



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών περιβάλλοντος

Εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών

Εφαρμογή υδροκυκλώνα για απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών από αστικά λύματα



Διπλωματική εργασία

του

Κεχαγιά Αναστάσιου

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής, Γκίκας Πέτρος (Επιβλέπων)

Καθηγητής, Χρυσικόπουλος Κωνσταντίνος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Αραμπατζής Γεώργιος

Χανιά, Μάρτιος 2024

«Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης».

Πρόλογος και ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Εφαρμογή υδροκυκλώνα για την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών από αστικά λύματα» εκπονήθηκε στο εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Πέτρου Γκίκα.

Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή μου Πέτρο Γκίκα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε δίνοντας μου το συγκεκριμένο θέμα και για τον χρόνο και ενέργεια που αφιέρωσε για την επίβλεψη και διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσαμουτσόγλου Κωνσταντίνο που με την συνεργασία του με βοήθησε στην συλλογή δεδομένων, στην εκπόνηση των εργαστηριακών πειραμάτων καθώς και στη συγγραφή της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην οικογένεια μου που ήταν δίπλα μου και με στήριζαν καθημερινά έτσι ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω την διπλωματική μου εργασία καθώς και τις σπουδές μου συνολικά.

Με εκτίμηση,

Αναστάσιος Κεχαγιάς

Περίληψη

Η ανάγκη επαναχρησιμοποίησης των υδάτων, σε συνδυασμό με τα αυστηρά νομοθετικά πλαίσια που έχουν θεσπιστεί καθώς και την αύξηση του κόστους ενέργειας έχουν ωθήσει τις Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) στην ανάγκη για την ενεργειακή βελτιστοποίηση τους. Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις με χαμηλό κόστος και ενέργεια. Οι υδροκυκλώνες αποτελούν τεχνολογίες διαχωρισμού που εφαρμόζουν φυγοκεντρική κίνηση για την ταξινόμηση και τον διαχωρισμό των εισερχόμενων στερεών με βάση την πυκνότητα και χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες μεταξύ αυτών και της επεξεργασίας αποβλήτων. Οι υδροκυκλώνες αποτελούν τεχνολογία με χαμηλό κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας, ενώ παράλληλα απαιτούν ελάχιστο χώρο κατά την εγκατάστασή τους και ελάχιστη ενεργειακή δαπάνη κατά τη λειτουργία τους.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διαστασιολόγηση και η αξιολόγηση της απόδοσης ενός υδροκυκλώνα ως προς την απομάκρυνση των Ολικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS), του Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (BOD_5) καθώς και του Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD) σε πρωτοβάθμια αστικά λύματα. Σε αυτά τα πλαίσια, εγκαταστάθηκε στη ΕΕΛ Χανίων, μετά το στάδιο της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας, υδροκυκλώνας μέγιστης παροχής $50 \text{ m}^3/\text{h}$. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, η ποσοστιαία απομάκρυνση των TSS υπολογίστηκε ίση με $31,25 \pm 2,12\%$, ενώ για το BOD_5 και COD ήταν ίση με $17,7 \pm 2,15\%$ και $9,96 \pm 2,01\%$, αντίστοιχα. Η συγκέντρωση των TSS στο συμπύκνωμα υπολογίστηκε ίση με $840 \pm 100 \text{ mg/L}$. Τα παραπάνω αποτελέσματα θεωρήθηκαν αρκετά ενθαρρυντικά σχετικά με την δυνατότητα του υδροκυκλώνα να παρέχει ικανοποιητικές αποδόσεις στην επεξεργασία πρωτοβάθμιων αστικών λυμάτων. Παρόλα αυτά, απαραίτητη κρίνεται η περαιτέρω μελέτη του υδροκυκλώνα έτσι ώστε να εξεταστούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

Abstract

The need to reuse water, combined with the strict legislative frameworks that have been established as well as the increase in energy costs have pushed Wastewater Treatment Facilities (WTP) to the need for their energy optimization. Addressing these challenges requires environmentally friendly, low-cost and energy-efficient solutions. Hydrocyclones are separation technologies that apply centrifugal motion to sort and separate incoming solids based on density and are widely used in various industries including waste treatment. Hydrocyclones are a technology with low capital and operating costs, while at the same time minimal space is required during their installation and minimal energy expenditure during their operation.

The purpose of this thesis is the dimensioning and evaluation of the performance of a hydrocyclone in terms of the removal of Total Suspended Solids (TSS), Biochemical Oxygen Demand (BOD_5) as well as Chemical Oxygen Demand (COD) in primary. In this context, a hydrocyclone with a maximum flow of $50 \text{ m}^3/\text{h}$ was installed at WTP Chania, after the stage of primary treatment. According to the experimental results, the percentage removal of TSS was calculated as $31.25 \pm 2.12\%$, while for BOD_5 and COD it was $17.7 \pm 2.15\%$ and $9.96 \pm 2.01\%$, respectively. The TSS concentration in the concentrate was calculated to be $840 \pm 100 \text{ mg/L}$. The above results were considered quite encouraging regarding the possibility of the hydrocyclone to provide satisfactory yields in the treatment of primary municipal wastewater. Nevertheless, further study is needed to examine the optimal operating conditions of the system.

Περιεχόμενα

Πρόλογος και ευχαριστίες	1
Περίληψη	2
Abstract	3
Περιεχόμενα	4
Κατάλογος συντομογραφιών	8
Κατάλογος πινάκων	9
Κατάλογος διαγραμμάτων	11
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	12
1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο	12
1.2 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας	12
1.3 Σκοπός	12
Κεφάλαιο 2: Επεξεργασία και διαχείριση αστικών υγρών αποβλήτων	13
2.1 Ιστορία της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	13
2.2 Υγρά απόβλητα	13
2.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά αστικών υγρών αποβλήτων	14
2.3.1 Στερεά	14
2.3.2 Ενεργός οξύτητα (pH)	16
2.3.3 Κατανομή μεγέθους σωματιδίων	17
2.3.4. Πυκνότητα	17
2.3.5 Χρώμα	17
2.3.7 Θερμοκρασία	18
2.3.8 Θολότητα	18
2.3.9 Άζωτο	19
2.3.10 Φώσφορος	20
2.3.11 Χλωριούχα	20
2.3.12 Θεικές ενώσεις	20
2.3.14 BOD	21
2.3.15 COD	22
2.3.16 Μικροοργανισμοί	23
2.4 ΕΕΛ	24
2.4.1 Προ-επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων	24

Εσχάρωση.....	24
Εξάμμωση-Λιποσυλλογή	26
Δεξαμενή εξισορρόπησης ροής	26
2.4.2 Πρωτοβάθμια καθίζηση	27
2.4.3 Δευτεροβάθμια επεξεργασία	28
Απομάκρυνση αζώτου	28
Απομάκρυνση φωσφόρου	29
2.4.3.1 Συστήματα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας	29
Συστήματα αιωρούμενης βιομάζας.....	29
Συστήματα προσκολλημένης βιομάζας.....	30
2.4.4 Τριτοβάθμια επεξεργασία.....	31
Αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis, RO)	32
Προσρόφηση	32
Ιοντοεναλλαγή	32
2.4.5 Απολύμανση	32
2.4.6 Επεξεργασία ιλύος.....	33
Αποτέφρωση	35
Πυρόλυση	36
Αεριοποίηση	36
2.4.7 Ενεργειακές απαιτήσεις ΕΕΛ.....	37
Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες απομάκρυνσης στερεών από υγρά απόβλητα.....	40
3.1 Μικροκοσκίνιση	40
3.2 Μεμβράνες διήθησης.....	41
3.3 Ηλεκτροκροκίδωση	41
3.4 Επίπλευση	42
3.5 Καθίζηση	42
3.6 Εσχάρωση στην προεπεξεργασία	43
3.7 Υδροκυκλώνας	44
3.7.1 Εφαρμογές υδροκυκλώνα.....	45
3.7.1.1 Υδροκυκλώνες σε ΕΕΛ.....	45
Στράς,Αυστρία	46
Ντιζόν, Γαλλία.....	46
3.7.1.2 Υδροκυκλώνας στην επεξεργασία ορυκτών πόρων	46

Υδροκυκλώνας στην βιομηχανία χαρτιού.....	46
Υδροκυκλώνας στην βιομηχανία τροφίμων	47
Κεφάλαιο 4: Περιγραφή ΕΕΛ Χανίων	48
4.1 Παράμετροι σχεδιασμού της εγκατάστασης	48
4.2 Βασικά τμήματα της εγκατάστασης	50
4.3 Γραμμή επεξεργασίας λυμάτων.....	51
4.3.1 Αντλιοστάσιο εισόδου εγκατάστασης.....	51
4.3.2 Εγκατάσταση υποδοχής βοθρολυμάτων	51
4.3.3 Εσχάρωση.....	51
4.3.4 Εξάμμωση – Αφαίρεση λιπών	52
4.3.5 Πρωτοβάθμια επεξεργασία	52
4.3.6 Βιολογική επεξεργασία.....	53
4.3.7 Δεξαμενές αερισμού	54
4.3.8 Δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης	54
4.3.9 Δεξαμενή χλωρίωσης	55
4.3.10 Γραμμή επεξεργασίας ιλύος.....	56
4.3.11 Μηχανική πάχυνση ιλύος	56
4.3.12 Προπάχυνση.....	56
4.3.13 Αναερόβιοι χωνευτές	57
4.3.14 Μεταπάχυνση	57
4.3.15 Αφυδάτωση.....	57
4.3.16 Μονάδα παραγωγής ενέργειας.....	58
4.4 Επιπλέον μονάδες εγκατάστασης.....	58
Κεφάλαιο 5: Περιγραφή και διαστασιολόγηση του συστήματος υδροκυκλώνα	60
5.1 Πειραματική διάταξη και δειγματοληψία	60
5.2 Διαστασιολόγηση υδροκυκλώνα.....	61
5.2.1 Διάμετρος υδροκυκλώνα	62
5.2.2 Ύψος υδροκυκλώνα.....	64
5.2.3 Διάμετρος εισόδου, εξόδου και διάμετρος υπορροής.....	64
5.2.4 Γωνία κώνου	65
5.3 Αναλυτικές μέθοδοι.....	65
5.3.1 TSS.....	66
5.3.2 BOD ₅	67

5.3.3 COD.....	68
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα και συζήτηση.....	70
6.1 Αποτελέσματα.....	70
6.2.1 TSS.....	76
6.2.2 BOD ₅	76
6.2.3 COD.....	76
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	77
7.1 Συμπεράσματα.....	77
7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	77
Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία	78

Κατάλογος συντομογραφιών

BOD₅: Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Biochemical Oxygen Demand) πέντε ημερών

BOD_U: Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο Απόλυτο (Biochemical Oxygen Demand Ultimate)

COD: Χημικά απαιτούμενο Οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand)

TS: Ολικά Στερεά (Total Solids)

DS: Διαλυμένα Στερεά (Dissolved Solids)

SS: Αιωρούμενα Στερεά (Suspended Solids)

FS: (Fixed solids)

TN: Ολικό Άζωτο (Total Nitrogen,)

TP: Ολικός Φώσφορος (Total Phosphorus,)

TOC: Ολικός οργανικός άνθρακας (Total Organic Carbon)

UV: Υπεριώδης Ακτινοβολία (Ultra Violent)

RBC: Rotating Biological Contactors

KAA: Κεντρικός Αποχετευτικός Αγωγός

ΑΕΠΟ: Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων

ΥΠΕΚΑ: Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας

ΕΕΛ: Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων

ΙΚ: Ισοδύναμοι Κάτοικοι

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1 Απαιτήσεις για την απόρριψη επεξεργασμένων αστικών λυμάτων σύμφωνα με την ΚΥΑ-5673-97

Πίνακας 2.2 Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων απολύμανσης (Δελημπάση,2001)

Πίνακας 2.3 Ενεργειακή ένταση και αναλογία ενέργειας ως προς την συνολική εθνική ενεργειακή κατανάλωση για διαφορετικές χώρες (πηγή: Υ Gu,2017).

Πίνακας 3.1 Αποδόσεις τεχνικών απομάκρυνσης στερεών

Πίνακας 4.1 Υδραυλικά και Ρυπαντικά φορτία ΕΛΛ Χανίων (Πηγή: : <http://astikalimata.ypeka.gr>, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.204460/25-09-2011) της ΕΕΛ Χανίων)

Πίνακας 4.2 Ποιοτικά Χαρακτηριστικά εξόδου της ΕΕΛ. (Πηγή: : <http://astikalimata.ypeka.gr>, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.204460/25-09-2011) της ΕΕΛ Χανίων)

Πίνακας 4.3 Όρια εκπομπής απερίων (Πηγή: : <http://astikalimata.ypeka.gr>, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.204460/25-09-2011) της ΕΕΛ Χανίων)

Πίνακας 5.1 Αναλογίες διαμέτρου εισόδου σε σχέση με την διάμετρο του υδροκυκλώνα. Προσαρμοσμένες από δεδομένα που έχουν δημοσιευθεί από τους Bradley (1965), Castilho & Medronho (2000), Plitt (1976) και Silva (2012).

Πίνακας 5.2 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά υδροκυκλώνα

Πίνακας 5.3 Όγκος δείγματος και συντελεστής για τον υπολογισμό του BOD₅ ανάλογα την κλίμακα μέτρησης (Παντίδου & Αντέλλη, 2019)

Πίνακας 6.1 Απομάκρυνση TSS

Πίνακας 6.2 Απομάκρυνση BOD₅

Πίνακας 6.3 Απομάκρυνση COD

Πίνακας 6.4 Απομακρύνσεις TSS, BOD₅, COD

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1 Κώνος Imhoff (Πατσακίδου,2016)

Εικόνα 2.2 Διαχωρισμός και ανάλυση κατά κατηγορίες των στερεών που περιέχονται σε ένα υγρό απόβλητο. (Βλυσίδης,2007)

Εικόνα 2.3 Τυπικές τιμές PH (Ζανάκη, 2001).

Εικόνα 2.4 Διάφορες μορφές του αζώτου (Νταράκας, 2010)

Εικόνα 2.5 Καμπύλη BOD (A) και καμπύλη νιτροποίησης (B) (Βλυσίδης,2007)

Εικόνα 2.6 Διαχωρισμός COD (Metcalf and Eddy,2006)

Εικόνα 2.7 Κάθετες σχάρες (Τσώνης,2003)

Εικόνα 2.8 Ποσότητα συγκρατούμενων στερεών ανάλογα με το μέγεθος των ανοιγμάτων μιας μηχανικά καθαριζόμενης εσχάρας (Στάμου και Βογιατζής, 1994).

Εικόνα 2.9 Εικοσιτετράωρη διακύμανση παροχής λυμάτων (Μ.Χατζάκης, 2003)

Εικόνα 2.10 Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (Monroeeenvironmental, 2020)

Εικόνα 2.11 Διάγραμμα ροής εγκατάστασης με μέθοδο ενεργού ιλύος (Νταράκας, 2017)

Εικόνα 2.12 Διάγραμμα ροής μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με τη μέθοδο ενεργού ιλύος (Τραγανίτης και Σκουμπούρης, 1995)

Εικόνα 2.13 Βιολογικό Φίλτρο με χαλίκια και προαιρετική επανακυκλοφορία(Νταράκας, 2010)

Εικόνα 2.14 Σύστημα Περιστρεφόμενου Βιολογικού Δίσκου (Νταράκας, 2010)

Εικόνα 2.15 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για διαφορετικές ΕΕΛ (Gikas, 2017).

Εικόνα 2.16 Κατανομή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ΕΕΛ που χρησιμοποιεί την μέθοδο της ενεργούς ιλύος (Y Gu, 2017).

Εικόνα 3.1 Κίνηση Ροής (Partin, 2017)

Εικόνα 4.1 Κάτοψη της ΕΕΛ Χανίων

Εικόνα 4.2 Αντλιοστάσιο εισόδου ΕΕΛ Χανίων

Εικόνα 4.3 Αίθουσα Μηχανικών Εσχάρων ΕΕΛ Χανίων

Εικόνα 4.4 Δεξαμενές Αμμοσυλλογής και Λιποσυλλογής ΕΕΛ Χανίων

Εικόνα 4.5 Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης ΕΕΛ Χανίων

Εικόνα 4.6 Δεξαμενή Αερισμού ΕΕΛ Χανίων

Εικόνα 4.7 Δεξαμενή Δευτεροβάθμιας Καθίζησης ΕΕΛ Χανίων

Εικόνα 4.8 Δεξαμενή Χλωρίωσης ΕΕΛ Χανίων

Εικόνα 4.9 Αναερόβιοι Χωνευτές ΕΕΛ Χανίων

Εικόνα 4.10 Διάγραμμα ροής ΕΕΛ Χανίων (Δημοπούλου, 2011)

Εικόνα 5.1 Διάταξη Υδροκυκλώνα στην ΕΕΛ Χανίων

Εικόνα 5.2 Σχέδιο Υδροκυκλώνα του Εργαστηρίου Σχεδιασμού του Πολυτεχνείου Κρήτης

Εικόνα 5.3 Διαστάσεις υδροκυκλώνα

Εικόνα 5.4 Συσκευή Διήθησης υπό κενό

Εικόνα 5.5 Ζυγαριά ακριβείας Kern & Sohn ABJ-NM Αποξηραμένα φίλτρα εισόδου (1), εξόδου (2) και συμπυκνώματος (3).

Εικόνα 5.6 Μπουκάλια δειγματοληψίας BOD με συσκευές μέτρησης WTW OxiTop και μαγνητική βάση ανάδευσης WTW IS6 Stirrer

Εικόνα 5.7 Θερμοαντιδραστήρας Hach LT 200

Εικόνα 5.8 Φωτόμετρο Hach DR 1900

Εικόνα 6.1 Ισοζύγιο Μάζας Υδροκυκλώνα

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 5.1 Προσδιορισμός του d_{50} για συγκεκριμένη διάμετρο σωματιδίων και απόδοση υδροκυκλώνα (Zanker, 1977).

Διάγραμμα 6.1 Απομάκρυνση % TSS

Διάγραμμα 6.2 Απομάκρυνση % BOD₅ ανά ημέρα

Διάγραμμα 6.3 Απομάκρυνση % COD

Διάγραμμα 6.4 Απομακρύνσεις TSS, BOD₅ και COD

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο

Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων είναι μια αναγκαιότητα κάθε σύγχρονης πόλης ή ακόμα και μικρού οικισμού (Gikas, 2020). Οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) διαδραματίζουν κομβικό ρόλο στην προστασία του περιβάλλοντος μετριάζοντας τις αρνητικές επιπτώσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στα υδάτινα οικοσυστήματα. Με την επεξεργασία των λυμάτων, οι ΕΕΛ συμβάλλουν στην πρόληψη της μόλυνσης ποταμών, λιμνών και ωκεανών, διατηρώντας τα υδάτινα οικοσυστήματα και προστατεύοντας την υγεία τόσο της άγριας ζωής όσο και των ανθρώπων. Επιπλέον, συμβάλλουν σημαντικά στις προσπάθειες ανακύκλωσης του νερού, παρέχοντας μια βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση του αυξανόμενου παγκόσμιου ζητήματος λειψυδρίας (California State Board of Health, 1918). Η ανακύκλωση επεξεργασμένου νερού για μη πόσιμες χρήσεις, όπως η άρδευση, οι βιομηχανικές διεργασίες, ακόμη και ορισμένες οικιακές εφαρμογές, μειώνει τη ζήτηση νερού (Asano, 2007; Paranychiakis, 2011). Έχει εκτιμηθεί πως πάνω από το 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας από υπηρεσίες κοινής ωφελείας αντιστοιχεί στις ΕΕΛ (Means, 2004). Η ενσωμάτωση διεργασιών χαμηλής ενέργειας σε ΕΕΛ είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος αυτών των εργασιών καθώς όχι μόνο μειώνει το λειτουργικό κόστος, αλλά συμβάλλει επίσης σε γενικούς στόχους βιωσιμότητας, ευθυγραμμίζοντας την επιτακτική ανάγκη εξοικονόμησης πόρων και μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που σχετίζονται με τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας λυμάτων (Tchobanoglous, 2009). Ουσιαστικά, οι ΕΕΛ βρίσκονται στο σημείο τομής της προστασίας του περιβάλλοντος, της ανακύκλωσης του νερού και της ενεργειακής απόδοσης, διαδραματίζοντας κεντρικό ρόλο στην προώθηση ενός πιο βιώσιμου και ανθεκτικού μέλλοντος.

1.2 Οργάνωση διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε οχτώ (8) κεφάλαια. Το κεφάλαιο 1 αποτελεί την εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το κεφάλαιο 2 αναφέρεται στην επεξεργασία και διαχείριση αστικών υγρών αποβλήτων. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι μέθοδοι απομάκρυνσης στερεών από τα υγρά απόβλητα. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται η ΕΕΛ Χανίων, ενώ στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η περιγραφή και η διαστασιολόγηση του συστήματος υδροκυκλώνα στην ΕΕΛ Χανίων. Ακολουθεί το Κεφάλαιο 6, στο οποίο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Στο Κεφάλαιο 7 αναλύονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και προτείνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την συγγραφή της παρούσας εργασίας.

1.3 Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διαστασιολόγηση και η διερεύνηση της απόδοσης του υδροκυκλώνα σε αστικά λύματα μετά την επεξεργασία τους με πρωτοβάθμια καθίζηση. Το σύστημα υδροκυκλώνα εγκαταστάθηκε στην ΕΕΛ Χανίων και η εκτέλεση των πειραμάτων ξεκίνησε από τις 26/8/2022 έως τις 20/12/2022. Για την αποτελεσματικότητα του

συστήματος μετρήθηκαν τα TSS, BOD₅ και COD στην είσοδο και στην έξοδο του υδροκυκλώνα καθώς και η συγκέντρωση του συμπυκνώματος σε TSS.

Κεφάλαιο 2: Επεξεργασία και διαχείριση αστικών υγρών αποβλήτων

2.1 Ιστορία της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Παρόλο που αποχετεύσεις απομάκρυνσης του δύσοσμου νερού υπήρχαν στην αρχαία Ρώμη, μόλις τον 18ο αιώνα οι μεγάλες πόλεις άρχισαν να κατανοούν την αναγκαιότητα μείωσης της ποσότητας των ρύπων στο χρησιμοποιημένο νερό που απέρριπταν στο περιβάλλον. Παρά τις μεγάλες προμήθειες πόσιμου νερού και τη φυσική ικανότητα των επιφανειακών υδάτων να καθαρίζονται με την πάροδο του χρόνου, οι πληθυσμοί είχαν συγκεντρωθεί τόσο πολύ μέχρι το 1850 που τα κρούσματα απειλητικών για τη ζωή ασθενειών έγιναν συνηθισμένα (Abdullah, 2020). Η κατασκευή των πρώτων ΕΕΛ ξεκίνησε στις αρχές του 18ου αιώνα, με την δημιουργία των πρώτων φίλτρων νερού και την δημιουργία του πρώτου συστήματος παροχής νερού για την κάλυψη των αναγκών μιας ολόκληρης πόλης. Την ίδια περίοδο ο Robert Thom σχεδίασε και υλοποίησε την πρώτη δημοτική μονάδα επεξεργασίας νερού (Τσαρουχά, 2013). Τις επόμενες δεκαετίες η επεξεργασία του νερού εξελίχθηκε περαιτέρω και έτσι αντί να απορρίπτονται τα λύματα απευθείας σε ένα κοντινό υδάτινο αποδέκτη, πρώτα περνούσαν μέσω ενός συνδυασμού φυσικών, βιολογικών και χημικών διεργασιών που αφαιρούσαν κάποιους ή τους περισσότερους από τους ρύπους. Επίσης, ξεκινώντας από τη δεκαετία του 1900, σχεδιάστηκαν νέα συστήματα συλλογής λυμάτων για να διαχωρίζουν τα όμβρια ύδατα από τα οικιακά λύματα, έτσι ώστε οι μονάδες επεξεργασίας να μην υπερφορτώνονται σε περιόδους υγρών καιρικών συνθηκών. Ως αποτέλεσμα, η δημόσια υγεία και η ποιότητα του νερού προστατεύονται καλύτερα σήμερα (Abdullah, 2020).

2.2 Υγρά απόβλητα

Ως υγρά απόβλητο ορίζεται κάθε υγρό που έχει χρησιμοποιηθεί και απορριφθεί, είτε από σπίτια, επιχειρήσεις, βιομηχανίες ή άλλες πηγές. Είναι ένα πολύπλοκο μείγμα οργανικών και ανόργανων ενώσεων, παθογόνων, θρεπτικών και άλλων ουσιών που μπορεί να αποτελέσουν απειλή για το περιβάλλον και τη δημόσια υγεία εάν δεν αντιμετωπιστούν σωστά (Metcalf, 2014). Τα λύματα μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικούς τύπους με βάση την προέλευση, τη σύνθεση και το επίπεδο επεξεργασίας τους. Τα οικιακά λύματα, για παράδειγμα, παράγονται από νοικοκυριά και περιέχουν ανθρώπινα απόβλητα, υπολείμματα τροφίμων, καθαριστικά και άλλη οργανική ύλη. Τα βιομηχανικά λύματα, από την άλλη πλευρά, παράγονται από τη μεταποίηση, την εξόρυξη και άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες και μπορεί να περιέχουν βαρέα μέταλλα, διαλύτες και άλλες επικίνδυνες ουσίες (Wang, 2016).

Τα απόβλητα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την προέλευση τους (Μανιός, 2007). Πιο συγκεκριμένα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες σύμφωνα με την ΚΥΑ Υ.Α. οικ. 5673/400/1997 (ΦΕΚ 192/Β` 14.3.1997) :

- **Οικιακά λύματα:** τα λύματα από περιοχές κατοικίας και υπηρεσιών που προέχονται κυρίως από τις λειτουργίες του ανθρώπινου οργανισμού και τις εμπορικές δραστηριότητες

- **Αστικά απόβλητα:** τα οικιακά λύματα ή το μείγμα οικιακών με βιομηχανικά υγρά απόβλητα ή και όμβρια ύδατα.
- **Βιομηχανικά υγρά απόβλητα:** οποιαδήποτε υγρά απόβλητα που απορρίπτονται από κτίρια και χώρους που χρησιμοποιούνται για οποιαδήποτε εμπορική ή βιομηχανική δραστηριότητα, και τα οποία δεν είναι οικιακά λύματα ή όμβρια ύδατα.

2.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά αστικών υγρών αποβλήτων

Τα υγρά απόβλητα αποτελούνται κατά 99,9% από νερό με σχετικά μικρές περιεκτικότητες αιωρούμενων και διαλυμένων οργανικών και ανόργανων ουσιών (Πανώρας and Ηλίας, 1999). Ανάλογα με την προέλευση τους, τα υγρά απόβλητα έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, παρόλα αυτά υπάρχουν ορισμένα εργαλεία και δείκτες με βάση τα οποία αξιολογούνται τα χαρακτηριστικά τους (Amoatey & Bani, 2011).

Τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων χωρίζονται σε φυσικά, χημικά και μικροβιολογικά (Κούγκολος, 2007). Πολλά από τα χαρακτηριστικά αλληλοσχετίζονται, για παράδειγμα η θερμοκρασία επηρεάζει τις ποσότητες των διαλυμένων αερίων στα υγρά απόβλητα και την βιολογική δραστηριότητα τους (Tchobanoglous, 2003). Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι επιτρεπόμενες τιμές των κύριων ποιοτικών χαρακτηριστικών για την απόρριψη επεξεργασμένων αστικών λυμάτων στην Ελλάδα σύμφωνα με την ΚΥΑ-5673-97.

Πίνακας 2.1 Απαιτήσεις για την απόρριψη επεξεργασμένων αστικών λυμάτων σύμφωνα με την ΚΥΑ-5673-97.

Παράμετρος	Μονάδα	Μέση Συγκέντρωση
BOD ₅	mg/L O ₂	25
COD	mg/L O ₂	125
TSS	mg/L	35
Ολικός Φώσφορος (Total Phosphorous, TP)	mg/L ανά 1.000-100.000 ισοδύναμο πληθυσμό	15
Ολικό Αζωτο (Total Nitrogen, TN)	mg/L ανά 1.000-100.000 ισοδύναμο πληθυσμό	2

Να σημειωθεί πως για τα TP και TN οι απαιτήσεις αφορούν την διάθεση λυμάτων σε ευαίσθητες περιοχές.

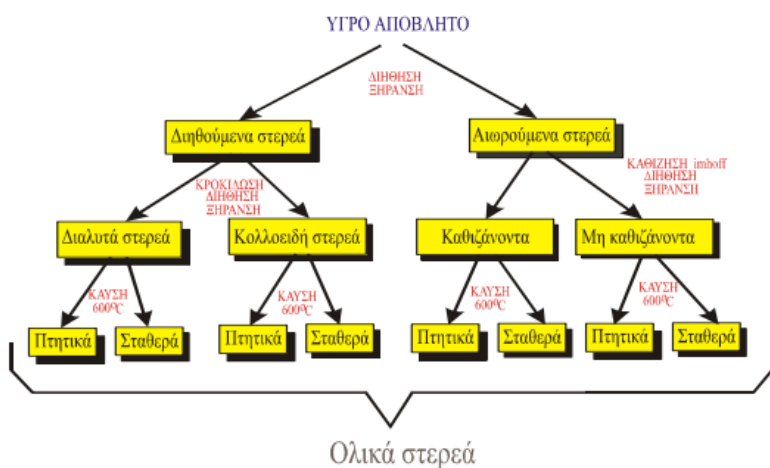
2.3.1 Στερεά

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους ρύπανσης των νερών είναι η περιεκτικότητα του σε Ολικά Στερεά (Total Solids, TS) τα οποία προσδιορίζονται με ζύγιση του υλικού που απομένει μετά από εξάτμιση ορισμένου όγκου δείγματος στους 102-105 °C και εκφράζονται ως mg/L. Τα TS διαχωρίζονται σε Αιωρούμενα Στερεά (Suspended Solids, SS) και σε Διαλυτά Στερεά (Dissolved Solids, DS). Τα αιωρούμενα στερεά διακρίνονται σε καθιζάνοντα, τα οποία κατακάθονται στον πυθμένα κωνικού δοχείου, τον κώνο imhoff (Εικόνα 2.1.) και είναι ενδεικτικά των στερεών που αφαιρούνται από δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης (Smith & Schroeder, 1985).



Εικόνα 2.1 Κώνος Imhoff (Πατσακίδου, 2016).

Το κλάσμα των διηθήσιμων στερεών αποτελείται από κολλοειδή και διαλυμένα στερεά. Η κατηγορία των κολλοειδών στερεών αποτελείται από στερεά που η διάμετρος τους κυμαίνεται από 1nm έως 1μm. Δεν είναι δυνατόν να καθιζάνουν διότι η εξωτερική τους επιφάνεια φέρνει ηλεκτρικά φορτία και η απομάκρυνσή τους από το αιώρημα απαιτεί βιολογική οξείδωση ή κροκίδωση. Τα διαλυμένα στερεά αποτελούνται από μόρια και ιόντα οργανικά και ανόργανα που βρίσκονται σε πραγματική διάλυση στα υγρά απόβλητα (Βλυσίδης, 2007). Στην εικόνα 2.2. παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των στερεών στα υγρά απόβλητα



Εικόνα 2.2 Διαχωρισμός και ανάλυση κατά κατηγορίες των στερεών που περιέχονται σε ένα υγρό απόβλητο (Βλυσίδης, 2007).

Τα στερεά μπορούν να ταξινομηθούν επίσης, στα Πτητικά Στερεά (Volatile Solids, VS) δηλαδή σε εκείνα που εξατμίζονται σε υψηλή θερμοκρασία (600°C) και είναι οργανικά και σε εκείνα που δεν εξατμίζονται και ονομάζονται Σταθερά Στερεά (Fixed Solids, FS) (Alturkmani, 2013).

2.3.2 Ενεργός οξύτητα (pH)

Η ενεργός οξύτητα (pH) είναι ένας εύχρηστος τρόπος έκφρασης της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου ή αλλιώς τον κατιόντων υδροξωνίου (H_3O^+) σε ένα υδατικό διάλυμα. Ο συνήθης τρόπος έκφρασης της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου γίνεται με τον προσδιορισμό της τιμής του pH, που ορίζεται ως ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης των υδρογονοϊόντων, δηλαδή $pH = -\log_{10} (H^+)$. Το pH μετράται σε κλίμακα από 0 – 14 (Εικόνα 2.3), με ουδέτερο σημείο την τιμή 7, όπου τα ιόντα υδρογόνου και υδροξυλίου βρίσκονται σε ίσες συγκεντρώσεις. Ύδατα με τιμές pH μικρότερες από 7 ορίζονται ως όξινα και με τιμές μεγαλύτερες από 7, ως αλκαλικά. Η τιμή του pH στα ύδατα είναι σε άμεση συνάρτηση με το είδος των χημικών ουσιών που περιέχονται σε αυτά, ρυθμίζει τους μηχανισμούς των αντιδράσεων και επιταχύνει ή παρεμποδίζει τις βιοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα (Metcalf & Eddy, 2003).

Έντονα όξινα ή αλκαλικά ύδατα και απόβλητα δημιουργούν προβλήματα κατά την επεξεργασία και πρέπει να γίνεται ρύθμιση του pH στα επιθυμητά ανά περίπτωση όρια. Για παράδειγμα η βιολογική επεξεργασία πρέπει να γίνεται σε τιμές pH που κυμαίνονται στην ουδέτερη περιοχή, μεταξύ 6 – 8 (Riffat, 2013).



Εικόνα 2.3 Τυπικές τιμές pH (Ζανάκη, 2001).

Στα νερά φυσικής προέλευσης το pH κυμαίνεται κυρίως μεταξύ 6,5 – 8,5. Σε αυτά τα όρια πρέπει να βρίσκεται το pH των λυμάτων και αποβλήτων πριν τη διάθεσή τους στη θάλασσα, τα ρέματα και τους υπονόμους ώστε να μην μεταβάλλονται οι αντίστοιχες τιμές των φυσικών νερών (Ζανάκη, 2001).

2.3.3 Κατανομή μεγέθους σωματιδίων

Για τον πλήρη προσδιορισμό και την κατανόηση της φύσης των σωματιδίων που αποτελούν τα TSS των υγρών αποβλήτων, είναι απαραίτητη η εφαρμογή μετρήσεων και η ανάλυση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων (Metcalf, 1991). Οι πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος των σωματιδίων χρίζει ιδιαίτερης σημαντικότητας για την εκτίμηση της αποδοτικότητας των σταδίων επεξεργασίας. Επειδή η αποδοτικότητα τόσο της χλωρίωσης, όσο και της υπεριώδους ακτινοβολίας στη διαδικασία απολύμανσης εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων, η εύρεση του μεγέθους των σωματιδίων θεωρείται πολύ σημαντική, ειδικότερα τις σημερινές μέρες που υπάρχει αυξημένη ανάγκη για την επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων (Metcalf & Eddy, 2003).

2.3.4. Πυκνότητα

Ως πυκνότητα των υγρών αποβλήτων ορίζεται η μάζα τους ανά μονάδα όγκου (kg/L). Αποτελεί μια σημαντική παράμετρο διότι λόγω των ρευμάτων πυκνότητας που μπορεί να σχηματιστούν ενδέχεται να επηρεαστεί η λειτουργία των δεξαμενών καθίζησης, χλωρίωσης και άλλων μονάδων επεξεργασίας (Metcalf & Eddy, 2003). Συχνά χρησιμοποιείται η σχετική πυκνότητα στη θέση της πυκνότητας η οποία ορίζεται από την εξίσωση (1.1) ως:

$$S_w = \quad (2.1)$$

Όπου:

ρ_w = πυκνότητα υγρών αποβλήτων

ρ_o = πυκνότητα του νερού

2.3.5 Χρώμα

Για να είναι το νερό αισθητικά ευχάριστο θα πρέπει να είναι πρακτικώς απαλλαγμένο από χρώμα. Επιπλέον, ο χρωματισμός των υδάτων εμποδίζει την διέλευση του φωτός και επομένως τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης των αυτότροφων οργανισμών. Όταν το χρώμα των υγρών αποβλήτων είναι μαύρο, τα υγρά απόβλητα θεωρείται ότι έχουν υποστεί σήψη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το γκρι, το σκούρο γκρι και το μαύρο χρώμα των υγρών αποβλήτων οφείλεται στη δημιουργία σουλφιδίων μετάλλων, τα οποία σχηματίζονται όταν τα σουλφίδια που παράγονται κάτω από αναερόβιες συνθήκες αντιδρούν με τα μέταλλα των υγρών αποβλήτων (Metcalf & Eddy, 2003). Η αλλαγή στο χρώμα οφείλεται κυρίως στην κατανάλωση του διαλυμένου οξυγόνου από μικροοργανισμούς που αποικοδομούν τις οργανικές ενώσεις των αποβλήτων (Μαρκαντωνάτος, 1990).

2.3.7 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία του νερού είναι πλήρως εξαρτώμενη από την εποχή, καθώς παρατηρούνται διακυμάνσεις στην θερμοκρασία υγρών αποβλήτων από μήνα σε μήνα. Η θερμοκρασία είναι μία πολύ κρίσιμη παράμετρος αφού επηρεάζει την υδρόβια ζωή, την ταχύτητα των χημικών και βιοχημικών αντιδράσεων καθώς και την καταλληλότητα του για παραγωγικές χρήσεις. Οι Abdulla (2020) και Alisawi (2020) αναφέρουν πως η θερμοκρασία είναι βασική παράμετρος στη διατήρηση της αποτελεσματικότητας της απομάκρυνσης του BOD₅ από τις ΕΕΛ. Επίσης η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η θερμοκρασία επηρεάζει την αφαίρεση του COD και των TSS. Περαιτέρω, παρατηρήθηκε ότι η απομάκρυνση του BOD₅ ήταν μέγιστη το καλοκαίρι, και τελικά, η απόδοση αφαίρεσης έπεσε το χειμώνα κατά 73,68%. Η αφαίρεση του COD παρατηρήθηκε επίσης καλύτερη το καλοκαίρι και σταδιακά η αποτελεσματικότητα έπεσε το χειμώνα (47% μέγιστο). Τα TSS επηρεάστηκαν λιγότερο από την αλλαγή της θερμοκρασίας.

Ο Hughes (2021) προσδιόρισε τις επιπτώσεις της θερμοκρασίας σε διάφορες ΕΕΛ. Ήταν προφανές ότι το πρόβλημα της οσμής αυξήθηκε με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, αποφράξεις παρατηρήθηκαν σε αντλιοστάσια λόγω της αυξημένης ροής των λυμάτων. Επί προσθέτως, η αποτελεσματικότητα της απομάκρυνσης του φωσφόρου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Alisawi, 2020).

Ο Metcalf (1991) αναφέρει συγκεκριμένες παρατηρήσεις που βασίζονται στη μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στα συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων:

- Με την αύξηση της θερμοκρασίας η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου μειώνεται. Το διαλυμένο οξυγόνο είναι μια βασική παράμετρος για την βιολογική ή δευτεροβάθμια επεξεργασία. Το διαλυμένο οξυγόνο επηρεάζει επίσης την ανάπτυξη της μικροβιακής κοινότητας
- Η αναερόβια χώνευση και η διαδικασία μεθανογένεσης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στη μεταβολή της θερμοκρασίας. Η παραγωγή μεθανίου αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Οι υψηλότερες θερμοκρασίες επηρεάζουν την πρωτοβάθμια και τη δευτεροβάθμια επεξεργασία λυμάτων, καθώς αυξάνουν τον ρυθμό αντίδρασης της μικροβιακής κοινότητας και μειώνουν την πυκνότητα της καθιζάνουσας ιλύς (Zouboulis, 2015).

2.3.8 Θολότητα

Η παρουσία συστατικών στα υγρά απόβλητα εμποδίζουν το φως να διαδοθεί μέσα από το νερό απορροφώντας ή διαχέοντας τις ακτίνες φωτός. Η συγκεκριμένη παρεμβολή στην δίοδο του φωτός, λέγεται θολότητα των υγρών αποβλήτων. Η μέτρηση της θολότητας βασίζεται στη σύγκριση της έντασης του φωτός που περνά διαμέσο ενός δείγματος με αυτή που διαπερνά ένα πρότυπο αιώρημα, κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Μονάδα μέτρησης της θολότητας είναι η νεφελομετρική θολότητα (NTU, Nephelometric Turbidity Unit) (Γρηγορίου, 2017). Παρόλο που δεν υπάρχει κάποια μαθηματική σχέση για να εκφράσει ποσοτικά την θολότητα, μία προσεγγιστική σχέση που υπάρχει για να υποδηλώσει την θολότητα ολικών αιωρούμενων

σωματιδίων εκροών μετά από δευτεροβάθμια επεξεργασία ενεργού ιλύος είναι (Metcalf & Eddy, 2003):

$$TSS = (TSS_F) \cdot (T) \quad (2.2)$$

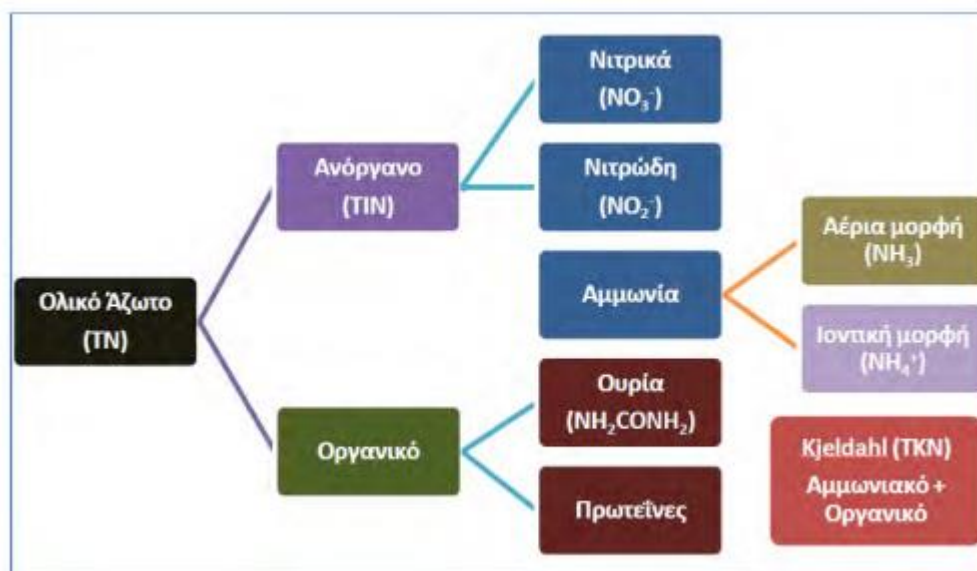
Όπου:

TSS_F = παράγοντας που χρησιμοποιείται για την μετατροπή των μετρήσεων θολότητας σε ολικά αιωρούμενα στερεά (mg/l TSS)/NTU

T= θολότητα, NTU

2.3.9 Άζωτο

Το άζωτο (Εικόνα 2.4) είναι βασικό στοιχείο για τη σύνθεση των πρωτεϊνών και οι γνώσεις για τη μορφή με την οποία βρίσκεται στα απόβλητα καθώς επίσης και οι συγκεντρώσεις του σε οποιαδήποτε μορφή, είναι απαραίτητες για τη διαδικασία αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας των βιολογικών διεργασιών επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Νταράκας, 2010). Οι κύριες πηγές αζώτου είναι τα αζωτούχα συστατικά των φυτών και των ζώων, το νιτρικό νάτριο και το ατμοσφαιρικό άζωτο. Το ολικό άζωτο διακρίνεται σε οργανικό και ανόργανο άζωτο. Στο ανόργανο άζωτο ανήκουν τα νιτρικά, τα νιτρώδη καθώς και η αμμωνία είτε σε αέρια μορφή είτε σε ιοντική μορφή. Στο οργανικό άζωτο ανήκει οι ουρία καθώς και οι πρωτεΐνες. Το αζωτούχο φορτίο των φρέσκων ανεπεξεργαστων αστικών λυμάτων κυμαίνεται από 35 ως 100 mg/L (Νταράκας, 2010).



Εικόνα 2.4 Μορφές του αζώτου στα αστικά λύματα (Νταράκας, 2010).

2.3.10 Φώσφορος

Ο φώσφορος είναι ένα από τα βασικά συστατικά των ζώντων οργανισμών και περιέχεται στα απόβλητα στις παρακάτω μορφές (Στάμου, 1995):

- Ανόργανος φώσφορος, κυρίως ως ορθοφωσφορικά (PO_4^{-3} , HPO_4^{-3} , $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$) ή και ως πολυφωσφορικά ($\text{P}_2\text{O}_7^{-4}$).
- Οργανικός φώσφορος, σε μικρότερες ποσότητες από ότι ο ανόργανος

Τα πολυφωσφορικά σε υδατικό διάλυμα υδρολύονται σε ορθοφωσφορικά που μπορούν να καταναλωθούν απευθείας από διάφορους μικροοργανισμούς. Η διοχέτευση αποβλήτων που περιέχουν φώσφορο σε ένα υδάτινο φορέα ευνοεί, σε συνδυασμό με την παρουσία αζώτου, το φαινόμενο του ευτροφισμού (Τζιάννα, 2009). Το φορτίο επιβάρυνσης των λυμάτων με φώσφορο υπολογίζεται συνήθως με τιμές περίπου 2–4 gr/κατ.-ημ. (Νταρακάς, 2010).

2.3.11 Χλωριούχα

Τα χλωριούχα προέρχονται από το πόσιμο νερό, τα ανθρώπινα απόβλητα και από ορισμένες βιομηχανίες. Η κύρια επίδραση των χλωριούχων στα λύματα είναι η μείωση της διαλυτότητας του οξυγόνου και η επιρροή του στη μέτρηση της παραμέτρου COD (Στάμου & Βογιατζής, 1994).

2.3.12 Θεικές ενώσεις

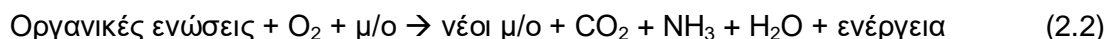
Το θείο αποτελεί το βασικό συστατικό των ζωντανών οργανισμών γεγονός που ενισχύει την παρουσία του στα λύματα. Η σημαντικότερη από τις ενώσεις του θείου είναι τα θειικά, τα οποία μετατρέπονται σε υδρόθειο και θειικό οξύ. Τα κυριότερα προβλήματα των ενώσεων θείου προκαλούνται λόγω του υδρόθειου και είναι οι δυσάρεστες οσμές και αν υπάρχει σίδηρος, οι ενώσεις με το υδρόθειο δίνουν μαύρο χρώμα τόσο στη παραγόμενη ιλύς όσο και στα υδατικά απόβλητα. Επί προσθέτως το θειικό οξύ προκαλεί διάβρωση στους αγωγούς αποχέτευσης (Στάμου & Βογιατζής, 1994).

2.3.13 Βαρέα μέταλλα

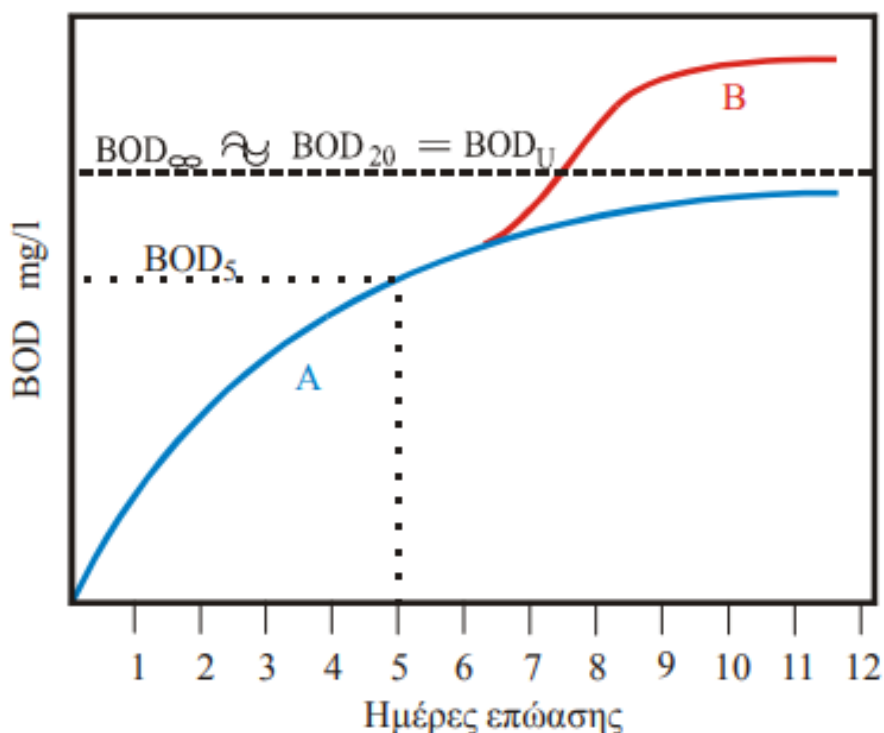
Βαρέα μέταλλα θεωρούνται τα μέταλλα τα οποία έχουν πυκνότητα μεγαλύτερη από $5,0 \text{ g/cm}^3$, όπως το κάδμιο, ο κασσίτερος, το κοβάλτιο, ο μόλυβδος, ο χαλκός, ο χρυσός, ο ψευδάργυρος κ.α. (Förstner & Wittmann, 2012). Τα βαρέα μέταλλα έχουν φυσική γεωλογική προέλευση ή είναι αποτέλεσμα βιομηχανικής δραστηριότητας και ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Ορισμένα βαρέα μέταλλα έχουν εξειδικευμένες χρήσεις ή είναι ιδιαίτερα τοξικά και άλλα είναι απαραίτητα ως ιχνοστοιχεία για τον ανθρώπινο οργανισμό (Τschounpou, 2012). Παρόλα αυτά η ραγδαία ανάπτυξη στις συγκεντρώσεις στο περιβάλλον λόγω τις ανθρωπογενείς δραστηριότητας τα καθιστά ιδιαίτερα επικίνδυνα για την υγεία του ανθρώπου. Η τοξικότητά τους αλλάζει ανάλογα με το είδος του μετάλλου και τη μορφή με την οποία συναντώνται στο περιβάλλον (Αλμπάνης, 2009).

2.3.14 BOD

Το BOD (Εικόνα 2.5) χρησιμοποιείται συνήθως ως έμμεση μέτρηση της οργανικής ύλης και αποτελεί τη συγκέντρωση της οργανικής ύλης όσον αφορά το οξυγόνο που απαιτείται από τους μικροοργανισμούς για την πλήρη οξείδωση των αποβλήτων. Η οξείδωση περιγράφεται στην παρακάτω αντίδραση (1.2) (Woodard, 2001):



Δεδομένου ότι η βιοχημική αποδόμηση είναι βραδεία διαδικασία η οποία ολοκληρώνεται σε μεγάλα χρονικά διαστήματα, μετράται συνήθως το οξυγόνο που καταναλώνεται εντός των πρώτων πέντε ημερών από την έναρξή της (προσδιορισμός του BOD_5), ενώ όταν ο χρόνος επώασης είναι 20 ημέρες προκύπτει ο προσδιορισμός του BOD_{20} (Henze, 2008).



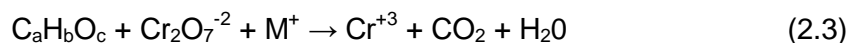
Εικόνα 2.5 Καμπύλη BOD (A) και καμπύλη νιτροποίησης (B) (Βλυσίδης, 2007).

Η οριακή τιμή της καμπύλης A αντιστοιχεί στην κατανάλωση οξυγόνου για άπειρες ημέρες επώασης η οποία προσεγγίζεται πρακτικά σε είκοσι ημέρες. Η (B) καμπύλη παριστάνει το απαιτούμενο οξυγόνο για τις αντιδράσεις νιτροποίησης που μπορούν να συμβούν κατά τη διάρκεια του πειράματος αν υπάρχουν στο δείγμα και βακτηρίδια νιτροποίησης. Ενώ το

Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο Απόλυτο (Biochemical Oxygen Demand Ultimate, BOD_U) αντιστοιχεί στο απαιτούμενο οξυγόνο για την βιο-οξείδωση οργανικού περιεχομένου μετά από άπειρες μέρες (Βλυσίδης, 2007).

2.3.15 COD

Τα οργανικά συστατικά μετρούνται από την ανάλυση του COD ή του BOD₅, αναλύσεις που είναι ιδιαίτερα σημαντικές στο σχεδιασμό μιας ΕΕΛ. Ο προσδιορισμός του COD πραγματοποιείται με την κατανάλωση διχρωμικού καλίου. Το διχρωμικό κάλιο είναι ένας πολύ ισχυρός οξειδωτής κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την οξείδωση και των μη βιολογικά αποδομήσιμων και των εν μέρει βιοαποδομήσιμων ενώσεων.. Η αντίδραση (1.3) που εμπλέκεται στη μέτρηση της οργανικής ύλης μπορεί να αναπαρασταθεί ως εξής (Woodard, 2001):

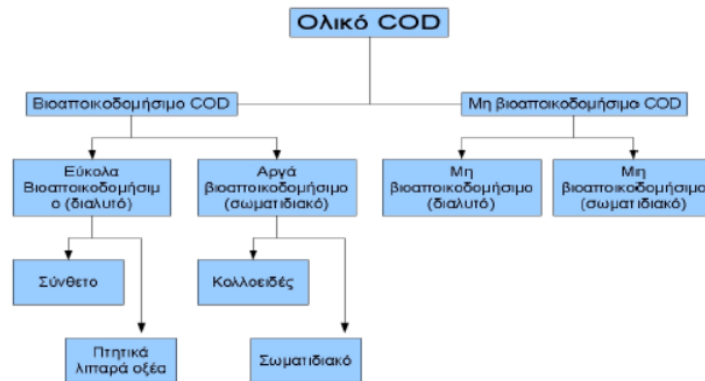


Σχεδόν όλες οι οργανικές ενώσεις οξειδώνονται στη δοκιμή COD ενώ μόνο μερικές αποσυντίθενται κατά τη διάρκεια της δοκιμής BOD, με αποτέλεσμα οι τιμές COD να είναι πάντα υψηλότερες από τις τιμές BOD (Peirce, 1998).

Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ανάλυσης του COD (Εικόνα 2.6) είναι ότι μπορεί να ολοκληρωθεί σε 120 λεπτά ενώ η ανάλυση του BOD₅ απαιτεί 5 ημέρες. Τα κυριότερα κλάσματα COD είναι το διαλυτό COD και το COD σωματιδιακής μορφής. Στις βιολογικές επιστήμες, τα κλάσματα αυτά κατηγοριοποιούνται περισσότερο παρακάτω για την εκτίμηση του βαθμού επεξεργασίας του νερού (Tchobanoglous & Stensel, 2007). Κλάσματα του COD είναι τα παρακάτω:

- Εύκολα βιοαποικοδομήσιμο διαλυτό COD
- Δύσκολο βιοαποικοδομήσιμο κολλοειδές COD σωματιδιακής μορφής
- Μη βιοαποικοδομήσιμο διαλυτό COD
- Μη βιοαποικοδομήσιμο κολλοειδές COD σωματιδιακής μορφής

Το εύκολα βιοαποικοδομήσιμο διαλυτό COD κατηγοριοποιείται περαιτέρω σε σύνθετο COD που μπορεί να εξατμιστεί με τη μορφή πτητικών λιπαρών οξέων. Δυστυχώς δεν υπάρχουν σαφείς διαχωρισμοί μεταξύ των ορισμών του διαλυτού COD και του COD σωματιδιακής μορφής. Όταν χρησιμοποιείται η διήθηση ως τεχνική για το διαχωρισμό του δείγματος, η σχετική κατανομή μεταξύ τους εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων του φίλτρου. Μια εναλλακτική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εύρεση του διαλυτού COD περιλαμβάνει την καθίζηση των αιωρούμενων στερεών και ενός τμήματος του κολλοειδούς υλικού. Το COD του υγρού αντιστοιχεί στο διαλυτό COD (Tchobanoglous & Stensel, 2007).



Εικόνα 2.6 Διαχωρισμός COD (Metcalf and Eddy, 2007).

2.3.16 Μικροοργανισμοί

Οι μικροοργανισμοί συνεισφέρουν σε μια ΕΕΛ κυρίως στη δευτεροβάθμια επεξεργασία και χωρίζονται σε δυο κατηγορίες (Στάμου & Βογιατζής, 1994):

i) **Ανάλογα με την πηγή άνθρακα που χρησιμοποιούν σαν τροφή διακρίνονται σε:**

- αυτότροφους μικροοργανισμούς, οι οποίοι τρέφονται με διοξείδιο του άνθρακα
- ετεροτροφικούς μικροοργανισμούς, οι οποίοι τρέφονται με οργανικό άνθρακα.

ii) **Ανάλογα με την παρουσία οξυγόνου στο περιβάλλον που αναπτύσσονται και δρουν χωρίζονται σε**

- αερόβιοι, που δρουν μόνο κάτω από την παρουσία οξυγόνου
- αναερόβιοι, που δρουν μόνο κάτω από την απουσία οξυγόνου
- αερόβιοι-αναερόβιοι, που δρουν είτε με την παρουσία είτε με την απουσία οξυγόνου.

Τα βασικότερα είδη μικροοργανισμών που συναντιούνται στις ΕΛΛ είναι τα παρακάτω (Στάμου & Βογιατζής, 1994):

i) **Βακτήρια:** είναι μονοκύτταροι οργανισμοί, οι οποίοι αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την αποδόμηση και σταθεροποίηση την οργανικής ύλης, τόσο στη φύση όσο και στις ΕΕΛ. Ένα από τα συνηθέστερα βακτήρια είναι η *Escherichia coli*. Μια κατηγορία βακτηρίων τα κολοβακτηριοειδή χρησιμοποιούνται ως δείκτες μόλυνσης του περιβάλλοντος από ανθρώπινα απόβλητα.

ii) **Μύκητες:** Οι μύκητες μαζί με τα βακτήρια είναι υπεύθυνοι για την σήψη του οργανικού φορτίου. Είναι ετερότροφοι, αερόβιοι, μη φωτοσυνθετικοί, χημειότροφοι, οργανισμοί. Επίσης, είναι οργανισμοί που εμφανίζονται σε όλα τα περιβάλλοντα και αντέχουν σε συνθήκες που για άλλους μικροοργανισμούς είναι δυσμενείς, όπως σε χαμηλό pH και μικρές συγκεντρώσεις θρεπτικών.

iii) **Πρωτόζωα:** Οι περισσότερες κατηγορίες πρωτόζωων μικροοργανισμών είναι αερόβιοι και επιλεκτικά αναερόβιοι χημειοτροφικοί οργανισμοί. Η τροφή τους είναι βακτήρια και άλλοι μικροοργανισμοί. Η σπουδαιότητα των πρωτόζωων έγκειται στο γεγονός ότι διατηρούν την ισορροπία μεταξύ των διαφορετικών μικροοργανισμών.

iv) **Μικροφύκη ή άλγη:** Αυτότροφοι, φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί, οι οποίοι δημι-ουργούν προβλήματα στα επιφανειακά νερά. Επίσης, η άλγη είναι υπεύθυνη για την δημιουργία ευτροφικών καταστάσεων,σε περίπτωση που στα απόβλητα υπάρχει μεγάλη ποσότητα θρεπτικών συστατικών

v) **Έλμινθες-Νηματοειδή:** Είναι παράσιτα, τα οποία θεωρούνται από τους πιο επιβλαβείς οργανισμούς για την ανθρώπινη υγεία και είναι υπεύθυνα για πολλές ασθένειες.

vi) **Ιοί:** Ανθεκτικοί οργανισμοί, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα αναπαραγωγής αν βρεθούν σε κατάλληλες συνθήκες. Αποτελούν ιδιαίτερα επιβλαβείς οργανισμούς για την ανθρώπινη υγεία.

2.4 ΕΕΛ

Οι ΕΕΛ είναι μονάδες συλλογής και επεξεργασίας αστικών ή άλλων λυμάτων των οποίων η επεξεργασία αποτελείται από διάφορες διεργασίες οι οποίες έχουν ως σκοπό την δημιουργία παραπροϊόντων τα οποία θα είναι ασφαλή για το περιβάλλον και τους ζωικούς οργανισμούς που θα βρίσκονται στο περιβάλλον εναπόθεσης. Η σημαντικότητα της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων μάλιστα έγκειται στο γεγονός ότι οι αυξανόμενες ανάγκες για νερό οδηγούν στην επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων ως πηγές άρδευσης ή για βιομηχανική χρήση (Νταρακάς, 2010). Στις ΕΛΛ επιτυγχάνεται αφαίρεση ή εξουδετέρωση συστατικών των λυμάτων, όπως τα χονδρά στερεά, η άμμος, τα λίπη και έλαια, τα παθογόνα μικρόβια, το άζωτο και το φώσφορο, τα οποία ρυπαίνουν ή μολύνουν τον υδάτινο αποδέκτη (Διαλυνάς, 1994).

2.4.1 Προ-επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Ο στόχος της προεπεξεργασίας είναι να προετοιμάσει τα υγρά απόβλητα για την περαιτέρω επεξεργασία που θα υποστούνε στη συνέχεια. Κατά την προεπεξεργασία απομακρύνονται χαλίκια, άμμος, τεμάχια ξύλου, πλαστικά και άλλα υλικά τα οποία μπορούν να προκαλέσουν μηχανολογικές βλάβες στον εξοπλισμό και στην γενικότερη ομαλή λειτουργία της ΕΕΛ. Κατά την διαδικασία αυτή, εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη παροχή στα επόμενα στάδια της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων και την ακολουθεί η πρωτοβάθμια καθίζηση (Tchobanoglous, 2003).

Εσχάρωση

Η πρώτη φυσική διεργασία σε ΕΕΛ, σε αυτό το στάδιο αποδεσμεύονται τα ογκώδη και ευμεγέθη αντικείμενα από την μάζα των υδατικών αποβλήτων, έτσι ώστε να μην δημιουργηθούν προβλήματα στον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Οι εσχάρες (Εικόνα 2.7) είναι συνήθως παράλληλες σιδερένιες ράβδοι με ομοιόμορφα διάκενα, όπου κατά την διέλευση των λυμάτων παγιδεύονται τα μεγάλα αντικείμενα όπως κουρέλια, κουτάκια, πέτρες, κλαδιά, φύλλα (Μαρκαντωνάτος, 1990):.



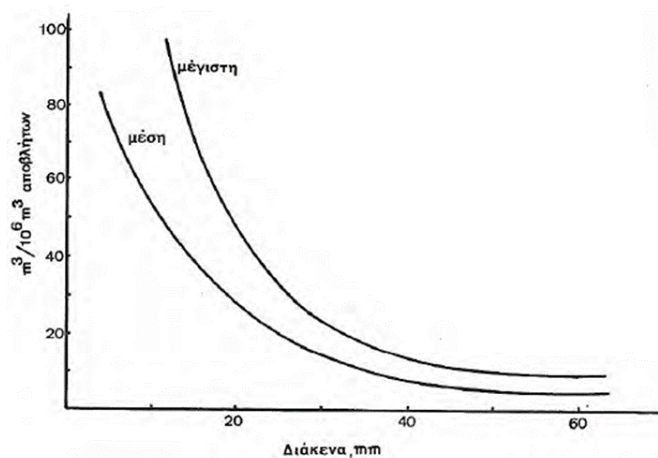
Εικόνα 2.7 Κάθετες σχάρες (Τσώνης, 2003).

Τα διάφορα είδη εσχάρων ταξινομούνται ανάλογα με τον τρόπο καθαρισμού σε (Μαρκαντωνάτος, 1990):

- Χειροκαθαριζόμενες
- Μηχανικά καθαριζόμενες

Ανάλογα με το μέγεθος των ανοιγμάτων σε:

- Χονδρές σχάρες με καθαρά ανοίγματα 40-150 mm
- Μεσαίες σχάρες με καθαρά ανοίγματα 20-40 mm
- Μικρές σχάρες με καθαρά ανοίγματα 5-20 mm



Εικόνα 2.8 Ποσότητα συγκρατούμενων στερεών ανάλογα με το μέγεθος των ανοιγμάτων μιας μηχανικά καθοριζόμενης εσχάρας (Στάμου & Βογιατζής, 1994).

Το πλήθος των στερεών που παγιδεύεται στη σχάρα είναι άμεση ανάλογη συνάρτηση των διάκενων της σχάρας. Η Εικόνα 2.8 δείχνει την ποσότητα των στερεών που κατακρατείται σε μια μηχανικά καθαριζόμενη εσχάρα ανάλογα με το μέγεθος των ανοιγμάτων (Μαρκαντωνάτος, 1990).

Εξάμμωση-Λιποσυλλογή

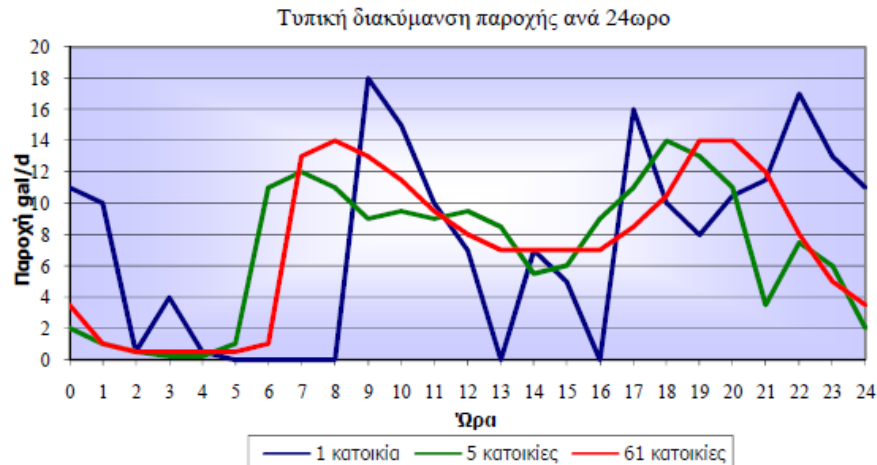
Η εξάμμωση γίνεται σε ειδικές δεξαμενές που καλούνται εξαμμωτές με την δημιουργία κατάλληλων συνθηκών ροής που ευνοούν την καθίζηση και απομάκρυνση της άμμου από τη μάζα των υδατικών αποβλήτων. Ως άμμος ορίζονται όλα τα ανόργανα σωματίδια διαμέτρου 0,15-0,2 mm και σχετικής πυκνότητας 1,5-2,7 σε θερμοκρασία 15,5 °C Η εξάμμωση γίνεται σε δεξαμενές που ονομάζονται εξαμμωτές, οι οποίοι σχεδιάζονται έτσι ώστε να απομακρύνουν ευμεγέθη ανόργανα σωματίδια (Κούγκολος, 2007).

Η αφαίρεση της άμμου, των λιπών και των ελαίων από τα λύματα στην προεπεξεργασία παίζει καθοριστικό ρόλο διότι (Διαλυνάς, 1994):

- Η άμμος και τα λίπη αν δεν αφαιρεθούν στην προεπεξεργασία συσσωρεύονται σε μετέπειτα στάδια, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα λειτουργίας και κατ'επέκταση καθαρισμού των υγρών αποβλήτων.
- Η άμμος συγκεντρώνεται στις δεξαμενές αερισμού και στα αντλιοστάσια, προκαλώντας φθορά στις αντλίες και στις μεγαλύτερες μονάδες στους χωνευτές ιλύς.
- Τα λίπη συγκεντρώνονται στη επιφάνεια των δεξαμενών αερισμού και καθίζησης, με δυσάρεστες συνέπειες όπως τη διόγκωση της ιλύς.
- Η διαφυγή λιπών από την καθίζηση προκαλεί υποβάθμιση της εκροής. Η συγκέντρωση λιπών στον αερισμό δυσκολεύει τη μεταφορά και προσρόφηση οξυγόνου και κατά συνέπεια την καλή λειτουργία της δεξαμενής αερισμού.

Δεξαμενή εξισορρόπησης ροής

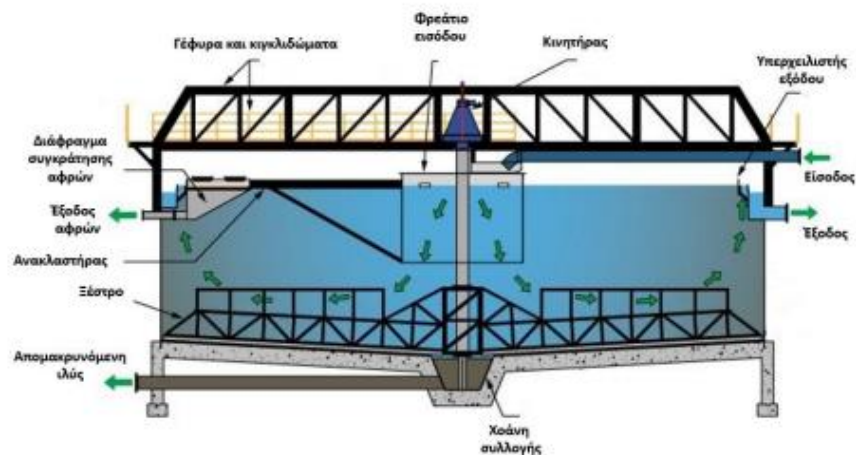
Η ποσότητα και η ποιότητα των λυμάτων που εισέρχονται σε μια ΕΕΛ δεν είναι σταθερές. Η ποιότητα των λυμάτων που εισέρχονται στο σύστημα διαφοροποιείται τόσο μέσα στο εικοσιτετράωρο όσο και κατά την διάρκεια του έτους (Εικόνα 2.9) (Metcalf, 1991). Το παραπάνω οφείλεται στις συνθήκες διαβίωσης των κατοίκων της περιοχής, σε κλιματολογικές συνθήκες και στην πιθανή εισροή επιπλέον αποβλήτων στο δίκτυο. Η διακύμανση της παροχής σε ένα τυπικό αποκεντρωμένο σύστημα επεξεργασίας φαίνεται στην εικόνα 2.9 .



Εικόνα 2.9 Διακύμανση παροχής λυμάτων (Μ.Χατζάκης, 2003)

2.4.2 Πρωτοβάθμια καθίζηση

Ένα από τα βασικά στάδια της επεξεργασίας των αποβλήτων είναι η καθίζηση των αιωρούμενων στερεών λόγω βαρύτητας. Σωματίδια που το ειδικό βάρος τους είναι μεγαλύτερο του νερού καθιζάνουν στον πυθμένα της δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης (Εικόνα 2.10) από όπου και απομακρύνονται υπό μορφή ιλύς. Τα επεξεργασμένα λύματα συνεχίζουν την επεξεργασία τους τα επόμενα στάδια. Η ιλύς στο πυθμένα της δεξαμενής απομακρύνεται με την βοήθεια μηχανισμού ξέστρου ή με αντλίες ανά συχνά διαστήματα για αποφυγή ανάπτυξης αναερόβιων συνθηκών που προκαλούν δυσοσμία ειδικά κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Γεωργιοπούλου, 2007). Το λίπος και το έλαιο, τείνουν να έχουν χαμηλότερη πυκνότητα από το περιβάλλον υγρό και ανεβαίνουν στην επιφάνεια των δεξαμενών καθίζησης, όπου συλλέγονται και αφαιρούνται από τη δεξαμενή για μετέπειτα επεξεργασία (Guyer, 2011). Στην πρωτοβάθμια καθίζηση απομακρύνονται τα TSS και BOD₅ κατά 50-70% και 25-40% αντίστοιχα (Tchobanoglous, 2003).



φορτίου (BOD) στα συστήματα ενεργού ιλύος. Πλεονέκτημα αυτού είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης, η σταθερότητα και αξιοπιστία, ο εύκολος έλεγχος και το χαμηλό σχετικά κόστος (Νταρακάς, 2010).

Απομάκρυνση φωσφόρου

Οι φωσφορούχες ενώσεις πρέπει να απομακρυνθούν από τα απόβλητα για τον ίδιο λόγο που απομακρύνονται οι αζωτούχες ενώσεις. Ο φώσφορος αποτελεί βασικό συστατικό για την σύνθεση του κυτταρικού ιστού των μικροοργανισμών της ενεργού ιλύος και για την μεταφορά ενέργειας. Αποτέλεσμα αυτού είναι η απομάκρυνση 10 – 30% ποσότητας φωσφόρου κατά τη διάρκεια της βιολογικής επεξεργασίας στις δεξαμενές αερισμού, και η μετατροπή των φωσφορικών ενώσεων σε ορθοφωσφορικά ιόντα. Η βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου πραγματοποιείται στις ΕΕΛ με την μέθοδο ενεργού ιλύος, ταυτόχρονα με τη βιολογική απομάκρυνση του οργανικού φορτίου (Νταρακάς, 2010).

2.4.3.1 Συστήματα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας

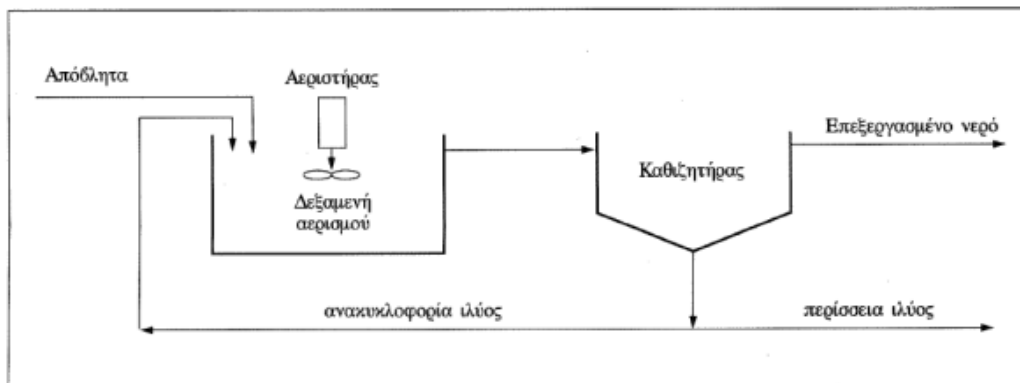
Οι κύριες βιολογικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων μπορούν να χωριστούν σε: διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας και διεργασίες αιωρούμενης βιομάζας. Στις διεργασίες προσκολλημένης βιομάζας, οι μικροοργανισμοί είναι προσκολλημένοι σε πληρωτικό υλικό και συνθέτουν το οργανικό φορτίο καθώς η ροή έρχεται σε επαφή με τα μέσα προσκόλλησης των μικροοργανισμών. Ενώ στις διεργασίες αιωρούμενης βιομάζας, οι μικροοργανισμοί διατηρούνται σε υγρό εναιώρημα σε έναν βιολογικό αντιδραστήρα με κατάλληλες τεχνικές ανάμιξης. Σε αυτές τις διεργασίες ουσιαστικά οι μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν την οργανική ύλη ως τροφή για την αναπαραγωγή νέων κυττάρων, την οξείδωση του οργανικού φορτίου σε τελικά προϊόντα και την παραγωγή ενέργειας για την συντήρησή τους.

Συστήματα αιωρούμενης βιομάζας

Σύστημα ενεργού ιλύος

Η διεργασία ενεργού ιλύος και οι παραλλαγές της αποτελούν τις επικρατέστερες βιολογικές διαδικασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων κάτω από αερόβιες συνθήκες (Spellman, 2014). Η ενεργός ιλύς αποτελείται από μια συσσωμάτωση ζωντανών και νεκρών μικροοργανισμών που δεν έχουν ακόμα αποσυντεθεί, οργανικών αιωρούμενων και κολλοειδών καθώς και άλλα οργανικά (Νταράκας, 2010). Το σύστημα ενεργού ιλύος περιλαμβάνει (Εικόνα 2.12) :

- Την δεξαμενή καθίζησης, στην οποία γίνεται ο διαχωρισμός των μικροοργανισμών από το νερό
 - Την δεξαμενή αερισμού, στην οποία εμπεριέχεται το υγρό αιώρημα των μικροοργανισμών.
- Αντλίες και σωληνώσεις για την ανακυκλοφορία μέρους της ιλύος.



Εικόνα 2.12 Διεργασία ενεργού ιλύος (Τραγανίτης και Σκουμπούρης, 1995).

Για την επιτυχή λειτουργία του συστήματος πρέπει ο λόγος BOD:N:P να είναι ίσος με 100:5:1 , ενώ το pH του συστήματος πρέπει να κυμαίνεται σε ουδέτερες ως αλκαλικές περιοχές και ο χρόνος παραμονής στη δεξαμενή αερισμού να είναι 60-90 λεπτά (Γρηγορίου, 2017).

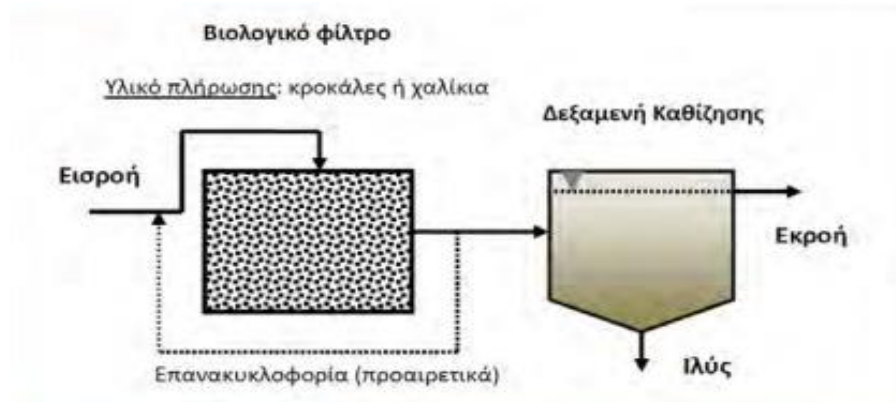
Αεριζόμενες λίμνες

Οι αεριζόμενες λίμνες είναι αβαθείς λίμνες, βάθους μέχρι 3 m, οι οποίες κατασκευάζονται με την εκσκαφή του εδάφους και τη στεγανοποίηση του πυθμένα με άργιλο, μπετόν ή πλαστικά φύλλα. Οι αεριζόμενες λίμνες είναι συστήματα μικτά, στα οποία το στο ανώτερο στρώμα διατηρούνται αερόβιες συνθήκες λόγω του ατμοσφαιρικού οξυγόνου ή του παραγόμενου από τα φύκια οξυγόνου μέσω φωτοσύνθεσης, ενώ στο κατώτερο στρώμα όπου δεν φτάνει το φως επικρατούν αναερόβιες συνθήκες. Το απόβλητο οξυγονώνεται με τη βοήθεια επιφανειακών διαχυτήρων και η καθίζηση της ιλύς επιτυγχάνεται, διακόπτοντας τον αερισμό για μικρό χρονικό διάστημα. Με την χρήση αεριζόμενων λιμνών για χρόνους παραμονής 30-60 ημέρες επιτυγχάνεται απομάκρυνση BOD μεγαλύτερη από 90%, όπως παρατηρούμε ο χρόνος παραμονής είναι πολύ μεγάλος, γεγονός που ευθύνεται στη βιοαποδομησιμότητα του οργανικού φορτίου, την ανεπάρκεια ή όχι θρεπτικών, τις θερμοκρασιακές μεταβολές και την παρουσία ή όχι τοξικών μετάλλων στα απόβλητα (Henze, 2013).

Συστήματα προσκολλημένης βιομάζας

Βιολογικά φίλτρα

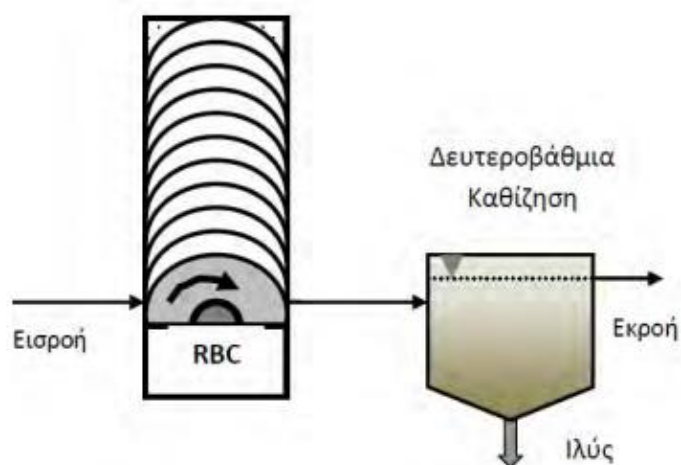
Το σύστημα βιολογικού φίλτρου περιλαμβάνει μια κλίνη με διηθητικό μέσο, στο οποίο είναι προσκολλημένοι οι μικροοργανισμοί και μια δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης (Εικόνα 2.13). Οι μικροοργανισμοί οξειδώνουν τις οργανικές ουσίες που έχουν τα απόβλητα που περνούν στο εσωτερικό της κλίνης (Γρηγορίου, 2017).



Εικόνα 2.13 Βιολογικό Φίλτρο με χαλίκια και προαιρετική επανακυκλοφορία (Νταράκας, 2010).

Βιολογικοί δίσκοι

Οι Βιολογικοί Δίσκοι (Rotating Biological Contactors, RBC) λειτουργούν όπως τα βιολογικά φίλτρα, με τη μόνη διαφορά ότι οι μικροοργανισμοί βρίσκονται πάνω σε περιστρεφόμενους δίσκους (Εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14 Σύστημα Περιστρεφόμενου Βιολογικού Δίσκου (Νταράκας, 2010).

2.4.4 Τριτοβάθμια επεξεργασία

Στη τριτοβάθμια επεξεργασία απομακρύνονται ενώσεις αζώτου (N), φωσφόρου (P) και οι παθογόνοι μικροοργανισμοί ούτως ώστε τα επεξεργασμένα απόβλητα να πληρούν όλους τους διεθνείς κανόνες και πρότυπα σε περίπτωση της επαναχρησιμοποίησής τους (Amoatey & Bani, 2011). Σε επόμενο στάδιο, πραγματοποιείται η διαδικασία της απολύμανσης που αποτελεί το τελευταίο βήμα της επεξεργασίας και γίνεται με την χρήση πολλών μεθόδων συμπεριλαμβανομένης της χρήσης χλωρίου, όζοντος και Υπεριώδους Ακτινοβολίας (UV, UltraViolent) ούτως ώστε τα υγρά απόβλητα να πληρούν όλους τους διεθνείς κανόνες και πρότυπα για την αγροτική και αστική επαναχρησιμοποίησή τους (Amoatey & Bani, 2011).

Η τριτοβάθμια επεξεργασία πραγματοποιείται με συστήματα διήθησης τα οποία αποσκοπούν στην απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, τα οποία έχουν διαφύγει από την προηγούμενη επεξεργασία και επιτυγχάνεται με διάφορους συνδυασμούς διηθητικών μέσων, όπως η άμμος, ο ανθρακίτης και διάφορες συνθετικές ίνες και μεμβράνες. Η ταξινόμηση των φίλτρων διήθησης γίνεται σύμφωνα με τον ρυθμό διήθησης, σε βραδέα και ταχεία φίλτρα, καθώς και βάσει του αριθμού στρωμάτων τους διακρίνονται σε μονοστρωματικά και πολυστρωματικά φίλτρα (Χρυσικόπουλος, 2013).

Αντίστροφη ώσμωση (Reverse Osmosis, RO)

Μέθοδος αντιστροφής της όσμωσης που είναι φυσικοχημική διεργασία. Συγκεκριμένα όταν ασκηθεί στο διάλυμα εξωτερική πίεση μεγαλύτερη από την οσμωτική του πίεση, τότε το φαινόμενο αντιστρέφεται και μόρια διαλύτη θα εξέρχονται από το διάλυμα προς τον καθαρό διαλύτη. Μία μεμβράνη χρησιμοποιείται σαν μοριακό φίλτρο που συγκρατεί τα διαλυμένα συστατικά ενός υδατικού διαλύματος. Η διεργασία διαχωρίζει τα διαλυτά συστατικά του νερού και η δύναμη εξαναγκάζει την διέλευση καθαρού νερού διαμέσου της ημιπερατής μεμβράνης και όχι των διαλυτών συστατικών του. Η αντίστροφη όσμωση επιτυγχάνει την πλήρη απομάκρυνση διαλυτών αλάτων και οργανικών μικρορυπαντών από το νερό (Νταρακάς, 2010).

Προσρόφηση

Φαινόμενο μεταφοράς μάζας από την υγρή φάση στην επιφάνεια ενός στερεού. Είναι διεργασία συσσώρευσης συστατικών που βρίσκονται σε ένα διάλυμα πάνω σε μια κατάλληλη επιφάνεια. Η προσρόφηση συστατικών γίνεται με τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις που έλκουν το προσροφούμενο συστατικό από το διάλυμα στη στερεά επιφάνεια του προσροφητικού. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται ενεργός άνθρακας προκειμένου να συσσωρευτούν και να απομακρυνθούν τα διαλυμένα οργανικά συστατικά. Μια τυπική διεργασία προσρόφησης αποτελείται από δύο στερεές κλίνες πληρωμένες με στερεό προσροφητή με δυνατότητα αυτόματης εναλλαγής. (Γεντεκάκης, 2010; Χρυσικόπουλος, 2013).

Ιοντοεναλλαγή

Φυσικοχημική διεργασία με σκοπό τη μεταφορά ιόντων από ένα αδιάλυτο στερεό σε μία υγρή φάση και αντίστροφα. Το αδιάλυτο στερεό αποτελείται από ευκίνητα ανιόντα ή κατιόντα που είναι ικανά για αντιστρεπτή και στοιχειομετρική εναλλαγή με ιόντα ίδιου φορτίου από το διάλυμα ενός ηλεκτρολύτη με το οποίο έρχεται σε επαφή. Η διεργασία στηρίζεται στην ικανότητα ορυκτών π.χ. ζεόλιθοι, ή συνθετικών π.χ. ρητίνες, να δεσμεύουν διάφορα ιόντα. Ο ιοντοεναλλάκτης (η ρητίνη) αναγεννιέται για να επαναχρησιμοποιηθεί μετά το πέρας πολλών χρήσεων (Νταρακάς, 2010).

2.4.5 Απολύμανση

Στόχος της απολύμανσης είναι να καταστραφούν οι παθογόνοι μικροοργανισμοί πριν την τελική διάθεση των υγρών αποβλήτων χωρίς να υπάρχει ο παραμικρός κίνδυνος για την δημόσια υγεία (Crini & Lichthouse, 2019). Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι αρκετές και ταξινομούνται σε

χημικές/συμβατικές μεθόδους, μη χημικές μεθόδους αλλά και σε νέες εναλλακτικές μεθόδους. Τα χαρακτηριστικά του ιδανικού απολυμαντικού δεν είναι συγκεντρωμένα σε ένα απολυμαντικό, όμως λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση των εναλλακτικών μεθόδων και την επιλογή του απολυμαντικού (Χρυσικόπουλος, 2013).

Για την απολύμανση μπορούν να εφαρμόζονται χημικές μέθοδοι όπως η χλωρίωση και η οζόνωση, αλλά και μη χημικές μέθοδοι όπως είναι η υπεριώδης ακτινοβολία, οι μεμβράνες ή ακόμη και ο συνδυασμός κάποιων από τις παραπάνω μεθόδους (Collivignarelli, 2017).

Η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων. Κάθε μέθοδος έχει τους δικούς της περιορισμούς όχι μόνο από άποψη κόστους αλλά και από άποψη σκοπιμότητας, αποτελεσματικότητας, πρακτικής ικανότητας, αξιοπιστίας, περιβαλλοντικών επιπτώσεων, δυσκολίες λειτουργίας, απαιτήσεων προεπεξεργασίας κλπ. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των πιο κοινών μεθόδων απολύμανσης στο πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων απολύμανσης (Δελημπάση, 2001).

Χαρακτηριστικό	Οζόνωση	UV	Χλωρίωση
Απομάκρυνση κολοβακτηριδίων	Πολύ Καλή	Πολύ Καλή	Πολύ Καλή
Απομάκρυνση ιών	Πολύ Καλή	Καλή	Μέτρια
Επίδραση στον αποδέκτη	Καμία	Καμία	Αύξηση διαλυτών στερεών
Παραπροϊόντα	Κανένα	Κανένα	Αλογονοφόρμια
Επικινδυνότητα παραπροϊόντων	Μηδενική	Μηδενική	Μεγάλη
Κόστος Εγκατάστασης	Υψηλό	Υψηλό	Μέσο
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης	Μέσο	Υψηλό	Μέσο
Απαιτούμενη έκταση	Μέση	Μικρή	Μεγάλη

2.4.6 Επεξεργασία ιλύος

Τα υγρά αφού έχουν επεξεργαστεί ανάλογα απορρίπτονται στο περιβάλλον, ενώ τα στερεά απομακρύνονται για περαιτέρω επεξεργασία και τελική διάθεση. Τα στερεά αυτά περιλαμβάνουν εσχαρίσματα, άμμο, ξαφρίσματα, καθώς και τα απομακρυνόμενα στερεά από τις δεξαμενές πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας καθίζησης και αποτελούν την ιλύ των υγρών αποβλήτων (Wang, 2008). Ανάλογα από το στάδιο στο οποίο συναντάμε την ιλύ κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, η ιλύς διακρίνεται σε: (Turovskiy & Mathai, 2006)

- **Πρωτοβάθμια ιλύς:** Παράγεται κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία στις δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης. Αποτελείται κυρίως από τα καθιζήσιμα αιωρούμενα στερεά, έχει δυσάρεστη οσμή, αποσυντίθεται πολύ εύκολα και εμπεριέχει περισσότερα από 100 διαφορετική είδη παθογόνων μικροοργανισμών. Σε μια τυπική ΕΕΛ που περιλαμβάνει πρωτοβάθμια καθίζηση και συμβατική δευτεροβάθμια επεξεργασία ενεργού ιλύος, το βάρος της

πρωτοβάθμιας ιλύος αποτελεί περίπου το 50% κ.β. (επί ξηρού) της συνολικά παραγόμενης ιλύος. Η συγκέντρωση των ολικών στερεών στην ανεπεξεργαστη πρωτοβάθμια ιλύ, κυμαίνεται μεταξύ 2 και 7% (Turovskiy & Mathai, 2006).

- **Δευτεροβάθμια ιλύς:** Η δευτεροβάθμια ιλύς παράγεται κατά τις διεργασίες της βιολογικής, επεξεργασίας από τη χρήση ειδικών αποσυνθετικών μικροοργανισμών οι οποίοι διασπούν το παραμένον οργανικό υλικό των λυμάτων μετά τη πρωτοβάθμια επεξεργασία. Οι ποσότητες και τα χαρακτηριστικά της δευτεροβάθμιας ιλύς ποικίλλει ανάλογα με το μεταβολισμό και την ταχύτητα ανάπτυξης των διάφορων μικροοργανισμών που περιέχει. Τυπικά, η ιλύς των βιολογικών καθαρισμών ενεργού ιλύος περιέχει στερεά σε συγκέντρωση (επί ξηρού) 0,4 – 1,5% κ.β. και είναι πιο δύσκολο να αφυδατωθεί και να παχυνθεί σε σχέση με την πρωτοβάθμια (Turovskiy & Mathai, 2006).

Η παραγόμενη ιλύς μιας εγκατάστασης εκτιμάται περίπου σε 20 τόνους το χρόνο ανά 1.000 άτομα εξυπηρετούμενου ισοδύναμου πληθυσμού (Bruce, 1983). Η ιλύς υπόκειται σε επεξεργασία προκειμένου να επιτευχθεί α) η μείωση του όγκου της, β) η καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών και γ) η μείωση του ρυπαντικού φορτίου και των οσμών. Για την επεξεργασία της ιλύος είναι δυνατόν να ακολουθηθούν διάφορα στάδια και διεργασίες. Τα κυριότερα στάδια είναι αυτά της προεπεξεργασίας, της πάχυνσης, της σταθεροποίησης, της προετοιμασίας για αφυδάτωση, της αφυδάτωσης, της ξήρανσης και της καύσης. Η επιλογή των σταδίων και των αντίστοιχων διεργασιών τους, που θα επιλεγούν για κάθε ΕΕΛ, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των επεξεργασμένων λυμάτων, τον σχεδιασμό του συστήματος επεξεργασίας τους, καθώς και από τον τελικό αποδέκτη της ιλύος. Η μεταφορά της ιλύος γίνεται μέσω κατάλληλων αντλιών ή άλλων διατάξεων (Τσώνης, 2004). Το κόστος της επεξεργασίας ιλύος μπορεί συχνά να καλύψει ως και το 50% του συνολικού κόστους λειτουργίας των ΕΕΛ (Collivignarelli, 2019) και να συνεισφέρει σε περισσότερο από το 40% των συνολικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που συνδέονται με τη λειτουργία τους (Liu, 2013).

Οι βασικές διεργασίες που εκτελούνται στην επεξεργασία της ιλύος είναι (Γεωργιοπούλου, 2007):

- **Πύκνωση:** Αφαίρεση του υγρού που εμπεριέχεται στην ιλύ. Επιτυγχάνεται με βαρύτητα, επίπλευση ή φυγοκέντρωση.
- **Αφυδάτωση:** Αφαίρεση του υγρού κλάσματος με διήθηση υπό κενό ή υπό πίεση, φυγοκέντρωση ή εξάτμιση.
- **Ξήρανση:** Εκτελείται σε κλίνες ξήρανσης και επιτυγχάνεται ταυτόχρονη διήθηση και εξάτμιση του υγρού κλάσματος.
- **Σταθεροποίηση:** Μείωση των οργανικών ενώσεων που περιέχονται στην ιλύ είτε με βιολογικές διεργασίες (αερόβια ή αναερόβια χώνευση), είτε με χημικές διεργασίες (οξειδωση με χλώριο ή επεξεργασία με υδράσβεστο), είτε με θερμική κατεργασία.
- **Μείωση στερεού κλάσματος ιλύος:** Γίνεται με καύση ή οξείδωση της ιλύος.

Η επεξεργασμένη ιλύς μπορεί να διατεθεί είτε σε ειδικές χωματερές ή να επαναχρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς της σε θρεπτικές και οργανικές ουσίες.

Η επαναχρησιμοποίηση της ως εδαφοβελτιωτικό αποτελεί τη πλέον χρησιμοποιούμενη επιλογή διάθεσης, αφού βελτιώνει τη δομή, μειώνει την πυκνότητα και αυξάνει το πορώδες και την κατακράτηση υγρασίας του εδάφους. Επιπλέον η περιεκτικότητα της σε θρεπτικά συστατικά άζωτο και φωσφόρο, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απόδοση των καλλιεργειών. Απαραίτητη προϋπόθεση πριν την χρήση της αποτελεί η αφαίρεση βαρέων μετάλλων και παθογόνων μικροοργανισμών που είναι επιβλαβή για την δημόσια υγεία (Collivignarelli, 2019).

Η κατάλληλη επεξεργασία της ιλύος οδηγεί στην παραγωγή των λεγόμενων βιοστερεών (biosolids). Τα βιοστερεά, αποτελούν τα οργανικά κατάλοιπα της επεξεργασίας των αστικών υγρών αποβλήτων που είναι κατάλληλα για ανακύκλωση μέσω διάφορων ωφέλιμων χρήσεων λόγω της υψηλής θρεπτικής τους αξίας (Turovskiy, Mathai, 2006, Wang, 2008, Τσώνης, 2004). Άλλες χρήσεις της αναφέρονται στην παραγωγή τούβλων και άλλων δομικών υλικών, στην παρασκευή τσιμέντου ως συμπληρωματικό υλικό, στην παραγωγή αδρανών υλικών ως υλικό πλήρωσης οδοστρωμάτων και στην καύση της σε κλιβάνους τσιμέντου ως εναλλακτικό καύσιμο, λόγω των μικρότερων εκπομπών της σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Τα τελευταία χρόνια οι επιστήμονες εξετάζουν και την χρήση της ως προσροφητικό υλικό που δίνει την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησής της στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων (Collivignarelli, 2019).

Για τον μετριασμό του κόστους διάθεσης της ιλύος και της συνεισφοράς της στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, οι τεχνολογίες αποτέφρωσης, πυρόλυσης και αεριοποίησης αποτελούν μερικές από τις βασικές μεθόδους θερμικής επεξεργασίας της ιλύος, στοχεύοντας στη μείωση του ρυπαντικού φορτίου, τη μέγιστη δυνατή ελάττωση του όγκου της και τη μετατροπή της σε προϊόντα μη επιβλαβή για το περιβάλλον, με ταυτόχρονη αξιοποίηση του ενεργειακού της περιεχομένου (Oladejo, 2019).

Αποτέφρωση

Η διεργασία της αποτέφρωσης είναι η πιο ευρέως διαδομένη μέθοδος θερμικής επεξεργασίας της ιλύος και περιλαμβάνει το στάδιο της μηχανικής αφυδάτωσης, της θερμικής ξήρανσης και της εισαγωγής της ιλύος στον αποτεφρωτήρα, με σκοπό την πλήρη καύση της (Hao, 2020). Στην πλήρη καύση της ιλύος πραγματοποιείται ταχεία εξώθερμη οξείδωση των οργανικών στοιχείων της με τελικά προϊόντα CO_2 , H_2O και αδρανή τέφρα. Η αφυδατωμένη ιλύς παρουσιάζει θερμοκρασίες ανάφλεξης μεταξύ 420 και 500°C παρουσία οξυγόνου, ενώ για την πλήρη καύση απαιτούνται θερμοκρασίες από 760 έως 820°C (Turovskiy & Mathai, 2006). Η παραγόμενη θερμότητα από την αποτέφρωση προορίζεται για θέρμανση ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ατμού. Οι εγκαταστάσεις αποτέφρωσης μπορούν ενίοτε να χρησιμοποιούν την παραγόμενη θερμότητα, δεδομένου ότι κύριος σκοπός τους είναι η καύση επιβλαβών στοιχείων από απόβλητα πριν από την τελική διάθεση ή την επαναχρησιμοποίηση υπολειμματικής τέφρας. Εν κατακλείδι, οι εγκαταστάσεις αποτέφρωσης πρέπει να είναι εξοπλισμένες με συστήματα καθαρισμού απαερίων για την εξουδετέρωση των περιεχόμενων επικίνδυνων ρύπων. Αντίστοιχη επεξεργασία είναι δυνατόν να απαιτεί και η παραγόμενη στάχτη, η οποία ενδέχεται να περιέχει σημαντικούς ανόργανους ρύπους (Oladejo, 2019).

Πυρόλυση

Ως πυρόλυση ορίζεται η διαδικασία θερμικής διάσπασης της ιλύος και πραγματοποιείται υπό την απουσία οξυγόνου, ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται μια εξωτερική πηγή θερμότητας για να ενεργοποιήσει τις ενδόθερμες αντιδράσεις θερμικής διάσπασης των στερεών αποβλήτων (Freeman, 1989). Η διεργασία της πυρόλυσης λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 350-600°C, ενώ παράλληλα υπάρχουν ορισμένοι αντιδραστήρες πυρόλυσης που λειτουργούν σε θερμοκρασίες άνω των 900°C (Ruiz, 2013). Η πυρόλυση προϋποθέτει την μηχανική αφυδάτωση και την θερμική ξήρανση της ιλύος, πριν την εισαγωγή της στον αντιδραστήρα, όπως και στην περίπτωση της αποτέφρωσης. Τα προϊόντα που προκύπτουν από την πυρόλυση είναι τα εξής: αέρια προϊόντα πυρόλυσης (H_2 , CO, CO_2 , CH_4 , και ελαφροί υδρογονάνθρακες), βιοέλαιο (bio – oil) και βιο-εξανθράκωμα (bio – char) (Zhang, 2010). Οι σχετικές αποδόσεις και τα χαρακτηριστικά των προϊόντων πυρόλυσης εξαρτώνται από τις συνθήκες της διεργασίας, όπως την θερμοκρασία, το ρυθμό θέρμανσης και τη λειτουργία αντιδραστήρα, καθώς και τις ιδιότητες της πρώτης ύλης (Oladejo, 2019).

Αεριοποίηση

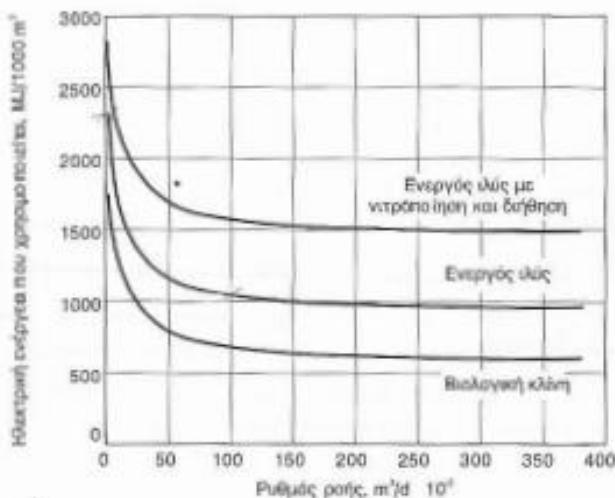
Ως αεριοποίηση της βιομάζας ορίζεται η θερμοχημική μετατροπή στερεών ανθρακούχων υλικών σε αέριο καύσιμο (Zhang, 2014). Πρόκειται για μερική καύση της βιομάζας καθώς ο λόγος αέρα/καυσίμου είναι κάτω από την απαιτούμενη τιμή για στοιχειομετρική καύση (Martinez, 2012). Η διεργασία λαμβάνει χώρα σε αντιδραστήρα που ονομάζεται αεριοποιητής και πραγματοποιείται συνήθως σε υψηλές θερμοκρασίες και ατμοσφαιρική πίεση (Sansaniwal, 2017). Η κύρια διαφοροποίηση της αεριοποίησης από την πυρόλυση είναι η απαίτηση της παρουσίας περίσσειας υδρατμού, που οδηγεί στην πλήρη μετατροπή του περιεχομένου άνθρακα σε καύσιμο αέριο, πλούσιο σε H_2 (Fytli & Zabaniotou, 2008). Η αεριοποίηση μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ως οξειδωτικά μέσα τον αέρα, το διοξείδιο του άνθρακα, το οξυγόνο, τον ατμό, ή μείγματα αυτών των αερίων. Κατά την αεριοποίηση λαμβάνουν χώρα οι παρακάτω αντιδράσεις (Gikas, 2015):

- $C + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow CO$ (Gasification with Oxygen)
- $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ (Gasification with Carbon Dioxide)
- $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ (Gasification with Steam)
- $C + 2H_2 \leftrightarrow H_2 + CO_2$ (Gasification with Hydrogen)
- $C + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2$ (Water-Gas shift Reaction)
- $S + H_2 \leftrightarrow H_2S$ (Sulfur forms H_2S – not SO_x)

Τα κύρια προϊόντα της αεριοποίησης είναι το αέριο σύνθεσης και η τέφρα. Η τέφρα που παράγεται από τη διαδικασία αυτή μπορεί είτε να απορριφθεί στον χώρο υγειονομικής ταφής είτε να χρησιμοποιηθεί σε κατασκευαστικές εφαρμογές. Το αέριο σύνθεσης απαιτεί περαιτέρω επεξεργασία και καθαρισμό για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (Oladejo, 2019).

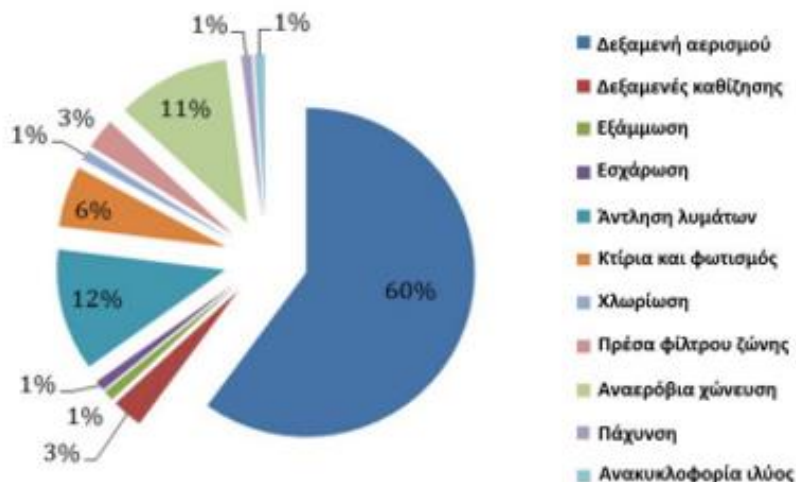
2.4.7 Ενεργειακές απαιτήσεις ΕΕΛ

Μια συμβατική ΕΕΛ αποτελείται συνήθως από πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία. Οι ενεργειακές απαιτήσεις (Εικόνα 2.15) της εξαρτώνται από τη δυναμικότητα, τον τύπο της επεξεργασίας, τις απαιτήσεις των ποιότητας των λυμάτων, την ηλικία της μονάδας καθώς και την εμπειρία των διαχειριστών της (Y Gu, 2017). Η επεξεργασία με την χρήση ενεργού ιλύος είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος στην επεξεργασία αστικών λυμάτων και έχει υπολογιστεί ότι οι ενεργειακές ανάγκες μιας συμβατικής ΕΕΛ, που χρησιμοποιεί την παραπάνω μέθοδο, κυμαίνονται από 1,1 έως 2,4 MJ/m³ (Tchobanoglous, 2003). Αξίζει να σημειωθεί πως οι μεγαλύτερες σε δυναμικότητα ΕΕΛ παρουσιάζουν μεγαλύτερες ενεργειακές αποδόσεις από τις μικρότερες καθώς και ότι οι ΕΕΛ με ημερήσια εισροή άνω των 5.000 m³/d έχουν σχετικά σταθερή ενεργειακή ζήτηση που κυμαίνεται στις 0,331-0,414 Kwh/m³ (Gikas, 2020).



Εικόνα 2.15 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για διαφορετικές ΕΕΛ (Gikas, 2017).

Στην Εικόνα 2.15 παρατηρείται ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος της εγκατάστασης. Στην επεξεργασία ενεργού ιλύος, απαιτούνται περίπου 1.100 έως 2.400 MJ ηλεκτρικής ενέργειας για την επεξεργασία κάθε 1.000 m³ των υγρών αποβλήτων (Metcalf & Eddy, 2007). Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας καταναλώνεται στη διεργασία του αερισμού (Y Gu, 2017), καθώς στην αναερόβια χώνευση, ενώ το υπόλοιπο ενεργειακό φορτίο διαμοιράζεται στις υπόλοιπες διεργασίες όπως απεικονίζει η Εικόνα 2.16.



Εικόνα 2.16 Κατανομή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ΕΕΛ που χρησιμοποιεί την μέθοδο της ενεργούς ιλύος (Y Gu, 2017).

Αξίζει να σημειωθεί πως οι ενεργειακές απαιτήσεις μιας ΕΕΛ διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή που είναι εγκατεστημένη. Για παράδειγμα, μονάδες που είναι εγκατεστημένες στην Σουηδία καταναλώνουν κατά μέσο όρο 45% παραπάνω ηλεκτρική ενέργεια από αντίστοιχες μονάδες που βρίσκονται στην Αυστρία, η αιτία αυτής της μεγάλης απόκλισης είναι πως η Αυστρία πραγματοποιεί μελέτες συγκριτικής αξιολόγησης για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για περισσότερα χρόνια σε σχέση με την Σουηδία (Jonasson, 2007). Η αναλογία και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ΕΕΛ σε εθνικό επίπεδο σε διάφορες χώρες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3 Ενεργειακή κατανάλωση και αναλογία ενέργειας ως προς την συνολική εθνική ενεργειακή κατανάλωση για διαφορετικές χώρες (Y Gu, 2017).

Χώρα	Ενεργειακή κατανάλωση ΕΕΛ (kWh/m ³)	Συνεισφορά στην εθνική κατανάλωση ενέργειας (%)
Η.Π.Α	0.52	0.6
Κίνα	0.31	0.25
Γερμανία	0.40-0.43	0.7
Νότια Αφρική	0.079-0.41	-
Ιαπωνία	0.304	-
Νότια Κορέα	0.243	0.5
Σουηδία	0.42	1

Οι ΗΠΑ που θεωρούνται μια ανεπτυγμένη χώρα έχει τυπικό ρυθμό κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για τις ΕΕΛ στις 0,52 kWh/m³. Το 2008, υπολογίστηκε ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την επεξεργασία των λυμάτων αντιπροσώπευε μόνο το 0,6% της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ. Σε αντίθεση με τις ΗΠΑ, οι ασιατικές χώρες εμφανίζουν χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας για την επεξεργασία των λυμάτων, όπως 0,31 kWh/m³ για την Κίνα, 0,304 kWh/m³ για την Ιαπωνία και 0,243 kWh/m³ για την Νότια

Κορέα. Μεταξύ αυτών των ασιατικών χωρών, η Κίνα έχει ελαφρώς μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας αλλά χαμηλότερο ποσοστό της συνολικής χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, μόλις 0,25%. Αυτό το χαμηλότερο ποσοστό στην Κίνα πιθανότατα οφείλεται στον μεγάλο πληθυσμό και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας η οποία είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες χώρες. Για τις ευρωπαϊκές χώρες, η ενεργειακή ένταση για την επεξεργασία των λυμάτων είναι παρόμοια μεταξύ Σουηδίας και Γερμανίας, περίπου στις 0,42 kWh/m³ (Wang, 2016). Στη Νότια Αφρική, η ένταση ηλεκτρικής ενέργειας για τις ΕΕΛ κυμαίνεται μεταξύ 0,079 και 0,41 kWh/m³, με τις τεχνολογίες λιμνοθάλασσας και φίλτρων άμμου να είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η χρήση ενέργειας σε ΕΕΛ αποτελεί περίπου το ένα πέμπτο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας ενός δήμου από τις δημόσιες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και αναμένεται να αυξηθεί κατά 20% τα επόμενα 15 χρόνια λόγω της αυξανόμενης κατανάλωσης νερού και των αυστηρότερων κανονισμών (Y Gu, 2017).

Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική η βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας της ενεργειακής χρήσης των ΕΕΛ. Η χρήση των παραπροϊόντων της επεξεργασίας για την παραγωγή ενέργειας είναι να μια πρακτική που χρησιμοποιείται και συνεχίζεται να διερευνάται με κύριες πρακτικές την αναερόβια χώνευση, την καύση και την αεριοποίηση να χρησιμοποιούνται ως μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Fyttili, 2008). Επί πρόσθετα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντικαταστήσουν εν μέρει ή ακόμη και πλήρως την ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Ορισμένες ΕΕΛ έχουν ήδη ενσωματώσει γεννήτριες ηλιακής ή αιολικής ενέργειας, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις, η παραγόμενη ισχύς χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει ένα ποσοστό της ενέργειας που λαμβάνεται από το δίκτυο (Gikas and Tsoutsos, 2015).

Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες απομάκρυνσης στερεών από υγρά απόβλητα

Η συμβατική επεξεργασία των αστικών λυμάτων είναι μια ενεργοβόρα διαδικασία, λόγω της ανάγκης μεγάλης παροχής αέρα στις βιολογικές διεργασίες (Shi, 2011). Με το αυξημένο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι συνετό να μελετηθούν εναλλακτικές τεχνικές επεξεργασίας καθώς και η αξιοποίηση του χημικού ενεργειακού περιεχομένου για παραγωγή ενέργειας (Gikas, 2016).

Μερικές τεχνολογίες απομάκρυνσης στερεών από υγρά απόβλητα είναι τα μικροκόσκινα, ο υδροκυκλώνας, η ηλεκτροκροκίδωση, η επίπλευση, η εσχάρωση στην προεπεξεργασία καθώς και οι συμβατικές δεξαμενές καθίζησης.

3.1 Μικροκοσκίνιση

Η χρήση της τεχνολογίας της μικροκοσκίνισης για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, είναι μια αποδοτική αλλά και καινοτόμα μέθοδος απομάκρυνσης στερεών (Koliopoulos & Gikas, 2013). Η φιλοσοφία της μικροκοσκίνισης είναι η όσο το δυνατόν γρηγορότερη και αποδοτικότερη απομάκρυνση των στερεών πριν τη δεξαμενή αερισμού, διευκολύνοντας την μετέπειτα επεξεργασία. Αυτό επιτυγχάνεται με μικρές ενεργειακές απαιτήσεις σε πολύ περιορισμένο χώρο (Μπατιστάτος, 2017). Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει ευρεία χρήση σε παγκόσμια επίπεδο (Bourgeous, 2003), μερικά από τα συστήματα μικροκοσκίνισης που βρίσκονται εμπορικά διαθέσιμα είναι τα παρακάτω (Lema & Martinez, 2017):

- Φίλτρο Περιστρεφόμενου Ιμάντα (Rotating Belt Filter, RBF)
- Φίλτρο Περιστρεφόμενου Τυμπάνου (Rotating Drum Filter, RDF)
- Φίλτρο Δίσκου (Disc Filter, DF)

Το RBF αποτελείται από μια περιστρεφόμενη εσχάρα κοσκίνου, η οποία τοποθετείται υπό κλίση 35 και έχει στόχο να απομακρυνθούν τα αιωρούμενα στερεά. Καθώς εισέρχονται τα λύματα διαμέσου του κόσκινου, γίνεται προσκόλληση των αιωρούμενων στερεών πάνω στο πλέγμα και, ενώ παράλληλα, στο άνω άκρο του φίλτρου βρίσκεται ένα αυτόματο σύστημα καθαρισμού για τον καθαρισμό του πλέγματος του φίλτρου και την αφαίρεση τυχόν συσσωρευμένης ιλύς. Η μεταφορά του φιλτραρισμένου αποβλήτου πραγματοποιείται μέσω βαρύτητας στο σημείο εξόδου χωρίς να διακόπτεται η επεξεργασία, ενώ τα συλλεγόμενα στερεά συμπιέζονται και αφυδατώνονται με περιεκτικότητα σε στερεά άνω του 30% (Lema & Martinez, 2017). Το RDF λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο. Τα πιο μεγάλα στερεά κατακρατούνται στους πόρους του φίλτρου, προκαλώντας μια αύξηση της στάθμης του λύματος στο εσωτερικό του. Μόλις η στάθμη φτάσει σε μια προκαθορισμένη μέγιστη τιμή το φίλτρο περιστρέφεται ξεκινώντας μια πλύση υψηλής πίεσης (Carles, 2015), παρόμοια αρχή λειτουργίας έχουν και τα DF

Η μικροκοσκίνιση προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας λυμάτων :

- Απαιτεί πολύ λιγότερο χώρο σε σχέση με την συμβατική επεξεργασία (Gikas, 2017).
- Δεν υπάρχει προσθήκη χημικών άρα είναι μια διεργασία φιλική προς το περιβάλλον
- Δεν εμφανίζεται το πρόβλημα της θερμικής διαστρωμάτωσης σε αντίθεση με τις ΔΠΚ (Franchi & Santoro, 2015)

- Μικρότερο κεφαλαιουχικό και λειτουργικό κόστος από την πρωτοβάθμια επεξεργασία (Behera, 2018).
- Τα βιοστερεά που παράγονται από τα μικροκόσκινα έχουν περιεκτικότητα σε στερεά άνω του 30% η οποία είναι διπλάσια σε σχέση με την συμβατική επεξεργασία (Koliopoulos & Gikas, 2013).
- Τα βιοστερεά που παράγονται θεωρούνται ιδανική πρώτη ύλη για την αεριοποίηση καθώς απαιτούν περιορισμένη περαιτέρω αφυδάτωση και έχουν Υψηλότερη Θερμογόνο Δύναμη (Higher Heating Value, HHV) περίπου στα 23 MJ/kg η οποία είναι μεγαλύτερη από εκείνη των στερεών που προκύπτουν από την συμβατική επεξεργασία η οποία είναι περίπου 16 MJ/kg (Gikas, 2017b).

3.2 Μεμβράνες διήθησης

Οι μεμβράνες αποτελούν «εμπόδιο» επιλεκτικής διαπερατότητας ή διεπαφή μεταξύ δύο φάσεων (Ravanchi, 2009). Οι μεμβράνες διήθησης παρεμβάλλονται μεταξύ της τροφοδοσίας και του διηθήματος. Η φάση προς την πλευρά της τροφοδοσίας ονομάζεται υπολείμμα και ταυτίζεται συνήθως με τη φάση του συμπυκνώματος, δηλαδή περιέχει ότι δεν περνάει από τη μεμβράνη. Η φάση από την άλλη πλευρά της μεμβράνης είναι το διήθημα, δηλαδή ότι διαπερνάει τη μεμβράνη. Η φάση του υπολείμματος δεν ταυτίζεται απαραίτητα με τη φάση της τροφοδοσίας, πράγμα που συμβαίνει μόνο στη μέθοδο της κατά μέτωπο τροφοδοσίας (Γκέκας, 2002). Ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο η μεμβράνη, το μηχανισμό διαχωρισμού, τη φύση της κινητήριας δύναμης διαχωρισμού και το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης, προκύπτουν οι ακόλουθοι τύποι διήθησης (Φυτίλη, 2007):

- Μικροδιήθηση (Microfiltration, MF): χρησιμοποιείται πρωταρχικά για τον διαχωρισμό σωματιδίων και βακτηρίων από μικρότερες διαλυμένες ουσίες, τα ανοίγματα πόρων κυμαίνονται από 10^{-1} – $10 \mu\text{m}$ και η πίεση που λειτουργούν στα 1-3 bar (Conidi, 2020)
- Υπερδιήθηση (Ultrafiltration, UF): χρησιμοποιείται για την συμπύκνωση μορίων όπως πεπτιδία και πρωτείνες, τα ανοίγματα πόρων κυμαίνονται από 10^{-3} – $1 \mu\text{m}$ και η πίεση που λειτουργούν στα 2-5 bar (Rosenberg, 1995).
- Νανοδιήθηση (Nanofiltration, NF): απόρριψη μη φορτισμένων διαλυμένων συστατικών και θετικά φορτισμένων ιόντων, σε ποσοστό που εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα των εκάστοτε μορίων, τα ανοίγματα πόρων κυμαίνονται από 10^{-3} – $10^{-2} \mu\text{m}$ και η πίεση που λειτουργούν στα 5-15 bar (Koros, 1996).
- Αντίστροφη Ώσμωση (Reverse Osmosis, RO): υψηλή απομάκρυνση μικρών σωματιδίων, όπως βακτηρίων και μονοσθενικών ιόντων όπως ιόντα νατρίου και ιόντα χλωρίου σε ποσοστό έως και 99,5%, τα ανοίγματα πόρων κυμαίνονται από 10^{-3} – $10^{-4} \mu\text{m}$ και η πίεση που λειτουργούν στα 15-75 bar (Muro, 2012).

3.3 Ηλεκτροκροκίδωση

Η μέθοδος της ηλεκτροκροκίδωσης είναι μια ηλεκτροχημική τεχνική επεξεργασίας που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση των TSS, BOD₅, COD, μικροοργανισμών καθώς και άλλους ρύπους που βρίσκονται στα λύματα με την εφαρμογή συνεχούς ρεύματος σε ένα ζεύγος ηλεκτροδίων (Govindan, 2020). Η βασική αρχή της ηλεκτροκροκίδωσης είναι η οξειδοαναγωγική αντίδραση. Το σύστημα χρησιμοποιεί δύο πλάκες ηλεκτροδίων, η μια λειτουργεί ως άνοδος και

η άλλη ως κάθοδος. Στη συνέχεια, συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί μια ηλεκτροχημική διαδικασία κατά την οποία ανιόντα κινούνται προς την άνοδο για να απελευθερώσουν οξειδωμένα ηλεκτρόνια και κατιόντα κινούνται προς την κάθοδο για να δεχτούν τα ηλεκτρόνια από την αναγωγή η οποία τελικά σχηματίζει κροκίδες που δεσμεύουν τους ρύπους. Για την ηλεκτροκροκίδωση, χρησιμοποιούνται χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια αλουμινίου , επειδή αυτό το μέταλλο έχει καλές πηκτικές ιδιότητες. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως εύκολα προσβάσιμο εξοπλισμό, το γεγονός πως δεν απαιτούνται επιπρόσθετα χημικά (Hakizimana, 2017) καθώς και υψηλά ποσοστά απομάκρυνσης (Zhurina, 2018). Ωστόσο, έχει τα μειονεκτήματα της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας, του σχετικά μεγάλου χρόνου παραμονής 90-180 λεπτά καθώς και της συνεχούς αντικατάστασης των ηλεκτροδίων λόγω της θερμικής καταστροφής τους (Agustina, 2022).

3.4 Επίπλευση

Η επίπλευση είναι μια μηχανική μέθοδος διαχωρισμού των αιωρούμενων στερεών από τα υγρά απόβλητα. Η χρήση ενός αερίου στο σύστημα, όπως αέρα ή αζώτου, διευκολύνει το διαχωρισμό. Η αρχή της μεθόδου είναι η εξής: το αέριο διοχετεύεται υπό πίεση στα απόβλητα σχηματίζοντας λεπτές φυσαλίδες και προσροφάται στην επιφάνεια των στερεών, μειώνοντας το ειδικό βάρος, με αποτέλεσμα την ανύψωση και επίπλευση των στερεών στην επιφάνεια όπου στη συνέχεια απομακρύνονται μηχανικά. Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας χρησιμοποιούνται χημικές ουσίες όπως (Ευδαίμων, 2012):

- 1) Ουσίες που προκαλούν αφρισμό, καθώς οι δημιουργία αφρού σταθεροποιεί τις φυσαλίδες και τον αφρό στην επιφάνεια της δεξαμενής.
- 2) Ουσίες που καθιστούν τα αιωρούμενα στερεά υδρόφοβα και προσκολλώνται ευκολότερα στις φυσαλίδες του αέρα και κινούνται προς την επιφάνεια.
- 3) Ρυθμιστικοί παράγοντες όπως ρυθμιστές pH και ουσίες που προκαλούν κροκίδωση.

Ένα τυπικό σύστημα επίπλευσης χρησιμοποιεί συνήθως μια δεξαμενή ανάμιξης με κροκιδωτικό χημικό, προκειμένου να μετασχηματίσει τα σωματίδια σε μεγαλύτερα στερεά κλάσματα για ευκολότερη απομάκρυνση. Το απόβλητο αφού εισέλθει στη δεξαμενή επίπλευσης όπου γίνεται μηχανική διάχυση αέρα και το στρώμα που δημιουργείται στο άνω μέρος της δεξαμενής απομακρύνεται. Μέρος της εκροής του επεξεργασμένου αποβλήτου οδηγείται σε ένα θάλαμο υπό πίεση, όπου γίνεται προσθήκη αέρα. Αφού επέλθει κορεσμός, με ένα σύστημα ανακυκλοφορίας, το απόβλητο οδηγείται ξανά στην κυρίως δεξαμενή επίπλευσης. Τελικά, οι φυσαλίδες που δημιουργούνται υπερνικούν την επίδραση της βαρύτητας και τα σωματίδια επιπλέουν στην επιφάνεια, δημιουργώντας ένα επιφανειακό στρώμα (Μπατιστάτος, 2017). Τα κύρια πλεονεκτήματα της επίπλευσης ως προς την καθίζηση είναι ότι τα πολύ μικρά ή ελαφρά σωματίδια που καθιζάνουν αργά μπορούν να απομακρυνθούν πλήρως σε μικρό χρονικό διάστημα (Λοϊζίδου, 2006).

3.5 Καθίζηση

Η απομάκρυνση των αιωρούμενων και κolloειδών σωματιδίων από τα υγρά απόβλητα με διαχωρισμό με βαρύτητα είναι μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διεργασίες στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Η καθίζηση είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό αιωρούμενων σωματιδίων που είναι βαρύτερα από το νερό με τη δράση της

βαρύτητας. Μια δεξαμενή καθίζησης μπορεί να αναφέρεται επίσης ως διαυγαστής ή δεξαμενή κατακάθισης. Η επιταχυνόμενη καθίζηση με βαρύτητα περιλαμβάνει την απομάκρυνση των σωματιδίων σε αιώρηση με καθίζηση λόγω βαρύτητας, σε πεδίο επιταχυνόμενης ροής (Λοϊζίδου Μ., 2006) . Η απόδοση της πρωτοβάθμιας καθίζησης φτάνει το 25-40% στη μείωση του οργανικού φορτίου (BOD_5) και το 50-70% στη μείωση των αιωρούμενων στερεών (Νταράκας, 2010). Η καθίζηση χρησιμοποιείται επίσης για την πύκνωση των στερεών σε παχυντές ιλύς. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο πρωταρχικός σκοπός είναι η παραγωγή μιας διαυγασμένης εκροής, ενώ είναι επίσης σημαντικό να παραχθεί ιλύς με μία συγκέντρωση στερεών που να μπορεί να διαχειριστεί και να επεξεργαστεί εύκολα. Με βάση τη συγκέντρωση και την τάση των σωματιδίων να αλληλεπιδρούν, υπάρχουν τέσσερις τύποι καθίζησης με βαρύτητα (Νταράκας, 2010):

- Διακεκριμένων σωματιδίων: τα οποία δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους κατά την πορεία τους προς τον πυθμένα της δεξαμενής που καθιζάνουν (discrete particle settling). Για την περίπτωση της καθίζησης των διακριτών σωματιδίων, αυτών δηλαδή που διατηρούν το μέγεθος, το σχήμα και την πυκνότητά τους, ισχύουν τα ακόλουθα. Όταν βρίσκονται σε ένα στάσιμο ρευστό, τα διακριτά σωματίδια επιταχύνονται μέχρι η δύναμη τριβής να εξισωθεί με τη δύναμη βαρύτητας. Όταν οι δυνάμεις αυτές εξισωθούν, τότε το σωματίδιο που καθιζάνει αποκτά ομοιόμορφη ταχύτητα καθίζησης, η οποία ονομάζεται τελική ταχύτητα καθίζησης. Η δύναμη που δρα στο σωματίδιο και το οδηγεί προς τα κάτω είναι η συνισταμένη της δύναμης βάρους (που δρα προς τα κάτω) και της άνωσης (που δρα προς τα πάνω). Παράδειγμα καθίζησης διακεκριμένων σωματιδίων είναι η καθίζηση άμμου στους αμμοσυλλέκτες.
- Συσσωμάτωσης: τα σωματίδια συσσωματώνονται και αλλάζουν την χαρακτηριστική συμπεριφορά καθίζησης στην διάρκεια της πορείας τους προς τον πυθμένα της δεξαμενής όπου καθιζάνουν, η συγκεκριμένη καθίζηση αντιστοιχεί στην πρωτοβάθμια καθίζηση.
- Παρεμποδισμένη (καλείται και ζώνης): τα σωματίδια δημιουργούν ένα πλέγμα που καθιζάνει ενιαία, δημιουργώντας μια διεπιφάνεια στην υγρή φάσης. Παράδειγμα παρεμποδισμένης καθίζησης είναι η δευτεροβάθμια καθίζηση για διαχωρισμό αιωρούμενων στερεών.
- Με συμπίεση: λαμβάνει χώρα σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων συγκεντρώσεων στερεών όπου τα σωματίδια βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη καθίζηση αντιστοιχεί στην πάχυνση της ιλύος.

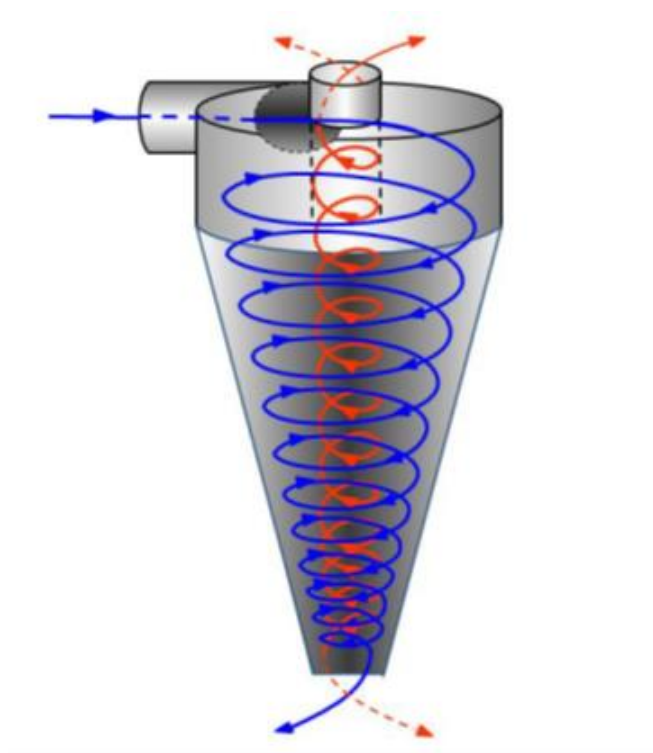
3.6 Εσχάρωση στην προεπεξεργασία

Η φυσική διεργασία που βρίσκεται στην αρχή μιας ΕΕΛ είναι η εσχάρωση που χρησιμεύει στην απομάκρυνση ογκωδών στερεών όπως ξύλα, κλαδιά, πλαστικά και άλλα αντικείμενα μεγέθους 10 – 150 mm ανάλογα με το μέγεθος των σχαρών που έχουν τοποθετηθεί στην ΕΕΛ. Συνήθως χρησιμοποιούνται μηχανικά αυτοκαθαριζόμενες σχάρες. Τα στερεά πρέπει να απομακρυνθούν γιατί είναι ικανά να μειώσουν την απόδοση της εγκατάστασης, να προκαλέσουν μετέπειτα προβλήματα στον εξοπλισμό και να ρυπάνουν το ρεύμα. Με την εσχάρωση επιτυγχάνεται η μείωση των TSS κατά 5 – 10% και η μείωση BOD_5 κατά 0 – 10% (Στάμος & Βογιατζής, 1994, Νταράκας, 2010).

3.7 Υδροκυκλώνας

Ο υδροκυκλώνας είναι μια μηχανική τεχνολογία που εφαρμόζει μια φυγόκεντρη κίνηση για να ταξινομήσει και να διαχωρίσει τα εισερχόμενα συστατικά με βάση την πυκνότητα, που εφευρέθηκε στα τέλη του 18ου αιώνα και αρχικά σχεδιάστηκε για διαχωρισμό χαρτοπολτού στη βιομηχανία χαρτιού (Bradley, 1965). Στη συνέχεια, περισσότερες βιομηχανίες όπως η πετροχημεία (Huang Y., 2017), η χημεία (Huang C., 2017; Tailleux, 2020), η βιομηχανία τροφίμων (Cilliers, 2019), η εξόρυξη (Palaniandy, 2017) και η επεξεργασία λυμάτων (Chang, 2018) άρχισε να χρησιμοποιεί την τεχνολογία υδροκυκλώνων, με τα τελευταία χρόνια να έχει γίνει ένας σημαντικός εξοπλισμός για τον αποτελεσματικό διαχωρισμό φάσης υγρού-στερεού (Souza, 2000).

Οι φυγόκεντρικές δυνάμεις και οι δυνάμεις έλξης δρουν μεταξύ τους ώστε να εξασφαλίσουν τον διαχωρισμό και την ταξινόμηση των σωματιδίων εντός του υδροκυκλώνα μέχρι το μέγεθος των $10\mu\text{m}$ (Endres, 2012). Η φυγόκεντρος δύναμη και η δύναμη έλξης αντιτίθενται η μία στην άλλη και διατηρούν τα σωματίδια σε ισορροπία κατά τις συνθήκες στρωτής ροής (Partin, 2019). Όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.1, το υγρό εισέρχεται στον υδροκυκλώνα με καθοδική ροή στο εξωτερικό άκρο του σώματος και αυτή η ροή, σε συνδυασμό με μια περιστροφική κίνηση, σχηματίζει την εξωτερική σπειροειδή ροή (μπλε γραμμή).



Εικόνα 3.1 Κίνηση Ροής (Partin, 2019).

Η εσωτερική σπειροειδής ροή εμφανίζεται όταν μέρος του υγρού κινείται κεντρικά, και επειδή δεν μπορεί να αφαιρεθεί όλο το υγρό από την έξοδο της κορυφής, αυτό το κεντρικό υγρό θα αντιστρέψει την κατεύθυνση του και θα ρέει προς τα πάνω στο στόμιο εξόδου υπερχειλίσης (Bradley, 1965). Έτσι, τα σωματίδια εντός της εξωτερικής σπείρας που είναι πιο πυκνά και

κινούνται προς το άνοιγμα κορυφής του υδροκυκλώνα θα ταξινομηθούν ως το συστατικό υπορροής. Τα σωματίδια μέσα στην εσωτερική σπείρα είναι λιγότερο πυκνά και θα ανέβουν στην εκκένωση υπερχειλίσσης και θα εξέλθουν μέσω της εξόδου υπερχειλίσσης και ταξινομούνται ως στοιχεία υπερχειλίσσης (Partin 2019).

Πολλά πλεονεκτήματα σχετίζονται με έναν υδροκυκλώνα, όπως λιγότερος χρόνος παραμονής, μικρός χώρος, μη κινούμενα μέρη, σχετικά χαμηλό κόστος, υψηλή απόδοση αφαίρεσης σωματιδίων, συμπαγής εγκατάσταση επεξεργασίας, δεν απαιτεί συμπληρωματική προσθήκη χημικών ουσιών, τα παραπάνω καθιστούν τον υδροκυκλώνα ένα πολλά υποσχόμενο μέσο για ποικίλες επεξεργασίες λυμάτων (Wei, 2017).

Στο πίνακα 3.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τυπικές απομακρύνσεις των εξεταζόμενων πρακτικών απομάκρυνσης στερεών. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως οι συγκεκριμένες απομακρύνσεις είναι ενδεικτικές καθώς το εισερχόμενο ρεύμα διαφέρει σε χαρακτηριστικά καθώς και η τοποθέτηση των διεργασιών είναι διαφορετική σε κάθε περίπτωση. Όπως γίνεται αντιληπτό, ο υδροκυκλώνας μπορεί να μην πετυχαίνει τις μεγαλύτερες απομακρύνσεις, αλλά η ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση σε συνδυασμό με την μη χρήση χημικών, τον μικρό χώρο που απαιτεί καθώς και την ανύπαρκτη φθορά του που έχει ως αποτέλεσμα το να μην χρειάζεται αντικατάσταση μερών του, το καθιστά μια ιδιαίτερα προσιτή τεχνολογία διαχωρισμού στερεών που μπορεί να βελτιώσει τις αποδόσεις των υφιστάμενων ΕΕΛ.

Πίνακας 3.1 Αποδόσεις τεχνικών απομάκρυνσης στερεών από δεδομένα που έχουν δημοσιευθεί από τους Στάμος & Βογιατζής (1994) , Μπατιστάτος (2017) , Franchi & Santoro (2015), GHD (2003) Νταρακάς (2010) , Munoz (2021) , Παυλής (2011) , Zhuria (2018) , Tchobanoglous, (1998), Kim (2015).

Τεχνολογία	Απομάκρυνση TSS	Απομάκρυνση BOD ₅	Απομάκρυνση COD
Εσχάρωση στην προεπεξεργασία	5-10%	0-10%	-
Μικροκοσκίνιση	30-50%	10-20%	10-20%
Υδροκυκλώνας	15-60%	10-30%	10-30%
Καθίζηση	30-80%	15-35%	9-30%
Επίπλευση	40-99%	50-70%	29-79%
Μεμβράνες Διήθησης	-	61-78%	40-78%
Ηλεκτροκροκίδωση	85,7%	27,02%	92,18%

3.7.1 Εφαρμογές υδροκυκλώνα

3.7.1.1 Υδροκυκλώνες σε ΕΕΛ

Ο υδροκυκλώνας είναι μια συσκευή η οποία μπορεί να βοηθήσει με την γρήγορη και οικονομικά προσιτή φύση του μια ΕΕΛ στην απομάκρυνση στερεών και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε στάδιο της εγκατάστασης (Wang, 2019).

Στράς, Αυστρία

Η ΕΕΛ του Strass, που βρίσκεται στο Strass της Αυστρίας, εφάρμοσε υδροκυκλώνες, ειδικότερα την τεχνολογία S-Select®. Πολλοί παράγοντες συνέβαλαν στην κακή καθίζηση που γνώρισε η εγκατάσταση, όπως αλλαγές στη θερμοκρασία περιβάλλοντος και ασυνεπής οργανική/υδραυλική φόρτωση λόγω της εισροής τουριστών. Με την εγκατάσταση υδροκυκλώνων, με σκοπό τη βελτίωση της καθιζητικότητας της ιλύς, ο αρχικός δείκτης όγκου ιλύς ήταν 180 mL/g και μειώθηκε σημαντικά σε πολύ κάτω από τα 100 mL/g, αποτελέσματα ιδιαίτερα ενθαρρυντικά για τις δυνατότητες του υδροκυκλώνα (Welling, 2015).

Ντιζόν, Γαλλία

Η ΕΕΛ του Ντιζόν της Γαλλίας είναι άλλη μια εγκατάσταση που χρησιμοποίησε υδροκυκλώνες. Ο στόχος ήταν να βελτιστοποιηθεί η καθίζηση της βιολογικής ιλύος μειώνοντας και σταθεροποιώντας τον δείκτη όγκου ιλύς και η διαδικασία αποδείχθηκε ότι σταθεροποιεί τη λειτουργία. Η πύκνωση της βιομάζας επιτεύχθηκε με βάση την εξωτερική βαρυμετρική καθίζηση με χρήση υδροκυκλώνων εντός βιοαντιδραστήρα βιολογικής απομάκρυνσης θρεπτικών ουσιών συνεχούς ροής (Roche, 2022).

3.7.1.2 Υδροκυκλώνας στην επεξεργασία ορυκτών πόρων

Στη μηχανική επεξεργασίας ορυκτών πόρων, οι υδροκυκλώνες έχουν χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση και το διαχωρισμό στερεών αιωρούμενων σε ρευστά (Bradley, 1965). Η μεταλλευτική βιομηχανία χρησιμοποιεί υδροκυκλωνικά φίλτρα επειδή παρέχουν καλύτερο διαχωρισμό ελέγχου μεγέθους, χαμηλότερη κατανάλωση νερού, όλο και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και λιγότερο χώρο από άλλες συσκευές διαχωρισμού (Machado, 1992).

Η εισροή νερού στις πηγές πετρελαίου είναι γνωστή για περισσότερα από 100 χρόνια και θεωρείται ως ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα κατά την παραγωγή πετρελαίου. Γεγονός είναι ότι, υπάρχει μια περίοδος στη διάρκεια ζωής μιας πετρελαιοπηγής όπου η παραγωγή φτάνει στο αποκορύφωμά της και το παραγόμενο πετρέλαιο συνδέεται συχνά με αυξημένη παραγωγή νερού. Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν το πεδίο της πετρελαιοπηγής έχει ωριμάσει και παράγει πετρέλαιο για πολλά χρόνια (Ogunsina, 2005).

Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο διαχωρισμός των παραγόμενων ρευστών (πετρέλαιο/νερό) με τη χρήση υδροκυκλώνα και η απόρριψη του διαχωρισμένου νερού είναι ένα φιλικό προς το περιβάλλον εργαλείο που παρέχει μια μοναδική ευκαιρία μείωσης του λειτουργικού κόστους και ενίσχυσης της οικονομικής βιωσιμότητας των πεδίων μεγάλης παραγωγής πετρελαίου ενώ ταυτόχρονα μειώνουν τη ρύπανση (Shaw C, 2000).

Υδροκυκλώνας στην βιομηχανία χαρτιού

Το 1937, οι υδροκυκλώνες χρησιμοποιήθηκαν στη βιομηχανία χαρτιού και χαρτοπολτού για τον διαχωρισμό μολυσμένων σωματιδίων από την ίνα κυτταρίνης σε ένα υγρό εναιώρημα δημιουργώντας το τελικό προϊόν χαρτιού (Machado, 1992). Με αυτή την επιτυχία, η χρήση υδροκυκλώνων επεκτάθηκε και αλλού στη βιομηχανία χαρτιού για να συμπεριλάβει: αφαίρεση ρύπων από διάφορα μέρη της διαδικασίας παραγωγής χαρτιού, αφαίρεση ρύπων διαφορετικής πυκνότητας και πιθανή προκατασκευή ινών (Covey, 2009).

Υδροκυκλώνας στην βιομηχανία τροφίμων

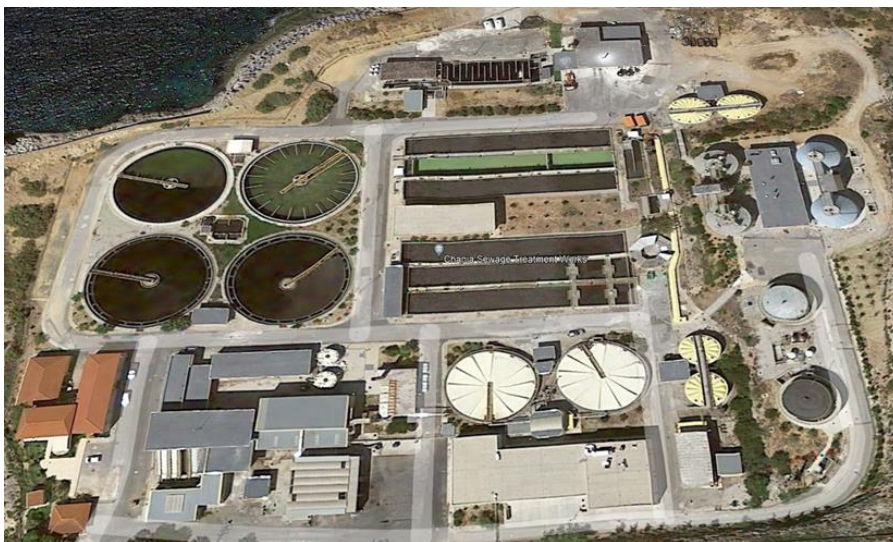
Οι υδροκυκλώνες χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στην επεξεργασία τροφίμων, όπως στη διύλιση αμύλου, στο καθαρισμός χυμού φρούτων και λαδιών και στην επεξεργασία λυμάτων από την επεξεργασία τροφίμων. Ο αποτελεσματικός διαχωρισμός αμύλου και πρωτεΐνης στα πρωτογενή γεωργικά προϊόντα είναι ζωτικής σημασίας για τη βιομηχανία τροφίμων. Πολλά βασικά γεωργικά προϊόντα όπως η ταπιόκα (Saengchan, 2009) ή ο αλεσμένος κόκκος ρεβιθιού (Emami, 2005) απαιτούν καλό διαχωρισμό αμύλου και πρωτεΐνης για περαιτέρω χρήση και ο υδροκυκλώνας είχε χρησιμοποιηθεί στον τομέα (Svarovsky, 1984). Στην συγκεκριμένη βιομηχανία η χρήση πολλαπλών υδροκυκλώνων με χαμηλή τροφοδοσία έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικότερο από τη χρήση ενός υδροκυκλώνα που αντιμετωπίζει υψηλές τροφοδοσίες (Emami, 2005).

Κεφάλαιο 4: Περιγραφή ΕΕΛ Χανίων

Η ΕΛΛ της πόλεως των Χανίων βρίσκεται στη τοποθεσία Κουμπελή Χανίων σε απόσταση περίπου 4 χιλιόμετρα βορειοανατολικά από το κέντρο της πόλης των Χανίων, 2 χιλιόμετρα βόρεια του Πολυτεχνείου Κρήτης και καταλαμβάνει χώρο έκτασης 43 στρεμμάτων.

Στην ΕΕΛ οδηγούνται τα αστικά λύματα των Δήμων Χανίων, Ελευθερίου Βενιζέλου, Θερύσου, Σούδας και Ακρωτηρίου, οι οποίοι πλέον εντάσσονται στον νέο Καλλικρατικό Δήμο Χανίων, τα βοθρολύματα από ολόκληρο το νομό Χανίων, καθώς και τα υγρά απόβλητα των βιομηχανικών παραγωγικών μονάδων που είναι ομοειδή ως προς τη σύσταση τους με τα αστικά λύματα.

Η εγκατάσταση έχει τεθεί σε λειτουργία από το 1995 με σκοπό την επεξεργασία αστικών λυμάτων. Η μέθοδος επεξεργασίας είναι η μέθοδος ενεργού ιλύος με μερική νιτροποίηση – απονιτροποίηση και σταθεροποίηση ιλύος με αναερόβια χώνευση. Τα επεξεργασμένα λύματα διατίθενται με υποθαλάσσιο αγωγό στη θάλασσα.



Εικόνα 4.1 Κάτοψη της ΕΕΛ Χανίων

4.1 Παράμετροι σχεδιασμού της εγκατάστασης

Σύμφωνα με την Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) της ΕΛΛ Χανίων, Α.Π οικ.204460/25092011, η οποία είναι αναρτημένη στην ιστοσελίδα του Υπουργείου Περιβάλλοντος Και Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ) ο σχεδιασμός της ΕΛΛ Χανίων έγινε με βάση τα παρακάτω δεδομένα του πίνακα 4.1:

Πίνακας 4.1 Υδραυλικά και Ρυπαντικά φορτία ΕΛΛ Χανίων (Πηγή: <http://astikalimata.ypeka.gr>, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.204460/25-09-2011) της ΕΕΛ Χανίων).

	Παρούσα φάση		Τελική Φάση (Έτος σχεδιασμού 2030)	
	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Χειμώνας	Καλοκαίρι
Ισοδύναμοι κάτοικοι	114775	117765	157500	170000
Μέση ημερήσια παροχή (m^3/d)	20994	26040	28500	31500
BOD ₅ (kg/d)	6255	6418	9450	10200
Αιωρούμενα στερεά (kg/d)	5436	5650	8750	9600
Ολικό Άζωτο (kg/d)	963	998	1150	1250
Φωσφόρος (kg/d)	283	295	340	370

Για τα υγρά απόβλητα, οι μέγιστοι αποδεκτοί μέσοι όροι των συγκεντρώσεων σχετικά με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εξόδου της εγκατάστασης παρουσιάζονται στον πίνακα 4.2

Πίνακας 4.2 Ποιοτικά Χαρακτηριστικά εξόδου της ΕΕΛ (Πηγή: <http://astikalimata.ypeka.gr>, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.204460/25-09-2011) της ΕΕΛ Χανίων).

Παράμετρος	Τιμή
BOD ₅ (mg/L)	< 25
COD (mg/L)	< 125
Αιωρούμενα Στερεά SS (mg/L)	< 35
Καθιζάνοντα στερεά εντός 2 ωρών σε κώνο Imhoff (ml/L)	< 0,3
Ολικό Άζωτο (mg/L)	< 10
Αμμωνιακό άζωτο (mg/L)	< 2
Λίπη – Έλαια (mg/L)	< 0,1
Επιπλέοντα Στερεά	0

Για τα αέρια απόβλητα της μονάδας συμπαραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας από βιοαέριο, ισχύουν τα αναφερόμενα στο Π.Δ. 1180/29.9.81 (ΦΕΚ 293/Α/6.10.81).

Για τα απαέρια από την καύση του βιοαερίου καθορίστηκαν τα παρακάτω όρια εκπομπής με αναγωγή σε 5% οξυγόνο:

Πίνακας 4.3 Όρια εκπομπής ατμοσφαιρικών (Πηγή: <http://astikalimata.ypeka.gr>, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.204460/25-09-2011) της ΕΕΛ Χανίων).

Ρύπος	mg/Nm ³ ατμοσφαιρικών
CO	1100
NO _x	650
SO _x	20
VOC	1300
H ₂ S	4

4.2 Βασικά τμήματα της εγκατάστασης

Σύμφωνα με την ΑΕΠΟ Α.Π. οικ.204460/25-09-2011 τα λύματα οδηγούνται στην ΕΛΛ μέσω δικτύου κεντρικών αποχετευτικών αγωγών (ΚΑΑ) και κεντρικών αντλιοστασίων (ΚΑ) ως εξής:

1. **ΚΑΑ1** από όρια περιοχής NATURA Αγιάς μέχρι ΚΑΑ7 Δήμου Χανίων

Μήκος αγωγών βαρύτητας: 7.250 m.

2. **ΚΑΑ2** από Σούδα μέχρι ΚΑΑ7 Δήμου Χανίων

Μήκος αγωγών βαρύτητας: 2.050 m.

Μήκος καταθλιπτικού αγωγού: 2500 m.

3. **ΚΑΑ3** από οικισμό Σταυρού Ακρωτηρίου μέχρι ΚΑΑ6 Ακρωτηρίου

Μήκος αγωγών βαρύτητας: 6.700 m.

Μήκος καταθλιπτικού αγωγού: 4.250 m.

4. **ΚΑΑ4** από οικισμό Χωρδακίου Ακρωτηρίου μέχρι ΚΑΑ6 Ακρωτηρίου

Μήκος αγωγών βαρύτητας: 5.650 m.

Μήκος καταθλιπτικού αγωγού: 2.500 m.

5. **ΚΑΑ5** από οικισμό Στερνών Ακρωτηρίου μέχρι ΚΑΑ6 Ακρωτηρίου

Μήκος αγωγών βαρύτητας: 6.800 m.

Μήκος καταθλιπτικού αγωγού: 3.900 m.

6. **ΚΑΑ6** από περιοχή Αγίου Ονουφρίου Ακρωτηρίου μέχρι την ΕΕΛ

Μήκος αγωγών βαρύτητας: 2.300 m.

Μήκος καταθλιπτικού αγωγού: 350 m.

7. **ΚΑΑ7** Δήμου Χανίων από περιοχή οδού Νεάρχου (συμβολή των ΚΑΑ1 και ΚΑΑ2) μέχρι την ΕΕΛ

Μήκος αγωγών βαρύτητας: 5.950 m.

4.3 Γραμμή επεξεργασίας λυμάτων

4.3.1 Αντλιοστάσιο εισόδου εγκατάστασης

Τα λύματα, μέσω του ΚΑΑ καταλήγουν σε δύο παράλληλα κανάλια, και μετά από χονδροεσχάρωση οδηγούνται στο φρεάτιο φόρτισης του Αντλιοστασίου Εισόδου, ενώ ανάντη των διωρύγων εσχάρωσης έχει κατασκευαστεί υπερχειλιστής καμπύλης στέψης, μέσω του οποίου παρέχεται η δυνατότητα γενικής παράκαμψης της εγκατάστασης. Η ανύψωση των λυμάτων γίνεται με τέσσερις κοχλιωτές αντλίες (η μία εφεδρική). Κάθε κοχλιωτή αντλία έχει παροχή $830 \text{ m}^3/\text{h}$ και μπορεί να απομονωθεί με την χρήση χειροκίνητων θυροφραγμάτων. Στο αντλιοστάσιο εισόδου έχει κατασκευαστεί ένας ακόμη αύλακας για την μελλοντική εγκατάσταση μίας ακόμη κοχλιωτής αντλίας (Δημοπούλου 2011).

4.3.2 Εγκατάσταση υποδοχής βοθρολυμάτων

Για την προεπεξεργασία των βοθρολυμάτων έχει εγκατασταθεί, ενοποιημένη μονάδα για την υποδοχή, εσχάρωση και εξάμμωση των βοθρολυμάτων δυναμικότητας 85 L/s . Τα προεπεξεργασμένα βοθρολύματα οδηγούνται στη συνέχεια σε δεξαμενή εξισορρόπησης. Τα βοθρολύματα από τα βυτία, μέσω αγωγού καταλήγουν σε συγκρότημα προεπεξεργασίας βοθρολυμάτων, ενώ παρέχεται η δυνατότητα παράκαμψης του συγκροτήματος. Η εσχάρωση των βοθρολυμάτων πραγματοποιείται σε τύμπανο εσχάρωσης, με διάκενο 6 mm και η εξάμμωση σε επιμήκη δεξαμενή σταθερής ταχύτητας. Τα εσχαρίσματα από την χοάνη συλλογής μεταφέρονται και συμπιέζονται μέσω κλειστού κοχλία και εναποτίθενται σε κάδο απορριμμάτων. Η άμμος που συλλέγεται στον πυθμένα της δεξαμενής οδηγείται στον διαχωριστή άμμου, ο οποίος είναι κλειστός και διαθέτει την άμμο σε κάδο απορριμμάτων. Τα βοθρολύματα, μετά την προεπεξεργασία, καταλήγουν με βαρύτητα σε διθάλαμη δεξαμενή εξισορρόπησης, συνολικού όγκου 420 m^3 . Σε κάθε θάλαμο έχει εγκατασταθεί ένας υποβρύχιος αεριστήρας συνεχούς λειτουργίας και ένας μηχανικός αναδευτήρας για τον αερισμό και την ανάδευση του περιεχομένου της δεξαμενής. Από τη δεξαμενή εξισορρόπησης, τα βοθρολύματα με αντλίες καταλήγουν στο φρεάτιο μερισμού των δεξαμενών πρωτοβάθμιας καθίζησης (Δημοπούλου, 2011).

4.3.3 Εσχάρωση

Η εσχάρωση γίνεται αρχικά με επίπεδες χειροκίνητες εσχάρες και στη συνέχεια με τρεις αυτόματες εσχάρες (η μία είναι εφεδρική) με διάκενο μεταξύ ράβδων 6 mm . Η ενεργοποίηση του περιστρεφόμενου μηχανισμού απομάκρυνσης εσχαρωμάτων γίνεται με αισθητήρια διαφοράς πίεσεως αέρα οπότε τα εσχαρώματα αφού συμπιεστούν μεταφέρονται σε κάδο συλλογής μέσω μεταφορικής ταινίας (Καρρά, 2008).



Εικόνα 4.2 Αίθουσα μηχανικών εσχάρων ΕΕΛ Χανίων (Καρρά, 2008)

4.3.4 Εξάμμωση – Αφαίρεση λιπών

Λειτουργούν δύο δεξαμενές εξάμμωσης-αφαίρεσης λιπών. Ο συνολικός όγκος της κάθε δεξαμενής είναι 118m^3 από τα οποία τα 75m^3 είναι περιοχή εξάμμωσης και τα 43m^3 ο όγκος της περιοχής αφαίρεσης λιπών.

Στα λύματα διοχετεύεται αέρας μέσω 11 κεραμικών διαχυτήρων. Με προβλεπόμενο χρόνο παραμονής των λυμάτων στην περιοχή εξάμμωσης μεγαλύτερο από 7min επιτυγχάνεται η αφαίρεση του 90% του αριθμού των σωματιδίων που έχουν διάμετρο μεταξύ 0,16 και 0,20 mm (Καρρά, 2008). Τα επιπλέοντα υλικά απομακρύνονται μέσω ειδικού μηχανισμού και συγκεντρώνονται σε φρεάτιο συλλογής. Επίσης λειτουργεί ειδική διάταξη έκπλυσης οργανικών και απομάκρυνσης της υγρασίας από την άμμο.



Εικόνα 4.3 Δεξαμενές αμμοσυλλογής και λιποσυλλογής ΕΕΛ Χανίων (Καρρά, 2008)

4.3.5 Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Ακολουθώντας την προεπεξεργασία, τα λύματα εισέρχονται στο φρεάτιο μερισμού για την κατάλληλη διανομή της παροχής στις δύο δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης. Στο φρεάτιο

μερισμού, οδηγούνται επίσης τα στραγγίδια καθώς και τα προεπεξεργασμένα βοθρολύματα. Επί προσθέτως, έχει εγκατασταθεί υπερχειλιστικό θυρόφραγμα στο φρεάτιο, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα μερικής ή ολικής παράκαμψης της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (Δημοπούλου, 2011). Οι δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης έχουν διάμετρο 22 m και διαθέτουν περιστρεφόμενη γέφυρα, με ξέστρο πυθμένα και σαρωτή επιπλεόντων. Η ιλύς από τον κώνο ιλύος οδηγείται στον υγρό θάλαμο του αντλιοστασίου πρωτοβάθμιας ιλύος και από εκεί στους παχυντές βαρύτητας. Εντός του αντλιοστασίου πρωτοβάθμιας ιλύος έχουν εγκατασταθεί δύο υποβρύχιες αντλίες. Εναλλακτικά η πρωτοβάθμια ιλύς μπορεί να οδηγηθεί στην μηχανική πάχυνση ή στην μεταπάχυνση. Τα επιπλέοντα από τις δεξαμενές καθίζησης καταλήγουν σε φρεάτιο και από εκεί απομακρύνονται με βυτιοφόρα οχήματα. Η απόδοση της πρωτοβάθμιας καθίζησης είναι απομάκρυνση BOD_5 κατά 33% και αιωρούμενων στερεών κατά 60%(Καρρά, 2008).



Εικόνα 4.4 Δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης ΕΕΛ Χανίων (Καρρά, 2008)

4.3.6 Βιολογική επεξεργασία

Η βιολογική επεξεργασία περιλαμβάνει τη δεξαμενή επιλογής των μικροοργανισμών, τις σωληνώσεις και διώρυγες τροφοδότησης των δεξαμενών αερισμού, τις δεξαμενές αερισμού, τις δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης και τα αντλιοστάσια ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος.

Στην δεξαμενή επιλογής που έχει όγκο 485 m³ αναμιγνύονται υπό ανοξικές συνθήκες τα πρωτοβάθμια λύματα με την ιλύ ανακυκλοφορίας. Η δεξαμενή έχει κατασκευαστεί για να εμποδίσει την ανάπτυξη ανεπιθύμητων νηματοειδών βακτηριδίων στα επόμενα στάδια της εγκατάστασης (Καρρά, 2008). Η ανάδευση του περιεχομένου της δεξαμενής επιτυγχάνεται με τέσσερις υποβρύχιους αναδευτήρες. Τα πρωτοβάθμια λύματα και η ιλύς ανακυκλοφορίας οδηγούνται στο ανάντη άκρο της δεξαμενής επιλογής μικροοργανισμών. Το πλέον ανάμικτο υγρό εξέρχεται από την δεξαμενή επιλογής μικροοργανισμών και με διώρυγα οδηγείται στο

προμεριστή, μέσω του οποίου διανέμεται σε δύο ομάδες βιολογικών αντιδραστήρων (Δημοπούλου, 2011).

4.3.7 Δεξαμενές αερισμού

Έχουν κατασκευαστεί συνολικά τέσσερις δεξαμενές αερισμού: δύο στην Α' φάση και δύο στη Β' φάση. Οι δύο που έχουν κατασκευαστεί στη πρώτη φάση έχουν συνολικό ενεργό όγκο 4.536 m^3 . Το πρώτο τμήμα κάθε δεξαμενής αερισμού λειτουργεί ως ανοξική ζώνη για την απονιτροποίηση των νιτροποιημένων εκροών. Για τον σκοπό αυτό έχουν τοποθετηθεί δύο κατακόρυφοι υποβρύχιοι αναδευτήρες για την ανάδευση του ανάμικτου υγρού. Η ανοξική ζώνη έχει όγκο 748 m^3 και αποτελεί το 33% του συνολικού όγκου της δεξαμενής. Σε κάθε αερόβια ζώνη κάθε δεξαμενής έχουν εγκατασταθεί 800 διαχυτήρες λεπτής φυσαλίδας, παρέχοντας $288 \text{ kg O}_2/\text{h}$ σε κάθε δεξαμενή. Η εσωτερική ανακυκλοφορία του ανάμικτου υγρού γίνεται μέσω τεσσάρων αντλιών δυναμικότητας $290 \text{ m}^3/\text{h}$ έκαστη.

Οι δεξαμενές αερισμού που κατασκευάστηκαν στην δεύτερη φάση έχουν ενεργό όγκο 4536 m^3 . Σε κάθε δεξαμενή έχουν διαμορφωθεί δύο πλήρως διακριτές ζώνες: ανοξική ζώνη που αποτελεί το 33% του συνολικού όγκου και αερόβια ζώνη που αποτελεί το 67% του συνολικού όγκου. Σε κάθε ανοξική ζώνη είναι εγκατεστημένοι δύο υποβρύχιοι αναδευτήρες, ενώ για τον αερισμό των λυμάτων έχουν εγκατασταθεί τέσσερις συστοιχίες διαχυτήρων που παρέχουν σε κάθε αερόβια ζώνη $270 \text{ kg O}_2/\text{h}$ σε τυπικές συνθήκες. Η εσωτερική ανακυκλοφορία γίνεται με τέσσερις επίτοιχες υποβρύχιες αντλίες δυναμικότητας $300 \text{ m}^3/\text{h}$, οι οποίες μέσω διωρύγων οδηγούν την νιτροποιημένη εκροή στην είσοδο της ανοξικής ζώνης κάθε δεξαμενής αερισμού. Ο απαιτούμενος αέρας των δεξαμενών και των δύο φάσεων παρέχεται από πέντε φυσητήρες δυναμικότητας $3.750 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (Δημοπούλου, 2011).



Εικόνα 4.5 Δεξαμενή αερισμού ΕΕΛ Χανίων (Καρρά, 2008)

4.3.8 Δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης

Υπάρχουν τρεις δεξαμενές διαμέτρου 33 μέτρων και όγκου 2.130 m^3 η μία. Η ροή εισόδου των λυμάτων έχει την ίδια μορφή με την πρωτοβάθμια ενώ για την εκροή οι δύο (παλαιότερες

δεξαμενές) φέρουν περιμετρικούς επιφανειακούς υπερχειλιστές και η νεώτερη υποεπιφανειακούς ακτινικούς σωλήνες υπερχειλίσης. Τα λύματα εισέρχονται στο κέντρο της κάθε δεξαμενής και εξέρχονται ακτινικά μέσω περιμετρικού διπλού υπερχειλιστή. Η ιλύς από τον κώνο ιλύος απομακρύνεται με σωλήνα και ρυθμιζόμενη δικλείδα τύπου bellmouth, στο υγρό φρέαρ του αντλιοστασίου ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος. Τα επιπλέοντα από κάθε δεξαμενή αφαιρούνται μέσω αντλίας που φέρεται από την γέφυρα και οδηγούνται σε φρεάτιο και από εκεί απομακρύνονται με βυτιοφόρο όχημα (Δημοπούλου, 2011).



Εικόνα 4.6 Δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης ΕΕΛ Χανίων (Καρρά, 2008)

Η δευτεροβάθμια ιλύς από τον κώνο συλλογής των δύο δεξαμενών τελικής καθίζησης που κατασκευάστηκαν στη πρώτη φάση, οδηγείται μέσω βαρύτητας στον υγρό θάλαμο του αντλιοστασίου ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος μέσω τηλεσκοπικών δικλείδων. Η ανακυκλοφορία της επιτυγχάνεται με τρεις αντλίες ξηρού τύπου δυναμικότητας $450 \text{ m}^3/\text{h}$. Από το αντλιοστάσιο η ανακυκλοφορία οδηγείται στην είσοδο της δεξαμενής επιλογής. Η πλεονάζουσα ιλύς οδηγείται στην μονάδα μηχανικής πάχυνσης με δύο αντλίες δυναμικότητας $80 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.3.9 Δεξαμενή χλωρίωσης

Τα λύματα από τις δεξαμενές καθίζησης καταλήγουν με βαρύτητα στην μονάδα απολύμανσης και από εκεί στο φρεάτιο φόρτισης του αγωγού εκβολής. Ανάντη της δεξαμενής χλωρίωσης ενεργού όγκου 600 m^3 έχει εγκατασταθεί μετρητής παροχής venturi (Δημοπούλου, 2011). Η απολύμανση των λυμάτων γίνεται με διάλυμα υποχλωριώδους νατρίου με 15% ενεργό χλώριο, ο χρόνος επαφής είναι 30 λεπτά με σχεδιαζόμενη συγκέντρωση κοπρανωδών κολοβακτηριδίων μετά την απολύμανση της τάξεως $176/100 \text{ ml}$. (Καρρά, 2008). Για την δοσομέτρηση του διαλύματος υποχλωριώδους νατρίου έχουν εγκατασταθεί δύο δοσομετρικές αντλίες.



Εικόνα 4.7 Δεξαμενή χλωρίωσης ΕΕΛ Χανίων (Καρρά, 2008)

Κάταντη της δεξαμενής χλωρίωσης έχει κατασκευαστεί και φρεάτιο αποχλωρίωσης. Η δοσομέτρηση του αποχλωριωτικού μέσου γίνεται μέσω δυο δοσομετρικών αντλιών εκ των οποίων η μία είναι εφεδρική. Ο υποθαλάσσιος αγωγός διάθεσης των επεξεργασμένων λυμάτων είναι κατασκευασμένος από πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας διαμέτρου 750 mm, έχει μήκος 110 m και καταλήγει σε βάθος 16m (Καρρά, 2008).

4.3.10 Γραμμή επεξεργασίας ιλύος

Η περίσσεια ιλύς οδηγείται σε μονάδα μηχανικής πάχυνσης και στη συνέχεια η παχυμένη ενεργός ιλύς μπορεί να οδηγηθεί μέσω των παχυντών βαρύτητας στους χωνευτές ή απευθείας στην μεταπάχυνση. Από την μεταπάχυνση, οι αντλίες τροφοδότησης των ταινιοφιλτροπρεσών αναρροφούν για την αφυδάτωση της ιλύος.

4.3.11 Μηχανική πάχυνση ιλύος

Η δευτεροβάθμια ιλύς υφίσταται πάχυνση με δύο φυγόκεντρους δυναμικότητας από 25 m³/h ιλύος περιεκτικότητας 0,7% σε στερεά και ακολούθως οδηγείται στην προπάχυνση, ενώ υπάρχει δυνατότητα απ' ευθείας παροχέτευσης και στους χωνευτές ή στην μεταπάχυνση (Καρρά, 2008).

4.3.12 Προπάχυνση

Έχουν κατασκευαστεί δύο παχυντές ιλύος, διαμέτρου 8,5m, με μέσο βάθος 3,5m εξοπλισμένοι με μηχανισμό ανάδευσης. Η ιλύς αναρροφάται από τον πυθμένα των δεξαμενών και με αντλίες θετικής εκτόπισης οδηγείται στους χωνευτές, ενώ τα στραγγίδια οδηγούνται με βαρύτητα στο δίκτυο στραγγιδίων της εγκατάστασης. Στη πραγματικότητα οι παχυντές βαρύτητας λειτουργούν σαν δεξαμενές ομογενοποίησης της ιλύος. Από το αντλιοστάσιο των προπαχυντών παρέχονται

οι εξής δυνατότητες: (α) τροφοδότηση της μονάδας χώνευσης, (β) παράκαμψη της μονάδας χώνευσης και τροφοδότηση απ' ευθείας των δεξαμενών μεταπάχυνσης (Δημοπούλου 2011).

4.3.13 Αναερόβιοι χωνευτές

Έχουν κατασκευαστεί δύο χωνευτές, ενεργού όγκου 1.500m^3 έκαστος. Η ανάμιξη του περιεχομένου των χωνευτών γίνεται με βιοαέριο. Η ιλύς θερμαίνεται μέσω εναλλακτών (ένας για κάθε χωνευτή) σε θερμοκρασία 35°C . Η δυναμικότητα κάθε εναλλάκτη θερμότητας ανέρχεται σε 775 MJ/h έκαστος. Για την θέρμανση του νερού έχουν εγκατασταθεί δύο λέβητες διπλού καυσίμου (ο ένας εφεδρικός) δυναμικότητας 925 MJ/h . Η ανακυκλοφορία της ιλύος γίνεται με τρεις αντλίες (η μία εφεδρική) θετικής εκτόπισης δυναμικότητας $22\text{ m}^3/\text{h}$. Η έξοδος της χωνευμένης ιλύος γίνεται επιλεκτικά από τον πυθμένα ή από ενδιάμεσο σημείο, ενώ προβλέπεται και υπερχείλιση υψηλής στάθμης. Η χωνευμένη ιλύς καταλήγει με βαρύτητα στις δεξαμενές μεταπάχυνσης και από εκεί αντλείται προς την μονάδα αφυδάτωσης. Το παραγόμενο βιοαέριο οδηγείται στη μονάδα αποθείωσης και από εκεί στο αεριοφυλάκιο ενεργού όγκου 650 m^3 . Η περίσσεια βιοαερίου οδηγείται σε δαυλό δυναμικότητας $800\text{ m}^3/\text{h}$. Το βιοαέριο χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις ανάγκες του έργου. Για τον σκοπό αυτό έχει εγκατασταθεί συγκρότημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το βιοαέριο, δυναμικότητας 200 kVA παρέχοντας ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 160 kW (Δημοπούλου, 2011).



Εικόνα 4.8 Αναερόβιοι χωνευτές ΕΕΛ Χανίων (Καρρά, 2008)

4.3.14 Μεταπάχυνση

Η σταθεροποιημένη ιλύς οδηγείται από τους χωνευτές σε δύο κυκλικές δεξαμενές διαμέτρου 11m οι οποίες λειτουργούν όπως οι δεξαμενές προπάχυνσης. Η ιλύς παχύνεται και στη συνέχεια οδηγείται προς αφυδάτωση. Η κάθε δεξαμενή έχει όγκο 300 m^3 (Καρρά, 2008).

4.3.15 Αφυδάτωση

Ιλύς από την μεταπάχυνση τροφοδοτείται προς την αφυδάτωση. Η αφυδάτωση επιτυγχάνεται με δύο ταινιοφιλτρόπρεσες με πλάτος ιμάντα 2m και μέγιστο ωριαίο φορτίο 848 kg/h μετά από κροκίδωση της ιλύος με πολυηλεκτρολύτη. Η συγκέντρωση στερεών της αφυδατωμένης ιλύος είναι περίπου 20% (Καρρά, 2008).

4.3.16 Μονάδα παραγωγής ενέργειας

Στην ΕΛΛ Χανίων, έχει εγκατασταθεί μονάδα ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 166 KW η οποία χρησιμοποιεί το παραγόμενο βιοαέριο ως καύσιμο. Η μονάδα αποτελείται από τα παρακάτω μέρη (Δημοπούλου, 2011):

- Δίκτυα σωληνώσεων για τη διασύνδεση του μηχανήματος με τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας της ιλύς, δίκτυα καλωδιώσεων για την σύνδεση με τον υποσταθμό, ηλεκτρονικό πίνακα και χώρο για τη στέγαση του συγκροτήματος.
- Συγκρότημα ενναλακτών συνολικής θερμικής ισχύος 175 KW αποτελούμενο από δύο πλακοειδή ενναλάκτες αντιροής για την ανάκτηση της θερμότητας από το ζεστό νερό της μηχανής, καθώς και τον ενναλάκτη αντιροής καυσαερίων – νερού για την ανάκτηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων.
- Κινητήρα εσωτερικής καύσης ισχύος 174 kW.
- Σύγχρονη γεννήτρια η οποία κινείται από τον κινητήρα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας είναι: 166 kW με $\cos\phi=1$ και 162 kW $\cos\phi=0,8$. Η παραγόμενη τάση είναι τριφασική 400/231 V ή 50 Hz.

4.4 Επιπλέον μονάδες εγκατάστασης

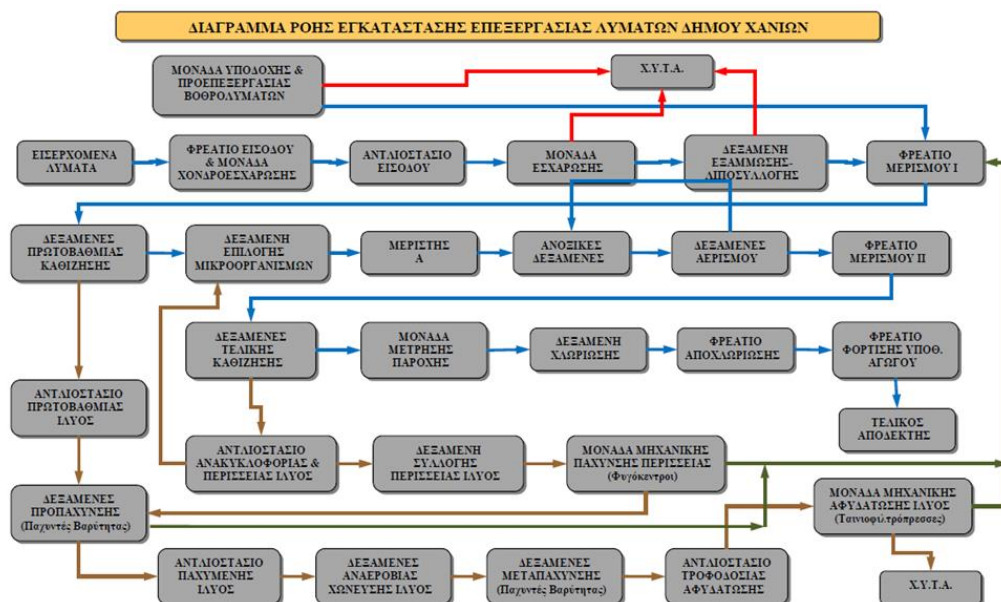
Μονάδα απόσμησης με δυναμικότητα 45.000 m³/h έχει κατασκευαστεί με σκοπό την μείωση των οσμών που παράγονται από το έργο έχοντας την δυνατότητα αντιμετώπισης συνεχών συγκεντρώσεων 15 ppm ισοδύναμων H₂S και 10 ppm ισοδύναμων NH₃ μέχρι ποσοστού 99% (Καρρά, 2008). Η απόσμηση πραγματοποιείται με την μέθοδο εξουδετέρωσης των οσμών με οξείδωση χρησιμοποιώντας σαν οξειδωτικό μέσο διάλυμα του υπεροξειδίου του υδρογόνου. Η μονάδα απόσμησης αποτελείται από τις εξής επιμέρους μονάδες (Δημοπούλου, 2011):

- Πλυντηρίδα τριών σταδίων, οριζόντιου τύπου, διασταυρούμενης ροής
- Μονάδες δοσομέτρησης υγρών αντιδραστηρίων (H₂O₂, NaOH και H₂SO₄)
- Αντλίες ανακυκλοφορίας: μία ανά στάδιο και δύο εφεδρικές
- Σωληνώσεις τροφοδοσίας των διαμερισμάτων της πλυντηρίδας, δοσομέτρησης χημικών και ανακυκλοφορίας
- Δοχεία αποθήκευσης των χημικών αντιδραστηρίων
- Διατάξεις ρύθμισης και ελέγχου στάθμης, αγωγιμότητας, pH και H₂O₂

Στην μονάδα απόσμησης καταλήγουν τέσσερις κλάδοι αεραγωγών από:

- Τις μονάδες προεπεξεργασίας και υποδοχής βοθρολυμάτων
- Την πρωτοβάθμια καθίζηση
- Τους παχυντές βαρύτητας
- Την αφυδάτωση, την μεταπάχυνση και την δεξαμενή επιλογής μικροοργανισμών

Τέλος, η ΕΕΛ Χανίων διαθέτει όλες τις απαραίτητες κτιριακές και λοιπές υποδομές για την πλήρη και ομαλή λειτουργία της. Τα βοηθητικά έργα αποτελούνται από το δίκτυο ύδρευσης, το δίκτυο αποχέτευσης όμβριων υδάτων, το δίκτυο πυρόσβεσης και άρδευσης, το δίκτυο εξωτερικού φωτισμού και το πλήρες δίκτυο αυτοματισμών και ελέγχου (Δημοπούλου, 2011).



Εικόνα 4.9 Διάγραμμα ροής ΕΕΛ Χανίων (Δημοπούλου, 2011).

Κεφάλαιο 5: Περιγραφή και διαστασιολόγηση του συστήματος υδροκυκλώνα

5.1 Πειραματική διάταξη και δειγματοληψία

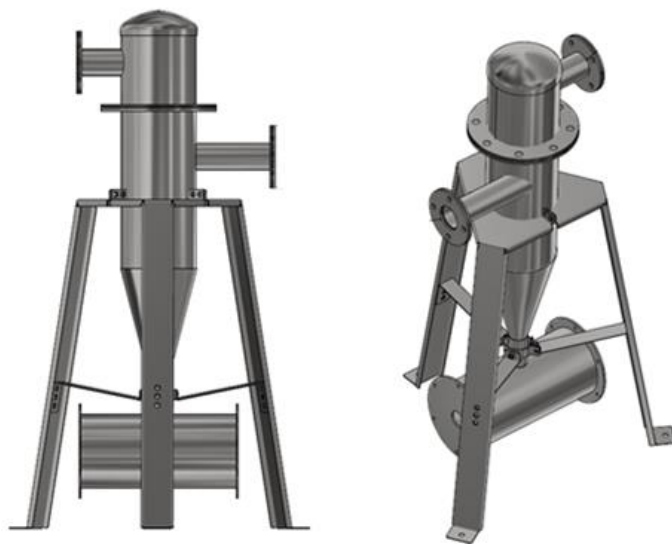
Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το Εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών του Πολυτεχνείου Κρήτης υδροκυκλώνας από ανοξείδωτο χάλυβα ASI 304, ο οποίος εγκαταστάθηκε στην έξοδο της πρωτοβάθμιας καθίζησης (Εικόνα 5.1). Το πλήθος των μετρήσεων ανήλθε στις είκοσι μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε διάστημα τεσσάρων μηνών. Τα δείγματα συλλέχθηκαν κυρίως μεταξύ των ωρών 11 π.μ. και 3 μ.μ. Η δειγματοληψία διεξήχθη κυρίως υπό αίθριες καιρικές συνθήκες για να διασφαλιστεί ότι οι μετρήσεις παραμένουν αναλλοίωτες. Τα δείγματα μεταφερόντουσαν άμεσα στο Πολυτεχνείο Κρήτης για ανάλυση. Για να εξασφαλιστεί το υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας, οι εργαστηριακές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν την ίδια ημέρα με τη συλλογή του δείγματος. Εάν δεν ήταν εφικτό να γίνει αυτό, τα δείγματα φυλάσσονταν σε ψυγείο σε θερμοκρασία 5°C για μέγιστη διάρκεια 1 ημέρας.



Εικόνα 5.1 Διάταξη υδροκυκλώνα στην ΕΕΛ Χανιών

Ο υδροκυκλώνας απαρτίζεται από έναν κοίλο κύλινδρο στην κορυφή και έναν ανεστραμμένο κώνο στο πάνω μέρος. Η αρχή λειτουργίας του υδροκυκλώνα βασίζεται στην φυγόκεντρο δύναμη που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του, καθώς το υγρό εισέρχεται εφαπτομενικά στον υδροκυκλώνα. Τα βαρύτερα σωματίδια ακολουθώντας μια σπειροειδή τροχιά κοντά στα τοιχώματα, συλλέγονται στο θάλαμο συλλογής που βρίσκεται χαμηλά όπου και απομακρύνονται με το άνοιγμα βάνας αποχέτευσης, ενώ το καθαρό υγρό απομακρύνεται από το πάνω μέρος του. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υδροκυκλώνα είναι τα ακόλουθα:

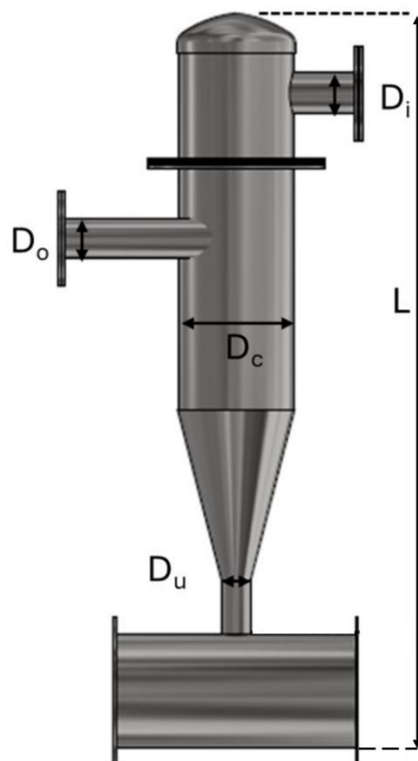
- Μέγιστη/μέση παροχή λυμάτων: 50/21 m³/h
- Υλικό κατασκευής: Ανοξείδωτος χάλυβας 304
- Διατομή εισόδου/εξόδου καθαρών: Φ 26,5 mm/ Φ 26,5 mm
- Διατομή Υπορροής: Φ 13,25 mm
- Ύψος υδροκυκλώνα: 1.052 mm



Εικόνα 5.2 Σχηματική απεικόνιση υδροκυκλώνα

5.2 Διαστασιολόγηση υδροκυκλώνα

Η γεωμετρία του υδροκυκλώνα επηρεάζει την απόδοσή του και χαρακτηριστικές παράμετροι για τον σχεδιασμό ενός υδροκυκλώνα είναι οι εξής: η Διάμετρος του Υδροκυκλώνα (Hydrocyclone Diameter, D_c), η Διάμετρος Εισόδου (Inlet Diameter, D_i), η Διάμετρος Υπερχείλισης/εξόδου επεξεργασμένου ρεύματος (Overflow Diameter, D_o), η Διάμετρος Υπορροής (Underflow Diameter, D_u), το ύψος (L) καθώς και η γωνία κώνου του υδροκυκλώνα (θ). Για το σχεδιασμό ενός υδροκυκλώνα είναι σύνηθες να απλοποιείται η γεωμετρία χρησιμοποιώντας αναλογίες των διαφορετικών γεωμετρικών ιδιοτήτων σε σχέση με τη διάμετρο του υδροκυκλώνα. Οι περισσότεροι υδροκυκλώνες που λειτουργούν στη βιομηχανία είναι αποτέλεσμα αυτών των προτεινόμενων αναλογιών. Ένας τυπικός υδροκυκλώνας ορίζεται ως ο υδροκυκλώνας που έχει την κατάλληλη γεωμετρική σχέση μεταξύ της διαμέτρου του υδροκυκλώνα, της διατομής εισόδου-εξόδου, της γωνίας κώνου και έχει αρκετό ύψος έτσι ώστε να παρέχει αρκετό χρόνο παραμονής προκειμένου να διαχωρίσει τα στερεά υπολείμματα από το υγρό (Sovechles, 2018), οι βασικές σχεδιαστικές διαστάσεις αποτυπώνονται στην εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3 Διαστάσεις υδροκυκλώνα

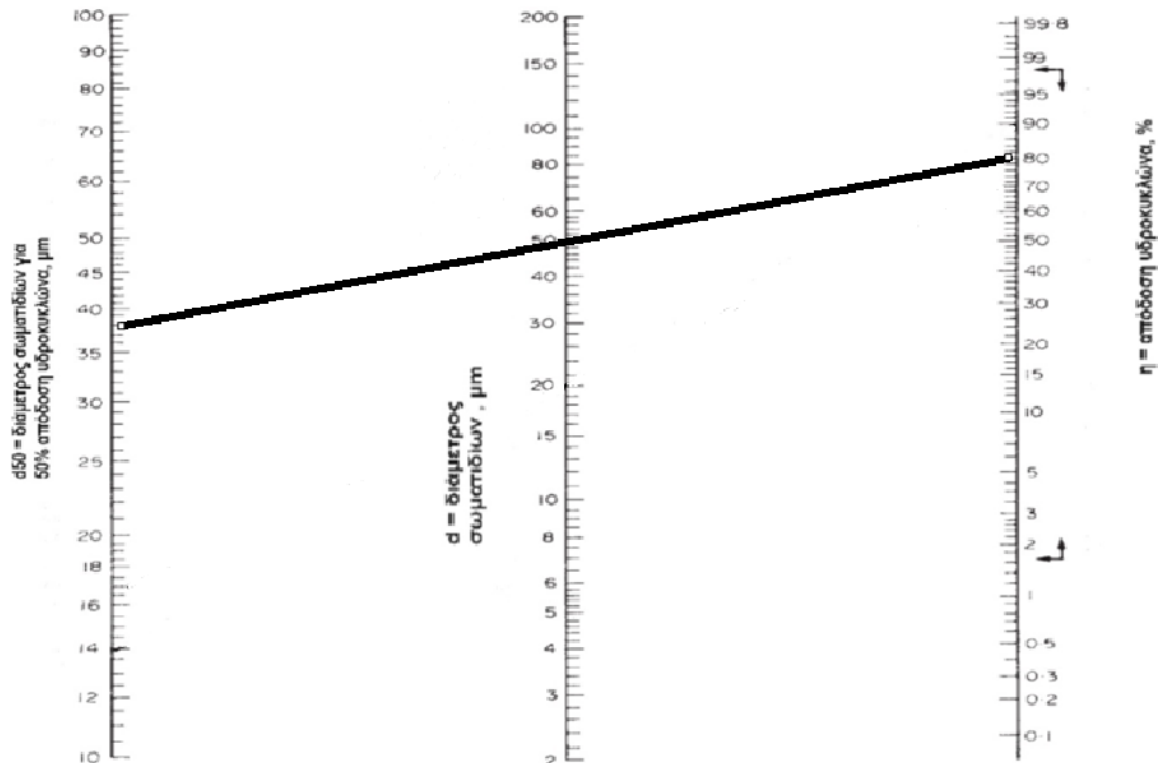
Η μέγιστη παροχή που επιλέχθηκε για τον σχεδιασμό του υδροκυκλώνα είναι τα 50 m³/h, η επιθυμητή απόδοση 80% και τα σωματίδια προς απομάκρυνση εκτιμήθηκαν με διάμετρο τα 50 μm, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, κατά την οποία μετά την πρωτοβάθμια καθίζηση, η πλειοψηφία των σωματιδίων που υπάρχουν στα λύματα έχουν διάμετρο μικρότερη των 100 μm (Levine, 1985; Okamoto, 2016).

5.2.1 Διάμετρος υδροκυκλώνα

Η διάμετρος του υδροκυκλώνα (D_c) θεωρείται η βασική παράμετρος σχεδιασμού του καθώς από αυτή προκύπτουν και οι υπόλοιπες διαστάσεις του (Arterburn, 1982). Το εύρος των διαμέτρων υδροκυκλώνων που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία έχει ένα ανώτερο όριο. Οι δυσκολίες χειρισμού μεγάλων σωματιδίων σε εναιώρηση, και η έντονη τριβή, συμβάλλουν επίσης σε αυτό το ανώτερο όριο που είναι περίπου 2,3 m (Gupta & Yan, 2006). Στο άλλο άκρο του φάσματος, οι δυσκολίες στην κατασκευή και στην πολλαπλή χρήση κυκλώνων πολύ μικρής διαμέτρου περιορίζουν μεγέθη κάτω των 10 mm (Bradley, 1965).

Τα νομογραφήματα του Zanker (1977) χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία για τη διαστασιολόγησή του. Η μέθοδος του Zanker λειτουργεί ως εξής (Coulson, 2005):

Αρχικά, πρέπει να προσδιορισθεί το d_{50} , το οποίο είναι η διάμετρος σωματιδίων για την οποία ο υδροκυκλώνας θα έχει απόδοση 50%. Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα 5.1, για απόδοση 80% και διάμετρο σωματιδίων στα 50 μm , βρέθηκε το $d_{50} = 38 \mu\text{m}$.



Διάγραμμα 5.1 Προσδιορισμός του d_{50} για συγκεκριμένη διάμετρο σωματιδίων και απόδοση υδροκυκλώνα (Zanker, 1977).

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η D_c χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Bradley :

$$D_{50} = 4.5 \left[\frac{D_c^3 \mu}{L^{1.2} (\rho_s - \rho_L)} \right] \quad (5.1)$$

Όπου:

D_c = διάμετρος του υδροκυκλώνα, (cm)

μ = ιξώδες του υγρού, 1 mN s/m^2 (Πανώρας & Ηλίας, 1999).

L = παροχή υδροκυκλώνα, $50 \text{ m}^3/\text{h} = 833 \text{ L/min}$

ρ_L = πυκνότητα του υγρού, 1 g/cm^3

ρ_s = πυκνότητα του συμπυκνώματος, $1,18 \text{ g/cm}^3$ (Sperling, 2007).

$$D_{50} = 38 \mu\text{m}$$

Άρα, η D_c προκύπτει ως εξής:

$$D_c = \sqrt[3]{\frac{d_{50} \cdot L^{1.2} \cdot (\rho_s - \rho_L)}{4,5 \cdot \mu}} \quad \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow D_c = \sqrt[3]{\frac{38 \mu\text{m} \cdot \frac{833^{1.2} L}{\text{min}} \cdot (1,18 - 1) \text{g/cm}^3}{4,5 \cdot 1 \text{ mN s/m}^2}} \quad \Leftrightarrow$$

$$D_c = 16,93 \text{ cm} \quad \Leftrightarrow$$

$$D_c = 169,3 \text{ mm}$$

Εφαρμόζοντας συντελεστή ασφάλειας ίσο με 1,1, η διάμετρος του υδροκυκλώνα σχεδιάστηκε στα 186 mm.

5.2.2 Ύψος υδροκυκλώνα

Ο Hoffman 2001 πραγματοποίησε πειραματική και αριθμητική προσομοίωση για την επίδραση του μήκους του κυκλώνα και διαπίστωσε ότι η απόδοση του κυκλώνα βελτιώνεται με αυξημένο μήκος αλλά σε βέλτιστο μήκος η απόδοση θα αρχίσει να μειώνεται. Η βέλτιστη αναλογία ύψους προς διάμετρο υπολογίστηκε στα 5,65/1 και είναι η κορυφή, μετά την οποία περαιτέρω αύξηση του ύψους μειώνει την απόδοση διαχωρισμού του υδροκυκλώνα. Σύμφωνα με την αναλογία του Hoffman 2001, το ύψος του υδροκυκλώνα σχεδιάστηκε ίσο με 1.052 mm.

5.2.3 Διάμετρος εισόδου, εξόδου και διάμετρος υπορροής

Έχουν προταθεί αρκετές αναλογίες μεταξύ διαμέτρου υδροκυκλώνα/διαμέτρου εισόδου, το πλήρες εύρος για βιομηχανικά χρησιμοποιούμενους υδροκυκλώνες κυμαίνεται από $D_c/3$ έως και $D_c/15$ με τις επικρατέστερες να παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Αναλογίες διαμέτρου εισόδου σε σχέση με την διάμετρο του υδροκυκλώνα. Προσαρμοσμένες από δεδομένα που έχουν δημοσιευθεί από τους Bradley (1965), Castilho & Medronho (2000), Plitt (1976) και Silva (2012).

Είδος Υδροκυκλώνα	Bradley	Plitt	Krebs	Rietema
D_i	$D_c/7$	$D_c/7$	$D_c/3.7$	$D_c/3.6$

Σύμφωνα με τον Sabbagh (2014) η αυξημένη διάμετρος εισόδου σε σχέση με την διάμετρο υδροκυκλώνα, μειώνει την ταχύτητα εισόδου, την εφαιπτομενική ταχύτητα και τη φυγόκεντρο δύναμη κατά συνέπεια, μειώνεται η απόδοση διαχωρισμού. Αυτό το αποτέλεσμα επιβεβαιώθηκε και από άλλους ερευνητές (Vieira, 2016; Gawali & Bhambere, 2015).

Στην προκειμένη περίπτωση, η διάμετρος εισόδου σχεδιάστηκε σύμφωνα με τον Bradley, στα 26,5 mm, δηλαδή $D_i = D_o/7$. Η διάμετρος εξόδου D_o επιλέχθηκε ίση με την D_i (Durango-Cogollo, 2020).

Η διάμετρος υπορροής σχεδιάστηκε στο μισό της διαμέτρου εισόδου και εξόδου, στην προκειμένη περίπτωση ίση με 13,25 mm (Durango-Cogollo, 2020).

5.2.4 Γωνία κώνου

Η γωνία κώνου ενός υδροκυκλώνα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 15-30°, με μικρότερες γωνίες για διαχωρισμό λεπτότερων σωματιδίων και μεγαλύτερες γωνίες για πιο χονδρά σωματίδια (Cilliers, 2000). Ο Vieira (2005) διαπίστωσε ότι μια μεγαλύτερη γωνία κώνου από τις 30° οδηγεί σε μείωση της απόδοσης καθώς αυτό βοηθά στην έλξη περισσότερων σωματιδίων στο ρεύμα της εξόδου. Ο Bradley (1965) και ο Coulson (2005) υποστηρίζουν πως οι γωνία κώνου πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 9-12°. Με βάση την φύση των σωματιδίων στα υγρά απόβλητα, επιλέχθηκε διάμετρος ίση με 10°.

Το υλικό με το οποίο επιλέξαμε να κατασκευάσουμε τον υδροκυκλώνα είναι ανοξείδωτος χάλυβας 304 λόγω της αντίστασης του σε οξειδώσεις, της ολικής ανθεκτικότητας του καθώς και στην αντοχή του σε διάβρωση. Συνολικά κατασκευάστηκε υδροκυκλώνας για τον οποίο συμβουλευτήκαμε τόσο τη βιβλιογραφία όσο και τους εμπορικούς κατασκευαστές υδροκυκλώνων. Τα πλήρης χαρακτηριστικά του υδροκυκλώνα αποτυπώνονται στο πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.2 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά υδροκυκλώνα

Σχεδιαστική παράμετρος	Τιμή
Μέγιστη παροχή (m^3/h)	50
Μέση παροχή (m^3/h)	21
Απόδοση (%)	80
Διάμετρος υδροκυκλώνα, D_c (mm)	186
Ύψος υδροκυκλώνα, L (mm)	1.052
Γωνία κώνου, θ (°)	10
Διάμετρος εισόδου, D_i (mm)	26,5
Διάμετρος υπερχείλισης, D_o (mm)	26,5
Διάμετρος υπορροής, D_u (mm)	13,25
Υλικό κατασκευής	ανοξείδωτος χάλυβας 304

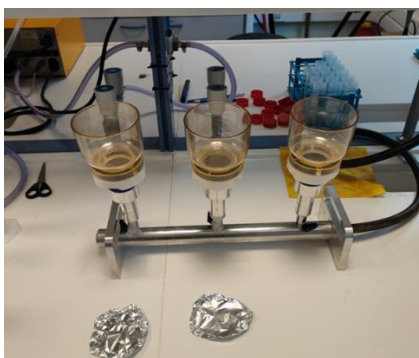
5.3 Αναλυτικές μέθοδοι

Οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν στην ΕΕΛ Χανίων στην οποία είχε γίνει η εγκατάσταση του υδροκυκλώνα, στο διάστημα από 26 Αυγούστου έως 20 Δεκεμβρίου 2022. Η άντληση της παροχής γινόταν από κανάλι εξόδου της πρωτοβάθμιας καθίζησης. Ο υδροκυκλώνας έχει μια είσοδο και δύο εξόδους, μια για το συμπύκνωμα και μια για την έξοδο του επεξεργασμένου ρεύματος. Τα δείγματα συλλέγονταν σε πλαστικά μπουκάλια των 1,5 L και μεταφέρονταν στο

Πολυτεχνείο Κρήτης με σκοπό την μέτρηση των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών, η αποθήκευση τους εκεί γινόταν σε ψυγείο με θερμοκρασία 10-15°C έτσι ώστε να μην αλλοιωθούν τα χαρακτηριστικά των λυμάτων λόγω θερμοκρασίας.

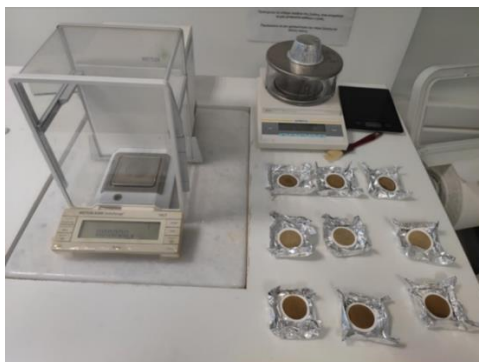
5.3.1 TSS

Η μέτρηση των TSS μετράει όλα τα αιωρούμενα στερεά στο νερό και προσδιορίζεται σύμφωνα με την Standard Method (solids 2540). Αυτή η μέτρηση γίνεται με την πλήρη εξάτμιση του δείγματος, ξήρανση στους 105 °C και ζύγιση του υπολείμματος. Η ολική ποσότητα του στερεού υπολείμματος εκφράζεται συνήθως σε mg/L. Για την μέτρηση των TSS, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή διήθησης του Πολυτεχνείου Κρήτης η οποία λειτουργεί υπό κενό (εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4 Συσκευή Διήθησης υπό κενό

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα (Whatman Glass microfiber filters, Grade 934 0,45 μm) στηριζόμενα σε διαμορφωμένα αλουμινόχαρτα. Αφού ζυγίζονταν τα φίλτρα διήθησης μαζί με την βάση τους από αλουμινόχαρτο, σε ζυγαριά ακριβείας Kern & Sohn ABJ-NM (Εικόνα 5.5), τοποθετούνταν στην συσκευή και βρεχόντουσαν με απιονισμένο νερό έτσι ώστε να εφαρμόζουν σωστά στην βάση της συσκευής. Στη συνέχεια 100 ml δείγματος διαχέονταν στην επιφάνεια του φίλτρου με σκοπό την κατακράτηση των αιωρούμενων στερεών στο φίλτρο, αφού το φίλτρο απαλασσόταν από υγρασία, τελείωνε η διαδικασία διήθησης και εισάγονταν σε φούρνο ξηρής κλίνης (Memmert 'UL50' Lab Oven) για 60 λεπτά στους 103-105°C .



Εικόνα 5.5 Ζυγαριά ακριβείας Kern & Sohn ABJ-NM Αποξηραμένα φίλτρα εισόδου (1), εξόδου (2) και συμπυκνώματος (3).

Τέλος, τοποθετούνταν σε αφυγραντήρα για 30 λεπτά ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία τους και ζυγίζονταν ξανά. Η διαφορά του βάρους από το κάθε φίλτρο ανά 100ml δείγματος ήταν και το τελικό αποτέλεσμα της τιμής των TSS, εκφρασμένο σε mg/L TS. Η συγκεκριμένη διαδικασία γινόταν εννέα φορές, τρεις για το δείγμα της εξόδου της πρωτοβάθμιας, τρεις για το δείγμα της εξόδου από τον υδροκυκλώνα και τρεις για το συμπύκνωμα του υδροκυκλώνα.

5.3.2 BOD₅

Για τον προσδιορισμό του BOD₅ χρησιμοποιήθηκε η μανομετρική μέθοδος που βασίζεται στη διαφορρά της πίεσης που σε δημιουργείται σε καλά κλεισμένη φιάλη που περιέχει το δείγμα (Παντίδου & Αντέλλη, 2019). Ανάλογα με την αναμενόμενη τιμή του BOD₅, απαιτούνται και συγκεκριμένοι όγκοι δείγματος, το αποτέλεσμα της μέτρησης πολλαπλασιάζεται με τον κατάλληλο συντελεστή όπως φαίνεται στον πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.3 Όγκος δείγματος και συντελεστής για τον υπολογισμό του BOD₅ ανάλογα την κλίμακα μέτρησης (Παντίδου & Αντέλλη, 2019)

Όγκος δείγματος (mL)	Κλίμακα μέτρησης (mgO ₂ /L)	Συντελεστής
432	0-40	1
365	0-80	2
250	0-200	5
164	0-400	10
97	0-800	20
43,5	0-2.000	50
22,7	0-4.000	100

Για την διεξαγωγή της μέτρησης του BOD₅ χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα σκεύη, όργανα και αναλώσιμα:

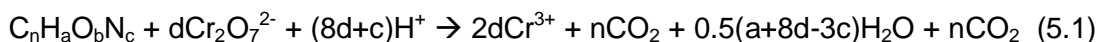
- Αντιδραστήριο NaOH
- Λαίμος από καουτσούκ για την σωστή τοποθέτηση του NaOH
- Μπουκάλια δειγματοληψίας BOD
- Συσκευές μέτρησης BOD (WTW OxiTop)
- Μαγνητική βάση ανάδευσης (WTW IS6 Stirrer)
- Μαγνήτες ανάδευσης από Teflon
- Ψυχώμενος επωαστικός κλίβανος (Pol-Eko ST2)



Εικόνα 5.6 Μπουκάλια δειγματοληψίας BOD με συσκευές μέτρησης WTW OxiTop και μαγνητική βάση ανάδευσης WTW IS6 Stirrer

5.3.3 COD

Ως COD ορίζεται η απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου για την χημική οξείδωση των οργανικών ουσιών δείγματος σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό από ισχυρό οξειδωτικό μέσο (συνήθως διχρωμικό κάλιο) σε όξινες συνθήκες. Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα περιγράφεται από την εξίσωση 4.1:



Όπου:

$$d = 2n/3 + a/6 - c/2 - b/3$$

Για τον προσδιορισμό του COD χρησιμοποιήθηκε η Standard Method (COD 5220) με αντιδραστήρα της εταιρίας Hach. Η μέθοδος αυτή περιλάμβανε αντιδραστήρια, χρήση θερμοαντιδραστήρα όπου τοποθετούνταν τα φιαλίδια και τελική μέτρηση σε φωτόμετρο.



Εικόνα 5.7 Θερμοαντιδραστήρας Hach LT 200

Στα δείγματα πραγματοποιούνταν αραιώση 1:8, δηλαδή στο φιαλίδιο με το αντιδραστήριο (με εύρος μέτρησης 15-150mg/l, ονομασία Hach Lck 314) έγινε προσθήκη 0,25ml δείγματος και 1,75ml απιονισμένου νερού και στη συνέχεια τοποθετούνταν στο φούρνο αντιδραστήρα για 120 λεπτά. Η τελική συγκέντρωση προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ένδειξης του φασματοφωτόμετρου με το 8.



Εικόνα 5.8 Φωτόμετρο Hach DR 1900

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα και συζήτηση

6.1 Αποτελέσματα

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πάρθηκαν από την ΕΛΛ Χανίων. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα ποσοστά απομάκρυνσης των χαρακτηριστικών που εξετάζονται καθώς και η τυπική απόκλιση τους (Σ), η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 6.1.

$$\Sigma = \sqrt{\frac{(X-M)^2}{N}} \quad 6.1$$

Όπου:

N: Ο αριθμός των δειγμάτων (20),

X: Η τιμή του δείγματος,

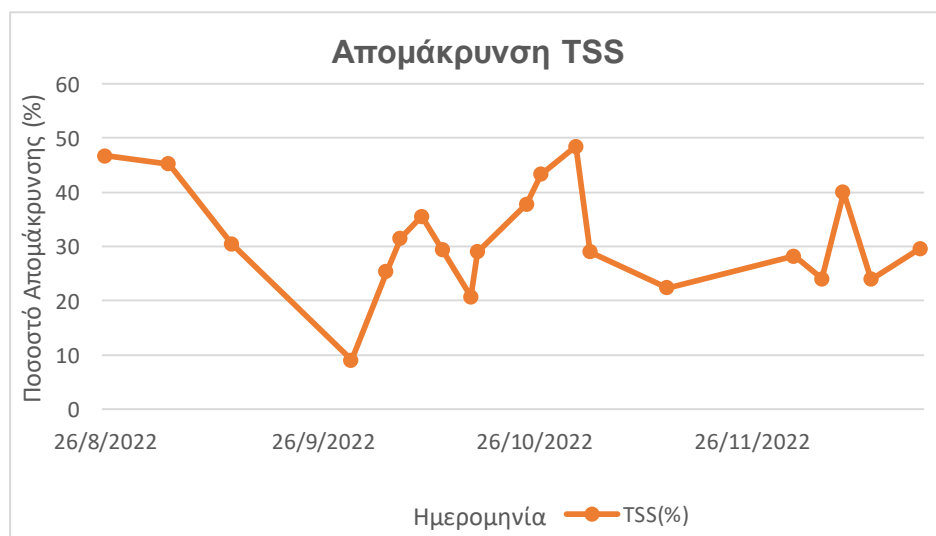
M: Ο μέσος όρος των δειγμάτων

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη χρήση υδροκυκλώνα ως προς την απομάκρυνση των TSS στην είσοδο, στην έξοδο του υδροκυκλώνα καθώς και του συμπυκνώματος.

Πίνακας: 6.1 Απομακρύνσεις ως προς τα TSS

Ημερομηνία	TSS (mg/L) (Είσοδος)	TSS (mg/L) (Είσοδος)	Απομάκρυνση TSS (%)	TSS (mg/L) (Συμπύκνωμα)
26/8/2022	469,16	249,8	46,75	2804,2
4/9/2022	268,6	147	45,21	1549,4
13/9/2022	348,3	242,03	30,52	1477,7
30/9/2022	125,06	113,7	9,08	247,3
5/10/2022	381,93	284,96	25,38	1412,2
7/10/2022	140,06	95,83	31,58	614,4
10/10/2022	148,06	95,4	35,56	712,2
13/10/2022	117,43	82,96	29,34	491,8
17/10/2022	139,46	110,56	20,72	449,9
18/10/2022	126,13	89,53	29,01	509,4
25/10/2022	185,10	115,16	37,78	903,3
27/10/2022	139,16	78,9	43,30	743,4
1/11/2022	153,73	79,23	48,46	926,6
3/11/2022	165,50	117,46	29,02	639,1
14/11/2022	187,00	145,13	22,38	626,5
2/12/2022	155,26	111,4	28,25	620,4
6/12/2022	122,60	93,06	24,08	434,9
9/12/2022	152,40	99,06	39,99	726,2
13/12/2022	137,53	104,6	23,94	461,2
20/12/2022	104,93	73,8	29,66	431,3
Μέσος Όρος	188,37	126,48	31,25	839,1
Τυπική Απόκλιση	26,14	13,85	2,12	100

Στο διάγραμμα 6.1 παρουσιάζονται τα ποσοστά απομάκρυνσης των TSS κατά την επεξεργασία τους με τον υδροκυκλώνα.



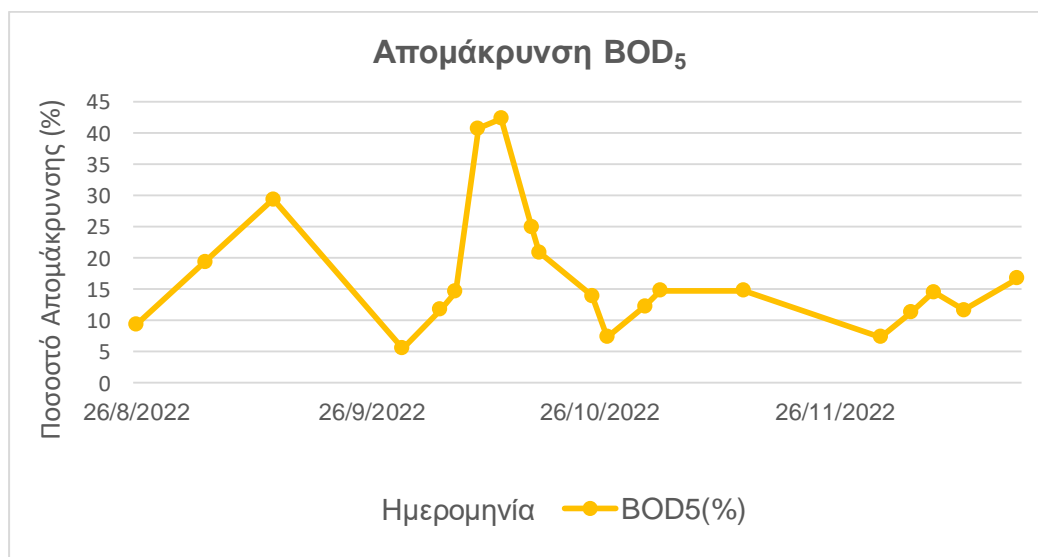
Διάγραμμα 6.1 Απομάκρυνση % TSS

Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη χρήση υδροκυκλώνα ως προς την απομάκρυνση του BOD₅ στην είσοδο και στην έξοδο του υδροκυκλώνα.

Πίνακας 6.2 Απομακρύνσεις ως προς BOD₅

Ημερομηνία	BOD ₅ (mg/L) (Είσοδος)	BOD ₅ (mg/L) (Έξοδος)	Απομάκρυνση(%)BOD ₅
26/8/2022	317,5	287,5	9,44
4/9/2022	490	395	19,38
13/9/2022	425	300	29,41
30/9/2022	225	212,5	5,55
5/10/2022	425	375	11,76
7/10/2022	205	175	14,63
10/10/2022	435	257,5	40,80
13/10/2022	425	245	42,35
17/10/2022	370	277,5	25,00
18/10/2022	215	170	20,93
25/10/2022	250	215	14,00
27/10/2022	260	215	17,30
1/11/2022	305	267,5	12,29
3/11/2022	220	187,5	14,77
14/11/2022	250	213	14,80
2/12/2022	285	264	7,36
6/12/2022	186	165	11,29
9/12/2022	220	188	14,54
13/12/2022	300	265	11,66
20/12/2022	185	154	16,75
Μέσος Όρος	299,67	241.45	17,70
Τυπική Απόκλιση	20,86	14.32	2,15

Στο διάγραμμα 6.2 παρουσιάζονται τα ποσοστά απομάκρυνσης του BOD₅ κατά την επεξεργασία τους με τον υδροκυκλώνα.



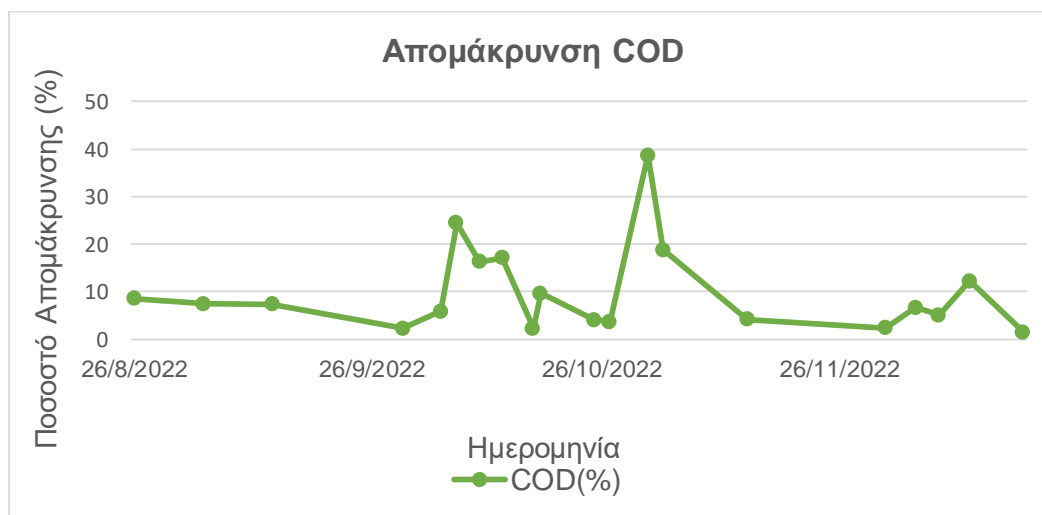
Διάγραμμα 6.2 Απομάκρυνση BOD₅

Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τη χρήση υδροκυκλώνα ως προς την απομάκρυνση του COD είσοδο και στην έξοδο του υδροκυκλώνα.

Πίνακας 6.3 Απομακρύνσεις ως προς COD

Ημερομηνία	COD (mg/L) (Είσοδος)	COD (mg/L) (Έξοδος)	Απομάκρυνση(%)COD
26/8/2022	395	361	8,60
4/9/2022	350	324	7,42
13/9/2022	366	339	7,37
30/9/2022	600	586	2,33
5/10/2022	683	643	5,85
7/10/2022	702	530	24,50
10/10/2022	595	498	16,30
13/10/2022	620	514	17,09
17/10/2022	591	577	2,36
18/10/2022	720	650	9,72
25/10/2022	538	516	4,08
27/10/2022	481	463	3,74
1/11/2022	753	462	38,64
3/11/2022	964	782	18,87
14/11/2022	450	431	4,22
2/12/2022	330	322	2,42
6/12/2022	270	252	6,66
9/12/2022	315	299	5,07
13/12/2022	366	321	12,29
20/12/2022	505	497	1,58
Μέσος Όρος	529,7	468,35	9,96
Τυπική Απόκλιση	39,23	30,27	2,01

Στο διάγραμμα 6.3 παρουσιάζονται τα ποσοστά απομάκρυνσης του COD κατά την επεξεργασία τους με τον υδροκυκλώνα.



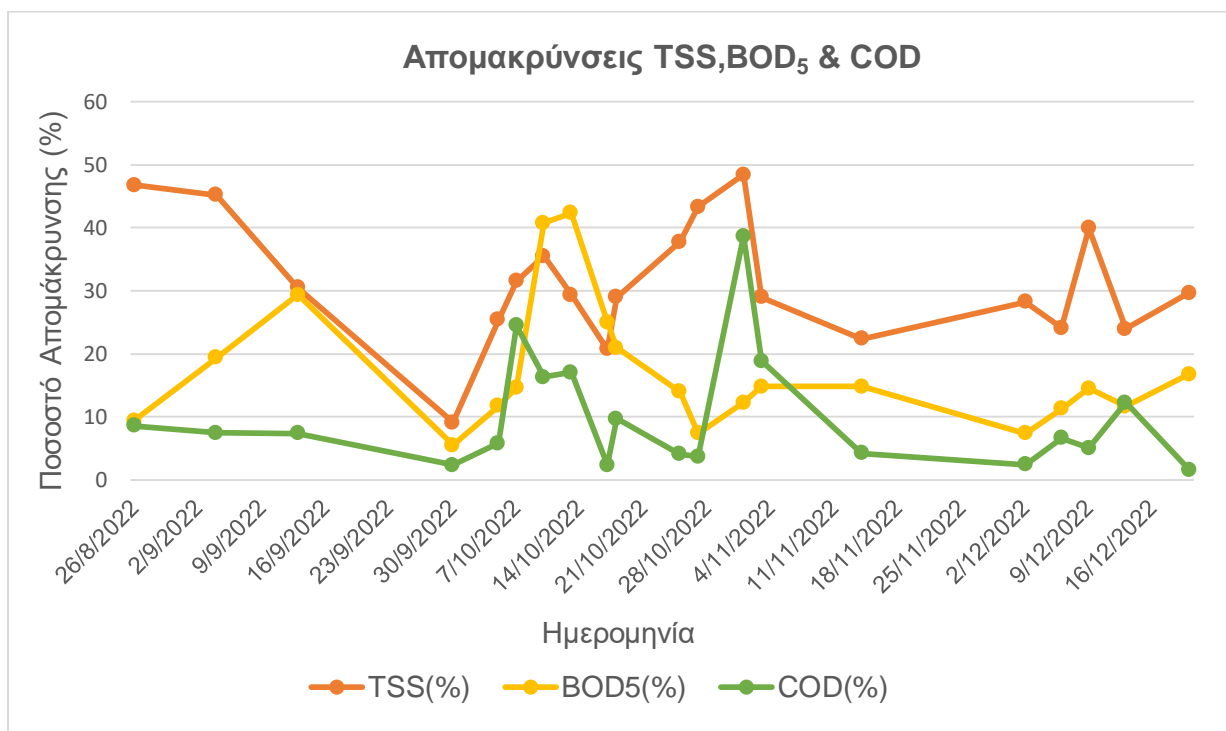
Διάγραμμα 6.3 Απομάκρυνση COD

Στο πίνακα 6.4 βρίσκονται συγκεντρωτικά οι μέσες τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την απόδοση του υδροκυκλώνα.

Πίνακας 6.4 Απομακρύνσεις TSS, BOD₅, COD

Παράμετρος	TSS	BOD ₅	COD
Πριν την επεξεργασία(mg/L)	188,37	299,67	529,7
Μετά την επεξεργασία(mg/L)	126,48	241,45	468,35
Απομάκρυνση(%)	31,25	17,70	9,96

Όπως παρατηρούμε η μεγαλύτερη απομάκρυνση επιτεύχθηκε κατά την απομάκρυνση των TSS, τα οποία από 188,37 mg/L μειώθηκαν στα 126,48 mg/L με μέση απομάκρυνση 31,25%. Η απομάκρυνση του BOD₅ μετρήθηκε στο 17,70% και του COD 9,96%. Στο διάγραμμα 6.10 παρουσιάζεται μια συγκριτική εικόνα για τις απομακρύνσεις της κάθε παραμέτρου.



Διάγραμμα 6.4 Απομακρύνσεις TSS, BOD₅ και COD.

Ισοζύγιο μάζας

Τα ισοζύγια μάζας αποτελούν τη λογιστική απεικόνιση μιας διεργασίας ή μιας ενότητας διεργασιών (Himmelblau & Riggs, 2012). Ο στόχος τους είναι ο έλεγχος και η εκτίμηση της απόδοσης ενός συστήματος, είτε με θεωρητικά δεδομένα είτε χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις (Γκαϊντατζής, 2012). Ο βασικός νόμος που χρησιμοποιείται είναι ο νόμος διατήρησης

της μάζας κατά τον οποίο η μάζα ενός κλειστού συστήματος παραμένει σταθερή. Στην δικιά μας περίπτωση το κλειστό σύστημα είναι ο υδροκυκλώνας. Το ισοζύγιο μάζας διαμορφώνεται ως εξής:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (6.2)$$

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 + C_3 \cdot V_3 \quad (6.3)$$

$$Q = V/t \quad (6.4)$$

Αντικαθιστώντας την (6.4) στην (6.3) έχουμε:

$$C_1 \cdot Q_1 \cdot t = C_2 \cdot Q_2 \cdot t + C_3 \cdot Q_3 \cdot t \rightarrow$$

$$C_1 \cdot Q_1 = C_2 \cdot Q_2 + C_3 \cdot Q_3 \quad (6.5)$$

Όπου:

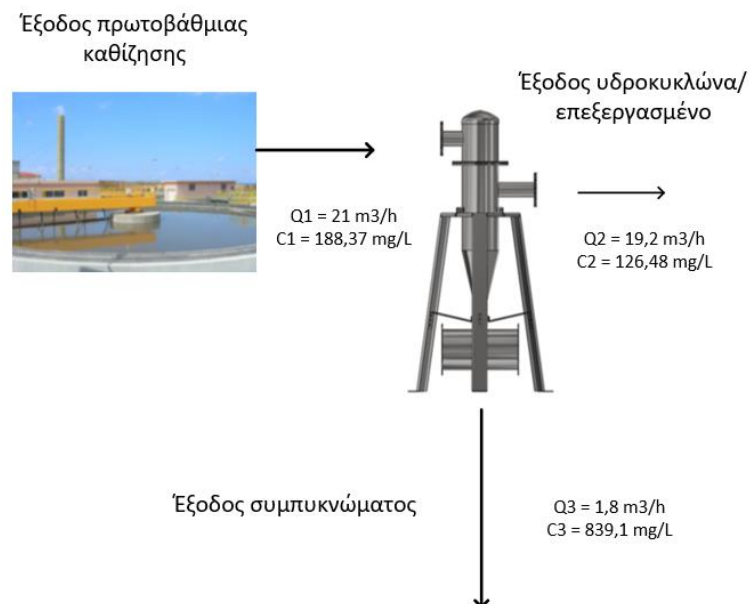
C_1 και Q_1 : Συγκέντρωση (mg/L) και παροχή εισόδου προς επεξεργασία (m^3/h)

C_2 και Q_2 : Συγκέντρωση (mg/L) και παροχή εξόδου μετά την επεξεργασία (m^3/h)

C_3 και Q_3 : Συγκέντρωση (mg/L) και παροχή συμπυκνώματος (m^3/h).

Λύνοντας την 6.5 ως προς την παροχή του συμπυκνώματος έχουμε:

$$Q_3 = 1,8 \, m^3/h$$



Εικόνα 6.1 Ισοζύγιο μάζας υδροκυκλώνα

6.2 Συζήτηση των αποτελεσμάτων

6.2.1 TSS

Η μέση τιμή της συγκέντρωσης των TSS που μετρήθηκε στην είσοδο και η τυπική της απόκλιση υπολογίσθηκαν στα $188,37 \pm 26,14$ mg/L ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση στην έξοδο του υδροκυκλώνα υπολογίσθηκε $126,48 \pm 13,85$ mg/L. Η απομάκρυνση που επιτυγχάνει ο υδροκυκλώνας κατά μέσο όρο για τα TSS υπολογίσθηκε με την τυπική του απόκλιση σε $31,25 \pm 2,12$ %. Το συγκεκριμένο ποσοστό θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό καθώς τα TSS είναι από τις κρίσιμότερες παραμέτρους στον καθαρισμό υγρών αστικών αποβλήτων καθώς εκτός από την αισθητική και περιβαλλοντική βελτίωση που επιτυγχάνεται με την συγκεκριμένη απόδοση, μειώνεται σημαντικά ο κίνδυνος απόφραξης των σωληνώσεων, οδηγώντας δυνητικά σε εξοικονόμηση κόστους και λειτουργικής αποτελεσματικότητας στις υπόλοιπες διαδικασίες επεξεργασίας των λυμάτων, συμπεριλαμβανόμενης της μείωσης σε απαίτηση αέρα στη δεξαμενή αερισμού. Παρόλα αυτά, βλέπουμε αρκετά μεγάλες διαφοροποιήσεις στις συγκεντρώσεις εισόδου καθώς και στις απομακρύνσεις που επιτυγχάνει ο υδροκυκλώνας, ενδεικτικά η μεγαλύτερη απομάκρυνση υπολογίσθηκε 48,46% και η μικρότερη 9,08% γεγονός που οφείλεται στις διαφοροποιήσεις του εισερχόμενου αποβλήτου στην σύσταση του καθώς και στα σφάλματα επιλογής και επεξεργασίας του δείγματος.

6.2.2 BOD₅

Η μέση τιμή της συγκέντρωσης των BOD₅ που μετρήθηκε στην είσοδο και η τυπική της απόκλιση υπολογίσθηκαν $299,67 \pm 20,86$ mg/L, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση στην έξοδο του υδροκυκλώνα υπολογίσθηκε $241,45 \pm 14,32$ mg/L. Η απομάκρυνση που επιτυγχάνει ο υδροκυκλώνας κατά μέσο όρο για τα BOD₅ υπολογίσθηκε με την τυπική του απόκλιση σε $17,7 \pm 2,15$ %. Μεγάλες διακυμάνσεις παρουσιάστηκαν και εδώ με την μέγιστη απομάκρυνση σε 42,35% και την ελάχιστη σε 5,55%, αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση της μέγιστης απομάκρυνσης, η είσοδος είχε από τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις εκ των μετρήσεων ενώ αντίστοιχα η ελάχιστη απομάκρυνση επιτεύχθηκε όταν και η συγκέντρωση της εισόδου ήταν από τις μικρότερες. Παρόλα αυτά, το ποσοστό απομάκρυνσης BOD₅ του υδροκυκλώνα βρέθηκε παραπλήσιο με αυτό που επιτυγχάνει μια πρωτοβάθμια καθίζηση και παρόμοιο με την μικροκοσκίνιση, γεγονός ιδιαίτερα ενθαρρυντικό για την αποτελεσματικότητα του υδροκυκλώνα στην αφαίρεση οργανικού υλικού από τα υγρά απόβλητα.

6.2.3 COD

Η μέση τιμή της συγκέντρωσης του COD που μετρήθηκε στην είσοδο και η τυπική της απόκλιση υπολογίσθηκαν $529,7 \pm 39,2$ mg/L, ενώ η αντίστοιχη συγκέντρωση στην έξοδο του υδροκυκλώνα υπολογίσθηκε $468,35 \pm 30,27$ mg/L. Η απομάκρυνση που επιτυγχάνει ο υδροκυκλώνας κατά μέσο όρο για το COD υπολογίσθηκε με την τυπική του απόκλιση σε $9,96 \pm 2,01$ %, με μέγιστη απομάκρυνση 38,64% και ελάχιστη απομάκρυνση 1,58%. Το συγκεκριμένο ποσοστό κρίνεται χαμηλό, τόσο σε σχέση με άλλες πρακτικές απομάκρυνσης COD, τόσο και με την εκτίμηση που υπήρχε σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Πιθανή αιτία είναι η αδυναμία του υδροκυκλώνα να συγκρατήσει τα σωματίδια που συνεισφέρουν στο COD αλλά και πιθανά σφάλματα στις μετρήσεις και την διεξαγωγή των αναλύσεων.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

7.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορούσε στη διερεύνηση της χρήσης υδροκυκλώνα για την επεξεργασία πρωτοβάθμιων υγρών αποβλήτων στην ΕΕΛ των Χανίων. Οι μέσες απομακρύνσεις των TSS, BOD₅ και COD υπολογίστηκαν μαζί με το τυπικό σφάλμα τους σε $31,25 \pm 2,12\%$, $17,7 \pm 2,15\%$ και $9,96 \pm 2,01\%$ αντίστοιχα. Όσον αφορά τη συγκέντρωση του συμπυκνώματος σε TSS, βρέθηκε στα $736,22 \pm 100$ mg/L.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής υπογραμμίζουν τη δυνατότητα του υδροκυκλώνα ως πρωτοβάθμιο σύστημα για την επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Τα σημαντικά ποσοστά απομάκρυνσης του TSS και οι αξιοσημείωτες μειώσεις στα επίπεδα BOD₅ και COD σε συνδυασμό με την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια και τη μη χρήση επιπρόσθετων χημικών, σηματοδοτούν την αποτελεσματικότητά του στην επεξεργασία των λυμάτων, ιδιαίτερα για εφαρμογές όπου η απόδοση του χώρου είναι βασικό ζητούμενο.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή τη μελέτη καταδεικνύουν ότι ο υδροκυκλώνας είναι μια πολλά υποσχόμενη και αποτελεσματική επιλογή για την επεξεργασία των λυμάτων η οποία να εφαρμοστεί ως πρωτοβάθμιο σύστημα επεξεργασίας λυμάτων για την αναβάθμιση νέων ή υφιστάμενων ΕΕΛ. Αυτά τα ευρήματα έχουν τη δυνατότητα να συμβάλουν σημαντικά στις συνεχιζόμενες προσπάθειες για τη βελτίωση της ποιότητας του νερού και την προστασία του περιβάλλοντος, ανοίγοντας τον δρόμο για πιο βιώσιμες και αποτελεσματικές πρακτικές επεξεργασίας λυμάτων.

7.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη σε αυτόν τον τομέα μπορεί να επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας του υδροκυκλώνα για να βελτιώσει περαιτέρω την αποτελεσματικότητά του. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα είναι οι ακόλουθες:

- Τοποθέτηση του υδροκυκλώνα σε διαφορετικά στάδια επεξεργασίας των λυμάτων.
- Λειτουργία του υδροκυκλώνα υπό διαφορετικές παροχές.
- Μελέτη περισσότερων στοιχείων που πιθανώς να επηρεάζουν την απόδοση του υδροκυκλώνα όπως το μέγεθος και η κατανομή των σωματιδίων.
- Μαθηματική μοντελοποίηση του υδροκυκλώνα.
- Μελέτη απόδοσης πολλαπλών υδροκυκλώνων σε σειρά.
- Διεξαγωγή πειραματικών αναλύσεων σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.
- Μελέτη της απόδοσης του υδροκυκλώνα με την προσθήκη κροκιδωτικών.

Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία

- Abdulla, F., & Farahat, S. (2020). Impact of Climate Change on the Performance of Wastewater Treatment Plant: Case study Central Irbid WWTP (Jordan). *Procedia Manufacturing*, 44, 205–212.
- ABDULLAH, R. A., ALI, H., & MOHAMMED, M. (2020). Characteristics of Erbil wastewater.
- A.C. Hoffmann, M. de Groot, W. Peng, H.W.A. Dries, J. Kater, Advantages and risks in increasing cyclone separator length, *AIChE J.* 47 (11) (2001) 2452–2460.
- Agustina, E. B., & Yuniarto, A. H. P. (n.d.). Study of BOD, COD and TSS Removal in Batik Industry Wastewater using Electrocoagulation Method. *JKPK (Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia)*, 2022, 7(2), 150–158.
- AHMED, M. M., IBRAHIM, G. A., FARGHALY, M. G., 2009. *Performance of a three-product hydrocyclone*. *International Journal of Mineral Processing* 91, 34-40.
- Alisawi, H. A. O. (2020). Performance of wastewater treatment during variable temperature. *Applied Water Science*, 10(4), 1–6.
- Alturkmani, A. (2013). 1.1 Industrial Wastewater Characteristics.
- Amoatey, P., & Bani, R. (2011). Wastewater management.
- Andreoli, Cleverston Vitorio, Marcos Von Sperling, and Fernando Fernandes. *Sludge treatment and disposal*. IWA publishing, 2007.
- Arterburn, R. A. (1982). The sizing and selection of hydrocyclones. *Design and Installation of Comminution Circuits*, 1, 597–607.
- Asano, T., Burton, F. L., Leverenz, H. L., Tsuchinhashi, R., Tchobanoglous, G., 2007. *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*, McGraw-Hill: New York, NY, USA.
- Behera, C., Santoro, D., Gernaey, K., & Sin, G. (2018). Organic carbon recovery modeling for a rotating belt filter and its impact assessment on a plant-wide scale. *Chemical Engineering Journal*, 334, 1965–1976.
- Bourgeois, K., Riess, J., Tchobanoglous, G., & Darby, J. (2003). Performance Evaluation of a Cloth-Media Disk Filter for Wastewater Reclamation. *Water Environment Research*, 75(6), 532–538.
- Bradley, D. (1965). *The Hydrocyclone* (Volume 4; P. V. Danckwerts, Ed.). New York: Pergamon Press.
- Bruce, A. M., Campbell, H. W., & Balmer, P. (1984). Developments and trends in sludge processing techniques. *Processing and Use of Sewage Sludge*, 19–38.
- California State Board of Health, 1918. Regulations governing use of sewage for irrigation purposes. California State Board of Health, Sacramento, California, USA.
- Carles, P., Petter, O., & Pille, K. (2015). *www.powerstep.eu*. Westewitz, Sjölanda: Horizon 2020 Framework Programme.
- Castilho, L.R., Medronho, R.A., 2000. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema hydrocyclones. *Minerals Engineering* 13, 183-191
- Cilliers, J. J., and S. T. L. Harrison. "Yeast flocculation aids the performance of yeast dewatering using mini-hydrocyclones." *Separation and Purification Technology* 209 (2019): 159-163.
- Cilliers, J. J. "Hydrocyclones for particle size separation." *particle size separation* (2000): 1819-1825.

- Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Benigna, I., Sorlini, S., & Torretta, V. (2017). Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants. *Sustainability*, 10(1), 86.
- Collivignarelli, M. C., Canato, M., Abba, A., & Miino, M. C. (2019). Biosolids: what are the different types of reuse, *Journal of Cleaner Production*, 238, 117844.
- Conidi, C., Castro-Muñoz, R., & Cassano, A. (2020). Membrane-Based Operations in the Fruit Juice Processing Industry: A Review. *Beverages*, 6(1), 18.
- Coulson, J. M. "Coulson & Richardson's Chemical Engineering Design 4th Edition Volume VI." (2005).
- Covey, G. (2009). Separation performance of centrifugal cleaners. *Appita: Technology, Innovation, Manufacturing, Environment*, 62(1), 31–36.
- Crini, G., & Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 145–155.
- D. Levine, G. Tchobanoglous and T. Asano, "Characterization of the size distribution of contaminants in wastewater: treatment and reuse implications", *Journal (Water Pollution Control Federation)*, Vol.57, No.7, pp. 805-816, July 1985
- Durango-Cogollo, M., Garcia-Bravo, J., Newell, B., Gonzalez-Mancera, A., 2020. CFD modeling of hydrocyclones-A study of efficiency of hydrodynamic reservoirs. *Fluids* 5.
<https://doi.org/10.3390/fluids5030118>
- E. Dulekgurgen, S. Dogruel, O. Karahan and D. Orhon, "Size distribution of wastewater COD fractions as an index for biodegradability", *Water Research*, Vol.40, No. 2, pp. 273–282, January 2006
- Endres, E., J. Dueck, and Th Neesse. "Hydrocyclone classification of particles in the micron range." *Minerals Engineering* 31 (2012): 42-45.
- Emami, S., Tabil, L. G., Tyler, R. T., & Crerar, W. J. (2005). Effect of Feed Concentration and Pressure Drop in Starch-Protein Separation Using a Hydrocyclone. In 2005 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Farghaly, M. G., Attia, H., Saleh, H. A., Ramadan, A. M., & Khalek, A. (2021). A combined hydrocyclone-electrocoagulation treatment for different types of industrial wastewater. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57.
- Fazal, S., Zhang, B., Zhong, Z., Gao, L., & Chen, X. (2015). Industrial wastewater treatment by using MBR (membrane bioreactor) review study. *Journal of Environmental Protection*, 6(06), 584.
- Förstner, U., & Wittmann, G. T. W. (2012). Metal pollution in the aquatic environment. Springer Science & Business Media.
- Franchi, A., & Santoro, D. (2015). Current status of the rotating belt filtration (RBF) technology for municipal wastewater treatment. *Water Practice and Technology*, 10(2), 319-32.
- Freeman, H. (1989). *Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal*. (1 ed.). New York: McGraw-Hill Book Co.
- Fytili, D., & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 116–140.
- F. Zuhria, Sarto, and I. Prasetyo, "The Influence of Electrocoagulation on the Reduction of COD, BOD, and TSS of Batik Industry Wastewater", *J. Environment and Sustainability*, vol.2(2), pp.100-107, 2018.

GAWALI, S. S., BHAMBERE, M., 2015. *Effect of Design and the Operating Parameters on the Performance of Cyclone Separator-A Review*. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* 4, 244.

GHD., (2003) Assessment of Hydrocyclones for Fat Removal from Meat Processing Wastewater Streams

Gikas, P. (2017). Towards energy positive wastewater treatment plants. *Journal of Environmental Management*, 203, 621–629.

Gikas, P. (2017b). Ultra high temperature gasification of municipal wastewater primary biosolids in a rotary kiln reactor for the production of synthesis gas. *Journal of environmental management*, 203, 688-694.

Gikas, P., & Tsoutsos, T. (2015). Near zero energy wastewater treatment plants for the Greek islands. *Desalination and Water Treatment*, 53(12), 3328-3334.

Gikas, P., Ventafrintas, E., & Farazaki, M. (2015). Potential for Gasification and Electric Energy Production from Biosolids [PowerPoint presentation]. Chania: School of Environmental Engineering, Technical University of Crete.

Gokhale, M.; Mantri, R. *Developing Solid Oral Dosage Forms*; Elsevier, 2017; pp 85– 112

Gupta, A., Yan, D.S., 2006. Chapter 12 - Classification, Mineral Processing Design and Operation. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 354-400.

Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Wang, X., ... Li, F. (2017). Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges. *Energy Procedia*, 105, 3741–3751.

Guyer, J. P., & PE, R. A. (2011). *An Introduction to Advanced Wastewater Treatment*. Eng. Edge, LLC PDH Prof. Train, 1–6.

Hao, X., Chen, Q., van Loosdrecht, M., & Li, J. (2020). Sustainable disposal of excess sludge: Incineration without anaerobic digestion. *Water research*, 170, 115298.

Henze, M., van Loosdrecht, M. C. M., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological wastewater treatment*. IWA publishing.

Henze, M. et al., 2013. *Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes*, Springer Berlin Heidelberg.

Himmelblau, D., & Riggs, J. (2012). *Basic principles and calculations in chemical engineering*. (1 ed.). New Jersey: FT press.

Huang, Yuan, et al. "High-speed particle rotation for coating oil removal by hydrocyclone." *Separation and Purification Technology* 177 (2017): 263-271.

Hughes, J., Cowper-Heays, K., Olesson, E., Bell, R., & Stroombergen, A. (2021). Impacts and implications of climate change on wastewater systems: A New Zealand perspective. *Climate Risk Management*, 31, 100262.

Jiang, L., Liu, P., Yang, X., Zhang, Y., Wang, H., & Xu, C. (2019). Numerical analysis of flow field and separation characteristics in hydrocyclones with adjustable apex. *Powder Technology*, 356, 941–956.

J. N. Hakizimana, B. Gourich, M. Chafi, Y. Stiriba, C. Vial, P. Drogui, and J. Naja, "Electrocoagulation Process in Water Treatment: A Review of Electrocoagulation Modeling Approaches", *Desalination*, vol. 404, pp. 1–21, 2017.

- Jonasson, M., & Ulf Jeppsson, I. (2007). Energy Benchmark for wastewater treatment processes. Sweden: Lund University.
- Ju, B., Qiu, X., Dai, S., Fan, T., Wu, H., & Wang, X. (2008). A study to prevent bottom water from coning in heavy-oil reservoirs: Design and simulation approaches. *Journal of Energy Resources Technology*, 130(3).
- K. Govindan, A. Angelin, M. Kalpana, M. Rangarajan, P. Shankar, and A. Jang, "Electrocoagulants Characteristics and Application of Electrocoagulation for Micropollutant Removal and Transformation Mechanism", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 12, pp. 1775–1788, 2020.
- Kim, Y., Choi, D., Cui, M., Lee, J., Kim, B., Park, K., ... & Lee, B. (2015). Dissolved air flotation separation for pretreatment of membrane bioreactor in domestic wastewater treatment. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 64(2), 186-193.
- Koliopoulos, G., & Gikas, P. (2013). Fine Mesh Sieving of Raw Municipal Wastewater for TSS and COD removal. Στο *13th International Conference on Environmental Science and Technology* (σσ. 5-7). Athens: G. Koliopoulos and P. Gikas, 2013, Fine Mesh Sieving of Raw Municipal Wastewater for TSS and COD removal, 13th International Conference on Environmental Science and Technology, 5-7 September, Athens, Greece.
- Koros, W., Ma, Y., & Shimidzu, T. (1996). Terminology for membranes and membrane processes (IUPAC Recommendations 1996). *Pure and Applied Chemistry*, 68(7), 1479-1489.
- Lema, J., & Martinez, S. (2017). *Innovative wastewater treatment & resource recovery technologies: impacts on energy, economy and environment* (1 ed.). London: IWA publishing.
- Liu, B., Wei, Q., Zhang, B., & Bi, J. (2013). Life cycle GHG emissions of sewage sludge treatment and disposal options in Tai Lake Watershed, China. *Science of the Total Environment*, 447, 361–369.
- Lv, W.; Chen, J.; Chang, Y.; Liu, H.; Wang, H. UU-Type Parallel Mini-Hydrocyclone Group Separation of Fine Particles from Methanol-to-Olefin Industrial Wastewater. *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* 2018, 131, 34–42.
- Machado, A. (1992). The role of hydrocyclones in mineral processing. *Filtration & Separation*, 29(6), 479.
- Malovanyy, M., Moroz, O., Hnatysh, S., Maslovska, O., Zhuk, V., Petrushka, I., Sereda, A. (2019). Perspective technologies of the treatment of the wastewaters with high content of organic pollutants and ammoniacal nitrogen. *Journal of Ecological Engineering*, 20(2).
- Martínez, J.D., Mahkamov, K., Andrade, R. V. and Lora, E.E.S., 2012. Syngas production in downdraft biomass gasifiers and its application using internal combustion engines. *Renew. Energy*, 38, 1-9.
- Means, E., 2004. Water and Wastewater Industry Energy Efficiency: A Research Roadmap. Awwa Research Foundation, NY, USA.
- Metcalf, E. E., & Eddy, H. (2003). Wastewater engineer treatment disposal, reuse. New York: McGraw, 191.
- Metcalf, G., Pillay, L., Murutu, C., Chiburi, S., Gumede, N., & Gaydon, P. (2014). Wastewater reclamation for potable reuse Volume 2: Integration of MBR technology with advanced treatment processes. *Water Research Commission, Pretoria. WRC Report No. TT, 611*, 14.

- Metcalf, L., Eddy, H. P., & Tchobanoglous, G. (1991). Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse (Vol. 4). McGraw-Hill New York.
- Metcalf and Eddy, Inc, et al. *Water reuse*. United States of America: McGraw-Hill Professional Publishing, 2007.
- Monroeeenvironmental. (2020). Monroeeenvironmental. Retrieved 5 18, 2020, from <http://www.monroeeenvironmental.com/water-and-wastewater-treatment/circularclarifiers-and-thickeners/primary-clarifier>
- Muro, C., Riera, F., & del Carmen Díaz, M. (2012). Membrane separation process in wastewater treatment of food industry.
- Ogunsina, O. O., & Wiggins, M. L. (2005). A review of downhole separation technology. In SPE Production Operations Symposium. OnePetro.
- Okamoto, Rianne, and Jaclyn B. O'Hara. "Analysis of Particle Size and Metal Content of a Decentralized Wastewater Treatment System." (2016).
- Oladejo, J., Shi, K., Luo, X., Yang, G., & Wu, T. (2019). A review of sludge-to-energy recovery methods. *Energies*, 12(1), 60.
- Palaniandy, Samayamutthirian, Mohsen Yahyaei, and Malcolm Powell. "Assessment of hydrocyclone operation in gravity induced stirred mill circuits." *Minerals Engineering* 108 (2017): 83-92.
- Paranychanakis, N. V., Salgot, M., Angelakis, A. N., 2011. Irrigation with recycled water: Guidelines and regulations. In Treated Wastewater in Agriculture: Use and Impacts on the Soil Environments and Crops;
- Partin, A. K. (2019). Hydrocyclone implementation at two wastewater treatment facilities to promote overall settling improvement. Virginia Tech.
- Peirce, J. J., Vesilind, P. A., & Weiner, R. (1998). Environmental pollution and control. Butterworth-Heinemann.
- Plitt, L.R., 1976. A mathematical model of the hydrocyclone classifier. CIM Bulletin 69, 114–123.
- Ravanchi M.T., Kaghazchi T., Kargari A., Application of membrane separation processes in petrochemical industry: a review, *Desalination* 235 (1–3), 2009, p. 199-244
- Riffat R., *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering*, CRC Press, Taylor and Francis Group, Florida, 2013
- Roche, C., Donnaz, S., Murthy, S., & Wett, B. (2022). Biological process architecture in continuous-flow activated sludge by gravimetry: Controlling densified biomass form and function in a hybrid granule–floc process at Dijon WRRF, France. *Water Environment Research*, 94(1), e1664.
- Rosenberg, M. (1995). Current and future applications for membrane processes in the dairy industry. *Trends in Food Science & Technology*, 6(1), 12-19.
- Ruiz, J., Juárez, M., Morales, M., Muñoz, P., & MENDÍVIL, M. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 174-183.
- Saengchan, K., Nopharatana, A., & Songkasiri, W. (2009). Enhancement of tapioca starch separation with a hydrocyclone: effects of apex diameter, feed concentration, and pressure drop on tapioca starch separation with a hydrocyclone. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(1), 195–202.

- Sabbagh, R., Lipsett, M. G., Koch, C. R., & Nobes, D. S. (2014). Theoretical and experimental study of hydrocyclone performance and equivalent settling area. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 46545, V007T09A044.
- Sansaniwal, S.K., Pal, K., Rosen, M.A. and Tyagi, S.K., 2017a. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 72, 363-384.
- Sansaniwal, S.K., Rosen, M.A. and Tyagi, S.K., 2017b. Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 80, 23-43.
- Shaw, C. (2000). Downhole separation as a strategic water and environmental management tool. In SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production. OnePetro.
- Shi, C.Y., 2011. Mass Flow and Energy Efficiency of Municipal Wastewater Treatment Plants, first ed. IWA Publishing, London, UK.
- Siatou, A., Manali, A., & Gikas, P. (2020). Energy consumption and internal distribution in activated sludge wastewater treatment plants of Greece. *Water*, 12(4), 1204.
- Silva, A.C., Silva, E.M.S., Matos, J.D.V., 2012. A modification in Plitt's for hydrocyclones simulation. *International Journal of Recent Research and Applied Studies* 13, 753-758
- Smith, R. G., & Schroeder, E. D. (1985). Field studies of the overland flow process for the treatment of raw and primary treated municipal wastewater. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 785–794.
- Souza, F. J., Vieira, L. G. M., Damasceno, J. J. R., & Barrozo, M. A. S. (2000). Analysis of the influence of the filtering medium on the behaviour of the filtering hydrocyclone. *Powder Technology*, 107(3), 259–267.
- Sovechles, J. M. (2018). *Exploring particle flow in a hydrocyclone classifier through positron emission particle tracking (PEPT)*. McGill University (Canada).
- Spellman, F. R., & Drinan, J. (2014). Wastewater stabilization ponds. CRC Press Boca Raton.
- Sun, Y., Liu, Y., Zhang, Y., Huang, Y., Wang, L., Dai, L., ... Wang, H. (2019). Hydrocyclone-induced pretreatment for sludge solubilization to enhance anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal*, 374, 1364–1372.
- Svarovsky, L., & Hydrocyclones, H. (1984). Rinehart and Winston LTD. London UK.
- Tchobanoglous, B. F., & Stensel, H. D. (2007). Μηχανική Υγρών Αποβλήτων: Επεξεργασία και Επαναχρησιμοποίηση, μεταφραστές: Κούγκολος Α. Σαμαράς Π., Τόμος Β', Metcalf and Eddy, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). Metcalf & Eddy wastewater engineering: treatment and reuse. International Edition. McGrawHill, 4, 361–411.
- Tchobanoglous, G., Leverenz, H., Gikas, P., 2009. Impacts of new concepts and technology on the energy sustainability of wastewater management. In: Proc. 3rd Conference on Climate Change, Sustainable Development and Renewable Energy Sources, 15e17 October 2009, Thessaloniki, Greece.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*, 133–164.

- Topare, N. S., Attar, S. J., & Manfe, M. M. (2011). Sewage/wastewater treatment technologies: a review. *Sci. Revs. Chem. Commun*, 1(1), 18–24.
- Turovskiy, I. S., & Mathai, P. K. (2006). Wastewater sludge processing. John Wiley & Sons.
- Vieira, L. G. M., Barbosa, E. A., Damasceno, J. J. R., & Barrozo, M. A. S. (2005). Performance analysis and design of filtering hydrocyclones. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 22, 143–152.
- VIEIRA, L. G., SILVA, D. O., BARROZO, M. A., 2016. Effect of Inlet Diameter on the Performance of a Filtering Hydrocyclone Separator. *Chemical Engineering & Technology* 39, 1406-1412.
- Von Sperling, M. (2007). Wastewater characteristics, treatment and disposal. IWA publishing.
- Wang, H., Yang, Y., Keller, A. A., Li, X., Feng, S., Dong, Y., & Li, F. (2016). Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa. *Applied Energy*, 184, 873–881.
- Wei, W., Jiu-yang, Y., Xiao-tao, Z., Xia, L., & Wei, L. (2017). A New Method for Predicting the Hydrocyclone Efficiency with the Light Dispersed Phase. *Energy Procedia*, 105, 4428–4435.
- Welling, C., Kennedy, A., Wett, B., Johnson, C., Rutherford, B., Baumler, R., & Bott, C. (2015). Improving settleability and enhancing biological phosphorus removal through the implementation of hydrocyclones. In WEFTEC 2015. Water Environment Federation.
- Woodard, F. (2001). Industrial waste treatment handbook. Elsevier.
- ZANKER, A. (1977) *Chem. Eng.*, NY 84 (May 9th) 122. Hydrocyclones: dimensions and performance.
- Zhang, L., Xu, C., Champagne, P. and Mabee, W., 2014. Overview of current biological and thermo-chemical treatment technologies for sustainable sludge management. *Waste Manage. Res.*, 32, 586-600.
- Zhang, L., Xu, C., & Champagne, P. (2010). Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Conversion and Management*, 51(5), 969-982.
- Zouboulis, A., & Tolkou, A. (2015). Effect of climate change in wastewater treatment plants: reviewing the problems and solutions. In *Managing water resources under climate uncertainty* (pp. 197–220). Springer.
- Zuhria, F., Sarto, S., & Prasetyo, I. (2018). The influence of Electrocoagulation to the Reduction of COD, BOD, and TSS of Batik Industry Wastewater. *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*, 2(2), 100–107.
- Αλμπάνης, Τ. (2009). Ρύπανση και τεχνολογίες προστασίας περιβάλλοντος.
- Α. Βλυσίδης (2003). Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων & νερών , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Βλυσίδης, Α. (2007). Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων και νερών. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ) Σχολή Χημικών Μηχανικών*.
- Γεντεκάκης Ιωάννης, Φυσικές Διεργασίες: Ανάλυση και Σχεδιασμός, Εκδόσεις Κλειδαριθμός, Χανιά, 2010.
- Γεωργιοπούλου, Μ. (2007). Ανάπτυξη μεθόδων για την επιλογή της καλύτερης διαθέσιμης τεχνολογίας για την επεξεργασία υγρών βιομηχανικών αποβλήτων.
- Γκαϊντατζής, Γ. (2012, 04 19). Eclass.duth. (1, Επιμ.) Ανάκτηση 08 06, 2020, από <https://eclass.duth.gr/modules/document/?course=TME112>

- Γκέκας Β., Πρωιμάκη Σπ., 2002, Φυσικοχημικές Διεργασίες Διαχωρισμού για Μηχανικούς Περιβάλλοντος, Εκδόσεις Τζιόλα
- Γρηγορίου, Γ. Β. (2017). Επεξεργασία υγρών αποβλήτων και συντήρηση του μηχανολογικού εξοπλισμού της μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων Καρδίτσας.
- Δελήμπαση, Κ. (2001, 11 20). Το όζον στην Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων. *e- telescope*, σ. 6.
- Διαλυνάς, Γ. (1994) PETRA II: λειτουργία & συντήρηση μικρών μονάδων επεξεργασίας λυμάτων, Αθήνα, Εκδόσεις Action
- Δημοπούλου, Α. Ι. (2011). Συγκριτική αξιολόγηση ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών αερίων θερμοκηπίου σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων (ΕΕΛ).
- Ευδαίμων, Π.-Β. (2012). *Επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων με χρήση τροποποιημένων λιγνοκυτταρινούχων υπολειμμάτων*. University of Piraeus (Greece).
- Ζανάκη, Κ. (2001). Έλεγχος ποιότητας νερού. Εκδόσεις Ίων, 508.
- Καρρά, Σ. (2008). Προσδιορισμός μικροβιακού φορτίου σε αεροζολ σε εγκατάσταση επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων.
- Κούγκολος, Α. (2007). Εισαγωγή στην περιβαλλοντική μηχανική. Θεσσαλία: ΤΖΙΟΛΑ.
- Λοϊζίδου Μ., Υγρά Απόβλητα, Σημειώσεις ΕΜΠ, 2006
- Μανιός, Θ. (2007). Επεξεργασία και αξιοποίηση υγρών αποβλήτων. Εκδόσεις ΤΕΙ Κρήτης, Ηράκλειο.
- Μαρκαντωνάτος, Γ. (1990). Επεξεργασία και διάθεση υγρών αποβλήτων. Εκδόσεις Γαρταγάνης, Αθήνα.
- Μπατιστάτος Ν. (2017). Διαφοροποίηση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων υγρών αστικών αποβλήτων μετά από επεξεργασία με μικροκοσκίνιση.
- Νταρακάς, Ε. (2010). Διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής & Τεχνικής Περιβάλλοντος.
- Παντίδου, Α. και Αντέλλη, Κ., 2019. Έλεγχος ρύπανσης νερών (σημειώσεις εργαστηριακών ασκήσεων). Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Πανώρας, Α., & Ηλίας, Α. (1999). Άρδευση με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα. Εκτύπωση Γιαχούδη-Γιαπούλη.
- Πατσακίδου (2016) Διερεύνηση της επίδρασης της αλατότητας των λυμάτων στην βιολογική τους επεξεργασία, Θεσσαλονίκη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Στάμου Α., Βογιατζής Ζ., Βασικές Αρχές και Σχεδιασμός Συστημάτων Επεξεργασίας Αποβλήτων Έκδοση Τ.Ε.Ε., Αθήνα, 1994
- Στάμου, Α. Ι. (1995). Βιολογικός καθαρισμός αστικών αποβλήτων. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Τραγανίτης Στ, Σκουμπούρης Ι, Οδηγός Λειτουργίας Μονάδων Επεξεργασίας Λυμάτων, Ελληνική Εταιρία Τοπικής Ανάπτυξης και Αυτοδιοίκησης, 1995
- Τζιάνα, Α. (2009). Προσομοίωση λειτουργίας δεξαμενής αερισμού ετερότροφης βιομάζας με ανακυκλοφορία ενεργού ιλύος σε εγκατάσταση επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.
- Τσαρούχα, Μ. Ε., (2013), Υποδομές Ύδρευσης και η Προοπτική Επαναχρήσεων του Νερού, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας – Πολυτεχνική Σχολή – Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας & Περιφερειακής Ανάπτυξης,
- Τσώνης Π. Σ. (2003) Καθαρισμός Νερού, Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου
- Τσώνης, Π. Σ. (2004) Επεξεργασία λυμάτων, Αθήνα, Εκδόσεις Παπασωτηρίου

Φυτιλή Δ., 2007, Εφαρμογή της τεχνολογίας μεμβρανών σε προωθημένη επεξεργασία αστικών αποβλήτων με στόχο την επαναχρησιμοποίηση

Χατζάκης (2003), Αξιολόγηση συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων μικρής και μεσαίας κλίμακας, Μεταπτυχιακή εργασία, Βιβλιοθήκη Δ.Μ.Π.Σ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, σελ 20-55, Ε.Μ.Π

Χρυσικόπουλος, Κ. (2013) Εισαγωγή στις Διεργασίες Καθαρισμού Νερού και Λυμάτων, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ