



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΟΙΝΟΥ, ΑΜΠΕΛΟΥ ΚΑΙ ΠΟΤΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Διεργασίες αερισμού και ανάμειξης στην
επεξεργασία των υγρών αποβλήτων**

**Ηλίας Ηλία
ΑΜ: 151111**

**Επιβλέπων εκπαιδευτικός:
Παπακωνσταντίνου Σπύρος, Επίκουρος Καθηγητής**

ΑΙΓΑΛΕΩ 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΟΙΝΟΥ, ΑΜΠΕΛΟΥ ΚΑΙ ΠΟΤΩΝ

Διασαφήσεις εξεταστικής επιτροπής

**Οι υπογράφωντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει την διπλωματική εργασία με τίτλο
«Διεργασίες αερισμού και ανάμειξης στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων»
που παρουσιάσθηκε από τον Ηλία Ηλία και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.**

Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα Καθηγητή (1^{ου} Μέλους Επιτροπής)	Παπακωνσταντίνου Σπύρος	
Ψηφιακή Υπογραφή Καθηγητή (2^{ου} Μέλους Επιτροπής)	Σεχάντε Αντνάν	
Ψηφιακή Υπογραφή Καθηγητή (3^{ου} Μέλους Επιτροπής)	Ταταρίδης Παναγιώτης	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ηλία Ηλίας του Ιωάννη , με αριθμό μητρώου 151111


Φοιτητής/τρια του Τμήματος Επιστημών Οίνου, Αμπέλου και Ποτών της Σχολής Επιστημών Τροφίμων του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο δηλών

* Ονοματεπώνυμο/Ιδιότητα
(Υπογραφή)

Ηλία Ηλίας


ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Θέμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι οι διεργασίες αερισμού και ανάμειξης που εφαρμόζονται κατά την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Τα υγρά απόβλητα συνήθως σε πρώτο στάδιο υποβάλλονται σε προεπεξεργασία, όπου από τη ροή των αποβλήτων απομακρύνονται στερεά σωματίδια, λιπαρές ουσίες και ρυθμίζεται η ροή, η σύνθεση και το pH. Ακολουθεί η κύρια επεξεργασία των αποβλήτων όπου χωρίζεται σε τρία στάδια (πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια) και στοχεύει στην μικρότερη δυνατή περιβαλλοντική επιβάρυνση. Ο αερισμός και η ανάμειξη εξασφαλίζουν ότι οι μικροοργανισμοί θα έχουν το απαραίτητο οξυγόνο για την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό τους, η οργανική ύλη θα αφομοιωθεί πλήρως, τα στερεά δε θα καθιζάνουν και δε θα παραχθούν θειούχες ενώσεις που είναι τοξικές και δύσοσμες. Ο αερισμός και η ανάμειξη μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε με διάχυτο ή υποεπιφανειακό αερισμό, με μηχανικό ή επιφανειακό αερισμό και με φυσικό αερισμό. Οι φυσαλίδες που μεταφέρουν τον αέρα, άρα και το απαραίτητο οξυγόνο, μπορεί να είναι είτε χονδροειδείς είτε λεπτές, με τις λεπτές φυσαλίδες να παρουσιάζουν βέλτιστη μεταφορά του οξυγόνου από τον αέρα στο υγρό. Εκτός από τις συμβατικές μεθόδους αερισμού, υπάρχουν και ορισμένες εναλλακτικές μέθοδοι που όμως είτε είναι ακόμη στο στάδιο μελέτης είτε εφαρμόζονται περιορισμένα, όπως η χρήση καθαρού οξυγόνου, ο συνδυασμός τεχνικών αερισμού με τεχνικές ανάμειξης, η αντικατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας δικτύου, είτε μερικώς είτε πλήρως, με ηλιακή ακτινοβολία, τα βιολογικά αεριζόμενα φίλτρα. Σημειώνεται ότι τα αερολύματα που δημιουργούνται κατά τον αερισμό σε μία μονάδα επεξεργασίας είναι σημαντικά και μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία, όπως λοιμώξεις, φλεγμονή των αεραγωγών ή αλλεργίες.

SUMMARY

The subject of this dissertation is the aeration and mixing processes applied during the treatment of liquid waste. Liquid waste is usually pre-treated in the first stage, where solid particles, fats are removed from the waste stream and the flow, composition and pH are adjusted. The following is the main waste treatment where it is divided into three stages (primary, secondary and tertiary) and aims at the smallest possible environmental burden. Aeration and mixing ensure that the microorganisms have the necessary oxygen for their growth and multiplication, the organic matter will be fully assimilated, the solids will not precipitate and no sulfur compounds will be produced that are toxic and foul-smelling. Ventilation and mixing can be carried out by either diffuse or subsurface aeration, mechanical or surface aeration and natural aeration. The bubbles that carry the air, and therefore the necessary oxygen, can be either coarse or fine, with the fine bubbles having an optimal transfer of oxygen from the air to the liquid. In addition to the conventional ventilation method, there are some alternative methods that are either still under study or are used sparingly, such as the use of pure oxygen, the combination of ventilation techniques with mixing techniques, and the replacement of mains electricity, either in part or in full. with solar radiation, bio-ventilated filters. It is noted that aerosols created during ventilation in a treatment plant are important and can cause human health problems, such as infections, inflammation of the airways or allergies.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
SUMMARY	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	6
ΕΙΚΟΝΕΣ	8
ΠΙΝΑΚΕΣ	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	10
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	10
1.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	11
1.2.1 Εσχάρωση	12
1.2.1 Εξάμμωση ή αμμοσυλλογή	14
1.2.3 Λιπосуλλογή	15
1.2.4 Εξισορρόπηση ροής	15
1.3 ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	16
1.4 ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	17
1.4.1 Φυσικές και χημικές διεργασίες	18
1.4.2 Βιολογική Επεξεργασία	19
1.5 ΤΡΙΤΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	22
ΣΗΜΑΣΙΑ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	22
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	22
2.2 ΑΕΡΙΣΜΟΣ	22
2.3 ΑΝΑΜΕΙΞΗ	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	29
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	29
3.1 ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΕΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ	29
3.1.1 Ενεργειακές απαιτήσεις	29
3.1.2 Υπολογισμοί χρήσιμων παραμέτρων κατά τον αερισμό.	29
3.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΕΥΡΕΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ	32
3.2.1 Μηχανικός ή επιφανειακός αερισμός	33
3.2.2 Αεριστήρας που παράγει φυσαλίδες χονδροειδείς	37

3.2.3 Αεριστήρας που παράγει φυσαλίδες λεπτοειδείς	39
3.3 ΒΑΣΙΚΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΑ ΜΕΡΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟ ΑΕΡΙΣΜΟΥ	40
3.3.1 Συστήματα φυσητήρων αέρα	40
3.3.2 Οδηγός μεταβλητής συχνότητας	42
3.3.3 Συστήματα ελέγχου	42
3.4 ΝΕΩΤΕΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ	43
3.4.1 Χρήση καθαρού οξυγόνου	44
3.4.2 Συνδυασμός τεχνικών αερισμού και τεχνικών ανάμειξης	46
3.4.2.1 Σύστημα Aire O ₂ Triton	47
3.4.3 Ανάμειξη και οξυγόνωση λυμάτων με τη βοήθεια ηλιακής ακτινοβολίας	49
3.4.5 Βιολογικά αεριζόμενα φίλτρα	50
3.4 ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑ ΑΕΡΟΛΥΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΕΡΙΣΜΟ	51
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	56

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της επεξεργασίας αποβλήτων	11
Εικόνα 1.2: Σχάρα για διαχωρισμό στερεών- υγρών αποβλήτων, κατάλληλη για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, όπως και για βαθιά κανάλια	12
Εικόνα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση θαλάμου όπου συνδυάζεται η απομάκρυνση άμμου που καθιζάνει στον πυθμένα και λιπών και ελαίων που επιπλέουν στην επιφάνεια	14
Εικόνα 1.4: Τυπικές δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης (α) ορθογώνια δεξαμενή οριζόντιας ροής (b) κυκλική δεξαμενή ακτινικής ροής (c) δεξαμενή με πυθμένα χοάνης	17
Εικόνα 1.5: Σχήμα βιολογικού αντιδραστήρα ενεργής ιλύος	19
Εικόνα 2.1: Στάδια μεταφοράς οξυγόνου από τη φυσαλίδα αερίου στο κύτταρο	23
Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση επιφανειακού αεριστήρα	33
Εικόνα 3.2: Τάφρος οξείδωσης υγρών αποβλήτων εξοπλισμένη με αεριστήρα με βούρτσα	35
Εικόνα 3.3: Επιφανειακός αεριστήρας με βούρτσα σε λιμνοθάλασσα	36
Εικόνα 3.4: Σύστημα αερισμού με χονδροειδείς φυσαλίδες αέρα	36
Εικόνα 3.5: Αερισμός και ανάμειξη (αριστερά) και ανάμειξη (δεξιά) με το σύστημα Aire O ₂ Triton	47
Εικόνα 3.6: Απεικόνιση συστήματος SPC	48

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες, τύποι και χρήση σχαρών ανάλογα με το μέγεθος των διάκενων	13
Πίνακας 2.1 : Σύγκριση μεθόδων επεξεργασίας της ενεργούς ιλύος	25
Πίνακας 3.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φυσητήρων θετικής μετατόπισης και φυγοκεντρικών φυσητήρων	39

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελείται από τρία κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται ορισμένες γενικές πληροφορίες για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Αναφέρονται τα κυριότερα στάδια επεξεργασίας: προεπεξεργασία, πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία και εξηγείται συνοπτικά ο σκοπός που εξυπηρετεί το κάθε στάδιο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μία αναφορά στην έννοια του αερισμού και της ανάμειξης, στο ρόλο και στη σημασία που έχουν για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αρχικά αναφέρονται ορισμένες από τις σημαντικότερες παράμετρους κατά τον αερισμό και την ανάμειξη των υγρών αποβλήτων. Είναι και οι δύο ενεργοβόρες διαδικασίες με την ανάμειξη να απαιτεί περισσότερη ενέργεια από τον αερισμό. Σημαντικός είναι ο προσδιορισμός του ρυθμού μεταφοράς οξυγόνου, καθώς και η κατανόηση της χρησιμότητας των παραγόντων α και β . Τα συνήθη συστήματα αερισμού ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: διάχυτος ή επιφανειακός αερισμός, μηχανικός ή επιφανειακός αερισμός, φυσικός αερισμός. Μελετώνται εναλλακτικές μέθοδοι αερισμού και ανάμειξης, αλλά και εξασφάλιση ενέργειας, όπως η χρήση καθαρού οξυγόνου, ο συνδυασμός τεχνικών αερισμού με τεχνικές ανάμειξης, η αντικατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας δικτύου, είτε μερικώς είτε πλήρως, με ηλιακή ακτινοβολία, τα βιολογικά αεριζόμενα φίλτρα. Τέλος, γίνεται μία σύντομη αναφορά στον όρο αερολύματα και στις επιπτώσεις του στην ανθρώπινη υγεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

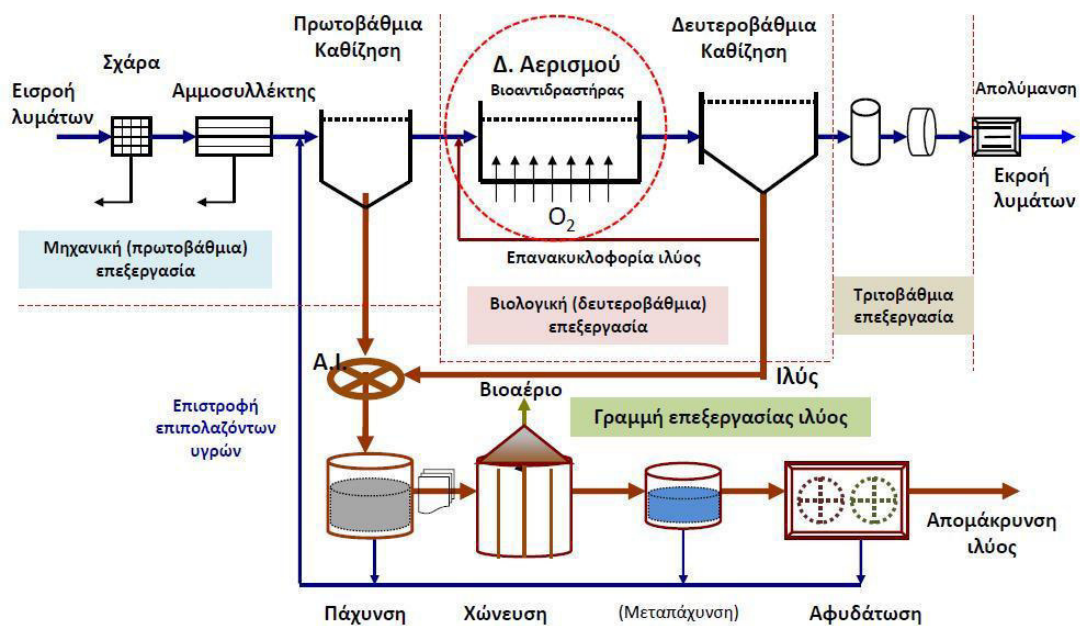
Ως υγρά απόβλητα ουσιαστικά νοείται το νερό το οποίο έχει δεχτεί ανθρωπογενή επίδραση. Στα υγρά απόβλητα περιλαμβάνονται τα υποπροϊόντα που αποβάλλονται καθημερινά από κάθε βιομηχανική εγκατάσταση, οι αστικές απορρίψεις, αλλά και τα ακάθαρτα όμβρια ύδατα. Η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων αποτελείται από τρία κύρια στάδια: την πρωτοβάθμια, τη δευτεροβάθμια και την τελική ή τριτοβάθμια επεξεργασία. (Alkhalidi et al., 2016).

Η επεξεργασία υγρών αποβλήτων είναι ενεργοβόρα, δηλαδή απαιτεί την κατανάλωση μεγάλης ποσότητας ενέργειας για να πραγματοποιηθεί. Η ενέργεια που χρησιμοποιείται συνήθως είναι ηλεκτρική και, σύμφωνα με υπολογισμούς που έχουν γίνει, το 1% της συνολικής κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης πραγματοποιείται σε εγκαταστάσεις για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Το αντίστοιχο ποσοστό στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής ανέρχεται στο 4% (Skouteris et al., 2020).

Η κατανάλωση ενέργειας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το λειτουργικό κόστος μίας μονάδας επεξεργασίας, καθώς, για παράδειγμα σε μία συμβατική μονάδα ενεργού ιλύος που καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια, απαιτούνται 0,3 – 2,1 kWh/m³, τα οποία αντιστοιχεί στο 25 – 50% του συνολικού λειτουργικού κόστους. Τα στάδια επεξεργασίας που απαιτούν κυρίως την κατανάλωση ενέργειας είναι (Skouteris et al., 2020) :

- ο αερισμός
- η άντληση και η επεξεργασία των βιοστερεών αποβλήτων (biosolids)

Στο παρακάτω διάγραμμα περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία επεξεργασίας αποβλήτων.



Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της επεξεργασίας αποβλήτων
 Πηγή :Νταρακάς, 2010

1.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Η προεπεξεργασία (pre-treatment) αποβλήτων είναι το σύνολο των εργασιών εκείνων που προηγούνται της επεξεργασίας των αποβλήτων. Περιλαμβάνει διαδικασίες, όπως εσχάρωση, λιποσυλλογή, αμμοσυλλογή, εξισορρόπηση παροχής, ρύθμιση pH. Οδηγεί σε απόβλητα όπου είναι πιο ασφαλές, εύκολο και οικονομικό να τα διαχειριστεί κάποιος (Ojovan & Lee, 2016).

1.2.1 Εσχάρωση



Εικόνα 1.2: Σχάρα για διαχωρισμό στερεών- υγρών αποβλήτων, κατάλληλη για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, όπως και για βαθιά κανάλια

Πηγή: <https://www.indiamart.com/dewatering-and-filtration-engineers/mechanical-screen-waste-water.html>

Τα μη επεξεργασμένα απόβλητα συχνά περιέχουν στερεά υλικά μεγάλου μεγέθους, όπως κομμάτια υφάσματος, χαρτιά, πλαστικά ή μεταλλικά δοχεία, καπάκια και άλλα αντικείμενα, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν αδικαιολόγητες φθορές και να εμφράξουν τον εξοπλισμό ενός εργοστασίου επεξεργασίας αποβλήτων, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση του κόστους συντήρησης (EPA, 2002).

Κατά την εσχάρωση μπορούν να χρησιμοποιούν μηχανήματα διαχωρισμού που φέρουν ανοίγματα, διάκενα ή οπές, σε οποιοδήποτε σχήμα, αλλά κυρίως κύκλους ή ορθογώνια. Για να σχηματιστούν τα ανοίγματα αυτά χρησιμοποιούνται παράλληλες ράβδοι ή σύρματα που σχηματίζουν σχάρες, πλέγματα, σήτες ή διάτρητες πλάκες. Ο καθαρισμός τους μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με μηχανικό είτε με χειροκίνητο τρόπο (Bhargava, 2016). Στον παρακάτω πίνακα 1.1 αναφέρονται οι κυριότεροι τύποι σχαρών που χρησιμοποιούνται, ανάλογα με το μέγεθος των οπών.

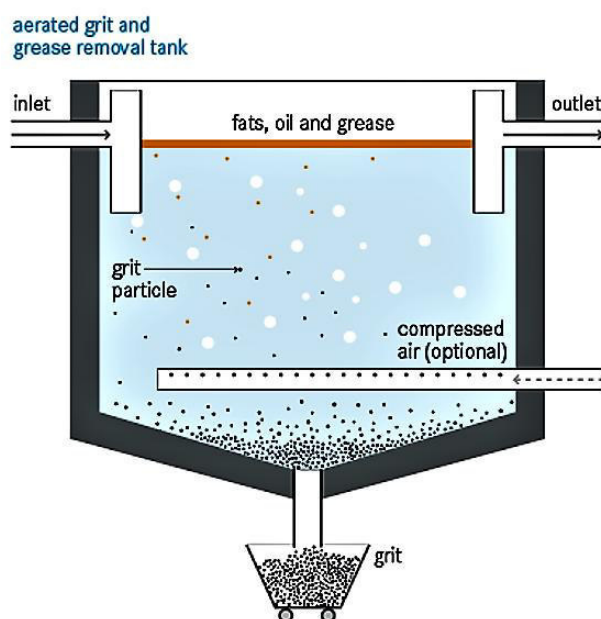
Πίνακας 1.1: Κατηγορίες, τύποι και χρήση σχαρών ανάλογα με το μέγεθος των διάκενων

Κατηγορία	Μέγεθος διάκενου (σε mm)	Χρήση	Τύποι
Χονδρές σχάρες (coarse screens)	≥6	Απομάκρυνση μεγάλων στερεών υλικών, σκουπιδιών και υπολειμμάτων	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Σχάρες ράβδων με χειροκίνητο καθαρισμό ▪ Μηχανικά καθαρισμένες σχάρες ραβδών.
Λεπτές σχάρες (fine screens)	1,5-6	Απομακρύνει αιωρούμενα σωματίδια και προετοιμάζει το απόβλητο για την πρωτοβάθμια επεξεργασία	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Περιστρεφόμενο τύμπανο με σχάρες (rotary-drum screens) ▪ Περιστρεφόμενο τύμπανο με σχάρες και ροή προς τα έξω ή προς τα μέσα (rotary-drum screens with outward or inward flow) ▪ Περιστρεφόμενες κυκλικές σχάρες (δίσκοι) κάθετων στον άξονα περιστροφής (rotary-vertical-disk screens) ▪ Κεκλιμένες περιστρεφόμενες σχάρες (inclined revolving disc screens) ▪ Μετακινούμενες σχάρες (traveling screens) ▪ Δονούμενες σχάρες (vibrating screens)
Πολύ λεπτές σχάρες (very fine screens)	0,2-1,5	Απομακρύνει αιωρούμενα σωματίδια και προετοιμάζει το απόβλητο για την πρωτοβάθμια επεξεργασία	
Μικρο- σχάρες (micro screens)	0,001-0,3	Προετοιμάζει το υγρό απόβλητο για τριτοβάθμια επεξεργασία	

Πηγή: Bhargava, 2016

Για τις χονδρές σχάρες, τα σχεδιαστικά κριτήρια περιλαμβάνουν το μέγεθος των ραβδών, την μεταξύ τους απόσταση, την γωνία που μπορεί να σχηματίσει η σχάρα από την κατακόρυφο, το πλάτος του καναλιού και την ταχύτητα κίνησης. Οι λεπτές σχάρες είναι διαφόρων τύπων όπως πλάκες με σχισμές ή οπές, συρμάτινα πλέγματα ή πλέγματα από σύρμα. Για να αποφεύγονται προβλήματα έμφραξης απαιτείται συνεχής καθαρισμός που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή βούρτσας, ξύστρας ή πιδάκων νερού (Bhargava, 2016).

1.2.1 Εξάμμωση ή αμμοσυλλογή



Εικόνα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση θαλάμου όπου συνδυάζεται η απομάκρυνση άμμου που καθιζάνει στον πυθμένα και λιπών και ελαίων που επιπλέουν στην επιφάνεια

Πηγή : Tilley et al., 2014

Μετά την εσχάρωση, ακολουθεί η εξάμμωση ή αμμοσυλλογή (grit removal), όπου από τη μάζα των αποβλήτων απομακρύνονται στερεά διαμέτρου 0,2 – 0,1mm. Πρόκειται για χαλίκια, άμμο και άλλα ορυκτά υλικά. Πρόκειται για μία διαδικασία που πραγματοποιείται συνήθως σε ανοικτό κανάλι ή κατάλληλους θαλάμους όπου τα απόβλητα εισέρχονται με ελεγχόμενη ροή, έτσι ώστε τα στερεά συστατικά να καθιζάνουν αλλά η μεγαλύτερη ποσότητα οργανικών συστατικών να συνεχίσει να αιωρείται (Tilley et al., 2014).

Με την αμμοσυλλογή:

- Προστατεύεται ο μηχανικός εξοπλισμός από τη φθορά
- Μειώνεται ο σχηματισμός βαρέων εναποθέσεων στη γραμμή σωλήνων
- Μειώνεται η ανάγκη για συχνό καθαρισμό που οφείλεται στην υπερβολική συσσώρευση κόκκων

Υπάρχουν τρεις γενικοί τύποι θαλάμων άμμου (Tilley et al., 2014):

- θάλαμοι οριζόντιας ροής (horizontal-flow chambers) με ορθογώνια ή τετράγωνη διαμόρφωση
- αεριζόμενοι θάλαμοι (aerated chambers)
- θάλαμοι τύπου vortex (vortex-type grit chambers).

1.2.3 Λιποσυλλογή

Η λιποσυλλογή είναι μία διαδικασία που έχει ως στόχο να απομακρύνει λιπαρές ουσίες από την ροή των αποβλήτων. Μία μέθοδος απομάκρυνσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η επίπλευση. Τα λιπαρά συστατικά λόγω μικρότερης πυκνότητας συγκεντρώνονται στην επιφάνεια των αποβλήτων και δημιουργούν ένα υπερκείμενο στρώμα όπου μπορεί να απομακρυνθεί είτε χειρωνακτικά είτε μηχανικά. Η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί παράλληλα με την αμμοσυλλογή (εικόνα 1.3). Τα λίπη που απομακρύνονται κατά τη διαδικασία αυτή συνηθίζεται να οδηγούνται μαζί με τις λάσπες που συλλέγονται κατά την πρωτοβάθμια, δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια καθίζηση (Tilley et al., 2014).

1.2.4 Εξισορρόπηση ροής

Τα απόβλητα που παράγονται από μία βιομηχανική μονάδα ή ακόμη και από ένα αστικό κέντρο παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας ως προς τη ροή, αλλά και τη σύνθεσή τους. Κάθε στάδιο μίας παραγωγικής διαδικασίας μπορεί να παράγει ένα ρεύμα αποβλήτων διαφορετικής χημικής σύστασης. Οι διακυμάνσεις αυτές όμως μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην ομαλή διεξαγωγή και την αποτελεσματικότητα ορισμένων διαδικασιών επεξεργασίας, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί με συγκεκριμένα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Έτσι η συνολική απόδοση και η αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας υποβαθμίζονται σημαντικά. Οπότε, συχνά, απαιτείται τα διαφορετικά ρεύματα να αναμιγνύονται και να ομογενοποιούνται ώστε να διαμορφώνεται ένα ρεύμα αποβλήτων ποιοτικά ομοιόμορφο ποιοτικά (Goel et al., 2007, Bhargava, 2016).

Στη δεξαμενή εξισορρόπησης, η είσοδος των αποβλήτων είναι χρονικά μεταβαλλόμενο μέγεθος, αλλά τα απόβλητα που εξέρχονται από τη δεξαμενή είναι σταθερά σε ποσότητα και σύνθεση. Αν τα απόβλητα απαιτούν να παραμείνουν στη δεξαμενή για μεγάλο χρονικό διάστημα τότε εφαρμόζεται αερισμός, ώστε να μην δημιουργηθούν αναερόβιες συνθήκες (Bhargava, 2016).

Συχνά στις δεξαμενές εξισορρόπησης πραγματοποιείται και ρύθμιση της αλκαλικότητας και της οξύτητας των υγρών αποβλήτων. Το pH των υγρών αποβλήτων είναι μεταβλητό και παρουσιάζει σημαντική διακύμανση. Οι ακραίες τιμές

του όμως (3,5-12) μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στην κροκίδωση ή στην ανάπτυξη ορισμένων μικροοργανισμών, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στις βιολογικές διεργασίες (Goel et al., 2007).

1.3 ΠΡΩΤΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

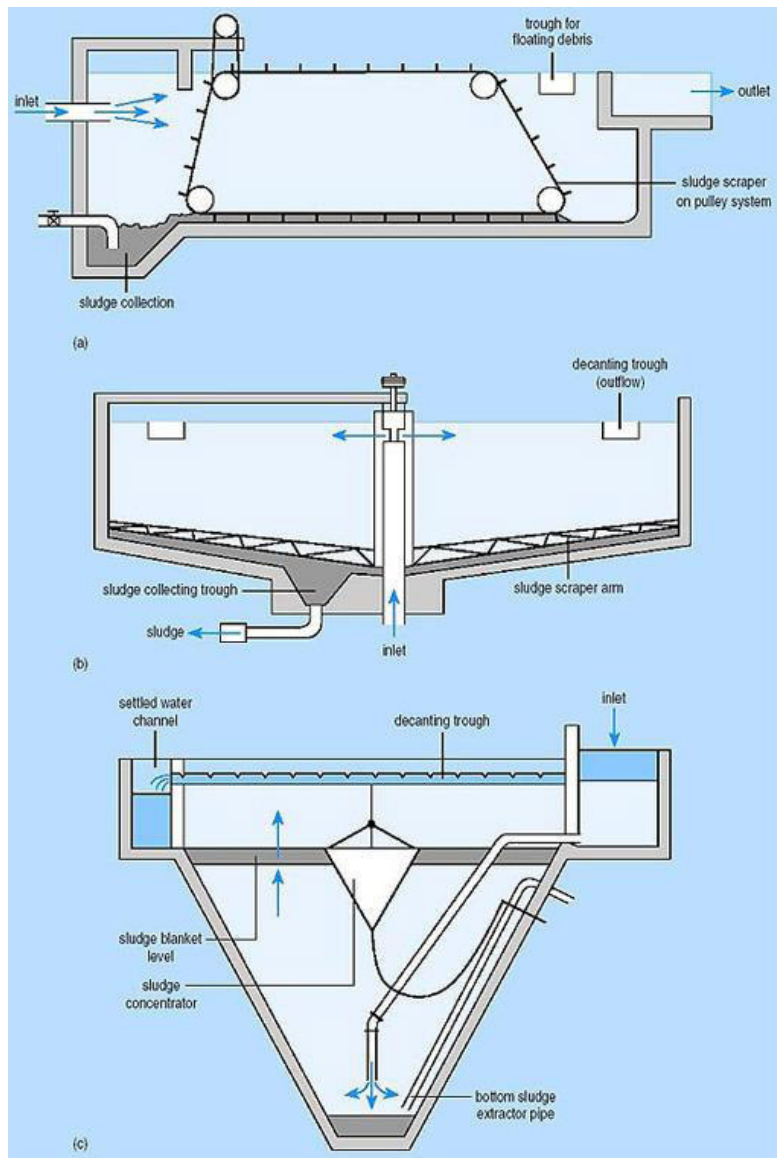
Η πρωτοβάθμια επεξεργασία ονομάζεται επίσης και πρωτογενής καθίζηση. Είναι μία τεχνολογία όπου εφαρμόζεται ώστε να απομακρυνθούν από τη ροή του υγρού αποβλήτου, τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια διαμέτρου 0,1 – 0,001mm ως ιζήματα και το πλεονάζον οργανικό υλικό που μπορεί να σχηματίζει μία αφρώδης μάζα στην επιφάνεια του υγρού. Η απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών σε αυτό το στάδιο είναι ελάχιστη και σε μεγάλο βαθμό τυχαία, καθώς ορισμένοι μικροοργανισμοί προσκολλώνται στα στερεά σωματίδια και απομακρύνονται στην πρωτογενής λάσπη (Oakley, 2018).

Η πρωτογενής λάσπη περιέχει 2-5% ολικά στερεά και σε ποσοστό 60-80% το περιεχόμενο της είναι οργανικό. Οδηγείται, λοιπόν, για περαιτέρω επεξεργασία, ώστε να διατεθεί με ασφάλεια στο περιβάλλον, ενώ γίνονται προσπάθειες να αξιοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό. Συνήθως, η πρωτογενής λάσπη αφού σταθεροποιηθεί, υποβάλλεται σε αερόβια ή αναερόβια χώνευση, από όπου μπορεί να παραχθεί βιοαέριο (Oakley, 2018).

Οι δεξαμενές καθίζησης είναι είτε δεξαμενές οριζόντια ροής είτε ακτινικής ροής. Οι δεξαμενές οριζόντιας ροής έχουν σχήμα ορθογώνιο, τετράγωνο ή κυκλικό και η ροή του αποβλήτου γίνεται παράλληλα με τη μεγαλύτερη διάσταση της δεξαμενής (μήκος). Στις δεξαμενές κυκλικής ροής, το υγρό ρέει ακτινικά από το κέντρο προς τα εξωτερικά τοιχώματα της δεξαμενής (Bhargava, 2016).

Το συνήθες υλικό κατασκευής είναι ο χάλυβας ή το σκυρόδεμα και η κάτω επιφάνεια έχει μία κλίση ώστε να διευκολύνεται η απομάκρυνση της λάσπης. Στις ορθογώνιες δεξαμενές η κλίση είναι συνήθως προς την είσοδο, ενώ στις κυκλικές και τετράγωνες ο πυθμένα είναι κωνικός με κλίση προς το κέντρο (Bhargava, 2016).

Στην παρακάτω εικόνα διακρίνονται ορισμένες τυπικές δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης: (α) ορθογώνια δεξαμενή οριζόντιας ροής (β) κυκλική δεξαμενή ακτινικής ροής (γ) δεξαμενή με πυθμένα χοάνης



Εικόνα 1.4: Τυπικές δεξαμενές πρωτοβάθμιας καθίζησης (α) ορθογώνια δεξαμενή οριζόντιας ροής (b) κυκλική δεξαμενή ακτινικής ροής (c) δεξαμενή με πυθμένα χοάνης

Πηγή: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/engineering-and-technology/technology/potable-water-treatment/content-section-4.4>

1.4 ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Οι διαδικασίες που εφαρμόζονται στη δευτεροβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων αποσκοπούν στην απομάκρυνση των βιοαποικοδομήσιμων οργανικών ουσιών και των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων με τη βοήθεια ενός συνδυασμού βιολογικών, φυσικών και χημικών διεργασιών. Η επιλογή των μεθόδων που θα χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία των λυμάτων σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά των λυμάτων, το οικονομικό κόστος, τη σκοπιμότητα, την αποτελεσματικότητα, την

πρακτικότητα, την αξιοπιστία, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την παραγόμενη ιλύ, τις νομοθετικές απαιτήσεις και τον σχηματισμό των δυνητικά τοξικών υποπροϊόντων (Crini & Lichtfouse, 2018).

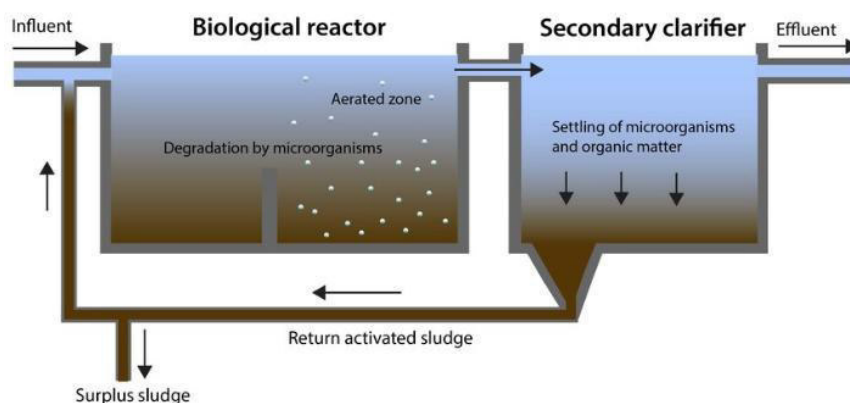
1.4.1 Φυσικές και χημικές διεργασίες

Κατά τις φυσικοχημικές επεξεργασίες μειώνεται το οργανικό φορτίο των υγρών αποβλήτων. Εφαρμόζονται στα βιομηχανικά απόβλητα όπου η παρουσία ορισμένων χημικών συστατικών μπορεί να οδηγήσει σε παρεμπόδιση της βιολογικής δραστηριότητας. Οι φυσικοχημικές επεξεργασίες οδηγούν στην παραγωγή μεγάλης ποσότητας ιλύος, η οποία φέρει το σύνολο του ρυπαντικού φορτίου που απομακρύνθηκε από τη μάζα των αποβλήτων. Δηλαδή, οι ρύποι δεν καταστράφηκαν αλλά απλά απομακρύνθηκαν από το υγρό απόβλητο προς την ιλύ. Ορισμένες από τις φυσικές και χημικές εργασίες που εφαρμόζονται είναι (Crini & Lichtfouse, 2018):

- Η κροκίδωση. Είναι μία απλή και ολοκληρωμένη φυσικοχημική διαδικασία, αποτελεσματική για την απομάκρυνση στερεών διαλυτών σωματιδίων και κολλοειδών, με καθίζηση ή επίπλευση. Στο εμπόριο διατίθεται ένα ευρύ φάσμα χημικών – κροκιδωτικών ουσιών που μπορούν να προστεθούν στα υγρά απόβλητα (ανόργανα κροκιδωτικά όπως άλατα σιδήρου, αργύρου, υδράργυρος ή πολυμερείς ενώσεις. Προκαλεί μείωση του COD και BOD, μείωση του συνολικού οργανικού άνθρακα, απομακρύνει αποτελεσματικά από το υγρό απόβλητο αδιάλυτους ρύπους όπως χρωστικές. Τα κυριότερα μειονεκτήματα του είναι ότι τα κροκιδωτικά ή πιθανόν βοηθητικές ουσίες που προστίθενται είναι μη επαναχρησιμοποιούμενες, ο όγκος της παραγόμενης ιλύς είναι αυξημένος και οι εκροές που προκύπτουν θέλουν παρακολούθηση των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών τους.
- Η επίπλευση/επίπλευση αφρού είναι αποτελεσματική για την αφαίρεση μικρών σωματιδίων και σωματιδίων μικρής πυκνότητας, τα οποία θα απαιτούσαν μεγάλο χρόνο επεξεργασίας κατά την καθίζηση. Επιτυγχάνεται με εισαγωγή φυσαλίδων αέρα στη μάζα του αποβλήτου, στην επιφάνεια των οποίων τα σωματίδια κατάλληλης διαμέτρου και πυκνότητας προσκολλώνται και ανεβαίνουν στην επιφάνεια του υγρού. Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει είναι το κόστος αρχικής εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας, η κατανάλωση ενέργειας.

1.4.2 Βιολογική Επεξεργασία

Η βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια αερόβιων ή αναερόβιων μικροοργανισμών, οι οποίοι ως στόχο έχουν την αποδόμηση της οργανικής ύλης που περιέχεται στο υγρό απόβλητο. Μπορεί να γίνει χρησιμοποιηθούν βιοαντιδραστήρες (bioreactors), η μέθοδος της ενεργούς ιλύος (biological activated sludge), μικροβιολογικές επεμβάσεις, ενζυματική αποσύνθεση και λιμνοθάλασσες (lagoon) (Crini & Lichtfouse, 2018).



Εικόνα 1.5: Σχήμα βιολογικού αντιδραστήρα ενεργής ιλύος

Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-depictions-of-an-activated-sludge-system_fig4_328980854

Η ενεργός ιλύς (activated sludge process -ASP) είναι μία συμβατική αερόβια τεχνική η οποία εφαρμόζεται σε αστικά αλλά και βιομηχανικά λύματα. Βασίζεται στο γεγονός ότι οι μικροοργανισμοί για να επιβιώσουν, να αναπτυχθούν και να πολλαπλασιαστούν χρειάζονται θρεπτικά συστατικά (N, C, P), τα οποία λαμβάνουν από τη μάζα των υγρών αποβλήτων. Για παράδειγμα, πολύπλοκες οργανικές ενώσεις που μπορεί να περιέχονται στο υγρό απόβλητο, χρησιμοποιούνται ως πηγή άνθρακα και σταδιακά διασπώνται σε απλούστερες. Στη μέθοδο αυτή, τα βιομηχανικά απόβλητα αναμειγνύονται με μικροβιακές καλλιέργειες, απλές ή σύνθετες, σε αντιδραστήρα αεριζόμενο και στη συνέχεια η ενεργοποιημένη ιλύ οδηγείται στη δεξαμενή αερισμού. Εκτός από την αποικοδόμηση της οργανικής ύλης από τους μικροοργανισμούς, μία ποσότητα οργανικών ενώσεων απομακρύνεται από τη μάζα του υγρού αποβλήτου, καθώς δημιουργούνται μικροβιακά κροκίδια (microbial flocs) στα οποία οι υδρόφοβες οργανικές ενώσεις προσκολλώνται. Με την ενεργό ιλύ, τα επεξεργασμένα λύματα είναι συνήθως κακής ποιότητας και απαιτείται

μεγάλη έκταση για να εγκατασταθεί αυτή η τεχνική. Συνήθως, ακολουθεί δευτεροβάθμια καθίζηση (Kanaiya et al., 2019).

Η βιολογική νιτρίκοποίηση/απονιτρίκοποίηση των υγρών αποβλήτων είναι μία ακόμη διεργασία δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Κατά την νιτρίκοποίηση, το αμμώνιο (NH_4^+) οξειδώνεται με την επίδραση νιτροποιητικών βακτηρίων σε νιτρώδη (NO_2^-) και νιτρικά (NO_3^-) άλατα, ενώ κατά την απονιτρίκοποίηση τα νιτρώδη (NO_2^-)/νιτρικά (NO_3^-) μετατρέπονται σε μοριακό άζωτο (N_2) που είναι αέριο και ελευθερώνεται στο περιβάλλον (Kanaiya et al., 2019).

Η εφαρμογή μικροοργανισμών στην βιοαποικοδόμηση οργανικών ενώσεων είναι μία απλή, οικονομική και αποδεκτή πρακτική. Διάφορα είδη μικροοργανισμών που συνήθως ανήκουν στα βακτήρια, στους μύκητες ή στα πρωτόζωα συνθέτουν ένα περιβάλλον μέσα στο οποίο αναπτύσσονται συμβιωτικές σχέσεις συνέργειας ή ανταγωνισμού. Η παρουσία των μικροοργανισμών σε ένα υγρό απόβλητο συχνά συνεπάγεται και την παραγωγή εξωκυτταρικών ενζύμων που αυξάνουν την βιοαποικοδόμηση της οργανικής ύλης, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τους μύκητες της λευκής σήψης (Crini & Lichtfouse, 2018).

Η βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων απαιτεί τη διαμόρφωση ενός ευνοϊκού περιβάλλοντος για την ανάπτυξη των μικροοργανισμών. Αυτό σημαίνει, ότι θα πρέπει να έχει ρυθμιστεί το περιβάλλον κατάλληλα (αλκαλικότητα και οξύτητα, απομάκρυνση τοξικών ουσιών). Είναι μία αργή διαδικασία, αναποτελεσματική σε μη αποικοδομήσιμες ενώσεις, ενώ υπάρχουν και ορισμένες ουσίες που αν και οργανικές δεν βιοδιασπώνται εύκολα όπως ορισμένες χρωστικές. Μπορεί να προκαλέσει αφρισμό στην ιλύ, ενώ τα παραγόμενα προϊόντα αποδόμησης μπορεί να είναι μη προβλέψιμα (Crini & Lichtfouse, 2018).

1.5 ΤΡΙΤΟΒΑΘΜΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Μετά το τέλος της δευτεροβάθμιας καθίζησης, η ιλύς απομακρύνεται για περαιτέρω επεξεργασία ενώ το υπερκείμενο υγρό, θεωρείται ακόμη υγρό απόβλητο, καθώς περιέχει ουσίες οι οποίες δεν έχουν αποικοδομηθεί σε πιο απλές και είναι ακόμη διαλυμένες στη μάζα του, αιωρούμενα στερεά σωματίδια, κολλοειδείς ουσίες που δεν μπόρεσαν να απομακρυνθούν κατά την καθίζηση, καθώς και μικροβιακή μάζα, η οποία αποτελείται από τους ζωντανούς ή νεκρούς, παθογόνους ή μη

παθογόνους μικροοργανισμούς που παρέμειναν από τις προηγούμενες διαδικασίες. Το σύνολο των τεχνολογιών που θα εφαρμοστούν για την απομάκρυνση όλων αυτών από τη μάζα του υγρού αποτελεί την τρίτοβάθμια επεξεργασία. Συνήθως πρόκειται για φυσικοχημικές μεθόδους επεξεργασίας (Crini & Lichtfouse, 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΗΜΑΣΙΑ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο αερισμός αποτελεί μία από τις πιο κρίσιμες διαδικασίες κατά την αερόβια επεξεργασία υγρών λυμάτων. Με τον αερισμό (Skouteris et al., 2020):

- οι μικροοργανισμοί προμηθεύονται το απαραίτητο για την ανάπτυξη και τον πολλαπλασιασμό τους απαιτούμενο διαλυμένο οξυγόνο
- εμποδίζεται η καθίζηση των στερεών τα οποία παραμένουν διαλυμένα στη μάζα του υγρού αποβλήτου, καθώς πραγματοποιείται μία ήπια ανάμειξη στη δεξαμενή
- ελέγχεται η ρύπανση στους βιοαντιδραστήρες μεμβράνης

Ο αερισμός μπορεί να διαρκέσει από 30 min μέχρι και 36 h.

Κατά τον αερισμό πραγματοποιείται, επίσης, μία ήπια ανάμειξη στη δεξαμενή, η οποία επιτυγχάνει να φέρει και να διατηρήσει σε επαφή τους μικροοργανισμούς και την οργανική ύλη που είτε αιωρείται μέσα στο απόβλητο είτε είναι διαλυμένη σε αυτό. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η πέψη της οργανικής ύλης (Alkhalidi et al., 2016)

Επιπλέον, το οξυγόνο που παρέχεται κατά τον αερισμό στη μάζα των υγρών αποβλήτων σχηματίζει ένα προστατευτικό «κάλυμμα οσμής» στην επιφάνεια των λιμνών και λεκανών. Ουσιαστικά, εμποδίζει την απελευθέρωση ενός σημαντικού αριθμού δύσοσμων ενώσεων του θείου στον αέρα, καθώς τις οξειδώνει (Hudnell et al., 2011).

2.2 ΑΕΡΙΣΜΟΣ

Στην αερόβια επεξεργασία, τα μόρια οξυγόνου πρέπει να ξεπεράσουν μια σειρά αντιστάσεων μεταφοράς που θα χρησιμοποιηθούν από τα κύτταρα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αυτές είναι (Skouteris et al., 2020):

1. Μεταφορά από το εσωτερικό της φυσαλίδας στη διεπιφάνεια αερίου-υγρού
2. Μετακίνηση κατά μήκος της διεπαφής αερίου-υγρού
3. Διάχυση μέσω του σχετικά στάσιμου υγρού φιλμ που περιβάλλει τη φυσαλίδα

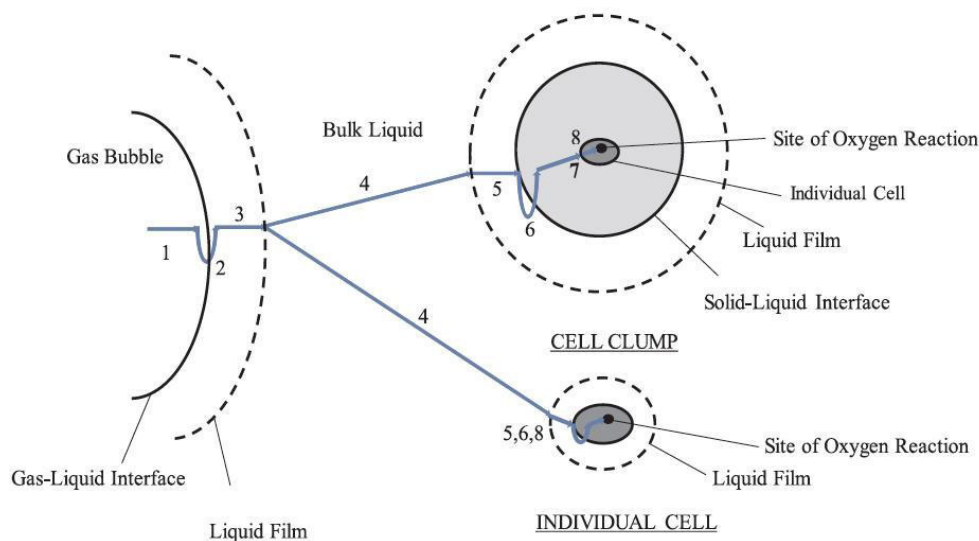
4. Μεταφορά μέσω του υγρού όγκου

5. Διάχυση μέσω του σχετικά στάσιμου υγρού φιλμ που περιβάλλει τις κυψέλες

6. Κίνηση κατά μήκος της διεπαφής υγρού-κυττάρου

7. Διάχυση μέσω του στερεού στο μεμονωμένο κύτταρο, σε περίπτωση που τα κύτταρα βρίσκονται σε κροκίδα, συστάδα ή στερεό σωματίδιο (για μεμονωμένα κύτταρα, αυτό το στάδιο δεν υπάρχει)

8. Μεταφορά μέσω του κυτταροπλάσματος στη θέση της αντίδρασης,



Εικόνα 2.1: Στάδια μεταφοράς οξυγόνου από τη φυσαλίδα αερίου στο κύτταρο
Πηγή: Skouteris et al., 2020

Η μεταφορά οξυγόνου στα λύματα επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της βιομάζας και τον σχεδιασμό του συστήματος αερισμού. Ο αερισμός και οι τρεις παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη βιομάζα, δηλαδή η συγκέντρωση σωματιδίων, το μέγεθος σωματιδίων και το ιξώδες, είναι αλληλένδετες. Η ένταση του αερισμού επηρεάζει το μέγεθος και το ιξώδες των σωματιδίων. Οποιαδήποτε αύξηση του ιξώδους έχει αρνητική επίδραση στη μεταφορά οξυγόνου με τη συγκέντρωση των στερεών να την τροποποιεί. Η μεταφορά οξυγόνου επηρεάζεται επίσης από το μέγεθος των σωματιδίων και τη συγκέντρωση των σωματιδίων, τα αποτελέσματα των οποίων είναι αλληλένδετα. Τέλος, ο σχεδιασμός του συστήματος αερισμού επηρεάζει επιπρόσθετα τη μεταφορά οξυγόνου με τον παράγοντα α να είναι η κύρια παράμετρος που καθορίζει την ικανότητα αερισμού του συστήματος. Ο παράγοντας α υποδεικνύει την επίδραση των λυμάτων στη μεταφορά οξυγόνου και ποικίλλει ανάλογα με την ποιότητα των λυμάτων, τη συγκέντρωση MLSS και την ένταση της

ανάμειξης ή την εφαρμοζόμενη αναταραχή. Τόσο ο β-παράγοντας, ο οποίος ευθύνεται για την επίδραση των αλάτων και των σωματιδίων στα λύματα στη μεταφορά οξυγόνου, όσο και ο παράγοντας θερμοκρασίας έχουν μικρότερο αντίκτυπο στη μεταφορά μάζας, επομένως μπορούν να αγνοηθούν (Skouteris et al., 2020).

Η ενεργός ιλύς είναι μία διαδικασία επεξεργασίας όπου, με τη βοήθεια του αερισμού, μικροοργανισμοί χρησιμοποιούν τις οργανικές ουσίες των υγρών αποβλήτων ως τροφή. Οι μικροοργανισμοί αυτοί αναπτύσσονται και αναπαράγονται στην ιλύ είτε ως μεμονωμένα σωματίδια είτε ως συσσωματώματα (flocs), τα οποία με καθίζηση μπορούν να απομακρυνθούν από τη μάζα των υγρών αποβλήτων (Skouteris et al., 2020).

Η επεξεργασία της ενεργούς ιλύος απαιτεί

- Μία δεξαμενή αερισμού, μέσα στην οποία πραγματοποιούνται οι βιολογικές αντιδράσεις
- Μία πηγή αερισμού, ώστε να τροφοδοτείται η μάζα των υγρών αποβλήτων με οξυγόνο και να πραγματοποιείται ανάμειξη του συστήματος
- Μία δεξαμενή δευτεροβάθμιας καθίζησης, όπου απομακρύνονται τα στερεά που έχουν καθιζάνει από τα διαυγασμένα υγρά απόβλητα
- Ένα σύστημα απομάκρυνσης της ιλύος στα επόμενα στάδια επεξεργασίας ή μερικής επιστροφής στην δεξαμενή αερισμού

Τρεις τύποι επεξεργασίας εφαρμόζονται συχνότερα (Skouteris et al., 2020):

- Εκτεταμένος αερισμός: Σε δεξαμενές αερισμού παρέχεται αέρας με μηχανικό τρόπο ή με κατάλληλους διαχυτήρες και πραγματοποιείται ταυτόχρονα και ανάμειξη. Κατά τη διαδικασία αυτή παράγεται μικρή ποσότητα περίσσειας ιλύος και μικρότερη ποσότητα ιλύος από άλλες μεθόδους αερόβιας επεξεργασίας
- Αντιδραστήρες διαλείπουσας λειτουργίας (SBR): Στους αντιδραστήρες διαλείπουσας λειτουργίας, ο αερισμός, η οξειδωση και η καθίζηση πραγματοποιούνται στην ίδια δεξαμενή. Είναι μία διαδικασία πέντε διαδοχικών βημάτων που επαναλαμβάνονται: πλήρωση- αερισμός- καθίζηση- απομάκρυνση ιλύος-αδράνεια.

- Οξειδωτικοί τάφροι: Κανάλια ελλειψοειδούς σχήματος ή δακτύλιοι που φέρουν κατάλληλο μηχανολογικό εξοπλισμό για αερισμό, όπως αεριστήρες με βούρτσα ή εμβαπτισμένους δίσκους. Συνήθως προηγείται κοσκίνιση, εξάμμωση και λιποσυλλογή. Ο χρόνος παραμονής των στερεών είναι μεγάλη και συνήθως αιωρούνται.

Στον παρακάτω πίνακα, συγκρίνονται αυτές οι τρεις μεθόδους επεξεργασίας της ενεργούς ιλύος και παρουσιάζονται τα κυριότερα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Πίνακας 2.1 : Σύγκριση μεθόδων επεξεργασίας της ενεργούς ιλύος

Μέθοδος	Θετικά	Αρνητικά
Εκτεταμένος αερισμός	Εύκολη λειτουργία Ευκολία εγκατάστασης Δεν εμφανίζονται οσμές Μικρή απαίτηση σε χώρο Μικρή παραγωγή περίσσειας ιλύος	Δεν μπορεί να επιτύχει απονιτροποίηση ή αποφωσφόριση, δυσκολία λειτουργίας όταν εμφανίζονται λύματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά, μεγάλη ανάγκη σε ενέργεια
Αντιδραστήρες διαλείπουσας λειτουργίας	Μπορεί να επιτύχει νιτροποίηση, απονιτροποίηση και αποφωσφόριση, μεγάλη λειτουργική ευελιξία, μικρή πιθανότητα διόγκωσης ιλύος, λίγα λειτουργικά προβλήματα	Μεγάλη κατανάλωση ενέργειας, δυσκολία συγχρονισμού ή χρονισμού, συνεχής απομάκρυνση περίσσειας ιλύος
Οξειδωτικοί τάφροι	Μικρή κατανάλωση ενέργειας, δεν υπάρχει συσχέτιση με τις καιρικές συνθήκες, προσφέρει άριστης ποιότητας εκρέον, μικρή παραγωγή περίσσειας ιλύος, ικανή να ανταπεξέρχεται με επιτυχία σε συνθήκες υπερφόρτισης	Θορυβώδης με ταυτόχρονη παραγωγή οσμών, προβλήματα στην περίπτωση εισροής τοξικών υλικών, απαιτεί εκτεταμένες εκτάσεις γης

2.3 ΑΝΑΜΕΙΞΗ

Κατά τη διαδικασία ανάμειξης, υπάρχουν πέντε συντελεστές που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον (Grenville et al., 2021):

1. Ο μέσος χρόνος παραμονής (mean residence time), ο οποίος ουσιαστικά εκφράζει τον μέσο χρόνο που μία μικρο-ποσότητα υγρού παραμένει στο χώρο ανάμειξης. Αν πρόκειται για αντιδραστήρα συνεχούς ανάμειξης (continuous stirred-Tank reactor) υπολογίζεται από τον λόγο του λειτουργικού όγκου του δοχείου προς την παροχή.
2. Ο χρόνος κυκλοφορίας (circulation time). Είναι ο χρόνος που απαιτείται κατά μέσο όρο ώστε μία μικρο-ποσότητα υγρού να κινηθεί από την πτερωτή, γύρω στο δοχείο και να επιστρέψει ξανά στην πτερωτή.
3. Ο χρόνος ανάμειξης (blend time). Είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε ένα υλικό που προστίθεται να αναμιχθεί με το υπόλοιπο περιεχόμενο του δοχείου στον επιθυμητό βαθμό ομοιογένειας.
4. Χρονική κλίμακα μεσο-ανάμειξης (meso-mixing timescale). Είναι μία παράμετρος που σχετίζεται με τον χρόνο που απαιτείται για τη διασπορά της τροφοδοσίας που εισέρχεται σε έναν αντιδραστήρα ημισυνεχούς ροής ή σε συνεχή αντιδραστήρα.
5. Χρονική κλίμακα μικρο-ανάμειξης (micro-mixing timescale). Σχετίζεται με το χρόνο που απαιτείται για να συρρικνωθούν οι μικρότερες τυρβώδεις δίνες στην κλίμακα μήκους τύρβης ή κλίμακα Kolmogorov όταν χάνουν τη δομική τους ταυτότητα και η κινητική τους ενέργεια διαχέεται ως θερμότητα. Αυτό προκύπτει ότι ο αριθμός Reynolds των δίνων είναι μονάδα και οι αδρανειακές και ιξώδεις τάσεις είναι σε ισορροπία.

Η ανάμειξη βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της επεξεργασίας κατανέμοντας διαλυμένο οξυγόνο (DO) σε όλη τη μάζα των αποβλήτων και αναμειγνύοντας ομοιογενή ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) και διαλυμένα συστατικά υγρών αποβλήτων. Η οξυγόνωση παρέχει το διαλυμένο οξυγόνο (DO) που απαιτείται από τα βακτήρια για να αφομοιώσουν την εισερχόμενη οργανική ύλη αερόβια. Τα αερόβια και τα βακτήρια που λειτουργούν προαιρετικά αερόβια αφομοιώνουν γρήγορα την οργανική ύλη όταν ικανοποιείται η βιοχημική ζήτηση οξυγόνου (BOD) του εισερχόμενου νερού. Η διαδικασία πέψης αποδίδει νερό και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και μειώνει τη συγκέντρωση άνθρακα στο νερό όταν η ανάμειξη προάγει την

εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Τα προαιρετικά βακτήρια που λειτουργούν αναερόβια στον άμορφο πολτό κοντά στον πυθμένα της λίμνης αφομοιώνουν επίσης την οργανική ύλη, χρησιμοποιώντας οξυγόνο που παρέχεται από νιτρικά (NO_3^-) και θειικά (SO_4^{2-}). Αυτή η διαδικασία πέψης αποδίδει οξέα, αλκοόλες, υδρόθειο (H_2S) και άλλες τοξικές και δύσοσμες ενώσεις θείου. Τα αναερόβια βακτήρια κάτω από τον πολτό στην ιλύ που φέρει βάρος μεταβολίζουν τα οξέα και τις αλκοόλες, παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο (CH_4) μέσω της ζύμωσης. Η ανάμειξη προάγει την απελευθέρωση του διοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου στον αέρα, μειώνοντας έτσι περαιτέρω τις συγκεντρώσεις άνθρακα στο νερό. Η διατήρηση του οξυγόνου στα κορυφαία λίγα εκατοστά ή περισσότερα από τις λίμνες παρέχει ένα «κάλυμμα οσμής» οξειδώνοντας τις δύσοσμες ενώσεις θείου σε άοσμο θειικό άλας (SO_4^{2-}) (Hundell et al., 2011).

Το άζωτο από εισερχόμενα ιόντα αμμωνίου (NH_4^+) απελευθερώνεται στον αέρα ως στοιχειακό αέριο άζωτο (N_2) όταν η νιτροποίηση ακολουθείται από απονιτροποίηση. Τα αυτοτροφικά, νιτροποιητικά βακτήρια οξειδώνουν ιόντα αμμωνίου σε νιτρώδες (NO_2^-) και περαιτέρω σε νιτρικά, χρησιμοποιώντας διαλυμένο οξυγόνο (DO) για παραγωγή ενέργειας και διττανθρακικά (μορφές HCO_3^-) για κυτταρικό άνθρακα. Ο ρυθμός νιτροποίησης είναι υψηλότερος σε pH περίπου 7,5–9,0 και θερμοκρασία περίπου 15–35 °C. Η απονιτροποίηση συμβαίνει κυρίως όταν προαιρετικά βακτήρια οξειδώνουν την οργανική ύλη σε αναερόβιες περιοχές λιμνών. Τα ετερότροφα, απονιτροποιητικά βακτήρια μειώνουν τα νιτρικά σε άζωτο οξειδία (π.χ. NO_3^- , NO_2^-), και τελικά αέριο άζωτο, κατά την αναπνοή. Ο ρυθμός απονιτροποίησης είναι υψηλότερος σε pH περίπου 7,5–8,5 και σε θερμοκρασίες περίπου 25–35 °C. Η συγκέντρωση αζώτου στο νερό μειώνεται καθώς το αέριο άζωτο εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα (Hundell et al., 2011).

Οι δεξαμενές αποθήκευσης απορριμμάτων ιλύος, που μερικές φορές χρησιμοποιούνται σε συστήματα ενεργοποιημένης ιλύος, συνήθως αερίζονται για να παρέχουν ένα «κάλυμμα οσμής» 2 mg/L DO ή περισσότερο στα 0,1–0,5 m κορυφής για την οξείδωση του υδρόθειου και άλλων δύσοσμων ενώσεων θείου σε άοσμη θειικό άλας. Αν και τα φύκια και ο επανααερισμός της επιφάνειας συχνά παρέχουν το απαιτούμενο DO, μπορεί να συμβούν συμβάντα οσμής όταν η αερόβια πέψη των διαλυμένων οργανικών ουσιών στην άνω στήλη νερού εξαντλεί το DO. Οσμές μπορεί επίσης να συμβούν σε μη αναμεμιγμένες λίμνες κατά τη διάρκεια εποχιακών

ανατροπών, όταν οι ενώσεις θείου μετακινούνται με το νερό του πυθμένα στην επιφάνεια χωρίς να περάσουν μέσα από οξυγονωμένο νερό (Hundell et al., 2011)..

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΚΑΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

3.1 ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΕΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

3.1.1 Ενεργειακές απαιτήσεις

Ο αερισμός θεωρείται απαραίτητος στην πλειονότητα των μονάδων επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Ωστόσο, απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργεια και έχει υπολογιστεί ότι αντιπροσωπεύει το 45 έως 75% της συνολικής ενεργειακής δαπάνης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας αποβλήτων. Σύμφωνα με υπολογισμούς που έχουν γίνει, αν ο ηλεκτροκινητήρας που χρησιμοποιείται στη μονάδα επεξεργασίας έχει απόδοση 92%, για την παραγωγή 0,9 kg διαλυμένου οξυγόνου (Dissolved oxygen – DO) / h απαιτείται περίπου 0,83 kW ισχύος. Για τον υπολογισμό του απαιτούμενου διαλυμένου οξυγόνου λαμβάνεται υπόψη η ποσότητα BOD και οι απαιτήσεις της μετατροπής του αμμωνίου (NH_4^+) σε νιτρικό (NO_3^-) κατά τη νιτρίκοποίηση. Κάθε 1 kg βιοχημικά απαιτούμενου οξυγόνου (Biochemical Oxygen Demand – BOD) απαιτεί την είσοδο περίπου 1,5 kg DO σε λίμνες εκτεταμένου αερισμού, ενώ για την μετατροπή 1 kg ιόντων αμμωνίου σε νιτρικό κατά τη νιτροποίηση απαιτούνται περίπου 4,6 kg DO. Σημειώνεται ότι το DO που καταναλώνεται κατά την νιτροποίηση, ανακτάται κατά την απονιτροποίηση εφόσον συμβεί στον ίδιο χώρο επεξεργασίας. Οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ μίας μονάδας επεξεργασίας για τον αερισμό και την ανάμειξη υπολογίζονται χωριστά και συγκρίνονται. Το σύστημα ηλεκτρικής ισχύος εγκαθίσταται έτσι ώστε να καλύπτει τις υψηλότερες απαιτήσεις, οι οποίες συνήθως είναι της ανάμειξης, αυξημένες κατά ένα ποσοστό 15–20% (Hudnell et al., 2011).

3.1.2 Υπολογισμοί χρήσιμων παραμέτρων κατά τον αερισμό.

Κατά την ανάλυση ή τον προσδιορισμό συστημάτων αερισμού, είναι σημαντικό να ορίζονται οι παράμετροι απόδοσης. Το οξυγόνο που παρέχεται κατά τη διαδικασία αερισμού, πρέπει να είναι επαρκές ώστε να υποστηρίξει το σύστημα

βιολογικής επεξεργασίας . Η παροχή αποβλήτων δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια μίας ημέρας (24h), οπότε το σύστημα αερισμού πρέπει να έχει σχεδιαστεί ώστε να ανταποκρίνεται τόσο στην χαμηλή όσο και στην υψηλή ζήτηση οξυγόνου (Kaberline et al., 2017).

Αυτά είναι απαραίτητα για τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών, καθώς και για την παρακολούθηση συστημάτων αερισμού για παρατεταμένο χρόνο λειτουργίας.

Μία βασική και χρήσιμη παράμετρος που εξετάζεται είναι ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου (Oxygen Transfer Rate, OTR, kgO₂/h) από την αέρια στην υγρή φάση. Το οξυγόνο πρέπει να είναι επαρκές για να καλύψει τις απαιτήσεις της αερόβιας επεξεργασίας. Απαιτείται αύξηση των διεπαφών αέρα – υγρού αποβλήτου, όπως για παράδειγμα συμβαίνει όταν το απόβλητο σχηματίζει σταγονίδια (Kocamemi, 2012).

Προσδιορισμός ρυθμού μεταφοράς οξυγόνου: Ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου είναι ανάλογος με τη διαφορά μεταξύ της υπάρχουσας συγκέντρωσης οξυγόνου και της συγκέντρωσης ισορροπίας του αερίου στο διάλυμα. Ωστόσο είναι ένα μέγεθος που ποσοτικοποιεί την ικανότητα που διαθέτει το σύστημα αερισμού, δηλαδή την ποσότητα οξυγόνου που μπορεί να παρέχει στο υγρό ανά μονάδα χρόνου, ανεξάρτητα όμως από την αποτελεσματικότητά του να μεταφέρει αυτό το οξυγόνο στο υγρό απόβλητο (Kocamemi, 2012).

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$r_c = \frac{dc}{dt} = K_{La} (C_s - C), \text{ όπου } K_{La} = K_g \frac{A}{V} \quad (3.1)$$

$$\frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} = e^{-K_{La}T} \quad (3.2)$$

K_{La} =Συνολικός συντελεστής μεταφοράς μάζας. Προσδιορίζεται για μία εγκατάσταση πλήρους κλίμακας και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τη σύνθεση του αποβλήτου και την ένταση ανάμειξης, η οποία καθορίζεται από τον τύπο της συσκευής αερισμού και τη γεωμετρία που έχει ο χώρος ανάμειξης. Αν η εγκατάσταση είναι πιλοτικής κλίμακας, για τον ορθό υπολογισμό του K_{La} πρέπει να ληφθεί υπόψη η κλίμακα.

Το υγρό απόβλητο που υποβάλλεται σε αερισμό περιέχει εκτός από νερό και διαλυμένες και αιωρούμενες προσμείξεις, οι οποίες προκαλούν αποκλίσεις στους υπολογισμούς που αφορούν την απόδοση του αεριστήρα και έχουν

πραγματοποιηθεί όταν υπάρχει καθαρό νερό. Μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που προσπαθεί να συσχετίσει το υγρό απόβλητο με το καθαρό νερό, είναι ο **παράγοντας α** (factor α), ο οποίος ορίζεται ως η αναλογία των συντελεστών μεταφοράς μάζας από τη διεργασία προς το καθαρό νερό

$$\alpha = \frac{K_{La} (wastewater)}{K_{La} (tap water)} \quad (3.3)$$

Ο παράγοντας α εξαρτάται από το είδος της συσκευής αερισμού που χρησιμοποιείται, τη γεωμετρία του χώρου όπου γίνεται ο αερισμός, το βαθμό ανάμειξης, τα χαρακτηριστικά του υγρού αποβλήτου. Μπορεί να λάβει τιμές από 0,3 – 1,2 (Kocamemi, 2012).

Ο παράγοντας β (factor β) χρησιμοποιείται για τη διόρθωση του ρυθμού μεταφοράς οξυγόνου του συστήματος λόγω της παρουσίας ορισμένων συστατικών στο νερό, όπως άλατα, μικροσωματίδια και επιφανειοδραστικές ουσίες.

$$\beta = \frac{C_s (wastewater)}{C_s (tap water)} \quad (3.4)$$

Συνήθως η τιμή του κυμαίνεται από 0,7-0,8, αν και στα υγρά απόβλητα συχνά χρησιμοποιείται η τιμή 0,95 (Kocamemi, 2012).

Ο υπολογισμός της πραγματικής ποσότητας απαιτούμενου οξυγόνου στις εκάστοτε συνθήκες, με τη βοήθεια των παραγόντων α και β, δίνεται από την παρακάτω σχέση (Kocamemi, 2012):

$$AOTR = SOTR \left(\frac{\beta C_{\bar{s},T,H} - C_L}{C_{s,20}} \right) (1,024^{T-20})(\alpha)(F) \quad (3.5)$$

Όπου,

AOTR (actual oxygen transfer rate) = πραγματικός ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου υπό δεδομένες συνθήκες (kg O₂ / h)

SOTR (standard oxygen transfer rate) = τυπικός ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου νερού βρύσης στους 20 °C, και μηδενικό διαλυμένο οξυγόνο (kg O₂ / h)

β = παράγοντας β ή συντελεστής διόρθωσης αλατότητας-επιφανειακής τάσης

$C_{\bar{s},T,H}$ = μέση συγκέντρωση κορεσμού διαλυμένου οξυγόνου σε καθαρό νερό σε δεξαμενή αερισμού σε θερμοκρασία T και υψόμετρο H (mg/L)

C_L = συγκέντρωση οξυγόνου λειτουργίας (mg/L)

$C_{s,20}$ = συγκέντρωση κορεσμού DO σε καθαρό νερό στους 20 C και 1 atm (mg/L)

T = θερμοκρασία λειτουργίας (°C)

α = παράγοντας α ή συντελεστής διόρθωσης μεταφοράς οξυγόνου για απόβλητα

F = συντελεστής ρύπανσης (συνήθως 0,65 – 0,9). Εκφράζει την εσωτερική όσο και την εξωτερική ρύπανση των διαχυτήρων αέρα

3.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΕΥΡΕΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ

Τα συνήθη συστήματα αερισμού μπορούν να μεταφέρουν οξυγόνο στα υγρά απόβλητα με :

- διάτμηση της επιφάνειας του υγρού με ένα μίξερ ή στρόβιλο
- απελευθερώνοντας αέρα μέσω μακροσκοπικών στομιών ή πορωδών υλικών
- με άμεση επαφή αέρα με μεγάλη επιφάνεια υγρών αποβλήτων.

Ουσιαστικά, οι μηχανισμοί αερισμού ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες (Alkhalidi et al., 2016, Kaberline et al., 2017):

- ❖ **Διάχυτος (diffused aeration) ή υποεπιφανειακός αερισμός (subsurface aeration).** Στον υποεπιφανειακό αερισμό, η παροχή του αέρα πραγματοποιείται από τον πυθμένα της δεξαμενής. Σχηματίζονται φυσαλίδες αέρα, οι οποίες διασχίζουν το υγρό απόβλητο κατακόρυφα, από κάτω προς τα πάνω. Το μέγεθος των φυσαλίδων είναι καθοριστικό για την ταξινόμηση του συστήματος αερισμού σε σύστημα διάχυσης λεπτών ή χονδροειδών φυσαλίδων. Τα συστήματα διάχυσης λεπτών φυσαλίδων παρουσιάζουν σημαντικά καλύτερη απόδοση από τα συστήματα διάχυσης χονδροειδών φυσαλίδων. Την δεκαετία 1970 – 1980, η εφαρμογή διαχυτήρων λεπτών πόρων αποτέλεσε μία καινοτόμο λύση για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης, καθώς οδήγησε σε αύξηση της απόδοσης των συστημάτων αερισμού ακόμη και ως 50%.
- ❖ **Μηχανικός (mechanical aeration) ή επιφανειακός αερισμός (surface aeration).** Στην περίπτωση αυτή, η ανάδευση των υγρών αποβλήτων γίνεται επιφανειακά, έτσι ώστε σταγονίδια να διασκορπίζονται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Χρησιμοποιούνται συχνά βούρτσες με λεπίδες ή έλικες που προκαλούν διάτμηση του νερού σε σταγονίδια. Τα σταγονίδια αποβάλλονται στον αέρα και έρχονται σε επαφή με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Ποσότητα οξυγόνου μεταφέρεται από τον αέρα στα σταγονίδια και από τα σταγονίδια στη μάζα

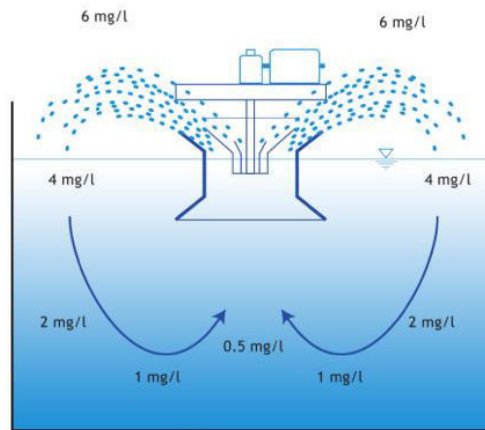
των υγρών αποβλήτων. Ο επιφανειακός αερισμός οδηγεί σε κίνηση τα υγρά απόβλητα, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται ταυτόχρονα και ανάμειξη. Μειονεκτεί σε σύγκριση με τον υποεπιφανειακό αερισμό καθώς παρουσιάζει χαμηλότερη απόδοση αερισμού και έχει σημαντικά περισσότερες ενεργειακές απαιτήσεις, για την κίνηση της βούρτσας ή των ελίκων.

- ❖ **Φυσικός αερισμός ή καταρρακτικός αερισμός (cascade aeration).** Πρόκειται για μία μέθοδο αερισμού όπου ακολουθεί παρόμοιο μηχανισμό μεταφοράς οξυγόνου με τον επιφανειακό αερισμό, μόνο που δεν απαιτεί τη χρήση μηχανικού εξοπλισμού. Συντελείται φυσικά σε ρέματα και καταρράκτες, όπου το υγρό απόβλητο αφήνεται από ύψος να μετακινηθεί σε χαμηλότερη δεξαμενή. Κατά την πτώση, τη στιγμή της κρούσης με την κατώτερη επιφάνεια, διαχωρίζεται σε σταγονίδια που έρχονται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Ο αερισμός αυτής της κατηγορίας δεν απαιτεί την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιείται σε πολλές μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

3.2.1 Μηχανικός ή επιφανειακός αερισμός

Οι αεριστήρες επιφανείας ανήκουν στην πρώτη γενιά τεχνολογιών μεταφοράς οξυγόνου. Τα κύρια μέρη ενός επιφανειακού αεριστήρα είναι : τα μηχανοκίνητα στροφέα, έλικες αναρρόφηση ή ρότορες (Koberline et al., 2017).

Οι επιφανειακοί αεριστές προκαλούν διάτμηση του υγρού με τη βοήθεια πτερωτής και του ρότορα, σε μικρά σταγονίδια τα οποία απλώνονται σε ένα τυρβώδες νέφος με υψηλή ταχύτητα. Τα σταγονίδια που «ταξιδεύουν» στον αέρα, βρίσκονται σε τυρβώδη επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα και τυπικά οξυγονώνονται σε τουλάχιστον μισό κορεσμό. Μόλις προσγειωθούν στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, αναμειγνύονται με τον όγκο του υγρού, μεταφέροντας και διαλύοντας έτσι το οξυγόνο στο νερό. Στην παρακάτω εικόνα, απεικονίζεται σχηματικά η λειτουργία του επιφανειακού αεριστήρα.



Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση επιφανειακού αεριστήρα
 Πηγή: (Stenstrom & Rosso, 2009)

Η κίνηση του υγρού για την παραγωγή του ψεκασμού παρέχει επίσης ανάμειξη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι επιφανειακοί αεριστήρες καθορίζονται επίσης από τον ρυθμό άντλησης υγρού (Stenstrom & Rosso, 2009, Koberline et al., 2017).

Οι επιφανειακοί αεριστήρες διαχωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα τη διαμόρφωσή τους (Koberline et al., 2017):

- Με υψηλή ταχύτητα ακτινικής ροής (radial flow high speed)
- Με χαμηλή ταχύτητα ακτινικής ροής (radial flow low speed)
- Οριζόντιοι ρότορες (horizontal rotors)
- Αεριστήρες με αναρρόφηση (aspirating devices)

Οι αεριστήρες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας ακτινικής ροής, συνήθως έχουν πτερωτές που άλλοτε έχουν σχεδιαστεί να βρίσκονται στην επιφάνεια και άλλοτε μπορούν να βυθίζονται σε διάφορα βάθη (Koberline et al., 2017).

Οι αεριστήρες υψηλής ταχύτητας περιστρέφονται στις 900-1200 rpm και λόγω της απουσίας του κιβωτίου ταχυτήτων εγκαθίστανται εύκολα και είναι λιγότερο δαπανηροί. Ωστόσο, δημιουργούν ένα τυρβώδες νέφος σταγονιδίων, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερο σχηματισμό αερολύματος και πιθανή διάτμηση κροκίδωσης. (Stenstrom & Rosso, 2009).

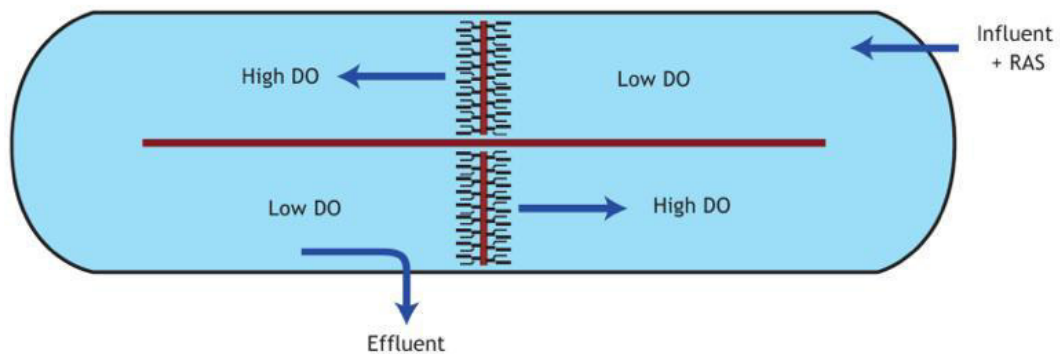
Η εισαγωγή ενός κιβωτίου ταχυτήτων μεταξύ του ηλεκτροκινητήρα και της πτερωτής επιτρέπει στον αεριστήρα να περιστρέφεται με χαμηλότερη ταχύτητα (30-60 rpm) Αυτό συνήθως συνδέεται με αυξημένο κόστος κεφαλαίου και παρατεταμένο χρόνο για την προμήθεια (συνήθως το κιβώτιο ταχυτήτων κατασκευάζεται μόνο μετά την αγορά του). Το υψηλότερο αρχικό κόστος και ο χρόνος προμήθειας μπορεί να

αντισταθμιστεί εν μέρει από υψηλότερη απόδοση. Η απώλεια θερμότητας και ο σχηματισμός ψεκασμού αερολύματος είναι σημαντικοί παράγοντες και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη με το ίδιο βάρος κατά την επιλογή συστημάτων αερισμού. Η δυνατότητα δημιουργίας σπρεί και οσμής είναι ιδιαίτερα σημαντική στις αστικές περιοχές (Stenstrom & Rosso, 2009).

Και οι δύο τύποι αεριστήρων έχουν υψηλή επαφή με το νερό που εξατμίζεται ώστε να τους παρέχει ψύξη. Σε ορισμένες εγκαταστάσεις, όπως είναι οι λιμνοθάλασσες σε θερμά κλίματα ή εγκαταστάσεις επεξεργασίας βιομηχανικών λυμάτων, ενδέχεται να επιλέγονται αεριστήρες επιφανείας για την ψυκτική τους ικανότητα. Σε ψυχρά κλίματα, οι επιφανειακοί αεριστήρες πρέπει να αποφεύγονται λόγω ψύξης που μειώνει τη βιολογική δραστηριότητα και πιθανές συνθήκες παγώματος. Γενικά, οι αεριστήρες υψηλής ταχύτητας έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης αερισμού από τους αεριστήρες χαμηλής ταχύτητας

Οι επιφανειακοί αεριστήρες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βαθιές δεξαμενές ή λιμνοθάλασσες χωρίς πρόβλεψη για χαμηλότερη ανάμιξη με χρήση σωλήνων έλξης ή χαμηλότερων πτερυγίων. Ένας σωλήνας βύθισης κατευθύνει την ανοδική ροή που επιστρέφει στον αεριστήρα από το βάθος της δεξαμενής. Μια χαμηλότερη πτερωτή είναι τοποθετημένη σε έναν μακρύ άξονα που τοποθετείται στην πτερωτή περίπου 1 m πάνω από τον πυθμένα της δεξαμενής. Οι αεριστήρες υψηλής ταχύτητας και χαμηλής ταχύτητας χρησιμοποιούνται σπάνια ως βάθη μεγαλύτερα από 4 m και 5 m, αντίστοιχα, χωρίς σωλήνες έλξης ή αναμικτήρες (Stenstrom & Rosso, 2009).

Στην περίπτωση λιμνοθάλασσας σε δεξαμενές με χωματένιο πυθμένα, ο πυθμένας πρέπει να προστατεύεται από την επιφανειακή τριβή από το υγρό. Δεν είναι ασυνήθιστο οι επιφανειακοί επιβραδυντές να δημιουργούν καταθλίψεις σε χωμάτινους πυθμένες που μπορεί να επιτρέψουν την είσοδο βράχων και συντριμμιών και να καταστρέψουν τις έλικες ή να δημιουργήσουν δομικές αστάθειες. Επιπλέον, για πολύ ρηχές και ευρείες λιμνοθάλασσες, η ζώνη επιρροής του αεριστήρα μπορεί να μην εκτείνεται μέχρι την άκρη της λιμνοθάλασσας, προκαλώντας ενδεχομένως το σχηματισμό ζωνών χαμηλής συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου (DO) (Stenstrom & Rosso, 2009).



Εικόνα 3.2: Τάφρος οξειδωσης υγρών αποβλήτων εξοπλισμένη με αεριστήρα με βούρτσα
 Πηγή: Stenstrom & Rosso, 2009

Ένας τύπος αεριστήρα επιφάνειας που παρέχει αερισμό και ανάμειξη, ενώ προσδίδει οριζόντια ταχύτητα στο νερό είναι ο αεριστήρας ή ο ρότορας επιφανειακής βούρτσας, που συνήθως βρίσκεται σε αυλάκια οξειδωσης (εικόνα). Αυτοί οι αεριστήρες επιφανειών χαμηλής ταχύτητας συνήθως παρουσιάζουν συγκεκριμένες και αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις. Οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις αποδίδονται στην αναγκαιότητα κυκλοφορίας του υγρού στις τάφρους, δηλαδή απαιτείται ενέργεια για να διατηρείται το νερό σε κυκλική κίνηση γύρω από την τάφρο. Δεδομένου ότι το νερό είναι περίπου τρεις τάξεις μεγέθους πιο πυκνό από τον αέρα, μεγάλο μέρος της ενέργειας των αεριστήρων βούρτσας χρησιμοποιείται για την άντληση υγρού αντί για τον αερισμό του. Επομένως, οι τάφροι με βούρτσες επιφάνειας είναι συχνά υποψήφιος για μετασκευή σε διαχυτήρες λεπτής φυσαλίδας και μηχανικούς υπόγειους αναμικτήρες/αντλίες χαμηλής ισχύος, οι οποίοι μπορεί να μειώσουν σημαντικά το ενεργειακό αποτύπωμα των τάφρων οξειδωσης (Stenstrom & Rosso, 2009).

Μια λιγότερο συχνή εφαρμογή επιφανειακών αεριστήρων βούρτσας είναι σε ρηχές αεριζόμενες λιμνοθάλασσες (lagoons). Ο αεριστήρας είναι τοποθετημένος σε μια πλωτή φορηγίδα, ανοιχτή στο κέντρο, όπου οι επιφανειακοί αεριστήρες πραγματοποιούν ανάμειξη και αερισμό (εικόνα). Αυτός ο τύπος τεχνολογίας αερισμού επιλέγεται σε λιμνοθάλασσες για ευκολία στη λειτουργία και συντήρηση, καθώς η φορηγίδα μπορεί εύκολα να ρυμουλκηθεί στην ξηρά για συντήρηση ή επισκευή. Επίσης, ο αεριστήρας μπορεί να μετακινηθεί για να αποτρέψει τη συσσώρευση λάσπης στο κάτω μέρος (Stenstrom & Rosso, 2009).



Εικόνα 3.3: Επιφανειακός αεριστήρας με βούρτσα σε λιμνοθάλασσα
Πηγή: <https://www.makwater.com.au/products/floating-brush-aerators/>

3.2.2 Αεριστήρας που παράγει φυσαλίδες χονδροειδείς

Τα συστήματα αερισμού με χονδροειδείς φυσαλίδες (χονδροειδείς διαχυτήρες αέρα) χρησιμοποιούν μακροσκοπικά στόμια ή σχισμές για την απελευθέρωση φυσαλίδων αέρα με διαστάσεις συνήθως άνω των 50 mm.



Εικόνα 3.4: Σύστημα αερισμού με χονδροειδείς φυσαλίδες αέρα
Πηγή: <https://entec-international.com/aeration-coarse-bubble-aeration/#ENTECCoarsebubbleaerationssystem>

Οι φυσαλίδες σε αυτό το εύρος διαμέτρου δεν εμφανίζονται ως σφαίρες, αλλά ως σφαιρικά καλύμματα, δηλαδή μοιάζουν με το σχήμα της μέδουσας). Οι χονδροειδείς φυσαλίδες έχουν πολύ τυρβώδη φύση και χαρακτηρίζονται από μια

λιγότερο σοβαρή επιφανειοδραστική συσσώρευση, επομένως έχουν υψηλότερους παράγοντες α σε σύγκριση με συστήματα λεπτών φυσαλίδων. Τα υποεπιφανειακά συστήματα, όπως τα συστήματα με χονδροειδή φυσαλίδες, εγκαθίστανται γενικά σε διαμόρφωση πλήρους δαπέδου, για βελτιστοποίηση της απόδοσης. Σε παλαιότερες εποχές, με λιγότερο ακριβό ενεργειακό κόστος, οι διαχυτήρες χονδροειδών φυσαλίδων τοποθετούνταν συχνά σε μία μόνο σειρά στις πλευρές των δεξαμενών ή σε δύο ή περισσότερες σειρές (cross roll, ridge και αυλάκι). Αυτά τα συστήματα απαιτούσαν λιγότερους διαχυτήρες, μειώνοντας το κόστος κεφαλαίου, αλλά είναι από τα συστήματα αερισμού χαμηλότερης απόδοσης (Stenstrom & Rosso, 2009).

Οι διαχυτήρες χονδροειδών φυσαλίδων έχουν το εγγενές πλεονέκτημα ότι επηρεάζονται λιγότερο από ρύπανση ή υπολείμματα. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη διάσταση και στον υψηλό στροβιλισμό των στομιών εκκένωσης, γεγονός που καθιστά πρακτικά δύσκολο το φράξιμο τους. Από την άλλη πλευρά, αυτοί οι διαχυτήρες χαρακτηρίζονται πάντα από χαμηλή απόδοση αερισμού σε καθορισμένες συνθήκες σε καθαρό νερό (SAE - στην περιοχή από 0,6-1,5 kgO₂/kWh), επειδή οι μεγάλες φυσαλίδες ταξιδεύουν πολύ γρήγορα μέσω της στήλης νερού και έχουν χαμηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο (Stenstrom & Rosso, 2009).

Οι διαχυτήρες χονδροειδών φυσαλίδων έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να παρέχουν εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα μεταφοράς οξυγόνου σε καθαρό νερό (OTR) εντός ενός δεδομένου όγκου δεξαμενής. Ο ρυθμός ροής αέρα σπάνια περιορίζεται από τον αριθμό των διαχυτήρων αέρα ή των ανοιγμάτων. Η μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς οξυγόνου (OTR) των διαχωριστών με χονδροειδείς φυσαλίδες μπορεί να είναι αρκετές φορές υψηλότερο από τους αεριστήρες λεπτών πόρων ή επιφανειών και συνήθως περιορίζεται από την ικανότητα του φυσητήρα. Επομένως, τα πυκνά πλέγματα χονδροειδών διαχυτήρων φυσαλίδων είναι μερικές φορές η τεχνολογία επιλογής για την επεξεργασία βιομηχανικών λυμάτων υψηλής αντοχής. Για συστήματα επεξεργασίας που δεν απαιτούν υψηλή ταχύτητα μεταφοράς οξυγόνου (OTR) ανά μονάδα όγκου, όπως οι δημοτικές εγκαταστάσεις, οι διαχυτήρες χονδροειδών φυσαλίδων είναι κακή επιλογή για εξοικονόμηση ενέργειας. Οι εγκαταστάσεις με διαχυτήρες χονδροειδών φυσαλίδων άρχισαν να αντικαθίστανται μετά την ταχεία άνοδο των τιμών της ενέργειας στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων χρησιμοποιούν συχνότερα διαχυτήρες με λεπτούς πόρους (Stenstrom & Rosso, 2009).

3.2.3 Αεριστήρας που παράγει φυσαλίδες λεπτοειδείς

Οι λεπτές φυσαλίδες μπορούν να παραχθούν με διαφορετικές τεχνολογίες, είτε με την απελευθέρωση αέρα μέσα από μια πορώδη πλάκα είτε με μηχανική διάτμηση μεγάλων φυσαλίδων σε μικρές. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν τουρμπίνες (turbines) ή διαχυτήρες που δημιουργούν πίδακα (jet diffusers) και σχηματίζουν λεπτές φυσαλίδες, αλλά το κάνουν χωρίς τη χρήση μικρών στομιών, καθώς και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται μηχανική ενέργεια για τη διάτμηση μεγάλων φυσαλίδων σε λεπτές φυσαλίδες (Stenstrom & Rosso, 2009).

Οι λεπτές φυσαλίδες από τουρμπίνες ή πίδακες έχουν πάντα χαμηλότερο βαθμό απόδοσης σε καθαρό νερό από τις λεπτές φυσαλίδες από διαχυτήρες λεπτών πόρων. Οι διαχυτήρες λεπτών πόρων είναι ένα υποσύνολο λεπτών φυσαλίδων που απελευθερώνουν πεπιεσμένο αέρα μέσω μικρών στομιών ή πόρων που βρίσκονται είτε σε διάτρητες μεμβράνες είτε σε πορώδη μέταλλα, όπως κεραμικές πέτρες ή πυροσυσσωματωμένο πλαστικό (Stenstrom & Rosso, 2009).

Οι μικρότερες φυσαλίδες αυξάνουν την επιφάνεια όπου το νερό και ο αέρας έρχονται σε επαφή, οπότε μεγιστοποιείται η μεταφορά οξυγόνου από τον αέρα στο υγρό (Koberline et al., 2017).

Οι διαχυτήρες λεπτών πόρων είναι πλέον οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι διαχυτήρες αέρα στην επεξεργασία λυμάτων στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη. Έχουν καλύτερη απόδοση αερισμού και χρησιμοποιούνται συνήθως σε διαμορφώσεις πλήρους δαπέδου, οι οποίες εκμεταλλεύονται στο μέγιστο την απόδοσή τους. Το σύστημα διαχυτήρων λεπτών πόρων αφαιρεί τις λιγότερες πτητικές οργανικές ενώσεις λόγω της αυξημένης απόδοσής τους, η οποία έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερους ρυθμούς ροής αέρα και μείωση των απωλειών θερμότητας (Stenstrom & Rosso, 2009).

Οι διαχυτήρες λεπτών πόρων έχουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα: το πρώτο είναι η ανάγκη για περιοδικό καθαρισμό, το δεύτερο είναι μια μεγάλη αρνητική επίδραση της απόδοσης μεταφοράς από ρύπους λυμάτων, η οποία ποσοτικοποιείται συχνότερα από τον παράγοντα α . Οι διαχυτήρες λεπτών πόρων έχουν γενικά χαμηλότερες τιμές του παράγοντα α από τους διαχυτήρες χονδροειδών φυσαλίδων ή τους αεριστήρες επιφάνειας για παρόμοιες συνθήκες. Οι διαφορές στο α μεταξύ των συστημάτων αερισμού σημειώθηκαν τη δεκαετία του 1930, αλλά γενικά ξεχάστηκαν μέχρι που η ενεργειακή κρίση της δεκαετίας του 1970 αύξησε την ευαισθητοποίηση

για ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες. Πριν από τη δεκαετία του 1980, πολλά εργοστάσια είχαν σχεδιαστεί με $\alpha \approx 0,8$, το οποίο θεωρήθηκε ως «καθολικό» α για όλους τους τύπους συστημάτων αερισμού και για όλες τις συνθήκες. Έχει αποδειχθεί ότι οι διαφορετικές μέθοδοι αερισμού έχουν διαφορετικό α και για τους διαχυτήρες λεπτών πόρων το αρχικό α μειώνεται με την πάροδο του χρόνου κατά τη λειτουργία λόγω ιζημάτων που επικάθονται στους πόρους. Επιπλέον, για το σύστημα λεπτών φυσαλίδων, ο παράγοντας α είναι συνάρτηση συνθηκών διεργασίας όπως ο χρόνος απομάκρυνσης της λάσπης ή ο ρυθμός ροής αέρα (Stenstrom & Rosso, 2009).

3.3 ΒΑΣΙΚΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΑ ΜΕΡΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

3.3.1 Συστήματα φυσητήρων αέρα

Οι φυσητήρες (blowers) είναι συμπιεστές που λειτουργούν σε χαμηλή πίεση και χρειάζονται για συστήματα υποεπιφανειακού αερισμού συμπεριλαμβανομένων των στροβίλων ή τουρμπίνων. Υπάρχει μια κατηγορία συσκευών αερισμού που αποφεύγει τη χρήση φυσητήρων προκαλώντας αναρρόφηση αέρα, αλλά αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούνται κυρίως για ανάμειξη (Stenstrom & Rosso, 2009).

Οι φυσητήρες ταξινομούνται σε δύο μεγάλους τύπους: θετικής μετατόπισης και φυγοκεντρικούς (centrifugal blowers). Οι φυσητήρες θετικής μετατόπισης (PD) θεωρούνται γενικά ως συσκευές σταθερής ροής, μεταβλητής πίεσης, ενώ οι φυγοκεντρικοί φυσητήρες θεωρούνται συχνά συσκευές σταθερής πίεσης, μεταβλητής ροής. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δύο τύπων παρατίθενται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα φυσητήρων θετικής μετατόπισης και φυγοκεντρικών φυσητήρων

Φυσητήρες θετικής μετατόπισης	Φυγοκεντρικοί φυσητήρες
Πιο οικονομικοί σε μικρή κλίμακα	Οικονομικοί σε όλες τις κλίμακες, αλλά ειδικά σε μεγάλες εγκαταστάσεις
Θορυβώδεις. Ακούγεται ένα «χτύπημα» χαμηλών συχνοτήτων που σχετίζεται με τους περιστροφικούς λοβούς, το οποίο δε είναι εύκολο να αποσβεστεί.	Επίσης, θορυβώδεις αλλά ο συνεχής και υψηλότερης συχνότητας ήχος περιστροφής είναι πιο εύκολο να αποσβεστεί.
Ορισμένοι κραδασμοί που μεταδίδονται σε	

σωληνώσεις και στηρίγματα, μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα	
Παρουσιάζονται υπερφορτώσεις κινητήρα που απαιτούν προστασία ρεύματος στους κινητήρες	Η λειτουργία σε υπερβολική ροή υπερφορτώνει τον κινητήρα, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του φυσητήρα. Απαιτούνται έλεγχοι ανίχνευσης ρεύματος αυξημένης έντασης και κραδασμών για ασφαλή λειτουργία

Πηγή: Stenstrom & Rosso, 2009

Οι φυγοκεντρικοί φυσητήρες (centrifugal blowers) εισάγουν αέρα κατά μήκος του άξονα περιστροφής του άξονα και διαθέτει πτερωτή συνδεδεμένη στον κύριο άξονα. Ο αέρας εκκενώνεται συνεχώς ακτινικά και η αυξημένη κινητική του ενέργεια μετατρέπεται σε αύξηση πίεσης μειώνοντας την ταχύτητα του αέρα μέσω ενός διαχύτη. Επίσης, οι παραδοσιακοί φυγοκεντρικοί φυσητήρες δεν έχουν δυνατότητα "turn-up" ή "turn out" και πρέπει να λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Οι νεότερες τεχνολογίες περιλαμβάνουν φυγοκεντρικούς φυσητήρες με πτερύγια οδηγών μεταβλητής εισαγωγής και οι πιο σύγχρονες περιλαμβάνουν επίσης μεταβλητούς διαχυτήρες εξόδου. Μεταβάλλοντας τη γωνία των πτερυγίων, ο ρυθμός ροής του αέρα μπορεί να μεταβληθεί και ο φυσητήρας αποκτά ικανότητα περιστροφής. Ωστόσο, οι φυγοκεντρικοί φυσητήρες έχουν μια βέλτιστη περιοχή λειτουργίας και εκτός αυτής της περιοχής η απόδοση μειώνεται (Stenstrom & Rosso, 2009).

Οι φυσητήρες θετικής μετατόπισης (positive displacement blowers) χρησιμοποιούν διαφορετική προσέγγιση από τους φυγοκεντρικούς. Αντί ο αέρας να κινείται συνεχώς και η κινητική ενέργεια να μετατρέπεται σε πίεση, συμπιέζει διακριτά "πακέτα" αέρα σπρώχνοντας αέρα με δίλοβα ή τρίλοβα γρανάζια ή ρότορες (Stenstrom & Rosso, 2009).

Η συμπίεση στους φυσητήρες θετικής μετατόπισης δεν είναι τόσο αποτελεσματική όσο η φυγόκεντρη ροή, αλλά μπορεί να επιτύχει υψηλότερες τιμές πίεσης εξόδου για τους ίδιους ρυθμούς ροής αέρα. Επίσης, η ροή του αέρα μπορεί να ποικίλλει μεταβάλλοντας την ταχύτητα του φυσητήρα. Ένα μειονέκτημα των φυσητήρων θετικής μετατόπισης είναι ο θόρυβος που παράγεται από τη συμπίεση, που συνήθως είναι ήχος χαμηλής συχνότητας (Stenstrom & Rosso, 2009).

Στις μικρότερες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται κυρίως φουσητήρες θετικής μετατόπισης ή φυγόκεντρος, ενώ οι μεγαλύτερες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν φυγόκεντρικούς φουσητήρες (Stenstrom & Rosso, 2009).

3.3.2 Οδηγός μεταβλητής συχνότητας

Ένας οδηγός ή ρυθμιστής μεταβλητής συχνότητας (variable frequency drive) είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα που επιτρέπει τον έλεγχο της συχνότητας για εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο έλεγχος της συχνότητας του εναλλασσόμενου ρεύματος οδηγεί σε έλεγχο της την ταχύτητας περιστροφής του συνδεδεμένου ηλεκτροκινητήρα. Για παράδειγμα, εάν ένας ηλεκτρικός κινητήρας έχει ταχύτητα 1800 rpm με ηλεκτρική συχνότητα 60 Hz, η ταχύτητά του μπορεί να μειωθεί στις 1200 rpm μειώνοντας τη συχνότητα στα 40 Hz (Stenstrom & Rosso, 2009)..

Εφαρμόζοντας μια κίνηση μεταβλητής συχνότητας σε έναν ηλεκτρικό κινητήρα, ο κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες ή χαμηλότερες ταχύτητες από την ονομαστική του τιμή και μπορεί να εκκινηθεί και να σταματήσει λόγω μικρότερης υπερθέρμανσης. Όταν ξεκινούν οι παραδοσιακοί κινητήρες, περίπου το 300% του ονομαστικού ρεύματος αντλείται αρχικά για να φέρει τον κινητήρα σε ταχύτητα. Αυτό υπερθερμαίνει τον κινητήρα και για μεγάλους κινητήρες μπορεί να περιορίσει την ικανότητα του κινητήρα να επανεκκινείται περισσότερες από μία φορές σε εκτεταμένη χρονική περίοδο. Ταυτόχρονα, το υψηλό ρεύμα εκκίνησης μπορεί να ενεργοποιήσει υψηλότερους ρυθμούς ισχύος, ειδικά εάν ξεκινήσει σε περιόδους αιχμής καθημερινής χρήσης ισχύος. Οι ημερήσιοι κύκλοι στην επεξεργασία λυμάτων συνήθως έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερες απαιτήσεις επεξεργασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας ή του απογεύματος, όταν η ηλεκτρική ενέργεια έχει το υψηλότερο κόστος. Επομένως, η μείωση της ισχύος που καταναλώνεται για την εκκίνηση του κινητήρα είναι πολύ σημαντική (Stenstrom & Rosso, 2009).

3.3.3 Συστήματα ελέγχου

Οι τεχνικές ελέγχου για τα συστήματα αερισμού βασίζονται τυπικά σε σήματα ανάδρασης που παρέχονται από ανιχνευτές του διαλυμένου οξυγόνου που βυθίζονται στις δεξαμενές αερισμού. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου είναι

αποτέλεσμα της μεταφοράς οξυγόνου και είναι ένας σημαντικός δείκτης της σωστής υπερφόρτωσης των κινητήρων. Η αντίθλιψη (back pressure), που ονομάζεται δυναμική υγρή πίεση που απαιτείται από τους διαχυτήρες με ρύπους, μπορεί να είναι πολύ υψηλή, με αποτέλεσμα ορισμένοι διαχυτήρες να μην απελευθερώνουν αέρα, με αποτέλεσμα την ανομοιόμορφη κατανομή των φυσαλίδων σε όλη τη δεξαμενή. Σε άλλες εγκαταστάσεις, οι φυσητήρες ενδέχεται να μπορούν να εκφορτίσουν τη δυναμική πίεση wte (DWP) που απαιτείται από τους διαχυτές ρύπανσης μόνο όταν εργάζονται εκτός της περιοχής βέλτιστης απόδοσης, με αποτέλεσμα αυξημένο κόστος ισχύος και πιθανή ζημιά στον ανεμιστήρα (Stenstrom & Rosso, 2009).

Για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των συστημάτων αερισμού, η καλύτερη στρατηγική ελέγχου του φυσητήρα είναι η παροχή της ελάχιστης ποσότητας αέρα διεργασίας στην επεξεργασία των λυμάτων, καλύπτοντας ωστόσο τις απαιτήσεις αφαίρεσης υποστρώματος (Stenstrom & Rosso, 2009).

3.4 Νεωτερισμοί και βελτιώσεις

Τα κύρια προβλήματα που ένα εργοστάσιο επεξεργασίας υγρών αποβλήτων αντιμετωπίζει λόγω του αερισμού είναι (Skouteris et al., 2020):

1. Η υψηλή κατανάλωση ενέργεια. Όπως αναφέρθηκε, πρόκειται για ένα σημαντικά ενεργοβόρο στάδιο επεξεργασίας που απαιτεί την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ίση με 0,18 -0,8 kWh/m³, δηλαδή τιμές που αντιστοιχούν στο 50 – 90% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνει του εργοστασίου επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Το κόστος λειτουργίας της διαδικασίας αερισμού αντιστοιχεί στο 15-49% του συνολικού κόστους της μονάδας επεξεργασίας.
2. Η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αερισμού συχνά δεν είναι ικανοποιητική. Η ποιότητα των υγρών αποβλήτων που απομακρύνονται από τη δεξαμενή αερισμού ελέγχεται με τη βοήθεια ορισμένων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα από τη συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου (Dissolved Oxygen – DO). Οι χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου (DO), δηλαδή τιμές μικρότερες από 1,1 mg O₂/L, επηρεάζουν την ανάπτυξη του μικροβιακού πληθυσμού των υγρών αποβλήτων. Έτσι, μπορεί ο ρυθμός ανάπτυξης των βακτηρίων να μειωθεί, γεγονός που σημαίνει ότι τα επεξεργασμένα υγρά

απόβλητα θα είναι χαμηλότερης ποιότητας από την αναμενόμενη. Επίσης, σε χαμηλές συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου (DO) ευνοείται ο ρυθμός ανάπτυξης των νηματωδών μικροοργανισμών, άρα αυξάνει η πιθανότητα διόγκωσης ή αφρισμού της ιλύος.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων απαιτείται η βελτιστοποίηση της διαδικασίας αερισμού των υγρών αποβλήτων. Η εισαγωγή νέου μηχανολογικού εξοπλισμού με χαμηλότερο ενεργειακό κόστος και βελτιωμένων μεθόδων αερισμού και ανάμειξης μελετώνται συνεχώς.

3.4.1 Χρήση καθαρού οξυγόνου

Η χρήση καθαρού οξυγόνου (pure oxygen – PO) κατά τον αερισμό των υγρών αποβλήτων συνιστάται όταν τα υγρά απόβλητα είναι υψηλής αντοχής σε διακυμάνσεις παροχών ή/ και σε διακυμάνσεις μικροβιακών φορτίων. Όσο πιο αυξημένα είναι τα μικροβιακά φορτία τόσο μεγαλύτερη είναι η βιομάζα, η οποία απαιτεί μεγαλύτερες συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου. Όταν, λοιπόν, ο αέρας αντικαθίσταται από καθαρό οξυγόνο (PO), καθαρότητας μεγαλύτερη από 90%, ο ρυθμός μεταφοράς οξυγόνου αυξάνεται, ακόμη και αν ο ρυθμός ροής είναι πιο μικρός. Οι συνθήκες επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων παραμένουν αερόβιες ακόμη και αν η συγκέντρωση οργανικών φορτίων είναι υψηλή (Skouteris et al., 2020).

Η εφαρμογή καθαρού οξυγόνου αντί για αέρα στις μονάδες επεξεργασίας ενεργού ιλύος εκφράστηκε ως ιδέα για πρώτη φορά το 1940, αλλά πρωτοεφαρμόστηκε τρεις δεκαετίες αργότερα στις ΗΠΑ, το 1968, για την επεξεργασία αστικών λυμάτων. Σήμερα, βρίσκει εφαρμογή για την επεξεργασία διαφόρων υγρών αποβλήτων όπως είναι: τοξικοί και πυρίμαχοι ρύποι, εκπλύματα χωματερών, σε βιοαντιδραστήρες μεμβράνης, αντιδραστήρες βιοφίλμ και αντιδραστήρες βιοφίλμ κινούμενης κλίνης. Στις ΗΠΑ, εφαρμόζεται στο 15% επεξεργασίας των αστικών υγρών αποβλήτων (Skouteris et al., 2020).

Οι λεπτές φυσαλίδες οξυγόνου θεωρούνται αποτελεσματικότερες από τις χονδροειδείς, καθώς έχουν αυξημένη επιφάνεια επαφής με τα υγρά απόβλητα (Skouteris et al., 2020).

Σε σύγκριση με τον αέρα, το καθαρό οξυγόνο (PO) παρέχει υψηλότερες συγκεντρώσεις οξυγόνου σε αέρια φάση, βελτιώνει τη βιοκινητική και επιτρέπει ταχύτερους ρυθμούς επεξεργασίας σε υψηλότερες συγκεντρώσεις MLSS και

μικρότερους χρόνους υδραυλικής παραμονής (HRTs). Τα συστήματα που χρησιμοποιούν αερισμό καθαρού οξυγόνου (PO) είναι απλά και συμπαγή και επιτρέπουν την εύκολη αποθήκευση και χειρισμό του αερίου. Διαχειρίζονται ακάθαρτα συμπυκνώματα χωρίς απογύμνωση, έτσι μειώνουν τις οσμές και τις εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC), μειώνουν την παραγωγή λάσπης καθώς επιτυγχάνεται πληρέστερη οξειδωση σε CO₂ και ελαχιστοποιούν τα προβλήματα διόγκωσης της ιλύος και αφρισμού βιομάζας. Το καθαρό οξυγόνο (PO) διασφαλίζει τη σταθερότητα του συστήματος σε μειωμένους ρυθμούς κατανάλωσης ενέργειας και χαμηλότερο κόστος διάθεσης ιλύος (Skouteris et al., 2020).

Η ποσότητα του οξυγόνου που μεταφέρεται σχετίζεται με τον εφαρμοζόμενο ρυθμό ροής — όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός ροής, τόσο καλύτερη είναι η μεταφορά οξυγόνου. Για τον ίδιο ρυθμό ροής αέρα ή καθαρού οξυγόνου, η ποσότητα οξυγόνου που μεταφέρεται είναι υψηλότερη για το καθαρό οξυγόνο λόγω της υψηλότερης κινητήριας δύναμης. Το καθαρό οξυγόνο (PO) έχει συγκέντρωση κορεσμού διαλυμένου οξυγόνου (DO) που είναι έως και πέντε φορές υψηλότερη από αυτή του αέρα με τον ίδιο ρυθμό ροής. Οι Lee & Kim (2013), οι οποίοι εφάρμοσαν ρυθμούς ροής καθαρού οξυγόνου που κυμαίνονταν από 0,0125 L / min έως 0,2 L / min σε μια δεξαμενή με όγκο εργασίας 21 L, διαπίστωσαν ότι όταν ο ρυθμός ροής άλλαξε από 0,0125 L / min στο επόμενο ένα από τα 0,025 L / min, σημειώθηκε ξαφνική αύξηση του OTR. Για τις υπόλοιπες παροχές, η συγκέντρωση DO συνέχισε να αυξάνεται αλλά σταδιακά. Ομοίως, οι Zhuang et al. (2016a) παρατήρησαν ότι, όταν ένας ρυθμός ροής PO 0,5 L.h⁻¹ αυξήθηκε σε 1,5 L.h⁻¹, η συγκέντρωση DO σε συγκεκριμένο χρόνο 300 s ήταν 1,8 φορές υψηλότερη. Βρήκαν επίσης ότι σε μια παροχή καθαρού οξυγόνου 2,5 L.h⁻¹ η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου (DO) ήταν πέντε φορές υψηλότερη από αυτή για παρόμοια παροχή αέρα και ότι υπήρχε ένα όριο πάνω από το οποίο οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση της παροχής καθαρού οξυγόνου δεν μπορούσε να αυξήσει την απόδοση μεταφοράς οξυγόνου (OTE) (Skouteris et al., 2020).

Επιπλέον, οι Rodríguez et al. (2014), διαπίστωσαν ότι σε ένα βιοαντιδραστήρα μεμβράνης (MBR) που τροφοδοτήθηκε είτε με καθαρό οξυγόνο (PO) είτε με αέρα και λειτουργούσε με σταθερό χρόνο υδραυλικής παραμονής (HRT), ο παράγοντας α αυξήθηκε όταν μειώθηκαν οι συγκεντρώσεις MLSS, αλλά, για την ίδια συγκέντρωση MLSS, το καθαρό οξυγόνο (PO) οδήγησε σε υψηλότερους α-παράγοντες. Ομοίως, οι Rodríguez et al. (2011) έδειξε ότι, σε σταθερό χρόνο υδραυλικής παραμονής (HRT),

(και SRT), μια αύξηση στη συγκέντρωση MLSS από 3420 mg L⁻¹ σε 12600 mg L⁻¹ σε ένα βιοαντιδραστήρα μεμβράνης (MBR) που χρησιμοποιεί αερισμό PO μείωσε τον παράγοντα α από 0,426 σε 0,022. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης της οργανικής ύλης παρέμεινε υψηλή, υποδηλώνοντας ότι το PO διατηρούσε τις αερόβιες συνθήκες που απαιτούνται ακόμη και σε υψηλές συγκεντρώσεις MLSS. Κατ' αρχήν, η επίδραση των συγκεντρώσεων MLSS πρέπει να προσδιορίζεται σε συνδυασμό με την εφαρμοζόμενη HRT, καθώς τα HRT ρυθμίζουν το χρόνο κατά τον οποίο το οξυγόνο έρχεται σε επαφή με το υγρό. Οι Rodríguez et al. (2012b) έδειξε ότι ο παράγοντας α επηρεάστηκε τόσο από τις συγκεντρώσεις MLSS όσο και από τις HRTs, αλλά η συγκέντρωση MLSS συσχετίστηκε ισχυρότερα με τον α-παράγοντα. Ωστόσο, τυχόν δεδομένα που βασίζονται σε μια συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης δεν μπορούν να συγκριθούν άμεσα με άλλα δεδομένα, καθώς ο παράγοντας α εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της φυσαλίδας, τη γεωμετρία του συστήματος και τις εξωκυτταρικές πολυμερείς ουσίες (EPS) και τα διαλυτά μικροβιακά προϊόντα (SMP).) συγκεντρώσεις, αν και το EPS και το SMP έχουν μικρότερη επίδραση. Επιπλέον, οι α-παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να διατηρήσουν αερόβιες συνθήκες σε κλίμακα πάγκου, πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή όταν εξετάζονται εφαρμογές πλήρους κλίμακας (Skouteris et al., 2020).

3.4.2 Συνδυασμός τεχνικών αερισμού και τεχνικών ανάμειξης

Το βασικό χαρακτηριστικό και πλεονέκτημα των συνδυασμένων συστημάτων είναι ότι παρέχουν λειτουργίες ανάμειξης και αερισμού. Τα συνδυασμένα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιούν διαφορετικούς τύπους αερισμού ανάλογα με τη χρήση, τη θέση και τα χαρακτηριστικά τους (Singrova & Sevcik, 2020).

Τα υποβρύχια συνδυασμένα συστήματα εγκαθίστανται συνήθως στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα στο κέντρο του και είναι πλήρως βυθισμένα. Οι κινητήρες και οι σωλήνες αέρα είναι εξαιρέσεις που συνήθως υπερβαίνουν το επίπεδο ή συνδέονται με φυσητήρες. Για παράδειγμα, μερικά από αυτά είναι ικανά να τροφοδοτούν ένα μείγμα λυμάτων και αέρα στον αντιδραστήρα σε ακτινική κατεύθυνση. Άλλα μπορεί να έχουν ένα υπερβολοειδές σχήμα, το οποίο υποστηρίζει τη ροή στον αντιδραστήρα (Singrova & Sevcik, 2020).

Τα συνδυασμένα συστήματα επιφανειακού τύπου εγκαθίστανται σε σταθερές γέφυρες ή πλωτήρες. Οι πλωτήρες επιτρέπουν την κίνηση ανάλογα με τη στάθμη του νερού. Ένα μέρος του συστήματος είναι πάντα σε επαφή με το νερό και ένα άλλο τμήμα βρίσκεται πάνω από τη στάθμη του νερού. Αυτά μπορεί να είναι, για παράδειγμα, αεριστήρες με κουπιά ή στρόβιλοι. Συστήματα που χρησιμοποιούν μεταφορά αέρα ή αναρρόφηση από το περιβάλλον (Singrona & Sevcik, 2020).

Τις τελευταίες δεκαετίες, το ενεργειακό πρόβλημα έχει προκαλέσει παγκόσμια ανησυχία. Αναζητείται λοιπόν τρόπος να αντικατασταθούν οι διαδικασίες αερισμού των υγρών αποβλήτων από άλλες, λιγότερο ενεργοβόρες. Μία εναλλακτική λύση είναι η μίμηση του καταρράκτη αερισμού, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα παρακείμενους διαχυτήρες αέρα (Alkhalidi et al., 2016).

Οι Alkhalidi et al., (2016) ανέπτυξαν ένα νέο προσέγγισης έγχυσης αέρα στα υγρά απόβλητα που το ονόμασαν παλμικό σύστημα (pulsating system). Η λειτουργία αυτού του συστήματος βασιζόταν στην διαδοχική άντληση αέρα από δύο διαφορετικούς διαχυτήρες τοποθετημένους στη βάση της δεξαμενής αερισμού. Διαδοχική άντληση σημαίνει ότι όταν ο ένας διαχυτήρας λειτουργούσε, ο άλλος για τον ίδιο χρόνο σταματούσε. Το σύστημα αυτό βελτίωσε την αποτελεσματικότητα μεταφοράς οξυγόνου έως και 57% με ρυθμό ροής 42 l/min και χρόνο διαχωρισμού 1,5 s. Η αύξηση αυτής της απόδοσης και της μεταφοράς οξυγόνου αποδόθηκε στην κίνηση του υγρού κατά την εναλλαγή στη λειτουργία των διαχυτήρων. Οι φυσαλίδες που σχηματίζονται στον έναν διαχυτήρα, που ξεκινάει να λειτουργεί, απομακρύνουν το υγρό που ήταν πάνω από τον δεύτερο διαχυτήρα και είχε εμπλουτιστεί με οξυγόνο. Νέο υγρό, χαμηλότερης συγκέντρωσης σε οξυγόνο, το αντικαθιστά και έτσι η διαφορά μεταξύ φυσαλίδας οξυγόνου και εξωτερικού περιβάλλοντος αυξάνει, οπότε η διάχυση του οξυγόνου από το εσωτερικό στο εξωτερικό της φυσαλίδα που θα δημιουργηθεί θα είναι βελτιωμένη (Alkhalidi et al., 2016).

3.4.2.1 Σύστημα Aire O₂ Triton

Ο εξοπλισμός πάνω από τη στάθμη του νερού αναρροφά αέρα ο οποίος τροφοδοτείται μέσω ενός κοίλου άξονα στην έξοδο με έναν διαχύτη που εξασφαλίζει τη διασπορά του. Η ανάμειξη εξασφαλίζεται με ειδικά κουπιά. Η διαδρομή των φυσαλίδων είναι επομένως διαφορετική από τα συμβατικά συστήματα αερισμού

(εικόνα). Κανονικά, το Triton στερεώνεται με ένα σταθερό στήριγμα ή επιπλέει στα πλάγια ή στο κέντρο του αντιδραστήρα (Singrova & Sevcik, 2020).



Εικόνα 3.5: Αερισμός και ανάμειξη (αριστερά) και ανάμειξη (δεξιά) με το σύστημα Aire O₂ Triton
Πηγή: Singrova & Sevcik, 2020

Το σύστημα Aire O₂ Triton χρησιμοποιείται σε δεξαμενές επεξεργασίας λυμάτων σε αντιδραστήρες αερισμού, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε δεξαμενές πάχυνσης ή αποθήκευσης λάσπης. Το σύστημα είναι ικανό να εξασφαλίζει ξεχωριστή ανάμειξη ή ανάμειξη και αερισμό (Singrova & Sevcik, 2020).

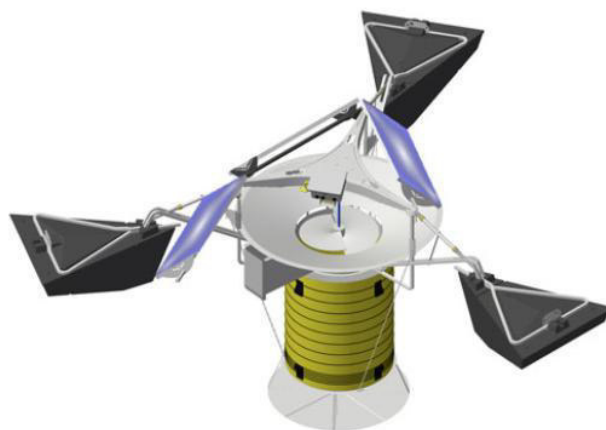
Το ιδανικό σχήμα αντιδραστήρα για αυτό το σύστημα είναι κυκλικό ή ωειδές (σύστημα ενεργοποίησης κυκλοφορίας). Τέτοιοι αντιδραστήρες αξιοποιούν στο έπακρο το δυναμικό αυτού του συστήματος. Στους ορθογώνιους αντιδραστήρες μπορεί να υπάρχει πρόβλημα με επαρκή ομογενοποίηση ολόκληρου του όγκου και καθίζηση λάσπης σε νεκρές περιοχές. Για αυτούς τους λόγους, είναι δυνατό να τοποθετηθούν τα συστήματα που είναι εγκατεστημένα σε τέτοιους αντιδραστήρες με κιβώτιο ταχυτήτων που εξασφαλίζει την περιστροφή του, γεγονός που εξαλείφει αυτό το πρόβλημα. Μια άλλη δυνατότητα είναι να αναπτυχθεί ένα μοντέλο και να αναλυθεί η κίνηση του νερού στον αντιδραστήρα (Singrova & Sevcik, 2020).

Το σύστημα είναι κατοχυρωμένο με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από την Aeration Industries International, Inc. (Μινεσότα, ΗΠΑ) σε διάφορες τροποποιήσεις. Το Triton χρησιμοποιείται ευρέως παγκοσμίως και για την επεξεργασία βιομηχανικών λυμάτων. Αυτές οι εφαρμογές περιλαμβάνουν, για παράδειγμα, επεξεργασία νερού από βιομηχανικές εγκαταστάσεις τροφίμων, αμπελουργικές εταιρείες, χημικές και πετροχημικές βιομηχανίες αλλά και από χωματερές κ.λπ. (Singrova & Sevcik, 2020).

3.4.3 Ανάμειξη και οξυγόνωση λυμάτων με τη βοήθεια ηλιακής ακτινοβολίας

Μία εναλλακτική μέθοδος ανάμειξης και οξυγόνωσης των υγρών αποβλήτων βασίζεται στη χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μία ανανεώσιμη και άφθονα διαθέσιμη φυσική πηγή ενέργειας, χωρίς εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και με αμελητέο κόστος. Μπορεί να συμβάλει στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια για την λειτουργία του μηχανολογικού εξοπλισμού (Sansaniwal, 2019).

Η Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ το 2005 για να αξιολογήσει αν η τεχνολογία κυκλοφορία με ηλιακή ενέργεια (Solar-Powered Circulation - SPC) είναι κατάλληλη να εφαρμοστεί στον αερισμό και την ανάμειξη των υγρών αποβλήτων, προχώρησε σε πειραματική εφαρμογή σε τέσσερις μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Η παρακολούθηση των τεσσάρων αυτών μονάδων επεξεργασίας έδειξε ότι η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί μία βιώσιμη λύση, καθώς οδήγησε σε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας που το δίκτυο τροφοδοτεί τις μονάδες επεξεργασίας, του λειτουργικού κόστους, εκπομπών αερίων θερμοκηπίων που επιβαρύνουν το περιβάλλον, ενώ ταυτόχρονα περιορίστηκε σημαντικά η δυσοσμία και η συσσώρευση λάσπης. Ωστόσο, δεν δόθηκαν ποσοτικά αποτελέσματα για τις ηλεκτρικές καταναλώσεις, την ποιότητα του νερού ούτε για άλλες παραμέτρους (Hudnell et al., 2011).



Εικόνα 3.6: Απεικόνιση συστήματος SPC

Πηγή: Hudnell et al., 2011

Σε μελέτη των Hudnell et al (2011) του Τμήματος Περιβαλλοντικών Υπηρεσιών του Νιού Χάμσαϊρ (NHDES), έγινε προσπάθεια να ποσοτικοποιηθούν οι επιπτώσεις της κυκλοφορίας με ηλιακή ακτινοβολία (SPC) όσο αφορά τη λειτουργική απόδοση,

τα χαρακτηριστικά του εξερχόμενου αποβλήτου, τα φαινόμενα που σχετίζονται με δυσάρεστες οσμές και τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της παραγόμενης ιλύς σε τρεις μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Οι μονάδες SPC που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν πλωτήρες που δημιουργούν άνωση για τα επιφανειακά και βυθισμένα στο νερό εξαρτήματα. Στην επιφάνεια επιπλέουν τρεις ηλιακοί συλλέκτες ισχύς 80 Watt, ένας κινητήρας 18V, ένα κιβώτιο ελέγχου. Κοντά στην επιφάνεια αλλά βυθισμένα στο νερό, ένας διανομέας, η πτερωτή και η μπαταρία. Η μπαταρία τροφοδοτεί τον κινητήρα για να περιστρέφει την πτερωτή, σταθερά και συνεχώς κατά τη διάρκεια όλου του 24ωρου. Στη συνέχεια, ακολουθεί ένας εύκαμπτος σωλήνας διαμέτρου 0,915 m. Επίσης, υπάρχει μία χαλύβδινη πλάκα έλκει ακτινικά το υγρό απόβλητο, το οποίο κινείται σχεδόν με στρωτή ροή. Η κάθε μονάδα SPC διατηρεί τη θέση της με τη χρήση αγκυροβολίων(παραπάνω εικόνα). Τα αποτελέσματα επαλήθευσαν τις προηγούμενες δοκιμές που αφορούσαν τη χρήση του συστήματος κυκλοφορίας με ηλιακή ακτινοβολία (SPC): μείωση ποσότητας ιλύς, λιγότερες δυσάρεστες οσμές, μείωση των εκπομπών αερίων, καλή ποιότητα παραγόμενου αποβλήτου. Σημειώθηκε μείωση των δαπανών σε ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο κατά 37% στις δύο από τις τρεις μονάδες επεξεργασίας λυμάτων (Exeter και Pittsfield). Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η απόσβεση για τη δαπάνη εγκατάστασης των μονάδων SPC, ήταν κατά μέσο όρο 3,3 χρόνια (2,9 χρόνια στο Exeter και 3,7 χρόνια στο Pittsfield). Τα κέρδη ήταν σημαντικά μεγαλύτερα στη μονάδα επεξεργασίας ενεργοποιημένης ιλύος του Rochester, όπου δύο δεξαμενές εξισορρόπησης τερμάτισαν την χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τον αερισμό όταν εφαρμόστηκε η κυκλοφορία με ηλιακή ενέργεια. Παρουσιάστηκε μείωση των δαπανών για ηλεκτρική ενέργεια κατά 86% και ο χρόνος απόσβεσης των αρχικών εξόδων εγκατάστασης υπολογίστηκε σε 1,9 χρόνια. Αν θα ληφθεί υπόψη ότι η αναμενόμενη διάρκεια ζωής των μονάδων SPC είναι 25 χρόνια, ενώ τα λειτουργικά έξοδα και η συντήρηση είναι ελάχιστα, το οικονομικό όφελος για μία μονάδα επεξεργασίας είναι σημαντικό (Hudnell et al., 2011).

3.4.5 Βιολογικά αεριζόμενα φίλτρα

Τα βιολογικά αεριζόμενα φίλτρα (Biological aerated filter – BAF) είναι μία διαδικασία η οποία εφαρμόζεται στη δευτεροβάθμια και τριτοβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Επιτρέπει τόσο τη βιολογική επεξεργασία των λυμάτων όσο και

την απομάκρυνση στερεών σωματιδίων. Κατά την εφαρμογή των βιολογικά αεριζόμενων φίλτρων εφαρμόζεται αερισμός με λεπτές φυσαλίδες και ποσότητα από τα επεξεργασμένα λύματα επιστρέφει (backwash) περιοδικά ώστε να βοηθήσει στον καθαρισμό του φίλτρου (Hong & Zhong, 2013).

Οι Yu et al (2019) αξιολόγησαν την πιθανότητα να χρησιμοποιηθούν βιολογικά αεριζόμενα φίλτρα σε αστικά λύματα της Κίνας. Μετά από πειραματική εφαρμογή παρατήρησαν ότι η απομάκρυνση του COD και του $\text{NH}_4\text{-N}$ πραγματοποιήθηκε με σταθερό ρυθμό σε μέσες τιμές περίπου 75% και 60%. Όταν ο αερισμός ρυθμίστηκε στα $0,25 \text{ m}^3/\text{h}$, οι αντίστοιχες απομακρύνσεις πήραν τις βέλτιστες τιμές τους (88,73% και 65,49% αντίστοιχα – μείωση TP κατά 89,98%). Συμπέραναν ότι πρόκειται για μία τεχνική που αν εφαρμοστεί έχει πολλαπλά οφέλη: απαιτεί μικρότερη περιοχή από ένα συμβατικό σύστημα ενεργοποιημένης λάσπης, έχει χαμηλότερο κόστος για την κατασκευή των κατάλληλων υποδομών αλλά, και μικρότερο λειτουργικό κόστος, δίνει λύματα καλύτερης ποιότητας, άρα επιβαρύνει λιγότερο το περιβάλλον και τους υδάτινους πόρους (Yu et al., 2019).

3.4 Επικινδυνότητα αερολυμάτων που δημιουργούνται κατά τον αερισμό

Με τον όρο βιοαερολύματα νοούνται ορισμένοι βιολογικοί παράγοντες που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα. Είναι, δηλαδή, ζωντανοί ή νεκροί μικροοργανισμοί, είτε μεμονωμένοι μικροοργανισμοί είτε συσσωματώματα αυτών, θραύσματα και προϊόντα μικροοργανισμών, όπως βακτηριακές ενδοτοξίνες, β -(1-3)-D γλυκάνες και μυκοτοξίνες.

Τα βιοαερολύματα βρίσκονται διάσπαρτα στη φύση και συναντώνται παντού. Ωστόσο, η ποιότητα και η ποσότητά τους εξαρτάται από ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως είναι η κτηνοτροφία, η συγκομιδή και η διαχείριση των παραγόμενων καρπών, αλλά και η λειτουργία σημαντικών βιομηχανικών μονάδων που σχετίζονται με την επεξεργασία ξύλου, παραγωγή και επεξεργασία τροφίμων, κλωστοϋφαντουργία, καθώς και με τη διαχείριση των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων. Είναι γεγονός ότι η ανάπτυξη της ανακύκλωσης βιοαποδομήσιμων αποβλήτων, η οποία αποτελεί μία ανάγκη και απαίτηση της εποχής, προκαλεί την αύξηση της ποσότητας των οργανικών υλικών που βρίσκονται σε κατάσταση αποσύνθεσης. Οι εργαζόμενοι στους χώρους αυτούς, αλλά και οι κάτοικοι γειτονικών περιοχών, κινδυνεύουν δυνητικά να εκτεθούν σε υψηλές συγκεντρώσεις

βιοαερολυμάτων. Τα βιοαποδομήσιμα κλάσματα απορριμμάτων περιλαμβάνουν (Schlosser, 2019):

- Τα βιοαπόβλητα, που προκύπτουν από νοικοκυριά και βιομηχανικές μονάδες και συνήθως διαχωρίζονται από τα υπόλοιπα απορρίματα
- Την οργανική ύλη/κλάσμα αποβλήτων που παραμένει σε ξηρά ανακτημένα απόβλητα

Σε όλα τα στάδια της διαχείρισης αποβλήτων, είτε πρόκειται για αστικά είτε για βιομηχανικά απόβλητα, το κλάσμα υπάρχει και πολλές από τις διεργασίες που συντελούνται αφορούν ή σχετίζονται με αυτό, όπως για παράδειγμα, η κομποστοποίηση, η αναερόβια χώνευση ή η σταθεροποίηση. Στις περισσότερες από αυτές τις διεργασίες, η ανάπτυξη μικροοργανισμών είναι επιθυμητή και ενθαρρύνεται. Επίσης, ορισμένοι παράγοντες όπως η ηλικία των αποβλήτων και οι περιβαλλοντικές συνθήκες για παράδειγμα η αυξημένη υγρασία και θερμοκρασία, μπορούν να ευνοήσουν την παρουσία μικροοργανισμών (Schlosser, 2019).

Η έκθεση σε βιοαερολύματα μπορεί να προκαλέσει στον άνθρωπο που εκτίθεται λοιμώξεις, ανοσοαλλεργικές, μη αλλεργικές φλεγμονώδεις και τοξικές αντιδράσεις (Schlosser, 2019).

- **Λοιμώξεις:** Η εισπνοή βιοαερολυμάτων θεωρείται ότι είναι μία από τις κύριες οδούς μετάδοσης μολυσματικών ασθενειών. Για να μολυνθεί ένα άτομο θα πρέπει ο παθογόνος μικροοργανισμός που θα εισπνεύσει να είναι ζωντανός. Η σοβαρότητα μίας βακτηριακής, ιικής ή μυκητιακής λοίμωξης εξαρτάται από την μολυσματικότητα του στελέχους του μικροοργανισμού και από παράγοντες κινδύνου, που αφορούν μεμονωμένα το άτομο, όπως είναι η ανοσολογική ανεπάρκεια. Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί που βρίσκονται στα αερολύματα μπορούν να προσβάλουν ανθρώπους αλλά και ζώα. Ο συνωστισμός και η έκθεση σε μεγάλο μικροβιακό φορτίο μπορούν να επηρεάσουν και να διευκολύνουν την εμφάνιση αερομεταφερόμενων μολυσματικών ασθενειών. Για παράδειγμα, η γρίπη και η φυματίωση είναι παραδείγματα λοιμώξεων που σχετίζονται με την κοντινή απόσταση που τηρούν δύο άτομα, ενώ το αυξημένο μικροβιακό φορτίο σχετίζεται με ορισμένα επαγγέλματα (πυρετός Q σε αγρότες, ψιτάκωση σε εκτροφείς πτηνών) ή περιβάλλοντα (π.χ. λεγεωνέλλωση, μη φυματιώδης μυκοβακτηριακή πνευμονική νόσος, ιστοπλάσμωση). Επίσης, υπάρχουν

ορισμένοι μικροοργανισμοί που είναι δυνητικά παθογόνα, όπως ορισμένα είδη μυκήτων *Aspergillus fumigatus*, *Zygomycetes species*, *Fusarium*, *Coccidioides immitis* και ζυμομύκητες όπως *Cryptococcus neoformans* και *Pneumocystis jirovecii* και βακτήρια

- Μη μολυσματικές επιδράσεις: Οι μη μολυσματικές επιδράσεις των εισπνεόμενων βιοαερολυμάτων σχετίζονται με την ανάπτυξη φλεγμονής στους αεραγωγούς από μη αλλεργικούς μηχανισμούς, όπως είναι η επίδραση της κυτοκίνης, ανοσοαλλεργικές αναπνευστικές ασθένειες (άσθμα, ρινίτιδα, πνευμονίτιδα υπερευαισθησίας) που χρειάζονται προηγούμενη ευαισθητοποίηση στις αλλεργιογόνες ενώσεις του μικροοργανισμού και τοξικές επιδράσεις στα όργανα (ήπαρ, νεφρός, κεντρικό νευρολογικό σύστημα, ανοσοποιητικό σύστημα). Στις περιπτώσεις αυτές, δεν απαιτείται να έρθει σε επαφή ο οργανισμός με ζωντανά κύτταρα. Ακόμη και νεκροί μικροοργανισμοί ή θραύσματα αυτών μπορούν να προκαλέσουν αντιδράσεις. Επίσης, ορισμένες μυκοτοξίνες, όπως για παράδειγμα η αφλατοξίνη B1, είναι επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία. Η αφλατοξίνη B1 ταξινομείται ως καρκινογόνο για τον άνθρωπο (Ομάδα 1) από τον Διεθνή Οργανισμό Έρευνας για τον Καρκίνο. Αν και η έκθεση στις μυκοτοξίνες συντελείται κυρίως με κατάποση, ωστόσο υπάρχουν ενδείξεις, οι οποίες αυξάνονται συνεχώς, ότι η διαρκής εισπνοή τους από αερολύματα μπορεί να επηρεάσει τον πνεύμονα και να οδηγήσει σε καρκινογενέσεις. Οι βιολογικοί παράγοντες στο αεροζόλ μπορούν να μεταδοθούν μέσω τριών οδών:

Κατά την εισπνοή βιοαερολυμάτων, η βλεννογόνος μεμβράνη που βρίσκεται στους αεραγωγούς και τους πνεύμονες, ανθρώπων και ζώων, προστατεύει. Ωστόσο, όσο η διάμετρος του εισπνεόμενου σωματιδίου μειώνεται, τόσο το βάθος στο οποίο εναποτίθεται το σωματίδιο στον πνεύμονα αυξάνει. Τα μεγαλύτερα σε διάμετρο σωματίδια, αν και περιορίζονται στο ανώτερο αναπνευστικό σύστημα, μπορούν να εισέλθουν στον οργανισμό σε μεταγενέστερο χρόνο με κατάποση. Επίσης, κατάποση τα βιοαερολύματα μπορούν να επικαθίσουν σε βρώμικα χέρια και από εκεί με επαφή να μεταφερθούν στο πρόσωπο, στα μάτια, στις βλεννογόνους ή να εισέλθουν στο στόμα (Schlosser, 2019).

Ο Schlosser (2019) πραγματοποίησε μία μεταμελέτη ώστε να αξιολογήσει τις γνώσεις και τα κενά σχετικά με τους κινδύνους για την υγεία που συνδέονται με τα βιοαερολύματα στον τομέα της διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων καθώς και

των εμπορικών και βιομηχανικών αποβλήτων. Παράλληλα, μέσα από αυτή τη μελέτη, προσπάθησε να εντοπίσει ποια ζητήματα πρέπει να αποκτήσουν προτεραιότητα για την έρευνα, ώστε η γνώση και η πρόληψη να ενισχυθούν. Επέλεξε ένα συνολικό αριθμό 368 μελετών και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν ισχυρά στατιστικά στοιχεία τα οποία συνδέουν την έκθεση σε βιοαερούματα ορισμένων επαγγελματιών που συσχετίζονται με την επεξεργασία αποβλήτων με δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, συμπεριλαμβανομένων των μακροχρόνιων αναπνευστικών παθήσεων. Ιδιαίτερα προβλήματα φαίνεται ότι κινδυνεύουν να αντιμετωπίσουν, όταν δεν λαμβάνουν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας, τα άτομα που ασχολούνται με τη κομποστοποίηση, της μηχανική βιολογική επεξεργασία και τις εγκαταστάσεις ανάκτησης υλικών. Κατά τη συγκεκριμένη ανασκόπηση, οι ερευνητές εντόπισαν πολλά κενά στην αξιολόγηση του κινδύνου από την έκθεση στα βιοαερούματα. Το πιο σημαντικό είναι ότι πρέπει να διαμορφωθούν έγκυρες και τυποποιημένες μέθοδοι που θα επιτρέψουν την ποσοτική αξιολόγηση της έκθεσης. Εντόπισαν, επίσης, ορισμένα θέματα που χρήζουν προτεραιότητας ώστε να μπορεί κάθε φορά να αξιολογηθεί ο κίνδυνος έκθεσης, όπως είναι ο προσδιορισμός περιβαλλοντικών δεικτών, η εκτίμηση των παραγόντων που επηρεάζουν το επίπεδο έκθεσης στο χώρο εργασίας, οι καλά σχεδιασμένες επιδημιολογικές μελέτες και η επικύρωση μοντέλων διασποράς.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο αερισμός και η ανάμειξη είναι δύο διαδικασίες απαραίτητες στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για απόβλητα πλούσια σε οργανική ύλη, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με τα απόβλητα των βιομηχανιών τροφίμων, των οινοποιείων, των αποσταγματοποιείων και των ζυθοποιείων.

Συνήθως πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Είναι δύο ενεργοβόρες διαδικασίες που επιβαρύνουν την κλιματική αλλαγή. Τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας την παρουσιάζει η ανάμειξη.

Ο αερισμός μπορεί να είναι επιφανειακός, υποεπιφανειακός ή να πραγματοποιείται με φυσικό τρόπο. Από τις τρεις μεθόδους ο πιο αποτελεσματικός μηχανισμός αερισμός είναι ο υποεπιφανειακός με λεπτές φυσαλίδες και ο πιο οικονομικός είναι ο φυσικός αερισμός, ο οποίος δεν απαιτεί την χρήση μηχανολογικού εξοπλισμού ή την κατανάλωση ενέργειας.

Για το αερισμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ατμοσφαιρικός αέρας ή καθαρό οξυγόνο. Το καθαρό οξυγόνο έχει μεγαλύτερο ρυθμό μεταφοράς στο υγρό απόβλητο.

Γίνεται προσπάθεια να βελτιωθούν οι τεχνικές αερισμού και ανάμειξης και να βελτιωθούν χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την απόδοση του συστήματος αλλά και με τις δαπάνες. Έχουν γίνει προσπάθειες με πολύ θετικά αποτελέσματα, όπως η χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας ή η εφαρμογή καινοτόμων συστημάτων (Σύστημα Aire O₂ Triton ή ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων τύπων αερισμού ή δύο διαχυτήρες που λειτουργούν εναλλάξ). Ωστόσο, η εφαρμογή τους είναι περιορισμένη ή ακόμη σε πειραματικό στάδιο.

Η κλιματική αλλαγή, η παγκόσμια μείωση του διαθέσιμου για κατανάλωση νερού, αλλά ο αντίκτυπος που τα μη σωστά επεξεργασμένα απόβλητα έχουν στο περιβάλλον απαιτούν από την επιστημονική κοινότητα να ασχοληθεί εκτεταμένα με την επεξεργασία των αποβλήτων και την εφαρμογή εναλλακτικών μορφών ενέργειας για τη λειτουργία των μονάδων επεξεργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. Άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά

1. Alkhalidi, A.A.T., Al Ba'ba'a, H.B., Amano, R.S. Wave generation in subsurface aeration system: a new approach to enhance mixing in aeration tank in wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, **2016**, 57 (56): 27144-27151
2. Bhargava, A. Physico-Chemical Waste Water Treatment Technologies: An Overview. *International Journal of Scientific Research and Education*, **2016**, 4 (5): 5308-5319
3. Crini, G. & Lichtfouse, E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, **2019**, 17: 145-155
4. Grenville, R.K. Giacomelli, J.J., Boyer, B.A., Johnson, S.J. Time and Length Scales of Mixing: The Macro Scale. *Chemical Engineering*. **2021**: 26-32
5. Hong, S. & Zhong, Q.W. Application of the Intelligent Control System of Biological Aerated Filter Wastewater Treatment. *Advanced Materials Research*, **2013**, 800 :550-554
6. Hudnell, H.K., Green D., Vien, R., Butler, S., Rahe, G., Richards, B.A., Bleth, J. Improving wastewater mixing and oxygenation efficiency with solar-powered circulation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, **2011**, 13: 731-742
7. Kaberline, J., Kadonsky, K., Rohrbacher, J. Liquid Stream Fundamentals: Aeration Design. *Water Environment Federation*, **2017**: 1-6
8. Kanauya, D.K., Paul, T., Sinharoy, A., Pakshirajan, K. Biological Treatment Processes for the Removal of Organic Micropollutants from Wastewater: a Review. *Current Pollution Reports*, **2019**, 5: 122-128
9. Sansaniwal, S.K. Advances and challenges in solar-powered wastewater treatment technologies for sustainable development: a comprehensive review. *International Journal of Ambient Energy*, **2019**: 1-81

10. Schlosser, O. Bioaerosols and Health: Current Knowledge and Gaps in the Field of Waste Management. *Multidisciplinary Journal of Waste Resources & Residues*, **2019**, 5: 11-125

11. Scouteris, G., Rodriguez-Garcia, G., Reinecke, S.F., Hampel, U. The use of pure oxygen for aeration in aerobic wastewater treatment: A review of its potential and limitations. *Bioresource Technology*, **2020**, 312: 123595

12. Singrova, V. & Sevcik, J., Combined aeration and mixing system and its use in the practice. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, **2020**, 444 (1): 012049

13. Yu, T., Linshi, J., Miao, Y, Guizhou, G., Zheng, L. Study of Treatment of Domestic Wastewater by Biological Aerated Filter. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **2019**, 330: 032054

B. Βιβλία

1. Oakley, S. Preliminary Treatment and Primary Settling. In: Rose, J.B. & Jimenez-Cisneros B. (eds). *Water and Sanitation for the 21st Century: Health and Microbiological Aspects of Excreta and Wastewater Management*. Michigan State University, Lansing, MI, UNESCO

2. Tilley, E., Ulrich, L., Luthi, C, Reymond, P., Zurbrugg, C. *Compendium of Sanitation Systems and Technologies*. 2nd Revised edition. **2014**. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag)

Γ. Κεφάλαια βιβλίων

1. Goel, R., Flora, J., Chen, J. Flow Equalization and Neutralization. From *Handbook of Environmental Engineering*. Wang, L.K., Hung Y.-T., Shamas N.K. (editors), **2007**, 3: 21-45

2. Kocamemi, A. Chapter 7: Aeration Systems Air Requirement Calculations. Class Notes for “ENVE302” Marmara University Department of Environmental Engineering. Istanbul. Turkey. **2012**.: 1-51: Available online (12/12/2021):

[https://mimoza.marmara.edu.tr/~bilge.alpaslan/enve302course%20outline%20%20\(2012\).htm](https://mimoza.marmara.edu.tr/~bilge.alpaslan/enve302course%20outline%20%20(2012).htm)

3. Ojovan, M.I & Lee, W.E. (2014). 13 – Pre-treatment of Radioactive Wastes. In *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*, Elsevier (2nd edition): 159-170

Δ. Διαδίκτυο

1. EPA. Wastewater Technology Fact Sheet. Screening and Grit Removal. **2002**. Available online (22/12/2021):

https://www3.epa.gov/npdes/pubs/final_sgrit_removal.pdf