

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΦΩΤΟΚΑΤΑΛΥΣΗΣ, ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΔΙΗΘΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ & ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΘΗΡΑΣΙΑΣ**Ι. Νυδριώτη^{1*}, Π.-Μ. Σταθάτου^{1,2}, Β. Πράπας³, Σ. Αυλωνίτης³, Δ. Ασημακόπουλος¹**¹Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, Ελλάδα²Center for Bits and Atoms, MIT, Cambridge, Massachusetts, USA³Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Δήμου Θήρας, Νομός Κυκλάδων, Ελλάδα(*inydrioti@chemeng.ntua.gr)**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Τα αστικά λύματα αποτελούν βασική πηγή ρύπανσης κυρίως σε μικρές κοινότητες και απομακρυσμένα νησιά και ο συνδυασμός φυσικών και μηχανικών μεθόδων στην επεξεργασία των λυμάτων, θα μπορούσε να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση κυρίως για Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) μικρής δυναμικότητας. Ένα τέτοιο σύστημα κατασκευάστηκε στη Θηρασία συνδυάζοντας καθίζηση, ετερογενή φωτοκατάλυση, τεχνητούς υγροτόπους, υπερδιήθηση και χλωρίωση. Ο συνδυασμός αυτών των μεθόδων επιτυγχάνει μεγάλα ποσοστά απομάκρυνσης ρύπων και παθογόνων μικροοργανισμών (85% και 99% αντίστοιχα), καθιστώντας την εκροή της ΕΕΛ κατάλληλη για επαναχρησιμοποίηση σε «περιορισμένη άρδευση» και υπόγεια διάθεση.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αστικά λύματα αποτελούν βασική πηγή ρύπανσης των υδατικών πόρων και οικοσυστημάτων. Η επεξεργασία και διαχείρισή τους σε τοπικό επίπεδο κρίνεται απαραίτητη σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ «για την επεξεργασία και διάθεση αστικών λυμάτων» όπως αυτή τροποποιήθηκε με την Οδηγία 98/15/ΕΕ, με σκοπό την περιβαλλοντική προστασία, τη διασφάλιση της ποιότητας των υδάτων, την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλεί η ελεύθερη διάθεσή τους και τη διατήρηση των φυσικών πόρων στις τοπικές κοινωνίες και τους μικρούς οικισμούς^[1].

Εναλλακτικές μέθοδοι επεξεργασίας λυμάτων, όπως τα φυσικά συστήματα (π.χ. τεχνητοί υγροτόποι, εμπλουτισμός υπόγειου υδροφορέα, λίμνες σταθεροποίησης κ.α.), αποτελούν βιώσιμη λύση κυρίως για αποκεντρωμένες ΕΕΛ μικρής δυναμικότητας. Προσφέρουν αποδοτικότερη λειτουργία σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας (π.χ. ενεργός ιλύς) με πολλά περιβαλλοντικά και κοινωνικό-οικονομικά οφέλη όπως χαμηλότερα πάγια και λειτουργικά κόστη, μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις, χαμηλότερες εκπομπές αέριων ρύπων και διατήρηση του φυσικού τοπίου^[2,3]. Παράλληλα όμως, η εφαρμογή των φυσικών συστημάτων μπορεί να περιοριστεί από πολλούς παράγοντες, όπως οι κλιματικές συνθήκες, ο χρόνος παραμονής των λυμάτων σε αυτά και οι απαιτήσεις τους σε έκταση^[4].

Η απόδοση και λειτουργία των φυσικών συστημάτων μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με το συνδυασμό τους με συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας. Ο συνδυασμός φυσικών και μηχανικών συστημάτων για την επεξεργασία αστικών λυμάτων μπορεί να αποτελέσει μια χρήσιμη λύση για απομονωμένες κοινότητες και μικρούς οικισμούς λόγω του χαμηλού κόστους και των μειωμένων αναγκών συντήρησης όπως και για τουριστικές περιοχές λόγω της ικανότητάς τους να προσαρμόζονται στις εποχιακές διακυμάνσεις των υδραυλικών και ρυπαντικών φορτίων^[5,6].

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της απόδοσης του συνδυασμού φυσικών και συμβατικών διεργασιών, αλλά και της επιμέρους συνεισφοράς της κάθε διεργασίας ξεχωριστά, στην επεξεργασία των αστικών λυμάτων της νήσου Θηρασίας. Τα λύματα στην ΕΕΛ της Θηρασίας αρχικά υφίστανται προ-επεξεργασία και πρωτοβάθμια καθίζηση, στη συνέχεια διέρχονται από τις διεργασίες της ετερογενούς φωτοκατάλυσης και των τεχνητών υγροτόπων, κατόπιν υφίστανται υπερδιήθηση και τέλος απολύμανση. Η τελική εκροή επαναχρησιμοποιείται για περιορισμένη άρδευση των εκτάσεων εντός της ΕΕΛ και υπόγεια διάθεση. Η εκτίμηση της απόδοσης

πραγματοποιείται σε δύο εποχιακές περιόδους και αναλύονται οι συνθήκες και τα κόστη λειτουργίας των διεργασιών καταλήγοντας σε προτάσεις για αποδοτικότερη λειτουργία της ΕΕΛ.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το νησί της Θηρασίας ανήκει στο ηφαιστειακό νησιωτικό συγκρότημα της Σαντορίνης, στο σύμπλεγμα των Κυκλάδων του Αιγαίου Πελάγους (Σχήμα 1). Η Θηρασία έχει έκταση 9,299 km² και μόνιμο πληθυσμό 319 κατοίκους (σύμφωνα με την απογραφή του 2011), ο οποίος αυξάνεται σημαντικά κατά τη θερινή περίοδο.



Σχήμα 1. Η τοποθεσία της νήσου Θηρασίας (προσαρμογή από: Google Earth, 2019)

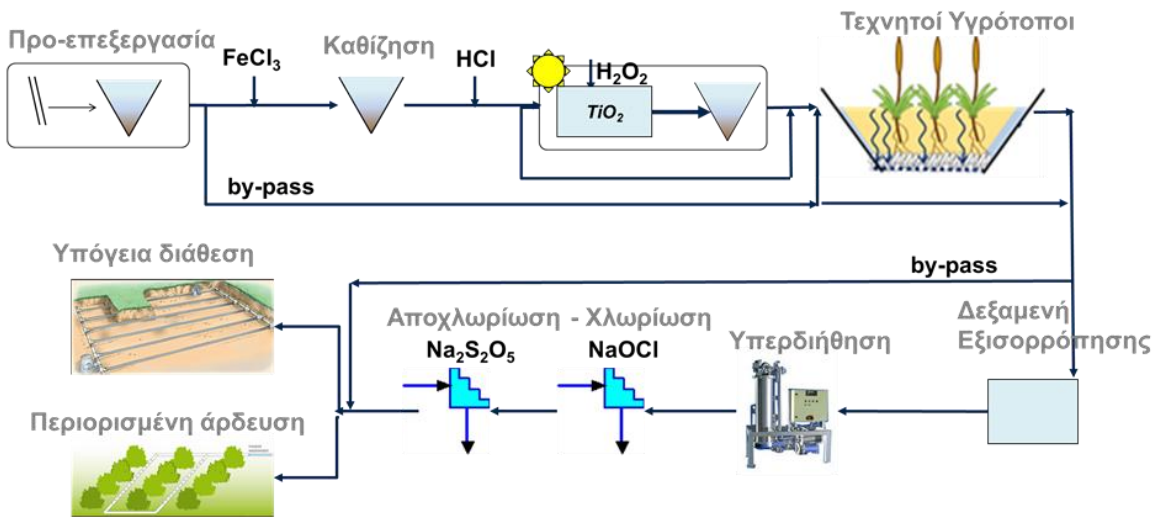
Η ΕΕΛ της Θηρασίας κατασκευάστηκε το 2016, στα πλαίσια του Επιχειρησιακού Προγράμματος Νοτίου Αιγαίου 2014 - 2020, με σκοπό την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση των αστικών λυμάτων του νησιού. Η ΕΕΛ καταλαμβάνει έκταση 4,756 m² και βρίσκεται δυτικά του οικισμού του Ποταμού (Σχήμα 2). Η μονάδα έχει σχεδιαστεί με ορίζοντα 30 ετών και η μέση ημερήσια παροχή σχεδιασμού των λυμάτων είναι 218.6 m³ / ημέρα (πρόβλεψη για 399 μόνιμους κάτοικους και 1,467 εποχιακούς κάτοικους και τουρίστες το 2045) [7].



Σχήμα 2. Η τοποθεσία της ΕΕΛ της νήσου Θηρασίας (προσαρμογή από: Google Earth, 2019)

Τα εισερχόμενα λύματα στην ΕΕΛ αρχικά υφίστανται προ-επεξεργασία (εσχάρωση και αεριζόμενη εξάμωση) και στη συνέχεια οδηγούνται στην πρωτοβάθμια καθίζηση σε δεξαμενή όγκου 89.4 m³ όπου προστίθεται διάλυμα τριχλωριούχου σιδήρου (FeCl₃) για τη χημική κατακρήμνιση του φωσφόρου. Στη συνέχεια, τα λύματα διέρχονται από τη διεργασία της ετερογενούς φωτοκατάλυσης, η οποία εφαρμόζεται για πρώτη φορά σε μονάδα μεγάλης κλίμακας και αποτελείται από δύο φωτοκαταλυτικούς αντιδραστήρες όγκου 61 m³, όπου πραγματοποιείται η καταλυτική οξείδωση με τη χρήση ηλιακού φωτός, διοξειδίου του τιτανίου (TiO₂) ως καταλύτη και υδροχλωρίου (HCl) για την επίτευξη όξινων συνθηκών στον αντιδραστήρα. Μετά το τέλος της αντίδρασης τα επεξεργασμένα λύματα, στα οποία ο καταλύτης βρίσκεται σε μορφή αιωρήματος, μεταφέρονται στις δεξαμενές καθίζησης της φωτοκατάλυσης (δύο δεξαμενές όγκου 73.5 m³) όπου συλλέγεται ο καταλύτης στον πυθμένα των δεξαμενών και το υπερκείμενο υγρό διοχετεύεται στη μονάδα τεχνητών υγροτόπων. Οι τεχνητοί υγροτόποι, που αποτελούν και το φυσικό σύστημα

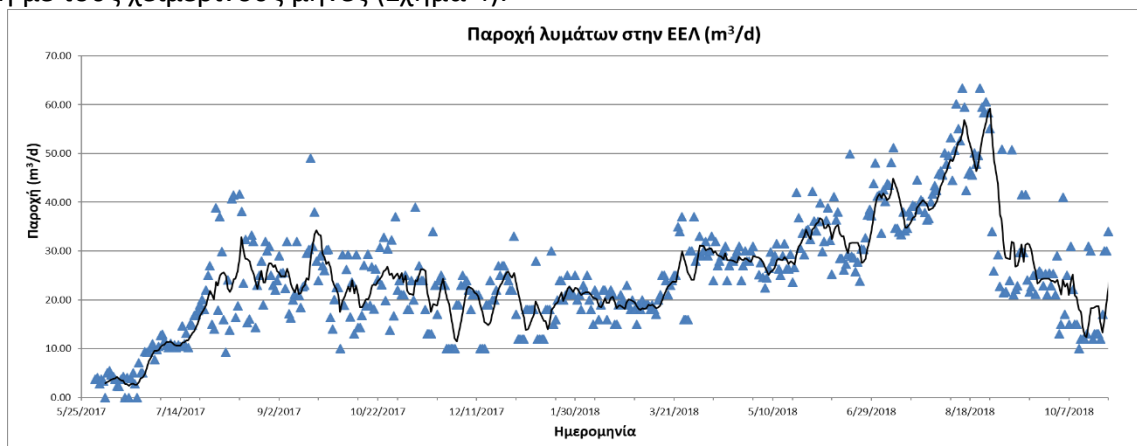
επεξεργασίας της ΕΕΛ, αποτελούνται από δύο παράλληλες κλίνες οριζόντιας υποεπιφανειακής ροής φυτεμένες με το είδος *Phragmites communis* (κοινό καλάμι) επιφάνειας 208.2 m² η καθεμία, κλίση πυθμένα 0.4 % και υδραυλικό χρόνο παραμονής των λυμάτων 4 ημέρες. Μετά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία, τα λύματα οδηγούνται σε μονάδα υπερδότησης με 152 m² ενεργή επιφάνεια μεμβρανών και λόγο ανάκτησης 96.8%, για περαιτέρω επεξεργασία και απομάκρυνση μικροοργανισμών. Τέλος, πραγματοποιείται χλωρίωση και αποχλωρίωση των επεξεργασμένων λυμάτων, με τη χρήση διαλύματος υποχλωριώδους νατρίου (NaOCl) περιεκτικότητας 14% σε ενεργό χλώριο και διαλύματος Na₂S₂O₅ (40% περιεκτικότητα), αντίστοιχα. Στόχος είναι η επίτευξη τιμών μικρότερων του ορίου επαναχρησιμοποίησης για περιορισμένη άρδευση και υπόγεια διάθεση που ορίζει η Ελληνική Νομοθεσία (ΚΥΑ 145116/2011). Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της ΕΕΛ της Θηρασίας [7].



Σχήμα 3. Διάγραμμα ροής της ΕΕΛ Θηρασίας (*by-pass: παράκαμψη της ροής των λυμάτων)

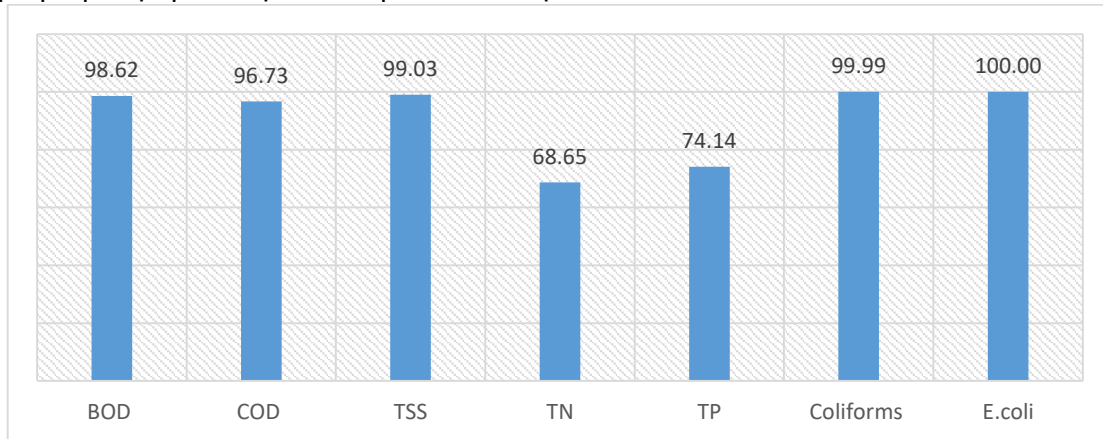
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η εκτίμηση της απόδοσης του συνδυασμού των διεργασιών της ΕΕΛ αλλά και η συνεισφορά της κάθε διεργασίας ξεχωριστά στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου των εισερχόμενων λυμάτων πραγματοποιήθηκε για δύο περιόδους, χειμώνα και καλοκαίρι. Το χειμώνα αντιπροσωπεύουν οι μήνες Οκτώβριος, Νοέμβριος, Δεκέμβριος, Ιανουάριος και Φεβρουάριος και το καλοκαίρι οι υπόλοιποι. Επιλέχθηκαν αυτές οι δύο χρονικές περιόδους καθώς παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στο εισερχόμενο υδραυλικό και ρυπαντικό φορτίο στην ΕΕΛ λόγω της αύξησης των κατοίκων του νησιού, με την παροχή των εισερχόμενων λυμάτων να αυξάνεται το καλοκαίρι κατά 70 – 80% σε σχέση με τους χειμερινούς μήνες (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Παροχή λυμάτων στην ΕΕΛ Θηρασίας

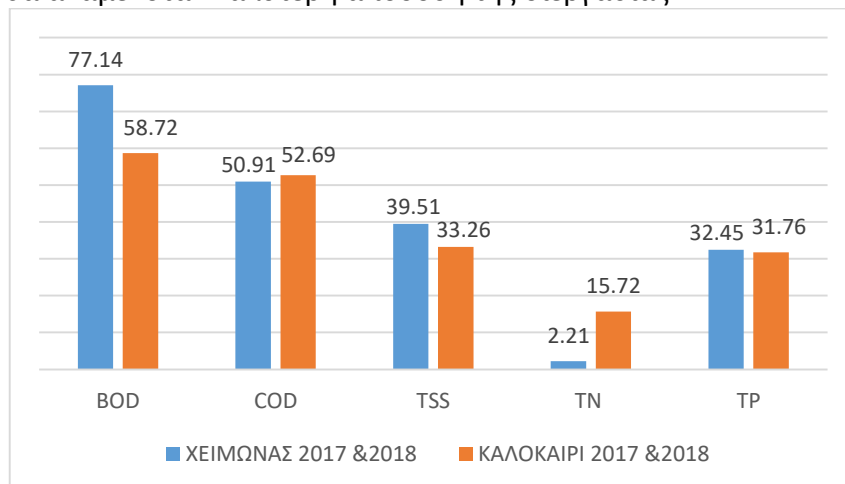
Ο συνδυασμός φυσικών και μηχανικών μεθόδων επεξεργασίας στην ΕΕΛ της Θηρασίας επιτυγχάνει μεγάλα ποσοστά απομάκρυνσης των ρύπων και παθογόνων μικροοργανισμών. Η απομάκρυνση των BOD, COD και TSS κυμαίνεται στο 97%, του ολικού αζώτου (TN) και του ολικού φωσφόρου (TP) στο 71% και των παθογόνων μικροοργανισμών (total coliforms, E.coli) στο 99.9% στην έξοδο της ΕΕΛ, όπως φαίνει στο Σχήμα 5, επιτυγχάνοντας τιμές μικρότερες του ορίου επαναχρησιμοποίησης για περιορισμένη άρδευση και υπόγεια διάθεση.



Σχήμα 5. Ποσοστά απομάκρυνσης ρύπων και παθογόνων μικροοργανισμών στην έξοδο της ΕΕΛ

Η εκτίμηση της απόδοσης του συνδυασμού και της κάθε διεργασίας ξεχωριστά, βασίστηκε σε αντίστοιχες της ποιότητας των λυμάτων το διάστημα από τον Ιούνιο του 2017 έως τον Αύγουστο του 2018. Όπως περιγράφηκε, τα εισερχόμενα λύματα υφίστανται εσχάρωση και εξάμμωση και στη συνέχεια διέρχονται από πρωτοβάθμια καθίζηση όπου απομακρύνεται πάνω από το 50% του COD και των TSS τόσο το χειμώνα όσο και το καλοκαίρι.

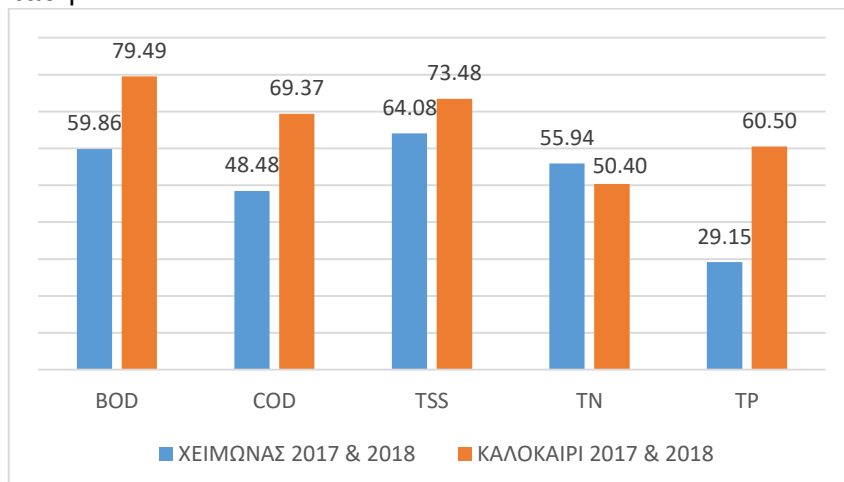
Κατά την ετερογενή φωτοκατάλυση απομακρύνεται μεγάλο μέρος του οργανικού φορτίου των λυμάτων, χωρίς να παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις στην απόδοση της διεργασίας το χειμώνα σε σχέση με το καλοκαίρι (όπως φαίνεται στο Σχήμα 6) όπου η ηλιοφάνεια είναι μεγαλύτερη και θα αναμενόταν καλύτερη απόδοση της διεργασίας.



Σχήμα 6. Ποσοστά απομάκρυνσης ρύπων μετά την ετερογενή φωτοκατάλυση για το χειμώνα και το καλοκαίρι του 2017 & του 2018

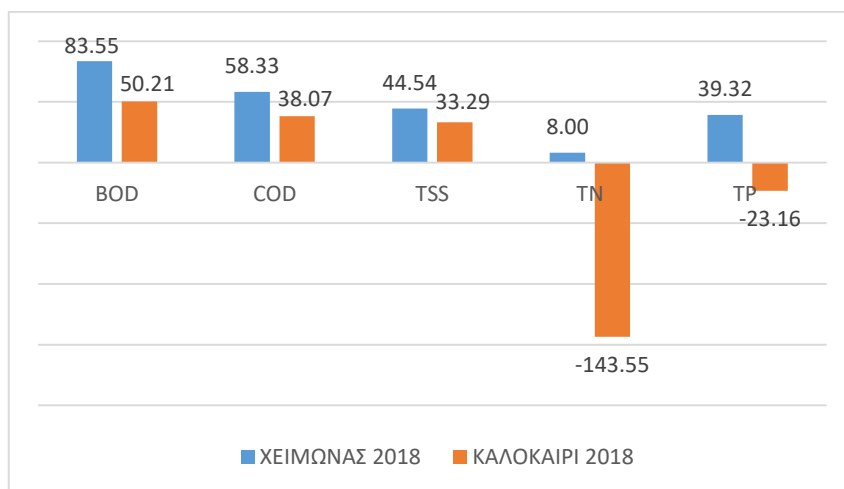
Οι τεχνητοί υγρότοποι επιτυγχάνουν μεγάλα ποσοστά απομάκρυνσης όλων των ρύπων και στις δύο εποχές, άνω του 30% όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7, λόγω της ικανότητάς τους να προσαρμόζονται στις διακυμάνσεις των υδραυλικών φορτίων. Ακόμα, δεν παρατηρούνται φαινόμενα έμφραξης των υγροτόπων λόγω καλής απομάκρυνσης των στερεών τόσο στην καθίζηση όσο και στην ετερογενή

φωτοκατάλυση διασφαλίζοντας την καλή λειτουργία των υγροτόπων όπως και μειώνοντας τις απαιτήσεις σε έκταση.



Σχήμα 7. Ποσοστά απομάκρυνσης ρύπων μετά τους τεχνητούς υγρότοπους για το χειμώνα και το καλοκαίρι του 2017 & του 2018

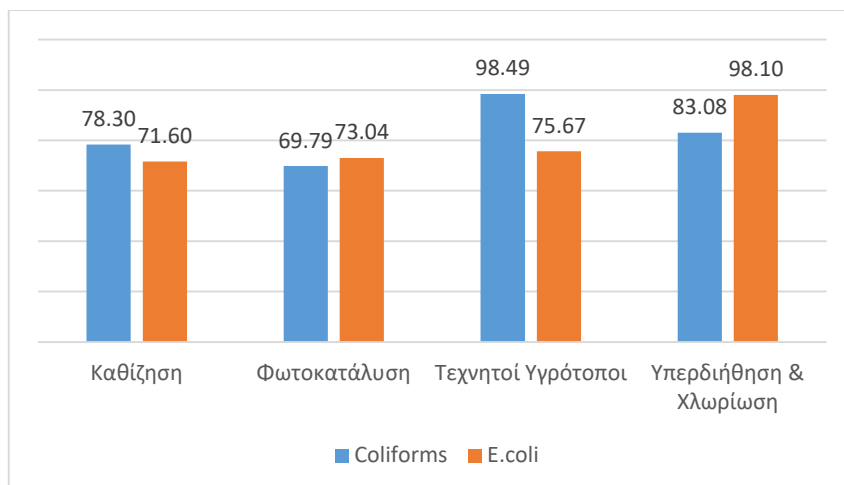
Κατά την τριτοβάθμια επεξεργασία, τα επεξεργασμένα λύματα διέρχονται από μονάδα υπερδιήθησης και στη συνέχεια απολυμαίνονται με χλωρίωση, μειώνοντας σημαντικά το ρυπαντικό φορτίο και τους μικροοργανισμούς στα λύματα, αντίστοιχα. Το 2017 η διεργασία της υπερδιήθησης δεν ήταν σε λειτουργία λόγω της χαμηλής παροχής λυμάτων στην ΕΕΛ. Κατά την περίοδο του καλοκαιριού του 2018 παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση του TN και του TP κατά τη διεργασία αυτή όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8, διατηρώντας και πάλι τις τελικές συγκεντρώσεις εντός των επιθυμητών ορίων της επαναχρησιμοποίησης.



Σχήμα 8. Ποσοστά απομάκρυνσης ρύπων μετά την υπερδιήθηση και τη χλωρίωση για το χειμώνα και το καλοκαίρι του 2018

Ο συνδυασμός φυσικών και μηχανικών μεθόδων επεξεργασίας επιτυγχάνει σημαντικά ποσοστά απομάκρυνσης και των παθογόνων μικροοργανισμών (total coliforms και E. coli) με τις πιο αποτελεσματικές διεργασίες να είναι αυτές των τεχνητών υγροτόπων και της υπερδιήθησης σε συνδυασμό με χλωρίωση με ποσοστά απομάκρυνσης άνω το 70% (Σχήμα 9).

Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω διεργασιών οδηγεί σε χαμηλά λειτουργικά κόστη της ΕΕΛ (περίπου 600€/ μήνα για το χειμώνα και 2,500€/ μήνα για το καλοκαίρι), τα οποία κυρίως είναι τα χημικά που χρησιμοποιούνται στην καθίζηση και την φωτοκατάλυση όπως και ο καταλύτης (TiO₂).



Σχήμα 9. Ποσοστά απομάκρυνσης παθογόνων μικροοργανισμών (total coliforms & E.coli) σε κάθε διεργασία

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο συνδυασμός φυσικών και μηχανικών μεθόδων επεξεργασίας λυμάτων αποτελεί μια βιώσιμη λύση για απομακρυσμένες περιοχές και νησιά με μεγάλες εποχιακές διακυμάνσεις στα υδραυλικά και ρυπαντικά φορτία όπως φαίνεται και στην περίπτωση της ΕΕΛ της Θηρασίας.

Ο συνδυασμός της καθίζησης και της ετερογενούς φωτοκατάλυσης πριν τη δευτεροβάθμια επεξεργασία (τεχνητοί υγρότοποι) πετυχαίνει αποτελεσματική μείωση των στερεών και του οργανικού φορτίου των λυμάτων διευκολύνοντας την περαιτέρω επεξεργασία τους στους υγρότοπους με σημαντικά οφέλη στη λειτουργία τους (δεν εμφανίζονται φαινόμενα έμφραξης, μικρότερη απαιτούμενη έκταση υγροτόπου). Τέλος, τα επεξεργασμένα λύματα διέρχονται από υπερδιήθηση και χλωρίωση απομακρύνοντας τους παθογόνους μικροοργανισμούς σε ποσοστό άνω του 80%, και καθιστώντας την εκροή της ΕΕΛ κατάλληλη για επαναχρησιμοποίηση.

Για την αποδοτικότερη λειτουργία της ΕΕΛ θα μπορούσαν και αυτά τα κόστη να μειωθούν, είτε χρησιμοποιώντας μόνο τον αερισμό της φωτοκατάλυσης κατά τους χειμερινούς μήνες, μειώνοντας έτσι τα έξοδα για αγορά καταλύτη είτε αντικαθιστώντας τον καταλύτη με κάποιον με μεγαλύτερη απόδοση, μειώνοντας έτσι τις ενεργειακές απαιτήσεις και τη χρήση χημικών στους υγρότοπους και την υπερδιήθηση αντίστοιχα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C. Zaharia. Process Safety and Environmental Protection 180 (2017) 74-88.
- [2] R. H. Kadlec, D. S. Wallace. CRC Press (2008) Florida, USA.
- [3] P.-M. Stathatou, P. Dedousis, G. Arampatzis, H. Grigoropoulou, D. Assimacopoulos. 6th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Naxos Island, Greece, (2018) June 13-16.
- [4] R. H. Kadlec, K. R. Reddy. Water Environmental Research 73(5) (2001) 543-557.
- [5] A. Antoniadis, V. Takavakoglou, G. Zalidis, E. Darakas, I. Poullos. Catalysis Today 151(1) (2010) 114-118.
- [6] D. Tsoukleris, I. Nydrioti, P.-M. Stathatou, P. Dedousis, G. Arampatzis, D. Assimacopoulos. 6th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Crete Island, Greece, (2018) September 4-6.
- [7] Εγνατία Οδός Α.Ε. Τεχνική Περιγραφή – Ειδικές Τεχνικές Προδιαγραφές. ΕΡΓΟ: «Κατασκευή εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων νήσου Θηρασίας (N0900α) (2013).