

## **Αειφόρος λειτουργία εγκαταστάσεων βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων**

Αμανατίδου Ελισάβετ<sup>1,\*</sup>, Σαμιώτης Γεώργιος<sup>1</sup>, Τρικοιλίδου Ελένη<sup>1</sup>, Ταουσάνιδης Νικόλαος<sup>2</sup>, και Μπέλλος Δημήτριος<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος και Μηχανικών Τεχνολογιών Αντιρρύπανσης, Εργαστήριο Περιβαλλοντικής Χημείας και Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων (ΕΠΧ-ΕΥΑ), Κοζάνη, 50100, Ελλάδα

<sup>2</sup>ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών και Βιομηχανικού Σχεδιασμού ΤΕ, Κοζάνη, 50100, Ελλάδα

\*Corresponding author email: eamanatidou@teiwu.gr

### **Περίληψη**

Η αειφορική λειτουργία μονάδας βιολογικού καθαρισμού λυμάτων των μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (ΜΕΥΑ) είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την απόδοση της επεξεργασίας, το κόστος της διαχείρισης ιλύος, την κατανάλωση ενέργειας και το κόστος παρακολούθησης. Η βιολογική επεξεργασία προσφέρει υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης οργανικού ρυπαντικού φορτίου, εμπεριέχει όμως το πρόβλημα των μεγάλων ποσοτήτων παραγόμενης βιομάζας. Η παραγόμενη βιομάζα (ιλύς) αποτελείται από ενεργούς (ζωντανούς) και ανενεργούς (νεκρούς) μικροοργανισμούς και πρέπει να υποστεί επεξεργασία πριν την τελική της διάθεση, ώστε να αποφευχθούν δυσμενείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον. Η απόδοση επεξεργασίας συσχετίζεται άμεσα με τις λειτουργικές συνθήκες της ΜΕΥΑ, τα χαρακτηριστικά της βιομάζας και τον επιτυχή διαχωρισμό της ενεργού ιλύος από τα εξερχόμενα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα (ΥΑ). Ο αφρισμός, η διόγκωση της ιλύος, η επίπλευση ιλύος στις δεξαμενές καθίζησης και η αδυναμία συσσωμάτωσης της βιομάζας είναι από τα συνηθέστερα και σημαντικότερα προβλήματα που συναντώνται στις ΜΕΥΑ και τα οποία συνήθως συσχετίζονται με τις λειτουργικές συνθήκες της ΜΕΥΑ και τα μικροβιολογικά χαρακτηριστικά της βιομάζας. Η αειφορική διαχείριση της απορριπτόμενης ιλύος (λυματολάσπη) και ο περιορισμός της κατανάλωσης ενέργειας είναι οι δύο κύριες πτυχές που καθορίζουν το κόστος λειτουργίας των ΜΕΥΑ. Η επεξεργασία και διαχείριση της απορριπτόμενης ιλύος καταλαμβάνει ποσοστό μεγαλύτερο του 50% του συνολικού κόστους λειτουργίας των ΜΕΥΑ. Οι αερόβιες ΜΕΥΑ έχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις για την κάλυψη των αναγκών αερισμού, μεταφοράς του εισερχόμενου ΥΑ, ανακυκλοφορίας του ανάμεικτου υγρού και της ιλύος (ανακυκλοφορία νιτρικών και βιομάζας). Προκειμένου να διασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία των ΜΕΥΑ, ένας μεγάλος αριθμός φυσικοχημικών παραμέτρων πρέπει να παρακολουθείται συστηματικά, αυξάνοντας περαιτέρω το λειτουργικό κόστος τους. Δεδομένου ότι οι λειτουργικές παράμετροι των ΜΕΥΑ συνδέονται με το μικροβιακό πληθυσμό, ένας πρακτικός τρόπος ελέγχου των εγκαταστάσεων είναι η μικροσκοπική εξέταση της ιλύος, η οποία έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την αξιολόγηση της απόδοσης επεξεργασίας και την αξιολόγηση πιθανών προβλημάτων και συμπτωμάτων. Αυτή η εργασία παρουσιάζει μια βιολογική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με σχεδόν μηδενική παραγωγή απορριπτόμενης ιλύος και με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, καθώς και έναν πρακτικό τρόπο για τον έλεγχο λειτουργίας των ΜΕΥΑ μέσω της μικροβιακής χειραγώγησης και της μικροσκοπικής εξέτασης της ιλύος.

**Λέξεις κλειδιά:** *Ενεργός Ιλύς, Οικολογικό Αποτύπωμα, Βελτιστοποίηση Λειτουργίας, Εξοικονόμηση Ενέργειας, Ελαχιστοποίηση Λυματολάσπης, Ολική Κράτηση Ιλύος*

## 1. Εισαγωγή

*Προβλήματα που προκαλούνται από τα υγρά απόβλητα:* Οι ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η γεωργία και η κτηνοτροφία, καθώς και η αστική και βιομηχανική ανάπτυξη, δημιουργούν μεγάλες ποσότητες υγρών αποβλήτων (ΥΑ) που πρέπει να υποστούν επεξεργασία πριν από την διάθεσή τους σε υδατικά σώματα ή στην ξηρά. Αν τα ΥΑ δεν υποστούν επαρκή επεξεργασία, το ρυπαντικό τους φορτίο μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υποβάθμισης του περιβάλλοντος, με άμεσο αντίκτυπο στην ανθρώπινη υγεία. Τα γεωργικά και αστικά ΥΑ συσσωρεύουν μεγάλες ποσότητες ρύπων, όπως οργανικά, αζωτούχα και φωσφορικά συστατικά, στα επιφανειακά ύδατα, τα υπόγεια ύδατα και το έδαφος, συμβάλλοντας στην κλιματική αλλαγή λόγω εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases, GHGs) από τη βιοαποικοδόμηση του ρυπαντικού φορτίου. Οι ρύποι αυτοί είναι υπεύθυνοι για τον ευτροφισμό των επιφανειακών υδάτων καθώς αποτελούν θρεπτικές ουσίες για ένα πλήθος μικροβιακών ειδών.

*Αρχή διεργασίας ενεργού ιλύος:* Εδώ και δεκαετίες, ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών, διεργασιών και τεχνικών έχει αναπτυχθεί και εφαρμοστεί για την επεξεργασία των αστικών ή / και βιομηχανικών αποβλήτων. Οι πιο συχνά εφαρμοζόμενες τεχνολογίες επεξεργασίας είναι οι βιολογικές διεργασίες, δηλαδή η χρήση και η εκμετάλλευση βακτηριακών ειδών για την απομάκρυνση του ρυπαντικού φορτίου. Η βασική ιδέα είναι η καλλιέργεια ενός σημαντικού μικροβιακού πληθυσμού (ενεργό ιλύ, EI), ο οποίος χρησιμοποιεί το ρυπαντικό φορτίο για την κάλυψη των αναγκών του (ανάπτυξη και παραγωγή ενέργειας), μέσα από τη δημιουργία των απαραίτητων συνθηκών στους βιοαντιδραστήρες που ευνοούν την ανάπτυξη τους. Διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες, όπως αερόβιες, αναερόβιες ή ανοξικές, ενισχύουν την ανάπτυξη συγκεκριμένων βακτηρίων, τα οποία μπορούμε να εκμεταλλευτούμε για την επεξεργασία διαφορετικών υποστρωμάτων (οργανικά, αζωτούχα και φωσφορικά συστατικά των ΥΑ). Η βιολογική διεργασία ακολουθείται από το διαχωρισμό στερεών / υγρού, διαχωρισμός που επιτυγχάνεται συνήθως με βαρυτική καθίζηση. Ένα κλάσμα των διαχωρισμένων στερεών ανακυκλώνεται, ενώ το υπόλοιπο απορρίπτεται από το σύστημα.

*Το πρόβλημα της παραγωγής ιλύος κατά τη βιολογική επεξεργασία ΥΑ:* Αν και βιολογική επεξεργασία προσφέρει σημαντική απόδοση με σχετικά χαμηλό κόστος, συνεπάγεται επίσης σημαντική παραγωγή ιλύος λόγω της συσσώρευσης ενεργού και ανενεργού (ανόργανης) ιλύος στη μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (ΜΕΥΑ). Η εκτεταμένη συσσώρευση ιλύος εμποδίζει την αποτελεσματικότητα της καθίζησης και μπορεί επίσης να δημιουργήσει προβλήματα στην ανάμιξη και στον αερισμό των βιοαντιδραστήρων. Κατά συνέπεια, μεγάλες ποσότητες συσσωρευμένης ιλύος (λυματολάσσης) πρέπει να απορρίπτονται συχνά από μία εγκατάσταση βιολογικής επεξεργασίας ΥΑ. Η ποσότητα της παραγόμενης, άρα και απορριπτόμενης, ιλύος εξαρτάται από τη σύσταση και την παροχή του εισερχόμενου ΥΑ, καθώς και από τις λειτουργικές συνθήκες της ΜΕΥΑ. Μεγάλα ρυπαντικά φορτία έχουν ως αποτέλεσμα αυξημένη παραγωγή βιομάζας, ενώ λειτουργικές παράμετροι όπως τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου (Dissolved Oxygen, DO), τα επίπεδα φόρτισης υποστρώματος ανά μονάδα μάζας ιλύος (Food to Microorganisms ratio, F/M) ή αλλιώς ο συντελεστής φόρτισης ιλύος (Sludge loading rate, Ls), η ηλικία λάσσης (Solids Retention Time, SRT), ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time, HRT) και η εναλλαγή των συνθηκών επεξεργασίας (αερόβιες, ανοξικές, αναερόβιες κτλ.) μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την παραγωγή βιομάζας.

Η διάθεση της απορριπτόμενης ιλύος στο έδαφος μπορεί να δημιουργήσει αρνητικές περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, όπως τη ρύπανση του εδάφους και των

υδάτων, τους κινδύνους που μπορεί να δημιουργηθούν για την ανθρώπινη υγεία και την υποτίμηση της αξίας της περιοχής. Η επεξεργασία της απορριπτόμενης λύσης αυξάνει το κόστος επεξεργασίας των ΥΑ περισσότερο από 50%.<sup>1-3</sup> Κατά συνέπεια, η ελαχιστοποίηση της απορριπτόμενης λύσης αποτελεί βασικό βήμα προς τον αειφόρο σχεδιασμό και λειτουργία των ΜΕΥΑ.

*Προσεγγίσεις για την ελαχιστοποίηση της απορριπτόμενης λύσης:* Διάφορες προσεγγίσεις για την ελαχιστοποίηση της παραγόμενης λύσης έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον επιστημόνων και μηχανικών, καθώς αυτή μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα της διαχείρισης της απορριπτόμενης λύσης στην πηγή. Είναι γνωστό ότι οι συνθήκες λειτουργίας των ΜΕΥΑ συνδέονται με τα βιολογικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά της ενεργού λύσης και με τη μικροβιακή χειραγώγηση που με τη σειρά της επηρεάζει τη διεργασία της καθίζησης, την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας και την παραγωγή λύσης.<sup>3-5</sup>

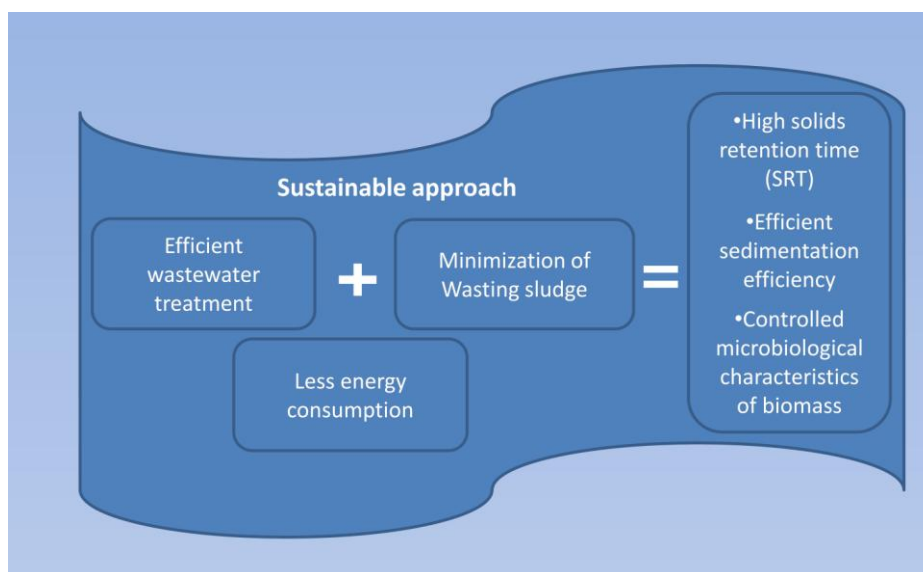
*Υψηλή ηλικία λύσης:* Μια από τις προσεγγίσεις για την ελαχιστοποίηση των παραγόμενων ποσοτήτων λύσης στις ΜΕΥΑ περιλαμβάνει την ενίσχυση της μικροβιακής λύσης και την ανάπτυξη βιομάζας από κυτταρικά υπολείμματα, το οποίο ονομάζεται «εν κρυπτώ ανάπτυξη» (cryptic growth).<sup>6,7</sup> Οι μεγάλοι χρόνοι παραμονής της λύσης οδηγούν στη μείωση του ρυθμού χρήσης υποστρώματος (substrate utilization rate, SUR) και του λόγου F/M, ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο την εν κρυπτώ ανάπτυξη.<sup>5,8</sup>

*Μικροβιακή χειραγώγηση:* Η επιτυχής μικροβιακή χειραγώγηση μπορεί να ελαχιστοποιήσει την παραγωγή λύσης έως του σημείου όπου απορρίπτονται σχεδόν μηδενικές ποσότητες λύσης.<sup>5,9</sup> Η μικροβιακή χειραγώγηση είναι η καθοδηγούμενη ανάπτυξη των επιθυμητών μικροβιακών ειδών μέσω της επιβολής συγκεκριμένων συνθηκών λειτουργίας στους βιοαντιδραστήρες των ΜΕΥΑ. Η επιτυχής μικροβιακή χειραγώγηση προς την κατεύθυνση της αύξησης των ειδικών βακτηρίων θηρευτών (predator microbial species) μπορεί να ελαχιστοποιήσει την παραγωγή λύσης, καθώς οι συγκεκριμένοι μικροοργανισμοί τρέφονται με βακτήρια και οργανικά σωματίδια. Οι αλλαγές στο μεταβολισμό των βακτηρίων που προκαλούνται σε συστήματα με υψηλούς χρόνους παραμονής λύσης, εκτεταμένο αερισμό και εναλλασσόμενες συνθήκες λειτουργίας (αερόβιες, ανοξικές κτλ) έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικροοργανισμών θηρευτών, με αποτέλεσμα μειωμένες ποσότητες συσώρευσης βιομάζας.<sup>8-10</sup> Κατά συνέπεια, σε βιολογικές διεργασίες υψηλού SRT, ο ρυθμός παραγωγής νέων κυττάρων εξισώνεται με το ρυθμό αποσύνθεσης της βιομάζας. Το φαινόμενο της μειωμένης συσώρευσης στερεών υποβοηθείται από την δραστηριότητα των μικροβίων θηρευτών, τα οποία καταναλώνουν διάφορα πολύπλοκα υποστρώματα που περιέχουν οργανικά σωματίδια, βακτήρια, κυτταρικά υπολείμματα κ.λπ. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο καθαρός ρυθμός παραγωγής βιομάζας είναι ελάχιστος και τείνει στο μηδέν.<sup>11</sup>

*Αρχή διεργασίας ολικής κράτησης λύσης:* Μια από τις πιο πολλά υποσχόμενη προσέγγιση προς την αειφόρο λειτουργία των ΜΕΥΑ και τη διαχείριση της απορριπτόμενης λύσης είναι αυτή της ολικής κράτησης λύσης (Complete solids retention process). Η διεργασία αυτή βασίζεται στο υψηλό SRT και στη μικροβιακή χειραγώγηση. Η κεντρική ιδέα της διεργασίας είναι η ολική ανακυκλοφορία της λύσης στους βιοαντιδραστήρες και η οποία έχει ως αποτέλεσμα (α) την εξίσωση της ηλικίας λύσης με το χρόνο λειτουργίας της ΜΕΥΑ, (β) την αύξηση της συγκέντρωσης βιομάζας στους βιοαντιδραστήρες, (γ) τη δημιουργία συνθηκών έλλειψης υποστρώματος (χαμηλό F/M), (δ) τη μείωση του ρυθμού χρήσης υποστρώματος (SUR) και (ε) την ανάπτυξη μικροβίων-θηρευτών. Όλα τα παραπάνω ενεργοποιούν βιοχημικές και βιολογικές διεργασίες μείωσης της παραγόμενης λύσης, όπως τη βακτηριακή λύση, τα φαινόμενα μικροβιακής θήρευσης και τη

μερική αποδόμηση οργανικών σωματιδίων της εισόδου και των μικροβιακών υπολειμμάτων (influent unbiodegradable particulate organics and cell debris) και τα οποία θεωρούνται μη-βιοαποικοδομήσιμα.<sup>9,12</sup> Άλλες μελέτες που διεξήχθησαν σε βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR) που λειτουργούν σε υψηλά SRT έως και του σημείου της ολικής κράτησης των στερεών, ανέφεραν επίσης ότι η παραγωγή βιομάζας εξισορροπείται από την απώλεια βιομάζας (ενδογενής μεταβολισμός, μικροβιακός θάνατος, λύση και θήρευση) ή ότι το εισερχόμενο υπόστρωμα είχε πλήρως οξειδωθεί για τη συντήρηση των κυττάρων.<sup>13,14</sup>

**Οικονομικό αποτύπωμα:** Η αιεφορική ανάπτυξη των ΜΕΥΑ είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον περιορισμό του οικολογικού και οικονομικού αποτύπωμάτος τους. Η υψηλή απόδοση επεξεργασίας, η ελαχιστοποίηση των δευτερογενώς παραγόμενων ρύπων και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι τα κλειδιά για την αιεφορία. Οι ενεργειακές απαιτήσεις για τη λειτουργία των υποβρύχιων αντλιών, των φυσητήρων, των αναδευτήρων, των διαχωριστών κτλ, είναι ανάλογες του εισερχόμενου φορτίου και διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των διαφόρων διεργασιών επεξεργασίας. Η κατανάλωση ενέργειας κυμαίνεται από 1 έως 25 Kwh/kgCOD<sub>απομακρυνόμενου</sub> και 0,25 έως 13 Kwh/kgCOD<sub>απομακρυνόμενου</sub> για αερόβια και αναερόβια συστήματα επεξεργασίας αντίστοιχα.<sup>15-19</sup> Η επιτυχής μικροβιακή χειραγώγηση και ως εκ τούτου η αποδοτική επεξεργασία με μικρότερες ποσότητες απορριπτόμενης ιλύος, όπως επίσης και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, θα πρέπει να είναι ο στόχος των μηχανικών στο δρόμο για το σχεδιασμό και λειτουργία αιεφόρων ΜΕΥΑ (Σχήμα 1).

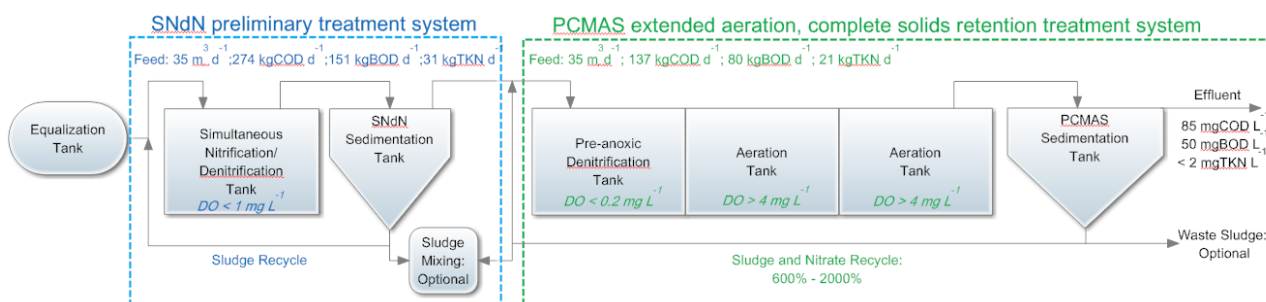


**Σχήμα 1.** Βασικοί παράμετροι προς τις αιεφόρες τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την επιτυχή εφαρμογή μίας καινοτόμου ΜΕΥΑ ενεργού ιλύος, σχεδιασμένη για την επεξεργασία ισχυρών ΥΑ (high strength wastewater) με ελαχιστοποιημένες παραγωγές απορριπτόμενης ιλύος. Η ΜΕΥΑ που μελετήθηκε λειτούργησε πέραν των τυπικών βιβλιογραφικών ορίων που αφορούν στη συγκέντρωση βιομάζας, στους ρυθμούς ανακυκλοφορίας και στο σχεδιασμό των δεξαμενών, ενώ πέτυχε εξαιρετική απόδοση επεξεργασίας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και αμελητέες ποσότητες απορριπτόμενης ιλύος. Η εργασία παρέχει στους μηχανικούς με τις πληροφορίες που απαιτούνται για τον έλεγχο της βιολογικής διεργασίας μέσω της μικροβιακής χειραγώγησης και προσφέρει την ευκαιρία να αξιολογηθούν εκ νέου κάποιες κρίσιμες παράμετροι στο σχεδιασμό και στη λειτουργία των ΜΕΥΑ, προς μια πιο αποτελεσματική και βιώσιμη επεξεργασία ΥΑ.

## 2. Υλικά και Μέθοδοι

Η ΜΕΥΑ αναφοράς είναι εγκατεστημένη στην εταιρεία Σφαγεία Αλμωπίας ΑΕ στο νομό Πέλλας. Η ΜΕΥΑ σχεδιάστηκε για την επεξεργασία ΥΑ υψηλού ρυπαντικού φορτίου (high strength wastewater) με εφαρμογή της διεργασίας ολικής κράτησης στερεών.<sup>20</sup> Η ΜΕΥΑ (Σχήμα 2) αποτελείται από δύο διακριτά στάδια επεξεργασίας που περιλαμβάνουν (α) ένα προκαταρκτικό στάδιο ταυτόχρονης βιολογικής νιτροποίησης-απονιτροποίησης (Simultaneous Nitrification-Denitrification, SNdN) και (β) ένα στάδιο βιολογικής επεξεργασίας ΕΙ, παρατεταμένου αερισμού με προ-απονιτροποίηση (Pre-anoxic Complete Mix Activated Sludge, PCMAS) και με καθολική κατακράτηση υλός (Complete Solids Retention Activated Sludge Process). Το προκαταρκτικό στάδιο επεξεργασίας (SNdN) διαθέτει δεξαμενή καθίζησης με εσωτερική ανακυκλοφορία υλός, δηλαδή λειτουργεί ως βιοεπιλογέας (biological selector), όπου αναπτύσσεται νεότερη σε ηλικία βιομάζα αξιοποιώντας το εύκολα βιοαποικοδομήσιμο υπόστρωμα (readily biodegradable substrate). Το εξερχόμενο ΥΑ και η απορριπτόμενη υλός του SNdN εισρέουν στο PCMAS. Πριν την εισροή των ΥΑ στο SNdN, εφαρμόζεται προκαταρκτική επεξεργασία (αυτόματες σχάρες, decanter, αεριζόμενη δεξαμενή εξισορρόπησης).



Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής της ΜΕΥΑ αναφοράς και σχετικές λειτουργικές συνθήκες

Αυτή η εφαρμογή της διεργασίας ΕΙ με ολική κράτηση στερεών εμφανίζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα ΕΙ, όπως τη διάταξη των δεξαμενών και βιοαντιδραστήρων, τη γεωμετρία των δεξαμενών καθίζησης, καθώς και τα σημεία και το ρυθμό των ανακυκλοφοριών. Τα ΥΑ υπόκεινται εναλλασσόμενα αερόβια, ανοξικά και ημι-ανοξικά στάδια βιολογικής επεξεργασίας, διατηρώντας με αυτόν τον τρόπο μικρούς ρυθμούς ανάπτυξης βιομάζας και αυξημένη παρουσία συγκεκριμένων, επιθυμητών μικροβιακών ειδών στους βιοαντιδραστήρες. Με σκοπό τον έλεγχο της διεργασίας της καθίζησης, η ΜΕΥΑ λειτουργεί με υψηλούς ρυθμούς ανακυκλοφοριών (>600%), ως εκ τούτου δημιουργούνται συνθήκες «εξανασμένης καθίζησης».<sup>1,3,21-22</sup>

Το ογκομετρικό φορτίο του συγκεκριμένου σφαγείου είναι σχετικά μικρό (35 m<sup>3</sup>/ημέρα), ενώ περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις οργανικών (8250 mgCOD/L and 4538 mgBOD<sub>5</sub>/L) και υψηλές συγκεντρώσεις αζώτου (1250 mgTKN/L). Λόγω της προέλευσης των ΥΑ, το εισερχόμενο οργανικό φορτίο είναι βιοδιασπάσιμο σε μεγάλο βαθμό, με μία μέση αναλογία COD/BOD<sub>ultimate</sub> της τάξης του 0,969. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων στερεών του εισερχόμενου ΥΑ είναι περίπου 1100 mgTSS/L, αποτελούμενα κυρίως από πτητικά οργανικά (1008 mgVSS/L), με ένα μικρό αδρανές (ανόργανο) κλάσμα της τάξης του 0,027.

Ενώ τα οργανικά αιωρούμενα στερεά δε θεωρούνται πλήρως βιοαποικοδομήσιμα, προηγούμενες μελέτες έχουν αποδείξει ότι υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και σχεδιασμό, το κλάσμα των αιωρούμενων στερεών που θεωρείται μη-βιοαποικοδομήσιμο

(unbiodegradable) μπορεί να αξιοποιηθεί και να βιοαποικοδομηθεί από τους μικροοργανισμούς.<sup>9</sup>

### 3. Results and discussion

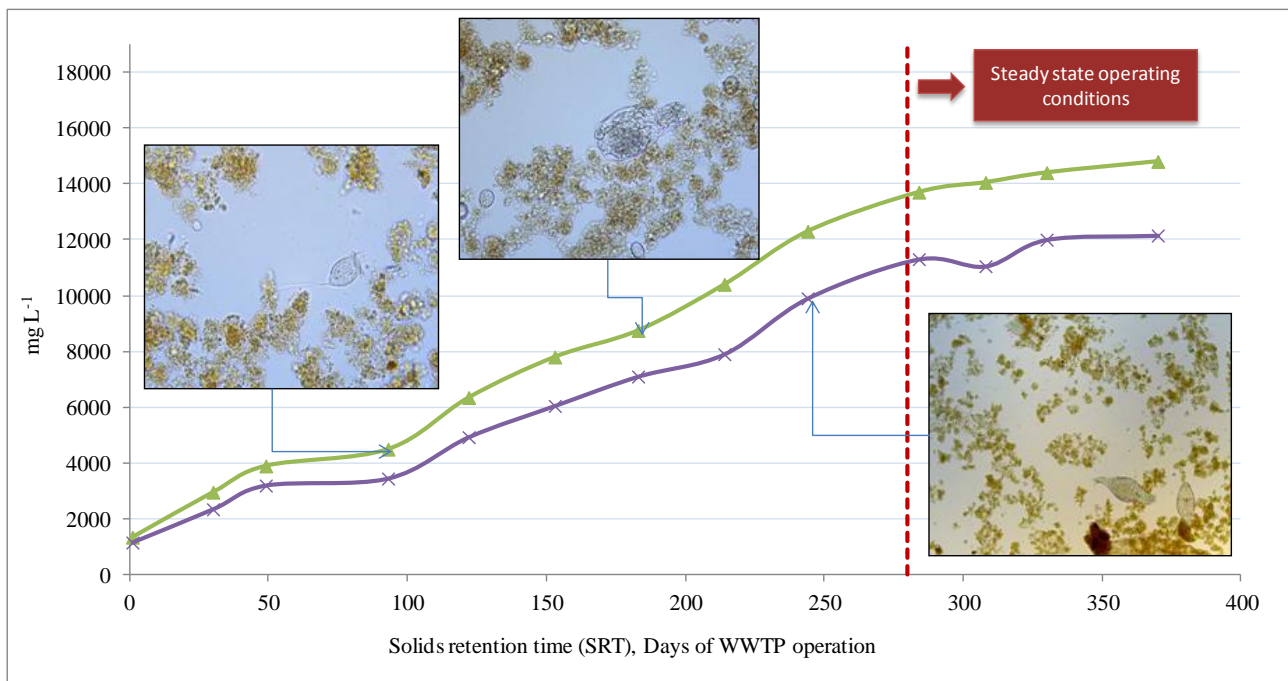
Στη ΜΕΥΑ που μελετήθηκε, η απομάκρυνση του ρυπαντικού φορτίου ολοκληρώθηκε σε δύο στάδια. Μια προκαταρκτική απομάκρυνση επιτεύχθηκε στο SNdN αλλά η κύρια επεξεργασία και απομάκρυνση των ρυπαντών επιτεύχθηκε στο δεύτερο στάδιο (PCMAS). Η ποιότητα του επεξεργασμένου ΥΑ ήταν σύμφωνη με τη νομοθεσία που αφορά στη διάθεση ΥΑ σε ευαίσθητους αποδέκτες. Η ολική απόδοση απομάκρυνσης ήταν 99% για τα οργανικά και τα φωσφορικά συστατικά και μεγαλύτερη από 90% για τα αζωτούχα.

Από την εκκίνηση (start-up) της ΜΕΥΑ και για διάστημα 280 ημερών παρατηρούταν σταδιακή μείωση του ρυθμού συσσώρευσης στερεών, μέχρι του σημείου όπου το σύστημα εισήλθε σε συνθήκες σταθερής λειτουργίας (steady state operating conditions) με σχεδόν μηδενική παραγωγή και συσσώρευση ιλύος (zero sludge process), διατηρώντας σχετικά σταθερή αναλογία μικροοργανισμών/ιλύ (MLVSS/MLSS ratio) (Σχήμα 3).

Η συγκέντρωση της ιλύος στην εγκατάσταση (MLSS), καθώς επίσης το οργανικό (πηκτικό) της μέρος (MLVSS), αυξάνονταν μέχρι τη 280<sup>η</sup> ημέρα λειτουργίας της ΜΕΥΑ, όπου τότε το σύστημα εισήλθε σε συνθήκες σταθερής λειτουργίας (steady state operating conditions) με σχεδόν μηδενική παραγωγή και συσσώρευση ιλύος (zero sludge process), διατηρώντας σχετικά σταθερή αναλογία μικροοργανισμών/ιλύ (MLVSS/MLSS  $\approx$  0,8) (Σχήμα 3).

Αυτές οι παρατηρήσεις οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι κάτω από συνθήκες ολικής κράτησης ιλύος και υπό συγκεκριμένες λειτουργικές συνθήκες, το μεγαλύτερο μέρος του θεωρητικά μη βιοδιασπόμενου σωματιδιακού COD (unbiodegradable particulate COD), προερχόμενο από το εισερχόμενο ΥΑ και από την ενδογενή κυτταρική λύση των (endogenous decay products), καταναλώνεται από τους μικροοργανισμούς ως υπόστρωμα (τροφή). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή τα τροχόζωα (rotifers) και τα βλεφαριδοφόρα (ciliates) θεωρούνται υπεύθυνα για την απομάκρυνση του σημαντικότερου μέρους αυτών των θεωρητικά μη βιοδιασπασίμων οργανικών στερεών (Σχήμα 3).

Παρατηρήθηκαν τρεις διακριτές φάσης ανάπτυξης που μπορούν να χαρακτηριστούν ως: (α) φάση εκκίνησης με υψηλούς ρυθμούς μικροβιακής ανάπτυξης (1<sup>η</sup> με 90<sup>η</sup> ημέρα), όπου παρατηρείται αυξημένη παρουσία ενδεικτικών μικροοργανισμών που αναπτύσσονται σε ενεργό ιλύ μικρής ηλικίας (free-swimming bacterivorous ciliates και small heterotrophic flagellates), (β) φάση μειωμένης ανάπτυξης (90<sup>η</sup> με 180<sup>η</sup> ημέρα) με παρουσία μικροβιακών ειδών ενδεικτικών ώριμης (mature) ενεργού ιλύος (free-swimming ciliates, crawling ciliates, stalk ciliates και rotifers-metazoan) και με καλή συνεκτικότητα φλόκων (floc aggregation) και (γ) φάση σταθεροποίησης (180<sup>η</sup> με 425<sup>η</sup> ημέρα), με σχεδόν μηδενική παραγωγή βιομάζας, όπου παρατηρείται αυξημένη παρουσία μικροβιακών ειδών μεγαλύτερης ηλικίας (freeswimming ciliates, crawling ciliates, stalk ciliates και rotifers-metazoan), ενώ οι φλόκοι της ιλύος εμφανίζουν μορφή «κεφαλής καρφίτσας» (pin point flocs).



**Σχήμα 3.** Συσσώρευση στερεών στη ΜΕΥΑ αναφοράς και αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες μικροσκοπίου στα διακριτά στάδια εξέλιξης της βιομάζας; ▲ συγκέντρωση MLSS; × συγκέντρωση MLVSS

Ο επιτυχής διαχωρισμός των στερεών από το επεξεργασμένο ΥΑ επιτεύχθηκε μέσω του ιδιαίτερου σχεδιασμού της δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης (ΔΔΚ) και της εφαρμογής εξαναγκασμένης καθίζησης που προκαλείται από την εφαρμογή υψηλών ρυθμών ανακυκλοφορίας ιλύος (1000% - 2000%).<sup>3</sup>

Επιπλέον, για τον έλεγχο της απόδοσης της διεργασίας της καθίζησης και τη ρύθμιση των ανακυκλοφοριών πραγματοποιούνταν περιοδικά δοκιμές καθίζησης (settling velocity tests) και ανάλυση του σημείο λειτουργικής κατάστασης (steady state analysis). Από τον έλεγχο αυτό προσδιορίζονταν οι ρυθμοί ανακυκλοφορίας και ρυθμίζονταν η ζώνη λάσπης (sludge blanket) στη ΔΔΚ, καθώς και η συνολική απόδοση της διεργασίας. Αξίζει να αναφερθεί ότι στη συγκεκριμένη εφαρμογή γίνεται χρήση αεραντλιών, έναντι της χρήσης ηλεκτρικών υποβρύχιων αντλιών, για τις ανακυκλοφορίες ιλύος και νιτρικών με αποτέλεσμα τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων της ΜΕΥΑ.

Η εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους εργασίας στην ΜΕΥΑ αναφοράς επιτεύχθηκε κυρίως μέσω (α) της ελαχιστοποίησης των ποσοτήτων απορριπτόμενης ιλύος και επομένως τις μικρότερες ανάγκες σε εξοπλισμό, προσωπικό και διαδικασίες διάθεσης (αφυδάτωση ιλύος, μεταφορά κτλ) και (β) της περιορισμένης χρήσης ηλεκτρικών υποβρύχιων αντλιών (γενικευμένη χρήση αεραντλιών) και (γ) της επιτυχούς μικροβιακής χειραγώγησης που είχε ως αποτέλεσμα τη αποφυγή χρήσης χημικών βοηθημάτων (κροκκιδωτικά κτλ).

Σε συμβατικά συστήματα επεξεργασίας ΥΑ, ο παρατηρούμενος ρυθμός παραγωγής βιομάζας (observed biomass production rate,  $Y_{obs}$ ) κυμαίνεται συνήθως σε τιμές μεταξύ 0,12 and 0,45 kgMLVSS/kgCOD.<sup>1</sup> Συνεπώς, με τα δεδομένα χαρακτηριστικά των ΥΑ της ΜΕΥΑ αναφοράς θα αναμένονταν ημερήσιες παραγωγές απορριπτόμενης ιλύος (επί ξηρού) της τάξης των 35 με 130 kg ή 5,8 με 21,6 m<sup>3</sup> απορριπτόμενης ιλύος (περιεκτικότητας 6% σε στερεά). Σε ετήσια κλίμακα η ποσότητες υπολογίζονται σε περίπου 12,7 με 47,5 τόνους επί ξηρού ή 2100 με 7900 m<sup>3</sup>



απορριπτόμενης ιλύος (περιεκτικότητας 6% σε στερεά). Από την παρακολούθηση όμως του ρυθμού παραγωγής βιομάζας ( $Y_{obs}$ ) στη φάση σταθερής λειτουργίας της ΜΕΥΑ αναφοράς διαπιστώθηκαν πολύ μικρότεροι ρυθμοί συσσώρευσης στερεών, έχοντας μία μέση τιμή  $Y_{obs}$  περίπου 0,025 kgVSS/kgCOD. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την απόρριψη μόνο 2,6 τόνων ιλύος, δηλαδή επιτεύχθηκε 80 – 95 % λιγότερη παραγωγή απορριπτόμενης ιλύος. Αξίζει να επισημανθεί ότι το κόστος επεξεργασίας και διαχείρισης της απορριπτόμενης ιλύος καταλαμβάνει ποσοστό μεγαλύτερο του 50% του συνολικού κόστους λειτουργίας των ΜΕΥΑ.<sup>1-3</sup>

Κάτω από τις δεδομένες συνθήκες λειτουργίας της ΜΕΥΑ αναφοράς, η μικροβιακή χειραγώγηση σε συνδυασμό με την επιτυχή καθίζηση και διαχωρισμό οδήγησαν σε αποδοτική επεξεργασία και ελαχιστοποιημένη παραγωγή ιλύος, ενώ η χρήση αεραντλιών και η απουσία χρήσης χημικών (κροκιδωτικών κτλ) περιόρισαν την κατανάλωση ενέργειας και το λειτουργικό κόστος. Σχεδόν το σύνολο του κόστους λειτουργίας (>90%) της ΜΕΥΑ αναφοράς αφορά στον αερισμό και ο οποίος πρέπει να επιτυγχάνει μεγάλη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου ( $DO > 4$  mg/L) στις δεξαμενές αερισμού αλλά και να διασφαλίζει την ορθή λειτουργία των αεραντλιών. Οι υπόλοιπες ενεργειακές ανάγκες της ΜΕΥΑ οφείλονται στη χρήση ενός ηλεκτρικού αναδευτήρα στη δεξαμενή προ-απονιτροποίησης ανάμιξης, δύο υποβρύχιων ηλεκτρικών αντλιών και του συστήματος τηλεπισκόπησης (SCADA).

Λόγω της φύσης των ΥΑ σφαγείου (υψηλό οργανικό και αζωτούχο φορτίο) και τις υψηλές συγκεντρώσεις βιομάζας, η κατανάλωση οξυγόνου στη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων είναι σχετικά υψηλή. Στη ΜΕΥΑ απαιτείται οξυγόνο τόσο για την οξείδωση των οργανικών ενώσεων και του αμμωνιακού αζώτου των ΥΑ, όσο και για την αναπνοή της βιομάζας. Με βάση τη βιβλιογραφία<sup>1</sup> και λαμβάνοντας υπόψη τη σχετικά μικρή ποσότητα οξυγόνου που απελευθερώνεται στους ανοξικούς βιοαντιδραστήρες κατά τη διεργασία της απονιτροποίησης, οι υπολογιζόμενες τιμές κατανάλωσης οξυγόνου ήταν περίπου 130 kgO<sub>2</sub>/ημέρα, 90 kgO<sub>2</sub>/ημέρα και 190 kgO<sub>2</sub>/ημέρα για την οξείδωση των οργανικών συστατικών, την οξείδωση της αμμωνίας και της αναπνοής της βιομάζας αντίστοιχα, οδηγώντας σε μια συνολική απαίτηση σε οξυγόνο των 410 kgO<sub>2</sub>/ημέρα. Η πραγματική ποσότητα του οξυγόνου που απαιτείται είναι περίπου 940 kgO<sub>2</sub>/ημέρα, υπολογισμένο λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της αλατότητας, την επιφανειακή τάση, τη θερμοκρασία, το υψόμετρο, το βάθος διάχυσης, το επιθυμητό επίπεδο οξυγόνου (4 mg/L), την επίδραση της έντασης ανάμιξης και τη διαμόρφωση της δεξαμενής.

Η τροφοδότηση του συστήματος αερισμού και των αεραντλιών ανακυκλοφορίας χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρικός φυσητήρας 7,5 kW, ο οποίος καταναλώνει περίπου 168 kWh/ημέρα. Η ανακυκλοφορία νιτρικών και ιλύος γίνονταν με τη χρήση αεραντλιών συνδεδεμένων στο δίκτυο αερισμού, συνεπώς δεν απαιτείται καμία πρόσθετη ενέργεια. Η μόνη πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας οφείλεται στη χρήση δύο υποβρύχιων ηλεκτρικών αντλιών τροφοδοσίας 250 watt (μέγιστη κατανάλωση 12 kWh/ημέρα). Κατά συνέπεια, η συνολική κατανάλωση ενέργειας ήταν περίπου 180 kWh/ημέρα.

Η κατανάλωση ενέργειας σε μία ΜΕΥΑ μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του ογκομετρικού φορτίου, του απομακρυνόμενου COD ή BOD, όπως επίσης συναρτήσει του απομακρυνόμενου αζώτου (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN) των ΥΑ (όταν χρησιμοποιείται ξεχωριστός ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός). Στην περίπτωσή μας, το ενεργειακό κόστος αναφέρεται στην συνολική απομάκρυνση οργανικών και αζωτούχων συστατικών καθώς οι διεργασίες της οξείδωσης των οργανικών και των αμμωνιακών λαμβάνουν χώρα στον ίδιο βιοαντιδραστήρα και με κοινό ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Συνεπώς, εκφράζοντας την κατανάλωση ενέργειας ως



kWh/kgBOD ή ως kWh/kgCOD, η κατανάλωση ενέργειας για την απομάκρυνση του αζώτου περιλαμβάνεται.

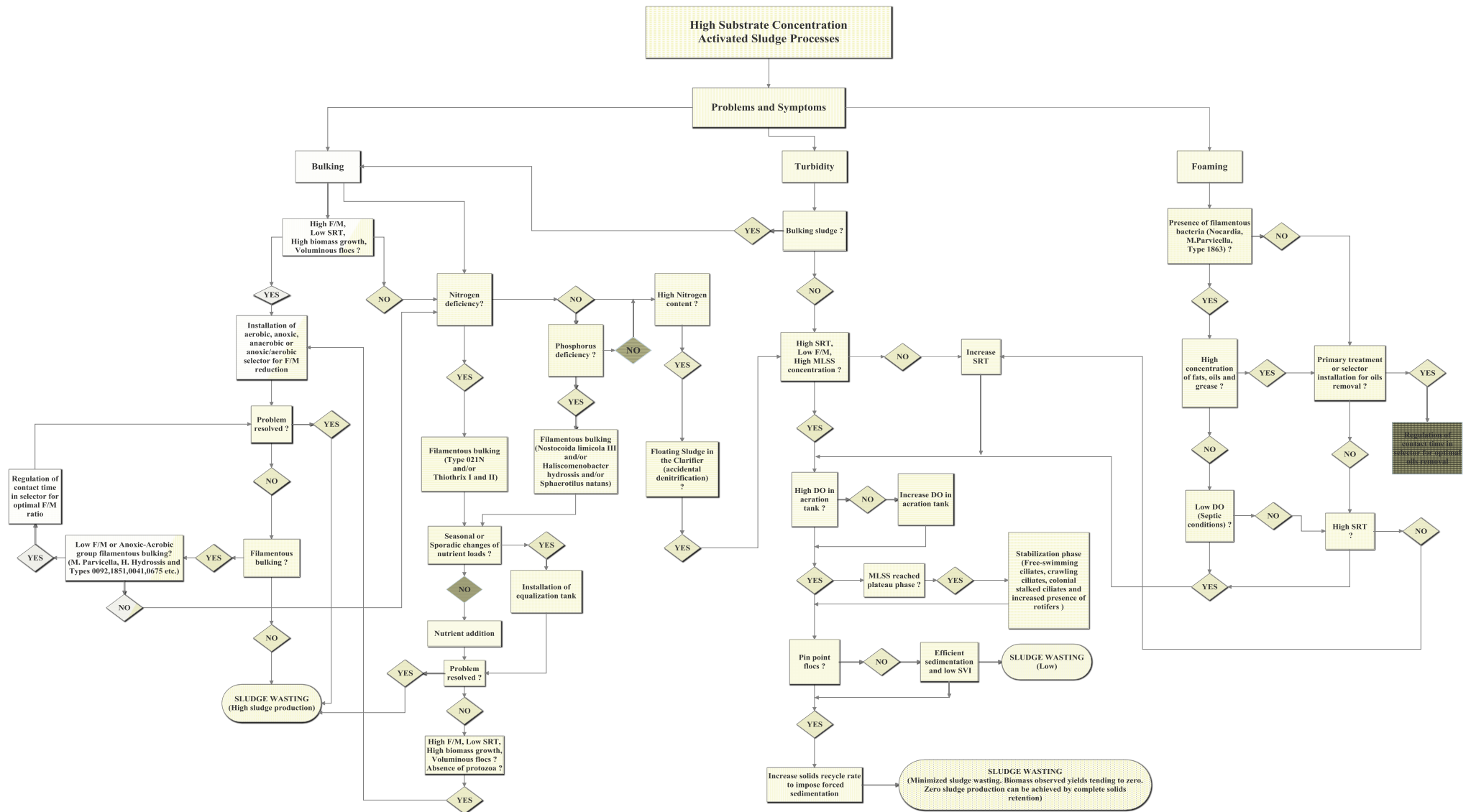
Οι τιμές που υπολογίστηκαν είναι 1,13 kWh/kgBOD ή 0,62 kWh/kgCOD και είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές των συμβατικών συστημάτων EI (0,95 έως 3,3 kWh/kgBOD ή 0,66 έως 3,65 kWh/kgCOD).<sup>1,23,25</sup> Η ΜΕΥΑ αναφοράς έχει επίσης σημαντικά μικρότερη κατανάλωση ενέργειας από ότι τα βιολογικά συστήματα επεξεργασίας ΥΑ με χρήση μεμβρανών (MBR) και τα οποία είναι ενεργοβόρα και χαρακτηρίζονται από 150% – 300% μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις έναντι των συμβατικών συστημάτων EI.<sup>1,24-25</sup> Μόνον οι αερόβιες διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας (aerated biofilm reactors) ή τα αναερόβια συστήματα επεξεργασίας ΥΑ βρέθηκαν να έχουν μικρότερες ειδικές καταναλώσεις ενέργειας σε σχέση με τη ΜΕΥΑ αναφοράς, με τιμές που προσεγγίζουν τις 0,25 kWh/kgCOD ή 0,1 kWh/kgCOD αντίστοιχα.<sup>15-19</sup>

Κατά τη της λειτουργία μίας ΜΕΥΑ ολικής κράτησης λύος και ανάλογα με τις εφαρμοζόμενες λειτουργικές συνθήκες, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και βιολογικά χαρακτηριστικά της βιομάζας μπορεί να διαφοροποιηθούν σημαντικά. Η ανάπτυξη των ανεπιθύμητων μικροβιακών ειδών, όπως νηματοειδή βακτήρια, μύκητες κ.α. ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα αφρισμού, μειωμένης συνεκτικότητας κροκίδων (φλόκων) λύος (υψηλός δείκτης διόγκωσης λύος) και παρεμποδίζουν την καθίζηση της λύος στις δεξαμενές καθίζησης. Οι κύριες λειτουργικές παράμετροι που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της βιομάζας είναι η ηλικία της λύος, ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time, HRT), η ηλικία της λύος (Solids Retention Time, SRT), ο υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT), τα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου (Dissolved Oxygen, DO), τα επίπεδα φόρτισης υποστρώματος ανά μονάδα μάζας λύος (Food to Microorganisms ratio, F/M) ή αλλιώς ο συντελεστής φόρτισης λύος (Sludge loading rate, Ls) και η διαθεσιμότητα των θρεπτικών συστατικών (C, N, P).

Στη ΜΕΥΑ αναφοράς αποφεύχθηκε η δημιουργία ανεπιθύμητων μικροοργανισμών που σχετίζονται με προβλήματα διόγκωσης και επίπλευσης βιομάζας, μέσω (α) της ρύθμισης των λειτουργικών παραμέτρων, (β) της χρήσης βιοεπιλογέα (microbial selector) και (γ) του συστηματικού ελέγχου των μικροβιολογικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών της βιομάζας.

Είναι γνωστό ότι οι υψηλές συγκεντρώσεις εύκολα βιοαποικοδομήσιμου υποστρώματος (readily biodegradable substrate) υποβοηθούν την ανάπτυξη νηματοειδών βακτηρίων.<sup>26</sup> Η υπέρμετρη ανάπτυξη νηματοειδών με τη σειρά της παρεμποδίζει τις διεργασίες συμπύκνωσης και βαρυτικού διαχωρισμού της λύος, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του επεξεργασμένου ΥΑ. Συνεπώς, η αξιοποίηση του εύκολα βιοαποικοδομήσιμου υποστρώματος στο προκαταρκτικό στάδιο επεξεργασίας (SNdN) απέτρεψε την ανάπτυξη νηματοειδών, καθώς αυτό λειτούργησε ως βιοεπιλογέας (microbial selector).

Η μικροσκοπική παρακολούθηση της μικροβιακής σύστασης της βιομάζας αποδείχθηκε ότι αποτελεί ένα γρήγορο και ακριβές εργαλείο για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών της. Οι διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά της βιομάζας γίνονται άμεσα αντιληπτές κατά τη μικροσκοπική παρακολούθηση και βοηθούν στην αναγνώριση των αιτιών που τις προκάλεσαν καθώς και στην επιλογή των βέλτιστων λειτουργικών παρεμβάσεων για την επίλυση των πιθανών προβλημάτων που αυτές δημιούργησαν. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται ένα λογικό διάγραμμα (flowchart) με τα λογικά βήματα για την εξεύρεση της βέλτιστης και αειφορικής λύσης σε συνήθη λειτουργικά προβλήματα των ΜΕΥΑ.



**Figure-Σχήμα 54.** Λογικό διάγραμμα (flowchart) ελέγχου ΜΕΥΑ αναφοράς - Λογικά βήματα για την εξεύρεση της βέλτιστης και αιειφορικής λύσης σε συνήθη λειτουργικά προβλήματα των ΜΕΥΑ

#### 4. Conclusions

Η επιτυχής εφαρμογή της διεργασίας ΕΙ με ολική κράτηση ιλύος, μέσω μικροβιακής χειραγώγησης, δημιουργίας συνθηκών εκτεταμένης έλλειψης υποστρώματος, διατήρησης υψηλών επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου στους αερόβιους βιοαντιδραστήρες, επιβολής υψηλών ρυθμών ανακυκλοφορίας και μέσω της ελεγχόμενης καθίζησης, διασφαλίζει την αποδοτική επεξεργασία ΥΑ υψηλού ρυπαντικού φορτίου (high strength wastewater) με αμελητέες ποσότητες απορριπτόμενης ιλύος. Η μείωση της παραγόμενης ιλύος μπορεί να φτάσει τα επίπεδα του 95%, οδηγώντας σε μείωση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας των ΜΕΥΑ κατά περίπου 50%. Επιπλέον, η χρήση αεραντλιών στη ΜΕΥΑ αναφοράς, έναντι των κλασικών ηλεκτρικών υποβρύχιων αντλιών, μειώνει περαιτέρω το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης, κατατάσσοντας την στις τεχνολογίες επεξεργασίας με τη μικρότερη ειδική κατανάλωση ενέργειας, όπως είναι οι αναερόβιες τεχνολογίες και οι αερόβιες τεχνολογίες με βιοφίλμ. Ενώ η κατανάλωση ενέργειας στη ΜΕΥΑ αναφοράς είναι συγκρίσιμη με τις λιγότερο ενεργοβόρες τεχνολογίες επεξεργασίας ΥΑ, τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη που προκύπτουν από την προτεινόμενη αερόβια διεργασία ελαχιστοποιημένης παραγωγής ιλύος την καθιστούν πιο «πράσινη» και αειφόρα.

Είναι επομένως απαραίτητο να επανεκτιμηθεί ο τρόπος σχεδιασμού και λειτουργίας των ΜΕΥΑ στη χώρα μας με στόχο (α) τη βελτίωση των αποδόσεων επεξεργασίας, (β) τη μείωση του λειτουργικού τους κόστους και (γ) την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος. Μέσα από ένα ενιαίο εθνικό επιχειρησιακό σχέδιο για την επεξεργασία των ΥΑ και με την κατάλληλη υποστήριξη και τεχνογνωσία μπορούν να προωθηθούν αειφόρες τεχνολογίες επεξεργασίας ΥΑ, τόσο με έργα βελτιστοποίησης λειτουργίας των υπάρχοντων ΜΕΥΑ, όσο με τον καινοτόμο σχεδιασμό νέων μονάδων.

#### References

- [1] Metcalf and Eddy, 2003. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Metcalf and Eddy Inc., McGraw Hill, Boston, USA (revised by: Tchobanoglous G., Burton L.F., Stensel H.D.).
- [2] Guo, W.Q., Yang, S.S., Xiang, W.S., Wang, X.J., Ren, N.-Q., 2013. Minimization of excess sludge production by in-situ activated sludge treatment processes - a comprehensive review. *Biotechnol. Adv.* 31, pp. 1386-1396.
- [3] Amanatidou Elisavet, Samiotis Georgios, Trikoilidou Eleni, Pekridis George, Taousanidis Nikolaos, 2015. Evaluating sedimentation problems in activated sludge treatment plants operating at complete sludge retention time. *Water Research J*, Volume 69, pp. 20–29.
- [4] Y. Wei, R.T. van Houten, A.R. Borger, D.H. Eikelboom, and Y. Fan, 2003. Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment, *Water Research* 37, pp. 4453–4467.

- [5] Amanatidou Elisavet, Samiotis Georgios, Bellos Dimitrios, Pekridis George, Trikoilidou Eleni, 2015. Net biomass production under complete solids retention in high organic load activated sludge process. *Bioresource Technology J.*, 182, pp. 193–199.
- [6] Rocher, M., Goma, G., Begue, A.P., Louvel, L., Rols, J.L., 1999. Towards a reduction in excess sludge production in activated sludge processes: biomass physicochemical treatment and biodegradation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 51, pp. 883-890.
- [7] Liu, Y., Tay, J.H., 2001. Strategy for minimization of excess sludge production from the activated sludge process. *Biotechnology Advances* 19, pp. 97-107.
- [8] Loosdrecht, M. and Henze, M. 1999. Maintenance, endogenous respiration, lysis, decay and predation, *Water Sci. Technol.* 39, pp. 107–117.
- [9] Amanatidou Elisavet, Samiotis Georgios, Trikoilidou Eleni, Tsikritzis Lazaros, 2016. Particulate organics degradation and sludge minimization in aerobic, complete SRT bioreactors. *Water Research* (94), pp. 288–295.
- [10] Foladori, P., Andreottola, G., Ziglio, G., 2010. *Sludge Reduction Technologies in Wastewater Treatment Plants*. IWA Publishing.
- [11] Amanatidou Elisavet, Samiotis Georgios, Trikoilidou Eleni, Pekridis George, Tsikritzis Lazaros, 2016. Complete Solids Retention Activated Sludge Process. *Water Science and Technology*, 73.6, pp. 1364 –1369.
- [12] M. Henze, M.C.M. van Loosdrecht, G.A. Ekama, and D. Brdjanovic, 2008. *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing.
- [13] Henze, M., Gujer, W., Mino, T., van Loosdrecht, M.C.M., 2000. *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. Scientific and Technical Report No.9. IWA Publishing.
- [14] Sperandio, M., Labelle, M.-A., Ramdani, A., Gadbois, A., Paul, E., Comeau, Y., Dold, P.L., 2013. Modelling the degradation of endogenous residue and unbiodegradable influent organic suspended solids to predict sludge production. *Water Science & Technology* 67, pp. 789-796.
- [15] Pitas, V.; Fazekas, B.; Banyai, Z.S.; Karpati, A., 2010. Energy efficiency of the municipal wastewater treatment. *Journal of Biotechnology* 150, pp. 163-164
- [16] Water Environment Federation (WEF), 2009. *Energy conservation in water and waste water facilities*, 1<sup>st</sup> Ed., WEF Press, McGraw Hill, New York.
- [17] Mizuta, K.; Shimada, M., 2010. Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan, *Water Science and Technology* 62, pp. 2256-2262.
- [18] Yang, L.; Zeng. S.; Chen, J.; He, M.; Yang W., 2010. Operational energy performance assessment system of municipal waste water treatment plants. *Water Science and Technology* 62, pp. 1361-1370.
- [19] Bodík, I.; Kubaská, M., 2013. Energy and sustainability of operation of a wastewater

treatment plant. *Environment Protection Engineering* 39, pp. 15-24.

- [20] Bellos, D., 2012. Special compact activated sludge wastewater treatment plant for large and medium size applications. Patent number: 1007711, International Classification (INT.CL8):C02F 9/00, C02F 11/00.
- [21] Grady, C.P.L., Daigger Jr., G.T., Lim, H.C., 1999. *Biological Wastewater Treatment*, second ed. Marcel Dekker, Inc. Revised and expanded.
- [22] Maine department of environmental protection, (USA), 2003. Document Describing the State-point Analysis Process. *Maine DMR O&M News*.
- [23] Williams, R., Schuler, P., Comstock, K., Pope R., 2008. Large Membrane Bioreactors of Georgia: A Guide and Comparison. *Water Environment Federation Membrane Technology Conference*. Atlanta Georgia. pp 548-561.
- [24] Chudoba P., Rosenbergová R., Beneš O., 2010. Benchmarking of large wastewater treatment plants, *Proc. from Conference Wastewater*, STU Bratislava, I. Bodík (Ed.), pp. 385.
- [25] Malcolm B., Middlenton R., Wheale G., Schulting F., 2011. Energy efficiency in the water industry, a global research project, *Wat. Proc. Techn.* 6, pp. 221.
- [26] Amanatidou Elisavet, Samiotis Georgios, Trikoilidou Eleni, & Michailidis Avraam, 2016. Influence of Wastewater Treatment Plants' Operational Conditions on Activated Sludge Microbiological and Morphological Characteristics. *Environmental Technology J.* 37, pp. 265-278.