



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Χημικών Μηχανικών & Μηχανικών Περιβάλλοντος

Εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών

## Διερεύνηση απομάκρυνσης αιωρούμενων στερεών από αστικά λύματα με τη χρήση υδροκυκλώνα



Φίλιππος Τζήκας

Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Καθηγητής Πέτρος Γκίκας (Επιβλέπων)

Καθηγητής, Μελίδης Παράσχος

Καθηγητής, Δημήτριος Γουρνής

«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 «Διερεύνηση απομάκρυνσης αιωρούμενων στερεών από αστικά λύματα με τη χρήση υδροκυκλώνα» εκπονήθηκε στο εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή και Κοσμήτορα της σχολής ΧΗΜΗΠΕΡ κ. Γκίκα Πέτρου. Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά μου εκτίμηση στον καθηγητή μου Δρ. Πέτρο Γκίκα για την καθοδήγηση και πολύτιμες συμβουλές που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Με την εμπειρία του και τις άρτιες τεχνικές του γνώσεις, με ώθησε στη ανάπτυξη της κριτικής μου σκέψης ως υποψήφιος Μηχανικός Περιβάλλοντος καθώς και σε πιο έντονο ενδιαφέρον για το αντικείμενο. Επιπλέον, τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στο χειρισμό των μηχανημάτων καθώς και στη χρήση εργαστηριακού εξοπλισμού. Παράλληλα, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου στον διδάκτωρ Κωνσταντίνο Τσαμουτσόγλου. Η συνέπεια, η συνεχής υποστήριξη, η υπομονή και οι πολύτιμες συμβουλές του, υπήρξαν καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη των στόχων μου. Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μηχανικούς και τεχνικούς της Δημόσιας Επιχείρησης Ύδρευσης και Αποχέτευσης Ρεθύμνου για την πολύτιμη βοήθειά τους στο χειρισμό, εγκατάσταση και συντήρηση του υδροκυκλώνα. Τελικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, για την αγάπη και υποστήριξη που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου

Τζήκας Φίλιππος

## Περίληψη

Στη σύγχρονη εποχή, οι Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) αναζητούν ολοένα και περισσότερο τρόπους που αποσκοπούν στην μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ελαχιστοποίησης κόστους και ενεργειακών αναγκών, καθώς και αύξηση αποτελεσματικότητας. Συνεπώς αποτελείται επιτακτική ανάγκη η εύρεση καινοτόμων τεχνολογιών που έχουν ως στόχο τη μείωση της ενέργειας σε ΕΕΛ. Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας ενός υδροκυκλώνα στην απομάκρυνση των Ολικών Αιωρούμενων Στερεών (TSS), του Βιοχημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου ( $BOD_5$ ), καθώς και του Χημικά Απαιτούμενου Οξυγόνου (COD) από αστικά λύματα. Επίσης, μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα του υδροκυκλώνα σε διαφορετικές παροχές εισερχόμενων αποβλήτων με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της ταχύτητας εισόδου του αποβλήτου στην αποτελεσματικότητα του συστήματος. Ωστόσο, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για την κατανομή της διαμέτρου των σωματιδίων πριν και μετά την επεξεργασία των αποβλήτων με το σύστημα υδροκυκλώνα. Οι αναλύσεις έδειξαν σημαντικές απομακρύνσεις των TSS  $46,34 \pm 17,63 \%$ ,  $BOD_5$   $23,34 \pm 9,023 \%$ , COD  $16,04 \pm 4,881 \%$ . Η συγκέντρωση των TSS στο συμπύκνωμα υπολογίστηκε ίση με  $1150 \pm 220$  mg/L. Στις μέρες που πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διαφορετικές παροχές εισόδου ( $15 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ), παρατηρήθηκε ότι στα  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  εμφανίζονται οι μεγαλύτερες απομακρύνσεις (TSS  $64,9 \pm 5,5 \%$ ),  $BOD_5$  ( $30,2 \pm 4,5 \%$ ), COD ( $26,5 \pm 1,45 \%$ ). Επιπρόσθετα, η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης παροχής εμφανίστηκε και στη μέτρηση μεγέθους των σωματιδίων. Παρατηρήθηκε, μείωση σε όλους τους δείκτες  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$ . Αναλυτικότερα για τον δείκτη  $d_{10}$  παρουσιάστηκε μείωση 19,6 %, 32,6% στον  $d_{50}$  και 52,8 %  $d_{90}$ . Συμπερασματικά τα αποτελέσματα που λάβαμε από τη χρήση του υδροκυκλώνα ήταν ενθαρρυντικά σχετικά με την δυνατότητα τους στην απομάκρυνση ρύπων από τα υγρά απόβλητα.

## Abstract

In the modern era, Wastewater Treatment Plants (WWTPs) are increasingly seeking ways to reduce environmental impacts, minimize costs and energy demands, and enhance efficiency. Consequently, there is an urgent need to identify innovative technologies aimed at reducing energy consumption in WWTPs. The objective of this thesis is to evaluate the effectiveness of a hydrocyclone in removing Total Suspended Solids (TSS), Biochemical Oxygen Demand ( $BOD_5$ ), and Chemical Oxygen Demand (COD) from urban wastewater. Additionally, the efficiency of the hydrocyclone was examined under different incoming wastewater flow rates to investigate the impact of inlet velocity on system performance. Furthermore, measurements were conducted to assess the particle size distribution before and after wastewater treatment using the hydrocyclone system. The analyses demonstrated significant removal rates: TSS  $46.34\% \pm 17.63\%$ ,  $BOD_5$   $23.34\% \pm 9.023\%$ , COD  $16.04\% \pm 4.881\%$ . The concentration of the rejected water was calculated at  $1150 \pm 220$  mg/L. In the experiments conducted at different inlet flow rates (15 m<sup>3</sup>/h, 10 m<sup>3</sup>/h, 5 m<sup>3</sup>/h), it was observed that at 10 m<sup>3</sup>/h, the highest removal efficiencies were recorded: TSS  $64.9\% \pm 5.5\%$ ,  $BOD_5$   $30.2\% \pm 4.5\%$ , COD  $26.5\% \pm 1.45\%$ . Moreover, the effectiveness of this flow rate was also reflected in particle size measurements. A reduction was observed in all size distribution indices ( $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$ ). Specifically, a 19.6% reduction in  $d_{10}$ , 32.6% in  $d_{50}$ , and 52.8% in  $d_{90}$  was recorded. In conclusion, the results obtained from the use of the hydrocyclone were encouraging regarding its ability to remove pollutants from liquid wastewater.

## Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος και ευχαριστίες .....	3
Περίληψη .....	4
Abstract .....	5
Κατάλογος Συντομογραφιών .....	8
Κατάλογος Πινάκων.....	9
Κατάλογος εικόνων.....	10
Κατάλογος διαγραμμάτων .....	12
Κεφάλαιο 1: Επεξεργασία υγρών αποβλήτων .....	13
1.1 Υγρά απόβλητα .....	13
1.2 Μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων .....	14
1.2.1 Προ-επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία .....	14
1.2.1.1 Προ-επεξεργασία .....	14
1.2.1.2 Εσχάρωση .....	14
1.2.1.3 Εξάμμωση-Απολίπανση .....	16
1.2.1.4 Πρωτοβάθμια επεξεργασία .....	17
1.2.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία .....	18
1.2.2.1 Δεξαμενή αερισμού .....	18
1.2.2.2 Νιτροποίηση - απονιτροποίηση .....	19
1.2.2.3 Δευτεροβάθμια καθίζηση .....	20
1.2.2.4 Απολύμανση .....	22
1.2.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία.....	24
1.2.4 Επεξεργασία ιλύος .....	24
1.2.4.1 Πάχυνση ιλύος .....	24
1.2.4.2 Αναερόβια χώνευση .....	29
1.2.4.3 Αφυδάτωση ιλύος.....	30
Κεφάλαιο 2: Υδροκυκλώνες.....	33
2.1 Λειτουργία υδροκυκλώνα .....	34
2.2 Είδη υδροκυκλώνα .....	34
2.2.1 Κωνικοί υδροκυκλώνες .....	34
2.2.2 Κυλινδρικοί υδροκυκλώνες.....	37
2.3 Εφαρμογές υδροκυκλώνα .....	39
2.3.1 Εφαρμογή υδροκυκλώνα σε ΕΕΛ .....	39

2.3.2 Εφαρμογή υδροκυκλώνα σε διαχείριση και επεξεργασία ορυκτών πόρων .....	40
2.3.3 Εφαρμογή υδροκυκλώνα στη βιομηχανία τροφίμων .....	41
2.3.4 Εφαρμογή υδροκυκλώνα στη βιομηχανία χαρτιού .....	41
Κεφάλαιο 3: ΕΕΛ Ρεθύμνου.....	42
3.1 Φρεάτιο άφιξης λυμάτων .....	45
3.2 Μονάδα εσχάρωσης.....	45
3.3 Μονάδα εξάμμωσης .....	45
3.4 Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας .....	45
3.4.1 Δεξαμενή αερισμού .....	46
3.4.2 Δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης .....	46
3.4.3 Αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος.....	46
3.5 Μονάδα απολύμανσης και αγωγός διάθεσης .....	46
3.6 Μονάδα επεξεργασίας ιλύος.....	47
3.6.1 Μηχανική προ-πάχυνση.....	47
3.6.2 Αερόβια χώνευση .....	47
3.6.3 Μετά-πάχυνση και μονάδα αφυδάτωσης ιλύος .....	47
3.6.4 Συνδυασμένη μονάδα ηλιακής ξήρανσης – κομποστοποίησης.....	48
3.7 Μονάδα υποδοχής - εξισορρόπησης βοθρολυμάτων .....	48
3.8 Μονάδα υποδοχής και προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων .....	48
3.9 Μονάδα βιομηχανικού νερού .....	49
Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία.....	49
4.1 Σκοπός πειράματος .....	49
4.2 Πειραματική διάταξη- Διάγραμμα ροής .....	50
4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά .....	54
4.3.1 Υδροκυκλώνας.....	54
Κεφάλαιο 5: Μέθοδοι ανάλυσης .....	56
5.1 Μέτρηση TSS .....	56
5.2 Μέτρηση BOD <sub>5</sub> .....	58
5.3 Μέτρηση COD .....	59
5.4 Μέτρηση μεγέθους σωματιδίων.....	60
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα.....	62
6.1 Πίνακες αποτελεσμάτων .....	62
6.1.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά .....	62

6.1.2 Ποσοστιαίες απομακρύνσεις .....	65
6.2 Διαγράμματα αποτελεσμάτων.....	67
6.2.1 Συγκεντρώσεων – Απομάκρυνσης.....	67
6.2.2 Ισοζύγιο μάζας .....	75
6.2.2 Κατανομή μεγέθους σωματιδίων.....	77
6.3 Συζήτηση αποτελεσμάτων.....	84
6.3.1 TSS .....	84
6.3.2 BOD <sub>5</sub> .....	85
6.3.3 COD .....	85
6.3.4 Κατανομή σωματιδίων .....	86
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα .....	87
Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία .....	89

## Κατάλογος Συντομογραφιών

**BOD<sub>5</sub>** Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο πέντε ημερών

**TSS** Ολικά Αιωρούμενα Στερεά (Total Suspended Solids)

**COD** Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand)

**ΔΠΚ** Δεξαμενή Πρωτοβάθμιας Καθίζησης

**ΔΔΚ** Δεξαμενή Δευτεροβάθμιας Καθίζησης

**UV** Υπεριώδης(UltraViolet)

**ΕΕΛ** Εγκατάσταση Επεξεργασία Λυμάτων

**AGS** Αερόβιος Κόκκος Ιλύος

**DAF** Επίπλευση Διαλυμένου Αέρα



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.2.2 : Σύγκριση μεθόδων απολύμανσης(Γκίκας,2020).....	22
Πίνακας 3.1.1: Υδραυλικά και Ρυπαντικά φορτία σχεδιασμού ΕΕΛ ΡΕΘΥΜΝΟΥ ( <a href="http://astikalimata.ypeka.gr">http://astikalimata.ypeka.gr</a> , ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.175133/26-09-2014) της ΕΕΛ Ρεθύμνου).....	43
Πίνακας 3.1.2: Ποιοτικά Χαρακτηριστικά εξόδου ΕΕΛ ( <a href="http://astikalimata.ypeka.gr">http://astikalimata.ypeka.gr</a> , ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.175133/26-09-2014) της ΕΕΛ Ρεθύμνου).....	43
Πίνακας 5.2.1 Όγκοι δείγματος για ανάλυση BOD (Παντίδου, Α. και Αντέλλη, Κ., 2019).....	59
Πίνακας 6.1.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου .....	62
Πίνακας 6.1.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά εξόδου .....	63
Πίνακας 6.1.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά για δειγματοληψία στις 15.01.25. ....	63
Πίνακας 6.1.4 Ποιοτικά χαρακτηριστικά για δειγματοληψία στις 16.1.25. ....	64
Πίνακας 6.1.5 Συγκέντρωση συμπυκνώματος .....	64
Πίνακας 6.1.6 Συγκέντρωση συμπυκνώματος για ημέρες δειγματοληψίας 15.1 /16.1 .....	65
Πίνακας 6.1.7 Ποσοστά % Απομάκρυνσης .....	65
Πίνακας 6.1.8 Ποσοστιαίες απομακρύνσεις για διαφορετικές παροχές εισόδου. .....	66
Πίνακας 6.2.1 Συγκριτική αξιολόγηση των απομακρύνσεων των TSS, BOD <sub>5</sub> , COD. ....	70
Πίνακας 6.2.2 Αποτελέσματα ισοζυγίου μάζας.....	76
Πίνακας 6.2.3 Δείκτες κατανομής εισόδου.....	82
Πίνακας 6.2.4 Δείκτες κατανομής εξόδου .....	82

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Μηχανικά καθαριζόμενες εσχάρες (Γκίκας,2020).....	15
Εικόνα 2 : Τεμαχιστής (Comminutor)(Γκίκας,2020) .....	15
Εικόνα 3 : Τυπικός θάλαμος αεριζόμενου εξαμωτή-απολιπαντή(Γκίκας,2020)..	16
Εικόνα 4: Τύποι δεξαμενών Πρωτοβάθμιας Καθίζησης(Γκίκας,2020) .....	17
Εικόνα 5 : Τομή δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης(Γκίκας,2020) .....	17
Εικόνα 6: Μονάδα αερισμού εμβολικής ροής με διαχυτήρες(Γκίκας,2020) .....	18
Εικόνα 7: Διαδικασία νιτροποίησης-απονιτροποίησης (Γκίκας,2020) .....	20
Εικόνα 8: Τομή δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης(Γκίκας,2020) .....	21
Εικόνα 9 : Είδη δεξαμενών δευτεροβάθμιας καθίζησης(Γκίκας,2020) .....	21
Εικόνα 10: Είδη αμμόφιλτρων(Γκίκας,2020) .....	23
Εικόνα 11: Μέθοδοι απολύμανσης(Γκίκας,2020).....	23
Εικόνα 12: Πάχυνση με επίδραση βαρύτητας(Γκίκας,2020) .....	25
Εικόνα 13: Πάχυνση με φυγοκέντρωση(Γκίκας,2020) .....	26
Εικόνα 15: Πάχυνση με επίπλευση(Γκίκας,2020) .....	27
Εικόνα 16: Τράπεζα πάχυνσης (Γκίκας,2020) .....	28
Εικόνα 17: Πάχυνση με περιστρεφόμενα τύμπανα(Γκίκας,2020) .....	29
Εικόνα 18: Διβάθμια διεργασία αναερόβιας χώνευσης ιλύος(Γκίκας,2020) .....	30
Εικόνα 19: Αφυδάτωση με φυγοκέντρωση(Γκίκας,2020).....	31
Εικόνα 20: Αφυδάτωση με ταινιοφιλτρόπρεσσα (Γκίκας,2020).....	31
Εικόνα 21: Αφυδάτωση με ηθμούς κενού(Γκίκας,2020).....	32
Εικόνα 22: Αφυδάτωση με θαλαμοφιλτρόπρεσσα (Γκίκας,2020).....	32
Εικόνα.23 :Σχηματική παράσταση κωνικού ( <a href="https://www.researchgate.net/">https://www.researchgate.net/</a> ) .....	35
Εικόνα 25 : Κωνικός υδροκυκλώνας σε κεφαλή δικτύου άρδευσης, με φίλτρο σίτας μετα από αυτόν ( <a href="https://www.researchgate.net/">https://www.researchgate.net/</a> ) .....	37
Εικόνα 26 : διαχωριστές-άμμου προσαρμοσμένοι σε γεωτρήσεις ( <a href="https://www.researchgate.net/">https://www.researchgate.net/</a> ):.....	38
Εικόνα 27: ΕΕΛ Ντιζόν,Γαλλία ( <a href="http://bienpublic.com">bienpublic.com</a> ).....	39
Εικόνα 28: ΕΕΛ Στραζς, Αυστία ( <a href="http://wte.de">wte.de</a> ).....	40
Εικόνα 29: ΕΕΛ Ρεθύμνου( <a href="http://astikalimata.ypeka.gr">http://astikalimata.ypeka.gr</a> , ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.175133/26-09-2014) της ΕΕΛ Ρεθύμνου) .....	42
Εικόνα 30: Διάγραμμα ροής ΕΕΛ Ρεθύμνου ( <a href="http://astikalimata.ypeka.gr">http://astikalimata.ypeka.gr</a> , ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.175133/26-09-2014) της ΕΕΛ Ρεθύμνου) .....	44
Εικόνα 31: Πειραματική διάταξη στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. ....	50
Εικόνα 32: Υδροκυκλώνας ΕΕΛ Ρεθύμνου.....	51
Εικόνα 33: Τοποθέτηση φυγόκεντρης αντλίας στο κανάλι προεπεξεργασίας .....	51
Εικόνα 34: Κανάλι άντλησης αστικού λύματος.....	52
Εικόνα 35: Διάγραμμα Ροής .....	53
Εικόνα 36: Υδροκυκλώνας ΕΕΛ Ρεθύμνου.....	54

Εικόνα 37: Απεικόνιση Υδροκυκλώνα. ....	55
Εικόνα 38: Αναλυτικός ζυγός (Παντίδου, Α. και Αντέλλη, Κ., 2019) .....	57
Εικόνα 39: Φούρνος Ξήρανσης (Παντίδου, Α., Αντέλλη, Κ., 2019).....	57
Εικόνα 40: Αφυγραντήρα/Ξηραντήρας (Παντίδου, Α., Αντέλλη, Κ., 2019) .....	58
Εικόνα 41: Φιάλες BOD με ειδικά πώματα OxīTop, τοποθετημένες σε σύστημα μαγνητικού αναδευτήρα (Παντίδου, Α. και Αντέλλη, Κ., 2019).....	59
Εικόνα 42: Ισοζύγιο μάζας .....	75

## Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 6.1: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου TSS .....	67
Διάγραμμα 6.2: Ποσοστά απομάκρυνσης TSS .....	68
Διάγραμμα 6.3: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου BOD <sub>5</sub> .....	68
Διάγραμμα 6.4: Ποσοστά απομάκρυνσης BOD <sub>5</sub> .....	69
Διάγραμμα 6.5: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου COD .....	69
Διάγραμμα 6.6: Ποσοστά απομάκρυνσης COD. ....	70
Διάγραμμα 6.7: Απομάκρυνση TSS, BOD <sub>5</sub> , COD. ....	71
Διάγραμμα 6.8: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου TSS για διαφορετικές παροχές εισόδου. ....	71
Διάγραμμα 6.9: Ποσοστά απομάκρυνσης TSS για διαφορετικές παροχές εισόδου. ....	72
Διάγραμμα 6.10: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου BOD <sub>5</sub> για διαφορετικές παροχές εισόδου. ....	72
Διάγραμμα 6.11: Ποσοστά απομάκρυνσης BOD <sub>5</sub> για διαφορετικές παροχές εισόδου. ....	73
Διάγραμμα 6.12: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου COD για διαφορετικές παροχές εισόδου. ....	73
Διάγραμμα 6.13: Ποσοστά απομάκρυνσης COD για διαφορετικές παροχές εισόδου. ....	74
Διάγραμμα 6.14: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων για δειγματοληψία στις 15.1.25. ....	77
Διάγραμμα 6.15: Αθροιστικώς διερχόμενο υλικό για δειγματοληψία στις 15.1.25. ....	78
Διάγραμμα 6.16: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων για δειγματοληψία στις 15.1.25. ....	79
Διάγραμμα 6.17: Αθροιστικώς διερχόμενο υλικό για δειγματοληψία στις 15.1.25. ....	79
Διάγραμμα 6.18: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων για δειγματοληψία στις 15.1.25. ....	80
Διάγραμμα 6.19: Αθροιστικώς διερχόμενο υλικό για δειγματοληψία στις 15.1.25. ....	80
Διάγραμμα 6.20: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων για δειγματοληψία στις 15.1.25. ....	81
Διάγραμμα 6.21: Αθροιστικώς διερχόμενο υλικό για δειγματοληψία στις 15.1.25. ....	81
Διάγραμμα 6.22: Μεταβολή τιμών δείκτη d <sub>10</sub> .....	83
Διάγραμμα 6.23: Μεταβολή τιμών δείκτη d <sub>50</sub> .....	83
Διάγραμμα 6.24: Μεταβολή τιμών δείκτη d <sub>90</sub> .....	84

## Κεφάλαιο 1: Επεξεργασία υγρών αποβλήτων

### 1.1 Υγρά απόβλητα

Οι κύριες πηγές υγρών αποβλήτων περιλαμβάνουν τις κατοικίες και τις βιομηχανίες. Στη σύγχρονη εποχή, η διάθεση των υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον είναι μια διαδικασία που περιέχει υψηλά επίπεδα τοξικών ουσιών και παθογόνων μικροοργανισμών.

Η άμεση απόρριψη των υγρών λυμάτων στο φυσικό περιβάλλον ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα τόσο στους οργανισμούς όσο και στο περιβάλλον ίδιο (Metcalf, 2014). Αυτά τα απόβλητα συχνά περιέχουν τοξικές ουσίες και παθογόνους μικροοργανισμούς. Η έκθεση των ανθρώπων σε υγρά απόβλητα είναι πιθανό να προκύψει από την κατανάλωση μολυσμένου πόσιμου νερού, άλλων δραστηριοτήτων, αλλά και από την κατανάλωση θαλασσινών και κυρίως οστρακοειδών. Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί που συνήθως βρίσκονται στα υγρά απόβλητα περιλαμβάνουν το *E. coli*, το *Streptococcus*, το *Salmonella*, το *Shigella*, το *Mycobacteria*, το *Pseudomonas aeruginosa*, το *Giardia lamblia*, καθώς και είδη του γένους *enterovirus*. Επιπλέον, αντιμετωπίζουμε ποικιλία άλλων μικροοργανισμών που είναι εξαιρετικά επικίνδυνοι για τους ανθρώπους. Συνοπτικά, παρακάτω θα γίνει αναλυτική περιγραφή για τις κατηγορίες των υγρών αποβλήτων (Amoatey & Bani, 2011).

Τα υγρά απόβλητα μπορούν να ταξινομηθούν σε σχέση με την πηγή προέλευσής τους. Συγκεκριμένα, διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- **Οικιακά Λύματα:** Αποτελούνται από υγρά απόβλητα που προκύπτουν από τις ατομικές δραστηριότητες των ανθρώπων, όπως το μπάνιο και άλλες οικιακές χρήσεις.
- **Αστικά Υγρά Απόβλητα:** Κυρίως προέρχονται από κατοικίες και εμπορικές δραστηριότητες.
- **Βιομηχανικά Απόβλητα:** Αφορούν τα απόβλητα που προέρχονται από χώρους χρήσης για εμπορικές ή βιομηχανικές δραστηριότητες και δεν ανήκουν στην κατηγορία οικιακών λυμάτων ή όμβριων υδάτων. Αυτά τα απόβλητα δημιουργούνται κατά τη διαδικασία παραγωγής σε βιομηχανικές ή βιοτεχνικές εγκαταστάσεις και μπορεί να περιλαμβάνουν υπολείμματα υλικών που χρησιμοποιούνται κατά τη λειτουργία τους (Wang, 2016).

Η δημιουργία αυτών των αποβλήτων οφείλεται στην παρουσία φυσικών ρυπαντών, όπως αδιάλυτες, διαλυτές και κολλοειδείς ουσίες που προκαλούν αποχρωματισμό, θόλωση και δυσάρεστες οσμές στα υγρά απόβλητα. Επίσης, περιλαμβάνουν χημικούς ρύπους, όπως οργανικές, ανόργανες ουσίες και ραδιενεργά υλικά. Τέλος, δεν περιλαμβάνουν τα υγρά λύματα από τους χώρους υγιεινής των εργαζομένων, τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των αστικών λυμάτων σύμφωνα με την Οδηγία 91/271/ΕΟΚ του 1991.

## **1.2 Μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων**

### **1.2.1 Προ-επεξεργασία και πρωτοβάθμια επεξεργασία**

#### **1.2.1.1 Προ-επεξεργασία**

Κατά την προεπεξεργασία, υπάρχει η δυνατότητα να εφαρμοστούν διάφορες διαδικασίες. Στόχος αυτού του σταδίου είναι η απομάκρυνση αρχικών υλικών, όπως ξύλα, πέτρες, πλαστικά και πανιά, με τη χρήση σχαρών. Η αφαίρεση αυτών των υλικών θεωρείται απαραίτητη διαδικασία (Εσχάρωση), καθώς ενισχύει τη λειτουργία των επόμενων μονάδων επεξεργασίας μιας ΕΕΛ. Επιπλέον, συνδυάζεται συχνά με τη διαδικασία άλεσης/πολτοποίησης, κατά την οποία τα υλικά από τα σχάρια πολτοποιούνται και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθούν χωρίς να απαιτείται ξεχωριστή διάθεση. Συνεχίζοντας, μετά την αφαίρεση των ογκωδών υλικών ή την πολτοποίησή τους, ακολουθεί η εξάμμωση, δηλαδή η απομάκρυνση υλικών όπως χαλίκια και άμμος με μεγάλο ειδικό βάρος (Χρυσικόπουλος, 2013).

#### **1.2.1.2 Εσχάρωση**

Παραδοσιακά, για τον σκοπό της εσχάρωσης χρησιμοποιούνται μεταλλικές ισαπέχουσες εσχάρες σε μορφή ράβδων. Οι χαρακτηρισμοί των εσχάρων διαφέρουν ανάλογα με τον τρόπο απομάκρυνσης των εσχαρισμάτων, χωρίζονται δηλαδή σε χειρωνακτικά και μηχανικά καθαριζόμενες, ανάλογα με το αν χρησιμοποιείται μηχανισμός αυτόματου καθαρισμού (Metcalf and Eddy, Inc., 1991).

Τα χειρωνακτικά είναι μια κλίση μεταλλικών ράβδων (με γωνία κλίσης 30 - 45°) και διάκενο 20 - 50mm. Χρησιμοποιούνται κυρίως για το στάδιο εσχάρωσης σε μικρές εγκαταστάσεις, ενώ επίσης χρησιμοποιούνται ως εφεδρικές, by-pass ή για προεσχάρισμο (πριν τη μηχανική εσχάρωση). Στην τελευταία περίπτωση, το διάκενο μπορεί να φτάνει μέχρι 50 - 80mm. Στις μηχανικά καθαριζόμενες εσχάρες, η κλίση είναι 0 - 30°, με διάκενο 17 - 76mm (Metcalf and Eddy, Inc., 1991). Επιπλέον, οι ράβδοι μπορεί να είναι επίπεδες(1), καμπύλες (2), κυλιόμενου ιμάντα (3) (Εικόνα 1).

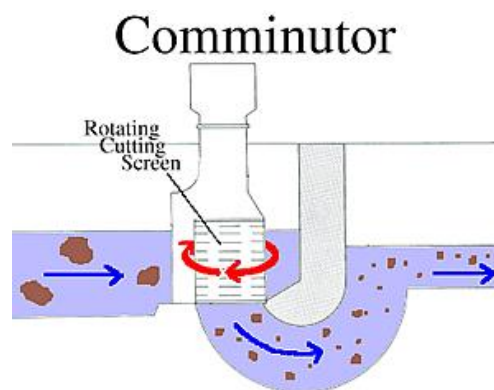


**Εικόνα 1: Μηχανικά καθαριζόμενες εσχάρες (Γκίκας,2020)**

1. Επίπεδη εσχάρα (Εικόνα 1)
2. Καμπύλη εσχάρα (Εικόνα 1)
3. Εσχάρα κυλιόμενου ιμάντα (Εικόνα 1)

Η διαδικασία του εσχαρίσματος ενδέχεται να προκαλέσει δυσάρεστες οσμές και άλλες ενοχλήσεις, ειδικά όταν λαμβάνει χώρα σε περιοχές με υψηλές θερμοκρασίες. Για τη μείωση αυτών των ενοχλήσεων, συχνά τα μηχανήματα εσχαρίσματος τοποθετούνται σε κλειστούς χώρους με ειδική απόσμηση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται μηχανήματα που ονομάζονται τεμαχιστές (Εικόνα 2) για τον χωρισμό των στερεών υλικών σε μικρότερα κομμάτια (Στάμος & Βογιατζής, 1994).

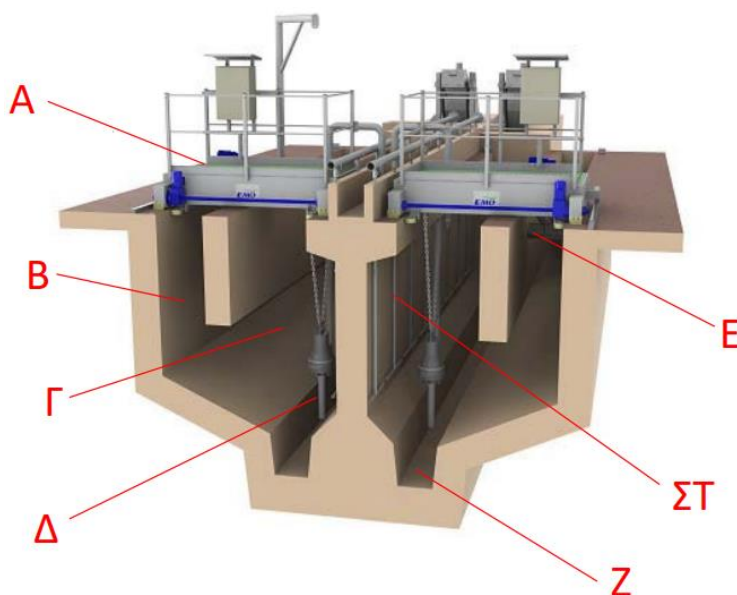
Συνήθως, αυτά τα μηχανήματα χρησιμοποιούνται με σκοπό να αποφευχθεί η παραδοσιακή διαδικασία του εσχαρίσματος και μπορεί να ακολουθηθούν από εξελιγμένους μηχανισμούς εσχάρωσης (Αγγελάκης, 2004).



**Εικόνα 2 : Τεμαχιστής (Comminutor)(Γκίκας,2020)**

### 1.2.1.3 Εξάμμωση-Απολίπανση

Τα απόβλητα που προέρχονται από βιομηχανικές διεργασίες περιλαμβάνουν σημαντικές ποσότητες άμμου. Αυτή η άμμος μπορεί να προκαλέσει σοβαρές φθορές στον μηχανολογικό εξοπλισμό της εγκατάστασης, επηρεάζοντας επίσης τις αποθέσεις στις δεξαμενές αερισμού και τους χωνευτές. Για την απομάκρυνση αυτών των ανόργανων υλικών και περίσσειας σωματιδίων, χρησιμοποιείται ένα σύστημα αεριζόμενου εξαμμωτή (Εικόνα 3). Η άμμος μεταφέρεται με ένα μεταφορικό κοχλία και στη συνέχεια απομακρύνεται με ένα φορτηγό για τελική διάθεση στη χωματερή. Οι υπερβαινουσες ουσίες συλλέγονται σε έναν εξαφρωτή και διακινούνται προς το κέντρο επεξεργασίας, όπου απομακρύνονται περιοδικά με χρήση βυτίων (Χρυσικόπουλος, 2013).



Εικόνα 3 : Τυπικός θάλαμος αεριζόμενου εξαμμωτή-απολιπαντή(Γκίκας,2020)

- A. Παλινδρομική γέφυρα
- B. Θάλαμος απολίπανσης
- Γ. Θάλαμος εξάμμωσης
- Δ. Τζιφάρι
- E. Επιφανειακό ξέστρο απολίπανσης
- ΣΤ. Σωληνώσεις παροχέτευσης αέρα
- Ζ. Χωάνη συλλογής άμμου



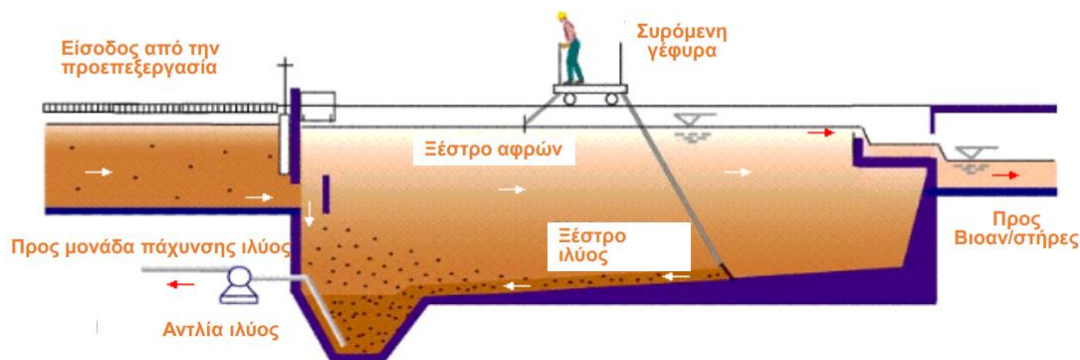
### 1.2.1.4 Πρωτοβάθμια επεξεργασία

Κατά την πρώτη επεξεργασία, τα οργανικά και ανόργανα στερεά απομακρύνονται μέσω της διαδικασίας της καθίζησης (Εικόνα 4) (Στάμου & Βογιατζής, 1995). Παράλληλα, γίνεται απομάκρυνση και των στοιχείων που επιπλέουν. Επίσης, σε αυτό το στάδιο είναι δυνατόν να απομακρυνθεί έως και το 50% του  $BOD_5$ , το 70% των TSS που περιέχονται στα υγρά απόβλητα. Επιπρόσθετα κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία τα διαλυμένα κολλοειδή δεν επηρεάζονται (Στάμου & Βογιατζής, 1994). Ένα ποσοστό του οργανικού αζώτου, του οργανικού φωσφόρου, καθώς και των βαρέων μετάλλων που περιέχονται στα υγρά απόβλητα απομακρύνεται από αυτά κατά τη διαδικασία της καθίζησης. Τα απόβλητα που προκύπτουν από τις μονάδες καθίζησης χαρακτηρίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως απόβλητα πρωτοβάθμιας επεξεργασίας (Amoatey & Bani, 2011).



Εικόνα 4: Τύποι δεξαμενών Πρωτοβάθμιας Καθίζησης(Γκίκας,2020)

1. Ορθογωνικής διατομής
2. Κυκλικής διατομής



Εικόνα 5 : Τομή δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης(Γκίκας,2020)

### 1.2.2 Δευτεροβάθμια επεξεργασία

Στη διαδικασία της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας, γίνεται απομάκρυνση των οργανικών ουσιών που μπορούν να υποστούν βιοαποικοδόμηση, καθώς και των αιωρούμενων στερεών.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τον αερισμό (Εικόνα 6) για την οξείδωση των οργανικών ουσιών, τη νιτροποίηση-απονιτροποίηση (Εικόνα 7), την καθίζηση (Εικόνα 8) και το φιλτράρισμα (Tchobanoglous, et al., 2003).

#### 1.2.2.1 Δεξαμενή αερισμού

Ο αερισμός αποτελεί μια από τις ουσιώδεις διαδικασίες κατά την αερόβια επεξεργασία υγρών λυμάτων, (Skouteris et al., 2020). Κατά τη διάρκειά του, οι μικροοργανισμοί παρέχονται με το απαραίτητο διαλυμένο οξυγόνο για την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό τους. Επιπλέον, ο αερισμός εμποδίζει την καθίζηση των στερεών σωματιδίων στο υγρό απόβλητο, διατηρώντας τα διαλυμένα στη μάζα του, ενώ προκαλεί μια ανάμειξη στη δεξαμενή.

Ο αερισμός παίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στον έλεγχο της ρύπανσης στους βιοαντιδραστήρες μεμβράνης. Κατά τη διάρκειά του, προκαλείται μια ήπια ανάμειξη στη δεξαμενή (Εικόνα 6), η οποία επιτυγχάνει τη σύνδεση των μικροοργανισμών και της οργανικής ύλης που αιωρείται ή είναι διαλυμένη στο απόβλητο, βοηθώντας έτσι στην πέψη της οργανικής ύλης (Alkhalidi et al., 2016).



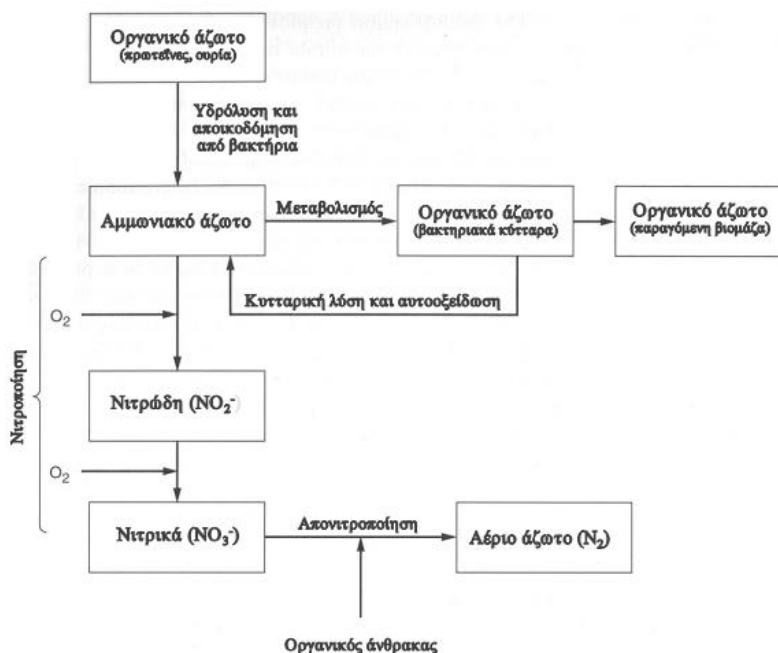
Εικόνα 6: Μονάδα αερισμού εμβολικής ροής με διαχυτήρες(Γκίκας,2020)

### 1.2.2.2 Νιτροποίηση - απονιτροποίηση

Κατά τη διαδικασία της νιτροποίησης, οι αζωτούχες οργανικές ενώσεις υφίστανται μετατροπή, μεταβαίνοντας πρώτα σε οργανικά οξέα και  $\text{NH}_4$ , και στη συνέχεια σε νιτρώδη άζωτο ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) και νιτρικό άζωτο ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), με τη συνεργασία των βακτηρίων *Nitrosomonas* (στο πρώτο στάδιο) και *Nitrosococcus* (στο δεύτερο στάδιο) (Νταρακάς, 2010). Αυτές οι μετατροπές πραγματοποιούνται μέσω συγκεκριμένων χημικών αντιδράσεων. Η νιτροποίηση λαμβάνει χώρα σε δύο στάδια, χαρακτηρίζεται δηλαδή από διπλή διαδικασία. Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά αυτής της διαδικασίας είναι η αυξημένη ανάγκη για οξυγόνο και η εκπομπή ιόντων υδρογόνου. Η πρώτη αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον υπολογισμό του συστήματος αερισμού, ενώ η δεύτερη μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του pH. Οι γενικές προϋποθέσεις για την ανάπτυξη των οξειδωτικών αμμωνίας και νιτρώδους περιλαμβάνουν:

- 1 Εύρος pH: 5,5-9,0
- 2 Κατάλληλα επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου με 0,5 mg/l για την οξείδωση της αμμωνίας και 1,5 mg/l για την οξείδωση του  $\text{NO}_2^-$ .
- 3 Θερμοκρασίες 5-40°C.

Κατά την απονιτροποίηση, τα νιτρικά και νιτρώδη υποβάλλονται σε μικροβιολογική μετατροπή, μετατρέποντας τα σε μοριακό άζωτο (Εικόνα 7). Σε περίπτωση που τα αναγωγικά στοιχεία του υγρού αποβλήτου δεν είναι επαρκή, χρησιμοποιούνται εξωτερικοί δότες, όπως μεθανόλη, αιθανόλη και οξικό οξύ. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα βιομηχανικά απόβλητα. Όπως συμβαίνει με τη νιτροποίηση, η απονιτροποίηση υπόκειται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τη μετατροπή των νιτρικών σε νιτρώδη, ενώ το δεύτερο στάδιο τη μετατροπή των νιτρώδων σε οξείδιο του αζώτου, υποοξείδιο του αζώτου και, τελικά, σε μοριακό άζωτο, κλείνοντας τον κύκλο του αζώτου. Η διαδικασία της απονιτροποίησης λαμβάνει χώρα σε μια βιολογική μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, χρησιμοποιώντας ετερότροφους μικροοργανισμούς, όπως το *Paracoccus* και διάφορες ψευδομονάδες. Ένα κύριο χαρακτηριστικό της απονιτροποίησης είναι ο αποκλεισμός του οξυγόνου και η αύξηση του pH (Νταρακάς, 2010).



Εικόνα 7: Διαδικασία νιτροποίησης-απονιτροποίησης (Γκίκας,2020)

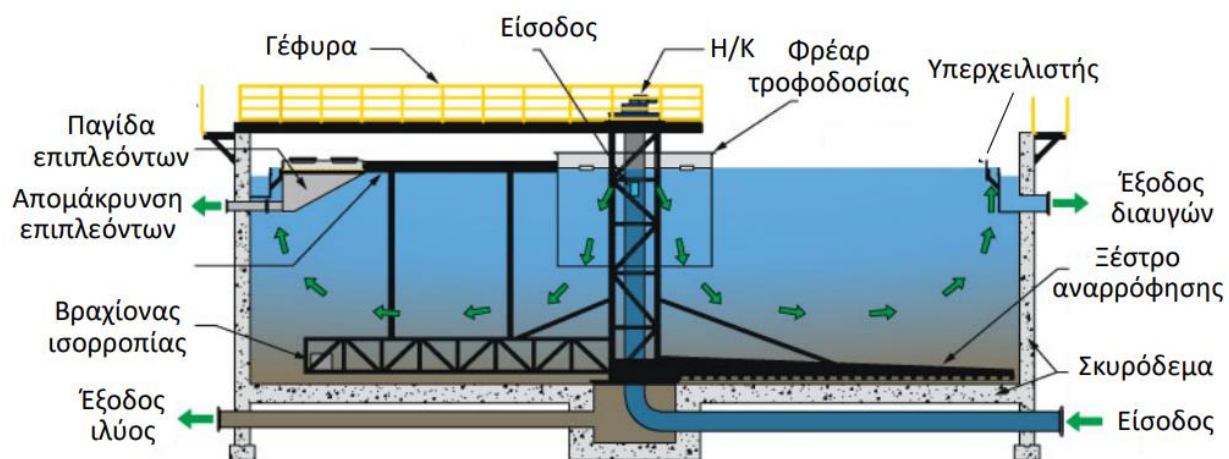
### 1.2.2.3 Δευτεροβάθμια καθίζηση

Η δευτεροβάθμια καθίζηση αποτελείται από δεξαμενές που είναι παρόμοιες με αυτές της πρωτοβάθμιας καθίζησης. Το κύριο χαρακτηριστικό που τις διακρίνει είναι το ποσοστό αφαίρεσης οργανικών και αιωρούμενων στερεών. Στη δευτεροβάθμια καθίζηση, συνήθως χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες δεξαμενές, επιτρέποντας έτσι περισσότερο χρόνο για το επεξεργασμένο υγρό να παραμείνει μέσα σε αυτές. Οι δεξαμενές δευτεροβάθμιας καθίζησης συνήθως έχουν κυκλικό σχήμα (Εικόνα 9) (Torare, 2011).

Στη Εικόνα 8, παρουσιάζονται λεπτομερώς οι ζώνες σε μια τυπική δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης κυκλικής διατομής:

- Το φρέαρ τροφοδοσίας, που βρίσκεται στο πάνω μέρος της δεξαμενής.
- Η ζώνη καθίζησης, η οποία αποτελεί τον χώρο διαχωρισμού των καθιζανουσών ουσιών.
- Η παγίδα επιπλεόντων, όπου συγκρατείται η βιομάζα που απομακρύνεται από τις δεξαμενές αερισμού κατά τις περιόδους βροχών στις εγκαταστάσεις παντοροϊκών δικτύων.
- Η ζώνη πάχυνσης, που βρίσκεται πάνω από τον πυθμένα και συγκεντρώνεται η ιλύς που έχει καθιζάνει.





Εικόνα 8: Τομή δεξαμενής δευτεροβάθμιας καθίζησης(Γκίκας,2020)



Εικόνα 9 : Είδη δεξαμενών δευτεροβάθμιας καθίζησης(Γκίκας,2020)

#### 1.2.2.4 Απολύμανση

Η διαδικασία της απολύμανσης αφορά την απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών, όπως βακτηρίδια, ιοί, προτού προλάβουν να αναπαραχθούν και να εξελιχθούν σε παθογόνους οργανισμούς (Crini & Lichthouse, 2018). Η απολύμανση, επομένως, αποτελεί ένα ουσιαστικό βήμα στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, εξασφαλίζοντας ότι, όταν αυτά διατίθενται στο περιβάλλον και δεν υπάρχει πιθανότητα αρνητικής επίδρασής τους στον άνθρωπο και το περιβάλλον (American Chemistry Council, 2021). Ο στόχος της απολύμανσης η αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών πριν την τελική διάθεση των υγρών αποβλήτων χωρίς να υπάρχει κίνδυνος για την δημόσια υγεία. Οι πιο κοινές τεχνικές απολύμανσης που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τη χλωρίωση, την Υπεριώδη Ακτινοβολία (UltraViolet, UV) και την οζονισμό (Εικόνα 11). Κάθε μια από αυτές τις μεθόδους έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Πίνακας 1.2.2).

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται μερικοί από τους τρόπους απολύμανσης σε μια μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων και σύγκριση των ιδιοτήτων τους.

**Πίνακας 1.2.2 : Σύγκριση μεθόδων απολύμανσης(Γκίκας,2020)**

Ιδιότητα	Μέθοδος Απολύμανσης		
	Χλωρίωση	UV	Οζόνισμος
Απομάκρυνση κολοβακτηριδίων	Πολύ καλή	Πολύ καλή	Πολύ καλή
Απομάκρυνση ιών	Μέτρια	Καλή	Πολύ καλή
Πιθανότητα επαναμόλυνσης	Ελάχιστη	Σημαντική	Καμία
Επίδραση στον αποδέκτη	Αύξηση	Καμία	Καμία



Εικόνα 10: Είδη αμμόφιλτρων(Γκίκας,2020)

- A. Αμμόφιλτρο βαρύτητας
- B. Αμμόφιλτρο κλειστού τύπου
- C. Αμμόφιλτρο ανοδικής ροής



Εικόνα 11: Μέθοδοι απολύμανσης(Γκίκας,2020)

- a) Χλωρίωση (Εικόνα 11)
- b) Οζόνισμος (Εικόνα 11)
- c) UltraViolet ,UV (Εικόνα 11)

### **1.2.3 Τριτοβάθμια επεξεργασία**

Η τριτοβάθμια επεξεργασία χρησιμοποιείται όταν είναι απαραίτητο να απομακρυνθούν συγκεκριμένα συστατικά από τα υγρά απόβλητα που δεν μπορούν να αφαιρεθούν κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία.

Δύο αποτελεσματικές μέθοδοι φιλτραρίσματος χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των αποβλήτων στην τριτοβάθμια επεξεργασία. Η πρώτη είναι η χρήση παραδοσιακών φίλτρων άμμου (Εικόνα 10), ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει τη χρήση πιο σύγχρονων υλικών μεμβράνης. Μια μέθοδος χρησιμοποιείται πρόσφατα είναι η διήθηση δίσκου, όπου γίνεται σύνδεση μεγάλων δίσκων υφάσματος και περιστρεφόμενων τύμπανων για φιλτράρισμα. Σε αυτό το στάδιο, γίνεται επίσης η απολύμανση, η οποία είναι η τελική φάση στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων πριν αυτά διατεθούν στον υδάτινο αποδέκτη (FAO, 2021). Η απολύμανση πραγματοποιείται με τη χρήση ποικίλων μεθόδων, όπως της χρήσης χλωρίου, όζοντος και UV. Εξασφαλίζεται ότι τα υγρά λύματα πληρούν όλες τις προδιαγραφές και πρότυπα για την αστική-αγροτική επαναχρησιμοποίησή τους (Amoatey & Bani, 2011).

### **1.2.4 Επεξεργασία ιλύος**

Ο σκοπός της επεξεργασίας της λάσπης είναι η μείωση της οργανικής ύλης και των παθογόνων, μικροοργανισμών και η επιστροφή της στο περιβάλλον σε όσο πιο καθαρή μορφή γίνεται (Νταράκας, 2010). Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι επεξεργασίας της λάσπης είναι η πάχυνση, η χώνευση και η αφυδάτωση (Γεωργιοπούλου, 2007).

#### **1.2.4.1 Πάχυνση ιλύος**

Πάχυνση είναι η διαδικασία που χρησιμοποιείται για την αύξηση της περιεκτικότητας της ιλύος σε στερεά με απομάκρυνση ενός τμήματος του υγρού κλάσματος. Η ιλύς των Εγκαταστάσεων Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) τυπικά περιέχει 0,8% ολικά στερεά, εντούτοις αυτά μπορούν να



συμπυκνωθούν σε ένα υλικό με 4% στερεά, κάτι το οποίο επιτρέπει μια μείωση του όγκου της ιλύος κατά 5 φορές (Arjona & Cisneros, 2005).

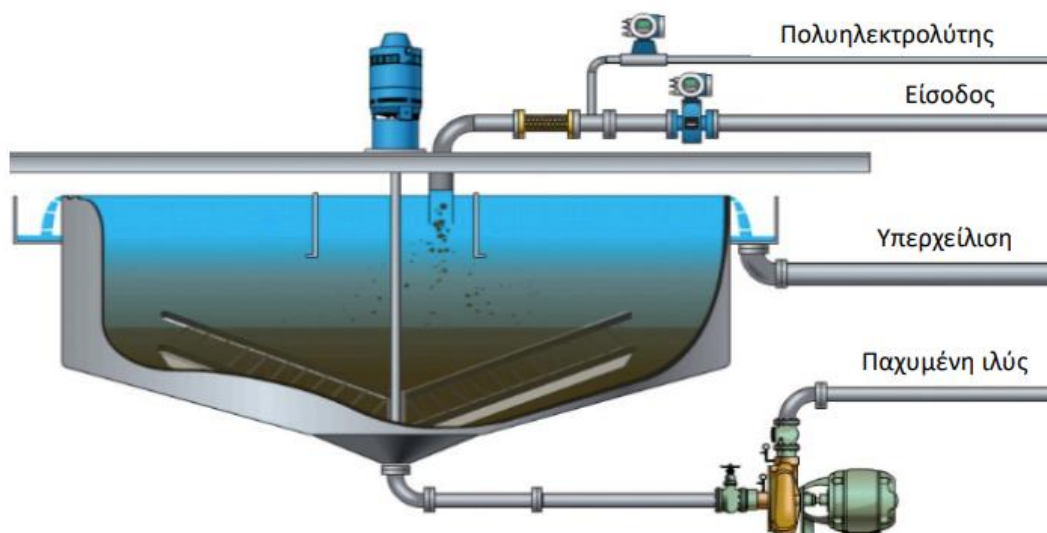
Η πάχυνση επιτυγχάνεται με φυσικό ή μηχανικό τρόπο:

- Καθίζηση (Εικόνα 12)
- Φυγοκέντρωση (Εικόνα 13)
- Κογχλία συμπίεσης (Εικόνα 14)
- Επίπλευση (Εικόνα 15)

Παράλληλα η μείωση του όγκου της ιλύος είναι απαραίτητη καθότι επιτρέπει την ευκολότερη τελική επεξεργασία της ιλύος, (χώνευση, αφυδάτωση, ξήρανση και καύση).

- **Πάχυνση με επίδραση της βαρύτητας**

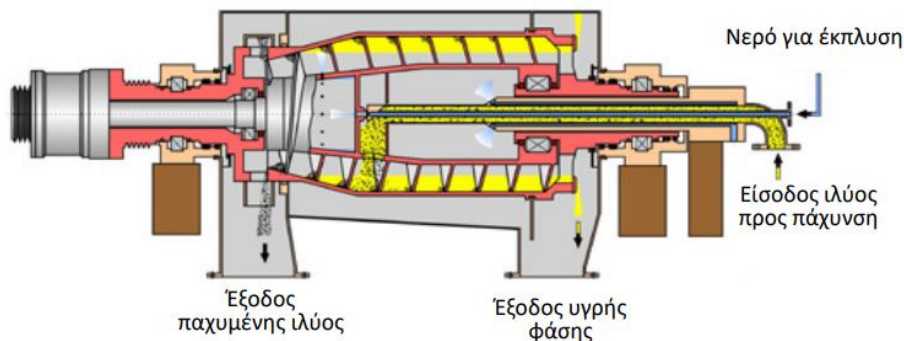
Οι δεξαμενές αυτές έχουν παρόμοιο σχεδιασμό με τις δεξαμενές καθίζησης, με κύρια διαφορά τον μεγαλύτερο λόγο βάθους προς διάμετρο. Ιλύς και πολυηλεκτρολύτης τροφοδοτούνται συνεχώς, ενώ ένα σύστημα από κατακόρυφες ράβδους ή δικτυωτό πλέγμα, στερεωμένο στον περιστρεφόμενο μηχανισμό του ξέστρου, δημιουργεί κενά. Αυτά τα κενά διευκολύνουν την άνοδο των υγρών και την καθίζηση πιο πυκνής ιλύος. Στη συνέχεια, η ιλύς συμπυκνώνεται περαιτέρω σε χοάνη που βρίσκεται στον πυθμένα, λόγω της αυξημένης υδροστατικής πίεσης από τα υπερκείμενα στρώματα (Γκίκας,2020).



Εικόνα 12: Πάχυνση με επίδραση βαρύτητας(Γκίκας,2020)

- **Πάχυνση με φυγοκέντρωση**

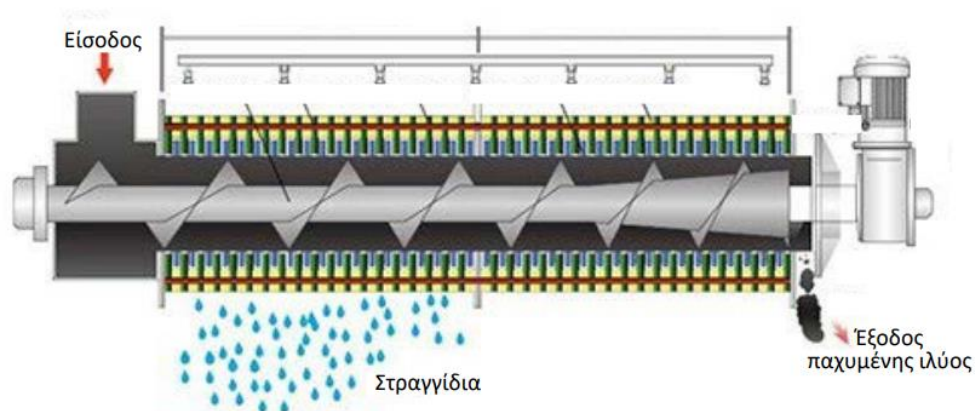
Τα συστήματα φυγοκέντρησης χρησιμοποιούνται τόσο για την πάχυνση όσο και για την αφυδάτωση της ιλύος. Στην περίπτωση της πάχυνσης, συνήθως εφαρμόζονται φυγοκεντρικοί παχυντές με συμπαγές περιστρεφόμενο περίβλημα (solid-bowl centrifuge). Αυτές οι συσκευές αποτελούνται από έναν κυλινδρικό θάλαμο που περιστρέφεται γύρω από έναν κοχλία, προκαλώντας την ώθηση της παχυμένης ιλύος προς τα τοιχώματα και τον διαχωρισμό της. Για τη διαδικασία αυτή, συνήθως απαιτείται η χρήση πολυηλεκτρολύτη σε ποσότητα έως 4 mg ανά κιλό ξηρών στερεών (Γκίκας, 2020).



Εικόνα 13: Πάχυνση με φυγοκέντρωση (Γκίκας, 2020)

- **Πάχυνση με κοχλία συμπίεσης**

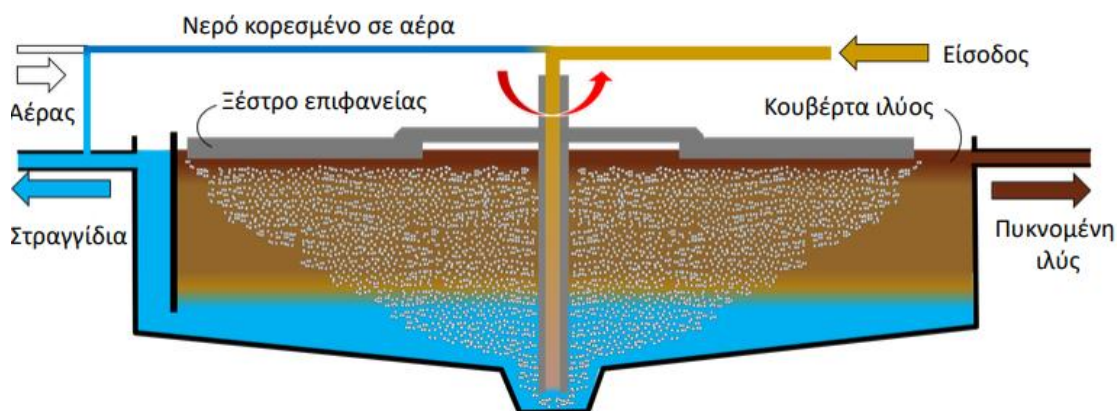
Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν κοχλίες συμπίεσης, οι οποίοι διαθέτουν προοδευτικά μειούμενο βήμα. Η ταχύτητα περιστροφής τους είναι αισθητά χαμηλότερη σε σύγκριση με τους φυγοκεντρικούς παχυντές, γεγονός που συνεπάγεται χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Για την επεξεργασία σχετικά πιο αραιών ιλύων, χρησιμοποιούνται κοχλίες με μικρότερα βήματα. Όπως και σε άλλες μεθόδους, η χρήση πολυηλεκτρολύτη είναι συνήθως απαραίτητη, σε ποσότητα έως 4 mg ανά κιλό ξηρών στερεών (Γκίκας, 2020).



Εικόνα 14: Πάχυνση με κογχλία συμπίεσης(Γκίκας,2020)

- **Πάχυνση με επίπλευση**

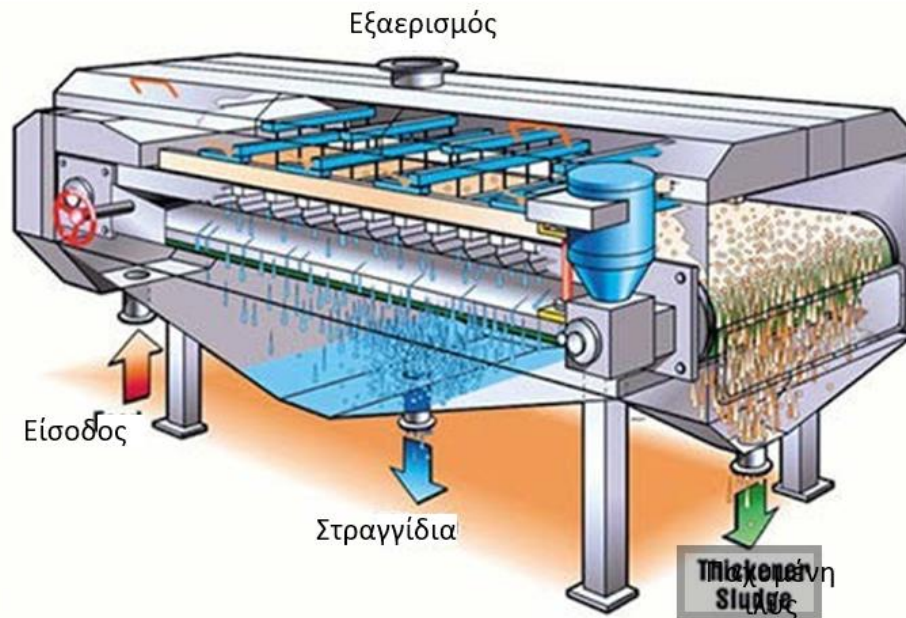
Πρόκειται για μια διεργασία παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό ιλύος από απόβλητα. Ο αέρας διαλύεται υπό υψηλή πίεση στη μάζα της ιλύος και, με την πτώση της πίεσης, απελευθερώνεται σε μορφή λεπτών φυσαλίδων. Οι φυσαλίδες αυτές μεταφέρουν τα στερεά της ιλύος προς την επιφάνεια, όπου διαχωρίζονται. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται ιδιαίτερα στην πάχυνση της ενεργού ιλύος (Γκίκας,2020).



Εικόνα 15: Πάχυνση με επίπλευση(Γκίκας,2020)

- **Τράπεζες πάχυνσης**

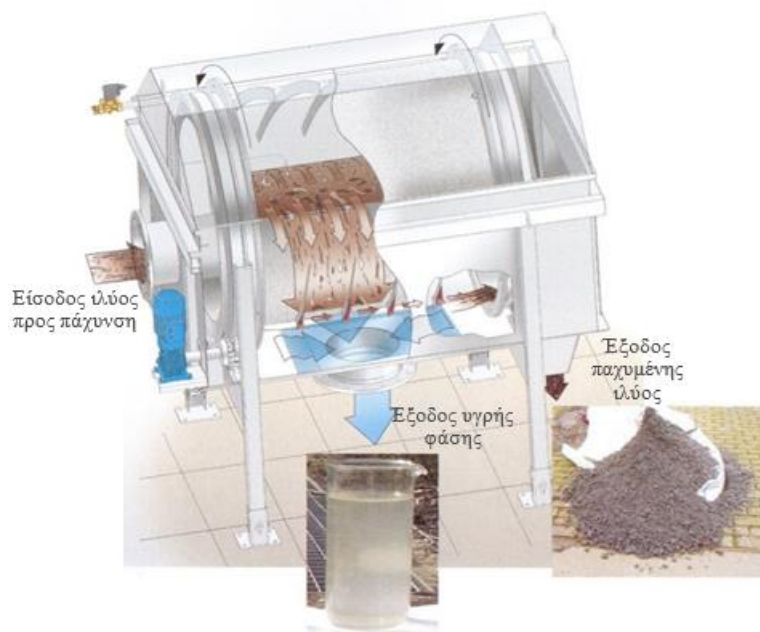
Πρόκειται για σύστημα με περιστρεφόμενο ατέρμονο φιλτρόπανο προσαρμοσμένο σε οριζόντια τράπεζα. Η ιλύς, αφού αναμειχθεί με πολυηλεκτρολύτη, τροφοδοτείται στο ένα άκρο της τράπεζας και, μέσω της περιστροφής του φιλτρόπανου, μεταφέρεται προς το άλλο άκρο. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδρομής, αποβάλλει ένα μέρος της περιεχόμενης υγρασίας. Έχουν ικανότητα απομάκρυνσης έως και 98% των εισερχομένων στερεών με χρήση πολυηλεκτρολύτη (3-7mg ανά kg ξηρής μάζας) (Γκίκας,2020).



Εικόνα 16: Τράπεζα πάχυνσης (Γκίκας,2020)

- **Πάχυνση με περιστρεφόμενα τύμπανα**

Πρόκειται για περιστρεφόμενα κυλινδρικά κόσκινα, στα οποία η κροκιδωμένη ιλύς τροφοδοτείται κατά μήκος του άξονα των τύμπανων. Με την επίδραση της περιστροφής, η ιλύς διαχωρίζεται σε συμπυκνωμένη φάση, που εξέρχεται από το άλλο άκρο των τύμπανων, και σε υγρή φάση, η οποία απομακρύνεται μέσω των κόσκινων. Έχουν ικανότητα απομάκρυνσης έως και 98% των εισερχομένων στερεών (Γκίκας,2020).



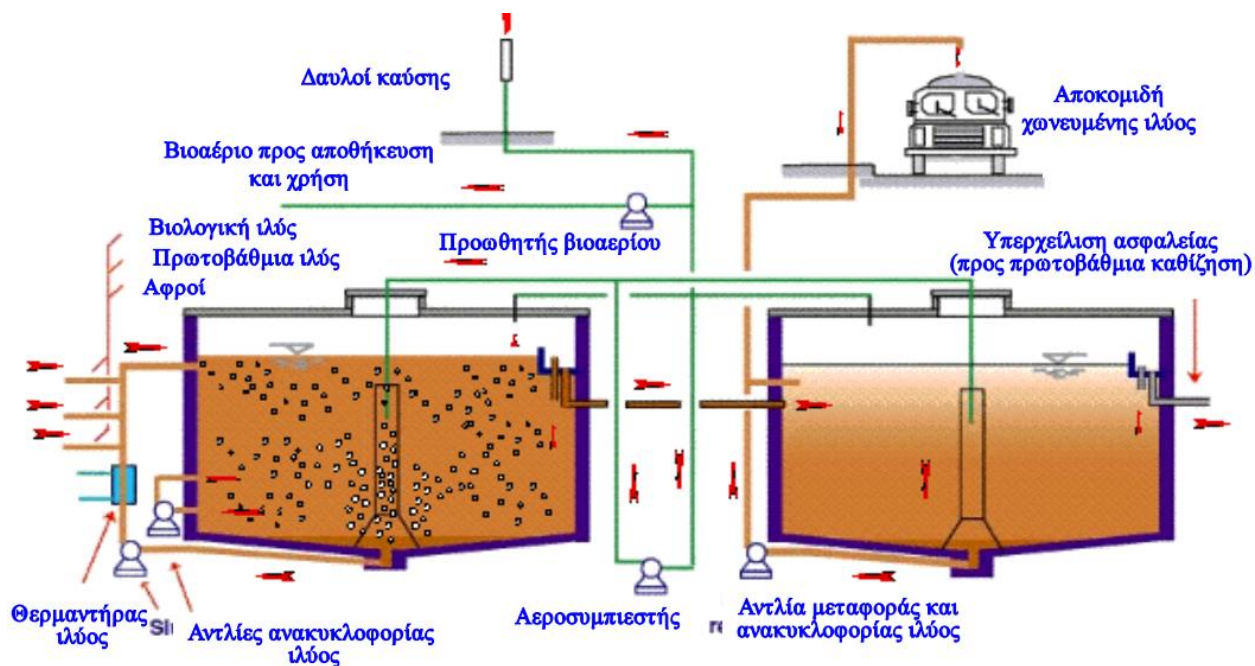
Εικόνα 17: Πάχυνση με περιστρεφόμενα τύμπανα(Γκίκας,2020)

#### 1.2.4.2 Αναερόβια χώνευση

Ως αναερόβια χώνευση μπορεί να οριστεί η βιολογική διεργασία κατά την οποία ,οποιαδήποτε οργανική ουσία, απουσία οξυγόνου, μετατρέπεται σε μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα.

Αρχικά, οι ενώσεις, όπως οι υδατάνθρακες, οι πρωτεΐνες και τα λίπη, διασπώνται από εξωκυτταρικά ένζυμα σε μικρότερα, διαλυτά μόρια. Έτσι, μπορούν να περάσουν μέσα από την κυτταρική μεμβράνη και να εισέλθουν στο εσωτερικό του κυττάρου. Στη συνέχεια, αυτές οι απλούστερες ενώσεις είτε ζυμώνονται είτε υφίστανται αναερόβια οξείδωση, παράγοντας πτητικά λιπαρά οξέα, αλκοόλες, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και αμμωνία. Τα πτητικά λιπαρά οξέα μετατρέπονται σε οξικό οξύ, υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τελικά, το παραγόμενο μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα σχηματίζονται είτε μέσω της αναγωγής του διοξειδίου του άνθρακα από το υδρογόνο είτε από τη διάσπαση του οξικού οξέος. Μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος αναερόβιας χώνευσης είναι η διεργασία υψηλής φόρτισης δύο σταδίων, η οποία περιλαμβάνει την προσθήκη μιας στατικής δεξαμενής. Αυτή η δεξαμενή συνδέεται στην έξοδο της δεξαμενής υψηλής φόρτισης, επιτρέποντας την ολοκλήρωση της διαδικασίας της χώνευσης και τον μερικό διαχωρισμό των στερεών. Στη δεύτερη δεξαμενή παράγεται λιγότερο από το 10% του συνολικού βιοαερίου (Γεωργιοπούλου, 2007).





Εικόνα 18: Διβάθμια διεργασία αναερόβιας χώνευσης ιλύος(Γκίκας,2020)

#### 1.2.4.3 Αφυδάτωση ιλύος

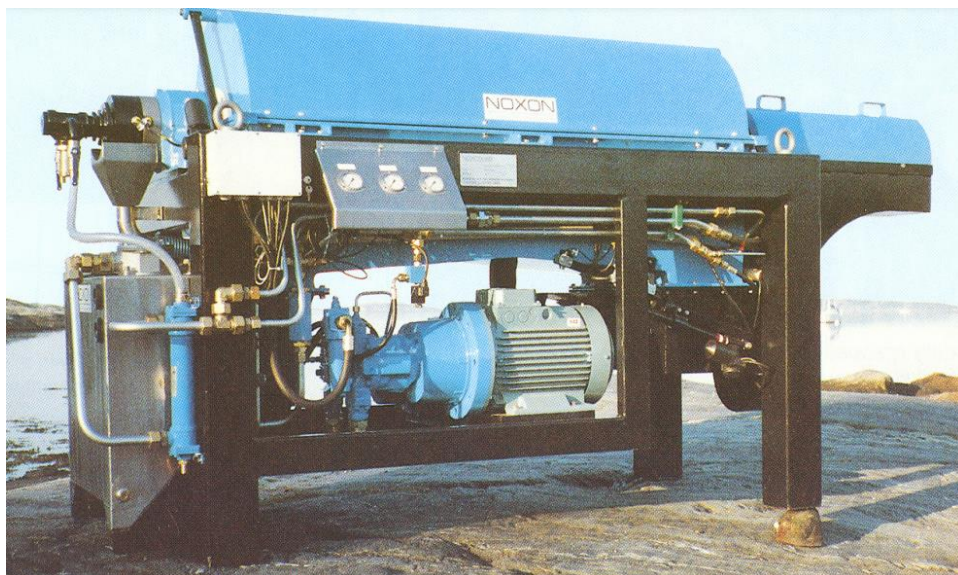
Η αφυδάτωση και η ξήρανση είναι φυσικές διεργασίες για την ελάττωση της υγρασίας, ώστε να είναι δυνατή και πιο εύκολη η περαιτέρω διαχείριση της ιλύος (Van de Roest et al., 1993; Tay and Jeyaseelan, 1993; Denkert and Retter, 1993). Σε μικρές μονάδες η αφυδάτωση γίνεται σε κλίνες ξηράνσεως ακάλυπτες ή καλυμμένες, στην περίπτωση βροχερών τόπων, ή και σε αβαθείς δεξαμενές εξατμίσεως. Επίσης υπάρχουν διάφοροι τρόποι αφυδάτωσης ιλύος όπως με

- Φυγοκέντρωση (Εικόνα 19)
- Ταινιοφιλτρόπρεσσα (Εικόνα 20)
- Ηθμούς κενού (Εικόνα 21)
- Θαλαμμοφιλτρόπρεσσα(Εικόνα 22)

Γενικά η αφυδάτωση δίνει συμπαγές προϊόν με υγρασία 55%-70% εκτός από τη θερμική ξήρανση, που ελαττώνει την υγρασία κάτω του 10% (Gruter et al., 1990).

- **Αφυδάτωση με φυγοκέντρωση**

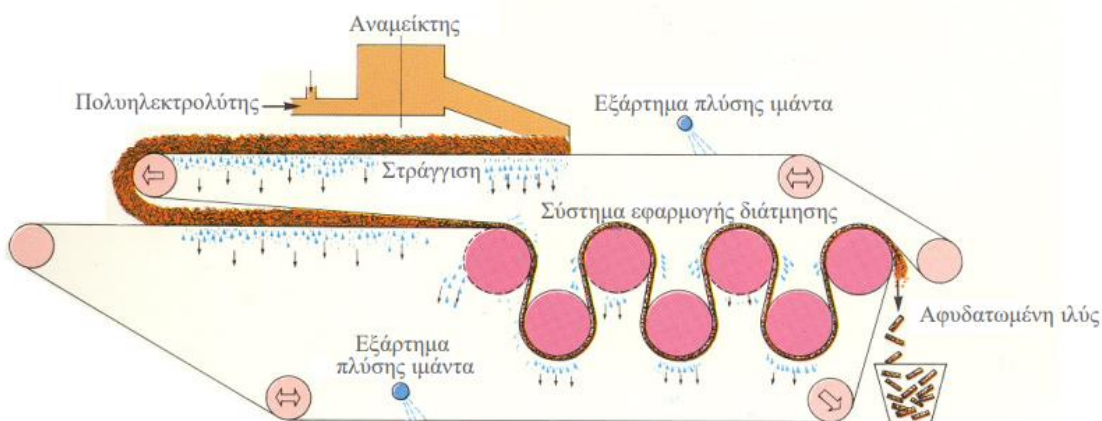
Η μέθοδος επιτυγχάνει τον διαχωρισμό ενός σχεδόν στερεού συμπυκνώματος από την υγρή φάση μέσω της ανάπτυξης υψηλών περιστροφικών επιταχύνσεων. Η διεργασία μοιάζει με αυτή της πάχυνσης και μπορεί να πραγματοποιείται είτε συνεχώς είτε σε διαλείποντα κύκλο. Για την αποτελεσματική λειτουργία, απαιτείται η προσθήκη πολυηλεκτρολυτών σε ποσότητες 1-10 kg ανά τόνο ξηρής μάζας. Το τελικό προϊόν μπορεί να περιέχει ποσοστό στερεών που ξεπερνά το 30%, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ιλύος και τον τύπο του πολυηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται(Γκίκας,2020).



Εικόνα 19: Αφυδάτωση με φυγοκέντρωση(Γκίκας,2020)

- **Αφυδάτωση με ταινιοφιλτρόπρεσσα**

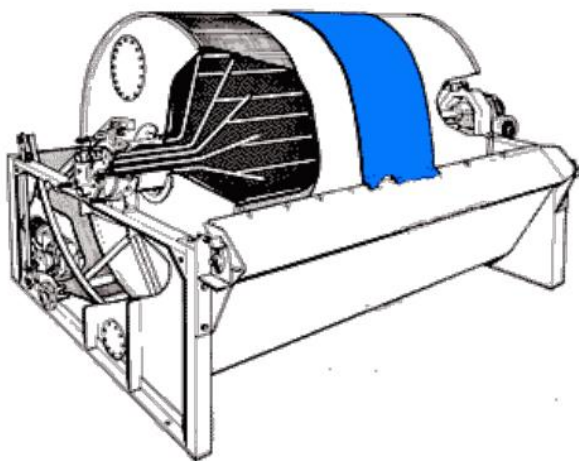
Πρόκειται για μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους αφυδάτωσης. Η ιλύς τροφοδοτείται σε έναν ιμάντα διήθησης, όπου αρχικά υφίσταται στράγγισμα μέσω δυνάμεων βαρύτητας. Στη συνέχεια, συμπιέζεται ανάμεσα σε δύο ταινίες που κινούνται παράλληλα, και τελικά ακολουθεί μια πορεία σε σχήμα «S». Κατά τη φάση αυτή, ασκούνται διατμητικές τάσεις που επιτυγχάνουν περαιτέρω απομάκρυνση του νερού. Η χρήση πολυηλεκτρολυτών είναι απαραίτητη, σε ποσότητες 1-10 kg ανά τόνο ξηρής μάζας. Το τελικό προϊόν μπορεί να περιέχει ποσοστό στερεών που ξεπερνά το 25%, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ιλύος και τον τύπο του πολυηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται(Γκίκας,2020).



Εικόνα 20: Αφυδάτωση με ταινιοφιλτρόπρεσσα (Γκίκας,2020)

- **Αφυδάτωση με ηθμούς κενού**

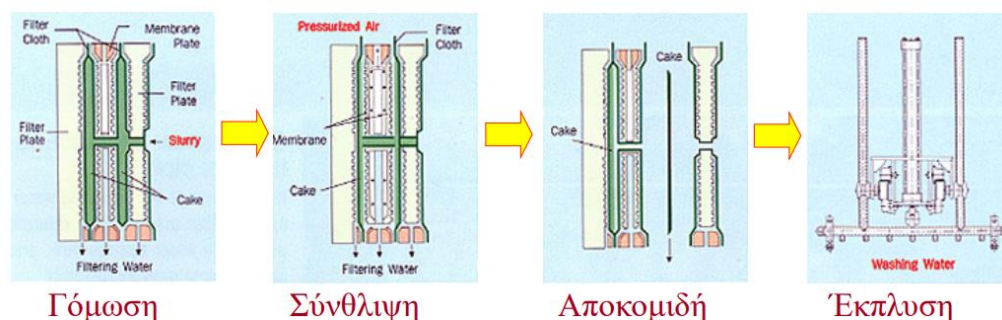
Αυτά τα συστήματα αποτελούνται από περιστρεφόμενο τύμπανο καλυμμένο με ηθμό, το οποίο βυθίζεται μερικώς στην ιλύ. Με τη δημιουργία κενού, η ιλύς προσκολλάται στην επιφάνεια του τυμπάνου, όπου αποβάλλεται μέρος της υγρασίας της. Η αφυδατωμένη ιλύς απομακρύνεται από το τύμπανο με τη βοήθεια εφαπτομενικού ξέστρου. Η μέθοδος αυτή παράγει ιλύ με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά, ενώ η χρήση πολυηλεκτρολυτών είναι απαραίτητη για την αποτελεσματικότητά της(Γκίκας,2020).



Εικόνα 21: Αφυδάτωση με ηθμούς κενού(Γκίκας,2020)

- **Αφυδάτωση με θαλαμοφιλτρόπρεσσα**

Πρόκειται για μια μηχανική διεργασία που παράγει τις υψηλότερες συγκεντρώσεις στερεών στο τελικό προϊόν. Η διαδικασία λειτουργεί κυρίως με ημιδιαλείπουσα λειτουργία, αν και υπάρχουν και μερικά μοντέλα συνεχούς έργου. Για την αποτελεσματική εφαρμογή της, απαιτείται η χρήση πολυηλεκτρολυτών(Γκίκας,2020).



Εικόνα 22: Αφυδάτωση με θαλαμοφιλτρόπρεσσα (Γκίκας,2020)



## Κεφάλαιο 2: Υδροκυκλώνες

Τον τελευταίο καιρό, οι κυβερνήσεις παγκοσμίως έχουν επισημάνει τη βελτίωση της ποιότητας ζωής μέσω φιλικών προς το περιβάλλον και μειωτικών της ρύπανσης μέτρων. Τα λύματα, αναπόφευκτο προϊόν σε πολλούς τομείς, όχι μόνο ρυπαίνει το περιβάλλον, αλλά αυξάνει επίσης τα έξοδα για την απόκτηση εξοπλισμού επεξεργασίας αποβλήτων. Είναι ευρέως αναγνωρισμένο ότι τα λύματα περιέχουν πολλά επιβλαβή σωματίδια. Η εκπομπή αυτών των σωματιδίων στον εξοπλισμό επεξεργασίας λυμάτων μπορεί να οδηγήσει σε φραγμούς και φθορά του εξοπλισμού και να μειώσει τη διάρκεια ζωής του. Συνεπώς, γίνεται αναγκαίο να απομακρύνονται τα σωματίδια από τα λύματα προτού εισέλθουν στον εξοπλισμό καθαρισμού. Ιστορικά, η απομάκρυνση των σωματιδίων βασιζόταν κυρίως στη φυσική καθίζηση, μια μέθοδος χαρακτηριζόμενη από την χρονοβόρα φύση της και την ανεπαρκή απόδοσή της. Ωστόσο, με την πρόοδο της τεχνολογίας περιστροφικής ροής, όλο και περισσότερες επιχειρήσεις επιλέγουν τους υδροκυκλώνες για την αποτελεσματική αφαίρεση μικροοργανισμών και αιωρούμενων στερεών από τα λύματα (Li et al., 2021).

Η φυγοκέντριση είναι μια πολύ συνηθισμένη μέθοδος για να διαχωρίζονται σωματίδια από ένα υγρό που έχει μικρότερη πυκνότητα. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ένας υδροκυκλώνας μπορεί να αφαιρέσει σχεδόν το 98% της άμμου που θα συγκρατούσε ένα φίλτρο με σίτα 200 mesh. Οι υδροκυκλώνες κάνουν εξαιρετική δουλειά στην απομάκρυνση της άμμου από το αρδευτικό νερό, αλλά δεν μπορούν να φιλτράρουν οργανικές ύλες. Τα νερά από γεωτρήσεις, ποτάμια και λίμνες συχνά περιέχουν μεγάλες ποσότητες άμμου, κάτι που μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα. Η άμμος μπορεί να βουλώσει τους διανεμητές των αρδευτικών συστημάτων και να προκαλέσει φθορές στις αντλίες, στις πομώνες και στα ακροφύσια (μπεκ) των εκτοξευτήρων. Για να απομακρυνθεί η άμμος από το αρδευτικό νερό, ο διαχωρισμός μπορεί να γίνει είτε κατά την αναρρόφηση είτε κατά την κατάθλιψη του αντλητικού συστήματος, αλλά και στην κεφαλή του αρδευτικού δικτύου. Η εισροή εισέρχεται στο υδροκυκλών από ένα ταγιάρ τροφοδοσίας υπό πίεση. Η γεωμετρία της τροφοδοσίας ελαχιστοποιεί την επίδρασή της στην αποτελεσματικότητα της διαχωριστικής διαδικασίας. Παρά το γεγονός ότι έχει ίδια επιφάνεια, μια ορθογώνια είσοδος είναι πιο αποτελεσματική από μια κυκλική (D. Bradley, 1965). Τα πυκνότερα και πιο σφαιρικά σωματίδια κατευθύνονται προς τον εσωτερικό τοίχο του κωνικού σώματος, από όπου κινούνται προς τον κάλυκα/ακροφύσιο για εκφόρτωση μέσω του εκρού σωλήνα. Αντίθετα, τα λιγότερο πυκνά σωματίδια κινούνται προς τα επάνω και εκφορτώνονται μέσω του σωλήνα υπερχειλίσης, ακολουθώντας την κατάλληλη διαδικασία απόρριψης αποβλήτων (D. Bradley, 1965).

## 2.1 Λειτουργία υδροκυκλώνα

Οι υδροκυκλώνες δέχονται μια ανάμεικτη ουσία μέσω της εισόδου τροφοδοσίας και υφίστανται φυγοκεντρική κίνηση που διαχωρίζει τα στερεά βάσει της πυκνότητάς τους (Bradley, 1965). Οι διαφοροποιήσεις στα μεγέθη των ακροφυσίων του υδροκυκλώνα θα οδηγήσουν σε διαφορετικά υπολογισμένα ποσοστά υδραυλικού και μαζικού διαχωρισμού για την υπερχειλίση και την υποχείλιση. Προηγούμενες έρευνες που διεξήχθησαν με υδροκυκλώνες σε πολλές εγκαταστάσεις πλήρους κλίμακας χρησιμοποίησαν έναν υδροκυκλώνα χωρητικότητας 10 m<sup>3</sup>/hr για την προώθηση βελτιωμένης ικανότητας καθορισμού, καθώς και για την υποστήριξη του σχηματισμού αερόβιου κόκκινου ιλύος (AGS). Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές πειραματικές και πρωτοβουλίες για τη βελτίωση του καθορισμού στις εγκαταστάσεις πλήρους κλίμακας για την επεξεργασία λυμάτων (Wei, 2017). Ωστόσο, έχει περιοριστεί η έρευνα που χρησιμοποιεί μεγαλύτερους υδροκυκλώνες (20 m<sup>3</sup>/hr) σε εγκαταστάσεις πλήρους κλίμακας κατά τη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας (Partin, Allison Kaitlyn, 2019).

Οι υδροκυκλώνες ή διαχωριστές άμμου λειτουργούν με βάση την αρχή της φυγοκέντρισης και της βαρύτητας.

Στην πράξη διακρίνουμε δυο τύπους :

- τους κωνικούς
- τους κυλινδρικούς υδροκυκλώνες.

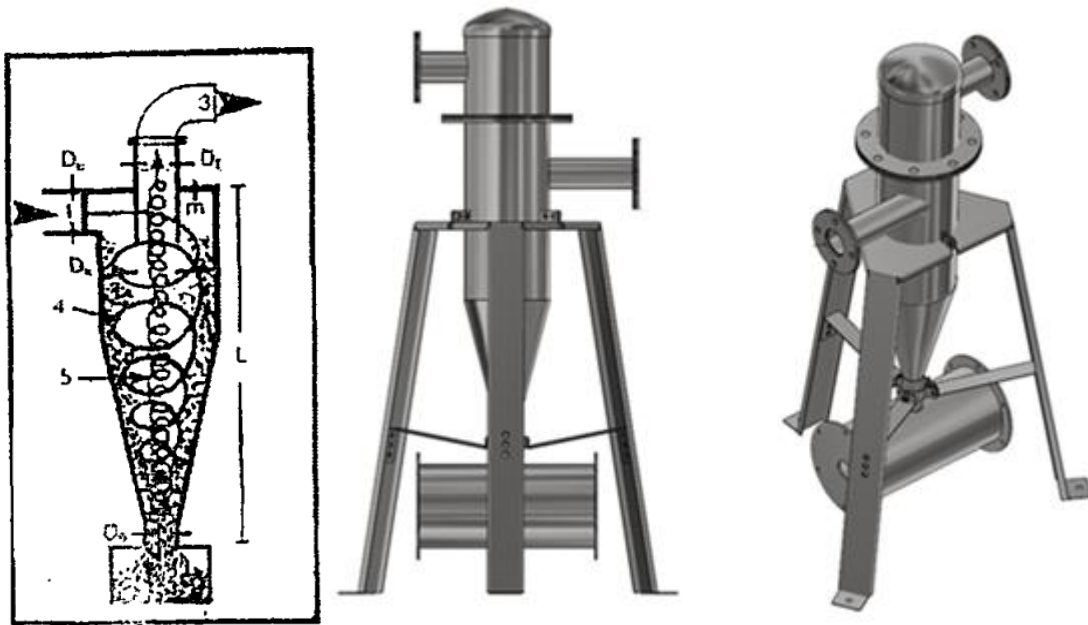
## 2.2 Είδη υδροκυκλώνα

### 2.2.1 Κωνικοί υδροκυκλώνες

Ο υδροκυκλώνας αποτελείται από δύο κύρια μέρη: ένα κυλινδρικό και ένα κωνικό τμήμα (Εικόνα 23). Το νερό εισέρχεται στο κυλινδρικό μέρος από το πλάι, με τέτοιο τρόπο ώστε η αρχική ευθύγραμμη ροή του να μετατρέπεται σε μια κυκλική κίνηση, δημιουργώντας έναν στρόβιλο που κινείται προς τα κάτω. Καθώς το νερό περιστρέφεται, τα βαρύτερα στερεά σωματίδια ωθούνται προς τα τοιχώματα λόγω της φυγόκεντρης δύναμης. Από εκεί, με τη βοήθεια της βαρύτητας, κατευθύνονται προς τον πυθμένα, όπου συγκεντρώνονται σε ειδικό θάλαμο. Κοντά στον πυθμένα, δημιουργείται ένας δεύτερος στρόβιλος, αυτή τη φορά με κίνηση προς τα πάνω, που μεταφέρει το καθαρό νερό προς την έξοδο. Αυτός ο συνδυασμός δύο αντίθετων ροών – η μία που οδηγεί τα στερεά προς τα κάτω και η άλλη που ανεβάζει το καθαρό νερό – είναι το βασικό χαρακτηριστικό που κάνει τον υδροκυκλώνα τόσο αποτελεσματικό. (Li et al., 2021). Ο εντοπιστής του στρόβιλου διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον υδροκυκλώνα, διακρίνοντας μεταξύ υλικών φιλό-αδρών και χονδρό-πυκνών. Οι τροποποιήσεις στον εντοπιστή του στρόβιλου μπορούν να επηρεάσουν το μέγεθος της υπερχειλίσης, αλλά απαιτούν αναδιάρθρωση του υδροκυκλώνα (Hwang & Chou, 2017). Για την αποφυγή βραχυκυκλώματος, ο εντοπιστής του στρόβιλου επεκτείνεται κάτω από την τροφοδοσία εισόδου (Arterburn, 1976). Επιπλέον, το μέγεθος του ακροφυσίου είναι κρίσιμο για τη διατήρηση συγκεκριμένης πίεσης και την επίτευξη αποτελεσματικού διαχωρισμού. Ένα μικρότερο ακροφύσιο περιορίζει τη ροή προς την

υποχείλιση, δημιουργώντας μεγαλύτερο όγκο στο κωνικό σώμα και αυξάνοντας το υλικό που πρέπει να διαχωρίσει ο εντοπιστής του στροβίλου για την εντοπισμό της μάζας υπερχειλίσης (D. Bradley, 1965). Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να προσαρμοστούν για να επιτευχθεί η επιθυμητή μάζα και υδραυλική διαίρεση που ευνοεί την επεξεργασία λυμάτων

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροκυκλώνα επηρεάζουν την απόδοσή του, και ο σχεδιασμός του βασίζεται σε συγκεκριμένες παραμέτρους, όπως: η διάμετρος του υδροκυκλώνα ( $D_c$ ), η διάμετρος εισόδου ( $D_i$ ), η διάμετρος υπερχειλίσης ή εξόδου ( $D_o$ ), η διάμετρος υπορροής ( $D_u$ ), το ύψος ( $L$ ), καθώς και η γωνία του κώνου ( $\theta$ ). Στη βιομηχανία, οι περισσότεροι υδροκυκλώνες βασίζονται σε αυτές τις αναλογίες. Ένας τυπικός υδροκυκλώνας είναι εκείνος που έχει σωστή γεωμετρική σχέση ανάμεσα στη διάμετρο του, στις διατομές εισόδου και εξόδου, στη γωνία του κώνου και στο ύψος του, ώστε να εξασφαλίζει επαρκή χρόνο παραμονής για τη διαχωριστική διαδικασία των στερεών υπολειμμάτων από το υγρό (Sovechles, 2018).



Εικόνα.23 :Σχηματική παράσταση κωνικού (<https://www.researchgate.net/>)

- $D_k$  : διάμετρος κυλινδρικού τμήματος
- $D_e$  : διάμετρος εισόδου
- $D_\xi$  : διάμετρος εξόδου
- $D_\theta$  : διάμετρος θαλάμου στερεών
- $L$  : μήκος υδροκυκλώνα
- $m$  : μήκος σωλήνα εξόδου)

Για να είναι αποτελεσματικός ένας υδροκυκλώνας πρέπει η κατασκευή του να εξασφαλίζει την ανάπτυξη κατά το δυνατό μεγαλύτερης φυγόκεντρης δύναμης κατά τη λειτουργία του. Η φυγόκεντρη δύναμη δίνεται από τον τύπο :

$$F = \frac{M \times V^2}{R}$$

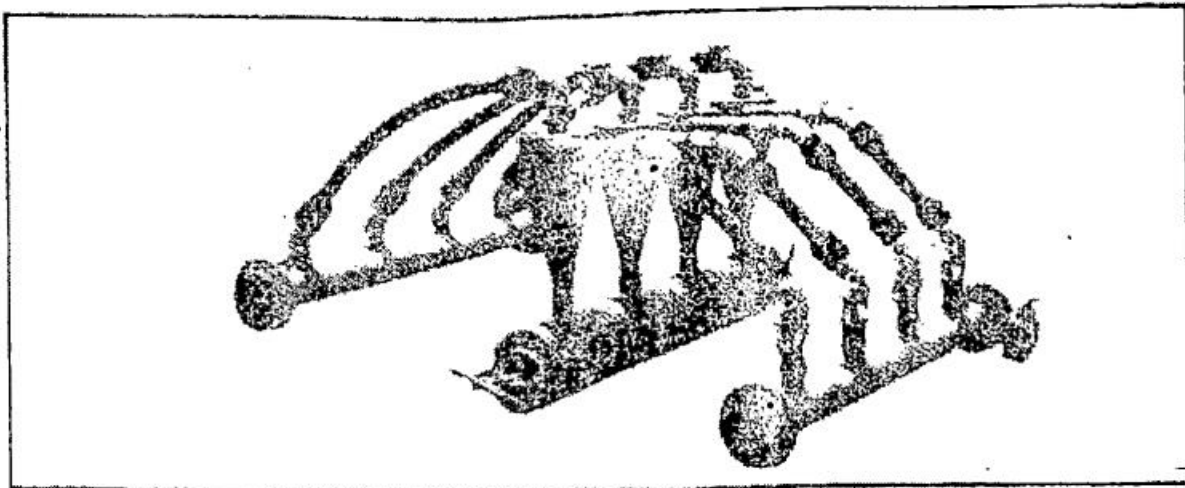
όπου :

- P : φυγόκεντρη δύναμη
- M : μάζα σωματιδίου
- V : ταχύτητα περιστροφής
- R : ακτίνα περιστροφής.

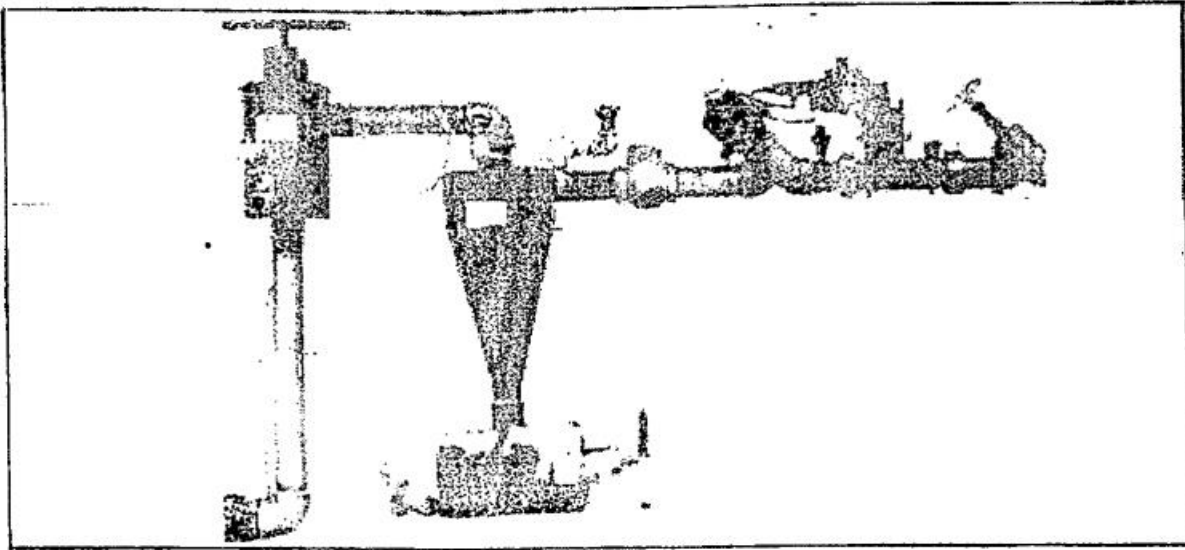
Από τον παραπάνω συμπεραίνουμε ότι ένας υδροκυκλώνας είναι αποτελεσματικός όταν :

α) Η ταχύτητα εισόδου του νερού είναι μεγαλύτερη πράγμα που για- δεδομένη παροχή απαιτεί. η διάμετρος εισόδου να είναι όσο γίνεται μικρότερη και για δεδομένη διάμετρο η παροχή να είναι μεγαλύτερη.

β) Η ακτίνα περιστροφής του νερού είναι μικρότερη πράγμα που κάνει μικρότερη τη χρήση πολλών υδροκυκλώνων μικρού μεγέθους από τη χρήση ενός υδροκυκλώνα μεγάλου μεγέθους



Εικόνα 24 : Συστοιχία κωνικών υδροκυκλώνων, συνδεδεμένων παράλληλα  
(<https://www.researchgate.net/>)



**Εικόνα 25 : Κωνικός υδροκυκλώνας σε κεφαλή δικτύου άρδευσης, με φίλτρο σίτας μετά από αυτόν (<https://www.researchgate.net/>)**

Στην πράξη πολλοί κατασκευαστές καθορίζουν με διάφορες εμπειρικές σχέσεις τις διαστάσεις των διαφόρων τμημάτων των υδροκυκλώνων που κατασκευάζουν. Μία τέτοια σχέση (Kelier και Lin, 1972) βασισμένη στη διάμετρο  $D_k$  του κυλινδρικού τμήματος του υδροκυκλώνα είναι η ακόλουθη:

- Ολικό μήκος υδροκυκλώνα:  $L = (5 \text{ έως } 8) D_k$
- διάμετρος εισόδου:  $D_e = (0,15 \text{ έως } 0,33) D_k$
- Διάμετρος εξόδου:  $D_x = (0,15 \text{ έως } 0,30) D_k$
- Είσοδος θαλάμου στερεών:  $D_\theta = (0,15 \text{ έως } 0,20) D_k$

Μήκος σωλήνα εξόδου καθαρού νερού:

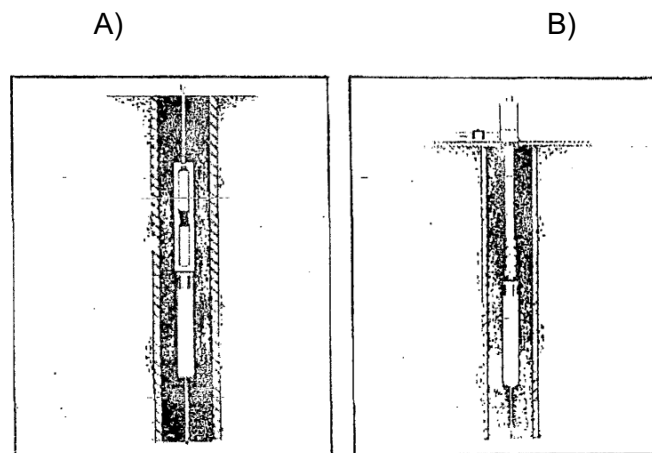
- α. Για μεγάλα μεγέθη:  $m = (0,16 \text{ έως } 0,25) D_k$
- β. Για μικρά μεγέθη:  $m = (0,33 \text{ έως } 0,50) D_k$

Στην πράξη, ο υδροκυκλώνας δεν μπορεί να καθαρίσει εντελώς το νερό, γι' αυτό συνήθως τοποθετείται ένα φίλτρο σήτας για επιπλέον ασφάλεια. Όταν το νερό περνά μέσα από τον υδροκυκλώνα, χάνει πίεση. Αυτή η απώλεια πίεσης γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η παροχή ή μειώνεται η διάμετρος του κυλινδρικού τμήματος. Παρόλα αυτά, για να δουλέψει σωστά ο υδροκυκλώνας, χρειάζεται υψηλή ταχύτητα ροής, δηλαδή μεγάλη παροχή, οπότε οι απώλειες πίεσης είναι κάτι που δεν μπορούμε να αποφύγουμε. Όταν επιλέγουμε το μέγεθος του υδροκυκλώνα για μια συγκεκριμένη παροχή, δεν πρέπει να εστιάζουμε μόνο στο να μειώσουμε όσο γίνεται τις απώλειες πίεσης. Γενικά, οι απώλειες αυτές κυμαίνονται μεταξύ 2m και 5m, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις, ακόμα και με 0,3m μπορεί να επιτευχθεί αποδεκτό επίπεδο καθαρότητας.

### 2.2.2 Κυλινδρικοί υδροκυκλώνες

Η κυλινδρική ενότητα του υδροκυκλώνα δέχεται την είσοδο πολυφασικών ροών υπό υψηλή πίεση. Όταν η φυγόκεντρος δύναμη υπερβαίνει την αντίσταση του υγρού, τα σωματίδια κινούνται προς τον τοίχο του κυλίνδρου και εκπέμπονται μέσω της πόρτας υποχείλισης. Αντίστροφα, όταν η φυγόκεντρος δύναμη είναι ανεπαρκής σε σύγκριση με την αντίσταση του υγρού, τα σωματίδια κινούνται προς το κέντρο και εξέρχονται μέσω της πόρτας υπερχείλισης. Αυτή η διπλή διαδικασία απομονώνει αποτελεσματικά τα σωματίδια μέσω της συνδυασμένης επίδρασης της κεντριφυγικής δύναμης και της βαρύτητας (Li et al., 2021).

Λειτουργούν με βάση την ίδια αρχή της φυγοκέντρισης αλλά έχουν κυλινδρικό αντί για κωνικό σώμα και επιπλέον σε μερικούς τύπους (Εικόνα 23) φέρουν περιφερειακές αυλακώσεις για τη διευκόλυνση της περιστροφής του νερού.



Εικόνα 26 : διαχωριστές-άμμου προσαρμοσμένοι σε γεωτρήσεις (<https://www.researchgate.net/>):

A) υποβρύχια αντλία

B) στροβιλοφόρος αντλία

## 2.3 Εφαρμογές υδροκυκλώνα

### 2.3.1 Εφαρμογή υδροκυκλώνα σε ΕΕΛ

Ο υδροκυκλώνας χρησιμοποιεί φυγόκεντρη κίνηση για να ταξινομεί και να διαχωρίζει τα εισερχόμενα υλικά, βάση της πυκνότητάς τους. Η γρήγορη και οικονομικά προσιτή λειτουργία του υδροκυκλώνα μπορεί να βοηθήσει μια Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) στην μείωση στερεών και εφαρμόζεται σε όλα τα στάδια της διαδικασίας (Wang, 2019). Χαρακτηριστικά παραδείγματα σε εφαρμογή υδροκυκλώνα είναι αυτά στις ΕΕΛ του Ντιζόν και του Στρας

- **Dijon, France**

Η ΕΕΛ του Ντιζόν στη Γαλλία αξιοποίησε υδροκυκλώνες με σκοπό τη βελτιστοποίηση της καθίζησης της ιλύος, όπου μειώθηκε και σταθεροποιήθηκε ο δείκτης όγκου ιλύος. Με τη διαδικασία αυτή αποδείχθηκε ότι σταθεροποιείται η λειτουργικότητα της εγκατάστασης. Η βιομάζα πυκνώθηκε με χρήση εξωτερικής βαρυμετρικής καθίζησης και με χρήση υδροκυκλώνων μέσα σε ένα βιολογικό αντιδραστήρα απομάκρυνσης θρεπτικών ουσιών με συνεχόμενη ροή (Roche, 2022).



Εικόνα 27: ΕΕΛ Ντιζόν, Γαλλία (bienpublic.com)



- **Strass, Austria**

Η ΕΕΛ που βρίσκεται στο Strass της Αυστρίας αντιμετώπιζε προβλήματα με την καθίζηση λόγω παραγόντων όπως οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και η μη συνεπής οργανική και υδραυλική φόρτιση εξαιτίας της τουριστικής κίνησης. Η εγκατάσταση των υδροκυκλώνων βελτίωσε την απόδοση καθίζησης της ιλύος. Αρχικά ο δείκτης όγκου ιλύος, ήταν 180 mL/g, μειώθηκε σημαντικά στα 100 mL/g, συνεπώς φάνηκαν οι δυνατότητες του υδροκυκλώνα (Welling, 2015).



Εικόνα 28: ΕΕΛ Στρας, Αυστία (wte.de)

### **2.3.2 Εφαρμογή υδροκυκλώνα σε διαχείριση και επεξεργασία ορυκτών πόρων**

Για την επεξεργασία των ορυκτών πόρων, οι υδροκυκλώνες χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό αιωρούμενων στερεών μέσα σε λύματα (Bradley, 1965). Η μεταλλευτική βιομηχανία τους επιλέγει λόγω της βελτιωμένης δυνατότητας διαχωρισμού με βάση το μέγεθος, της χαμηλής κατανάλωσης νερού, του μειωμένου λειτουργικού κόστους και της μικρότερης απαίτησης χώρου σε σύγκριση με άλλες συσκευές διαχωρισμού (Bradley, 1965).

Στην παραγωγή πετρελαίου, η εισροή νερού στις πηγές αποτελεί πρόβλημα εδώ και πάνω από ένα αιώνα, ιδιαίτερα κατά την ώριμη φάση ζωής μιας πετρελαιοπηγής, όταν η παραγωγή πετρελαίου συνδέεται με αυξημένα επίπεδα νερού. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο διαχωρισμός πετρελαίου και νερού μέσω υδροκυκλώνων και η απόρριψη του διαχωρισμένου νερού αποτελούν περιβαλλοντικά φιλική λύση. Αυτή η διαδικασία μειώνει το λειτουργικό κόστος, ενισχύει τη βιωσιμότητα των πετρελαιοπηγών μεγάλης παραγωγής και συμβάλλει στη μείωση της ρύπανσης (Shaw C, 2000).



### **2.3.3 Εφαρμογή υδροκυκλώνα στη βιομηχανία τροφίμων**

Οι υδροκυκλώνες βρίσκουν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή στη βιομηχανία τροφίμων, ιδιαίτερα σε διαδικασίες όπως η διύλιση αμύλου, ο καθαρισμός φρουτοχυμών και ελαίων, καθώς και στην διαχείριση αποβλήτων που παράγονται από παραγωγή τροφίμων. Ο αποδοτικός διαχωρισμός του αμύλου από την πρωτεΐνη στα πρωτογενή αγροτικά προϊόντα είναι κρίσιμης σημασίας για τη βιομηχανία τροφίμων. Μερικά κύρια προϊόντα είναι η ταπιόκα και ο κόκκος ρεβιθιού απαιτούν αποτελεσματικό διαχωρισμό αυτών των συστατικών για να καταστούν κατάλληλα για περαιτέρω επεξεργασία, και ο υδροκυκλώνας έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε αυτόν τον τομέα (Svarovsky, 1984). Στον κλάδο αυτό, η εφαρμογή πολλών υδροκυκλώνων χαμηλής τροφοδοσίας κρίνεται πιο αποτελεσματική σε σχέση με τη λειτουργία ενός και μόνο υδροκυκλώνα που επεξεργάζεται υψηλές ποσότητες τροφοδοσίας (Emami, 2005).

### **2.3.4 Εφαρμογή υδροκυκλώνα στη βιομηχανία χαρτιού**

Εφαρμογή των υδροκυκλώνων έγινε και στη βιομηχανία χαρτιού για να διαχωρίζουν μολυσμένα σωματίδια από την κυτταρινική ίνα μέσα σε υγρά εναιωρήματα, συμβάλλοντας στην παραγωγή του τελικού προϊόντος χαρτιού. Η επιτυχία αυτής της εφαρμογής οδήγησε στη διεύρυνση της χρήσης των υδροκυκλώνων σε διάφορα στάδια της διαδικασίας παραγωγής χαρτιού. Οι νέες χρήσεις περιλάμβαναν την απομάκρυνση ρύπων από διάφορα τμήματα της παραγωγής, την απομάκρυνση ρύπων με διαφορετική πυκνότητα και τη δυνητική προεπεξεργασία ινών (Covey, 2009).

### Κεφάλαιο 3: ΕΕΛ Ρεθύμνου

Η ΕΕΛ Ρεθύμνου (Εικόνα 29) βρίσκεται, 2,5 χιλιόμετρα στο δυτικό κομμάτι του Ρεθύμνου και 2 χιλιόμετρα από τον οικισμό του Ατσιπόπουλου, με έκταση 35 στρέμματα . Στην ΕΕΛ εισέρχονται τα λύματα/βοθρολύματα από τον δήμο του Ρεθύμνου , όπως και τα λύματα από βιομηχανίες της δυτικής και ανατολικής πλευράς του Ρεθύμνου, που έχουν ήδη επεξεργαστεί κατάλληλα για να παρουσιάζεται μια αντίστοιχη σύσταση με τα αστικά λύματα. Ακολουθώντας, την Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων, ΑΕΠΟ της ΕΕΛ Ρεθύμνου, Α.Π. οικ.175133/26-09-2014, η οποία έχει αναρτηθεί στον ιστότοπο του Υπουργείου Περιβάλλοντος Και Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ) τα χαρακτηριστικά σχεδίασης παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.1 και 3.1.2.



Εικόνα 29: ΕΕΛ Ρεθύμνου(<http://astikalimata.ypeka.gr>, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.175133/26-09-2014) της ΕΕΛ Ρεθύμνου)

**Πίνακας 3.1.1: Υδραυλικά και Ρυπαντικά φορτία σχεδιασμού ΕΕΛ ΡΕΘΥΜΝΟΥ**  
(<http://astikalimata.ypeka.gr>, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.175133/26-09-2014) της ΕΕΛ Ρεθύμνου)

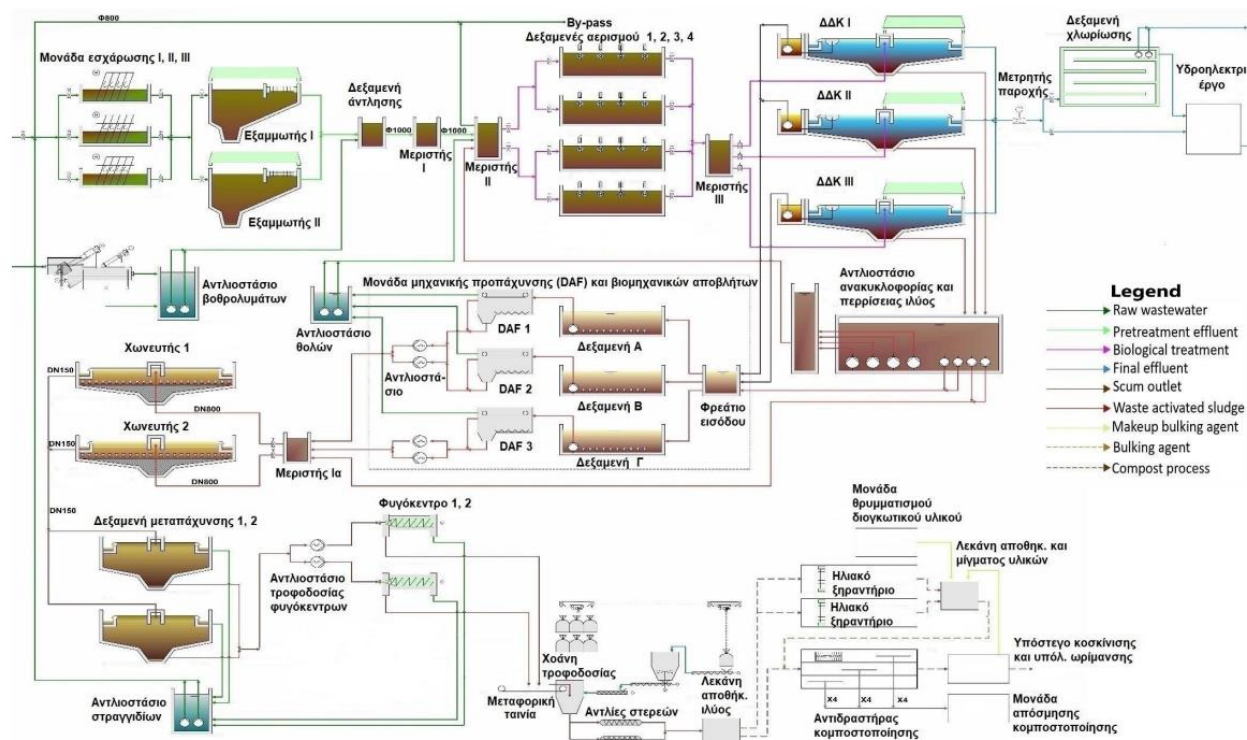
	Χειμώνας	Καλοκαίρι	Αιχμή καλοκαιριού
Ισοδύναμος πληθυσμός	96.000	126.200	151.750
Μέση ημερήσια παροχή (m <sup>3</sup> /d)	19.000	22.120	28.170
Παροχή αιχμής(m <sup>3</sup> /d)	1600	1760	2170
Παροχή βιομηχανικών αποβλήτων (m <sup>3</sup> /d)	440	300	100
Παροχή βοθρολυμάτων(m <sup>3</sup> /d)	100	150	200
BOD <sub>5</sub> (kg/d)	5760	7392	9105
SS (kg/d)	6144	5914	7284
TKN (kg/d)	768	885	1147
TP (kg/d)	288	370	445
Θερμοκρασία λυμάτων (°C)	15	24	28

**Πίνακας 3.1.2: Ποιοτικά Χαρακτηριστικά εξόδου ΕΕΛ** (<http://astikalimata.ypeka.gr>, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.175133/26-09-2014) της ΕΕΛ Ρεθύμνου)

ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΗ
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	<20
COD (mg/L)	<75
SS (mg/L)	<20
NO <sub>4</sub> -N (mg/L)	<2
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	<8
TN (mg/l)	<10
TP (mg/l)	<10
Κολοβακτηριοειδή (cfu/100 ml)	<500
Χλώριο (mg/l)	<0,5
DO(mg/l)	>5

Σύμφωνα με την ΑΕΠΟ με αριθμό 175133/26-10-2014, η εισαγωγή των λυμάτων στην ΕΕΛ Ρεθύμνου πραγματοποιείται μέσω δικτύου κεντρικών αποχετευτικών αγωγών, κεντρικού αντλιοστασίου και απο συλλεκτήριους αγωγούς. Συγκεκριμένα, τα απόβλητα μεταφέρονται με συλλεκτήριους αγωγούς και καταλήγουν στο αντλιοστάσιο που βρίσκεται στην Αγία Φωτεινή και

στη συνέχεια, μέσω δύο παράλληλων καταθλιπτικών αγωγών μήκους 2 μέτρων, φτάνουν στην ΕΕΛ. Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στην ΕΕΛ παρουσιάζονται στην Εικόνα 30.



**Εικόνα 30: Διάγραμμα ροής ΕΕΛ Ρεθύμνου (<http://astikalimata.ypeka.gr>, ΑΕΠΟ (Α.Π. οικ.175133/26-09-2014) της ΕΕΛ Ρεθύμνου)**

- 1) Φρεάτιο άφιξης λυμάτων
- 2) Μονάδα εσχάρωσης
- 3) Μονάδα εξάμμισης
- 4) Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας
  - Δεξαμενές αερισμού
  - Δεξαμενές Δευτεροβάθμιας Καθίζησης (ΔΔΚ)
  - Αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περισσειας ιλύος
- 5) Μονάδα απολύμανσης και αγωγός διάθεσης
- 6) Μονάδα επεξεργασίας ιλύος
  - Μηχανική προ-πάχυνση
  - Αερόβια χώνευση
  - Μετά-πάχυνση και μονάδα αφυδάτωσης ιλύος
  - Συνδυασμένη μονάδα ηλιακής ξήρανσης – κομποστοποίησης
- 7) Μονάδα υποδοχής-εξισορρόπησης βοθρολυμάτων
- 8) Μονάδα υποδοχής και προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων
- 9) Μονάδα βιομηχανικού νερού

### 3.1 Φρεάτιο άφιξης λυμάτων

Στην υπάρχουσα ΕΕΛ, τα υγρά απόβλητα φτάνουν απο το δίκτυο αποχέτευσης στο φρεάτιο της άφιξης, συμπεριλαμβανομένου των στραγγίδων από όλες τις μονάδες της ΕΕΛ και τα προεπεξεργασμένα απόβλητα από βιοχανίες. Όταν παρουσιάζεται έκτακτη ανάγκη, γίνεται χρήση της διάταξης παράκαμψης ( by – pass ), η οποία επιτρέπει την άμεση διοχέτευση των λυμάτων στον αγωγό εξόδου (Κεχαγιαδάκη, 2019).

### 3.2 Μονάδα εσχάρωσης

Η μονάδα εσχάρωσης είναι εγκατεστημένη στο κτίριο προ-επεξεργασίας, όπου υπάρχει πλήρες σύστημα εξαερισμού και απόσμησης. Στο εσωτερικό του κτιρίου υπάρχει το φρεάτιο άφιξης , το οποίο αποτελείται απο τρία κανάλια (ένα εκ των οποίων χρησιμοποιείται σαν εφεδρικό). Τα κανάλια είναι εξοπλισμένα με ηλεκτροκίνητα, ανοξείδωτα θυροφράγματα άνω και κάτω των εσχάρων. Η μονάδα της εσχάρωσης εμπεριέχει αυτοκαθαριζόμενες ευθύγραμμες εσχάρες, με κανάλι πλάτους 0,8 μέτρα, ράβδους πάχους 8 χιλιοστών και διάκενα 10 χιλιοστών (Κεχαγιαδάκη, 2019). Η απομάκρυνση των εσχαρισμάτων από το μηχανισμό γίνεται είτε μέσω ελέγχοντας τη διαφορική στάθμη ανάντη και κατάντη των εσχάρων είτε με χρήση χρονοδιαγράμματος. Τα εσχαρίσματα μεταφέρονται από τη χοάνη σε ειδικούς κάδους αποκομιδής μέσω μεταφορικού ιμάντα (Κεχαγιαδάκη, 2019; Δανδόλου, 2010).

### 3.3 Μονάδα εξάμμωσης

Μετά την εσχάρωση, τα λύματα κατευθύνονται σε δίδυμο αεριζόμενο εξαμμωτή. Η εξάμμωση βρίσκεται σε κλειστό κτίριο με αεραγωγούς για την απόσμηση του αέρα. Ο αερισμός των λυμάτων επιτυγχάνεται μέσω δύο φυσητήρων (ένας εκ των οποίων είναι εφεδρικός) με δυναμικότητα 330 Nm<sup>3</sup>/d και μανομετρικό 400 mbar. Ο αέρας διοχετεύεται στον εξαμμωτή μέσω διαχυτήρων χονδρής φυσαλίδας, τοποθετημένων σε βάθος περίπου 2 μέτρων (Κεχαγιαδάκη, 2019). Η άμμος συλλέγεται μέσω κινητής γέφυρας και, με τη χρήση υποβρύχιων αντλιών, οδηγείται στο αυτόματο σύστημα διαχωρισμού, όπου η αποθηκείωση της γίνεται χρήση ειδικων δοχείων αποκομιδής. Δίπλα στον εξαμμωτή βρίσκεται το κανάλι ροής(ηρεμίας), όπου τα λίπη συλλέγονται με τη βοήθεια ξέστρου κινούμενης γέφυρας και συνεχίζουν την πορεία τους σε ειδικό φρεάτιο αποκομιδής (Κεχαγιαδάκη, 2019; Δανδόλου, 2010).

### 3.4 Μονάδα βιολογικής επεξεργασίας

Η βιολογική επεξεργασία των λυμάτων γίνεται μέσω της μεθόδου παρατεταμένου αερισμού, η οποία επιτρέπει τη βιολογική απομάκρυνση του αζώτου και του φωσφόρου. Τα απόβλητα, μετά την προεπεξεργασία, μεταφέρονται με βαρύτητα στον μεριστή 1 και στη συνέχεια στον μεριστή 2, από όπου γίνεται η υπερχειλίση στις δεξαμενές αερισμού (Κεχαγιαδάκη, 2019).

### 3.4.1 Δεξαμενή αερισμού

Στη δεξαμενή αερισμού, τα λύματα υπόκεινται σε αερόβια και αναερόβια επεξεργασία έτσι ώστε αποδομηθεί και να αδρανοποιηθεί το οργανικό υλικό, καθώς και για να μειωθούν τα αζωτούχα και φωσφορούχα ρυπαντικά φορτία. Σε κάθε δεξαμενή αερισμού υπάρχει ο διαχωρισμός σε αερόβια-αναερόβια ζώνη. Στην αναερόβια ζώνη, μετατρέπονται τα νιτρικά άλατα σε αέριο άζωτο από τους μικροοργανισμούς. Παράλληλα στην αερόβια ζώνη, διασπώνται οι ενώσεις αζώτου, σε αερόβιες συνθήκες και γίνεται η μετρατροπή τους σε νιτρικά άλατα (Γκίκας,2020).

### 3.4.2 Δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης

Το μικτό υγρό κατευθύνεται στον μεριστή III και, με ένα υπόγειο αγωγό, διανέμεται στις τρεις Δεξαμενές Δευτεροβάθμιας Καθίζησης (ΔΔΚ) που έχουν κυκλικό σχήμα. Τα επεξεργασμένα απόβλητα με χρήση περιμετρικών τριγωνικών υπερχειλιστών, κατευθύνονται στο φρεάτιο εξόδου, η ιλύς που συλλέγεται από τις ΔΔΚ συγκεντρώνεται στον θάλαμο του αντλιοστασίου ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος, μέσω υπόγειου αγωγού. Μέρος της κατακαθισμένης ιλύος οδεύει προς τον μεριστή I, ενώ η υπόλοιπη οδεύει προς τη μονάδα μηχανικής προ-πάχυνσης με χρήση υποβρύχιων αντλιών. Η απομάκρυνση των επιπλέοντων στερεών επιτυγχάνεται με ξέστρο επιφανείας(ακτινικό) και οδηγούνται προς τα φρεάτια επιπλεόντων. Παράλληλα, η ΕΕΛ έχει τρεις δεξαμενές αερισμού, και έχει μια τέταρτη που κατασκευάζεται. Ο τύπος των δεξαμενών αερισμού είναι οξειδωτικής τάφρου. Ο αερισμός επιτυγχάνεται μέσω 16 επιφανειακών βραδύστροφων αεριστήρων με οριζόντιο άξονα, ισχύος 30 kW έκαστος. Η εκροή των αποβλήτων από κάθε δεξαμενή γίνεται μέσω ηλεκτροκίνητου υπερχειλιστή (Κεχαγιαδάκη, 2019).

### 3.4.3 Αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περίσσειας ιλύος

Η ιλύς που καθιζάνει από τις ΔΔΚ συγκεντρώνεται με χρήση υγρού θάλαμου στο αντλιοστάσιο. Επιτυγχάνεται ένα μέρος της ανακυκλοφορίας στις δεξαμενές αερισμού από τον μεριστή I, με τη βοήθεια από τέσσερις υποβρύχιες αντλίες, (800 m<sup>3</sup>/d και 15 kW ανα αντλία) .Η απομάκρυνση της περίσσειας ιλύος γίνεται μέσω τριών υποβρύχιων αντλιών (με μία εφεδρική) παροχής 46 m<sup>3</sup>/ημέρα και ισχύος 3 kW η καθεμία. Τελικά, μέρος της περίσσειας ιλύος πορεύεται, με χρήση καταθλιπτικού αγωγού, στη διεργασία της προ-πάχυνσης και το υπόλοιπο διοχετεύεται στους αερόβιους χωνευτές (Κεχαγιαδάκη, 2019).

## 3.5 Μονάδα απολύμανσης και αγωγός διάθεσης

Μετά τη ΔΔΚ, τα απόβλητα μεταφέρονται με βαρύτητα στη μονάδα μέτρησης παροχής μέσω καναλιού (Parshall) , καταλύγοντας στη συνέχεια στη μονάδα απολύμανσης. Εκεί, τα λύματα υποβάλλονται σε χλωρίωση για να απομάκρυνθεί το μικροβιακό φορτίο, και ακολουθεί αποχλωρίωση που εξουδετερώνεται το υπολειμματικό χλωρίο. Τα επεξεργασμένα απόβλητα διοχετεύονται μέσω αγωγού στο φρεάτιο στην είσοδο της δεξαμενής χλωρίωσης και στη συνέχεια υπερχειλίζουν σε αυτή. Η προσθήκη διαλύματος NaOCl (συγκέντρωσης 12%) γίνεται με δοσομετρική αντλία δυναμικότητας 70 L/h, η οποία ρυθμίζεται σύμφωνα με τον μετρητή παροχής, για την ολοκληρωτική επαφή του λύματος με το διάλυμα NaOCl, μέσα στη μαιανδρική δεξαμενή

(Κεχαγιαδάκη, 2019). Στη συνέχεια, τα λύματα πορεύονται προς το φρεάτιο αποχλωρίωσης, που γίνεται χρήση όξινου θειώδους νατρίου ( $\text{NaHSO}_3$ ) για την εξουδετέρωση του υπολειμματικού χλωρίου. Στην έξοδο της δεξαμενής χλωρίωσης, υπάρχει μετρητής του χλωρίου, ο οποίος ρυθμίζει αυτόματα τη δόση των δοσομετρικών αντλιών. Επιπλέον, η εγκατάσταση περιλαμβάνει υδροστρόβιλο συνδεδεμένο με γεννήτρια 60 kW για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τελικά, η διάθεση των επεξεργασμένων αποβλήτων πραγματοποιείται μέσω αγωγού εκβολής μήκους 580 μέτρων, βάθους 20 μέτρων στο κόλπο του Γρόντα, σύμφωνα με την υπ' αριθμό. 4603/12-9-1989 απόφαση (Κεχαγιαδάκη, 2019).

## **3.6 Μονάδα επεξεργασίας ιλύος**

### **3.6.1 Μηχανική προ-πάχυνση**

Η ιλύς σε περίσσεια που παράγεται στην ΕΕΛ μεταφέρεται από το αντλιοστάσιο με καταθλιπτικό αγωγό στη μονάδα μηχανικής προ-πάχυνσης. Αυτή αποτελείται από τρεις αεριζόμενες δεξαμενές προσωρινής αποθήκευσης της ιλύος και δύο συστήματα Επίπλευσης Διαλυμένου Αέρα (Dissolved Air Flotation, DAF). Συνεπώς, η ιλύς αποθηκεύεται στις τρεις δεξαμενές, με ωφέλιμο όγκο  $410 \text{ m}^3$  η καθεμία, οι οποίες είναι ορθογωνικής μορφής και από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η παροχή αέρα μέσα στις δεξαμενές γίνεται μέσω διαχυτών λεπτής φουσαλίδας. Έπειτα, τρεις αντλίες, καθεμία με δυναμικότητα  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  και ισχύ  $2,6 \text{ kW}$ , μεταφέρουν την ιλύ στα δύο συστήματα DAF. Κάθε σύστημα DAF έχει ενεργή επιφάνεια  $23 \text{ m}^2$  και είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα (Γκίκας, 2020).

### **3.6.2 Αερόβια χώνευση**

Στη διαδικασία της αερόβιας χώνευσης γίνεται χρήση των δύο πρώην Δεξαμενών Πρωτοβάθμιας Καθίζησης (ΔΠΚ), οι χωνευτές I, II, που είναι κυκλικής διατομής. Η ιλύς από τα δύο συστήματα DAF και από το αντλιοστάσιο ανακυκλοφορίας και περίσσειας οδηγείται στον μεριστή 1α, από όπου διανέμεται στους δύο χωνευτές, οι οποίοι έχουν διάμετρο 22 m, επιφάνεια  $380 \text{ m}^2$ , βάθος 3 m και ωφέλιμο όγκο  $1.150 \text{ m}^3$  (Κεχαγιαδάκη, 2019).

### **3.6.3 Μετά-πάχυνση και μονάδα αφυδάτωσης ιλύος**

Η διαδικασία μετά-πάχυνσης της ιλύος στην ΕΕΛ Ρεθύμνου περιέχει δύο κυκλικούς παχυντές βαρύτητας με διάμετρο 10 m, βάθος 4,5 m και ωφέλιμο όγκο  $520 \text{ m}^3$ . Η ιλύς τροφοδοτείται κεντρικά μέσω του τυμπάνου εισόδου του κινητού ξέστρου, και οι ειδικές κατακόρυφες ράβδοι διευκολύνουν την άνοδο των υγρών και την καθίζηση της συμπυκνωμένης ιλύος. Η παχυμένη ιλύς αντλείται προς τη μηχανική αφυδάτωση με αντλίες θετικής εκτόπισης, ενώ τα θολά νερά επιστρέφουν στην είσοδο της ΕΕΛ μέσω περιμετρικού καναλιού υπερχείλισης και υπάρχουσας εγκατάστασης απαγωγής. Το κτίριο που στεγάζει τη μονάδα αφυδάτωσης περιλαμβάνει τον εξοπλισμό με τον οποίο αφυδατώνεται η ιλύς και μεταφέρονται τα στραγγισμάτα στα έργα προεπεξεργασίας λυμάτων. Η ιλύς που έχει σταθεροποιηθεί από τους παχυντές βαρύτητας οδεύει προς αφυδάτωση μέσω δύο φυγόκεντρου τύπου διαχωριστών ( $450 \text{ kg/h}$ ). Για να μεταφερθεί το διαλύμα πολυηλεκτρολύτη στο δοχείο ανάμιξης με την ιλύ γίνεται χρήση δύο

αντλίων θετικής εκτόπισης(Κεχαγιαδάκη, 2019). Τα στραγγίσματα της ΕΕΛ συγκεντρώνονται στο φρεάτιο στραγγισμάτων και πορεύονται στην είσοδο της ΕΕΛ.

### **3.6.4 Συνδυασμένη μονάδα ηλιακής ξήρανσης – κομποστοποίησης**

Από τις λεκάνες αφυδατωμένης ιλύος-μίγματος υλικών, ένα μέρος της ιλύος οδηγείται προς τη μονάδα ηλιακής ξήρανσης (Κεχαγιαδάκη, 2019). Το μίγμα που παράγεται από τη μίξη ,του μέρους της αφυδατωμένης ιλύος, του διογκωτικού υλικού αλλά και της ιλύς που έχει ξηρανθεί καταλήγει για κομποστοποίηση

### **3.7 Μονάδα υποδοχής - εξισορρόπησης βοθρολυμάτων**

Η μονάδα υποδοχής - εξισορρόπησης για τα βοθρολυματά της ΕΕΛ Ρεθύμνου δυναμικότητας 90 m<sup>3</sup> /h , περιλαμβάνει τα εξής μέρη:

- Χονδροεσχάρα για την απομάκρυνση μεγάλου μεγέθους στερεών.
- Λεπτοεσχάρα με 6mm διάκενα. (αυτοκαθαριζόμενη)
- Αεριζόμενο εξαμμωτή
- Δεξαμενή εξισορρόπησης και προ-αερισμού με ενεργό όγκο 53m<sup>3</sup>
- Αντλιοστάσιο κατάθλιψης προς το φρεάτιο εισροής.

### **3.8 Μονάδα υποδοχής και προ-επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων**

Η μονάδα προ-επεξεργασίας των αποβλήτων από βιομηχανίες λαμβάνει απορρίμματα από βυρσοδεψία, σφαγεία και τυροκομία. Ο τρόπος προεπεξεργασίας των αποβλήτων από τις βυρσοδεψίες αποτελείται απο τη διαδικασία οξείδωσης των θειούχων ενώσεων και τη κροκίδωση χρωμίου, TSS και λιπών, ενώ τα ελαία απομακρύνονται με επίπλευση. Η συγκεκριμένη γραμμή επεξεργασίας περιέχει

- Δύο περιστρεφόμενα κόσκινα, τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου δυναμικότητας 50 m<sup>3</sup>/h
- Μέτρηση παροχής ηλεκτρομαγνητικού τύπου.
- Διόρθωση pH με διάλυμα καυστικής σόδας, εξισορρόπηση και οξείδωση
- θειούχων με αερισμό παρουσία θειικού μαγγανίου σε δίδυμη δεξαμενή εναλλασσόμενης λειτουργίας.
- Κροκίδωση και επίπλευση με διαλυμένο αέρα.



Η προ-επεξεργασία των βιομηχανικών λυμάτων από τυροκομεία-σφαγεία πραγματοποιείται μέσω χημικής κροκίδωσης των TSS, του χρωμίου και των λιπών και την απομάκρυνση των λιπών με επίπλευση. Η επεξεργασία των λυμάτων από τυροκομεία απαρτίζεται από:

- Εξισορρόπηση σε αεριζόμενη δεξαμενή και διόρθωση pH με διάλυμα καυστικής σόδας.
- Διβάθμιο αεριζόμενο βιολογικό αντιδραστήρα.
- Διοχέτευση στην αεριζόμενη δεξαμενή των σφαγείων και στη συνέχεια στη μονάδα κροκίδωσης και επίπλευσης για περαιτέρω επεξεργασία.

Η επεξεργασία των λυμάτων από σφαγεία απαρτίζεται από:

- Δύο περιστρεφόμενα κόσκινα, τύπου περιστρεφόμενου τυμπάνου δυναμικότητας 50 m<sup>3</sup>/h
- Μέτρηση παροχής ηλεκτρομαγνητικού τύπου.
- Εξισορρόπηση σε αεριζόμενη δεξαμενή και κροκίδωση που λαμβάνει χώρα με χλωριούχο πολυαργίλιο.
- Επίπλευση με διαλυμένο αέρα.

### 3.9 Μονάδα βιομηχανικού νερού

Στη μονάδα βιομηχανικού νερού της ΕΕΛ, δυναμικότητας (50 m<sup>3</sup>/h), περιλαμβάνονται οι μονάδες διήθησης, της απολύμανσης και της αποθήκευσης. Η διήθηση των επεξεργασμένων λυμάτων γίνεται με χρήση αμμοδιαλυστήριων καθοδικής ροής. Τα παραγόμενα από τη διαδικασία νερά της αντίστροφης πλύσης υπερχειλίζουν σε πλευρικά κανάλια και οδηγούνται προς το αντλιοστάσιο α. Εν συνέχεια, τα επεξεργασμένα λύματα καταλήγουν σε μια δεξαμενή απολύμανσης (200 m<sup>3</sup>). Η μονάδα βιομηχανικού νερού παρέχει σε όλα τα τμήματα της ΕΕΛ και με τη χρήση την καλύπτονται εξωτερικές ανάγκες, όπως η άρδευση και άλλες χρήσεις (Δανδόλου, 2010).

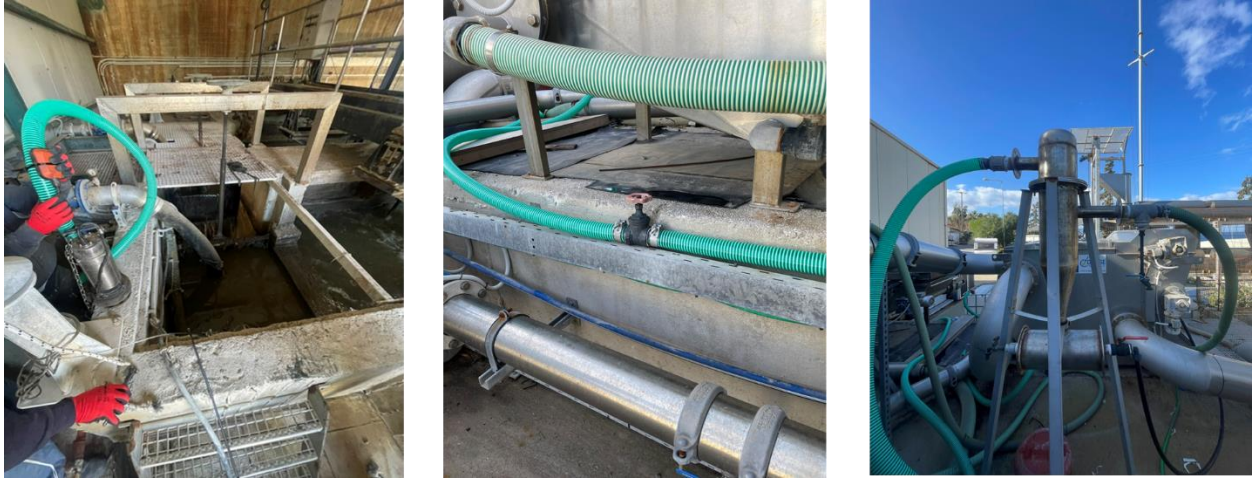
## Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία

### 4.1 Σκοπός πειράματος

Η λειτουργία του υδροκυκλώνα αποδίδεται στην εφαρμόγη φυγοκεντρικής δύναμης για το διαχωρισμό των εισερχόμενων στερεών βασιζόμενος στη πυκνότητα τους και χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες όπου μεταξύ αυτών και της επεξεργασίας αποβλήτων. Οι υδροκυκλώνες αποτελούν μια μέθοδο διαχωρισμού σωματιδίων με χαμηλό λειτουργίας, ενώ παράλληλα έχουν μειωμένες απαιτήσεις για το χώρο κατά την εγκατάστασή τους καθώς και μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση κατά τη λειτουργία τους.

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας ενός συστήματος υδροκυκλώνα στην απομάκρυνση των TSS, του BOD<sub>5</sub>, καθώς και του COD από αστικά λύματα. Όλες οι δειγματοληψίες πραγματοποιήθηκαν στην ΕΕΛ Ρεθύμνου. Επίσης, μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα του υδροκυκλώνα (Εικόνα 31) σε ένα διαφορετικές παροχές εισερχόμενων αποβλήτων με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης της ταχύτητας εισόδου του αποβλήτου στην αποτελεσματικότητα του συστήματος. Ωστόσο, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις

για την κατανομή της διαμέτρου των σωματιδίων πριν και μετά την επεξεργασία των αποβλήτων με το σύστημα υδροκυκλώνα.



**Εικόνα 31: Πειραματική διάταξη στην ΕΕΛ Ρεθύμνου.**

## **4.2 Πειραματική διάταξη- Διάγραμμα ροής**

Στην ΕΕΛ Ρεθύμνου, τοποθετήθηκε υδροκυκλώνας από ανοξείδωτο χάλυβα ASI 304 ο οποίος σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το Εργαστήριο Σχεδιασμού Περιβαλλοντικών Διεργασιών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Επιπλέον τοποθετήθηκε και μια φυγόκεντρη αντλία μέσα στο κανάλι της προεπεξεργασίας η οποία τροφοδοτεί τον υδροκυκλώνα (Εικόνες 32, 33, 34).



**Εικόνα 32: Υδροκυκλώνας ΕΕΛ Ρεθύμνου**



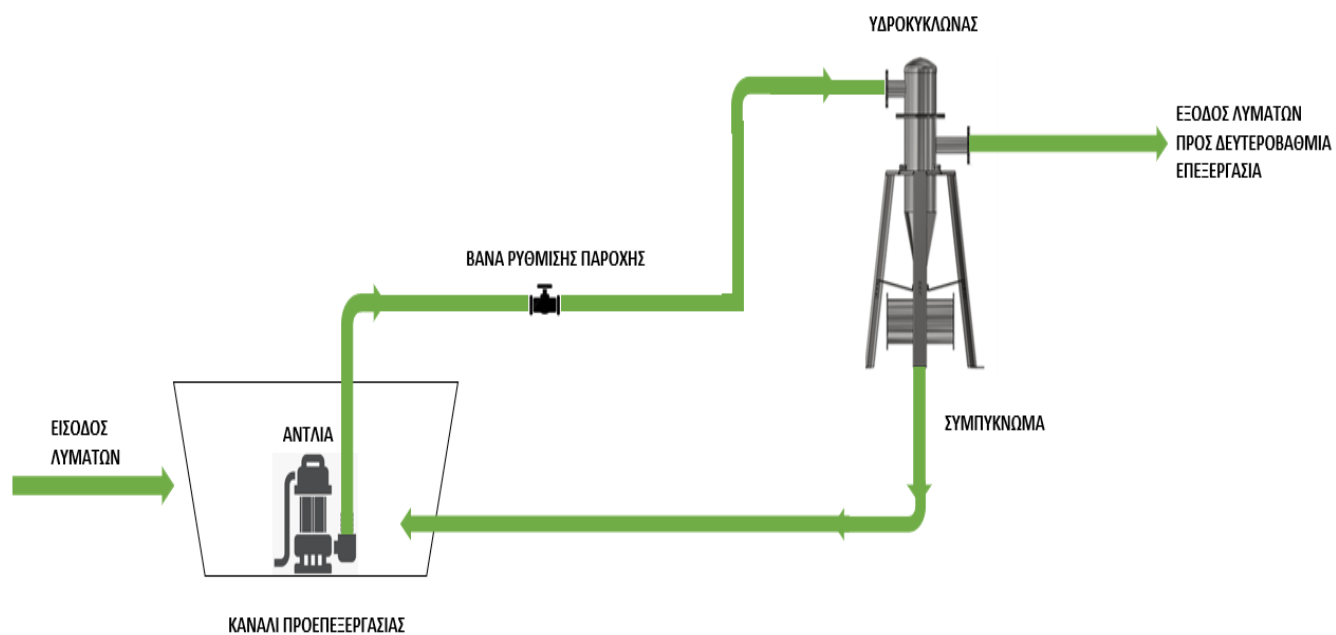
**Εικόνα 33: Τοποθέτηση φυγόκεντρης αντλίας στο κανάλι προεπεξεργασίας**



**Εικόνα 34: Κανάλι άντλησης αστικού λύματος.**

Αρχικά, τα λύματα εισέρχονται στον υδροκυκλώνα με τη βοήθεια φυγόκεντρης αντλίας. Το απόβλητο εισέρχεται εφαπτομενικά στο κυλινδρικό τμήμα του υδροκυκλώνα, όπου η ευθύγραμμη ροή του μετατρέπεται σε κυκλική, σχηματίζοντας έναν κύριο στρόβιλο που κατευθύνεται προς τα κάτω. Τα στερεά σωματίδια, όντας βαρύτερα, απωθούνται από τη φυγόκεντρη δύναμη προς την περιφέρεια, και με τη βοήθεια της βαρύτητας κατευθύνονται προς τα κάτω, όπου συλλέγονται σε ειδικό θάλαμο. Κοντά στον πυθμένα, ο κύριος στρόβιλος σχηματίζει έναν δευτερεύοντα στρόβιλο που κατευθύνεται προς τα πάνω και τελικά καταλήγει στην έξοδο. Τελικά, οι δυο εκροές λυμάτων από τις εξόδους του υδροκυκλώνα οδεύουν για περαιτέρω επεξεργασία. Η μέτρηση της παροχής γίνεται με φορητό παροχόμετρο.

Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής



Εικόνα 35: Διάγραμμα Ροής



## 4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

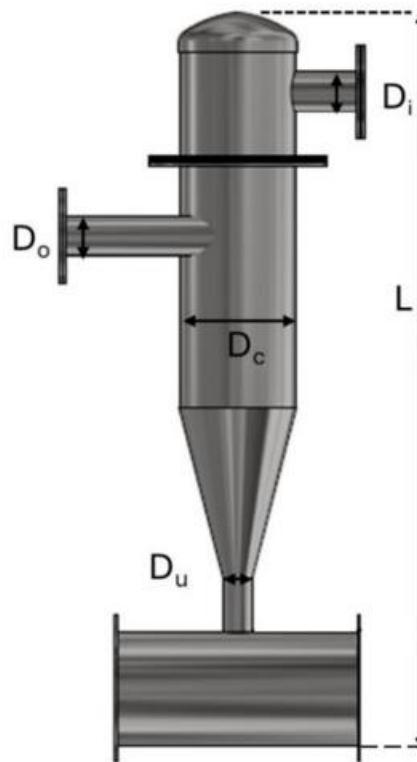
### 4.3.1 Υδροκυκλώνας

Ο υδροκυκλώνας αποτελείται από έναν κοίλο κύλινδρο στο επάνω μέρος και έναν ανεστραμμένο κώνο στο κάτω μέρος. Η λειτουργία του βασίζεται στην ανάπτυξη φυγόκεντρης δύναμης στο εσωτερικό του, καθώς το υγρό εισέρχεται εφαπτομενικά. Τα βαρύτερα σωματίδια, ακολουθώντας σπειροειδή κίνηση κοντά στα τοιχώματα, συλλέγονται στον θάλαμο συλλογής στο κάτω μέρος και απομακρύνονται μέσω της βάνας αποχέτευσης. Το καθαρό υγρό εξέρχεται από το επάνω μέρος.

Ο συγκεκριμένος υδροκυκλώνας (Εικόνα 36) σχεδιάστηκε για μέγιστη παροχή λυμάτων 50 m<sup>3</sup>/h και μέση παροχή στα 15 m<sup>3</sup>/h. Κατασκευάστηκε με χρήση ανοξείδωτου χάλυβα 304 και η διατομή εισόδου και εξόδου είναι Φ 26,5 mm. Επιπλέον έχει ύψος 1.052 mm και η διατομή υπορροής του είναι Φ 13,25 mm. Η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε για παροχές εισόδου 5, 10 και 15 m<sup>3</sup>/h.



Εικόνα 36: Υδροκυκλώνας ΕΕΛ Ρεθύμνου



**Εικόνα 37: Απεικόνιση Υδροκυκλώνα.**

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροκυκλώνα είναι τα ακόλουθα:

- $D_i$  (Διάμετρος εισόδου) =  $D_o$  (Διάμετρος υπερχείλισης) =  $\Phi$  26,5 mm
- $D_c$  (Διάμετρος υδροκυκλώνα) = 186 mm
- $D_u$  (Διάμετρος υπορροής) =  $\Phi$  13,25 mm
- $L$  = 1.025 mm



## Κεφάλαιο 5: Μέθοδοι ανάλυσης

Η δειγματοληψία διεξήχθη κατά κύριο λόγο υπό αίθριες καιρικές συνθήκες, ώστε οι μετρήσεις να παραμείνουν αναλλοίωτες. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε από το κανάλι της προεπεξεργασίας το οποίο είναι συνδεδεμένο με τον υδροκυκλώνα. Ο υδροκυκλώνας διαθέτει μία είσοδο και δύο εξόδους: μία για το συμπύκνωμα και μία για την έξοδο του επεξεργασμένου ρεύματος. Τα δείγματα συλλέγονταν σε μπουκάλια χωρητικότητας 1,5 L και μεταφέρονταν στο Πολυτεχνείο Κρήτης για τη μέτρηση των απαιτούμενων χαρακτηριστικών. Τα δείγματα μεταφέρονταν άμεσα για ανάλυση, με στόχο τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας μέσω της άμεσης επεξεργασίας την ίδια ημέρα. Στην περίπτωση που δεν ήταν δυνατή η άμεση ανάλυση, τα δείγματα διατηρούνταν σε ψυγείο στους 5°C για μέγιστο χρονικό διάστημα μιας ημέρας.

### 5.1 Μέτρηση TSS

Η μέτρηση των TSS εκτιμά την ποσότητα όλων των αιωρούμενων στερεών που βρίσκονται στο νερό, ακολουθώντας την πρότυπη μέθοδο "Standard Method (solids 2540)." Η διαδικασία περιλαμβάνει την πλήρη εξάτμιση του δείγματος, την ξήρανσή του στους 105 °C και τη ζύγιση του υπολείμματος, με την τελική ποσότητα των στερεών να εκφράζεται σε mg/L. Για την ανάλυση των TSS χρησιμοποιήθηκε μια συσκευή διήθησης, η οποία λειτουργεί υπό συνθήκες κενού, εξασφαλίζοντας ακρίβεια στη μέτρηση. Χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα (Whatman Glass microfiber filters, Grade 934, διαμέτρου 0,45 μm) τοποθετημένα σε φύλλα αλουμινόχαρτου. Αρχικά, γινόταν η ζύγιση των φίλτρων, μαζί με τη βάση τους σε ζυγό ακριβείας (Kern & Sohn ABJ-NM), ώστε να εξασφαλιστεί ακριβής μέτρηση της αρχικής μάζας. Στη συνέχεια, τα φίλτρα τοποθετούνταν στη συσκευή και υγραίνονταν με αποιονισμένο νερό για σωστή εφαρμογή στη βάση. Ακολούθως, 25 ml δείγματος περνούσαν μέσα από το φίλτρο, συγκρατώντας τα αιωρούμενα στερεά στην επιφάνειά του. Μόλις το φίλτρο αφυδατωνόταν, ολοκληρωνόταν η διήθηση και το φίλτρο εισαγόταν σε φούρνο ξήρανσης (Memmert 'UL50' Lab Oven) για 60 λεπτά στους 103-105°C, ώστε να απομακρυνθεί πλήρως η υγρασία.



**Εικόνα 38: Αναλυτικός ζυγός (Παντίδου, Α. και Αντέλλη, Κ., 2019)**



**Εικόνα 39: Φούρνος Ξήρανσης (Παντίδου, Α., Αντέλλη, Κ., 2019)**

Μετά τη διαδικασία θέρμανσης, τα φίλτρα τοποθετούνταν σε αφυγραντήρα για 10 λεπτά, ώστε να διασφαλιστεί η πλήρης απομάκρυνση της υγρασίας. Έπειτα, κάθε φίλτρο ζυγιζόταν ξανά. Η διαφορά στο βάρος κάθε φίλτρου, αντιστοιχούσε στην τελική συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών ( mg/L TS). Η διαδικασία πραγματοποιούνταν εννέα φορές: τρεις μετρήσεις για το δείγμα της εισόδου στον υδροκυκλώνα, τρεις για το δείγμα εξόδου από τον υδροκυκλώνα, και τρεις για το συμπύκνωμα του υδροκυκλώνα. Συνεπώς υπολογίστηκε ο μέσος όρος της ποσοστιαίας απομάκρυνσης αιωρούμενων στερεών από τα δείγματα.



Εικόνα 40: Αφυγραντήρα/Ξηραντήρας (Παντίδου, Α., Αντέλλη, Κ., 2019)

## 5.2 Μέτρηση BOD<sub>5</sub>

Ο προσδιορισμός του BOD<sub>5</sub> πραγματοποιήθηκε με χρήση μανομέτρου, η οποία βασίζεται στη μέτρηση της διαφοράς πίεσης που αναπτύσσεται σε μια ερμητικά κλειστή φιάλη που περιέχει το δείγμα (Παντίδου & Αντέλλη, 2019). Το βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο είναι μία μέτρηση του οξυγόνου που καταναλώνεται για την βιοαποικοδόμηση της οργανικής ύλης ενός δείγματος νερού σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (5 ημέρες στους 20 °C) και είναι ανάλογο του ποσού του οργανικού υλικού που είναι διαθέσιμο. Οι μονάδες μέτρησης του BOD είναι mg O<sub>2</sub>/L ή ppm O<sub>2</sub> (Παντίδου & Αντέλλη, 2019). Ο όγκος του δείγματος επιλέγεται ανάλογα με την αναμενόμενη τιμή του BOD<sub>5</sub>, και το τελικό αποτέλεσμα της μέτρησης προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό με έναν κατάλληλο συντελεστή (Παντίδου & Αντέλλη, 2019). Για την μέτρηση του BOD<sub>5</sub> χρησιμοποιήθηκαν τα εξής :

- Αντιδραστήριο NaOH
- Μπουκάλια δειγματοληψίας BOD
- Λαιμός (καουτσούκ) για την ορθή τοποθέτηση του NaOH
- Σύστημα μαγνητικού αναδευτήρα από Teflon
- Συσκευές μέτρησης BOD (WTW OxiTop)
- Μαγνητική βάση ανάδευσης (WTW IS6 Stirrer)
- Ψυχώμενος επωαστικός κλίβανος (Pol-Eko ST2)

**Πίνακας 5.2.1 Όγκοι δείγματος για ανάλυση BOD (Παντίδου, Α. και Αντέλλη, Κ., 2019)**

Όγκος δείγματος (mL)	Κλίμακα μέτρησης (mg O <sub>2</sub> /L)	Συντελεστής
432	0-40	1
365	0-80	2
250	0-200	5
164	0-400	10
97	0-800	20
43,5	0-2000	50
22,7	0-4000	100



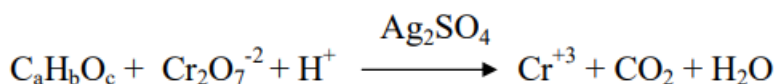
**Εικόνα 41: Φιάλες BOD με ειδικά πώματα OxiTop, τοποθετημένες σε σύστημα μαγνητικού αναδευτήρα (Παντίδου, Α. και Αντέλλη, Κ., 2019)**

### 5.3 Μέτρηση COD

Το COD αποτελεί δείκτη της ποσότητας οργανικών ουσιών στο δείγμα που μπορούν να οξειδωθούν μέσω χημικών διαδικασιών. Περιλαμβάνει τόσο τις ενώσεις που μπορούν να υποστούν βιολογική οξείδωση όσο και αυτές που δεν οξειδώνονται βιολογικά, γεγονός που εξηγεί γιατί οι τιμές του COD είναι πάντα υψηλότερες από εκείνες του BOD. Το COD εκφράζεται ως η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για τη χημική οξείδωση της οργανικής ύλης του δείγματος. Οι μονάδες μέτρησης είναι mg O<sub>2</sub>/L ή ppm O<sub>2</sub> (Παντίδου & Αντέλλη, 2019).

Για τον προσδιορισμό του COD εφαρμόστηκε η μέθοδος Standard Method (COD 5220), με τη χρήση αντιδραστήρα. Η διαδικασία περιλάμβανε τη χρήση συγκεκριμένων αντιδραστηρίων, τη

θέρμανση των δειγμάτων σε θερμοαντιδραστήρα όπου τοποθετούνταν τα φιαλίδια, και την τελική μέτρηση με φωτόμετρο για τον υπολογισμό των τιμών του COD. Χρησιμοποιήθηκε ως οξειδωτικό ένα διάλυμα διχρωμικού καλίου ( $K_2Cr_2O_7$ ), το όξινο περιβάλλον εξασφαλίζεται με πυκνό θειικό οξύ ( $H_2SO_4$ ) και ως καταλύτης χρησιμοποιήθηκε θειικός άργυρος ( $Ag_2SO_4$ ). Η θερμοκρασία χώνευσης είναι  $150\text{ }^{\circ}C$  για 2 ώρες (Παντίδου & Αντέλλη, 2019). Σχηματικά, η συντελούμενη αντίδραση είναι η ακόλουθη:



Στα δείγματα εφαρμόστηκε αραίωση 1:8. Συγκεκριμένα, στο φιαλίδιο που περιείχε το αντιδραστήριο Hach LCK 314 (με εύρος μέτρησης 15-150 mg/l) προστέθηκαν 0,25 ml δείγματος και 1,75 ml απιονισμένου νερού. Στη συνέχεια, τα φιαλίδια τοποθετήθηκαν στον θερμοαντιδραστήρα για 2 ώρες. Η τελική συγκέντρωση του COD υπολογίστηκε πολλαπλασιάζοντας την ένδειξη του φασματοφωτόμετρου επί 8.

#### 5.4 Μέτρηση μεγέθους σωματιδίων

Η κατανομή σωματιδίων μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της μεθόδου σκέδασης ακτινών λέιζερ, η οποία επιτρέπει τη μέτρηση της κατανομής μεγέθους των σωματιδίων και τον υπολογισμό του μέσου μεγέθους τους σε ένα εύρος από 0,01 έως 2000  $\mu m$ . Το δείγμα μπορεί να εισαχθεί είτε ως υδατικό αιώρημα είτε σε ξηρή μορφή. Τα λογισμικά των συσκευών παρέχουν διάφορα μοντέλα κατανομής μεγέθους κόνεων, επιτρέποντας στον χρήστη να επιλέξει εκείνο που ταιριάζει καλύτερα στην ανάλυση των αποτελεσμάτων σκέδασης (Μπατιστάτος Ν., 2017). Τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν το ευρύ φάσμα μετρήσεων, τη γρήγορη παροχή ακριβών αποτελεσμάτων και την ευκολία επανάληψης της διαδικασίας για πολλαπλά δείγματα. Επιπλέον, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε δείγματα διαφορετικών μορφών (στερεά ή αιωρήματα). Στην παρούσα εργασία, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατανομής των σωματιδίων (Μπατιστάτος Ν., 2017).

Η ποσότητα του δείγματος που εισάγεται για μέτρηση εξαρτάται από τον δείκτη συσκότισης (obscuration), ο οποίος πρέπει να ξεπερνά το 10. Ο δείκτης αυτός αντανακλά τον αριθμό των σωματιδίων που εισέρχονται στο όργανο για ανάλυση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ισοδύναμες σφαιρικές διαμέτρους, παρόλο που τα σχήματα των σωματιδίων μπορεί να διαφέρουν (Μπατιστάτος Ν., 2017). Στο μπροστινό τμήμα του οργάνου εισάγεται το απόβλητο μαζί με νερό. Πριν την εισαγωγή, το δείγμα ανακινείται ελαφρώς ώστε να διασφαλιστεί η ομοιογένεια. Μέσα στον θάλαμο εισαγωγής, το δείγμα υπόκειται σε συνεχή ανάδευση, ενώ υπάρχει η δυνατότητα χρήσης υπερήχων για τη διάσπαση συσσωματωμάτων. Ωστόσο, η εφαρμογή των υπερήχων δεν έδειξε σημαντικές διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα, γι' αυτό και δεν χρησιμοποιήθηκαν. Το απόβλητο διοχετεύεται στα κελιά του οργάνου, όπου διαπερνάται από μια ευθυγραμμισμένη ακτίνα λέιζερ. Τα δεδομένα καταγράφονται και αποθηκεύονται αυτόματα σε υπολογιστή (Μπατιστάτος Ν., 2017).

Το όργανο μέτρησης διαθέτει προ ρυθμισμένα κλάσματα για τον προσδιορισμό του μεγέθους των σωματιδίων. Εκτός από τις καμπύλες κατανομής, ιδιαίτερη σημασία έχει ο δείκτης residual, ο οποίος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερος, ιδανικά κοντά στο μηδέν. Επιπλέον, σημαντικοί είναι οι κοκκομετρικοί δείκτες  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  και  $d_{90}$ , οι οποίοι υποδεικνύουν τις διαμέτρους κάτω από τις οποίες βρίσκεται το 10%, 50% και 90% του συνολικού υλικού αντίστοιχα. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της κατανομής των σωματιδίων είναι το Mastersizer S της εταιρείας Malvern (Μπατιστάτος Ν., 2017).

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα

Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων από την ΕΕΛ Ρεθύμνου. Συνεπώς, παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις εισόδου και εξόδου, τα ποσοστά απομάκρυνσης των χαρακτηριστικών που εξετάζονται καθώς και η Τυπική Απόκλιση (Standard deviation, SD), η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση :

$$s = \sqrt{\frac{\sum(\chi - M)^2}{N}}$$

Όπου :

- S: Τυπική απόκλιση
- $\chi$ : Τιμή του δείγματος
- M: Μέσος όρος δείγματος
- N: Αριθμός των δειγμάτων

### 6.1 Πίνακες αποτελεσμάτων

#### 6.1.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά

Στο πίνακα 6.1.1 παρουσιάζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά για τις συγκεντρώσεις των TSS, BOD<sub>5</sub> και COD στην είσοδο του υδροκυκλώνα, καθώς και οι μέσοι όροι των συγκεντρώσεων και η τυπική απόκλιση.

Πίνακας 6.1.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά εισόδου

Ημέρες δειγματοληψιών	TSS (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	COD (mg/L)
21.12.24	370,6	480	607
8.1.24	381,3	514	588
10.1.25	471	560	684
13.1.25	483	413	499
14.1.25	374,33	425	634
<b>Μέσος όρος</b>	416	478,4	602,4
<b>SD</b>	50,03	54,87	60,95



Στον πίνακα 6.1.2 παρουσιάζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά για τις συγκεντρώσεις των TSS, BOD<sub>5</sub> και COD στην έξοδο του υδροκυκλώνα, καθώς και οι μέσοι όροι των συγκεντρώσεων και η τυπική απόκλιση.

**Πίνακας 6.1.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά εξόδου**

Έξοδος	TSS (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	COD (mg/L)
21.12.24	69,33	381,6	530,5
8.1.24	256,9	393,72	498,6
10.1.25	265,17	334,88	619,7
13.1.25	254	55,75	397,7
14.1.25	265,39	343,8	490
<b>Μέσος όρος</b>	222,1	301,95	507,5
<b>SD</b>	76,54	125	71,49

Στους Πίνακες 6.1.3, 6.1.4 παρουσιάζονται τα ποιοτικά στην είσοδο και έξοδο του υδροκυκλώνα. Τις συγκεκριμένες μέρες δειγματοληψίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε τρεις διαφορετικές παροχές εισόδου (15 m<sup>3</sup>/h , 10 m<sup>3</sup>/h , 5 m<sup>3</sup>/h ).

**Πίνακας 6.1.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά για δειγματοληψία στις 15.01.25.**

Παροχές	TSS (mg/L)		BOD <sub>5</sub> (mg/L)		COD (mg/L)	
	Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος
<b>15 m<sup>3</sup>/h</b>	244	160	307	250,8	488	411,3
<b>10 m<sup>3</sup>/h</b>	244	72	307	210	488	342,6
<b>5 m<sup>3</sup>/h</b>	244	205	307	285,5	488	449

**Πίνακας 6.1.4 Ποιοτικά χαρακτηριστικά για δειγματοληψία στις 16.1.25.**

Παροχές	TSS (mg/L)		BOD <sub>5</sub> (mg/L)		COD (mg/L)	
	Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος	Είσοδος	Έξοδος
<b>15 m<sup>3</sup>/h</b>	337	204,75	446	359,47	513	411
<b>10 m<sup>3</sup>/h</b>	337	135,6	446	317,55	513	395,52
<b>5 m<sup>3</sup>/h</b>	337	252,83	446	395,6	513	457

Στον πίνακα 6.1.5 παρουσιάζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά στην έξοδο του υδροκυκλώνα για το συμπύκνωμα, καθώς και οι μέσοι όροι των συγκεντρώσεων και η τυπική απόκλιση.

**Πίνακας 6.1.5 Συγκέντρωση συμπυκνώματος**

Ημερομηνία	Συγκέντρωση συμπυκνώματος (mg/L)
21.12.24	951
8.1.25	1008,5
10.1.25	1399
13.1.25	1438,5
14.1.25	957
<b>Μέσος όρος</b>	1150
<b>SD</b>	220

Στον πίνακα 6.1.6 παρουσιάζονται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά στην έξοδο του υδροκυκλώνα για τις τρεις διαφορετικές παροχές εισόδου (15 m<sup>3</sup>/h , 10 m<sup>3</sup>/h και 5 m<sup>3</sup>/h ).

**Πίνακας 6.1.6 Συγκέντρωση συμπυκνώματος για ημέρες δειγματοληψίας 15.1 /16.1**

<b>Ημερομηνία</b>	<b>Συγκέντρωση συμπυκνώματος (mg/L)</b>
15.1.25	780,8
16.1.25	867,4
<b>Μέσος όρος</b>	824,1
<b>SD</b>	43,3

### 6.1.2 Ποσοστιαίες απομακρύνσεις

Στο πίνακα 6.1.7 παρουσιάζονται τα ποσοστά απομακρύνσεων (%) των TSS, BOD<sub>5</sub> και COD καθώς και οι μέσοι όροι των απομακρύνσεων και η τυπική απόκλιση.

**Πίνακας 6.1.7 Ποσοστά % Απομάκρυνσης**

<b>% Απομάκρυνση</b>	<b>TSS (mg/L)</b>	<b>BOD<sub>5</sub> (mg/L)</b>	<b>COD (mg/L)</b>
21.12.24	78,9	20,5	12,6
8.1.25	32,6	23,4	15,2
10.1.25	43,7	40,2	9,4
13.1.25	47,4	13,5	20,3
14.1.25	29,1	19,1	22,7
<b>Μέσος όρος</b>	46,34	23,34	16,04
<b>SD</b>	17,63	9,02	4,88

Στο πίνακα 6.1.8 παρουσιάζονται τα ποσοστά απομακρύνσεων (%) των TSS ,BOD<sub>5</sub>, COD καθώς και οι μέσοι όροι των απομακρύνσεων και η τυπική απόκλιση. Τις συγκεκριμένες μέρες πραγματοποιήθηκαν πειράματα με τρεις διαφορετικές παροχές εισόδου (15 m<sup>3</sup>/h , 10 m<sup>3</sup>/h , 5 m<sup>3</sup>/h ).

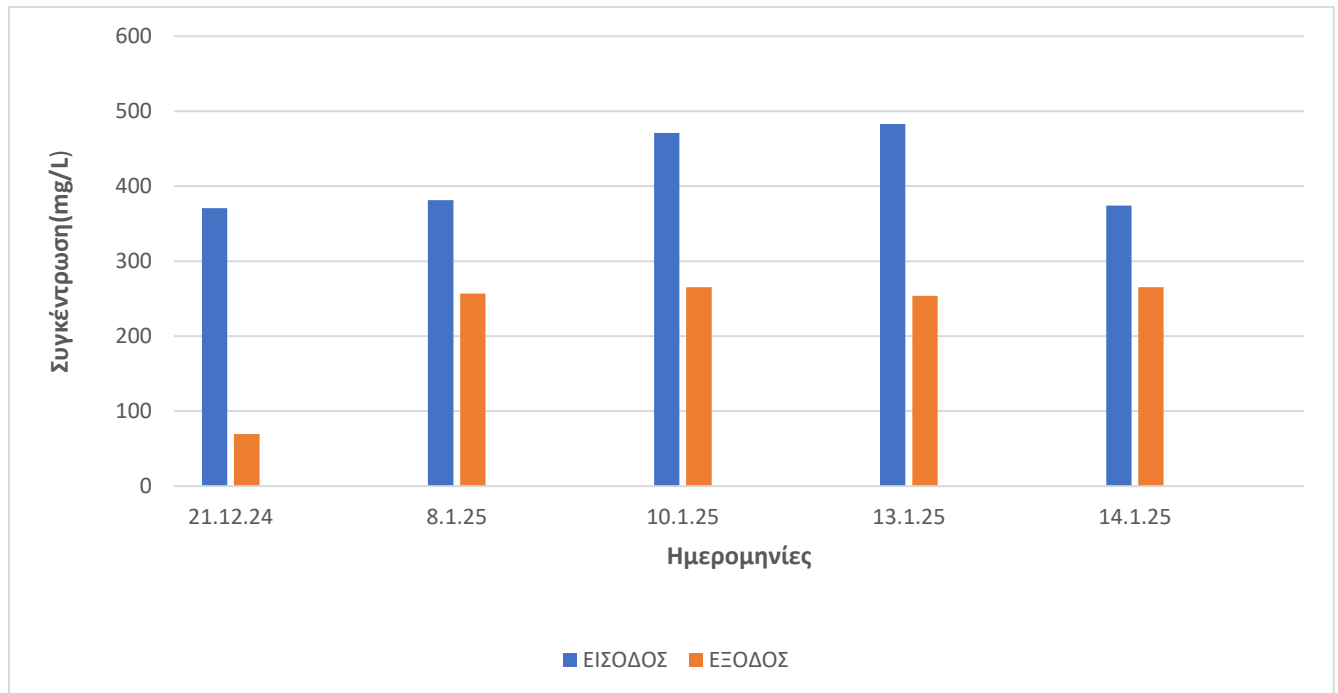
**Πίνακας 6.1.8 Ποσοστιαίες απομακρύνσεις για διαφορετικές παροχές εισόδου.**

<b>Απομάκρυνση(%)</b>	<b>TSS (mg/L)</b>			<b>BOD<sub>5</sub> (mg/L)</b>			<b>COD (mg/L)</b>		
	<b>15 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>10 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>5 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>15 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>10 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>5 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>15 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>10 m<sup>3</sup>/h</b>	<b>5 m<sup>3</sup>/h</b>
<b>15.1.25</b>	34.4	70.4	15.9	18.3	31.6	7	15.7	29.8	8
<b>16.1.25</b>	38.7	59.4	24.3	19.4	28.8	11.3	17.1	22.9	10.9
<b>Μέσος όρος</b>	36.55	64.9	20.1	18.55	30.2	9.15	16.4	26.35	9.45
<b>SD</b>	2.15	5.5	4.2	1.4	4.5	0.55	3.45	1.45	0.7

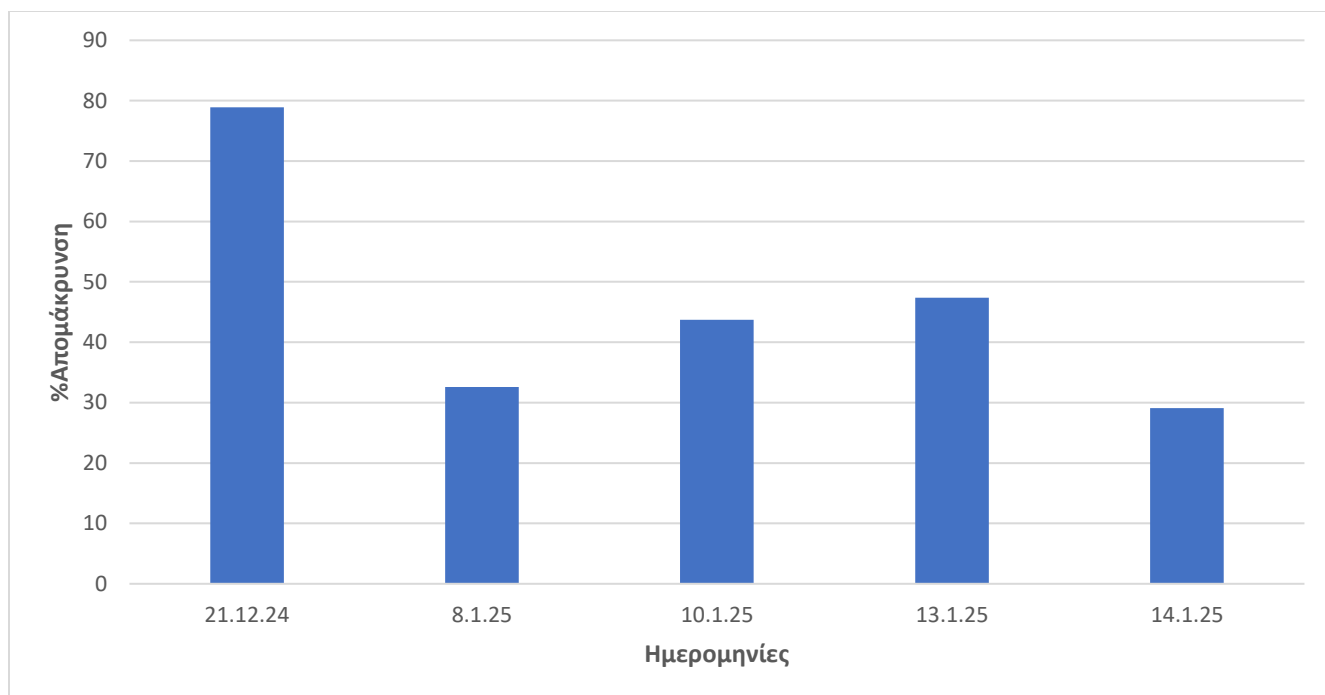
## 6.2 Διαγράμματα αποτελεσμάτων

### 6.2.1 Συγκεντρώσεων – Απομάκρυνσης

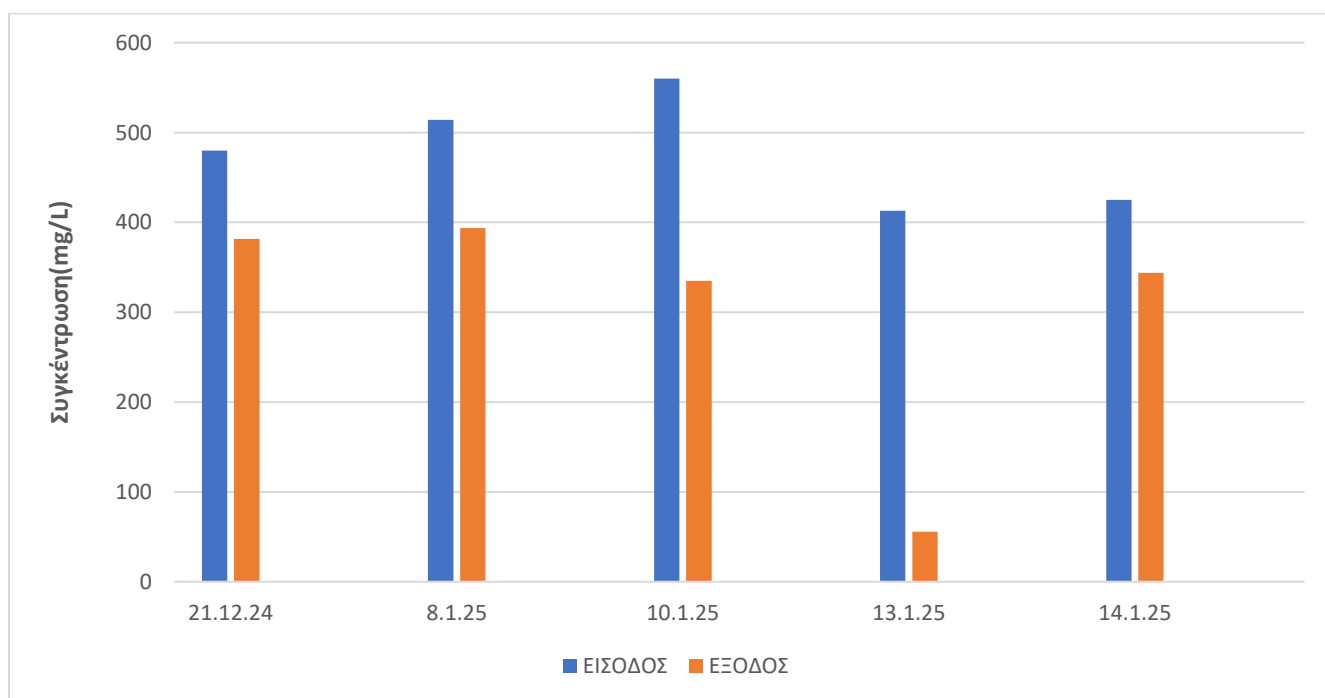
Στα διαγράμματα 6.1 έως 6.6 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου των BOD<sub>5</sub>, COD, TSS καθώς και οι αντίστοιχες απομακρύνσεις τους για την επεξεργασία των αποβλήτων με τη χρήση συστήματος υδροκυκλώνα.



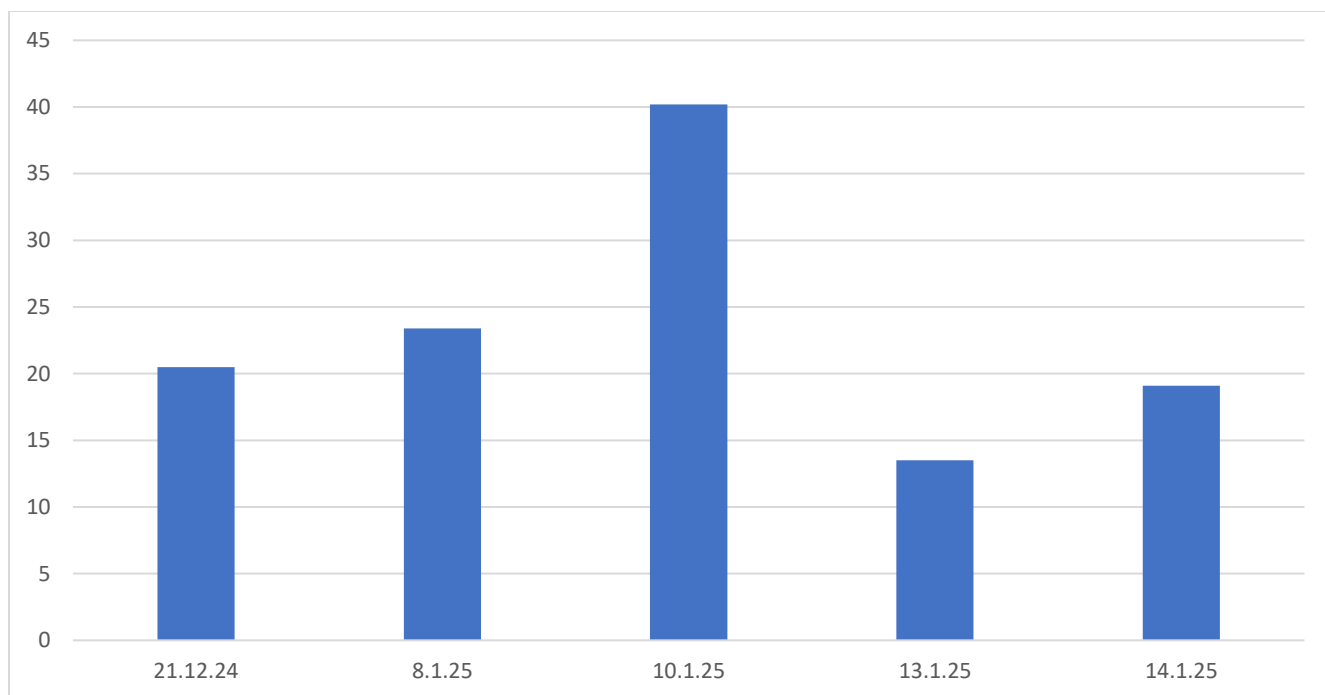
Διάγραμμα 6.1: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου TSS



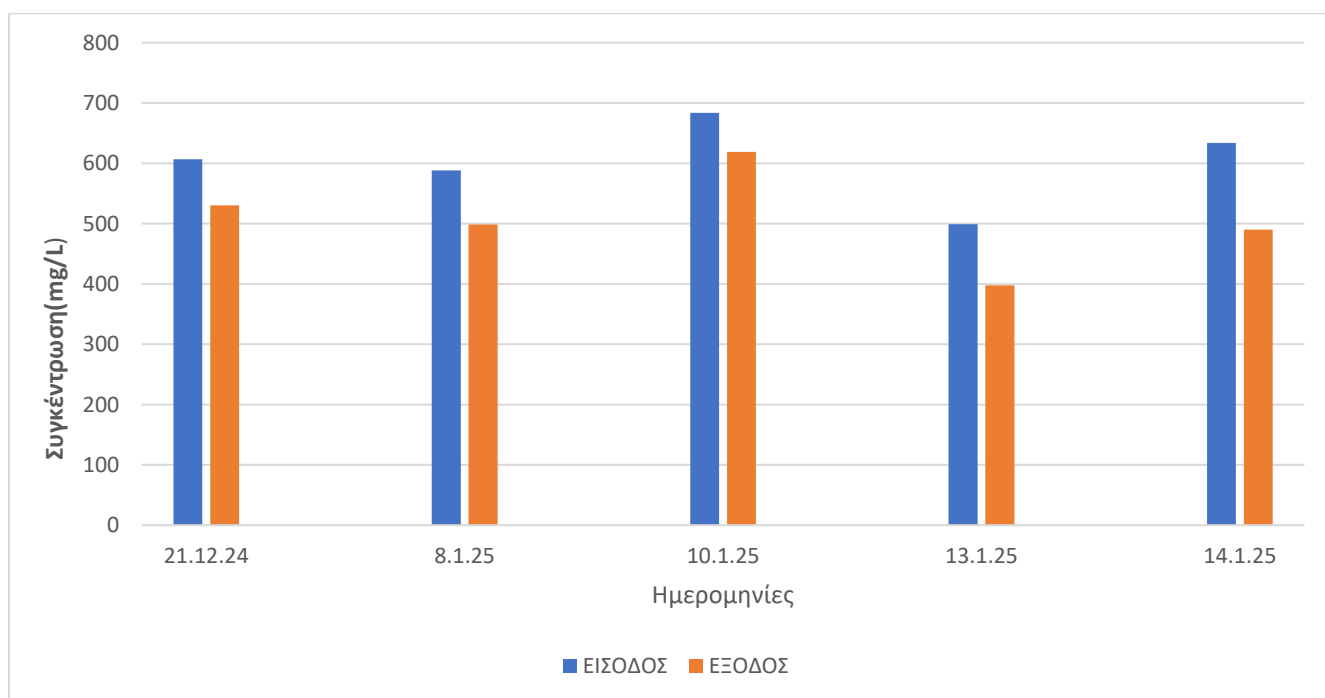
**Διάγραμμα 6.2: Ποσοστά απομάκρυνσης TSS**



**Διάγραμμα 6.3: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου BOD<sub>5</sub>**

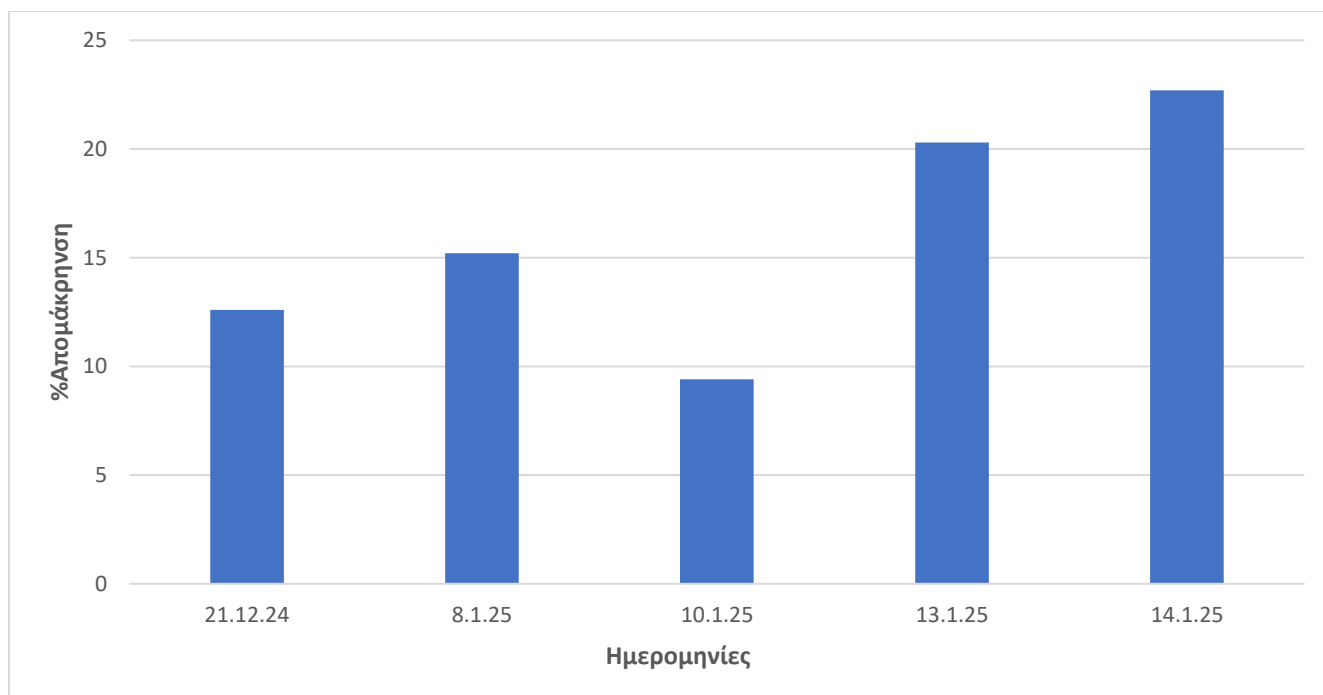


**Διάγραμμα 6.4: Ποσοστά απομάκρυνσης BOD<sub>5</sub>**



**Διάγραμμα 6.5: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου COD**



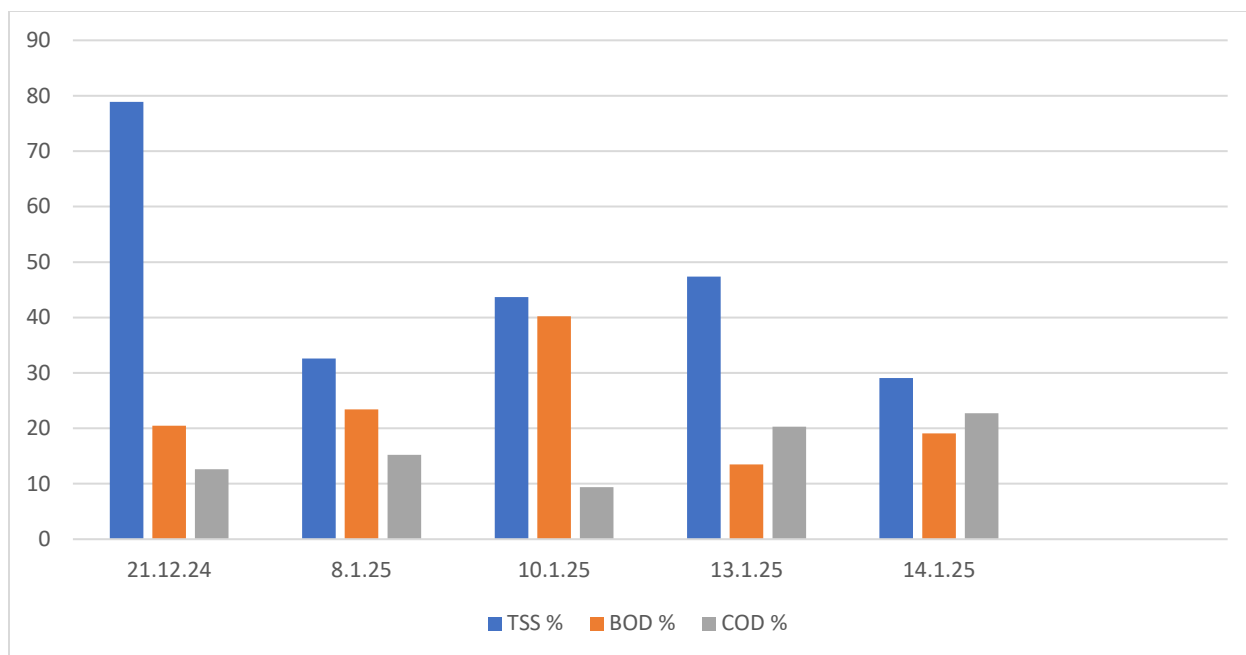


**Διάγραμμα 6.6: Ποσοστά απομάκρυνσης COD.**

Στο Πίνακα 6.2.1 και Διάγραμμα 6.7 παρουσιάζονται συγκριτικά οι απομακρύνσεις των TSS, BOD<sub>5</sub>, COD.

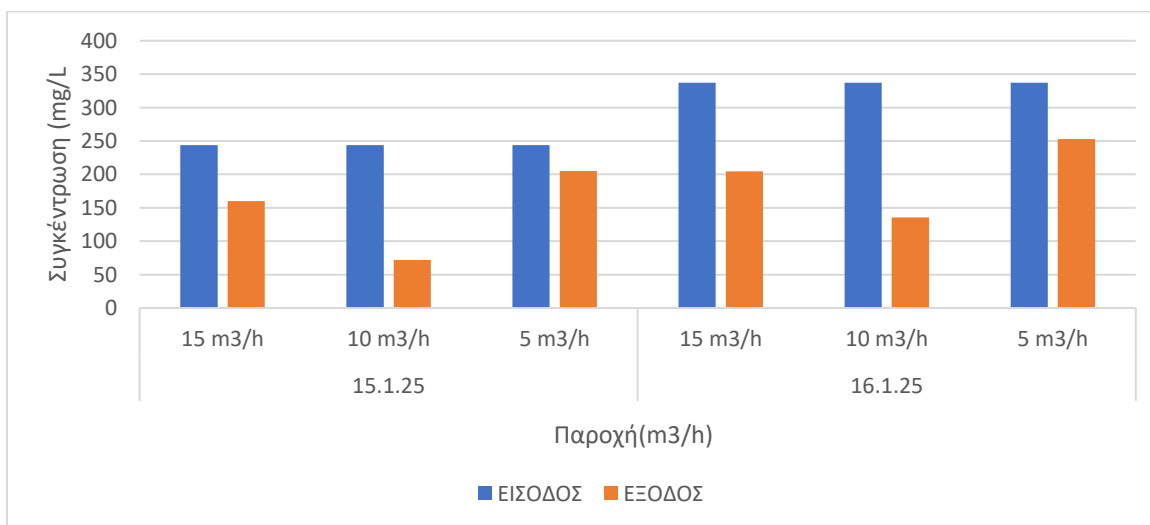
**Πίνακας 6.2.1 Συγκριτική αξιολόγηση των απομακρύνσεων των TSS, BOD<sub>5</sub>, COD.**

Ημερομηνία	TSS (mg/L)	BOD <sub>5</sub> (mg/L)	COD (mg/L)
<b>21.12.24</b>	78,9	20,5	12,6
<b>8.1.25</b>	32,6	23,4	15,2
<b>10.1.25</b>	43,7	40,2	9,4
<b>13.1.25</b>	47,4	13,5	20,3
<b>14.1.25</b>	29,1	19,1	22,7

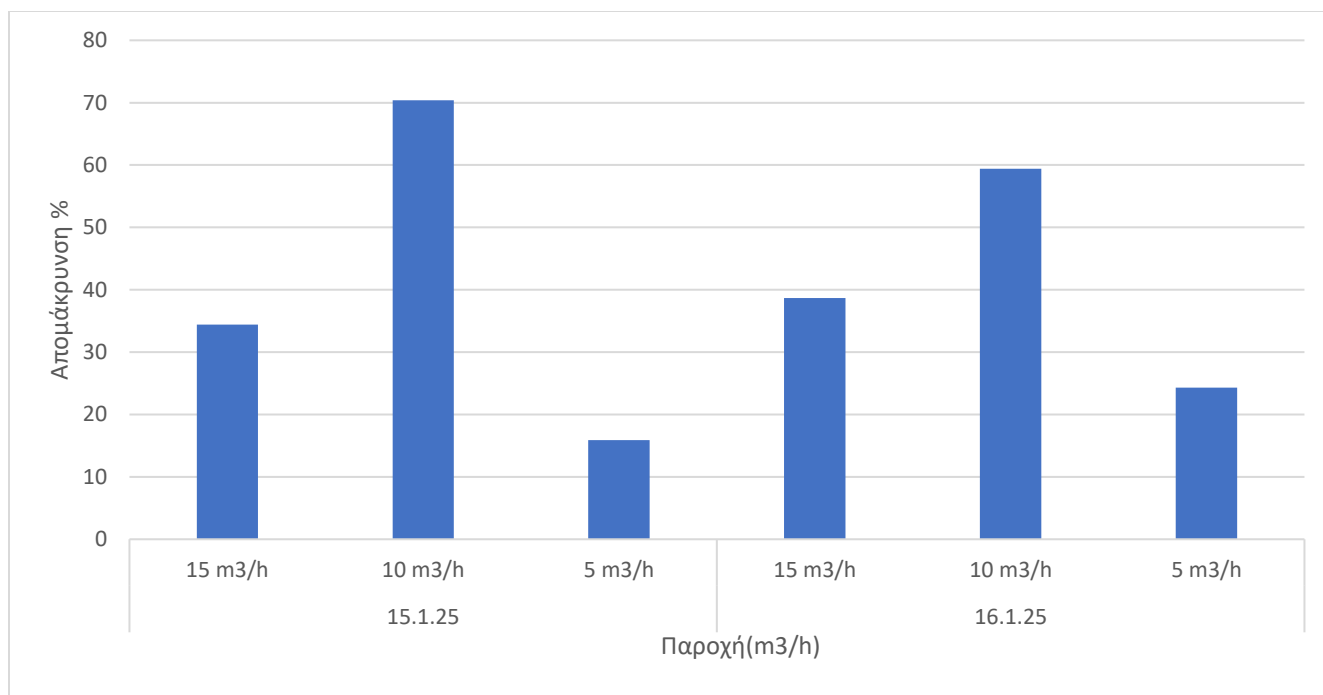


**Διάγραμμα 6.7: Απομάκρυνση TSS, BOD<sub>5</sub>, COD.**

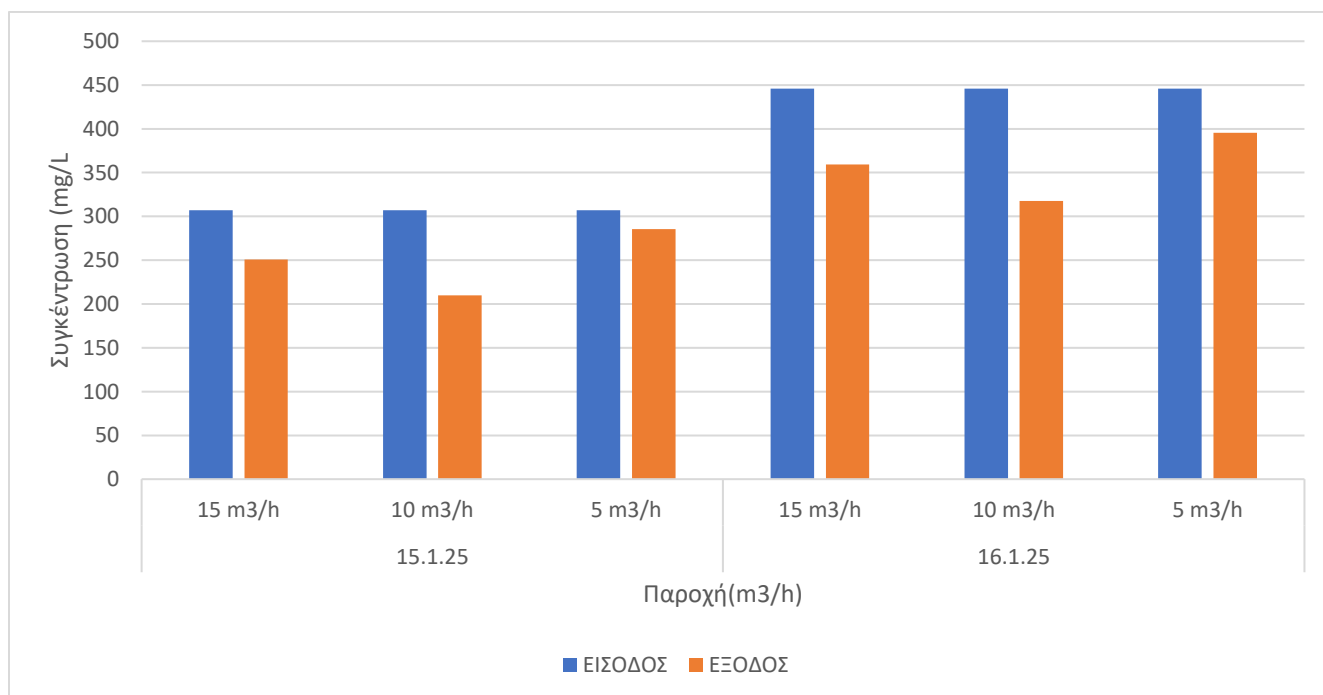
Στα διαγράμματα 6.8 και 6.9 παρουσιάζονται συγκεντρώσεις εισόδου–εξόδου των TSS ,BOD<sub>5</sub> , COD και απομακρύνσεις για τις διαφορετικές παροχές εισόδου (15 m<sup>3</sup>/h , 10 m<sup>3</sup>/h , 5 m<sup>3</sup>/h ).



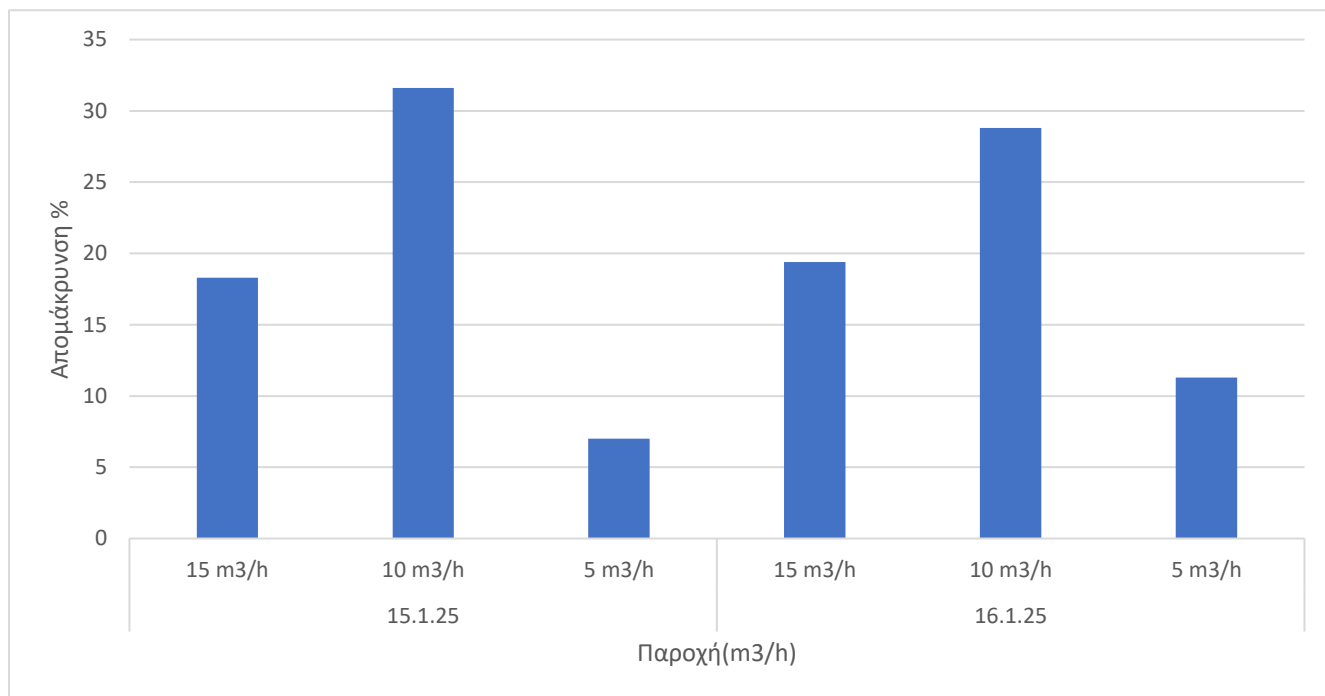
**Διάγραμμα 6.8: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου TSS για διαφορετικές παροχές εισόδου.**



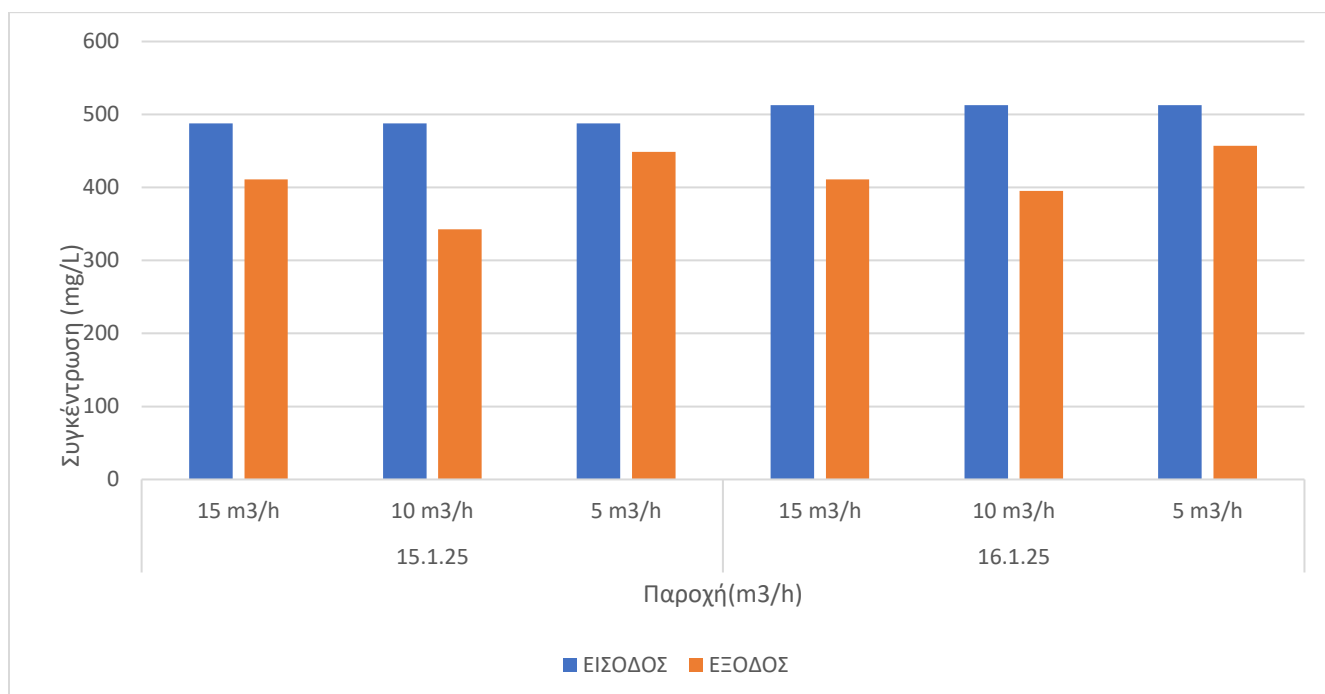
**Διάγραμμα 6.9: Ποσοστά απομάκρυνσης TSS για διαφορετικές παροχές εισόδου.**



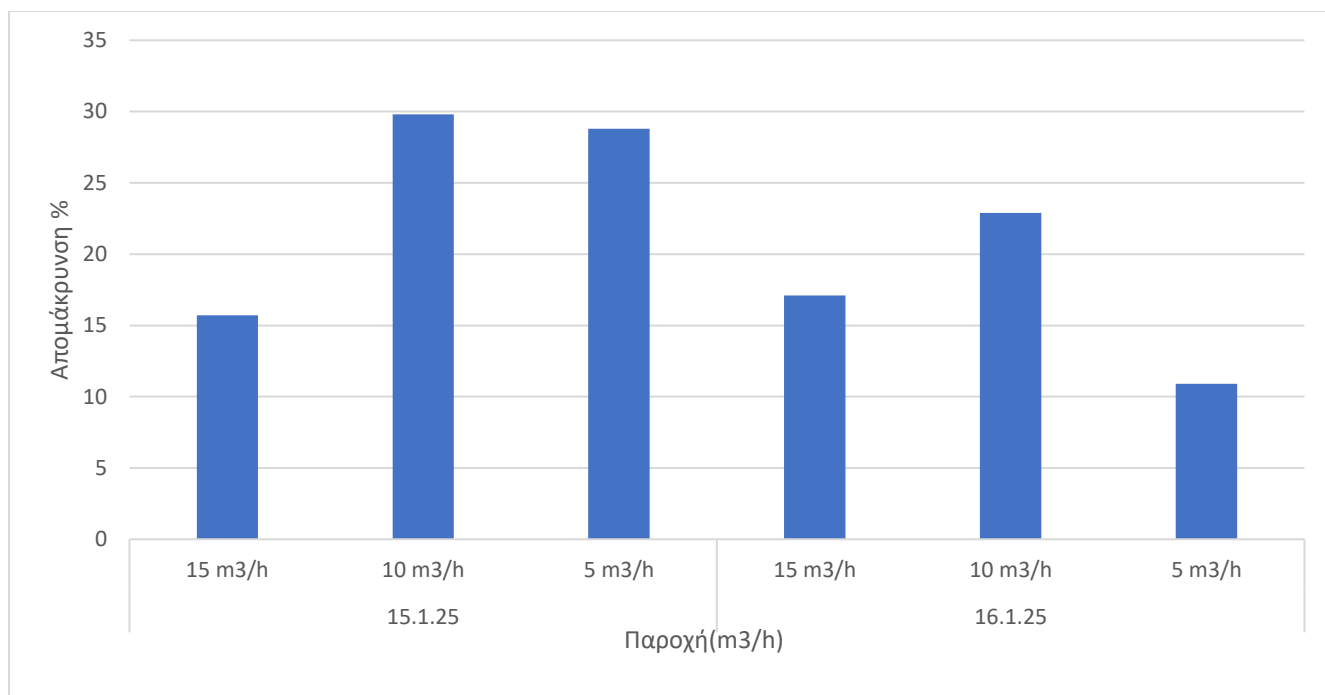
**Διάγραμμα 6.10: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου BOD<sub>5</sub> για διαφορετικές παροχές εισόδου.**



**Διάγραμμα 6.11: Ποσοστά απομάκρυνσης BOD<sub>5</sub> για διαφορετικές παροχές εισόδου.**



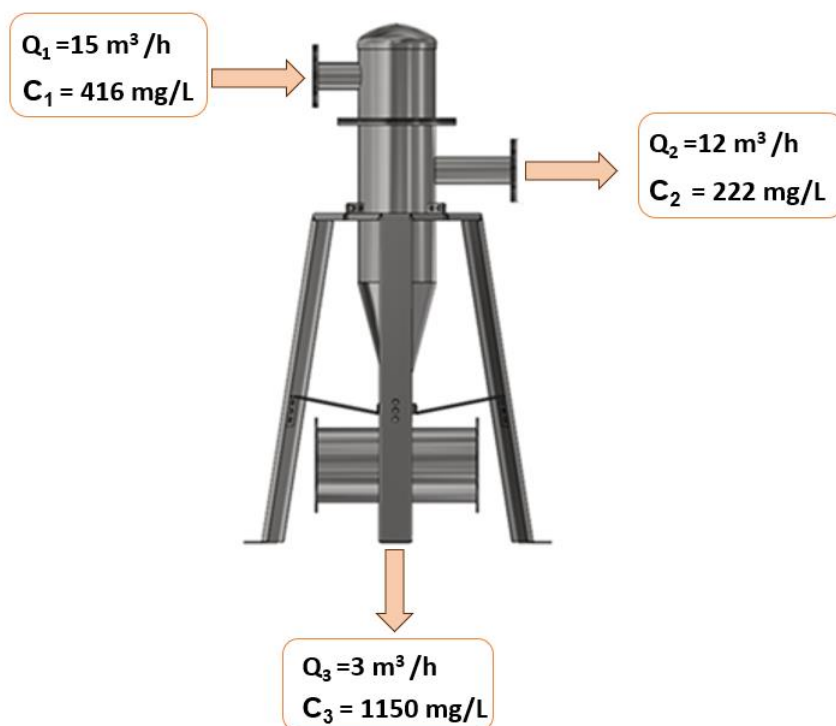
**Διάγραμμα 6.12: Συγκεντρώσεις εισόδου-εξόδου COD για διαφορετικές παροχές εισόδου.**



**Διάγραμμα 6.13: Ποσοστά απομάκρυνσης COD για διαφορετικές παροχές εισόδου.**

### 6.2.2 Ισοζύγιο μάζας

Στην Εικόνα 43 παρουσιάζεται το ισοζύγιο μάζας για το σύστημα υδροκυκλώνα στην ΕΕΛ Ρεθύμνου.



Εικόνα 42: Ισοζύγιο μάζας

Ο σκοπός των ισοζυγίων μάζας είναι η παρακολούθηση και η αξιολόγηση της απόδοσης ενός συστήματος, είτε μέσω θεωρητικών δεδομένων είτε με τη χρήση πειραματικών μετρήσεων (Γκαϊντατζής, 2012).

Κατά τα ισοζύγια μάζας της εικόνας 43, οι συγκεντρώσεις  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  προκύπτουν από τον μέσο όρο των συγκεντρώσεων από 21.12.24 – 14.1.25. Οι παροχές  $Q_1$ ,  $Q_2$  μετρήθηκαν με παροχόμετρο. Το ισοζύγιο μάζας διατυπώνεται ως εξής:

- $Q_1 / C_1$ : Παροχή / Συγκέντρωση εισόδου
  - $Q_2 / C_2$  : Παροχή / Συγκέντρωση εξόδου
  - $Q_3 / C_3$ : Παροχή / Συγκέντρωση συμπυκνώματος
- $$Q_1 = Q_2 + Q_3 \text{ (I)}$$
- $$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 + C_3 \cdot V_3 \text{ (II)}$$
- $$Q = V/t \text{ (III)}$$

Αντικαθιστώντας την (III) στην (II) έχουμε:

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

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

$$Q_3 = (C_1 \cdot Q_1) - (C_2 \cdot Q_2) / C_3 \rightarrow$$

$$Q_3 = 3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Στο πίνακα 6.2.2. παρουσιάζονται οι τιμές τα αποτελέσματα των ισοζυγίων μάζας εισερχόμενη παροχή αποβλήτων στον υδροκυκλώνα ίση με 15 m<sup>3</sup>/h.

**Πίνακας 6.2.2 Αποτελέσματα ισοζυγίου μάζας**

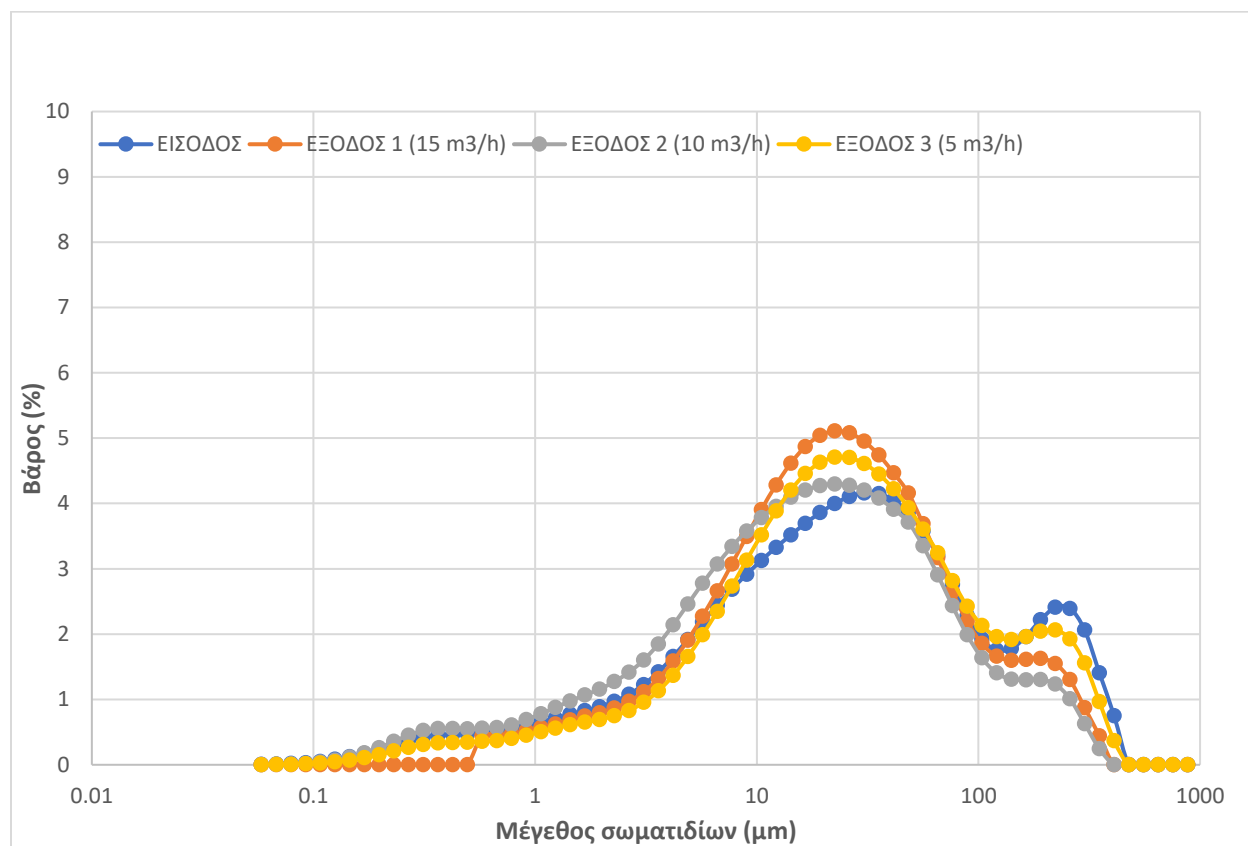
	<b>Είσοδος</b>	<b>Έξοδος</b>	<b>Συμπύκνωμα</b>
<b>Παροχή (m<sup>3</sup>/h)</b>	15	12	3
<b>Συγκέντρωση (mg/L)</b>	416	222,1	1150



### 6.2.2 Κατανομή μεγέθους σωματιδίων

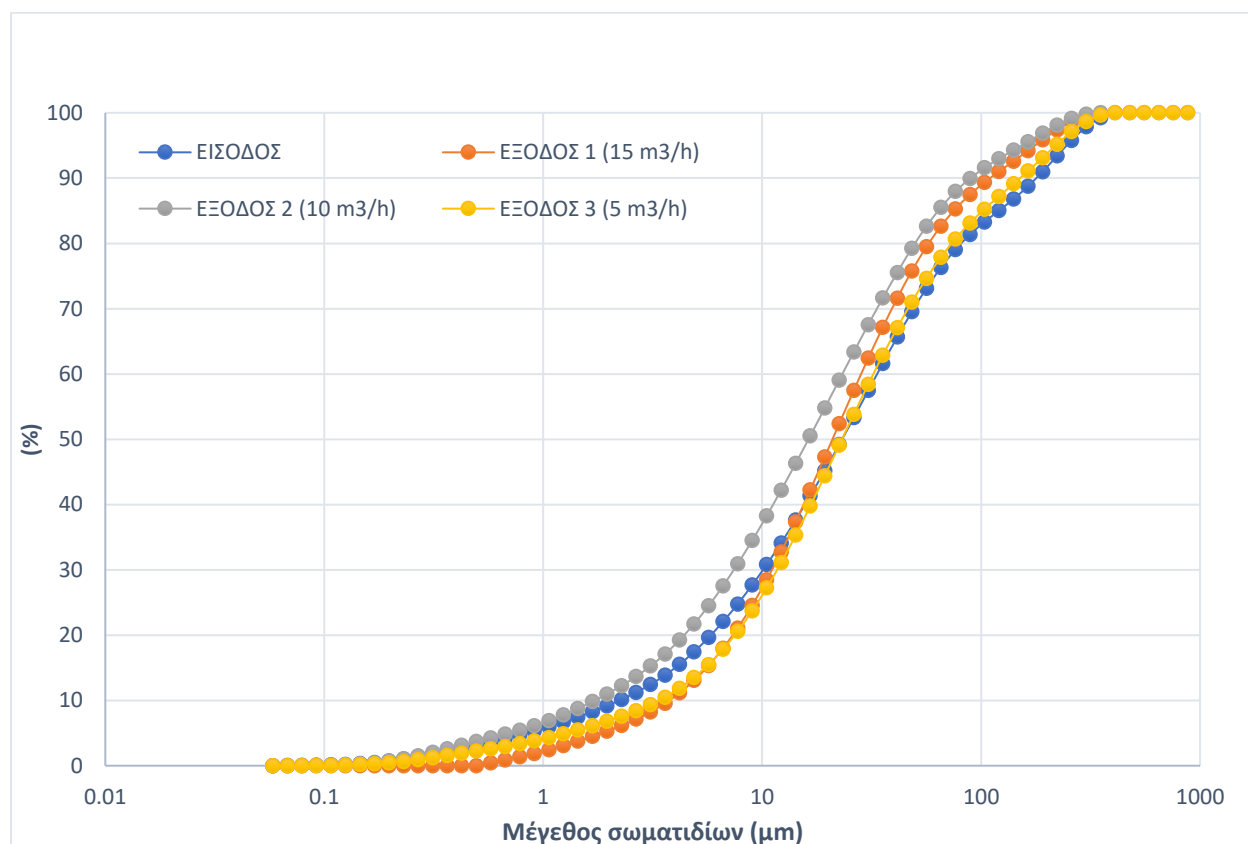
Για την μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στις 15.1.25, προκύπτουν δύο διαγράμματα κατανομής σωματιδίων. Στο πρώτο διάγραμμα, το μέγεθος των σωματιδίων απεικονίζεται σε συνάρτηση με το ποσοστό βάρους τους, ενώ στο δεύτερο το μέγεθος των σωματιδίων φαίνεται σε σχέση με το ποσοστό διέλευσης του δείγματος.

Στο διάγραμμα 6.14 παρουσιάζεται η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων με παροχή (15,10,5 m<sup>3</sup>/h), καθώς και η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων για τις παροχές εξόδου ίσες με 15,10 και 5 m<sup>3</sup>/h.



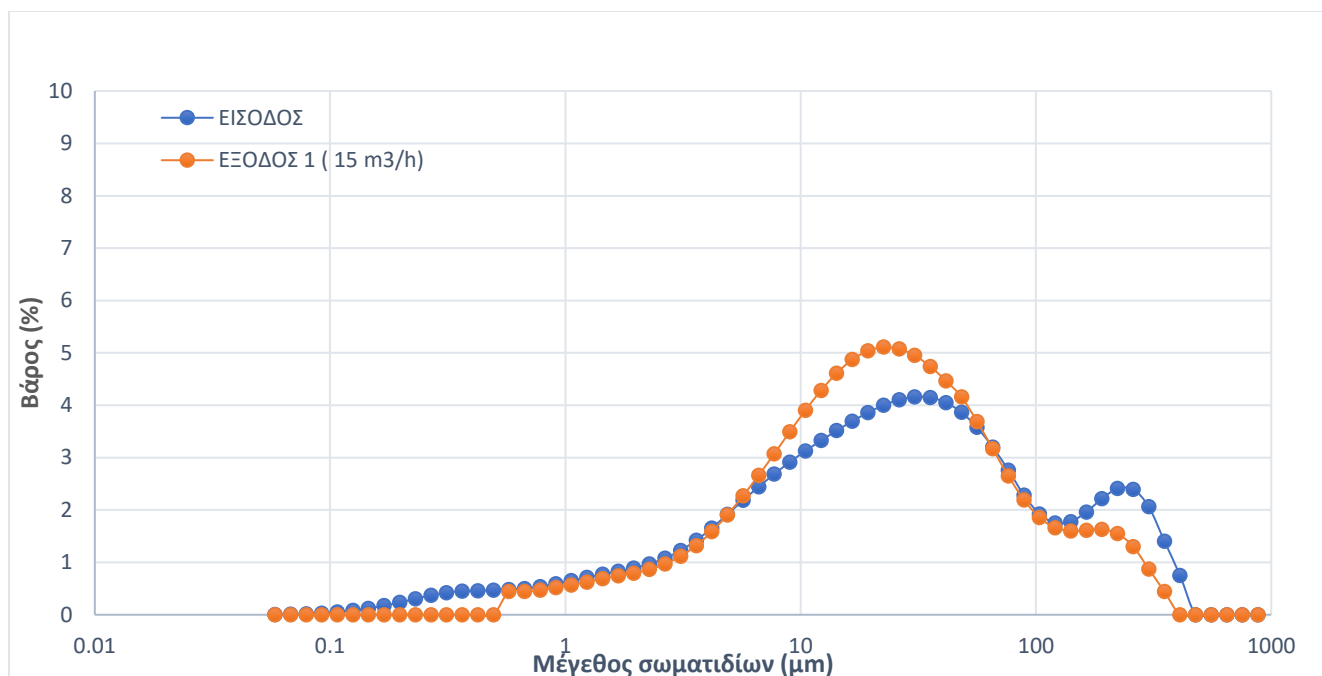
Διάγραμμα 6.14: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων για δειγματοληψία στις 15.1.25.

Στο διάγραμμα 6.15 κατανομής σωματιδίων απεικονίζεται το μέγεθος των σωματιδίων φαίνεται σε σχέση με το ποσοστό διέλευσης του δείγματος.

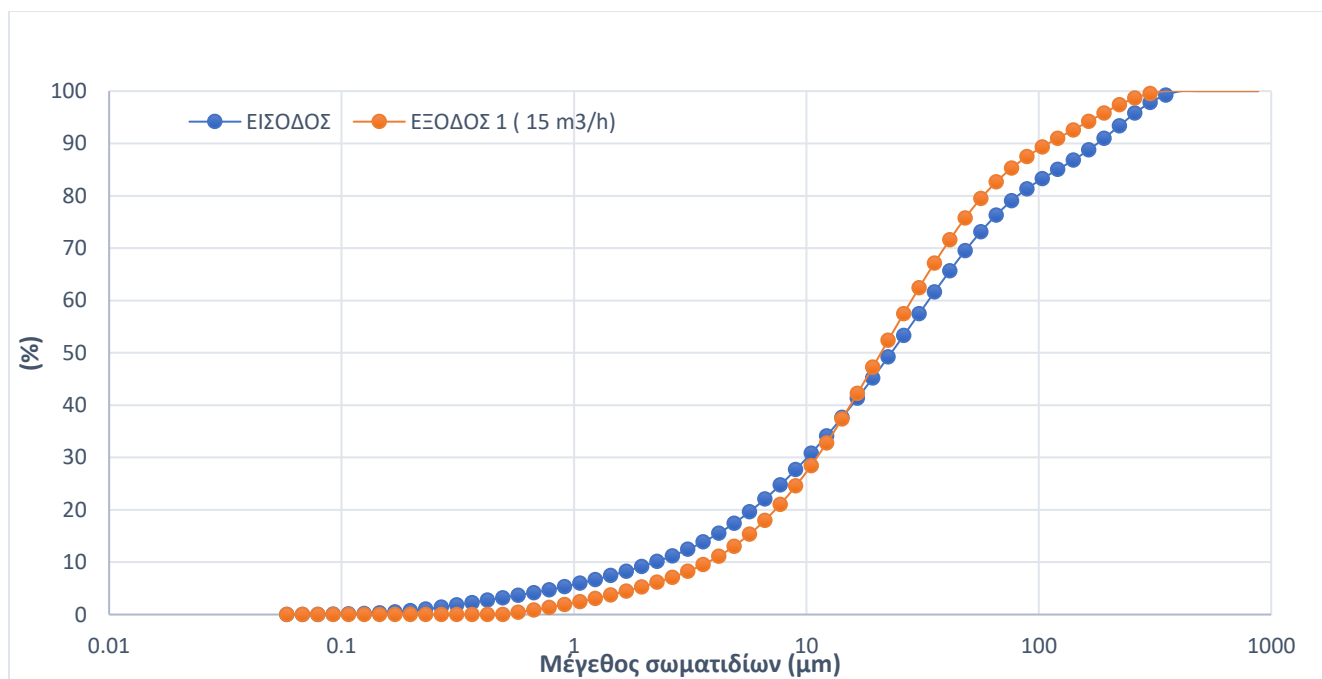


**Διάγραμμα 6.15: Αθροιστικώς διερχόμενο υλικό για δειγματοληψία στις 15.1.25.**

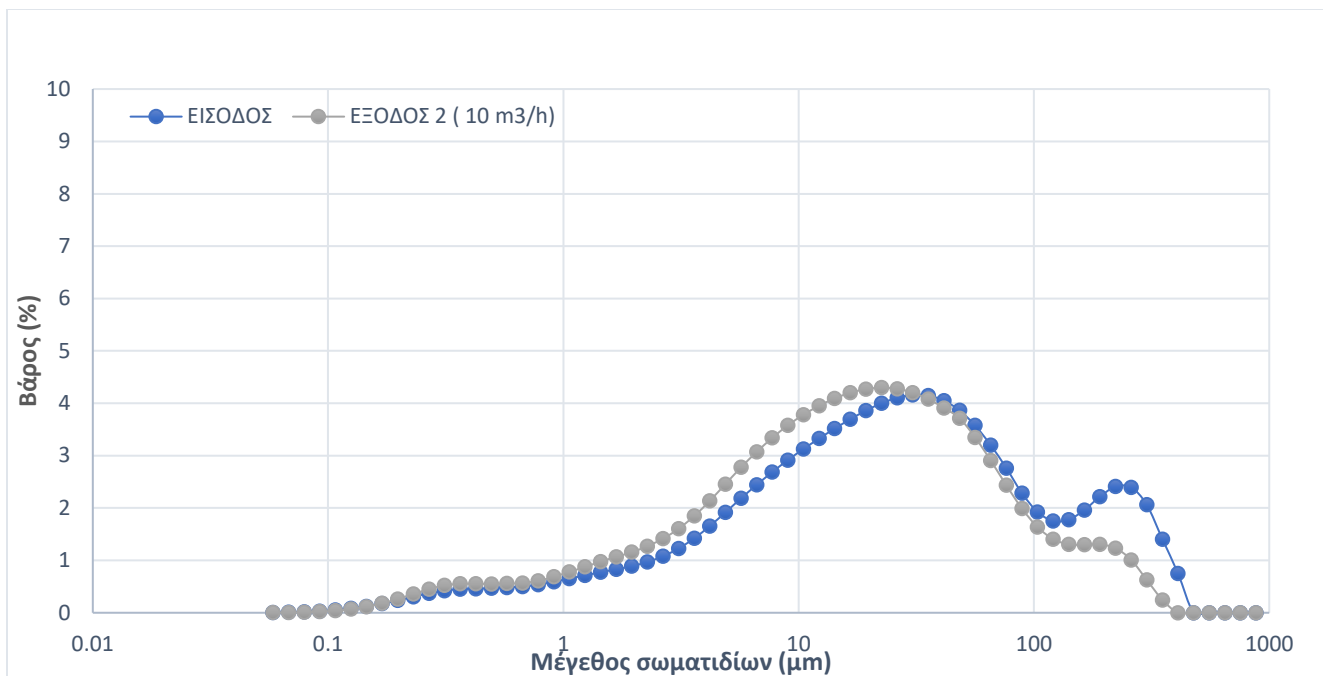
Στα διαγράμματα 6.16, έως 6.21 απεικονίζεται το μέγεθος των σωματιδίων φαίνεται σε σχέση με το ποσοστό διέλευσης του δείγματος καθώς και η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων μεμονωμένα για τις παροχές εξόδου ίσες με 15,10 και 5 m<sup>3</sup> /h.



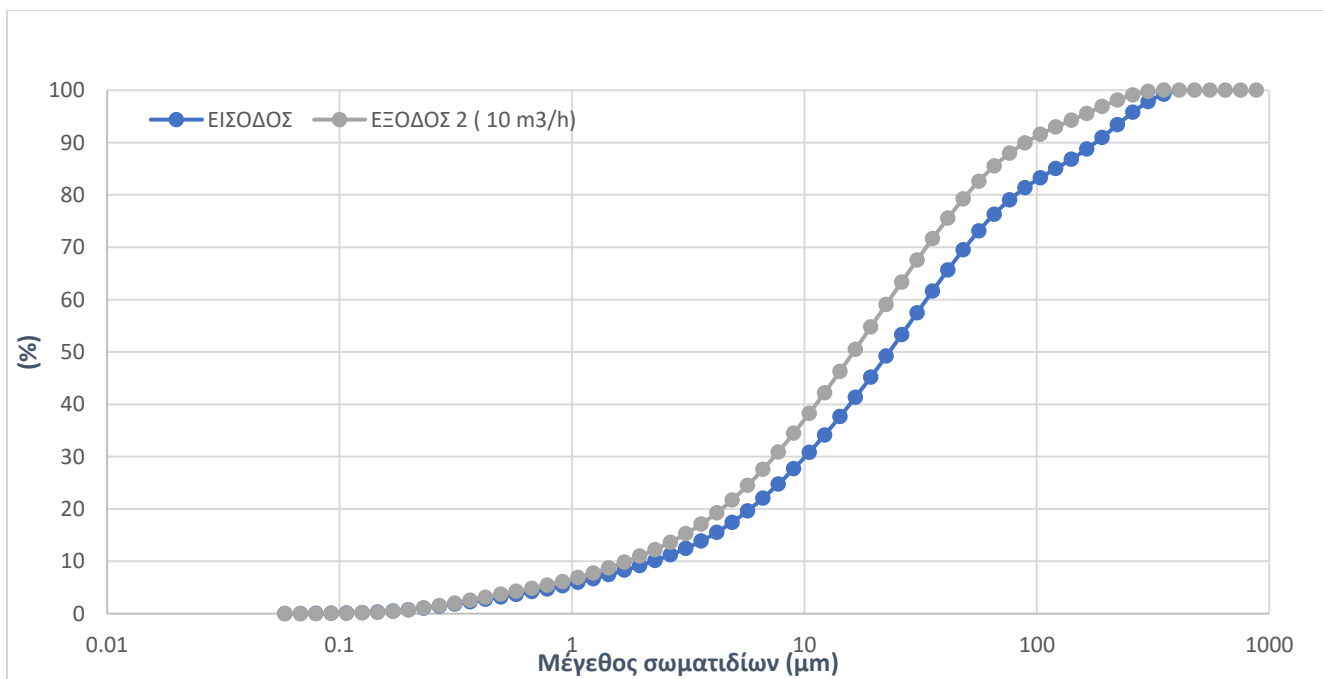
Διάγραμμα 6.16: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων για δειγματοληψία στις 15.1.25.



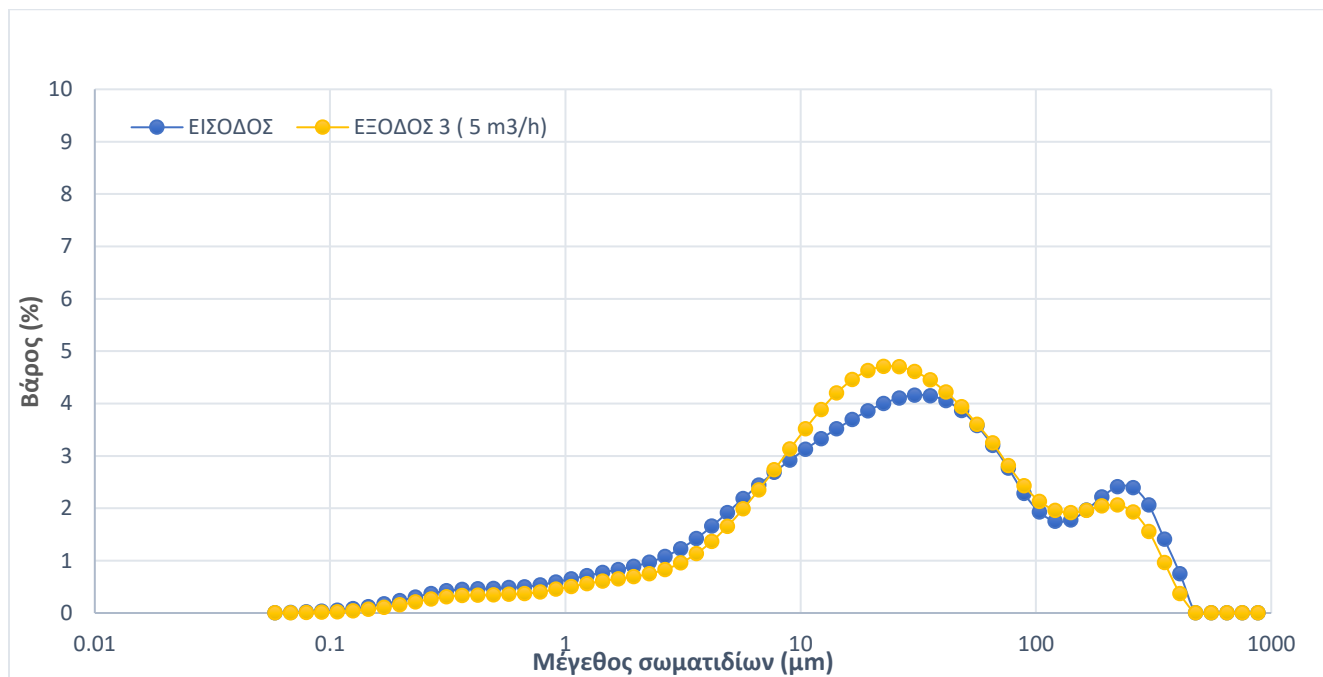
Διάγραμμα 6.17: Αθροιστικώς διερχόμενο υλικό για δειγματοληψία στις 15.1.25.



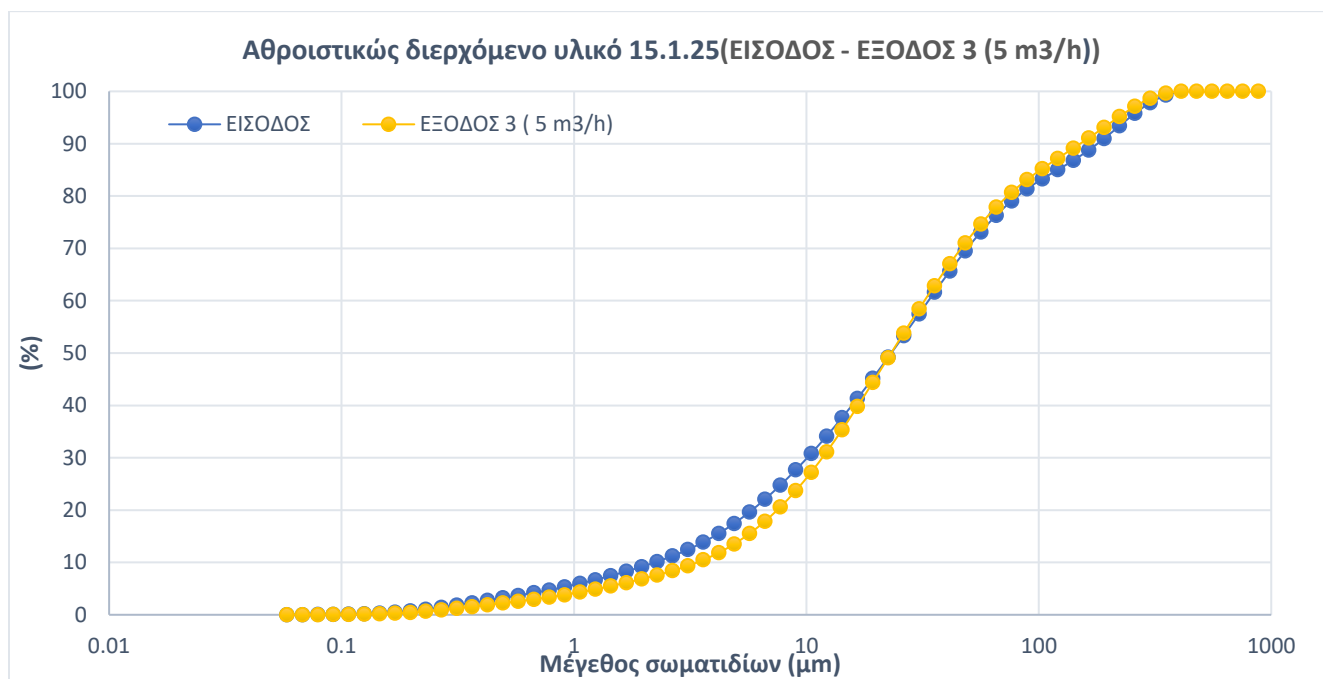
**Διάγραμμα 6.18:** Κατανομή μεγέθους σωματιδίων για δειγματοληψία στις 15.1.25.



**Διάγραμμα 6.19:** Αθροιστικώς διερχόμενο υλικό για δειγματοληψία στις 15.1.25.



**Διάγραμμα 6.20: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων για δειγματοληψία στις 15.1.25.**



**Διάγραμμα 6.21: Αθροιστικώς διερχόμενο υλικό για δειγματοληψία στις 15.1.25.**

Για τους δείκτες κατανομής  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  των μετρήσεων, παρουσιάζονται οι τιμές εισόδου και εξόδου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (6.2.3-6.2.4).

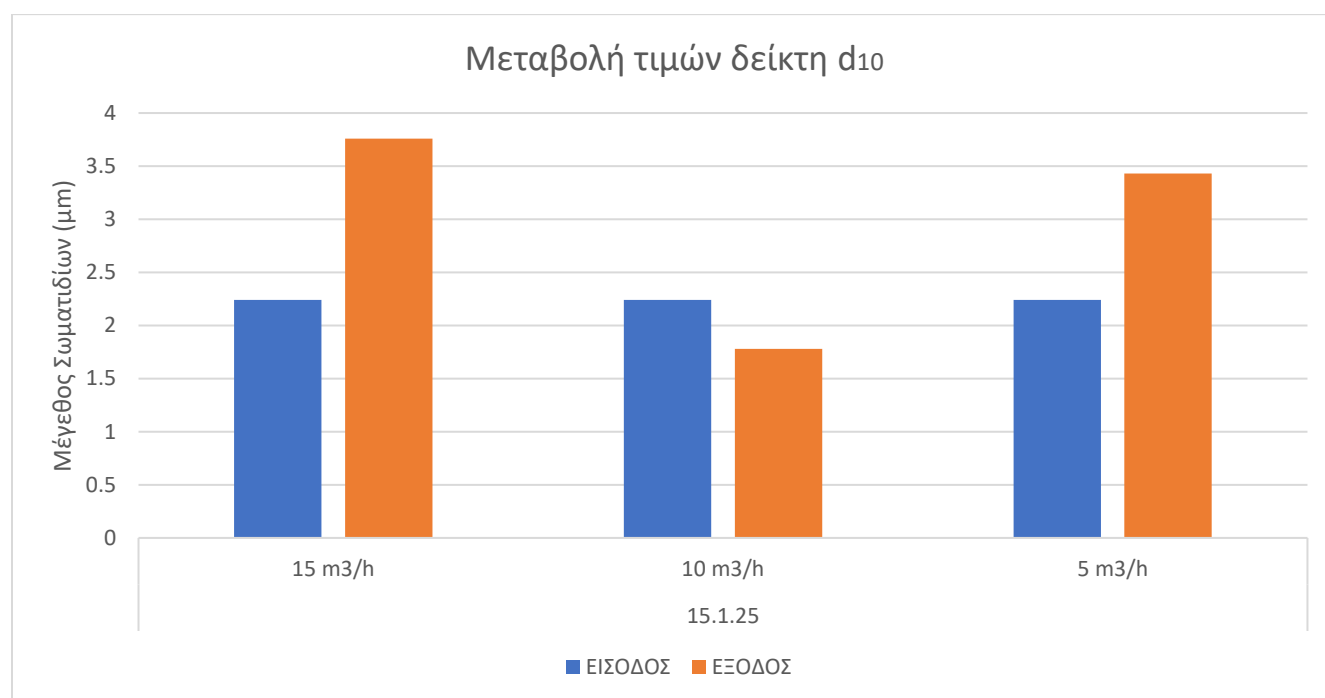
**Πίνακας 6.2.3 Δείκτες κατανομής εισόδου**

<b>Είσοδος</b>	<b><math>d_{10}</math> (μm)</b>	<b><math>d_{50}</math> (μm)</b>	<b><math>d_{90}</math> (μm)</b>
<b>15.1.25</b>	2,24	24,35	188,74

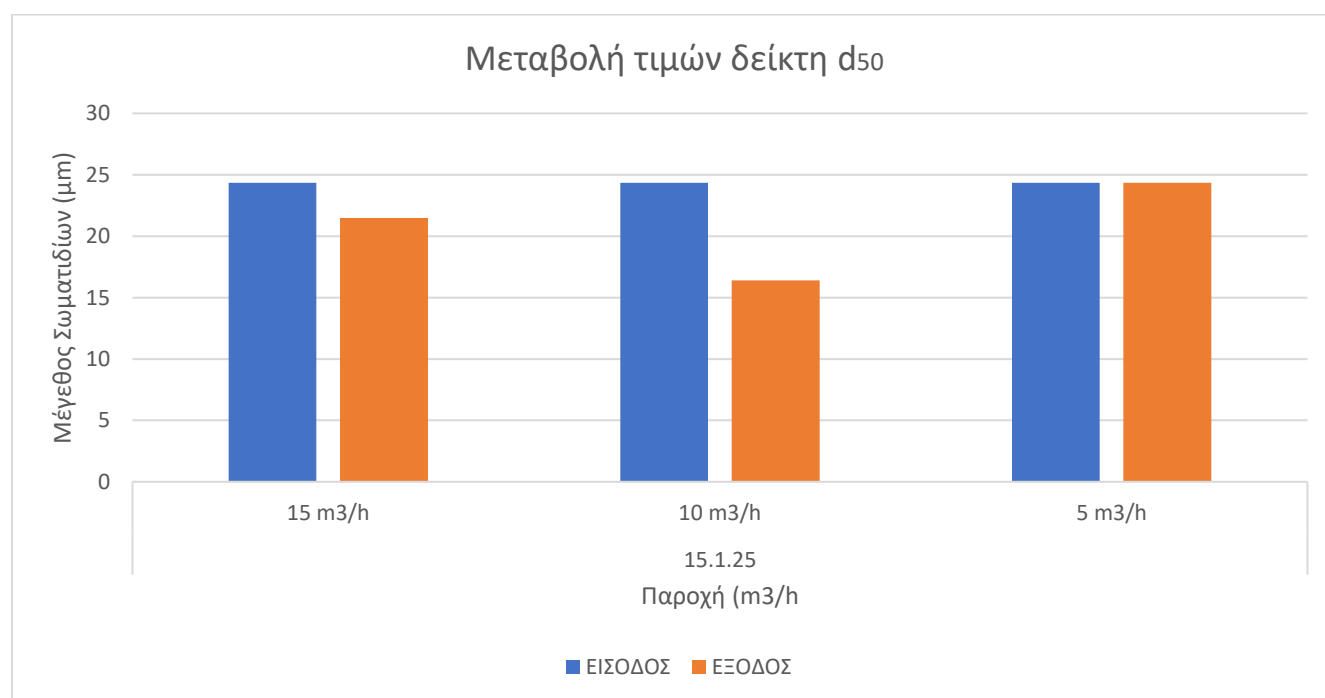
**Πίνακας 6.2.4 Δείκτες κατανομής εξόδου**

<b>Έξοδος</b>	<b><math>d_{10}</math> (μm)</b>			<b><math>d_{50}</math> (μm)</b>			<b><math>d_{90}</math> (μm)</b>		
<b>Παροχή εισόδου ( m<sup>3</sup> /h )</b>	15	10	5	15	10	5	15	10	5
<b>15.1.25</b>	3,76	1,78	3,43	21,46	16,40	24,35	119,34	88,97	140,57
<b>Μέσος όρος</b>	2,99			20,74			116,29		
<b>SD</b>	0,86			3,28			21,17		

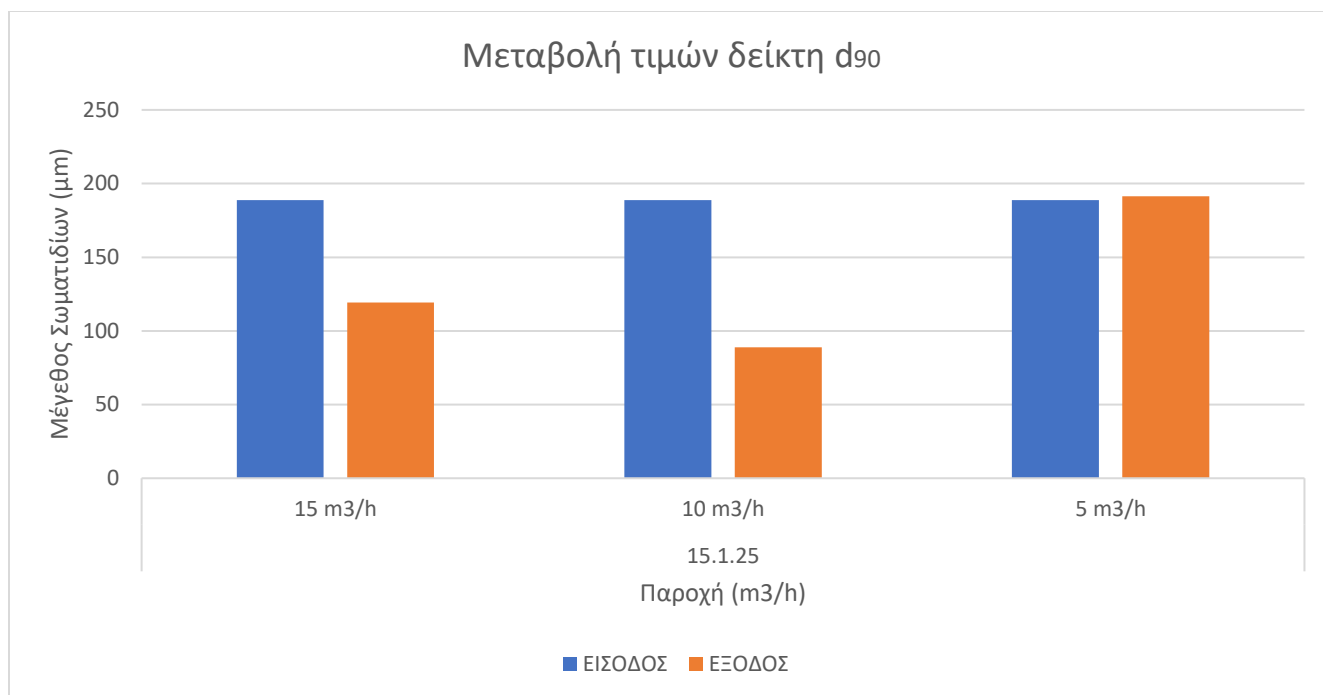
Στα διαγράμματα 6.22- 6.24 παρουσιάζεται η μεταβολή των δεικτών  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  και  $d_{90}$ .



**Διάγραμμα 6.22: Μεταβολή τιμών δείκτη  $d_{10}$**



**Διάγραμμα 6.23: Μεταβολή τιμών δείκτη  $d_{50}$**



Διάγραμμα 6.24: Μεταβολή τιμών δείκτη  $d_{90}$

## 6.3 Συζήτηση αποτελεσμάτων

### 6.3.1 TSS

Η μέση συγκέντρωση των TSS που καταγράφηκε στην είσοδο και η τυπική απόκλιση υπολογίστηκαν στα  $416 \pm 50,03$  mg/l. Η συγκέντρωση στην έξοδο του υδροκυκλώνα υπολογίστηκε στα  $222,1 \pm 76,54$  mg/L. Η απομάκρυνση που επιτυγχάνει το σύστημα υδροκυκλώνα για τα TSS, κατά μέσο όρο, μαζί με την τυπική απόκλιση, φτάνουν το  $46,34 \pm 17,63\%$ , με σημαντικές όμως διακυμάνσεις. Στην ελάχιστη συγκέντρωση των TSS στην είσοδο (370 mg/L) παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη απομάκρυνση (78,9%). Στις 15.1.25 και 16.1.25 που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τρεις διαφορετικές παροχές εισόδου, παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη απομάκρυνση στη παροχή  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $64,9 \% \pm 5,5$ ). Αναλυτικότερα στην παροχή  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $36,55 \% \pm 2,15$ ) και στα  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $20,1 \% \pm 4,2$ ). Αυτές οι διακυμάνσεις οφείλονται κυρίως στην ποιότητα του εισερχόμενου αποβλήτου, η οποία παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς τη σύνθεσή του.



### 6.3.2 BOD<sub>5</sub>

Για τον δείκτη BOD<sub>5</sub>, η μέση συγκέντρωση στην είσοδο που μετρήθηκε, μαζί με την τυπική απόκλιση, ήταν  $478,4 \pm 54,87$  mg/l. Η συγκέντρωση στην έξοδο του συστήματος υπολογίστηκε  $301.95 \pm 125$  mg/L. Η απομάκρυνση που επιτυγχάνεται από το σύστημα έχει μέσο όρο  $23,34 \pm 9,023$  %, μαζί με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση. Στις πειραματικές μετρήσεις εμφανίστηκαν συγκεντρώσεις στην είσοδο με εύρος 413 - 560 mg/L. Η μέγιστη απομάκρυνση που παρατηρήθηκε ήταν 40,2% καθώς και η ελάχιστη ήταν 13,5%. Στις 15.1.25 και 16.1.25 που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τρεις διαφορετικές παροχές εισόδου, παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη απομάκρυνση στη παροχή 10 m<sup>3</sup>/h ( $30,2 \% \pm 14,5$ ). Αναλυτικότερα στην παροχή 15 m<sup>3</sup>/h ( $18,55\% \pm 1,4$ ) και στα 5 m<sup>3</sup>/h ( $9,15 \% \pm 0,55$ ). Η απομάκρυνση που επιτυγχάνεται με την πρωτοβάθμια καθίζηση κυμαίνεται από 25-40% (Γκίκας, 2022). Συνεπώς, ο υδροκυκλώνας, πετυχαίνει παρόμοιες απομακρύνσεις. Επίσης, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η απομάκρυνση του BOD<sub>5</sub> μέσω υδροκυκλώνα είναι ανεξάρτητη του χρόνου παραμονής. Αντίθετα, η πρωτοβάθμια καθίζηση είναι άμεσα εξαρτημένη με το χρόνο παραμονής καθώς για την αντίστοιχη αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης χρειάζεται 1,5-2 ώρες. Επίσης παρατηρείται άμεση εξάρτηση μεταξύ της σχέσης συγκέντρωσης - απομάκρυνσης του BOD<sub>5</sub>. Στις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στην είσοδο παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες απομακρύνσεις.

### 6.3.3 COD

Η μέση τιμή της συγκέντρωσης του COD που καταγράφηκε στην είσοδο ήταν  $602,4 \pm 60,95$  mg/L, ενώ συγκέντρωση στην έξοδο του υδροκυκλώνα στα  $507,5 \pm 71,49$  mg/L. Η απομάκρυνση του COD από τον σύστημα, κατά μέσο όρο, υπολογίστηκε στο 16,04% με τυπική απόκλιση  $\pm 4,881\%$ . Παρουσιάστηκε μέγιστη απομάκρυνση 22,7% και ελάχιστη 9,4%. Στις 15.1.25 και 16.1.25 που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τρεις διαφορετικές παροχές εισόδου, παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη απομάκρυνση στη παροχή 10 m<sup>3</sup>/h ( $26,35\% \pm 1,45$ ). Αναλυτικότερα στην παροχή 15 m<sup>3</sup>/h ( $16,4\% \pm 3,45$ ) και στα 5 m<sup>3</sup>/h ( $9,45 \% \pm 0,7$ ).

### 6.3.4 Κατανομή σωματιδίων

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον είχαν τα αποτελέσματα της κατανομής των σωματιδίων. Για τον δείκτη  $d_{10}$  η τιμή του στην είσοδο παρουσιάστηκε στα 2,24  $\mu\text{m}$  και στην έξοδο  $2,99 \pm 0,86 \mu\text{m}$ . Για τον δείκτη  $d_{50}$  η μεταβολή της τιμής του ήταν από 24,35  $\mu\text{m}$  στην είσοδο σε  $20,74 \pm 3,28 \mu\text{m}$  στην έξοδο. Παράλληλα για τον δείκτη  $d_{90}$  η τιμή στην είσοδο ήταν 188,74  $\mu\text{m}$  ενώ στην έξοδο  $133,26 \pm 42,99 \mu\text{m}$ . Συνεπώς η ποσοστιαία μεταβολή των δεικτών ήταν 33% αύξηση για τον  $d_{10}$ , μείωση 14,8 % για τον  $d_{50}$  και 30% μείωση για τον  $d_{90}$ . Η μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση των δεικτών καταγράφηκε στη παροχή εισόδου  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  όπου υπήρξε μείωση 19,6% στον  $d_{10}$ , 32,6% στον  $d_{50}$  και 52,8 %  $d_{90}$ . Επιπρόσθετα στους δείκτες  $d_{10}$  και  $d_{50}$  που σχετίζονται με μικρού και μεσαίου μεγέθους σωματίδια αντίστοιχα, ο υδροκυκλώνας φαίνεται να παρουσιάζει αδυναμία στην απομάκρυνση των μικρότερων σωματιδίων. Τελικά, μια σημαντική μείωση του δείκτη  $d_{90}$  ήταν αναμενόμενη, καθώς αυτός σχετίζεται με σωματίδια διαμέτρου περίπου 180-310  $\mu\text{m}$ , επιβεβαιώνοντας την υπόθεση της απομάκρυνσης μεγάλων σωματιδίων μέσω το υδροκυκλώνα.

## Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η επεξεργασία των αστικών λυμάτων αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τις σύγχρονες κοινωνίες, καθώς συνδέεται άμεσα με την προστασία του περιβάλλοντος και της δημόσιας υγείας. Οι παραδοσιακές μέθοδοι επεξεργασίας, αν και ευρέως διαδεδομένες, συχνά συνοδεύονται από υψηλά ενεργειακά κόστη. Επιπλέον, τα υφιστάμενα συστήματα ενδέχεται να μην επαρκούν για την απομάκρυνση στερεών, γεγονός που περιορίζει τη συνολική αποτελεσματικότητα των ΕΕΛ. Η ανάγκη για βιώσιμες λύσεις που θα εξασφαλίζουν υψηλή αποδοτικότητα, χαμηλότερα λειτουργικά κόστη και περιορισμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα καθίσταται πιο επιτακτική από ποτέ. Σε αυτό το πλαίσιο, οι υφιστάμενες τεχνολογίες αντιμετωπίζουν προκλήσεις που απαιτούν καινοτόμες και πιο αποτελεσματικές προσεγγίσεις. Συνεπώς η εισαγωγή του υδροκυκλώνα ως πρωτοβάθμιου συστήματος επεξεργασίας λυμάτων προσφέρει μια νέα, πολλά υποσχόμενη λύση για τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι το σύστημα είναι εξαιρετικά αποδοτικό, με σημαντικές μειώσεις στα TSS, BOD<sub>5</sub> και COD. Αυτό καθιστά τον υδροκυκλώνα ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους επεξεργασίας λυμάτων. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του συστήματος είναι η λειτουργία του με ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση και κόστος. Επιπλέον, το γεγονός ότι δεν απαιτεί τη χρήση επιπρόσθετων χημικών ουσιών ενισχύει την περιβαλλοντική του βιωσιμότητα. Το σύστημα μπορεί να ενσωματωθεί είτε σε νέες είτε σε υφιστάμενες ΕΕΛ, συμβάλλοντας στην αναβάθμισή τους χωρίς την ανάγκη σημαντικών αλλαγών στις υποδομές. Αυτή η καινοτόμος προσέγγιση συνδυάζει την αποδοτικότητα με την οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα, προσφέροντας μια πρακτική και αποτελεσματική λύση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με την επεξεργασία των αστικών λυμάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας τονίζουν την αποτελεσματικότητα του υδροκυκλώνα στη επεξεργασία των πρωτοβάθμιων αστικών λυμάτων. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε μείωση στους δείκτες TSS  $46,34 \pm 17,63\%$ , BOD<sub>5</sub>  $23,34 \pm 9,02 \%$  και COD  $16,04\% \pm 4,88\%$ . Στις μέρες που πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διαφορετικές παροχές εισόδου ( $15 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ), παρατηρήθηκε ότι στα  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα του υδροκυκλώνα στην απομάκρυνση των TSS ( $64,9 \pm 5,5\%$ ), BOD<sub>5</sub> ( $30,2 \pm 4,5\%$ ) και COD ( $26,5 \pm 1,45\%$ ) από τα υγρά απόβλητα. Συνεπώς, με τη παροχή ( $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ) αναπτύχθηκε η βέλτιστη εφαιπτομενική ταχύτητα η οποία δημιούργησε την κατάλληλη φυγόκεντρο δύναμη για την μέγιστη απομάκρυνση των δεικτών TSS, BOD<sub>5</sub>, COD. Επιπρόσθετα, η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης παροχής εμφανίστηκε και στη μέτρηση μεγέθους των σωματιδίων. Παρατηρήθηκε, μείωση σε όλους τους δείκτες  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$ . Αναλυτικότερα για τον δείκτη  $d_{10}$  παρουσιάστηκε μείωση  $19,6 \%$ ,  $32,6\%$  στον  $d_{50}$  και  $52,8 \%$   $d_{90}$ .

Η μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα αυτό μπορεί να εστιάσει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας του υδροκυκλώνα, με στόχο τη μέγιστη δυνατή βελτίωση της απόδοσής του. Προτεινόμενες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα περιλαμβάνουν:

1. Διερεύνηση της αποτελεσματικότητας σε διαφορετικά είδη και συνθήκες λυμάτων, ώστε να διευρυνθεί το πεδίο εφαρμογής.
2. Συνδυασμός με άλλες τεχνολογίες επεξεργασίας για τη δημιουργία ολοκληρωμένων και πιο αποδοτικών συστημάτων.
3. Ανάπτυξη προσομοιώσεων και μοντέλων για την καλύτερη κατανόηση των ροών και της απόδοσης του συστήματος.

## Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία

- Metcalf, L., Eddy, H. P., & Tchobanoglous, G. (1991). Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse (Vol. 4). McGraw-Hill New York.
- Amoatey, P., & Bani, R. (2011). Wastewater management.
- Amoatey, P., & Bani, R. (2016). Wastewater management.
- Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Wang, X., Wu, J., Li, F. (2017). Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges. *Energy Procedia*, 105, 3730–3750.
- Hao, X., Chen, Q., van Loosdrecht, M., & Li, J. (2020). Sustainable disposal of excess sludge: Incineration without anaerobic digestion. *Water research*, 170, 115298.
- Bradley, D. (1965). *The Hydrocyclone* (Volume 4; P. V. Danckwerts, Ed.). New York: Pergamon Press.
- Partin, A. K. (2019). Hydrocyclone implementation at two wastewater treatment facilities to promote overall settling improvement. Virginia Tech.
- Arterburn, R. A. (1982). The sizing and selection of hydrocyclones. *Design and Installation of Comminution Circuits*, 1, 595–608.
- Sovechles, J. M. (2018). Exploring particle flow in a hydrocyclone classifier through positron emission particle tracking (PEPT). McGill University (Canada).
- Siatou, A., Manali, A., & Gikas, P. (2020). Energy consumption and internal distribution in activated sludge wastewater treatment plants of Greece. *Water*, 12(4), 1204.
- 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.
- Koliopoulos, G., & Gikas, P. (2013). Fine Mesh Sieving of Raw Municipal Wastewater for TSS and COD removal. 13th International Conference on Environmental Science and Technology (ss. 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.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Metcalf & Eddy wastewater engineering: treatment and reuse. International Edition*. McGrawHill, 4, 359–410.
- Topare, N. S., Attar, S. J., & Manfe, M. M. (2011). Sewage/wastewater treatment technologies: a review. *Sci. Revs. Chem. Commun*, 1(1), 15–24.
- Arjona, B., & Cisneros, R. (2005). Analysis of Drying Technologies for Wastewater Treatment Plant Sludge as an Alternative Source of Energy. Third LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and

Technology (LACCET'2005). Cartagena de indias: Center for Water Studies - ITESM.

- 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, 350-367.
- 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
- Παντίδου, Α. και Αντέλλη, Κ., (2019). Έλεγχος ρύπανσης νερών (σημειώσεις εργαστηριακών ασκήσεων). Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Μπατιστάτος Ν. (2017). Διαφοροποίηση της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων υγρών αστικών αποβλήτων μετά από επεξεργασία με μικροκοσκίνιση.
- Γκίκας, Π., (2020) Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Ι (σημειώσεις θεωρίας) Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Γκίκας, Π., (2020) Σχεδιασμός Περιβαλλοντικών Εγκαταστάσεων και Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων ΙΙ (σημειώσεις θεωρίας) Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- Κεχαγιαδάκη, Δ. (2019). Τοξικές ουσίες στην Ιλύ της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων Ρεθύμνου. Πάτρα: Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Δανδόλου, Ε. (2010). Έλεγχος και αξιολόγηση λειτουργίας Μονάδας Επεξεργασίας Λυμάτων Ρεθύμνου. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Χρυσικόπουλος, Κ. (2013) Εισαγωγή στις Διεργασίες Καθαρισμού Νερού και Λυμάτων, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ
- 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
- Νταρακάς, Ε. (2010). Διεργασίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδραυλικής & Τεχνικής Περιβάλλοντος.