



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Επεξεργασία Υγρών Αστικών Αποβλήτων με
Συνδυασμό Κροκίδωσης & Βιοφίλτρου»**

Χουρδάκης Ιωάννης

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

*Επίκουρος Καθηγητής κ. Πέτρος Γκίκας
(Επιβλέπων)*

Καθηγητής κ. Νικόλαος Καλογεράκης

Επίκουρη Καθηγήτρια κα. Δανάη Βενιέρη

ΧΑΝΙΑ 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, η οποία υλοποιήθηκε στο εργαστήριο «Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών» της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν στην υλοποίησή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Πέτρο Γκίκα που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ και να εμβαθύνω στο αντικείμενο της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Η συμβολή του ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας μου. Η καθοδήγησή του και οι γνώσεις του στο συγκεκριμένο αντικείμενο, διαμόρφωσαν την κριτική μου σκέψη και άνοιξαν νέους ορίζοντες στον τομέα της διαχείρισης του περιβάλλοντος.

Τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου θα ήθελα να εκφράσω στον κύριο Χάρη Μάρακα, εργαστηριακό βοηθό – ερευνητή, για την ανεκτίμητη βοήθεια που μου προσέφερε, τόσο κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων όσο και για τη συγγραφή και παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δεν θα παραλείψω φυσικά να ευχαριστήσω την εταιρία Device, για την προσφορά του πληρωτικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε στα σταλακτικά φίλτρα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή και την κατανόηση που έδειξαν καθ' όλο το διάστημα εκπόνησης της εργασίας μου, στηρίζοντας με και σ' αυτήν τη προσπάθειά μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της χρήσης των σταλακτικών φίλτρων στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων με χρήση σταλακτικών φίλτρων προσκολλημένης βιομάζας σταθερού πληρωτικού υλικού. Έγινε σύγκριση της απόδοσης των σταλακτικών φίλτρων ως προς την απομάκρυνση του οργανικού φορτίου. Η τροφοδοσία των σταλακτικών φίλτρων έγινε με χρήση κροκιδωμένου και ακροκιδωτού υγρών αστικών αποβλήτων. Για την επίτευξη την μέγιστης απόδοσης των σταλακτικών φίλτρων, τα φίλτρα τροφοδοτήθηκαν με διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης.

Για τις ανάγκες της εργασίας κατασκευάστηκαν δύο κυλινδρικά σταλακτικά φίλτρα προσκολλημένης βιομάζας. Εκπονήθηκαν μετρήσεις για τον προσδιορισμό της ικανότητας μείωσης του οργανικού φορτίου των υγρών αποβλήτων. Τα υγρά απόβλητα προέρχονταν από τη Μονάδα Επεξεργασίας Υγρών Αστικών Αποβλήτων του Δήμου Χανίων. Η δειγματοληψία των αποβλήτων γινόταν αμέσως μετά τη διεργασία της πρωτοβάθμια καθίζησης της μονάδας.

Το πληρωτικό υλικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα σταλακτικά φίλτρα ήταν πλαστικοί κυλινδρικοί βιοφορείς, εξωτερικής διαμέτρου 18.7mm. Καθημερινά, τα βιοφίλτρα τροφοδοτούταν με 25L υγρών αστικών αποβλήτων και τα εκρέοντα επεξεργασμένα απόβλητα συλλέγονταν σε δεξαμενή.

Για τον έλεγχο της απόδοσης της επεξεργασίας έγιναν μετρήσεις, TOC, BOD, COD, TSS, $\text{NH}_3\text{-N}$ και pH. Αναλύσεις δειγμάτων γίνονταν τόσο στα ανεπεξέργαστα, όσο και στα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα.

Η αποτελεσματικότητα της χρήσης των σταλακτικών φίλτρων στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων μετρήθηκε σε τρία διαφορετικά σενάρια: ,

- ✓ Σενάριο 1: χρήση κροκιδωμένων και ακροκιδωτων υγρών αποβλήτων,
- ✓ Σενάριο 2: μεταβολή του τρόπου σύνδεσης των δύο στηλών των σταλακτικών φίλτρων και
- ✓ Σενάριο 3: μεταβολή της παροχής των αποβλήτων στα σταλακτικά φίλτρα

Βέλτιστα αποτελέσματα καταγράφονται στο σενάριο της διακοπτόμενης λειτουργίας. Στο σενάριο αυτό τα σταλακτικά φίλτρα τροφοδοτούνταν με κροκιδωμένα απόβλητα και παροχή ίση με 1L/h (ποσοστά απομάκρυνσης, 87% BOD, 87% TOC και 73% NH₃-N). Επιπλέον, στο σενάριο της διακοπτόμενης λειτουργίας, με είσοδο ακροκιδωτα απόβλητα και παροχή 0.5L/h επιτεύχθηκε υψηλό ποσοστό απομάκρυνσης 85% και 87% για τους δείκτες BOD και TOC αντίστοιχα. Στο ίδιο σενάριο λειτουργίας, πολύ μεγάλο ποσοστό απομάκρυνσης επιτεύχθηκε στην απομάκρυνση των αμμωνιακών, της τάξης του 99%. Μεγάλη απομάκρυνση Συνολικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS) παρουσίασαν όλα τα σενάρια, της τάξης του 98 - 99 %. Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά για την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα της μεθόδου επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων με συνδυασμό κροκίδωσης και βιοφίλτρου.

ABSTRACT

The subject of this work was the treatment of municipal wastewater using attached growth trickling filters and particularly to compare the performance of two trickling filters which were fed with coagulated and uncoagulated urban waste water. The trickling filters compared under different operating conditions. In order to compare trickling filters, two tanks were constructed (2m in height and 20cm outer diameter) and measurements were carried out for the maximum decontamination of wastewater taken from the Wastewater Treatment Plant of Chania. The waste water was collected from the outlet of the primary sedimentation tank. The filling material of trickling filters was donated by the company Device. The type of filling material was moving bed biofilm. The trademark of filling material is Fill Pac Wheel Media (FLOWER).

Each filter was provided with 25L of wastewater every day. The effluent treated waste was collected in a different container for each tank. To estimate the processing performance, measurements were made on DO, pH, TOC, BOD, TSS and $\text{NH}_3\text{-N}$ for the raw and treated waste water. Three different operating conditions were tested :

- the use of coagulated and uncoagulated urban waste water
- different interconnection of the two trickling filter (one serial and one parallel connection)
- different supply of waste water in the trickling filter

Initially, the filter operated at a flow rate of 1L/h (which was the minimal possible) and at a hydraulic flow rate of $q=0,00796\text{m}^3/\text{h}$.

The best results were obtained by adopting intermediate supply of waste water, using a flow rate of 0.5L/h. Indicative removal sizes are 85% BOD removal,

87% removal of TOC, 99% NH₃-N removal and 100% removal of TSS. In conclusion, the results were encouraging for the credibility and effectiveness of the treatment process. Consequently the trickling filters are low energy and efficient in waste water treatment.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	7
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
2. ΥΓΡΑ ΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ	17
2.1. Παράμετροι Χαρακτηρισμού Υγρών Αστικών Αποβλήτων	17
2.2. Μέθοδοι Επεξεργασίας Υγρών Αστικών Αποβλήτων	18
2.3. Στάδια Επεξεργασίας Υγρών Αστικών Λυμάτων	20
2.3.1. Προ-επεξεργασία	20
2.3.2. Πρωτοβάθμια Επεξεργασία	20
2.3.3. Δευτεροβάθμια Επεξεργασία	21
2.3.4. Τριτοβάθμια Επεξεργασία	23
2.3.5. Περαιτέρω Επεξεργασία	23
2.3.6. Επεξεργασία και Διάθεση Λάσπης	24
3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΚΡΟΚΙΔΩΣΗΣ	25
3.1. Διεργασία Κροκίδωσης - Συσσωμάτωσης	31
4. ΑΕΡΟΒΙΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΣΚΟΛΛΗΜΕΝΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ (ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ)	34
4.1. Μέθοδοι Επεξεργασίας Με Χρήση Βιοφίλτρων	34
4.1.1. Χαλικοδιυλιστήρια	36
4.1.2. Περιστρεφόμενοι Βιολογικοί Δίσκοι	37
4.1.3. Συνδυασμένες Διεργασίες Προσκολλημένης και Αιωρούμενης Βιομάζας	38
4.2. Μέθοδος Επεξεργασίας Χαλικοδιυλιστηρίων	39
4.2.1. Είδη Πληρωτικών Υλικών	44
4.2.2. Αρχές Σχεδιασμού Χαλικοδιυλιστηρίων	46
4.2.3. Είδη Αναπτυσσόμενων Μικροοργανισμών στα Σταλακτικά Φίλτρα	64

4.2.4.	Ρυθμός Φόρτισης	67
4.2.5.	Είδη Σταλακτικών Φίλτρων Βάση του Ρυθμού Φόρτισης	69
4.2.6.	Ενεργειακά Οφέλη.....	72
5.	ΣΚΟΠΟΣ	76
6.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΥΛΙΚΩΝ	77
6.1.	Υγρά Αστικά Απόβλητα.....	77
6.2.	Πειραματική Διάταξη	79
6.3.	Πληρωτικό Υλικό	80
6.4.	Διαλυμένο Οξυγόνο - Dissolved Oxygen (DO)	81
6.5.	Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο - Biochemical Oxygen Demand (BOD)	83
6.5.1.	Μέθοδος Μέτρησης BOD	84
6.6.	Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο - Chemical Oxygen Demand (COD).....	85
6.6.1.	Μέθοδος Μέτρησης COD	86
6.7.	Ολικός Οργανικός Ανθρακας - Total Organic Carbon (TOC)	87
6.7.1.	Μέθοδος Μέτρησης TOC.....	88
6.8.	Μέτρηση Αμμωνιακών (NH ₃ -N)	90
6.9.	Μέτρηση Νιτρικών (NO ₃ -N)	91
6.10.	Μέθοδος Μέτρησης Ολικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS)	92
6.11.	Κροκίδωση Λύματος.....	93
6.12.	Πειραματική Κατασκευή	94
6.12.1.	Δεξαμενές Βιοφίλτρων και Άντληση Αποβλήτων	94
6.12.2.	Σύστημα Ομοιόμορφης Διαβροχής	99
6.12.3.	Σύστημα Καταγραφής Ενεργειακής Κατανάλωσης.....	100
6.13.	Πειραματική Μέθοδος.....	101
6.13.1.	Αρχική προσκόλληση βιομάζας στα πληρωτικά υλικά.....	101

6.13.2.	Άντληση Αποβλήτων	103
6.13.3.	Διαδικασία Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων	105
7.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	109
7.1.	Μετρήσεις Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (BOD)	110
7.1.1.	Διακοπτόμενη Εν Σειρά Λειτουργία Των Στηλών Βιολογικών Φίλτρων	110
7.1.2.	Συνεχής Εν Σειρά Λειτουργία Των Στηλών Βιολογικών Φίλτρων	113
7.1.3.	Παράλληλη Λειτουργία των Στηλών Βιολογικών Φίλτρων	115
7.2.	Μετρήσεις Ολικού Οργανικού Άνθρακα (TOC)	116
7.2.1.	Διακοπτόμενη Εν Σειρά Λειτουργία Των Στηλών Βιολογικών Φίλτρων	116
7.2.2.	Συνεχής Εν Σειρά Λειτουργία Των Στηλών Βιολογικών Φίλτρων	119
7.2.3.	Παράλληλη Λειτουργία Των Στηλών Βιολογικών Φίλτρων	121
7.3.	Μετρήσεις Αμμωνιακών (NH₃-N)	122
7.3.1.	Διακοπτόμενη εν Σειρά Λειτουργία Των Στηλών Βιολογικών Φίλτρων	122
7.3.2.	Συνεχής Εν Σειρά Λειτουργία Των Στηλών Βιολογικών Φίλτρων	125
7.3.3.	Παράλληλη Λειτουργία Των Στηλών Βιολογικών Φίλτρων	127
7.4.	Μετρήσεις Συνολικά Αιωρούμενων Στερεών (TSS)	128
8.	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	129
8.1.	Σχολιασμός Μετρήσεων BOD	130
8.2.	Σχολιασμός Μετρήσεων TOC	133
8.3.	Σχολιασμός Μετρήσεων NH₃-N	136
9.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	139
10.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	141
11.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	142
11.1.	Διεθνής Βιβλιογραφία	142
11.2.	Ελληνική Βιβλιογραφία	146
12.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	148

Εικόνες

Εικόνα 1, Αρχή βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	22
Εικόνα 2, Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού της κροκίδωσης	26
Εικόνα 3, Εργαστηριακή δοκιμή κροκίδωσης (Jar test)	32
Εικόνα 4, Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας κροκίδωσης - καθίζησης σε βιομηχανική κλίμακα.	33
Εικόνα 5, Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας προσκολλημένης βιομάζας.....	35
Εικόνα 6, Σχηματική απεικόνιση των διεργασιών στην επιφάνεια των βιοφορέων των σταλακτικών φίλτρων.....	35
Εικόνα 7, Βιολογικοί δίσκοι (Δισκοδυλιστήριο)	37
Εικόνα 8, Σχηματική αναπαράσταση Χαλικοδυλιστηρίου	40
Εικόνα 9, Εγκαταστάσεις σταλακτικών φίλτρων.....	42
Εικόνα 10, Σχηματική αναπαράσταση σταλακτικού φίλτρου.....	42
Εικόνα 11, Βιολογικό φίλτρο με πλαστικό υλικό.....	43
Εικόνα 12, Διάφορα είδη πλαστικών υλικών πλήρωσης των βιολογικών φίλτρων.	43
Εικόνα 13, Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου Atkinson.....	54
Εικόνα 14, Αναπαράσταση της ροής πάνω από μια επίπεδη πλάκα στην οποία αναπτύσσεται βιολογικό στρώμα.....	57
Εικόνα 15, Φύκια των γενών Ulothrix, Chlorella και Phormidium	64
Εικόνα 16 , Ινώδη βακτήρια natans, Beggiatoa, και Sphaerotilus	64
Εικόνα 17, Οξειδωτικά βακτήρια Pseudomonas, Flavobacterium, Achrmobacter και Alcaligenes.....	65
Εικόνα 18 , Νιτροποιητικά βακτήρια Nitrobacter και Nitrosomonas.	65
Εικόνα 19, Ομάδα πρωτόζωων ciliate (Opercularia, Epistylis, Verticella)	66
Εικόνα 20, Μύγα Psychoda, και σαλιγκάρι Physa gyrina	67
Εικόνα 21, Σχηματική αναπαράσταση φίλτρου τραχύτητας. [Sandec, 1995].....	71
Εικόνα 22, Αεροφωτογραφία και κάτοψη εγκαταστάσεων του βιολογικού καθαρισμού Δήμου Χανίων. Α: Σημείο άντλησης αποβλήτων από την έξοδο δεξαμενής πρωτοβάθμια καθίζησης. Β: Σημείο βύθισης πληρωτικού υλικού για την ανάπτυξη της αρχικής βιομάζας.	78
Εικόνα 23, Διάγραμμα ροής της πειραματικής διάταξης	79

Εικόνα 24, Το πληρωτικό υλικό των βιολογικών φίλτρων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία FILL PAC WHEEL MEDIA(FLOWER).....	80
Εικόνα 25, Πολυόργανο Multi 3410 της WTW και το αντίστοιχο, οπτικής μέτρησης, ηλεκτρόδιο για μέτρηση DO.	82
Εικόνα 26, Συσκευή πέψης (δεξιά) και φορητό φασματοφωτόμετρο (αριστερά) που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του COD και του TOC.....	87
Εικόνα 27, Αναλυτής TOC (Total Organic Carbon) TOC-5000A της Shimadzu.....	89
Εικόνα 28, Ακρυλικοί κύλινδροι που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των σταλακτικών φίλτρων.....	94
Εικόνα 29, Ανοξείδωτη βάση σταλακτικού φίλτρου και βάννα εκροής επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.	95
Εικόνα 30, Στάδια κατασκευής των σημείων δειγματοληψίας καθ' ύψος των δεξαμενών των σταλακτικών φίλτρων	96
Εικόνα 31, Στάδια κατασκευής συστήματος αποστράγγισης	97
Εικόνα 32, PLC(Programmable Logic Controller) της SIEMENS που χρησιμοποιήθηκε για το έλεγχο λειτουργίας των σταλακτικών φίλτρων	98
Εικόνα 33, Στάδια κατασκευής συστήματος διαβροχής	99
Εικόνα 34, Ενεργοποιημένη βιομάζα (activated sludge)που αναπτύχθηκε στο πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στα σταλακτικά φίλτρα της παρούσας εργασίας (φωτογραφία πάνω αριστερά).	102
Εικόνα 35, Βύθιση πληρωτικών υλικών στη δεξαμενή αερισμού της μονάδας Βιολογικού Καθαρισμού Δήμου Χανίων.....	103
Εικόνα 36, Άντληση αποβλήτων από την εγκατάσταση του βιολογικού καθαρισμού του Δήμου Χανίων, με τη βοήθεια βυθιζόμενης αντλίας 12volts.	104
Εικόνα 37, Διάγραμμα ροής της πειραματικής διάταξης στην οποία φαίνονται τα σημεία δειγματοληψίας.....	109

Πίνακες

Πίνακας 1, Τυπικά πληρωτικά υλικά εγκαταστάσεων φίλτρων προσκολλημένης βιομάζας.....	45
Πίνακας 2, Ιστορική ταξινόμηση των εφαρμογών των βιολογικών φίλτρων. (Πηγή : Metcalf & Eddy, Inc. (1979) and WEF (2000)).....	106
Πίνακας 3, Αναλυτική παρουσίαση παροχών τροφοδοσίας και χρόνων λειτουργίας - παύσης των σταλακτικών φίλτρων.....	106
Πίνακας 4, Αναλυτική παρουσίαση παροχών φόρτισης των σταλακτικών φίλτρων στη συνεχή λειτουργία.....	106
Πίνακας 5α, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.....	110
Πίνακας 5β, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.....	111
Πίνακας 5γ, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.....	112
Πίνακας 6α, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.....	113
Πίνακας 6β, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή τροφοδοσία 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.....	114
Πίνακας 7, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και παράλληλη σύνδεση.....	115
Πίνακας 8α, Παρουσίαση μετρήσεων TOC με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.....	116
Πίνακας 8β, Παρουσίαση μετρήσεων TOC με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.....	117
Πίνακας 8γ, Παρουσίαση μετρήσεων TOC με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.....	118
Πίνακας 9α, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.....	119

Πίνακας 9β, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή τροφοδοσία 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.....	120
Πίνακας 10, Παρουσίαση μετρήσεων TOC με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και παράλληλη σύνδεση.....	121
Πίνακας 11α, Παρουσίαση μετρήσεων NH ₃ -N με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.	122
Πίνακας 11β, Παρουσίαση μετρήσεων NH ₃ -N με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.	123
Πίνακας 11γ, Παρουσίαση μετρήσεων NH ₃ -N με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.	124
Πίνακας 12α, Παρουσίαση μετρήσεων NH ₃ -N με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.	125
Πίνακας 12β, Παρουσίαση μετρήσεων NH ₃ -N με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή τροφοδοσία 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.....	126
Πίνακας 13, Παρουσίαση μετρήσεων NH ₃ -N με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και παράλληλη σύνδεση.	127
Πίνακας 14, Μετρήσεις συνολικών αιωρούμενων στερεών στα σημεία δειγματοληψίας πριν και μετά τη βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων με τα σταλακτικά φίλτρα.....	128
Πίνακας 15, Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων όρων απομάκρυνσης BOD ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων	131
Πίνακας 16, Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων όρων απομάκρυνσης TOC ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων	134
Πίνακας 17, Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων όρων απομάκρυνσης NH ₃ -N ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων	137

Γραφήματα

Γράφημα 1 , Κατανομή χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ενεργούς ιλύος (EPRI, 1994).....	73
Γράφημα 2, Ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας ανά είδος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. [Gikas, 2014].....	75
Γράφημα 3, Συγκεντρωτικός γράφημα μέσων όρων απομάκρυνσης BOD ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων. Οι τιμές στο γράφημα αφορούν ποσοστιαία απομάκρυνση καθώς και την αντίστοιχη συγκέντρωση.	132
Γράφημα 4, Συγκεντρωτικός γράφημα μέσων όρων απομάκρυνσης TOC ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων. Οι τιμές στο γράφημα αφορούν ποσοστιαία απομάκρυνση καθώς και την αντίστοιχη συγκέντρωση.	135
Γράφημα 5, Συγκεντρωτικός γράφημα μέσων όρων απομάκρυνσης NH ₃ -N ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων. Οι τιμές στο γράφημα αφορούν ποσοστιαία απομάκρυνση καθώς και την αντίστοιχη συγκέντρωση.	138

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πλαίσιο διαχείρισης του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος, ιδιαίτερη σημασία έχουν τα έργα αποχέτευσης και επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, που ως σκοπό έχουν την όσο το δυνατόν γρηγορότερη και οικονομικότερη απομάκρυνση των ακάθαρτων και βλαβερών για το περιβάλλον νερών (υγρά απόβλητα), καθώς και την κατάλληλη επεξεργασία (καθαρισμό τους), ώστε να διατεθούν ακίνδυνα στο περιβάλλον ή να επαναχρησιμοποιηθούν. Η παρούσα εργασία αφορά τα σταλακτικά φίλτρα, τα οποία αποτελούν μια μέθοδο βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων **[Κοτζαμπασάκης, 2010], [Μαρκουλάκης, 2010]**.

Τα σταλακτικά φίλτρα (Trickling Filters) ή χαλικοδιυλιστήρια είναι βιόφιλτρα σταθερής βιολογικής στοιβάδας μη εμβαπτιζόμενης βιομάζας, στα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά ως υλικά πλήρωσης, όπως λίθοι, χαλίκια, και πλαστικά υλικά. Τα υγρά απόβλητα ψεκάζονται στο άνω μέρος της κλίνης του φίλτρου και ρέουν διαμέσου του φίλτρου. Οι περιστρεφόμενοι διανομείς ροής ή οι βραχίονες ψεκασμού επιτρέπουν να διανέμονται τα υγρά απόβλητα ομοιόμορφα πάνω στην επιφάνεια του υλικού πλήρωσης. Καθώς το ρευστό ρέει μέσα από τους πόρους του φίλτρου, μια βιολογική στιβάδα αναπτύσσεται στο υλικό του φίλτρου με σκοπό τη μείωση του BOD και των αιωρούμενων στερεών. Η όλη διάταξη λειτουργεί (ως επί το πλείστον) υπό αερόβιες συνθήκες, οι οποίες επιτυγχάνονται είτε με προ-αερισμό των αποβλήτων, είτε με διάχυση αέρα λόγω φυσικής κυκλοφορίας, είτε με έμφυση αέρα εντός του βιοφίλτρου, είτε με συνδυασμό κάποιων από τις ανωτέρω μεθόδους. Τα σταλακτικά φίλτρα ταξινομούνται με βάση τις οργανικές και υδραυλικές φορτίσεις, σε χαμηλού, μέσου και υψηλού ρυθμού φόρτισης. Τα κύρια προτερήματα των σταλακτικών φίλτρων είναι οι μειωμένες απαιτήσεις σε ενέργεια και η εύκολη διαχείριση τους. Με κατάλληλο σχεδιασμό τα φίλτρα αυτά χρησιμοποιούνται σε πολυάριθμες εφαρμογές με πολύ καλή απόδοση. Σε περίπτωση που υπάρχουν

προβλήματα κατά τον σχεδιασμό τα αποτελέσματα συνήθως είναι έντονες οσμές και χαμηλή ποιότητα εκροών, και αυτοί είναι δύο από τους λόγους που τα σταλακτικά φίλτρα δεν έχουν τύχει ευρείας αποδοχής. Η παρουσία στερεών (SS) στα υγρά απόβλητα είναι ένας από τους λόγους μειωμένης απόδοσης.

Η παρούσα εργασία αποσκοπεί στο να εξετάσει την απόδοση των σταλακτικών φίλτρων τόσο στην απομάκρυνση των οργανικών φορτίων όσο και στην απαιτούμενη ενέργεια, σε υγρά αστικά απόβλητα τα οποία έχουν προ επεξεργαστεί με κροκίδωση (για την απομάκρυνση στερεών).

Τα πειράματα γίνονται σε πιλοτική εγκατάσταση εργαστηριακής κλίμακας, με χρήση πραγματικών αστικών υγρών αποβλήτων.

2. ΥΓΡΑ ΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

2.1. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΥΓΡΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Τα αστικά λύματα είναι τα οικιακά λύματα ή, σε κάποιες περιπτώσεις, μείγμα οικιακών με βιομηχανικά λύματα ή/και όμβρια ύδατα. Τα λύματα αυτά προέρχονται από τις κατοικίες και διάφορες άλλες δραστηριότητες (σχολεία και πανεπιστήμια, δημόσιες επιχειρήσεις, χώροι εργασίας, τουριστικές μονάδες, νοσοκομεία, ιατρικά κέντρα, βιοτεχνίες και άλλα).

Τα οικιακά λύματα παράγονται από τις ανάγκες των ανθρώπων όπως η αφόδευση, η χρήση του μπάνιου, η προετοιμασία του φαγητού κ.α. Κατά μέσο όρο παράγονται 120-200 λίτρα ανά άτομο κάθε ημέρα, ανάλογα με τις συνήθειες και τις πρακτικές του κάθε ατόμου.

Τα βιομηχανικά λύματα είναι οποιαδήποτε λύματα που απορρίπτονται από κτίρια και χώρους που χρησιμοποιούνται για οποιαδήποτε εμπορική ή βιομηχανική δραστηριότητα και τα οποία δεν είναι οικιακά λύματα ή όμβρια ύδατα.

Είναι αναγκαία η συλλογή και η επεξεργασία των αστικών λυμάτων για την προστασία των υπογείων υδάτων και υδροφορέων καθώς και για την αποφυγή ρύπανσης των παράκτιων σημείων απόρριψης. Επίσης διατηρείται η ποιότητα ζωής και αποφεύγονται δυσμενείς επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Επιπροσθέτως, με την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

- αποφεύγονται προβλήματα κατά την εκκένωση και συντήρηση στεγανών ή απορροφητικών σηπτικών δεξαμενών
- δεν υφίσταται οχληρία κατά την εκκένωση των απορροφητικών βόθρων - σηπτικών δεξαμενών και δεν δημιουργούνται εστίες μόλυνσης.

- Σε ιδιαίτερα αστικοποιημένες περιοχές πρόκειται ουσιαστικά για την μόνη εφικτή λύση στο πρόβλημα της διαχείρισης των υγρών αστικών αποβλήτων.

Με την επεξεργασία των υγρών αστικών λυμάτων, τα παραγόμενα τριτοβάθμια επεξεργασμένα υγρά απόβλητα μπορούν να αξιοποιηθούν για άρδευση στην γεωργία και σε χώρους πρασίνου. Συνεπώς, εξοικονομείται πόσιμο νερό. Η παραγόμενη λάσπη από την επεξεργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό προϊόν στη γεωργία ή να αξιοποιηθεί για παραγωγή ενέργειας (αναερόβια χώνευση, καύση, αεριοποίηση).

Σημαντική παράμετρος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό φορτίων αστικών λυμάτων είναι και η μονάδα ισοδύναμου πληθυσμού (Μ.Ι.Π.). Η μονάδα **Ι.Π.** είναι η ποσότητα BOD (βιολογικά απαιτούμενο οξυγόνο) που παράγει ένας κάτοικος σε ημερήσια βάση και ισούται με 60γρ./ημέρα BOD₅. **[Μαρκαντωνάτος, 1990], [Λοιζίδου 2006]**.

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων γίνεται με βάση την **Κοινοτική Οδηγία 91/271/ΕΟΚ/1991 (για κοινότητες > 2.000 Ι.Π.)** και του νόμου περί **Αποχετευτικών Συστημάτων 1971-2007 (Ν 148 Ι/2007)**.

2.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα είναι σαφές πως τα αστικά υγρά απόβλητα χρήζουν αποτελεσματικής επεξεργασίας έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η δημόσια υγεία καθώς και η ποιότητα και η αειφορία του περιβάλλοντος συμπεριλαμβανομένων της χλωρίδας και της πανίδας. Για να επιτευχθεί η επεξεργασία και ασφαλής διάθεση των

υγρών αποβλήτων θα πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα ολοκληρωμένης διαχείρισης τους. Το σύστημα αυτό είναι απαραίτητο να εγγυάται την πλήρη συλλογή τους, την ορθή επεξεργασία τους καθώς και την μη ρυπογόνο διάθεσή τους. [Νταρακάς, 2014]. Τα λύματα μεταφέρονται στις εγκαταστάσεις του βιολογικού καθαρισμού μέσω των δικτύων αποχέτευσης, καθώς και με χρήση ειδικών βυτιοφόρων οχημάτων.

Η ορθή επεξεργασία των υγρών αστικών αποβλήτων μπορεί να επιτευχθεί με τις ακόλουθες διεργασίες ή συνδυασμό αυτών:

- **Διεργασία ενεργού ιλύος:** είναι διεργασία βιολογικής επεξεργασίας των λυμάτων στην οποία η ανάμειξη λυμάτων και ενεργούς ιλύος αναδεύεται και αερίζεται. Στη συνέχεια η ενεργός ιλύς διαχωρίζεται από τα επεξεργασμένα λύματα. Μέρος της ενεργούς ιλύος αφαιρείται από το σύστημα σαν περίσσεια λάσπη. Ορισμένα είδη διεργασιών με ενεργού ιλύος είναι τα ακόλουθα:
 - Αντιδραστήρας διαλείποντος έργου
 - Σταδιακός αερισμός
 - Οξειδωτικές τάφροι
 - Παρατεταμένος αερισμός
 - Επαφή και σταθεροποίηση
- **Επεξεργασία λυμάτων με χρήση ακινητοποιημένης βιομάζας** όπως τα trickling filters, fixed granular beds, περιστρεφόμενοι δίσκοι, αιωρούμενης ακινητοποιημένης βιομάζας (MBBR).
- **Βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR):** Η αρχή λειτουργίας της διεργασίας, βασίζεται στην διήθηση του ανάμεικτου υγρού των λυμάτων δια μέσου μεμβρανών προκειμένου να διαχωριστεί η τελική εκροή από την ιλύ (στερεά).
- **Αναερόβια Επεξεργασία Λυμάτων:** Η διεργασία αυτή είναι ο καθαρισμός των λυμάτων με τη βοήθεια μικροοργανισμών κάτω από αναερόβιες συνθήκες. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε βιομηχανικά ή κτηνοτροφικά απόβλητα

2.3. ΣΤΑΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΓΡΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΜΑΤΩΝ

Η ανάγκη για επεξεργασία των υγρών αποβλήτων οδήγησε σε μελέτες για τον σχεδιασμό εγκαταστάσεων κατάλληλες για κάθε τύπο αποβλήτων, χαμηλού κόστους κατασκευής και λειτουργίας καθώς και υψηλής απόδοσης με όσο το δυνατόν λιγότερη χρήση χημικών μέσων. Με το πέρασμα των χρόνων έχουν καθιερωθεί ορισμένα βασικά στάδια επεξεργασίας τα οποία είναι:

1. Προεπεξεργασία
2. Πρωτοβάθμια επεξεργασία
3. Δευτεροβάθμια επεξεργασία και
4. Τριτοβάθμια επεξεργασία

2.3.1. ΠΡΟ-ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στο στάδιο αυτό αφαιρούνται τα σχετικά ευμεγέθη υλικά που τυχόν συμπαρασύρονται με τα υγρά απόβλητα, όπως πέτρες, ξύλα, πλαστικά, καθώς επίσης χώμα, άμμος, λίπη και έλαια. Τα λύματα με την είσοδο τους στην Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ), διέρχονται από το στάδιο της προ-επεξεργασίας, το οποίο συνήθως διενεργείται μέσω σχαρών (10-50mm), αμμοσυλλέκτη και λιποπαγίδων.

2.3.2. ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Στο στάδιο αυτό αφαιρείται μέρος των καθιζανόντων και αιωρούμενων στερεών από τα λύματα και λαμβάνει χώρα, εάν εφαρμοστεί, αμέσως μετά από την προ-επεξεργασία.

Για την αφαίρεση των αιωρούμενων στερεών χρησιμοποιούνται φυσικές και χημικές μέθοδοι. Η φυσική μέθοδος είναι η χρήση των δεξαμενών καθίζησης, όπου καθώς διοχετεύονται τα λύματα στις δεξαμενές καθίζησης, επιτυγχάνεται μείωση αιωρούμενων σωματιδίων (TSS) κατά 40 – 50 %. Επίσης, επιτυγχάνεται μείωση του οργανικού φορτίου ως BOD₅ κατά 25 – 30 % **[Νταρακάς, 2014]**.

2.3.3. ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Σκοπός της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας είναι η περαιτέρω μείωση του Διαλυτού Οργανικού Φορτίου (BOD) και των αιωρούμενων στερεών (SS). (βλ. Εικόνα 1) Κατά κανόνα, επιτυγχάνεται και μείωση των αζωτούχων (N) και φωσφορικών ενώσεων (P), που εμπεριέχονται στα αστικά υγρά απόβλητα. Το στάδιο αυτό είναι το στάδιο της επεξεργασίας με βιολογικές διεργασίες, όπως της ενεργού ιλύος ή άλλων (ακόμα και όχι βιολογικών διεργασιών που μπορούν να δώσουν ισοδύναμα αποτελέσματα). Κατά το στάδιο αυτό επιτυγχάνεται απομάκρυνση του BOD και του COD τουλάχιστον κατά 70% και 75% αντίστοιχα.

Οι συνηθέστερες μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δευτεροβάθμια επεξεργασία είναι:

- Η επεξεργασία ενεργούς ιλύος,
- Η επεξεργασία με Περιστρεφόμενους βιολογικούς δίσκους (RBC)
- Οι τεχνητοί υγρότοποι (Φυσικές μέθοδοι)

Η εφαρμογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η προσδοκώμενη ποιότητα των υδάτων, ο όγκος των προς επεξεργασία αποβλήτων και το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας της μονάδος επεξεργασίας.

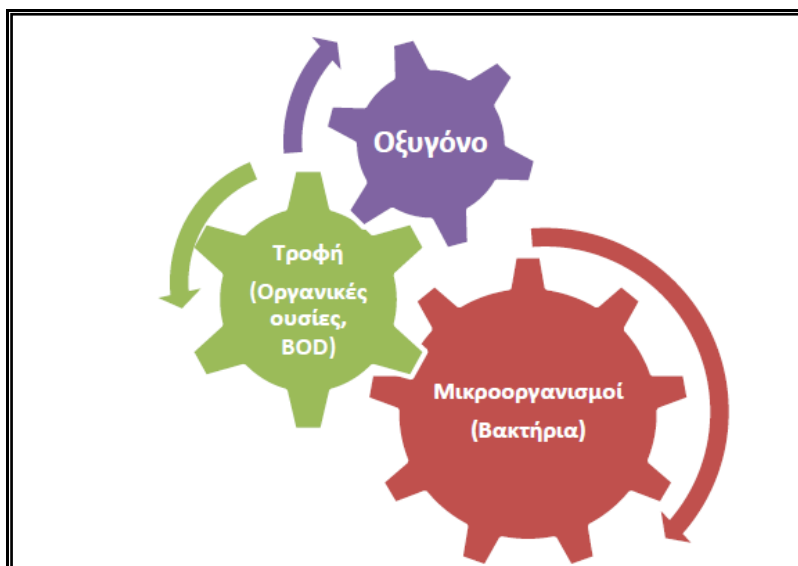
[Αραβώσης, 2003]

Επεξεργασία ενεργούς ιλύος

Στο σύστημα ενεργού ιλύος, τα λύματα οδηγούνται στις δεξαμενές αερισμού, όπου εκεί αναδεύονται και αερίζονται με την ενεργό ιλύ. Κατόπιν το πιο πάνω μείγμα οδηγείται στη δευτεροβάθμια δεξαμενή καθίζησης, όπου εκεί η ενεργός ιλύς διαχωρίζεται με φυσική καθίζηση και τα επεξεργασμένα λύματα οδηγούνται στην τριτοβάθμια επεξεργασία.

Επεξεργασία με Περιστρεφόμενους βιολογικούς δίσκους (RBC)

Το σύστημα περιλαμβάνει μία οριζόντια ημικυλινδρική δεξαμενή. Στην δεξαμενή περιστρέφεται ένας άξονας κατά μήκος, ο οποίος είναι εφοδιασμένος με δίσκους μεγάλης διαμέτρου που αγγίζει τα 3.5 m. Κατά την λειτουργία, η δεξαμενή πληρώνεται με τα αστικά απόβλητα. Με τη περιστροφή του άξονα, οι δίσκοι βυθίζονται περιοδικά στα λύματα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται επαφή λυμάτων και βιομάζας και ακολούθως έκθεση στον ατμοσφαιρικό αέρα με αποτέλεσμα την υψηλή απομάκρυνση οργανικού φορτίου (90-95%) και σε ορισμένες περιπτώσεις νιτροποίηση.



Εικόνα 1, Αρχή βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

2.3.4. ΤΡΙΤΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η τριτοβάθμια επεξεργασία είναι μια επιπρόσθετη διεργασία επεξεργασίας με σκοπό τον περαιτέρω καθαρισμό των επεξεργασμένων λυμάτων από αυτόν που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της πρωτοβάθμιας και της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Η τριτοβάθμια επεξεργασία περιλαμβάνει φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες.

Στις φυσικές διεργασίες περιλαμβάνονται η διήθηση, η προσρόφηση από ενεργό άνθρακα και διεργασίες με μεμβράνες (αντίστροφη ώσμωση). Στις χημικές διεργασίες περιλαμβάνεται η απομάκρυνση των νιτρικών και της αμμωνίας με ιοντοεναλλαγή, του φωσφόρου με χημική επεξεργασία. Από τις βιολογικές διεργασίες η σημαντικότερη είναι η νιτροποίηση – απονιτροποίηση, η οποία χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση των ενώσεων του αζώτου. Η τριτοβάθμια επεξεργασία διαδικασία είναι απαραίτητη όταν το νερό προορίζεται να χρησιμοποιηθεί για άρδευση, αναψυχή και για προσθήκη στο πόσιμο νερό. **[Metcalf and Eddy, 2003]**

2.3.5. ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η περαιτέρω επεξεργασία περιλαμβάνει επιπρόσθετες διεργασίες επεξεργασίας των λυμάτων, με σκοπό την αφαίρεση οποιασδήποτε άλλης ρυπαντικής ουσίας που επηρεάζει την ποιότητα ή μια συγκεκριμένη χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων, όπως μικροβιολογική ρύπανση, χρώμα κτλ. Στη περίπτωση αστικής χρήσης ή διάθεσης σε υπόγειους υδροφορείς, των επεξεργασμένων αποβλήτων θα πρέπει να ισχύουν οι ακόλουθες ελάχιστες αποδόσεις: οργανική αφαίρεση (BOD_5) ≤ 10 mg/l και ολικά στερεά (SS) ≤ 2 mg/l (και στις δύο τιμές αναφέρονται για το 80% των δειγμάτων). Επίσης, κατά περίπτωση

τίθενται όρια για το μικροβιακό φορτίο. Στην προαναφερθείσα περίπτωση επίσης θα πρέπει να ισχύει: ολικά κολοβακτηρίδια (TC) ≤ 20 TC/100ml (για το 95% των δειγμάτων) [ΚΥΑ 145116_2011]

Αυτές οι επιπρόσθετες διεργασίες επεξεργασίας των λυμάτων επιτυγχάνονται κυρίως μ' εφαρμογή φυσικοχημικών ή χημικών μεθόδων. Στο στάδιο αυτό γίνεται και απολύμανση των αποβλήτων. Κατά την διεργασία της απολύμανσης, τα επεξεργασμένα λύματα χλωριώνονται στη δεξαμενή χλωρίωσης, ούτως ώστε να μειωθεί η δραστηριότητα των παθογόνων μικροοργανισμών κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Εναλλακτικές μέθοδοι απολύμανση των αποβλήτων είναι η χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) ή με όζον ή και συνδυασμός δύο μεθόδων απολύμανσης.

2.3.6. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗ ΛΑΣΠΗΣ

Η λάσπη που παράγεται κατά την βιολογική επεξεργασία, υπόκειται στη διαδικασία της πάχυνσης και κατευθύνεται σε μονάδες αερόβιας ή αναερόβιας σταθεροποίησης (με ενεργειακή αξιοποίηση του βιοαερίου). Στη συνέχεια, αφυδατώνεται και τελικός αποδέκτης είναι ή χώροι υγειονομική ταφής αστικών απορριμμάτων. Εναλλακτικά μπορεί να υποστεί κομποστοποίηση ή καύση ή αεριοποίηση. Στις περισσότερες περιπτώσεις η πρωτογενώς παραγόμενη λάσπη επεξεργάζεται στις ίδιες μονάδες, με δευτερογενή λεπτομερή ανάλυση των σταδίων επεξεργασίας της. [Noyes, 1991], [Metcalf & Eddy, 2003].

3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΚΡΟΚΙΔΩΣΗΣ

Οι διεργασίες της κροκίδωσης και της συσσωμάτωσης χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντοτε συμπληρωματικά , κατά την κατεργασία των νερών και των υγρών αποβλήτων, με κύριους στόχους:

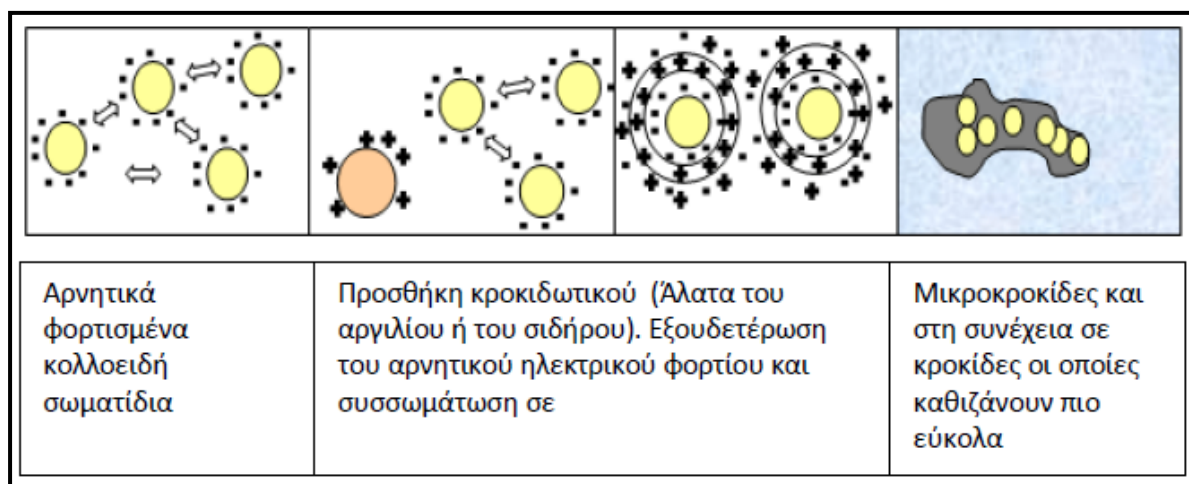
- την αύξηση της απομάκρυνσης των αιωρουμένων στερεών, δηλ. για να βελτιώσουν την καθίζηση των στερεών αυτών, αλλά κυρίως,
- την αποσταθεροποίηση των κολλοειδών συστημάτων (διεσπαρμένα στερεά με διάμετρο μικρότερη από 1 μm), με σκοπό την δημιουργία συσσωματωμάτων, τα οποία μπορούν να απομακρυνθούν με καθίζηση ή επίπλευση.

Τα κυριότερα πεδία εφαρμογών των διεργασιών της κροκίδωσης και της συσσωμάτωσης είναι:

- η κατεργασία του πόσιμου νερού με σκοπό την απομάκρυνση της θολερότητας και του χρώματος
- η κατεργασία των υγρών βιομηχανικών αποβλήτων για την απομάκρυνση οργανικών κολλοειδών ή τοξικών μετάλλων
- η κατεργασία υγρών αστικών αποβλήτων για την απομάκρυνση κυρίως των φωσφορικών.

Οι φυσικοχημικές αυτές διεργασίες συμβάλλουν στη βελτίωση της απομάκρυνσης των ρύπων που βρίσκονται σε κολλοειδή μορφή. Με τις διεργασίες αυτές τα κολλοειδή σωματίδια με τη προσθήκη κροκιδωτικού υλικού δημιουργού μικροκροκίδες οι οποίες απομακρύνονται συνήθως με καθίζηση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προκαταρκτικό στάδιο ή μετά από την βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

Κολλοειδή ονομάζονται τα συστήματα διασποράς σε μορφή σωματιδίων της τάξης μεγέθους $10^{-7} - 10^{-4}$ cm (0,01 - 1,0 μ m) που ονομάζονται μικκύλια. Τα μικκύλια μπορεί να είναι συσσωματώματα μορίων, μικροκρύσταλλοι, ή μεγαλομόρια, δηλαδή μόρια πολύ μεγάλου μοριακού βάρους και διαστάσεων, όπως οι πρωτεΐνες, τα πολυμερή, τα νουκλεϊικά οξέα, οι πολυσακχαρίτες κ.ά..



Εικόνα 2, Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού της κροκίδωσης

Κροκίδωση ή θρόμβωση ονομάζεται το φαινόμενο της εξουδετέρωσης του ηλεκτρικού φορτίου των μικκυλίων κολλοειδούς διασποράς, με αποτέλεσμα τη συνένωση των αποσταθεροποιημένων κολλοειδών και τη δημιουργία μεγάλων σχηματισμών, δηλαδή κροκίδων, (βλ. Εικόνα 2). Ακολουθεί η συσσωμάτωση και καταβύθιση. Συσσωμάτωση είναι η διεργασία κατά την οποία τα κολλοειδή αιωρούμενα υλικά ενός υδατικού διαλύματος προετοιμάζονται με κατάλληλα μέσα για συνένωση. Πρακτικά, η συσσωμάτωση αποτελεί διεργασία συνένωσης των αποσταθεροποιημένων κροκίδων. Ο όρος καταβύθιση έχει νόημα όταν τα πρώην κολλοειδή συστατικά είναι βαρύτερα από το κύριο συστατικό του πρώην κολλοειδούς συστήματος. Αν είναι ελαφρύτερα τότε και πάλι απομακρύνονται, αλλά προς τα πάνω, με την διεργασία της επίπλευσης. Σε κάθε περίπτωση, με την κροκίδωση το

συνολικό σύστημα παύει να φαίνεται ομοιογενές. Κι αυτό γιατί όταν με τη συσσωμάτωση τα σωματίδια των συστατικών ξεπεράσουν το όριο των 10^{-4} cm, γίνονται πλέον ορατά. [Τζουπάνος, 2009].

Τα κολλοειδή και αδρομερή αιωρούμενα σωματίδια που υπάρχουν στο νερό και στα απόβλητα προετοιμάζονται με κατάλληλα αντιδραστήρια για την αποσταθεροποίηση, τη συνένωση και την απομάκρυνσή τους. Οπτικά φαίνονται ότι είναι ομογενή μίγματα. Η απομάκρυνσή τους με απλή καθίζηση είναι αδύνατη. Τα σωματίδια αυτά φέρουν συνήθως αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο και η αυθόρμητη συνένωσή τους, λόγω των δυνάμεων έλξεως Van der Waals, εξουδετερώνεται από τις ηλεκτρικές απωστικές δυνάμεις οι οποίες αυξάνονται όσο μικρότερα είναι τα κολλοειδή, λόγω της μεγάλης ειδικής επιφάνειας και των κολλοειδών ιδιοτήτων που αυτά παρουσιάζουν. Συνεπώς πρέπει πρώτα να αποσταθεροποιηθούν και στη συνέχεια να συνενωθούν σε μεγαλύτερους σχηματισμούς (κροκίδες, flocs) για πιο αποτελεσματική απομάκρυνση.

Ανάλογα με την ικανότητα ή όχι να προσροφούν μόρια του κύριου συστατικού και να αυξάνουν το μέγεθός τους, τα μικκύλια διακρίνονται σε υδρόφοβα, αν δεν έχουν την ικανότητα να προσροφούν μόρια του κύριου συστατικού και δεν αυξάνουν το μέγεθός τους, και σε υδρόφιλα αν έχουν την ικανότητα να προσροφούν μόρια του κύριου συστατικού και να αυξάνουν το μέγεθός τους. Ενώ λοιπόν τα μικκύλια των κολλοειδών είναι σχετικά μεγάλα και βαριά, δεν καταβυθίζονται όπως θα περίμενε κανείς, γιατί απωθούνται αμοιβαία μεταξύ τους, επειδή έχουν εξωτερικά ομοειδές ηλεκτρικό φορτίο (θετικό ή αρνητικό). Η σταθερότητα των υδρόφοβων κολλοειδών οφείλεται στις απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις, ενώ των υδρόφιλων οφείλεται περισσότερο στη συγγένειά τους με το νερό, καθώς διασκορπίζονται εύκολα στη μάζα του και λιγότερο στα ηλεκτρικά φορτία που διαθέτουν. Ένας επιπλέον λόγος

σταθερότητας των κολλοειδών είναι η προστασία που τους παρέχουν ορισμένες ουσίες που προσροφώνται σε αυτά.

Συνήθως τα κροκιδωτικά και τα συσσωματικά περιλαμβάνουν φυσικά και συνθετικά οργανικά πολυμερή, μεταλλικά άλατα όπως θειικό αργίλιο ή σίδηρος και προϋδρολυμένα μεταλλικά άλατα όπως το PAC (polyaluminum chloride) και PIC (polyiron chloride). Τα συσσωματικά, ειδικά τα οργανικά πολυμερή, χρησιμοποιούνται επίσης για να βελτιώσουν την απόδοση φίλτρων σωματιδιακών μέσων και στην αφύγρανση χωνευμένων βιοστερεών. Σε αυτές τις εφαρμογές, τα χημικά συσσωμάτωσης συχνά ονομάζονται ως βοηθητικά της διήθησης (filter aids).

Μέχρι σήμερα, τα κυριότερα ανόργανα κροκιδωτικά μέσα που χρησιμοποιούνται είναι :

- άλας αργιλίου, $Al_2(SO_4)_3$
- τριχλωριούχο αργίλιο, $AlCl_3$
- άλας σιδήρου, $Fe_2(SO_4)_3$
- τριχλωριούχος σίδηρος, $FeCl_3$

Η αποτελεσματικότητα των παραπάνω κροκιδωτικών δεν οφείλεται μόνο στο μεγάλο σθένος των ιόντων Al_3^+ και Fe_3^+ , αλλά και στη σημαντική αποσταθεροποίηση των κολλοειδών σωματιδίων που επιτυγχάνεται από τα προϊόντα υδρόλυσης των ιόντων αυτών.

Τα άλατα του αργιλίου και του σιδήρου θεωρείται ότι συμβάλλουν με δύο τρόπους στη συσσωμάτωση και κροκίδωση των κολλοειδών σωματιδίων, όταν προστεθούν στο νερό.

- Τα θετικά φορτισμένα μέταλλο – υδροξυ σύμπλοκα που δημιουργούνται μετά την ολοκλήρωση των αντιδράσεων υδρόλυσης των ιόντων Al_3^+ και Fe_3^+ , παραμένουν διαλυμένα και προσροφούνται στην επιφάνεια των αρνητικά

φορτισμένων κολλοειδών σωματιδίων, με αποτέλεσμα να εξουδετερώνουν το φορτίο τους.

- Ο πολυμερισμός των σύμπλοκων μπορεί να συνεχιστεί ή ακόμα τα σύμπλοκα να αρχίσουν να συνενώνονται. Στην περίπτωση αυτή προκύπτουν θετικά φορτισμένα μεταλλικά υδροξείδια, τα οποία είναι ελάχιστα διαλυτά στο νερό.

Τα πιο διαδεδομένα προϋδρολυμένα κροκιδωτικά μέσα που χρησιμοποιούνται είναι του $AlCl_3$ και του $FeCl_3$ και τα οποία παρασκευάζονται με ελεγχόμενη υδρόλυση διαλυμάτων $AlCl_3$ και $FeCl_3$. Το είδος των συμπλόκων που σχηματίζονται, εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Συγκέντρωση των ιόντων Al_3^+ και Fe_3^+
- Βαθμός προ-υδρόλυσης, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της συγκέντρωσης των υδροξυλίων προς τη συγκέντρωση των ιόντων Al_3^+ ή Fe_3^+ ($B=[OH^-]/[Al_3^+]$ ή $B=[OH^-]/[Fe_3^+]$)
- Διάρκεια υδρόλυσης
- Συγκέντρωση των ανιόντων στο διάλυμα
- Συνθήκες ανάμιξης της βάσης με το διάλυμα του κροκιδωτικού
- Το είδος και η κανονικότητα της βάσης που χρησιμοποιείται για την υδρόλυση.

Άλλα προϋδρολυμένα κροκιδωτικά που χρησιμοποιούνται είναι αυτά το θειικού σιδήρου, το polyaluminum silicate και το sulphate polyalumino-ferric sulphate.

[Jiang & Graham, 1998]

Η δοσολογία τους ποικίλλει ανάλογα με το ειδικότερο πεδίο εφαρμογής τους και κυμαίνεται μεταξύ 0.05-0.5 mg/L για την κατεργασία επιφανειακών νερών, 0.5-5 mg/L για την κατεργασία υγρών αποβλήτων και 0.5-7 kg πολυμερούς/ τόνο

στερεών (επί ξηρού) για την αφυδάτωση της λάσπης. **[Α.Π.Θ., Τμήμα Χημείας, 2010]**

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την κροκίδωση είναι:

- η δοσολογία, δηλ. η χρησιμοποιούμενη συγκέντρωσή των κροκιδωτικών,
- η επίδραση της ανάμιξης και των παραγομένων διατμητικών τάσεων στη σταθερότητα των κροκίδων,
- το μέγεθος των στερεών που πρόκειται να κροκιδωθούν,
- η συγκέντρωση των στερεών,
- το μοριακό βάρος των πολυμερών,
- η τιμή του pH, και
- η επίδραση της θερμοκρασίας.

Η επίδραση της τιμής του pH

Τα ανόργανα αντιδραστήρια όταν προστεθούν σ' ένα σύστημα που πρόκειται να υποστεί κροκίδωση, εξαιτίας της υδρόλυσης που υφίστανται, δημιουργούν καινούργια στερεά (προϊόντα καταβύθισης, αδιάλυτα υδροξείδια), ενώ αλλάζουν και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του προς κατεργασία νερού (pH, αγωγιμότητα). Η τιμή του pH ιδιαίτερα, είναι μία σημαντική παράμετρος για την αποσταθεροποίηση του κολλοειδούς συστήματος.

Η βέλτιστη τιμή του, είναι ένας συμβιβασμός αφενός μεταξύ του απαραίτητου pH για την αποσταθεροποίηση του κολλοειδούς (που εξαρτάται κυρίως από το είδος του) και αφετέρου, του απαραίτητου pH για συσσωμάτωση/κροκίδωση (που εξαρτάται από το σχηματισμό της αντίστοιχης κροκίδας του υδροξειδίου σιδήρου ή αργιλίου). Η επιζητούμενη τιμή pH συνήθως αντιστοιχεί στην ελάχιστη διαλυτότητα του αντίστοιχου υδροξειδίου που σχηματίζεται (βελτιστοποίηση του σταδίου

κροκίδωσης). Όταν χρησιμοποιείται σαν κροκιδωτικό κάποιο άλας του Al^{3+} , τότε το βέλτιστο pH είναι 6-7.5, ενώ όταν χρησιμοποιείται κάποιο άλας του Fe^{3+} , το βέλτιστο pH πρέπει να είναι μεγαλύτερο από του 5. [Α.Π.Θ., Τμήμα Χημείας, 2010]

3.1. ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΚΡΟΚΙΔΩΣΗΣ - ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗΣ

Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση των κροκιδωτικών υλικών πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές τα λεγόμενα **Jar-test**, (βλ. Εικόνα 3). Σκοπός των εργαστηριακών δοκιμών είναι να βρεθούν οι κατάλληλες συνθήκες (θερμοκρασία, το pH, ο ρυθμός ανάδευσης) στο οποίο δρουν καλύτερα τα κροκιδωτικά υλικά. Σε πολλές περιπτώσεις για να υποβοηθηθεί η διεργασία της κροκίδωσης γίνεται χρήση συσσωματικού μέσου, ώστε να επιτευχθεί δημιουργία μεγάλων σχηματισμών, (κροκίδων, flocks). Ελέγχονται διαφορετικές δοσολογίες, ώστε να βρεθεί η δοσολογία που επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση του κροκιδωτικού υλικού. Βέλτιστη δόση κροκιδωτικού θεωρείται η ελάχιστη ποσότητα αυτού που θα προκαλέσει την μεγαλύτερη απομάκρυνση οργανικού φορτίου από την υδατική φάση.

Οι εργαστηριακές συσκευές, στις οποίες πραγματοποιούνται οι δοκιμές **Jar-Test** έχουν συνήθως έξι διαφορετικά δοχεία ανάδευσης. Διαθέτουν μεταβαλλόμενη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής των μεταλλικών αναδευτήρων στα δοχεία. Τα δοχεία που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των δειγμάτων είναι γυάλινα και έχουν χωρητικότητα 500ml. Η ταχύτητα του κάθε αναδευτήρα επιλέγεται από το χρήστη βάση ενός εύρους στροφών ανά λεπτό. Ο άξονας του αναδευτήρα μετακινείται στη κάθετη διεύθυνση ώστε να δημιουργείται περιδίνηση του υγρού σε όποιο ύψος του δοχείου είναι επιθυμητό. [Οικονομόπουλος, 2005], [Λοιζίδου, 2006]

Ο εργαστηριακός έλεγχος αποτελείται από 3 φάσεις:

Ταχεία Ανάμιξη (Rapid Mix)

Προστίθεται το δείγμα (500ml λύματος ανά δοχείο) και το κροκιδωτικό, και αναδεύονται για σύντομο χρονικό διάστημα (π.χ. 5 min) σε υψηλές στροφές (π.χ. 200 rpm). Στη φάση αυτή διασπείρεται το κροκιδωτικό και επέρχεται εξουδετέρωση των κολλοειδών. Η φάση αυτή αντιστοιχεί στην κροκίδωση.

Αργή Ανάδευση (Slow Mix)

Η φάση αυτή αντιστοιχεί στη συσσωμάτωση. Οι συνθήκες ανάδευσης είναι περίπου 15 min σε 60 rpm

Καθίζηση (Settling)

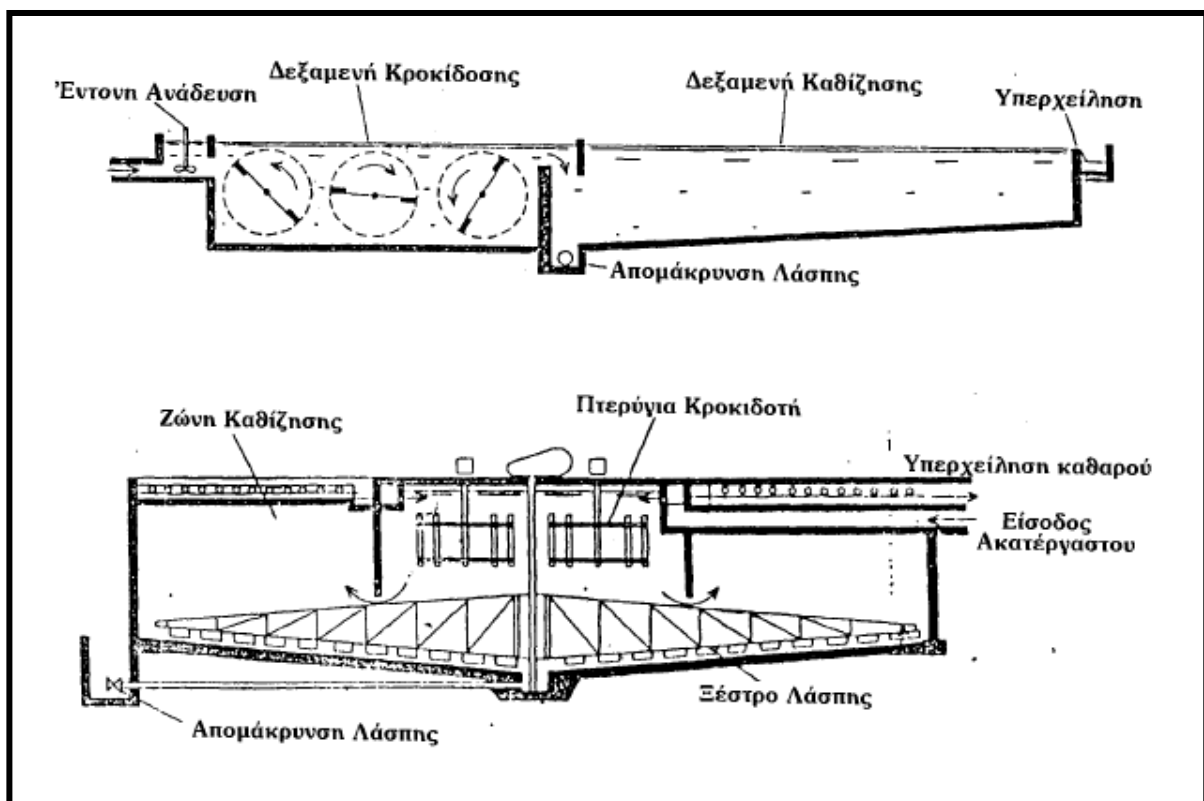
Συνήθως 30 min. Από το υπερκείμενο υγρό λαμβάνεται δείγμα και γίνεται μέτρηση (π.χ. θολότητα).



Εικόνα 3, Εργαστηριακή δοκιμή κροκίδωσης (Jar test)

Στην περίπτωση της κροκίδωσης σε βιομηχανική κλίμακα, η κροκίδωση στα απόβλητα πραγματοποιείται σε δεξαμενή στην οποία προστίθενται τα κατάλληλα χημικά αντιδραστήρια υπό συνθήκες έντονης ανάδευσης με σκοπό την αποσταθεροποίηση των υπαρχόντων κολλοειδών.

Στη συνέχεια τα απόβλητα οδηγούνται σε δεύτερη δεξαμενή. Στη δεξαμενή αυτή, με τη βοήθεια μεγάλων πτερυγίων ανάδευσης που περιστρέφονται με μικρή ταχύτητα περιστροφής, ολοκληρώνεται η κροκίδωσή των αποβλήτων. Έπειτα τα απόβλητα οδηγούνται σε δεξαμενή καθίζησης, ώστε να καθιζάνουν οι κροκίδες που δημιουργήθηκαν και να γίνει ο διαχωρισμός του από το καθαρό νερό. Το καθαρό νερό υπερχειλίζει σε περιμετρική διώρυγα της δεξαμενής και από εκεί οδηγείται στο διυλιστήριο, (βλ. Εικόνα 4). Συνήθως ο χώρος κροκίδωσης σχεδιάζεται για μέσο χρόνο παραμονής του νερού ίσο με 10 - 15 min. [Μαρκαντωνάτος, 1986], [Βλυσίδης, 2006].



Εικόνα 4, Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας κροκίδωσης - καθίζησης σε βιομηχανική κλίμακα.

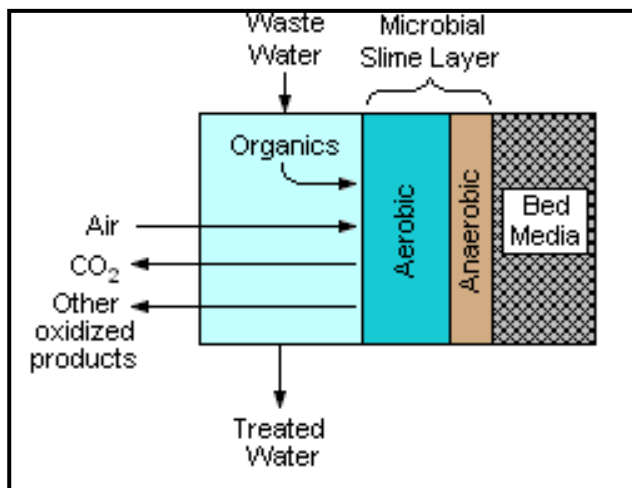
4. ΑΕΡΟΒΙΑ ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΣΚΟΛΛΗΜΕΝΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ (ΒΙΟΛΟΓΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ)

4.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΦΙΛΤΡΩΝ

Η μέθοδος επεξεργασίας προσκολλημένης βιομάζας των βιοφίλτρων αποτελεί μέθοδο επεξεργασίας χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. [Henrich & Marggraff, 2013]. Στις διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας, οι μικροοργανισμοί αναπτύσσονται ως ένα βιολογικό στρώμα (φιλμ), και τα υγρά απόβλητα που υποβάλλονται σε επεξεργασία έρχονται σε επαφή με το φιλμ των μικροοργανισμών. Οι προσκολλημένοι στο αδρανές πληρωτικό υλικό οξειδώνουν την οργανική ύλη και την αμμωνία. Η οργανική ύλη και τα θρεπτικά άλατα απομακρύνονται από τα υγρά απόβλητα, καθώς αυτά ρέουν πάνω στην προσκολλημένη βιομάζα, η οποία είναι επίσης γνωστή ως ή βιολογικός υμένας. (βλ. Εικόνα 5).

Η αερόβια βιολογική επεξεργασία προσκολλημένης βιομάζας μπορεί να γίνει με διάφορους μεθόδους. Οι συνήθεις μέθοδοι προσκολλημένης βιομάζας είναι:

- Χαλικοδιυλιστήρια
- Περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι
- Συνδυασμένες διεργασίες ενεργούς ιλύος με διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας



Εικόνα 5, Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας προσκολλημένης βιομάζας. [Wikipedia, 2016]

Στους αντιδραστήρες προσκολλημένης βιομάζας παρατηρείται κάποια αποκοπή της βιολογικής στοιβάδας κατά την ροή των υγρών αποβλήτων, (βλ. Εικόνα 6). Για το λόγο αυτό, είναι συνήθως απαραίτητη η κατασκευή ενός φυσικού σταδίου κατακράτησης της βιομάζας αυτής ,πριν την τελική διάθεση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.



Εικόνα 6, Σχηματική απεικόνιση των διεργασιών στην επιφάνεια των βιοφορέων των σταλακτικών φίλτρων. [Σωτηρίου, 2012]

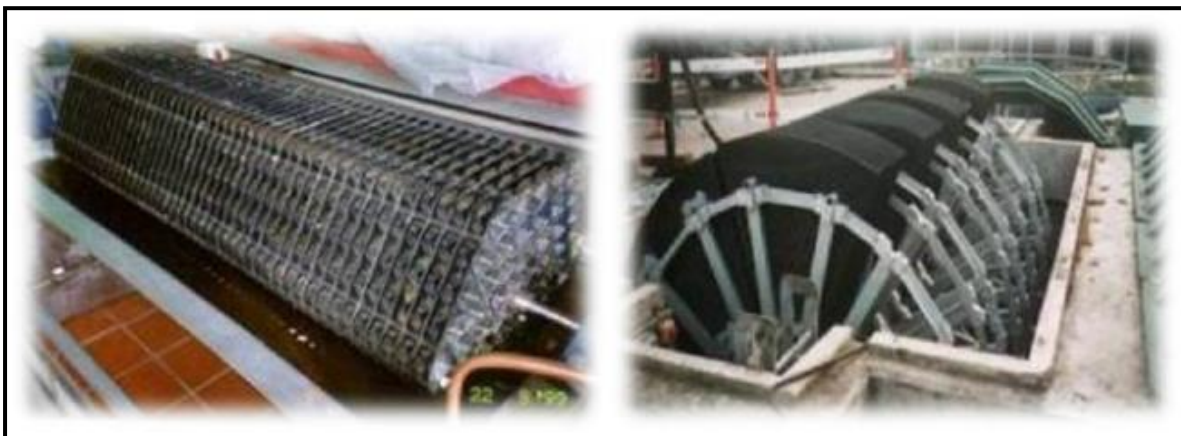
4.1.1. ΧΑΛΙΚΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΑ

Το χαλικοδιυλιστήριο είναι ένας διαβρεχόμενος μη εμβαπτιζόμενος βιολογικός αντιδραστήρας, σταθερής στοιβάδας στον οποίο γίνεται χρήση χαλικών ή πλαστικών πληρωτικών υλικών πλήρωσης πάνω στα οποία διαβρέχονται τα υγρά απόβλητα. Ο σκοπός των συστημάτων αυτών είναι η επαφή των υγρών αποβλήτων με τη προσκολλημένη βιομάζα των υλικών και κατ' επέκταση η μείωση του οργανικού φορτίου τους. Όπως αναλύεται και κατωτέρω, η μόνη ενεργειακή απαίτηση είναι χρήση αντλιών για την ανύψωση των λυμάτων ώστε να διαβρέχουν τα φίλτρα.

Στην περίπτωση των χαλικοδιυλιστηρίων η εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται από το γεγονός ότι δεν απαιτείται εξωτερική παροχή οξυγόνου, αλλά οι ανάγκες των φίλτρων, καλύπτονται από τον φυσικό αερισμό της εγκατάστασης. Η μέθοδος των χαλικοδιυλιστηρίων αναλύεται διεξοδικά στο κεφάλαιο 4.2

4.1.2. ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ ΔΙΣΚΟΙ

Οι περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι (Rotating Biological Contactors RBC) ή δισκοδιυλιστήρια λειτουργούν επίσης με τη μέθοδο της προσκολλημένης βιομάζας και αποτελούνται από μια ημικυλινδρική σκάφη κατά μήκος της οποίας υπάρχει ένας περιστρεφόμενος άξονας στον οποίο είναι στερεωμένοι κυκλικοί δίσκοι σε κατάλληλη μεταξύ τους απόσταση. Οι δίσκοι είναι ημιβυθισμένοι στη σκάφη εντός της οποίας



εισέρχονται τα λύματα, (βλ. Εικόνα 7)

Εικόνα 7, Βιολογικοί δίσκοι (Δισκοδιυλιστήριο). [NTUA, 2015]

Οι βιολογικοί υμένες αναπτύσσονται πάνω στις επιφάνειες των δίσκων. Όταν τα βακτήρια είναι βυθισμένα στα λύματα προσροφούν τις διαλυμένες σε αυτά οργανικές ουσίες και τις χρησιμοποιούν σαν τροφή. Στη συνέχεια με την περιστροφή του δίσκου εξέρχονται τα βακτήρια από τα λύματα και έρχονται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα από τον οποίο παίρνουν το απαιτούμενο οξυγόνο για την οξείδωση των οργανικών ενώσεων. Η παραγόμενη βιομάζα αποκολλάται από τις επιφάνειες των δίσκων λόγω της ταχύτητας περιστροφής των δίσκων και των

δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια νερού - βιολογικού υμένα. Στη συνέχεια εκρέουν μαζί με τα λύματα από το διυλιστήριο και φθάνουν στις δεξαμενές τελικής καθίζησης όπου και κατακρατούνται.

Τα δισκοδιυλιστήρια κατασκευάζονται συνήθως σαν δεξαμενές οι οποίες αποτελούνται από περισσότερες σκάφες στη σειρά. Η σύσταση των μικροοργανισμών που αποτελούν τους βιολογικούς υμένες διαφέρει από σκάφη σε σκάφη. Επίσης από σκάφη σε σκάφη διαφέρει και η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στα λύματα. Έτσι ενώ στην πρώτη σκάφη έχουμε συγκέντρωση οξυγόνου 1,5 mg/lt στην τέταρτη είναι δυνατόν αυτή να είναι 6,0 mg/l. Το βασικό πλεονέκτημα των δισκοδιυλιστηρίων είναι οι χαμηλές δαπάνες λειτουργίας τους οι οποίες ουσιαστικά περιορίζονται στις δαπάνες για την κίνηση του άξονα των δίσκων. Η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια στις εγκαταστάσεις αυτού του τύπου είναι το 20 – 30 % της αντίστοιχης των εγκαταστάσεων ενεργού ιλύος. Επίσης οι δαπάνες συντήρησής τους είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των χαλικοδιυλιστηρίων και των εγκαταστάσεων ενεργού ιλύος. **[Metcalf & Eddy, 2003]**

4.1.3. ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΡΟΣΚΟΛΛΗΜΕΝΗΣ ΚΑΙ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

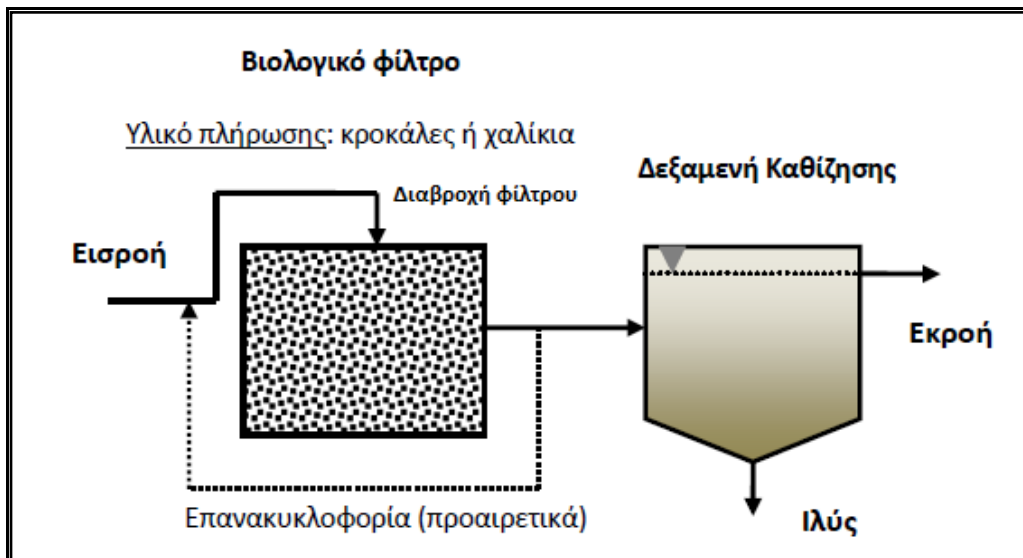
Πρόκειται για εγκαταστάσεις στις οποίες συνδυάζονται οι τεχνολογίες δευτεροβάθμιας βιολογικής επεξεργασίας. Οι διεργασίες που συνδυάζονται είναι εκείνες της ενεργού ιλύος με διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας (βιολογικά φίλτρα, περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι). Ουσιαστικά, είναι αποτέλεσμα αναβάθμισης εγκαταστάσεων με προσθήκη είτε διεργασιών προσκολλημένης βιομάζας, είτε της μεθόδου ενεργούς ιλύος.

Κατηγοριοποιώντας τους διάφορους συνδυασμούς που χρησιμοποιούνται συχνότερα, διακρίνονται οι εξής εγκαταστάσεις [Metcalf & Eddy, 2003]:

- Βιολογικό φίλτρο και επαφή στερεών
- Βιολογικό φίλτρο και μέθοδος ενεργού ιλύος
- Ενεργό βιολογικό φίλτρο και βιολογικό φίλτρο μεθόδου ενεργού ιλύος
- Σειρές βιολογικών φίλτρων και μέθοδος ενεργού ιλύος

4.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΧΑΛΙΚΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΩΝ

Τα χαλικοδιυλιστήρια αποτελούν βιοαντιδραστήρες στα τοιχώματα των οποίων αναπτύσσεται με το χρόνο βιολογική μάζα η οποία περιβάλλει όλες τις ελεύθερες επιφάνειες και χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Είναι κατάλληλα διαμορφωμένες δεξαμενές μέσα στις οποίες τοποθετούνται τα χαλίκια ή πλαστικά υλικά πλήρωσης. Οι βιολογικοί υμένες αναπτύσσονται πάνω στις στερεές επιφάνειες των υλικών πλήρωσης (χαλίκια ή πλαστικά πληρωτικά υλικά), (βλ. Εικόνα 8). Τα κενά μεταξύ των χαλικιών ή των πλαστικών υλικών πρέπει να είναι αρκετά μεγάλα προκειμένου να μην φράσσονται εύκολα από τη βιομάζα που αναπτύσσεται στις επιφάνειές τους, αλλά και από αυτή που αποκολλάται. Συνεπώς η διάμετρος των υλικών πλήρωσης δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη γιατί έτσι ελαττώνεται η επιφάνεια των στερεών, αλλά ούτε και πολύ μικρή γιατί έτσι ελαττώνεται ο όγκος των κενών χώρων.



Εικόνα 8, Σχηματική αναπαράσταση Χαλικοδιυλιστηρίου

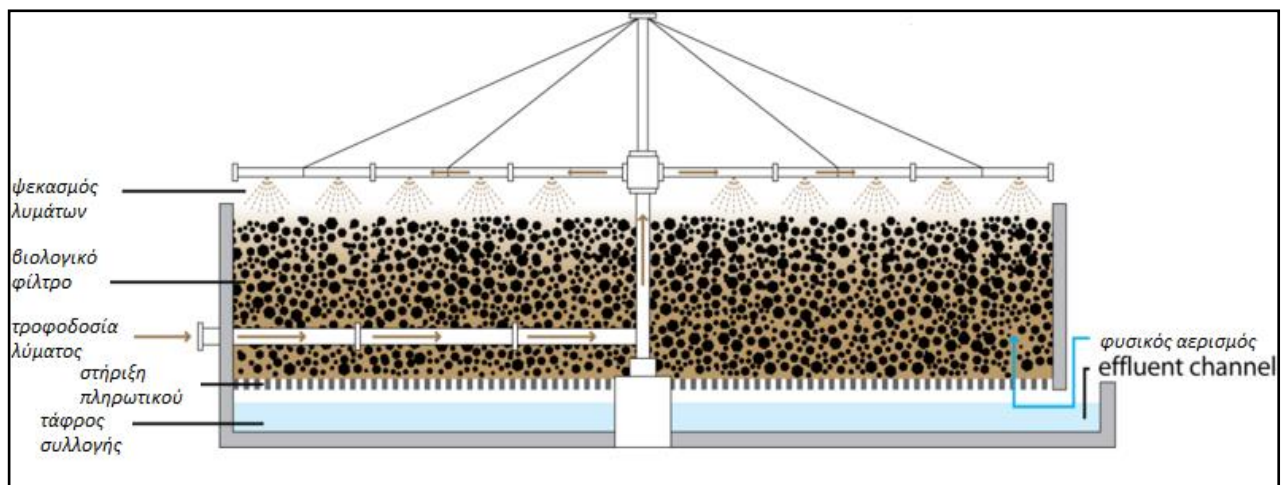
Τα λύματα ραντίζονται στην επιφάνεια της δεξαμενής του σταλακτικού φίλτρου και ρέουν προς τα κάτω δια μέσου των κενών χώρων του διυλιστηρίου. Έτσι περιβρέχεται η βιομάζα που έχει αναπτυχθεί στις επιφάνειες των χαλικιών με λύματα. Όσο διαρκεί η επαφή των λυμάτων με τη βιομάζα, γίνεται προσρόφηση των οργανικών ουσιών που περιέχονται στα λύματα είτε σε αιώρηση είτε σε διάλυση, από τους βιολογικούς υμένες. Οι μικροοργανισμοί που σχηματίζουν τους βιολογικούς υμένες αποικοδομούν τις οργανικές ουσίες των λυμάτων. Αποτέλεσμα της διεργασίας είναι η παραγωγή βιομάζας και καταλοίπων της βιοαποικοδόμησης, δηλαδή ανόργανες ουσίες. Οι ανόργανες αυτές ουσίες αποβάλλονται από τα κύτταρα των μικροοργανισμών με τις εκκρίσεις. Η παραγωγή βιομάζας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του πάχους των βιολογικών υμένων και κατά συνέπεια την ελάττωση των κενών χώρων του διυλιστηρίου. Ένα τμήμα της βιομάζας χρησιμοποιείται σαν τροφή από τους μικροοργανισμούς που διαβιώνουν στο εσωτερικό των διυλιστηρίων. Το απαιτούμενο οξυγόνο για την οξειδωση των οργανικών ουσιών λαμβάνεται από τον αέρα. Με κατάλληλη διαμόρφωση του πυθμένα της δεξαμενής του σταλακτικού φίλτρου εξασφαλίζεται καλός αερισμός στο εσωτερικό του φίλτρου. Αυτό

επιτυγχάνεται με τη δημιουργία οπών στο πυθμένα για την εκροή των λυμάτων και την κυκλοφορία του αέρα. Με την αύξηση του πάχους των βιολογικών υμένων περιορίζεται ο όγκος των κενών χώρων του φίλτρου και το οξυγόνο που εισέρχεται στο εσωτερικό του δεν αρκεί για να φθάσει στα εσωτερικά στρώματα των βιολογικών υμένων. Έτσι η αποικοδόμηση από αερόβια μετατρέπεται σε αναερόβια. Με την πάροδο του χρόνου η αδρανοποιημένη βιομάζα χάνει την ικανότητα πρόσφυσής της στις στερεές επιφάνειες, αποκολλάται από αυτές και συμπαρασύρεται προς την έξοδο του σταλακτικού φίλτρου. Η αύξηση της βιομάζας στο εσωτερικό του φίλτρου έχει σαν αποτέλεσμα και τη μείωση του ελεύθερου χώρου μεταξύ των υλικών πλήρωσης. Συνέπεια αυτού είναι ο κίνδυνος απόφραξης του σταλακτικού φίλτρου. Για να αποφθεχθεί ο κίνδυνος απόφραξης του φίλτρου, από καιρού εις καιρόν αυξάνεται η υδραυλική φόρτιση του σταλακτικού φίλτρου.

Τα πιο σύγχρονα σταλακτικά φίλτρα κυμαίνονται σε ύψος από 5 έως 10 m και είναι γεμάτα με πλαστικό υλικό πλήρωσης για την προσκόλληση της βιολογικής στοιβάδας.

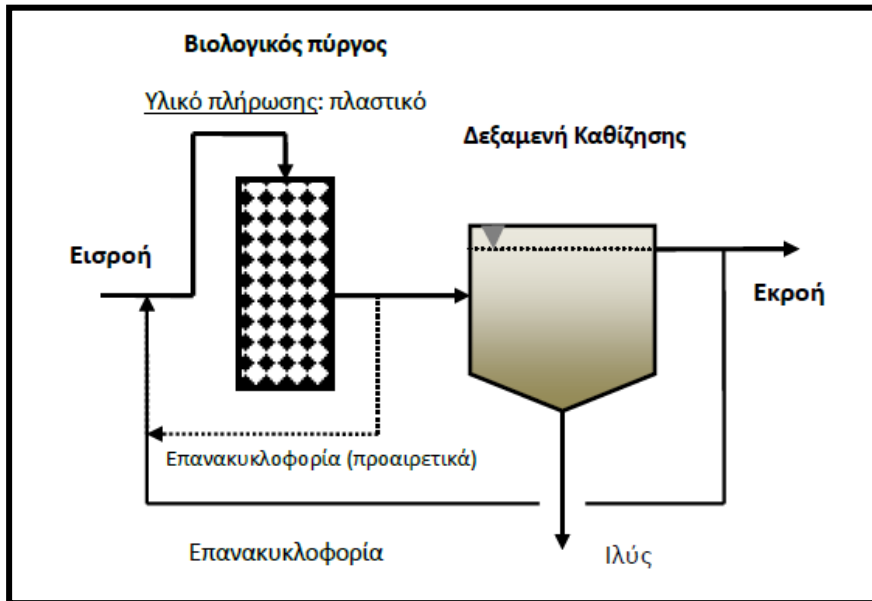


Εικόνα 9, Εγκαταστάσεις σταλακτικών φίλτρων. [Igreenion , 2014]



Εικόνα 10, Σχηματική αναπαράσταση σταλακτικού φίλτρου. [Camix Co., 2016]

Το πλαστικό υλικό πλήρωσης είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε το 90 – 95 % του συνολικού της δεξαμενής του σταλακτικού φίλτρου να αποτελείται από κενό χώρο, (βλ. Εικόνα 14, Εικόνα 11). Η διεργασία είναι όμοια με αυτήν των παραδοσιακών χαλικοδιυλιστηρίων με πληρωτικό υλικό χαλίκια ή κροκάλες, (βλ. Εικόνα 11).



Εικόνα 11, Βιολογικό φίλτρο με πλαστικό υλικό.







Εικόνα 12, Διάφορα είδη πλαστικών υλικών πλήρωσης των βιολογικών φίλτρων. [Purlicus Inc., 2016]

4.2.1. ΕΙΔΗ ΠΛΗΡΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ιδανικό υλικό πλήρωσης των χαλικοδιυλιστηρίων θεωρείτε ένα υλικό με μεγάλη έκταση επιφάνειας ανά μονάδα όγκου, μεγάλη αντοχή και με αρκετά υψηλό πορώδες ώστε να ελαχιστοποιείται η απόφραξη και να επιτυγχάνεται καλή κυκλοφορία του αέρα. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υλικό πλήρωσης των σταλακτικών φίλτρων είναι: χαλίκια ή πλαστικό ή ξύλο. Παλαιότερα το σύννηθες υλικό πλήρωσης των βιοφίλτρων ήταν χαλίκια, από όπου προέρχεται η παλιότερη ονομασία, χαλικοδιυλιστήρια, των σταλακτικών φίλτρων. Πλέον όμως χρησιμοποιείται κυρίως το πλαστικό ως υλικό πλήρωσης. Τα χαλίκια έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους και το ιδανικό σχήμα αυτών για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι στρογγυλό. Η ομοιομορφία στο μέγεθος των χαλικιών εξασφαλίζει επαρκή χώρο ώστε να ρέουν τα απόβλητα και να κυκλοφορεί ο αέρας. Όταν όμως δεν έχουν ιδανικό σχήμα τα χαλίκια, ο μικρός όγκος των πόρων περιορίζει την κυκλοφορία του αέρα και αυξάνει την πιθανότητα να φράξει το σύστημα. Το βάθος των φίλτρων αυτών με την χρήση χαλικιών, λόγω του μεγάλου βάρους τους, κυμαίνεται στα 2m. Αντίθετα, τα πλαστικά υλικά πλήρωσης διαμορφώνονται έτσι ώστε να έχουν μορφή κερήθρας, (βλ. Πίνακας 1). Τα στρώματα που δημιουργούνται συνήθως έχουν μια πτυχωτή πλευρά ώστε να αναπτύσσεται επαρκώς ο υμένας και να υπάρχει ικανοποιητικός χρόνος κατακράτησης. Τοποθετούνται κατά τέτοιον τρόπο ώστε να βελτιώνεται η κατανομή των αποβλήτων και να βελτιστοποιείται η απομάκρυνση του BOD και TSS. Τα πλαστικά υλικά πλήρωσης κέρδισαν χώρο με το πέρασμα του χρόνου γιατί αποδείχτηκε πως προσφέρουν μεγάλη υδραυλική ικανότητα, υψηλή αναλογία πόρων και ανθεκτικότητα σε προβλήματα έμφραξης του συστήματος. Επίσης, το πλαστικό υλικό πλήρωσης έχει το πλεονέκτημα πως μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε

εγκατάστασης (μέγεθος, σχήμα δεξαμενών). Συγκριτικό πλεονέκτημα αποτελεί και το μειωμένο βάρος των πλαστικών πληρωτικών υλικών, σε σχέση με τα χαλίκια.

Λόγω των πλεονεκτημάτων των νέων πληρωτικών υλικών (κόστος παραγωγής, διάρκεια χρήσης και απόδοσης), η χρησιμοποίηση χαλικιών και ξύλινων πληρωτικών υλικών έχει περιοριστεί πολύ.

Υλικό πλήρωσης	Εικόνα	Ειδική Επιφάνεια (m ² /m ³)	Πορώδες (%)
Πέτρα, χαλίκι κ.α.		40-80	50-60
Cross-flow (πολυπροπυλενίου)		100-240	>97
Vertical flow (πολυπροπυλενίου)		125	>97
Fill Pac Wheel Media (Flower)		100	>95

Πίνακας 1, Τυπικά πληρωτικά υλικά εγκαταστάσεων φίλτρων προσκολλημένης βιομάζας.

Τον όγκο του πληρωτικού υλικού που απαιτεί κάθε δεξαμενή σταλακτικού φίλτρου το καθορίζει:

- το ποσοστό διαβροχής της συνολικής επιφάνειας του φίλτρου
- το οργανικό φορτίο των προς επεξεργασία αποβλήτων
- το φορτίο αμμωνίας που εμπεριέχουν τα απόβλητα
- η θερμοκρασία των αποβλήτων και
- η επιθυμητή ποιότητα εκροής των αποβλήτων

4.2.2. ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΧΑΛΙΚΟΔΙΥΛΙΣΤΗΡΙΩΝ

Αρχικά, ανάλογα με τη σύσταση των λυμάτων προς επεξεργασία, θα πρέπει να εξεταστεί εάν στόχος είναι αποκλειστικά η απομάκρυνση BOD ή και αζώτου. Ο σχεδιασμός των βιολογικών φίλτρων περιλαμβάνει:

- την επιλογή του πληρωτικού υλικού του βιολογικού φίλτρου,
- την επιλογή του συστήματος ψεκασμού των λυμάτων,
- τη διαμόρφωση του συστήματος αποστράγγισης,
- την επιλογή του συστήματος αερισμού και
- την ενδεχόμενη επανακυκλοφορία των λυμάτων

Επιλογή του πληρωτικού υλικού του χαλικοδυλιστηρίου

Τα στερεά πληρωτικά υλικά μπορεί να είναι βράχος, χαλίκι, λίθοι λάβας ή ανθρακίτη, άνθρακας αποβλήτων, κλπ. ή ειδικά κατασκευασμένα πλαστικά πληρωτικά υλικά. Τα τελευταία μπορεί να είναι κυματοειδή πλαστικά φύλλα ή κοίλοι πλαστικοί κύλινδροι με κύριο στόχο να παρέχουν μια μεγάλη επιφάνεια για τα βακτήρια να προσκολλούνται, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπουν την ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα. Σε κάθε περίπτωση, το ιδανικό υλικό πλήρωσης του φίλτρου είναι ένα υλικό που έχει μεγάλη περιοχή επιφάνειας ανά μονάδα όγκου, είναι χαμηλού κόστους, έχει υψηλή ανθεκτικότητα, και δεν είναι εύκολο να φράξει. Πληρωτικά υλικά φίλτρου με ειδική επιφάνεια μέχρι $900 \text{ m}^2/\text{m}^3$ είναι διαθέσιμα. Ωστόσο, στην επιλογή του πληρωτικού υλικού σημαντικό ρόλο παίζει η διαθεσιμότητα των υλικών αλλά και το χαμηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης. Παρ' όλα αυτά, η ειδική επιφάνεια πρέπει να είναι τουλάχιστον $30 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Μια μέση διάμετρος που συνίσταται για τους λίθους είναι 25 mm. Όμως, η τάση είναι να χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα μεγέθη.

Οι λίθοι με διάμετρο 7 cm μπορούν να αποφύγουν το λίμνασμα, αλλά περιορίζουν το εμβαδόν επιφανείας ανά μονάδα όγκου που είναι διαθέσιμο για να αναπτυχθεί βιοφίλμ. Για αυτό συνιστάται ένα άνω όριο μεγέθους περίπου 10 cm. Τα τεμάχια θα πρέπει να είναι ομοιόμορφα, έτσι ώστε το 95% των τεμαχίων να έχουν διάμετρο μεταξύ 7 και 10 cm. Τα πλαστικά υλικά πλήρωσης διαμορφώνονται έτσι ώστε να έχουν μορφή κερήθρας. Τα στρώματα που δημιουργούνται συνήθως έχουν μια πτυχωτή πλευρά ώστε να αναπτύσσεται επαρκώς ο υμένας και να υπάρχει ικανοποιητικός χρόνος κατακράτησης. Τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιώνεται η κατανομή των αποβλήτων και να βελτιστοποιείται η απομάκρυνση του BOD και TSS. Τα πλαστικά υλικά πλήρωσης κέρδισαν χώρο με το πέρασμα του χρόνου γιατί αποδείχτηκε πως προσφέρουν μεγάλη υδραυλική ικανότητα, υψηλή αναλογία πόρων και ανθεκτικότητα σε προβλήματα μπουκώματος του συστήματος. Επίσης, το πλαστικό υλικό πλήρωσης έχει το πλεονέκτημα πως απαιτεί μικρότερη επιφάνεια στήριξης για την δομή του φίλτρου και αυτό οφείλεται στην ικανότητα να χρησιμοποιεί μεγαλύτερη ταχύτητα επεξεργασίας και υψηλότερες βιολογικές κλίνες.

[U.S EPA, 2000]

Επιλογή του συστήματος ψεκασμού των λυμάτων

Προκειμένου να κατανεμηθεί ομοιόμορφα το λύμα - ανακυκλωμένο νερό στο φίλτρο χρησιμοποιείται συχνά ένας "περιστροφικός ραντιστήρα - διανομέας", ο οποίος ψεκάζει το μίγμα στην κορυφή του φίλτρου. Ο περιστροφικός διανομέας κινείται με υδραυλική αντίδραση ή με μηχανικά μέσα. Ο διανομέας αποτελείται από μια κατακόρυφη στήλη στο κέντρο της δεξαμενής και φέρει ακτινωτά δύο ή περισσότερους βραχίονες μερικά εκατοστά πάνω από το υλικό πλήρωσης του φίλτρου. Οι βραχίονες φέρουν κατά το μήκος αριθμό ακροφυσίων ή στομιών για την εκκένωση των υγρών αποβλήτων πάνω στη κλίνη. Η ταχύτητα περιστροφής μπορεί

να ρυθμίζεται ανάλογα. Η αλλαγή της ταχύτητας είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε συστήματα που έχουν υψηλό οργανικό φορτίο. Σε πύργους νιτροποίησης, η αλλαγή της ταχύτητας χρησιμεύει επίσης για να ξεπλένονται και διάφορα ζώδια, όπως σαλιγκάρια.

Διαμόρφωση του συστήματος αποστράγγισης

Τα στερεά υλικά πλήρωσης είναι τοποθετημένα πάνω σε διάτρητη πλάκα. Η τοποθέτηση αυτή εξασφαλίζει την αποστράγγιση των υγρών αποβλήτων. Το σύστημα αποστράγγισης που εφαρμόζεται στα σταλακτικά φίλτρα εξυπηρετεί δύο σκοπούς:

- μεταφέρει τα υγρά απόβλητα που διέρχονται του φίλτρου προς την τελική διεργασία διαύγασης.
- βοηθάει στην κυκλοφορία αέρα ανάμεσα στα διάκενα του πληρωτικού υλικού, ώστε να διατηρούνται αερόβιες συνθήκες.

Επιλογή του συστήματος αερισμού

Η κατασκευή των χαλικοδιηλυστηρίων είναι τέτοια ώστε το υλικό πλήρωσης στηρίζεται σε διάτρητες πλάκες που εδράζονται στην πλάκα σκυροδέματος που αποτελεί και τη βάση της δεξαμενής. Η ανωτέρω διάταξη έχει σαν αποτέλεσμα ο αέρας να κινείται ελεύθερα μέσα από σχισμές των διάτρητων πλακών στήριξης. Ο αέρας κινείται προς τα πάνω το καλοκαίρι (αέρας θερμότερος από τα λύματα) ή προς τα κάτω τον χειμώνα (αέρας ψυχρότερος από τα υγρά απόβλητα), παρέχοντας οξυγόνο στα βακτήρια σε όλο το ύψος του πύργου.

Επανακυκλοφορία των λυμάτων

Τάφρος στο κάτω μέρος της δεξαμενής του χαλικοδιυληστηρίου συλλέγει τα επεξεργασμένα λύματα και τα οδηγεί σε μια δεξαμενή από την οποία, είτε οδηγούνται προς ανακύκλωση, είτε απορρίπτονται σε ένα δευτερεύοντα διαχωριστή.

Τα σταλακτικά φίλτρα έχουν σχεδιαστεί κατά κύριο λόγο για την απομάκρυνση του BOD. Οι αποδόσεις εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων, την υδραυλική και οργανική φόρτιση, το τύπο του πληρωτικού μέσου, τη διατήρηση των βέλτιστων επιπέδων διαλυμένου οξυγόνου, και τα ποσοστά ανακυκλοφορίας. Μια μείωση BOD από 60 έως 85% μπορεί να αναμένεται με ρυθμό φόρτισης του 1 kg BOD/m³/day. Η μείωση των βακτηρίων έχει αναφερθεί να είναι 1 - 2 logs των κοπρανωδών κολοβακτηριδίων, αντίστοιχα, 60 έως 90 % των ολικών κολοβακτηριδίων. Η φυσική προσρόφηση των ιών στο βιοφίλμ ή η μείωση με το χρόνο είναι επιπλέον παράγοντες για την εξάλειψη των παθογόνων στα σταλακτικά φίλτρα. **[Health Research Inc., 2004], [Health Education Services Division, 2004]**

Λόγω του μικρού χρόνου επαφής μεταξύ αποβλήτων και βιοφίλμ, ο οποίος αντιστοιχεί στον χρόνο ροής των αποβλήτων δια μέσο της κλίνης, δεν ευνοείται η αφομοίωση σωματιδιακού BOD (δηλαδή η απομάκρυνση των TSS). Για αυτό τον λόγο επιλέχθηκε η απομάκρυνση των TSS με κροκίδωση-συσσωμάτωση-καθίζηση, πριν αυτά εισέλθουν στο βιοφίλτρο. Επειδή τα αερόβια νιτροποιητικά βακτήρια μετατρέπουν την αμμωνία σε νιτρικά, μερική νιτροποίηση μπορεί επίσης να επιτευχθεί, ανάλογα με τον ρυθμό οργανικής φόρτισης στο φίλτρο, την θερμοκρασία και τον αερισμό. Η συνολική απομάκρυνση του αζώτου κυμαίνεται από 0 έως 35%. Η απομάκρυνση του φωσφόρου κυμαίνεται από 10 έως 15%. Ωστόσο, η ικανότητα για την απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών στα σταλακτικά φίλτρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λειτουργίας.

Με τη πάροδο του χρόνου, η ανάπτυξη και η αναπαραγωγή των μικροοργανισμών οδηγεί σε αύξηση του πάχους του στρώματος του βιοφίλμ, ιδίως στην κορυφή του σταλακτικού φίλτρου. Αν το βιοφίλμ αυξάνεται σε πάχος, το οξυγόνο εμποδίζεται να εισέλθει στο φίλτρο και να διαχυθεί σε βάθος εντός του βιοφίλμ, με συνέπεια να αναπτύσσονται αναερόβιοι οργανισμοί. Η συνεχής ανάπτυξη του βιοφίλμ, τα απόβλητα των μεταβολικών προϊόντων των αναερόβιων βακτηρίων, καθώς και η διατήρηση της υδραυλικής φόρτισης στο φίλτρο, τελικά οδηγούν στο γεγονός οι μικροοργανισμοί κοντά στην διεπιφάνεια του πληρωτικού υλικού-βιοφίλμ, να χάνουν την ικανότητά τους να προσκολλούνται στο πληρωτικό υλικό, και αποκολλώνται με την μορφή μεγάλων μεμβρανών.

Οι μικροοργανισμοί αποκολλούνται από το υλικό πλήρωσης και μεταφέρονται στην εκροή. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως αποκόλληση (sloughing). Το σύστημα αποστράγγισης επιτρέπει τη μεταφορά αυτών των στερεών σε μία δεξαμενή καθίζησης, όπου τα στερεά καθιζάνουν και διαχωρίζονται από τα επεξεργασμένα λύματα. Για να κρατηθεί η εσχαροποίηση στον ελάχιστο βαθμό, η οργανική και η υδραυλική φόρτιση στα φίλτρα πρέπει να εγγυώνται μια ισορροπία μεταξύ της ανάπτυξης του βιοφίλμ και της ποσότητας που αποκολλάται από το βιοφίλμ. Τα σταλακτικά φίλτρα μπορούν να συνδυαστούν σε αποκεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας λυμάτων (π.χ. ακολουθούμενα μετά από σηπτικές δεξαμενές ή αναερόβιους baffled αντιδραστήρες). Τα σταλακτικά φίλτρα είναι δυνατόν να αποτελούν μέρος μεγάλων κεντρικών εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (π.χ. ακολουθούμενα από επεξεργασία ενεργής ιλύος). Μετά την επεξεργασία, το νερό μεταφέρεται συνήθως σε έναν τελικό διαυγαστή. Στη συνέχεια το νερό απορρίπτεται σε επιφανειακά ύδατα, διηθείται σε υπόγεια ύδατα ή χρησιμοποιείται για άρδευση.

Μολονότι τα σταλακτικά φίλτρα είναι πιο εύκολα στην λειτουργία και καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια από τις διεργασίες ενεργούς ιλύος, έχουν

χαμηλότερη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης στερεών και οργανικής ύλης, είναι πιο ευαίσθητα σε χαμηλές θερμοκρασίες αέρα, και μπορεί να λειτουργήσουν ως εστίες προσέλκυσης εντόμων (μύγες, κουνούπια). [Health Research Inc., 2004], [Health Education Services Division, 2004]

Ο σχεδιασμός των σταλακτικών φίλτρων μέχρι σήμερα γίνεται με βάση διάφορα εμπειρικά και ημιεμπειρικά μοντέλα.

Το 1946 δημοσιεύτηκαν οι εξισώσεις από το **NRC (National Research Council of USA)**. Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν την λειτουργία του χαλικοδιυλιστηρίου. Είναι καθαρά εμπειρικές σχέσεις, οι οποίες αναφέρονται στην απομάκρυνση του BOD και προέρχονται από παρατηρήσεις και μελέτες στρατιωτικών εγκαταστάσεων κατά τη διάρκεια του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου. Για ένα μόνο φίλτρο ισχύει η ακόλουθη Εξίσωση 4.1:

$$E_1 = \frac{100}{1 + 0,0561 \sqrt{\frac{W}{VF}}} \quad \text{Εξίσωση 4.1}$$

Όπου:

E_1 = ποσοστιαία απόδοση της απομάκρυνσης BOD στους 20° ° C, συμπεριλαμβανομένων ανακυκλοφορίας και καθίζησης.

W = φόρτιση BOD στο φίλτρο (lb/day)

V = όγκος του πληρωτικού υλικού (10^3 ft^3)

F = παράγοντας ανακυκλοφορίας

Ο παράγοντας ανακυκλοφορίας υπολογίζεται από την ακόλουθη Εξίσωση 4.2 :

$$F = \frac{1 + R}{\left(1 + \frac{R}{10}\right)^2} \quad \text{Εξίσωση 4.2}$$

Όπου:

R = λόγος ανακυκλοφορίας (Q_r/Q)

Q_r = παροχή ανακυκλοφορίας

Q = παροχή αποβλήτων

Εάν υπάρχουν δυο φίλτρα σε σειρά, η Εξίσωση 4.3 περιγράφει τη λειτουργία του δεύτερου φίλτρου.

$$E_2 = \frac{100}{1 + \frac{0,0561}{1 - E_1} \sqrt{\frac{W'}{VF}}} \quad \text{Εξίσωση 4.3}$$

Όπου:

E_2 = ποσοστιαία απόδοση της απομάκρυνσης BOD στο δεύτερο φίλτρο στους 20°C, συμπεριλαμβανομένων ανακυκλοφορίας και καθίζησης.

E_1 = κλάσμα απομάκρυνσης του BOD στο πρώτο φίλτρο

W' = φόρτιση BOD στο δεύτερο φίλτρο (lb/day)

[«Design of Municipal Wastewater Treatment Plants», 2010]

Μια άλλη εμπειρική έκφραση είναι η σχέση του **Eckenfelder (1963)**, βλ. Εξίσωση 4.4:

$$\frac{S_e}{S_i} = \exp[-KS_a^m D(Q_v)^{-n}] \quad \text{Εξίσωση 4.4}$$

Όπου:

S_e = συγκέντρωση εξόδου (mg/l)

S_i = συγκέντρωση εισόδου (mg/l)

K = σταθερά αντίδρασης, από πειράματα πιλοτικής κλίμακας (ft/d)

D = βάθος φίλτρου (ft)

S_a = ειδική επιφάνεια του φίλτρου (ft²/ft³)

Q_v = ογκομετρική παροχή στο φίλτρο ανά μονάδα επιφάνειας (ft³/ft²d)

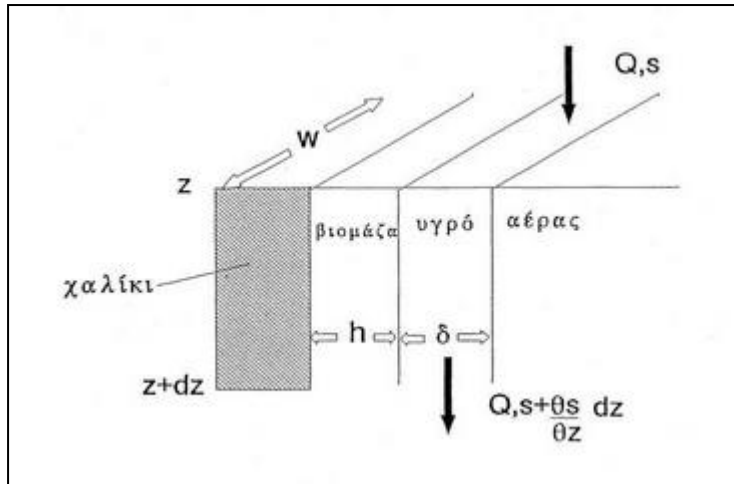
Q = ογκομετρική παροχή (ft³/d)

A = επιφάνεια διατομής του φίλτρου (ft²)

m, n = εμπειρικές σταθερές

Η Εξίσωση 4.4 συσχετίζει τις συγκεντρώσεις εισόδου (S_i) και εξόδου (S_e) στο φίλτρο με λειτουργικά (Q, Q_v) και γεωμετρικά μεγέθη (A, D, S_a), καθώς και με εμπειρικές σταθερές (K, m, n) που ισχύουν όμως για το συγκεκριμένο φίλτρο από το οποίο προήλθαν.

Κλασσικό μοντέλο για το σχεδιασμό των χαλικοδιυλιστηρίων θεωρείται το μοντέλο του **Atkinson**. Το μοντέλο αυτό ξεκινώντας από ισοζύγια μάζας καταλήγει σε μια ημιεμπειρική έκφραση, ανάλογη του **Eckenfelder**. Το σύστημα που θεωρήθηκε δίνεται παρακάτω, (βλ. Εικόνα 13).



Εικόνα 13, Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου Atkinson.

Με βάση ένα ισοζύγιο μάζας για το θρεπτικό συστατικό στην υγρή φάση προκύπτει η Εξίσωση 4.5

$$\frac{\partial S}{\partial t} dV = QS - Q \left(S + \frac{\partial S}{\partial z} dz \right) + dzwr_s \quad \text{Εξίσωση 4.5}$$

Ο ρυθμός μεταφοράς θρεπτικού συστατικού (r_s) από την υγρή φάση στο βιολογικό στρώμα υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.6

$$r_s = -\frac{f h k_o S^2}{K_m + S} \quad \text{Εξίσωση 4.6}$$

Όπου

f = αναλογικός παράγοντας

h = πάχος του βιολογικού στρώματος (ft)

k_o = μέγιστος ρυθμός αντίδρασης (d^{-1})

K_m = σταθερά κορεσμού (mg/l)

Η τελική μορφή που καταλήγει το μοντέλο είναι η Εξίσωση 4.7 :

$$S_e = S_i \exp\left(-\frac{f h k_o w D}{Q}\right) \quad \text{Εξίσωση 4.7}$$

Όπου w το πλάτος της θεωρούμενης τομής (ft).

Η εξίσωση αυτή συσχετίζει τη συγκέντρωση εξόδου (S_e) με τη συγκέντρωση εισόδου (S_i). Περιλαμβάνει μια εμπειρική σταθερά (f), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (D , h , w) του φίλτρου και την ογκομετρική παροχή (Q) στο φίλτρο. [**«Design of Municipal Wastewater Treatment Plants», 2010**]

Μια δεκαετία αργότερα οι **Vaughan & Holder** (1984) παρουσίασαν ένα πιο λεπτομερές μοντέλο. Θεώρησαν στρωτή ροή του υγρού ρεύματος πάνω από το βιολογικό στρώμα που έχει αναπτυχθεί σε επίπεδη κεκλιμένη πλάκα και χρησιμοποίησαν την εξίσωση συνέχειας για να περιγράψουν τη μεταφορά του θρεπτικού συστατικού μέσα στην υγρή φάση. Στη συνέχεια εξετάζοντας το σύστημα στη μόνιμη κατάσταση, υποθέτοντας ότι δε γίνεται αντίδραση στο υγρό ρεύμα και χρησιμοποιώντας τη συμμετρία του συστήματος, κατέληξαν στην ακόλουθη Εξίσωση 4.8:

$$v_{z,max} \left| 1 - \left(\frac{x}{\delta}\right)^2 \right| \frac{\partial C S_l}{\partial z} = D_{Sl} \frac{\partial^2 C S_l}{\partial x^2} \quad \text{Εξίσωση 4.8}$$

Όπου:

x = διεύθυνση κάθετη ως προς την επιφάνεια του χαλικιού ($x = 0$ στη διεπιφάνεια υγρού ρεύματος – αέρα)

z = διεύθυνση παράλληλη ως προς την επιφάνεια του χαλικιού

$v_{z,max}$ = μέγιστη ταχύτητα του υγρού ως προς την z διεύθυνση

δ = μέσο πάχος του υγρού ρεύματος

CS_l = συγκέντρωση υποστρώματος στο υγρό ρεύμα

D_{sl} = συντελεστής διάχυσης του υποστρώματος στην υγρή φάση

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

1. η συγκέντρωση του υποστρώματος στο υγρό ρεύμα στην είσοδο της πλάκας ισούται με την συγκέντρωση τροφοδοσίας (CS_0), βλ. Εξίσωση 4.9:

$$CS_l(x, 0) = CS_0$$

Εξίσωση 4.9

2. ισχύει ότι η συγκέντρωση του υποστρώματος στη διεπιφάνεια υγρού ρεύματος – αέρα δε μεταβάλλεται, βλ. Εξίσωση 4.10:

$$\left. \frac{\partial CS_l}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

Εξίσωση
4.10

3. η μεταβολή της συγκέντρωσης του υποστρώματος στη διεπιφάνεια υγρό ρεύμα – βιολογικό στρώμα εκφράζεται από την ακόλουθη Εξίσωση 4.11

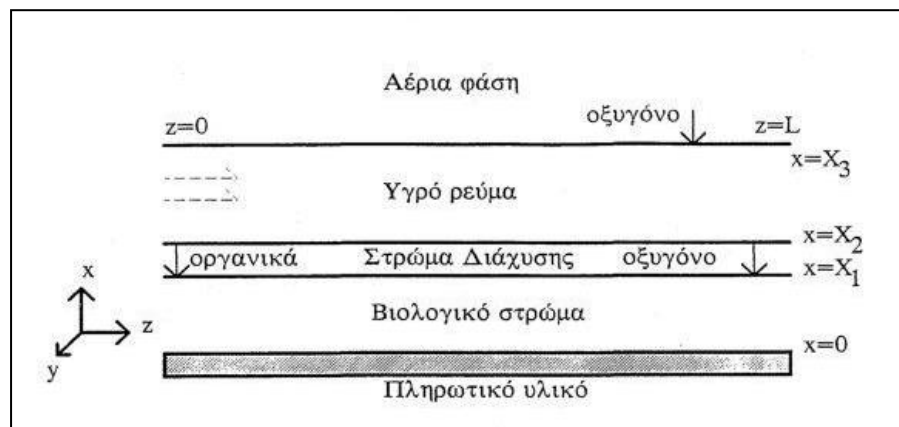
$$\left. \frac{\partial CS_l}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \frac{\sqrt{2RD_{ss}}}{D_{sl}} (CS_l|_{x=\delta})^{0.5}$$

Εξίσωση
4.11

Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει από ένα ισοζύγιο μάζας για το υπόστρωμα μέσα στο βιολογικό στρώμα σε μόνιμη κατάσταση. Για να επιλυθεί η διαφορική Εξίσωση 4.8 με τις οριακές συνθήκες 4.9, 4.10, 4.11, γίνεται αδιαστατοποίηση και στη συνέχεια αριθμητική ολοκλήρωση. Το μοντέλο αυτό δεν είναι γενικά εύκολο στη

χρήση του, ενώ δε λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή του πάχους του βιολογικού στρώματος. [Hicks, 2007]

Το 1984 οι **Benefield & Molz** ανέπτυξαν ένα πραγματικά εξελιγμένο μαθηματικό μοντέλο, το οποίο περιέγραφε την ανάπτυξη του βιολογικού στρώματος και την απομάκρυνση του BOD, πάνω σε μια επίπεδη πλάκα, καθώς και τη μεταβολή της πυκνότητας των κυττάρων μέσα στο βιολογικό στρώμα. Το σύστημα που θεώρησαν δίνεται στο παρακάτω σχήμα, (βλ. Εικόνα 14)



Εικόνα 14, Αναπαράσταση της ροής πάνω από μια επίπεδη πλάκα στην οποία αναπτύσσεται βιολογικό στρώμα

Οι **Benefield & Molz (1984)** θεώρησαν ότι ανάμεσα στο βιολογικό στρώμα και στο υγρό ρεύμα υπάρχει ένα λεπτό στρώμα διάχυσης, στο οποίο γίνεται η μεταφορά μάζας από το υγρό ρεύμα στο βιολογικό στρώμα. Μια άλλη βασική παραδοχή ήταν ότι η πυκνότητα της βιομάζας παραμένει σταθερή και ότι το πάχος του βιολογικού στρώματος αυξάνει προς τα έξω καθώς αναπτύσσεται η βιομάζα. Το μοντέλο αναπτύχθηκε με βάση ισοζύγια μάζας που έγιναν τόσο για τα οργανικά όσο και για το οξυγόνο στο βιολογικό στρώμα και στο υγρό ρεύμα. Έτσι για το υγρό ρεύμα ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις, βλ. Εξίσωση 4.12, Εξίσωση 4.13:

$$\frac{\partial CS_B}{\partial t} = -V_Z \frac{\partial CS_B}{\partial Z} - \frac{D_{SL}}{(X_3 - X_2)} \frac{CS_B - CS_F(X_1)}{(X_2 - X_1)} \quad \text{Εξίσωση 4.12}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial CO_B}{\partial t} = & \frac{K_{OL}}{(X_3 - X_2)} (CO_{SAT} - CO_B) - V_Z \frac{\partial CO_B}{\partial Z} \\ & - \frac{D_{OL}}{(X_3 - X_2)} \frac{CO_B - CO_F(X_1)}{(X_2 - X_1)} \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 4.13}$$

Όπου τα γράμματα (S) και (O) (κεφάλαια ή δείκτες) υποδηλώνουν τα οργανικά και το οξυγόνο αντίστοιχα, ενώ οι δείκτες (B) και (L) υποδηλώνουν το υγρό ρεύμα και ο δείκτης (F) υποδηλώνει το βιολογικό στρώμα. V_Z είναι η μέση ταχύτητα του υγρού στη Z – κατεύθυνση, K_{OL} είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας για το οξυγόνο στο υγρό ρεύμα και CO_{SAT} είναι η συγκέντρωση κορεσμού του οξυγόνου. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται για τις παραπάνω εξισώσεις είναι οι ακόλουθες, βλ. Εξίσωση 4.14, Εξίσωση 4.15:

$$Z = 0 : \quad CS_B = CS_o, \quad CO_B = CO_o \quad \text{Εξίσωση 4.14}$$

$$Z = L : \quad \frac{\partial CS_B}{\partial Z} = \frac{\partial CO_B}{\partial Z} \quad \text{Εξίσωση 4.15}$$

Όπου CS_o και CO_o , οι συγκεντρώσεις των οργανικών και του οξυγόνου αντίστοιχα, στην είσοδο. Επίσης για χρόνο μηδέν υπάρχουν στο υγρό ρεύμα οι συγκεντρώσεις CS_B και CO_B .

Τα ισοζύγια μάζας για τα οργανικά και το οξυγόνο, μέσα στο βιολογικό στρώμα, υποθέτοντας συνθήκες ψευδομόνιμης κατάστασης δίνουν τις εξισώσεις Εξίσωση 4.17 Εξίσωση 4.16 και Εξίσωση 4.17

$$\frac{d^2 CO_F}{dX^2} = \frac{1}{D_{SF}} \frac{\mu_{max} \rho}{Y} \left(\frac{CS_F}{K_S + CS_F} \right) \left(\frac{CO_F}{K_O + CO_F} \right) \quad \text{Εξίσωση 4.16}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 CO_F}{dX^2} = \frac{1}{D_{OF}} \frac{\gamma \mu_{max} \rho}{Y} \left(\frac{CS_F}{K_S + CS_F} \right) \left(\frac{CO_F}{K_O + CO_F} \right) \\ + \alpha \rho K_d \left(\frac{CO_F}{K_O + CO_F} \right) \end{aligned} \quad \text{Εξίσωση 4.17}$$

Όπου K_S και K_O , σταθερές κορεσμού των οργανικών και αμμωνίας, μ_{max} , ειδικός ρυθμός ανάπτυξης βακτηριδίων, Y , συντελεστής απόδοσης, K_d , σταθερά αποδόμησης βακτηριδίων, γ , συντελεστής χρήσης οξυγόνου για σύνθεση βιομάζας, α , συντελεστής χρήσης οξυγόνου για παραγωγή ενέργειας για συντήρηση των βακτηριδίων, ρ , πυκνότητα των κυττάρων.

Οι οριακές συνθήκες για τις δυο προηγούμενες σχέσεις είναι οι ακόλουθες, βλ. Εξίσωση 4.18, Εξίσωση 4.19, και Εξίσωση 4.20:

$$X = 0 : \frac{dCS_F}{dX} = \frac{dCO_F}{dX} \quad \text{Εξίσωση 4.18}$$

$$\left. \frac{dCS_F}{dX} \right|_{X=X_1} = \frac{D_{SL}}{D_{SF}} \frac{CS_B - CS_F(X_1)}{X_2 - X_1} \quad \text{Εξίσωση 4.19}$$

$$\left. \frac{dCO_F}{dX} \right|_{X=X_1} = \frac{D_{OL}}{D_{OF}} \frac{CO_B - CO_F(X_1)}{X_2 - X_1} \quad \text{Εξίσωση 4.20}$$

Η επόμενη σχέση αποτελεί ένα ισοζύγιο μάζας για τη βιομάζα, σε ένα στοιχειώδη όγκο ελέγχου μέσα στο βιολογικό στρώμα, βλ. Εξίσωση 4.21 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \mu_{max} \rho \left(\frac{CS_F}{K_S + CS_F} \right) \left(\frac{CO_F}{K_O + CO_F} \right) - \rho K_d \quad \text{Εξίσωση 4.21}$$

Όπως αναφέρθηκε μια βασική παραδοχή του μοντέλου είναι ότι η πυκνότητα της βιομάζας παραμένει σταθερή και ότι το πάχος του βιολογικού στρώματος αυξάνει προς τα έξω καθώς αναπτύσσεται η βιομάζα. Η παραπάνω παραδοχή οδηγεί στην ακόλουθη Εξίσωση 4.22:

$$\Delta L = \Delta x \left(\frac{\Delta \rho + \rho}{\rho} \right) - \Delta x \quad \text{Εξίσωση 4.22}$$

Τέλος προκειμένου να επιλυθεί το σύστημα των εξισώσεων Εξίσωση 4.12 έως και Εξίσωση 4.22, οι **Benefield & Molz** (1984) χρησιμοποίησαν αριθμητικές μεθόδους πεπερασμένων διαφορών. Το μοντέλο αυτό αποτελεί ίσως την καλύτερη, έως τώρα, προσπάθεια μοντελοποίησης της ανάπτυξης βιολογικού στρώματος πάνω σε επιφάνεια και της απομάκρυνσης του BOD. [**Hicks, 2007**]

Στη συνέχεια οι **Gujer & Boller** (1986) παρουσίασαν το δικό τους μοντέλο για σχεδιασμό χαλικοδιυλιστηρίων. Το μοντέλο βασίστηκε σε ένα ισοζύγιο μάζας για το υπόστρωμα, μέσα στο βιολογικό στρώμα, βλ. Εξίσωση 4.23:

$$\frac{\partial CS(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial j(x, t)}{\partial x} + r_v(CS)$$

Εξίσωση
4.23

Όπου,

j = μοριακή διάχυση υποστρώματος

r_v = ρυθμός παραγωγής υποστρώματος ανά μονάδα όγκου

Στη συνέχεια, αν και υποτέθηκε μόνιμη κατάσταση, χρησιμοποιήθηκαν καθαρά εμπειρικές εκφράσεις ("line fit"), για την περιγραφή των ρυθμών μεταφοράς αμμωνίας και οξυγόνου από την υγρή φάση στο βιολογικό στρώμα. Έτσι όπως αναφέρουν οι ίδιοι οι **Gujer & Boller**, "για κάθε διαδικασία σχεδιασμού απαιτείται εμπειρία πιλοτικής κλίμακας". Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο μοντέλο αναφέρεται σε χαλικοδιυλιστήριο και όχι σε επίπεδα πλάκα. [Hicks, 2007]

Οι **Logan et al.** (1987) παρουσίασαν ένα δυναμικό μοντέλο για το σχεδιασμό των χαλικοδιυλιστηρίων. Η ανάπτυξη του μοντέλου βασίζεται σε ένα σύστημα πανομοιότυπο με αυτό των **Vaughan & Holder** (κεκλιμένη επίπεδη πλάκα). Το ισοζύγιο μάζας για το υπόστρωμα, στην υγρή φάση έχει ως εξής, βλ. Εξίσωση 4.24:

$$\frac{\partial CS_1}{\partial t} = D_{sl} \frac{\partial^2 CS_1}{\partial x^2} - v(x) \frac{\partial CS_1}{\partial z}$$

Εξίσωση
4.24

Ενώ οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται είναι:

1. η συγκέντρωση του υποστρώματος στο υγρό ρεύμα στην είσοδο της πλάκας ισούται με τη συγκέντρωση τροφοδοσίας (CS_0), βλ. Εξίσωση 4.25:

$$z = 0 \quad CS_1 = CS_0$$

Εξίσωση
4.25

2. στη διεπιφάνεια αέρα – υγρού ρεύματος η συγκέντρωση του οξυγόνου (C) ισούται με τη συγκέντρωση κορεσμού (C^*) και δε μεταβάλλεται η συγκέντρωση του υποστρώματος, βλ. Εξίσωση 4.26, Εξίσωση 4.27:

$$x = 0 \text{ οξυγόνο: } C = C^*$$

Εξίσωση
4.26

$$BOD: \frac{\partial CS_1}{\partial x} = 0$$

Εξίσωση
4.27

3. στη διεπιφάνεια υγρό ρεύμα – βιολογικό στρώμα ισχύει η ακόλουθη σχέση, βλ. Εξίσωση 4.28:

$$x = \delta \quad D_{S1} \frac{dCS_1}{dx} = CS_s D_{Ss} \left(\frac{3E_B(1-\varepsilon)}{a_c^2} \right)^{0.5}$$

Εξίσωση
4.28

Το δεύτερο μέρος της Εξίσωσης 4.28 προέρχεται από ισοζύγιο μάζας για τη συγκέντρωση του υποστρώματος μέσα στο βιολογικό στρώμα (CS_s), σε μόνιμη όμως κατάσταση. E_B ο συντελεστής απόδοσης των συγκρούσεων Brown των μορίων του υποστρώματος με τα κύτταρα (η τιμή του υπολογίζεται από τη βαθμονόμηση του μοντέλου), ε είναι το πορώδες του βιολογικού στρώματος και a_c είναι η ακτίνα ενός σφαιρικού κυττάρου συμπεριλαμβανομένου και του βιολογικού στρώματος. Το

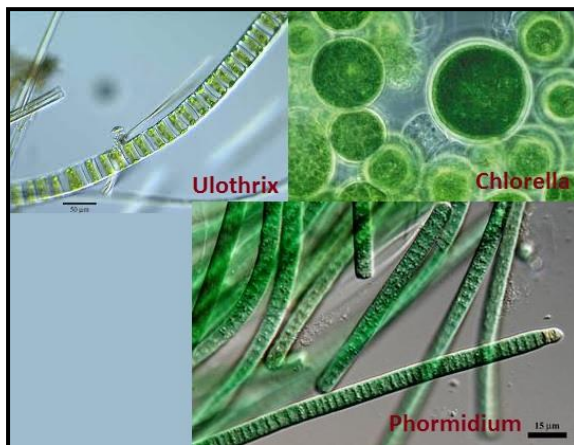
παραπάνω σύστημα των εξισώσεων λύνεται με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Το μοντέλο αυτό, όπως και το μοντέλο των **Vaughan and Holder** δεν περιγράφει την ανάπτυξη του βιολογικού στρώματος, αλλά ούτε και το προφίλ των συγκεντρώσεων μέσα στο βιολογικό στρώμα. Επιπλέον η απαίτηση για υπολογισμό των παραμέτρων E_B , ϵ και α_c , περιορίζουν αυστηρά τη χρήση του. [**«Design of Municipal Wastewater Treatment Plants», 2010**]

Τα πρώτα μοντέλα σχεδιασμού των σταλακτικών φίλτρων αναπτύχθηκαν για να αντιμετωπίσουν ανάγκες της εποχής εκείνης. Στηρίχτηκαν σε εμπειρικά και ημιεμπειρικά μοντέλα. Τα φίλτρα αυτά δεν βασίστηκαν σε μελέτες ή έρευνες αλλά αντίθετα σε εμπειρικές αρχές σχεδιασμού. Τα μοντέλα αυτά όμως βρίσκουν εφαρμογή μόνο στις διεργασίες από τις οποίες άντλησαν τα κινητικά τους δεδομένα. Έτσι για το σχεδιασμό ενός νέου σταλακτικού φίλτρου απαιτείται κάθε φορά πειραματικός προσδιορισμός των εμπειρικών παραμέτρων που χρησιμοποιούν.

Με τη πάροδο του χρόνου έρευνες - μελέτες βελτίωσαν τις είδη εγκατεστημένες μονάδες των σταλακτικών φίλτρων. Οι έρευνες αυτές άρχισαν να στηρίζονται σε μαθηματικά μοντέλα. Υπάρχουν περιπτώσεις ερευνητών όπου ανέπτυξαν περισσότερο εξελιγμένα, αυστηρά και λεπτομερή μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά όμως είτε δεν αποφεύγουν τη χρήση κάποιων εμπειρικών εκφράσεων, είτε δεν λαμβάνουν υπόψη τους το φαινόμενο της αποκόλλησης της βιομάζας, είτε τέλος δεν προβλέπουν τη μεταβολή της συγκέντρωσης των θρεπτικών συστατικών και του πάχους του βιολογικού στρώματος κατά βάθος στο φίλτρο.

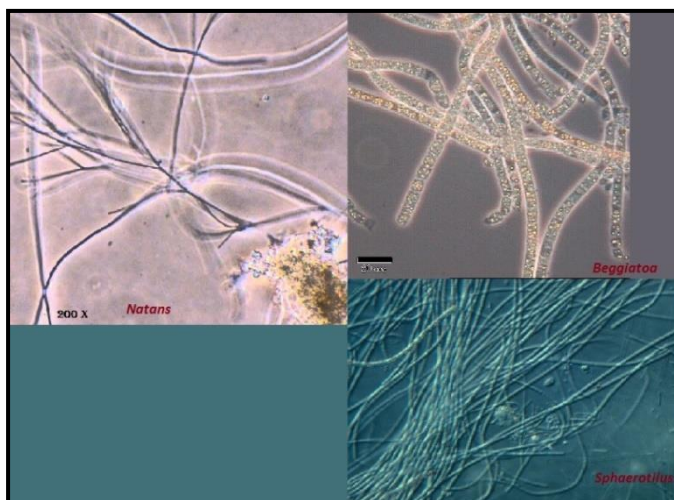
4.2.3. ΕΙΔΗ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΜΕΝΩΝ ΜΙΚΡΟΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ ΣΤΑ ΣΤΑΛΑΚΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

Στα ανώτερα στρώματα, όπου ο φωτισμός είναι αρκετός για την επίτευξη της φωτοσύνθεσης, κυριαρχούν φύκια των γενών *Phormidium*, *Chlorella* και *Ulothrix*, (βλ. Εικόνα 15) Κατά περιόδους, η ανάπτυξή τους μπορεί να είναι τόσο εκτεταμένη, ώστε να διαταράσσεται η ομαλή λειτουργία του φίλτρου.



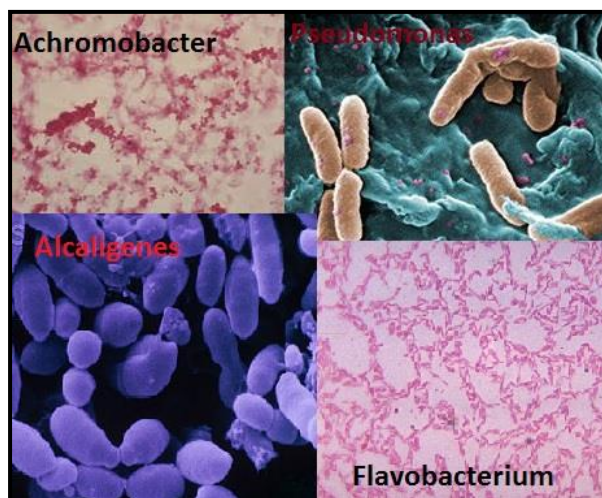
Εικόνα 15, Φύκια των γενών *Ulothrix*, *Chlorella* και *Phormidium*

Όπως και στην περίπτωση της ενεργού ιλύος, αναπτύσσεται ένα φιλμ εξαιτίας της παρουσίας ινώδων βακτηρίων (*Sphaerotilus*, *natans* και *Beggiatoa*), (βλ. Εικόνα 16)



Εικόνα 16, Ινώδη βακτήρια *natans*, *Beggiatoa*, και *Sphaerotilus*

Άλλα γένη βακτηρίων που οξειδώνουν την οργανική ύλη είναι τα *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Achromobacter* και *Alcaligenes*. (βλ. Εικόνα 17)



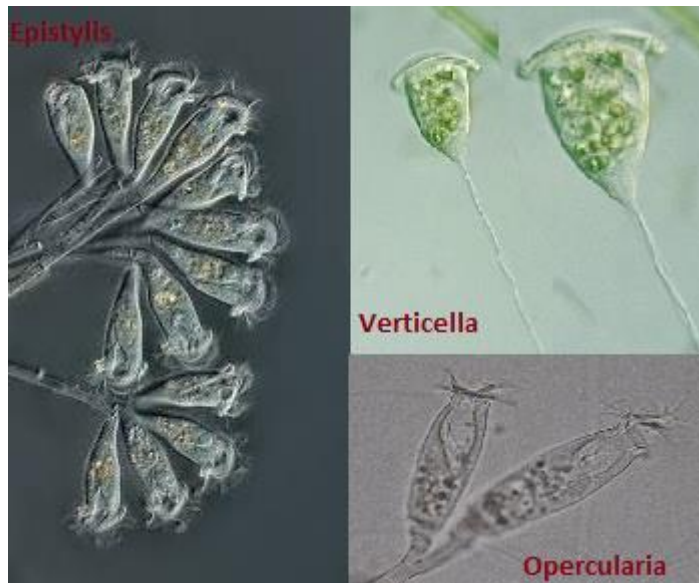
Εικόνα 17, Οξειδωτικά βακτήρια *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Achromobacter* και *Alcaligenes*.

Στο χαμηλότερο επίπεδο νιτροποίησης κυριαρχούν οργανισμοί όπως: *Nitrobacter* και *Nitrosomonas*. (βλ. εικόνα 18).



Εικόνα 18, Νιτροποιητικά βακτήρια *Nitrobacter* και *Nitrosomonas*.

Πολλά είδη μυκήτων και πρωτόζων εμφανίζονται σε όλο το φίλτρο και ο αριθμός τους επηρεάζεται από τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου και θρεπτικών ουσιών. Μεταξύ των πρωτόζων κυριαρχεί η ομάδα ciliate, η οποία περιλαμβάνει τα *Opercularia*, *Epistylis* και *Verticella*, (βλ. Εικόνα 18).



Εικόνα 19, Ομάδα πρωτόζων ciliate (*Opercularia*, *Epistylis*, *Verticella*)

Άλλες μορφές πρωτόζων είναι τα *Amoeba*, *Euglena*, *Persanema*, *Trepomonas*, *Paramecium* και *Stenor*.

Στα βιόφιλτρα προσκολλημένης βιομάζας παρατηρείται η ανάπτυξη ενός είδους μικρής μύγας (*Psychoda*), (βλ. Εικόνα 20), η οποία αναπαράγεται με γρήγορους ρυθμούς αν δεν παρθούν τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης. Επίσης, αναπτύσσεται και ένα είδος σαλιγκαριού το *Physa gyrina*, (βλ. Εικόνα 20). Η απομάκρυνση των *Physa gyrina* επιτυγχάνεται με μείωση του pH των λυμάτων σε 10, καθώς το όξινο περιβάλλον ($pH = 10$) είναι τοξικό για τα σαλιγκάρια.



Εικόνα 20, Μύγα *Psychoda*, και σαλιγκάρι *Physa gyrina* [Michigan State University, Conchology]

4.2.4. ΡΥΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Ο ρυθμός φορτίσεως μιας βιολογικής κλίνης είναι η ποσότητα των λυμάτων που μπορεί να διοχετευθεί στη βιολογική κλίνη ως προς τη μονάδα του χρόνου. [Metcalf & Eddy, 2003]. Από την δεκαετία του 1960 και μετά υποστήριξαν πολλοί πως η μειωμένη ταχύτητα περιστροφής του διανομέα (ψεκαστήρα) δίνει καλύτερη απόδοση του φίλτρου έναντι της τυπικής ταχύτερης περιστροφής η οποία ήταν 0.5 έως 2 λεπτά της ώρας. Όταν ο υψηλός ρυθμός φορτίσεως διατηρείται για τον έλεγχο του πάχους της μικροβιολογικής στοιβάδας η αποτελεσματικότητα του φίλτρου μπορεί να μειωθεί επειδή η διάρκεια επαφής των αποβλήτων με το φίλτρο είναι μικρότερη. Καθημερινά όμως πραγματοποιείται μια διαλείπουσα υψηλή φόρτιση, φόρτιση έκπλυσης, για να ελέγχεται το πάχος της στοιβάδας και για να γίνεται καταγραφή των στερεών. Έτσι χρειάζεται συνδυασμός και ευελιξία στον σχεδιασμό του διανομέα σχετικά με την υψηλού και χαμηλού ρυθμού φόρτιση ώστε να βελτιστοποιείται η απόδοση του φίλτρου. Η βελτιστοποίηση του ρυθμού φορτίσεως, και του ρυθμού έκπλυσης απαιτεί τη συστηματική παρακολούθηση της βιολογικής διαδικασίας του φίλτρου με

επιτόπιο έλεγχο. Η ευελιξία στον σχεδιασμό του διανομέα είναι απαραίτητη για την βελτιστοποίηση της απόδοσης. Η ταχύτητα περιστροφής περιγράφεται από τον ακόλουθο τύπο. **[Albertson, 1989]:**

$$n = \frac{(1 + R)(q)(10^3 \text{ mm/m})}{(A)(DR)(60 \text{ min/h})}$$

Εξίσωση
4.29

$$n = \frac{(1 + R)(q)(10^3 \text{ mm/m})}{(A)(DR)(60 \text{ min/h})}$$

Όπου,

n = ταχύτητα περιστροφής, περιστροφές/λεπτό

q = αγωγός ρυθμού υδραυλικής φορτίσεως

R = αναλογία ανακύκλωσης

A = αριθμός διανομέων στη συνδεσμολογία του διανομέα

DR = ρυθμός φορτίσεως, mm/διέλευση του διανομέα

Για την επίτευξη των προτεινόμενων ρυθμών φόρτισης, η ταχύτητα του διανομέα μπορεί να ελεγχθεί:

- μεταβάλλοντας την κατεύθυνση ψεκασμού σε ορισμένα στόμια, ώστε να επιβραδύνεται η περιστροφική κίνηση του διανομέα.
- προσθέτοντας ανακλαστήρες στη ροή των στομιών ψεκασμού.
- αντικαθιστώντας των συνήθη κινούμενο από την ορμή του νερού διανομέα, με διανομέα κινούμενο από ηλεκτροκινητήρα μεταβλητής ταχύτητας.

4.2.5. ΕΙΔΗ ΣΤΑΛΑΚΤΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ ΒΑΣΗ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Η ταξινόμηση των σταλακτικών φίλτρων γίνεται με βάση τις οργανικές και υδραυλικές φορτίσεις, στις πιο κάτω κατηγορίες: [Metcalf & Eddy, 2003].

Φίλτρα χαμηλού ρυθμού

Η υδραυλική φόρτιση στα φίλτρα αυτά κυμαίνεται από 1,17 έως 3,52 m³/m²*d και η οργανική φόρτιση BOD από 0,08 έως 0,4 kg/m³*d.

Σε ένα φίλτρο χαμηλού ρυθμού, μια σχετικά απλή και αξιόπιστη συσκευή, έχουμε σταθερούς δείκτες μέτρησης του οργανικού φορτίου στην έξοδο, παρότι μπορεί να τροφοδοτείται με κυμαινόμενης ποιότητας απόβλητα. Τα φίλτρα μπορεί να έχουν κυκλικό ή ορθογώνιο σχήμα. Στα περισσότερα φίλτρα χαμηλών ρυθμών μόνο τα πρώτα 0,6 έως 1,2 m του υλικού πλήρωσης θα έχουν σημαντικό βιολογικό υμένα. Ως αποτέλεσμα, τα χαμηλότερα τμήματα του φίλτρου μπορεί να εποικισθούν από αυτότροφα νιτροποιητικά βακτήρια. Ένα καλώς χειριζόμενο φίλτρο χαμηλού ρυθμού μπορεί να παρέχει καλή απομάκρυνση BOD και μια εκροή με υψηλό βαθμό νιτροποίησης. Οι οσμές είναι ένα σύννηθες πρόβλημα, ειδικά εάν τα υγρά απόβλητα είναι εκτεθειμένα για πολύ καιρό και έχουν περιέλθει σε σήψη, ή όταν ο καιρός είναι ζεστός. Τα φίλτρα δε, πρέπει να εγκαθίστανται σε περιοχές όπου οι οσμές δημιουργούν πρόβλημα στη περιοχή. Όπως παράδειγμα, κοντά σε οικισμούς.

Φίλτρα ενδιάμεσου ρυθμού

Η υδραυλική φόρτιση κυμαίνεται από 3,52 έως 9,39 m³/m²*d και η οργανική φόρτιση BOD από 0,24 έως 0,48 kg/m³*d, ενώ το πληρωτικό υλικό είναι χαλίκι.

Φίλτρα υψηλού ρυθμού

Η υδραυλική φόρτιση στα φίλτρα αυτά κυμαίνεται από 9,39 έως 37,55 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ και η οργανική φόρτιση BOD από 0,48 έως 0,96 $\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$. Τα φίλτρα υψηλού ρυθμού χρησιμοποιούν χαλίκια ή πλαστικό υλικό πλήρωσης. Η ανακυκλοφορία της εκροής του φίλτρου και της τελικής εκροής επιτρέπει υψηλότερα οργανικά φόρτια, παρέχει υψηλότερους ρυθμούς φορτίσεων στο φίλτρο για να βελτιώσει την κατανομή του υγρού και τον καλύτερο έλεγχο του πάχους του υμένα, παρέχει περισσότερο οξυγόνο στην εισροή των υγρών αποβλήτων και επιστρέφει τους ζωντανούς μικροοργανισμούς. Η ανακύκλωση βοηθά επίσης στην αποτροπή συγκέντρωσης νερού μέσα στο φίλτρο και ελαττώνει την όχληση από τις οσμές και τα μυγιάκια

Φίλτρα υπερυψηλής φόρτισης

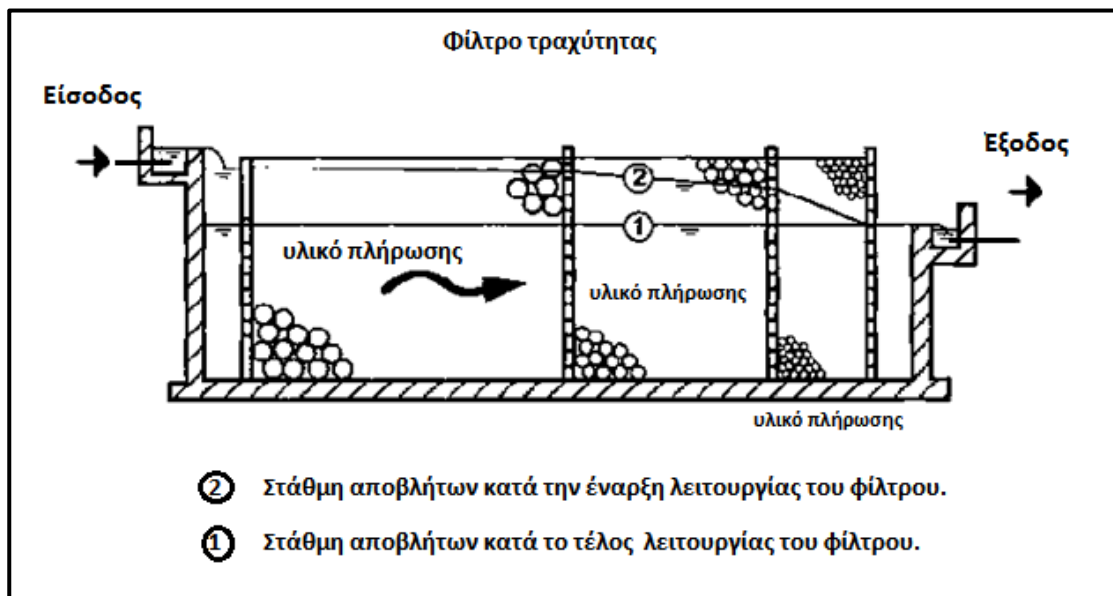
Η υδραυλική φόρτιση στα φίλτρα αυτά κυμαίνεται από 11,73 έως 70,4 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ και η οργανική φόρτιση BOD από 0,24 έως 1,44 $\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ ενώ το πληρωτικό υλικό αποτελείται από διάφορα πλαστικά υλικά. Τα φίλτρα αυτά διαφέρουν από τα φίλτρα υψηλής φόρτισης στο ότι υπόκεινται σε μεγαλύτερες φορτίσεις και στο ότι έχουν μεγαλύτερο βάθος. Η αύξηση του βάθους επιτυγχάνεται με την χρήση ελαφρών πλαστικών υλικών.

Φίλτρα τραχύτητας

Τα φίλτρα τραχύτητας είναι τα φίλτρα τύπου υψηλού ρυθμού τα οποία επεξεργάζονται ένα οργανικό φορτίο μεγαλύτερο από 1,6 $\text{kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$ και υδραυλικά φορτία πάνω από 190 $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$. Τα φίλτρα τραχύτητας χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των πρωτογενών υγρών αποβλήτων σε δευτεροβάθμια επεξεργασία. Τα περισσότερα φίλτρα τραχύτητας σχεδιάζονται για να χρησιμοποιούν πλαστικό υλικό πλήρωσης, [WPCF, 1988]. Ένα από τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα φίλτρα τραχύτητας είναι η χαμηλή ενεργειακή απαίτηση για την απομάκρυνση του

οργανικού φορτίου (BOD) από ανώτερης ισχύος υγρά απόβλητα συγκριτικά με τον αερισμό της ενεργού ιλύος.

Τα φίλτρα τραχύτητας κατασκευάζονται σε μακρόστενες ορθογωνικές δεξαμενές. Τα απόβλητα εκχύνονται στη ανάντη πλευρά της δεξαμενής. Με αργό ρυθμό και φυσική ροή, δια μέσου του πληρωτικού υλικού υπερχειλίζουν στην κατάντη πλευρά της δεξαμενής. Από το κατώτερο σημείο της δεξαμενής εκρέουν παραπροϊόντα από της διεργασίας.



Εικόνα 21, Σχηματική αναπαράσταση φίλτρου τραχύτητας. [Sandec, 1995]

Φίλτρα δύο σταδίων

Ένα σύστημα φίλτρου δύο σταδίων, με ενδιάμεση δεξαμενή καθίζησης για να απομακρύνει στερεά που προήλθαν από το πρώτο φίλτρο, χρησιμοποιείται συχνότερα για υγρά απόβλητα μεγάλης ισχύος. Τα συστήματα δύο σταδίων χρησιμοποιούνται επίσης εκεί όπου απαιτείται νιτροποίηση. Το φίλτρο του πρώτου σταδίου και η ενδιάμεση δεξαμενή καθίζησης μειώνουν το ανθρακογενές BOD και η νιτροποίηση λαμβάνει χώρα στο δεύτερο στάδιο.

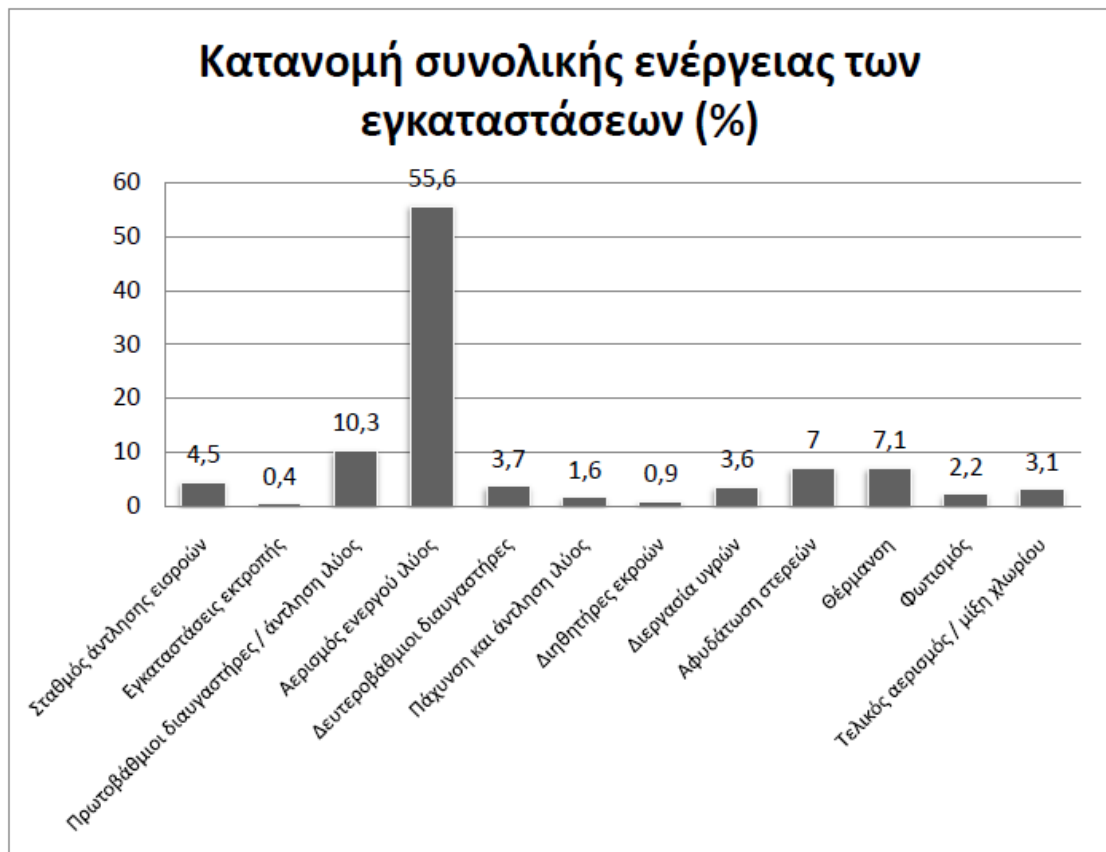
4.2.6. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΟΦΕΛΗ

Η εφαρμογή διεργασιών ευρείας αποδοχής στα συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων (όπως τα συστήματα ενεργούς ιλύος), οδηγεί σε αποδοτικά αποτελέσματα ως προς την ευκολία σχεδιασμού και την σταθερή και νομοθετικά αποδεκτή ποιότητα των αποβλήτων. Επίσης, η πολυετής συσσωρευμένη γνώση πάνω στα συστήματα αυτά, επιφέρει ολοένα και αποδοτικότερους ρυθμούς και κατατάσσει τα συστήματα πρώτα σε επιλογή. Όμως, η λειτουργία των συστημάτων αυτών είναι ενεργοβόρα καθ' όσον απαιτείται ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός μεγάλων ενεργειακών απαιτήσεων, παραδείγματος χάριν φυσητήρες.

Στα πιο πάνω συστήματα, οι ενεργειακές ανάγκες δεν είναι σταθερές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι ανάγκες μεταβάλλονται ανάλογα με το φορτίο των υγρών αποβλήτων. Παρατηρείται αύξηση της ενεργειακής απαίτησης κατά τις μεσημβρινές ώρες όπου οι οικιακές απαιτήσεις είναι μεγαλύτερες. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην υιοθέτηση προσαρμοσμένων συστημάτων ανάλογα με το εκάστοτε φορτίο, σε κάθε περίπτωση όμως υπάρχουν και εγκαταστάσεις που λειτουργούν σε μόνιμη βάση σε πλήρη λειτουργία (φυσητήρες κ.ά.) ανεξαρτήτως από την παροχή. Δηλαδή, υπάρχει μία μόνιμος ενεργειακή απαίτηση [Metcalf & Eddy, Inc., 2003].

Από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε συμβατικές μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ενεργού ιλύος οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια κυμαίνονται από 317kWh / 1000m³ έως 660kWh / 1000m³ (1200 έως 2500 kWh ανά Mgal). Επίσης, έχει παρατηρηθεί πως το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία των μονάδων καταναλώνεται για την πραγματοποίηση της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. [Metcalf & Eddy, Inc., 2003].

Σε μία συμβατική δευτεροβάθμια επεξεργασία το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται στην βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων με τη μέθοδο της ενεργούς ιλύος (η οποία απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας για τον αερισμό) ή με την μέθοδο των βιολογικών κλινών (κατά την οποία καταναλώνεται ενέργεια για την άντληση των εισροών και την επανακυκλοφορία των εκρεόντων αποβλήτων), (βλ. Γράφημα 1). [EPRI, 1994]



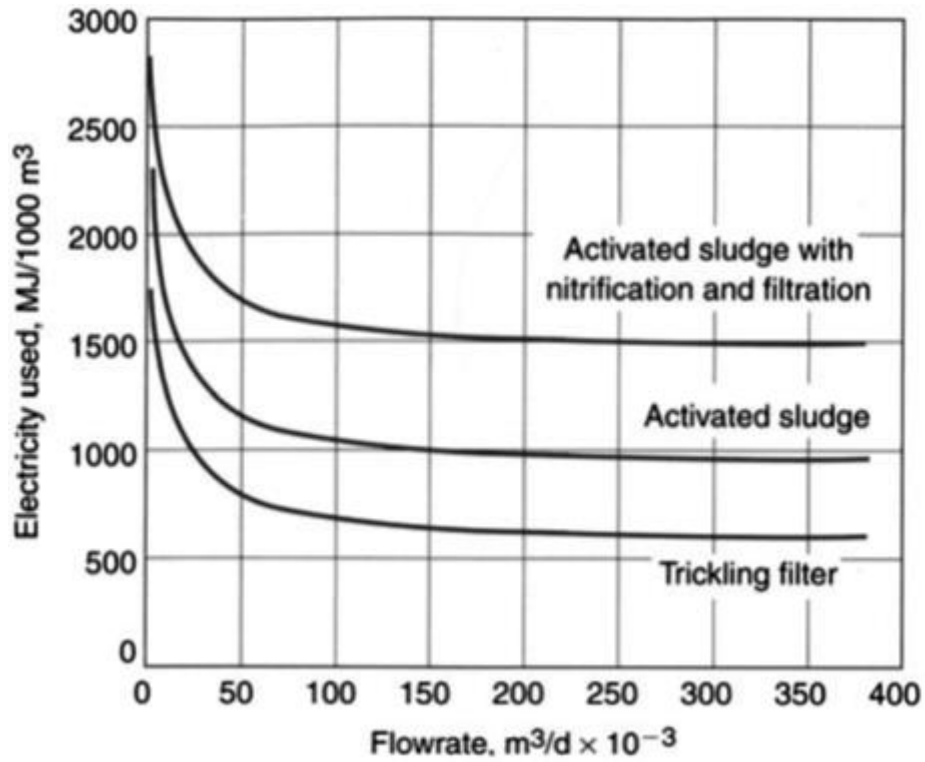
Γράφημα 1, Κατανομή χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων ενεργούς ιλύος (EPRI, 1994).

Από τη σκοπιά της ενεργειακής κατανάλωσης, κρίνεται αποδοτικότερη η χρήση διεργασιών οι οποίες δε θα περιλαμβάνουν την ανάγκη διαλυτοποίησης οξυγόνου, εντός ρευστού, καθώς απαιτούνται συστήματα αντλιών υψηλής πίεσης και κατ' επέκταση υψηλών αναγκών σε ενέργεια.

Υφίσταται η ανάγκη για αναβάθμιση των μονάδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με μεθόδους λιγότερο ενεργοβόρες, με ίδια ποιοτικά αποτελέσματα οι

οποίες τελικά θα επιφέρουν αυξημένη αποδοτικότητα στον τομέα της ενεργειακής κατανάλωσης. Οι σύγχρονες εγκαταστάσεις σταλακτικών φίλτρων με τη βοήθεια νέων τεχνολογιών εμφανίζουν οφέλη και πλεονεκτήματα, σε σχέση με εγκαταστάσεις και συστήματα επεξεργασίας ενεργού ιλύος. **[Henrich & Marggraff, 2013]**

Οι νέες εγκαταστάσεις απαιτούν ισχύ μόνο για την άντληση των αποβλήτων και δεν χρειάζονται υψηλής ισχύος φυσητήρες αερισμού όπως εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν εξ' ολοκλήρου μεθόδους ενεργούς ιλύος. Η χρήση σταλακτικών φίλτρων στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων επιτυγχάνει σημαντική μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης της διεργασίας, σε σχέση με την παραδοσιακή μέθοδος επεξεργασίας ενεργούς ιλύος, (βλ. Γράφημα 2). Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι το κόστος επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων σε μονάδες επεξεργασίας με σταλακτικά φίλτρα είναι κατά 16% - 18% οικονομικότερο σε σχέση με τις μονάδες επεξεργασία με ενεργό ύλη. Επίσης το ετήσιο κόστος λειτουργίας μιας μονάδας επεξεργασία υγρών αποβλήτων με σταλακτικά φίλτρα είναι μειωμένο κατά 46-53% σε σχέση με μια μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με τη μέθοδο της ενεργούς ιλύος. Τα παραπάνω δεδομένα έχουν υπολογιστεί με βάση τα οικονομικά δεδομένα του έτους 2006. Και αφορούν μια μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με ικανότητα επεξεργασίας 200.000m³/day και χαρακτηριστικά των αποβλήτων, BOD:300mg/L και SS:400mg/L. **[M. Zahid, 2007]**



Γράφημα 2, Ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας ανά είδος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. [Gikas, 2014]

5. ΣΚΟΠΟΣ

Τα περάματα που περιγράφονται στην παρούσα εργασία εντάσσονται στον ερευνητικό σχεδιασμό του «Εργαστηρίου Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών» του Πολυτεχνείου Κρήτης, ο οποίος αποσκοπεί στην ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, με μειωμένο ενεργειακό αποτύπωμα. Βασική κατεύθυνση της έρευνας είναι η απομάκρυνση στερεών (με χρήση μικρο-εσχάρωσης και διήθησης) σε πρωταρχικό στάδιο της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της επίδρασης της κροκίδωσης, για την αύξηση της απόδοσης της λειτουργίας χαλικοδιυλιστηρίων, σε επεξεργασία υγρών αστικών αποβλήτων. **[Gikas, 2016], [Gikas, Tsoutsos, 2015], [Gikas, Stedman, 2013], [Franchi, Stedman, Gikas, 2012]**

Για την εφαρμογή κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη που αποτελείται από 2 κυλινδρικά σταλακτικά φίλτρα ύψους 1m. και διαμέτρου 200mm. Ως πληρωτικό υλικό χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί κυλινδρικοί, βιοφορείς, τύπου *FILL PAC WHEEL MEDIA (FLOWER)*. Τα σταλακτικά φίλτρα τροφοδοτήθηκαν με υγρά αστικά απόβλητα, τα οποία συλλεγόταν από τη Μονάδα Βιολογικού Καθαρισμού Υγρών Αστικών Αποβλήτων του Δήμου Χανίων αμέσως μετά από τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης. Τα βιολογικά φίλτρα τροφοδοτήθηκαν με κροκιδωμένα και ακροκίδωτα υγρά αστικά απόβλητα. Έγινε καταγραφή των αποτελεσμάτων μείωσης του οργανικού φορτίου, του ολικού οργανικού άνθρακα, του αμμωνιακού αζώτου καθώς και των ολικών στερεών.

Όσον αναφορά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, στη μελέτη αυτή έγινε καταγραφή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε από τη πειραματική διάταξη των σταλακτικών φίλτρων.

6. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΥΛΙΚΩΝ

6.1. ΥΓΡΑ ΑΣΤΙΚΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν υγρά αστικά απόβλητα από την Μονάδα Βιολογικού Καθαρισμού του Δήμου Χανίων, (βλ. Εικόνα 22).

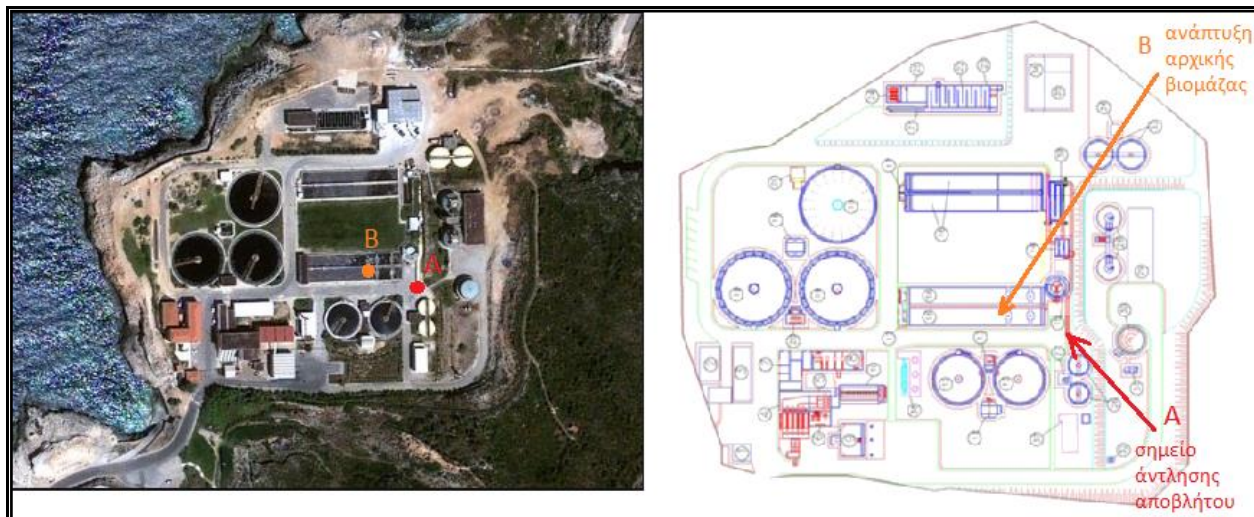
Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια των πειραμάτων διαπιστώσαμε ότι στην ΕΕΛ Χανίων γίνεται κατά διαστήματα προσθήκη τριχλωριούχου σιδήρου, στο κεντρικό φρεάτιο εισόδου, για λόγους απόσμησης. Ο τριχλωριούχος σίδηρος λειτουργεί ως κροκιδωτικό, με συνέπεια τα απόβλητα που λαμβάναμε να έχουν υποστεί ήδη κάποιου είδους κροκίδωση.

Επειδή οι λοιπές Μονάδες Βιολογικών Καθαρισμών του Ν. Χανίων και Ν. Ρεθύμνου λειτουργούν με την μέθοδο του παρατεταμένου αερισμού και δεν συμπεριλαμβάνουν διεργασία πρωτοβάθμιας καθίζησης, δεν κατέστη δυνατό να βρεθεί άλλη πηγή πρωτοβάθμια επεξεργασμένων λυμάτων χωρίς προσθήκη τριχλωριούχου σιδήρου.

Η εγκατάσταση που βρίσκεται σε λειτουργία από το 1995, προβλέπει την επεξεργασία αστικών λυμάτων που αντιστοιχούν σε 105.500 κατοίκους, βιομηχανικά απόβλητα που αντιστοιχούν σε 5.000 ισοδυνάμους κατοίκους και βοθρολύματα που αντιστοιχούν σε 7.000 ισοδυνάμους κατοίκους, δηλαδή συνολικά θα εξυπηρετεί 117.500 ισοδυνάμους κατοίκους και 26.000 m³/d. Η δυναμικότητα της εγκατάστασης θα αυξηθεί στους 170.000 ισοδυνάμους κατοίκους.

Η επεξεργασία των λυμάτων γίνεται με την μέθοδο της ενεργούς ιλύος και η επεξεργασία της λάσπης με την μέθοδο της αναερόβιας χώνευσης με παράλληλη αξιοποίηση του παραγόμενου βιοαερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

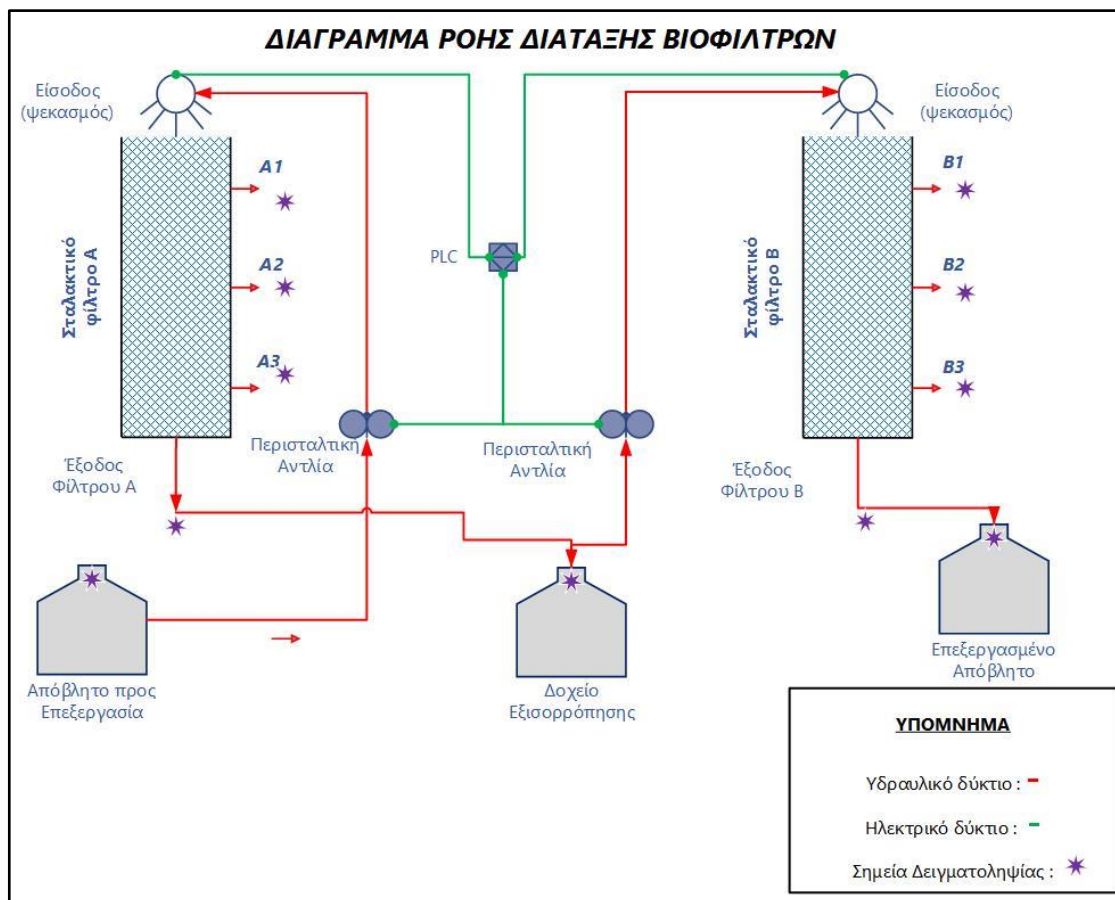
Η εγκατάσταση έχει σχεδιαστεί για την απομάκρυνση του BOD₅ κατά 96% και των αιωρούμενων στέρεων κατά 95%. [ΔΕΥΑ Χανίων, 2013]



Εικόνα 22, Αεροφωτογραφία και κάτοψη εγκαταστάσεων του βιολογικού καθαρισμού Δήμου Χανίων. **A:** Σημείο άντλησης αποβλήτων από την έξοδο δεξαμενής πρωτοβάθμια καθίζησης. **B:** Σημείο βύθισης πληρωτικού υλικού για την ανάπτυξη της αρχικής βιομάζας. [ΔΕΥΑΧ, 2013]

6.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για τις εργαστηριακές ανάγκες τις παρούσας εργασίας κατασκευάστηκαν δύο σταλακτικά φίλτρα, τα οποία γέμισαν με πλαστικό πληρωτικό υλικό, (βλ. Εικόνα 23). Τα σταλακτικά φίλτρα λειτούργησαν για διάστημα περίπου τεσσάρων μηνών με παρακολούθηση και καταγραφή των αποτελεσμάτων τους. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε επεξηγείται λεπτομερώς στο κεφάλαιο 6.13



Εικόνα 23, Διάγραμμα ροής της πειραματικής διάταξης

6.3. ΠΛΗΡΩΤΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

Το πληρωτικό υλικό είναι τύπου FILL PAC WHEEL MEDIA (FLOWER) της εταιρίας Device και πρόκειται για κυλινδρικό πλαστικό υλικό τυχαίας εσωτερικής κατανομής υγρού, κατασκευασμένο από πολυπροπυλένιο (PP). Κύριο χαρακτηριστικό του είναι το εξαιρετικά μεγάλο πορώδες. Η μορφή τους παρουσιάζεται στην Εικόνα 24.

Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά φαίνονται παρακάτω:

Εμπορική ονομασία : Fill Pac Wheel Media (FLOWER)

Υλικό κατασκευής : πολυπροπυλένιο

Δομή : κυλινδρικό σχήμα, ακτινωτή κατασκευή εσωτερικά, πτυχές στην εξωτερική επιφάνεια

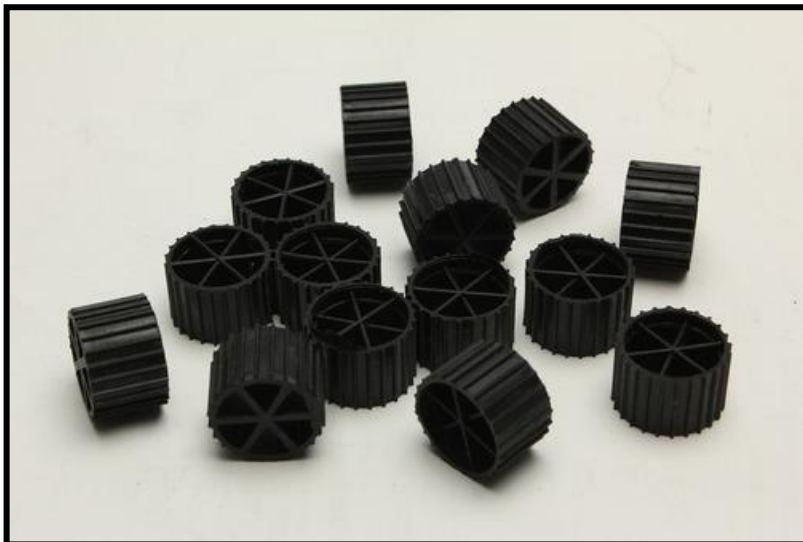
Διαστάσεις: 18,7Ømm X 51mm

Πορώδες : <95%

Ειδική επιφάνεια : 100 m²/m³

Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης : 80°C

Χρώμα : Μαύρο



Εικόνα 24, Το πληρωτικό υλικό των βιολογικών φίλτρων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία FILL PAC WHEEL MEDIA(FLOWER).

6.4. ΔΙΑΛΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ - DISSOLVED OXYGEN (DO)

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό αποτελεί αναμφισβήτητο δείκτη της κατάστασης και της βιωσιμότητας του υδάτινου οικοσυστήματος, καθόσον η ύπαρξη του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό είναι ζωτική για τους υδρόβιους οργανισμούς.

Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στα επιφανειακά νερά εξαρτάται από την θερμοκρασία, την ποσότητα των ιζημάτων, την ποσότητα που καταναλώνεται από τους υδρόβιους οργανισμούς, την ποσότητα που προκύπτει από την φωτοσύνθεση, την ταχύτητα ροής του νερού καθώς και τον αερισμό του. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου συνήθως μετράται σε mg/l, ppm ή ποσοστό συγκέντρωσης κορεσμού. Με την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού μειώνεται η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό, (αρχή **Le Chatelier**). Η διαλυτότητα του οξυγόνου στο νερό είναι της τάξης των 9.2 mg/L για καθαρό νερό σε 20°C και πίεση 1 Atm. Η παρουσία οργανικών υλών σε έναν αποδέκτη έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση του διαλυμένου οξυγόνου του αποδέκτη λόγω της αερόβιας αναπνοής σύμφωνα με την αντίδραση:



Εξίσωση 6.1



Ο υδατικός αποδέκτης έχει δυνατότητα να διατηρεί μια μέγιστη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου, η οποία καλείται συγκέντρωση κορεσμού και συμβολίζεται C_s . Η τιμή κορεσμού C_s , εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη

θερμοκρασία . Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι για θερμοκρασία 20 °C η τιμή του κορεσμού είναι 9 mg/l.

Κατά τις Κατευθυντήριες Οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης πρέπει να εξασφαλίζεται απολύτως ελάχιστη συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου 5mg/l. Μεγαλύτερες είναι οι απαιτούμενες διάμεσες συγκεντρώσεις ανάλογα με τον αποδέκτη των λυμάτων. **[Βασιλάτος , 2010]**

Οι μετρήσεις του διαλυμένου οξυγόνου (DO) πραγματοποιήθηκαν με το πολυόργανο Multi 3410 της WTW, με χρήση του ηλεκτροδίου DO prob, οπτικού αισθητηρίου, της WTW.



Εικόνα 25, Πολυόργανο Multi 3410 της WTW και το αντίστοιχο, οπτικής μέτρησης, ηλεκτρόδιο για μέτρηση DO. [WTW, 2015]

6.5. ΒΙΟΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ - BIOCHEMICAL OXYGEN DEMAND (BOD)

Είναι η συνήθως χρησιμοποιούμενη παράμετρος για τη μέτρηση του οργανικού φορτίου των λυμάτων και ρυπασμένων υδάτινων σωμάτων. Το ολικό BOD (BOD_u) μιας ποσότητας νερού ορίζεται ως η ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου που χρησιμοποιούν οι μικροοργανισμοί για την πλήρη βιοχημική οξείδωση των περιεχόμενων οργανικών υλών. **[Βασιλάτος, 2010]**

Η ολοκλήρωση του πειράματος BOD απαιτεί πολύ χρόνο. Απαιτούνται 20 ημέρες για να ικανοποιηθούν τα 95-99% του BOD_u και γι' αυτό χρησιμοποιείται συνήθως το BOD₅ που είναι το BOD που ικανοποιείται κατά τις 5 πρώτες ημέρες του πειράματος σε θερμοκρασία 20°C.

Η ταχύτητα της βιολογικής οξείδωσης εξαρτάται από το είδος της οργανικής ύλης, ενώ υπάρχουν οργανικές ύλες που δεν οξειδώνονται βιολογικά (μη βιοδιασπάσιμες ύλες) με αποτέλεσμα το BOD (BOD_u ή BOD₅) να μετρά την οργανική μάζα κατά προσέγγιση μόνο. Ο λόγος BOD₅/BOD_u επηρεάζεται από το είδος των οργανικών υλών του νερού και λυμάτων αλλά και από το βαθμό βιολογικής επεξεργασίας των λυμάτων αφού προηγείται η οξείδωση των ευκολότερα βιοδιασπάσιμων υλών.

Η μεγάλη αξία του BOD βρίσκεται στο ότι μετρά άμεσα το κυριότερο ρυπαντικό αποτέλεσμα της οργανικής ύλης δηλαδή την κατανάλωση διαλυμένου οξυγόνου που πραγματοποιούν οι μικροοργανισμοί κατά την οξείδωσή της.

Κατά την τυπική πείραματική μέθοδο προσδιορισμού του BOD τοποθετείται το διάλυμα του δείγματος σε σφραγισμένη φιάλη και μετρίεται μανομετρικά, ανά μία περίπου ώρα, η κατανάλωση του οξυγόνου ενώ γίνεται δέσμευση του παραγόμενου CO₂ από υδροξείδιο του λιθίου κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η τελική μέτρηση αντιστοιχεί στην μείωση της πίεσης του αέρα μέσα στη φιάλη είναι το BOD.

Για αστικά λύματα το BOD₅ είναι συνήθως 65-75% του BOD. Για καθαρώς οικιακά λύματα το BOD₅ είναι 55 - 80 γραμμάρια ανά κάτοικο την ημέρα. [Βασιλάτος , 2010]

6.5.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ BOD

Για την μέτρηση του BOD₅ ακολουθήθηκε η διαδικασία σύμφωνα με τα Standard Methods. Συνοπτικά, λαμβανόταν το επιθυμητό δείγμα, βάσει του αναμενόμενου BOD πραγματοποιούνταν και ανάλογη αραίωση με απιονισμένο νερό. Στη συνέχεια, το διάλυμα τοποθετούνταν σε δοχείο στο οποίο υπήρχε ακροφύσιο διοχέτευσης αέρα με σκοπό τον κορεσμό του διαλύματος σε οξυγόνο.

Στο διάλυμα εγένετο επίσης πρόσθεση απαραίτητων θρεπτικών συστατικών για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών.

Μετά τον αερισμό, το διάλυμα μοιραζόταν σε δύο γυάλινα μπουκάλια Robotic BOD των 300ml. Σε κάθε μπουκάλι γινόταν μέτρηση του διαλυμένου οξυγόνου με χρήση του οξυγονόμετρου WTW Multi 3410 και του ανάλογου ηλεκτροδίου. Κατόπιν, τα μπουκάλια κλείνονταν και τοποθετούνταν για 5 24ωρα σε επωαστικό κλίβανο WTW BOD ρυθμισμένο σε σταθερή θερμοκρασία 20 ±0,5°C.

Τέλος, μετά το πέρας των 5 24ώρων, πραγματοποιούνται η τελικές μετρήσεις του διαλυμένου οξυγόνου. Το BOD₅ είναι η διαφορά των συγκεντρώσεων του διαλυμένου οξυγόνου πολλαπλασιασμένη με την αρχική αραίωση του δείγματος. Το BOD₅ προέκυπτε από την μέση τιμή των δύο επιμέρους BOD δειγμάτων. Ο τελικός μαθηματικός τύπος που προσομοιάζει την παραπάνω μεθοδολογία είναι:

$$BOD_5 = \frac{(DO_{αρχικό}(1) - DO_5(1)) * Αραίωση + (DO_{αρχικό}(2) - DO_5(2)) * Αραίωση}{2}$$

Εξίσωση 6.2

6.6. ΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΟΞΥΓΟΝΟ - CHEMICAL OXYGEN DEMAND (COD)

Το COD είναι η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη χημική οξείδωση της οργανικής ύλης σε CO₂ και νερό [Βασιλάτος, 2010]. Το δείγμα «χωνεύεται» παρουσία οξειδωτικού μέσου {π.χ. διχρωμικού κάλιου. (K₂Cr₂O₇)} και στη συνέχεια φασματοφωτομετρείται.

Τα οξειδούμενα οργανικά συστατικά αντιδρούν με το διχρωμικό ιόν (εξασθενές), σχηματίζοντας πράσινο χρωμικό (τρισθενές Cr).

Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος με το φασματοφωτόμετρο της Hack για το εύρος the 0-150 mg/L ο προσδιορισμός γίνεται με τη μέτρηση του Cr⁶⁺ που απομένει. Όταν η μέθοδος αφορά τα εύρη 0–1,500 mg/L ή 0–15,000 mg/L ο προσδιορισμός γίνεται με τη μέτρηση του Cr³⁺ που παράγεται.

Στα αντιδραστήρια για τον προσδιορισμό του COD περιέχονται επίσης ιόντα αργύρου και υδραργύρου. Ο υδράργυρος χρησιμοποιείται ως καταλύτης για την οξείδωση και ο άργυρος για τον περιορισμό των παρεμβολών από το χλώριο.

Το COD χρησιμοποιείται ευρύτατα αντί του BOD ή συμπληρωματικά με αυτό. Έχει το μεγάλο πλεονέκτημα της ταχύτητας αφού η μέτρηση ολοκληρώνεται σε λίγες (2-3) ώρες αλλά μετρά όχι μόνο τη βιοδιασπάσιμη αλλά και τη μη βιοδιασπάσιμη οργανική ύλη.

Ισχύει **COD>BOD_u>BOD₅**.

6.6.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ COD

Στη περίπτωση μας, για τη μέτρηση του COD, ακολουθήθηκε η πλήρης μέθοδος της εταιρίας HACH με χρήση αντιδραστηρίων, φούρνου και φασματοφωτόμετρου της ίδιας εταιρίας.

Αναλυτικά, 1ml του δείγματος, τοποθετούνταν σε φιάλες αντιδραστηρίων της εταιρίας HACH με εμπορικές ονομασίες LCK 514 (605nm), LCK 314 (448nm) ή LCK 114 (605nm), ανάλογα με το αναμενόμενο COD των αποβλήτων προς μέτρηση, και αναδεύονταν χειρονακτικά. Στη συνέχεια οι φιάλες τοποθετούνταν στον αυτοματοποιημένο φούρνο HACH LT200, (βλ. Εικόνα 26). Η λειτουργία του είχε προγραμματισμένη θερμοκρασία 150°C και χρόνο παραμονής 2 ώρες.

Τέλος, τα φιαλίδια παρέμεναν για κάποια λεπτά σε θερμοκρασία δωματίου έως ότου να κρυώσουν και τοποθετούνταν στο φασματοφωτόμετρο HACH DR2800, (βλ. Εικόνα 26), το οποίο αναγνώριζε αυτόματα το γραμμωτό κώδικα (Barcode) του αντίστοιχου φιαλιδίου, ρύθμιζε το απαιτούμενο μήκος κύματος (για τα LCK 514 και LCK 114 στα 605nm και για το LCK 314 στα 448nm) και εμφάνιζε το αποτέλεσμα του COD.



Εικόνα 26, Συσκευή πέψης (δεξιά) και φορητό φασματοφωτόμετρο (αριστερά) που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του COD και του TOC.

6.7. ΟΛΙΚΟΣ ΟΡΓΑΝΙΚΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ - TOTAL ORGANIC CARBON (TOC)

Ο Ολικός Οργανικός Άνθρακας (Total Organic Carbon – TOC) είναι παράμετρος άμεσης μέτρησης του συνολικού οργανικού άνθρακα που περιέχεται στα ύδατα και τα απόβλητα, ανεξάρτητα από το είδος των ενώσεων στις οποίες περιέχεται. Ως εκ τούτου παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα και το επίπεδο ρύπανσης των υδάτων ως προς την παρουσία οργανικών συστατικών. [Λοϊζίδου, 2006]. Είναι μέτρο ιδιαίτερα κατάλληλο για μικρές συγκεντρώσεις οργανικής ύλης που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα την παραγωγή πόσιμου νερού.

Πρόκειται για μία γρήγορη, άμεση και οικονομική μέθοδο προσδιορισμού της οργανικής ύλης. Στα αστικά ανεπεξεργαστα λύματα είναι συνήθως: $BOD_5/TOC = 1,0 - 1,6$.

Η βασική ιδέα για τον προσδιορισμό του ολικού οργανικού άνθρακα βασίζεται στην πλήρη μετατροπή των μορίων, τα οποία περιέχονται στο δείγματα, σε διοξείδιο του άνθρακα. Κατ' επέκταση ο ποσοτικός προσδιορισμός του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να οδηγήσει σε έμμεσο προσδιορισμό του αρχικού άνθρακα. Οι σύγχρονες μέθοδοι για τον προσδιορισμό του TOC είναι η μέθοδος καύσης / υπερύθρων (IR) καθώς και η μέθοδος υγρής οξείδωσης.

Η μέθοδος της υγρής οξείδωσης, η οποία χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία, απαιτεί προ επεξεργασία του δείγματος σε ελαφρώς όξινες συνθήκες για να απομακρυνθεί ο ανόργανος άνθρακας. Κατόπιν, μετατρέπουμε τον οργανικό άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα και μετά σε ανθρακικό οξύ, το οποίο προκαλεί μεταβολή στο pH ενός έγχρωμου δείκτη. Η μεταβολή του χρώματος του δείκτη συνδέεται και είναι ανάλογη με την αρχική συγκέντρωση του οργανικού άνθρακα στο δείγμα.

6.7.1. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ TOC

Η μέτρηση του TOC στην παρούσα εργασία γινόταν με την συσκευή Shimadzu TOC-5000A. Η διαδικασία έχει ως ακολούθως:

Από το δείγμα, γινόταν λήψη περίπου 2-3ml με σύριγγα, στη συνέχεια γινόταν προσαρμογή στην άκρη της σύριγγας φίλτρο διήθησης Sartorius Minisart

0,45μm για την συγκράτηση των στερεών. Διηθούνταν περίπου 1ml του δείγματος και τοποθετούνταν σε γυάλινο δοχείο.

Τέλος, τοποθετούνταν το σωληνάκι δειγματοληψίας του οργάνου εντός του δοχείου δείγματος και πραγματοποιούνταν η μέτρηση. Το όργανο ήταν βαθμονομημένο και ρυθμισμένο να ολοκληρώνει 2 μετρήσεις για κάθε δείγμα (ή 3 αν κάποια από τις 2 πρώτες ήταν εκτός των ορίων βαθμονόμησης). Το τελικό αποτέλεσμα ήταν η μέση τιμή των μετρήσεων του οργάνου.



Εικόνα 27, Αναλυτής TOC (Total Organic Carbon) TOC-5000A της Shimadzu.

6.8. ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΜΜΩΝΙΑΚΩΝ ($\text{NH}_3\text{-N}$)

Αντιδραστήρια

- Αντιδραστήριο Nessler Cat. 21194-49, Hach-Lange
- Σταθεροποιητής μετάλλων Cat. 22766-26, Hach-Lange
- Παράγοντας διασποράς πολυβινυλαλκοόλης Cat. 23765-26, Hach-Lange

Πειραματική διαδικασία

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την μέτρηση των αμμωνιακών είναι η μέθοδος Nessler. Η μέθοδος Nessler μετράει συγκεντρώσεις αμμωνικού αζώτου από 0,02 μέχρι 2,50 mg/l, επομένως ανάλογα με το αναμενόμενο αποτέλεσμα απαιτείται και η ανάλογη αραίωση. Για τη μέτρηση της συγκέντρωσης των αμμωνιακών της εισόδου στον βιοαντιδραστήρα η αραίωση ήταν 1:25, ενώ για την μέτρηση της συγκέντρωσης στην έξοδο του βιοαντιδραστήρα, η αραίωση ήταν 1:12,5. Για την προετοιμασία του τυφλού διαλύματος, γεμίζεται η ογκομετρική φιάλη των 25 ml με απιονισμένο νερό. Για την είσοδο του βιοαντιδραστήρα, στην ογκομετρική φιάλη προστίθεται 1 ml λύματος και 24 ml απιονισμένου νερού, ενώ για την έξοδο προστίθενται 2 ml λύματος, και 23 ml απιονισμένου νερού. Έπειτα προστίθενται σε κάθε φιαλίδιο τρεις (3) σταγόνες σταθεροποιητή μετάλλων, τα φιαλίδια σφραγίζονται και ανακινούνται. Κατόπιν προστίθενται σε κάθε φιαλίδιο 3 σταγόνες παράγοντα διασποράς πολυβινυλαλκοόλης, και τα φιαλίδια σφραγίζονται και ανακινούνται. Τέλος σε κάθε φιαλίδιο προστίθεται ένα (1) ml αντιδραστηρίου Nessler και τα φιαλίδια σφραγίζονται και ανακινούνται. Το διάλυμα αφήνεται να αντιδράσει για ένα λεπτό, αλλά όχι παραπάνω από πέντε λεπτά.

Έπειτα επιλέγεται στο φασματοφωτόμετρο DR 2800 της HACH η μέθοδος Nessler, τοποθετείται το τυφλό σε κυψελίδα, και στο φασματοφωτόμετρο, και πατιέται η επιλογή «τυφλό», η οποία μηδενίζει το φασματοφωτόμετρο. Μετά τοποθετούνται με τη σειρά το δείγμα εισόδου και εξόδου, και πατιέται η επιλογή «μέτρηση», και εμφανίζεται η ένδειξη της συγκέντρωσης στο διάλυμα. Τέλος πολλαπλασιάζεται η ένδειξη του φασματοφωτόμετρου με 25 για την είσοδο, και 12,5 για την έξοδο, και υπολογίζεται η συγκέντρωση των αμμωνιακών.

6.9. ΜΕΤΡΗΣΗ ΝΙΤΡΙΚΩΝ ($\text{NO}_3\text{-N}$)

Η μέτρηση της συγκέντρωσης νιτρικών, γινόταν με φιαλίδια της σειράς LCK 339 της εταιρίας HACH-LANGE. Στο φιαλίδιο προστίθενται 2 ml δείγματος, ή 1 ml δείγματος και 1 ml απιονισμένο νερό, ανάλογα με το ύψος των αναμενόμενων αποτελεσμάτων. Έπειτα προστίθενται 1 ml του αντιδραστηρίου A και γινόταν ανακίνηση. Μετά από 15 λεπτά γινόταν αυτόματη μέτρηση απορρόφησης στο φασματοφωτόμετρο DR2800 της HACH-LANGE.

Στις παραπάνω μετρήσεις, σε περίπτωση αραίωσης γινόταν πολλαπλασιασμός των αποτελεσμάτων με τον κατάλληλο συντελεστή, για αναγωγή της συγκέντρωσης των συμπυκνωμένων αποβλήτων.

6.10. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΟΛΙΚΩΝ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ (TSS)

Η μέθοδος με την οποία μετρήθηκαν τα ολικά αιωρούμενα στερεά TSS των δειγμάτων, ήταν η κλασσική μέθοδος διήθησης και ζύγισης φίλτρων. Πιο αναλυτικά, τα φίλτρα *Whatman, Glass Microfiber Filters 934-AH* (0,45μm) ξεραίνονταν για 45 λεπτά σε φούρνο ξήρανσης *Memmert U100* σε θερμοκρασία 100°C, στη συνέχεια ζυγίζονταν σε ζυγαριά ακριβείας *Kern & Sohn ABJ-NM*. Έπειτα προσαρμόζονταν στη συσκευή διήθησης. Έπειτα διηθούνταν 100ml υγρού δείγματος. Στη συνέχεια τα φίλτρα ξεραίνονταν σε φούρνο ξήρανσης, για 45 λεπτά σε θερμοκρασία 100°C

Τέλος, τα φίλτρα τοποθετούνταν σε αφυγραντήρα για λίγα λεπτά, μέχρι η θερμοκρασία τους να εξομοιωθεί με την θερμοκρασία περιβάλλοντος, και ζυγίζονταν για τελευταία φορά. Η διαφορά βάρους όπου παρουσίαζαν τα φίλτρα σε σχέση με την αρχική τιμή βάρους που είχαν πριν τη διήθηση του δείγματος, ήταν και το τελικό αποτέλεσμα της τιμής των TSS ανά 100ml δείγματος.

6.11. ΚΡΟΚΙΔΩΣΗ ΛΥΜΑΤΟΣ

Εξοπλισμός

- Πιπέτα δέκα(10) ml
- Ποτήρι ζέσης εκατό (100) ml
- Μαγνητικός αναδευτήρας και μαγνήτης ανάδευσης
- Ποτήρι ζέσης δύο (2) λίτρων
- Ζυγαριά ακριβείας

Αντιδραστήρια

- Χλωριούχο πολυαλουμίνιο (PAC)
- Πολυηλεκτρολύτης (SNF FLOERGER - FO 4140)
- Απιονισμένο νερό

Διαδικασία

Αρχικά, τοποθετούνταν 0,3gr πολυηλεκτρολύτη (σε συγκέντρωση 6 ml/L) σε 150 ml απιονισμένου νερού. Έπειτα γινόταν ανάδευση με μαγνητικό αναδευτήρα για μισή ώρα σε 150 στροφές το λεπτό, μέχρι το διάλυμα να γίνει παχύρρευστο, και να διαλυθούν όλοι οι κόκκοι του πολυηλεκτρολύτη. Έπειτα, προσθέτονταν 1,2 ml PAC (σε συγκέντρωση 0,6 ml/L) σε 2 λίτρα λύματος και γινόταν αργή χειροκίνητη ανάδευση. Κατόπιν, προσθέτονταν 12 ml του διαλύματος πολυηλεκτρολύτη και γινόταν αργή χειροκίνητη ανάδευση, και το λύμα αφηνόταν να ηρεμήσει. Με τη διαδικασία αυτή δημιουργούνταν στο λύμα συσσωματώματα, τα οποία καθίζαναν σε μικρό χρόνο.

6.12. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

6.12.1. ΔΕΞΑΜΕΝΕΣ ΒΙΟΦΙΛΤΡΩΝ ΚΑΙ ΆΝΤΛΗΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Για τη κατασκευή των σταλακτικών φίλτρων χρησιμοποιήθηκε δύο κύλινδροι διαμέτρου 210mm και ύψους 1m. Το υλικό κατασκευής των κυλίνδρων είναι ακρυλικό φύλλο (plexi-glass) πάχους 5mm, (βλ. Εικόνα 28).

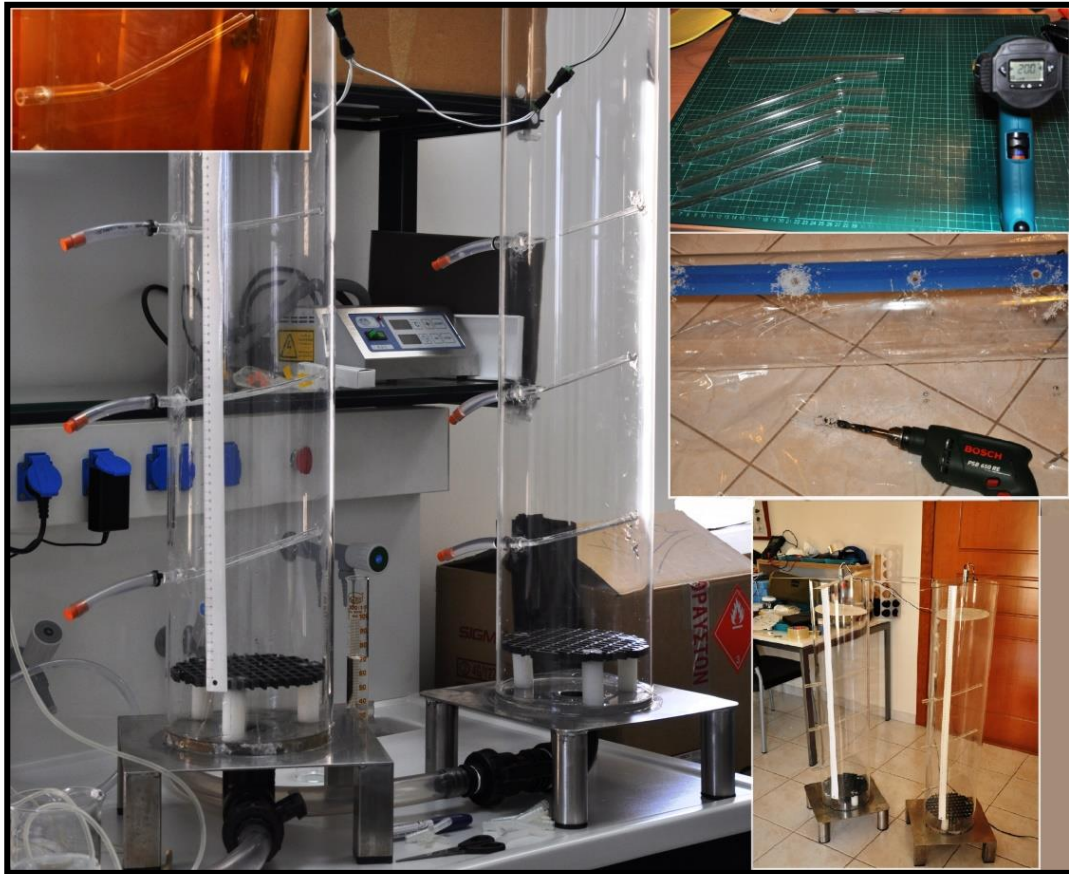


Εικόνα 28, Ακρυλικοί κύλινδροι που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των σταλακτικών φίλτρων.

Στο κάτω μέρος του κάθε κυλίνδρου συγκολλήθηκε κυκλική ακρυλική (plexi-glass) βάση πάχους 10mm. Στη βάση αυτή ανοίχτηκε ομόκεντρη τρύπα διαμέτρου 50mm, όπου και συγκολλήθηκε μαστός από πολυαιθυλένιο, (από αρδευτικά είδη), για την εκροή των λυμάτων. Στον μαστό προσαρμόστηκε σωλήνας με γωνία 90° και βάνα, για τον έλεγχο της εκροής των λυμάτων. Οι κύλινδροι τοποθετηθήκαν σε κατακόρυφη θέση πάνω σε ανοξείδωτες τετραγωνικής διατομής βάσεις, διαστάσεων 300x300mm. Το υλικό κατασκευής των βάσεων ήταν ανοξείδωτη λαμαρίνα πάχους 4mm. Κάθε βάση στηρίχτηκε με τέσσερα πόδια ύψους 5cm, κατασκευασμένα από ανοξείδωτη σωλήνα διαμέτρου 50mm. (βλ. Εικόνα 29)



Εικόνα 29, Ανοξείδωτη βάση σταλακτικού φίλτρου και βάνα εκροής επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.



Εικόνα 30, Στάδια κατασκευής των σημείων δειγματοληψίας καθ' ύψος των δεξαμενών των σταλακτικών φίλτρων .

Εσωτερικά το φίλτρο γέμισε με πληρωτικό υλικό. Το πληρωτικό υλικό αποτελείτε από κυλίνδρους πλαστικής κατασκευής διαμέτρου 10mm και ύψους 10mm. Το κυλινδρικό πληρωτικό υλικό είναι ακτινωτής κατασκευής, έχει πτυχές στην εξωτερική επιφάνεια του με σκοπό τη μεγιστοποίηση της συνολικής επιφάνειας του.

Η αρχιτεκτονική αυτή του υλικού συμβάλει στην ευκολότερη προσκόλληση περισσότερης ποσότητας βιομάζας. Στον πυθμένα της κυλινδρικής κατασκευής του φίλτρου, τοποθετήθηκε πλαστική σχάρα με τρία σημεία στήριξης ύψους 3cm, ώστε να αποφευχθεί η απευθείας επαφή του πληρωτικού υλικού με τον πυθμένα του κυλίνδρου. (βλ.Εικόνα 31)



Εικόνα 31, Στάδια κατασκευής συστήματος αποστράγγισης

Η διάταξη αυτή εξυπηρετεί τη αποστράγγιση των επεξεργαζόμενων αποβλήτων από το πληρωτικό υλικό και την απομάκρυνσή τους από το σταλακτικό φίλτρο.

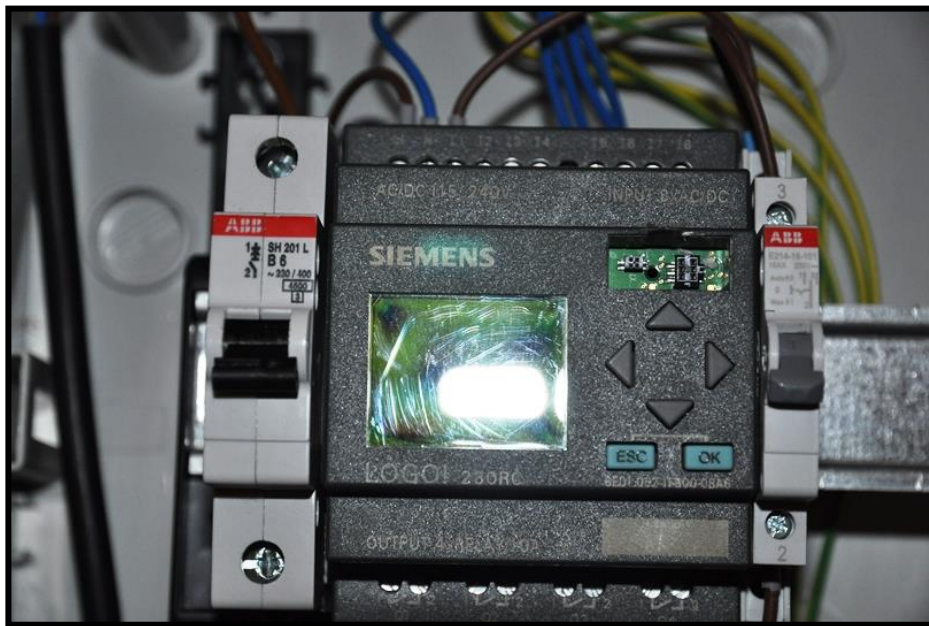
Στη κορυφή του κάθε βιοφίλτρου προσαρμόστηκε σύστημα για την παροχή και ομοιόμορφη διαβροχή των αποβλήτων σε όλη την επιφάνεια διατομής του βιοφίλτρου.

Το σύστημα παροχής λυμάτων αποτελείται από δίκτυο από σιλικονούχο αγωγούς (μακαρόνι) εσωτερικής διαμέτρου 2,5mm, και πλαστικό διαχωριστεί ροής τύπου **T**, για τον διαχωρισμό της παροχής σε δύο μέρη. Λεπτομερής περιγραφή ακολουθεί στην επόμενη παράγραφο 6.12.2.

Για την άντληση του λύματος από τα δοχεία συλλογής μέχρι το σύστημα διαβροχής χρησιμοποιήθηκε αντλία περισταλτική με δύο κεφάλες (μία για κάθε στήλη βιοφίλτρου).

Ο έλεγχος της αντλίας έγινε μέσω του PLC 230RC (Programmable Logic Controller) της SIEMENS. (βλ. Εικόνα 32). Το PLC τοποθετήθηκε σε κατάλληλα διαμορφωμένο ηλεκτρολογικό πίνακα και συνδέθηκε με PC (Personal Computer) μέσω USB θύρας.

Ο προγραμματισμός των διάφορων σεναρίων λειτουργίας των σταλακτικών φίλτρων έγινε σε περιβάλλον προγραμματισμού PC LOGO της SIEMENS.



Εικόνα 32, PLC(Programmable Logic Controller) της SIEMENS που χρησιμοποιήθηκε για το έλεγχο λειτουργίας των σταλακτικών φίλτρων

6.12.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ

Το σύστημα διαβροχής των σταλακτικών φίλτρων αποτελείται από ένα μοτέρ ηλεκτρικής παροχής 12V DC, υψηλής ροπής με ρυθμό περιστροφής 30 rpm/min. Το μοτέρ στηρίχτηκε στο κέντρο της κυκλικής διατομής του βιολογικού φίλτρου από τα τοιχώματα του κυλινδρικού Plexi-glass, με τη βοήθεια μεταλλικών γαλβανισμένων ελασμάτων πλάτους 10mm και πάχους 2mm, (βλ. Εικόνα 33).



Εικόνα 33, Στάδια κατασκευής συστήματος διαβροχής

Στον ρότορα του μοτέρ έχει προσαρμοστεί ανοξείδωτος άξονας μήκους 100mm και διατομής 2mm. Στην άλλη άκρη του αναξείδωτου άξονα έχει κολληθεί, κάθετα προς την διεύθυνση του άξονα, διάτρητος δίσκος από πολυμερές πολυαμίδιο PA6 (γνωστό και ως ερταλόν) διαμέτρου 190mm.

Στο δίσκο έχουν ανοιχτεί τρύπες δύο διαφορετικών διαμέτρων, τέτοιες ώστε να διαφεύγουν τα απόβλητα ομοιόμορφα πάνω από το δίσκο, (βλ. Εικόνα 33). Έπειτα από θέρμανση του δίσκου, του δόθηκε κυματοειδής μορφή για βελτιστοποίηση της κατανομής των αποβλήτων πάνω στο πληρωτικό υλικό.

6.12.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Για την καταγραφή της ενεργειακής κατανάλωσης των σταλακτικών φίλτρων χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όργανα.

- Ψηφιακό πολύμετρο με λειτουργία αμπερομέτρου συνεχούς ρεύματος.
- Ψηφιακός καταμετρητής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος 220volts/50Hz.

Το ψηφιακό πολύμετρο για την μέτρηση του ρεύματος (i) συνδέθηκε έν σειρά στο κύκλωμα τροφοδοσίας του συστήματος διαβροχής. Ο ψηφιακός καταμετρητής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος συνδέθηκε έν σειρά στο κύκλωμα ηλεκτρικής τροφοδοσίας της αντλίας τροφοδοσίας των αποβλήτων στη στήλη του βιολογικού φίλτρου. Από το ίδιο ηλεκτρικό κύκλωμα τροφοδοτείται και το σύστημα αυτοματισμού (PLC) της διάταξης. Η κατανάλωση του συστήματος αυτοματισμού (PLC) δε μετρήθηκε καθόσον θεωρείται αμελητέα, της τάξης κάποιων mA.

6.13. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

Η πειραματική μέθοδος περιελάμβανε τη καθημερινή λήψη δείγματος υγρών αστικών αποβλήτων από τη Μονάδα Βιολογικού Καθαρισμού Δήμου Χανίων και συγκεκριμένα έπειτα από την έξοδο της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης. Το δείγμα μεταφερόταν στο εργαστήριο και επεξεργαζόταν με τη μέθοδο των σταλακτικών φίλτρων. Καθημερινά, ελέγχονταν μετρήσεις των ποιοτικών χαρακτηριστικών των εισρεόντων και εκρεόντων αποβλήτων με σκοπό τον έλεγχο της απόδοσης των σταλακτικών φίλτρων. Τα φίλτρα τροφοδοτούνταν με κροκιδωμένα ή ακροκίδωτο απόβλητα.

Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν δύο όμοιες διατάξεις σταλακτικών φίλτρων. Αρχικά τα δύο σταλακτικά φίλτρα λειτούργησαν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Στη συνέχεια αφού παρατηρήθηκε ότι η συγκεκριμένη διάταξη δεν έφερνε τα επιθυμητά αποτελέσματα, η διάταξη αναπροσαρμόστηκε ώστε τα δύο σταλακτικά φίλτρα να δουλεύουν σ' εν σειρά σύνδεση μεταξύ τους. Τα απόβλητα περνούσαν πρώτα από τη πρώτη στήλη και στη συνέχεια από τη δεύτερη στήλη. Αυτή διάταξη επέφερε καλύτερα αποτελέσματα.

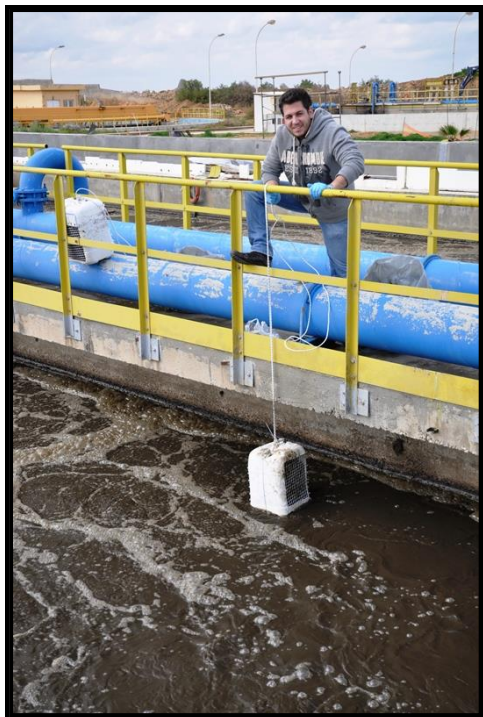
6.13.1. ΑΡΧΙΚΗ ΠΡΟΣΚΟΛΛΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΑ ΠΛΗΡΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Αρχικά τα πληρωτικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στα σταλακτικά φίλτρα της παρούσας πειραματικής διεργασίας βυθίστηκαν για 14 ημέρες (από 6/3/2014 έως 21/3/2014) εντός της δεξαμενής αερισμού της μονάδας Βιολογικού Καθαρισμού του Δήμου Χανίων, (βλ. Εικόνα 35), με σκοπό να αναπτυχθεί η αρχική στρώση προσκολλημένης βιομάζας στην επιφάνεια τους, (βλ. Εικόνα 34).

Κατόπιν τα πληρωτικά υλικά μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο και τοποθετήθηκαν εντός των σταλακτικών φίλτρων. Επειδή το πάχος της προσκολλημένης βιομάζας δεν ήταν ικανοποιητικό, η φόρτισή των σταλακτικών φίλτρων συνεχίστηκε για 5 ημέρες (από 21/3/2014 έως 26/3/2014), με συλλογή αποβλήτων από την έξοδο της πρωτοβάθμιας δεξαμενής καθίζησης του Βιολογικού Καθαρισμού του Δήμου Χανίων (το σημείο άντλησης των αποβλήτων φαίνεται στη Εικόνα 22. Επίσης, Τα απόβλητα εμπλουτίστηκαν με επιπρόσθετα θρεπτικά συστατικά.



Εικόνα 34, Ενεργοποιημένη βιομάζα (activated sludge) που αναπτύχθηκε στο πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε στα σταλακτικά φίλτρα της παρούσας εργασία (φωτογραφία πάνω αριστερά). [World Water Works, 2014], [YULONG, 2016]



Εικόνα 35, Βύθιση πληρωτικών υλικών στη δεξαμενή αερισμού της μονάδας Βιολογικού Καθαρισμού Δήμου Χανίων.

6.13.2. ΆΝΤΛΗΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Τα απόβλητα συλλεγόταν καθημερινά από το τη μονάδα Βιολογικού Καθαρισμού του Δήμου Χανίων στη περιοχή Κουμπελή. Αρχικά συλλέγονταν 50L αποβλήτων μοιρασμένα σε δύο δοχεία των 25L και στη συνέχεια του πειράματος συλλεγόταν μόνο ένα δοχείο 25L. Τα δοχεία μεταφέρονταν στο χώρο του εργαστηρίου όπου και γινόταν η βιολογική επεξεργασία των αποβλήτων στα σταλακτικά φίλτρα. Ως σημείο δειγματοληψίας επιλέχτηκε σημείο μεταξύ της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης και της δεξαμενής αερισμού της εγκατάστασης. Για την διευκόλυνση της δειγματοληψίας χρησιμοποιήθηκε, βυθιζόμενη αντλία (βατράχι), ναυτικού τύπου 12Volts, (βλ. Εικόνα 36).

Η τροφοδοσία της αντλίας γινόταν από μπαταρία αυτοκινήτου. Η αντλία είχε δυναμικότητα άντλησης 600 L/h (160 GPH). Για τις ανάγκες των μετρήσεων, γινόταν κροκίδωση στο ήμισυ της συνολικής ποσότητας των αποβλήτων που συλλεγόταν.

Αρχικά επεξεργάζοντουσαν κροκιδωμένα και ακροκιδωτά απόβλητα παράλληλα στα σταλακτικά φίλτρα. Στη συνέχεια του πειράματος γινόταν κροκίδωση σε όλη τη ποσότητα των υγρών αποβλήτων.. Οι διεργασίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο 6.13.3.



Εικόνα 36, Άντληση αποβλήτων από την εγκατάσταση του βιολογικού καθαρισμού του Δήμου Χανίων, με τη βοήθεια βυθιζόμενης αντλίας 12volts.

6.13.3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Κάθε 24ωρο γινόταν δειγματοληψία στις εκροές των σταλακτικών φίλτρων και καταμέτρηση των παραμέτρων. Στη συνέχεια τα σταλακτικά φίλτρα τροφοδοτούνταν με νέα απόβλητα και λειτουργούσαν σε συνεχή ροή.

Αρχικά τα βιοφίλτρα λειτούργησαν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Το πρώτο σταλακτικό φίλτρο τροφοδοτούνταν από δοχείο 25L, το οποίο περιείχε ακροκίδωτα υγρά απόβλητα. Το δεύτερο σταλακτικό φίλτρο τροφοδοτούνταν με υγρά απόβλητα ομοίως από δοχείο 25L αλλά το οποίο περιείχε κροκιδωμένα υγρά απόβλητά.

Πειραματιστήκαμε με διαφορετικούς χρόνους έκχυσης – παύσης έκχυσης των υγρών αποβλήτων στα σταλακτικά φίλτρα, ώστε να επιτύχουμε την καλύτερη επεξεργασία των αποβλήτων. Η παροχή τροφοδοσίας που χρησιμοποιήθηκε ήταν $Q = 1 \text{ L/h}$ με ειδική φόρτιση $q = 0,00796 \text{ m/h}$. Ως αρχική παροχή χρησιμοποιήθηκε η $27,6 \text{ L/day} \sim 1 \text{ L/h}$, με ειδική φόρτιση $q = 0,00796 \text{ m/h}$. Οι τιμές αυτές αποτελούν τις μέγιστες δυνατές τιμές που μπορεί να δεχτούν τα σταλακτικά φίλτρα, για το συγκεκριμένο πληρωτικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε και τις μικρές εργαστηριακές διαστάσεις του σταλακτικού φίλτρου. Το παραπάνω προκύπτει, επιλέγοντας ως υδραυλικό φορτίο $1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$, (βλ. Πίνακας 2). [Metcalf & Eddy, 1979], [WEF, 2000]. Στη συνέχεια επιλέχτηκαν και άλλες παροχές. Τα σενάρια λειτουργίας παρουσιάζονται παρακάτω, (βλ. Πίνακας 3, Πίνακας 4)

Χαρακτηριστικά σχεδίου	Χαμηλός ρυθμός	Μέσος ρυθμός	Υψηλός ρυθμός	Υψηλός ρυθμός	Τραχύτητα
Τύπος υλικού πλήρωσης	Χαλίκια	Χαλίκια	Χαλίκια	Πλαστικό	Χαλίκια/ Πλαστικό
Υδραυλικό φορτίο , $m^3/m^2 \cdot d$	1 έως 4	4 έως 10	10 έως 40	10 έως 75	40 έως 200
Οργανικό φορτίο , $kg BOD/m^3 \cdot d$	0.07-0.22	0.24-0.48	0.4-2.4	0.6-3.2	>1.5
Βαθμός ανακύκλωσης	0	0-1	1 έως 2	1 έως 2	0 έως 2
Μυγάκια φίλτρου	Πολλά	Ποικίλλουν	Λίγα	Λίγα	Λίγα
Επιλύωση	διαλείπουσα	διαλείπουσα	συνεχής	συνεχής	συνεχής
Βάθος , m	1.8-2.4	1.8-2.4	1.8-2.4	3.0-12.2	0.9-6
Ικανότητα απομάκρυνσης BOD , %	80-90	50-80	50-90	60-90	40-70
Ποιότητα εκροών	Καλά νιτροποιημένα	μερική νιτροποίηση	καθόλου νιτροποίηση	καθόλου νιτροποίηση	καθόλου νιτροποίηση
Ισχύς , $kW/10^3 m^3$	2 έως 4	2 έως 8	6 έως 10	6 έως 10	10 έως 20

Πίνακας 2, Ιστορική ταξινόμηση των εφαρμογών των βιολογικών φίλτρων. (Πηγή : Metcalf & Eddy, Inc. (1979) and WEF (2000))

Διακοπτόμενη λειτουργία		
Χρόνος λειτουργίας (min)	Χρόνος παύσης (min)	Παροχή (L/h)
3	1	1
7	1	0.5
1	1	2

Πίνακας 3, Αναλυτική παρουσίαση παροχών τροφοδοσίας και χρόνων λειτουργίας - παύσης των σταλακτικών φίλτρων.

Συνεχής λειτουργία	
Εσωτερική διάμετρος σωλήνα άντλησης (mm)	Παροχή (L/h)
1.5	1.19
2.5	4

Πίνακας 4, Αναλυτική παρουσίαση παροχών φόρτισης των σταλακτικών φίλτρων στη συνεχή λειτουργία.

Έπειτα από λίγο καιρό λειτουργίας των σταλακτικών φίλτρων διαπιστώσαμε ότι το σταλακτικό φίλτρο που τροφοδοτούνταν με κροκιδωμένα απόβλητα και το σταλακτικό φίλτρο που τροφοδοτούνταν με ακροκιδωτά απόβλητα δεν παρουσίαζαν μεγάλες διαφορές στη μείωση του οργανικού φορτίου, όπως αναμενότανε.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος πληροφορηθήκαμε από τους υπευθύνους της μονάδας ότι τα λύματα της πόλης πριν εισέρθουν προς επεξεργασία στη μονάδα βιολογικού καθαρισμού υπόκεινται σε κροκίδωση με τριχλωριούχο σίδηρο. Η κροκίδωση γίνεται ώστε να αντιμετωπιστεί σοβαρό πρόβλημα δυσοσμίας στην γύρω περιοχή, κυρίως όταν έπνεε στην περιοχή ΒΑ άνεμος.

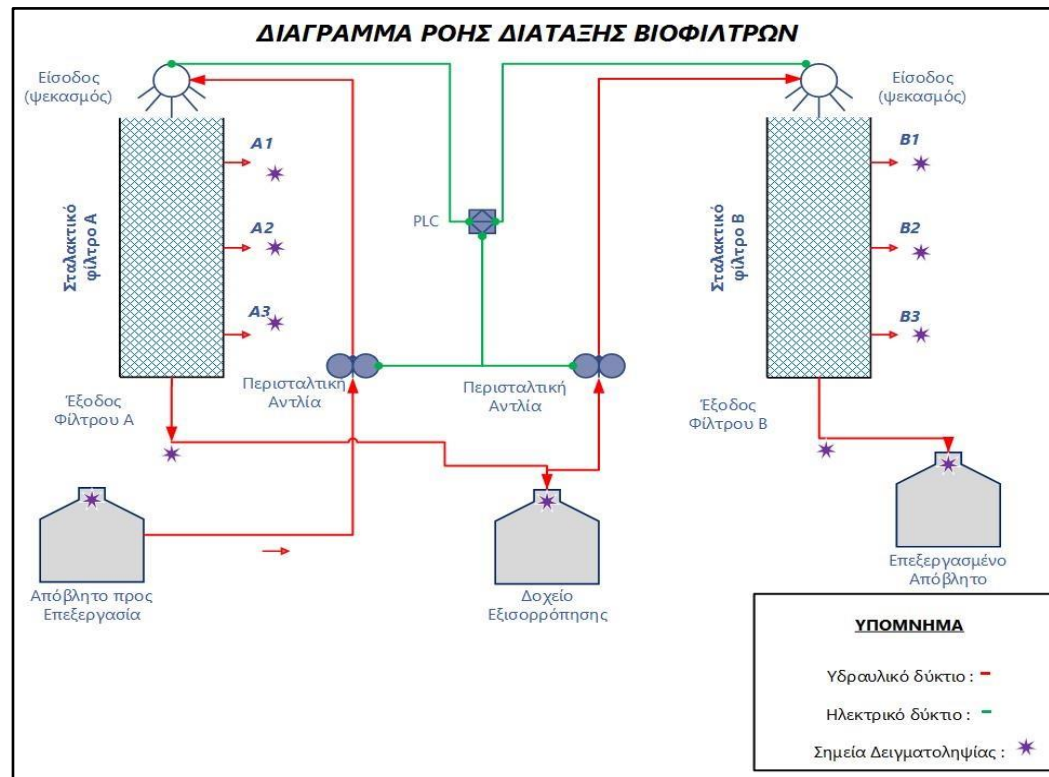
Για να πετύχουμε καλύτερα αποτελέσματα, αλλάξαμε τη διάταξη των φίλτρων. Τα φίλτρα συνδέθηκαν εν σειρά. Η εν σειρά τοποθέτηση μας έδωσε το πλεονέκτημα της δημιουργίας ενός μεγαλύτερου σε μήκος βιόφιλτρου. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την παραμονή των αποβλήτων περισσότερο χρόνο στην επιφάνεια των βιοφορέων, όπου είχε αναπτυχθεί η βιομάζα. Τα απόβλητα ερχόντουσαν σε επαφή με μεγαλύτερη επιφάνεια των βιοφορέων.

Κατ' αρχήν γινόταν άντληση των αποβλήτων και έκχυση τους στο πρώτο σταλακτικό φίλτρο της πειραματικής διάταξης από ένα δοχείο συνολικού όγκου 25 λίτρων. Κατόπιν, η εκροή του πρώτου σταλακτικού φίλτρου συλλεγόταν σε ένα δεύτερο δοχείο που χρησίμευε ως προσωρινή δεξαμενή αποθήκευσης (Buffer). Στη δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης καθίζαναν και τυχόν εναπομείναντα στερεά των αποβλήτων. Η τροφοδοσία της 2^{ου} σταλακτικού φίλτρου άρχιζε όταν στο 2^ο δοχείο (Buffer) των 25L, η στάθμη των υγρών αποβλήτων ανέβαινε σε κατάλληλο επίπεδο ώστε να μπορεί να αντλήσει η αντλία του 2^{ου} σταλακτικού φίλτρου. Η στάθμη των αποβλήτων στη δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης ανέβαινε σε κατάλληλο επίπεδο σε χρόνο περίπου 10 - 15min.

Τέλος, τα απόβλητα από την εκροή του 2^{ου} σταλακτικού φίλτρου συλλεγόταν σε δοχείο των 25L, το οποίο ήταν και η τελική έξοδος της διάταξης. Καθημερινά, γινόταν δειγματοληψία, καταγραφή και ανάλυση των αποτελεσμάτων από το δοχείο εισόδου, το δοχείο προσωρινής αποθήκευσης (buffer) και το δοχείο συλλογής της τελικής εξόδου. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 7.

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα σημεία δειγματοληψίας από τα οποία γινόντουσαν οι μετρήσεις των δεικτών BOD, TOC, $\text{NH}_3\text{-N}$ και TSS παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής της πειραματικής διάταξης, βλ. Εικόνα 37



Εικόνα 37, Διάγραμμα ροής της πειραματικής διάταξης στην οποία φαίνονται τα σημεία δειγματοληψίας.

7.1. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΒΙΟΧΗΜΙΚΑ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΟΞΥΓΟΝΟΥ (BOD)

7.1.1. ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, συγκεκριμένα στους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι μετρήσεις του δείκτη BOD που πραγματοποιήθηκαν στα σταλακτικά φίλτρα στο σενάριο της διακοπτόμενης λειτουργίας. Στο σενάριο της διακοπτόμενης λειτουργίας τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε εν σειρά σύνδεση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τροφοδοσία των φίλτρων με ακροκίδωτο καθώς και κροκιδωμένο λύμα. Στους πίνακες 5α, 5β, 5γ παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικές τιμές παροχής φόρτισης των 2L/h, 1L/h και 0,5L/h αντίστοιχα.

BOD5 - 2L/h												
	Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο					
	5-Σεπ	6-Σεπ	7-Σεπ	8-Σεπ	Μ.Ο.	Τ.Α.	10-Σεπ	11-Σεπ	12-Σεπ	13-Σεπ	Μ.Ο.	Τ.Α.
BOD Είσοδος	248,00	252,00	434,25	350,62	321,22	±89,1	98,5	74,1	79,8	84,6	84,25	±10,4
BOD Δοχείο Εξισορρόπησης	89,00	84,20	193,40	182,30	137,23	±58,7	62,70	64,05	68,25	53,10	62,03	±6,4
BOD Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	64%	67%	55%	48%	59%	±0,1	36%	14%	14%	37%	25%	±0,1
BOD Έξοδος	67,00	46,65	67,80	54,30	58,94	±10,3	42,625	50,4	51,6	47,4	48,01	±4,0
BOD Συνολική Απομάκρυνση	73%	81%	84%	85%	81%	±0,1	57%	32%	35%	44%	42%	±0,1

Πίνακας 5α, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

BOD5 - 1L/h												
	Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο					
	26-Αυγ	27-Αυγ	28-Αυγ	29-Αυγ	M.O.	T.A.	1-Σεπ	2-Σεπ	3-Σεπ	4-Σεπ	M.O.	T.A.
BOD Είσοδος	231,50	228,75	172,75	190,25	205,81	±29,0	187,5	226,25	205,25	212,6	207,90	±16,1
BOD Δοχείο Εξισορρόπησης	53,55	81,60	56,70	70,48	65,58	±13,0	62,60	88,40	75,30	68,7	73,75	±11,1
BOD Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	77%	64%	67%	63%	68%	±0,1	67%	61%	63%	68%	65%	±0,0
BOD Έξοδος	18,00	43,05	24,13	25,80	27,74	±10,7	24,8	32,2	27,6	26,7	27,83	±3,1
BOD Συνολική Απομάκρυνση	92%	81%	86%	86%	86%	±0,0	87%	86%	87%	87%	87%	±0,0

Πίνακας 5β, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

BOD5 - 0,5L/h												
	Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο					
	23-Ιουλ	24-Ιουλ	25-Ιουλ	26-Ιουλ	M.O.	T.A.	30-Ιουλ	31-Ιουλ	1-Αυγ	2-Αυγ	M.O.	T.A.
BOD Είσοδος	198,00	169,00	231,00	188,50	196,63	±25,9	231	219	105,5	164,7	180,05	±57,5
BOD Δοχείο Εξισορρόπησης	56,70	36,45	51,00	45,70	47,46	±8,6	51	57,38	21,25	34,2	40,96	±16,4
BOD Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	71%	78%	78%	76%	76%	±0,0	78%	74%	80%	79%	78%	±0,0
BOD Έξοδος	33,63	25,38	35,00	28,40	30,60	±4,5	35	25,95	16,65	31,5	27,28	±8,0
BOD Συνολική Απομάκρυνση	83%	85%	85%	85%	84%	±0,0	85%	88%	84%	81%	85%	±0,0

Πίνακας 5γ, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

7.1.2. ΣΥΝΕΧΗΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, συγκεκριμένα στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις του δείκτη BOD που πραγματοποιήθηκαν στα σταλακτικά φίλτρα στο σενάριο της συνεχούς 24ωρης των φίλτρων. Στο σενάριο της συνεχούς λειτουργίας τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε εν σειρά σύνδεση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τροφοδοσία των σταλακτικών φίλτρων με ακροκίδωτο καθώς και κροκιδωμένο λύμα. Στους πίνακες 6α, 6β παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικές τιμές παροχής φόρτισης των 4L/h, 1L/h αντίστοιχα.

BOD5 - 4L/h					
	Ακροκίδωτο				
	22-Σεπ	23-Σεπ	24-Σεπ	M.O	T.A.
BOD Είσοδος	246,00	330,38	252,00	276,13	±47,1
BOD Δοχείο Εξισορρόπησης	128,25	194,70	129,90	150,95	±37,9
BOD Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	48%	41%	48%	46%	±0,0
BOD Έξοδος	107,20	145,00	78,25	110,15	±33,5
BOD Συνολική Απομάκρυνση	56%	56%	69%	60%	±0,1

Πίνακας 6α , Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

BOD5 - 1L/h					
	Ακροκίδωτο				
	25-Σεπ	26-Σεπ	27-Σεπ	Μ.Ο	Τ.Α.
BOD Είσοδος	202,13	150,15	151,55	167,94	±29,6
BOD Δοχείο Εξισορρόπησης	81,00	54,00	53,60	62,87	±15,7
BOD Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	60%	64%	65%	63%	±0,0
BOD Έξοδος	79,75	41,65	38,50	53,30	±23,0
BOD Συνολική Απομάκρυνση	61%	72%	75%	69%	±0,1

Πίνακας 6β , Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή τροφοδοσία 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

7.1.3. ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, συγκεκριμένα στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις του δείκτη BOD που πραγματοποιήθηκαν στα σταλακτικά φίλτρα στο σενάριο της παράλληλης σύνδεση των φίλτρων και 24ωρη συνεχής λειτουργία. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τροφοδοσία των φίλτρων με ακροκίδωτο καθώς και κροκιδωμένο λύμα. Στο πίνακα 7 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη BOD για παροχή φόρτιση 1L/h.

		BOD ₅										
		2-Απρ	3-Απρ	4-Απρ	11-Απρ	30-Απρ	28-Μαϊ	29-Μαϊ	30-Μαϊ	18-Ιουν	M.O.	T.A.
Ακροκίδωτο	BOD Είσοδος	198,93	170,55	165,15	133,05	213,25	205,25	187,5	237,25	266,25	197,46	±39,8
	BOD Έξοδος	82,00	63,15	58,65	29,85	76,35	58,5	91	62,5	71,5	65,94	±17,5
	BOD Απομ/ση	59%	63%	64%	78%	64%	71%	51%	74%	73%	66%	±0,1
Κροκιδωμένο	BOD Είσοδος	190,00	156,00	151,95	107,4	144	146,25	156,25	186,25	182,5	157,84	±25,9
	BOD Έξοδος	63,20	45,75	37,65	22,8	45,9	35,5	72,25	64	43,5	47,84	±15,8
	BOD Απομ/ση	67%	71%	75%	79%	68%	76%	54%	66%	76%	70%	±0,1

Πίνακας 7 , Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και παράλληλη σύνδεση.

7.2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΟΛΙΚΟΥ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΆΝΘΡΑΚΑ (TOC)

7.2.1. ΔΙΑΚΑΠΤΟΜΕΝΗ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, συγκεκριμένα στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις του δείκτη TOC που πραγματοποιήθηκαν στα σταλακτικά φίλτρα στο σενάριο της διακοπτόμενης λειτουργίας. Στο σενάριο της διακοπτόμενης λειτουργίας τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε εν σειρά σύνδεση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τροφοδοσία των φίλτρων με ακροκίδωτο καθώς και κροκιδωμένο λύμα. Στους πίνακες 8α, 8β, 8 γ παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικές τιμές παροχής φόρτισης των 2L/h, 1L/h και 0,5L/h αντίστοιχα.

TOC - 2L/h												
	Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο					
	5-Σεπ	6-Σεπ	7-Σεπ	8-Σεπ	M.O.	S.D.	10-Σεπ	11-Σεπ	12-Σεπ	13-Σεπ	M.O.	T.A.
TOC Είσοδος	130,10	133,10	157,90	142,30	140,85	±12,5	96,62	92,4	98,24	95,7	95,74	±2,5
TOC Δοχείο Εξισορρόπησης	62,70	61,10	69,34	59,70	63,21	±4,3	38,78	32,60	35,70	34,50	35,40	±2,6
TOC Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	52%	54%	56%	58%	55%	±0,0	60%	65%	64%	64%	63%	±0,0
TOC Έξοδος	46,77	20,36	49,80	23,70	35,16	±15,3	18,61	15,7	16,9	16,2	16,85	±1,3
TOC Συνολική Απομάκρυνση	64%	85%	68%	83%	75%	±0,1	81%	83%	83%	83%	82%	±0,0

Πίνακας 8α, Παρουσίαση μετρήσεων TOC με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

TOC - 1L/h												
	Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο					
	26-Αυγ	27-Αυγ	28-Αυγ	29-Αυγ	M.O.	S.D.	1-Σεπ	2-Σεπ	3-Σεπ	4-Σεπ	M.O.	T.A.
TOC Είσοδος	120,60	138,40	142,50	139,70	135,30	±9,9	89,5	95,8	88,6	87,8	90,43	±3,7
TOC Δοχείο Εξισορρόπησης	44,85	47,54	31,51	50,20	43,53	±8,3	32,50	34,90	23,80	25,4	29,15	±5,4
TOC Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	63%	66%	78%	64%	68%	±0,1	64%	64%	73%	71%	68%	±0,0
TOC Έξοδος	38,41	22,84	24,83	23,70	27,45	±7,4	18,4	23,2	16,9	18,6	19,28	±2,7
TOC Συνολική Απομάκρυνση	68%	83%	83%	83%	79%	±0,1	79%	76%	81%	79%	79%	±0,0

Πίνακας 8β, Παρουσίαση μετρήσεων TOC με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

TOC - 0,5L/h												
	Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο					
	23-Ιουλ	24-Ιουλ	25-Ιουλ	26-Ιουλ	M.O.	S.D.	30-Ιουλ	31-Ιουλ	1-Αυγ	2-Αυγ	M.O.	T.A.
TOC Είσοδος	142,50	129,10	139,90	130,60	135,53	±6,7	90,87	90,49	84,25	92,7	89,58	±3,7
TOC Δοχείο Εξισορρόπησης	31,51	22,65	25,48	23,70	25,84	±4,0	11,11	7,24	9,48	10,4	9,56	±1,7
TOC Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	78%	82%	82%	82%	81%	±0,0	88%	92%	89%	89%	89%	±0,0
TOC Έξοδος	24,83	16,23	16,32	18,40	18,95	±4,0	21,67	7,12	8,06	8,17	11,26	±7,0
TOC Συνολική Απομάκρυνση	83%	87%	88%	86%	86%	±0,0	76%	92%	90%	91%	87%	±0,1

Πίνακας 8γ, Παρουσίαση μετρήσεων TOC με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

7.2.2. ΣΥΝΕΧΗΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, συγκεκριμένα στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις του δείκτη TOC που πραγματοποιήθηκαν στα σταλακτικά φίλτρα στο σενάριο της συνεχούς 24ωρης των φίλτρων. Στο σενάριο της συνεχούς λειτουργίας τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε εν σειρά σύνδεση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τροφοδοσία των σταλακτικών φίλτρων με ακροκίδωτο καθώς και κροκιδωμένο λύμα. Στους πίνακες 9α, 9β παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικές τιμές παροχής φόρτισης των 4L/h, 1L/h αντίστοιχα.

TOC - 4L/h					
	Ακροκίδωτο				
	22-Σεπ	23-Σεπ	24-Σεπ	Μ.Ο	Τ.Α.
TOC Είσοδος	138,00	140,90	137,90	138,93	±1,7
TOC Δοχείο Εξισορρόπησης	105,70	98,21	95,70	99,87	±5,2
TOC Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	23%	30%	31%	28%	±0,0
TOC Έξοδος	86,67	82,16	83,40	84,08	±2,3
TOC Συνολική Απομάκρυνση	37%	42%	40%	39%	±0,0

Πίνακας 9α, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

TOC - 1L/h					
	Ακροκίδωτο				
	25-Σεπ	26-Σεπ	27-Σεπ	Μ.Ο	Τ.Α.
TOC Είσοδος	131,80	115,80	130,80	126,13	±9,0
TOC Δοχείο Εξισορρόπησης	30,90	36,18	30,66	32,58	±3,1
TOC Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	77%	69%	77%	74%	±0,0
TOC Έξοδος	14,80	13,52	13,63	13,98	±0,7
TOC Συνολική Απομάκρυνση	89%	88%	90%	89%	±0,0

Πίνακας 9β, Παρουσίαση μετρήσεων BOD με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή τροφοδοσία 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

7.2.3. ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, συγκεκριμένα στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις του δείκτη TOC που πραγματοποιήθηκαν στα σταλακτικά φίλτρα στο σενάριο της παράλληλης σύνδεση των φίλτρων και 24ωρη συνεχής λειτουργία. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τροφοδοσία των φίλτρων με ακροκίδωτο καθώς και κροκιδωμένο λύμα. Στο πίνακα 10 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη TOC για παροχή φόρτιση 1L/h.

		TOC								
		27-Μαΐ	28-Μαΐ	29-Μαΐ	30-Μαΐ	5-Ιουν	6-Ιουν	18-Ιουν	M.O.	T.A.
Ακροκίδωτο	TOC Είσοδος	143,00	174,50	168,70	160,3	157,5	150,3	178,1	161,77	±12,8
	TOC Έξοδος	97,00	86,35	80,55	72,72	95,8	77,31	75,74	83,64	±9,7
	TOC Απομ/ση	32%	51%	52%	55%	39%	49%	57%	48%	±0,1
Κροκιδωμένο	TOC Είσοδος	116,00	131,90	128,20	100,3	118,6	105,3	127,2	118,21	±12,0
	TOC Έξοδος	44,50	34,25	37,25	30,17	47,54	37,44	31,58	37,53	±6,4
	TOC Απομ/ση	62%	74%	71%	70%	60%	64%	75%	68%	±0,1

Πίνακας 10, Παρουσίαση μετρήσεων TOC με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και παράλληλη σύνδεση.

7.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΜΜΩΝΙΑΚΩΝ (NH₃-N)

7.3.1. ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΗ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, συγκεκριμένα στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις του δείκτη NH₃-N που πραγματοποιήθηκαν στα σταλακτικά φίλτρα στο σενάριο της διακοπτόμενης λειτουργίας. Στο σενάριο της διακοπτόμενης λειτουργίας τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε εν σειρά σύνδεση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τροφοδοσία των φίλτρων με ακροκίδωτο καθώς και κροκιδωμένο λύμα. Στους πίνακες 11α, 11β, 11γ παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικές τιμές παροχής φόρτισης των 2L/h, 1L/h και 0,5L/h αντίστοιχα.

NH ₃ -N - 2L/h												
	Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο					
	5-Σεπ	6-Σεπ	7-Σεπ	8-Σεπ	M.O.	S.D.	10-Σεπ	11-Σεπ	12-Σεπ	13-Σεπ	M.O.	T.A.
NH ₃ -N Είσοδος	44,00	50,50	47,60	48,30	47,60	±2,7	48,8	50,25	49,7	51,4	50,04	±1,1
NH ₃ -N Δοχείο Εξισορρόπησης	22,00	24,00	23,60	24,50	23,53	±1,1	18,80	21,25	22,50	23,60	21,54	±2,1
NH ₃ -N Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	50%	52%	50%	49%	51%	±0,0	61%	58%	55%	54%	57%	±0,0
NH ₃ -N Έξοδος	5,75	14,25	7,83	10,40	9,56	±3,7	13,8	18,75	14,5	15,7	15,69	±2,2
NH ₃ -N Συνολική Απομάκρυνση	87%	72%	84%	78%	80%	±0,1	72%	63%	71%	69%	69%	±0,0

Πίνακας 11α, Παρουσίαση μετρήσεων NH₃-N με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπτόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

NH ₃ -N - 1L/h												
	Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο					
	26-Αυγ	27-Αυγ	28-Αυγ	29-Αυγ	M.O.	S.D.	1-Σεπ	2-Σεπ	3-Σεπ	4-Σεπ	M.O.	T.A.
NH ₃ -N Είσοδος	50,50	64,20	52,40	53,20	55,08	±6,2	59,8	49,8	56,2	51,7	54,38	±4,5
NH ₃ -N Δοχείο Εξισορρόπησης	17,25	18,60	15,30	17,40	17,14	±1,4	20,30	19,60	14,80	20,4	18,78	±2,7
NH ₃ -N Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	66%	71%	71%	67%	69%	±0,0	66%	61%	74%	61%	65%	±0,1
NH ₃ -N Έξοδος	9,25	12,40	8,60	10,40	10,16	±1,7	9,6	18,3	10,3	19,7	14,48	±5,3
NH ₃ -N Συνολική Απομάκρυνση	82%	81%	84%	80%	82%	±0,0	84%	63%	82%	62%	73%	±0,1

Πίνακας 11β, Παρουσίαση μετρήσεων NH₃-N με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

NH₃-N - 0,5L/h												
	Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο					
	23-Ιουλ	24-Ιουλ	25-Ιουλ	26-Ιουλ	M.O.	S.D.	30-Ιουλ	31-Ιουλ	1-Αυγ	2-Αυγ	M.O.	T.A.
NH₃-N Είσοδος	51,70	49,00	53,25	50,70	51,16	±1,8	59,5	55,3	51,75	54,7	55,31	±3,2
NH₃-N Δοχείο Εξισορρόπησης	3,80	2,50	4,50	3,50	3,58	±0,8	22,75	19,60	27,00	18,4	21,94	±3,8
NH₃-N Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	93%	95%	92%	93%	93%	±0,0	62%	65%	48%	66%	60%	±0,1
NH₃-N Έξοδος	0,60	0,50	0,50	0,70	0,58	±0,1	17,25	15,4	21,5	16,6	17,69	±2,7
NH₃-N Συνολική Απομάκρυνση	99%	99%	99%	99%	99%	±0,0	71%	72%	58%	70%	68%	±0,1

Πίνακας 11γ, Παρουσίαση μετρήσεων NH₃-N με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε διακοπόμενη λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

7.3.2. ΣΥΝΕΧΗΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, συγκεκριμένα στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις του δείκτη $\text{NH}_3\text{-N}$ που πραγματοποιήθηκαν στα σταλακτικά φίλτρα στο σενάριο της συνεχούς 24ωρης των φίλτρων. Στο σενάριο της συνεχούς λειτουργίας τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε εν σειρά σύνδεση. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τροφοδοσία των σταλακτικών φίλτρων με ακροκίδωτο καθώς και κροκιδωμένο λύμα. Στους πίνακες 12α, 12β παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικές τιμές παροχής φόρτισης των 4L/h, 1L/h αντίστοιχα.

$\text{NH}_3\text{-N}$ - 4L/h					
	Ακροκίδωτο				
	22-Σεπ	23-Σεπ	24-Σεπ	Μ.Ο	Τ.Α.
$\text{NH}_3\text{-N}$ Είσοδος	46,00	42,30	49,20	45,83	±3,5
$\text{NH}_3\text{-N}$ Δοχείο Εξισορρόπησης	37,00	29,20	38,10	34,77	±4,9
$\text{NH}_3\text{-N}$ Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	20%	31%	23%	24%	±0,1
$\text{NH}_3\text{-N}$ Έξοδος	31,25	25,60	32,40	29,75	±3,6
$\text{NH}_3\text{-N}$ Συνολική Απομάκρυνση	32%	39%	34%	35%	±0,0

Πίνακας 12α, Παρουσίαση μετρήσεων $\text{NH}_3\text{-N}$ με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

NH₃-N - 1L/h					
	Ακροκίδωτο				
	25-Σεπ	26-Σεπ	27-Σεπ	Μ.Ο	Τ.Α.
NH₃-N Είσοδος	39,50	64,20	52,40	52,03	±12,4
NH₃-N Δοχείο Εξισορρόπησης	10,75	18,60	15,30	14,88	±3,9
NH₃-N Απομάκρυνση Πρώτης Στήλης	73%	71%	71%	72%	±0,0
NH₃-N Έξοδος	0,00	12,40	8,60	7,00	±6,4
NH₃-N Συνολική Απομάκρυνση	100%	81%	84%	88%	±0,1

Πίνακας 12β, Παρουσίαση μετρήσεων NH₃-N με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή τροφοδοσία 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και εν σειρά σύνδεση.

7.3.3. ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΤΗΛΩΝ ΒΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, συγκεκριμένα στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις του δείκτη $\text{NH}_3\text{-N}$ που πραγματοποιήθηκαν στα σταλακτικά φίλτρα στο σενάριο της παράλληλης σύνδεση των φίλτρων και 24ωρη συνεχή λειτουργία. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τροφοδοσία των φίλτρων με ακροκίδωτο καθώς και κροκιδωμένο λύμα. Στο πίνακα 13 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη $\text{NH}_3\text{-N}$ για παροχή φόρτιση 1L/h.

		$\text{NH}_3\text{-N}$										
		27-Μαρ	28-Μαρ	1-Απρ	2-Απρ	3-Απρ	7-Απρ	8-Απρ	29-Μαΐ	30-Μαΐ	Μ.Ο.	Τ.Α.
Ακροκίδωτο	$\text{NH}_3\text{-N}$ Είσοδος	54,50	55,00	54,00	49	52,5	54	52	52	47,75	52,31	±2,5
	$\text{NH}_3\text{-N}$ Έξοδος	36,00	33,00	32,00	26,75	22,25	16,5	15,5	17,5	19,25	24,31	±7,8
	$\text{NH}_3\text{-N}$ Απομ/ση	34%	40%	41%	45%	58%	69%	70%	66%	60%	54%	±0,1
Κροκιδωμένο	$\text{NH}_3\text{-N}$ Είσοδος	50,50	52,00	53,00	50	50,5	51	47	50,25	44,25	49,83	±2,7
	$\text{NH}_3\text{-N}$ Έξοδος	45,00	29,00	30,00	14,5	34,75	14	12,5	33,5	26,75	26,67	±11,0
	$\text{NH}_3\text{-N}$ Απομ/ση	11%	44%	43%	71%	31%	73%	73%	33%	40%	47%	±0,2

Πίνακας 13, Παρουσίαση μετρήσεων $\text{NH}_3\text{-N}$ με τροφοδοσία ακροκίδωτων και κροκιδωμένων αποβλήτων με παροχή 1L/h. Τα σταλακτικά φίλτρα είναι σε συνεχή λειτουργία και παράλληλη σύνδεση.

7.4. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΙΩΡΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ (TSS)

Η μέθοδος με την οποία μετρήθηκαν τα συνολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) των δειγμάτων, ήταν η κλασσική μέθοδος διήθησης και ζύγισης φίλτρων. Μετρήσεις συνολικά αιωρούμενων στερεών πραγματοποιήθηκαν σε τρία σημεία εκροής των αποβλήτων της διάταξης των σταλακτικών φίλτρων. Πρώτα, γινόταν καταμέτρηση των ολικά αιωρούμενων στερεών στα αποβλήτων πριν εισέρθουν προς επεξεργασία με τα σταλακτικά φίλτρα. Έπειτα, η δεύτερη καταμέτρηση γινόταν στην δεξαμενή εξισορρόπησης. Στη δεξαμενή εξισορρόπησης συλλεγότανε η εκροή του πρώτου σταλακτικού φίλτρου από την οποία τροφοδοτούνταν το δεύτερο σταλακτικό φίλτρο. Τέλος, καταμέτρηση των συνολικά αιωρούμενων στερεών γινόταν και στη συνολική εκροή αποβλήτων της διάταξης των σταλακτικών φίλτρων. (βλ. πίνακα 22)

TSS			
Σημείο δειγματοληψίας	πριν την βιολογική επεξεργασία	μετά τη βιολογική επεξεργασία	
		Ακροκίδωτο	Κροκιδωμένο
TSS (Είσοδος)	325	35	7
TSS (Δεξαμενή Εξισορρόπησης)	310	0	0
Απομ. (Πρώτο Στάδιο Απομάκρυνση)	5%	100%	100%
TSS (Έξοδος)	116,5	0	0
Απομ. (Συνολική Απομάκρυνση)	64%	100%	100%

Πίνακας 14, Μετρήσεις συνολικών αιωρούμενων στερεών στα σημεία δειγματοληψίας πριν και μετά τη βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων με τα σταλακτικά φίλτρα.

8. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η αποτελεσματικότητα της χρήσης των σταλακτικών φίλτρων στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων μετρήθηκε σε τρία διαφορετικά σενάρια μεταβάλλοντας ,

- την παροχή των αποβλήτων στα σταλακτικά φίλτρα
- τον τρόπο σύνδεσης των δύο στηλών των σταλακτικών φίλτρων και
- τη χρήση κροκιδωμένων και ακροκιδωτων αποβλήτων

Συγκεκριμένα έγιναν μετρήσεις σε

- **Διακοπτόμενη λειτουργία των σταλακτικών φίλτρων στο 24ωρο**

Παροχή: $Q = 2 \text{ L/h}$,

Παροχή: $Q = 1 \text{ L/h}$,

Παροχή: $Q = 0,5 \text{ L/h}$

- **Συνεχή λειτουργία των σταλακτικών φίλτρων στο 24ωρο**

Παροχή: $Q = 4 \text{ L/h}$,

Παροχή: $Q = 1 \text{ L/h}$,

- **Ανεξάρτητη συνεχόμενη λειτουργία των δύο στηλών σταλακτικών φίλτρων**

Παροχή: $Q = 1 \text{ L/h}$,

Παρακάτω θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε σενάριο λειτουργίας και τις διάφορες παροχές όπου δοκιμάστηκε το κάθε σενάριο. Τέλος, ακολουθούν συγκριτικά στοιχεία.

8.1. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ BOD

Κατά τις μετρήσεις του δείκτη BOD παρατηρούμε μεγαλύτερη απομάκρυνση στη τελική έξοδο του σεναρίου διακοπτόμενης λειτουργίας. Η μεγαλύτερη απομάκρυνση παρατηρείται τόσο στις περιπτώσεις όπου η τροφοδοσία των στηλών γίνεται με ακροκίδωτα, όσο και με κροκιδωμένα απόβλητα.

Στη τροφοδοσία εν σειρά συνδεδεμένων στηλών με κροκιδωμένο λύμα, με παροχή 2L/h (*πίνακας 16*), δεν παρατηρείται μεγάλο ποσοστό απομάκρυνσης στη πρώτη στήλη αλλά μόνο στη δεύτερη στήλη. Το γεγονός αυτό δεν συμβαίνει στις άλλες περιπτώσεις (παροχές 1L/h και 0.5 L/h) της διακοπτόμενης λειτουργίας όπου έχουν μεγάλη απομάκρυνση και στις δύο στήλες

Το μεγαλύτερο ποσοστό απομάκρυνσης παρατηρείτε κατά τη τροφοδοσία των στηλών με τη μικρότερη παροχή 0,5L/h (*πίνακας 16*). Στις περιπτώσεις κροκιδωμένου και ακροκίδωτου λύματος, οι απομακρύνσεις είναι 85% και 84%, αντίστοιχα (*πίνακας 16*). Αυτό εξηγείται διότι τα απόβλητα έχει αρκετό χρόνο να έρθει σε επαφή με του μικροοργανισμούς που έχουν αναπτυχθεί πάνω στους βιοφορείς.

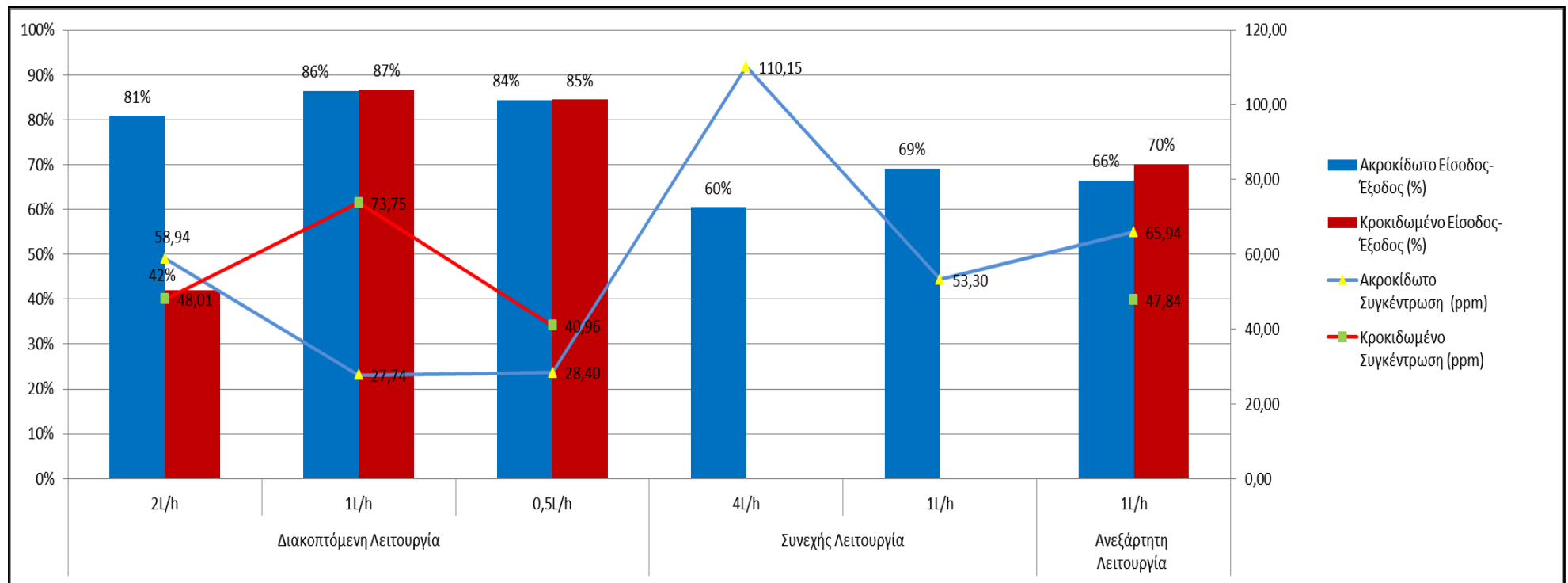
Στη περίπτωση συνεχούς ροής καθώς και στη περίπτωση των διαχωρισμένων στηλών παρατηρούνται ίδια ποσοστά απομάκρυνσης BOD. Αυτά κυμαίνονται κατά μέσο όρο στο 65% . Αυτό πιθανόν οφείλεται στον μικρή διάρκεια επαφής των αποβλήτων με τους μικροοργανισμούς.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η διακοπτόμενη λειτουργία με την μικρότερη παροχή αποβλήτων (0,5L/h) δίνει καλύτερα αποτελέσματα απομάκρυνσης. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι με τη διάταξη αυτή ο χρόνος παραμονής / επαφής των αποβλήτων με τη προσκολλημένη βιομάζα στους βιοφορείς είναι μεγαλύτερος.

Για την διευκόλυνση της λήψης συμπερασμάτων από τις μετρήσεις, κατασκευάστηκαν οι ακόλουθοι πίνακες και γραφήματα:

Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο			
		Πρώτο Στάδιο Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)	Συνολική Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)	Πρώτο Στάδιο Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)	Συνολική Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)
Διακοπτόμενη Λειτουργία	2L/h	59%	137,23, $\pm 50,8$	81%	58,94 $\pm 8,9$	25%	62,03 $\pm 5,5$	42%	48,01 $\pm 3,5$
	1L/h	68%	65,58 $\pm 11,2$	86%	27,74 $\pm 9,3$	65%	73,75 $\pm 9,6$	87%	27,83 $\pm 2,7$
	0,5L/h	76%	47,46 $\pm 7,5$	84%	30,60 $\pm 3,9$	78%	40,96 $\pm 14,2$	85%	28,28 $\pm 6,9$
Συνεχής Λειτουργία	4L/h	46%	150,95 $\pm 30,9$	60%	110,15 $\pm 27,3$				
	1L/h	63%	62,87 $\pm 12,8$	69%	53,30 $\pm 18,7$				
Ανεξάρτητη Λειτουργία	1L/h			66%	65,94 $\pm 12,5$			70%	47,84 $\pm 14,9$

Πίνακας 15, Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων όρων απομάκρυνσης BOD ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων



Γράφημα 3, Συγκεντρωτικός γράφημα μέσω των όρων απομάκρυνσης BOD ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων. Οι τιμές στο γράφημα αφορούν ποσοστιαία απομάκρυνση καθώς και την αντίστοιχη συγκέντρωση.

8.2. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ TOC

Η εκδοχή της διακοπτόμενης λειτουργίας των σταλακτικών φίλτρων καταγράφει υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) στα αστικά απόβλητα που επεξεργαστήκαμε. Υψηλό ποσοστό απομάκρυνσης του ολικού οργανικού άνθρακα παρατηρήθηκε και στα ακροκιδωτά απόβλητα και στα κροκιδωμένα. Με υψηλότερο ποσοστά να καταγράφεται στα κροκιδωμένα απόβλητα. Αντίθετα, εάν υιοθετήσουμε το σενάριο της συνεχούς λειτουργίας των σταλακτικών φίλτρων, τα ποσοστά απομάκρυνσης είναι χαμηλά.

Στη περίπτωση της ανεξάρτητης λειτουργίας των σταλακτικών φίλτρων, τα ποσοστά απομάκρυνσης ολικού οργανικού άνθρακα κυμαίνονται σε ακόμη πιο χαμηλά επίπεδα.

Υψηλές απομακρύνσεις εμφανίζονται σε όλες τις παροχές τροφοδοσίας (0.5L/h, 1L/h, 2L/h) τις διακοπτόμενης λειτουργίας σε κροκιδωμένα ή ακροκιδωτά απόβλητα. Υψηλότερες απομακρύνσεις εμφανίζονται στη περίπτωση των κροκιδωμένων αποβλήτων 87% με παροχή 0.5L/h.

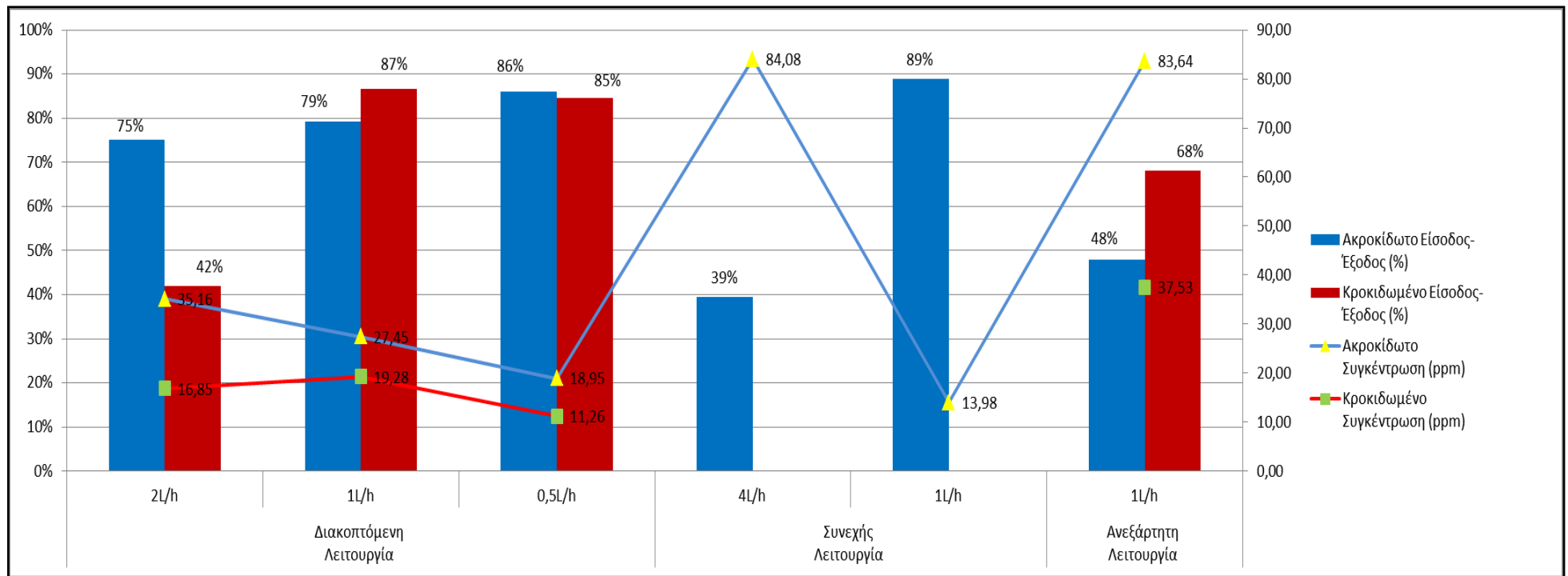
Επίσης, στην συνεχή λειτουργία με τροφοδοσία ακροκιδωτών αποβλήτων, παρατηρείται υψηλό ποσοστό απομάκρυνσης 89% με παροχή 1L/h. Σε αντίθεση, στο ίδιο σενάριο συνεχούς λειτουργίας, η μεγαλύτερη παροχή δίνει πολύ χαμηλά ποσοστά τις τάξης του 39% .

Στη περίπτωση της λειτουργίας ανεξάρτητων στηλών τα ποσοστά απομάκρυνσης κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα. Εάν τροφοδοτήσουμε το φίλτρο με κροκιδωμένα απόβλητα επιτυγχάνουμε συνολική απομάκρυνση 68% έναντι 48% των κροκιδωμένων αποβλήτων.

Για την διευκόλυνση της λήψης συμπερασμάτων από τις μετρήσεις, κατασκευάστηκαν οι ακόλουθοι πίνακες και γραφήματα:

Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο			
		Πρώτο Στάδιο Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)	Συνολική Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)	Πρώτο Στάδιο Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)	Συνολική Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)
Διακοπτόμενη Λειτουργία	2L/h	55%	63,21 ±3,7	75%	35,16 ±13,2	63%	35,40 ±2,2	82%	16,85 ±1,1
	1L/h	68%	43,53 ±7,2	79%	27,45 ±6,4	68%	29,15 ±4,7	79%	19,28 ±2,4
	0,5L/h	81%	25,84 ±3,4	86%	18,95 ±3,5	89%	9,56 ±1,5	87%	11,26 ±6,0
Συνεχής Λειτουργία	4L/h	28%	99,87 ±4,2	39%	84,08 ±1,9				
	1L/h	74%	32,58 ±2,5	89%	13,98 ±0,6				
Ανεξάρτητη Λειτουργία	1L/h			48%	83,64 ±0,8			68%	37,53 ±2,9

Πίνακας 16, Συγκεντρωτικός πίνακας μέσω των όρων απομάκρυνσης TOC ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων



Γράφημα 4, Συγκεντρωτικός γράφημα μέσω των όρων απομάκρυνσης TOC ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων. Οι τιμές στο γράφημα αφορούν ποσοστιαία απομάκρυνση καθώς και την αντίστοιχη συγκέντρωση.

8.3. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ $\text{NH}_3\text{-N}$

Εκτιμώντας τα αποτελέσματα που μας έδωσε το πείραμα όσον αναφορά την απομάκρυνση των αμμωνιακών $\text{NH}_3\text{-N}$, παρατηρεί κανείς ότι η διακοπτόμενη λειτουργία, για άλλη μια φορά, δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα στη συνολική απομάκρυνση των αμμωνιακών.

Πιο συγκεκριμένα, στο σύστημα που επεξεργαζόταν ακροκίδωτα και όχι κροκιδωμένα απόβλητα, παρατηρείτε απομάκρυνση της τάξης του 99%, με μικρή παροχή αποβλήτων (0.5L/h).

Στο σενάριο L/ητης διακοπτόμενης λειτουργίας με τροφοδοσία ακροκίδωτων αποβλήτων, επιτυγχάνονται μεγάλα ποσοστά απομάκρυνσης και στις τρεις διαφορετικές παροχές (0.5L/h, 1L/h, 2L/h). Το υψηλό ποσοστό απομάκρυνσης παρατηρείται στην εκροή της πρώτης στήλης με ακροκίδωτα απόβλητα. Έγιναν 4^{εις} μετρήσεις συνολικά με $C_{M.O.} = 0.58 \text{ ppm} \pm 0.1$. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται στις άλλες παροχές του ίδιου σεναρίου διακοπτόμενης λειτουργίας.

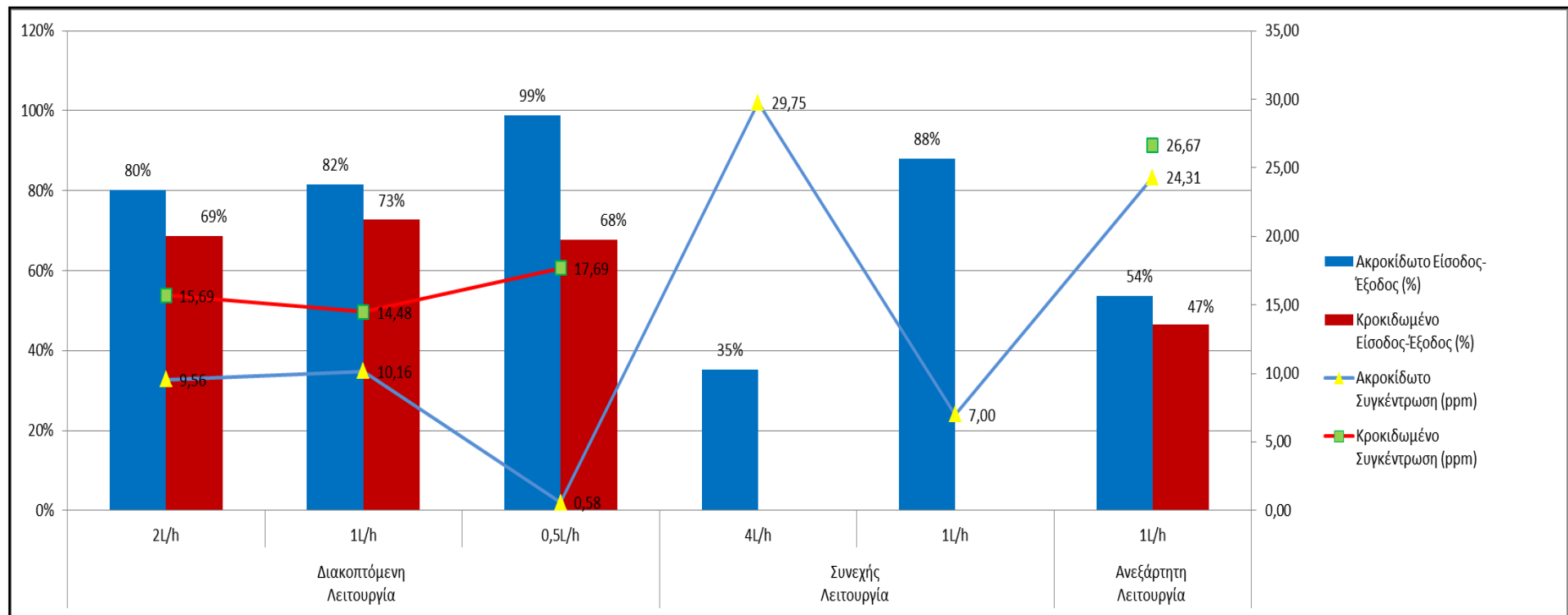
Ικανοποιητικά ποσοστά απομάκρυνσης παρατηρούμε και στο σενάριο της συνεχούς λειτουργίας, με παροχή ακροκίδωτου λύματος 1L/h. Με το σενάριο αυτό έχουμε ποσοστό απομάκρυνσης 88% και συγκέντρωση 7ppm $\text{NH}_3\text{-N}$ στην εκροή του φίλτρου.

Τέλος, στο σενάριο των ανεξάρτητων στηλών βιοφίλτρου, δεν υπάρχουν αξιόλογα ποσοστά απομάκρυνσης $\text{NH}_3\text{-N}$. είτε με τροφοδοσία με κροκιδωμένων αποβλήτων είτε με τροφοδοσία με ακροκίδωτων αποβλήτων.

Για την διευκόλυνση της λήψης συμπερασμάτων από τις μετρήσεις, κατασκευάστηκαν οι ακόλουθοι πίνακες και γραφήματα:

Ακροκίδωτο						Κροκιδωμένο			
		Πρώτο Στάδιο Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)	Συνολική Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)	Πρώτο Στάδιο Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)	Συνολική Απομάκρυνση	Μέση Συγκέντρωση (ppm)
Διακοπτόμενη Λειτουργία	2L/h	51%	23,53 ±0.9	80%	9,56 ±3.2	57%	21,54 ±1.8	69%	15,69 ±1.9
	1L/h	69%	17,14 ±1.2	82%	10,16 ±1.4	65%	18,78 ±2.3	73%	14,48 ±4.6
	0,5L/h	93%	3,58 ±0.7	99%	0,58 ±0.1	60%	21,94 ±3.3	68%	17,69±2.3
Συνεχής Λειτουργία	4L/h	24%	34,77 ±4.0	35%	29,75 ±3.0				
	1L/h	72%	14,88 ±3.2	88%	7,00 ±5.2				
Ανεξάρτητη Λειτουργία	1L/h			54%	24,31 ±0.9			47%	26,67 ±3.4

Πίνακας 17, Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων όρων απομάκρυνσης NH₃-N ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων



Γράφημα 5, Συγκεντρωτικός γράφημα μέσω όρων απομάκρυνσης $\text{NH}_3\text{-N}$ ανά σενάριο τροφοδοσίας των αποβλήτων. Οι τιμές στο γράφημα αφορούν ποσοστιαία απομάκρυνση καθώς και την αντίστοιχη συγκέντρωση.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έπειτα από την αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων του πειράματος επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων με χρήση βιοφίλτρου και κροκίδωσης και τη χρήση τριών διαφορετικών σεναρίων και διαφορετικές παροχές στο κάθε σενάριο διαπιστώνουμε τα ακόλουθα:

Η διαφορά μεταξύ των μετρήσεων μεταξύ κροκιδωμένων και ακροκιδωτων αποβλήτων προς επεξεργασία δεν παρουσιάζει θεαματικές διαφορές, κυρίως στους δείκτες BOD, COD και TOC. Σημαντικές διαφορές υπάρχουν στις μετρήσεις αμμωνιακών. Αυτό εξηγείτε διότι τα αμμωνιακά δεν επηρεάζονται από την διαδικασία της κροκίδωσης.

Στο σενάριο διακοπτόμενης λειτουργίας των στηλών βιοφίλτρου, παρατηρούμε αρκετά ικανοποιητικά ποσοστά απομάκρυνσης στους δείκτες BOD και TOC. Μικρότερα ποσοστά απομάκρυνσης παρατηρούνται στο δείκτη NH_3 . Συγκεκριμένα, με τροφοδότηση του συστήματος με κροκιδωμένα απόβλητα παροχής ίση με 1L/h, επιτυγχάνονται ποσοστά απομάκρυνσης, 87% BOD, 87% TOC και 73% $\text{NH}_3\text{-N}$.

Στη περίπτωση τροφοδοσίας του συστήματος με ακροκιδωτα απόβλητα παροχής 0.5L/h, επιτύχαμε υψηλότερα ποσοστά απομάκρυνσης για τους δείκτες BOD, TOC. Η απομάκρυνση των αμμωνιακών ήταν της τάξης του 99%.

Η ανωτέρω αύξηση του ποσοστού απομάκρυνσης, οφείλεται στο γεγονός ότι στα κροκιδωμένα απόβλητα, το BOD που βρίσκεται προσκολλημένο σε μη διαλυμένα αιωρούμενα σωματίδια καθιζάνει κατά τη κροκίδωση.

Επίσης, το μικρό ποσοστό απομάκρυνσης αμμωνιακών, που παρατηρείται στα επεξεργασμένα κροκιδωμένα απόβλητα, οφείλεται στη αδυναμία των

μικροοργανισμών να πραγματοποιήσουν νιτροποίηση λόγω της ύπαρξης του κροκιδωτικού υλικού.

Τα πειράματα επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων με χρήση σταλακτικών φίλτρων, έδειξαν μεγάλο ποσοστό απομάκρυνσης στα αιωρούμενα στερεά (TSS).

Τέλος συμπεραίνουμε, ότι η διακοπτόμενη λειτουργία με μικρή παροχή απόβλητων 0,5L/h δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου.

10. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Παρακάτω παρουσιάζονται προτάσεις, προς περαιτέρω έρευνα, για την αύξηση της αποδοτικότητας των σταλακτικών φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα μελέτη:

- Δοκιμή, χρήση κι άλλων πληρωτικών υλικών (πχ κεραμικό υλικό, όπως θραύσματα οικοδομικού τούβλου) στα σταλακτικά φίλτρα.
- Τροφοδότηση των σταλακτικών φίλτρων με απόβλητα τα οποία δε θα έχουν υποστεί κροκίδωση κατά την είσοδο τους στην Μονάδα Επεξεργασίας Αστικών Αποβλήτων.
- Προσθήκη αερισμού στα σταλακτικά φίλτρα κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.
- Σύνδεση των σταλακτικών φίλτρων σε σειρά, διατηρώντας τη δεύτερη δεξαμενή σε αναερόβιες συνθήκες, ώστε να δημιουργηθούν συνθήκες απονιτροποίησης.
- Χρήση των σταλακτικών φίλτρων με επανακυκλοφορία των εκρεόντων αποβλήτων σε διάφορες αναλογίες σε σχέση με τα εισρέοντα απόβλητα.

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

11.1. ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- *Boller & Gujer (1986) "Nitrification in tertiary trickling filters followed by deep-bed filters", Water Research Vol 20, No. 11, pp. 1363-1373*
- *EPRI (1994), Encor-America, Inc. "Heat-rate improvement conference: Volumes 1-4", California*
- *Harrison & Filtert (1984) "A Survey of Combined Trickling Filter and Activated Sludge Processes", Journal Water Pollution Control Federation, vol 56, p. 1073*
- *P.Gikas, T.Tsoutsos (2013) "Near zero energy wastewater treatment plants for the Greek islands", International Conference WIN4Life in Tinos Island*
- *Hassard, Biddle, Cartmell, Jefferson, Tyrrel, Stephenson (2015) "Rotating biological contactors for wastewater treatment – A review", Process Safety and Environmental Protection, vol 94, p. 285-306*
- *P. Gikas, 2016, "Towards Energy Positive Wastewater Treatment Plants", Journal of Environmental Management, (Accepted), DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.05.061*
- *Waleed M. Zahid (2007) "Cost Analysis of Trickling-Filtration and Activated-Sludge Plants for the Treatment of Municipal Wastewater", 7th Saudi Engineering Conference 2007 in Riyadh*

- *Henrich (2014) "German research underway on trickling filter practices", World Water September/October 2014, p. 37-38*
- *P. Gikas and T. Tsoutsos, 2015, "Near Zero Energy Wastewater Treatment Plants for the Greek Islands", Desalination and Water Treatment, Vol.: 53, Iss.: 12, Pp.: 3328-3324.*
- *Henrich & Marggraff (2013) "Energy-efficient Wastewater Reuse – The Renaissance of Trickling Filter Technology", IWA Water Reuse Conference 2013 in Namibia*
- *Jorgensen & Johnsen (1989), "Principles of environmental science and technology", Elsevier, Amsterdam*
- *A. Franchi, K. Stedman and P. Gikas, 2012, "Enhanced Primary Solids Removal From Municipal Wastewater by Two Steps Filtration", IWA Regional Conference on Wastewater Purification & Reuse, 28-30 March, Heraklion, Greece.*
- *P. Gikas and K. Stedman, 2013, "Novel Wastewater Treatment Configuration for Zero Energy Requirements Wastewater Treatment Plants", 3rd Asian Conference on Sustainability, Energy and the Environment (ACSEE2013), 6-9 June, Osaka, Japan.*
- *Metcalf & Eddy Inc. (2003), Revised by Tchobanoglous et. Al. "Wastewater Engineering Treatment and Reuse 4th Edition"*
- *Water Environment Federation: Design of Municipal Wastewater Treatment Plants: WEF Manual of Practice No. 8 ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 76, Fifth Edition. TRICKLING FILTERS, Chapter (McGraw-Hill Professional, 2010), AccessEngineering*

- Noyes (1991), *“Handbook of pollution control processes”*, Noyes Publications, New Jersey
- U.S EPA (2000), *“Wastewater technology Fact Sheet Trickling Filter”*, EPA 832-F-00-014, EPA Office of Water, Washington, D.C.
- Tyler G. Hicks: *Handbook of Civil Engineering Calculations*, Second Edition.
- Health Research Inc., Health Education Services Division (2004), *“Recommended Standards for Wastewater Facilities”*, Edition 2004
- *Design of a Trickling Filter Using the NRC Equations*, Chapter (McGraw-Hill Professional, 2007), AccessEngineering
- Parker (1999) *“Trickling filter mythology”*, Journal of environmental engineering July 1999
- Parker, Krugel, & McConnell (1994) *“Critical Process Design Issues in the Selection of the TF/SC Process for Large Secondary Treatment Plant”* Water Science and Technology, vol. 29, p. 209
- Parker, Lutz, & Pratt (1990) *“New Trickling Filter Applications in the U.S.A.”*, Water Science Technology, Vol. 22
- Richards & Reinhart (1986) *“Evaluation of plastic media in trickling filters”*, Journal Water Pollution Control Federation, Vol 58, No. 7, pp. 774-783
- WPCF (1977) *Manual of practice No 8 “Wastewater treatment plant design, 2nd edn.”*, Lancaster Press, Inc., Lancaster

11.2. ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βλυσίδης (2006) “Τεχνικές Επεξεργασίας Υγρών Αποβλήτων”, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Νταρακάς (2014) “Διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Τεχνική Περιβάλλοντος)”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής & Τεχνικής Περιβάλλοντος
- Βασιλάτος (2010) “Προσδιορισμός φυσικοχημικών παραμέτρων υγρών αποβλήτων και υδάτων (DO – BOD – COD – TOC)”
- Μαρκαντωνάτος Γ (1986), “Επεξεργασία και Διάθεση Υγρών Αποβλήτων”, Αθήνα
- Παρασκάκη (2013), Μεταπτυχιακή εργασία “Κατασκευή και λειτουργία δύο συστημάτων προσκολλημένης ανάπτυξης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
- Στάμου (2001) “Διαχείριση Υγρών Αποβλήτων”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων
- Δρ. Στασινάκης (2000) “Εισαγωγή στην Περιβαλλοντική Μηχανική”, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος, Τομέας Περιβαλλοντικής Μηχανικής και Επιστήμης, Εργαστήριο Διαχείρισης Αποβλήτων
- Τερεζάκης (2009), Διδακτορική διατριβή “Σύγκριση της απόδοσης εναλλακτικών μεθόδων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Έλεγχος ποιότητας & διαχείριση περιβάλλοντος»

- Τσουνίδης (2006) “Συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων για μικρούς και απομονωμένους οικισμούς. Εφαρμογή στη Λέσβο”
- Τσέζος (2012) “Τεχνολογία επεξεργασίας υγρών αποβλήτων”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών
- Χρυσικού (2008), Μεταπτυχιακή εργασία “Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορών με επεξεργασμένα λύματα – περίπτωση εφαρμογής στο Θριάσιο Πεδίο”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»
- «Οδηγία 91/271/ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21ης Μαΐου 1991 για την επεξεργασία των αστικών αποβλήτων», Επίσημη Εφημερίδα αριθ. L 135 της 30/05/1991 σ. 0040 – 0052
- Envia (2013) “Τεχνολογία επεξεργασίας λυμάτων: προσκολλημένη βιομάζα”, Τεχνική Τεκμηρίωση, Έκδοση 1
- Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης Αποχέτευσης Χανίων (2013), <http://www.deyax.org.gr>

12. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

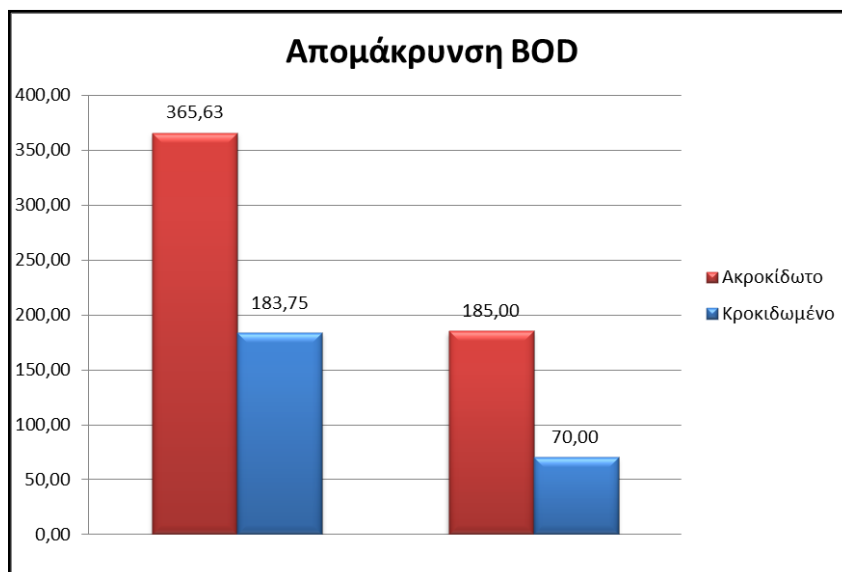
Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται:

- Σύγκριση υγρών αστικών αποβλήτων από δύο μονάδες βιολογικής επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων. Στη μία μονάδα τα απόβλητα κροκιδώνονται πριν εισέρθουν προς επεξεργασία και στη άλλη δεν κροκιδώνονται.
- Μετρήσεις των δεικτών COD, BOD, TOC που αποσκοπούν στον αρχικό έλεγχο της αποδοτικότητας και σταθερότητας των εκροών κατά τη περίοδο έναρξης λειτουργίας των φίλτρων.
- Μετρήσεις σε ενδιάμεσα σημεία δειγματοληψίας των στηλών , εκτός των σημείων εισόδου και εξόδου των βιολογικών φίλτρων.

Οι μετρήσεις αφορούν τη διαφορά ανάμεσα σε μη κροκιδωμένα απόβλητα μετά από τη δεξαμενή καθίζησης της Μονάδας Βιολογικού Καθαρισμού Υγρών αστικών Αποβλήτων του Δήμου Πλατανιά και των κροκιδωμένων αποβλήτων της Μονάδας Βιολογικού Καθαρισμού Υγρών Αστικών Αποβλήτων του Δήμου Χανίων (με χρήση τριχλωριουχου σιδήρου για λόγους απόσμησης). Το σημείο δειγματοληψία είναι μετά τη δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης.

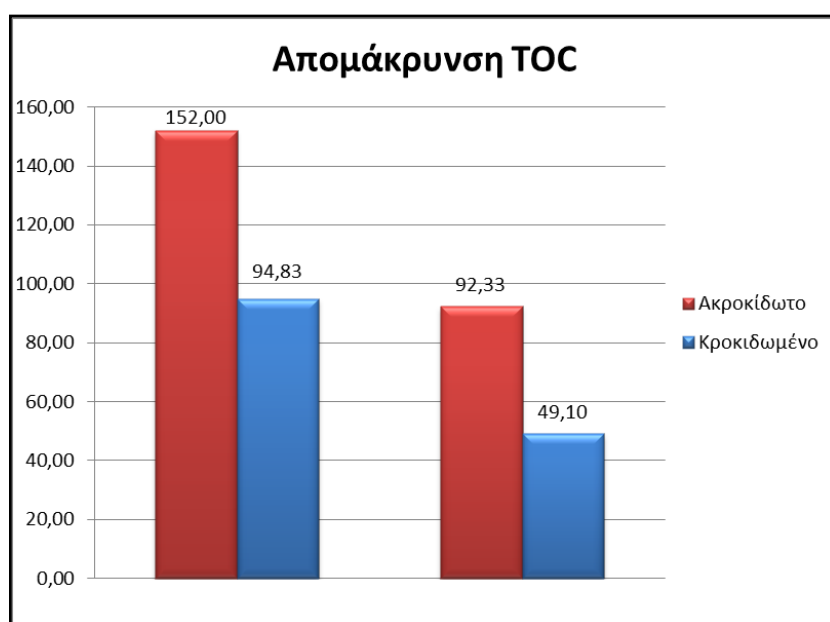
Μέτρηση BOD

BOD ₅			
		Ακροκίδωτο	Κροκιδωμένο
Χανιά	Απομάκρυνση	365,63	183,75
		50%	
Πλατανιάς	Απομάκρυνση	185,00	70,00
		62%	



Μέτρηση TOC

TOC			
		Ακροκίδωτο	Κροκιδωμένο
Χανιά	Απομάκρυνση	152,00	94,83
		38%	
Πλατανιάς	Απομάκρυνση	92,33	49,10
		47%	



Οι παρακάτω πίνακες αφορούν τη λειτουργία των σταλακτικών φίλτρων κατά τη περίοδο έναρξης των σταλακτικών φίλτρων. Παρουσιάζονται μετρήσεις των δεικτών COD, BOD, TOC για ένα χρονικό διάστημα 6 ημερών που χρειάστηκε για τη σταθεροποίησης λειτουργίας των φίλτρων.

COD - 1L/h								
	4-Απρ	7-Απρ	30-Απρ	28-Μαϊ	29-Μαϊ	30-Μαϊ	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκ.
COD Είσοδος Α στήλης (ppm)	380	349	555	447	442	488	434,60	±74,01
COD Έξοδος Α στήλης (ppm)	207	163	230	176	407	164	236,60	±93,21
COD Απομ. Α στήλης	45,5%	53,3%	58,6%	60,6%	7,9%	66,4%	45,6%	±21,21%
COD Είσοδος Β στήλης (ppm)	291	254	374	297	321	318	307,40	±39,86
COD Έξοδος Α στήλης (ppm)	49,2	110	89,5	40,1	39	37	65,56	±31,14
COD Β Απομ. Β στήλης	83,1%	56,7%	76,1%	86,5%	87,9%	88,4%	78,7%	±12,19

Συγκεντρωτικός πίνακας απομάκρυνσης COD

BOD ₅ - 1L/h								
	4-Απρ	11-Απρ	30-Απρ	28-Μαϊ	29-Μαϊ	30-Μαϊ	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκ.
BOD ₅ Είσοδος Α στήλης (ppm)	165,15	133,05	190,25	205,25	187,5	237,25	176,24	±35,37
BOD ₅ Έξοδος Α στήλης (ppm)	58,65	29,85	178,25	58,5	91	62,5	83,25	±51,99
BOD ₅ Απομ. Α στήλης	64,5%	77,6%	6,3%	71,5%	51,5%	73,7%	52,8%	±26,72%
BOD ₅ Είσοδος Β στήλης (ppm)	151,95	107,4	112,25	146,25	156,25	186,25	134,82	±29,49
BOD ₅ Έξοδος Α στήλης (ppm)	37,65	22,8	122,5	35,5	72,25	64	58,14	±36,20
BOD ₅ Απομ. Β στήλης	75,2%	78,8%	-9,1%	75,7%	53,8%	65,6%	56,9%	±33,49%

Συγκεντρωτικός πίνακας απομάκρυνσης BOD

TOC - 1L/h								
	4-Απρ	7-Απρ	30-Απρ	28-Μαϊ	29-Μαϊ	30-Μαϊ	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκ.
TOC Είσοδος Α στήλης (ppm)	143	157,5	150,3	174,5	168,7	160,3	158,80	±11,58
TOC Έξοδος Α στήλης (ppm)	97	95,8	77,31	86,35	80,55	72,72	87,40	±9,92
TOC Απομ. Α στήλης	32,2%	39,2%	48,6%	50,5%	52,3%	54,6%	45,0%	±8,68%
TOC Είσοδος Β στήλης (ppm)	116	118,6	105,3	131,9	128,2	100,3	120,00	±12,38
TOC Έξοδος Β στήλης (ppm)	44,5	47,54	37,44	34,25	37,25	30,17	40,20	±6,45
TOC Απομ. Β στήλης.	61,6%	59,9%	64,4%	74,0%	70,9%	69,9%	66,5%	±5,63%

Συγκεντρωτικός πίνακας απομάκρυνσης TOC

Σε κάθε στήλη βιολογικού φίλτρου κατά τη κατασκευή είχαν ανοιχτεί τρύπες και προσαρμοστεί συνολικά τρεις σωλήνες για κάθε στήλη μικρής διαμέτρου από Plexi – glass κατά το διαμήκη άξονα της κάθε στήλης. Σκοπός ήταν η δειγματοληψία αποβλήτων σε ενδιάμεσα σημεία εκτός από την εισροή και εκροή των βιολογικών φίλτρων, για την παρακολούθηση της προόδου της βιολογικής διαδικασίας.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις NH_3 και TOC

NH ₃ -N - 1L/h						
		Ακροκίδωτο				
		3-Σεπ	4-Σεπ	5-Σεπ	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκ.
Είσοδος NH ₃ -N (ppm)		50	50,5	51,75	50,75	±0,9
Δεξαμενή Εξισορρόπησης NH ₃ -N (ppm)		26,5	17,25	27	23,58	±5,49
Απομ. Α στήλης (ppm)		47,0%	65,8%	47,8%	53,6%	±10,63%
Έξοδος NH ₃ -N (ppm)		21	9,25	21,7	17,32	±6,99
Συνολική Απομ. (ppm)		58,0%	81,7%	58,1%	65,9%	±13,65%
Στήλη Α	A1 (ppm)	20,5	19,51	24,12	21,38	±2,43
	A2 (ppm)	19,25	18,72	18,48	18,82	±0,39
	A3 (ppm)	14,54	13,63	13,92	14,03	±0,46
Στήλη Β	B1 (ppm)	9,75	10,52	19,62	13,30	±5,49
	B2 (ppm)	9,25	8,27	14,33	10,62	±3,25
	B3 (ppm)	8,75	7,88	10,76	9,13	±1,48

TOC - 1L/h						
		Ακροκίδωτο				
		3-Σεπ	4-Σεπ	5-Σεπ	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκ.
Είσοδος TOC (ppm)		83,07	120,6	129,1	110,92	±24,9
Δεξαμενή Εξισορρόπησης TOC (ppm)		16,69	44,85	22,65	28,06	±14,84
Απομ. Α στήλης (ppm)		79,9%	62,8%	82,5%	75,1%	±10,7%
Έξοδος TOC (ppm)		9,01	38,41	16,23	21,22	±15,32
Συνολική Απομ. (ppm)		89,2%	68,2%	87,4%	81,6%	±11,64%
Στήλη Α	A1 (ppm)	30,86	61,9	70,88	54,55	±21,0
	A2 (ppm)	19,16	53,41	72,89	48,49	±27,2
	A3 (ppm)	14,182	31,99	54,26	33,48	±20,08
Στήλη Β	B1 (ppm)	18,83	30,59	42,41	30,61	±11,79
	B2 (ppm)	9,12	24,25	39,7	24,36	±15,29
	B3 (ppm)	6,48	19,75	33,1	19,78	±13,31