

Interreg
Ελλάδα-Κύπρος

Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης



T4H



ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ



Τίτλος Πράξης: Επιτόπια Διαχείριση Νοσοκομειακών Υγρών Αποβλήτων με Στόχο τη Βελτίωση της Απόδοσης των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων και της Αξιοποίησης των Εκροών (Treatment for Hospitals)

Ακρώνυμο: T4H

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ – ΔΙΕΘΝΕΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ
ΝΕΡΟΥ ΝΗΡΕΑΣ: Περιβαλλοντική Αξιολόγηση – 6.4.2**

20/10/2023





ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ



ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ



ΚΥΠΡΙΑΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ



Η Πράξη συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Τ.Π.Α.) και από εθνικούς πόρους της Ελλάδας και της Κύπρου στο πλαίσιο του Προγράμματος Συνεργασίας INTERREG V-A Ελλάδα-Κύπρος 2014-2020



Πανεπιστήμιο Κύπρου

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
και Μηχανικών Περιβάλλοντος



NIWEAS

International Water Research Center

Δικαιούχος 4:

**Πανεπιστήμιο Κύπρου –
Διεθνές Ερευνητικό Κέντρο Νερού
Νηρέας**

Το Διεθνές Ερευνητικό Κέντρο Νερού Νηρέας σε συνεργασία με τον Δρ. Σπύρο Φωτίνη πραγματοποιήσαν την περιβαλλοντική αξιολόγηση της πιλοτικής μονάδας στη Λάρνακα με βάση τα αποτελέσματα: α) Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, β) Ενεργειακού Αποτυπώματος, και γ) Ισοζυγίου Νερού. Αναπτύχθηκε το πλαίσιο αξιολόγησης τεχνολογιών αποκεντρωμένης διαχείρισης που περιλαμβάνει, τους στόχους, τους τομείς, τα κριτήρια και τους δείκτες αξιολόγησης. Εξετάστηκαν οι δείκτες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και επιλέγηκαν οι επικρατέστεροι οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν στην αξιολόγηση και κάλυψαν τομείς όπως είναι η ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, και η οικονομία. Στο παρόν Παραδοτέο παραγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία υπολογισμού των περιβαλλοντικών δεικτών σύμφωνα με τις μεθόδους εκτίμησης επιπτώσεων LCA (Life Cycle Assessment). Ο κύριος στόχος του παρόντος Παραδοτέου ήταν η εφαρμογή της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής για το σύνολο της πιλοτικής μονάδας μέσω του λογισμικού SimaPro.

Πανεπιστήμιο Κύπρου

20/10/2023

**Περιβαλλοντική αξιολόγηση πιλοτικής μονάδας διαχείρισης
νοσοκομειακών αποβλήτων: Περίπτωση μελέτης του Γενικού
Νοσοκομείου Λάρνακας, Κύπρος**

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	Σκοπός και αντικείμενο (goal and scope)	1
1.1	Εισαγωγή και σκοπός μελέτης	1
1.2	Πιλοτική μονάδα.....	3
1.3	Μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής	5
1.4	Μέθοδος αξιολόγησης επιπτώσεων κύκλου ζωής	6
2	Απογραφή δεδομένων κύκλου ζωής	8
2.1	Αναερόβιος βιοαντιδραστήρας μεμβρανών	8
2.2	Αερόβιος αντιδραστήρας βιοφιλμ κινούμενης κλίνης	12
2.3	Φυτοεξυγίανση με φυτά <i>Lemna minor</i>	14
2.4	Απολύμανση με χρήση προηγμένης οξειδωσης.....	17
3	Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου ζωής	19
3.1	Αναερόβιος βιοαντιδραστήρας μεμβρανών	19
3.1.1	Υποθέσεις σχετικά με τα δεδομένα ανάλυσης κύκλου ζωής	19
3.1.2	Αποτελέσματα στο μέσο σημείο	20
3.1.3	Αποτελέσματα στο τελικό σημείο	23
3.1.4	Ανάλυση ευαισθησίας	25
3.2	Αερόβιος βιοαντιδραστήρας	29
3.2.1	Υποθέσεις σχετικά με τα δεδομένα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	29
3.2.2	Αποτελέσματα στο μέσο σημείο	30
3.2.3	Αποτελέσματα στο τελικό σημείο	32
3.2.4	Ανάλυση ευαισθησίας	34
3.3	Φυτοεξυγίανση με φυτά <i>Lemna minor</i>	37
3.3.1	Υποθέσεις σχετικά με τα δεδομένα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	37
3.3.2	Αποτελέσματα στο μέσο σημείο	37
3.3.3	Αποτελέσματα στο τελικό σημείο	40
3.3.4	Ανάλυση ευαισθησίας	41
3.4	Απολύμανση με χρήση προηγμένης οξειδωσης.....	43
3.4.1	Υποθέσεις σχετικά με τα δεδομένα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.....	43

3.4.2	Αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο	44
3.4.3	Αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο τελικό σημείο	46
3.4.4	Ανάλυση ευαισθησίας	48
3.5	Συνολικό σύστημα.....	48
4	Βιβλιογραφία.....	51

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1:	Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού αποβλήτου, και η συνεισφορά κάθε σταδίου σε κάθε μια από τις εξεταζόμενες κατηγορίες.	22
Διάγραμμα 2:	Τα κανονικοποιημένα (Normalisation) αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού αποβλήτου και η συνεισφορά κάθε σταδίου σε κάθε μια από τις κατηγορίες της μεθόδου.	23
Διάγραμμα 3:	Δενδρόγραμμα των κύριων διεργασιών του AnMBR και η συνεισφορά (%) του κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.	24
Διάγραμμα 4:	Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο τελικό σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού νοσοκομειακού αποβλήτου.	25
Διάγραμμα 5:	Τα αποτελέσματα του ανανεωμένου σεναρίου (χρήση ΑΠΕ) στο μέσο σημείο (μεθόδος ReCiPe) και η συνεισφορά κάθε σταδίου σε κάθε μια από τις κατηγορίες της μεθόδου.	27
Διάγραμμα 6:	Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα του ανανεωμένου σεναρίου (χρήση ΑΠΕ) στο μέσο σημείο (μεθόδος ReCiPe) και η συνεισφορά κάθε σταδίου σε κάθε μια από τις εξεταζόμενες κατηγορίες.	28
Διάγραμμα 7:	Δενδρόγραμμα των κύριων διεργασιών του AnMBR όταν η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από ΑΠΕ (ηλιακή ενέργεια) και η συνεισφορά (%) του κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.	28
Διάγραμμα 8:	Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο τελικό σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού νοσοκομειακού αποβλήτου.	29
Διάγραμμα 9:	Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα της μονάδας MBBR για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού υγρού αποβλήτου.	31
Διάγραμμα 10:	Δενδρόγραμμα των κύριων διεργασιών του MBBR όταν η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από ΑΠΕ (ηλιακή ενέργεια) και η συνεισφορά (%) του κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.	33

Διάγραμμα 11: Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο τελικό σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού αποβλήτου από τον MBBR.....	34
Διάγραμμα 12: α) Τα αποτελέσματα της ReCiPe στο μέσο σημείο (επάνω) και β) τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα (κάτω), όταν χρησιμοποιείται ενέργεια από ΑΠΕ.	35
Διάγραμμα 13: Δενδρόγραμμα με την συμμετοχή κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της MBBR μονάδας όταν χρησιμοποιείτε ενέργεια από ΑΠΕ.....	36
Διάγραμμα 14: Το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της MBBR μονάδας όταν χρησιμοποιείται ενέργεια από ΑΠΕ.	36
Διάγραμμα 15: Τα αποτελέσματα για την φυτοεξυγίανση με φυτά <i>Lemna minor</i> στο μέσο σημείο.	39
Διάγραμμα 16: Τα κανονικοποιημένα αποτελεσματα της μεθόδου ReCiPe για την επεξεργασία ενός m ³ νοσοκομειακού λύματος μεσω φυτοεξυγίανσης με φυτά <i>Lemna minor</i>	39
Διάγραμμα 17: Το δενδρόγραμμα με την συμμετοχή κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της φυτοεξυγίανσης με φυτά <i>Lemna minor</i>	40
Διάγραμμα 18: Τα αποτελέσματα στο τελικό σημείο και το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της φυτοεξυγίανσης με φυτά <i>Lemna minor</i>	41
Διάγραμμα 19: α) Τα αποτελέσματα της ReCiPe στο μέσο σημείο (επάνω) και β) τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα (κάτω), του συστήματος φυτοεξυγίανσης με φυτά <i>Lemna minor</i> όταν χρησιμοποιείται ενέργεια από ΑΠΕ.	42
Διάγραμμα 20: Το δενδρόγραμμα με τα κύρια στάδια και την συμμετοχή τους στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της φάσης φυτοεξυγίανσης με φυτά <i>Lemna minor</i> όταν χρησιμοποιείτε ενέργεια από ΑΠΕ.	43
Διάγραμμα 21: Τα αποτελέσματα στο τελικό σημείο της φάσης φυτοεξυγίανσης με φυτά <i>Lemna minor</i> όταν χρησιμοποιείτε ενέργεια από ΑΠΕ.....	43
Διάγραμμα 22: Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο για την απολύμανση 1 m ³ λύματος με χρήση προηγμένης οξειδωσης.	45
Διάγραμμα 23: Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο για την απολύμανση 1 m ³ λύματος με χρήση προηγμένης οξειδωσης.	46
Διάγραμμα 24: Το δενδρόγραμμα με την συμμετοχή κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της απολύμανσης με χρήση προηγμένης οξειδωσης.....	47
Διάγραμμα 25: Τα αποτελέσματα στο τελικό σημείο και το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της χρήση προηγμένης οξειδωσης.	47
Διάγραμμα 26: Τα αποτελέσματα στο μέσο σημείο του συνολικού συστήματος επεξεργασίας.	48
Διάγραμμα 27: Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα στο μέσο σημείο του συνολικού συστήματος επεξεργασίας.	49

Διάγραμμα 28: Το δενδρόγραμμα με την συμμετοχή κάθε φάσης επεξεργασίας στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συνολικού συστήματος επεξεργασίας.	49
Διάγραμμα 29: Το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και η συμμετοχή κάθε φάσης επεξεργασίας στις τρεις κατηγορίες τελικού σημείου της μεθόδου ReCiPe.	50

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Το καινοτόμο σύστημα επεξεργασίας νοσοκομειακών λυμάτων κατά το στάδιο δοκιμαστικής λειτουργίας του στο Γενικό Νοσοκομείο Λάρνακας, Κύπρος.	3
Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση της πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας (πηγή S.K. EUROMARKET LTD).	5
Εικόνα 3: Τα όρια (system boundary) του πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας νοσοκομειακών λυμάτων που ληφθήκαν υπόψη κατά την μοντελοποίηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής του.	6
Εικόνα 4: Οι κατηγορίες/δείκτες επιπτώσεων στο μέσο και τελικό σημείο που χρησιμοποιεί η μέθοδος ReCiPe 2016. Πηγή (Huijbregts et al., 2017).	7

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Διαλυτές μέσες συγκεντρώσεις φυσικοχημικών χαρακτηριστικών πριν και μετά την επεξεργασία των νοσοκομειακών υγρών αποβλήτων από τον αναερόβιο βιοαντιδραστήρα μεμβρανών μαζί με την ποσοστιαία απομάκρυνση που επιτυγχάνεται. Τα δεδομένα προέκυψαν από συνολικά 10 δειγματοληψίες (v=10).	9
Πίνακας 2: Τα κανονικοποιημένα (ανά επεξεργασμένο m ³ λύματος) δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής για τον αναερόβιο βιοαντιδραστήρα μεμβρανών	10
Πίνακας 3: Διαλυτές μέσες συγκεντρώσεις φυσικοχημικών χαρακτηριστικών πριν και μετά την επεξεργασία των νοσοκομειακών υγρών αποβλήτων από τον αερόβιο αντιδραστήρα βιοφίλμ κινούμενης κλίνης μαζί με την ποσοστιαία απομάκρυνση που επιτυγχάνεται. Τα δεδομένα προέκυψαν από συνολικά 10 δειγματοληψίες (v=10).	12
Πίνακας 4: Τα κανονικοποιημένα (ανά επεξεργασμένο m ³ λύματος) δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής για τον αερόβιο αντιδραστήρα βιοφίλμ κινούμενης κλίνης.	13
Πίνακας 5: Μέσες συγκεντρώσεις φυσικοχημικών χαρακτηριστικών πριν και μετά την επεξεργασία των νοσοκομειακών υγρών αποβλήτων μέσω φυτοεξυγίανσης με φυτά <i>Lemna minor</i> μαζί με την ποσοστιαία απομάκρυνση που επιτυγχάνεται. Τα δεδομένα προέκυψαν από εργαστηριακής κλίμακας πειράματα με συνολικά 4 δειγματοληψίες (v=4).	15
Πίνακας 6: Τα κανονικοποιημένα (ανά επεξεργασμένο m ³ λύματος) δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής για την φυτοεξυγίανση με φυτά <i>Lemna minor</i>	16

Πίνακας 7: Μέσες συγκεντρώσεις φυσικοχημικών χαρακτηριστικών πριν και μετά την επεξεργασία των νοσοκομειακών υγρών αποβλήτων μέσω απολύμανσης με υπεριώδη ακτινοβολία σε συνδυασμό με υπεροξείδιο του υδρογόνου μαζί με την ποσοστιαία απομάκρυνση που επιτυγχάνεται. Τα δεδομένα προέκυψαν από συνολικά 10 δειγματοληψίες (v=10).	17
Πίνακας 8: Τα κανονικοποιημένα (ανά επεξεργασμένο m ³ λύματος) δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής της μονάδας απολύμανσης με προηγμένη οξείδωση.	18
Πίνακας 9: Μέσες συγκεντρώσεις φυσικοχημικών χαρακτηριστικών στην είσοδο και έξοδο της πιλοτικής μονάδας μαζί με τη συνολική ποσοστιαία απομάκρυνση που επιτυγχάνεται (v=10).	18
Πίνακας 10: Τα αποτελέσματα της LCIA μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού νοσοκομειακού αποβλήτου.....	21
Πίνακας 11: Τα αποτελέσματα του ανανεωμένου σεναρίου (χρήση ΑΠΕ) της μεθόδου ReCiPe για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού αποβλήτου.	26
Πίνακας 12: Τα αποτελέσματα (characterization και normalization) της ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού λύματος από τον MBBR. 30	
Πίνακας 13: Τα αποτελέσματα (characterization και normalization) της ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού λύματος μέσω φυτοεξυγίανσης με φυτά <i>Lemna minor</i>	38
Πίνακας 14: Τα αποτελέσματα (characterization και normalization) της ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού λύματος μέσω απολύμανσης με χρήση προηγμένης οξείδωσης.	44

1 Σκοπός και αντικείμενο (goal and scope)

1.1 Εισαγωγή και σκοπός μελέτης

Το παρόν Παραδοτέο έχει ως κύριο σκοπό την εξέταση και αξιολόγηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας (environmental sustainability) πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας νοσοκομειακών λυμάτων (υγρά απόβλητα) η οποία βασίζεται σε σειρά καινοτόμων τεχνολογιών (novel treatment technologies in a treatment train). Ως περίπτωση μελέτης, λύματα από το Γενικό Νοσοκομείο Λάρνακας, ήτοι από το μεγαλύτερο νοσηλευτήριο της Επαρχίας Λάρνακας, συλλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν στην πιλοτική μονάδα. Το Γενικό Νοσοκομείο Λάρνακας αποτελεί μέλος του δικτύου νοσοκομείων του Οργανισμού Κρατικών Υπηρεσιών Υγείας (ΟΚΥΠΥ), του μεγαλύτερου οργανισμού στην Κύπρο. Συνεπώς τα νοσοκομειακά λύματα του Γενικού Νοσοκομείου Λάρνακας είναι αντιπροσωπευτικά των λυμάτων του δικτύου νοσοκομείων του ΟΚΥΠΥ, αλλά και νοσοκομειακών λυμάτων χωρών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπως αυτών από το Πανεπιστημιακό Γενικό Νοσοκομείο Ηρακλείου, στην Ελλάδα, αλλά και νοσοκομειακών λυμάτων άλλων χωρών των οποίων οι νοσοκομειακές εγκαταστάσεις και το επίπεδο νοσηλείας βρίσκεται σε παρόμοιο επίπεδο με αυτό του δικτύου Νοσοκομείων του ΟΚΥΠΥ.

Η πιλοτική μονάδα επεξεργασίας λυμάτων χρηματοδοτήθηκε και κατασκευάστηκε στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος «Επιτόπια Διαχείριση Νοσοκομειακών Υγρών Αποβλήτων με Στόχο τη Βελτίωση της Απόδοσης των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων και της Αξιοποίησης των Εκροών» με ακρώνυμο «Treatment for Hospitals» και συντομογραφία «T4H». Το πρόγραμμα T4H συγχρηματοδοτείται από το Πρόγραμμα Συνεργασίας Interreg V -A «Ελλάδα-Κύπρος 2014-2020». Κύριος στόχος του T4H είναι η ανάπτυξη αποτελεσματικών και περιβαλλοντικά φιλικών τεχνολογιών επιτόπιας επεξεργασίας υγρών νοσοκομειακών αποβλήτων (λυμάτων), εστιάζοντας τόσο στην απομάκρυνση αναδύομενων ρύπων (emerging contaminants (ECs) or contaminants of emerging concern (CECs)), όπως φαρμακευτικές ουσίες (pharmaceuticals), όσο και του παθογόνου φορτίου όπως ανθεκτικών στα αντιβιοτικά βακτηρίων και γονιδίων που φέρουν ανθεκτικότητας στα αντιβιοτικά (antibiotic resistant bacteria (ARB) και antibiotic resistance genes (ARGs)).

Συγκεκριμένα, τόσο το νοσοκομείο της Λάρνακας όσο και οι νοσοκομειακές μονάδες, εν γένει, παράγουν, από τη φύση τους, υγρά απόβλητα τα οποία περιέχουν σημαντικές ποσότητες φαρμακευτικών ουσιών, παθογόνων μικροοργανισμών, αλλά και βακτηρίων ανθεκτικών στις αντιβιοτικές ενώσεις και γονιδίων που φέρουν ανθεκτικότητα σε αυτές. Τυπικά, τα νοσοκομειακά υγρά απόβλητα καταλήγουν στα κεντρικά αποχετευτικά συστήματα, με μη επαρκή προεπεξεργασία (pretreatment) ή σε αρκετές περιπτώσεις χωρίς καμία επεξεργασία,

και στη συνέχεια αυτά καταλήγουν σε Σταθμούς Επεξεργασίας Λυμάτων (ΣΕΛ). Ως αποτέλεσμα, το ρυπογόνο φορτίο των αστικών λυμάτων που οι ΣΕΛ καλούνται να επεξεργαστούν εμπλουτίζεται με αυτές τις δύσκολα απομακρυνόμενες και επικίνδυνες ουσίες και μικροοργανισμούς (ARBs/ARGs και CECs). Αυτό οδηγεί στη μη βέλτιστη επεξεργασία του συνόλου των λυμάτων που καταλήγουν σε ΣΕΛ.

Το γεγονός αυτό επηρεάζει σημαντικά τόσο την εύρυθμη λειτουργία των ΣΕΛ, στις οποίες καταλήγουν τα νοσοκομειακά λύματα, αλλά κυρίως το περιβάλλον στο οποίο τελικά καταλήγουν τα επεξεργασμένα λύματα από τις ΣΕΛ, καθώς το παθογόνο φορτίο και κυρίως οι αναδυόμενοι ρύποι (CECs και ARB/ARGs) ενδέχεται να μην έχουν αποτελεσματικά απομακρυνθεί. Συνεπώς, το παραγόμενο επεξεργασμένο υγρό απόβλητο (treated effluent), το οποίο είτε καταλήγει στο περιβάλλον ή ακόμα και δύναται να επαναχρησιμοποιηθεί, μεταξύ άλλων για άρδευση, περιέχει φορτίο συγκεντρώσεων φαρμακευτικών ουσιών, μικροοργανισμών και γονιδίων ανθεκτικών στις αντιβιοτικές ενώσεις. Αυτή η πρακτική προκαλεί σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα και για το λόγο αυτό επιβάλλεται η αποτελεσματική απομάκρυνση των αναδυόμενων ρύπων, και του σημαντικά υψηλού παθογόνου φορτίου στην πηγή, ήτοι εντός των νοσοκομείων (σημείο παραγωγής) ή πριν αυτά καταλήξουν στα αποχετευτικά δίκτυα.

Η βιβλιογραφία σχετικά με τις επιπτώσεις των αναδυόμενων ρύπων στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία είναι εκτενής και αυξάνεται σημαντικά όσο αυξάνεται και η γνώση σχετικά με τα CECs και ARB/ARGs. Για τον λόγο αυτό, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), έχει προχωρήσει ήδη πριν από τρεις δεκαετίες, μέσω της οδηγίας 2000/60/ΕΚ, στην «προοδευτική μείωση της ρύπανσης από τις **ουσίες προτεραιότητας** και την παύση ή τη σταδιακή εξάλειψη των εκπομπών, των απορρίψεων και των διαρροών επικινδύνων **ουσιών προτεραιότητας**», ενώ με την Απόφαση αριθ. 2455/2001/ΕΚ ορίστηκε ο πρώτος κατάλογος τριάντα τριών (33) ουσιών ή ομάδων ουσιών στις οποίες και δόθηκε προτεραιότητα για δράση σε κοινοτική κλίμακα. Κατόπιν, με την Οδηγία 2013/39/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 12ης Αυγούστου 2013, η οποία τροποποίησε τις Οδηγίες 2000/60/ΕΚ και 2008/105/ΕΚ εισήχθησαν επιπλέον 12 ουσίες προτεραιότητας στον υπάρχοντα κατάλογο, ενώ η ουσιώδης σημασία απομάκρυνσης των ουσιών προτεραιότητας από τα ύδατα και το πόσιμο νερό ισχυροποιήθηκε με την οδηγία 2020/2184. Συνεπώς, το πρόγραμμα T4H είναι εναρμονισμένο με τις επιταγές της ΕΕ και του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την προστασία των υδάτων από ουσίες προτεραιότητας, καθώς μετά την επεξεργασία τους από την πιλοτική μονάδα, τα νοσοκομειακά λύματα δεν θα εμπεριέχουν υψηλό φορτίο αναδυόμενων ρύπων και παθογόνων μικροοργανισμών.

Βεβαίως, καθώς η επεξεργασία λυμάτων είναι, από την φύση της, μια πολύπλοκη διεργασία υψηλής εντάσεως ενέργειας (energy intensive), ενδέχεται, με την σειρά της, να συσχετίζεται με σειρά περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Συνεπώς, για τον βέλτιστο σχεδιασμό και λειτουργία της εν λόγω πιλοτικής μονάδας απαιτείται να ληφθεί υπόψη και η περιβαλλοντική σκοπιά (environmental perspective). Αυτός είναι ο κύριος σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment - LCA), ήτοι η περιβαλλοντική αξιολόγηση του καινοτόμου συστήματος επεξεργασίας νοσοκομειακών λυμάτων για την επεξεργασία λυμάτων από το νοσοκομείο της Λάρνακας.

1.2 Πιλοτική μονάδα

Όπως προαναφέρθηκε, η πιλοτική μονάδα επεξεργασίας νοσοκομειακών λυμάτων κατασκευάστηκε και βρίσκεται σε δοκιμαστική κλίμακα στις εγκαταστάσεις του Γενικού Νοσοκομείου Λάρνακας. Η μονάδα κάνει χρήση πρωτότυπων και καινοφανών τεχνολογικών επεξεργασίας λυμάτων οι οποίες βρίσκονται σε σειρά (treatment train) και αποτελούνται από:

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| i. Αναερόβια επεξεργασία | iii. Φυτοεξυγίανση |
| ii. Αερόβια επεξεργασία | iv. Οξείδωση |

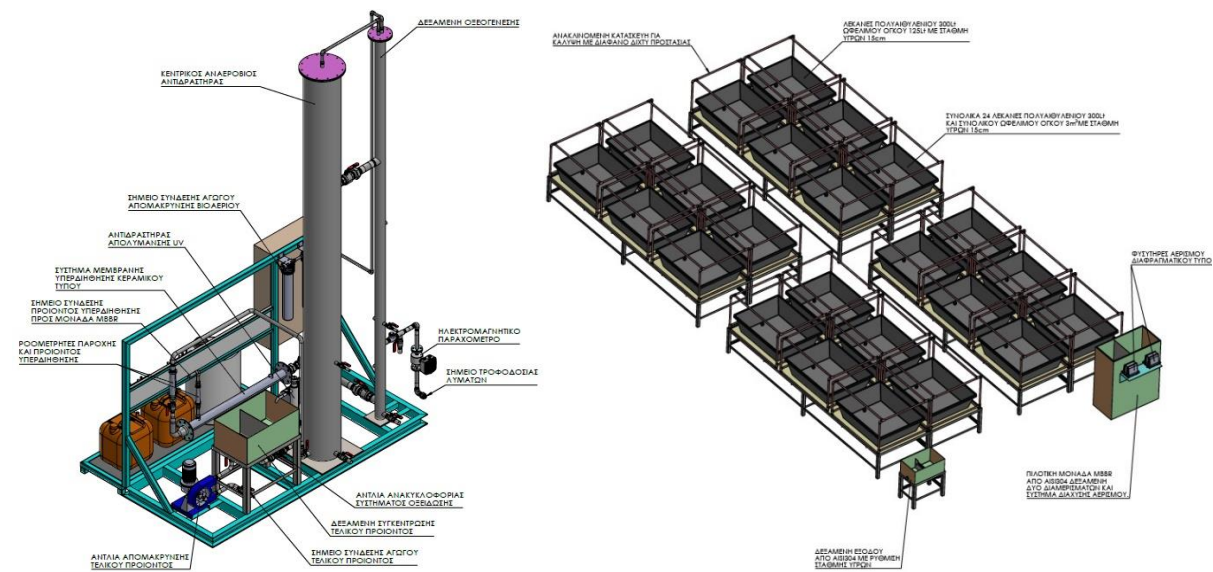
Συγκεκριμένα, η πιλοτική μονάδα αποτελείται από δύο διακριτά μέρη: i) το κομμάτι που έχει εγκατασταθεί στο έδαφος και περιλαμβάνει τον αναερόβιο βιοαντιδραστήρα μεμβρανών (Anaerobic membrane bioreactor, AnMBR) και τη μονάδα απολύμανσης με χρήση προηγμένης οξείδωσης και ii) το κομμάτι που έχει εγκατασταθεί στην οροφή του υφιστάμενου μηχανοστασίου της παλιάς βιολογικής μονάδας και περιλαμβάνει τον αντιδραστήρα κινούμενης κλίνης βιοϋμενίου (Moving Bed Biofilm Reactor, MBBR) και τη μονάδα φυτοεξυγίανσης με υδροχαρή φυτά *Lemna minor* (**Εικόνα 1**).



Εικόνα 1: Το καινοτόμο σύστημα επεξεργασίας νοσοκομειακών λυμάτων κατά το στάδιο δοκιμαστικής λειτουργίας του στο Γενικό Νοσοκομείο Λάρνακας, Κύπρος.

Οι ως άνω μονάδες έχουν ημερήσια δυναμικότητα επεξεργασίας περί τα 0.75-1 m³ νοσοκομειακών λυμάτων και ο κύριος σκοπός της κάθε μιας αναλύεται παρακάτω, ενώ το σύστημα επεξεργασίας παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2**.

- Αρχικά, ο αναερόβιος βιοαντιδραστήρας μεμβρανών (AnMBR), ο οποίος βασίζεται σε μεμβράνη υπερδιήθησης (ultrafiltration, UF), χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των στερεών, του οργανικού φορτίου, των παθογόνων μικροοργανισμών, καθώς και μέρους των αναδυόμενων ρύπων. Στο στάδιο αυτό είναι δυνατή η παραγωγή βιοαερίου, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για θέρμανση ή για παραγωγή ενέργειας και αυτό λήφθηκε υπόψη στην ανάλυση κύκλου ζωής της πιλοτικής μονάδας.
- Κατόπιν, το νοσοκομειακό απόβλητο μεταφέρεται στον αερόβιο αντιδραστήρα κινούμενης κλίνης βιοϋμενίου/βιοφίλμ (MBBR), ο οποίος χωρίζεται σε δυο διαμερίσματα και σε καθένα εκ των οποίων βρίσκονται τοποθετημένοι φυσητήρες αερισμού διαφραγματικού τύπου οι οποίοι παρέχουν φυσαλίδες αέρα για την βιολογική αποδόμηση μέσω πλαστικών φορέων βιοφίλμ (plastic carriers).
- Τα λύματα κατόπιν οδηγούνται στις δεξαμενές που περιέχουν τα υδροχαρή φυτά *Lemna minor*, όπου επιτυγχάνεται η φυτοεξυγίανση τους και βελτιώνεται περαιτέρω η ποιότητα των λυμάτων. Συνεπώς, στο στάδιο αυτό επιτυγχάνεται τόσο η απομάκρυνση οργανικού φορτίου και μέρους από των αναδυόμενων ρύπων, αλλά συγχρόνως παράγεται και σημαντικά ποσότητα βιομάζας (τα ίδια φυτά *Lemna minor*) η οποία μπορεί να συλλεχθεί και χρησιμοποιηθεί π.χ. ως στερεό καύσιμο μετά από κατάλληλη επεξεργασία όπως ξήρανση.
- Στη συνέχεια, τα επεξεργασμένα νοσοκομειακά λύματα μεταφέρονται στη μονάδα απολύμανσης με χρήση προηγμένης οξειδωσης, η οποία βρίσκεται τοποθετημένη στο έδαφος, όπου επιτυγχάνεται η τριτοβάθμια επεξεργασία τους μέσω συνδυασμού υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) με υπεροξειδίο του υδρογόνου (H₂O₂) για την οξείδωση των CECs και ARB/ARGs.



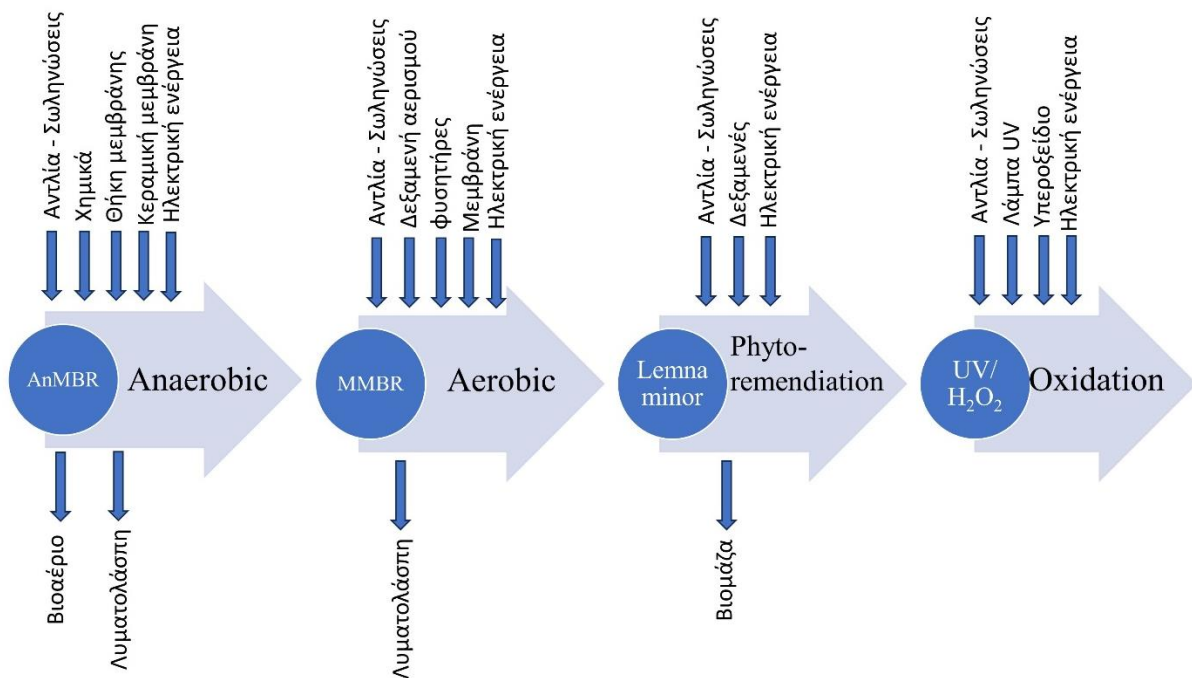
Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση της πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας (πηγή S.K. EUROMARKET LTD).

1.3 Μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής

Για την ποσοτικοποίηση του περιβαλλοντικού προφίλ της πιλοτικής μονάδας χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA). Συγκεκριμένα, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα (environmental sustainability) ολόκληρης της πιλοτικής μονάδας επεξεργασίας νοσοκομειακών λυμάτων μοντελοποιήθηκε κάνοντας χρήση της τελευταίας έκδοσης του λογισμικού προγράμματος SimaPro (έκδοση 9.5). Πραγματικά δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής (life cycle inventory, LCI) συλλέχθηκαν τόσο για το στάδιο κατασκευής όσο και για την λειτουργία της μονάδας. Για την περιβαλλοντική μοντελοποίηση τους χρησιμοποιήθηκαν οι τελευταίες εκδόσεις των διαθέσιμων βιβλιοθηκών δεδομένων κύκλου ζωής (LCI databases), με πρώτη επιλογή τη βιβλιοθήκη δεδομένων ecoinvent 3.9.1. Η χρονική κάλυψη (temporal coverage) αυτής της μελέτης ανάλυσης κύκλου ζωής είναι το παρόν έτος (2023) και η χωρική κάλυψη (spatial coverage) η Κύπρος και περιοχές με παρόμοιες κλιματικές συνθήκες, όπως η Μεσόγειος, και παρόμοιας σύστασης νοσοκομειακά λύματα.

Η τεχνολογική κάλυψη (technological coverage) αφορά στην χρήση σχετικά ώριμων τεχνολογιών (mature technologies), οι περισσότερες εκ των οποίων ήδη χρησιμοποιούνται μεμονωμένα σε βιομηχανικό επίπεδο (industrial scale). Συνεπώς, μέση/τυπική τεχνολογία (mean technology) λήφθηκε υπόψη. Όλες οι κύριες διεργασίες της πιλοτικής μονάδας λήφθηκαν υπόψη κατά την μοντελοποίηση του περιβαλλοντικού της προφίλ, ήτοι βρίσκονται εντός των όριων (system boundary) του υπό εξέταση συστήματος (**Εικόνα 3**). Ως λειτουργική μονάδα (functional unit, FU) χρησιμοποιήθηκε η αποτελεσματική επεξεργασία ενός (1)

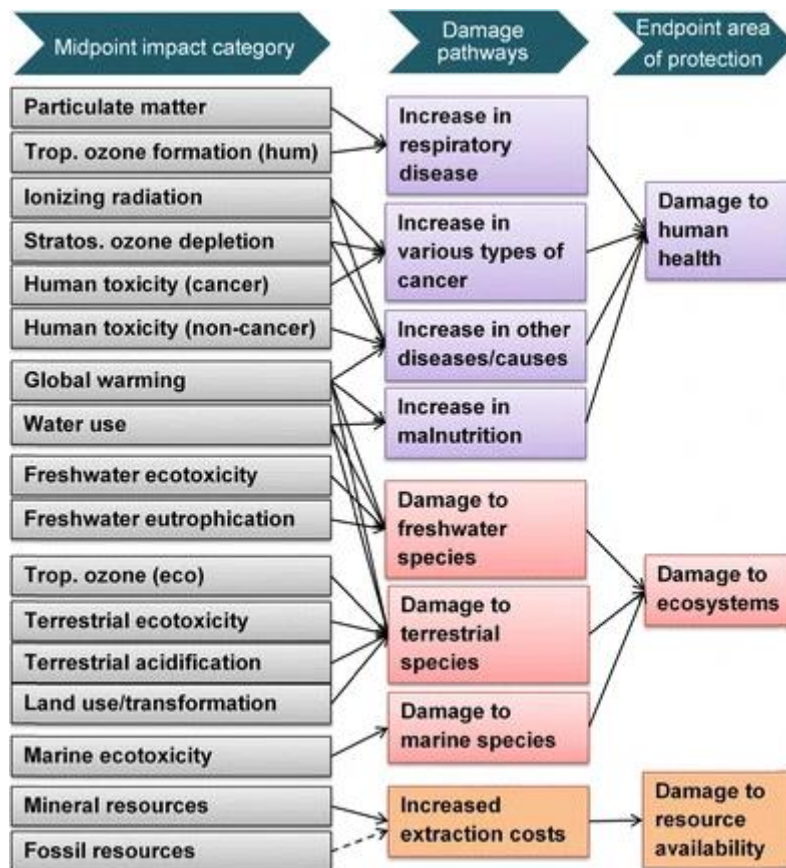
κυβικού μέτρου (m^3) πραγματικού νοσοκομειακού υγρού αποβλήτου. Συνεπώς, όλα τα δεδομένα ανάλυσης κύκλου ζωής κανονικοποιήθηκαν (normalised) ανά λειτουργική μονάδα (FU) και συνοψίζονται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.



Εικόνα 3: Τα όρια (system boundary) του πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας νοσοκομειακών λυμάτων που ληφθήκαν υπόψη κατά την μοντελοποίηση της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής του.

1.4 Μέθοδος αξιολόγησης επιπτώσεων κύκλου ζωής

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής χρησιμοποιήθηκε μια εναρμονισμένη (harmonised) πολυθεματική (multi-issue) μέθοδος αξιολόγησης επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life cycle impact assessment, LCIA), ήτοι η ReCiPe 2016. Η μέθοδος ReCiPe 2016 αποτελεί μετεξέλιξη της ReCiPe 2008, η οποία αποτελούσε συνδυασμό των μεθόδων CML (midpoint) και Eco-Indicator 99 (endpoint). Συνεπώς, η ReCiPe 2016 δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να μοντελοποιήσει την επίπτωση (impact) κάνοντας χρήση κατηγοριών/δεικτών επιπτώσεων στο μέσο σημείο της ανάλυσης κύκλου ζωής (midpoint level) αλλά και την ζημία (damage) στο τελικό σημείο της ανάλυσης κύκλου ζωής (endpoint level) (**Εικόνα 4**). Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η εκτίμηση και ποσοτικοποίηση των άμεσων επιπτώσεων που προκαλούν οι εκπομπές και η χρήση πόρων στο περιβάλλον (midpoint level) όσο και των συνεπειών που επιφέρουν αυτές οι εκπομπές και η χρήση πόρων σε συγκεκριμένες περιοχές προστασίας όπως η ανθρώπινη υγεία, το οικοσύστημα, και η ανθρώπινη ευημερία (endpoint level).



Εικόνα 4: Οι κατηγορίες/δείκτες επιπτώσεων στο μέσο και τελικό σημείο που χρησιμοποιεί η μέθοδος ReCiPe 2016. Πηγή (Huijbregts et al., 2017).

Οι κατηγορίες/δείκτες επιπτώσεων στο μέσο σημείο προσφέρουν μια ενδελεχή, και σχετικά ακριβή, εικόνα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος. Παρ' όλα αυτά, δεν μπορούν να αποτυπώσουν την ολιστική επίπτωση και την ζημία (damage) που αυτές οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις δύναται να επιφέρουν και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οι κατηγορίες/δείκτες επιπτώσεων στο τελικό σημείο. Οι τελευταίοι, αν και συσχετίζονται με σημαντικά υψηλότερη αβεβαιότητα από τις κατηγορίες/δείκτες επιπτώσεων στο μέσο σημείο είναι πιο εύκολο να κατανοηθούν και να κοινοποιούνται στο ευρύ κοινό. Παραδείγματος χάρη, όταν η μοντελοποίηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας κατηγορίες/δείκτες επιπτώσεων στο μέσο σημείο, τότε είναι δυνατός ο υπολογισμός των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (ως ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂e)) του υπό εξέταση συστήματος, τα οποία και καταδεικνύουν την επίπτωση στην υπερθέρμανση του πλανήτη (Global warming) αλλά και άλλων επιπτώσεων όπως του ευτροφισμού και της οικοτοξικότητας. Για να απλοποιηθούν τα αποτελέσματα και να γίνουν κατανοητά στο ευρύ κοινό, οι κατηγορίες/δείκτες επιπτώσεων του μέσο σημείου μπορούν να αθροιστούν και να εκφραστούν σε κατηγορίες/δείκτες επιπτώσεων του τελικού σημείου οι οποίες αφορούν την ζημία σε συγκεκριμένες περιοχές προστασίας. Παραδείγματος χάρη, η επίπτωση στην υπερθέρμανση του πλανήτη, ο ευτροφισμός, η

οικοτοξικότητα, κ.λπ. εκφράζονται σε κοινές μονάδες και αθροίζονται ώστε να υπολογιστή η ζημία που αυτές προκαλούν στην ανθρώπινη υγεία (human health).

2 Απογραφή δεδομένων κύκλου ζωής

Για τη μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής του πιλοτικού συστήματος επεξεργασίας νοσοκομειακών λυμάτων του Γενικού Νοσοκομείου Λάρνακας συλλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν υψηλής ακρίβειας δεδομένα ανάλυσης κύκλου ζωής (LCI data). Για το λόγο αυτό, υπήρξε επικοινωνία με τον ανάδοχο για την κατασκευή της πιλοτικής μονάδας, ήτοι S.K. EUROMARKET LTD, με σκοπό τη συλλογή δεδομένων για τη φάση κατασκευής (construction phase). Για τη φάση λειτουργίας, δεδομένα ανάλυσης κύκλου ζωής συλλέχθηκαν απ' ευθείας κατά τη λειτουργία της μονάδας. Δεδομένα επίσης συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία και από εκτιμήσεις σχετικά με την κατασκευή και λειτουργία της μονάδας. Ως αποτέλεσμα, κάποια προκαταρκτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται σε αυτό το Παραδοτέο. Ως ωφέλιμος χρόνος ζωής της πιλοτικής μονάδας λήφθηκαν τα 25 χρόνια συνεχούς λειτουργίας, και επί 360 ημέρες ανά έτος ώστε να συμπεριληφθούν διακοπές για προγραμματισμένες συντηρήσεις και τυχόν βλάβες. Όλα τα κύρια δεδομένα εισόδου και εξόδου (input and output flows) από και προς το πιλοτικό σύστημα, και κυρίως τα υλικά, εξαρτήματα/μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της πιλοτικής μονάδας και για την λειτουργία της, καταγράφηκαν, σταχυολογήθηκαν, και αναλύονται παρακάτω.

2.1 Αναερόβιος βιοαντιδραστήρας μεμβρανών

Ο Αναερόβιος βιοαντιδραστήρας μεμβρανών (AnMBR) αποτελείται από την δεξαμενή υδρόλυσης/οξεογένεσης και τον κεντρικό αναερόβιο αντιδραστήρα όπου η αναερόβια πέψη (ακετογένεση και μεθανογένεση) λαμβάνει χώρα και τα λύματα μετά διηθούνται από τη μεμβράνη υπερδιήθησης η οποία και βρίσκεται μέσα στον αντιδραστήρα. Μια σχάρα βρίσκεται τοποθετημένη στην είσοδο της δεξαμενής υδρόλυσης/οξεογένεσης για την απομάκρυνση μεγάλων στερέων (εσχαρισμός). Για την περιβαλλοντική μοντελοποίηση του συστήματος, τα δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής (LCI data) για τον αναερόβιο βιοαντιδραστήρα μεμβρανών πρέπει να κανονικοποιηθούν (normalised) ανά λειτουργική μονάδα (FU). Για τον λόγο αυτό μελετήθηκε η λειτουργία της μονάδας για περίπου ένα έτος και οι μέσες, τυπικές, απομακρύνσεις που επιτεύχθηκαν δίνονται στον **Πίνακα 1**.

Πίνακας 1: Διαλυτές μέσες συγκεντρώσεις φυσικοχημικών χαρακτηριστικών πριν και μετά την επεξεργασία των νοσοκομειακών υγρών αποβλήτων από τον αναερόβιο βιοαντιδραστήρα μεμβρανών μαζί με την ποσοστιαία απομάκρυνση που επιτυγχάνεται. Τα δεδομένα προέκυψαν από συνολικά 10 δειγματοληψίες (n=10).

Δείκτης	Εισροή	Εκροή	Απομάκρυνση (%)
pH	7.46	7.53	-
Conductivity (mS/cm)	1.80	1.95	-
COD (mg O ₂ /L)	360.10	337.80	6.19
P (mg PO ₄ ⁻ -P/L)	8.20	8.99	-9.62
N (mg N/L)	76.60	81.50	-6.40
NH ₄ ⁺ (mg NH ₄ ⁺ -N/L)	66.88	73.32	-9.63
TOC (ppm C)	195.26	155.62	20.31

Για την δεξαμενή υδρόλυσης/οξεογένεσης λήφθηκε υπόψη το υλικό (ανοξειδωτο αστάλι) και η κατασκευή της (ηλεκτροσυγκόλληση), όπως επίσης και το υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της αλκαλικότητας. Για τον κεντρικό αναερόβιο αντιδραστήρα ομοίως λήφθηκε υπόψη το υλικό κατασκευής του (ανοξειδωτο αστάλι), η κατασκευή του (ηλεκτροσυγκόλληση), καθώς και η μεμβράνη υπερδιήθησης που περιλαμβάνει. Για τη μεταφορά των δεξαμενών λήφθηκε υπόψη μια μέση απόσταση 50 km, όσο είναι απόσταση από τη Λευκωσία, την πρωτεύουσα της Κυπριακής Δημοκρατίας, έως την πόλη της Λάρνακας, όπου το πιλοτικό σύστημα είναι τοποθετημένο. Ο χρόνος ζωής των δεξαμενών είναι μεγαλύτερος από 25 έτη, συνεπώς δεν απαιτείται η αντικατάστασή τους καθ' όλη την διάρκεια ζωής του πιλοτικού συστήματος. Μετά το τέλος ζωής της πιλοτικής μονάδας οι δεξαμενές θα αποσυναρμολογηθούν και το υλικό τους θα ανακυκλωθεί, με τη μεταφορά του προς το εργοστάσιο ανακύκλωσης να είναι ομοίως σε απόσταση 50 km. Να σημειωθεί πως για τα ανακυκλώσιμα υλικά θεωρήθηκε ότι το 90% της μάζας τους ανακυκλώνεται και το υπόλοιπο 10% αποτίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ).

Όσον αναφορά τη μεμβράνη, αυτή είναι κατασκευασμένη από κεραμικό υλικό και για την περιβαλλοντική μοντελοποίηση της δεδομένα λήφθηκαν από την βιβλιογραφία, καθώς δεν βρέθηκαν σχετικά διαθέσιμα δεδομένα στις υπάρχουσες βιβλιοθήκες δεδομένων κύκλου ζωής (LCI databases) οι οποίες περιλαμβάνονται στο λειτουργικό πρόγραμμα SimaPro. Για την αποτελεσματικότερη λειτουργία της μεμβράνης, και τη μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής της, εφαρμόζεται χημικός καθαρισμός. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται υδροξείδιο του νατρίου (NaOH) για το οποίο μέσες αποστάσεις μεταφοράς για την Ευρώπη λήφθηκαν υπόψη (market processes). Τα νοσοκομειακά λύματα καταλήγουν στη δεξαμενή που στεγάζει την μεμβράνη

μέσω σωληνώσεων από σκληρό πολυβινυλοχλωρίδιο (uPVC), ενώ η μεταφορά τους επιτυγχάνεται μέσω αντλίας τροφοδοσίας. Τόσο οι σωλήνες όσο και η αντλία τροφοδοσίας και οι δοσομετρικές αντλίες (dosing pumps) συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση. Επίσης, η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στο στάδιο αυτό συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση, ενώ η διαχείριση της λυματολάσπης και του παραγόμενου βιοαέριου εξετάστηκαν σε ξεχωριστό σενάριο.

Η λειτουργική μονάδα (FU) που λήφθηκε υπόψη για την συγκεκριμένη μελέτη ανάλυσης κύκλου ζωής είναι η επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου (m^3) νοσοκομειακών λυμάτων. Συνεπώς, τα δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής (LCI data) για τον αναερόβιο βιοαντιδραστήρα μεμβρανών κανονικοποιήθηκαν (normalised) ανά επεξεργασμένο κυβικό μέτρο νοσοκομειακού αποβλήτου, με βάση τις απομακρύνσεις που φαίνονται στον **Πίνακα 2**. Τα κανονικοποιημένα δεδομένα φαίνονται στον (**Πίνακας 2**). Να σημειωθεί πως στο στάδιο αυτό παράγεται βιοαέριο μέσω της αναερόβιας διάσπασης του οργανικού φορτίου που περιέχεται στα νοσοκομειακά λύματα. Το παραγόμενο βιοαέριο συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση, ενώ η αναβάθμιση του και η χρήση του για την παραγωγή ηλεκτρισμού και της εκτόπισης (displacement) ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κυπριακής Δημοκρατίας εξετάστηκε ξεχωριστά.

Πίνακας 2: Τα κανονικοποιημένα (ανά επεξεργασμένο m^3 λύματος) δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής για τον αναερόβιο βιοαντιδραστήρα μεμβρανών

	Τύπος/υλικό	Αριθμός/ Είσοδος	Χρόνος ζωής (έτη)
Σχάρα (coarse)	Ανοξειδωτο ασάλι	5 kg	>25
	Ηλεκτροσυγκόλληση	0,5 m	-
	Οδική μεταφορά	0,25 tkm	-
	Ανακύκλωση	4,5 kg	-
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	0,5 kg	-
Σχάρα (fine)	Ανοξειδωτο ασάλι	4 kg	>25
	Ηλεκτροσυγκόλληση	1 m	-
	Οδική μεταφορά	0,2 tkm	-
	Ανακύκλωση	3,6 kg	-
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	0,4 kg	-
Αντλία τροφοδοσίας	EBARA (3M 32-160/1.5, 1.1 – 2.2 kW, 22 kg)	3 μονάδες	10

Αντλία Ανακυκλοφορίας	EBARA (3M 32-160/1.5, 1.1 – 2.2 kW, 22 kg)	3 μονάδες	10
	Οδική μεταφορά	3,3 tkm	-
Συνολική ηλεκτρική ενέργεια	2.2 kWh	-	-
Σωληνώσεις	UPVC PE	4 kg	>25
	Οδική μεταφορά	0,2 tkm	-
	Ανακύκλωση	3,6 kg	
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	0,4 kg	
Δεξαμενή οξεογένεσης	Ανοξειδωτο ατσάλι	70 kg	25
	Ηλεκτροσυγκόλληση	5 m	-
	Οδική μεταφορά	3,5 tkm	-
	Ανακύκλωση	67,5 kg	
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	7,5 kg	
Δεξαμενή Μεθανογένεσης	Ανοξειδωτο ατσάλι	70 kg	25
	Ηλεκτροσυγκόλληση	5 m	-
	Οδική μεταφορά	3,5 tkm	-
	Ανακύκλωση	67,5 kg	
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	7,5 kg	
	Μεμβράνη υπερδιήθησης (UF)	50 m ²	2
Ρύθμιση αλκαλικότητας	Υδροξείδιο του νατρίου (0.1% NaOH)	0,47 kg/m ³ⁱ	-
Δοσομετρική αντλία	40 W dosing pump	3	10
	Οδική μεταφορά	0,75 tkm	
Βιοαέριο		56,3 L ⁱⁱ	
Εκπομπές λόγω καύσης (flaring) ⁱⁱⁱ	PAH total	8,714 mg/m ³	
	Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂ , biogenic) ⁱⁱⁱ	2,6 kg/m ³	
	Μονοξείδιου του άνθρακα (CO, biogenic)	55,58 mg/m ³	
	Διοξείδιο του θείου (SO ₂)	92,11 mg/m ³	
	Οξείδια του αζώτου (NO _x)	453,3 mg/m ³	

	Ολικά αιωρούμενα σωματίδια	849,03 mg/m ³
	Αιωρούμενα σωματίδια (PM ₁₀)	849,03 mg/m ³
	Αιωρούμενα σωματίδια (PM _{2.5})	849,03 mg/m ³
Λυματολόαση		0,24 kg/m ³ⁱⁱⁱ
	Οδική μεταφορά	0,012
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	0,24 kg

- i. <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00089-5>
ii. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es405553j>
iii. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/national-pollutant-release-inventory/report/tools-calculating-emissions/biogas-flare.html>
iv. <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/mstr-ch3.pdf>

2.2 Αερόβιος αντιδραστήρας βιοφίλμ κινούμενης κλίνης

Το δεύτερο στάδιο επεξεργασίας είναι ο αερόβιος αντιδραστήρας βιοφίλμ κινούμενης κλίνης (MBBR), ο οποίος είναι ουσιαστικά ένα ορθογώνιο δοχείο/δεξαμενή από ανοξείδωτο ατσάλι, το οποίο χωρίζεται σε δυο ίσα τμήματα τα οποία είναι ανοικτά. Σε κάθε ένα από τα τμήματα της δεξαμενής βρίσκονται φυσητήρες αερισμού διαφραγματικού τύπου, οι οποίοι και δημιουργούν φυσαλίδες αέρα για την μεταφορά οξυγόνου σε όλη την στήλη του νοσοκομειακού λύματος. Με τον τρόπο αυτό, τα λύματα έρχονται σε άμεση επαφή με οξυγόνο, το οποίο βρίσκεται στον ατμοσφαιρικό αέρα και το οποίο είναι ουσιαστικά ο «καταλύτης» για την βιοαποδόμηση τους μέσω αερόβιων βακτηρίων τα οποία και αναπτύσσονται πάνω σε φορείς βιοφίλμ από πλαστικό (plastic carriers). Στο στάδιο αυτό το ρυπογόνο φορτίο από τα αναερόβια επεξεργασμένα λύματα μειώνεται σημαντικά όπως και μέρος των αναδυόμενων ρύπων (CECs και ARBs), όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3**.

Πίνακας 3: Διαλυτές μέσες συγκεντρώσεις φυσικοχημικών χαρακτηριστικών πριν και μετά την επεξεργασία των νοσοκομειακών υγρών αποβλήτων από τον αερόβιο αντιδραστήρα βιοφίλμ κινούμενης κλίνης μαζί με την ποσοστιαία απομάκρυνση που επιτυγχάνεται. Τα δεδομένα προέκυψαν από συνολικά 10 δειγματοληψίες (n=10).

Δείκτης	Εισροή	Εκροή	Απομάκρυνση (%)
pH	7,53	7,61	-
Conductivity (mS/cm)	1,95	1,72	-
COD (mg O ₂ /L)	337,80	176,90	47,63
P (mg PO ₄ ⁻ /L)	8,99	7,94	11,62

N (mg N/L)	81,50	72,30	11,29
NH ₄ ⁺ (mg NH ₄ ⁺ -N/L)	73.32	33.34	54.53
TOC (ppm C)	155.62	30.75	80.24

Στη συνέχεια τα δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής (LCI data) του MBBR, τα οποία συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια κατασκευής όσο και λειτουργίας του, κανονικοποιήθηκαν (normalised) ανά λειτουργική μονάδα (FU) και παραθέτονται στον **Πίνακα 4**. Συγκεκριμένα, τόσο το υλικό του αντιδραστήρα (ανοξειδωτο ατσάλι), η κατασκευή του (ηλεκτροσυγκόλληση), η μεταφορά του, αλλά και το τέλος ζωής του (ανακύκλωση και υγειονομική ταφή) συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση. Για τους δύο φυσητήρες αέρα το κύριο υλικό κατασκευή τους και το μοτέρ τους μοντελοποιήθηκε και περιλαμβάνεται στην ανάλυση, όπως επίσης και η μεταφορά τους και η κατάληξη τους μετά το πέρας του προσδόκιμου ορίου ζωής τους, το οποίο θεωρήθηκε ότι φτάνει τα 25 χρόνια με κατάλληλη συντήρηση. Να σημειωθεί πως ο αερισμός είναι μια διεργασία σχετικά υψηλής ενεργειακής έντασης και αυτό περιλαμβάνεται στην ανάλυση. Οι φορείς βιοφίλμ (plastic carriers) επίσης περιλαμβάνονται στην ανάλυση, όπως επίσης και η μεταφορά τους και η υγειονομική ταφή τους μετά το πέρας του προσδόκιμου ζωής τους (15 χρόνια). Τέλος, οι σωληνώσεις και η ενέργεια που καταναλώνεται στο στάδιο αυτό περιλαμβάνεται στην ανάλυση.

Πίνακας 4: Τα κανονικοποιημένα (ανά επεξεργασμένο m³ λύματος) δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής για τον αερόβιος αντιδραστήρας βιοφίλμ κινούμενης κλίνης.

	Τύπος/υλικό	Αριθμός/ Είσοδος	Χρόνος ζωής (έτη)
Δεξαμενή βιοαντιδραστήρα	Ανοξειδωτο ατσάλι	40 kg	>25
	Ηλεκτροσυγκόλληση	8 m	-
	Οδική μεταφορά	4 tkm	-
	Ανακύκλωση	36 kg	-
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	4 kg	-
Αντλία	EBARA (3M 32-160/1,5, 1,1 – 2,2 kW, 22 kg)	3 μονάδες	10
	Οδική μεταφορά	3,3 tkm	-
Σωληνώσεις	UPVC PE	4 kg	>25
	Οδική μεταφορά	0,2 tkm	-
	Ανακύκλωση	3,6 kg	-
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	0,4 kg	-

Αντλία αερισμού	FLUIMAC SP 15 FX (0,18 kW)	3 μονάδες	10
	Οδική μεταφορά	1,5 tkm	-
Φυσητήρες	Ανοξειδωτο ασάλι	15 kg	>25
	Οδική μεταφορά	0,15 tkm	-
	Ανακύκλωση	1,35	-
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	0,15	-
Σωληνώσεις	UPVC PE	4 kg	>25
	Οδική μεταφορά	0,8 tkm	-
	Ανακύκλωση	3,6 kg	-
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	0,4 kg	-
Φορείς βιοφίλμ	polypropylene	6 kg	10-15
	Οδική μεταφορά	0,6 tkm	-
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	6 kg	-
Ηλεκτρική ενέργεια	Αντλία	0,37 kWh (50 L/min)	-
	Αερισμός	0,72 (4 h retention time)	-

2.3 Φυτοεξυγίανση με φυτά *Lemna minor*

Το τρίτο στάδιο επεξεργασίας είναι η βιοεξυγίανση με τα υδροχαρή φυτά *Lemna minor*, ήτοι η απομάκρυνση του ρυπογόνου φορτίου επιτυγχάνεται μέσω φυτοεξυγίανσης. Το στάδιο αυτό είναι σχετικά απλό στη λειτουργία του, παρ' όλα αυτά η φυτοεξυγίανση καταφέρνει να απομακρύνει ένα ποσοστό ρυπογόνου φορτίου (**Πίνακας 5**). Συγκεκριμένα, τα υδροχαρή (υδρόβια) φυτά *Lemna minor* φύονται φυσικά σε λίμνες με στάσιμα ύδατα, με το πάνω μέρος τους (μικρά οριζόντια φύλλα πράσινου χρώματος και (ήμι)κυκλικού σχήματος) να επιπλέει και να προεξέχει ελάχιστα, μόλις μερικά εκατοστά, από την επιφάνεια των υδάτων και το κάτω μέρος τους να αποτελείται από μια μεγάλη ρίζα βυθισμένη στο νερό. Τα φυτά *Lemna minor* παρουσιάζουν σχετικά υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης, ενώ η ανάπτυξη τους δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ένταση του φωτός και την θερμοκρασία (άριστη ανάπτυξη 15-25 °C). Το βάθος των υδάτων δεν επηρεάζει ουσιαστικά την ανάπτυξη τους, καθώς αυτά μπορούν να αναπτυχθούν σε ρηχά ύδατα, κάνοντας δυνατή τη χρήση ρηχών δεξαμενών για την

απορρύπανση των λυμάτων. Ο βασικός μηχανισμός απομάκρυνσης του ρυπογόνου φορτίου και των CECs είναι η πρόσληψη τους από τα φυτά και η βιοαποδόμηση τους.

Πέραν τούτου στο στάδιο αυτό ένα σημαντικό ποσό βιομάζας δύναται να παραχθεί, μέσω της συλλογής και επεξεργασίας (π.χ., ξήρανση) των φυτών *Lemna minor*. Όπως στην περίπτωση του βιοαερίου, αυτή η βιομάζα μπορεί να αξιοποιηθεί, όπως παραδείγματος χάρη να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμη ύλη, μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Στην περίπτωση αυτή, όπως και στην περίπτωση του παραγόμενου βιοαερίου, ενδέχεται η τελική χρήση της βιομάζας να οδηγήσει σε κάποια περιβαλλοντικά οφέλη και για αυτό εξετάστηκε ξεχωριστά. Παραδείγματος χάρη, η παραγόμενη βιομάζα δύναται να εκτοπίσει ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται για θέρμανση, πιστώνοντας με τον τρόπο αυτό συγκεκριμένα περιβαλλοντικά οφέλη την πιλοτική μονάδα.

Πίνακας 5: Μέσες συγκεντρώσεις φυσικοχημικών χαρακτηριστικών πριν και μετά την επεξεργασία των νοσοκομειακών υγρών αποβλήτων μέσω φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* μαζί με την ποσοστιαία απομάκρυνση που επιτυγχάνεται. Τα δεδομένα προέκυψαν από εργαστηριακής κλίμακας πειράματα με συνολικά 4 δειγματοληψίες (n=4).

Δείκτης	Εισροή	Εκροή	Απομάκρυνση (%)
pH	7,73	7,60	-
Conductivity (mS/cm)	1,57	1,50	-
COD (mg O ₂ /L)	77	106	-37,66
P (mg PO ₄ -P/L)	6,43	4,73	26,33
N (mg N/L)	66,50	21,67	67,42
NH ₄ ⁺ (mg NH ₄ ⁺ -N/L)	38,03	15,17	60,11

Όσον αναφορά τα δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής (LCI data) της μονάδας φυτοεξυγίανσης με *Lemna minor*, αυτή ουσιαστικά αποτελείται από 24 ορθογώνιες ανοικτές δεξαμενές μικρού βάθους (λεκάνες εφεξής), τις βάσεις και τις σωληνώσεις τους, όπως επίσης και την αντλία ανακυκλοφορίας των λυμάτων. Συγκεκριμένα, οι λεκάνες είναι κατασκευασμένες από πολυαιθυλένιο (PE) με συνολικό ωφέλιμο όγκο 125 L η κάθε μια (στάθμη ύδατος μέσα στις λεκάνες 15 cm) και συνεπώς, στο σύνολο τους, έχουν την δυνατότητα επεξεργασίας έως 3 m³. Ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των λεκανών τοποθετείται στα 10 με 15 χρόνια, συνεπώς λήφθηκε υπόψη η αντικατάστασή τους μία φορά κατά την διάρκεια ζωής της πιλοτικής μονάδας. Ομοίως, θεωρήθηκε ότι το 90% της μάζας των λεκανών ανακυκλώνεται και το υπόλοιπο 10% μεταφέρεται προς απόθεση σε χώρο υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Το ποσοστό αυτό λήφθηκε υπόψη και για την ανακύκλωση των σωληνώσεων και των βάσεων των λεκανών, ενώ για την αντλία ανακυκλοφορίας τα δεδομένα για την ανακύκλωση

τους λήφθηκαν από την βιβλιογραφία. Όσον αναφορά τις σωληνώσεις, αυτές είναι ίδιες με τις σωληνώσεις των προηγούμενων σταδίων, ενώ το υλικό των βάσεων είναι από ανοξείδωτο ατσάλι και συνεπώς ο χρόνος ζωής τους είναι μεγαλύτερος από 25 έτη και συνεπώς δεν απαιτείται η αντικατάστασή τους κατά την διάρκεια ζωής της πιλοτικής μονάδας. Από την άλλη μεριά, η αντλία ανακυκλοφορίας των λυμάτων θα αντικατασταθεί μια φορά. Τέλος, η συμμετοχή της ενέργειας που καταναλώνει η αντλία ανακυκλοφορίας λήφθηκε υπόψη στο περιβαλλοντικό προφίλ του συγκεκριμένου σταδίου. Τα δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής (LCI data) της μονάδας φυτοεξυγίανσης με *Lemna minor* συνοψίζονται στον **Πίνακα 6**.

Πίνακας 6: Τα κανονικοποιημένα (ανά επεξεργασμένο m³ λύματος) δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής για την φυτοεξυγίανση με φυτά *Lemna minor*.

	Τύπος/υλικό	Αριθμός /Εισοδου	Χρόνος ζωής (έτη)
Λεκάνες	Πολυαιθυλένιο (PE)	480 kg	10-15
	Οδική μεταφορά	48 tkm	-
	Ανακύκλωση	432 kg	-
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	48 kg	-
Αντλία τροφοδοσίας/ ανακυκλοφορίας	EBARA (3M 32- 160/1.5, 1.1 – 2.2 kW, 22 kg)	3 μονάδες	10
	Οδική μεταφορά	3,3 tkm	-
	Ηλεκτρική ενέργεια (τροφοδοσία)	0,37 kWh (50 L/min)	-
	Ηλεκτρική ενέργεια (ανακυκλοφορία)	1,22 kWh (15 L/min)	-
Βάσεις	Σίδηρος	300 kg	25
	Οδική μεταφορά	30 tkm	-
	Ανακύκλωση	270 kg	-
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	30 kg	-
Βαφή βάσεων	Μη-βιολογικό χρώμα	25 kg	5
Σωληνώσεις	UPVC PE	35 kg	>25
	Οδική μεταφορά	3,5 tkm	-
	Ανακύκλωση	31,5 kg	-
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	1,5 kg	-

2.4 Απολύμανση με χρήση προηγμένης οξειδωσης

Το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας είναι απολύμανση με χρήση προηγμένης οξειδωσης, η οποία επιτυγχάνεται μέσω συνδυασμού υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) με υπεριώδη ξ (UV) ακτινοβολία. Ο συγκεκριμένος συνδυασμός αποτελεί μια τυπική μορφή τριτοβάθμιας επεξεργασίας (tertiary treatment) καθώς αφενός η υπεριώδης ακτινοβολία είναι μια από τις συνηθέστερες μεθόδους απομάκρυνσης μικροοργανισμών και παθογόνων βακτηρίων και αφετέρου το υπεροξειδίου του υδρογόνου (οξειδωτικός παράγοντας) διασφαλίζει την περαιτέρω απομάκρυνση τους, μέσω της φωτόλυσης τους, σε μήκη κύματος > 260 nm, με υδροξυλικές ρίζες. Ως αποτέλεσμα, στο στάδιο αυτό παρατηρείται σημαντική μείωση του υπολειπόμενου φορτίου των CECs και ARBs (**Πίνακας 7**) και το τελικό απόβλητο να καθίσταται κατάλληλο για απελευθέρωση στο δίκτυο αποχέτευσης αλλά ακόμα και για επαναχρησιμοποίηση (άρδευση).

Πίνακας 7: Μέσες συγκεντρώσεις φυσικοχημικών χαρακτηριστικών πριν και μετά την επεξεργασία των νοσοκομειακών υγρών αποβλήτων μέσω απολύμανσης με υπεριώδη ακτινοβολία σε συνδυασμό με υπεροξειδίου του υδρογόνου μαζί με την ποσοστιαία απομάκρυνση που επιτυγχάνεται. Τα δεδομένα προέκυψαν από συνολικά 10 δειγματοληψίες ($n=10$).

Δείκτης	Εισροή	Εκροή	Απομάκρυνση (%)
pH	7,61	7,66	-
Conductivity (mS/cm)	1,72	1,68	-
COD (mg O_2/L)	176,90	154,30	12,78
P (mg $PO_4^{3-}P/L$)	7,94	8,06	-1,40
N (mg N/L)	72,30	73,40	-1,52
NH_4^+ (mg NH_4^+-N/L)	33,34	32,65	2,07
TOC (ppm C)	30,75	38,48	-25,14

Όσον αναφορά τα δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής (LCI data) της μονάδας απολύμανσης με προηγμένη οξειδωση, αυτή ουσιαστικά αποτελείται από τον αντιδραστήρα απολύμανσης UV και το υπεροξειδίου του υδρογόνου. Ο αντιδραστήρα απολύμανσης UV είναι κατασκευή της εταιρείας Wedeco, η οποία κατασκευάζει σχετικά συστήματα και το μοντέλο είναι το UV700 Aquada Maxima. Η μοντελοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές του κατασκευαστή, ενώ στην ανάλυση περιλαμβάνονται τόσο η δεξαμενή συγκέντρωσης τελικού προϊόντος όσο και οι αντλίες και οι σωληνώσεις. Επίσης, η ενέργεια που καταναλώνεται όπως και το υπεροξειδίου του υδρογόνου περιλαμβάνονται στην ανάλυση. Τα δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής για το στάδιο αυτό φαίνονται στον **Πίνακα 8**.

Πίνακας 8: Τα κανονικοποιημένα (ανά επεξεργασμένο m³ λύματος) δεδομένα απογραφής κύκλου ζωής της μονάδας απολύμανσης με προηγμένη οξείδωση.

	Τύπος/υλικό	Αριθμός /Εισόδου	Χρόνος ζωής (έτη)
Αντλία τροφοδοσίας	EBARA (3M 32-160/1,5, 1,1 – 2,2 kW, 22 kg)	3 μονάδες	10
	Οδική μεταφορά	3,3 tkm	-
	Ηλεκτρική ενέργεια (τροφοδοσία)	0,37 kWh (50 L/min)	
Σύστημα UV	Aquada UV		
	Ηλεκτρική ενέργεια	35 W/m ³	
H ₂ O ₂	H ₂ O ₂ (30%)	100 mg/L	
Σωληνώσεις	UPVC PE	35 kg	>25
	Οδική μεταφορά	3,5 tkm	-
	Ανακύκλωση	31,5 kg	
	Ταφή (ΧΥΤΑ)	1,5 kg	

Πίνακας 9: Μέσες συγκεντρώσεις φυσικοχημικών χαρακτηριστικών στην είσοδο και έξοδο της πιλοτικής μονάδας μαζί με τη συνολική ποσοστιαία απομάκρυνση που επιτυγχάνεται (n=10).

Δείκτης	Εισροή	Εκροή	Απομάκρυνση (%)
pH	7,46	7,66	-
Conductivity (mS/cm)	1,80	1,68	-
COD (mg O ₂ /L)	360,10	154,30	57,15
P (mg PO ₄ ⁻ -P/L)	8,20	8,06	1,76
N (mg N/L)	76,60	73,40	4,18
NH ₄ ⁺ (mg NH ₄ ⁺ -N/L)	66,88	32,65	51,18
TOC (ppm C)	195,26	38,48	80,29

3 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλου ζωής

3.1 Αναερόβιος βιοαντιδραστήρας μεμβρανών

3.1.1 Υποθέσεις σχετικά με τα δεδομένα ανάλυσης κύκλου ζωής

Πριν από την είσοδο του αναερόβιου βιοαντιδραστήρα μεμβρανών (AnMBR) έχει τοποθετηθεί σύστημα εκσχαρισμού το οποίο και απομακρύνει τα μεγάλης διαμέτρου στερεά τα οποία επηρεάζουν αρνητικά τη λειτουργία του συστήματος. Συγκεκριμένα, το σύστημα αποτελείται από δύο (2) σχάρες κατασκευασμένες από ανοξείδωτο ασάλι, με την πρώτη να αφορά στην απομάκρυνση των μεγάλου διαμέτρου στερεών και τη δεύτερη στα μικρότερα. Τόσο το υλικό κατασκευής των σχαρών (steel pickled hot rolled coil) όσο και η ηλεκτροσυγκόλληση τους (arc welding), η μεταφορά τους (freight lorry, EURO5 emissions standard), και το στάδιο του τέλους ζωής τους λήφθηκε υπόψη. Να σημειωθεί πως ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των σχαρών ξεπερνάει τα 25 χρόνια, συνεπώς δεν απαιτείται η αντικατάστασή τους κατά την διάρκεια ζωής της μονάδας, ενώ η όποια συντήρηση γίνεται χειροκίνητα και δεν απαιτεί χημικά και άλλους πόρους (resources).

Πριν από τις σχάρες βρίσκεται τοποθετημένη η αντλία τροφοδοσίας (EBARA 3M 32-160/1.5, 1,1 – 2,2 kW, 22 kg) η οποία, τόσο ως υλικό αλλά και ως κατανάλωση ενέργειας (ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο της Κύπρου), λήφθηκε υπόψη. Για τη μοντελοποίηση της αντλίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα κύκλου ζωής (LCI data) από τη βιβλιοθήκη Ecoinvent, τα οποία αναφέρονται σε μεγαλύτερη αντλία (water pump 22 kW). Για το λόγο αυτό η ισχύς της αντλίας κανονικοποιήθηκε με βάση την ισχύ της αντλίας τροφοδοσίας της μονάδας και η παραδοχή αυτή θεωρείται υψηλής ακρίβειας καθώς σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα προκύπτει όταν η κανονικοποίηση πραγματοποιηθεί με βάση την μάζα (βάρος) των αντλιών. Η μεταφορά της αντλίας λήφθηκε υπόψη, ενώ το στάδιο του τέλους ζωής της συμπεριλαμβάνεται ήδη στα δεδομένα της βιβλιοθήκης Ecoinvent και συνεπώς δεν συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο διπλής καταγραφής τους (double counting). Η μονάδα περιλαμβάνει επίσης μια αντλία ανακυκλοφορίας, η οποία είναι ίδιου τύπου και ισχύος με την αντλία τροφοδοσίας και συνεπώς μοντελοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο. Να σημειωθεί πως ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των αντλιών είναι τα 10 έτη και συνεπώς οι αντλίες θα χρειαστεί να αντικατασταθούν δύο φορές (σύνολο 3 αντλίες για τα 25 χρόνια ζωής της μονάδας).

Για τις σωληνώσεις εξωθημένοι πλαστικοί σωλήνες (extruded plastic pipes) λήφθηκαν υπόψη, όπως και η μεταφορά και ανακύκλωση/υγειονομική ταφή τους μετά το τέλος ζωής της μονάδας καθώς δεν απαιτείται η αντικατάστασή τους (ωφέλιμος χρόνος ζωής > 25 έτη). Τόσο για την δεξαμενή οξεογένεσης όσο και για την δεξαμενή μεθανογένεσης το υλικό κατασκευής τους (304 stainless steel) και η ηλεκτροσυγκόλληση του, αλλά και το στάδιο του τέλους ζωής τους

λήφθηκε υπόψη. Όμοια με τις σχάρες, ο ωφέλιμος χρόνος ζωής των δεξαμενών ξεπερνάει τα 25 χρόνια, συνεπώς δεν απαιτείται η αντικατάστασή τους κατά την διάρκεια ζωής της μονάδας, ενώ η όποια συντήρηση γίνεται χειροκίνητα και δεν απαιτεί χημικά και άλλους πόρους (resources). Παρ' όλα αυτά, η δεξαμενή μεθανογένεσης περιλαμβάνει τη μεμβράνη υπερδιήθησης (UF) η οποία λήφθηκε υπόψη (ως hollow fiber ultrafiltration membrane, 50 m² of active surface), όσο και την μεταφορά της και την αντικατάστασή της κάθε δύο (2) έτη. Για τον καθαρισμό της μεμβράνης χρησιμοποιείται υδροξείδιο του νατρίου (NaOH), το οποίο λήφθηκε υπόψη (ως sodium hydroxide production from membrane technology), όπως επίσης και η δοσομετρική αντλία που χρησιμοποιείται (ως 40 W pump).

Επίσης, το βιοαέριο που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή θερμότητας/ενέργειας και με τον τρόπο αυτό να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της μονάδας. Παρ' όλα αυτά, στη συγκεκριμένη περίπτωση, αυτό καίγεται στον ανοιχτό αέρα (flaring), το οποίο και οδηγεί σε σημαντική μείωση του αντίκτυπου του (το μεθάνιο από τη φύση του είναι ένα σημαντικό αέριο του θερμοκηπίου) σε σχέση με αυτό να απελευθερώνονταν στην ατμόσφαιρα. Η παραγωγή του βιοαερίου υπολογίστηκε από την μείωση του χημικώς απαιτούμενου οξυγόνου (Chemical Oxygen Demand, COD) ενώ οι εκπομπές από την καύση του από τη βιβλιογραφία. Παρ' όλο που οι εκπομπές από την καύση βιοαερίου περιλαμβάνονται στην ανάλυση, αυτές αναμένεται να έχουν σχετικά μικρή συμμετοχή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα καθώς η κύρια αέρια εκπομπή είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), αλλά καθώς αυτό είναι βιολογικής (biogenic) προέλευσης έχει ουδέτερο ανθρακικό αποτύπωμα. Τέλος, η παραγόμενη λυματολάσπη υπολογίστηκε από τη βιβλιογραφία και η μεταφορά και εναπόθεση της σε ΧΥΤΑ λήφθηκε υπόψη.

3.1.2 Αποτελέσματα στο μέσο σημείο

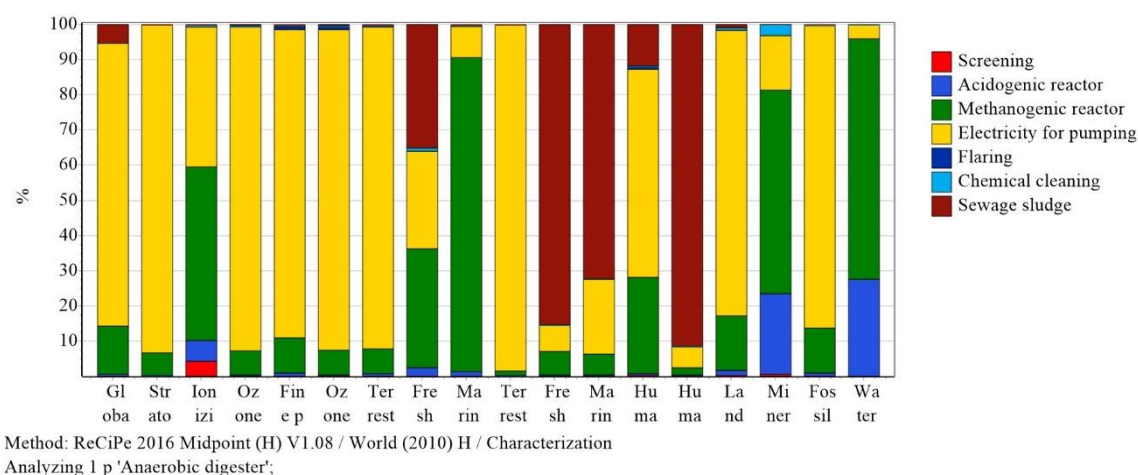
Πρώτα τα αποτελέσματα της LCIA μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο (midpoint level) παρουσιάζονται χρησιμοποιώντας το Hierarchist perspective. Υπενθυμίζεται ότι η λειτουργική μονάδα (FU) είναι η αποτελεσματική επεξεργασία ενός (1) κυβικού μέτρου (m³) πραγματικού νοσοκομειακού υγρού αποβλήτου (**Πίνακας 1**) και οι περιβαλλοντικές εκπομπές (Characterization) μαζί με τις κανονικοποιημένες τιμές (Normalization) από αυτή την επεξεργασία παρουσιάζονται στον **Πίνακα 10**. Συγκεκριμένα, από τις διάφορες κατηγορίες που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 10**, αυτή η οποία είναι ευρέως γνωστή είναι της κλιματικής αλλαγής (Global warming), η οποία ουσιαστικά αφορά το ανθρακικό αποτύπωμα της μονάδας. Αυτό βρέθηκε να είναι περί τα 2.7 kg CO₂ eq ανα κυβικό μέτρο αποβλήτου. Η κύρια διεργασία πίσω από αυτό το ανθρακικό αποτύπωμα, όσο και γενικά πίσω από τις περισσότερες κατηγορίες που εξετάζει η ReCiPe είναι η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από τις αντλίες (αντλία τροφοδοσίας, αντλία ανακυκλοφορίας, και σε πολύ μικρότερο βαθμό η δοσομετρική αντλία).

Πίνακας 10: Τα αποτελέσματα της LCIA μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού νοσοκομειακού αποβλήτου.

Impact category	Total	Normalization
Global warming	2,67 E+00 kg CO ₂ eq	1,49E-04
Stratospheric ozone depletion	1,77 E-06 kg CFC11 eq	1,48E-05
Ionizing radiation	4,68 E-02 kBq Co-60 eq	4,13E-05
Ozone formation, Human health	7,97 E-03 kg NO _x eq	1,99E-04
Fine particulate matter formation	5,25 E-03 kg PM2.5 eq	1,17E-04
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	8,12 E-03 kg NO _x eq	2,33E-04
Terrestrial acidification	1,59 E-02 kg SO ₂ eq	2,16E-04
Freshwater eutrophication	4,79 E-04 kg P eq	3,73E-04
Marine eutrophication	5,26 E-05 kg N eq	2,08E-06
Terrestrial ecotoxicity	4,87 E+00 kg 1,4-DCB	1,61E-04
Freshwater ecotoxicity	1,50 E-02 kg 1,4-DCB	5,95E-05
Marine ecotoxicity	2,41 E-02 kg 1,4-DCB	8,97E-05
Human carcinogenic toxicity	1,96 E-03 kg 1,4-DCB	6,60E-05
Human non-carcinogenic toxicity	4,09 E-01 kg 1,4-DCB	1,14E-06
Land use	3,52 E-02 m ² a crop eq	3,57E-06
Mineral resource scarcity	1,01 E-02 kg Cu eq	1,18E-07
Fossil resource scarcity	7,14 E-01 kg oil eq	3,48E-04
Water consumption	8,51 E-02 m ³	1,29E-04

Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 1** (Characterisation) η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις περισσότερες κατηγορίες, και ειδικά σε αυτές που σχετίζονται με την κατανάλωση και καύση ορυκτών καυσίμων όπως η κατηγορία «κλιματική αλλαγή». Ο λόγος είναι ότι το ενεργειακό μείγμα της Κύπρου στηρίζεται κυρίως σε ορυκτά καύσιμα και ειδικά σε πετρέλαιο (oil), η καύση του οποίου είναι υπεύθυνη για σειρά εκπομπών οι οποίες μεταφράζονται, μεταξύ άλλων, στις κατηγορίες Global warming, Stratospheric ozone depletion, Ozone και Fine particulate matter formation, και Terrestrial acidification και ecotoxicity (**Διάγραμμα 1**). Επίσης, η ίδια η καύση του είναι υπεύθυνη για την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων (κατηγορία Fossil resource scarcity). Η απόθεση της λυματολάσπης φαίνεται επίσης να επηρεάζει το σύστημα και κυρίως τις κατηγορίες που σχετίζονται με την (οικο)τοξικότητα ((eco)toxicity) καθώς στην λυματολάσπη καταλήγουν μη-βιοδιασπώμενες και τοξικές ουσίες. Επίσης, η δεξαμενή μεθανογένεσης φαίνεται να έχει μεγάλη συμμετοχή σε αρκετές κατηγορίες και ο κύριος λόγος δεν είναι το υλικό κατασκευής της ίδιας της δεξαμενής (ανοξείδωτο αστάλι) καθώς αυτό θεωρήθηκε ότι ανακυκλώνεται, αλλά οι μεμβράνες που βρίσκονται τοποθετημένες μέσα σε αυτήν, καθώς, μεταξύ άλλων, η κατασκευή τους είναι ενεργοβόρα διεργασία.

Παρ' όλο που η παραπάνω ανάλυση (Characterisation) προσφέρει μια πρώτη εικόνα για την συμμετοχή κάθε σταδίου σε κάθε κατηγορία της ReCiPe, δεν προσφέρει πληροφορία για το μέγεθος/βαθμό της επίπτωσης της κάθε μια κατηγορίας στο περιβάλλον. Για το λόγο αυτό τα δεδομένα αυτά κανονικοποιήθηκαν (Normalization) χρησιμοποιώντας το μέσο ετήσιο αποτύπωμα ενός παγκόσμιου πολίτη (world normalization factors). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **Πίνακα 10** και φαίνονται στο **Διάγραμμα 2**, όπου είναι εμφανές πως δεν παρατηρείται κάποια ακραία βλάβη/επίπτωση στον άνθρωπο ή το περιβάλλον καθώς όλες οι κατηγορίες παρουσιάζουν μικρά και συγκρίσιμα αποτελέσματα.

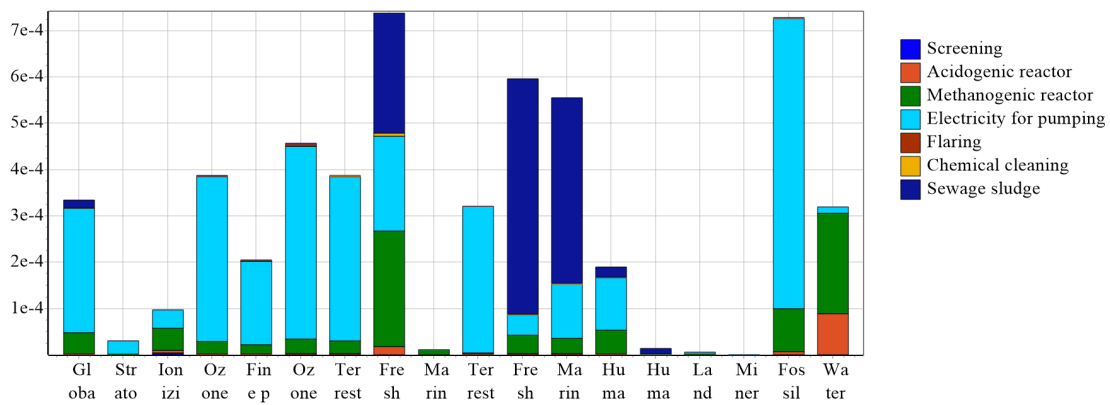


Διάγραμμα 1: Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού αποβλήτου, και η συνεισφορά κάθε σταδίου σε κάθε μια από τις εξεταζόμενες κατηγορίες.

Πιο συγκεκριμένα, όλες οι κατηγορίες βρίσκονται τουλάχιστον τέσσερις (4) τάξεις μεγέθους (**Πίνακας 10**) κάτω από το μέσο ετήσιο αποτύπωμα ενός παγκόσμιου πολίτη, με την κατηγορίες Freshwater eutrophication και Fossil resource scarcity να επηρεάζεται κυρίως. Για την πρώτη, ο κύριος λόγος είναι η κατανάλωση ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων (από το δίκτυο της Κύπρου για την λειτουργία των αντλιών αλλά και κατά την διαδικασία παραγωγής των μεμβρανών), καθώς, μεταξύ άλλων, η εξόρυξη ορυκτών καυσίμων οδηγεί στην έκθεση πετρωμάτων που περιέχουν φώσφορο ο οποίος μέσω των κατακρημνισμάτων μεταφέρεται σε οικοσυστήματα γλυκού νερού όπου και προκαλεί τον ευτροφισμό τους.

Επίσης, η καύση τους είναι υπεύθυνη για την εκπομπή οξειδίων του αζώτου, τα οποία επηρεάζουν την κατηγορία του θαλάσσιου ευτροφισμού (Marine eutrophication). Όχι μόνο αυτό, αλλά η λιματολόαση περιέχει θρεπτικά (κυρίως φώσφορο) και τοξικές ουσίες τα οποία μέσω των διασταλλαγμάτων των ΧΥΤΑ δύναται να καταλήξουν σε υδάτινα οικοσυστήματα και να τα επηρεάσουν (μέσω ευτροφισμού και τοξικότητας) αλλά και να επηρεάσουν και την ανθρώπινη υγεία μέσω βιοσυσσώρευσης. Τέλος, όπως προαναφέρθηκε η καύση ορυκτών

καυσίμων, και κυρίως πετρελαίου (oil) το οποίο κυριαρχεί στο ενεργειακό μείγμα της Κύπρου οδηγεί στην εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και αυτό αποτυπώνεται στην κατηγορία Fossil resource scarcity. Οι υπόλοιπες κατηγορίες παρουσιάζουν μικρότερα κανονικοποιημένα αποτελέσματα, αλλά το στάδιο που έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά σε όλες είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τις αντλίες, και συνεπώς αυτό ενδέχεται να είναι ένα περιβαλλοντικό σημείο συγκέντρωσης επιπτώσεων (environmental hotspot ή περιβαλλοντικό hotspot εφεξής). Για την αναγνώριση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος (total environmental impact) και να μελετηθεί περαιτέρω η συνεισφορά κάθε σταδίου σε αυτό αλλά και το μέγεθος των περιβαλλοντικών hotspot τα αποτελέσματα εκφράστηκαν επίσης στο τελικό σημείο και παρουσιάζονται παρακάτω.



Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H / Normalization
Analyzing 1 p 'Anaerobic digester';

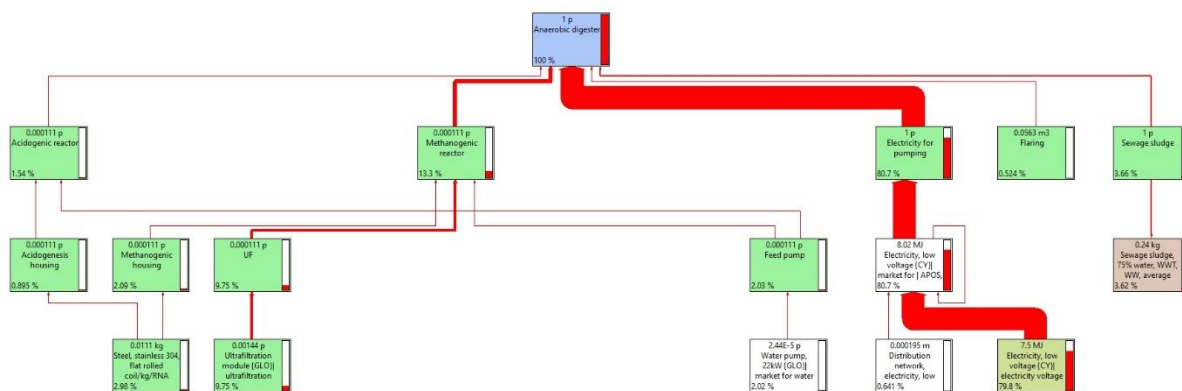
Διάγραμμα 2: Τα κανονικοποιημένα (Normalisation) αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού αποβλήτου και η συνεισφορά κάθε σταδίου σε κάθε μια από τις κατηγορίες της μεθόδου.

3.1.3 Αποτελέσματα στο τελικό σημείο

Όπως προαναφέρθηκε, για να αναγνωριστούν τυχόν περιβαλλοντικά hotspot αλλά και για να επιτευχθεί μια απευθείας σύγκριση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας του κάθε σταδίου η μέθοδος ReCiPe χρησιμοποιήθηκε επίσης στο τελικό σημείο. Συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση βασίστηκε ξανά στο Hierarchist perspective (average weighting) και το δένδρογραμμα που παρουσιάζει την συνεισφορά (%) κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα δίνεται στο **Διάγραμμα 3**. Συγκεκριμένα, όπως είναι ξεκάθαρο η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τις αντλίες είναι το κύριο περιβαλλοντικό hotspot, καθώς η συνολική συνεισφορά τους είναι άνω του 80% του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Όπως αναλύθηκε παραπάνω, ο κύριος λόγος είναι η εξόρυξη, μεταφορά, επεξεργασία, και καύση πετρελαίου (oil) η οποία είναι συνυφασμένη με σειρά περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ένας τρόπος να μειωθεί η πολύ υψηλή συνεισφορά της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο

συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι η αντικατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου με ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Αυτό το σενάριο εξετάστηκε στην ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) όπου ηλεκτρισμός από φωτοβολταϊκά (PV) θεωρήθηκε ότι παρέχει την ενέργεια για την λειτουργία των αντλιών.

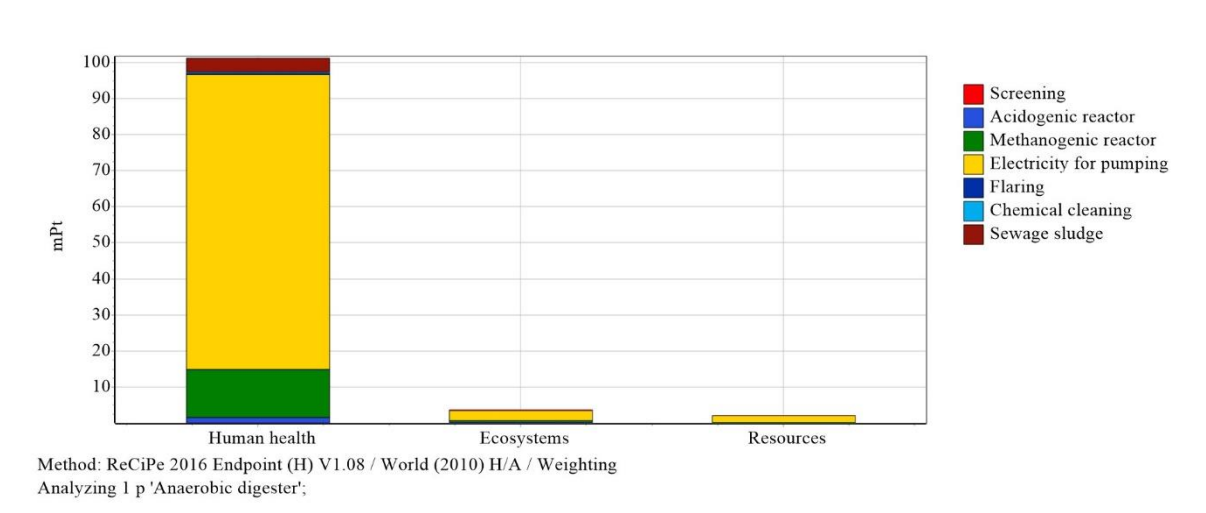
Η δεύτερη διεργασία που συνεισφέρει, σε πολύ μικρότερο βαθμό βέβαια, στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι το στάδιο της μεθανογένεσης (13.3%) και κυρίως οι μεμβράνες υπερδιήθησης (9.75%) που χρησιμοποιούνται, καθώς η δεξαμενή μεθανογένεσης, ως υλικό, έχει σχετικά μικρή συμμετοχή (2.1%). Είναι επίσης αξιο ενδιαφέροντος ότι και οι αντλίες, ως υλικά, έχουν μια σχετική συμμετοχή, της τάξης του 2%, στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και αυτό οφείλεται κυρίως στον χαλκό που καταναλώνεται για την κατασκευή τους (ηλεκτροκινητήρας) και σε πολύ μικρότερο βαθμό στα υπόλοιπα υλικά και στα λάδια/βαλβολίνες που χρειάζονται για την συντήρησή τους. Η λυματολάσπη, και συγκεκριμένα η επεξεργασία που απαιτείται για την απόθεση της σε ΧΥΤΑ έχει μια συμμετοχή της τάξης του 3.66% ενώ η δεξαμενή οξεογένεσης και η καύση του βιοαερίου μια συμμετοχή της τάξης του 1.54% και 0.5%, αντιστοίχως. Τέλος, η συμμετοχή των υπόλοιπων σταδίων (εκσχαρισμός και χημικός καθαρισμός) είναι μικρότερη του 0.5% και για αυτό δεν παρουσιάζονται στο **Διάγραμμα 3**, ενώ σε όλες τις περιπτώσεις η μεταφορά των υλικών δεν βρέθηκε να επηρεάζει σημαντικά την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της μονάδας.



Διάγραμμα 3: Δενδρόγραμμα των κύριων διεργασιών του AnMBR και η συνεισφορά (%) του κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Τέλος, για να ποσοτικοποιηθεί το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και να βρεθεί η συνολική ζημία που προκαλείται στις περιοχές προστασίας που λαμβάνει υπόψη η μέθοδος ReCiPe (ανθρώπινη υγεία, οικοσύστημα, και πόροι) τα αποτελέσματα αθροίστηκαν (single score) χρησιμοποιώντας κοινή μονάδα (Pt unit) και παρουσιάζονται στο **Διάγραμμα 4**. Συγκριμένα, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του AnMBR για την επεξεργασία ενός m^3 αποβλήτου ανέρχεται περίπου σε περίπου 120 mPt. Από αυτά, τα περισσότερα (> 100 mPt) αφορούν στην επιβάρυνση της ανθρώπινης υγείας και ο κύριος λόγος, με μεγάλη

διαφορά, είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την λειτουργία των αντλιών (**Διάγραμμα 4**) λόγω της καύσης, και σε μικρότερο βαθμό της εξόρυξης, μεταφοράς, και επεξεργασίας του πετρελαίου (oil) που καταναλώνεται για την παραγωγή ενέργειας στην Κύπρο. Συγκεκριμένα, όπως και η καύση του βιοαερίου (flaring) είναι υπεύθυνη για σειρά αέριων εκπομπών (**Πίνακας 2**), τόσο και η καύση του πετρελαίου είναι υπεύθυνη για σειρά αέριων κυρίως εκπομπών (μη βιογενής φύσης σε αυτή την περίπτωση), οι οποίες λόγω της φύσης τους (υγρό καύσιμο) και σχετικά χαμηλής θερμογόνου δύναμης τους είναι σημαντικά υψηλότερες από αυτές της καύσης βιοαερίου και αερίων καυσίμων γενικότερα. Παραδείγματος χάρη, η καύση πετρελαίου εκτός από διοξείδιο του άνθρακα παράγει και υποξείδιο του αζώτου, εκπομπές τοξικών υδρογονανθράκων, και μικροσωματιδίων όλα τα οποία επιβαρύνουν σημαντικά την ανθρώπινη υγεία μέσω της εισπνοής τους. Για το λόγο αυτό κρίνεται θεμιτή η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, το οποίο και εξετάζεται παρακάτω.



Διάγραμμα 4: Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο τελικό σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού νοσοκομειακού αποβλήτου.

3.1.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Όπως προαναφέρθηκε το κύριο περιβαλλοντικό hotspot που αναγνωρίστηκε είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου, το οποίο βασίζεται κυρίως στην χρήση ορυκτών καυσίμων. Συνεπώς, για την βελτίωση της βιωσιμότητας του AnMBR, κρίνεται δόκιμη η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας/σεναρίου (scenario analysis) σύμφωνα με το οποίο η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει το σύστημα προέχεται από φωτοβολταϊκά στέγης (3 kWp multi-Si panels, slanted-roof installation), καθώς η ηλιακή ενέργεια και η ηλιοφάνεια στην Κύπρο είναι υψηλή.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η χρήση ΑΠΕ βελτιώνει σημαντικά το περιβαλλοντικό προφίλ της μονάδας, καθώς, παραδείγματος χάρη, το ανθρακικό της αποτύπωμα είναι μειωμένο κατά

76%, αλλά και σχεδόν όλες οι υπόλοιπες κατηγορίες στο μέσο επίπεδο παρουσιάζουν σημαντικά μειωμένα αποτελέσματα (**Πίνακας 11**). Συγκεκριμένα, οι μειώσεις κυμαίνονται μεταξύ του 3.7% (Freshwater ecotoxicity) έως και 97.5% (Terrestrial ecotoxicity). Από την άλλη μεριά, τα αποτελέσματα για τρεις (3) κατηγορίες είναι αυξημένα μεταξύ του 0.6% (Water consumption) και 8.2% (Marine eutrophication). Να σημειωθεί πως οι μειώσεις σε σχέση με το αρχικό σενάριο (χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου), αφορούν ουσιαστικά την αντικατάσταση της καύσης πετρελαίου (oil) από ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη από φωτοβολταϊκά.

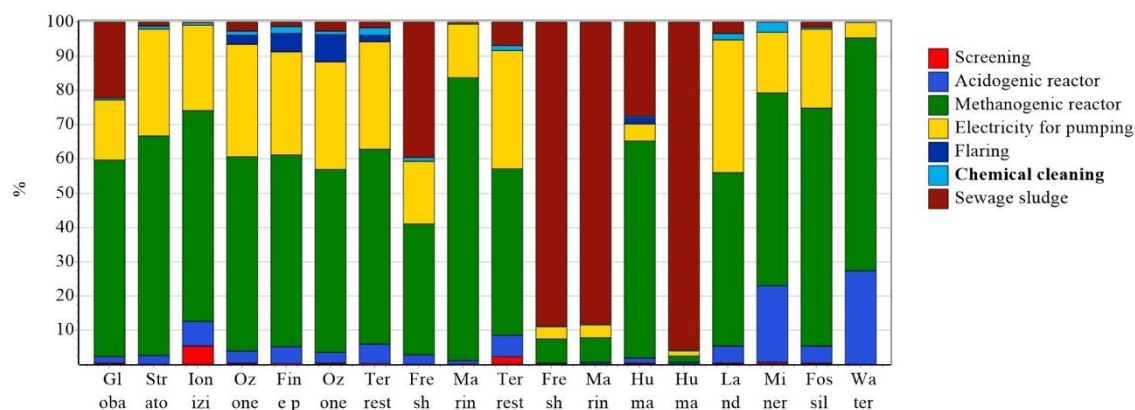
Η μικρή αύξηση στην κατανάλωση ύδατος (Water consumption) αφορά στη διαδικασία κατασκευής και λειτουργίας (πλύσιμο πάνελ) των φωτοβολταϊκών πάνελ σε σχέση με την χρήση ύδατος για την εξόρυξη, επεξεργασία, και καύση πετρελαίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Φυσικά, εάν κάποιο άλλο ορυκτό καύσιμο είχε υψηλή συμμετοχή στο ενεργειακό μείγμα της Κύπρου τα αποτελέσματα θα διέφεραν σημαντικά, καθώς, παραδείγματος χάρη, η συνολική χρήση ύδατος των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι σημαντικά χαμηλότερη (έως και 90%) σχέση με αυτή του λιγνίτη (coal) ανά μονάδα παραγωγής ενέργειας. Επίσης, οι μικρές αυξήσεις στις κατηγορίες Marine eutrophication και Mineral resource scarcity αφορούν στην εξόρυξη των μεταλλευμάτων για την παραγωγή των πάνελ, των βάσεων τους, αλλά και των καλωδιώσεων που είναι κατασκευασμένες από χαλκό, η οποία οδηγεί στην εξάντληση τους (depletion). Επίσης, η κατασκευή των πάνελ είναι ενεργοβόρα και τυπικά η ενέργεια αυτή προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, απελευθερώνοντας με τον τρόπο αυτό σειρά εκπομπών, συμπεριλαμβανόμενων και των οξειδίων του αζώτου. Παρ' όλα αυτά, όπως φαίνεται και στο **Διάγραμμα 2** οι κατηγορίες αυτές είχαν χαμηλές κανονικοποιημένες τιμές και στο αρχικό σενάριο, και συνεπώς η μικρή αύξηση τους δεν επηρεάζει σημαντικά το υπό εξέταση σύστημα. Από την άλλη μεριά, οι μειώσεις στις περισσότερες κατηγορίες είναι σημαντικά υψηλές οδηγώντας σε ένα ιδιαίτερα βελτιωμένο περιβαλλοντικό προφίλ (**Πίνακας 11**). Να σημειωθεί ότι οι ίδιες μειώσεις με αυτές που παρουσιάζονται στον **Πίνακας 11** παρατηρούνται και στα κανονικοποιημένα αποτελέσματα.

Πίνακας 11: Τα αποτελέσματα του ανανεωμένου σεναρίου (χρήση ΑΠΕ) της μεθόδου ReCiPe για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού αποβλήτου.

Κατηγορία	Μονάδα	Αποτέλεσμα	Διαφορά (%) με αρχικό σενάριο
Global warming	kg CO ₂ eq	6,41E-01	76,0%
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	1,77E-07	90,0%
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	3,75E-02	19,8%
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	9,52E-04	88,0%
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	9,34E-04	82,2%

Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	1,04E-03	87,1%
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	1,95E-03	87,7%
Freshwater eutrophication	kg P eq	4,23E-04	11,6%
Marine eutrophication	kg N eq	5,69E-05	-8,2%
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,23E-01	97,5%
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,45E-02	3,7%
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1,97E-02	18,1%
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	8,44E-04	56,9%
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	3,90E-01	4,6%
Land use	m ² a crop eq	1,08E-02	69,4%
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	1,03E-02	-2,2%
Fossil resource scarcity	kg oil eq	1,30E-01	81,8%
Water consumption	m ³	8,56E-02	-0,6%

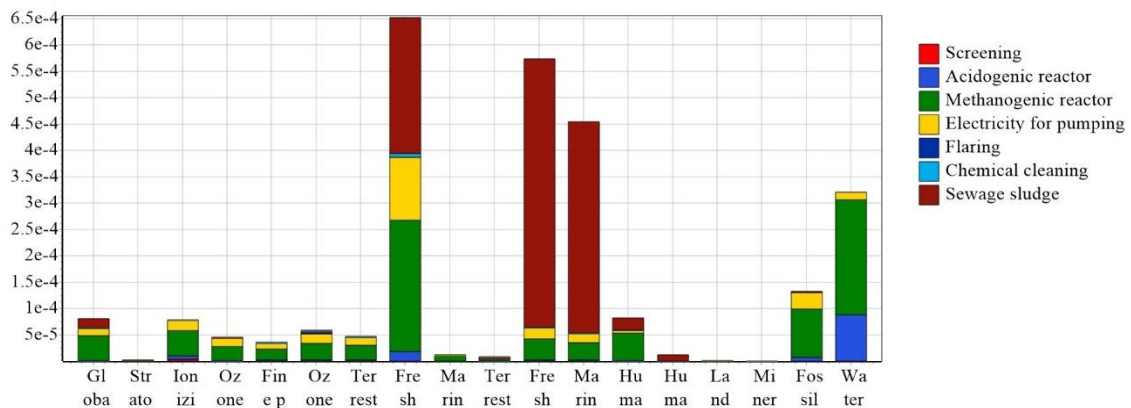
Ως αποτέλεσμα, η συνεισφορά της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντικά μειωμένη σε όλες τις κατηγορίες μέσου επιπέδου, με το στάδιο της μεθανογένεσης να είναι αυτό που έχει τη μεγαλύτερη συμμετοχή στις περισσότερες κατηγορίες. Λόγω των μειωμένων τιμών του σταδίου της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, το στάδιο της λυματολάσπης παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερη συμμετοχή στις κατηγορίες που είχε ήδη υψηλή συμμετοχή, ενώ κυριαρχεί στις κατηγορίες Freshwater ecotoxicity, Marine ecotoxicity, και Human non-carcinogenic toxicity για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Διάγραμμα 5: Τα αποτελέσματα του ανανεωμένου σεναρίου (χρήση ΑΠΕ) στο μέσο σημείο (μεθόδος ReCiPe) και η συνεισφορά κάθε σταδίου σε κάθε μια από τις κατηγορίες της μεθόδου.

Τέλος, τα μειωμένα κανονικοποιημένα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Διάγραμμα 6**, όπου πλέον οι κατηγορίες με τις υψηλότερες κανονικοποιημένες τιμές είναι οι Freshwater eutrophication και Freshwater και Marine ecotoxicity. Οι πιο υψηλές τιμές σε αυτές τις κατηγορίες σε σχέση με τις υπόλοιπες οφείλονται στην απόθεση της λυματολάσπης σε ΧΥΤΑ

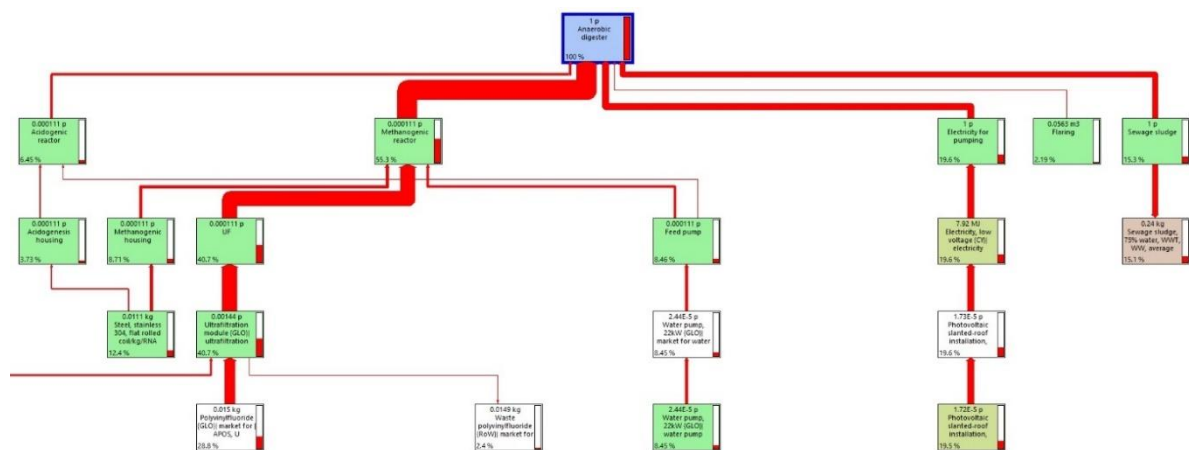
για τους λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω, ήτοι στα θρεπτικά συστατικά (κυρίως φώσφορο) και τις τοξικές ουσίες τις οποίες απελευθερώνει μέσω των διασταλλαγμάτων των ΧΥΤΑ.



Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H / Normalization
Analyzing 1 p 'Anaerobic digester';

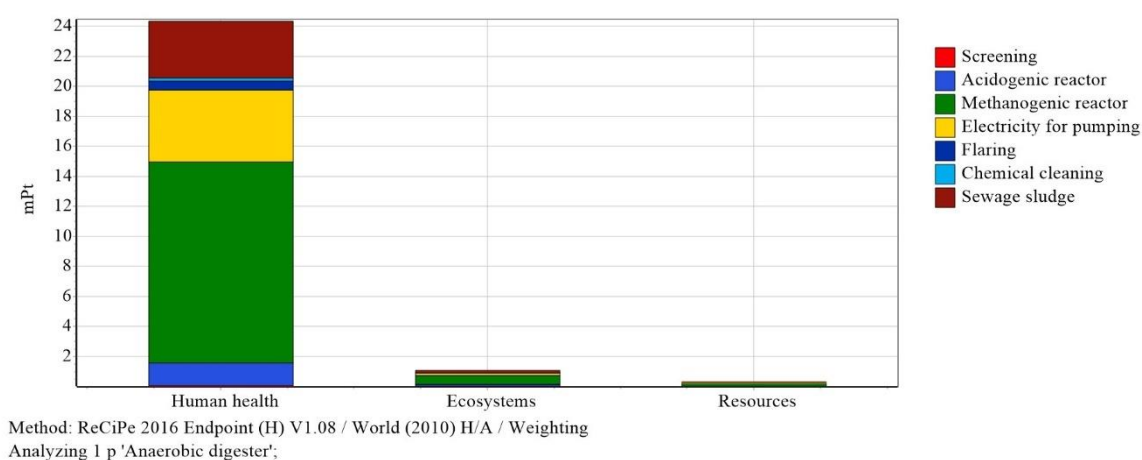
Διάγραμμα 6: Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα του ανανεωμένου σεναρίου (χρήση ΑΠΕ) στο μέσο σημείο (μεθόδος ReCiPe) και η συνεισφορά κάθε σταδίου σε κάθε μια από τις εξεταζόμενες κατηγορίες.

Όσον αναφορά στη συμμετοχή του κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, είναι άξιο αναφοράς ότι το κύριο περιβαλλοντικό hotspot είναι πλέον οι μεμβράνες υπερδιήθησης, με συμμετοχή μεγαλύτερη του 40% (από μικρότερη του 10% στο αρχικό σενάριο), όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 7**. Από την άλλη πλευρά, η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (ηλιακή ενέργεια) συμμετέχει πλέον περί του 20% του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος (από περισσότερο από 80% στο αρχικό σενάριο). Ως αποτέλεσμα της μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του σταδίου κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, το ποσοστό (%) συμμετοχής όλων των υπόλοιπων σταδίων στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα παρουσιάζεται αυξημένο (**Διάγραμμα 7**).



Διάγραμμα 7: Δενδρόγραμμα των κύριων διεργασιών του AnMBR όταν η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από ΑΠΕ (ηλιακή ενέργεια) και η συνεισφορά (%) του κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Τέλος, όσον αναφορά τα αποτελέσματα στο τελικό σημείο, ομοίως με το ανθρακικό αποτύπωμα, μια πολύ υψηλή μείωση στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα παρατηρήθηκε με τη χρήση ΑΠΕ, ήτοι περί το 80%, από 115 mPt σε 26 mPt (**Διάγραμμα 8**). Παρ' όλα αυτά, η κατηγορία τελικού σημείου που κυρίως επηρεάζεται από το υπό εξέταση σύστημα είναι ξανά η ανθρώπινη υγεία, όπως και στο αρχικό σενάριο. Το στάδιο με την υψηλότερη συμμετοχή στην κατηγορία αυτή είναι το στάδιο της μεθανογένεσης, το οποίο οφείλεται κυρίως στις μεμβράνες υπερδιήθησης, ακολουθούμενο από το στάδιο της ηλεκτρικής ενέργειας (PV electricity), και το στάδιο της λυματολάσπης. Τα επόμενα στάδια έχουν πολύ μικρή συμμετοχή, τόσο στην κατηγορία της ανθρώπινης υγείας όσο και στις υπόλοιπες κατηγορίες.



Διάγραμμα 8: Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο τελικό σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού νοσοκομειακού αποβλήτου.

3.2 Αερόβιος βιοαντιδραστήρας

3.2.1 Υποθέσεις σχετικά με τα δεδομένα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Για τη μοντελοποίηση του αερόβιου αντιδραστήρα βιοφίλμ κινούμενης κλίνης (MBBR) τα κύρια στάδια που εξετάστηκαν είναι ο ίδιος ο αντιδραστήρας, οι αντλίες, οι σωληνώσεις, οι φυσητήρες, και οι φορείς βιοφίλμ. Όσον αναφορά τον αντιδραστήρα, το υλικό (ανοξειδωτο ατσάλι) όσο και το στάδιο κατασκευής του (ηλεκτροσυγκόλληση) συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση, όπως επίσης και η μεταφορά του και το στάδιο μετά το τέλος ζωής του, ήτοι 90% της μάζας του ανακυκλώνεται και 10% καταλήγει σε ΧΥΤΑ. Ο ωφέλιμος χρόνος ζωής του αντιδραστήρα είναι μεγαλύτερος από 25 χρόνια και συνεπώς δεν απαιτείται η αντικατάσταση κατά την διάρκεια ζωής της μονάδας. Το ίδιο ισχύει και για της σωληνώσεις, όπου ομοίως το

υλικό κατασκευής τους, η μεταφορά τους, και η ανακύκλωση και απόθεση μέρους τους σε ΧΥΤΑ λήφθηκαν υπόψη (χρόνος ζωής > 25 χρόνια).

Η αντλία τροφοδοσίας των λυμάτων μοντελοποιήθηκε όπως στην περίπτωση του AnMBR (μέσος χρόνος ζωής 10 έτη). Για τους φυσητήρες, το υλικό κατασκευής και η ανακύκλωση/απόθεση σε ΧΥΤΑ λήφθηκε υπόψη (χρόνος ζωής > 25 χρόνια), ενώ για την αντλία αερισμού, αυτή μοντελοποιήθηκε όπως η αντλία τροφοδοσίας των λυμάτων στην περίπτωση του AnMBR, αλλά χρησιμοποιώντας τον ονομαστικό βαθμό ισχύς της (rated power). Για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ως χρόνος αερισμού (retention time) τέσσερις (4) ώρες λειτουργίας λήφθηκαν υπόψη. Στην ανάλυση συμπεριλαμβάνονται και οι πλαστικοί φορείς βιοφίλμ (plastic carriers), οι οποίοι θεωρήθηκε ότι είναι κατασκευασμένοι από ανακυκλωμένο πλαστικό και συνεπώς μετά τον ωφέλιμο χρόνο ζωής τους καταλήγουν σε ΧΥΤΑ. Τέλος, για την μεταφορά όλων των υλικών κατασκευής της μονάδας η οδική μεταφορά τους λήφθηκε υπόψη (freight lorry, EURO5 emissions standard).

3.2.2 Αποτελέσματα στο μέσο σημείο

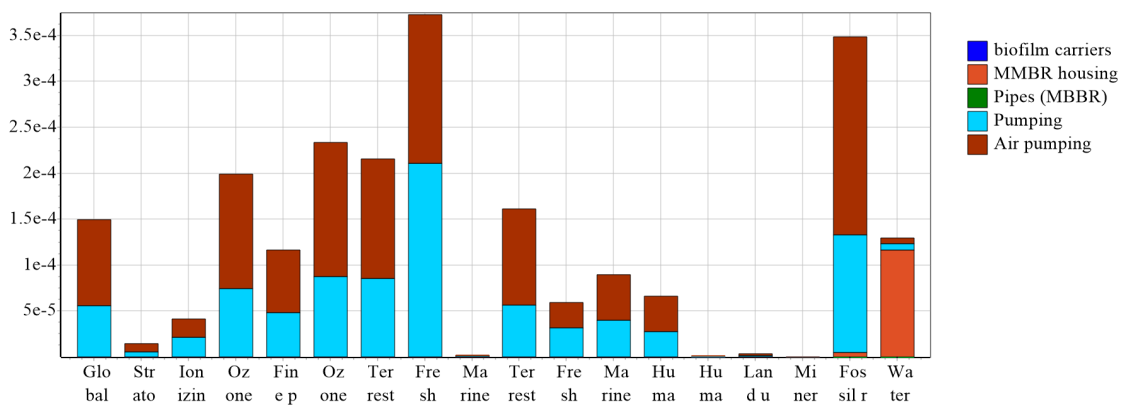
Τα αποτελέσματα στο μέσο σημείο (ReCiPe, midpoint level, Hierarchist perspective) για την επεξεργασία ενός (1) κυβικού μέτρου (m³) πραγματικού νοσοκομειακού υγρού αποβλήτου από τον MBBR παρουσιάζονται στον **Πίνακα 12**. Στη περίπτωση του MBBR, το ανθρακικό αποτύπωμα (κατηγορία Global warming) είναι περί το μισό σε σχέση με τον AnMBR, καθώς αυτό ανέρχεται σε 1.2 kg CO₂ eq ανα κυβικό μέτρο αποβλήτου (από 2.7 kg CO₂ eq ανα κυβικό μέτρο αποβλήτου στον AnMBR). Ομοίως, οι υπόλοιπες κατηγορίες της μεθόδου LCIA ReCiPe για τον MBBR παρουσιάζουν μικρότερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές του AnMBR, και συνεπώς παρουσιάζουν μικρότερες κανονικοποιημένες τιμές από αυτές του AnMBR (**Πίνακας 12**). Ο λόγος είναι διπτός, αφενός τα υλικά κατασκευής για τους δύο αντιδραστήρες είναι παρόμοια αλλά η μάζα τους για την κατασκευή του MBBR είναι μικρότερη από την μάζα τους για την κατασκευή του AnMBR και αφετέρου, και πιο σημαντικά, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την λειτουργία του MBBR είναι μικρότερη από αυτή για τη λειτουργία του AnMBR. Παρ' όλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι η σύγκριση μεταξύ του AnMBR και MBBR, όπως και η σύγκριση μεταξύ όλων των φάσεων της συνολικής μονάδας, δεν μπορεί να είναι άμεση, καθώς κάθε φάση επεξεργάζεται νοσοκομειακό απόβλητο με διαφορετικά χαρακτηριστικά, ενώ επιτυγχάνονται και διαφορετικές απομακρύνσεις σε κάθε φάση.

Πίνακας 12: Τα αποτελέσματα (characterization και normalization) της ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού λύματος από τον MBBR.

Impact category	Characterization	Normalization
Global warming	1,19E+00 kg CO ₂ eq	1,49E-04
Stratospheric ozone depletion	8,85E-07 kg CFC11 eq	1,48E-05
Ionizing radiation	1,99E-02 kBq Co-60 eq	4,13E-05

Ozone formation, Human health	4,10E-03 kg NOx eq	1,99E-04
Fine particulate matter formation	2,98E-03 kg PM2.5 eq	1,17E-04
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	4,15E-03 kg NOx eq	2,33E-04
Terrestrial acidification	8,85E-03 kg SO2 eq	2,16E-04
Freshwater eutrophication	2,42E-04 kg P eq	3,73E-04
Marine eutrophication	9,58E-06 kg N eq	2,08E-06
Terrestrial ecotoxicity	2,45E+00 kg 1,4-DCB	1,61E-04
Freshwater ecotoxicity	1,50E-03 kg 1,4-DCB	5,95E-05
Marine ecotoxicity	3,90E-03 kg 1,4-DCB	8,97E-05
Human carcinogenic toxicity	6,79E-04 kg 1,4-DCB	6,60E-05
Human non-carcinogenic toxicity	3,56E-02 kg 1,4-DCB	1,14E-06
Land use	2,20E-02 m ² a crop eq	3,57E-06
Mineral resource scarcity	1,41E-02 kg Cu eq	1,18E-07
Fossil resource scarcity	3,42E-01 kg oil eq	3,48E-04
Water consumption	3,45E-02 m ³	1,29E-04

Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα (Πίνακας 12 και Διάγραμμα 9) για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού υγρού αποβλήτου από τον MBBR δεν εμφανίζουν κάποια ακραία τιμή και, σε σχετικά επίπεδα, εμφανίζονται να είναι χαμηλές, όπως ήταν και η περίπτωση για τον AnMBR. Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα κυριαρχούνται από τα στάδια άντλησης των υδάτων και του αερισμού, και δη από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την λειτουργία των αντίστοιχων αντλιών. Συγκεκριμένα, η συμμετοχή των αντλιών, ως υλικά, παρουσιάζει μια σχετικά μικρή συμμετοχή σε σχέση με την συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία κυριαρχεί σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες (βλέπε τα αποτελέσματα στο τελικό σημείο για περισσότερες πληροφορίες).



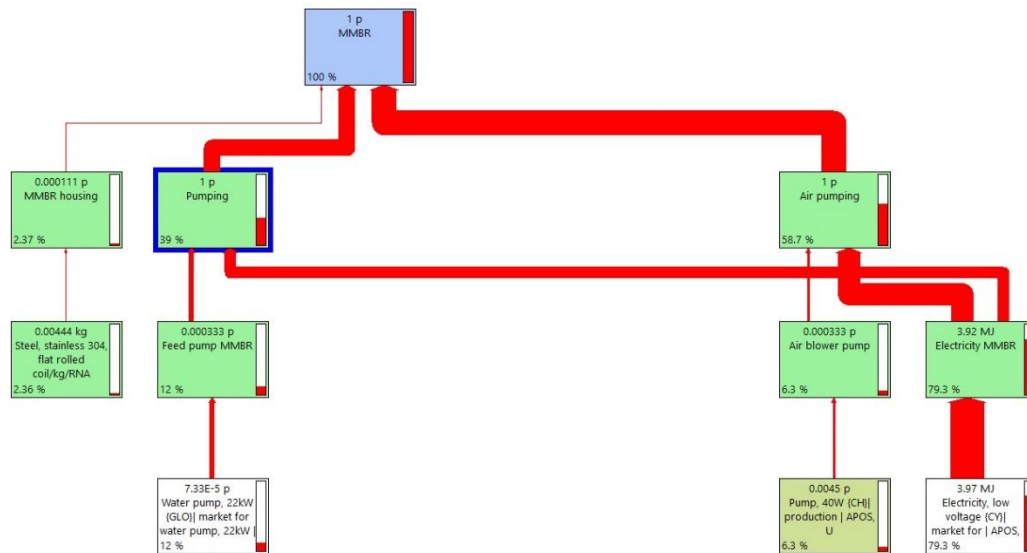
Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H / Normalization
Analyzing 1 p 'MMBR';

Διάγραμμα 9: Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα της μονάδας MBBR για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού υγρού αποβλήτου.

3.2.3 Αποτελέσματα στο τελικό σημείο

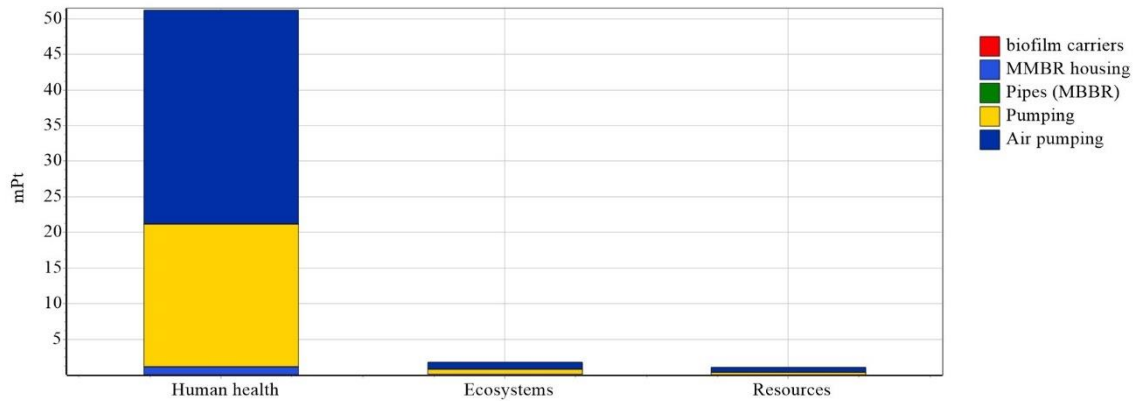
Όσον αναφορά το κύριο περιβαλλοντικό hotspot, αυτό είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, όπως και στην περίπτωση του AnMBR, καθώς η λειτουργία του MBBR είναι σχετικά ενεργοβόρα σε σχέση με τα υλικά κατασκευής του, των οποίων η μάζα είναι πολύ μικρή ανά λειτουργική μονάδα και ως υλικά δεν σχετίζονται με επικίνδυνες και τοξικές εκπομπές. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο **Διάγραμμα 10**, το στάδιο της άντλησης υδάτων και κυρίως το στάδιο αερισμού έχουν τη μεγαλύτερη συμμετοχή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της MBBR μονάδας, ήτοι 39 και 59% αντιστοίχως. Η συμμετοχή των δυο αυτών σταδίων αφορά κυρίως στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το ενεργειακό μείγμα της Κύπρου, καθώς τα υλικά κατασκευής τους (αντλία τροφοδοσίας και αερισμού) έχουν μια σχετικά μικρή συμμετοχή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Συγκεκριμένα, η αντλία τροφοδοσίας συμμετέχει με περίπου 12% στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα ενώ η αντλία αερισμού με περίπου 6%. Ο λόγος της μεγαλύτερης συμμετοχής της αντλίας τροφοδοσίας είναι η σημαντικά μεγαλύτερη μάζα της, καθώς η απόδοση της είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή της αντλίας αερισμού. Παρ' όλο που η αντλία τροφοδοσίας χρησιμοποιείται πολύ λιγότερο από την αντλία αερισμού, ο χρόνος ζωής της υπολογίστηκε στα 10 χρόνια όπως και της αντλίας αερισμού. Είναι πιθανό, ο ωφέλιμος χρόνος ζωής να είναι υψηλότερος από τα 10 χρόνια και συνεπώς να απαιτείται λιγότερο συχνή αντικατάσταση, το οποίο θα μεταφραστεί σε μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Από την άλλη πλευρά, η κατανάλωση ενέργειας είναι το κύριο περιβαλλοντικό hotspot (ηλεκτρικής ενέργειας από το ενεργειακό μείγμα της Κύπρου), με συμμετοχή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα κοντά στο 80% (**Διάγραμμα 10**). Η συμμετοχή της αντλίας τροφοδοσίας και την αντλίας αερισμού είναι ανάλογη της κατανάλωσης ενέργειας τους ανά λειτουργική μονάδα. Τα υπόλοιπα στάδια έχουν πολύ μικρή έως αμελητέα συμμετοχή (π.χ. οι φορείς βιοφίλμ και οι σωληνώσεις έχουν συμμετοχή μικρότερη από 0,5% στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα).



Διάγραμμα 10: Δενδρόγραμμα των κύριων διεργασιών του MBBR όταν η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από ΑΠΕ (ηλιακή ενέργεια) και η συνεισφορά (%) του κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Ως αποτέλεσμα, το περιβαλλοντικό προφίλ της μονάδας MBBR κυριαρχείται από τις επιπτώσεις κατανάλωσής ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου και, ομοίως με τον AnMBR, η κατηγορία τελικού σημείου που επηρεάζεται περισσότερο είναι η ανθρώπινη υγεία (**Διάγραμμα 11**) για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι υπόλοιπες κατηγορίες τελικού σημείου παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερες τιμές καθώς δεν επηρεάζονται σημαντικά από τα υλικά κατασκευής της μονάδας MBBR. Το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της μονάδας MBBR ανά λειτουργική μονάδα ανέρχεται σε 57 mPt, σημαντικά μικρότερο σε σχέση με αυτό του AnMBR. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η επεξεργασία με τον MBBR απαιτεί και λιγότερη ενέργεια αλλά και λιγότερες πρώτες ύλες ανά λειτουργική μονάδα (π.χ. δεν χρησιμοποιούνται μεμβράνες).



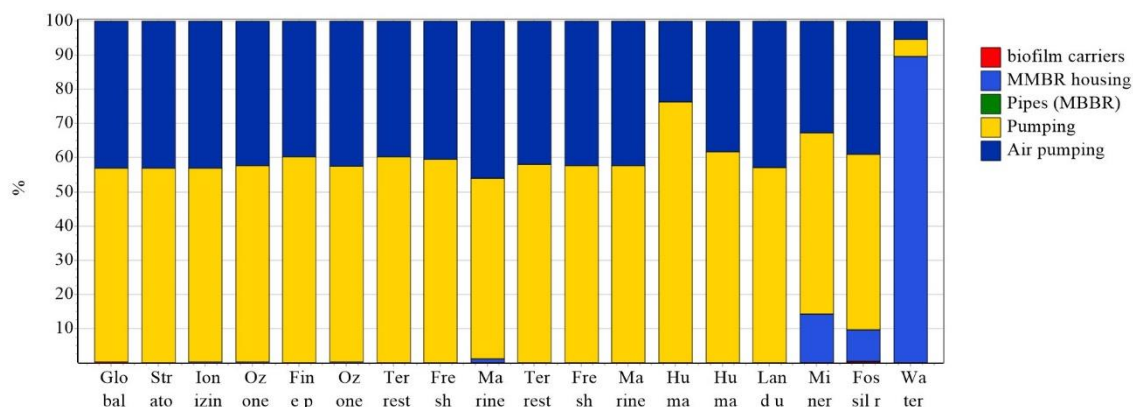
Method: ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.08 / World (2010) H/A / Weighting
Analyzing 1 p 'MMBR';

Διάγραμμα 11: Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο τελικό σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού αποβλήτου από τον MBBR.

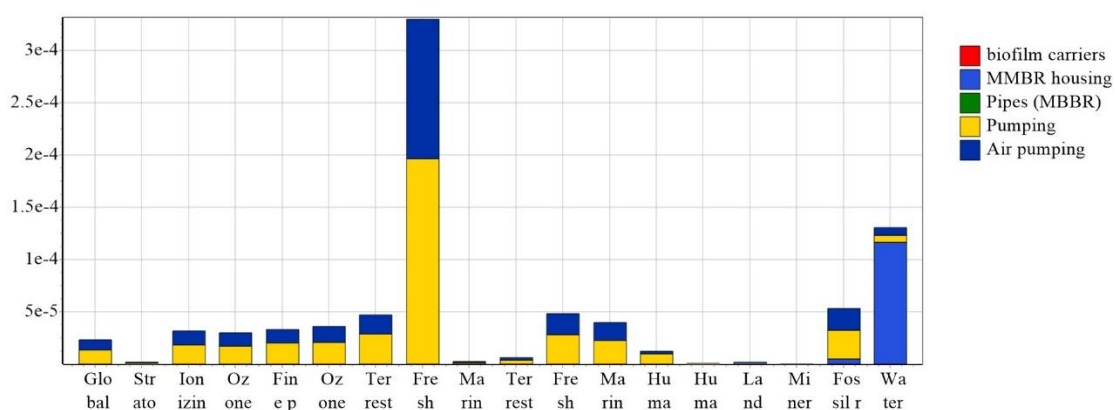
3.2.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Όπως ήταν και η περίπτωση με τον AnMBR, το κύριο περιβαλλοντικό hotspot του MBBR είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου, ήτοι η καύση πετρελαίου (oil) για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Συνεπώς, για τη βελτίωση της βιωσιμότητας του MBBR, ομοίως η ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά στέγης (3 kWp multi-Si panels, slanted-roof installation) θεωρήθηκε ότι καλύπτουν το 100% των αναγκών της μονάδας. Ως αποτέλεσμα, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα του MBBR βελτιώνεται σημαντικά, με όλες τις κατηγορίες μέσου σημείου να παρουσιάζουν σημαντική μείωση ανά λειτουργική μονάδα (π.χ. το ανθρακικό αποτύπωμα στην περίπτωση αυτή ανέρχεται σε 0,188 kg CO₂ eq ανα m³ αποβλήτου).

Και στην περίπτωση αυτή, το στάδιο της άντλησης υδάτων και αερισμού έχουν τη μεγαλύτερη συμμετοχή, αλλά όχι εξαιτίας της κατανάλωσης ενέργειας, αλλά εξαιτίας των αντλιών ως υλικά (βλέπε παρακάτω). Τα υπόλοιπα στάδια παρουσιάζουν πολύ μικρή έως αμελητέα συμμετοχή σε όλες τις εξεταζόμενες κατηγορίες (**Διάγραμμα 12^α**). Το ίδιο ισχύει και για τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα, τα οποία παρουσιάζουν πολύ μικρές κανονικοποιημένες τιμές. Η κατηγορία που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη κανονικοποιημένη τιμή είναι αυτή του Freshwater eutrophication (**Διάγραμμα 12^α**) και ο κύριος λόγος είναι οι αντλίες τροφοδοσίας και αερισμού και δη το υλικό κατασκευής τους. Συγκεκριμένα, το κύριο υλικό του ηλεκτροκίνητηρα των μαγνητών είναι ο χαλκός του οποίου η εξόρυξη και επεξεργασία εκτός του ότι είναι ενεργοβόρα, οδηγεί επίσης στην απελευθέρωση φωσφόρου μέσω των οξεοπαραγωγών υπολειμμάτων (sulfidic tailings) που παράγονται.



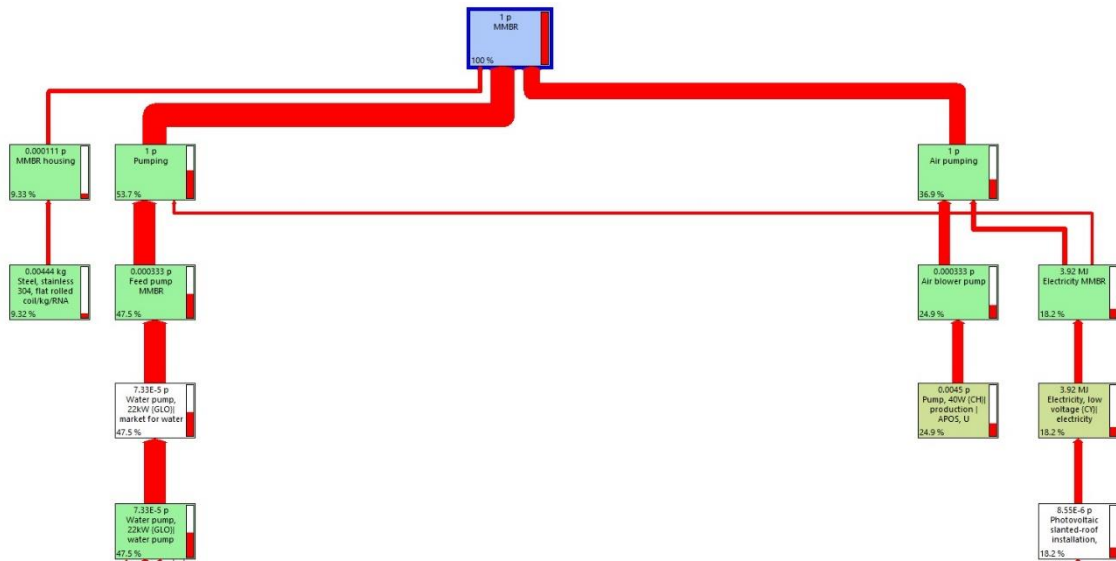
Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H / Characterization
Analyzing 1 p 'MMBR';



Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H / Normalization
Analyzing 1 p 'MMBR';

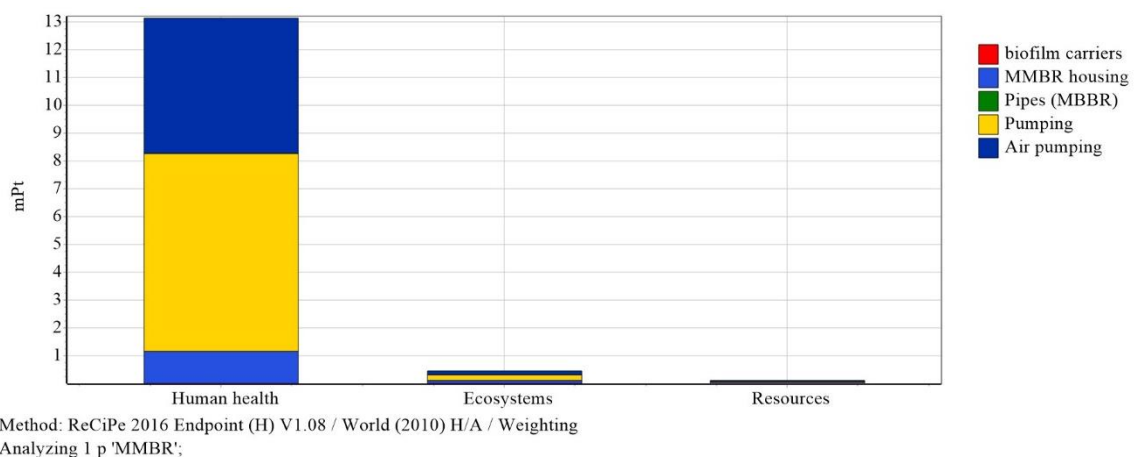
Διάγραμμα 12: α) Τα αποτελέσματα της ReCiPe στο μέσο σημείο (επάνω) και β) τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα (κάτω), όταν χρησιμοποιείται ενέργεια από ΑΠΕ.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το στάδιο άντλησης υδάτων και αερισμού έχουν τη μεγαλύτερη συμμετοχή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, αλλά σε αυτή την περίπτωση εξαιτίας των ίδιων των αντλιών. Συγκεκριμένα, η αντλία τροφοδοσίας, η οποία έχει τη μεγαλύτερη ισχύ και συνεπώς μεγαλύτερη μάζα, συμμετέχει με 47.5% στο συνολικό αποτύπωμα, ενώ η αντλία αερισμού με σχεδόν 25% (**Διάγραμμα 13**).



Διάγραμμα 13: Δενδρόγραμμα με την συμμετοχή κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της MBBR μονάδας όταν χρησιμοποιείτε ενέργεια από ΑΠΕ.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα στο τελικό σημείο, μια σημαντική μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος παρατηρείται, καθώς αυτό ανέρχεται σε μόλις 13.7 mPt. Ξανά η κατηγορία της ανθρώπινης υγείας κυριαρχεί στα αποτελέσματα, ενώ οι υπόλοιπες κατηγορίες παρουσιάζουν ξανά πολύ μικρές τιμές σε σχέση με αυτή της ανθρώπινης υγείας. **(Διάγραμμα 14)**. Συνολικά, η χρήση ενέργειας από ΑΠΕ βελτιώνει σημαντικά το περιβαλλοντικό προφίλ της μονάδας MBBR και για το λόγο αυτό σε μελλοντικά μεγαλύτερα συστήματα (scale up systems) προτείνεται η χρήση της.



Διάγραμμα 14: Το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της MBBR μονάδας όταν χρησιμοποιείται ενέργεια από ΑΠΕ.

3.3 Φυτοεξυγίανση με φυτά *Lemna minor*

3.3.1 Υποθέσεις σχετικά με τα δεδομένα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Η φάση φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* ουσιαστικά πραγματοποιείται από τα ίδια τα φυτά *Lemna minor*, με την καλλιέργεια και τη συλλογή των φυτών να πραγματοποιείται χειροκίνητα. Συνεπώς, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της φάσης αυτής αναμένεται να είναι μειωμένο εν συγκρίσει με τις προηγούμενες δυο φάσεις, ήτοι AnMBR και MBBR. Συγκεκριμένα, στην ανάλυση περιλαμβάνονται οι λεκάνες πολυαιθυλενίου (συνολικός όγκος 300L, ωφέλιμος όγκος 125L, συνολικά 24 λεκάνες), ήτοι το υλικό κατασκευής τους, η μεταφορά τους (χρησιμοποιώντας EURO5 emissions standard freight lorry, όπως και στην περίπτωση των υπόλοιπων υλικών), και το στάδιο μετά το τέλος ζωής του, ήτοι 90% της μάζας του ανακυκλώνεται και 10% καταλήγει σε ΧΥΤΑ, όπως και στην περίπτωση των υπόλοιπων υλικών. Για τη μοντελοποίηση τους η παραγωγή σωλήνων πολυαιθυλενίου (polyethylene pipe production, weight 3kg/m) χρησιμοποιήθηκε ως αντιπροσωπευτικό δεδομένο (proxy data). Ένα επίσης σημαντικό στάδιο είναι οι βάσεις στήριξης των λεκάνων πολυαιθυλενίου, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από σίδηρο. Τόσο το υλικό κατασκευής τους (cast iron), η μεταφορά και το στάδιο μετά το τέλος ζωής τους λήφθηκε υπόψη, όσο και το βάψιμο τους (alkyd paint, ανά 5 έτη) για την αποφυγή της οξειδωσης. Στις βάσεις περιλαμβάνεται και η ανακλινόμενη κατασκευή για την κάλυψη των λεκανών.

Το σύστημα χρησιμοποιεί την ίδια αντλία για την τροφοδοσία και ανακυκλοφορία του αποβλήτου (EBARA 3M 32-160/1,5, 1,1 – 2,2 kW, 22 kg), η οποία μοντελοποιήθηκε όπως στα προηγούμενα (κανονικοποιημένα δεδομένα κύκλου ζωής από τη βιβλιοθήκη Ecoinvent για water pump 22 kW). Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου μοντελοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη ταχύτητα ροής (low rate) 50 L ανά λεπτό για την αντλία τροφοδοσίας και 15 L ανά λεπτό για την αντλία ανακυκλοφορίας. Οι σωληνώσεις είναι και σε αυτή την περίπτωση εξωθημένοι πλαστικοί σωλήνες (extruded plastic pipes), αλλά η μάζα τους είναι σημαντικά υψηλότερη καθώς το συνολικό μήκος τους είναι σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό των προηγούμενων σταδίων. Ομοίως, το υλικό τους, η μεταφορά τους, και η ανακύκλωση/υγειονομική ταφή τους (ωφέλιμος χρόνος ζωής > 25 έτη) μετά το τέλος ζωής της μονάδας λήφθηκε υπόψη. Τέλος, το διάφανο δίχτυ προστασίας των λεκανών έχει πολύ μικρή μάζα και για τον λόγο αυτό δεν περιλαμβάνεται στην ανάλυση.

3.3.2 Αποτελέσματα στο μέσο σημείο

Τα αποτελέσματα της φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* στο μέσο σημείο παρουσιάζονται στον **Πίνακα 13** και στο **Διάγραμμα 15**. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της φάσης φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* είναι σχετικά παρόμοια με αυτά της φάσης MBBR (π.χ. ανθρακικό αποτύπωμα 1,67 kg CO₂ eq). Ο κύριος λόγος είναι ότι και στα δύο στάδια

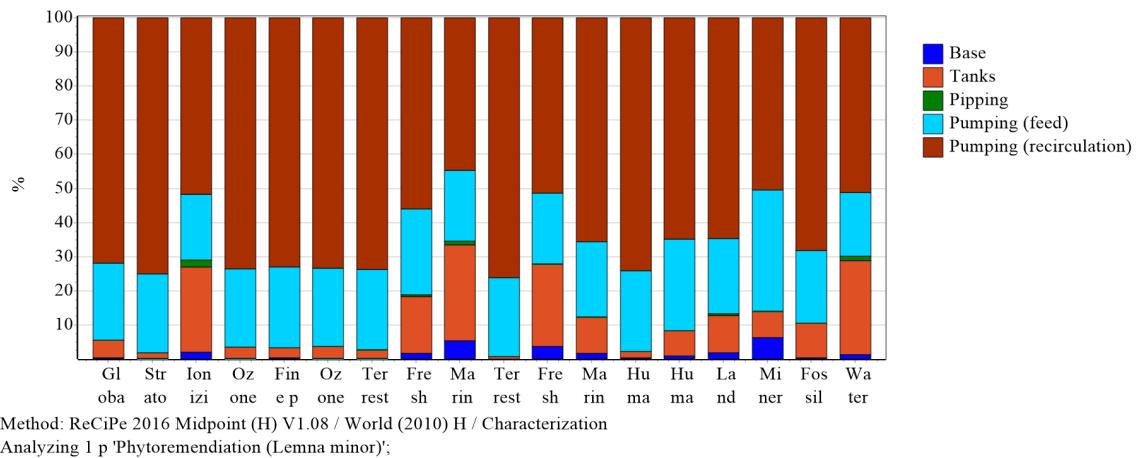
καταναλώνεται σχετικά παρόμοιο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας, στην περίπτωση του MBBR για την τροφοδοσία και αερισμό των λυμάτων και στην περίπτωση της φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* για την τροφοδοσία και ανακυκλοφορία των λυμάτων. Ως αποτέλεσμα παρόμοιες με αυτές που παρατηρήθηκαν σε κάθε κατηγορία για τον MBBR παρατηρούνται και στην φάση φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* για τους λόγους που προαναφέρθηκαν.

Πίνακας 13: Τα αποτελέσματα (characterization και normalization) της ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού λύματος μέσω φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor*.

Impact category	Characterization	Normalization
Global warming	1,67E+00 kg CO ₂ eq	2,09E-04
Stratospheric ozone depletion	1,23E-06 kg CFC11 eq	2,05E-05
Ionizing radiation	2,23E-02 kBq Co-60 eq	4,63E-05
Ozone formation, Human health	5,60E-03 kg NO _x eq	2,72E-04
Fine particulate matter formation	3,59E-03 kg PM2.5 eq	1,41E-04
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	5,67E-03 kg NO _x eq	3,19E-04
Terrestrial acidification	1,12E-02 kg SO ₂ eq	2,73E-04
Freshwater eutrophication	1,66E-04 kg P eq	2,55E-04
Marine eutrophication	7,58E-06 kg N eq	1,65E-06
Terrestrial ecotoxicity	3,50E+00 kg 1,4-DCB	2,31E-04
Freshwater ecotoxicity	1,38E-03 kg 1,4-DCB	5,50E-05
Marine ecotoxicity	4,57E-03 kg 1,4-DCB	1,05E-04
Human carcinogenic toxicity	8,86E-04 kg 1,4-DCB	8,60E-05
Human non-carcinogenic toxicity	2,48E-02 kg 1,4-DCB	7,94E-07
Land use	2,57E-02 m ² a crop eq	4,17E-06
Mineral resource scarcity	4,14E-03 kg Cu eq	3,45E-08
Fossil resource scarcity	5,05E-01 kg oil eq	5,15E-04
Water consumption	4,01E-03 m ³	1,50E-05

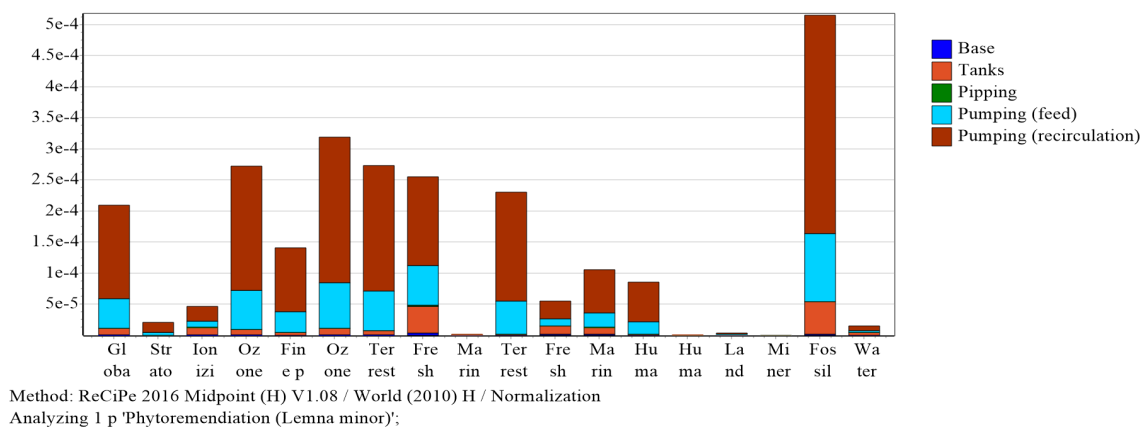
Από το **Διάγραμμα 15**, είναι ξεκάθαρο ότι το στάδιο που έχει τη μεγαλύτερη συμμετοχή είναι η ανατροφοδοσία του λύματος μέσα στις λεκάνες, και συγκεκριμένα η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται για την επίτευξη της. Το στάδιο που έχει τη δεύτερη μεγαλύτερη συμμετοχή είναι αυτό της αρχικής άντλησης του λύματος, η συμμετοχή του οποίου οφείλεται ξανά στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και σε πολύ μικρότερο βαθμό στην αντλία τροφοδοσίας. Όπως προαναφέρθηκε, ο λόγος της μεγάλης συμμετοχής της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε όλες τις εξεταζόμενες κατηγορίες οφείλεται στο γεγονός ότι το ενεργειακό μείγμα της Κύπρου βασίζεται κυρίως σε ορυκτά καύσιμα, ενώ η σχετικά μικρή συμμετοχή (δες παρακάτω) των αντλιών βασίζεται, εν μέρη, στο γεγονός ότι η ίδια αντλία χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία και ανακυκλοφορία των λυμάτων. Σχετικά υψηλή συμμετοχή παρουσιάζουν οι πλαστικές λεκάνες, εξαιτίας του υλικού κατασκευής τους και της ανάγκης αντικατάστασης

τους κατά την διάρκεια ζωής της μονάδας. Από την άλλη μεριά, η βάση των λεκανών παρουσιάζει μια σχετικά μικρή έως αμελητέα συμμετοχή σε όλες τις κατηγορίες (**Διάγραμμα 15 Εικόνα 19**).



Διάγραμμα 15: Τα αποτελέσματα για την φυτοεξυγίανση με φυτά *Lemna minor* στο μέσο σημείο.

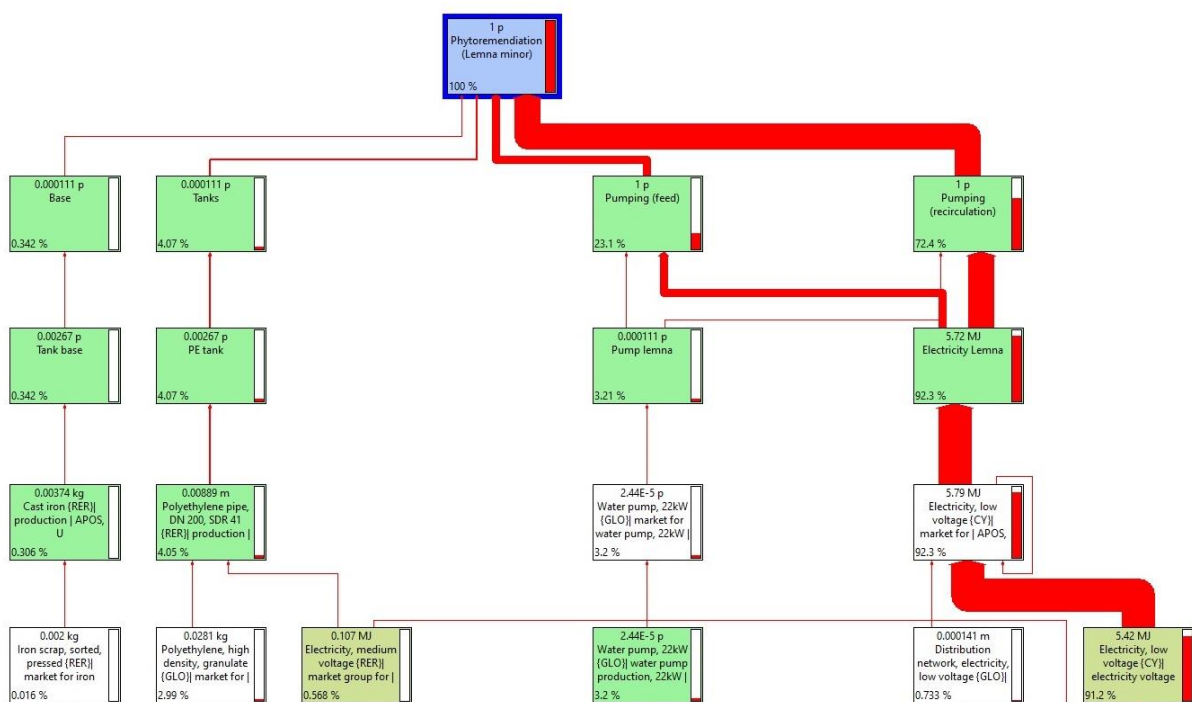
Όσον αναφορά τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα (**Διάγραμμα 16**), αυτά παρουσιάζουν χαμηλές τιμές, όπως ήταν και η περίπτωση για τα προηγούμενα στάδια, με την κατηγορία με τη μεγαλύτερη κανονικοποιημένη τιμή να είναι η Fossil resource scarcity. Αυτό ομοίως μεταφράζεται στο ότι η φάση φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* δεν σχετίζεται με κάποια σημαντική περιβαλλοντική επιβάρυνση ούτε οδηγεί σε επικίνδυνες και τοξικές εκπομπές, το οποίο θα οδηγούσε σε ακραίες τιμές κάποιες από τις εξεταζόμενες κατηγορίες. Όσον αναφορά την επιβάρυνση της κατηγορίας Fossil resource scarcity, αυτή κυρίως οφείλεται στην κατανάλωση πετρελαίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και σε μικρότερο βαθμό από την διαδικασία παραγωγής των λεκανών, η οποία είναι ενεργοβόρα και συνεπώς καταναλώνεται ορυκτά καύσιμα (**Διάγραμμα 16**).



Διάγραμμα 16: Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe για την επεξεργασία ενός m³ νοσοκομειακού λύματος μέσω φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor*.

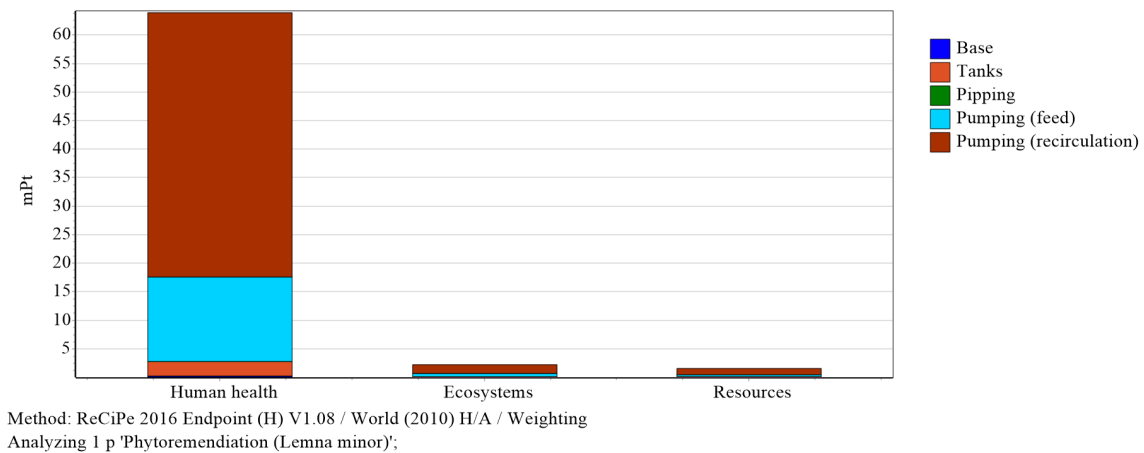
3.3.3 Αποτελέσματα στο τελικό σημείο

Όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 17** το κύριο περιβαλλοντικό hotspot της φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι υπεύθυνη για το 92% του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, με την αντλία τροφοδοσίας και ανακυκλοφορίας να συμμετέχουν ανάλογα με την κατανάλωση ενέργειας τους. Οι λεκάνες είναι το στάδιο με τη δεύτερη μεγαλύτερη συμμετοχή, αλλά κατά μια τάξη μικρότερη από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, ήτοι περί το 4% στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Τα υπόλοιπα στάδια έχουν πολύ μικρή έως αμελητέα συμμετοχή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.



Διάγραμμα 17: Το δενδρόγραμμα με την συμμετοχή κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor*.

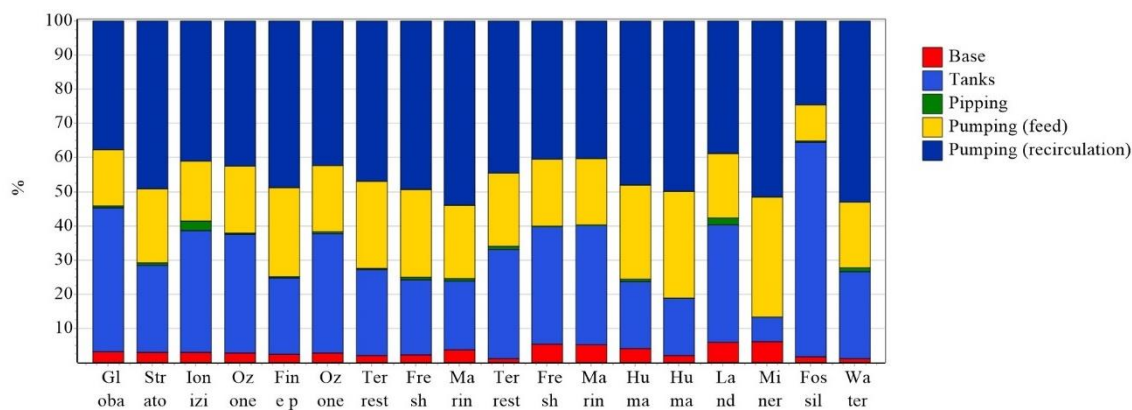
Όσον αναφορά το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* αυτό ανέρχεται σε περίπου 69 mPt, με την κατηγορία που κυρίως επηρεάζεται να είναι η ανθρώπινη υγεία (**Διάγραμμα 18**). Ο κύριος λόγος είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενη από καύση ορυκτών καυσίμων, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Όπως αναμενόταν οι υπόλοιπες δυο κατηγορίες παρουσιάζουν πολύ μικρότερες τιμές, καθώς η φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor*, όπως άλλωστε και όλες οι υπόλοιπες φάσεις επεξεργασίας των νοσοκομειακών λυμάτων δεν περιέχουν στάδια τα οποία επηρεάζουν σημαντικά τις κατηγορίες για το οικοσύστημα και των πόρων (resources).



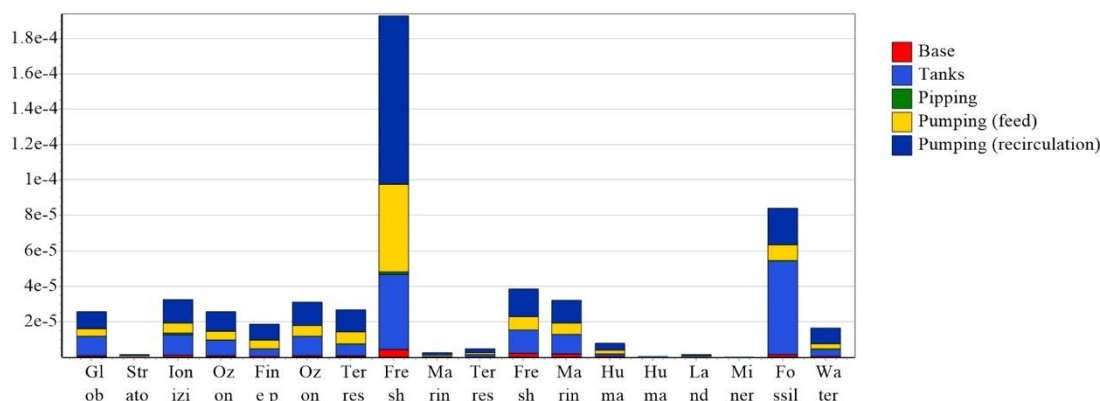
Διάγραμμα 18: Τα αποτελέσματα στο τελικό σημείο και το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor*.

3.3.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Ομοίως και για αυτή τη φάση επεξεργασίας η ανάλυση ευαισθησίας/σεναρίου εστιάστηκε στη χρήση ενέργειας από ΑΠΕ. Τα αποτελέσματα στο μέσο σημείο είναι αναμενόμενα, καθώς οι τιμές του πλήθους των κατηγορίες είναι σημαντικά μειωμένες. Ξανά η κατηγορία της ανακυκλοφορίας λόγω της σχετικά υψηλής κατανάλωσης ενέργειας και σε μικρότερο βαθμό της αντλίας ως υλικό (ο ηλεκτρομαγνήτης χρησιμοποιεί σχετικά υψηλές ποσότητες χαλκού). Οι λεκάνες είναι το δεύτερο περιβαλλοντικό hotspot, λόγω του υλικού κατασκευής του, ακολουθούμενες από το στάδιο άντλησης των λυμάτων (λόγο κατανάλωσης ενέργειας και της αντλίας ως υλικό) (**Διάγραμμα 19 α**). Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα παρουσιάζονται σημαντικά μειωμένα σε σχέση με το αρχικό σενάριο, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο. Η υψηλότερη τιμή της κατηγορίας Freshwater eutrophication σε σχέση με τις υπόλοιπες οφείλεται στην χρήση ενέργειας και την αντλία για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τέλος, η λεκάνες συμμετέχουν τόσο στο αποτέλεσμα για την κατηγορία Freshwater eutrophication αλλά κυρίως στο αποτέλεσμα της κατηγορίας Fossil resource scarcity (**Διάγραμμα 19 α**). Ο λόγος είναι ότι τα πλαστικά παράγονται από πετροχημικά (πετρέλαιο), ήτοι είναι υπεύθυνα για την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων (ορυκτού άνθρακα).



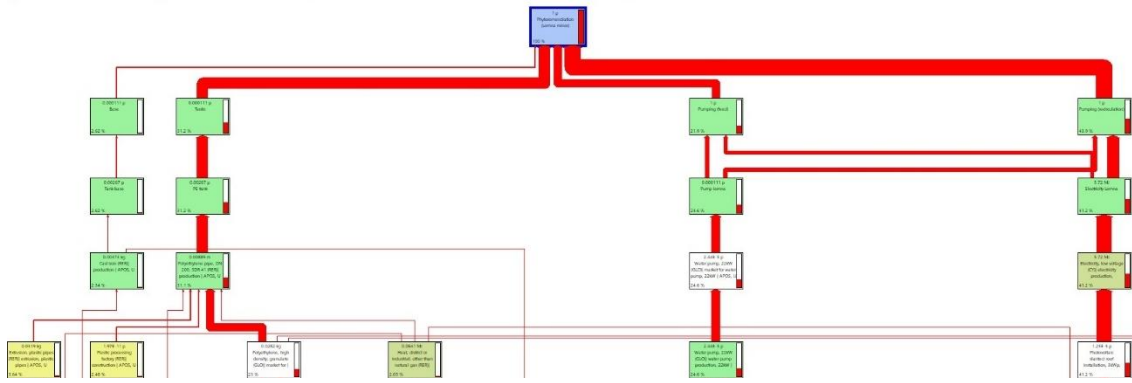
Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H / Characterization
Analyzing 1 p 'Phytoremmediation (Lemna minor)';



Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H / Normalization
Analyzing 1 p 'Phytoremmediation (Lemna minor)';

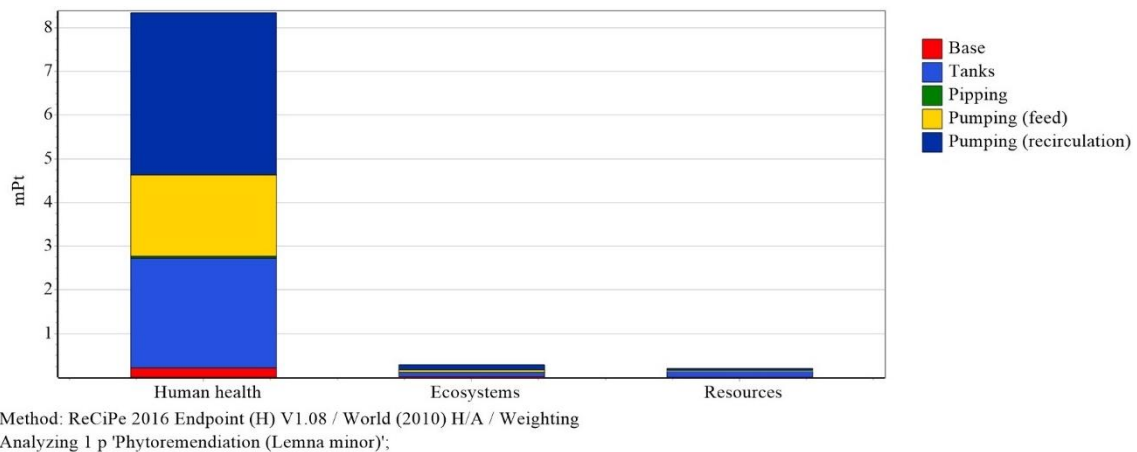
Διάγραμμα 19: α) Τα αποτελέσματα της ReCiPe στο μέσο σημείο (επάνω) και β) τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα (κάτω), του συστήματος φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* όταν χρησιμοποιείται ενέργεια από ΑΠΕ.

Η συμμετοχή του κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* όταν χρησιμοποιείται ενέργεια από ΑΠΕ παρουσιάζεται στο **Διάγραμμα 20**. Τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με αυτά για το μέσο σημείο (**Διάγραμμα 18**), καθώς το κύριο περιβαλλοντικό hotspot είναι το στάδιο ανακυκλοφορίας των λυμάτων (περίπου 44%), ακολουθούμενο από τις λεκάνες (περίπου 31%) και τέλος από το στάδιο άντλησης των λυμάτων (περίπου 22%). Οι βάσεις έχουν πολύ μικρή συμμετοχή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η συμμετοχή κάθε στάδιο οφείλεται στους λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω.



Διάγραμμα 20: Το δενδρόγραμμα με τα κύρια στάδια και την συμμετοχή τους στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της φάσης φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* όταν χρησιμοποιείτε ενέργεια από ΑΠΕ.

Τέλος, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της φάσης φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* όταν χρησιμοποιείται ενέργεια από ΑΠΕ είναι σημαντικά μειωμένο σε σχέση με το αρχικό σενάριο, καθώς αυτό ανέρχεται σε μόλις 8.8 mPt (**Διάγραμμα 21**). Ξανά, η κατηγορία της ανθρώπινης υγείας επηρεάζεται από τα στάδια που αναφέρθηκαν παραπάνω, με την συμμετοχή της στην κατηγορία αυτή να είναι παρόμοια με αυτή που φαίνεται στο δενδρογράμμα με τα κύρια στάδια της φάσης φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* όταν χρησιμοποιείται ενέργεια από ΑΠΕ (**Διάγραμμα 19**).



Διάγραμμα 21: Τα αποτελέσματα στο τελικό σημείο της φάσης φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* όταν χρησιμοποιείτε ενέργεια από ΑΠΕ.

3.4 Απολύμανση με χρήση προηγμένης οξειδωσης

3.4.1 Υποθέσεις σχετικά με τα δεδομένα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής

Το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας είναι η διεργασία προηγμένης οξειδωσης μέσω συνδυασμού H_2O_2 και UV ακτινοβολία. Ουσιαστικά, η απολύμανση επιτυγχάνεται με τη χρήση του συστήματος της εταιρίας AQUADA, από την οποία και έγινε η προμήθεια του αντίστοιχου

μοντέλου απολύμανσης UV. Για τη μοντελοποίηση αυτού του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν οι λάμπες απολύμανσης UV, οι οποίες περιέχονται ήδη στις βιβλιοθήκες του λογισμικού SimaPro, το δοχείο στέγασης του συστήματος (ανοξείδωτο ασάλι), η μεταφορά του, αλλά και η ενέργεια που καταναλώνουν οι λάμπες (περίπου 36 W/m³). Επίσης το H₂O₂ λήφθηκε από τις στις βιβλιοθήκες του λογισμικού SimaPro, ως 50% συγκέντρωση, η οποία θεωρήθηκε ότι διαλύθηκε σε υπερκάθαρο νερό για να φτάσει το 30% που χρησιμοποιεί η μονάδα. Όσον αναφορά τις σωληνώσεις και την άντληση του λύματος, αυτές θεωρήθηκαν ότι ήταν παρόμοιες με αυτές της φάσης επεξεργασίας με MBBR. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο μέσο και τελικό σημείο, όπως και η ανάλυση ευαισθησίας τους.

3.4.2 Αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο

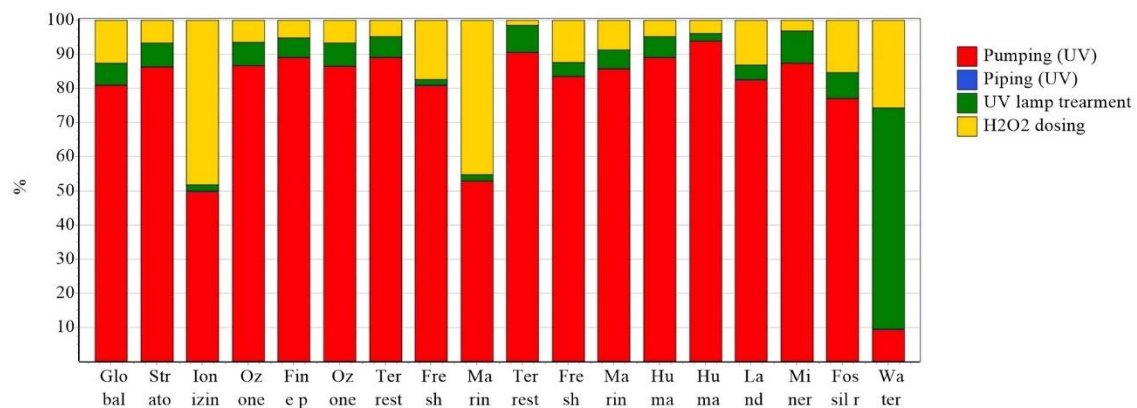
Τα αποτελέσματα της φάσης απολύμανσης με χρήση προηγμένης οξειδωσης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 14** και στο **Διάγραμμα 21**. Όπως είναι αναμενόμενο, η φάση επεξεργασίας αυτή παρουσιάζει ένα σχετικό μικρό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, ο οποίος είναι σχετικά συγκρίσιμος, αν και αρκετά μικρότερος, με αυτό της φάσης φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* (π.χ. ανθρακικό αποτύπωμα 1,67 kg CO₂ eq) και της φάσης MBBR αλλά πολύ μικρότερος από αυτό της φάσης AnMBR. Ο κύριος λόγος για τον οποίο ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του συστήματος απολύμανσης UV-H₂O₂ είναι αρκετά μικρότερος από τα υπόλοιπα στάδια είναι ότι το σύστημα Aquada UV βασίζεται στην χρήση λαμπτήρων τύπου LED, οι οποίοι είναι ιδιαίτερα ενεργειακά αποδοτικοί, σε αντίθεση με τους συμβατικούς λαμπτήρες οι οποίοι σχετίζονται με ιδιαίτερα υψηλή κατανάλωση ενέργειας.

Πίνακας 14: Τα αποτελέσματα (characterization και normalization) της ReCiPe στο μέσο σημείο για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου νοσοκομειακού λύματος μέσω απολύμανσης με χρήση προηγμένης οξειδωσης.

Impact category	Characterization	Normalization
Global warming	5,54E-01 kg CO ₂ eq	6,93E-05
Stratospheric ozone depletion	3,73E-07 kg CFC11 eq	6,23E-06
Ionizing radiation	2,05E-02 kBq Co-60 eq	4,27E-05
Ozone formation, Human health	1,77E-03 kg NO _x eq	8,61E-05
Fine particulate matter formation	1,38E-03 kg PM2.5 eq	5,41E-05
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	1,80E-03 kg NO _x eq	1,01E-04
Terrestrial acidification	3,94E-03 kg SO ₂ eq	9,61E-05
Freshwater eutrophication	1,69E-04 kg P eq	2,61E-04
Marine eutrophication	1,04E-05 kg N eq	2,25E-06
Terrestrial ecotoxicity	9,44E-01 kg 1,4-DCB	6,21E-05
Freshwater ecotoxicity	9,54E-04 kg 1,4-DCB	3,79E-05
Marine ecotoxicity	2,02E-03 kg 1,4-DCB	4,64E-05
Human carcinogenic toxicity	3,20E-04 kg 1,4-DCB	3,10E-05
Human non-carcinogenic toxicity	2,06E-02 kg 1,4-DCB	6,58E-07

Land use	1,19E-02 m ² a crop eq	1,92E-06
Mineral resource scarcity	8,61E-03 kg Cu eq	7,17E-08
Fossil resource scarcity	1,62E-01 kg oil eq	1,66E-04
Water consumption	1,81E-02 m ³	6,78E-05

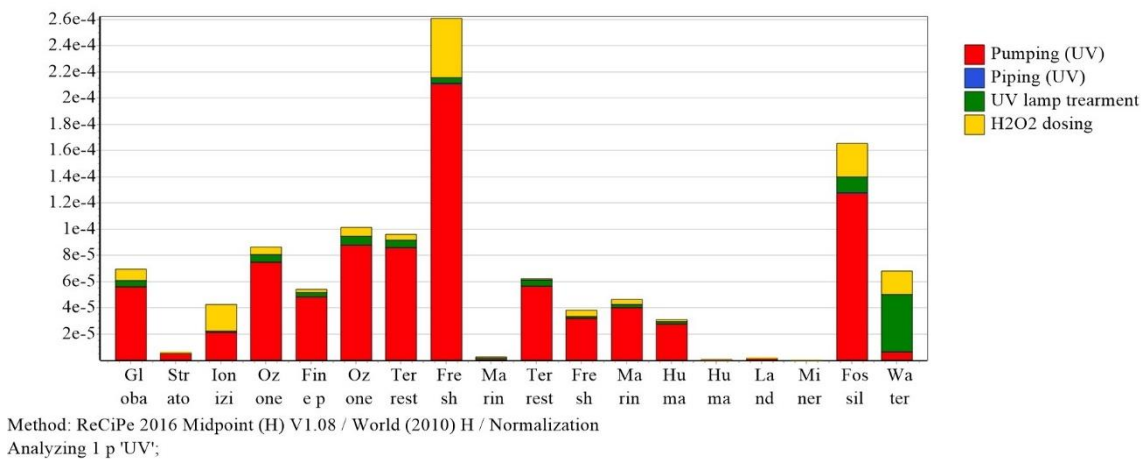
Ως αποτέλεσμα, το στάδιο που έχει τη μεγαλύτερη συμμετοχή σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες μέσου σημείου της μεθόδου ReCiPe είναι η άντληση των λυμάτων (**Διάγραμμα 22**). Ο κύριος λόγος είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η αντλία τροφοδοσίας των λυμάτων, ως υλικό, έχει πολύ μικρότερη συμμετοχή. Το επόμενο στάδιο με τη μεγαλύτερη συμμετοχή, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό, είναι η χρήση H₂O₂, καθώς η βιομηχανική παραγωγή συνήθως βασίζεται στη χρήση μεθανίου ή φυσικού αερίου από τα οποία παράγεται το υδρογόνο, το οποίο και είναι απαραίτητο για την παραγωγή H₂O₂. Συνεπώς, η χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή H₂O₂ είναι υπεύθυνη για της σχετικά αυξημένες συμμετοχές του στις περισσότερες κατηγορίες της μεθόδου ReCiPe. Τα υπόλοιπα στάδια παρουσιάζουν σχετικά μικρές συμμετοχές, με την μονάδα επεξεργασίας UV να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συμμετοχή στην κατηγορία Water consumption (**Διάγραμμα 21**).



Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.08 / World (2010) H / Characterization
Analyzing 1 p 'UV':

Διάγραμμα 22: Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο για την απολύμανση 1 m³ λυμάτων με χρήση προηγμένης οξείδωσης.

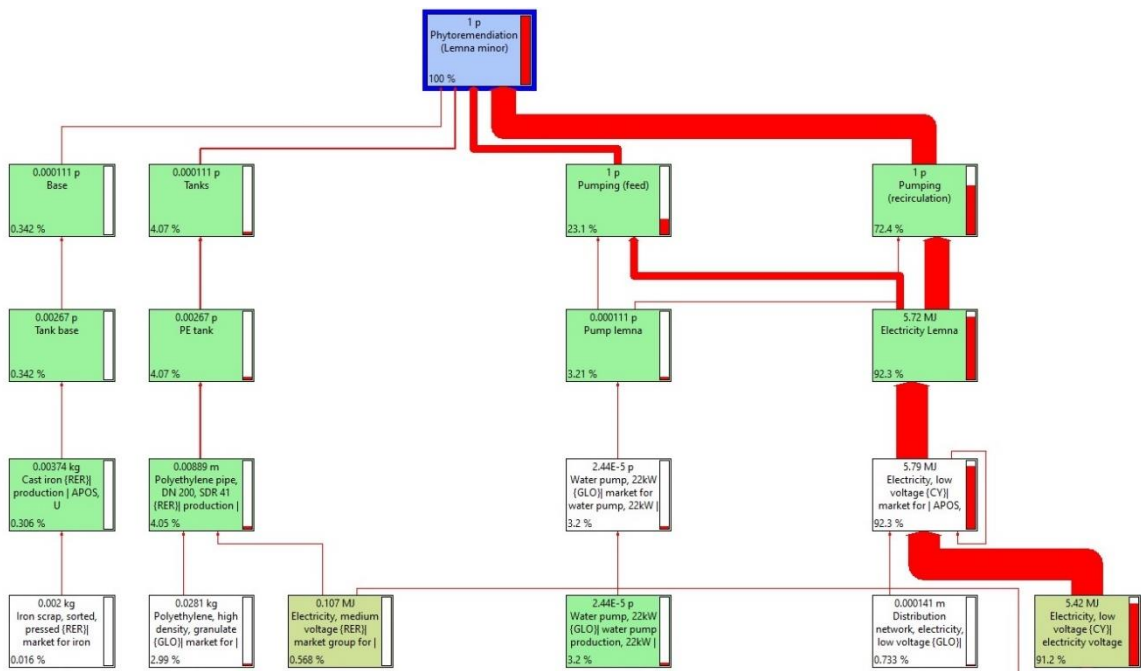
Παρ' όλα αυτά, τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα για την κατηγορία Water consumption είναι πολύ χαμηλά, όπως άλλωστε και το πλήθος των υπολοίπων κανονικοποιημένων κατηγοριών (**Πίνακα 14** και **Διάγραμμα 23**). Η κατηγορία με το μεγαλύτερο σκορ είναι η Freshwater eutrophication, ακολουθούμενη από την Fossil resource scarcity. Ο κύριος λόγος είναι η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία και καταναλώνεται για την άντληση των λυμάτων και από τα ορυκτά καύσιμα που απαιτούνται για την παραγωγή H₂O₂.



Διάγραμμα 23: Τα αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο μέσο σημείο για την απολύμανση 1 m³ λυμάτων με χρήση προηγμένης οξειδωσης.

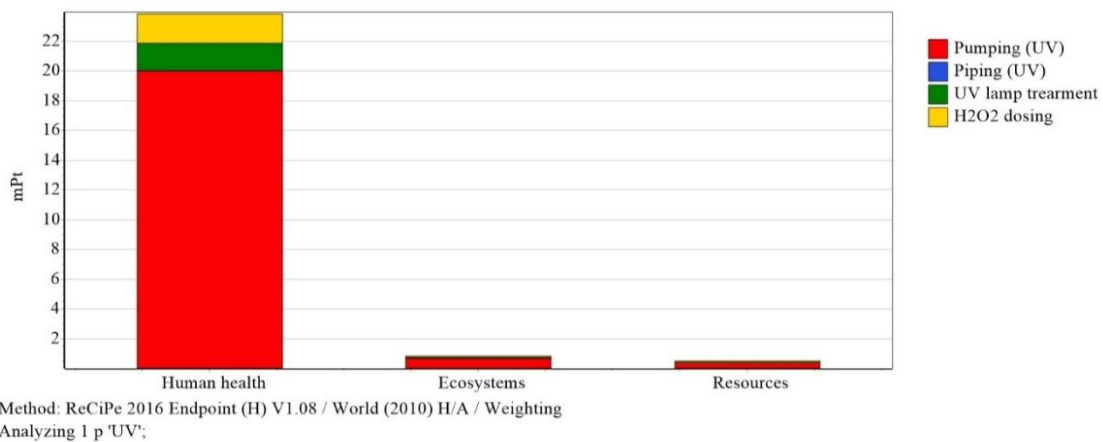
3.4.3 Αποτελέσματα της μεθόδου ReCiPe στο τελικό σημείο

Όπως προαναφέρθηκε το κύριο περιβαλλοντικό hotspot της απολύμανσης με χρήση προηγμένης οξειδωσης είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου για την άντληση των λυμάτων (**Διάγραμμα 24**). Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς ήταν και το κύριο περιβαλλοντικό hotspot και για τις υπόλοιπες φάσεις επεξεργασίας, ενώ οι λόγοι συμμετοχής του στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα αναλύθηκαν ενδελεχώς παραπάνω. Συγκεκριμένα, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι υπεύθυνη για το 57% του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, με την αντλία τροφοδοσία να συνεισφέρει ένα επιπλέον 26%. Η χρήση H₂O₂ είναι υπεύθυνη για το 8,5%, ενώ το σύστημα UV συμμετέχει με 7,8%, αλλά κυρίως λόγω της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου (5,9%). Οι σωληνώσεις έχουν πολύ μικρή συμμετοχή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.



Διάγραμμα 24: Το δένδρογραμμα με την συμμετοχή κάθε σταδίου στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της απολύμανσης με χρήση προηγμένης οξειδωσης.

Όσον αναφορά το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της απολύμανσης με χρήση προηγμένης οξειδωσης, αυτό ανέρχεται σε περίπου 25 mPt, αρκετά μικρότερο από αυτό της φάσης φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* (69 mPt). Η κατηγορία που κυρίως επηρεάζεται και σε αυτή την περίπτωση να είναι η ανθρώπινη υγεία (**Διάγραμμα 25**), όπως ήταν η περίπτωση και στις υπόλοιπες φάσεις επεξεργασίας. Ξανά κύριος λόγος είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενη από καύση ορυκτών καυσίμων, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Όπως αναμενόταν οι υπολοιπές δυο κατηγορίες παρουσιάζουν πολύ μικρότερες τιμές, όπως άλλωστε ήταν και η περίπτωση και στις υπόλοιπες φάσεις επεξεργασίας των νοσοκομειακών λυμάτων.



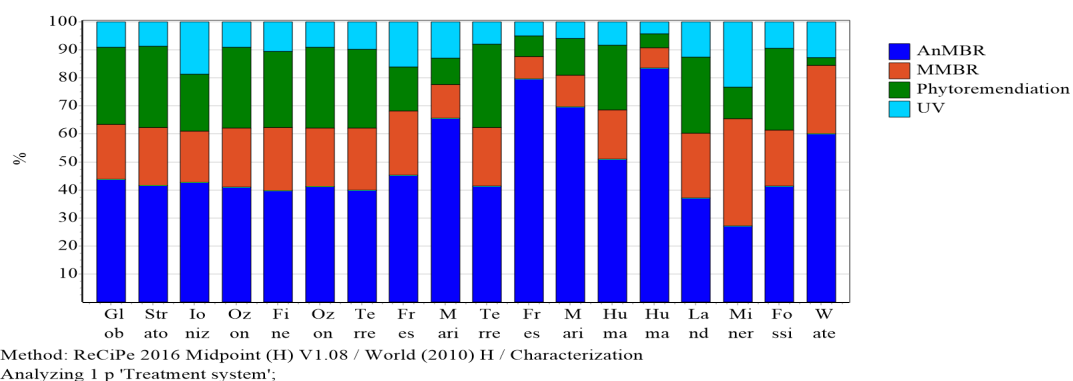
Διάγραμμα 25: Τα αποτελέσματα στο τελικό σημείο και το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της χρήση προηγμένης οξειδωσης.

3.4.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Ομοίως και για αυτή τη φάση επεξεργασίας η ανάλυση ευαισθησίας/σεναρίου εστιάστηκε στην αντικατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο της Κύπρου με ενέργεια από φωτοβολταϊκά. Ξανά, τα αποτελέσματα στο μέσο σημείο είναι αναμενόμενα, καθώς οι τιμές του πλήθους των κατηγοριών είναι σημαντικά μειωμένες σε σχέση με το αρχικό σενάριο, όπως άλλωστε ήταν και η περίπτωση για τα υπόλοιπα στάδια επεξεργασίας. Ξανά η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί το κύριο περιβαλλοντικό hotspot, αλλά πλέον η αντλία είναι το επόμενο περιβαλλοντικό hotspot, καθώς το μοτέρ της περιέχει σχετικά υψηλές ποσότητες χαλκού του οποίου η εξόρυξη και επεξεργασία είναι συνυφασμένη με σειρά περιβαλλοντικών πιέσεων. Η συμμετοχή του σταδίου χρήσης H₂O₂ είναι αυξημένη όπως και των υπόλοιπων σταδίων, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα εμφανίζουν παρόμοιο μοτίβο μειώσεων. Το ίδιο ισχύει και για τα αποτελέσματα στο τελικό σημείο, τα οποία εμφανίζουν μια σχετικά σημαντική μείωση (από 25 mPt στο αρχικό σενάριο σε 10.2 mPt). Ξανά το στάδιο της άντλησης είναι το κύριο περιβαλλοντικό hotspot, αλλά σε αυτή την περίπτωση η συμμετοχή του στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα ανέρχεται σε 59% και το στάδιο χρήσης H₂O₂ ακολουθεί με 38%. Ξανά, η κατηγορία που κυρίως επηρεάζεται είναι η ανθρώπινη υγεία (τα δεδομένα δεν παρουσιάζονται).

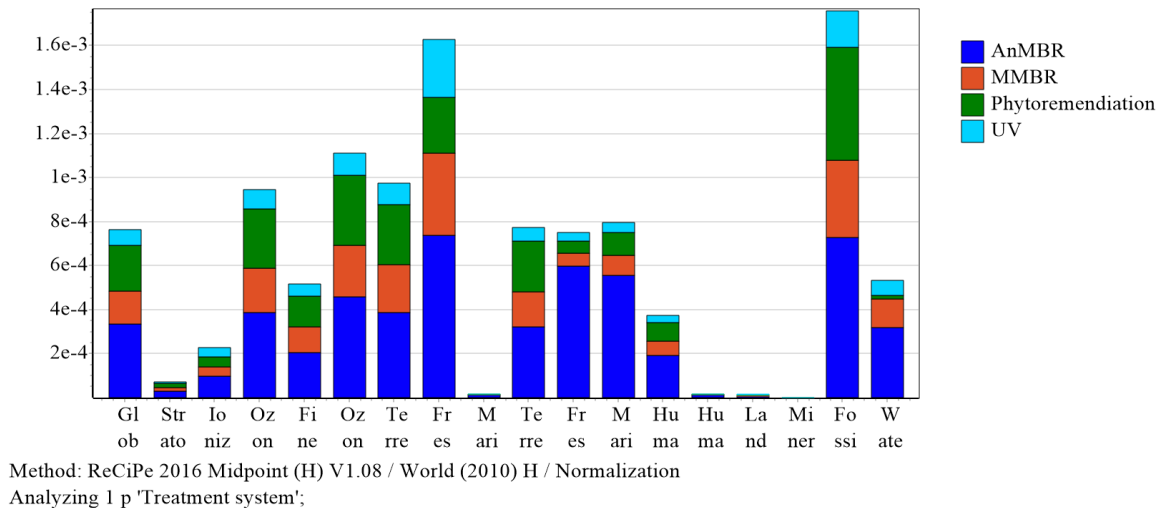
3.5 Συνολικό σύστημα

Τέλος, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα του συνολικού συστήματος επεξεργασίας, ήτοι οι τέσσερις (4) φάσεις επεξεργασίας, εξετάστηκαν. Όπως ήταν αναμενόμενο, η φάση AnMBR έχει τη μεγαλύτερη συμμετοχή σχεδόν σε όλες τις κατηγορίες μέσου σημείου, ακολουθούμενη από τις φάσεις φυτοεξυγίανσης και MBBR, οι οποίες παρουσιάζουν σχετικά παρόμοιες συμμετοχές, και τέλος η φάση προηγμένης οξειδωσης έχει την μικρότερη συμμετοχή (**Διάγραμμα 26**). Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς η κάθε φάση επεξεργασίας συμμετέχει με τον αντίστοιχο σκορ σε κάθε κατηγορία. Ως αποτέλεσμα, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συνολικού συστήματος ανέρχεται σε περίπου 6.1 kg CO₂ eq.



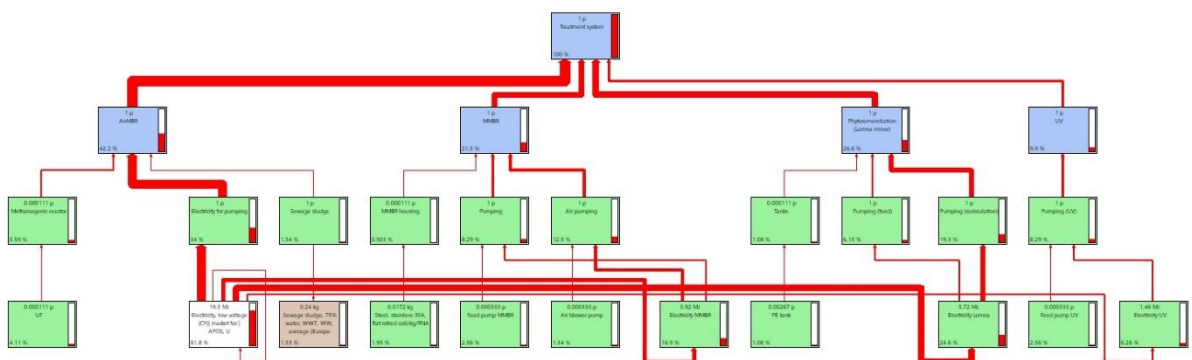
Διάγραμμα 26: Τα αποτελέσματα στο μέσο σημείο του συνολικού συστήματος επεξεργασίας.

Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα παρουσιάζουν ένα παρόμοιο μοτίβο με αυτό που αναλύθηκε σε κάθε φάση επεξεργασίας. Η συμμετοχή της κάθε φάσης επεξεργασίας στο συνολικό κανονικοποιημένο σκορ κάθε κατηγορίας φαίνεται στο **Διάγραμμα 27**. Στην περίπτωση αυτή η κατηγορία Fossil resource scarcity παρουσιάζει το μεγαλύτερο κανονικοποιημένο σκορ, κυρίως λόγω της φάσης φυτοεξυγίανσης με φυτά *Lemna minor* η οποία παρουσίαζε υψηλό σκορ στην κατηγορία αυτή. Η κατηγορία με το δεύτερο υψηλότερο κανονικοποιημένο σκορ είναι η Freshwater eutrophication, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.



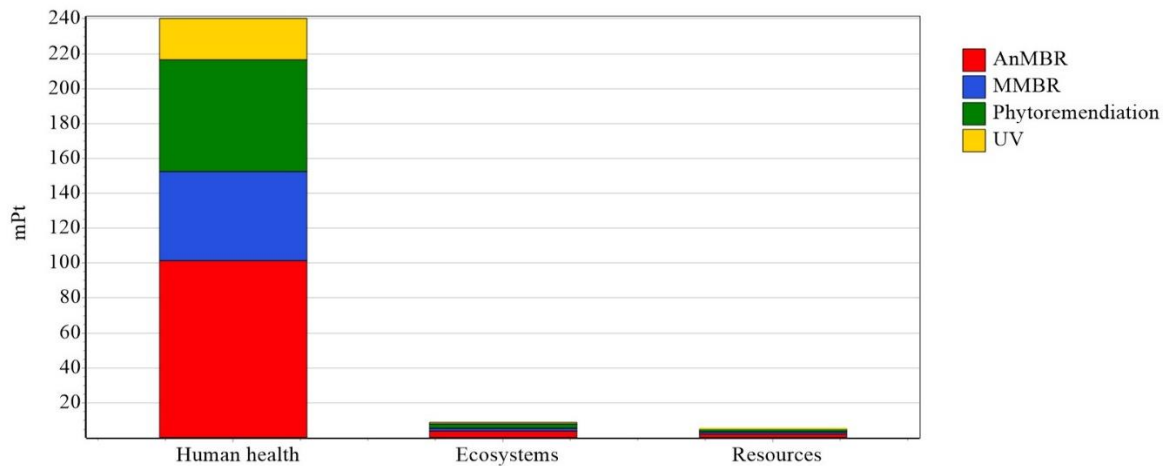
Διάγραμμα 27: Τα κανονικοποιημένα αποτελέσματα στο μέσο σημείο του συνολικού συστήματος επεξεργασίας.

Συγκεκριμένα, η φάση AnMBR συμμετέχει με περίπου 42% στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συνολικού συστήματος επεξεργασίας, ακολουθούμενη από την φάση φυτοεξυγίανσης (περίπου 27%), και την φάση MBBR (21%), ενώ η φάση προηγμένης οξειδωσης συμμετέχει με μόνο 10% στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συνολικού συστήματος επεξεργασίας (**Διάγραμμα 28**).



Διάγραμμα 28: Το δενδρόγραμμα με την συμμετοχή κάθε φάσης επεξεργασίας στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συνολικού συστήματος επεξεργασίας.

Ως αποτέλεσμα, το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συνολικού συστήματος επεξεργασίας ανέρχεται σε 254 mPt και η κατηγορία της ανθρώπινης υγείας να επηρεάζεται περισσότερο (**Διάγραμμα 29**). Αυτό ήταν άλλωστε αναμενόμενο, καθώς τα αποτελέσματα αντικατοπτρίζουν τη βαθμολογία κάθε φάσης ξεχωριστά, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Method: ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.08 / World (2010) H/A / Weighting
Analyzing 1 p 'Treatment system';

Διάγραμμα 29: Το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και η συμμετοχή κάθε φάσης επεξεργασίας στις τρεις κατηγορίες τελικού σημείου της μεθόδου ReCiPe.

4 Βιβλιογραφία

Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., van Zelm, R., 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

Teow, Y.H., Chong, M.T., Ho, K.C. et al. Comparative environmental impact evaluation using life cycle assessment approach: a case study of integrated membrane-filtration system for the treatment of aerobically-digested palm oil mill effluent. *Sustain Environ Res* 31, 15 (2021). <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00089-5>

Ze-hua Liu, Hua Yin, Zhi Dang, and Yu Liu. *Environmental Science & Technology* 2014 48 (2), 889-890. <https://doi.org/10.1021/es405553j>

Government of Canada. Biogas flare, available at: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/national-pollutant-release-inventory/report/tools-calculating-emissions/biogas-flare.html>

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Municipal Wastewater and Sludge Treatment, available at: <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/mstr-ch3.pdf>