τόνους απορριμμάτων τροφίμων και 21 εκατομμύρια τόνους λυματολάσπης στη χώρα κατά τη διάρκεια των 12 μηνών από τον Ιούλιο του 2016 (Morlet et al., 2017).

Η κύρια πηγή ενέργειας στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων είναι το βιοαέριο που παράγεται από την αναερόβια χώνευση, με περιεκτικότητα μεθανίου 50-70%, διοξειδίου του άνθρακα 30-50% και μερικά ίχνη αζώτου, υδρογόνου, υδρόθειου και υδρατμών (Tyagi and Lo, 2013, Shen et al, 2015). Η αναερόβια χώνευση είναι μία από τις πιο εφαρμοζόμενες τεχνολογίες για την παραγωγή βιοαερίου σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων.

Εντούτοις, για να αυξηθεί η παραγωγή βιοαερίου, ερευνήθηκαν πολλές μέθοδοι προεπεξεργασίας όπως η ακτινοβολήση με μικροκύματα, ο οζονισμός, η υπερηχοποίηση, η ενζυματική επεξεργασία, η επεξεργασία με αλκάλια ή οξέα, η υγρή οξείδωση και η χρήση υγρών πιδάκων (Tyagi and Lo, 2011, Cano et al, 2015).

Η θερμική προεπεξεργασία της ιλύος και η αναερόβια χώνευση είναι ένας καλός συνδυασμός για την παραγωγή βιοαερίου, που χρησιμοποιείται για τη συμπαραγωγή θερμότητας και ρεύματος (CHP) (Carlsson et al., 2016). Χώρες όπως η Γερμανία, η Αυστρία, η Ολλανδία και οι ΗΠΑ χρησιμοποιούν αυτόν τον συνδυασμό CHP-αναερόβιας χώνευσης στις υφιστάμενες ενεργειακά αυτοδύναμες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (Gu et al., 2017). Η μελέτη των Ruffino et al. (2015) έδειξε ότι η παραγωγή μεθανίου αυξήθηκε κατά 21 - 31% όταν χρησιμοποιήθηκε θερμική προεπεξεργασία. Αναλύοντας τη βελτίωση της παραγωγής βιοαερίου (από την αναερόβια χώνευση) μέσω της έννοιας της κυκλικής οικονομίας, η συν-χώνευση των απορριμμάτων τροφίμων και της λάσπη αποβλήτων είναι μια εφικτή λύση (Nghiem et al., 2017, Zhang et al., 2017). Αυτή η λύση όχι μόνο αυξάνει τη συγκέντρωση του διαθέσιμου άνθρακα, αλλά και την παραγωγή βιοαερίου (βελτιώνοντας την ενεργειακή ισορροπία), παρέχοντας εξοικονόμηση στο συνολικό ενεργειακό κόστος της λειτουργίας των εγκαταστάσεων (Di Maria et al, 2016, Maragkakiet al, 2017). Σύμφωνα με τους Schafer et al. (2013), στην Ευρώπη η παραγωγή βιοαερίου αυξήθηκε από 2,5 σε 4,0 m³ σε σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων που πραγματοποίησαν συν-χώνευση.

4.4.2.1.1 ΑΝΑΕΡΟΒΙΑ ΣΥΝ-ΧΩΝΕΥΣΗ ΙΛΥΟΣ ΛΥΜΑΤΩΝ & ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

Η αναερόβια συν-χώνευση των απορριμμάτων τροφίμων και της ιλύος των λυμάτων παρέχει μια σειρά από οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται η εκτροπή των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων από χώρους υγειονομικής ταφής και η δυνατότητα ανάκτησης βασικών πόρων στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας. Υπάρχουν επίσης οικονομικά οφέλη υπό μορφή τελών διαχείρισης αποβλήτων και εισοδημάτων μέσω της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας (Nghiem, Koch, Bolzonella, & Drewes, 2017).

Αναλυτικότερα, με την αφαίρεση των απορριμμάτων τροφίμων από τα ΑΣΑ, αυξάνεται ο διαθέσιμος χώρος αποκομιδής για αδρανή υλικά αποβλήτων με σημαντικά λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τη λειτουργία της υγειονομικής ταφής και τη συντήρηση μετά την παύση λειτουργίας του χώρου. Επιπλέον, αποφεύγεται η παραγωγή μεθανίου από την αποδόμηση των απορριμμάτων τροφίμων, και αντ' αυτού το παραγόμενο μεθάνιο συλλέγεται και αξιοποιείται. Τέλος, η αφαίρεση των απορριμμάτων τροφίμων από τα υλικά υγειονομικής ταφής μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο περιβαλλοντικών ζημιών λόγω διαρροής στραγγιδίων πλούσιων σε νιτρικά στα υπόγεια ύδατα και του κόστους διαχείρισης αυτών (Nghiem, Koch, Bolzonella, & Drewes, 2017).

Στην ΕΕ, η έλλειψη εδάφους, η προστασία του περιβάλλοντος και η υγεία του ανθρώπου, καθώς και η πυκνότητα του πληθυσμού οδήγησαν στην Οδηγία για την Υγειονομική Ταφή (1999), η οποία επιβάλλει υποχρεωτικούς στόχους για την πρόληψη ή τον περιορισμό, στο μέτρο του δυνατού, των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον από την ταφή των αποβλήτων. Η Οδηγία παρέχει στα κράτη μέλη της ΕΕ το απαραίτητο νομικό πλαίσιο για την ελαχιστοποίηση και τη σταδιακή κατάργηση των βιοαποδομήσιμων αποβλήτων από χώρους υγειονομικής ταφής. Αυτή είναι αναμφισβήτητα ο πιο σημαντικός παράγοντας για εξάπλωση της αναερόβιας χώνευσης των απορριμμάτων τροφίμων μέσω της συν-χώνευσης. (Nghiem, Koch, Bolzonella, & Drewes, 2017).

4.4.2.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ

Δεδομένου ότι τα βιοκαύσιμα έχουν την προοπτική να αντικαταστήσουν τα μη ανανεώσιμα καύσιμα πετρελαίου στο μέλλον, η χρήση της ιλύος αποβλήτων ως υπόστρωμα για την παραγωγή τους έχει κερδίσει ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Το υδρογόνο αντιπροσωπεύει ένα από τα αέρια βιοκαύσιμα που μπορούν να ανακτηθούν από τη λάσπη, είναι μια βιώσιμη εναλλακτική λύση λόγω της υψηλής ενεργειακής απόδοσης και του καθαρού αποτελέσματος της καύσης (νερό) (Gherghel, Teodosiu, & De Gisi, 2019).

Για την ανάκτησή του και επιπλέον, για να βελτιωθεί η παραγωγή πλούσιου σε υδρογόνο καυσίμου αερίου από ιλύ λυμάτων, ερευνήθηκαν διάφορες θερμοχημικές επεξεργασίες, όπως η ξήρανση, η πυρόλυση και η αεριοποίηση. Οι Manara και Zabaniotou (2012) επιβεβαίωσαν ότι ένα αέριο προϊόν με υψηλότερο ποσοστό H_2 παράγεται με πυρόλυση και όχι με ξήρανση υγρής λάσπης.

Επιπλέον, το υδρογόνο σε συνδυασμό με το μονοξείδιο του άνθρακα σχηματίζει συνθετικό αέριο, το οποίο μπορεί να αποτελέσει μια καθαρή εναλλακτική λύση για τα ορυκτά καύσιμα στην παραγωγή ηλεκτρισμού ή στην παραγωγή υγρών καυσίμων (Lv et al., 2007). Σύμφωνα με τον Tyagi and Lo (2013), η παραγωγή συνθετικού αερίου λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια: την πυρόλυση της ιλύος λυμάτων και την αεριοποίηση του κάρβουνου παρουσία οξυγόνου ή αέρα. Επίσης, μέσω της πυρόλυσης ιλύος, είναι δυνατή η παραγωγή βιο-ελαίων σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες (Cao and Pawlowski, 2012). Ένας περιορισμός της διεργασίας είναι η παρουσία πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων (PAH) στο έλαιο που έχουν καρκινογόνα ή μεταλλαξιογόνα χαρακτηριστικά. Μία πιθανή λύση για αυτό το πρόβλημα μπορεί να είναι η πυρόλυση επαγωγής μικροκυμάτων. Οι Tian et al. (2011) ανέφεραν μέγιστη απόδοση ελαίου 49,8% κατά βάρος (χρόνος: 6 λεπτά) και αμελητέες ποσότητες PAH.

Ένα άλλο βιοκαύσιμο που μπορεί να ανακτηθεί από την ιλύ είναι το βιοντίζελ. Η δημοτική ιλύς είναι μια πηγή λιπιδίων για την παραγωγή βιοντίζελ, λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητάς της σε λιπίδια (φωσφολιπίδια, μονογλυκερίδια, γλυκερίδια, τριγλυκερίδια και ελεύθερα λιπαρά οξέα) (Kargbo, 2010). Προκειμένου να ενισχυθεί η παραγωγή βιοντίζελ,

είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθούν οι μικροοργανισμοί που επιλέγονται για τις ικανότητές τους παραγωγής πετρελαίου και να χρησιμοποιηθούν οι μέθοδοι προεπεξεργασίας (υπερηχοποίηση, θερμική επεξεργασία ή αλκαλική / όξινη υδρόλυση) (Tyagi and Lo, 2013).

Διαφορετικά, οι Pastore et al. (2013) πρότειναν μια διαδικασία δύο σταδίων για την παραγωγή μεθυλεστέρων λιπαρών οξέων (FAME). Το εκχύλισμα αρχικά αφυδατομένης υλούς με χρήση εξανίου σε όξινο περιβάλλον ακολουθούμενο από μεθανόλυση επιτρέπει την μεγιστοποίηση της απόδοσης των FAME, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τη συνολική κατανάλωση ενέργειας και το κόστος.

Ο τελικός εξαγνισμός του βιοντίζελ με απόσταξη σε κενό επιτρέπει την ανάκτηση βιοντίζελ μαζί με στερόλες, κεριά, αλειφατικές αλκοόλες, καροτίνη και λυκοπένιο, αυξάνοντας το οικονομικό κέρδος της συνολικής διεργασίας (Pastore et al., 2013). Τα πλεονεκτήματα του βιοκαύσιμου που παράγεται από τη λάσπη είναι η διαθεσιμότητά του με χαμηλό κόστος και η αφθονία της προσφοράς υλούς (Massanet-Nicolau et al., 2010).

4.4.2.3 ΑΛΛΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι μικροβιακές κυψέλες καυσίμου (MFC) είναι ένα βιο-ηλεκτροχημικό σύστημα που κινεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμοποιώντας βακτήρια και μιμείται βακτηριακές αλληλεπιδράσεις που απαντώνται στη φύση (Ebrahimi, Najafpour, & Yousefi Kebria, 2018). Η χρήση των MFC για την παραγωγή ηλεκτρισμού θεωρείται βιώσιμη λύση για διάφορα προβλήματα όπως η περίσσεια υλούς και η κρίση νερού και ενέργειας (Nikhil et al., 2018). Επίσης, οι πρόοδοι των MFC στην επεξεργασία λυμάτων μπορούν να βελτιώσουν τη χρήση ενέργειας τους και την ανάκτησή πρώτων υλών (Puig et al., 2017). Σύμφωνα με τους Lefebvre et al. (2011), όταν το κλάσμα του φορτίου ηλεκτρονίων που συμβάλλει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 40% και οι υδραυλικοί χρόνοι παραμονής είναι 20 ώρες, η ενδεχόμενη ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί από τα λύματα μέσω των MFC μπορεί να φθάσει τις 0,65 kWh/m³. Επιπλέον, οι Pappally και Lienhard (2012) δήλωσαν ότι η χρήση των MFC αυξάνει την ενεργειακή αποδοτικότητα σε μια εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, καθώς η κατανάλωση ενέργειας θα μπορούσε να κυμανθεί μεταξύ 0,3 και 0,6 kWh/m³. Εκτός από τα λύματα, και η υλός μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ενέργειας από τις MFC (Gu et al., 2017). Οι Oon et al. (2017), στην έρευνά τους σε ένα τεχνητό υγρότοπο MFC ανοδικής ροής έδειξε ότι τα μακρόφυτα *E. Nuttallii* σε συνδυασμό με συμπληρωματικό αερισμό θα μπορούσαν να αυξήσουν την παραγωγή βιοηλεκτρικής ενέργειας (χρησιμοποιήθηκε O₂ ως τελικός δέκτης ηλεκτρονίων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στις MFC) (Gherghel, Teodosiu, & De Gisi, 2019).

Η δυνατότητα εφαρμογής σε πλήρη κλίμακα οφείλεται στο γεγονός ότι οι MFC μπορούν να απομακρύνουν ή να ανακτήσουν τα θρεπτικά συστατικά και να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια υπό θερμοκρασία περιβάλλοντος, ουδέτερο pH και κανονική πίεση (Raheem et al.,

2018). Στην ιδανική περίπτωση, οι MFC για την επεξεργασία λυμάτων θα πρέπει να συνδυάζουν τόσο την παραγωγή ενέργειας όσο και την ανάκτηση ή την αφαίρεση των θρεπτικών ουσιών. Η ανάκτηση των θρεπτικών συστατικών θα δώσει μια δεύτερη ευκαιρία στα θρεπτικά συστατικά που υπάρχουν στα λύματα, ωθώντας τις ΕΕΛ στην κυκλική οικονομία (Puig et al., 2017). Παρόλο που η χρήση τεχνολογιών MFC σε ΕΕΛ μπορεί να βελτιώσει τις επιδόσεις της επεξεργασίας, η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη εξαιτίας των δαπανηρών υλικών ηλεκτροδίων (Lefebvre et al., 2011).

Μια άλλη τεχνολογία ανάκτησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η *Αναερόβια οξείδωση του αμμωνίου (Anammox)*, λόγω της σημαντικής ποσότητας ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί κατά τη διάρκεια της αφαίρεσης του αζώτου από τις ΕΕΛ. Η *Anammox*, εκτός από το γεγονός ότι μειώνει την ένταση αερισμού και ανακτά τα μέγιστα οργανικά από το νερό, μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή αποδοτικότητα των ΕΕΛ (Gao και Tao, 2011). Η μερική νιτριοποίηση / *anammox* (PN / A) μπορεί να εξοικονομήσει ενέργεια μειώνοντας τη ζήτηση οξυγόνου για τη διαδικασία νιτροποίησης και ελαχιστοποιώντας την ποσότητα της περίσσειας ιλύος (Bauer et al., 2016). Σύμφωνα με τους Gao et al. (2014), η ενέργεια στον αντιδραστήρα *anammox* μπορεί να ανακτηθεί μέσω ενός συνδυασμού αναερόβιας χώνευσης και αυτοτροφικής αφαίρεσης αζώτου, μετατρέποντας τις ΕΕΛ σε συστήματα παραγωγής ενέργειας (Kartal et al., 2010). Σύμφωνα με το Tyagi και Lo (2013), η θερμική ενέργεια που παράγεται από τις διεργασίες επεξεργασίας είναι υψηλότερη από την απαιτούμενη θερμική ενέργεια στην εγκατάσταση. Έτσι, η πλεονάζουσα θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων ως πηγή ενέργειας των αντλιών θερμότητας για την παροχή θερμότητας και την εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας (Gherghel et al, 2019).

4.4.2.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ ΑΡΧΩΝ ΤΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ

4.4.2.4.1 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – SAINSBURY, ΗΝΩΜΕΝΟ ΒΑΣΙΛΕΙΟ

Το σούπερ μάρκετ του Sainsbury στο Cannock, Ηνωμένο Βασίλειο, λειτουργεί εξ ολοκλήρου με την ενέργεια που παράγεται από τα απόβλητα τροφίμων που παράγονται από το κατάστημα. Στο τέλος κάθε ημέρας, τυχόν απούλητα τρόφιμα από όλα τα καταστήματα του Sainsbury σε ολόκληρο το Ηνωμένο Βασίλειο που είναι κατάλληλα για κατανάλωση δίνονται σε φιλανθρωπικές οργανώσεις. Ορισμένα μετατρέπονται επίσης σε ζωοτροφές, αλλά οποιοδήποτε πλεόνασμα μεταφέρεται στην πλησιέστερη εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης του Biffa. Στην περίπτωση του καταστήματος Cannock, η πλησιέστερη εγκατάσταση απέχει μόλις 1,5χλμ. Αξιοποιώντας αυτή την εγγύτητα, εγκαταστάθηκε ένα καλώδιο που συνδέει το κατάστημα απευθείας με το εργοστάσιο αναερόβιας χώνευσης,

παρέχοντας μια άμεση παροχή ανανεώσιμης ενέργειας που παράγεται από τα απόβλητα του καταστήματος και τερματίζοντας την εξάρτηση του από το δίκτυο για τις καθημερινές ενεργειακές του ανάγκες. Παρόλο που το έργο αφορούσε μια επένδυση ύψους περίπου 280.000 στερλινών, η αλυσίδα καταστημάτων λιανικής υπολογίζει ετήσιες εξοικονομήσεις περίπου 140.000 στερλινών χάρη στο μειωμένο ενεργειακό κόστος (Morlet et al., 2017).

4.4.2.4.2 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – MONTPELIER, ΓΑΛΛΙΑ

Στο Montpellier της Γαλλίας, το εργοστάσιο Ametyst της Suez είναι η μεγαλύτερη μονάδα αναερόβιας χώνευσης στη χώρα, ικανή να επεξεργάζεται 173.000 τόνους αστικών στερεών αποβλήτων ετησίως, από τους οποίους 56.000 τόνοι χωνεύονται αναερόβια. Το εργοστάσιο παράγει 19 γιγαβατώρες (GWh) ηλεκτρικής ενέργειας και 7 GWh θερμότητας, η οποία χρησιμοποιείται για 1.500 νοικοκυριά στην τοπική γειτονιά του Griselles, καθώς και το κλινικό κέντρο του Saint-Roch. Επιπλέον, παράγονται 25.800 τόνοι κομπόστ που χρησιμοποιούνται στους δημόσιους χώρους πρασίνου και στους τοπικούς γεωργικούς τομείς (Morlet et al., 2017).

4.4.2.4.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – ARTOIS, ΓΑΛΛΙΑ

Στην καρδιά μιας γεωργικής περιοχής στη βόρεια Γαλλία, η Veolia δημιούργησε την τοποθεσία αναερόβιας χώνευσης Artois το 2012. Αυτή η μονάδα μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει οργανικά απόβλητα από τη γεωργία (γεωργική βιομάζα, ρίζες ραδικιού), τη βιομηχανία τροφίμων (βιολογικές λάσπες, πλεούμενα λίπη, απόβλητα της μεταποιητικής δραστηριότητας, απόβλητα κρέατος, απόβλητα κέτερινγκ μεταξύ άλλων), τις τοπικές αρχές (γρασίδι, απόβλητα καντινών) και τα σουπερ μάρκετ (συσκευασμένα προϊόντα που δεν έχουν πωληθεί). Ο χώρος είναι εξοπλισμένος με ένα πλήρες σετ λύσεων, από την αποκατάσταση έως την επαναχρησιμοποίηση. Οι συσκευασίες, όπως το χαρτόνι και το πλαστικό, διαχωρίζονται από το οργανικό υλικό πριν ταξινομηθούν και κατευθυνθούν στις κατάλληλες μονάδες ανακύκλωσης. Η ετήσια επεξεργασία 25.000 τόνων οργανικών αποβλήτων παράγει 3,5 εκατομμύρια κυβικά μέτρα βιοαερίου ετησίως και 8 GWh ηλεκτρικής ενέργειας ή το ποσό που καταναλώνεται από 2.700 νοικοκυριά. Αυτή η ενέργεια πωλείται και εισάγεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αποφεύγοντας έτσι 2.000 ισοδύναμους τόνους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κάθε χρόνο (Morlet et al., 2017).

4.4.2.4.4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΣΤΟ CAMPOSAMPIERO (ΙΤΑΛΙΑ)

Η πρωταρχική λειτουργία του εργοστασίου στο Camposampiero (Ιταλία) είναι η επεξεργασία οργανικών αποβλήτων. Έτσι, ο χωνευτής έχει σχεδιαστεί ειδικά για απόβλητα πλούσια σε

οργανικά. Η ιλύς λυμάτων αποτελεί λιγότερο από 25% κατ' όγκο. Τα απόβλητα για το εργοστάσιο Camposampiero είναι κυρίως το χωριστά συλλεγμένο οργανικό κλάσμα αστικών στερεών αποβλήτων (ΟΚΑΣΑ) από αστικές περιοχές. Το ΟΚΑΣΑ τεμαχίζεται και πολτοποιείται. Τα βαρέα στερεά σωματίδια (π.χ. οστά, κελύφη, μεταλλικά καπάκια, σπασμένα κεραμικά και γυαλί) απομακρύνονται. Ο πολτός απορριμμάτων τροφίμων υδrolύεται για περίπου μία ημέρα προτού υποστεί συν-χώνευση υπό θερμοφίλες συνθήκες (δηλ. 55 °C) με ενεργή ιλύ από παρακείμενη εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων. Τα βιοσωματίδια από το εργοστάσιο Camposampiero κομποστοποιούνται και τελικά χρησιμοποιούνται ως λιπάσματα ή βελτιωτικά εδάφους σε γεωργικές εκτάσεις (Nghiem, Koch, Bolzonella, & Drewes, 2017).

4.4.2.4.5 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ – ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟ ΣΤΟ MOOSBURG (ΓΕΡΜΑΝΙΑ)

Η συν-χώνευση εφαρμόζεται στο εργοστάσιο επεξεργασίας λυμάτων στο Moosburg για περισσότερα από 10 χρόνια. Τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα τροφίμων παρέχονται από το εργοστάσιο Oberding, το οποίο αποτελεί κεντρική μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων τροφίμων, και παρέχει περίπου 22 τόνους/ημέρα. Στη συνέχεια υποβάλλονται σε εργαστηριακή ανάλυση πριν από τη συν-χώνευση με ένα μείγμα 50% / 50% πρωτογενούς και ενεργούς ιλύος από το εργοστάσιο. Το χωνεμένο προϊόν αφυδατώνεται, ξηραίνεται θερμικά και μεταφέρεται για αποτέφρωση. Λόγω της μεγάλης αναλογίας οργανικών, η παραγωγή ενέργειας και θερμότητας είναι πολύ υψηλότερη από την εσωτερική ζήτηση στο εργοστάσιο του Moosburg. Ως εκ τούτου, το πλεόνασμα ενέργειας τροφοδοτείται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η πλεονάζουσα θερμότητα διοχετεύεται σε ξηρή αφυδατωμένη ιλύ αποβλήτων από άλλες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων ως προεπεξεργασία πριν από την αποτέφρωση. Τα τέλη εισαγωγής στο εργοστάσιο του Moosburg ποικίλλουν ανάλογα με το είδος των οργανικών (Nghiem, Koch, Bolzonella, & Drewes, 2017).

4.4.2.4.6 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – Η ΠΟΛΗ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΥΟΡΚΗΣ

Η πόλη της Νέας Υόρκης παράγει 5,3 δισεκατομμύρια λίτρα αποβλήτων κάθε μέρα, τα οποία πρέπει να υποστούν επεξεργασία πριν απορριφθούν εκ νέου σε τοπικά υδάτινα συστήματα. Η ενέργεια που απαιτείται για την επεξεργασία εκτιμάται σε 130 - 660 kWh ανά εκατομμύριο λίτρα, ποσό ίσο με ημερήσιο λογαριασμό ενέργειας μεταξύ 70.000 και 350.000 δολαρίων (Electricity Local, με 0,10 δολάρια ανά kWh). Αυτή η υψηλή ζήτηση ενέργειας απαιτεί μία αξιόπιστη τροφοδοσία, γεγονός που εξηγεί γιατί αυτή η προσέγγιση στην επεξεργασία των λυμάτων δεν πετύχαινε πάντα στις αναδυόμενες αγορές. Ωστόσο, η ανάλυση της χημικής και θερμικής ενέργειας στα λύματα αποκαλύπτει ότι περιέχει έως και 14 φορές περισσότερη ενσωματωμένη ενέργεια από εκείνη που απαιτείται για την επεξεργασία τους. Περίπου το

80% αυτής της ενέργειας είναι χαμηλής ανακτησιμότητας θερμότητα. Ωστόσο, εάν το υπόλοιπο 20% μετατραπεί σε βιοαέριο και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση μετατροπής 40%, θα ήταν ακόμη θεωρητικά δυνατό να επιτευχθεί σταθμός επεξεργασίας θετικής ισχύος (Parry, D, 2014). Μια αμερικανική μελέτη διαπίστωσε ότι τα εργοστάσια επεξεργασίας λυμάτων, αν εκτιμηθούν συλλογικά, θα μπορούσαν να καλύψουν το 10% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ (Scott, L).

4.4.2.4.7 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – ODENSE, ΔΑΝΙΑ

Σε επίπεδο μεμονωμένης εγκατάστασης, τεχνολογικός πρωτοπόρος στη μετατροπή της θεωρίας στην πράξη βρίσκεται στο Odense της Δανίας. Το εργοστάσιο επεξεργάζεται λύματα από το μεγαλύτερο μέρος του δήμου Odense, ο οποίος παράγει περισσότερα από 20 εκατομμύρια κυβικά μέτρα λυμάτων ετησίως. Με δυνατότητα εξυπηρέτησης 385.000 ισοδύναμων κατοίκων, το εργοστάσιο επεξεργασίας Ejby Mølle πέτυχε 110% αυτάρκεια στην ηλεκτρική ενέργεια, το οποίο σημαίνει ότι το εργοστάσιο παράγει περισσότερο ηλεκτρισμό από ό,τι καταναλώνει. Επιπλέον, έχουν εντοπιστεί ευκαιρίες περαιτέρω βελτίωσης αυτής της απόδοσης που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα, καθώς θα βελτιώσουν την επαναχρησιμοποίηση των θρεπτικών ουσιών και θα μεγιστοποιήσουν την εξαγωγή βιοαερίου για πρόσθετη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων Ejby Mølle διαθέτει πέντε βασικά στοιχεία: μια μηχανική μονάδα επεξεργασίας, μια μονάδα ενεργούς ιλύος, δύο ομάδες χαλικοδιυλιστηρίων για επεξεργασία των όμβριων υδάτων, ένα φίλτρο άμμου και μια μονάδα αφυδάτωσης ιλύος. Μετά την επεξεργασία, μια μονάδα αερισμού εξασφαλίζει υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου στο νερό προς διάθεση. Στο εργοστάσιο, η ανανεώσιμη ενέργεια παράγεται μετατρέποντας ιλύ σε βιοαέριο και βιοαέριο σε θερμότητα και ηλεκτρισμό. Το εργοστάσιο παράγει τώρα περισσότερο ηλεκτρισμό από ό,τι χρησιμοποιεί. Οι χωνευτές και τα κτίρια θερμαίνονται με τη θερμότητα που δημιουργείται από την εγκατάσταση παραγωγής αερίου και η παραγωγή πλεονάζουσας θερμότητας πωλείται στην περιφερειακή εταιρεία κοινής ωφελείας (State of Green).

4.4.2.4.8 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – THAMES WATER, ΗΝΩΜΕΝΟ ΒΑΣΙΛΕΙΟ

Σε μεγαλύτερη κλίμακα, η εταιρεία Thames Water στο Ηνωμένο Βασίλειο εξοικονόμησε περίπου 15 εκατομμύρια στερλίνες στους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας του 2013, παράγοντας το 14% της ενεργειακής της ζήτησης από λυματολάσπη (Thames Water, 2013). Από τότε, η εταιρεία επενδύει σε νέο εξοπλισμό θερμικής υδρόλυσης, ο οποίος επεξεργάζεται την ιλύ υπό πίεση στους 160 °C, διασπώντας τους δεσμούς και επιτρέποντας την εξαγωγή περισσότερου βιοαερίου ανά τόνο ιλύος. Χρησιμοποιώντας αναερόβια

χώνευση μαζί με ήλιο και άνεμο, η Thames Water στοχεύει να ικανοποιεί το 20% της ζήτησης ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές. Παράλληλα με τη μείωση των λογαριασμών ενέργειας, η αποδοτικότερη μετατροπή σημαίνει λιγότερα βιοστερεά στο τέλος της διαδικασίας επεξεργασίας. Επιπλέον, μειώνει το κόστος μεταφοράς που απαιτείται για την επιστροφή του πλούσιου σε θρεπτικά οργανικού υλικού πίσω στη γεωργική γη κατά 2 εκατομμύρια στερλίνες (Morlet et al, 2017).

4.4.2.4.9 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – ΕΥΔΑΠ, ΕΛΛΑΔΑ

Η ΕΥΔΑΠ, ως επιχείρηση Κοινής Ωφέλειας στο χώρο των υπηρεσιών ύδατος, έχει ως βασική δραστηριότητα την παραγωγή και διανομή πόσιμου νερού και τη συλλογή, διαχείριση και επεξεργασία των αστικών λυμάτων. Διαθέτει 3 Κέντρα Επεξεργασίας Λυμάτων (ΚΕΛ), το ΚΕΛ Ψυττάλειας, το ΚΕΛ Θριασίου και το ΚΕΛ Μεταμόρφωσης, στα οποία τα λύματα υπόκεινται βιολογική επεξεργασία με τη μέθοδο ενεργού ιλύος. Η ιλύς που παράγεται από την επεξεργασία αφυδατώνεται, ξηραίνεται στο ΚΕΛΨ και αξιοποιείται ως καύσιμο στην τσιμεντοβιομηχανία. Επιπλέον, στο στάδιο της χώνευσης της επεξεργασίας της λάσπης παράγεται βιοαέριο, τόσο στο ΚΕΛΨ όσο και στο ΚΕΛΜ. Το βιοαέριο αυτό αξιοποιείται για την παραγωγή ενέργειας. Στο ΚΕΛΨ όλη η ποσότητα βιοαερίου που παράγεται χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της εγκατάστασης, ενώ στο ΚΕΛΜ χρησιμοποιείται περίπου το 70% της ποσότητας βιοαερίου που παράγεται. Το σύνολο του βιοαερίου που παράχθηκε στα ΚΕΛ της ΕΥΔΑΠ για το 2018 ανέρχεται σε 33.087.514 Nm³ (ΕΥΔΑΠ, 2018).

4.5 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΙΛΥΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

4.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αύξηση της ποσότητας της λυματολάσπης είναι ένα παγκόσμιο πρόβλημα στο πλαίσιο της αύξησης του πληθυσμού και της επαρκούς παροχής υπηρεσιών αποχέτευσης μέσω μεγάλων μονάδων επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ). Σύμφωνα με την έκθεση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (EC, 2008), περισσότεροι από 10 εκατομμύρια τόνοι ξηρών στερεών ιλύος παρήχθησαν στα κράτη μέλη (26 ΕΕ) το 2008 και το ποσό της ιλύος αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται έως και τους 13 εκατομμύρια τόνους έως το 2020 (Kelessidis and Stasinakis, 2012). Η ιλύς είναι το στερεό υπόλειμμα που παραμένει μετά την επεξεργασία των λυμάτων (Abelleira et al., 2012), που παράγονται με μεθόδους όπως η ενεργή ιλύς, η αερόβια-οξική, η αναερόβια-ανοξική-οξική, η οξειδωμένη, η κυκλικά ενεργή ιλύς και από διεργασίες υποστρώματος ιλύος αναερόβιου αντιδραστήρα ανοδικής ροής (Gong et al., 2014). Η ποιότητα της ακατέργαστης λυματολάσπης και οι τεχνολογίες επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται στις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων μπορούν να επηρεάσουν τα τελικά χαρακτηριστικά της επεξεργασμένης ιλύος λυμάτων (Kacprzak et al., 2017). Ως εκ τούτου, η χρήση σε ΕΕΛ

διαφόρων διεργασιών επεξεργασίας λυμάτων και ιλύος (φυσικής, μηχανικής, χημικής και βιολογικής) φαίνεται να είναι το κλειδί για την επίτευξη της απομάκρυνσης των ρύπων από την ιλύ (Anjum et al., 2016) και για την ευθυγράμμιση με τις αυστηρές νομοθετικές απαιτήσεις για τις διαθέσεις ή την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων (Praspaliauskas and Pedisius, 2017).

Αν και θεωρείται κατάλοιπο, η ιλύς λυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας ή πόρων, αντικαθιστώντας έτσι μια ισοδύναμη ποσότητα υλικών / ενέργειας που διαφορετικά θα έπρεπε να παράγεται από μη ανανεώσιμους πόρους με σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Fijalkowski et al., 2017). Οι πρακτικές επεξεργασίας και διάθεσης ιλύος είναι σημαντικές για την προστασία του περιβάλλοντος λόγω της περιεκτικότητας της σε υπολειμματικούς οργανικούς ρύπους, τοξικά μέταλλα και παθογόνους μικροοργανισμούς που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα υγείας και πρέπει να απομακρύνονται (Anjum et al., 2016). Ταυτόχρονα, απαιτούν υψηλές ποσότητες ενέργειας (με συναφείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις), με το κόστος της επεξεργασίας της ιλύος να αντιπροσωπεύει περίπου το 50% του συνολικού κόστους λειτουργίας των ΕΕΛ (Collivignarelli et al., 2015; Qian et al., 2016). Είχε διαπιστωθεί ότι οι διαδικασίες διάθεσης ιλύος ευθύνονται για το 40% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τους σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων. Το ποσοστό αυτό θα μπορούσε να μειωθεί αν εφαρμοζόταν η έννοια της κυκλικής οικονομίας (Brown et al., 2010; Pilli et al., 2015).

Λόγω της νομοθεσίας που περιορίζει την υγειονομική ταφή και την εφαρμογή στη γη ως μεθόδους διάθεσης ιλύος, πολλοί ερευνητές επιχείρησαν την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση της ιλύος ως πιθανές βιώσιμες περιβαλλοντικές επιλογές (Smol et al., 2015). Σε σχέση με αυτό, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2011) θεωρεί ότι "εάν τα απόβλητα πρόκειται να αποτελέσουν πόρο που θα διοχετευθεί στην οικονομία ως πρώτη ύλη, θα πρέπει να δοθεί πολύ μεγαλύτερη προτεραιότητα στην επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση". Η επαναχρησιμοποίηση της ιλύος ως πρώτη ύλη σε διάφορες βιομηχανίες αντιπροσωπεύει μια καλή δυνατότητα διαχείρισης των αποβλήτων λαμβάνοντας υπόψη την έννοια της κυκλικής οικονομίας (Eliche-Qusada et al., 2011). Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι τα οργανικά συστατικά από την ιλύ είναι μια πλούσια πηγή πόρων όσον αφορά την ενέργεια και τα θρεπτικά συστατικά που είναι δυνατό να αξιοποιηθούν, μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε το 2015 από τη Διεθνή Ένωση Στερεών Αποβλήτων (ISWA, 2015), δείχνει ότι, στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας, ένα σημαντικό όφελος από την ενέργεια και τα καύσιμα που λαμβάνονται από τα απόβλητα είναι ότι μπορούν να αντικαταστήσουν άλλους ενεργειακούς πόρους και να περιορίσουν τις σχετικές εκπομπές CO₂ (Gherghel, Teodosiu, & De Gisi, 2019).

4.5.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΙΛΥΟΣ

Σε μια δημοτική εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας, παράγονται αρκετοί τύποι ιλύος, ως εξής:

1. Η **πρωτογενής ιλύς** παράγεται κατά τη διάρκεια της πρωτογενούς επεξεργασίας (εσχάρωση, εξάμμωση, επίπλευση, κατακρήμνιση και καθίζηση), όταν τα βαρέα στερεά, το λίπος και τα έλαια διαχωρίζονται από τα ακατέργαστα λύματα (Manara and Zabaniotou, 2012; Tyagi and Lo, 2013; Suarez-Iglesias et al., 2017). Συνήθως, η πρωτογενής ιλύς περιέχει 2% - 9% στερεά, ενώ το υπόλοιπο 90% (μερικές φορές ακόμη και 99,5%) είναι νερό (Tyagi and Lo, 2013).
2. Η **δευτερογενής ιλύς** (ενεργή ιλύς) παράγεται κατά τη διάρκεια της βιολογικής επεξεργασίας, όταν οι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν το βιοαποικοδομήσιμο οργανικό κλάσμα των λυμάτων (Deví and Saroha, 2017). Η ολική συγκέντρωση στερεών είναι μεταξύ 0,8% και 3,3%, ανάλογα με τον τύπο της διαδικασίας βιολογικής επεξεργασίας που χρησιμοποιείται (Tezel et al., 2011; Suarez-Iglesias et al., 2017), με το υπόλοιπο να είναι νερό. Το οργανικό κλάσμα ενεργής ιλύος περιέχει: άνθρακα 50-55%, οξυγόνο 25-30%, άζωτο 10-15%, υδρογόνο 6-10%, φωσφόρο 1-3% και θείο 0,5-1,5% (Tyagi and Lo, 2013).
3. Η **τριτογενής ιλύς** λαμβάνεται στα προηγμένα στάδια επεξεργασίας λυμάτων, όταν απαιτείται η αφαίρεση θρεπτικών ουσιών (αζώτου και φώσφορου) (Manara and Zabaniotou, 2012). Γενικά, οι διεργασίες αφαίρεσης θρεπτικών ουσιών εκτελούνται ταυτόχρονα με την απομάκρυνση οργανικής ύλης (Gherghel A. et al, 2019).
4. Η **χημική ιλύς** παράγεται από οποιοσδήποτε χημικές διεργασίες εφαρμόζονται στην δημοτική εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων, όπως η διαδικασία Χημικά Υποβοηθούμενης Πρωτογενούς Καθίζησης (Chemically Assisted Primary Sedimentation Process - CAPS). Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη χορήγηση κατάλληλου πηκτικού πριν από την πρωτογενή καθίζηση, προκειμένου να μειωθεί το οργανικό φορτίο στην επόμενη βιολογική επεξεργασία (De Feo et al., 2008, 2013). Τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της ιλύος εξαρτώνται από το αντιδραστήριο και τις δοσολογίες που χρησιμοποιούνται. Τυπικά αντιδραστήρια είναι η ένυδρη άσβεστος, ο χλωριούχος σίδηρος, το θειικό αργίλιο και η χιτοζάνη. Εκτός από την ένυδρη άσβεστο, με δόσεις μεταξύ 30 και 500 mg/l CaOH_2 , το εύρος δοσολογίας των αντιδραστηρίων είναι 10-50 mg/l. Οι χημικές ιλύες, ειδικά εκείνες από την CAPS, μπορεί να περιέχουν όχι αμελητέες ποσότητες μετάλλων, μερικές από τις οποίες είναι το αποτέλεσμα των χρησιμοποιούμενων ανόργανων κροκιδωτικών. Η χημική ιλύς μπορεί επίσης να παραχθεί με πήξη-κροκίδωση του παχυμένου υπερκείμενου υγρού (Wei et al., 2018), καθώς και με έκπληση φίλτρων με νερό ύστερα από καθίζηση / χημική-φυσική κατεργασία (Gherghel, A. et al, 2019).

Η πρωτογενής ιλύς έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε συνολικά και πτητικά στερεά από τη δευτερογενή βιολογική ιλύ. Η δευτερογενής ιλύς, από την άλλη πλευρά, έχει καλή περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά. Η ταυτόχρονη παρουσία πρωτογενούς καθίζησης, χαρακτηριστική μιας μεγάλης μονάδας επεξεργασίας λυμάτων, καθιστά την δευτερογενή βιολογική ιλύ "καθαρότερη" όσον αφορά την περιεκτικότητα σε μέταλλα. Ως αποτέλεσμα, η πρωτογενή ιλύς είναι θεωρητικά κατάλληλη για ανάκτηση ενέργειας με αναερόβια χώνευση,

ενώ η δευτερογενής ιλύς είναι καταλληλότερη για την ανάκτηση υλικών με τη χρήση της στη γεωργία ως λίπασμα (Gherghel, A. et al, 2019).

4.5.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΤΗΣ ΙΛΥΟΣ

Έχουν αναπτυχθεί πολλές φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες για την επεξεργασία ή την ελαχιστοποίηση της παραγωγής λάσπης (Xu et al., 2014; Praspaliauskas and Pedisius, 2017; Zhang et al., 2017). Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για τη διάθεση της πλεονάζουσας ιλύος είναι η αποτέφρωση, η υγειονομική ταφή, η απόρριψη στον ωκεανό (Anjum et al., 2016; Qian et al., 2016), η επαναχρησιμοποίηση στη γεωργία (απευθείας ή μετά από κομποστοποίηση) και η επαναχρησιμοποίηση για την παραγωγή τσιμέντου, τούβλων και ασφάλτου (Zhen et al., 2017; Świerczek et al., 2018; De Carvalho Gomes et al., 2019).

Ακόμη και αν το 40% περίπου της συνολικής ιλύος που παράγεται στην ΕΕ χρησιμοποιείται στη γεωργία (Eurostat, 2015), ορισμένες χώρες της ΕΕ υιοθέτησαν αυστηρότερες οριακές τιμές για τους ρύπους από εκείνες που αναφέρονται στην Οδηγία για την Ιλύ Αποχέτευσης (Sewage Sludge Directive - SSD). Κάθε χώρα έχει λάβει τη δική της απόφαση, κάποιες από αυτές έχουν προσθέσει νέους ρύπους στον κατάλογο της SSD, ενώ άλλες, λαμβάνοντας υπόψη τους περιβαλλοντικούς κινδύνους της χρήσης ιλύος στη γεωργία, εγκατέλειψαν αυτή τη μέθοδο διάθεσης ιλύος (Kacprzak et al., 2017). Για παράδειγμα, το 2010, αρκετές χώρες της ΕΕ, όπως το Ηνωμένο Βασίλειο, η Δανία, η Γαλλία, το Βέλγιο και η Ισπανία, χρησιμοποίησαν περισσότερο από το 50% της ιλύος στη γεωργία (EC, 2008), ενώ χώρες όπως η Ολλανδία, η Ελλάδα, η Ρουμανία, η Σλοβενία και η Σλοβακία δεν τη χρησιμοποίησαν καθόλου. Ο Smith (2002) υποστήριξε ότι η αξιοποίηση της προσέγγισης Καλύτερης Εφαρμόσιμης Περιβαλλοντικής Επιλογής (Best Practicable Environmental Option - BPEO) μπορεί να αξιολογήσει τις επιπτώσεις σε όλα τα περιβαλλοντικά μέσα. Ο Kacprzak και συνεργάτες (2017) επιβεβαιώνουν ότι η γεωργική χρήση της ιλύος θεωρείται BPEO, αλλά εξαρτάται από τη συναίνεση των αγροτών. Όταν η γη χρησιμοποιείται για την παραγωγή τροφίμων, είναι επιτακτική η ειδική ανάλυση της ιλύος και η λήψη μέτρων για την αποφυγή της μεταφοράς ρύπων. Από περιβαλλοντική άποψη, η γεωργική χρήση της ιλύος παραμένει μία από τις προτιμώμενες επιλογές λόγω της περιεκτικότητας της ιλύος σε θρεπτικά συστατικά που μπορούν να ανακτηθούν (Fijalkowski et al., 2017).

Όσον αφορά τη διάθεση της ιλύος σε χώρους υγειονομικής ταφής, η χρήση αυτή μειώνεται λόγω των υψηλών αρνητικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την παραγωγή στραγγισμάτων και τις ισοδύναμες εκπομπές CO₂ (Kacprzak et al., 2017), καθώς και λόγω της νομοθεσίας της ΕΕ που έγινε αυστηρότερη (Manara and Zabaniotou, 2012). Σύμφωνα με τους Kelessidis και Stasinakis (2012), οι οποίοι μελέτησαν τις μεθόδους επεξεργασίας και τελικής διάθεσης της ιλύος σε ευρωπαϊκές χώρες, από το 2000 έως το 2009 μόνο τρεις χώρες ανέφεραν αύξηση της χρήσης υγειονομικής ταφής (Ιταλία, Δανία και Εσθονία) (Gherghel. A et al, 2019).

Από την άλλη πλευρά, η χρήση της αποτέφρωσης έχει αυξηθεί σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες, λόγω της μεγάλης μείωσης του όγκου της ιλύος και της θερμικής αποτελεσματικότητας (Manara and Zabaniotou, 2012). Αναλύοντας τις τάσεις των μεθόδων διάθεσης της ιλύος (χρήση στη γεωργία άμεσα ή μέσω της κομποστοποίησης, υγειονομική ταφή και αποτέφρωση) που εφαρμόζονται στις χώρες της ΕΕ των 15, η αποτέφρωση είναι για τη Γερμανία και την Ολλανδία μια ολοένα και πιο υιοθετημένη λύση (με ανοδική τάση 28% και 16%). Από την άλλη πλευρά, υιοθετείται όλο και λιγότερο από τη Δανία και το Βέλγιο, με πτωτική τάση 22% και 12% αντίστοιχα (Kelessidis and Stasinakis, 2012).

Η εφαρμογή της βέλτιστης στρατηγικής για τη διαχείριση της ιλύος θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη: (i) το κόστος του καθαρισμού αερίων για τον έλεγχο της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Manara and Zabaniotou, 2012), (ii) την απελευθέρωση βαρέων μετάλλων στο περιβάλλον (Kelessidis and Stasinakis, 2012) και (iii) την επιλογή για αποτέφρωση στην περίπτωση μεγάλων μονάδων επεξεργασίας λυμάτων ή όταν η ποιότητα της ιλύος δεν είναι κατάλληλη για εφαρμογές στη γη. (Kacprzak et al., 2017). Ωστόσο, η αυξημένη φροντίδα για την προστασία του περιβάλλοντος (και η αυστηρή νομοθεσία), καθώς και η εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας οδήγησαν στην εξέταση άλλων εναλλακτικών τεχνολογιών για την ελαχιστοποίηση και την επεξεργασία της ιλύος.

Μεταξύ αυτών, η αναερόβια χώνευση διαδραματίζει θεμελιώδη ρόλο, καθώς επιτρέπει την απομάκρυνση των παθογόνων παραγόντων, τη μετατροπή των πτητικών στερεών σε βιοαέριο (και στη συνέχεια σε ενέργεια), καθώς και τη λήψη σταθερών βιοστερεών για μηχανική αφυδάτωση (Semblante et al., 2015; Nazari et al., 2017). Επίσης, λόγω της δυνατότητας συν-χώνευσης με οργανικά απόβλητα, η αναερόβια χώνευση θεωρείται ως μια εξαιρετικά οικονομικά αποδοτική τεχνολογία (Zhang et al., 2017), καθώς παρέχει ανάκτηση ενέργειας με τη μορφή μεθανίου, με περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Σε πολλές χώρες / περιφέρειες, η αναερόβια χώνευση εφαρμόζεται εντατικά. Στην περίπτωση της Καλιφόρνιας, το 82% των συνολικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων υιοθετεί αναερόβια χώνευση για τη σταθεροποίηση της ιλύος (Anjum et al., 2016).

Η αερόβια χώνευση είναι μια άλλη μέθοδος σταθεροποίησης της ιλύος που λαμβάνει χώρα σε έναν πλήρως αεριζόμενο αντιδραστήρα και επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του συστήματος και το χρόνο κατακράτησης (Semblante et al., 2015).

Οι διεργασίες κομποστοποίησης περιλαμβάνουν επεξεργασία και μετατροπή της ιλύος σε σταθεροποιημένο προϊόν, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οργανικό λίπασμα ή προϊόν προστιθέμενης αξίας (Anjum et al., 2016). Η διαδικασία κομποστοποίησης έχει ορισμένους περιορισμούς όπως τα χαρακτηριστικά σύνθεσης της ιλύος, η έλλειψη μικροοργανισμών, η απώλεια θερμοκρασίας ή η παρουσία παθογόνων παραγόντων. Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, η κομποστοποίηση της ιλύος εξακολουθεί να εφαρμόζεται σε ευρεία κλίμακα (Elia Ruda et al., 2013; Anjum et al., 2016). Χώρες όπως η Εσθονία, η Γαλλία, η Σλοβακία, η Σουηδία, η Ουγγαρία και η Τσεχία κομποστοποιούν τη μεγαλύτερη ποσότητα ιλύος τους (Prasaliauskas and Pedisius, 2017). Ένας περιορισμός στη χρήση της

κομποστοποίησης είναι η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις για τα οργανικά λιπάσματα (Fijalkowski et al., 2017).

4.5.4 ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΛΥΟΣ ΣΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΛΥΜΑΤΩΝ / ΙΛΥΟΣ

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της ποσότητας της ιλύος μπορούν να εφαρμοστούν στη γραμμή ύδρευσης ή / και στη γραμμή ιλύος (Gherghel. A et al, 2019).

Σύμφωνα με την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών (USEPA, 2012), οι τεχνολογίες μείωσης της ιλύος μπορούν να εφαρμοστούν στη γραμμή ύδρευσης όταν δεν υπάρχει αναερόβια χώνευση. Όσον αφορά τη γραμμή ιλύος, οι τεχνολογίες μπορούν να εφαρμοστούν σε μεγάλες μονάδες επεξεργασίας λυμάτων όπου υπάρχει αναερόβια χώνευση.

Όσον αφορά τη γραμμή ύδρευσης, έχουν αναπτυχθεί πολλές μηχανικές, θερμικές και χημικές τεχνολογίες επεξεργασίας. Μεταξύ των χημικών επεξεργασιών, προτείνονται ο οζονισμός (Gardoni et al., 2011; Romero et al., 2015), η οξειδωση του Fenton (He and Wei, 2010), η καταλυτική υγρή οξειδωση (Jing et al., 2012; Ureea et al., 2014), καθώς και το ελεύθερο νιτρώδες οξύ (Pijuan et al., 2012; Wang et al., 2013). Οι He et al. (2011) και Mohammadi et al. (2011) έχουν εφαρμόσει στις μελέτες τους υπερηχητική επεξεργασία για τη μείωση της παραγωγής ιλύος. Αντ' αυτού, οι Abelleira et al. (2012) και Heinz (2007) χρησιμοποίησαν θερμική και ηλεκτρική επεξεργασία, αντίστοιχα. Άλλες θεραπείες είναι η προσθήκη ενός χημικού αποζεύκτη (Guo et al., 2014; Zuriaga-Augusti et al., 2016) και μια συνδυασμένη επεξεργασία (Semblante et al., 2014) με στάδια φυσικής και βιολογικής επεξεργασίας. Μερικοί ερευνητές πρότειναν μια θεραπεία με βάση οργανισμούς (πρωτόζωα και μετάζωα) (Khursheed and Kazmi, 2011; Zhang et al., 2013) ενώ άλλοι πρότειναν την αντικατάσταση της συμβατικής μεθόδου ενεργής ιλύος (conventional activated sludge - CAS) με νέες βιολογικές διεργασίες όπως ο αντιδραστήρας εναλλασσόμενης λειτουργίας κοκκώδους βιοφίλτρου (sequencing batch biofilter granular reactor – SBBGR) (Di Iaconi et al., 2010; Lotito et al., 2012), καθώς οδηγεί στην παραγωγή 5-6 φορές χαμηλότερη ποσότητα παραγόμενης ιλύος ανά κιλό απομακρυσμένης οργανικής ύλης σε όρους χημικής ζήτησης οξυγόνου (COD).

Όσον αφορά τη γραμμή ιλύος, μερικές από τις παραπάνω τεχνολογίες για τη γραμμή νερού μπορούν επίσης να εφαρμοστούν εδώ. Παραδείγματα είναι: η προεπεξεργασία με υπερήχους (Donoso-Bravo et al., 2010; Martinez- Guerra and Gude, 2015), η θερμική προεπεξεργασία (Perez- Elvira and Fdz-Polanco, 2012; Abelleira- Peraiva et al., 2015) και ο οζονισμός (Erden and Filibeli, 2011; Silvestre et al., 2014). Οι φυσικές επεξεργασίες στη γραμμή ιλύος περιλαμβάνουν την προεπεξεργασία μικροκυμάτων (Uma Rani et al., 2013; Yeneneh et al., 2015), την εστιασμένη επεξεργασία παλμών (Lee et al., 2010), τη

φυγοκέντριση με λύση – πάχυνση (Wang et al., 2017), την ομογενοποίηση υπό υψηλή πίεση (Zhang et al., 2012) και την άλεση με αναδευόμενες μπάλες (Anjum et al., 2016).

Μεταξύ των τεχνολογιών μείωσης της ιλύος, η θερμική υδρόλυση είναι σήμερα μια από τις πιο ελπιδοφόρες λύσεις για τη γραμμή ιλύος μιας μεγάλης δημοτικής μονάδας επεξεργασίας λυμάτων. Η τεχνολογία έχει αναπτυχθεί από κορυφαίες εταιρίες επεξεργασίας λυμάτων όπως η θερμική υδρόλυση Cambi και η Exelys® από τη Veolia. Η θερμική υδρόλυση βασίζεται σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της πίεσης λειτουργίας εντός ειδικών αντιδραστήρων και μπορεί να εφαρμοστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, ανάλογα με τους στόχους που πρέπει να επιδιωχθούν μέσω της υλοποίησής της: (i) ανάντη της αναερόβιας χώνευσης, εάν η προτεραιότητα είναι η αύξηση της απόδοσης του θαλάμου χώνευσης, (ii) κατάντη της αναερόβιας χώνευσης, εάν η προτεραιότητα είναι η βελτίωση της αφυδάτωσης της ιλύος. Είναι σαφές ότι η δεύτερη μέθοδος επιτρέπει τη σημαντική μείωση του όγκου της ιλύος κατά τη διάθεσή της, καθώς η περιεκτικότητα σε ξηρά ουσία αυξάνεται από 40 έως 60%, απόδοση πολύ υψηλότερη από αυτή που επιτυγχάνεται μέσω της πιο αποδοτικής τεχνολογίας μηχανικής αφυδάτωσης της όπως η ταινιοφιλτρόπρεσσα (35%) (Gherghel, A et al, 2019).

4.5.5 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΙΛΥΟΣ ΑΠΟ ΕΕΛ

4.5.5.1 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ

Σημαντικές ποσότητες θρεπτικών ουσιών (περίπου 0,5 - 0,7% φώσφορου και 2,4 - 5,0% αζώτου) περιέχονται στη ιλύ λυμάτων με τη μορφή πρωτεϊνούχων υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή φυτικών λιπασμάτων (Tygi and Lo, 2013). Λόγω του γεγονότος ότι ο φώσφορος δεν είναι πλέον ένας ανεξάντλητος πόρος, παράλληλα με το υψηλότερο κόστος των εμπορικών λιπασμάτων και τις πιο απαιτητικές νομοθετικές απαιτήσεις, έχουν αναπτυχθεί πολλές βιολογικές και χημικές διεργασίες για την ανάκτηση θρεπτικών ουσιών από λύματα και λάσπη (Kleemann et al., 2015; Zhou κ.ά., 2016). Η ανάκτηση και η ανακύκλωση του φώσφορου θεωρείται πιθανός πρωτοπόρος κυκλικής οικονομίας, δηλ. μια πιθανή περίπτωση για «να αποδειχθεί ότι οι κυκλικές αρχές λειτουργούν στην πράξη» (EMF, 2015).

Η κρυστάλλωση είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για την ανάκτηση φώσφορου από τους σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων, υπό μορφή στρουβίτη. Τα οφέλη του στρουβίτη είναι σημαντικά για την παραγωγή ενός λιπάσματος βραδείας απελευθέρωσης, για τη χρήση του ως βασικού υλικού στη βιομηχανία φωσφορικών για την κατασκευή πυρίμαχων πάνελ και ως συνδετικό υλικό σε τσιμέντα (Kumar and Pal, 2013, Guadie et al., 2014). Σήμερα, υπάρχουν λίγες τέτοιες διεργασίες διαθέσιμες στο εμπόριο όπως το AirPrex® και το PHOSPAQ® (Gherghel, A et al, 2019).

Για να βελτιωθεί η παραγωγή του στρουβίτη, έχουν εφαρμοστεί διαφορετικοί τύποι αντιδραστήρων, όπως ο αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης (FBR) (Le Corre et al., 2007, Bhuiyan et al., 2008, Guadie et al., 2014), ο αντιδραστήρας μηχανικής ανάδευσης (MSR) (Pastor et al., 2008) και ο αντιδραστήρας εναλλασσόμενης λειτουργίας (SBR) (Crutchik et al., 2018).

Τα φωσφορικά μπορούν επίσης να ανακτηθούν σε δύο στάδια: με προσρόφηση και με εκρόφηση. Μετά την εκρόφηση, η προκύπτουσα τέφρα ή διάλυμα έκλουσης, πλούσιο σε φώσφορο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογή στη γη. Το διάλυμα εκρόφησης μπορεί να υποβληθεί σε επεξεργασία με χημική καταβύθιση για να ληφθούν ιζήματα φωσφορικών (Ye et al., 2017).

Επίσης, η υγρο-χημική επεξεργασία και η θερμοχημική επεξεργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάκτηση φωσφορικών από ιλύ. Η υγρή χημική τεχνολογία μπορεί να απελευθερώσει το φωσφορικό άλας από τη λυματολάσπη και την τέφρα λυματολάσπης με την προσθήκη ισχυρών οξέων ή αλκαλίων στην υγρή φάση, απομακρύνοντας ταυτόχρονα τα βαρέα μέταλλα και παθογόνους παράγοντες από το υπερκείμενο υγρό (Ye et al., 2017).

Η απόδοση αυτής της διεργασίας επηρεάζεται από το pH (Cokgor et al., 2009) και τη θερμοκρασία (Xie et al., 2011). Η μέθοδος Seaborne® είναι μια υγροχημική τεχνολογία, στην οποία το pH της χωνεμένης ιλύος λυμάτων ρυθμίζεται στο 4 με τη χρήση θειικού οξέος (H₂SO₄), όταν διαλύονται ταυτόχρονα φωσφορικά, οργανικά και κάποια βαρέα μέταλλα (Gherghel, A et al, 2019). Όσον αφορά τη θερμοχημική επεξεργασία, η μέθοδος AshDec® χρησιμοποιήθηκε για την ανάκτηση φώσφορου από τέφρα ιλύος λυμάτων σε περιστροφικό κλίβανο (Ye et al., 2017).

4.5.5.2 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΒΑΡΕΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Η παρουσία βαρέων μετάλλων (π.χ. Zn, Ni, Pb, Hg, Cr, Cu και Cd) στη λυματολάσπη περιορίζει τη χρήση της για εφαρμογή στη γη λόγω πιθανής ρύπανσης του εδάφους και των υπόγειων υδάτων, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει περαιτέρω την υγεία ανθρώπων και ζώων (Tyagi and Lo, 2013). Η συγκέντρωση βαρέων μετάλλων στην ιλύ είναι μεταξύ 0,5 και 2%, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να αυξηθεί σε έως 6% (Vyrides et al., 2017). Ως εκ τούτου, ορισμένοι ερευνητές έχουν μελετήσει διαφορετικές διεργασίες για την ανάκτηση βαρέων μετάλλων, μία εκ των οποίων είναι η διαδικασία υπερήχων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ποσοστό ανάκτησης υψηλότερο από 90%. Άλλοι χρησιμοποιούν θερμικές επεξεργασίες όπως πυρόλυση, αεριοποίηση ή μικροκύματα για την ανάκτηση των μετάλλων (Gherghel A, 2019).

Ο He et al. (2010), αναλύοντας τη δυναμική βιοδιαθεσιμότητα των Cu, Cd, Pb και Zn στη λυματολάσπη, ανέφερε ότι η πυρόλυση ενισχύει τη σταθερότητα αυτών των μετάλλων όταν η θερμοκρασία αυξάνεται μέχρι ορισμένες τιμές. Όσον αφορά τη διαδικασία αεριοποίησης

της ιλύος, το κύριο μέλημα είναι το περιεχόμενο των βαρέων μετάλλων που παραμένουν σε σκόνη τέφρας (Manara και Zabaniotou, 2012). Από την άποψη αυτή, οι Saveyn et al (2010) ανέφεραν ότι μετά την αεριοποίηση της ιλύος λυμάτων, μερικά μέταλλα (Cu, Zn, και Pb) μπορούν να ανακτηθούν από το κάρβουνο, ενώ άλλα (Hg και Cd) εξαντλούνται από την ιλύ λυμάτων και καταλήγουν σε διαφορετικές ροές κατάντη.

4.5.5.3 ΠΡΟΣΡΟΦΗΤΙΚΑ

Η επεξεργασία πυρόλυσης της ιλύος λυμάτων είναι μια ελκυστική διαδικασία επειδή μπορεί να μειώσει τον όγκο της λάσπης και ταυτόχρονα να παράγει προσροφητικά με βάση την ιλύ λυμάτων (SBAs) (Lin et al., 2012). Η πυρόλυση λαμβάνει χώρα κάτω από αδρανή ατμόσφαιρα, σε υψηλές θερμοκρασίες (400-1000 °C) με απελευθέρωση πτητικών ουσιών, προκειμένου να ληφθεί κάρβουνο ως τελικό προϊόν. Μετά την πυρόλυση, λαμβάνει χώρα το στάδιο ενεργοποίησης των προσροφητικών, το οποίο μπορεί να είναι φυσικό ή / και χημικό. Η φυσική ενεργοποίηση αναφέρεται στην εξανθράκωση της ιλύος των λυμάτων, ακολουθούμενη από ενεργοποίηση με CO₂ ή ατμό (Alvarez et al., 2015, 2016). Η χημική ενεργοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί μαζί με πυρόλυση παρουσία αντιδραστηρίων αφυδάτωσης (Cheng κ.ά., 2016). Λόγω όμως των περιορισμών της (μεγάλος χρόνος επεξεργασίας, υψηλή κατανάλωση ενέργειας), η διαδικασία πυρόλυσης άρχισε να χρησιμοποιείται λιγότερο, υπέρ της θέρμανσης με μικροκύματα. Οι Lin et al. (2012) χρησιμοποίησαν στη μελέτη τους εξοπλισμό θέρμανσης μικροκυμάτων πιλοτικής κλίμακας για την παρασκευή ανθρακούχων προσροφητικών (ενεργοποίηση H₃PO₄) προκειμένου να απομακρυνθούν τα ιόντα Cu²⁺ και Pb²⁺ από υδατικά διαλύματα. Τα στοιχεία της βιβλιογραφίας επιβεβαιώνουν ότι η ιλύς είναι μια πολλά υποσχόμενη πρώτη ύλη για την παραγωγή προσροφητικών ουσιών (Smith et al., 2009, Mo et al., 2018) και η διαδικασία εξαγωγής τους αντιπροσωπεύει μια ελκυστική εναλλακτική λύση για την ασφαλή διαχείριση ιλύος (Xu et al., 2015). Επιπλέον, τα προσροφητικά έχουν μεγάλες δυνατότητες ανταγωνισμού με τον εμπορικό ενεργό άνθρακα για την απομάκρυνση ρύπων αποβλήτων (Lin et al., 2012).

4.5.5.4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Τα σύμπλοκα που περιέχουν οργανικό άνθρακα και τα ανόργανα σύνθετα από ιλύ λυμάτων αποτελούν πηγή πολύτιμων υλικών τα οποία με θερμική κατεργασία (Tyagi και Lo, 2013) μπορούν να μετασχηματιστούν σε προϊόντα όπως τα τεχνητά ελαφρά αδρανή (ALWA), σκωρίες, τούβλα και γυαλί (Wang et al., 2008, Kalogo and Monteith, 2008). Τα προϊόντα ALWA παράγονται με ανάμιξη τέφρας, νερού και υλικού συνδετικού υλικού (όπως απόβλητα αποστάξεως αλκοόλης) σε φυγοκεντρικό σφαιροποιητή. Για την παραγωγή τούβλων και τσιμέντου, η ιλύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας χωρίς κάυση. Επιπλέον, η προσθήκη

λύος σε ακατέργαστη μορφή στην παραγωγή προϊόντων τσιμέντου και κονιάματος μπορεί να αποτελέσει εναλλακτική λύση στις υπάρχουσες μεθόδους, εξαλείφοντας ορισμένα από τα δαπανηρά και ενεργειακά απαιτητικά στάδια της διάθεσης της λύος και το πιο σημαντικό, τα κατά τα άλλα περιβαλλοντικά επιβλαβή απόβλητα μπορούν να μετατραπούν σε ασφαλή και αδρανή προϊόντα (Paris et al., 2016, Swierczek κ.ά., 2018).

Σήμερα, η καύση της πλεονάζουσας λύος λυμάτων γίνεται συχνή λύση λόγω της δυνατότητας ταυτόχρονης υγειονομοποίησης και μείωσης του όγκου της. Επιπλέον, η τέφρα που προκύπτει μετά την καύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρόσθετο σε μεταλλικά δομικά υλικά, τσιμέντα ή σκυροδέματα (Tantawy et al, 2012), αποφεύγοντας έτσι τη μεταφορά της στάχτης σε χώρους υγειονομικής ταφής και τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκύπτουν από την έκπλυση των διαλυτών συστατικών της (Smol et al., 2015). Το GlassPack® είναι μια διαδικασία υαλοποίησης που χρησιμοποιεί το οργανικό κλάσμα των βιοστερεών ως πηγή ανανεώσιμου καυσίμου για να παράγει ένα αδρανές γυαλί από το ανόργανο κλάσμα (τέφρας). Η υγρή λύς προ-ξηραίνεται (έως <15% υγρασία) και στη συνέχεια τα ξηρά στερεά υποβάλλονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 1.330 και 1.500 ° C, στις οποίες το συστατικό τέφρας τήκεται σε τετηγμένο γυαλί. Στη συνέχεια, το τετηγμένο γυαλί και τα καυσαέρια διαχωρίζονται με την εκροή βαρύτητας του γυαλιού σε μια δεξαμενή απόσβεσης (Kalogo and Monteith, 2008).

4.5.5.5 ΒΙΟΠΛΑΣΤΙΚΑ

Μια εναλλακτική λύση για τα πλαστικά πετρελαίου είναι τα πολυυδροξυαλκανοϊκά (PHA), τα οποία παράγονται στη φύση με βακτηριακή ζύμωση ζάχαρης και λιπιδίων. Τα PHA που παράγονται από βακτήρια έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα συμβατικά πλαστικά των οποίων η παραγωγή μπορεί να επηρεάσει το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία (Balasubramanian and Tyagi, 2017). Η χρήση της λύος αστικών λυμάτων ως πρώτης ύλης για την παραγωγή βιοπλαστικών θα μπορούσε να αποτελέσει μια βιώσιμη εναλλακτική λύση (Gherghel A. et al, 2019).

Σύμφωνα με τα στοιχεία της βιβλιογραφίας (Tyagi and Lo, 2013), η ενεργή λύς είναι πηγή μικροοργανισμών που συσσωρεύουν PHA, οι οποίοι απορροφούν τα πτητικά λιπαρά οξέα υπό αναερόβιες συνθήκες. Από την άποψη αυτή, οι Frison et al. (2015), εισάγοντας μια φάση όξινης ζύμωσης πριν από την αναερόβια χώνευση, κατέδειξαν τη δυνατότητα ανάκτησης των PHA χρησιμοποιώντας δύο αντιδραστήρες εναλλασσόμενης λειτουργίας (SBRs) σε σειρά. Λόγω της βιοδιασπασιμότητάς τους, τα PHA χρησιμοποιούνται ως μεμβράνες συσκευασίας και προϊόντα μιας χρήσεως και έχουν πολλές εφαρμογές στον ιατρικό τομέα (για μαλακή και σκληρή ιστική επισκευή και αναγέννηση, νευρικά ικρίωματα, καρδιοαγγειακές εφαρμογές και λειτουργικά σφαιρίδια για διαγνωστικές και θεραπευτικές εφαρμογές). Η Γερμανία, η Βραζιλία, η Κίνα, η Ιταλία, το Ηνωμένο Βασίλειο, ο Καναδάς και οι ΗΠΑ είναι από τις λίγες χώρες που χρησιμοποιούν PHA σε διάφορους τομείς (Tyagi και Lo, 2013). Όταν

χρησιμοποιούνται ιλύες για την παραγωγή ΡΗΑ, μπορούν να αναφερθούν οφέλη όπως η ανάκτηση και η χρήση αποβλήτων ως βιοαποικοδομήσιμων πλαστικών και η μείωση του κόστους παραγωγής λόγω της χρήσης εύκολα διαθέσιμης ιλύος (Tyagi and Lo, 2013).

4.5.5.6 ΠΡΩΤΕΪΝΕΣ

Η λυματολάσπη μπορεί να θεωρηθεί πηγή πρωτεϊνών λόγω της περιεκτικότητάς της σε πρωτεΐνες περίπου 61%, υδατάνθρακες 11%, λιπίδια 1% και άλλα συστατικά 27% (Chen et al., 2007). Λαμβάνοντας υπόψη ότι περίπου το 50% των ξηρών βαρών των βακτηριακών κυττάρων είναι πρωτεΐνες και επίσης ότι οι πρωτεΐνες είναι συστατικά στη διατροφή των ζώων και παρέχουν ενέργεια και άζωτο, η ανάκτηση αυτών των μακρομορίων είναι πολύ ελπιδοφόρα (Gherghel A. et al, 2019).

Σύμφωνα με τη μελέτη των Xiao et al. (2017), τα κύρια στάδια για την ανάκτηση πρωτεΐνης από ιλύ περιλαμβάνουν τη διαλογή, τις επεξεργασίες, τη διήθηση, την καθίζηση πρωτεΐνης (από το διάλυμα πρωτεΐνης), την ξήρανση του ιζήματος πρωτεΐνης και την ανάκτηση του τελικού προϊόντος πρωτεΐνης (Gherghel A. et al, 2019).

Μία επιπλοκή των διαδικασιών ανάκτησης είναι τα βαρέα μέταλλα, τα οποία ανακτώνται μαζί με τις πρωτεΐνες. Αυτό γίνεται πρόβλημα, ειδικά αν ο σκοπός είναι η χρήση πρωτεϊνών ως συμπληρωμάτων διατροφής για τα ζώα (Tyagi and Lo, 2013). Ωστόσο, η χρήση ιλύος στην παραγωγή πρωτεϊνών παραμένει μια επιλογή που μπορεί να δείξει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα (Gherghel A. et al, 2019).

4.5.5.7 ENZYMA

Διαφορετικοί τύποι ενζύμων (δηλ. Πρωτεάση, γλυκοσιδάση, αφυδρογονάση, καταλάση, υπεροξειδάση, α-αμυλάση, α-γλυκοσιδάση) περιέχονται στην ιλύ αστικών λυμάτων και θεωρούνται πολύτιμα προϊόντα που πρέπει να ανακτηθούν. Η χρήση ενζύμων σε διάφορους τομείς, όπως τα τρόφιμα, τα απορρυπαντικά, τα φαρμακευτικά προϊόντα και οι χημικές βιομηχανίες, καθιστά την ανάκτησή τους προτεραιότητα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τύποι λυμάτων (όπως δημοτικά ή βιομηχανικά από χαρτί ή από εκτύπωση και βαφή) για την απομόνωση, τον χαρακτηρισμό και την κατανομή των ζυμομυκήτων που παράγουν εξωκυτταρικές ζύμες (Balasubramanian and Tyagi, 2017).

4.6 ΒΙΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ

Οι τεχνολογίες που έχουν παρουσιαστεί μέχρι τώρα στοχεύουν στην ανάκτηση σαφώς καθορισμένων πόρων ή ενέργειας από τα λύματα και την ιλύ λυμάτων. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή δεν λαμβάνει υπόψη το σύνολο της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε μια ριζική αλλαγή στο όραμα των δημοτικών ΕΕΛ, με την αλλαγή αυτή να αποτελεί υποδειγματική μεταστροφή στην φιλοσοφία αντιμετώπισης των ΕΕΛ (Puchongkawarin et al., 2015). Οι ΕΕΛ δε λαμβάνονται υπόψιν πλέον μόνο για τις λειτουργίες προστασίας του περιβάλλοντος και ως κομμάτι του δικτύου αποχέτευσης, αλλά και ως σημείο εκκίνησης για την εκμετάλλευση δυνητικών πόρων (συμπεριλαμβανομένης της ιλύος) που θεωρούνται τώρα απόβλητα. Σε αυτό το πλαίσιο, οι ΕΕΛ θα πρέπει να νοούνται ως αυτοδύναμα συστήματα (ενεργειακά και οικονομικά) και, δεύτερον, ως «εργοστάσια» (βιοδιυλιστήρια) νέων ενώσεων για την αγορά (Gherghel A. et al, 2019).

Τα βιοδιυλιστήρια θα μπορούσαν να αποτελέσουν αναπόσπαστο συστατικό στοιχείο της υποδομής διαχείρισης αστικών αποβλήτων, λαμβάνοντας το οργανικό κλάσμα των ΑΣΑ καθώς και τα ρεύματα των λυμάτων και μετατρέποντας τα σε πολύτιμα υλικά και προϊόντα. Μια διαφορετική σειρά λύσεων σε πολλαπλές κλίμακες στο αστικό περιβάλλον θα μπορούσε να αναπτυχθεί ώστε να ταιριάζει σε τοπικά περιβάλλοντα. Θα μπορούσαν να προσαρμοστούν ανάλογα με τις τοπικές ανάγκες και την τοπική υποδομή συλλογής, και το περιεχόμενο των εισερχόμενων οργανικών πρώτων υλών θα καθόριζε ποια προϊόντα θα παράγονταν (Morlet et al, 2017).

Οι ορυκτές πρώτες ύλες χρησιμοποιούνται σε πετρελαϊκά και πετροχημικά διυλιστήρια για την παραγωγή καυσίμων, χημικών πρώτων υλών, πλαστικών και συνθετικών υλικών. Υπάρχει, ωστόσο, σημαντική ευκαιρία να χρησιμοποιηθούν τα οργανικά απόβλητα για να κατασκευαστεί ένα εύρος από αυτά τα προϊόντα. Αυτό είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον καθώς οι ορυκτές πρώτες ύλες μειώνονται και οι τιμές τους παραμένουν ασταθείς (Morlet et al, 2017).

Τα μικρά και μεγάλα βιοδιυλιστήρια, που βρίσκονται σε αστικές περιοχές κοντά στην πηγή πρώτων υλών, έχουν τόσο την ευκαιρία όσο και τις τεχνολογίες για να καταστήσουν αυτό το όραμα πραγματικότητα. Έρευνα που διεξήχθη στην Ολλανδία υπολόγισε ότι η δυνητική καθαρή αξία που θα προέκυπτε από την υλοποίηση ενός δικτύου κέντρων βιοδιυλιστηρίων στο Άμστερνταμ θα μπορούσε να ανέλθει σε 30 εκατομμύρια ευρώ ετησίως. Επιπλέον, ένα τέτοιο σύστημα εκτιμάται ότι μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 100.000 τόνους και θα εξοικονομεί 25.000 τόνους υλικού (Circle Economy, TNO and FABRIC).

Η συνύπαρξη των βιοδιυλιστηρίων με υφιστάμενες εγκαταστάσεις, όπως μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, θα μπορούσε να αποφέρει σημαντικά οφέλη από τις συνέργειες και την εξοικονόμηση κόστους της συλλογής, της προεπεξεργασίας και της διύλισης. Έρευνες έχουν δείξει ότι ένας τέτοιος συνδυασμός θα μπορούσε να οδηγήσει σε νέα εξοικονόμηση

κεφαλαίου κατά 20-80%, ανάλογα με το επίπεδο συνέργειας (ISWA, carbon, nutrients and soil, 2015).

Πολλές μελέτες έχουν προσπαθήσει να ποσοτικοποιήσουν τη δυνητική αξία της χρήσης διαδικασιών βιοδιύλισης, συνήθως με επίκεντρο συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές ή κατηγορίες προϊόντων. Για παράδειγμα, το Παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ εκτιμά ότι έως το 2050 τα δυνητικά παγκόσμια έσοδα από την αλυσίδα αξίας της βιομάζας (συνδυασμός παραγόμενων γεωργικών εισροών, εμπορίας βιομάζας και προϊόντων βιοδιύλισης) θα μπορούσαν να ανέλθουν σε 295 δισεκατομμύρια δολάρια (World Economic Forum, 2010). Οι Ηνωμένες Πολιτείες είναι σε θέση να παράγουν 340,70 δισεκατομμύρια λίτρα βιοκαυσίμων για να αντικαταστήσουν το πετρέλαιο, πράγμα που σημαίνει ότι, παράλληλα με τη βελτίωση της κατανάλωσης των οχημάτων, ο στόλος οχημάτων της χώρας θα μπορούσε να λειτουργήσει αποκλειστικά με βιοκαύσιμα έως το 2050. Ο περιοριστικός παράγοντας δεν είναι η προσφορά βιομάζας, αλλά η δέσμευση που προκαλεί η υπάρχουσα υποδομή γύρω από το πετρέλαιο, οι χαμηλές τιμές πετρελαίου και η έλλειψη πολιτικής δέσμευσης (World Economic Forum, 2010).

Η αγορά των χημικών προϊόντων που προέρχονται από την λιγνίνη (βενζόλιο, τολουόλιο, ίνες άνθρακα), τα οποία περιέχονται σε προϊόντα όπως τα καύσιμα κινητήρων, ο ενεργός άνθρακας και τα πλαστικά, εκτιμάται ότι υπερβαίνει τα 130 δισεκατομμύρια δολάρια και προβλέπεται να φθάσει τα 208 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2020 (Smolarski, N., 2012).

Τα βιοδιυλιστήρια μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια σειρά τεχνικών, όπως η θερμική επεξεργασία, οι βιολογικές διεργασίες και οι ενζυμικές μετατροπές, για να μετατρέψουν το οργανικό υλικό σε πολύτιμα χημικά και προϊόντα. Επιπλέον, διαθέτουν πολλές διαθέσιμες επιλογές για πρώτη ύλη. Μια χρήσιμη κατηγοριοποίηση διακρίνει μεταξύ πρώτης ύλης πρώτης και δεύτερης γενιάς. Η πρώτη γενεά αναφέρεται σε πρώτες ύλες που προέρχονται από βρώσιμη βιομάζα, όπως το καλαμπόκι και το ζαχαροκάλαμο, ενώ οι πρώτες ύλες δεύτερης γενεάς προέρχονται από υπολειμματικά μέρη μη βρώσιμων καλλιεργειών, ροές οργανικών αποβλήτων ή άλλες μη βρώσιμες πηγές, όπως τα φύκια. Οι πρώτες ύλες δεύτερης γενεάς έχουν συγκεντρώσει σημαντικό ενδιαφέρον, διότι όχι μόνο εξάγουν τη μέγιστη αξία από την διαθέσιμη βιομάζα και μετατρέπουν τα απόβλητα σε πόρους, αλλά και μειώνουν τον ανταγωνισμό για τις γεωργικές εκτάσεις (Morlet et al, 2017).

Η κυτταρίνη είναι η πιο άφθονη οργανική ένωση στον κόσμο και παρέχει την κυτταρική δομή για τα δέντρα, το γρασίδι και, στην πραγματικότητα, όλη τη ζωή των φυτών. Ένα "αστικό" βιοδιυλιστήριο θα μπορούσε να στοχεύσει στην ανάκτηση πρωτογενούς κυτταρινικής ιλύος (PCS) ως σημείο εκκίνησης. Εισάγοντας μια λεπτή φάση κοσκινίσματος (<0,35 mm) κατάντη της εσχάρωσης, είναι δυνατή η ανάκτηση της κυτταρίνης από PCS. Με παρουσία στα αστικά λύματα λόγω της διάθεσης χαρτιού υγείας, η κυτταρίνη είναι ένας σημαντικός πολυσακχαρίτης που αποτελείται από μεγάλο αριθμό μορίων γλυκόζης συνδεδεμένα μεταξύ τους με ένα δεσμό γλυκοζιδίου β (1/4). Ο Ruiken et al. (2013) (2013) έδειξε ότι η εισαγωγή ενός τέτοιου κόσκινου επιτρέπει την επίτευξη αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης: TSS =

50%, COD = 35%, $N_{\text{TOT}} = 1\%$ και $P_{\text{TOT}} < 1\%$ υψηλότερα από αυτά που μπορούν να επιτευχθούν με πρωτογενή καθίζηση. Επιπλέον, η περιεκτικότητα σε κυτταρίνη στα απομακρυνόμενα αιωρούμενα στερεά είναι ίση με 79%, η οποία είναι πολύ υψηλή. Περαιτέρω, επειδή η κυτταρίνη δεν είναι πλήρως βιοαποικοδομήσιμη σε μία συμβατική ΕΛΛ, η απομάκρυνσή της με λεπτό κοσκίνισμα θα επέτρεπε τη βελτίωση των βιολογικών διεργασιών (δηλ., της ενεργούς ιλύος και της αναερόβιας χώνευσης), όπως επισημαίνεται από τους Ruiken et al (2013). Η ανάκτηση της κυτταρινικής ιλύος μπορεί να ενισχυθεί με διαφορετικές λύσεις.

Στην πρώτη λύση, το στερεό μέρος της προηγούμενης πρωτογενούς πυκνωμένης ιλύος αποστέλλεται στον ακετογενή ζυμωτήρα. Πρόκειται για αντιδραστήρα SBR που λειτουργεί υπό συνθήκες θερμοκρασίας και pH που μεγιστοποιούν την παραγωγή λιπαρών οξέων βραχείας αλυσίδας (SCFA), συμπεριλαμβανομένου του οξικού και του προπιονικού οξέος. Υπό τις βέλτιστες συνθήκες θερμοκρασίας (37 °C, μεσοφιλικό καθεστώς) και pH (8, στην ιλύ εισόδου), οι Crutchik et al (2018) εκτίμησαν κατά κεφαλήν παραγωγή SCFA 2,92 kg COD / έτος. Επιπλέον, η διαδικασία ζύμωσης επιτρέπει την απελευθέρωση θρεπτικών συστατικών (άζωτο και φώσφορο) που υπάρχουν στην λάσπη εισόδου. Ακολούθως, η ιλύς που εξέρχεται από τον ζυμωτήρα υποβάλλεται σε διαχωρισμό στερεού / υγρού, όπου το στερεό κλάσμα αποστέλλεται για αναερόβια χώνευση. Όσον αφορά την παραγωγή βιοαερίου, οι Crutchik et al. (2018) εκτιμούν ότι η κατά κεφαλήν αξία είναι 3 m³ / έτος. Όσον αφορά το υγρό κλάσμα, οι υψηλές συγκεντρώσεις SCFA και θρεπτικών συστατικών υποδηλώνουν δυνατότητα ανάκτησης υλικών. Μέσω του προπιονικού οξέος (> 30%), το υγρό μετά τη ζύμωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την ανάκτηση φωσφόρου με τη μέθοδο EBPR (Ενισχυμένη Βιολογική Απομάκρυνση Φωσφόρου), όσο και για τις χημικές-φυσικές διεργασίες (μέσω παραγωγής στρουβίτη). Τέλος, και τα δύο κλάσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ενώσεων υψηλής προστιθέμενης αξίας όπως PHAs που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή βιοπλαστικών (Frison et al, 2015).

Στη δεύτερη λύση, η μικτή "πρωτογενής και δευτερογενής" ιλύς, προηγούμενης παχυμένη, αποστέλλεται στον ακετογενή ζυμωτήρα. Επίσης σε αυτή την περίπτωση, η ζύμωση επιτρέπει τη λήψη ιλύος ζυμωμένης πλούσιας σε SCFA και θρεπτικά συστατικά. Διαφορετικά από την προηγούμενη περίπτωση, αυτό το σχήμα επιτρέπει την ανάκτηση PHA καθώς και την αφαίρεση θρεπτικών συστατικών από το αναερόβιο υπερκείμενο υγρό. Για το πεδίο εφαρμογής, οι Frison κ.ά. (2015) εξέτασαν μια νέα διαδικασία στην οποία η εναλλαγή των αερόβιων (αφθονίας οξυγόνου) και ανοξικών (έλλειψης οξυγόνου) συνθηκών επιτρέπει την επιλογή της βιομάζας που περιέχει PHAs και την απομάκρυνση του αζώτου με νιτροδοποίηση/απονιτροδοποίηση. Ως ένας άλλος τρόπος αφαίρεσης του αζώτου, διαφορετικός από τη συμβατική απονιτροποίηση / νιτροποίηση, νίτρωση / απονίτρωση, περιλαμβάνει την απομάκρυνση του αζώτου με οξείδωση της αμμωνίας (NH₄⁺) σε νιτρώδη (NO₂⁻) και την μετέπειτα αναγωγή του σε αέριο άζωτο (N₂). Σε αυτές τις διεργασίες, η ποσότητα άνθρακα που πρέπει να παρέχεται στους μικροοργανισμούς είναι μικρότερη από εκείνη που απαιτείται στη συμβατική επεξεργασία (Malamis et al., 2014). Επειδή το αναερόβιο υπερκείμενο υγρό είναι συνήθως ζεστό (μεσοφιλικό, 30-40 °C) και οι υψηλές

Θερμοκρασίες ευνοούν την ανάπτυξη οξειδωτικών βακτηρίων αμμωνίου έναντι βακτηρίων οξειδώσεως νιτρωδών (Hellings et al, 1998), η νιτροδοποίηση / απονιτροδοποίηση είναι η ιδανική επεξεργασία για την απομάκρυνση αζώτου από το αναερόβιο υπερκείμενο υγρό (Malpei et al., 2008). Συνεπώς, διευκολύνεται η αφαίρεση του αζώτου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια συντομότερη οδός, σε σύγκριση με τη συμβατική απονιτροποίηση / νιτροποίηση.

Τα βιοδιυλιστήρια θα αρχίσουν να παράγουν ολοένα και πιο πολύπλοκα χημικά και υλικά καθώς η τεχνολογία ωριμάζει. Το σουκκινικό οξύ και το πολυγαλακτικό οξύ είναι ήδη παραδείγματα αυτού, καθώς τα «απόβλητα» των φυτών θεωρούνται ολοένα και περισσότερο συμφέρουσες ανταγωνιστικές εναλλακτικές λύσεις έναντι των ορυκτών πόρων. Κατά συνέπεια, οι εγκαταστάσεις αυτές θα γίνουν πραγματικά βιοδιυλιστήρια, παράγοντας μια ολόκληρη σειρά από πολύτιμα προϊόντα πέρα από προηγμένα βιοκαύσιμα από τις πρώτες ύλες που προηγουμένως θεωρούσαμε απόβλητα, και τα αντιμετωπίζαμε ως τέτοια (Morlet et al, 2017).

Τα μικροάλλα διερευνώνται όλο και περισσότερο και χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για την αξιοποίηση των θρεπτικών ουσιών στα οργανικά απόβλητα, καθώς και ως πηγή βιομάζας, προϊόντων και ενέργειας (Sivakumar et al., 2012; Abinandan and Shanthakumar, 2015). Τα μικροάλλα χρειάζονται μια πηγή θρεπτικών ουσιών για ανάπτυξη και μπορούν συνεπώς να χρησιμοποιηθούν για την ανακύκλωση θρεπτικών ουσιών από χωνεμένη ιλύ (Wang et al., 2010, Uggetti et al., 2014). Οι καλλιέργειες μικροαλγών που έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ζωοτροφών για τις βιομηχανίες κτηνοτροφίας ή υδατοκαλλιέργειας (Becker, 2007, Yaakob et al., 2014). Το σύστημα αυτό παρέχει την ευκαιρία να δημιουργηθεί μια λύση κυκλικής οικονομίας για τις οργανικές ροές αποβλήτων, οι οποίες θα περιορίσουν τον αντίκτυπο της γεωργίας και της διαχείρισης των οργανικών αποβλήτων στο περιβάλλον μειώνοντας τη θρεπτική ρύπανση, τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και την απαίτηση για αλλαγή χρήσης γης προκειμένου να παραχθεί η απαιτούμενη ζωοτροφή και να αυξηθεί η επισιτιστική ασφάλεια στην Ευρωπαϊκή Ένωση και πέραν αυτής (Stiles et al., 2018). Εκτός από τις βιομηχανίες τροφίμων, ζωοτροφών και καυσίμων, οι βιολογικές δραστικές ουσίες των αλγών έχουν αποδεδειγμένη εφαρμογή στη φαρμακευτική και την καλλυντική βιομηχανία (Singh et al., 2017). Τα άλλα, ιδιαίτερα τα κυανοβακτήρια, μπορούν επίσης να εφαρμοστούν ως εδαφοβελτιωτικό και ως λίπασμα βραδείας απελευθέρωσης (Sharma et al., 2012).

Σε ευρύτερο πλαίσιο, τα φωτοσυνθετικά βιοδιυλιστήρια παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας. Τα φωτοσυνθετικά κυανοβακτήρια *Arthrospira* sp., έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού, αφού έχουν αποτελέσει από σημαντική πηγή τροφής για τους αρχαίους πολιτισμούς (Spolaore et al., 2006) ως συστατικό υψηλής προστιθέμενης αξίας σε «φαρμακοτρόφιμα» & χρωστικές (Zhou et al., 2017; Leema et al., 2010), βιοπλαστικά (Zeller et al., 2013), βιοκαύσιμα (Shirazi et al., 2017) και μέρος συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων

(Jiang et al., 2015) στις μέρες μας. Η αξιοποίηση των δυνατοτήτων του *Arthrospira* sp. ως ένα φωτοσυνθετικό βιοδιυλιστήριο, ικανό να αξιοποιήσει πηγές χαμηλού κόστους νιτρικών αποβλήτων (αμμωνία και ουρία) (Deschoenmaeker et al., 2017) για την παράλληλη παραγωγή υψηλής αξίας προϊόντων (βιοπλαστικά, βιοκαύσιμο, χρωστικές, κ.α.) θα μπορούσε να μειώσει τα κόστη παραγωγής τους (Sachdeva, Mascolo, Wattiez, & Leroy, 2018).

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ESA) μέσω του σχεδίου MELiSSA μελετά τις δυνατότητες του *Arthrospira* sp., για να ανακυκλώνει τα απόβλητα του πληρώματος (ούρα και CO₂) και να παράγει βρώσιμη βιομάζα και οξυγόνο (O₂) για διαστημικές αποστολές (Farges et al. 2008). Ο βρόχος MELiSSA αποτελεί επομένως ένα τέλειο παράδειγμα πρότυπου κυκλικής οικονομίας με βάση τη φωτοσυνθετική βιοτεχνολογία, όπου τα απόβλητα του πληρώματος προορίζονται να ανακυκλωθούν ως πηγή θρεπτικών ουσιών (N και CO₂) για την καλλιέργεια *Arthrospira* sp. (Sachdeva, Mascolo, Wattiez, & Leroy, 2018).

Η ικανότητα του *Arthrospira* sp. να μεγαλώνει σε υψηλές συγκεντρώσεις ουρίας το καθιστά ιδανικό για καλλιέργεια με τη χρήση πλούσιων σε ουρία δημοτικών λυμάτων (Rittstieg et al., 2001), με αποτέλεσμα να εξυπηρετεί στην ανακύκλωση αζώτου από τα λύματα μέσω φωτοσύνθεσης για την παραγωγή βιοκαυσίμων, βιοαιθανόλης και ανανεώσιμων βιοπολυμερών, που διαδραματίζουν σπουδαίο ρόλο στην παγκόσμια οικονομία. Επιπλέον, τα πλούσια σε νιτρικά απόβλητα των βιομηχανιών κρέατος και τροφίμων θα μπορούσαν επίσης να υποστούν επεξεργασία για την παραγωγή μη-βρώσιμων παραπροϊόντων από το *Arthrospira* sp. Ως αποτέλεσμα, κυανοβακτήρια σαν το *Arthrospira* sp. επιτρέπουν το συνδυασμό επεξεργασίας των λυμάτων με την παραγωγή οικονομικά επικερδών προϊόντων μέσω φωτοσυνθετικών βιοδιυλιστηρίων. (Sachdeva, Mascolo, Wattiez, & Leroy, 2018).

4.6.1 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: THE CAP GROUP – ΜΙΛΑΝΟ, ΙΤΑΛΙΑ

Η CAP Group είναι η 100% δημόσια χρηματοδοτούμενη εταιρεία που διαχειρίζεται την ολοκληρωμένη υπηρεσία ύδρευσης στη μητροπολιτική πόλη του Μιλάνου. Παρέχει υπηρεσίες δημοτικής ύδρευσης και αποχέτευσης σε περισσότερους από 2 εκατομμύρια κατοίκους, με 59 μονάδες επεξεργασίας λυμάτων, όπου παράγονται περίπου 70.000 τόνοι / έτος αφυδατωμένης ιλύος. Στα πλαίσια της απάντησης στην κλιματική αλλαγή, την εύρεση νέων λύσεων για την ανάκτηση βιοκαυσίμων (βιομεθάνιο), θρεπτικών ουσιών (π.χ. φώσφορου) και ενέργειας από τον κύκλο του νερού, η CAP Group έχει ξεκινήσει ένα γενικό σχέδιο μετατροπής των εγκαταστάσεων σε βιοδιυλιστήρια. Οι υφιστάμενες αστικές εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων μπορούν να ανακαινιστούν και να ενσωματωθούν ώστε να γίνουν πολυχρηστικά αστικά βιοδιυλιστήρια που εξυπηρετούν τους πολίτες στην επεξεργασία και την αξιοποίηση των ρευμάτων των αστικών αποβλήτων, όπως τα λύματα και τα οργανικά απόβλητα, προς μια συνεκτική αστική στρατηγική. Οι υφιστάμενοι αναερόβιοι χωνευτές έχουν υπολειμματικές ικανότητες επεξεργασίας που επιτρέπουν την

ταυτόχρονη χώνευση (συν-χώνευση) της λυματολάσπης και του οργανικού κλάσματος των αστικών στερεών αποβλήτων, γεγονός που θα αυξήσει την ανάκτηση βιοκαυσίμων (βιομεθανίου) και θρεπτικών συστατικών (π.χ. φώσφορου) σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Ο συνδυασμός οικολογικών καινοτόμων τεχνολογιών με αναερόβια συν-χώνευση επιτρέπει την ολοκληρωμένη ανάκτηση βιομεθανίου, φώσφορου και βιοπολυμερών. Σε ένα τέτοιο σενάριο, η ομάδα CAP επιδιώκει να επιτύχει μια προσέγγιση κυκλικής οικονομίας. Για το σκοπό αυτό, ο όμιλος CAP έχει ορίσει ένα γεωγραφικό γενικό σχέδιο για την εφαρμογή οικολογικών καινοτόμων και ενεργειακά αποδοτικών λύσεων για την ανακαίνιση των υφιστάμενων μονάδων επεξεργασίας λυμάτων κοντά στην κυκλική αλυσίδα αξίας, εφαρμόζοντας τεχνικές χαμηλών εκπομπών άνθρακα για την ανάκτηση υλικών που διαφορετικά χάνονται. Προκειμένου να συμπεριληφθούν βιώσιμες λύσεις αιχμής, το Γενικό Σχέδιο εξετάζει τη συνεργική αλληλεπίδραση με τις κύριες, συνεχιζόμενες καινοτόμες δράσεις του Ευρωπαϊκού Ορίζοντα 2020, όπως το πρόγραμμα "SMART-Plant" που συντονίζεται από το ιταλικό πανεπιστήμιο της Βερόνα. Το έργο αναλήφθηκε από τον όμιλο CAP τον Αύγουστο του 2016 στο εργοστάσιο επεξεργασίας υδάτων στο Niguarda-Bresso (Μιλάνο) με την επιστημονική υποστήριξη του CNR και την τεχνολογική συνεργασία της FCA. Πρόκειται για παραγωγή βιομεθανίου από ιλύ που προέρχεται από μονάδες επεξεργασίας ύδατος ως βιώσιμη, οικολογική και καινοτόμο εναλλακτική λύση των παραδοσιακών μεθόδων διάθεσης ιλύος. (Russo, A., 2018).

4.6.2 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: DSM – ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΥΤΤΑΡΙΝΙΚΗΣ ΑΙΘΑΝΟΛΗΣ

Η παραγωγή κυτταρινικής αιθανόλης από βιομάζα έχει τεράστιες δυνατότητες καθώς περιλαμβάνει γεωργικά υπολείμματα, όπως υπολείμματα καλαμποκιών, τα φύλλα, τα στελέχη, τα άχυρα, τα χόρτα και τα απόβλητα ξύλου, ακόμη και τα δημοτικά αστικά απόβλητα.

Το «Project Liberty», η πρώτη πρωτοβουλία της POET-DSM Advanced Biofuels, κοινοπραξία 50:50 μεταξύ της POET, ενός παραγωγού αιθανόλης με έδρα τις ΗΠΑ και της Royal DSM, μιας παγκόσμιας επιστημονικής εταιρείας. Το έργο προσφέρει ουσιαστική απόδειξη της τεχνολογικής και εμπορικής βιωσιμότητας της προηγμένης παραγωγής βιοκαυσίμων με τη χρήση πρώτων υλών δεύτερης γενεάς. Το εργοστάσιο του Project Liberty άρχισε να εξάγει κυτταρινική αιθανόλη στα τέλη του 2015. Με πλήρη παραγωγική ικανότητα, θα μετατρέπει 770 τόνους βιομάζας την ημέρα για παραγωγή αιθανόλης με ρυθμό 75,70 εκατομμυρίων λίτρων ετησίως, και αργότερα θα αυξήσει την ετήσια παραγωγή στα 94,60 εκατομμύρια λίτρα.

Για να παραχθεί κυτταρινική βιοαιθανόλη, τα γεωργικά υπολείμματα από το καλαμπόκι πρέπει να υποβληθούν σε προεπεξεργασία με οξύ ή θερμότητα. Επίσης, προστίθενται ένζυμα για να εξαχθούν όλα τα σάκχαρα, οι πρωτεΐνες και η λιγνίνη από το φυτικό υλικό.

Τέλος, οι ζύμες «τρώνε» αυτά τα σάκχαρα και τα μετατρέπουν σε βιοαιθανόλη. Ενώ η θεωρία είναι απλή, η διαδικασία είναι εξαιρετικά δύσκολη στην πράξη. Τα μόρια σακχάρου που περιέχονται στην λιγνοκυτταρίνη προστατεύονται καλά από τις σφραγισμένες αλυσίδες κυτταρίνης (μέρος του φυσικού αμυντικού συστήματος των φυτών). Προηγμένη βιοτεχνολογία απαιτείται για να σπάσει αυτές τις αλυσίδες και να φτάσει στα σάκχαρα.

Η DSM πραγματοποίησε σημαντική επιστημονική πρόοδο το 2008 εντοπίζοντας τα ένζυμα στη συλλογή των στελεχών της με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά απόδοσης. Πραγματική πρόοδος σημειώθηκε επίσης στην ανάπτυξη ενός ενζυμικού συστήματος ιδιαίτερα αποτελεσματικού στην διάσπαση της λιγνοκυτταρίνης σε συστατικά σάκχαρα (Morlet et al, 2017).

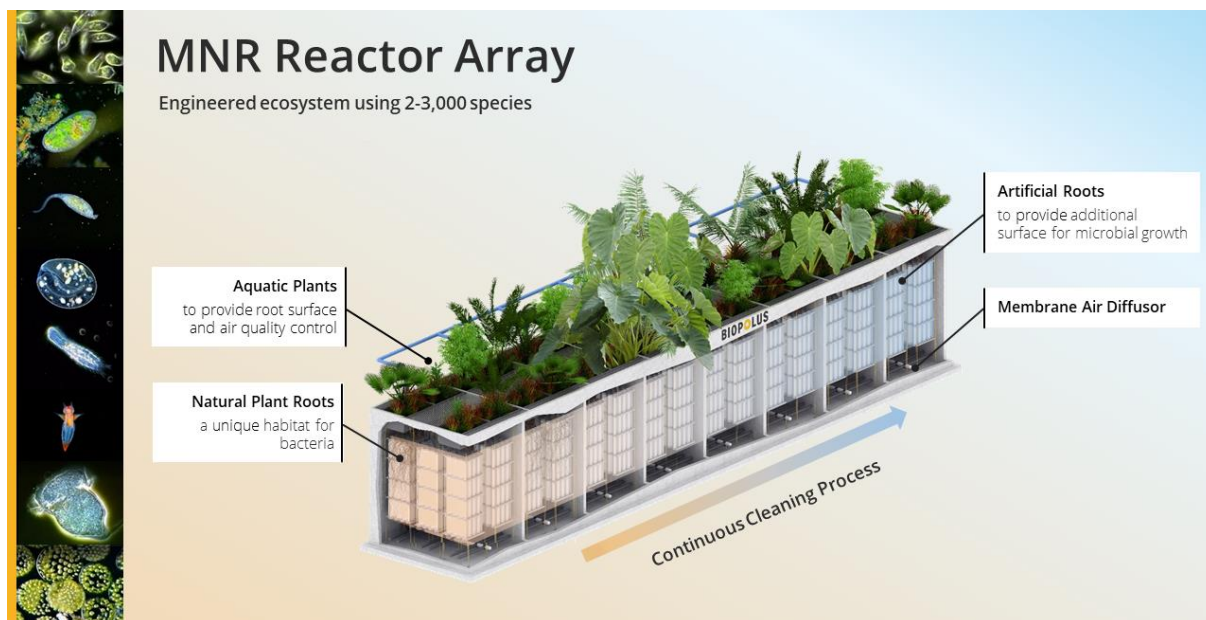
4.6.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΒΙΟΡΟΛΙΣ

Οι μεταβολικοί κόμβοι επανασχεδιασμού του αστικού μεταβολισμού θα μπορούσαν να υποστηρίξουν τις πόλεις στην άμεση επένδυση σε αποτελεσματικές λύσεις οργανικής επεξεργασίας που κλείνουν βρόχους νερού, τροφής και θρεπτικών συστατικών και παράγουν ενέργεια, ενώ παράλληλα αποφέρουν κοινωνικά οφέλη. Η Βιορόλις θέλει να δημιουργήσει ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο ανακύκλωσης νερού που συνδέεται με την παραγωγή ενέργειας, καθώς και με βιολογικά προϊόντα που αναπτύσσονται στους μεταβολικούς κόμβους της.

Αυτοί οι κόμβοι είναι κατάλληλοι για όλους τους τύπους οικισμών, που κυμαίνονται από βιομηχανικά πάρκα έως πολυτελείς οικιστικές κοινότητες και παραγκουπόλεις. Χάρη στην υψηλή παραμετροποιησιμότητα σε μέγεθος, διάταξη και λειτουργία, μπορούν να χωρέσουν σε οποιοδήποτε περιβάλλον, ως μέρος μιας νέας κατασκευής ή εκ των υστέρων. Οι επιμέρους μονάδες παρέχουν λειτουργίες κατάλληλες για το περιβάλλον της τοπικής κοινότητας, όπως η παραγωγή ενέργειας, η επεξεργασία νερού, η ανάκτηση θρεπτικών συστατικών και η παροχή μπλοκ μπάνιου και πλυντηρίων. Η μονάδα αεροπονίας Aero.Green, για παράδειγμα, υιοθετεί μια ειδική ελαφριά και κινητή μέθοδο αστικής γεωργίας, η οποία επιτρέπει στον κόμβο να παράγει υγιεινά, θρεπτικά τρόφιμα για μεγάλο πληθυσμό, ακόμη και όταν το νερό είναι σπάνιο και ο χώρος είναι περιορισμένος.

Κάθε μεμονωμένος κόμβος μπορεί να δημιουργηθεί για να εξυπηρετήσει οποιαδήποτε πόλη από 5.000 έως 50.000 άτομα. Χρησιμοποιώντας τεχνολογία «Αντιδραστήρα Μεταβολικού Δικτύου» (είδος αντιδραστήρα προσκολλημένης βιομάζας), ένα μικροσύστημα με περισσότερα από 2.000 είδη, συμπεριλαμβανομένων πρωτόζωων, βακτηρίων, ασπόνδυλων και φυτών, μετατρέπει τους κόμβους σε ζωντανό εργοστάσιο. Η βασική αρχή πίσω από την τεχνολογία MNR είναι ένα γνωστό φυσικό φαινόμενο, κατά το οποίο αναπτύσσεται μικροβιακό βιοφίλμ στις ρίζες των υδρόβιων φυτών. Η τεχνολογία χαρακτηρίζεται από μια μεγάλη ποσότητα βιομάζας που συνδέεται με βυθισμένους "μεταφορείς" - είτε στο φυσικό

ριζικό σύστημα ειδικώς επιλεγμένων φυτών είτε σε τεχνητές ρίζες που αναπτύχθηκαν από τη Biopolus για αυτόν τον συγκεκριμένο σκοπό. Αυτοί οι κόμβοι απαιτούν έως και 60% λιγότερη γη και εξοικονομούν έως και 35% σε λειτουργικά έξοδα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές λύσεις (Morlet et al, 2017, Biopolus, 2018).



Εικόνα 17 – Σχηματική αναπαράσταση Σειράς Αντιδραστήρων Μεταβολικού Δικτύου (Biopolus, 2018)

4.6.4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΚΕΝΤΡΟ ΠΑΡΟΧΩΝ - REGENSIA

Ως ισχυρός αναγεννητικός καταλύτης πόλης, η Regensia σχεδιάζει και διευκολύνει την ανάπτυξη Ολοκληρωμένων Κέντρων Παροχών (IUH). Τα IUH λειτουργούν ως μηχανισμός μεταβολισμού της κοινότητας που χρησιμοποιεί υπάρχουσες τεχνολογίες σε νέες διαμορφώσεις για τη μετατροπή των δημοτικών υποχρεώσεων (στερεά και υγρά απόβλητα) σε πολύτιμα περιουσιακά στοιχεία για τοπική χρήση: επαναχρησιμοποιήσιμα ύδατα, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, λιπάσματα πλούσια σε θρεπτικά συστατικά, καθώς και υψηλής καθαρότητας ανακτηθέντα υλικά. Τα IUH είναι εξαιρετικά επεκτάσιμα και μπορούν να ενεργοποιήσουν έργα αστικής επέκτασης που απαιτούν νέα υποδομή ή μπορούν να συνδεθούν σε υφιστάμενα δίκτυα κοινής ωφέλειας για να αποσυμφορήσουν τα ξεπερασμένα συστήματα υποδομής.



Εικόνα 18 – Σχηματική αναπαράσταση Ολοκληρωμένου Κέντρου Παροχών (IUH) (Regensia LLC, 2019)

Οι βασικές λειτουργίες του IUH είναι οι εξής:

- **Διαχείριση στερεών αποβλήτων.** Χρησιμοποιεί συστήματα ανάκτησης πρώτων υλών για τη συλλογή 80-90% των ροών αστικών αποβλήτων και την εκτροπή των αποβλήτων από χώρους υγειονομικής ταφής. Το σύστημα βιοχώνευσης IUH βρίσκεται στην αιχμή της τεχνολογίας, μετατρέποντας τα οργανικά απόβλητα σε βιοαέριο και λίπασμα με ρυθμό σχεδόν διπλάσιο των συμβατικών χωνευτών.
- **Καθαρισμός νερού.** Καθαρίζει τα λύματα χωρίς χημικά σε διάφορα πρότυπα επαναχρησιμοποίησης σε ένα κλάσμα του χώρου, του χρόνου και του κόστους των συμβατικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας. Οι εκροές μπορούν να υπερβούν τα πρωτεύοντα εθνικά πρότυπα πόσιμου νερού στις ΗΠΑ.
- **Παραγωγή ενέργειας.** Το συνδυασμένο σύστημα θερμότητας, υδρογόνου και ισχύος (CHHP) μπορεί να παράγει καθαρό βιοαέριο, καθαρό ηλεκτρικό φορτίο, θερμότητα και καθαρό υδρογόνο για κτίρια και οχήματα με μηδενικές εκπομπές. Το IUH μπορεί επίσης να εξορύξει τη θερμότητα και τα θρεπτικά συστατικά από τις γραμμές αποβλήτων ως πρόσθετες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- **Παραγωγή φαγητού.** Παράγει φρέσκα θαλασσινά, μαρούλια και βότανα για τοπική κατανάλωση μέσα σε μια εγκατάσταση που εξομοιώνει τις τέσσερις εποχές και είναι ανθεκτική στις καιρικές συνθήκες, στις πλημμύρες και την ξηρασία. Η διαδικασία κλειστού βρόχου προσφέρει ένα κβαντικό άλμα στην παραγωγικότητα 50 φορές μεγαλύτερο από εκείνο των συμβατικών προσεγγίσεων της γεωργίας.
- **Ανακύκλωση θρεπτικών στοιχείων:** Τα IUH παράγουν επίσης ως παραπροϊόν οργανικό λίπασμα πλούσιο σε NPK (άζωτο / φωσφόρο / κάλιο) που είναι υψηλότερης ποιότητας από τα συμβατικά λιπάσματα (Regensia LLC, 2019).

4.6.5 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – ΒΙΟΔΥΛΙΣΤΗΡΙΟ ΤΟΥ BILLUND

Το βιοδυλιστήριο του Billund, ένα βραβευμένο έργο στη Δανία που συνδυάζει τις περιβαλλοντικές τεχνολογίες στην επεξεργασία νερού και το βιοαέριο αποτελεί πρότυπο μεγάλης κλίμακας. Χρησιμοποιώντας την Exelys®, την ιδιόκτητη τεχνολογία θερμικής υδρόλυσης και αναερόβιας χώνευσης της Veolia, η μονάδα επεξεργάζεται ταυτόχρονα τα λύματα από τους 70.000 κατοίκους του Billund καθώς και 4.200 τόνους οργανικών αποβλήτων από τη γεωργία, τη βιομηχανία και τα τοπικά νοικοκυριά. Το παραγόμενο βιοαέριο μετασχηματίζεται σε ηλεκτρισμό και θερμότητα και τα θρεπτικά συστατικά αξιοποιούνται σε ένα πολύ αποτελεσματικό οργανικό λίπασμα χωρίς οσμή. Το εργοστάσιο παράγει αρκετή ενέργεια από το βιοαέριο για να εκτελέσει τη δική του διαδικασία επεξεργασίας. Επιπλέον, η διαδικασία ανοίγει δυνατότητες χρήσης ενδιάμεσων παραπροϊόντων με ενδιαφέρον, όπως ο φώσφορος (για τα λιπάσματα) και τα βιοπλαστικά.

Στα οφέλη συμπεριλαμβάνονται τα παρακάτω:

- Παραγωγή βιοαερίου από βιοαπόβλητα και επεξεργασμένη ιλύ που παρέχει θερμότητα και ηλεκτρισμό στην περιοχή.
- Παραγωγή οργανικού λιπάσματος για τη γεωργία και βιοπλαστικών για τη βιομηχανία
- Διάθεση επεξεργασμένου νερού στο παρακείμενο ρέμα.
- Δημιουργία βρόχου πόλης-χώρας-βιομηχανίας.
- Μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

(Morlet et al, 2017)

4.7 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΥΓΡΟΤΟΠΟΙ

Οι τεχνητοί υγρότοποι δύναται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην κυκλική οικονομία των πρώτων υλών και της παροχής υπηρεσιών οικοσυστήματος και να αποτελέσουν ουσιαστική απάντηση στις παγκόσμιες ανάγκες ύδρευσης και αποχέτευσης. Μπορούν να εφαρμοστούν για την διάχυση ή τον περιορισμό ενδεχόμενης ρύπανσης. Μπορούν να επεξεργαστούν το νερό με στόχο την υπό όρους επαναχρησιμοποίηση, την ιλύ από εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων για γεωργικές εφαρμογές (Vymazal and Brezinova, 2015), την απορροή ομβρίων υδάτων (Adyel et al., 2016), την υπερχείλιση υπονόμων (Masi et al., 2017), καθώς και τις βιομηχανικές απορροές (Vymazal, 2014). Μπορούν να καλύψουν ευρεία κλίμακα αναγκών χάρη στις πολλές δυνατές παραλλαγές στο σχεδιασμό τους, καθώς, όπως συμβαίνει και με τους φυσικούς υγρότοπους, οι τεχνητοί υγρότοποι μπορεί να είναι μεγάλοι ή μικροί, να έχουν επιφανειακή ή κυρίως υπόγεια ροή, να έχουν σταθερή ή μεταβαλλόμενη στάθμη νερού, να είναι κορεσμένοι ή μη, να είναι συνεχούς η διαλείπουσας λειτουργίας και να έχουν πολλές άλλες παραλλαγές. Εκτός από την ιδιαίτερη επεξεργασία

που επιδιώκεται, οι υγρότοποι μπορούν να προσφέρουν μια ποικιλία άλλων τυπικών λειτουργιών του οικοσυστήματος, μερικές από τις οποίες είναι οικότοπος άγριας πανίδας, εξατμισοδιαπνοή και επομένως ψύξη, αποθήκευση και διαχείριση νερού, αναψυχή, περιβαλλοντική αποκατάσταση και πράσινο στο δομημένο περιβάλλον (Masi, Rizzo, & Regelsberger, 2018).

Οι πιθανές εφαρμογές των τεχνητών υγρότοπων σε μια κυκλική οικονομία με έμφαση στη διαχείριση των πρώτων υλών και την παροχή υπηρεσιών οικοσυστήματος θα μπορούσαν να επιδιώξουν τους παρακάτω στόχους:

- Επαναχρησιμοποίηση νερού:
 - Επεξεργασία γκρίζων υδάτων για τοπική επαναχρησιμοποίηση (Masi et al., 2010, 2016)
 - Επεξεργασία και αποθήκευση όμβριων (Nolde, 2007)
 - Επεξεργασία ανθεκτικών οργανικών μορίων σε χαμηλές συγκεντρώσεις για επαναχρησιμοποίηση νερού (Matamoros et al., 2016; Verlicchi and Zambello, 2014)
 - Μείωση των παθογόνων παραγόντων σε αποδεκτά επίπεδα ως μέρος μιας πολυεπίπεδης προσέγγισης (Masi, Rizzo, & Regelsberger, 2018)
 - Περαιτέρω επεξεργασία λυμάτων που έχουν υποστεί δευτεροβάθμια επεξεργασία με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση (Ayaz, 2008; Rousseau et al., 2008)
- Ανάκτηση θρεπτικών:
 - Χρήση των τεχνητών υγρότοπων ως προεπεξεργασία για παραγωγή λιπάσματος (μείωση φορέων ασθενειών και επικίνδυνων ουσιών, διαχωρισμός υγρής από στερεή φάση) (Masi, Rizzo, & Regelsberger, 2018)
 - Παραγωγή βιομάζας από ιλύ από πρωτογενή ή δευτερογενή επεξεργασία καθώς και χωνεμένη ιλύ (Masi, Rizzo, & Regelsberger, 2018)
- Παραγωγή ενέργειας:
 - Χρήση τεχνητών υγρότοπων για περαιτέρω επεξεργασία του υγρού κλάσματος που προκύπτει από αναερόβιους αντιδραστήρες για παραγωγή βιοαερίου (Masi, Rizzo, & Regelsberger, 2018)
 - Τεχνητοί υγρότοποι ως μονάδες παραγωγής βιομάζας (Masi, Rizzo, & Regelsberger, 2018)
 - Ανάκτηση θερμότητας από συλλεγμένα γκρίζα ύδατα & επεξεργασία αυτών (Masi, Rizzo, & Regelsberger, 2018)
- Υπηρεσίες οικοσυστήματος:
 - Τεχνητοί υγρότοποι πολλαπλών χρήσεων για αποθήκευση ομβρίων, ως χώροι αναψυχής και δημιουργία οικοσυστημάτων στα πλαίσια του βιώσιμου αστικού αποστραγγιστικού συστήματος (Fletcher et al., 2015)
 - Αναπροσαρμογή των καλλωπιστικών πράσινων εκτάσεων όσον αφορά τις υπηρεσίες οικοσυστήματος (πράσινες στέγες, πράσινοι τοίχοι, χώροι

πρασίνου εσωτερικών χώρων, πάρκα, παραγωγικές περιοχές μόνιμης καλλιέργειας) που περιλαμβάνουν την παραγωγή βιολογικών τροφίμων σε ολοκληρωμένα ενδαιτήματα. (Masi, Rizzo, & Regelsberger, 2018).

4.8 ΕΠΙΔΗΜΙΟΛΟΓΙΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΛΥΜΑΤΑ

Η επιδημιολογία με βάση τα λύματα είναι διεπιστημονικό πεδίο έρευνας. Εν συντομία, συλλέγεται ένα δείγμα λυμάτων στην εισροή μιας μονάδας επεξεργασίας λυμάτων και αναλύεται για ουσίες που σχετίζονται με πτυχές της δημόσιας υγείας. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με την πάροδο του χρόνου και σε διάφορες τοποθεσίες επιτρέπει στους ερευνητές να αντικατοπτρίζουν αντικειμενικά τις τάσεις και τις διαφορές. Η παραγωγή ουσιαστικών αποτελεσμάτων απαιτεί εμπειρογνωμοσύνη από πολλούς ερευνητικούς τομείς, όπως τα αποχετευτικά δίκτυα των πόλεων. Οι εργασίες για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων και σωστή ερμηνεία αυτών περιλαμβάνουν συλλογή αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, σχεδιασμό βέλτιστων συστημάτων παρακολούθησης, εκτίμηση του αριθμού των ατόμων σε μια λεκάνη απορροής, αξιολόγηση μεγάλων συνόλων δεδομένων και αξιολόγηση της μεταβολής των ουσιών στους υπονόμους (Eawag, 2019).

4.8.1 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – ΣΧΕΔΙΟ «ΥΠΟΚΟΣΜΟΙ» (PROJECT “UNDERWORLDS”, MIT)

Το σχέδιο «Υπόκοσμοι» αποτελεί μία πιλοτική, διεπιστημονική πλατφόρμα ανοιχτών δεδομένων για την παρακολούθηση των προτύπων της αστικής υγείας, τη διαμόρφωση πιο περιεκτικών στρατηγικών για τη δημόσια υγεία και την προώθηση των ορίων της αστικής επιδημιολογίας. Πρωτοπαρουσιαζόμενη από το «Senseable City Lab» και το «Alm Lab» και χρηματοδοτούμενη από το Κέντρο Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του MIT-Kuwait, στο MIT αναπτύσσεται μία πρωτότυπη πλατφόρμα «έξυπνης» αποχέτευσης που αποτελείται από φυσική υποδομή, τεχνολογίες βιοχημικών μετρήσεων και τα υπολογιστικά εργαλεία και αναλυτικά στοιχεία της ροής κατάντη που είναι απαραίτητα για την ερμηνεία και την αντιμετώπιση των ευρημάτων.

Το έργο «Υπόκοσμοι» είναι το πρώτο του είδους και μια απόδειξη της έννοιας ότι οι πόλεις μπορούν να χρησιμοποιήσουν το σύστημα αποχέτευσης τους για να πραγματοποιήσουν αστική επιδημιολογία σε πραγματικό χρόνο και να κατανοήσουν την ανθρώπινη υγεία και συμπεριφορά με ακριβή χωροχρονική ανάλυση. Πιθανώς η πιο προφανής πρώτη εφαρμογή της τεχνολογίας έξυπνης αποχέτευσης είναι η παρακολούθηση των μολυσματικών ασθενειών και η πρόβλεψη των εστιών τους.

Οι έγκαιρες προειδοποιήσεις σχετικά με την παρουσία νέων στελεχών της γρίπης στα αστικά κέντρα θα μπορούσαν να μειώσουν σημαντικά τα ιατρικά έξοδα μιας κοινότητας και ακόμη

και να συμβάλουν στην εξάλειψη των εστιών τους. Επιπλέον, τα έξυπνα λύματα θα μπορούσαν να επηρεάσουν τον τρόπο με τον οποίο μελετώνται οι μη μεταδοτικές ασθένειες, επειδή οι βιοδείκτες για ασθένειες όπως η παχυσαρκία και ο διαβήτης θα μπορούν να μετρηθούν σε πρωτοφανή κλίμακα και χρονική ανάλυση.

Οι επιπτώσεις αυτής της πλατφόρμας ξεπερνούν την επιτήρηση ασθενειών και προεκτείνονται στην ανάπτυξη ενός νέου τύπου απογραφής του ανθρώπινου πληθυσμού. Εφόσον αναλυθεί σε συνδυασμό με δημογραφικά δεδομένα, αυτή η πλατφόρμα μπορεί να μελετήσει από τη συνολική υγεία μιας πόλης ως την μεμονωμένη κατάσταση υγείας μιας γειτονιάς.

Το έργο «Υπόκοσμοι» θα μελετήσει την γεωγραφική αστική περιοχή, την τοπολογία του δικτύου και τη δημογραφική κατανομή σε συνδυασμό με τα φορτία των λυμάτων με την πάροδο του χρόνου, με σκοπό να προτείνει και να επικυρώσει ένα μοντέλο που συσχετίζει τη δειγματοληψία λυμάτων με συγκεκριμένα δείγματα πληθυσμού. Μαζί με το Τμήμα Δημοσίων Έργων, αυτή η εργασία έχει ήδη ξεκινήσει σε μια πιλοτική μελέτη στο Cambridge (Morlet et al, 2017, Massachusetts Institute of Technology, 2019).

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Λαμβάνοντας υπόψη την αναμενόμενη αύξηση στην παραγωγή των λυμάτων τα επόμενα χρόνια, την αυξανόμενη παραγωγή οργανικών αποβλήτων και ζήτησης νερού που συνοδεύουν την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και τις περιβαλλοντικές πιέσεις που δημιουργούνται ως αποτέλεσμα, η ανάγκη στροφής σε βιωσιμότερα μοντέλα διαχείρισης του νερού και των λυμάτων κρίνεται επιτακτική.

Η εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας αποτελεί απάντηση στις προκλήσεις που δέχεται το υφιστάμενο γραμμικό οικονομικό μοντέλο. Με την εφαρμογή της θα ελαχιστοποιηθούν η εισροή πόρων και οι απώλειες, οι εκπομπές και η διαρροή ενέργειας με την επιβράδυνση, το κλείσιμο και τη μείωση των βρόγχων υλικού και ενέργειας. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω μακροχρόνιου σχεδιασμού, συντήρησης, επαναχρησιμοποίησης, ανακατασκευής, ανακαίνισης και ανακύκλωσης. Τα βασικά οικονομικά οφέλη από την εφαρμογή της είναι η σημαντική εξοικονόμηση πόρων, η μείωση της διακύμανσης των τιμών και του κινδύνου εφοδιασμού, η τομεακή μετατόπιση στην παροχή υπηρεσιών και τα συνεπακόλουθα οφέλη απασχόλησης και οι μειωμένες εξωτερικές επιπτώσεις.

Σε υπερεθνικό επίπεδο, το 2015 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υιοθέτησε ένα ολοκληρωμένο Σχέδιο Δράσης για την κυκλική οικονομία. Το 2018 λήφθηκαν επιπλέον πρωτοβουλίες στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας, συμπεριλαμβανομένων οδηγιών για την επαναχρησιμοποίηση του νερού, ενώ το 2019 ανακοινώθηκε ότι το σχέδιο δράσης για την κυκλική οικονομία ολοκληρώθηκε.

Τεράστιες προοπτικές υπάρχουν στη μετάβαση προς μία κυκλική οικονομία στη διαχείριση των λυμάτων. Τα λύματα είναι η μεγαλύτερη αναξιοποίητη κατηγορία αποβλήτων. Η τεχνογνωσία που απαιτείται για την επικερδή διαχείριση των αστικών λυμάτων είναι ήδη διαθέσιμη. Από τα λύματα είναι δυνατή η ανάκτηση νερού, με χρήσεις στη βιομηχανία, ως ψυκτικό μέσο, στην άρδευση, στη γεωργία και στην υδατοκαλλιέργεια, ακόμη και για πόσιμη χρήση. Είναι επίσης δυνατή η ανάκτηση άζωτου και φώσφορου για την παραγωγή λιπάσματος, καθώς και ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης του βιοαερίου για την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρισμού. Επιπλέον, η επεξεργασμένη ιλύς αξιοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό, για την αποκατάσταση εδαφών, ως πρώτη ίλη για κατασκευαστικά υλικά και ως πηγή θρεπτικών στοιχείων. Σε πιο πρώιμο τεχνολογικά στάδιο βρίσκονται οι τεχνολογίες ανάκτησης κυτταρίνης για την παραγωγή πλαστικών, χαρτικών, μονωτικών και λοιπών κατασκευαστικών υλικών, η καλλιέργεια αλγών, που αξιοποιείται ως βιοκαύσιμο και έχει εφαρμογές στην παραγωγή ζωοτροφών, στη βιομηχανία χαρτιού, στις φαρμακευτικές και καλλυντικές βιομηχανίες, η ανάκτηση εμπορικών χημικών, καθώς και εξαγωγή πληροφορίας από αυτά με σκοπό τη δημιουργία βάσεων δεδομένων δημόσιας υγείας.

Στην κυκλική διαχείριση των λυμάτων, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν τα μεγάλα αστικά κέντρα, ως κόμβος συγκέντρωσης οργανικού υλικού. Η αντιμετώπιση των οργανικών αποβλήτων και των λυμάτων ως πηγή πρώτων υλών προσφέρει την ευκαιρία αξιοποίησης

τους και μείωσης των εξωτερικών αρνητικών επιπτώσεων που συνοδεύει την απόρριψή τους. Πολλές πόλεις έχουν εγκαταστήσει συστήματα προς εκμετάλλευση της αξίας των λυμάτων. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε μια ριζική αλλαγή στο όραμα των δημοτικών ΕΕΛ, με την αλλαγή αυτή να αποτελεί υποδειγματική μεταστροφή στην φιλοσοφία αντιμετώπισης αυτών. Οι ΕΕΛ δε λαμβάνονται υπόψιν πλέον μόνο για τις λειτουργίες προστασίας του περιβάλλοντος και ως κομμάτι του δικτύου αποχέτευσης, αλλά και ως σημείο εκκίνησης για την εκμετάλλευση δυνητικών πόρων που θεωρούνται τώρα απόβλητα. Σε αυτό το πλαίσιο, οι ΕΕΛ νοούνται, αφενώς ως αυτοδύναμα συστήματα (ενεργειακά και οικονομικά) και, αφετέρου, ως «εργοστάσια» (βιοδιυλιστήρια) νέων ενώσεων για την αγορά. Λειτουργούν ως ολοκληρωμένα κέντρα παροχών υπηρεσιών που απορρέουν από την επεξεργασία των λυμάτων.

Οι εφαρμογές όμως των παραπάνω είναι σποραδικές και μη συντονισμένες. Επόμενο βήμα αποτελεί η μεγάλης κλίμακας εφαρμογή των ανωτέρω τεχνολογιών, μία συστημική στροφή σε οικονομικό και κοινωνικό επίπεδο προς την κυκλική οικονομία των οργανικών ροών, μέσω της διαμόρφωσης ενός κατάλληλου θεσμικού πλαισίου που θα επιτρέπει, θα συντονίζει, θα προάγει, θα επιβλέπει και θα δίνει κίνητρα σε όλα τα ενδιαφερόμενα μέλη για την επωφελή διαχείριση των λυμάτων και των αποβλήτων. Η στροφή στην κυκλική οικονομία αποτελεί τη λύση για τη βιώσιμη ανάπτυξη, την ανάσχεση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και την διαμόρφωση ενός ενάρετου κύκλου που εξασφαλίζει την ευημερία σε ένα κόσμο περιορισμένων πρώτων υλών.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Meadows, D.H., Randers, J., Meadows, D.L., 2004. The Limits to Growth. The 30-year Update. Routledge, London.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 2010. Vision 2050. The New Agenda for Business. Conches-Geneva.

Seiffert, M., Loch, C., 2005. Systemic thinking in environmental management: support for sustainable development. J. Clean. Prod. 13 (12), 1197-1202.

Markard, J., Raven, R., Truffer, B., 2012. Sustainability transitions: an emerging field of research and its prospects. Res. Policy 41, 955-967.

Ellen MacArthur Foundation (EMF), 2013a. Towards the Circular Economy, vol. 1 (Isle of Wight).

Ellen MacArthur Foundation (EMF), 2013b. Towards the Circular Economy, vol. 2 (Isle of Wight).

Ellen MacArthur Foundation (EMF), 2014. Towards the Circular Economy, vol. 3 (Isle of Wight).

Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin III, F.S., Lambin, E., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H., Nykvist, B., De Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sorlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J., 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. Ecol. Soc. 14 (2), 32. [online] [URL:http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/](http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/).

Jackson, T., 2009. Prosperity without Growth. Economics for a Finite Planet. Earthscan, London, New York.

World Wide Fund for Nature (WWF), 2014. Living Planet Report 2014: Species and Spaces, People and Places Gland.

Banerjee, A., Duflo, E., 2011. Poor Economics: a Radical Rethinking of the Way to Fight Global Poverty.

Sen, A., 2001. Development as Freedom. Oxford University Press.

Prahalad, C.K., 2004. The Fortune at the Bottom of the Pyramid: Eradicating Poverty through Profits. Wharton School Publishing.

Brennan, G., Tennant, M., Blomsma, F., 2015. Business and production solutions: closing the loop in. In: Kopnina, H., Shoreman-Ouimet, E. (Eds.), Sustainability: Key Issues. EarthScan. Routledge, pp. 219-239.

European Commission, 2015. Closing the Loop - an EU Action Plan for the Circular Economy, Com(2015) 614 Communication from the Commission to the Euro- pean Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. European Commission, Brussels.

Lieder, M., Rashid, A., 2016. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. J. Clean. Prod. 115, 36-51.

Pearce, D., Turner, R., 1989. Economics of Natural Resources and the Environment. Johns Hopkins University Press, Baltimore.

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>

Stahel, W., Reday, G., 1976. The Potential for Substituting Manpower for Energy, Report to the Commission of the European Communities.

Stahel, W., 1982. The product life factor. In: Orr, G.S. (Ed.), An Inquiry into the Nature of Sustainable Societies. The Role of the Private Sector. Houston Area Research Centre, Houston, pp. 72-105.

Lyle, J.T., 1994. Regenerative Design for Sustainable Development. John Wiley & Sons, New York; Chichester.

<http://www.product-life.org/en/major-publications/performance-economy>

McDonough, W., Braungart, M., 2002. Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things, first ed. North Point Press, New York.

Graedel, T.E., Allenby, B.R., 1995. Industrial Ecology. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.

<https://is4ie.org/>

Pauli, G.A., 2010. The Blue Economy: 10 Years, 100 Innovations, 100 Million Jobs. Paradigm Publications, Taos, NM.

www.theblueeconomy.org

Benyus, J.M., 2002. Biomimicry. Harper Perennial, New York.

<https://biomimicry.org/what-is-biomimicry/>

Geng, Y., Doberstein, B., 2008. Developing the circular economy in China: challenges and opportunities for achieving “leapfrog development.” Int. J. Sustain. Dev. World Ecol. 15, 231-239.

Webster, K., 2015. The Circular Economy: a Wealth of Flows. Ellen MacArthur Foundation, Isle of Wight.

Yuan, Z., Bi, J., Moriguchi, Y., 2008. The circular economy: a new development Strategy in China. J. Ind. Ecol. 10, 4-8.

Bocken, N.M.P., de Pauw, I., Bakker, C., van der Grinten, B., 2016. Product design and business model strategies for a circular economy. J. Ind. Prod. Eng. 33, 308-320.

<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>

Su, B., Heshmati, A., Geng, Y., Yu, X., 2013. A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. J. Clean. Prod. 42, 215-227.

METI, 2004. Handbook on Resource Recycling Legislation and 3R Initiatives. Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry, Tokyo.

Lieder, M., Rashid, A., 2016. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. J. Clean. Prod. 115, 36-51.

European Commission, 2014 Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe, COM/2014/0398 final/2 Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. European Commission, Brussels. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52014DC0398R\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52014DC0398R(01))

European Commission, 2015. Closing the Loop - an EU Action Plan for the Circular Economy, Com(2015) 614 Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and

Social Committee and the Committee of the Regions. European Commission, Brussels. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>

Official Journal of the European Union, L 150, 14 June 2018. Regulation (EU) 2018/848, Directives (EU) 2018/849, 2018/850, 2018/851, 2018/852, Decision (EU) 2018/853 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L:2018:150:TOC>

<https://sustainabledevelopment.un.org/?menu=1300>

European Commission, 2018. Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions. A European Strategy for Plastics in a Circular Economy, SWD (2018) 16 final, Brussels. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0028>

European Commission, 2018. Proposal for a Directive Of The European Parliament And Of The Council on port reception facilities for the delivery of waste from ships, repealing Directive 2000/59/EC and amending Directive 2009/16/EC and Directive 2010/65/EU COM/2018/033 final - 2018/012 (COD). SWD(2018) 21 final. SWD(2018) 22 final, Strasbourg <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52018PC0033>

European Commission, 2018. Directive of the European Parliament and of the Council on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment, SEC(2018) 253 final - SWD(2018) 254 final - SWD(2018) 255 final - SWD(2018) 256 final - SWD(2018) 257 final. European Commission, Brussels. http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/single-use_plastics_proposal.pdf

European Commission, 2018. Opinion of the European Economic and Social Committee on the Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the implementation of the circular economy package: options to address the interface between chemical, product and waste legislation (COM(2018) 32 final). EESC 2018/00491. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018AE0491>

European Commission, 2018. Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions on a monitoring framework for the circular economy, COM/2018/029 final, SWD(2018) 17 final, Strasbourg.

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2018. Ανακοίνωση της Επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Συμβούλιο, την Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και την Επιτροπή των Περιφερειών σχετικά με το πλαίσιο παρακολούθησης για την κυκλική οικονομία, SWD(2018) 17 final. Ευρωπαϊκή Επιτροπή, Στρασβούργο. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0029&from=EN>

European Commission, 2018. Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy, SWD(2018) 36 (parts 1,2,3). <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/27327>

European Commission, 2018. Regulation of the European Parliament and of the Council on minimum requirements for water reuse, SEC(2018) 249 final - SWD(2018) 249 final - SWD(2018) 250 final. European Commission, Brussels http://ec.europa.eu/environment/water/pdf/water_reuse_regulation.pdf

Raso, J. Updated Report on Wastewater Reuse in the European Union. 2013. Available online: https://ec.europa.eu/environment/water/blueprint/pdf/Final%20Report_Water%20Reuse_April%202013.pdf

Alcalde Sanz, L.; Gawlik, B.M. Water Reuse in Europe, Relevant Guidelines, Needs for and Barriers to Innovation. A Synoptic Overview. 2014. Available online: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC92582>

Frijns, J.; Smith, H.; Brouwer, S.; Garnett, K.; Elelman, R.; Jeffrey, P. How Governance Regimes Shape the Implementation of Water Reuse Schemes. *Water* 2016, 8, 605.

Khatib, N.A.; Shoqeir, J.A.H.; Özerol, G.; Majaj, L. Governing the reuse of treated wastewater in irrigation: The case study of Jericho, Palestine. *Int. J. Glob. Environ. Issues* 2017, 16, 135.

Saldías, C.; Speelman, S.; Amerasinghe, P.; van Huylbroeck, G. Institutional and policy analysis of wastewater (re)use for agriculture: Case study Hyderabad, India. *Water Sci. Technol.* 2015, 72, 322–331.

Saldías, C.; Speelman, S.; van Koppen, B.; van Huylbroeck, G. Institutional arrangements for the use of treated effluent in irrigation, Western Cape, South Africa. *Int. J. Water Resour. Dev.* 2015, 32, 203–218

Fawell, J.; Le Corre, K.; Jeffrey, P. Common or independent? The debate over regulations and standards for water reuse in Europe. *Int. J. Water Resour. Dev.* 2016, 32, 559–572.

European Economic Community. Council Directive 91/271/EEC Concerning urban Wastewater Treatment: (91/271/EEC); European Economic Community: Brussels, Belgium, 1991; Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0271&from=EN>

Alcalde Sanz, L.; Gawlik, B.M. Minimum Quality Requirements for Water Reuse in Agricultural Irrigation and Aquifer Recharge. Towards a Legal Instrument on Water Reuse at EU Level. 2017. Available online: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC109291/jrc109291_online_08022018.pdf

Rizzo, L.; Krätke, R.; Linders, J.; Scott, M.; Vighi, M.; de Voogt, P. Proposed EU minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge: SCHEER scientific advice. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* 2018, 2, 7–11.

Maaß, O., & Grundmann, P. (2018). Governing transactions and interdependences between linked value chains in a circular economy: The case of wastewater reuse in Braunschweig (Germany). *Sustainability (Switzerland)*, 10(4), 1–29. <https://doi.org/10.3390/su10041125>

Ellen MacArthur Foundation –EMF; Antea Group – Arup, 2018. Water and Circular Economy, White Paper

Natural Capital Coalition, Protocol – Food and Beverage Sector Guide, (2016), <https://naturalcapitalcoalition.org/natural-capital-protocol-food-and-beverage-sector-guide/>

Center for Advanced Studies on Applied Economics, University of São Paulo, and Brazilian Confederation of Agriculture and Livestock, <https://www.cepea.esalq.usp.br/en/brazilian-agribusiness-gdp.aspx>

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2018. Βιώσιμη βιοοικονομία για την Ευρώπη: ενίσχυση της σύνδεσης οικονομίας, κοινωνίας, SWD(2018) 431 final, Ανακοίνωση της Επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Συμβούλιο, την Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και την Επιτροπή των Περιφερειών. Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0673&from=EL>

Ronzon, T. κ.ά., *Sustainability*, 10, 6, 1745, (2018), doi: 10.3390/su10061745· ετήσια στοιχεία (δεδομένα για το 2015)

Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO), SAVE FOOD: Global Initiative on Food Loss and Waste Reduction, <http://www.fao.org/save-food/resources/keyfindings/en/>

Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO), Global Food Losses and Food Waste – Extent, Causes and Prevention, FAO: Rome, <http://www.fao.org/3/a-i2697e.pdf>

OECD, Water use in agriculture, <http://www.oecd.org/agriculture/topics/water-and-agriculture/>

European Environment Agency, Towards efficient use of water resources in Europe (2012), <https://www.eea.europa.eu/publications/towards-efficient-use-of-water>

Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO), Natural Capital Impacts in Agriculture, FAO: Rome (2015), http://www.fao.org/fileadmin/templates/nr/sustainability_pathways/docs/Natural_Capital_Impacts_in_Agriculture_final.pdf

Trucost (commissioned by TEEB), Natural Capital at Risk: The Top 100 Externalities of Business (2013), <https://www.naturalcapitalcoalition.org/wp-content/uploads/2016/07/Trucost-Nat-Cap-at-Risk-Final-Report-web.pdf>

Diaz, R.J., Rosenberg, R., Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems, Science, 15 August 2008: Vol. 321, Issue 5891, pp. 926-929, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18703733>

Food and Agriculture Organisation of the United Nations (FAO), World fertiliser trends and outlook to 2019, Summary Report, FAO: Rome (2016), <http://www.fao.org/3/a-i5627e.pdf>

Kellner, K., Risoli, C., Metz, M., Terminal Evaluation of the UNEP/FAO/ GEF Project Land Degradation Assessment in Drylands (LADA), United Nations Environment Programme (UNEP) (2011).

World Bank, What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management, Urban Development Series Knowledge Papers, No. 15, 2012, https://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva (2014), <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Ellen MacArthur Foundation, SUN and McKinsey Center for Business and Environment, Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe (2015).

Stuchtey, M., Rethinking the Water Cycle, Sustainability & Resource Productivity, McKinsey & Company (2015).

Strucker, A., Amsterdam water and waste in transition to a circular economy (2016), <https://www.greenribboncommission.org/wp-content/uploads/2016/07/Andre-Strucker-Amsterdam-water-and-waste-in-transition-to-a-circular-economy-6.13.2016.pdf>

Morlet, A., Walker, D., Jeffries, N., Susnjara, A., Churchill-Slough, S., Gravis, L., ... Turos, A. (2017). Urban Biocycles. Ellen MacArthur Foundation, 34. Retrieved from <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/urban-biocycles>

Milano Recycle City, 2015. Food Waste Recycling in a Densely Populated European City: The Case Study of Milan (2015), http://www.arsambiente.it/files/leaflet%20MRC_v7_ing_HR.PDF

City of New York, Department of Sanitation, 2015 NYC Organics Collection Report (2015), <https://www1.nyc.gov/assets/dsny/downloads/pdf/studies-and-reports/OrganicsCollection-LL77-NYCOrganicsCollectionReport-2015.pdf>

Waste and Resources Action Programme (WRAP), Statistics (2018) <http://laportal.wrap.org.uk/Statistics.aspx>

International Solid Waste Association (ISWA), Circular Economy: Carbon, Nutrients and Soil, ISWA: Vienna, (2015), https://www.iswa.org/fileadmin/galleries/Task_Forces/Task_Force_Report_4.pdf

International Solid Waste Association (ISWA), Circular Economy: Energy and Fuels, ISWA: Vienna (2015), <https://eco.nomia.pt/contents/documentacao/task-force-report-5.pdf>

Smil, V., Nitrogen cycle and world food production, *World Agriculture*, Vol. 2, pp. 9-13, 2011, <http://vaclavsmil.com/wp-content/uploads/docs/smil-article-worldagriculture.pdf>

Massachusetts Institute of Technology (MIT), Mission 2016: The Future of Strategic Natural Resources, Phosphorus: Supply and Demand, <http://web.mit.edu/12.000/www/m2016/finalwebsite/problems/phosphorus.html>

Shannon M, Bohn PW, Elimelech M, Georgiadis JG, Mariñas BJ, Mayes AM: Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature* 2008, 452:301–310.

Aiello, R.; Cirelli, G.L.; Consoli, S. Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil and tomato fruits: A case study in Sicily (Italy). *Agric. Water Manag.* 2007, 93, 65–72.

Bedbabis, S.; Trigui, D.; Ben Ahmed, C.; Clodoveo, M.L.; Camposeo, S.; Vivaldi, G.A.; Ben Rouina, B. Long-terms effects of irrigation with treated municipal wastewater on soil, yield and olive oil quality. *Agric. Water Manag.* 2015, 160, 14–21.

Singh, P.K.; Deshbhratar, P.B.; Ramteke, D.S. Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. *Agric. Water Manag.* 2012, 103, 100–104.

Zema, D.A.; Bombino, G.; Andiloro, S.; Zimbone, S.M. Irrigation of energy crops with urban wastewater: Effects on biomass yields, soils and heating values. *Agric. Water Manag.* 2012, 115, 55–65

Haruvy, N. Agricultural reuse of wastewater: Nation-wide cost-benefit analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 1997, 66, 113–119

Maaß, O.; Grundmann, P. Added-value from linking the value chains of wastewater treatment, crop production and bioenergy production: A case study on reusing wastewater and sludge in crop production in Braunschweig (Germany). *Resour. Conserv. Recycl.* 2016, 107, 195–211.

Rosenqvist, H.; Dawson, M. Economics of using wastewater irrigation of willow in Northern Ireland. *Biomass Bioenergy* 2005, 29, 83–92.

Paranychianakis, N.V.; Nikolantonakis, M.; Spanakis, Y.; Angelakis, A.N. The effect of recycled water on the nutrient status of Sultantina grapevines grafted on different rootstocks. *Agric. Water Manag.* 2006, 81, 185–198.

Pedrero, F.; Kalavrouziotis, I.; Alarcón, J.J.; Koukoulakis, P.; Asano, T. Use of treated municipal wastewater in irrigated agriculture—Review of some practices in Spain and Greece. *Agric. Water Manag.* 2010, 97, 1233–1241.

Maimon, A.; Gross, A. Greywater: Limitations and perspective. *Curr. Opin. Environ. Sci. Health* 2018, 2, 1–6. [CrossRef]

Muyen, Z.; Moore, G.A.; Wrigley, R.J. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. *Agric. Water Manag.* 2011, 99, 33–41. [CrossRef]

Fatta-Kassinos, D.; Kalavrouziotis, I.K.; Koukoulakis, P.H.; Vasquez, M.I. The risks associated with wastewater reuse and xenobiotics in the agroecological environment. *Sci. Total Environ.* 2011, 409, 3555–3563

Khan, S.; Cao, Q.; Zheng, Y.M.; Huang, Y.Z.; Zhu, Y.G. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environ. Pollut.* 2008, 152, 686–692.

Mapanda, F.; Mangwayana, E.N.; Nyamangara, J.; Giller, K.E. The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2005, 107, 151–165.

Pedersen, J.A.; Soliman, M.; Suffet, I.H.M. Human pharmaceuticals, hormones, and personal care product ingredients in runoff from agricultural fields irrigated with treated wastewater. *J. Agric. Food Chem.* 2005, 53, 1625–1632.

Toze, S. Reuse of effluent water—Benefits and risks. *Agric. Water Manag.* 2006, 80, 147–159.

Qadir, M.; Wichelns, D.; Raschid-Sally, L.; McCornick, P.G.; Drechsel, P.; Bahri, A.; Minhas, P.S. The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agric. Water Manag.* 2010, 97, 561–568.

Rusan, M.J.M.; Hinnawi, S.; Rousan, L. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination* 2007, 215, 143–152.

Maaß, O., & Grundmann, P. (2018). Governing transactions and interdependences between linked value chains in a circular economy: The case of wastewater reuse in Braunschweig (Germany). *Sustainability (Switzerland)*, 10(4), 1–29. <https://doi.org/10.3390/su10041125>

World Economic Forum: Global risk 2015 report. Geneva: Switzerland; 2015.

Henry JG, Heinke GW: Environmental science and engineering. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall; 1989. p. 728.

Chon H-S, Ohandja D-G, Voulvoulis N: Assessing the relative contribution of wastewater treatment plants to levels of metals in receiving waters for catchment management. *Water Air Soil Pollut* 2012, 223(7):3987–4006.

National Research Council: Use of reclaimed water and sludge in food crop production. Washington D.C: National Academy Press; 1996.

Al Aukidy M, Verlicchi P, Voulvoulis N: A framework for the assessment of the environmental risk posed by pharmaceuticals originating from hospital effluents. *Sci Total Environ* 2014, 493:54–64.

Rowell VF, Tangney P, Hunt C, Voulvoulis N: Estimating levels of micropollutants in municipal wastewater. *Water Air Soil Pollut* 2010, 206(1–4):357–368.

Voulvoulis, N. (2018). Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005>

Jones OA, Green PG, Voulvoulis N: Questioning the excessive use of advanced treatment to remove organic micro-pollutants from wastewater. *Environ Sci Technol* 2007a, 41(14): 5085–5089.

National Research Council: Water reuse: potential for expanding the Nation's water supply through reuse of municipal wastewater. Washington D.C: National Academy Press; 2012.

Wang H, Wang T, Zhang B, Li F, Toure B, Bosire Omosa I, Chiramba T, Abdel-Monem M, Pradhan M: Water and wastewater treatment in Africa – current practices and challenges. *Clean - Soil, Air, Water* 2014, 42(8):1029–1035.

Newcombe R: Municipal water reuse market set for explosive growth. 2009. Available at: <http://www.prweb.com/releases/water/reuse/prweb3009814.htm>

Tao W, Sauba K, Fattah KP, Smith JR: Designing constructed wetlands for wastewater reclamation [Editorial Manager]. 2016.

Davidson K, Gowen RJ, Harrison PJ, Fleming LE, Hoagland P, Moschonas G: Anthropogenic nutrients and harmful algae in coastal waters. J Environ Manag 2014, 146:206–216.

EPA: Case studies on implementing low-cost modifications to improve nutrient reduction at wastewater treatment plants. 2015.

IWA: Alternative water resources: a review of concepts, solutions and experiences. 2015.

Bixio D, Wintgens T: Water reuse system management manual Aquarec. Brussels, Belgium: Office for Official Publications of the European Communities, European Commission; 2006.

MED-EUWI (MEDITERRANEAN COMPONENT of the EU water initiative): Strategic partnership on water for sustainable development. 2007. Available at: http://www.twrm-med.net/southeastern-europe/regional-dialogue/framework/med-euwi/MED-EUWI_Brief_EN_Mar12-1.pdf

European Environmental Agency (2012) EEA report no 12/2012. European Environmental Agency; 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe — an indicator-based report.

WDD (2008) Addressing the challenge of water scarcity in Cyprus', presentation by Charis Omorphos at Global Water Efficiency 2008. International Conference and Exhibition, 27–28, November 2008, Limassol, Cyprus.

Environment Agency: Water for people and the environment: water resources strategy for England and Wales. Bristol: Environment Agency; 2009. <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20140328161417/http://cdn.environment-agency.gov.uk/geho0309bpx-e-e.pdf>

Kearney MS, Harris BH, Hershbein B, Jácome E, Nantz G: In times of drought: nine economic facts about water in the United States. 2014. Available at: <https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/nineeconomicfactsaboutuswaterkearneyharris.pdf>

WWI: Overcoming the global barriers to water reuse. 2017. Available at: <https://www.waterworld.com/international/article/16201890/overcoming-the-global-barriers-to-water-reuse>

Drewes JE, Reinhard M, Fox P: Comparing microfiltration- reverse osmosis and soil-aquifer treatment for indirect potable reuse of water. Water Res 2003, 37(15):3612–3621.

National Research Council: Issues in potable reuse: the viability of augmenting drinking water supplies. Washington D.C: National Academy Press; 1998.

Raghav M, Eden S, Mitchell K, Witte B: Contaminants of emerging concern in water. Arroyo: Water Resources Research Center College of Agriculture and Life Sciences, University of Arizona; 2013.

Jarusutthirak C, Amy G: Understanding soluble microbial products (SMP) as a component of effluent organic matter (EfOM). Water Res 2007, 41(12):2787–2793.

National Research Council: Water reuse: potential for expanding the Nation's water supply through reuse of municipal wastewater. Washington D.C: National Academy Press; 2012.

SIWI: World Water Week. Water and waste: reduce and reuse. 2017.

Busch J, Dawson D, Roelich K: Closing the low-carbon material loop using a dynamic whole system approach. *J Clean Prod* 2017, 149:751–761.

Winter T, Harvey JW, Franke OL, Alley WM: Ground water and surface water: a single resource. U.S. Geological Survey Circular. 1998. p. 1139.

European Environmental Agency: Assessment of cost recovery through water pricing EEA. Technical report No 16/2013. 2013.

Global Water Partnership: Pricing for water and water services (C7.01). 2017. Available: [https://www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/Management-Instruments/Economic-Instruments/Pricing for water and water services/](https://www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/Management-Instruments/Economic-Instruments/Pricing%20for%20water%20and%20water%20services/)

EPA: Water recycling and reuse: the environmental benefits. 1998. Water Division Region IX - EPA 909-F-98-001.

Hartley TW: Water reuse: understanding public perception and participation. 2003.

Jones AQ, Dewey CE, Dore K, Majowicz SE, McEwen SA, Waltner-Toews D, Henson SJ, Mathews E: Public perception of drinking water from private water supplies: focus group analyses. *BMC Publ Health* 2005, 5(129).

Public Utilities Board Singapore: Singapore water story. 2017. Available at: <https://www.pub.gov.sg/watersupply/singaporewaterstory>

Dolnicarm S, Hurlimann A, Grün B: What affects public acceptance of recycled and desalinated water? *Water Res* 2011, 45(2):933–943.

Chon H-S, Ohandja D-G, Voulvoulis N: Implementation of EU Water Framework Directive: source assessment of metallic substances at catchment levels. *J Environ Monit* 2010, 12(1): 36–47.

Jones OA, Voulvoulis N, Lester JN: The occurrence and removal of selected pharmaceutical compounds in a sewage treatment works utilising activated sludge treatment. *Environ Pollut* 2007b, 145(3):738–744.

Martin OV, Voulvoulis N: Sustainable risk management of emerging contaminants in municipal wastewaters. *Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci* 2009, 367(1904): 3895–3922.

Toze S: Reuse of effluent water—benefits and risks. *Agric Water Manag* 2006, 80(1):147–159.

Molinos-Senante M, Hernandez-Sancho F, Sala-Garrido R: Tariffs and cost recovery in water reuse. *Water Resour Manag* 2013, 27(6):1797–1808.

Hering JG, Waite TD, Luthy RG, Drewes JE, Sedlak DL: A changing framework for urban water systems. *Environ Sci Technol* 2013, 47:10721–10726.

Wilcox J, Nasiri F, Bell S, Rahaman MS: Urban water reuse: a triple bottom line assessment framework and review. *Sustain Cities Soc* 2016, 27:448–456.

Langergraber G, Muellegger E: Ecological Sanitation – a way to solve global sanitation problems? *Environ Int* 2005, 31: 433–444.

Lavagnolo MC, Malagoli M, Alibardi L, Garbo F, Pivato A, Cossu R: Use of oleaginous plants in phytotreatment of grey water and yellow water from source separation of sewage. *J Environ Sci* 2017, 55:274–282.

Makropoulos CK, Butler D: Distributed water infrastructure for sustainable communities. *Water Resour Manag* 2010, 24: 2795–2816.

Hochstrat R, Joksimovic D, Wintgens T, Melin T, Savic D, Pinnekamp J: Economic considerations and decision support tool for wastewater reuse scheme planning. *WaterSci Technol* 2007, 56:175–182.

Asano T, Clerico EA: Water reuse within green buildings: a case study of the solaire. In *Water sources conferences and exposition of the American Water Works Association*; 2006.

CDPH: Draft regulations for groundwater replenishment with recycled water. California Department of Public Health; 2011.

CDPH: Regulations related to recycled water. California Department of public Health; 2009.

du Pisani PL: Direct reclamation of potable water at Windhoek's Goreangab reclamation plant. *Desalination* 2006, 188: 79–88.

Abu-Ghunmi, D.; Abu-Ghunmi, L.; Kayal, B.; Bino, A. Circular economy and the opportunity cost of not 'closing the loop' of water industry: The case of Jordan. *J. Clean. Prod.* 2016, 131, 228–236.

Ahlers, R.; Eggers, T. *Abwasserverband Braunschweig: 50 Jahre Erfolgreich Tätig für Mensch und Umwelt durch Reinigung und Landwirtschaftliche Verwertung Kommunalen Abwässers*; Uwe Krebs Verlag: Neubrück, Switzerland, 2004.

Ternes, T.A.; Bonerz, M.; Herrmann, N.; Teiser, B.; Andersen, H.R. Irrigation of treated wastewater in Braunschweig, Germany: An option to remove pharmaceuticals and musk fragrances. *Chemosphere* 2007, 66, 894–904.

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, 139–148. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85028707942&partnerID=40&md5=6b565cf3733efdb6b03eb8198088b640>

Abu, R., & Solutions, W. (2018). Water reuse in the circular economy. *Filtration + Separation*, 55(5), 19–21. [https://doi.org/10.1016/s0015-1882\(18\)30329-x](https://doi.org/10.1016/s0015-1882(18)30329-x)

Verstraete, W., Van de Caveye, P., & Diamantis, V. (2009). Maximum use of resources present in domestic "used water." *Bioresource Technology*, 100(23), 5537–5545. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.047>

Utilities and Services in Amsterdam, 2019. <https://www.amsterdamtips.com/utilities-amsterdam>

IndexMundi, Commodity Price Indices, 2019 <http://www.indexmundi.com>

U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (USGS), 2019. Mineral Commodity Summaries 2019. http://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf

Lin, Y., Guo, M., Shah, N., & Stuckey, D. C. (2016). Economic and environmental evaluation of nitrogen removal and recovery methods from wastewater. *Bioresource Technology*, 215, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.064>

Van Hulle, S.W.H., Vandeweyer, H.J.P., Meesschaert, B.D., Vanrolleghem, P.A., Dejana, P., Dumoulin, A. 2010. Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams. *Chemical Engineering Journal*, 162(1), 1-20.

Kuenen, J.G. 2008. Anammox bacteria: from discovery to application. *Nat Rev Micro*, 6(4), 320- 326

Childers, D.L., Corman, J., Edwards, M., Elser, J.J., 2011. Sustainability challenges of phosphorus and food: solutions from closing the human phosphorus cycle. *Bioscience* 61 (2), 117-124. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.2.6>.

Gantner, O., Schipper, W., Weigand, J., 2014. Technological use of phosphorus: the non-fertilizer, non-feed and non-detergent domain. In: Scholz, R.W., Roy, A.H., Brand, F.S., Hellums, D.T., Ulrich, A.E. (Eds.), *Sustainable Phosphorus Management: a Sustainable Roadmap*. Springer, Dordrecht Heidelberg New York London, pp. 237-242.

Jedelhauser, M., Binder, C.R., 2015. Losses and efficiencies of phosphorus on a national level: a comparison of European substance flow analyses. *Resour. Conserv. Recycl.* 105, 294-310. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.021>.

Circle Economy, TNO and FABRIC, Circular Amsterdam: A vision and action agenda for the city and metropolitan area, <https://www.circle-economy.com/wp-content/uploads/2016/04/Circular-Amsterdam-EN-small-210316.pdf>

Faerge, J., Magid, J., Penning de Vries, F.W.T. Urban nutrient balance for Bangkok, *Ecological Modelling*, Vol. 139, Issue 1, 30 March 2001, pp. 63-74, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380001002332>

Australian Organics Recycling Association, The Australian Recycled Organics Industry at a Glance, https://www.aora.org.au/sites/default/files/uploaded-content/website-content/aora_capability_statement_web.pdf

European Commission, 2011. Roadmap to a Resource Efficient Europe. Communication COM (2011) 571, Brussels.

Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S., 2016. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *J. Clean. Prod.* 114, 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.

Hobson, K., 2016. Closing the loop or squaring the circle? Locating generative spaces for the circular economy. *Prog. Hum. Geogr.* 0309132514566342 <https://doi.org/10.1177/0309132514566342>.

Iacovidou, E., Millward-Hopkins, J., Busch, J., Purnell, P., Velis, C.A., Hahladakis, J.N., ..., Brown, A., 2017. A pathway to circular economy: developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste. *J. Clean. Prod.* 168, 1279-1288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.002>.

Winans, K., Kendall, A., Deng, H., 2017. The history and current applications of the circular economy concept. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 68, 825-833. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>.

Kraus, F., Kabbe, C., 2017. Phosphorrückgewinnung in der Praxis: so funktioniert es in den Niederlanden. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall* 64 (2), 96-98.

EΥΔΑΠ (2019). Research and Development. <https://www.eydap.gr/Development/researchDevelopment/>

EΥΔΑΠ (2018). Sustainability Report 2018. 153-157 https://www.eydap.gr/userfiles/Presentations/etairika_entypa/EYDAP_CSR_2018_F_ENG.PDF

Makropoulos, C., Rozos, E., Tsoukalas, I., Plevri, A., Karakatsanis, G., Karagiannidis, L., Makri, E., Lioumis, C., Noutsopoulos, C., Mamais, D., Rippis, C., Lytras, E. (2018). Sewer-mining: A water reuse option supporting

circular economy, public service provision and entrepreneurship. *Journal of Environmental Management*, 216, 285–298. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.026>

Butler, R., MacCormick, T., 1996. Opportunities for decentralized treatment, sewer mining and effluent re-use. *Desalination* 1996 (106), 273-283.

Jedelhauser, M., & Binder, C. R. (2018). The spatial impact of socio-technical transitions – The case of phosphorus recycling as a pilot of the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 197, 856–869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.241>

Kataki, S., West, H., Clarke, M., Baruah, D.C., 2016. Phosphorus recovery as struvite: recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential. *Resour. Conserv. Recycl.* 107, 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.12.009>.

Crutchik, D., Rodrigues, S., Ruddle, D., Garrido, J. M., 2017. Evaluation of a low-cost magnesium product for phosphorus recovery by struvite crystallization. *Sci. Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1002/jctb.5453>

Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J., Zessner, M., 2016. Phosphorus recovery from municipal wastewater: an integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Sci. Total Environ.* 571, 522-542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.019>.

Ayres, J., Bosia, M.J., 2011. Beyond global summitry: food sovereignty as localized resistance to globalization. *Globalizations* 8 (1), 47-63. <https://doi.org/10.1080/14747731.2011.544203>.

Feagan, R., 2007. The place of food: mapping out the ‘local’ in local food systems. *Prog. Hum. Geogr.* 31 (1), 23-42. <https://doi.org/10.1177/0309132507073527>.

Sage, C., 2014. The transition movement and food sovereignty: from local resilience to global engagement in food system transformation. *J. Consum. Cult.* 14 (2), 254-275. <https://doi.org/10.1177/1469540514526281>

Black, M., Fawcett, B., 2010. *The Last Taboo: Opening the Door on the Global Sanitation Crisis*. Earthscan Publications Ltd, London.

Jewitt, S., 2011. Geographies of shit: spatial and temporal variations in attitudes towards human waste. *Prog. Hum. Geogr.* 35 (5), 608-626. <https://doi.org/10.1177/0309132510394704>.

Erfurth, M., 2015. Mainz: Bau der Klärschlammverbrennungsanlage in Mombach darf trotz laufender Klage beginnen. *Allgemeine Zeitung Rhein Main Presse*. Retrieved from. https://www.allgemeine-zeitung.de/lokales/mainz/nachrichten-mainz/mainz-bau-der-klarschlammverbrennungsanlage-in-mombach-darf-trotz-laufender-klage-beginnen_16341859#

Schmidt, C., 2017. Bürgerinitiative sieht bei Klärschlammverbrennungsanlage in Mombach Stickstoffdioxide als Gefahr e Wirtschaftsbetrieb widerspricht. *Allgemeine Zeitung Rhein Main Presse*. Retrieved from. https://www.allgemeine-zeitung.de/lokales/mainz/stadtteile-mainz/mombach/burgerinitiative-sieht-bei-klarschlammverbrennungsanlage-in-mombach-stickstoffdioxide-als-gefahr-wirtschaftsbetrieb-widerspricht_17821194

Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc., 2019: <https://ostara.com/nutrient-management-solutions/>

International Energy Agency (IEA), About bioenergy (2016), <https://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/bioenergy/>

International Energy Agency (IEA), Energy, Climate Change & Environment: 2016 Insights, OECD/IEA: Paris (2016), <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ECCE2016.pdf>

International Energy Agency (IEA), Key CO₂ Emissions Trends: Excerpt from: CO₂ Emissions from Fuel Combustion (2016 edition), IEA: Paris (2016), <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustionHighlights2017.pdf>

International Energy Agency (IEA), Renewable Energy: Medium-Term Market Report 2016, Executive Summary (2016), <https://www.iea.org/Textbase/npsum/MTrenew2016sum.pdf>

SNV Netherlands Development Organisation (SNV), Vietnam Biogas Programme, [website] (2016), <http://www.snv.org/project/vietnam-biogas-programme>

Tyagi, V.K., Lo, S.L., 2013. Sludge: a waste or renewable source for energy and resources recovery? Renew. Sustain. Energy Rev. 25, 708-728. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.029>.

Shen, Y., Linville, J.L., Urgun-Demirtas, M., Mintz, M.M., Snyder, S.W., 2015. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. Renew. Sustain. Energy Rev. 50, 346-362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.129>.

Tyagi, V.K., Lo, S.L., 2011. Application of physico-chemical pretreatment methods to enhance the sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: an up to date review. Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 10 (3), 215-242. <https://doi.org/10.1007/s11157-011-9244-9>.

Cano, R., Perez-Elvira, S., Fdz-Polanco, F., 2015. Energy feasibility study of sludge pretreatment: a review. Appl. Energy 149, 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.132>.

Carlsson, M., Lagerkvist, A., Morgan-Sagastume, F., 2016. Energy balance performance of municipal wastewater treatment systems considering sludge anaerobic biodegradability and biogas utilisation routes. J. Environ. Chem. Eng. 4 (4), 4680-4689. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.10.030>.

Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Robinson, Z.P., Wang, X., Wu, J., Li, F., 2017. The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants. Appl. Energy 204, 1463-1475. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.069>.

Ruffino, B., Campo, G., Genon, G., Lorenzi, E., Novarino, D., Scibilia, G., Zanetti, M., 2015. Improvement of anaerobic digestion of sewage sludge in a wastewater treatment plant by means of mechanical and thermal pre-treatments: performance, energy and economical assessment. Bioresour. Technol. 175, 298-308. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.071>.

Nghiem, D.L., Koch, K., Bolzonella, D., Drewes, E.J., 2017. Full scale co-digestion of wastewater sludge and food waste: bottlenecks and possibilities. Renew. Sustain. Energy Rev. 72, 354-362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.062>.

Zhang, Q., Hu, J., Lee, D.-J., Chang, Y., Lee, Y.-J., 2017. Sludge treatment: current research trends. Bioresour. Technol. 243, 1159-1172.

Di Maria, F., Micale, C., Contini, S., 2016. Energetic and environmental sustainability of the co-digestion of sludge with bio-waste in a life cycle perspective. Appl. Energy 171, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.036>.

Maragkaki, A.E., Fountoulakis, M., Gypakis, A., Kyriakou, A., Lasaridi, K., Manios, T., 2017. Pilot-scale anaerobic co-digestion of sewage sludge with agro-industrial by-products for increased biogas production of existing digesters at waste- water treatment plants. *Waste Manag.* 59, 362-370. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.043>.

Schafer, P., Muller, C., Willis, J., 2013. Improving the performance and economics of Co-digestion and energy production. *Proceeding Water Environ. Fed.* 793-803. <https://doi.org/10.2175/193864713813668367>.

Gherghel, A., Teodosiu, C., & De Gisi, S. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 228, 244–263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.240>

Manara, P., Zabaniotou, A., 2012. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion - a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (5), 2566-2582. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.074>.

Lv, P., Yuan, Z., Wu, C., Ma, L., Chen, Y., Tsubaki, N., 2007. Bio-syngas production from biomass catalytic gasification. *Energy Convers. Manag.* 48 (4), 1132-1139. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.10.014>.

Cao, Y., Pawłowski, A., 2012. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: brief overview and energy efficiency assessment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (3), 1657-1665. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.014>.

Tian, Y., Zuo, W., Ren, Z., Chen, D., 2011. Estimation of a novel method to produce bio-oil from sewage sludge by microwave pyrolysis with the consideration of efficiency and safety. *Bioresour. Technol.* 102, 2053-2061. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.082>.

Kargbo, D.M., 2010. Biodiesel production from municipal sewage sludges. *Energy Fuels* 24 (5), 2791-2794. <https://doi.org/10.1021/ef1001106>

Pastore, C., Lopez, A., Lotito, V., Mascolo, G., 2013. Biodiesel from dewatered wastewater sludge: a two-step process for a more advantageous production. *Chemosphere* 92 (6), 667-673. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.03.046>.

Massanet-Nicolau, J., Guwy, A., Dinsdale, R., Premier, G., Esteves, S., 2010. Production of hydrogen from sewage biosolids in a continuously fed bioreactor: effect of hydraulic retention time and sparging. *Int. J. Hydrogen Energy* 35 (2), 469-478. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.076>.

Ebrahimi, A., Najafpour, G. D., & Yousefi Kebria, D. (2018). Performance of microbial desalination cell for salt removal and energy generation using different catholyte solutions. *Desalination*, 432(November 2017), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.01.002>

Nikhil, G.N., Krishna Chaitanya, D.N.S., Srikanth, S., Swamy, Y.V., Venkata Mohan, S., 2018. Applied resistance for power generation and energy distribution in microbial fuel cells with rationale for maximum power point. *Chem. Eng. J.* 335, 267-274. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.139>.

Puig, S., Baeza, J.A., Colprim, J., Cotterill, S., Guisasola, A., He, Z., Heidrich, E., Pous, N., 2017. Niches for bioelectrochemical systems in sewage treatment plants. In: Lema, L.M., Suarez, S. (Eds.), *Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies. Impacts on Energy, Economy and Environment*. IWA Publishing, pp. 96-106.

Lefebvre, O., Uzabiaga, A., Chang, I.S., Kim, B.H., Ng, H.Y., 2011. Microbial fuel cells for energy self-sufficient domestic wastewater treatment - a review and discussion from energetic consideration. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 89 (2), 259-270. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2881-z>.

Plappally, A.K., Lienhard, V.J.H., 2012. Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (7), 4818-4848. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.022>.

Oon, Y.L., Ong, S.A., Ho, L.N., Wong, Y.S., Dahalan, F.A., Oon, Y.S., Lehl, H.K., Thung, W.E., Nordin, N., 2017. Role of macrophyte and effect of supplementary aeration in up-flow constructed wetland-microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and energy recovery. *Bioresour. Technol.* 224, 265-275. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.079>.

Feng, Y., He, W., Liu, J., Wang, X., Qu, Y., Ren, N., 2014. A horizontal plug flow and stackable pilot microbial fuel cell for municipal wastewater treatment. *Bioresour. Technol.* 156, 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.104>.

Dong, Y., Qu, Y., He, W., Du, Y., Liu, J., Han, X., Feng, Y., 2015. A 90-liter stackable baffled microbial fuel cell for brewery wastewater treatment based on energy self-sufficient mode. *Bioresour. Technol.* 195, 66-72. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.026>

Raheem, A., Sikarwar, V.S., He, J., Dastyar, W., Dionysiou, D.D., Wang, W., Zhao, M., 2018. Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: a review. *Chem. Eng. J.* 337, 616-641. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.149>

Puig, S., Baeza, J.A., Colprim, J., Cotterill, S., Guisasola, A., He, Z., Heidrich, E., Pous, N., 2017. Niches for bioelectrochemical systems in sewage treatment plants. In: Lema, L.M., Suarez, S. (Eds.), *Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies. Impacts on Energy, Economy and Environment*. IWA Publishing, pp. 96-106.

Gao, D.W., Tao, Y., 2011. Versatility and application of anaerobic ammonium oxidizing bacteria. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 91 (4), 887-894. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3411-3>.

Bauer, H., Johnson, T.D., Johnson, B.R., Oerke, D., Graziano, S., 2016. Comparison of sidestream treatment technologies: post aerobic digestion and Anammox. *Water Sci. Technol.* 73 (11), 2789-2803. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.079>.

Gao, D.W., Lu, J.C., Liang, H., 2014. Simultaneous energy recovery and autotrophic nitrogen removal from sewage at moderately low temperatures. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 98 (6), 2637-2645. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5237-7>.

Kartal, B., Kuenen, J., Van Loosdrecht, M., 2010. Sewage treatment with anammox. *Science* 328, 702-703. <https://doi.org/10.1126/science.1185941>

Central Intelligence Agency, The World Factbook, North America: United States, <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/us.html>

Electricity Local, New York, Electricity Rates & Consumption in New York, με 0.10 δολάρια ανά kWh - <https://www.electricitylocal.com/states/new-york/new-york/>

Parry, D., Power Positive Resource Recovery, *BioCycle*, August 2014, Vol. 55, Issue 7, p. 45, <https://www.biocycle.net/2014/08/14/power-positive-resource-recovery/>

Scott, L., Capturing Energy in Wastewater Treatment Plants, *WaterWorld*, <http://www.waterworld.com/articles/print/volume-28/issue-9/departments/wwema/capturing-energy-in-wastewater-treatment-plants.html>

State of Green, Maximizing the Value of Wastewater (Odense, Denmark), <https://stateofgreen.com/en/partners/vcs-denmark/solutions/efficient-wastewater-treatment-at-ejby-molle/>

Thames Water, Thames Water invests £250m in renewable energy from sewage sludge [Press release], 4 March 2013, <https://waterbriefing.org/home/company-news/item/7076-thames-water-invests-£250m-in-generating-energy-from-sewage?tmpl=component&print=1>

Methane Finance Study Group, Methane Finance Study Group Report: Using Pay-for-Performance Mechanisms to Finance Methane Abatement, (2013), <http://documents.worldbank.org/curated/en/600031468148163877/Methane-finance-study-group-report-using-pay-for-performance-mechanisms-to-finance-methane-abatement>

Veolia, <https://www.veolia.com/en/veolia-group/media/press-releases/electr-od-new-facility-produces-most-renewable-energy-biogas-france-inaugurated-plessis-gassot-paris-region>

European Commission, 2008. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land; final report; Part II: report on options and impacts, prepared by RPA, milieu Ltd and WRc for the European commission, DG environment under study contract DG ENV.G.4/ETU/2008/0076r. http://ec.europa.eu/environment/archives/waste/sludge/pdf/part_ii_report.pdf.

Kelessidis, A., Stasinakis, A.S., 2012. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. Waste Manag. 32 (6), 1186-1195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.012>.

Abeleira, J., Perez-Elvira, S.I., Sanchez-Oneto, J., Portela, J.R., Nebot, E., 2012. Advanced thermal hydrolysis of secondary sewage sludge: a novel process combining thermal hydrolysis and hydrogen peroxide addition. Resour. Conserv. Recycl. 59, 52-57. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.008>.

Gong, M., Zhu, W., Xu, Z.R., Zhang, H.W., Yang, H.P., 2014. Influence of sludge properties on the direct gasification of dewatered sewage sludge in supercritical water. Renew. Energy 66, 605-611. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.006>.

Kacprzak, M., Neczaja, E., Fijałkowska, K., Grobelaka, A., Grossera, A., Worwaga, M., Rorata, A., Brattebob, H., Almåsc, Å., Singhc, B.R., 2017. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. Environ. Res. 156, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010>

Anjum, M., Al-Makishah, N.A., Barakat, M.A., 2016. Wastewater sludge stabilization using pre-treatment methods. Process Saf. Environ. 102, 615-632. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.05.022>.

Praspaliauskas, M., Pedisius, N., 2017. A review of sludge characteristics in Lithuania's wastewater treatment plants and perspectives of its usage in thermal processes. Renew. Sustain. Energy Rev. 67, 899-907. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.041>.

Fijalkowski, K., Rorat, A., Grobelak, A., Kacprzak, M.J., 2017. The presence of contaminations in sewage sludge e the current situation. J. Environ. Manag. 203, 1126-1136. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.068>.

Anjum, M., Al-Makishah, N.A., Barakat, M.A., 2016. Wastewater sludge stabilization using pretreatment methods. Process Saf. Environ. 102, 615-632. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.05.022>.

Collivignarelli, M.C., Castagnola, F., Sordi, M., Bertanza, G., 2015. Treatment of sewage sludge in a thermophilic membrane reactor (TMR) with alternate aeration cycles. J.Environ. Manage.162, 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.031>.

Qian, L., Wang, S., Xu, D., Guo, Y., Tang, X., Wang, L., 2016. Treatment of municipal sewage sludge in supercritical water: a review. *Water Res.* 89, 118-131. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.047>.

Brown, S., Beecher, N., Carpenter, A., 2010. Calculator tool for determining greenhouse gas emissions for biosolids processing and end use. *Environ. Sci. Technol.* 44 (24), 9509-9515. <https://doi.org/10.1021/es101210k>.

Pilli, S., Yan, S., Tyagi, R.D., Surampall, R.Y., 2015. Overview of Fenton pretreatment of sludge aiming to enhance anaerobic digestion. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 14 (3), 453-472. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9368-4>.

Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K., Wzorek, Z., 2015. The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *J. Clean. Prod.* 95, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.051>.

ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ, 2011. ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΣΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟ, ΤΟ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟ, ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΩΝ Χάρτης πορείας για μια αποδοτική, από πλευράς πόρων, Ευρώπη. Βρυξέλλες, 20.9.2011 COM, vol. 2011, 571 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0571&from=EN>

Eliche-Quesada, D., Martínez-García, C., Martínez-Cartas, M.L., Cotes- Palomino, M.T., Perez-Villarejo, L., Cruz-Perez, N., Corpas-Iglesias, F.A., 2011. The use of different forms of waste in the manufacture of ceramic bricks. *Appl. Clay Sci.* 52 (3), 270-276. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.03.003>.

Gherghel, A., Teodosiu, C., & De Gisi, S. (2019). A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 228, 244–263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.240>

Suarez-Iglesias, O., Urrea, J.L., Oulego, P., Collado, S., Díaz, M., 2017. Valuable compounds from sewage sludge by thermal hydrolysis and wet oxidation. A review. *Sci. Total Environ* 584-585, 921-934. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.140>

Devi, P., Saroha, A.K., 2017. Utilization of sludge based adsorbents for the removal of various pollutants: a review. *Sci. Total Environ.* 578, 16-33. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.220>.

Tezel, U., Tandukar, M., Pavlostathis, S.G., 2011. Anaerobic biotreatment of municipal sewage sludge. Moo-Young, M., (Editor-in-Chief), *Comprehensive biotechnology*. In: Agathos, S. (Ed.), *Environmental Biotechnology and Safety*, second ed.vol. 6. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

De Feo, G., De Gisi, S., Galasso, M., 2008. Definition of a practical multi-criteria procedure for selecting the best coagulant in a chemically assisted primary sedimentation process for the treatment of urban wastewater. *Desalination* 230 (1-3), 229-238.

De Feo, G., Galasso, M., Landi, R., Donnarumma, A., De Gisi, S., 2013. A comparison of the efficacy of organic and mixed-organic polymers with polyaluminium chloride in chemically assisted primary sedimentation (CAPS). *Environ. Technol.* 34 (10), 1297-1305.

Wei, H., Gao, B., Ren, J., Li, A., Yang, H., 2018a. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: a review. *Water Res.* 143, 608-631. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029>.

Xu, J., Yuan, H., Lin, J., Yuan, W., 2014. Evaluation of thermal, thermal-alkaline, alkaline and electrochemical pretreatments on sludge to enhance anaerobic biogas production. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 45 (5), 2531-2536. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2014.05.029>.

- Zhen, G., Lu, X., Kato, H., Zhao, Y., Li, Y.-Y., 2017. Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: current advances, full-scale application and future perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69, 559-577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.187>
- Swierczek, L., Cieslik, B.M., Konieczka, P., 2018. The potential of raw sewage sludge in construction industry - a review. *J. Clean. Prod.* 200, 342-356. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.188>.
- De Carvalho Gomes, S., Zhou, J.L., Li, W., Long, G., 2019. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: a review. *Resour. Conserv. Recycl.* 145, 148-159
- Eurostat, 2015. Sewage Sludge Disposal from Urban Wastewater Treatment, by Type of Treatment, 2015 (% of Total Mass). [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Sewage_sludge_disposal_from_urban_wastewater_treatment,_by_type_of_treatment,_2015_\(%25_of_total_mass\)_V2.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Sewage_sludge_disposal_from_urban_wastewater_treatment,_by_type_of_treatment,_2015_(%25_of_total_mass)_V2.png)
- Smith, S.R., 2002. Management, use and disposal of sewage sludge. In: Smith, S.R., Cheeseman, C., Blakey, N. (Eds.), *Waste Management and Minimization*. EOLSS Publications, pp. 110-136.
- Semblante, G.U., Haia, F.I., Huangb, X., Ball, A.S., Price, W.E., Nghiema, L.D., 2015. Trace organic contaminants in biosolids: impact of conventional wastewater and sludge processing technologies and emerging alternatives. *J. Hazard Mater.* 300, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.037>
- Nazari, L., Yuan, Z., Santoro, D., Sarathy, S., Ho, D., Batstone, D., Xu, C.C., Ray, M.B., 2017. Low-temperature thermal pre-treatment of municipal wastewater sludge: process optimization and effects on solubilization and anaerobic degradation. *Water Res.* 113, 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.055>.
- Jin, N., Jin, B., Zhu, N., Yuan, H., Ruan, J., 2015. Disinhibition of excessive volatile fatty acids to improve the efficiency of autothermal thermophilic aerobic sludge digestion by chemical approach. *Bioresour. Technol.* 175, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.073>.
- Liu, S., Zhu, N., Li, L.Y., 2012. The one-stage autothermal thermophilic aerobic digestion for sewage sludge treatment: stabilization process and mechanism. *Bioresour. Technol.* 104, 266-273. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.041>
- Yuan, H., Xu, C., Zhu, N., 2014. Disinhibition of the ammonium nitrogen in auto-thermal thermophilic aerobic digestion for sewage sludge by chemical precipitation. *Bioresour. Technol.* 169, 686-691. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.016>.
- Ezzariai, A., Hafidi, M., Khadra, A., Aemig, Q., El Fels, L., Barret, M., Merlina, G., Patureau, D., Pinelli, E., 2018. Human and veterinary antibiotics during composting of sludge or manure: global perspectives on persistence, degradation, and resistance genes. *J. Hazard Mater.* 359, 465-481. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.092>
- Elia Ruda, E., Mercedes Ocampo, E., Acosta, A., Mongiello, A., Olmos, G., 2013. Stabilization of industry sludge by composting for use as an organic fertilizer. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 15, p. 2313.
- USEPA, 2012. Opportunities for combined heat and power at wastewater treatment facilities: market analysis and lessons from the field. In: *Proceedings of the Water Environment Federation* https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/opportunities_for_combined_heat_and_power_at_wastewater_treatment_facilities_market_analysis_and_lessons_from_the_field.pdf

Gardoni, D., Ficara, E., Fornarelli, R., Parolini, M., Canziani, R., 2011. Long-term effects of the ozonation of the sludge recycling stream on excess sludge reduction and biomass activity at full-scale. *Water Sci. Technol.* 63 (9), 2032-2038. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.456>.

Romero, P., Coello, M., Aragon, C., Battistoni, P., Eusebi, A., 2015. Sludge reduction through ozonation: effects of different specific dosages and operative management aspects in a full-scale study. *J. Environ. Eng.* 141 (12), 04015043 [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001006](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001006).

He, M., Wei, C., 2010. Performance of membrane bioreactor (MBR) system with sludge Fenton oxidation process for minimization of excess sludge production. *J. Hazard Mater.* 176 (1-3), 597-601. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.071>

Jing, G., Luan, M., Du, W., Han, C., 2012. Treatment of oily sludge by advanced oxidation process. *Environ. Earth Sci.* 67 (8), 2217-2221. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1662-7>.

Urrea, J.L., Sergio, C., Laca, A., Diaz, M., 2014. Wet oxidation of activated sludge: transformations and mechanisms. *J. Environ. Manag.* 146, 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.043>

Pijuan, M., Wang, Q., Ye, L., Yuan, Z., 2012. Improving secondary sludge biodegradability using free nitrous acid treatment. *Bioresour. Technol.* 116, 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.016>

Wang, Q., Ye, L., Jiang, G., Yuan, Z., 2013. A free nitrous acid (FNA) - based technology for reducing sludge production. *Water Res.* 47 (11), 3663-3672. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.04.016>.

He, J., Wan, T., Zhang, G., Yang, J., 2011. Ultrasonic reduction of excess sludge from activated sludge system: energy efficiency improvement via operation optimization. *Ultrason. Sonochem.* 18 (1), 99-103. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.03.006>

Mohammadi, A., Mehrdadi, N., Bidhendi, G., Torabian, A., 2011. Excess sludge reduction using ultrasonic waves in biological wastewater treatment. *Desalination* 275 (1-3), 67-73. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.02.030>

Heinz, 2007. Scaling up of electrical route. In: Ginestet, P. (Ed.), *Comparative Evaluation of Sludge Reduction Routes*. IWA Publishing, London, UK.

Guo, X., Yang, J., Liang, Y., Liu, J., Xiao, B., 2014. Evaluation of sludge reduction by an environmentally friendly chemical uncoupler in a pilot-scale anaerobic/anoxic/oxic process. *Bioproc. Biosyst. Eng.* 37 (3), 553-560. <https://doi.org/10.1007/s00449-013-1022-3>

Zuriaga-Agustí, E., Mendoza-Roca, J.A., Bes-Pia, A., Alonso-Molina, J.L., Amoros-Munoz, I., 2016. Sludge reduction by uncoupling metabolism: SBR tests with Para-nitrophenol and a commercial uncoupler. *J. Environ. Manag.* 182, 406-411. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.100>.

Semblante, G.U., Hai, F.I., Ngo, H.H., Guo, W., You, S.J., Price, W.E., Nghiem, L.D., 2014. Sludge cycling between aerobic, anoxic and anaerobic regimes to reduce sludge production during wastewater treatment: performance, mechanisms, and implications. *Bioresour. Technol.* 155, 395-409. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.029>.

Khursheed, A., Kazmi, A.A., 2011. Retrospective of ecological approaches to excess sludge reduction. *Water Res.* 45, 4287-4310. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.05.018>.

Zhang, X., Tian, Y., Wang, Q., Lin, H., 2013. Waste sludge reduction using *Limnodrilus hoffmeisteri*: growth, development and sludge predation potential of aquatic worm correlate with process conditions. *Ecol. Eng.* 58, 406-413. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.003>.

- Di Iaconi, C., De Sanctis, M., Rossetti, S., Ramadori, R., 2010. SBBGR technology for minimising excess sludge production in biological processes. *Water Res.* 44 (6), 1825-1832. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.007>
- Lotito, A.M., Di Iaconi, C., Lotito, V., 2012. Physical characterisation of the sludge produced in a sequencing batch biofilter granular reactor. *Water Res.* 46 (16), 5316-5326. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.06.053>.
- Donoso-Bravo, A., Perez-Elvira, S.I., Fdz-Polanco, F., 2010. Application of simplified models for anaerobic biodegradability tests. Evaluation of pre-treatment processes. *Chem. Eng. J.* 160 (2), 607-614. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.03.082>
- Martinez-Guerra, E., Gude, V., 2015. Continuous and pulse sonication effects on transesterification of used vegetable oil. *Energy Convers. Manag.* 96, 268-276. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.073>
- Perez-Elvira, S., Fdz-Polanco, F., 2012. Continuous thermal hydrolysis and anaerobic digestion of sludge. Energy integration study. *Water Sci. Technol.* 65 (10), 1839-1846. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.863>
- Abelleira-Peraira, J., Perez-Elvira, S., Sanchez-Oneto, J., Cruz, R., Portela, J., Nebot, E., 2015. Enhancement of methane production in mesophilic anaerobic digestion of secondary sewage sludge by advanced thermal hydrolysis pretreatment. *Water Res.* 71, 330-340. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.027>
- Erden, G., Filibeli, A., 2011. Ozone oxidation of biological sludge: effects on disintegration, anaerobic biodegradability, and filterability. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 30 (3), 377-383. <https://doi.org/10.1002/ep.10494>.
- Silvestre, G., Ruiz, B., Fiter, M., Ferrer, C., Berlanga, J.G., Alonso, S., Canut, A., 2014. Ozonation as a pre-treatment for anaerobic digestion of waste-activated sludge: effect of the ozone doses. *Ozone: Sci. Eng.* 37 (4), 316-322. <https://doi.org/10.1080/01919512.2014.985817>
- Uma Rani, R., Adish Kumar, S., Kaliappan, S., Yeom, I., Rajesh Banu, J., 2013. Impacts of microwave pretreatments on the semi-continuous anaerobic digestion of dairy waste activated sludge. *Waste Manag.* 33 (5), 1119-1127. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.016>.
- Yeneneh, A., Kayaalp, A., Sen, T., Ang, H., 2015. Effect of microwave and combined microwave-ultrasonic pretreatment on anaerobic digestion of mixed real sludge. *J. Environ. Chem. Eng.* 3 (4), 2514-2521. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.09.003>.
- Lee, I.S., Parameswaran, P., Alder, J.M., Rittmann, B.E., 2010. Feasibility of focused- pulsed treated waste activated sludge as a supplemental electron donor for denitrification. *Water Environ. Res.* 82 (12) <https://doi.org/10.2175/106143010x126097369672>, 2316-232.
- Wang, Q., Wei, W., Gong, Y., Yu, Q., Li, Q., Sun, J., Yuan, Z., 2017. Technologies for reducing sludge production in wastewater treatment plants: state of the art. *Sci. Total Environ.* 587-588, 510e521. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.203>.
- Zhang, S., Zhang, P., Zhang, G., Fan, J., Zhang, Y., 2012. Enhancement of anaerobic sludge digestion by high-pressure homogenization. *Bioresour. Technol.* 118, 496-501. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.089>.
- Zhang, D., Chen, Y., Zhao, Y., Zhu, X., 2010. New sludge pretreatment method to improve methane production in waste activated sludge digestion. *Environ. Sci. Technol.* 44 (12), 4802-4808. <https://doi.org/10.1021/es1000209>.

- Zahedi, S., Icaran, P., Yuan, Z., Pijuan, M., 2016. Assessment of free nitrous acid pretreatment on a mixture of primary sludge and waste activated sludge: effect of exposure time and concentration. *Bioresour. Technol.* 216, 870-875. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.038>.
- Bolzonella, D., Cavinato, C., Fatone, F., Pavan, P., Cecchi, F., 2012. High rate meso-philic, thermophilic, and temperature phased anaerobic digestion of waste activated sludge: a pilot scale study. *Waste Manag.* 32 (6), 1196-1201. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.006>.
- Choi, J.-M., Han, S.-K., Lee, C.-Y., 2018. Enhancement of methane production in anaerobic digestion of sewage sludge by thermal hydrolysis pretreatment. *Bioresour. Technol.* 259, 207-213.
- Kleemann, R., Chenoweth, J., Clift, R., Morse, S., Pearce, P., Saroj, D., 2015. Evaluation of local and national effects of recovering phosphorus at wastewater treatment plants: lessons learned from the UK. *Resour. Conserv. Recycl.* 105, 347-359. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.007>.
- Zhou, K., Barjenbruch, M., Kabbe, C., Inial, G., Remy, C., 2016. Phosphorus recovery from municipal and fertilizer wastewater: China's potential and perspective. *J. Environ. Sci.* 52, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.04.010>.
- Kumar, R., Pal, P., 2013. Turning hazardous waste into value-added products: production and characterization of struvite from ammoniacal waste with new approaches. *J. Clean. Prod.* 43, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.001>.
- Guadie, A., Xia, S., Jiang, W., Zhou, L., Zhang, Z., Hermanowicz, S.W., Xu, X., Shen, S., 2014. Enhanced struvite recovery from wastewater using a novel cone-inserted fluidized bed reactor. *J. Environ. Sci.* 26 (4), 765-774. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(13\)60469-6](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(13)60469-6).
- Le Corre, K.S., Valsami-Jone, E., Hobbs, P., Parsons, S.A., 2007. Impact of reactor operation on success of struvite precipitation from synthetic liquors. *Environ. Technol.* 28 (11), 1245-1256. <https://doi.org/10.1080/09593332808618885>.
- Bhuiyan, M.H.I., Mavinic, D.S., Koch, F.A., 2008. Thermal decomposition of struvite and its phase transition. *Chemosphere* 70 (8), 1347-1356. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.09.056>.
- Pastor, L., Mangin, D., Barat, R., Seco, A., 2008. A pilot-scale study of struvite precipitation in a stirred tank reactor: conditions influencing the process. *Bioresour. Technol.* 99 (14), 6285-6291. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.003>
- Crutchik, D., Frison, N., Eusebi, A.L., Fatone, F., 2018. Biorefinery of cellulosic primary sludge towards targeted Short Chain Fatty Acids, phosphorus and methane recovery. *Water Res.* 136, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.047>
- Ye, Y., Ngo, H.H., Guo, W., Liu, Y., Li, J., Liu, Y., Zhang, X., Jia, H., 2017. Insight into chemical phosphate recovery from municipal wastewater. *Sci. Total Environ.* 576, 159-171. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.078>
- Cokgor, E.U., Oktay, S., Tas, D.O., Zengin, G.E., Orhon, D., 2009. Influence of pH and temperature on soluble substrate generation with primary sludge fermentation. *Bioresour. Technol.* 100 (1), 380-386. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.025>.
- Xie, C., Zhao, J., Tang, J., Xu, J., Lin, X., Xu, X., 2011. The phosphorus fractions and alkaline phosphatase activities in sludge. *Bioresour. Technol.* 102 (3), 2455-2461. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.011>.

Vyrides, I., Anayiotou, E., Bankovic, P., De Schepper, W., Dominguez-Benetton, X., 2017. Metal recovery from sludge: problem or opportunity. In: Impacts on Energy, Economy and Environment. IWA Publishing, pp. 355-367.

Saveyn, H., Ferrasse, J.H., Hernandez, A.B., Rose, J., Meeren, P.V., Roche, N., 2010. The Distribution of heavy metals following sewage sludge gasification. In: 2nd European Conference on Sludge Management ECSM.

Lin, Q.H., Cheng, H., Chen, G.Y., 2012. Preparation and characterization of carbonaceous adsorbents from sewage sludge using a pilot-scale microwave heating equipment. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 93, 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.10.006>.

Smith, K.M., Fowler, G.D., Pullket, S., Graham, N.J.D., 2009. Sewage sludge-based adsorbents: a review of their production, properties and use in water treatment applications. *Water Res.* 43 (10), 2569-2594. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.02.038>.

Xu, G., Yang, X., Spinosa, L., 2015. Development of sludge-based adsorbents: preparation, characterization, utilization and its feasibility assessment. *J. Environ. Manag.* 151, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.001>.

Mo, J., Yang, Q., Zhang, N., Zhang, W., Zheng, Y., Zhang, Z., 2018. A review on agroindustrial waste (AIW) derived adsorbents for water and wastewater treatment. *J. Environ. Manag.* 227, 395-405.

Alvarez, J., Amutio, M., Lopez, G., Barbarias, I., Bilbao, J., Olazar, M., 2015. Sewage sludge valorization by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Chem. Eng. J.* 273, 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.047>.

Alvarez, J., Lopez, G., Amutio, M., Bilbao, J., Olazar, M., 2016. Preparation of adsorbents from sewage sludge pyrolytic char by carbon dioxide activation. *Process Saf. Environ.* 103, 76-86. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.035>.

Cheng, F., Luo, H., Hu, L., Yu, B., Luo, Z., Fidalgo de Cortalezzi, M., 2016. Sludge carbonization and activation: From hazardous waste to functional materials for water treatment. *J. Environ. Chem. Eng.* 4 (4), 4574-4586. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.013>.

Wang, H., Brown, S.L., Magesan, G.N., Slade, A.H., Quintern, M., Clinton, P.W., Payn, T.W., 2008. Technological options for the management of biosolids. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 15, 308-317. <https://doi.org/10.1007/s11356-008-0012-5>.

Kalogo, Y., Monteith, H., 2008. State of science report: energy and resource recovery from sludge. In: Global Water Research Coalition. Water Environment Research Foundation, Alexandria, VA, p. 238.

Paris, J.M., Roessler, J.G., Ferraro, C.C., DeFord, H.D., Townsend, T.G., 2016. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *J. Clean. Prod.* 121, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>

Tantawy, M.A., El-Roudi, A.M., Abdalla, E.M., Abdelzaher, M.A., 2012. Evaluation of the pozzolanic activity of sewage sludge ash. *ISRN Chem. Eng.* 2012, 1-8. <https://doi.org/10.5402/2012/487037>

Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K., Wzorek, Z., 2015. The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *J. Clean. Prod.* 95, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.051>.

Balasubramanian, S., Tyagi, R.D., 2017. Value-added bio-products from sewage sludge. In: Wong, J.W.C., Tyagi, R.D., Pandey, A. (Eds.), *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering- Solid Waste Management*. Elsevier, pp. 27-42.

Frison, N., Katsou, E., Malamis, S., Oehmen, A., Fatone, F., 2015. Development of a novel process integrating the treatment of sludge reject water and the production of polyhydroxyalkanoates (PHAs). *Environ. Sci. Technol.* 49 (18), 10877-10885. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01776>.

Chen, Y., Jiang, S., Yuan, H., Zhou, Q., Gu, G., 2007. Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs. *Water Res.* 41 (3), 683-689. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.030>

Xiao, K., Chen, Y., Jiang, X., Seow, W.Y., He, C., Yin, Y., Zhou, Y., 2017. Comparison of different treatment methods for protein solubilisation from waste activated sludge. *Water Res.* 122, 492-502. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.024>.

Guanghui, Y.U., Pinjing, E.H., Liming, S.H.A.O., Yishu, Z.H.U., 2009. Enzyme extraction by ultrasound from sludge flocs. *J. Environ. Sci.* 21 (2), 204-210. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(08\)62252-4](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(08)62252-4).

Nabarlatz, D., Vondrysova, J., Jenicek, P., Stüber, F., Font, J., Fortuny, A., Fabregat, A., Bengoa, C., 2010. Hydrolytic enzymes in activated sludge: extraction of protease and lipase by stirring and ultrasonication. *Ultrason. Sonochem.* 17 (5), 923-931. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.02.006>.

Puchongkawarin, C., Gomez-Mont, C., Stuckey, D.C., Chachuat, B., 2015. Optimization-based methodology for the development of wastewater facilities for energy and nutrient recovery. *Chemosphere* 140, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.08.061>.

World Economic Forum, *The Future of Industrial Biorefineries*, WEF: Geneva (2010), https://www.iwbio.de/fileadmin/Publikationen/IWBio-Publikationen/WEF_Biorefineries_Report_2010.pdf

Smolarski, N., *High-Value Opportunities for Lignin: Unlocking its Potential*, Frost & Sullivan (2012), <https://www.greenmaterials.fr/wp-content/uploads/2013/01/High-value-Opportunities-for-Lignin-Unlocking-its-Potential-Market-Insights.pdf>

Ruiken, C.J., Breuer, G., Klaversma, E., Santiago, T., van Loosdrecht, M.C.M., 2013. Sieving wastewater - cellulose recovery, economic and energy evaluation. *Water Res.* 47 (1), 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.08.023>

Frison, N., Katsou, E., Malamis, S., Oehmen, A., Fatone, F., 2015. Development of a novel process integrating the treatment of sludge reject water and the production of polyhydroxyalkanoates (PHAs). *Environ. Sci. Technol.* 49 (18), 10877-10885. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01776>.

Malamis, S., Katsou, E., Di Fabio, S., Bolzonella, D., Fatone, F., 2014. Biological nutrients removal from the supernatant originating from the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste. *Crit. Rev. Biotechnol.* 34 (3), 244-257. <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.791246>.

Hellinga, C., Schellen, A.A.J.C., Mulder, J.W., van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J., 1998. The Sharon process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water. *Water Sci. Technol.* 37 (9) [https://doi.org/10.1016/s0273-1223\(98\)00281-9](https://doi.org/10.1016/s0273-1223(98)00281-9)

Malpei, F., Ficara, E., Canziani, R., 2008. Nitrogen removal from digestate: conventional and advanced technologies. In: Adani, F., Schievano, A., Boccasile, G. (Eds.), *Anaerobic Digestion: Opportunities for Agriculture and Environment*. University of Milan, Milan, pp. 113-127.

Sivakumar, G., Xu, J., Thompson, R.W., Yang, Y., Randol-Smith, P., Weathers, P.J., 2012. Integrated green algal technology for bioremediation and biofuel. *Bioresour. Technol.* 107, 1–9.

Abinandan, S., Shanthakumar, S., 2015. Challenges and opportunities in application of microalgae (Chlorophyta) for wastewater treatment: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52, 123–132.

Wang, L., Li, Y., Chen, P., Min, M., Chen, Y., Zhu, J., Ruan, R.R., 2010. Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp. *Bioresour. Technol.* 101 (8), 2623–2628.

Uggetti, E., Sialve, B., Latrille, E., Steyer, J.P., 2014. Anaerobic digestate as substrate for microalgae culture: the role of ammonium concentration on the microalgae productivity. *Bioresour. Technol.* 152, 437–443.

Becker, E.W., 2007. Micro-algae as a source of protein. *Biotechnol. Adv.* 25 (2), 207–210.

Yaakob, Z., Ali, E., Zainal, A., Mohamad, M., Takriff, M.S., 2014. An overview: biomolecules from microalgae for animal feed and aquaculture. *J. Biol. Res. Thessaloniki* 21 (1), 6.

Stiles, W. A. V., Styles, D., Chapman, S. P., Esteves, S., Bywater, A., Melville, L., ... Llewellyn, C. A. (2018). Using microalgae in the circular economy to valorise anaerobic digestate: challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 267(June), 732–742. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.100>

Singh, R., Parihar, P., Singh, M., Bajguz, A., Kumar, J., Singh, S., Singh, V.P., Prasad, S.M., 2017. Uncovering potential applications of cyanobacteria and algal metabolites in biology, agriculture and medicine: current status and future prospects. *Fronti. Microbiol.* 8, 515.

Sharma, R., Khokhar, M.K., Jat, R.L., Khandelwal, S.K., 2012. Role of algae and cyanobacteria in sustainable agriculture system. *Wudpecker J. Agric. Res* 1, 381–388.

Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., Isambert, A., 2006. Commercial applications of microalgae. *J. Biosci. Bioeng.* 101, 87–96.

Zhou, W., Li, Y., Gao, Y., Zhao, H., 2017. Nutrients removal and recovery from saline wastewater by *Spirulina platensis*. *Bioresour. Technol.* 245, 10–17.

Leema, J.T., Kirubakaran, R., Vinithkumar, N.V., Dheenan, P.S., Karthikayulu, S., 2010. High value pigment production from *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* cultures in seawater. *Bioresour. Technol.* 101, 9221–9227.

Zeller, M.A., Hunt, R., Jones, A., Sharma, S., 2013. Bioplastics and their thermoplastic blends from *Spirulina* and *Chlorella* microalgae. *J. Appl. Polym. Sci.* 130, 3263–3275.

Shirazi, H.M., Karimi-Sabet, J., Ghotbi, C., 2017. Biodiesel production from *Spirulina* microalgae feedstock using direct transesterification near supercritical methanol condition. *Bioresour. Technol.* 239, 378–386.

Jiang, L., Pei, H., Hu, W., Ji, Y., Han, L., Ma, G., 2015. The feasibility of using complex wastewater from a monosodium glutamate factory to cultivate *Spirulina subsalsa* and accumulate biochemical composition. *Bioresour. Technol.* 180, 304–310.

Deschoenmaeker, F., Bayon-Vicente, G., Sachdeva, N., Depraetere, O., Pino, J.C.C., Leroy, B., Muylaert, K., Wattiez, R., 2017. Impact of different nitrogen sources on the growth of *Arthrospira* sp. PCC 8005 under batch and continuous cultivation - a biochemical, transcriptomic and proteomic profile. *Bioresour. Technol.* 237, 78–88.

Farges, B., Poughon, L., Creuly, C., Cornet, J.F., Dussap, C.G., Lasseur, C., 2008. Dynamic aspects and controllability of the MELiSSA project: a bioregenerative system to provide life support in space. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 151, 686–699.

Rittstieg, K., Robra, K.H., Somitsch, W., 2001. Aerobic treatment of a concentrate urea wastewater with simultaneous stripping of ammonia. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 56, 820–825.

Russo, A. (2018). Innovation and circular economy in water sector: The CAP group. *The Italian Water Industry: Cases of Excellence*, 215–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71336-6_15

Biopolus, 2018. Metabolic Networks Reactors. <http://www.biopolus.net/technology/>

Regencia LLC, 2019. The Integrated Utility Hub. <http://www.regencia.com/iuh/>

Vymazal, J., Brezinova, T., 2015. The use of constructed wetlands for removal of pesticides from agricultural runoff and drainage: a review. *Environ. Int.* 75, 11-20.

Adyel, T.M., Oldham, C.E., Hipsey, M.R., 2016. Stormwater nutrient attenuation in a constructed wetland with alternating surface and subsurface flow pathways: event to annual dynamics. *Water Res.* 107, 66-82.

Masi, F., Bresciani, R., Rizzo, A., Conte, G., 2017. Constructed wetlands for combined sewer overflow treatment: ecosystem services at Gorla Maggiore, Italy. *Ecol. Eng.* 98, 427-438.

Vymazal, J., 2014. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review. *Ecol. Eng.* 73, 724-751.

Masi, F., El Hamouri, B., Abdel Shafi, H., Baban, A., Ghrabi, A., Regelsberger, M., 2010. Segregated black/grey domestic wastewater treatment by Constructed Wetlands in the Mediterranean basin: the Zer0-m experience. *Water Sci. Technol.* 61 (1), 97-105. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.780>.

Masi, F., Bresciani, R., Rizzo, A., Edathoot, A., Patwardhan, N., Panse, D., Langergraber, G., 2016. Green walls for greywater treatment and recycling in dense urban areas: a case-study in Pune. *J. Water Sanit. Hyg. Dev.* 6 (2), 342-347. <https://doi.org/10.2166/washdev.2016.019>.

Nolde, E., 2007. Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. *Desalination* 215, 1-11.

Matamoros, V., Rodríguez, Y., Albaiges, J., 2016. A comparative assessment of intensive and extensive wastewater treatment technologies for removing emerging contaminants in small communities. *Water Res.* 1 (88), 777-785. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.058>.

Verlicchi, P., Zambello, E., 2014. How efficient are constructed wetlands in removing pharmaceuticals from untreated and treated urban wastewaters? A review. *Sci. Total Environ.* 470-471, 1281-1306.

Ayaz, S.Ç., 2008. Post-treatment and reuse of tertiary treated wastewater by constructed wetlands. *Desalination* 226 (1-3), 249-255.

Rousseau, D.P.L., Lesage, E., Story, A., Vanrolleghem, P.A., De Pauw, N., 2008. Constructed wetlands for water reclamation. *Desalination* 218 (1-3), 181-189.

Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.L., Mikkelsen, P.S., 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more. The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water J.* 12 (7), 525-542.

Eawag, 2019. Department Urban Water Management, Überlandstrasse 133, CH-8600 Dübendorf. <https://www.eawag.ch/en/department/sww/projects/wbe/>

Massachusetts Institute of Technology, 2019, Project Underworlds. <http://underworlds.mit.edu/>

Εικόνα 1: Ellen MacArthur Foundation (EMF), 2013a. Towards the Circular Economy, vol. 1 (Isle of Wight).

Εικόνα 2: Εθνικό Κέντρο Τεκμηρίωσης, 2019. Κυκλική Οικονομία: Ένα νέο οικονομικό μοντέλο βιώσιμης ανάπτυξης. Περιοδικό «Καινοτομία, Έρευνα και Τεχνολογία». Αφιέρωμα, Τεύχος 115. <https://www.ekt.gr/el/magazines/features/23377>

Εικόνες 3 – 9: Circular Economy Indicators, 2019. European Commission, Eurostat, Circular economy, Indicators, Monitoring Framework. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/indicators/monitoring-framework>

Εικόνες 10 & 11: Ellen MacArthur Foundation –EMF; Antea Group – Arup, 2018. Water and Circular Economy, White Paper

Εικόνα 12: Voulvoulis, N. (2018). Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2, 32–45. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.005>

Εικόνες 13 & 14: Abu, R., & Solutions, W. (2018). Water reuse in the circular economy. Filtration + Separation, 55(5), 19–21. [https://doi.org/10.1016/s0015-1882\(18\)30329-x](https://doi.org/10.1016/s0015-1882(18)30329-x)

Εικόνες 15 & 16: Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc., 2019: <https://ostara.com/about/>

Εικόνα 17: Biopolus, 2018. Metabolic Networks Reactors. <http://www.biopolus.net/technology/>

Εικόνα 18: Regencia LLC, 2019. The Integrated Utility Hub. <http://www.regencia.com/iuh/>