

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΕ ΜΟΝΑΔΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΥΑ ΔΗΜΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ

Γ. Μ. Μανωλά¹, Κ. Τσαγκαράκης², Κ. Σηφακάκη³, Ι. Α. Βασιλειάδου^{1*}

¹Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, Ελλάδα

²Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάδα

³Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Ηρακλείου, Ηράκλειο, Ελλάδα

(*ivasiliadou@uowm.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εκτιμά ποσοτικά και ποιοτικά το θεωρητικό αποτύπωμα του άνθρακα της Μονάδας Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων με ταυτόχρονη παραγωγή βιοαερίου του Δήμου Ηρακλείου. Το αποτύπωμα του άνθρακα εκφράζει το σύνολο των αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gases, GHGs), που προέρχονται από τις άμεσες και τις έμμεσες διεργασίες της επεξεργασίας των λυμάτων, σε τόνους ισοδύναμων εκπομπών CO₂. Η ΜΕΥΑ που μελετάται είναι εξοπλισμένη με συμβατική μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων (πρωτοβάθμια - δευτεροβάθμια επεξεργασία ενεργού λύος) και τη μονάδα βιοαντιδραστήρα μεμβρανών (MBR, Membrane Bioreactors) και δύναται να καλύψει 191.500 κατοίκους. Η συμβατική μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων διακρίνεται σε τρεις γραμμές επεξεργασίας (υγρών, λύος και βιοαερίου). Η γραμμή υγρών περιλαμβάνει την πρωτοβάθμια, την δευτεροβάθμια και την εφεδρική τριτοβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Η γραμμή λύος περιλαμβάνει τις μονάδες επεξεργασίας λύος (προπάχυνση, αναερόβια χώνευση, μεταπάχυνση, αποξήρανση). Από την αναερόβια χώνευση σχηματίζεται η γραμμή βιοαερίου, από την οποία παράγεται ηλεκτρική και θερμική ενέργεια προς όφελος της εγκατάστασης. Η μονάδα MBR λειτουργεί σε περίπτωση μεγάλου όγκου λυμάτων και για την επεξεργασία αυτών περιλαμβάνει σύστημα μεμβρανών (κοίλης ίνας) υπερδιήθησης τριτοβάθμιας επεξεργασίας, μονάδα χλωρίωσης και αφυδάτωση λύος. Προκειμένου να υπολογισθεί θεωρητικά το αποτύπωμα του άνθρακα κατά το έτος 2019 χρησιμοποιήθηκε υπολογιστικό εργαλείο (excel) στο οποίο εισήχθησαν δεδομένα που αφορούν φυσικοχημικά χαρακτηριστικά εισροής-εκροής, κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, παραγωγή και καύση βιοαερίου, επεξεργασία-διάθεση λύος, μεταφορών για την εξυπηρέτηση της μονάδας και χρήσης χημικών. Στο υπολογιστικό εργαλείο λήφθηκαν υπόψη δείκτες που αφορούν τις εκπομπές από τη ΜΕΥΑ. Μέσω μαθηματικών εξισώσεων υπολογίστηκαν οι εκπομπές αερίων σε τόνους CO_{2e} ανά έτος, ως εξής: 4153 τόνοι CO_{2e} από την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, 1187 τόνοι CO_{2e} από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, 22 τόνοι CO_{2e} από τη παραγωγή και χρήση βιοαερίου, 119 τόνοι CO_{2e} από την επεξεργασία και διάθεση λύος, 1 τόνος CO_{2e} από τις μεταφορές, 24 τόνοι CO_{2e} από τη χρήση χημικών ουσιών και 78 τόνοι CO_{2e} από την εκροή στον τελικό αποδέκτη. Το αντικείμενο της εργασίας ήταν να παρέχει χρήσιμες και αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με όλες τις πηγές αερίων του θερμοκηπίου από την υπό μελέτη ΜΕΥΑ, με σκοπό την επιλογή κατάλληλων μέτρων για την βέλτιστη λειτουργία της μονάδας και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, αποτύπωμα άνθρακα, βιοαέριο, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι απόρροια του φαινομένου του θερμοκηπίου, το οποίο

προκαλείται από τη συγκέντρωση επιβλαβών αέριων στην ατμόσφαιρα (αέρια του θερμοκηπίου) ως αποτέλεσμα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Ως δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential – GWP) ορίζεται η ικανότητα των αερίων του θερμοκηπίου να απορροφούν ενέργεια από την ατμόσφαιρα και οποίο εκφράζεται σε ισοδύναμες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Τα αέρια του θερμοκηπίου που μπορούν να εκφραστούν με αυτόν τον τρόπο και σχετίζονται με τις ΜΕΥΑ είναι το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου^[1]. Για παράδειγμα 1 τόνος CH₄ που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα ισοδυναμεί με 34 τόνους ισοδύναμων εκπομπών CO₂. Αντίστοιχα, 1 τόνος N₂O που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα αντιστοιχεί σε 298 τόνους ισοδύναμων εκπομπών CO₂. Το αποτύπωμα του άνθρακα (CF) αφορά το σύνολο των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και εκφράζεται σε τόνους ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά έτος (tons CO_{2e}/y)^[2].

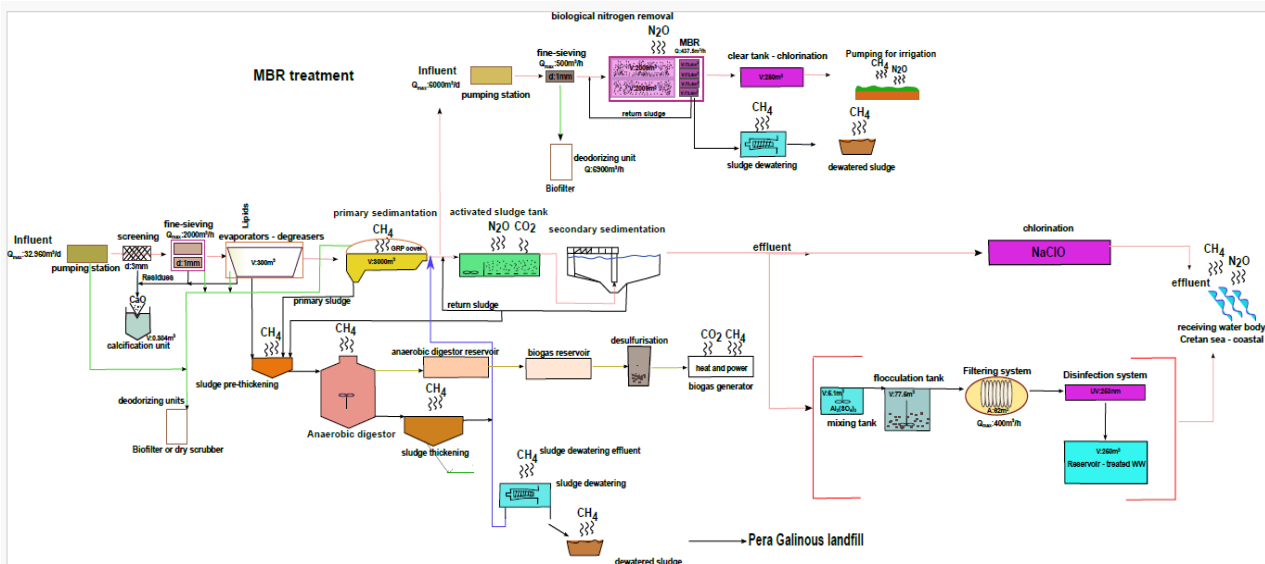
Οι μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων κατά την λειτουργία τους παράγουν αέρια του θερμοκηπίου (GHGs) μέσω των διαφόρων λειτουργιών, άμεσα ή έμμεσα, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), μεθάνιο (CH₄) και υποξείδιο του αζώτου (N₂O). Οι άμεσες εκπομπές προέρχονται από την βιολογική επεξεργασία των λυμάτων στη βασική γραμμή επεξεργασία μίας ΜΕΥΑ, από τη διάσπαση οργανικού φορτίου και θρεπτικών συστατικών, από τη διαχείριση της λύσος στη γραμμή επεξεργασίας λύσος, από την αναερόβια χώνευση και καύση του βιοαερίου^[3]. Οι έμμεσες εκπομπές σχετίζονται με ενέργειες απαραίτητες για τη λειτουργία της μονάδας, όπως είναι η κατανάλωση ενέργειας (ηλεκτρικής και θερμικής), η απόθεση υπολειμματικής λύσος και οι μετακινήσεις.

Η ανάλυση του αποτυπώματος του άνθρακα πραγματοποιήθηκε για τη ΜΕΥΑ του Δήμου Ηρακλείου (Ηράκλειο Κρήτης) (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Η θέση της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων του Δήμου Ηρακλείου.

Η συγκεκριμένη ΜΕΥΑ σχεδιάστηκε για να εξυπηρετεί λύματα πληθυσμού ισοδύναμου με 191.500 κατοίκους. Η ημερησία παροχή λυμάτων εισόδου υπολογίζεται στα 32.500 m³/d. Πρόκειται για ένα σύστημα διαχείρισης αποτελούμενο από ανεξάρτητους κύριους και δευτερεύοντες αγωγούς αποχέτευσης εξοπλισμένους με τα απαιτούμενα αντλιοστάσια, τον βιολογικό καθαρισμό (πρωτοβάθμιας-δευτεροβάθμιας επεξεργασίας) και τον αγωγό (χερσαίο και υποθαλάσσιο) διάθεσης του επεξεργασμένου λυμάτων στον φυσικό αποδέκτη. Επιπρόσθετα, η μονάδα είναι πλήρως εξοπλισμένη με σύστημα μεμβρανών (MBR), το οποίο χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μεγάλου όγκου διαχείρισης λυμάτων (Σχήμα 2).

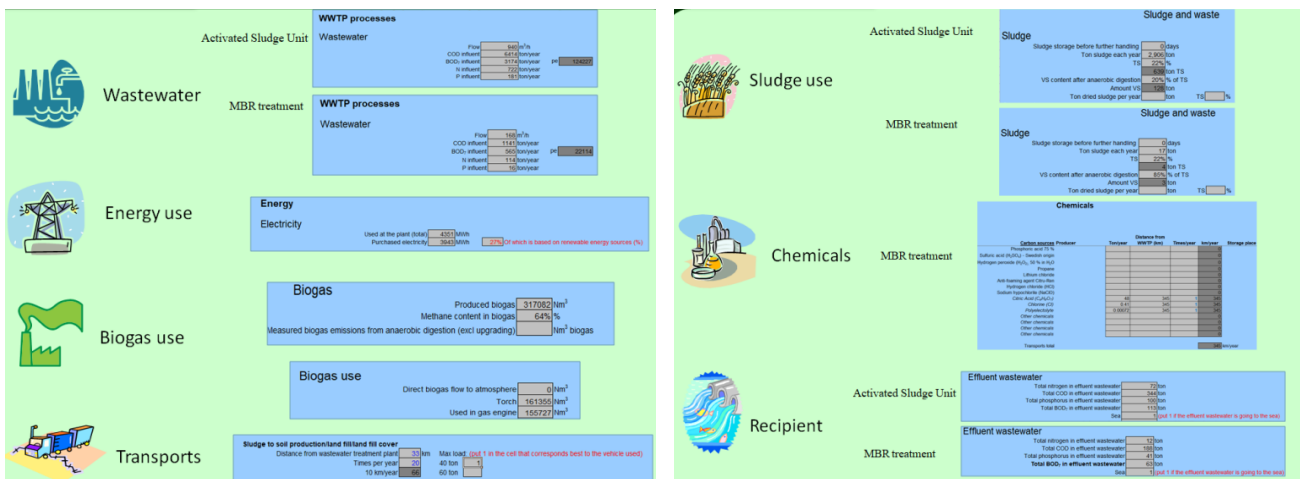


Σχήμα 2. Σχηματική απεικόνιση της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων του Δήμου Ηρακλείου.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το υπολογιστικό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη θεωρητική ανάλυση του αποτυπώματος του άνθρακα είναι σε περιβάλλον Microsoft Excel^[4]. Πρόκειται για ένα εργαλείο το οποίο δύναται να βοηθήσει μία ΜΕΥΑ, ανάλογα με τις δικές της ανάγκες, να ελαχιστοποιήσει τις εκπομπές των αέριων ρύπων του θερμοκηπίου που προέρχονται από τις διεργασίες που γίνονται μέσα σε αυτή. Με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου πραγματοποιούνται υπολογισμοί με βάση τα δεδομένα που εισάγονται από την λειτουργία της κάθε επεξεργασίας, σε συνδυασμό με τους κατάλληλους συντελεστές και παραμέτρους, ώστε τα αποτελέσματα να εκφράζονται σε τόνους ισοδύναμων CO₂.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παραχωρήθηκαν από την υπεύθυνη της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων του Δήμου Ηρακλείου (ΜΕΥΑ Ηρακλείου) και από την ιστοσελίδα <http://astikalimata.ypeka.gr/Services/Pages/WtpViewApp.aspx#>, η οποία περιέχει στοιχεία για τις ΜΕΥΑ της Ελλάδας. Τα στοιχεία αυτά αφορούν μετρήσεις και καταγραφές από τη ΜΕΥΑ (πρωτοβάθμιας-δευτεροβάθμιας επεξεργασία ενεργούς ιλύος) και τη μονάδα βιοαντιδραστήρα μεμβρανών (MBR), ενώ πληροφορίες που σχετίζονται με την κατανάλωση και την παραγωγή ενέργειας δίνονται από τιμολόγια της ΔΕΔΔΗΕ. Η εισαγωγή δεδομένων απεικονίζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Δεδομένα εισαγωγής στο υπολογιστικό εργαλείο.

Με την ολοκλήρωση της εισαγωγής των απαραίτητων δεδομένων, υπολογίζονται οι τιμές των εκπομπών CO_{2e}. Οι τιμές υπολογίζονται από μαθηματικές εξισώσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψη κατάλληλους συντελεστές και οι τιμές δίνονται εκφρασμένες σε τόνους CO_{2e}.

Για παράδειγμα, η μαθηματική εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των ετήσιων ισοδύναμων εκπομπών CO₂ από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη ΔΕΗ, η οποία καταναλώθηκε για τις ανάγκες λειτουργίας της ΜΕΥΑ Ηρακλείου είναι η εξής:

$$f_{EU} * \frac{\Delta EH_{MWh} * (1 - \Delta EH_{renew} \%)}{1000 \frac{MWh}{GWh}} = X \text{ ton } CO_{2e} \quad (1)$$

f_{EU} : δείκτης CO_{2e} για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο μέσος όρος του δείκτη για την Ευρωπαϊκή Ένωση είναι 415 ton CO_{2e}/GWh [5].

ΔEH_{MWh} : σύνολο ηλεκτρικής ενέργειας παρεχόμενης από τη ΔΕΗ (MWh) που καταναλώθηκαν στην ΜΕΥΑ Ηρακλείου για το έτος 2019. Η τιμή του είναι 3493 MWh.

ΔEH_{renew} : ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε από τη ΔΕΗ μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες κτλ). Τιμή 27%.

Βάση των παραπάνω οι εκπομπές CO_{2e} από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε από την ΔΕΗ:

$$\left(415 \frac{\text{ton } CO_{2e}}{GWh}\right) * \frac{(3493 \text{ MWh}) * (1 - 27\%)}{1000 \frac{MWh}{GWh}} = 1187 \text{ ton } CO_{2e} \quad (2)$$

Επομένως, η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ισούται με 1187 τόνους ($total_{eluse} = 1187 \text{ ton } CO_{2e}$).

Επιπλέον, για τον υπολογισμό των ισοδύναμων εκπομπών μεθανίου του βιοαερίου που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα η μαθηματική εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

$$\left(\frac{f_{CH_4}}{100}\right) * \left(\frac{MEYA_{prodbiogas} * MEYA_{CH_4inbio} * GWP_{DCH_4}}{1000000 \frac{g}{kg}}\right) * GWP_{CH_4} = W \text{ ton } CO_{2e} \quad (3)$$

f_{CH_4} : δείκτης εκπομπών CH₄ από την χρήση βιοαερίου. Η τιμή του είναι 0,15% [5].

$MEYA_{prodbiogas}$: πρόκειται για το βιοαέριο που παράγεται στη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων του Δήμου Ηρακλείου (τιμή 317082 Nm³).

$MEYA_{CH_4inbio}$: πρόκειται για την ποσότητα του μεθανίου που περιέχεται στο βιοαέριο που παράγεται (περιεκτικότητα 64%).

GWP_{DCH_4} : δείκτης GWP ο οποίος αποτυπώνει την πυκνότητα του CH₄. Η τιμή είναι 717 g / m³ [6].

GWP_{CH_4} : δείκτης GWP για 100 χρόνια που αντιστοιχεί στο σύνολο εκπομπών CH₄. Η τιμή είναι 34 kg CO_{2e} / kg CH₄ (IPCC 2013) [7].

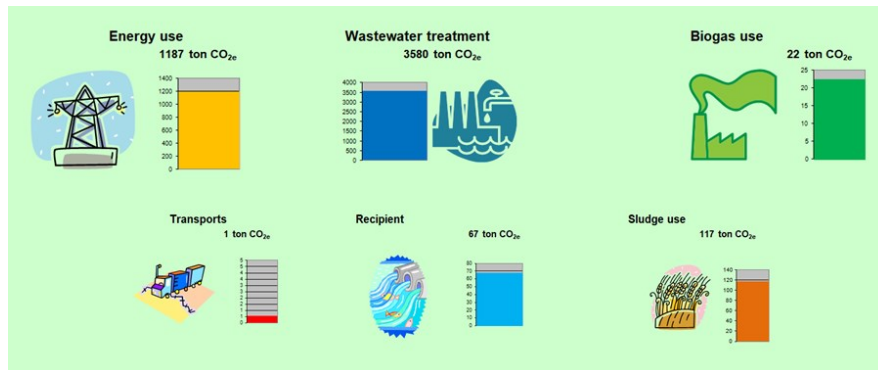
Βάση των παραπάνω οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ από τις εκπομπές CH₄ του βιοαερίου που διαφεύγει στην ατμόσφαιρα:

$$0.15 * 317082 \text{ Nm}^3 * \frac{64\% * 717 \frac{g}{m^3}}{1000000 \frac{g}{kg}} * 34 \frac{\text{kg } CO_{2e}}{\text{kg } CH_4} = 7 \text{ ton } CO_{2e} \quad (4)$$

Οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ από τις εκπομπές CH₄ που διαφεύγουν στην ατμόσφαιρα είναι 7 τόνοι ($total_{biogasslip} = 7 \text{ ton}$).

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο Σχήμα 4 απεικονίζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά τη λειτουργία της μονάδας πρωτοβάθμιας-δευτεροβάθμιας επεξεργασίας ενεργού λύος για το έτος 2019. Οι διεργασίες που σημείωσαν εκπομπές CO_{2e} είναι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή και κατανάλωση του βιοαερίου, η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, η επεξεργασία της λύος, η χρήση χημικών ουσιών, οι μεταφορές που πραγματοποιούνται για την ΜΕΥΑ και η εκροή στον τελικό αποδέκτη. Ομίως προκύπτουν και τα αποτελέσματα της μονάδας βιοαντιδραστήρων.



Σχήμα 4. Τελικά διαγράμματα ισοδύναμων εκπομπών CO₂ για τη μονάδα πρωτοβάθμιας-δευτεροβάθμιας επεξεργασίας ενεργού λύος.

Η περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης των επιμέρους εκπομπών CO_{2e}, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Επιμέρους εκπομπές CO_{2e} για τη μονάδα επεξεργασίας ενεργού λύος και τη μονάδα βιοαντιδραστήρα μεμβρανών (MBR) για το έτος 2019.

Εκπομπές CO _{2e}	πρωτοβάθμια-δευτεροβάθμια επεξεργασία	βιοαντιδραστήρας μεμβρανών MBR
Συνολικές εκπομπές έτους	4974 ton	1821 ton
Ανά άτομο (70g BOD7 την ημέρα)	40 kg	82.3 kg
Ανά m ³ επεξεργασμένου λύματος	0.6 kg	1.2 kg
Ανά τόνους απομακρυσμένου αζώτου (N-tot)	7.7 ton	17.9 ton
Ανά τόνους απομακρυσμένου φώσφορου (P-tot)	61 ton	166 ton
Ανά τόνους απομακρυσμένου χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD-tot)	0.6 ton	1.9 ton
Ανά συνολικό άζωτο εισόδου (N)	6.9 ton	16 ton
Ανά συνολικό χημικά απαιτούμενο οξυγόνο εισόδου (COD-tot)	0.8 ton	1.6 ton
Ανά συνολικό φώσφορο εισόδου (P-tot)	27.5 ton	113.8 ton

Η ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση του αποτυπώματος του άνθρακα αποτελεί σημαντικό εργαλείο το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στρατηγικές αντιμετώπισης μείωσης εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Με τη βοήθεια του υπολογιστικού προγράμματος δύναται να υπολογιστούν οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂, εκφρασμένες σε τόνους, για τις ΜΕΥΑ με στόχο να προταθούν μέτρα άμβλυνσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όπως είναι η εφαρμογή νέων τεχνολογιών. Θα πρέπει να σημειωθεί ωστόσο, ότι για την ακριβή αποτίμηση του άνθρακα απαιτείται πληθώρα δεδομένων, μετρήσεις εκπομπών που σχετίζονται με κάθε μονάδα επεξεργασίας σε καθημερινή βάση και επί τόπου μετρήσεις σε κάθε στάδιο της επεξεργασίας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών “Ενεργειακές Επενδύσεις και Περιβάλλον” του τμήματος Χημικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Ευχαριστούμε θερμά το Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, καθώς η δαπάνη της εργασίας «Θεωρητική εκτίμηση του αποτυπώματος του άνθρακα σε μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων: η περίπτωση της ΜΕΥΑ Δήμου Ηρακλείου» καλύφθηκε από τον τακτικό προϋπολογισμό του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Pagilla K, Shaw A, Kunetz T, Schiltz M. (2009). A Systematic Approach to Establishing Carbon Footprints for Wastewater Treatment Plants. Proceedings of the Water Environment Federation, 5399–5409.
- [2] Campos JL, Valenzuela-Heredia D, Pedrouso A, Val Del Río A, Belmonte M, Mosquera-Corral A. (2016). Greenhouse Gases Emissions from Wastewater Treatment Plants: Minimization, Treatment, and Prevention. Journal of Chemistry, 9, 1-12.
- [3] Solís B, Guisasola A, Pijuan M, Corominas L, Baeza JA. (2022). Systematic calibration of N₂O emissions from a full scale WWTP including a tracer test and a global sensitivity approach. Chemical Engineering Journal 435, 1385-8947.
- [4] Carbon footprint calculation tool for Waste Water Treatment Plants, VA Teknik Södra. (<https://va-tekniksodra.se/2014/11/carbon-footprint-calculation-tool-for-wwtps-now-available-in-english/>)
- [5] Elforsk AB, EME Analys AB and Profu i Göteborg AB. (2008). Environmental assessment of electricity – with a focus on CO₂ emissions.
- [6] SGC Svenskt Gastekniskt Center AB. <https://refman.energytransitionmodel.com/organizations/69>
- [7] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.