



*«Μελέτη απόδοσης επεξεργασίας λυμάτων με προσθήκη  
πληρωτικών υλικών σε πιλοτική μονάδα βιοαντιδραστήρων  
μεμβρανών»*

*"Study of wastewater treatment efficiency by adding filling  
materials to a pilot membrane bioreactor unit."*

**Κωνσταντίνος Ιωαννίδης (2002)**

**Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Σαμαράς Πέτρος**

**Υπεύθυνος: Δρ. Μπαντή Δήμητρα**

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2023**

*«Μελέτη απόδοσης επεξεργασίας λυμάτων με προσθήκη  
πληρωτικών υλικών σε πιλοτική μονάδα βιοαντιδραστήρων  
μεμβρανών»*

*" Study of wastewater treatment efficiency by adding filling  
materials to a pilot membrane bioreactor unit. "*

**Κωνσταντίνος Ιωαννίδης (20002)**

**Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Σαμαράς Πέτρος**

**Υπεύθυνος: Δρ. Μπαντή Δήμητρα**

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2023**

Υποβολή Πτυχιακής Εργασίας που αποτελεί μέρος των απαιτήσεων για την απονομή  
Πτυχίου του Τμήματος Τεχνολογίας Τροφίμων του ΔΠΠΑΕ Θεσσαλονίκης.

**ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2023**

**ΠΕΤΡΟΣ  
ΣΑΜΑΡΑΣ**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο του Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων Θεσσαλονίκης με τον επιβλέπων καθηγητή Δρ. Πέτρο Σαμαρά. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αλλά και την πλήρη καθοδήγηση και συνεργασία για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω και την υπεύθυνη Δρ. Δήμητρα Μπαντή για την βοήθεια της σε όλες τις τεχνικές διαδικασίες της ερευνητικής εργασίας κατά την λειτουργία της πιλοτής μονάδας MBBR-MBR, καθώς και τις συνεχείς εκπαιδευτικές και λειτουργικές συμβουλές.

Αφετέρου θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Διευθυντή του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Δρ. Χρήστο Ριτζούλη, για την άψογη συνεργασία και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής αυτής της εργασίας αλλά και όλη την περίοδο του μεταπτυχιακού προγράμματος . Χωρίς την ουσιαστική τους βοήθεια θα ήταν δυσχερής η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για όλη τη στήριξη κατά τη διάρκεια όλου του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Ιωαννίδης Κωνσταντίνος

Θεσσαλονίκη 2023

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι Αντιδραστήρες Κινούμενης Κλίνης Βιοφίλμ σε συνδυασμό με τους Βιοαντιδραστήρες Μembrανών (Moving Bed Biofilm Reactors – Membrane Bioreactors, MBBR-MBR) αποτελούν μια προηγμένη τεχνική με εφαρμογή στην επεξεργασία αστικών λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων. Πρόκειται για μια καινοτόμο τεχνολογία, η οποία εξελίσσεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια, καθώς παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, τα οποία θα αναλυθούν εκτενώς στη συνέχεια. Στόχος της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η βελτίωση της διήθησης και η αύξηση του χρόνου αποδοτικής λειτουργίας της μεμβράνης, μέσω της μείωσης της έμφραξης.

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της έμφραξης των μεμβρανών και της απόδοσης επεξεργασίας των αστικών λυμάτων σε έναν ημι-πilotικό αντιδραστήρα κινούμενης κλίνης βιοφίλμ σε συνδυασμό με βιοαντιδραστήρα μεμβρανών MBBR-MBR με τη χρήση εμπορικών βιοφορέων Kaldnes K1.

Αρχικά, στο θεωρητικό μέρος περιγράφεται η αρχή λειτουργίας των βιοαντιδραστήρων και τα είδη των διατάξεων. Παραθέτονται, επίσης, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των βιοαντιδραστήρων μεμβράνης, με ειδικότερη εστίαση στην έμφραξη της μεμβράνης, που αποτελεί το βασικότερο μειονέκτημα. Παρουσιάζονται, ακόμα, οι παράγοντες που συμβάλλουν στην έμφραξη καθώς και τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος. Στη συνέχεια, αναφέρεται και αναλύεται ο συνδυασμός των βιοαντιδραστήρων κινούμενης κλίνης βιοφίλμ με βιοαντιδραστήρες μεμβρανών.

Το πειραματικό μέρος παρουσιάζονται οι μέθοδοι που εφαρμοστήκαν και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Για την αξιολόγηση της απόδοσης της επεξεργασίας και του μηχανισμού έμφραξης της μεμβράνης σε ένα σύστημα MBBR-MBR, πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα συνεχούς λειτουργίας. Κατά το πρώτο πείραμα δεν προστέθηκαν βιοφορείς στη μονάδα και συνεπώς το πείραμα αυτό λειτούργησε ως μονάδα MBR έλεγχος. Κατά το δεύτερο πείραμα προστέθηκαν εμπορικοί βιοφορείς τύπου K1, και συνεπώς η μονάδα λειτούργησε ως μονάδα MBBR-MBR K1. Στόχος ήταν η συγκριτική μελέτη έμφραξης της μεμβράνης και απόδοσης επεξεργασίας των λυμάτων μεταξύ των δύο μονάδων, μέσω των μεθόδων ολικού αζώτου, νιτρικού και αμμωνιακού αζώτου.

## ABSTRACT

Moving Bed Biofilm Reactors in combination with Membrane Bioreactors (Moving Bed Biofilm Reactors - Membrane Bioreactors, MBBR-MBR) are an advanced technique with application in the treatment of municipal wastewater and industrial waste. It is an innovative technology, which has been constantly evolving in recent years, as it presents several advantages, which will be analyzed in detail below. The aim of this particular method is to improve the filtration and increase the efficient operation time of the membrane, through the reduction of clogging.

The aim of the work is to study the membrane fouling and treatment performance of municipal wastewater in a semi-pilot moving bed biofilm reactor combined with an MBBR-MBR membrane bioreactor using commercial Kaldnes K1 biocarriers.

Initially, the theoretical part describes the operating principle of bioreactors and the types of devices. The advantages and disadvantages of membrane bioreactors are also listed, with a special focus on membrane infarction, which is the main disadvantage. Also presented are the factors that contribute to heart attacks as well as ways to deal with the problem. Then, the combination of biofilm moving bed bioreactors with membrane bioreactors is reported and analyzed.

The experimental part presents the methods used and the materials used. To evaluate the treatment performance and membrane fouling mechanism in an MBBR-MBR system, two continuous operation experiments were performed. During the first experiment no biocarriers were added to the unit and therefore it served as a control MBR unit. Commercial type K1 biocarriers were added during the experiment, and the second unit was operated as MBBR-MBR unit K1. The aim was the comparative study of membrane clogging and wastewater treatment efficiency between the two units, through the methods of total nitrogen, nitrate and ammonium nitrogen.

## Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT .....	5
A.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1 Υγρά απόβλητα .....	10
1.2 Επεξεργασία αποβλήτων – Στάδια επεξεργασία υγρών αποβλήτων .....	11
2. Βιοαντιδραστήρες μεμβρανών .....	14
2.1 Αρχή λειτουργίας και διατάξεις .....	14
2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του βιοαντιδραστήρα μεμβρανών έναντι της συμβατικής μεθόδου βιολογικής επεξεργασίας.....	16
2.3 Μονάδες μεμβρανών στα συστήματα MBR.....	17
2.4 Διαμορφώσεις Μεμβρανών.....	19
2.5 Έμφραξη – Είδη και μηχανισμοί.....	22
2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν την έμφραξη της μεμβράνης.....	24
2.7 Τρόποι αντιμετώπισης της έμφραξης της μεμβράνης .....	29
3. Βιοαντιδραστήρες κινούμενης κλίνης βιοφίλμ σε συνδυασμό με βιοαντιδραστήρες μεμβρανών.....	31
3.1 Εφαρμογές του MBBR για την επεξεργασία λυμάτων .....	34
3.2 Βιοφορείς.....	37
3.3 Εφαρμογές και ήδη βιοφορέων .....	38
3.4 Τρισδιάστατη εκτύπωση βιοφορέων .....	40
3.5 Παράδειγμα πιλοτικής εφαρμογής Βιοαντιδραστήρα βιομηχανικής κλίμακας στο Πανεπιστήμιο Auburn North Auburn Fisheries Unit .....	41
4. ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	45
B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	46
5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	46
6. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	50
6.1 Όργανα .....	50
6.2 Μέτρηση δυναμικής σκέδασης φωτός (Dynamic Light Scattering DLS)- Προσδιορισμός κατανομής σωματιδίων .....	50
6.3 Προσδιορισμός συγκέντρωσης αζώτου .....	53
6.4 Χημική Απαίτηση Οξυγόνου COD .....	55
7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	56
7.1 Μελέτη της διαμεμβρανικής πτώσης πίεσης της μεμβράνης.....	56

7.2 Παρατήρηση της θερμοκρασίας.....	57
7.3 Μελέτη της απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου (COD).....	59
7.4 Μελέτη της κατανομής μεγέθους των κολλοειδών συστατικών .....	60
7.5 Μελέτη της απομάκρυνσης του ολικού αζώτου (Total N).....	63
7.6 Μελέτη της απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου (NH <sub>4</sub> -N).....	64
7.7 Μελέτη της απομάκρυνσης του νιτρικού αζώτου (NO <sub>3</sub> -N) .....	66
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
9. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ.....	69
10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	70
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	72

## A.ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Βιοαντιδραστήρες Μembrανών (Membrane Bio-Reactor, MBR) αποτελούν μια νέα τεχνική με εφαρμογή στην επεξεργασία αστικών λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων. Πρόκειται για μια καινοτόμο τεχνολογία, η οποία εξελίσσεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια, καθώς παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, τα οποία θα αναλυθούν εκτενώς στη συνέχεια. Στόχος της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η βελτίωση της διήθησης και η αύξηση του χρόνου αποδοτικής λειτουργίας της μεμβράνης, μέσω της μείωσης της έμφραξης.

Κατά τη λειτουργία των βιοαντιδραστήρων μεμβρανών πραγματοποιούνται δυο βασικές λειτουργίες, η βιολογική επεξεργασία και η διήθηση του δείγματος μέσω των μεμβρανών, με απώτερο στόχο το διαχωρισμό του ανάμικτου υγρού από την επεξεργασμένη μορφή. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο παρέχεται η δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλούς χρόνους παραμονής στερεών (SRT) και η συλλογή μεγάλων συγκεντρώσεων αιωρούμενων στερεών ανάμικτου υγρού. Παράλληλα, παρατηρείται μειωμένη παραγωγή λάσπης, μικρές απαιτήσεις σε όγκο του βιολογικού αντιδραστήρα και υψηλή ποιότητα εκροής. (1)

Η λειτουργία των MBR σε υψηλούς χρόνους παραμονής των στερεών, αποτελεί ένα βασικό πλεονέκτημα καθώς επιτρέπει την επιτυχή ολοκλήρωση της διαδικασίας της νιτροποίησης. Τα συστήματα MBR επιτρέπουν τη μειωμένη ταχύτητα ανάπτυξης των νιτροποιητικών βακτηρίων, με αποτέλεσμα να προλαμβάνεται η έκπλυση τους από τον βιοαντιδραστήρα, με αποτέλεσμα την αύξηση της βιοποικιλότητας της ενεργού ιλύος. Επίσης, η επιτρεπόμενη διαβάθμιση στις συγκεντρώσεις διαλυμένου οξυγόνου στα μικροβιακά συσσωματώματα ή στο βιοφίλμ που επιτυγχάνεται στα συστήματα MBR συμβάλλει στην ταυτόχρονη νιτροποίηση και απονιτροποίηση. Ένα εξίσου βασικό πλεονέκτημα είναι η πολύ υψηλή συλλογή οργανικού υλικού και οι απομακρύνσεις χημικά απαιτούμενου οξυγόνου. (2) (3) (4)

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η έμφραξη των μεμβρανών, η οποία για τον περιορισμό της απαιτεί μια σειρά ενεργειών, όπως υψηλό αερισμό και αντικατάσταση μεμβρανών, τα οποία αυξάνουν σημαντικά το κόστος, περιορίζοντας παράλληλα το εύρος εφαρμογής τους. Ως έμφραξη των μεμβρανών ορίζεται «η



*αντίσταση που προκαλείται στη ροή του διηθήματος ως αποτέλεσμα της συνεχόμενης εναπόθεσης σωματιδίων στην επιφάνεια και στο εσωτερικό της μεμβράνης». (5)*

Η έμφραξη των μεμβρανών έχει συσχετιστεί με τη συγκέντρωση βιομάζας, εξωκυτταρικών πολυμερών ενώσεων (EPS) και διαλυτών παραπροϊόντων των μικροοργανισμών (SMP) στο ανάμικτο υγρό, τα οποία επιτρέπουν τη συγκράτηση των βακτηριδίων στις βιοκροκίδες. Οι υψηλοί χρόνοι παραμονής στερεών έχουν συσχετιστεί με τη μειωμένη συγκέντρωση των EPS και SMP, καθώς παρατείνεται η βιοαποδόμηση. Παράλληλα, μικρότεροι χρόνοι παραμονής στερεών επιδεινώνουν την έμφραξη των μεμβρανών, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση των EPS και SMP. (6) (7) Αξίζει να σημειωθεί, ότι έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες που υποδεικνύουν τα αντίθετα αποτελέσματα. Τα διαφορετικά είδη μεμβρανών αλλά και αποβλήτων, οι διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες αλλά και οι μέθοδοι που εφαρμόζονται, αιτιολογούν τη διγνωμία που παρατηρείται. (8)

## 1.1 Υγρά απόβλητα

Ως υγρά απόβλητα καλούνται τα απόβλητα που αποτελούνται στο μεγαλύτερο μέρος τους από νερό, το οποίο προέρχεται κυρίως από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, είτε σε επίπεδο ατομικής χρήσης είτε σε επίπεδο βιομηχανικής κλίμακας. Πρόκειται, κυρίως για τα απόβλητα που προέρχονται από κατοικίες, από άρδευση και από διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι διαλύματα πλούσια σε τοξικές ουσίες ή/και παθογόνους μικροοργανισμούς, με αποτέλεσμα να αποτελούν συχνά κύρια εστία προβλημάτων. Με κριτήριο την προέλευσή τους τα υγρά απόβλητα ταξινομούνται στις ακόλουθες κατηγορίες: (9) (10)

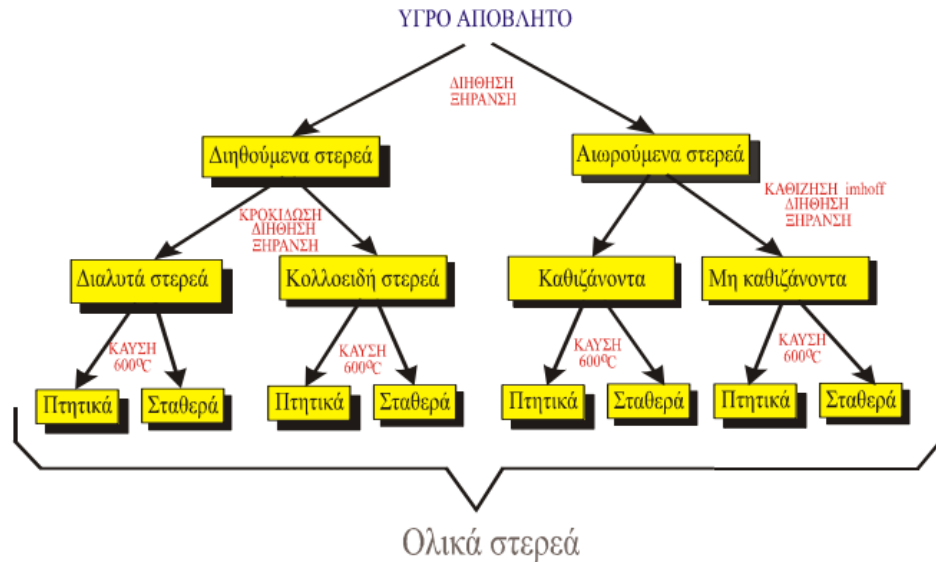
1. Οικιακά λύματα: προέρχονται από τις ατομικές δραστηριότητες των ανθρώπων σε επίπεδο κατοικίας, όπως μπάνιο κλπ.
2. Αστικά υγρά απόβλητα: υγρά απόβλητα από αστικά περιβάλλοντα, που περιλαμβάνουν σπύτια, μαγαζιά κλπ.
3. Βιομηχανικά απόβλητα: πρόκειται για τα υγρά απόβλητα που προέρχονται από εργασιακά περιβάλλοντα και βιομηχανίες. Παράγονται κατά την παραγωγική διαδικασία και ενδέχεται να περιέχουν υπολείμματα των υλικών- συστατικών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγική διεργασία. (10)

Τα υγρά απόβλητα με βάση των στερεών διαλυμένων ουσιών που περιέχουν ταξινομούνται σε: α) στερεά αιωρήματα τα οποία σταδιακά καθιζάνουν ή επιπλέουν, β) στερεά κολλοειδή αιωρήματα, τα οποία για την καθίζησή τους απαιτούν διεργασίες κροκίδωσης και γ) στερεά που είναι διαλυτοποιημένα.

Ως ολικά στερεά TS (Total Solids) ενός υγρού αποβλήτου ορίζονται «τα ιζήματα τα οποία διατηρούνται ύστερα από εξάτμιση σε θερμοκρασία 103-105°C προζυγισμένου δείγματος αποβλήτου και εκφράζεται σε mg

/l ή σε % αναλογία (βάρος ανά όγκο)». Η ταξινόμηση των ολικών στερεών παρουσιάζεται στην **Εικόνα 1**. Αρχικά, διακρίνονται σε αιωρούμενα SS (Suspended Solids) και σε διηθούμενα στερεά DS (Dissolved Solids). Για την διάκρισή τους χρησιμοποιείται φίλτρο για την κατακράτηση αιωρούμενων στερεών σωματιδίων. Στη συνέχεια, τα αιωρούμενα στερεά ταξινομούνται σε καθιζάνοντα και μη στερεά, ενώ τα διηθούμενα σε διαλυτά και κολλοειδή. Ως κολλοειδή καλούνται τα στερεά τα οποία έχουν διάμετρο από 1nm έως 1μ, και δεν μπορούν να καθιζάνουν λόγω του ηλεκτρικού

φορτίου που εντοπίζεται στην επιφάνειά τους. Τέλος, όλες οι υποκατηγορίες διακρίνονται σε πτητικά και σταθερά στερεά. (10)

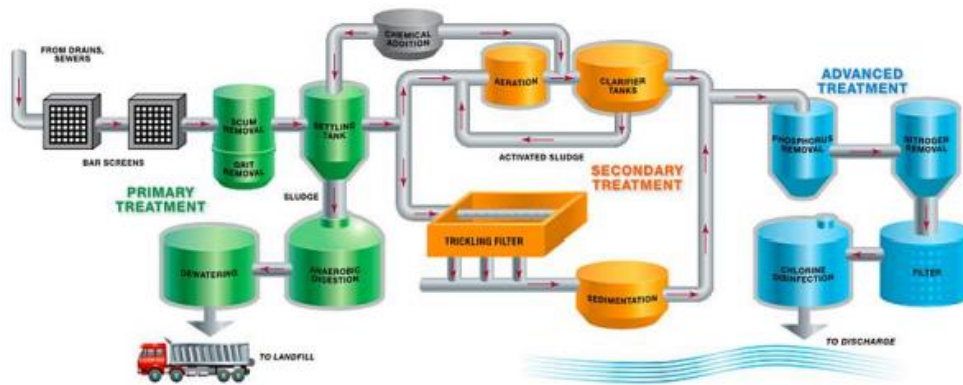


Εικόνα 1. Διαχωρισμός και ανάλυση κατά κατηγορίες των στερεών που περιέχονται σ' ένα υγρό απόβλητο.

## 1.2 Επεξεργασία αποβλήτων – Στάδια επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Καθώς τα υγρά απόβλητα δημιουργούν προβλήματα και είναι επικίνδυνα για τη δημόσια υγεία, απαιτείται ειδική επεξεργασία, η οποία να τα καθιστά ασφαλή για το περιβάλλον αλλά και για τους έμβιους οργανισμούς. Παράλληλα, τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα επαναχρησιμοποιούνται ως πηγές νερού στην άρδευση και τη βιομηχανία. Για την επεξεργασία τους, εφαρμόζονται αρκετές τεχνικές όπως καθίζηση, βιολογική αποδόμηση, χημική επεξεργασία κλπ.

Για να ολοκληρωθεί η επεξεργασία των αποβλήτων απαιτούνται τρία στάδια: η πρωτοβάθμια, η δευτεροβάθμια και/ή τριτοβάθμια επεξεργασία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου κρίνεται απαραίτητο διενεργείται ένα επιπλέον στάδιο προεπεξεργασίας. (10)



Εικόνα 2. Τα στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

1. Προεπεξεργασία: Στόχος του συγκεκριμένου σταδίου είναι η απομάκρυνση ογκωδών υλικών τα οποία στη συνέχεια θα παρεμποδίσουν την ομαλή επεξεργασία. Επιπλέον, μπορεί να πραγματοποιηθεί πολτοποίηση ή/και άλεση, με αποτέλεσμα τα ογκώδη υλικά να μην απομακρυνθούν αλλά να πολτοποιηθούν και να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία μαζί με το υπόλοιπο δείγμα. Παράλληλα, πραγματοποιείται εξάμμιση -η απομάκρυνση υλικών με μεγάλο ειδικό βάρος, όπως η άμμος- και εξάφριση των λιπαρών υλικών. Τέλος, ακολουθεί η διαδικασία εξισορρόπησης παροχής, κατά την οποία επιτυγχάνεται η ομοιόμορφη παροχή που απαιτείται στα επόμενα στάδια. (11)
2. Πρωτοβάθμια επεξεργασία: Στο συγκεκριμένο στάδιο μέσω καθίζησης απομακρύνονται οργανικά και ανόργανα συστατικά, αλλά και τα αιωρήματα συστατικά. Επιτυγχάνεται απομάκρυνση μέχρι και του 50% του BOD, του 70% των αιωρούμενων στερεών και του 65% των ελαίων και των λιπών που υπάρχουν στα υγρά απόβλητα. Στο συγκεκριμένο στάδιο τα κολλοειδή δεν επηρεάζονται, ενώ ποσοστό του οργανικού αζώτου, του οργανικού φωσφόρου αλλά και των βαρέων μετάλλων που εντοπίζονται στα απόβλητα απομακρύνονται μέσω καθίζησης.
3. Δευτεροβάθμια επεξεργασία: Στο συγκεκριμένο στάδιο απομακρύνονται τα υπολείμματα των οργανικών και των αιωρούμενων στερεών. Παράλληλα, μέσω βιολογικών διεργασιών απομακρύνεται η βιοαποικοδομήσιμη διαλυτοποιημένη ύλη καθώς και η κολλοειδής οργανική ύλη. Επιτυγχάνεται, επίσης, η απομάκρυνση οργανικού άνθρακα, αλλά και ενώσεων αζώτου και φωσφόρου.

Για τη δευτεροβάθμια επεξεργασία εφαρμόζονται μέθοδοι ενεργοποιημένης λάσπης, αναερόβιες διεργασίες, φίλτρα, τάφροι οξείδωσης κλπ. (12)

4. Τριτοβάθμια επεξεργασία: Εφαρμόζεται για την απομάκρυνση συγκεκριμένων συστατικών, τα οποία δεν απομακρύνθηκαν κατά τη δευτεροβάθμια επεξεργασία. Επίσης, πραγματοποιείται η απολύμανση των αποβλήτων, που αποτελεί το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας. (12)

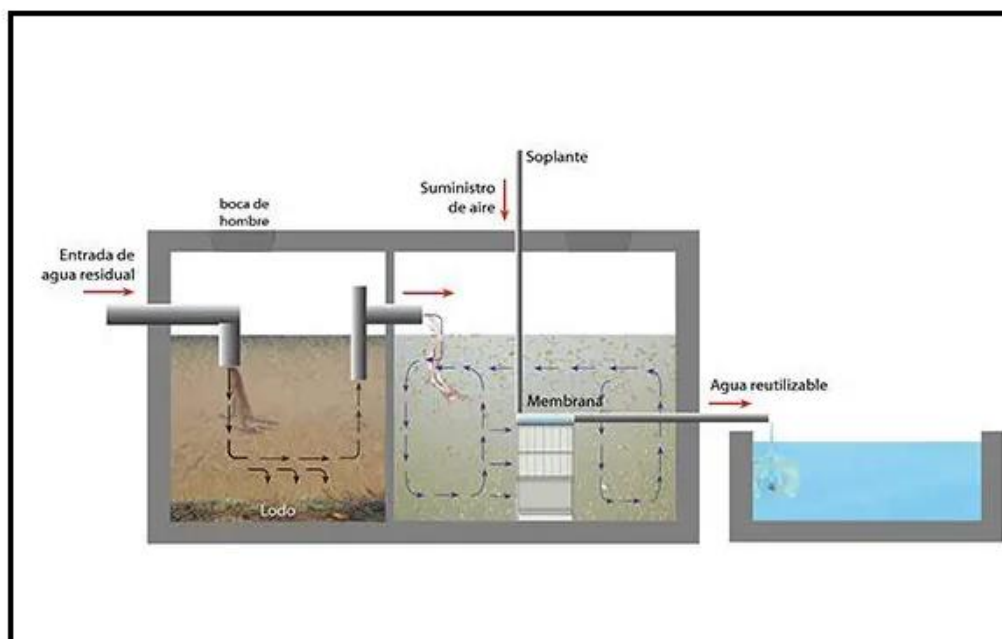
## 2. Βιοαντιδραστήρες μεμβρανών

### 2.1 Αρχή λειτουργίας και διατάξεις

Ένα σύστημα βιοαντιδραστήρα μεμβρανών MBR απαρτίζεται από τον βιοαντιδραστήρα και τις μεμβράνες διήθησης. Ο βιολογικός αντιδραστήρας αποτελείται από μια δεξαμενή αερισμού και -στις περισσότερες περιπτώσεις- από μια δεξαμενή απονιτροποίησης, και επιτελεί τη βιοδιάσπαση των αποβλήτων. Από τον βιοαντιδραστήρα αντλείται το μικτό υγρό και προωθείται στις μεμβράνες διήθησης, όπου απομακρύνεται το διήθημα. Το υπόλοιπο δείγμα επιστρέφει στον αντιδραστήρα.

Η λειτουργία των συστημάτων περιλαμβάνει 3 βασικά στάδια **Εικόνα 3**:

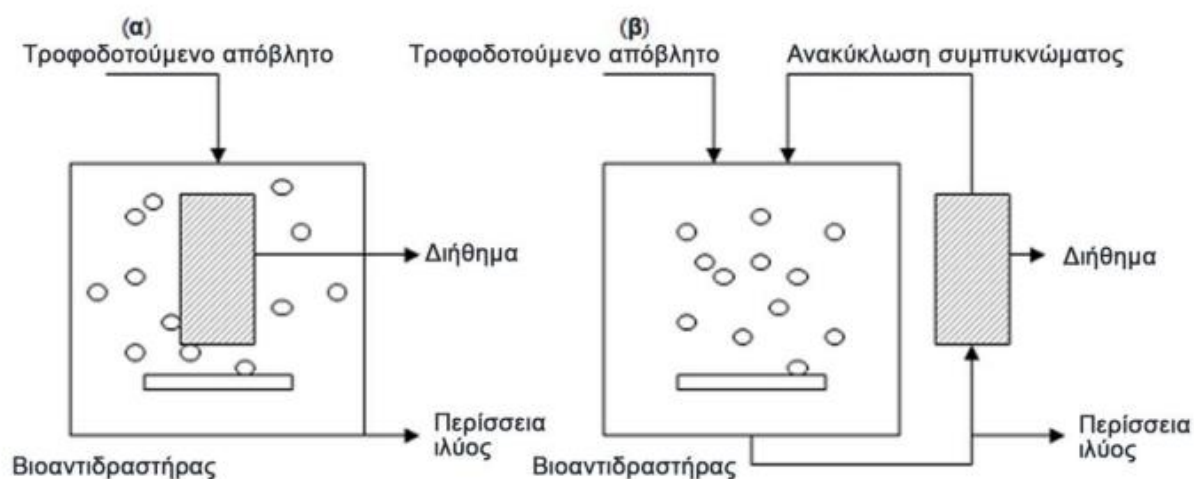
- *1<sup>ο</sup> στάδιο*: Επιτυγχάνεται η βιοδιάσπαση των λυμάτων και η διήθηση του ανάμικτου υγρού, το οποίο διαχωρίζεται στο ανακτώμενο υγρό (διήθημα) και την ιλύ (συμπύκνωμα).
- *2<sup>ο</sup> στάδιο*: Το δείγμα διηθείται μέσω υψηλής πίεσης στον αντιδραστήρα ή μέσω χαμηλής πίεσης στις μεμβράνες, τις οποίες διαπερνούν τα υγρά ενώ τα στερεά συγκρατούνται στη μεμβράνη.
- *3<sup>ο</sup> στάδιο*: Τα σωματίδια συγκρατούνται στις μεμβράνες, τις οποίες δεν μπορούν να διαπεράσουν λόγω μεγέθους.



Εικόνα 3. Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης

Οι βασικές διαμορφώσεις των συστημάτων είναι οι εξής: α) το εμβαπτισμένο MBR και β) το εξωτερικό MBR. Το εμβαπτισμένο MBR χρησιμοποιείται ευρέως στην επεξεργασία αστικών λυμάτων. Στη συγκεκριμένη διαμόρφωση οι μεμβράνες τοποθετούνται στο εσωτερικό του βιοαντιδραστήρα και εμβαπτίζονται στο αναμιγνυόμενο υγρό **Εικόνα 4α**. Ως εκ τούτου, η διήθηση και οι βιολογικές διεργασίες πραγματοποιούνται στο ίδιο περιβάλλον. Πρόκειται για μια διαδεδομένη μέθοδος, καθώς απαιτείται λιγότερη ενέργεια και μικρότερες απαιτήσεις καθαρισμού. (13)

Στο εξωτερικό σύστημα, οι μεμβράνες δεν έρχονται σε επαφή με τον βιοαντιδραστήρα καθώς τοποθετούνται εξωτερικά του **Εικόνα 4β**. Το δείγμα προωθείται από τον αντιδραστήρα στις μεμβράνες, όπου διηθείται. Στη συγκεκριμένη διαμόρφωση παρατηρείται ανακυκλοφορία του συμπυκνώματος προς το εσωτερικό του αντιδραστήρα. Στον εξωτερικό τύπο, παρατηρείται σταυρωτή ροή, καθώς η ροή του ρεύματος εφάπτεται της μονάδας των μεμβρανών. Απαιτείται μεγάλη ταχύτητα ροής ώστε να περιοριστεί η έμφραξη της μεμβράνης. Επίσης, μέσω των ειδικών συστημάτων επιτυγχάνεται ανάδευση και αερισμός της βιομάζας. Βασικό πλεονέκτημα της εξωτερικής διαμόρφωσης, είναι ο άμεσος έλεγχος της έμφραξης και η εύκολη αντικατάσταση της μεμβράνης. Απαιτείται, όμως, συνεχής καθαρισμός της μεμβράνης και υψηλότερη ενέργεια. (13)



Εικόνα 4. Οι βασικές διαμορφώσεις των συστημάτων: α) το εμβαπτισμένο MBR και β) το εξωτερικό MBR.

## 2.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του βιοαντιδραστήρα μεμβρανών έναντι της συμβατικής μεθόδου βιολογικής επεξεργασίας

Τα συστήματα MBR αποτελούν μια συνεχώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία, η οποία γνωρίζει ιδιαίτερη άνθιση τα τελευταία 20 χρόνια και συνεχώς κερδίζει έδαφος έναντι της συμβατικής μεθόδου βιολογικής επεξεργασίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε μια πληθώρα πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η συγκεκριμένη τεχνολογία. Συγκεκριμένα:

1. Παραγωγή υψηλής ποιότητας εκροής του επεξεργασμένου λύματος και δυνατότητα διατήρησης της ποιότητας του.
2. Φιλική προς το περιβάλλον μέθοδος, καθώς δεν απαιτείται η χρήση χημικών ουσιών.
3. Απομάκρυνση μεγάλου εύρους ουσιών.
4. Εξοικονόμηση ενέργειας
5. Ευελιξία εγκατάστασης
6. Δυνατότητα διαμόρφωσης κατάλληλου μεγέθους, καθώς διατίθενται σε μεμονωμένες μορφές.
7. Ήπιες συνθήκες λειτουργίας και διήθηση σε χαμηλές θερμοκρασίες.
8. Ανάκτηση του αρχικού διαλύματος με απλή ανάμιξη των παραγόμενων κλασμάτων.
9. Χαμηλό κόστος
10. Επιτυγχάνεται σημαντικός βαθμός διαχωρισμού, άρα μεγάλη απόδοση.
11. Παρέχεται βελτιωμένη νιτροποίηση του αζώτου και μειωμένη απαίτηση απολύμανσης των επεξεργασμένων λυμάτων. (14)

Παρόλα αυτά, η μέθοδος παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα, γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω εξέλιξη και βελτίωση της μεθόδου. Συγκεκριμένα:

1. Για την απολύμανση των υδάτων απαιτείται χρήση χλωρίου, σε περιπτώσεις που η διήθηση δεν είναι αποτελεσματική.
2. Η έμφραξη της μεμβράνης.
3. Μειωμένη ανάκτηση νερού, κυρίως μέσω της αντίστροφης ώσμωσης.
4. Υψηλό κόστος κατασκευής και εγκατάστασης.
5. Απαιτείται συνεχής συντήρηση και καθαρισμός του συστήματος.
6. Η ευαισθησία σε χημική επίθεση και η έλλειψη μηχανικής αντοχής



7. Η κατακράτηση μικρών σωματιδίων όπως κολλοειδών ή ιών μπορεί να μην επιτευχθεί πλήρως και εξαρτάται σε πολλές περιπτώσεις από τη σύσταση του προς διαχωρισμού διαλύματος και τις συνθήκες λειτουργίας. (15)

### 2.3 Μονάδες μεμβρανών στα συστήματα MBR

Ως διήθηση ορίζεται «η μέθοδος διαχωρισμού δύο ή περισσότερων συστατικών από ένα ρευστό, και βασίζεται κυρίως στη διαφορά μεγέθους». Βασικό στοιχείο των μεμβρανών είναι η πορώδης δομή, ώστε να επιτευχθεί η επιλεκτική διέλευση των μορίων μέσω των πόρων. Στην επιφάνεια της μεμβράνης παρατηρούνται μοριακές αλληλεπιδράσεις, οι οποίες επάγουν τον διαχωρισμό. (16)

#### 2.3.1 Χαρακτηριστικά μεμβρανών

##### ❖ Μέγεθος πόρων και κατανομή

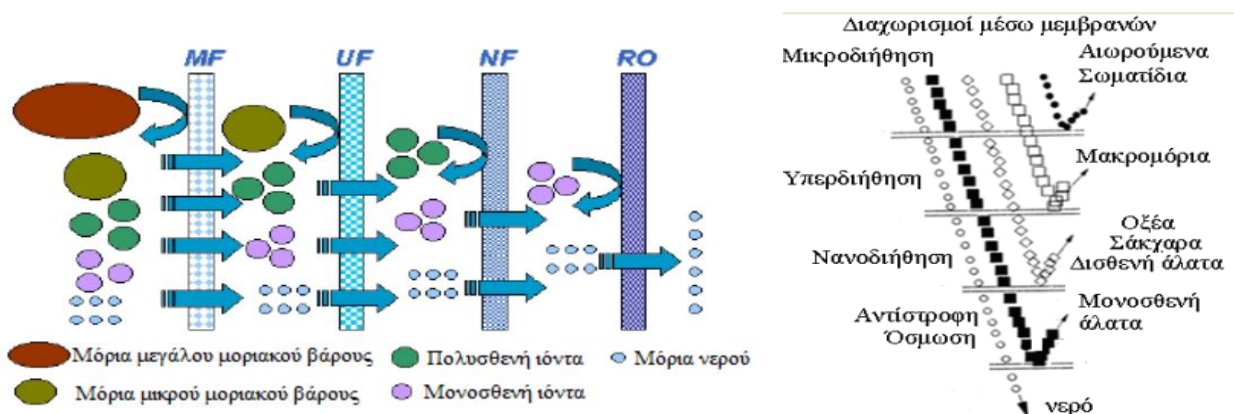
Ανάλογα με το μέγεθος των πόρων επιλέγεται το δείγμα, άρα κατ' επέκταση το είδος της διεργασίας που πραγματοποιείται. Επίσης, το μέγεθος των πόρων επηρεάζει το βαθμό έμφραξης της μεμβράνης, αν και οι απόψεις δίστανται όσον αφορά τον τρόπο. Με κριτήριο το μέγεθος των πόρων, οι μεμβράνες ταξινομούνται σε μεμβράνες μικροδιήθησης, υπερδιήθησης, νανοδιήθησης και αντίστροφης όσμωσης. Στους βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (MBR) χρησιμοποιούνται κυρίως μεμβράνες μικροδιήθησης και υπερδιήθησης, καθώς επιτρέπουν τον αποτελεσματικό διαχωρισμό υγρών αποβλήτων με μεγάλη συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών (MLSS).

##### **Εικόνα 5 (5)**

- *Μικροδιήθηση (microfiltration, MF)*: Επιτυγχάνεται μέσω μεμβρανών με μέγεθος πόρων 0,1-1  $\mu\text{m}$  και σημειώνει χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Εφαρμόζεται, κυρίως, για την επεξεργασία χημικών, τροφίμων, βιολογικών, φαρμακευτικών δειγμάτων και υγρών αποβλήτων, καθώς επιτρέπει το διαχωρισμό αιωρούμενων σωματιδίων, όπως τα βακτήρια και τα γαλακτώματα.
- *Υπερδιήθηση (ultrafiltration, UF)*: Εφαρμόζονται μεμβράνες με μέγεθος πόρων μεταξύ 0,01-0,1  $\mu\text{m}$ , οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως στο διαχωρισμό μακρομορίων και ιών. Είναι ανθεκτικές σε ακραίες τιμές pH και θερμοκρασίας. Καθώς τα όρια μεταξύ μικροδιήθησης και υπερδιήθησης δεν είναι ευδιάκριτα, κομβικό ρόλο διαδραματίζει η

δημιουργία στρώματος στερεού στην επιφάνεια της μεμβράνης, το οποίο δρα ως δεύτερη μεμβράνη κατά τη διήθηση, εγκλωβίζοντας σωματίδια μικρότερου μεγέθους σε σύγκριση με τους πόρους της μεμβράνης.

- *Νανοδιήθηση (nanofiltration, NF)*: Πρόκειται για το ενδιάμεσο στάδιο ανάμεσα σε υπερδιήθηση και αντίστροφη ώσμωση. Χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση πολυσθενών και δισθενών ιόντων, ενώ παρουσιάζει μειωμένη αποδοτικότητα για την απομάκρυνση οργανικών ενώσεων μικρού μοριακού βάρους.
- *Αντίστροφη ώσμωση (reverse osmosis, RO)*: Η ουσία που πληροί τα κριτήρια είναι στην πραγματικότητα μόνο το νερό. Επομένως εφαρμόζεται σε δείγματα όπου ο διαλύτης είναι το νερό. Απαιτείται, όμως, η αρχική επεξεργασία του δείγματος -χημική ή βιολογική- ώστε να περιοριστεί η έμφραξη της μεμβράνης. Βασικές εφαρμογές είναι η αφαλάτωση του νερού και στην παραγωγή υπερκάθαρου νερού για εργαστηριακή χρήση. Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται για μια μέθοδο απομάκρυνσης ιόντων. Επομένως, ουδέτερες οργανικές ενώσεις μικρού μοριακού βάρους μπορεί να παρατηρηθούν στο διήθημα. (17)



Εικόνα 5. Βασικές κατηγορίες διήθησης ανάλογα με το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης

#### ❖ Υλικό μεμβρανών

Το υλικό κατασκευής αποτελεί ένα ακόμη βασικό κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης μεμβράνης. Ανάλογα με το υλικό, η μεμβράνη παρουσιάζει διαφορετικές ιδιότητες και διαφορετική συμπεριφορά όταν επιδρά σε αυτή το τροφοδοτούμενο ρεύμα.

- *Κεραμικές μεμβράνες:* πρόκειται για μεμβράνες που εφαρμόζονται ευρέως στην επεξεργασία αποβλήτων με υψηλό ρυπαντικό φορτίο και στην αναερόβια αποδόμηση. Παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, σταθερότητα σε οργανικές ενώσεις, ευκολία καθαρισμού και δυνατότητα αναγέννησης. Έχουν, όμως, υψηλό κόστος γι' αυτό και χρησιμοποιούνται κυρίως πολυμερικές μεμβράνες.
- *Πολυμερικές μεμβράνες:* Αποτελούν την πιο διαδεδομένη επιλογή, λόγω χαμηλού κόστους. Απαιτείται, όμως, τις περισσότερες φορές ειδική προετοιμασία της μεμβράνης, καθώς τα περισσότερα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι υδρόφοβα. Επίσης, πρέπει να επικρατούν ήπιες συνθήκες, κυρίως σχετικά με τη θερμοκρασία, για αποφυγή της αποσύνθεσης του υλικού.

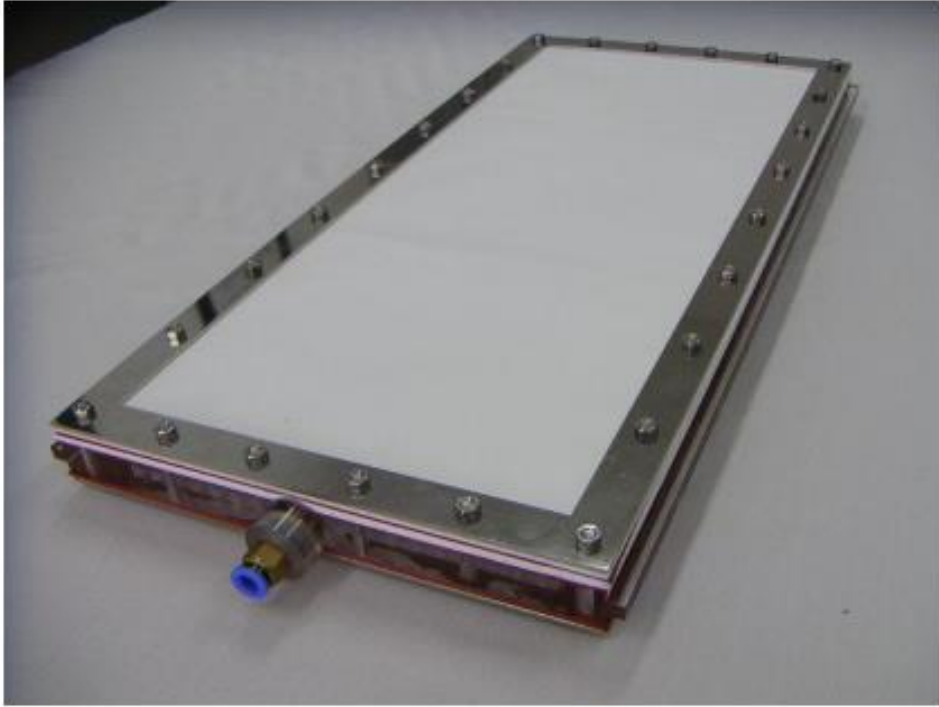
#### ❖ Υδροφοβικότητα

Η υδροφοβικότητα των συστατικών της μεμβράνης επηρεάζει το βαθμό έμφραξης της, καθώς η υδρόφοβη επιφάνεια επάγει την τάση προσρόφησης του δείγματος και κατ' επέκταση την έμφραξη. Για την αποφυγή έμφραξης, οι υδρόφοβες μεμβράνες υπόκεινται σε ειδική επεξεργασία ώστε να αποκτήσουν υδρόφιλη επιφάνεια. (18)

## 2.4 Διαμορφώσεις Μεμβρανών

Ανάλογα με τη διαμόρφωσή τους στα συστήματα MBR, οι μεμβράνες ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες:

1. **Επίπεδες μεμβράνες (flat sheet):** Στη συγκεκριμένη διαμόρφωση, σχηματίζονται modules, τα οποία αποτελούν ένα σύνολο επίπεδων μεμβρανικών φύλλων στερεωμένα σε ειδικές πλάκες υποστήριξης, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 6**. Οι πλάκες στήριξης σχηματίζουν ειδικά κανάλια, μέσω των οποίων διέρχεται το προς εξέταση δείγμα. Παρατηρούνται, όμως, προβλήματα έμφραξης των διαύλων, με αποτέλεσμα να απαιτείται η αποσυναρμολόγηση και ο καθαρισμός της συσκευής.



Εικόνα 6. Επίπεδες μεμβράνες (flat sheet)

2. Μεμβράνες κοίλων ινών (hollow fibre): Στη διάταξη κοίλων ινών τα modules συγκροτούνται από εκατοντάδες ή χιλιάδες τριχοειδείς μεμβρανικούς σωληνίσκους διαμέτρου 0.2-0.5 mm, οι οποίοι περιβάλλονται από ειδικό κέλυφος στο οποίο ασκείται πίεση **Εικόνα 7**. Το προς εξέταση δείγμα διέρχεται από έξω προς τα μέσα ή με την αντίθετη κατεύθυνση. Τα βασικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης διαμόρφωσης είναι η μεγάλη επιφάνεια μεμβράνης ανά μονάδα συνολικού όγκου, η δυνατότητα καλού ελέγχου της ροής και το σχετικά χαμηλό κόστος. Παράλληλα, όμως, παρατηρούνται προβλήματα έμφραξης και δυσκολία στον καθαρισμό, ο οποίος κατά βάση επιτυγχάνεται με αντιστροφή της ροής.



Εικόνα 7. Μεμβράνες κοίλων ινών (hollow fibre)

3. Σωληνοειδείς μεμβράνες (tubular): Στη σωληνοειδή διαμόρφωση, κεντρικός κορμός είναι ένας σωλήνας διαμέτρου 1-2.5 mm ή και μεγαλύτερη, από πορώδη ανοξείδωτο χάλυβα ή ενισχυμένες ίνες γυαλιού, στο εσωτερικό του οποίου εντοπίζεται η μεμβράνη **Εικόνα 8**. Οι σωλήνες περιβάλλονται από κυλινδρικά περιβλήματα, στα οποία ασκείται πίεση. Η συγκεκριμένη διαμόρφωση εφαρμόζεται κυρίως για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων με αιωρούμενα στερεά και έντονο δυναμικό έμφραξης. Βασικά πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα καλού ελέγχου της ροής και η μεγάλη ευκολία καθαρισμού. Παρουσιάζει, όμως, υψηλό κόστος και χαμηλό ρυθμό παραγωγής διηθήματος.  
(19)



Εικόνα 8. Σωληνοειδείς μεμβράνες (tubular)

## 2.5 Έμφραξη – Είδη και μηχανισμοί

Ως έμφραξη ορίζεται «η αντίσταση που προκαλείται στη ροή του ανάμικτου υγρού διαμέσου της μεμβράνης, λόγω της συσσώρευσης σωματιδίων στην επιφάνεια ή στους πόρους της μεμβράνης». Αποτελεί το βασικότερο πρόβλημα του συστήματος MBR καθώς παρεμποδίζει τη διήθηση του δείγματος. Προκαλείται από συσσώρευση κυρίως οργανικών στερεών (αιωρούμενα στερεά, κολλοειδή, μακρομόρια), αλλά και ανόργανων συστατικών (άλατα) και ιζημάτων.

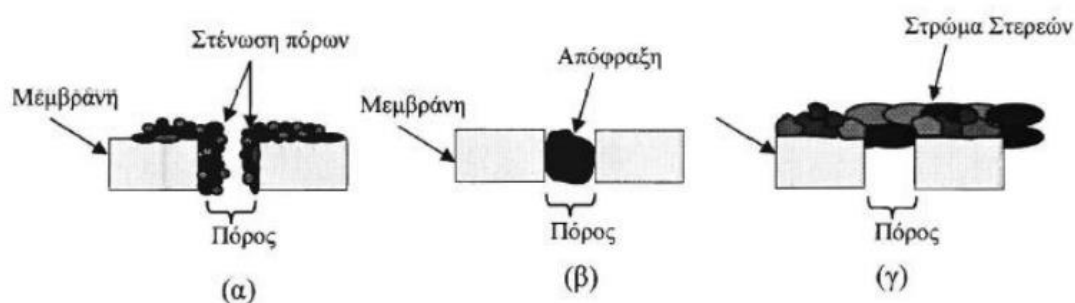
Η έμφραξη αυξάνει σημαντικά το κόστος της μεθόδου, καθώς απαιτούνται συνεχείς καθαρισμοί και αερισμοί των μεμβρανών. Η συσσώρευση των σωματιδίων στην επιφάνεια και το εσωτερικό της μεμβράνης, έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό ενός στρώματος στην επιφάνεια, του ‘cake layer’, το οποίο μειώνει τη ροή διήθησης για δεδομένη διαφορά πίεσης ή παρατηρείται μεγαλύτερη πίεση για σταθερή παροχή. Η μείωση της ροής του διηθήματος συνεπάγεται με μειωμένη παραγωγικότητα και

διάρκεια ζωής των μεμβρανών. Η έμφραξη που παρατηρείται λόγω του ‘cake layer’, είναι προσωρινή και αποκαθίσταται με ένα φυσικό καθαρισμό.

Το φαινόμενο της έμφραξης ερμηνεύεται με τη θεωρία της κρίσιμης ροής. Ειδικότερα, η συγκεκριμένη θεωρία υποστηρίζει ότι σε περίπτωση που η ροή υπερβεί την κρίσιμη τιμή παρατηρείται έμφραξη της μεμβράνης. Επομένως, η ροή πρέπει να διατηρείται σταθερά κάτω από την κρίσιμη τιμή. Στην εφαρμογή, όσο χαμηλή κι αν είναι η ροή παρατηρείται συσσώρευση σωματιδίων, η οποία όμως είναι αργή και σταδιακή και δεν προκαλεί λειτουργικά προβλήματα.

Οι βασικοί μηχανισμοί έμφραξης είναι οι εξής **Εικόνα 9**:

1. Η προσρόφηση ή/και συσσώρευση σωματιδίων προκαλεί στένωση των πόρων της μεμβράνης. Ανάμεσα στα μόρια των συστατικών του δείγματος και στους πόρους της μεμβράνης, αναπτύσσονται φυσικοχημικές αλληλεπιδράσεις, με αποτέλεσμα να φράσσεται η δίοδος.
2. Σε περιπτώσεις όπου τα συστατικά του δείγματος έχουν το ίδιο μέγεθος με τους πόρους εγκλωβίζονται στο εσωτερικό τους.
3. Η δημιουργία του ‘cake layer’, έχει ως αποτέλεσμα να παρατηρείται συσσώρευση σωματιδίων στο εσωτερικό της μεμβράνης.



Εικόνα 9. Μηχανισμοί έμφραξης μεμβρανών: (Α) στένωση των πόρων, (Β) απόφραξη των πόρων, (Γ) δημιουργία ζελατινώδους στρώματος.

Στις μεμβράνες υπερδιήθησης και μικροδιήθησης των MBR, ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων του δείγματος διακρίνονται δυο βασικές κατηγορίες: η μικροέμφραξη και η μακροέμφραξη. Η μακροέμφραξη οφείλεται κυρίως στο “cake layer” ή σε διάφορες προσμίξεις του δείγματος, οι οποίες δεν έχουν απομακρυνθεί κατά την αρχική επεξεργασία, όπως φύλλα, τρίχες, χαρτί. Η ταξινόμηση εξαρτάται από το είδος των ουσιών και από το είδος της έμφραξης. (1) (18) (20) (14)

## 2.6 Παράγοντες που επηρεάζουν την έμφραξη της μεμβράνης

Η μελέτη ενός συστήματος MBR αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία, καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν το βασικό λειτουργικό πρόβλημα, την έμφραξη της μεμβράνης. Οι βασικές κατηγορίες που ταξινομούνται οι παράγοντες είναι:

- *Τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της μονάδας των μεμβρανών*
- *Τα χαρακτηριστικά της βιομάζας*

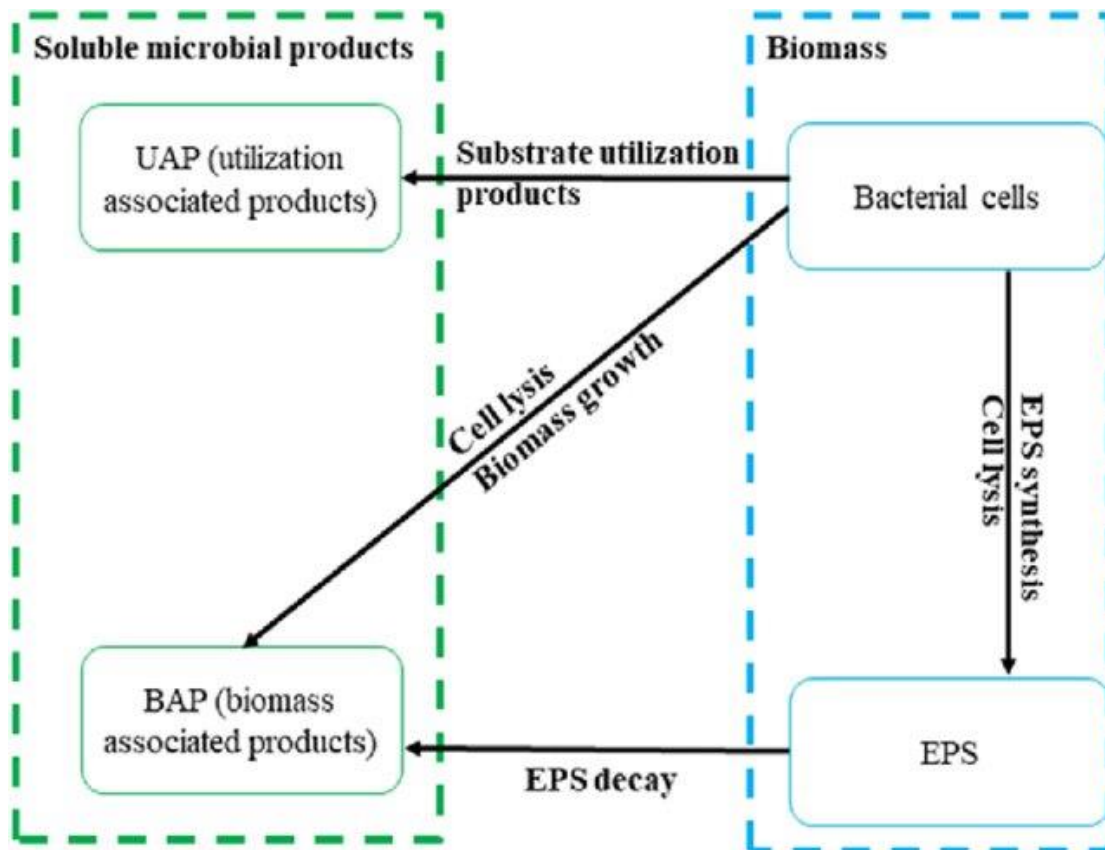
Η επίδραση της συγκέντρωσης του ανάμικτου υγρού (MLSS) στην έμφραξη των μεμβρανών δεν έχει αποσαφηνιστεί. Μελέτες υποδεικνύουν ότι η αυξημένη συγκέντρωση του ανάμικτου υγρού επιφέρει αρνητικές συνέπειες σε ένα σύστημα MBR. Παρόλα αυτά, υπάρχουν μελέτες που υποστηρίζουν την αντίθετη άποψη. Έχει, όμως, προσδιοριστεί ένα όριο (30g/l) πάνω από το οποίο παρατηρείται αρνητική επίπτωση της συγκέντρωσης των MLSS. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα αρκετών μελετών, συμπεραίνουμε ότι η συγκέντρωση των MLSS επιδρά στην έμφραξη σε πολύ χαμηλές (15000mg/l) συγκεντρώσεις.

Επίσης, σημαντικό ρόλο στην έμφραξη των μεμβρανών διαδραματίζει η συγκέντρωση των EPS. Οι εξωκυτταρικές πολυμερείς ενώσεις EPS αποτελούν δομικά συστατικά μικροβιακών δομών, αλλά και συστατικά της ενεργούς ιλύος. Πρόκειται για παραπροϊόντα της μικροβιακής δραστηριότητας και εντοπίζονται στην επιφάνεια ή στον εξωκυττάριο χώρο του κυττάρου. Ταξινομούνται σε δεσμευμένα εξωκυτταρικά πολυμερή (EPS) και στα διαλυτά εξωκυτταρικά πολυμερή (SMP) ανάλογα με τη θέση που εντοπίζονται, δεσμευμένα στις βιοκροκίδες ή ελεύθερα στο ανάμικτο υγρό. Και οι δυο κατηγορίες αποτελούνται από ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους, με υψηλές προσροφητικές και προσκολλητικές ιδιότητες. Πρόκειται κυρίως για πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, χουμικά οξέα, λιπίδια και νουκλεϊκά οξέα **Εικόνα 10**.



Τα δεσμευμένα εξωκυτταρικά πολυμερή αποτελούν το βασικό στοιχείο της βιομάζας που συσχετίζεται με την έμφραξη. Η επίδρασή τους στο φαινόμενο της έμφραξης είναι αμφιλεγόμενη, καθώς αρκετοί επιστήμονες υποστηρίζουν πως επάγουν την έμφραξη, ενώ έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες που υποδεικνύουν πως δεν παρατηρείται καμία συσχέτιση. Η αύξηση της έμφραξης επιτυγχάνεται είτε μέσω αύξησης της διαμεμβρανικής πίεσης λόγω συσσώρευσης EPS, είτε μέσω αύξησης του στρώματος των στερεών που δημιουργείται στην επιφάνεια της μεμβράνης με αύξηση των EPS.

Τέλος, η συγκέντρωση του διαλυτοποιημένου οξυγόνου σε ένα εμβαπτισμένο σύστημα, ελέγχεται μέσω των αερισμών της μεμβράνης. Το διαλυτοποιημένο οξυγόνο, αποτελεί πηγή οξυγόνου στη βιομάζα και μειώνει την έμφραξη της απομακρύνοντας τα συσσωρευμένα σωματίδια. Παράλληλα, προκαλεί μεταβολές στο βιοφίλμ που εντοπίζεται στην επιφάνεια της μεμβράνης, προκαλεί αυξομειώσεις στη συγκέντρωση των EPS και SMP, καθώς επιδρά και στη δομή των συσσωματωμάτων. Αυξημένη συγκέντρωση οξυγόνου προκαλεί το σχηματισμό βιοφίλμ από μεγαλύτερα σωματίδια, με αποτέλεσμα να παρατηρείται καλύτερη διηθησιμότητα ιλύος και χαμηλότεροι ρυθμοί έμφραξης. (2) (7) (21)



Εικόνα 10. Μονοπάτια παραγωγής EPS και SMP.

- Τα χαρακτηριστικά των λυμάτων
- Οι λειτουργικές συνθήκες

Οι κυριότερες λειτουργικές συνθήκες που επηρεάζουν την έμφραξη της μεμβράνης είναι ο χρόνος παραμονής των στερεών, η οργανική φόρτιση, και ο υδραυλικός χρόνος παραμονής.

Ως χρόνος παραμονής των στερεών ορίζεται «ο λόγος των στερεών του αντιδραστήρα προς τα στερεά που αφαιρούνται από αυτόν». Για τον υπολογισμό του SRT σε σύστημα MBR, σε περιπτώσεις που η ροή δεν περιέχει αιωρούμενα στερεά, πραγματοποιείται από την εξίσωση:

$SRT = V/W$ , όπου:

V: ο ενεργός όγκος του αντιδραστήρα (l)

W: η παροχή περίσσειας ιλύος (l/d)

Αποτελεί τη σημαντικότερη λειτουργική παράμετρο που σχετίζεται με την έμφραξη, καθώς επηρεάζει πολλές άλλες παραμέτρους που σχετίζονται με το φαινόμενο, όπως η συγκέντρωση των MLSS, το μέγεθος των βιοκροκίδων, καθώς και η συγκέντρωση των EPS και SMP. Σύμφωνα με μελέτες χρόνος παραμονής περίπου 15 ημέρες, ελαχιστοποιεί την περίσσεια ιλύος. Για να αξιολογηθεί η επίδραση του SRT στην έμφραξη της μεμβράνης, πρέπει να συνυπολογιστεί η συσσώρευση αδρανούς υλικού στον αντιδραστήρα ή αν είναι δυνατόν να εκμηδενιστεί, ώστε τα αποτελέσματα να είναι αληθή. Επίσης, υψηλός SRT επάγει την αύξηση του ιξώδους, το οποίο επηρεάζει τον αερισμό της βιομάζας.

Είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ο κατάλληλος χρόνος παραμονής των στερεών, καθώς επηρεάζονται άμεσα ή έμμεσα αρκετοί παράγοντες που επιδρούν στην έμφραξη της μεμβράνης. Ενδεικτικά αναφέρεται πως υψηλοί SRTs προκαλούν αύξηση της παραγωγής των SMP και κατ' επέκταση του ρυθμού έμφραξης. Σε άλλες περιπτώσεις, όμως, η έμφραξη μειώνεται σε υψηλότερους SRTs. (7) (8)

Ως οργανική φόρτιση του συστήματος (F/M), ορίζεται «ο λόγος της παρεχόμενης τροφής προς τους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται στο σύστημα».

$$F/M = \text{COD}_{\text{in}} * Q / \text{MLVSS} * V$$

Όπου:

F/M: λόγος τροφής προς μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται στο σύστημα

COD<sub>in</sub>: το COD του εισερχόμενου στον αντιδραστήρα αποβλήτου

Q: η παροχή του αποβλήτου

MLVSS: τα πτητικά αιωρούμενα στερεά του ανάμικτου υγρού

V: όγκος του αντιδραστήρα

Η οργανική φόρτιση συσχετίζεται άμεσα με τον χρόνο παραμονής των στερεών. Στις περισσότερες περιπτώσεις συστημάτων MBR, παρατηρούνται πολύ χαμηλές τιμές οργανικής φόρτισης (F/M 4.000mg/L). Παρόλο που δεν έχει αποσαφηνιστεί η επίδραση του SRT στην έμφραξη, έχει παρατηρηθεί πως χαμηλός SRT ερμηνεύεται ως αυξημένη

τροφοδοσία των μικροοργανισμών άρα μεγαλύτερο ρυθμό ανάπτυξής τους, δηλαδή αυξημένη οργανική φόρτιση.

Τέλος, ως υδραυλικός χρόνος παραμονής (Hydraulic Retention Time-HRT) ορίζεται ο χρόνος παραμονής των λυμάτων στον αντιδραστήρα και δίνεται από τη σχέση:

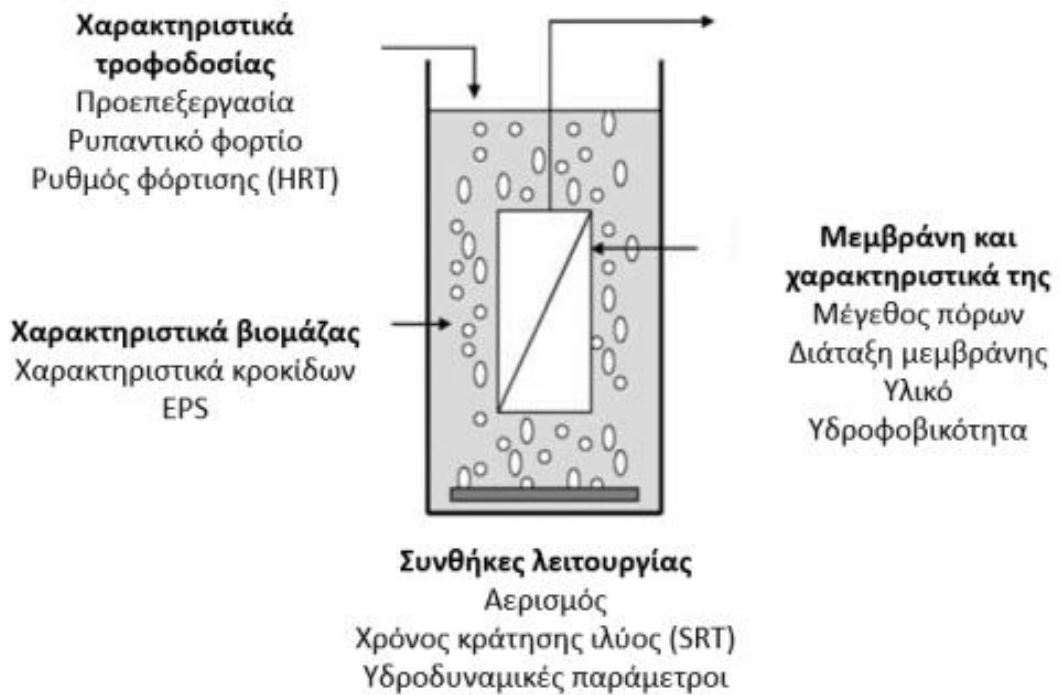
$$HRT = V/Q * 24$$

Όπου:

Q: η παροχή του αποβλήτου

V: όγκος του αντιδραστήρα

Η σωστή επιλογή του κατάλληλου HRT επιφέρει μια ισορροπία ανάμεσα στο κόστος της μεθόδου και της απόδοσής της. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες, οι οποίες υποστηρίζουν ότι η μείωση του HRT οδηγεί σε αύξηση της έμφραξης των μεμβρανών, λόγω αύξησης της αντίστασης στη διήθηση ή/και της διαμεμβρανικής πίεσης. Επίσης, οι χαμηλοί HRTs δεν επιδρούν στην απομάκρυνση του οργανικού υλικού και επομένως στην απόδοση του αντιδραστήρα. Σε περίπτωση, όμως, που το σύστημα MBR χρησιμοποιείται για τη διήθηση ενός σύνθετου αποβλήτου, ο HRT επηρεάζει σημαντικά την αποδοτικότητα του συστήματος. (22)



Εικόνα 11. Παράγοντες που επηρεάζουν την έμφραξη της μεμβράνης.

(22)

## 2.7 Τρόποι αντιμετώπισης της έμφραξης της μεμβράνης

Όπως έχει αναφερθεί, η έμφραξη της μεμβράνης απαιτεί συνεχείς καθαρισμούς και αερισμούς. Επομένως, ο κύριος τρόπος αντιμετώπισης είναι ο καθαρισμός της μεμβράνης, είτε μέσω υδραυλικού καθαρισμού είτε μέσω χημικού.

Η διεργασία του υδραυλικού καθαρισμού έχει ως στόχο την παράταση του χρόνου ζωής της μεμβράνης. Η μια μέθοδος είναι η πλύση με αντιστροφή της ροής του διηθήματος. Εφαρμόζεται κυρίως σε μεμβράνες μικροδιήθησης και υπερδιήθησης. Πραγματοποιείται μέσα στο σύστημα, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των μεμβρανών, μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία της διήθησης. Το νερό προωθείται προς την αντίθετη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα τα συσσωρευμένα σωματίδια να οδηγούνται εξωτερικά των μεμβρανών.

Ένας άλλος τρόπος είναι η περιοδική αποσυμπίεση, η οποία πραγματοποιείται με τη διακοπή της διήθησης, με σκοπό την απομάκρυνση και τη μετακίνηση των συσσωρευμένων σωματιδίων από την επιφάνεια της μεμβράνης στο ανάμικτο υγρό. Δεν αποτελεί αποτελεσματική μέθοδο για την αποφυγή έμφραξης στο εσωτερικό της

μεμβράνης. Τέλος, η στιγμιαία αντιστροφή της ροής για 1 δευτερόλεπτο και με επανάληψη ανά 30 δευτερόλεπτα, αποτελεί την πιο σύγχρονη μέθοδο.

Η πιο αποτελεσματική μέθοδος καθαρισμού των μεμβρανών είναι ο χημικός καθαρισμός. Εφαρμόζονται όξινα, αλκαλικά, επιφανειοδραστικά ή ενζυμικά διαλύματα, για την απομάκρυνση των σωματιδίων. Τα πιο συνηθισμένα διαλύματα είναι το υποχλωριώδες νάτριο για οργανικές ουσίες και το κιτρικό οξύ για ανόργανες. Ο χημικός καθαρισμός των συστημάτων MBR είναι είτε περιοδικός είτε εντατικός. Ο περιοδικός εφαρμόζεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα και κυρίως για προληπτικούς λόγους, ενώ ο εντατικός για την αντιμετώπιση της έμφραξης ή/και για την αποκατάσταση της ροής.

### 3. Βιοαντιδραστήρες κινούμενης κλίνης βιοφίλμ σε συνδυασμό με βιοαντιδραστήρες μεμβρανών

Η εμφάνιση του αντιδραστήρα βιοφίλμ κινούμενης κλίνης (MBBR) και του βιοαντιδραστήρα μεμβράνης (MBR) στο τελευταίο μέρος του 20ού αιώνα έφερε επανάσταση στην έρευνα στον τομέα της επεξεργασίας λυμάτων. Η έρευνα για τα MBR και MBBR έχει επιτύχει σημαντική δυναμική την τελευταία δεκαετία, γεγονός που οδήγησε σε διάφορες αναβαθμίσεις αυτών των συστημάτων από τα αρχικά τους πρότυπα. Οι διαδικασίες MBBR έχουν δείξει μια σημαντική υπόσχεση στην κυκλική οικονομία λόγω του υψηλού δυναμικού αφαίρεσης και ανάκτησης θρεπτικών συστατικών. Επιπλέον, αρκετοί ερευνητές έχουν εφαρμόσει το σύστημα MBBR για την αντιμετώπιση των αναδύμενων ρύπων. Ωστόσο, σε διάφορες περιπτώσεις που αφορούν την επεξεργασία λυμάτων υψηλής αντοχής, το MBBR από μόνο του μπορεί να μην είναι σε θέση να ανταποκριθεί στα αυστηρά πρότυπα απόρριψης. Από την άλλη πλευρά, το MBR είναι γνωστό για το χαμηλό του αποτύπωμα και την υψηλή απόδοση αφαίρεσης οργανικής ύλης, αιωρούμενων στερεών κ.λπ. Ωστόσο, η ρύπανση της μεμβράνης εξακολουθεί να αποτελεί θέμα ανησυχίας κατά την επεξεργασία λυμάτων υψηλής αντοχής. (23)

Σε αυτό το πλαίσιο, οι ερευνητές προσπάθησαν να συνδυάσουν το MBR και το MBBR με άλλες τεχνολογίες επεξεργασίας, όπως μικροβιακή κυψέλη καυσίμου, αντιδραστήρα βιοφίλμ συσκευασμένης κλίνης, κουβέρτα αναερόβιας λάσπης ανοδικής ροής, ενεργό άνθρακα σε σκόνη, προηγμένες διαδικασίες οξειδωσης κ.λπ., για να βελτιώσουν την απόδοσή τους και για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα των ατόμων. Για παράδειγμα, οι Khan et al. (24) ερεύνησαν ένα MBBR εργαστηριακής κλίμακας ενσωματωμένο με οζονισμό για την επεξεργασία φαρμακευτικών ενώσεων, όπως η ιβουπροφαίνη και η οφλοξασίνη από τα λύματα νοσοκομείων. Οι συγγραφείς έχουν παρατηρήσει ικανοποιητικές αφαιρέσεις, δηλαδή μεγαλύτερες από 90% για τις στοχευόμενες ενώσεις. Ωστόσο, η εφαρμογή προηγμένων διαδικασιών οξειδωσης σε μεγάλη κλίμακα εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική πρόκληση. Πρόσφατα, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν ένα υβριδικό σύστημα που συνδυάζει το MBBR με το MBR, γνωστό και ως βιοαντιδραστήρας μεμβράνης κινούμενης κλίνης (MBMBR), για την επεξεργασία των λυμάτων. Οι Lee et al. (25) διερεύνησε τα χαρακτηριστικά ρύπανσης και διαπερατότητας της μεμβράνης σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμένο σύστημα MBMBR. Μετά από αυτό, αρκετοί

ερευνητές διεξήγαγαν έρευνα που περιλαμβάνει αφαίρεση θρεπτικών ουσιών, κινητικές μελέτες, αφαίρεση μικρορρύπων και μείωση ρύπανσης, επιδράσεις αερισμού λεπτών και χονδροειδών φυσαλίδων, κ.λπ. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το MBMBR σύστημα έχει δείξει πολλά υποσχόμενη απόδοση. Επίσης, η ρύπανση της μεμβράνης, ένα εγγενές μειονέκτημα του MBR, μειώθηκε σημαντικά στο MBMBR. Ως εκ τούτου, τα τελευταία χρόνια έχουν χαρακτηριστεί από μια ταχεία αύξηση της έρευνας που περιλαμβάνει συστήματα MBMBR. (23)

Μέχρι σήμερα, διαφορετικοί ερευνητές έχουν δημοσιεύσει εργασίες ανασκόπησης σχετικά με τη σύνοψη της απόδοσης, τα ερευνητικά κενά και την τελευταία πρόοδο σχετικά με το MBBR και το MBR. Προς το παρόν, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις τάσεις της έρευνας, τη συμβολή των ειδικών στην έρευνα, τα σενάρια δημοσίευσης περιοδικών και πιθανές μελλοντικές κατευθύνσεις σε έναν συγκεκριμένο τομέα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση επιλεγμένων διαδικασιών επεξεργασίας, είναι επιτακτική ανάγκη να γνωρίζουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διεργασιών επεξεργασίας, τον λόγο για την τροποποίηση των υφιστάμενων συστημάτων επεξεργασίας, την απαίτηση υβριδισμού του συστήματος, τα κύρια ερευνητικά hotspot, εάν το επιλεγμένο ερευνητικό θέμα κορεσμένα ή όχι κ.λπ. (23)

Ο υβριδισμός συστημάτων MBR και MMBR έχει χρησιμοποιηθεί για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα των μεμονωμένων συστημάτων. Μια τεχνική είναι η σύζευξη ενός MBBR με ένα MBR, το οποίο συχνά ονομάζεται MBMBR ή υβριδικό MBBR-MBR. Το MBMBR έχει προτιμηθεί έναντι των απλών συστημάτων MBR και MBBR, κυρίως επειδή το MBMBR εμφάνισε αυξημένη ικανότητα αφαίρεσης ρύπων και απέτρεψε σημαντικά τη ρύπανση της μεμβράνης, αποτρέποντας έτσι τη ρύπανση σε σημαντικό βαθμό. Οι Canziani et al. (26) πραγματοποίησαν μια στοχευμένη απομάκρυνση αζώτου ακολουθούμενη από απονιτροποίηση χρησιμοποιώντας ένα αναερόβιο MBBR. Οι Ahl et al. (27) μελέτησαν τις επιπτώσεις του ρυθμού φόρτωσης στη ρύπανση της μεμβράνης σε ένα MBMBR, ενώ οι Lee et al. (25) διερεύνησαν τους παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά διήθησης ενός συζευγμένου με μεμβράνη MBBR. Την τελευταία δεκαετία οι Leyva-Díaz Juan Carlos, Royatos Jose Manuel, Jaime Martin Pascual (Πανεπιστήμιο του Γρανάδα, Ισπανία), Rodriguez-Sanchez Alejandro (Πανεπιστήμιο της Γρανάδας, Ισπανία) και Reboleiro-Rivas Patricia (Πανεπιστήμιο της Γρανάδας, Ισπανία) ήταν μεταξύ μερικών από τους κορυφαίους συγγραφείς που συνέβαλαν σημαντικά στον τομέα επεξεργασίας λυμάτων



με χρήση υβριδικών συστημάτων MBBR-MBR. Είναι εμφανές ότι η έρευνα που αφορά υβριδικά συστήματα MBBR-MBR εξακολουθεί να είναι στα αρχικά της στάδια και παρουσιάζει σημαντικές υποσχέσεις στον τομέα της διαχείριση υδατικών λυμάτων. (23)

Δημοσίευση ερευνητικών άρθρων και διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας που σχετίζονται με τη θεραπεία των λυμάτων που χρησιμοποιούν MBBR και MBR έχει παρατηρηθεί από τη δεκαετία του 1980. Η ικανότητα των συστημάτων να αφαιρούν οργανική ύλη και θρεπτικά συστατικά από τα λύματα, τα καθιστούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία στον τομέα αυτό. Το βασικό σχέδιο αυτών των συστημάτων έχει υποστεί πολυάριθμες τροποποιήσεις για να καλύψει τις σύγχρονες ανάγκες. Στην περίπτωση του MBBR, απαιτείται η ανάπτυξη νέων βιοφορέων ή τροποποιήσεις στους υπάρχοντες βιοφορείς για την ενίσχυση των βιοδραστηριοτήτων. Για παράδειγμα, η εφαρμογή πλαστικών απορριμμάτων ως βιοφορείς ή ίνες ντόπινγκ σε υπάρχοντες φορείς θα μπορούσαν να είναι αποτελεσματική επιλογή. Επιπλέον, η τεχνική της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων του βιοφορέα, όπως ειδική επιφάνεια, πυκνότητα, μέγεθος, σχήμα κ.λπ., σε λιγότερο χρόνο και με ελάχιστο κόστος χρησιμοποιώντας εξελιγμένα μηχανήματα.

Η έμφραξη της μεμβράνης είναι η βασική πρόκληση. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη αντιρρυπαντικών μεμβρανών, διαδικασιών καθαρισμού μεμβρανών με χαμηλό ενεργειακό κόστος, οικονομικά αποδοτικών υλικών μεμβρανών, και η διατύπωση πρωτοκόλλων προεπεξεργασίας για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και του προσδόκιμου ζωής του MBR απαιτεί περαιτέρω έρευνα. Αν και το υβριδικό σύστημα MBMBR έχει επιφέρει καλά αποτελέσματα, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για πλήρη κατανόηση των διαφορετικών εξαρτημάτων του συστήματος. (23)

### 3.1 Εφαρμογές του MBBR για την επεξεργασία λυμάτων

Η απομάκρυνση της οργανικής ύλης και των θρεπτικών ουσιών στο MBBR επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως HRT, αναλογία πλήρωσης φορέων, πάχος βιοφίλμ, DO, pH, θερμοκρασία, διαμόρφωση αντιδραστήρα, μικροοργανισμός κ.λπ. Υπάρχουν κυρίως δύο παράγοντες, όπως η διάχυση της ροής του υγρού και η διείσδυση θρεπτικών ουσιών μέσω του βιοφίλμ, που επηρεάζουν την απόδοση του MBBR. Οι διάφοροι μηχανισμοί που εμπλέκονται στην απομάκρυνση των ρύπων χρησιμοποιώντας MBBR έχουν απεικονιστεί στην **Εικόνα 12**. Ο σχηματισμός βιοφίλμ συμβαίνει όταν η επιφάνεια του φορέα απορροφά μακρομόρια και θρεπτικά συστατικά, ακολουθούμενη από αρχική μεταφορά κυττάρων. Στη συνέχεια, η ανάπτυξη του βιοφίλμ και η ωρίμανση του λαμβάνει χώρα μέσω της παραγωγής εξωκυτταρικής πολυμερικής ουσίας (EPS) και μικροαποικιών. Η μήτρα κυτταρίνης που αναπτύχθηκε από την EPS παρέχει καταφύγιο στους μικροοργανισμούς, δημιουργώντας έτσι ένα προστατευτικό περιβάλλον έναντι της αφυδάτωσης και της επίθεσης πρωτόζωων. Το EPS απορροφά και αποθηκεύει τα διάφορα συστατικά, όπως οργανική ύλη, θρεπτικά συστατικά και οξυγόνο που απαιτείται στους μικροοργανισμούς για τις μεταβολικές τους δραστηριότητες. Τα βακτήρια οξείδωσης της αμμωνίας (AOB) και τα βακτήρια αναμμοξ βρίσκονται στις αερόβιες και ανοξικές ζώνες του προσαρτημένου βιοφίλμ στους αιωρούμενους φορείς. (23)

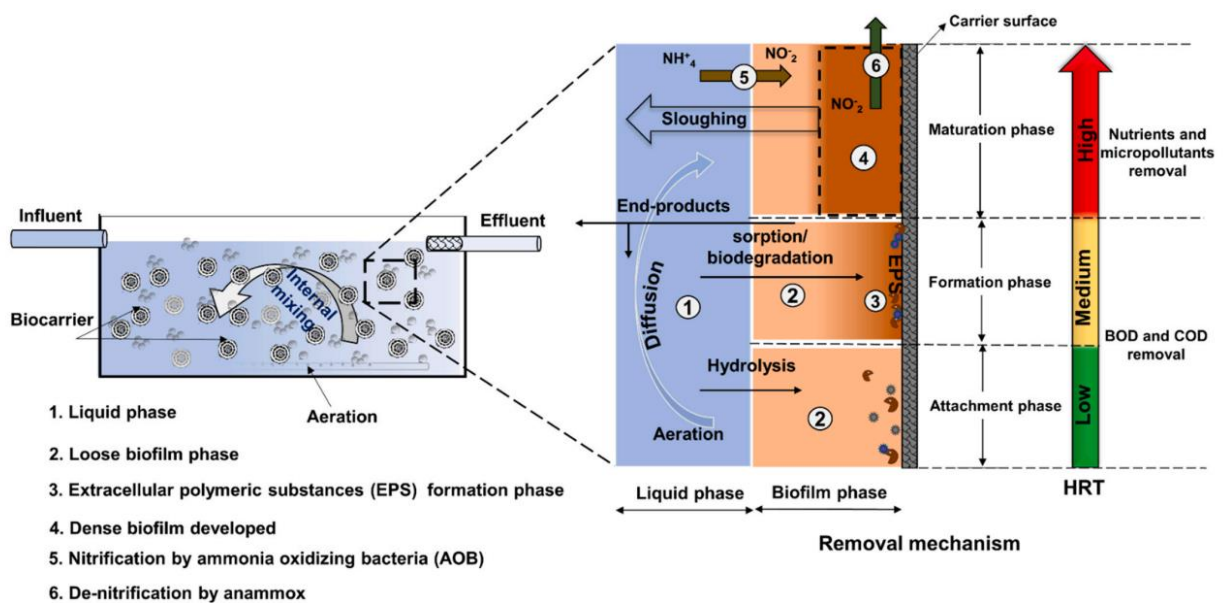
Το διάγραμμα δικτύου του MBBR αποκάλυψε μια συσχέτιση μεταξύ βιοφίλμ και AOB, βακτηρίδια αναμμοξ, νιτροποίηση, απονιτροποίηση κ.λπ. Η συνμεταβολική δραστηριότητα του AOB μετατρέπει το  $\text{NH}_4^+$  σε  $\text{NO}_2^-$  στην αερόβια ζώνη του βιοφίλμ, ενώ το αναμμοξ καταναλώνει το παραγόμενο  $\text{NO}_2^-$  από την AOB και κυκλοφορεί το  $\text{N}_2$ . Οι διαδικασίες νιτροποίησης και απονιτροποίησης επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα σε DO και τη βιοαύξηση. Οι Casas et al. (28) ανέπτυξε ένα MBBR σε πιλοτική κλίμακα για την επεξεργασία νοσοκομειακών λυμάτων και χρησιμοποίησε ρυθμό αερισμού 0,5 L/h, που οδήγησε σε 99% αφαίρεση του αζώτου του αμμωνίου, ενώ παρουσιάστηκε αρνητική αφαίρεση για νιτρικά. Αυτό τονίζει το γεγονός ότι ο αερισμός ευνοεί τη νιτροποίηση αλλά είναι επιζήμιος στη διαδικασία απονιτροποίησης, επηρεάζοντας έτσι την απομάκρυνση του TN. Για τη σωστή αφαίρεση του TN έχουν εφαρμοστεί αναερόβια MBBR, ανοξικά MBBR, αναμμοξ MBBR, αναερόβια-ανοξικά-οξικά MBBR κ.λπ. Στην περίπτωση αφαίρεσης TP, το MBBR έδειξε μέση αφαίρεση, δηλαδή περίπου 50%. (23)

Για παράδειγμα, οι Nhut et al. (29) ερεύνησαν την απόδοση του MBBR με χρήση τμημάτων από σφουγγάρι στην απομάκρυνση θρεπτικών ουσιών και οργανικών μικρορύπων από οικιακά λύματα. Οι συγγραφείς παρατήρησαν περίπου 40,5% αφαίρεση της TP. Ομοίως, οι Wang et al. (30) χρησιμοποίησε το MBBR για την αφαίρεση του TP από τα αστικά λύματα και πέτυχε απόδοση αφαίρεσης 9–15%. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο MBBR η απομάκρυνση του TP είναι δύσκολο να επιτευχθεί λόγω του μεγαλύτερου χρόνου κατακράτησης λάσπης (SRT) και της έλλειψης ελέγχου στην εκκένωση βιομάζας. Το μακρύ SRT στο σύστημα MBBR οδηγεί στη συσσώρευση οργανισμών που συσσωρεύουν φωσφορικά (PAOs), προκαλώντας έτσι περιστασιακά υψηλές συγκεντρώσεις TP στα απόβλητα. Η ελάχιστη συγκέντρωση DO που απαιτείται για τη λειτουργία ενός αερόβιου αντιδραστήρα αιωρούμενης βιομάζας είναι περίπου 2 mg/L. Επιπλέον, η επιλογή χονδροειδών ή λεπτών διαχυτών φυσαλίδων για σωστό αερισμό εξαρτάται επίσης από τα βιοφίλμ, τους βιο-φορείς και το κλάσμα πλήρωσης. Αυτά ενισχύουν περαιτέρω τη σημασία του αερισμού και του DO στην απόδοση του MBBR. Η εμφάνιση λέξεων-κλειδιών, όπως DO και βιοφίλμ σε κοντινή απόσταση, τεκμηριώνει τον ρόλο τους. (23)

Η λέξη-κλειδί HRT βρέθηκε να συνδέεται με διάφορες άλλες λέξεις-κλειδιά, όπως COD, BOD, αφαίρεση αζώτου, βιοφίλμ, κ.λπ. Καλύτερη αποτελεσματικότητα αφαίρεσης επιτυγχάνεται σε υψηλότερες HRT και συνήθως μια HRT 6-12 ωρών θεωρήθηκε επαρκής σειρά MBBR για την επεξεργασία λυμάτων. Είναι κυρίως επειδή οι μικροοργανισμοί έχουν περισσότερες ευκαιρίες επαφής για να αντιδράσουν με τους ρύπους. Ένα μεγάλο μέρος των BOD και COD αφαιρούνται κατά τις αρχικές φάσεις που περιλαμβάνουν τις φάσεις σύνδεσης και σχηματισμού. Ωστόσο, το άζωτο και οι ανθεκτικοί οργανικοί ρύποι αποικοδομούνται ή απομακρύνονται κατά τη φάση της ωρίμανσης, δηλαδή σε σχετικά υψηλή HRT. Η συσχέτιση της λέξης-κλειδιού «HRT» με μεγάλο αριθμό λέξεων-κλειδιών τεκμηριώνει τη σημασία της HRT στη βέλτιστη λειτουργία ενός MBBR **Εικόνα 12**. Παρατηρήθηκε ότι το pH είχε ισχυρή συσχέτιση με βακτήρια, μικροοργανισμούς, νιτροποίηση, αφαίρεση αζώτου, BOD, COD, κ.λπ. Οι μικροοργανισμοί, που αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των διαδικασιών αποδόμησης ή απομάκρυνσης στο MBBR είναι συχνά ευαίσθητοι στη μεταβολή του pH. Αρκετοί ερευνητές έχουν αναφέρει ότι η αλκαλικότητα στα απόβλητα τροφοδοσίας  $r$  παίζει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη της καλής απόδοσης νιτροποίησης του MBBR. Η αλκαλικότητα στα λύματα λειτουργεί ως υπόστρωμα ανάπτυξης για ετερότροφα νιτροποιητικά βακτήρια. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να διατηρηθεί η αλκαλικότητα

στο σύστημα προσθέτοντας αλκαλικές χημικές ουσίες (π.χ. ασβέστης, διττανθρακικό νάτριο, υδροξείδιο του νατρίου) στο νερό τροφοδοσίας. (23)

Οι Hou et al. (31) ερεύνησαν την επίδραση της αλκαλικότητας στην απόδοση νιτροποίησης του MBBR χρησιμοποιώντας διττανθρακικό νάτριο ως συμπλήρωμα αλκαλικότητας. Οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι η ενισχυμένη απομάκρυνση του  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , δηλ., από 23% σε 88% όταν διατηρήθηκε επαρκής αλκαλικότητα στο σύστημα. Ομοίως, οι Matheus et al. (32) παρατηρήθηκε πλήρης νιτροποίηση στο MBBR, με την προσθήκη διττανθρακικού νατρίου σε δόση 7,14 g  $\text{CaCO}_3/\text{g}$  ολικής απομάκρυνσης  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ . Ως εκ τούτου, το pH παίζει ζωτικό ρόλο στην ανάπτυξη των μικροοργανισμών και στη λειτουργία τους, επηρεάζοντας έτσι την απόδοση του συστήματος. Οι ερευνητές βρήκαν ένα pH μεταξύ 7 και 8 κατάλληλο για τη διάσπαση διαφόρων έμμονων οργανικών ρύπων (POPs). (23)



Εικόνα 12. Μηχανισμός και αρχές λειτουργίας του MBBR.

### 3.2 Βιοφορείς

Μια καινοτόμος μέθοδος για την αντιμετώπιση της έμφραξης της μεμβράνης είναι η χρήση βιοφορέων (Bio-Film Carriers, BFC). Η αποτελεσματικότητά τους στηρίζεται σε δυο μηχανισμούς: στην εφαρμογή διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια της μεμβράνης ή/και στην ελάττωση των SMP μέσω προσρόφησης. Οι βιοφορείς είναι ειδικά σχεδιασμένα πλαστικά μικρού μεγέθους τα οποία τοποθετούνται στον βιοαντιδραστήρα. Είναι κατασκευασμένοι κυρίως από πολυαιθυλένιο, πολυπροπυλένιο ή πολυουρεθάνη, και έχουν σχήμα κυλίνδρου ή δίσκου. Έχουν ελαφρώς μικρότερη πυκνότητα σε σχέση με το νερό και μεγάλη επιφάνεια επαφής. Στη συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκαν βιοφορείς τύπου k1 και όγκου 5L. Πρόκειται για τον τύπο BC 2510 που παρουσιάζεται στην **Εικόνα 13**.

MODEL		BC 1610	BC 1510	BC 2504	BC 2510
					
Διαστάσεις	mm	Ø16 x 10	Ø15 x 10	Ø25 x 04	Ø25 x 10
Συνολική ενεργή επιφάνεια	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	>500	>1100	>700	>500
Πυκνότητα	g/cm <sup>3</sup>	0.96 – 0.98	0.96 – 0.98	0.96 – 0.98	0.96 – 0.98
Αριθμός τεμαχίων	pcs/m <sup>3</sup>	>260.000	>300.000	>210.000	>97.000
Ποσοστό διάκενων	%	>85	>85	>85	>90
Θερμοκρασία εφαρμογής	°C	5 – 60	5 – 60	5 – 60	5 – 60
Υλικό	Παρθένο υλικό PE ελεγμένης υψηλής ποιότητας				
Διάρκεια ζωής	years	>15	>15	>15	>15
Αντοχή στους υδρογονάνθρακες		Καλή	Καλή	Καλή	Καλή
Αντοχή στην αλκαλικότητα		Άριστη	Άριστη	Άριστη	Άριστη

Εικόνα 13. Βασικά χαρακτηριστικά βιοφορέων.

### 3.3 Εφαρμογές και ήδη βιοφορέων

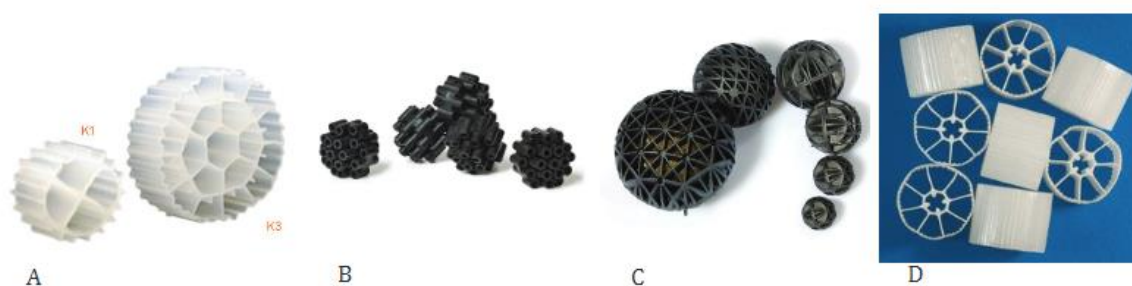
Μια προσέγγιση για την αποκατάσταση της ρύπανσης των υδάτων είναι μέσω της χρήσης βιοφορέων που χρησιμοποιούν μικροβιακές βιομεμβράνες συνδεδεμένης ανάπτυξης για τον μεταβολισμό των ρυπογόνων συστατικών. Σε αυτούς τους αντιδραστήρες, τα μικροβιακά βιοφίλμ αποικίζουν ένα τεχνητό υπόστρωμα και συλλαμβάνουν ή μετατρέπουν διαλυμένους ρύπους, καθιστώντας τους λιγότερο επιβλαβείς ή απομακρύνοντάς τους μέσω απωλειών στην ατμόσφαιρα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι βιοαντιδραστήρων που βασίζονται σε βιοφίλμ, συμπεριλαμβανομένων των βιοφορέων με αιωρούμενα μέσα (κινούμενης κλίνης) και βιοφορείς με στατικά μέσα, μεταξύ άλλων. (33)

Το δυνητικά χαμηλό λειτουργικό κόστος των βιοφορέων οδήγησε στην εφαρμογή τους σε πολλές εφαρμογές για την αποκατάσταση του νερού και των λυμάτων, συμπεριλαμβανομένης της εξυγίανσης οργανικών και αζωτούχων ρύπων. Οι βιοαντιδραστήρες κινητής κλίνης (MBBR) είναι δημοφιλείς σε πολλές διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων λόγω της απλής λειτουργίας και της πιθανής αποτελεσματικότητάς τους, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα τόσο των συνδεδεμένων όσο και των αιωρούμενων συστημάτων ανάπτυξης. Οι αντιδραστήρες επεξεργασίας MBBR χρησιμοποιούν μέσα φορείς για την ανάπτυξη βιοφίλμ στις επιφάνειές τους. Τα κατάλληλα φέροντα μέσα παρουσιάζουν μεγάλη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου και είναι ελαφριά για άνωση στη ροή κινούμενου ρευστού του δοχείου του αντιδραστήρα. Τα τυπικά σχέδια μέσων μεταφοράς που χρησιμοποιούνται σε αντιδραστήρες βιοφορέα είναι συχνά απλές δομές με μοτίβο κατά μήκος ενός μόνο άξονα συμμετρίας, έτσι ώστε να επιδέχονται παραδοσιακές διαδικασίες κατασκευής εργαλείων και καλουπιών (π.χ. εξώθηση πολυμερών, χύτευση με έγχυση, κ.λπ.). (33)

Η **Εικόνα 14** δείχνει διάφορους τύπους μέσων βιοφορέα που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο. Η αξιόπιστη υψηλή απόδοση αυτών των μέσων σε βιοφορείς έχει αποδειχθεί σε πολλές εφαρμογές αποκατάστασης ρύπων. Ωστόσο, οι περιορισμοί στις διαδικασίες παραγωγής θέτουν περιορισμούς στην ποικιλομορφία των σχημάτων των μέσων, περιορίζοντας δυνητικά τα τελικά κέρδη απόδοσης που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν μέσω νέων σχημάτων μέσων με αναδρομική πολυπλοκότητα επιφάνειας για αποικισμό βιοφίλμ. Υπάρχει η δυνατότητα να αναπτυχθούν νέες έννοιες μέσων που θα μπορούσαν να διεγείρουν νέα μικροβιακά συγκροτήματα και τον

μεταβολισμό της κοινότητας για να αποφέρουν κέρδη αποδοτικότητας στην απόδοση του αντιδραστήρα. (33)

Η απόδοση ενός μέσου μεταφοράς σε ένα MBBR συνήθως αξιολογείται ως συνάρτηση της ειδικής επιφάνειας του μέσου (SSA), η οποία είναι η αναλογία της συνολικής επιφάνειας προς τον όγκο όγκου. Οι γεωμετρίες μέσων που έχουν υψηλές τιμές SSA προσφέρουν περισσότερες ευκαιρίες για δημιουργία βιοφίλμ και γενικά θεωρούνται πιο αποτελεσματικές από τα μέσα με χαμηλότερες τιμές SSA. Άλλοι παράγοντες, όπως το υλικό, η υφή της επιφάνειας, ο προσανατολισμός του φορέα, η απόσταση πόρων και η γεωμετρία, έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζουν τη συνολική απόδοση των συστημάτων MBBR. (33)



Εικόνα 14. Μέσα βιοφορέα του εμπορίου: (A) K1, K3, (B) Atlantic bio-balls, (C) honeycomb bio-balls, και (D) media MB3

Ένα δείγμα διαφορετικών ειδών βιοφορέων που χρησιμοποιούνται σε ένα MBBR, μαζί με μια σύντομη περίληψη των χαρακτηριστικών τους, δίνεται από τον Shrestha (2013). Ενώ αυτοί οι τύποι μέσων είναι φθηνοί, η μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών του φορέα, η έλλειψη άνωσης, η απρόβλεπτη ικανότητα του SSA και τα ζητήματα μόλυνσης που προκύπτουν από τη χρήση βιοαποικοδομήσιμων υλικών έχουν στρέψει την προσοχή προς τη χρήση κατασκευασμένων πολυμερών μέσων μεταφοράς για την ενίσχυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ρευστού και το βιοφίλμ.). Η βιβλιογραφία των διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας προσφέρει επίσης μια μεγάλη ποικιλία σχεδίων μέσων μεταφοράς, με τα περισσότερα από αυτά να στοχεύουν στην αύξηση του SSA του στοιχείου φορέα. Από γεωμετρική άποψη, οι περισσότερες είναι παραλλαγές ενός γνωστού σχήματος που επιδέχεται την παραδοσιακή κατασκευή. Παραδείγματα περιλαμβάνουν κυλινδρικά, σφαιρικά ή κυβοειδή πρίσματα. Άλλοι προσφέρουν συνδυασμούς πολύπλοκων σχημάτων. (33)

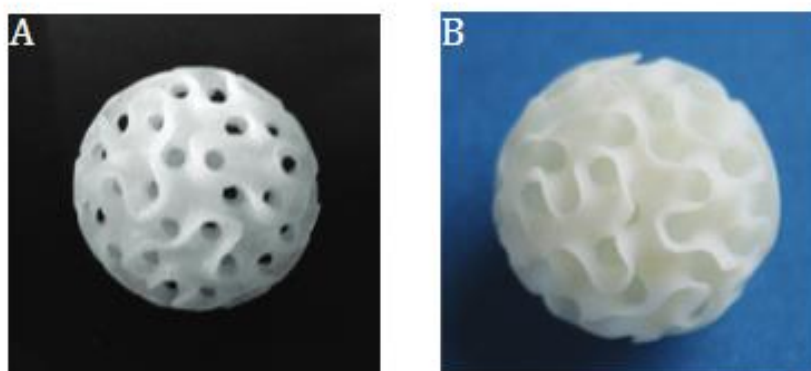
### 3.4 Τρισδιάστατη εκτύπωση βιοφορέων

Μία ανεξερεύνητη αλλά πολλά υποσχόμενη οδός για την ανάπτυξη και την κατασκευή μέσω βιοφορέα είναι η κατασκευή προσθέτων ή η τρισδιάστατη εκτύπωση. Οι πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης επιτρέπουν την ακριβή κατασκευή πολύπλοκων, βιομημητικών σχημάτων και τοπολογιών σε πλαστικό πολυμερές με πιστότητα σε κλίμακα  $\mu\text{m}$ . Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό και την κατασκευή φορέων εξαιρετικά υψηλής επιφάνειας με πολύπλοκες γεωμετρίες. Ο μικροβιακός αποικισμός τρισδιάστατων εκτυπωμένων υλικών έχει αποδειχθεί για χρήση σε αντιδραστήρες φωτοτροφικών βιοφίλμ. Με την τρισδιάστατη εκτύπωση, μπορεί να παραχθούν σχήματα που δεν έχουν άλλη μέθοδο κατασκευής και με πολυπλοκότητα που δυνητικά διεγείρει την ανάπτυξη μοναδικών ετερογενών βιοφίλμ μέσω της δημιουργίας διαφορετικών οδών για διάχυση και μεταφορική μεταφορά των διαλυμένων συστατικών. Για παράδειγμα, μπορεί να αναπτυχθούν σχέδια μέσω που ενθαρρύνουν την ανάπτυξη μικτών βακτηρίων και βιοφίλμ φυκιών, δημιουργώντας ετερογενή δίκτυα αυτοτροφικών και ετεροτροφικών μεταβολισμών που μετατρέπουν πληρέστερα στοχευμένους ρύπους του νερού. Επί του παρόντος, το δυνητικό σύνολο τρισδιάστατων γεωμετρικών μοτίβων για μέσα βιοφορέα παραμένει σχετικά ανεξερεύνητο, ειδικά όσον αφορά την πολυπλοκότητα του βιοφίλμ και την απόδοση του βιοφορέα. Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι να αμφισβητήσει τα κυρίαρχα παραδείγματα για αντιδραστήρες που βασίζονται σε μικροβιακά βιοφίλμ με το σχεδιασμό και την παραγωγή νέων μέσω βιοδιήθησης υψηλής επιφάνειας και να αποδείξει τη λειτουργική σκοπιμότητα σε έναν βιοαντιδραστήρα μικτής κλίνης για την αφαίρεση αζώτου. (33)

Ο σχεδιασμός μέσω εξήχθη από το λογισμικό Mathematica® (Wolfram, Champaign, IL) σε μορφή αρχείου STL και στάλθηκε σε εκτυπωτή 3D με εκτόξευση υλικού (Objet30, Stratasys®, Eden Prairie, MN). Όπως οι περισσότεροι τρισδιάστατοι εκτυπωτές, έτσι και αυτός δημιουργεί ένα αντικείμενο στρώμα-στρώμα, το οποίο επιτρέπει την κατασκευή πολύπλοκων σχημάτων. Αυτό είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για σχέδια πολυμέσων που περιέχουν πολύπλοκες γεωμετρίες εσωτερικού καναλιού, όπως το σχήμα του γυροειδούς. Ο τρισδιάστατος εκτυπωτής χρησιμοποιεί μια αρχή polyjet για την εναπόθεση σταγονιδίων μιας ρητίνης υγρού ακρυλικού μονομερούς μέσω 200 ακροφυσίων. Μόλις ολοκληρωθεί η εναπόθεση για μια στρώση, οι λαμπτήρες



υπεριώδους ακτινοβολίας εξασφαλίζουν τη σωστή σκλήρυνση της ρητίνης σε στερεό. Για να προσαρμοστεί η κατασκευή κοίλων δομικών σχημάτων, ο εκτυπωτής εναποθέτει επίσης ένα υλικό στήριξης παραφίνης, επιτρέποντας την κατασκευή οπών, κοιλοτήτων και καναλιών στα μέσα. Αυτό το υλικό αφαιρείται στη συνέχεια με συνδυασμό χημικής διάλυσης (διάλυμα NaOH 2%), καθαρισμού νερού υψηλής πίεσης και μηχανικής απόξεσης. Η **Εικόνα 15** απεικονίζει τα πραγματικά μέσα γυροειδούς που κατασκευάζονται με αυτή τη διαδικασία. Κατασκευάστηκε μια παρτίδα 220 φορέων γυροειδούς μέσου για ενοφθαλμισμό και προκαταρκτική δοκιμή.

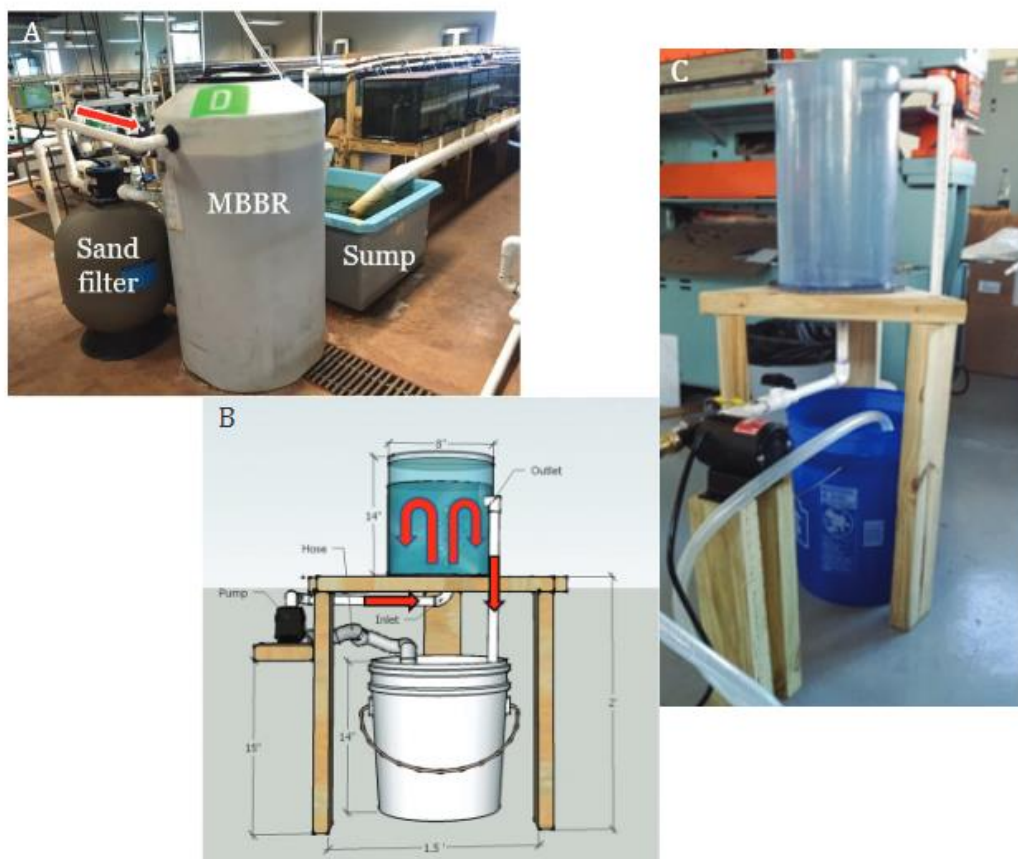


*Εικόνα 15. Τρισδιάστατα εκτυπωμένα γυροειδή μέσα με προσανατολισμό ευθυγραμμισμένο με (A) εσωτερικά κανάλια και (B) τυχαίο προσανατολισμό.*

### 3.5 Παράδειγμα πιλοτικής εφαρμογής Βιοαντιδραστήρα βιομηχανικής κλίμακας στο Πανεπιστήμιο Auburn North Auburn Fisheries Unit

Αρκετοί βιοαντιδραστήρες σε κλίμακα εργαστηρίου σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν για δοκιμή, με κλιμάκωση που βασίζεται σε ένα υπάρχον σύστημα που χρησιμοποιείται στη μονάδα αλιείας του Πανεπιστημίου Auburn Shell North Auburn **Εικόνα 16**. Αυτό το σύστημα είναι ένα MBBR που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της νιτροποίησης της αμμωνίας σε νιτρικό άζωτο σε μια εγκατάσταση υδατοκαλλιέργειας ψαριών. Δύο βιοαντιδραστήρες πιλοτικής κλίμακας (1/10 κλίμακας κατ' όγκο) σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν **Εικόνα 16** για την εφαρμογή των διαφορετικών πρωτοκόλλων δοκιμής. Καθένας από τους βιοαντιδραστήρες επανακυκλοφορούσε σε μια δεξαμενή 5 γαλονιών με αντλία κάρτερ 1/10 hp που παρέχει τη ροή. Τα κανάλια εξόδου και εισόδου του βιοαντιδραστήρα ήταν κατασκευασμένα από ονομαστικό σωλήνα PVC ½-in και διέθεταν βαλβίδες για να

επιτρέπουν τον έλεγχο του ογκομετρικού ρυθμού ροής στον βιοαντιδραστήρα. Οι ταχύτητες ροής εισόδου από τον πυθμένα του βιοαντιδραστήρα παρείχαν φορείς ταχύτητας κυκλοφορίας που διατηρούσαν τα μέσα σε αιώρηση. Χρησιμοποιώντας μετρητές ροής αέρα σε πάνελ, ο ρυθμός του αέρα στον βιοαντιδραστήρα ελεγχόταν και εγχύθηκε σε πέτρες αερισμού στον πυθμένα του δοχείου του βιοαντιδραστήρα. (33)



Εικόνα 16. (Α) Βιοαντιδραστήρας βιομηχανικής κλίμακας στο Πανεπιστήμιο Auburn North Auburn Fisheries Unit, (Β) σκίτσο του βιοαντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας για δοκιμές μέσων και (Γ) φωτογραφία του πραγματικού βιοαντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας

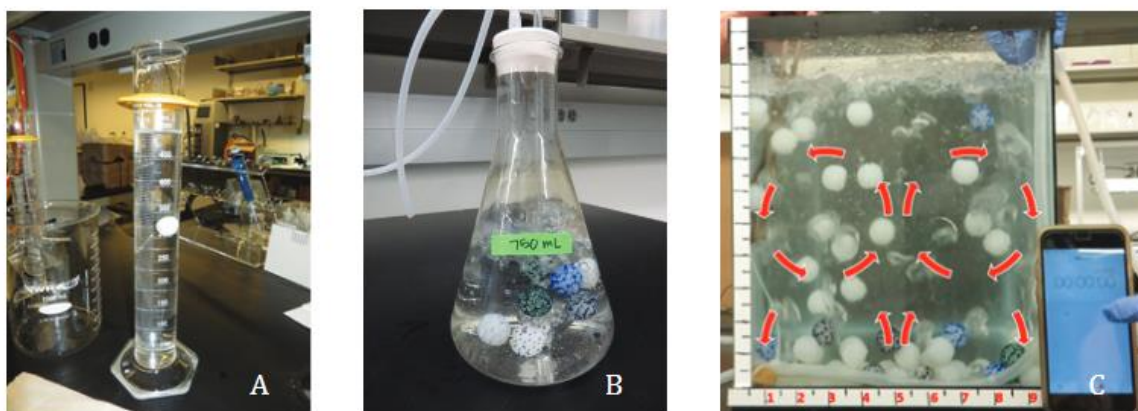
Μια σειρά λειτουργικών δοκιμών, συμπεριλαμβανομένων δοκιμών πλευστότητας, ανθεκτικότητας και ροής, διεξήχθησαν με μικρές παρτίδες των βιοφορέων γυροειδούς ( $n < 12$ ). Η δοκιμή άνωσης συνίστατο στην απελευθέρωση ενός στοιχείου μέσου γυροειδούς στην κορυφή ενός βαθμονομημένου κυλίνδρου 500 mL γεμάτο με νερό **Εικόνα 17** και στην καταγραφή του χρόνου που πέρασε μέχρι να φτάσει στο κάτω μέρος της στήλης νερού. Αυτό επαναλήφθηκε 25 φορές και χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ταχύτητας βύθισης, μια σημαντική παράμετρο για τα μέσα κινούμενης κλίνης, καθώς καθορίζει την ενέργεια που απαιτείται για την

ανακυκλοφορία των μέσων. Η πυκνότητα καθενός από τα μέσα μετρήθηκε επίσης με μέτρηση της μετατόπισης του νερού 20 μεμονωμένων στοιχείων γνωστής ξηρής μάζας που τοποθετήθηκαν σε βαθμονομημένο κύλινδρο. Το υγρό βάρος κάθε στοιχείου μετρήθηκε μετά την απομάκρυνση από τη βύθιση σε νερό και το στέγνωμα με στύπωμα με απορροφητικές πετσέτες. (33)

Διεξήχθη δοκιμή ανθεκτικότητας για να προσδιοριστεί η ποσότητα μάζας, εάν υπήρχε, που χάθηκε κατά τη διάρκεια μιας περιόδου 48 ωρών έντονης ανάδευσης. Δέκα προζυγισμένα στοιχεία μέσων τοποθετήθηκαν σε 400 mL νερού σε φιάλη Erlenmeyer και αναδύτηκαν με πεπιεσμένο αέρα με ρυθμό ροής αέρα 990 L/hr για 48 ώρες **Εικόνα 17**. Αυτός ο ρυθμός ροής αέρα επιλέχθηκε με βάση τον ρυθμό που χρησιμοποιήθηκε στους βιοαντιδραστήρες στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Auburn Fisheries. Τα στοιχεία του μέσου στη συνέχεια ξηράθηκαν στον αέρα για 24 ώρες και η τελική μάζα καταγράφηκε. Η δοκιμή ροής περιλάμβανε την τοποθέτηση ενός όγκου 0,6 L γυροειδούς μέσου μεταφοράς σε μια δεξαμενή επίπεδης πλάκας που κατασκευάστηκε με την εισαγωγή ενός φύλλου πλεξιγκλάς για να χωρίσει ένα ενυδρείο ψαριών 10 γαλονιών **Εικόνα 17**. Ένας σωλήνας πυριτίου OD 1 cm με οπές αέρα τοποθετήθηκε στον πυθμένα της δεξαμενής για παροχή αέρα. (33)

Δέκα φορείς γυροειδούς επισημάνθηκαν με μόνιμη μελάνη διαφορετικών χρωμάτων, έτσι ώστε οι διαδρομές κίνησής τους να μπορούν να παρακολουθούνται μέσω εγγραφής βίντεο. Χρησιμοποιώντας έναν μετρητή ροής αέρα, η πίεση ρυθμίστηκε στα 110, 170, 220 και 280 L/hr προκειμένου να καταγραφεί η συμπεριφορά των μέσων υπό διάφορες συνθήκες ροής. Αυτές οι ροές δεν προορίζονταν απαραίτητα να μιμηθούν τον βιοαντιδραστήρα στο πεδίο, αλλά απλώς χρησιμοποιήθηκαν ως πρότυπο για την άμεση σύγκριση των σχεδίων των μέσων μεταξύ τους με βάση τις απαιτήσεις κίνησης και ενέργειας. Οι άκρες της δεξαμενής σημειώθηκαν με χάρακα και τοποθετήθηκε χρονόμετρο στο παράθυρο καταγραφής, ώστε να μπορεί να γίνει ανάλυση καρέ-καρέ. Αυτό βοήθησε στον προσδιορισμό των μοτίβων κυκλοφορίας που συσχετίζονται με τη ροή του αέρα, την ενέργεια που απαιτείται για την επαρκή κυκλοφορία των μέσων, καθώς και την καλύτερη διάταξη της ροής του αέρα για την ελαχιστοποίηση των νεκρών ζωνών. Αφού πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές άνωσης, ανθεκτικότητας και ροής, εμβολιάστηκε μια παρτίδα γυροειδών μέσων και K1 Kaldnes για περίοδο 19 ημερών, ξεκινώντας στις 9 Μαρτίου 2016 και έληξε στις 27 Μαρτίου 2016.

Η ποσότητα κάθε τύπου μέσου που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία εμβολιασμού και πειραματισμού προσδιορίστηκε με τον υπολογισμό του αριθμού που απαιτείται για την κατάληψη του 50% του όγκου στον βιοαντιδραστήρα. Η διαδικασία εμβολιασμού περιελάμβανε την εναπόθεση κάθε παρτίδας μέσων σε μια δεξαμενή 5 γαλονιών που περιείχε τρία γαλιόνια λυμάτων από τιλάρια από το North Auburn Fisheries και διατήρησή της συνεχώς αεριζόμενο. Κάθε τύπος μέσου εμβολιάστηκε με ένα φλιτζάνι (250 mL) K1 Kaldnes καλυμμένο σε βιοφίλμ νιτροποιητικών βακτηρίων, που ανακτήθηκε από το MBBR στην αλιευτική εγκατάσταση. Λαμβάνονταν καθημερινά δείγματα 250 mL νερού και από τις δύο δεξαμενές και μετρήθηκαν για το pH, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση (σε mg/L) αμμωνίας, νιτρικών και νιτρικών. Η ανάλυση θρεπτικών ουσιών διεξήχθη χρησιμοποιώντας φωτόμετρο EcoSense 9500 (YSI, Yellow Springs, Ohio) και η θερμοκρασία και το pH μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας έναν ανιχνευτή pH (Hanna Instruments, Limena, Ιταλία). (33)



Εικόνα 17. (Α) Δοκιμή άνωσης μέσου γυροειδούς, (Β) Γυροειδές μέσο που υποβάλλεται σε δοκιμή ανθεκτικότητας και (Γ) δοκιμή χαρακτηρισμού ροής μέσου γυροειδούς.

## 4. ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της έμφραξης των μεμβρανών και της απόδοσης επεξεργασίας των αστικών λυμάτων σε έναν ημι-πilotικό αντιδραστήρα κινούμενης κλίνης βιοφίλμ σε συνδυασμό με βιοαντιδραστήρα μεμβρανών MBBR-MBR με τη χρήση εμπορικών βιοφορέων Kaldnes K1. Εν συνεχεία και η πραγματοποίηση σύγκρισης μεταξύ πρότυπων αποτελεσμάτων μονάδας χωρίς την προσθήκη κ1 βιοφορέων και αποτελεσμάτων με την προσθήκη κ1 βιοφορέων.

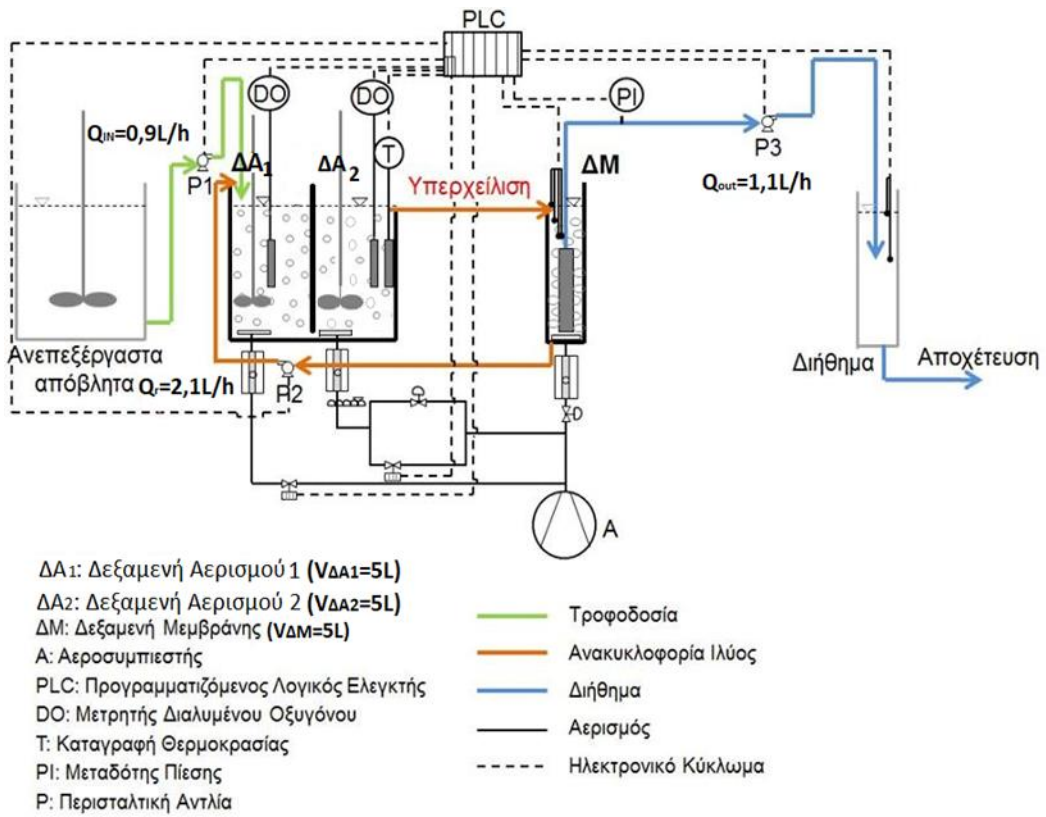
## B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

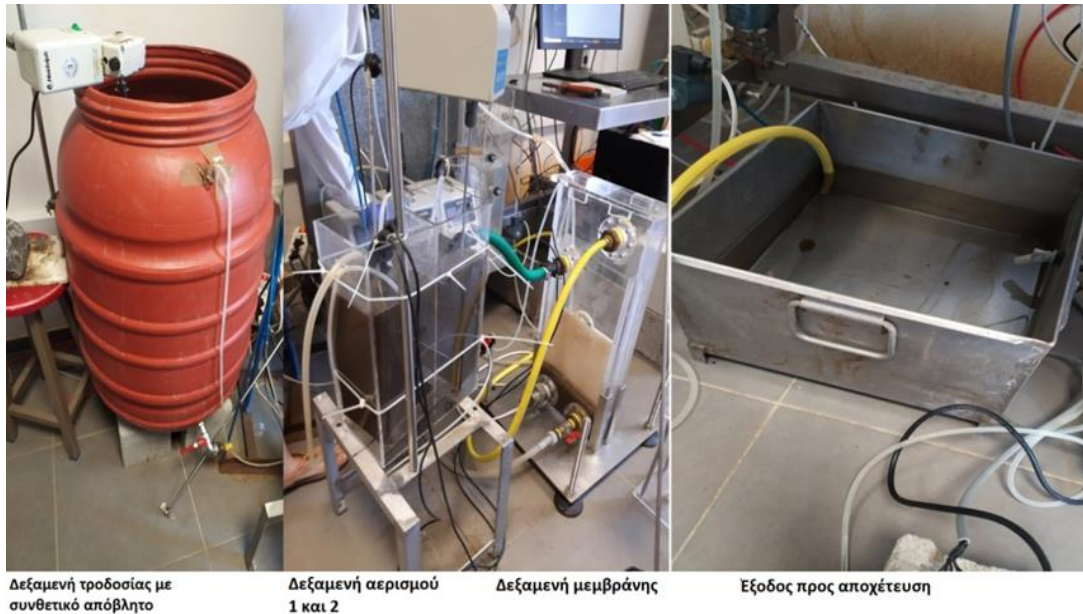
#### 5.1 Περιγραφή του πειράματος

Στο παρόν πείραμα, μελετήθηκε η απόδοση επεξεργασίας και ο μηχανισμός έμφραξης της μεμβράνης σε ένα σύστημα MBBR-MBR. Η διάταξη αποτελούνταν από τη δεξαμενή αποθήκευσης του συνθετικού λύματος, η οποία τροφοδοτούσε δύο δεξαμενές αερισμού ίσου όγκου σε σειρά. Το συνθετικό απόβλητο εισερχόταν στην πρώτη δεξαμενή και μέσω ενός ανοίγματος στο κάτω μέρος της, μεταφερόταν στην δεύτερη δεξαμενή αερισμού. Το λύμα έπειτα προωθούνταν στη δεξαμενή μεμβράνης που περιείχε τη βυθισμένη υδρόφιλη επίπεδη μεμβράνη μικροδιήθησης **Εικόνα 18**.

Για τη διπλωματική αυτή διενεργήθηκαν δύο πειράματα συνεχούς λειτουργίας, διάρκειας μεγαλύτερης του ενός μήνα το καθένα. Κατά το πρώτο πείραμα δεν προστέθηκαν βιοφορείς στη μονάδα και συνεπώς το πείραμα αυτό λειτούργησε ως **μονάδα MBR έλεγχος**. Κατά το δεύτερο πείραμα προστέθηκαν στην πρώτη δεξαμενή αερισμού της μονάδας, όγκου 5 L, εμπορικοί βιοφορείς τύπου K1, και συνεπώς η μονάδα λειτούργησε ως **μονάδα MBBR-MBR K1**. Στόχος ήταν η συγκριτική μελέτη έμφραξης της μεμβράνης και απόδοσης επεξεργασίας των λυμάτων μεταξύ των δύο μονάδων.



Εικόνα 18. Διάγραμμα ροής μονάδας κινούμενης κλίνης σε συνδυασμό με βιοαντιδραστήρα μεμβρανών MBBR-MBR



Εικόνα 19. Φωτογραφία του ημι-πυλοτικού συστήματος MBR

Για την αντιμετώπιση του cake layer, που παρατηρήθηκε στην επιφάνεια της μεμβράνης και είχε ως αποτέλεσμα την έμφραξή της, εφαρμόστηκε έντονη διεργασία αερισμού με παροχή αέρα 15-20 L/min, ενώ παράλληλα η ροή διήθησης ήταν διακοπτόμενη με 10 min λειτουργίας και 2 min παύσης. Το υβριδικό σύστημα MBBR-MBR τροφοδοτούνταν συνεχώς με συνθετικό απόβλητο, εφαρμόζοντας το πρωτόκολλο των Zhou et al. (2014) αλλά και με βάση τις ανάγκες του πειράματος. Οι μάζες των συστατικών του συνθετικού λύματος για 80 L λύματος αναφέρονται στον **Πίνακα 1**. Επίσης η προσθήκη  $\text{NaHCO}_3$  με συγκέντρωση 9,6 g / 80 L έγινε για να διατηρήσει το pH μεταξύ 7-7,5 στις δύο δεξαμενές.



<i>ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ</i>	<i>ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΙΣ</i>
<i>Γλυκόζη</i>	20g
<i>Αμυλο</i>	20g
<i>NH<sub>4</sub>Cl</i>	8g
<i>Πεπτόνη</i>	2.24g
<i>KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></i>	2.120g
<i>MSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O</i>	0.72g
<i>MnSO<sub>4</sub></i>	0,888
<i>FeSO<sub>4</sub></i>	0,132
<i>NaHCO<sub>3</sub></i>	28,8

*Πίνακας 1. Μάζες συστατικών με βάση τα 80 L*

## 6. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 6.1 .Όργανα

- Συσκευή Vortex
- Υδατόλουτρο
- Φασματοφωτόμετρο
- Θερμαινόμενος μαγνητικός αναδευτήρας (Fisher Stirring Hotplace, Fisher Scientific)
- Αναλυτικός ζυγός (KERN and Sohn GmbH, Electronic Balance, ABJ 220-4M, max 180g, d=0.1mg).
- Φυγόκεντρος
- Θερμοαντιδραστήρας
- Greisinger OXY 3610 MP
- Πλαστικές πιπέτες των 5 και 10 ml
- Μικροπιπέτες 200-1000 ml
- Tips μικροπιπέτας
- Γυάλινες πιπέτες των 5 και 10 ml
- Γυάλινοι δοκιμαστικοί σωλήνες
- Σιφόνιο 5 ml
- Ογκομετρικοί κύλινδροι των 50ml
- Πλαστικοί σωλήνες φυγοκέντρωσης
- Πλαστικά δοχεία αποθήκευσης δειγμάτων-κλασμάτων εκχύλισης
- Γυάλινη σύριγγα των 100 ml
- Φίλτρα μιας χρήσης των 0.1 $\mu$ m και 0,45  $\mu$ m
- Φίλτρο σύριγγας Whatman Puradisc
- Κυψελίδα

### 6.2 Μέτρηση δυναμικής σκέδασης φωτός (Dynamic Light Scattering DLS)- Προσδιορισμός κατανομής σωματιδίων

Η σκέδαση του φωτός αποτελεί μια μέθοδο που χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό του μοριακού βάρους, του μεγέθους, του συντελεστή διάχυσης και άλλων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών μεγάλων μορίων. Η χρήση laser και ηλεκτρονικών υπολογιστών τα τελευταία χρόνια, καθιστά δυνατή τη μελέτη μορίων μεγέθους μερικών

νανόμετρων. Η Δυναμική σκέδαση φωτός (επίσης γνωστή ως φασματοσκοπία συσχέτισης φωτονίων) αποτελεί μια τεχνική η οποία εφαρμόζεται για τη μελέτη του μεγέθους μικρών σωματιδίων σε εναιώρημα ή διαλυτοποιημένα σε διαλύτη. Επίσης, χρησιμοποιείται για τη μελέτη της συμπεριφοράς σύνθετων ρευστών, όπως συμπυκνωμένα διαλύματα πολυμερούς.

Οι διακυμάνσεις της συγκέντρωσης των σωματιδίων σε ένα εναιώρημα, επηρεάζουν τη σκέδαση της μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Η σκέδαση του φωτός από κινούμενο σωματίδιο, μετατοπίζεται προς ελαφρώς χαμηλότερη ή υψηλότερη συχνότητα ανάλογα με το αν το σωματίδιο κινείται από ή προς τον παρατηρητή. Αυτή η αλλαγή σχετίζεται με το μέγεθος του σωματιδίου. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων και προσδιορίζεται η κίνηση του σωματιδίου, μετρώντας τον συντελεστή διάχυσης των σωματιδίων και χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. (34) (35)

Η συνήθης μορφή της πειραματικής συνάρτησης αυτοσυσχέτισης περιγράφεται από την εξίσωση:

$$G(t) = A + |g^2(t)| = A + \exp(-2Dq^2t) = A + \exp\left(\frac{-2t}{t^*}\right) \quad (1)$$

όπου  $D$  : ο συντελεστής μεταφορικής διάχυσης του σωματιδίου

$q$ : το διάνυσμα σκέδασης ή άνυσμα κύματος.

$t^*$ : χρόνος χαλάρωσης, ο χρόνος που απαιτείται για να μετατοπισθεί το σωματίδιο με διάχυση κατά μια απόσταση ίση με  $q^{-1}$

Από τον συντελεστή διάχυσης

$$D = \frac{1}{t^* q^2} \quad (2)$$

μπορούμε να υπολογίσουμε το συντελεστή τριβής,

$$f = \frac{kT}{D} \quad (3)$$

του σωματιδίου και από το  $f$ ,

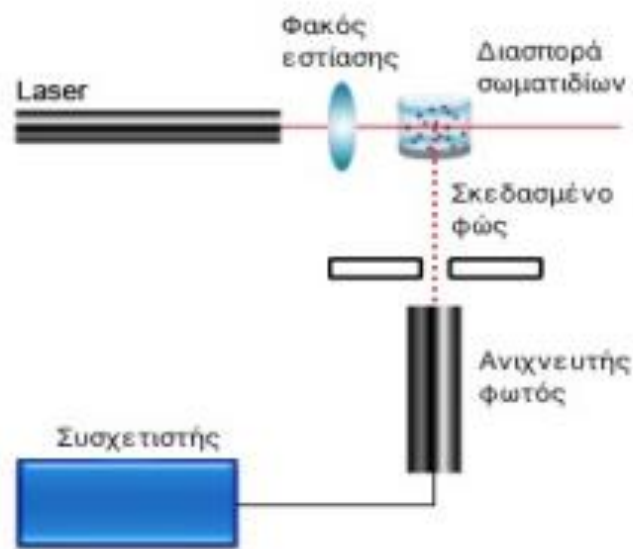
$$f = 6\pi\eta R \quad (4)$$

μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτίνα μιας υδροδυναμικά ισοδύναμης με το σωματίδιο σφαίρας:

$$(3),(4) \quad D = \frac{kT}{6\pi\eta R} \quad (5)$$

όπου  $k$  η σταθερά Boltzman,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία,  $\eta$  το ιξώδες και  $R$  η ακτίνα της υδροδυναμικά ισοδύναμης, με το σωματίδιο, σφαίρας.

Πρόκειται για μια γρήγορη, απλή και πλήρως αυτοματοποιημένη τεχνική. Στην **Εικόνα 19** παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη για την μέτρηση σωματιδίων με δυναμική σκέδαση φωτός.



Εικόνα 20. Σχηματικό διάγραμμα συσκευής δυναμικής σκέδασης φωτός.

Για τον προσδιορισμό του μεγέθους των σωματιδίων ( $<1 \mu\text{m}$ ) χρησιμοποιήθηκε το όργανο εφαρμογής δυναμικής σκέδασης φωτός (Dynamic Light Scattering - DLS) της Brookhaven Instruments Corporation το οποίο αναπαρίσταται στην **Εικόνα 20**. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δείγματα από το μικτό υγρό ενεργού ιλύος των δεξαμενών των μονάδων MBR και από την έξοδο τους, ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε πειράματος. Για την προετοιμασία των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε διήθηση, ώστε να απομακρυνθούν τα μεγάλα σωματίδια και να αποφευχθούν οι παρεμβολές, μέσω ειδικών φίλτρων μεγάλου

μεγέθους. Στα συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν φίλτρα σύριγγας Whatman Puradisc με μέγεθος πόρων 3,5  $\mu\text{m}$ .

Στη συνέχεια, το δείγμα τοποθετήθηκε στην ειδική κυψελίδα με διάφανα τοιχώματα και με ειδικό πάμα. Η κυψελίδα με το δείγμα τοποθετήθηκε στην ειδική εσοχή του οργάνου και καλύφθηκε με δυο πάματα του οργάνου, με σκοπό να απομονωθεί το δείγμα από το περιβάλλον και κατ' επέκταση από το φως. Τα στοιχεία του δείγματος καταγράφηκαν στο λογισμικό του προγράμματος για να ξεκινήσει η μέτρηση.

Για κάθε δείγμα, πραγματοποιούνται αυτόματα πέντε επαναλήψεις προκειμένου να ενισχυθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με το Brookhaven Instruments Corporation (BIC) Software Particle Solutions®. Στη συνέχεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό excel της Microsoft Office για τον υπολογισμό των αθροιστικών ποσοστών κατανομής μεγέθους των σωματιδίων εφόσον είναι επιθυμητό.



Εικόνα 21. Απεικόνιση του οργάνου εφαρμογής δυναμικής σκέδασης φωτός της Brookhaven Instruments Corporation.

### 6.3 Προσδιορισμός συγκέντρωσης αζώτου

#### ♦ Ολικό άζωτο - Total N

Ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης του ολικού αζώτου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ειδικού kit. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια μικρο-σιφωνίου τοποθετήθηκε σε φιαλίδιο του πρότυπου kit με κωδικό LCK 338 Hack-Lange (για συγκέντρωση 20-100 mg/L TN), 0,2 mL δείγματος, 2,3 mL NaOH (αντιδραστήριο A του

test kit) και 1 ταμπλέτα υπερθειικού καλίου  $K_2S_2O_8$  (αντιδραστήριο B). Το φιαλίδιο αναδεύτηκε και επώαστηκε σε θερμο-αντιδραστήρα για 1 h στους  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , ώστε να πραγματοποιηθεί η μετατροπή όλων των μορφών του αζώτου σε  $\text{NO}_3^-$ . Στη συνέχεια, επώαστηκε σε θερμοκρασία δωματίου για 15 min, προστέθηκε μικρή ποσότητα αναγωγικού αντιδραστήριου (αντιδραστήριο C) και αναδεύτηκε. Στη συνέχεια 0,5 mL οξειδωμένου δείγματος και 0,2 mL 2,6-διμεθυλοφαινόλης (αντιδραστήριο D) προστέθηκαν σε μικρό φιαλίδιο. Το μικρό φιαλίδιο αναδεύτηκε, επώαστηκε σε θερμοκρασία δωματίου για 15 min, καθαρίστηκε εξωτερικά και τοποθετήθηκε σε φασματοφωτόμετρο (DR-2800) για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του ολικού N.

♦ **Νιτρικό άζωτο  $\text{NO}_3\text{-N}$**

Με τη βοήθεια σιφωνίου πληρώσεως προστέθηκε είτε στο ειδικό φιαλίδιο με κωδικό LCK 339 Hack-Lange για συγκέντρωση νιτρικών ιόντων 0,23-13,5 mg  $\text{NO}_3\text{-N}$  /L, είτε στο LCK 340 Hack-Lange για συγκέντρωση νιτρικών ιόντων 5-35 mg  $\text{NO}_3\text{-N}$  /L, 1 mL δείγματος και 0,2 mL 2,6-διμεθυλοφαινόλης (αντιδραστήριο A) και το φιαλίδιο αναδεύτηκε. Ακολούθως επώαστηκε σε θερμοκρασία δωματίου για 15 min, καθαρίστηκε εξωτερικά και τοποθετήθηκε σε φασματοφωτόμετρο DR-2800 για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των  $\text{NO}_3\text{-N}$

♦ **Αμμωνιακό άζωτο  $\text{NH}_4\text{-N}$**

Με τη βοήθεια σιφωνίου πληρώσεως προστέθηκαν 5 mL δείγματος είτε στο ειδικό φιαλίδιο με κωδικό LCK 304 Hack-Lange (για 0,015-2,0 mg/L  $\text{NH}_4\text{-N}$  είτε στο LCK 303 (για 2,0-47,0 mg/L  $\text{NH}_4\text{-N}$ ). Το φιαλίδιο αναδεύτηκε, αφού προηγουμένως ανεστράφη το πώμα του. Ο προσδιορισμός βασίζεται στην αντίδραση των αμμωνιακών ιόντων σε pH 12,6 με ανιόντα  $\text{ClO}^-$  και σαλικυλικά ιόντα  $\text{C}_6\text{H}_4(\text{OH})\text{COO}^-$  υπό την παρουσία  $\text{Na}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , που δρα ως καταλύτης, στο σχηματισμό indophenol blue (N-(pdimethylaminophenyl)-1,4-naphthoquinoneimine. Ακολούθως το φιαλίδιο επώαστηκε σε θερμοκρασία δωματίου για 15 min, καθαρίστηκε εξωτερικά και τοποθετήθηκε σε φασματοφωτόμετρο (DR-2800) για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των  $\text{NH}_4\text{-N}$

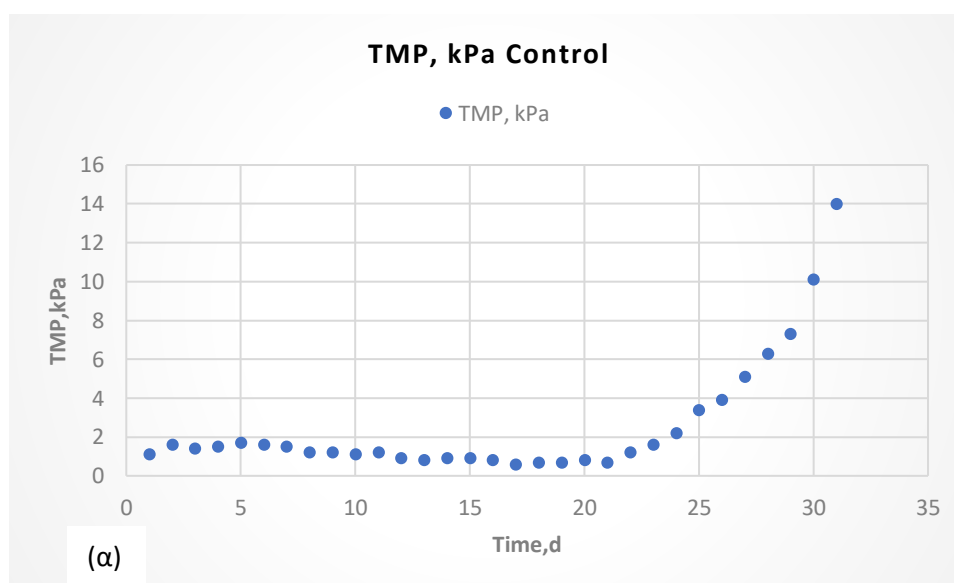
#### 6.4 Χημική Απαίτηση Οξυγόνου COD

Με τη βοήθεια σιφωνίου πλήρωσεως προστίθενται 2mL απιονισμένου νερού στο ειδικό φιαλίδιο με κωδικό LCK 214 Hack-Lange. Στη συνέχεια προσθέτουμε 2 mL από το δείγμα. Το φιαλίδιο ανακινείται, αφού προηγουμένως κλείσει καλά το καπάκι του. Ακολούθως τοποθετείτε σε θερμοστάτη υψηλής θερμοκρασίας για 15min. Εν συνεχεία με προσοχή κάνουμε ανάδευση μια φορά και το αφήνουμε σε θερμοκρασία δωματίου. Τέλος, σκουπίζεται εξωτερικά και τοποθετείται σε φασματοφωτόμετρο DR-2800 για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης COD. Η ίδια διαδικασία ακολουθούνταν και για τη μέτρηση του διαλυτού χημικά απαιτούμενου οξυγόνου με τη διαφορά ότι για τον προσδιορισμό του προηγούνταν διήθηση του δείγματος σε φίλτρο πορώδους 45 mm για την κατακράτηση των μη διαλυτών στερεών.

## 7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ- ΣΥΖΗΤΗΣΗ

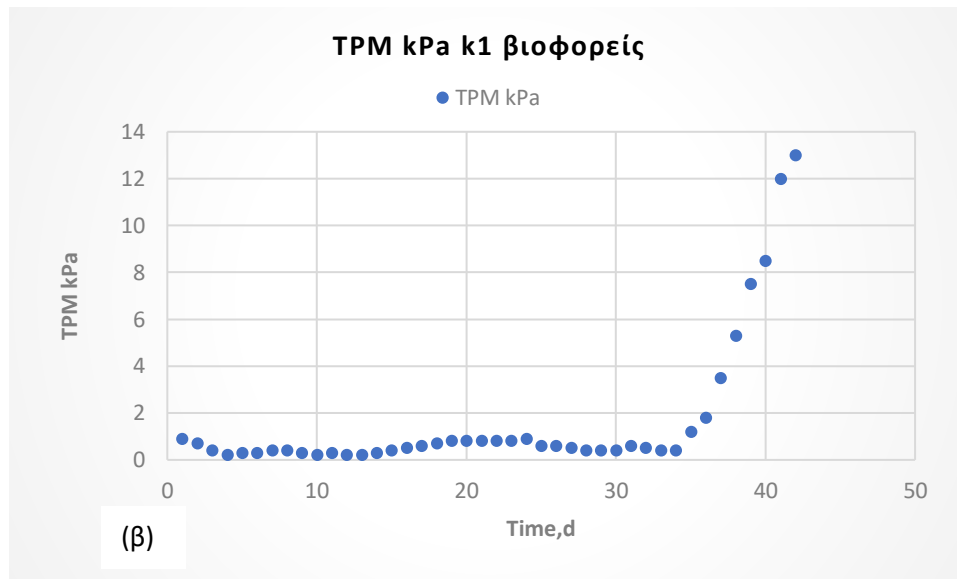
### 7.1 Μελέτη της διαμεμβρανικής πτώσης πίεσης της μεμβράνης

Στην **Εικόνα 21** παρουσιάζεται η διακύμανση της διαμεμβρανικής πίεσης που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Στην **Εικόνα 21α** παρατηρείται ότι η πίεση τις πρώτες μέρες, είναι χαμηλή, ενώ κατά τις τελευταίες μέρες του πειράματος (μετά την 35<sup>η</sup> μέρα) παρατηρήθηκε απότομη αύξηση, η οποία προκλήθηκε λόγω έμφραξης της μεμβράνης. Στην **Εικόνα 21β** με την προσθήκη κ1 βιοφορέων, παρατηρείται ότι η πίεση παραμένει σε πολύ πιο χαμηλά επίπεδα για τουλάχιστον 35 ημέρες, με αποτέλεσμα να παρατείνεται η διάρκεια ζωής της μεμβράνης που όπως φαίνεται στο control πείραμα σε σχέση με την προσθήκη βιοφορέων η απόκλιση ήταν 10 μέρες παραπάνω.



(α)

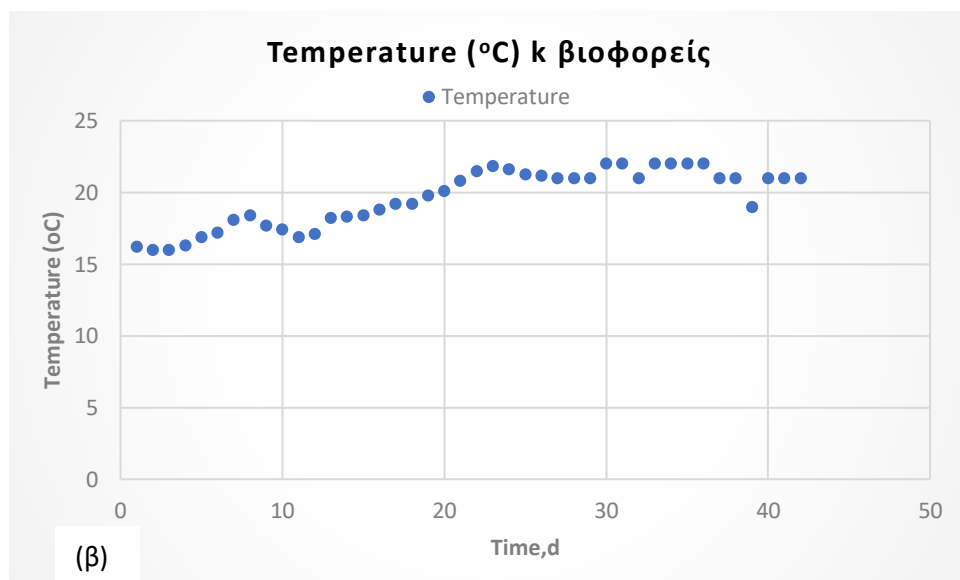
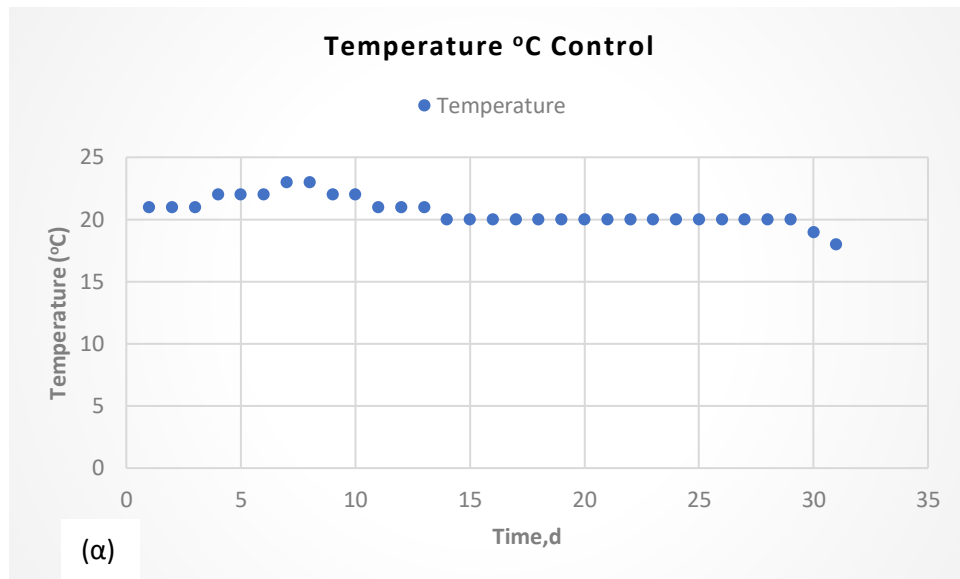




Εικόνα 22. Γράφημα διακύμανσης της TMP (διαμεμβρανική πίεση) απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.

## 7.2 Παρατήρηση της θερμοκρασίας

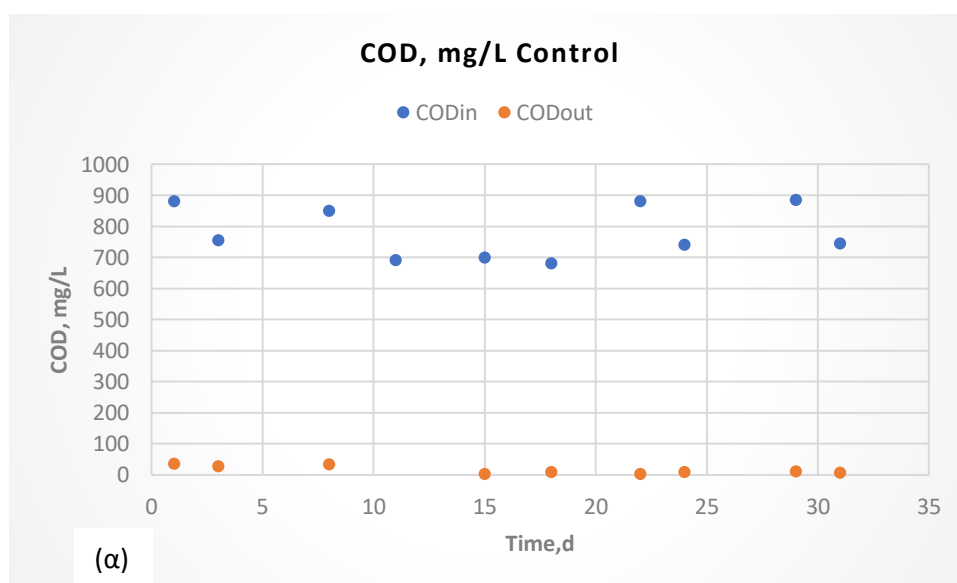
Στην **Εικόνα 22** παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του πειράματος. Στην **Εικόνα 22α** ο μέσος όρος θερμοκρασίας ήταν 21 °C με τυπική απόκλιση 1.1 °C και θερμοκρασία κυμάνθηκε μεταξύ 16-22 °C όπου τις τελευταίες ημέρες λόγω και έμφραξης της μεμβράνης η θερμοκρασία άρχισε να μειώνεται σταδιακά. Στην **Εικόνα 22β** ο μέσος όρος θερμοκρασίας ήταν 20 ° με τυπική απόκλιση 2 °C. Αρχικά, η θερμοκρασία κυμαινόταν στους 20 °C ενώ μετά την 20η μέρα η θερμοκρασία κυμαινόταν από 20 έως 22 °C. Συνεπώς, η θερμοκρασία διατηρήθηκε σταθερή και στα δύο πειράματα προκειμένου να είναι συγκρίσιμα.

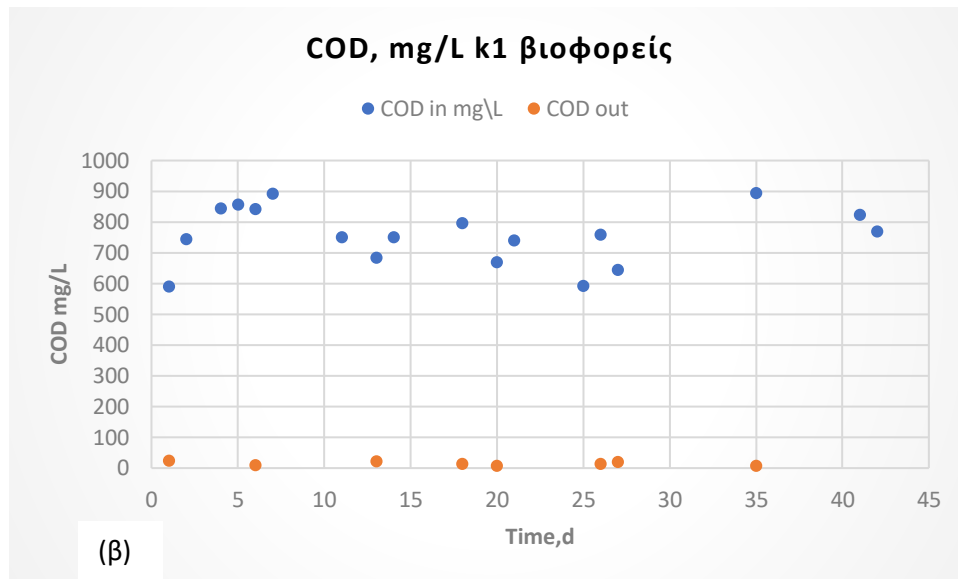


Εικόνα 23. Γράφημα διακύμανσης της θερμοκρασίας απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.

### 7.3 Μελέτη της απομάκρυνσης του οργανικού φορτίου (COD)

Στην **Εικόνα 23** παρουσιάζονται οι τιμές της συγκέντρωσης του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD). Το COD επηρεάζεται από μία πληθώρα διαφορετικών ενώσεων, που περιέχονται εντός της βιομάζας. Στην **Εικόνα 23α** παρατηρείται ότι η μέση συγκέντρωση ήταν κατά την εισροή ήταν 779 mg/L με τυπική απόκλιση 85 mg/L ενώ κατά την εκροή 16 mg/L με τυπική απόκλιση 13 mg/L. Στην **Εικόνα 23β** η μέση συγκέντρωση ήταν κατά την εισροή 758 mg/L με τυπική απόκλιση 94 mg/L ενώ κατά την εκροή 13 mg/L με τυπική απόκλιση 8 mg/L. Το COD της εκροής βελτιώθηκε με την προσθήκη βιοφορέων σε σχέση με το control πείραμα, καθώς η ποσότητα του οξυγόνου η οποία απαιτήθηκε για την ολική χημική οξείδωση των οργανικών συστατικών στην εκροή κυμάνθηκε σε ελαφρώς χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με το control.





Εικόνα 24. Γράφημα διακύμανσης του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.

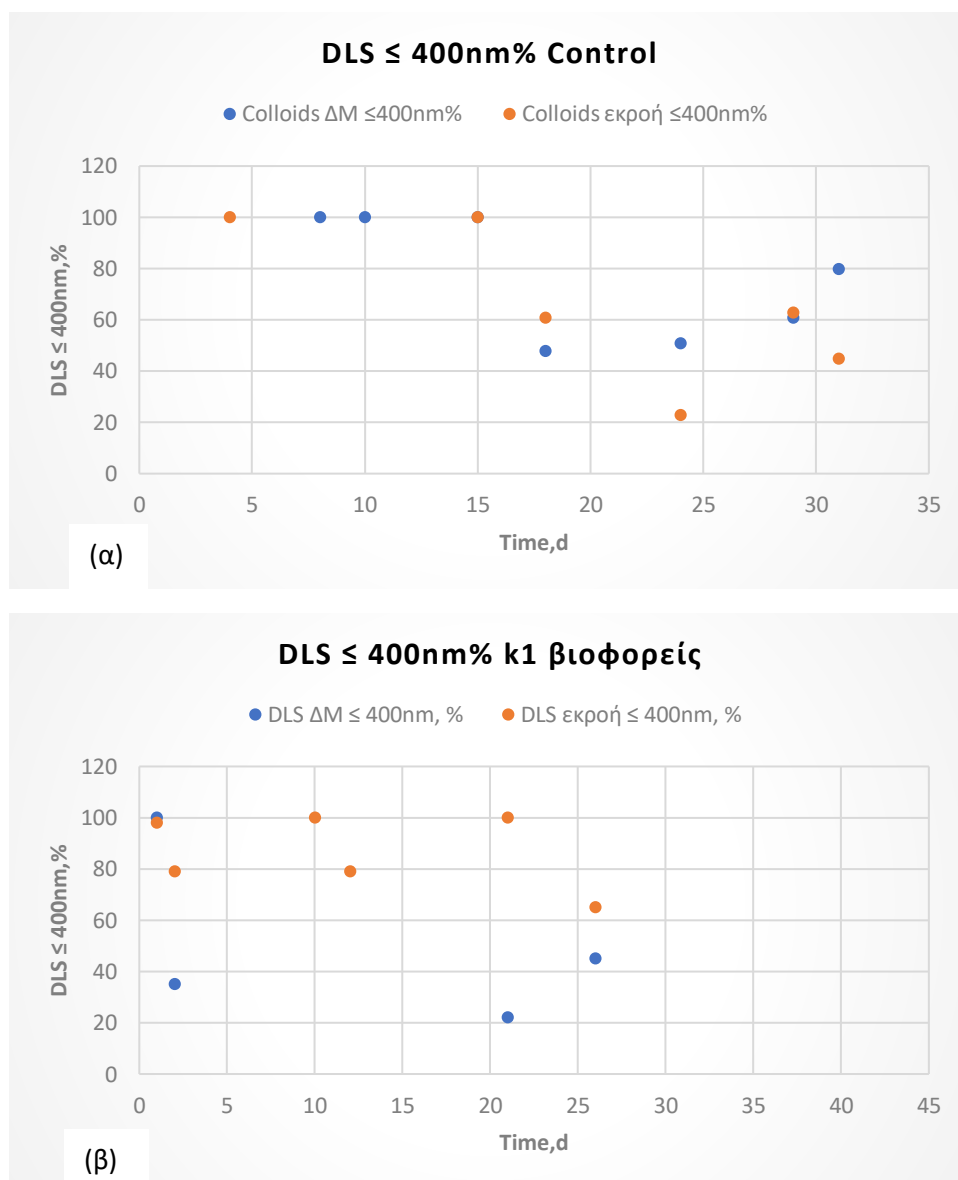
#### 7.4 Μελέτη της κατανομής μεγέθους των κολλοειδών συστατικών

Στις εικόνες που ακολουθούν **Εικόνα 24, 25** παρουσιάζεται η κατανομή μεγέθους των σωματιδίων που έχουν διάμετρο μικρότερη και μεγαλύτερη των 400 nm αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, στην **Εικόνα 24α** παρουσιάζεται η κατανομή των σωματιδίων από το control πείραμα με διάμετρο μικρότερη των 400 nm, δηλαδή διάμετρο μικρότερη από τους πόρους της μεμβράνης. Ο μέσος όρος του μεγέθους των κολλοειδών σωματιδίων στην δεξαμενή μεμβράνης ήταν 77 % με τυπική απόκλιση 24 % ενώ κατά την εκροή 65 % με τυπική απόκλιση 30 %. Στην **Εικόνα 24β** με την προσθήκη των k1 βιοφορέων ο μέσος όρος του μεγέθους των κολλοειδών σωματιδίων στην δεξαμενή μεμβράνης ήταν 60 % με τυπική απόκλιση 37 % ενώ κατά την εκροή ήταν 89 % με τυπική απόκλιση 14 %.

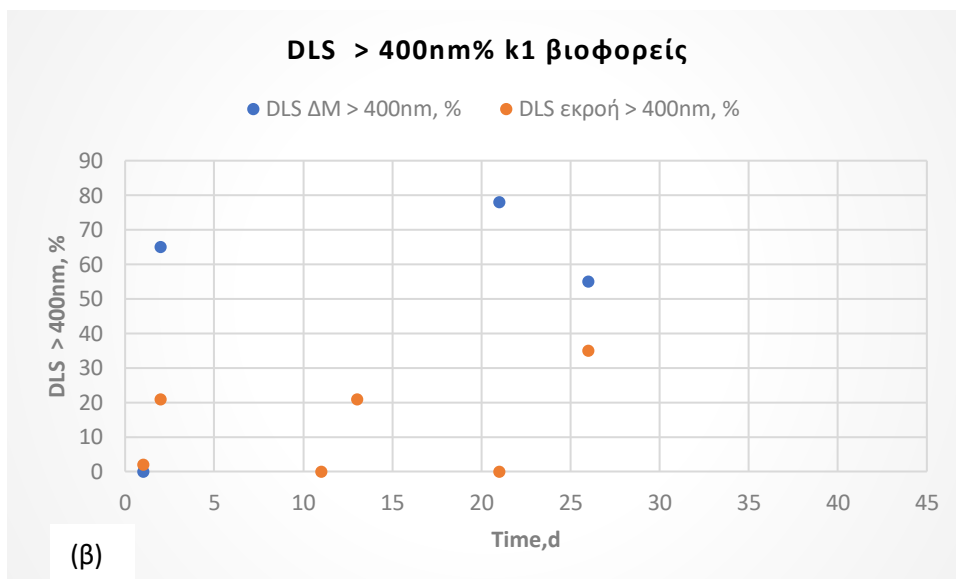
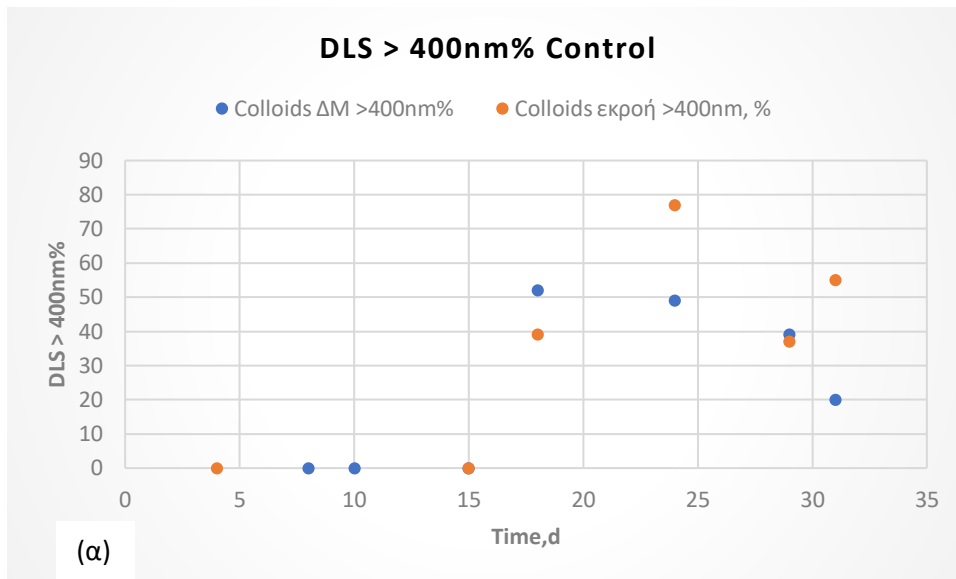
Στην **Εικόνα 25α** παρουσιάζεται η κατανομή των σωματιδίων από το control πείραμα με διάμετρο μεγαλύτερη των 400 nm. Ο μέσος όρος του μεγέθους των κολλοειδών σωματιδίων στην δεξαμενή μεμβράνης ήταν 23% με τυπική απόκλιση 24 % ενώ κατά την εκροή 35 % με τυπική απόκλιση 30 %. Στην **Εικόνα 25β** με την προσθήκη των k1 βιοφορέων ο μέσος όρος του μεγέθους των κολλοειδών σωματιδίων στην

δεξαμενή μεμβράνης ήταν 40% με τυπική απόκλιση 37 % ενώ κατά την εκροή ήταν 11 % με τυπική απόκλιση 14 %.

Ωστόσο, αυτό που παρατηρούμε είναι πως δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερη συσχέτιση του μεγέθους των κολλοειδών σωματιδίων στη δεξαμενή μεμβράνης και στην εκροή των μονάδων με την προσθήκη ή μη των βιοφορέων k1.



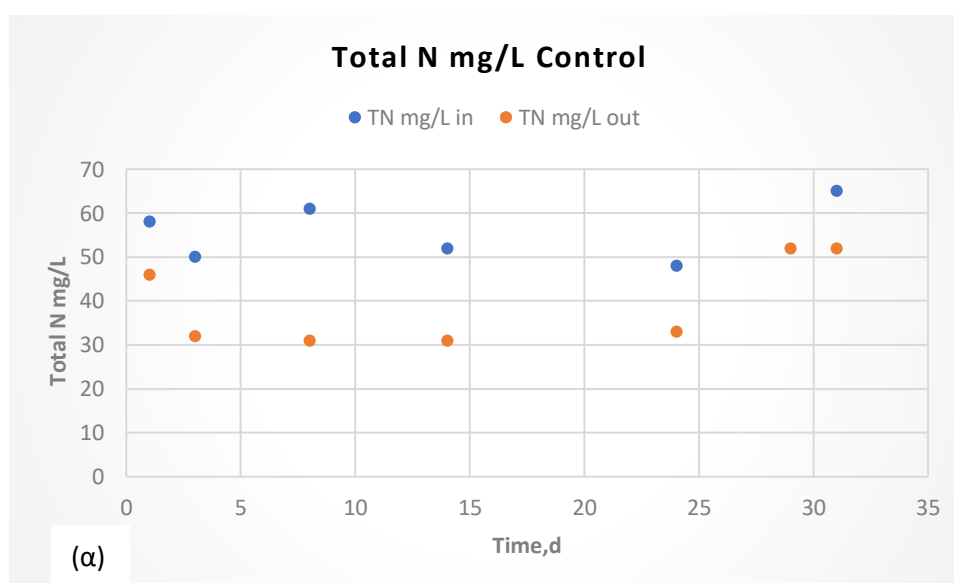
Εικόνα 25. Κατανομή μεγέθους σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 400 nm στην δεξαμενή μεμβράνης(ΔΜ) και στην εκροή απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.

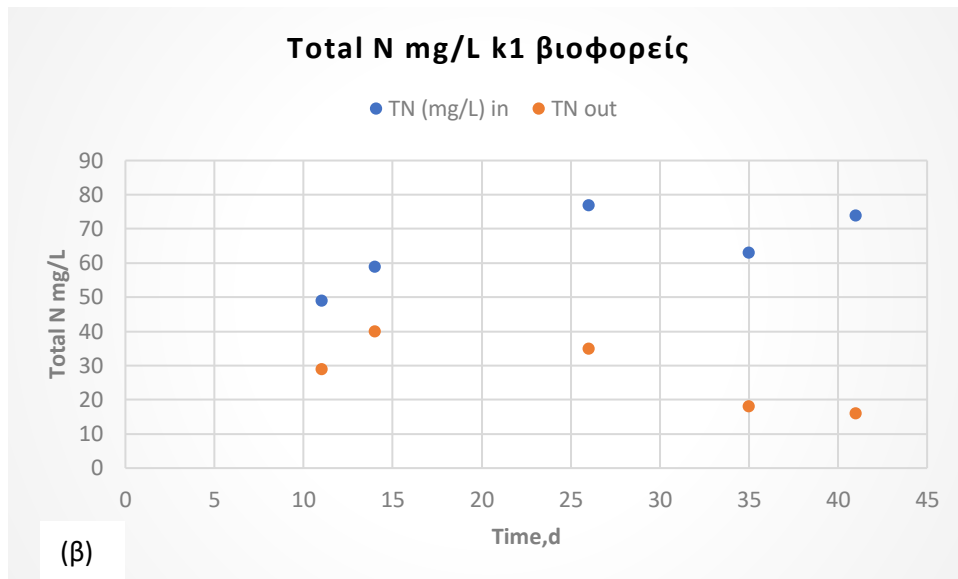


Εικόνα 26. Κατανομή μεγέθους σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη των 400 nm στην δεξαμενή μεμβράνης (ΔΜ) και στην εκροή απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.

## 7.5 Μελέτη της απομάκρυνσης του ολικού αζώτου (Total N)

Η **Εικόνα 26** παρουσιάζει τη συγκέντρωση του ολικού αζώτου στην εισροή και στην εκροή σε συνάρτηση με τον χρόνο. Στην **Εικόνα 26α** η εισροή κυμάνθηκε από 48-65 mg/L με μέση συγκέντρωση 65 mg/L με τυπική απόκλιση 6.7 mg/L και αντίστοιχα στην εκροή 31-52 mg/L με μέση συγκέντρωση 40 mg/L με τυπική απόκλιση 10 mg/L. Στην **Εικόνα 26β** η εισροή κυμάνθηκε από 49-74 mg/L με μέση συγκέντρωση 64 mg/L με τυπική απόκλιση 11.3 mg/L και αντίστοιχα στην εκροή 16-40 mg/L με μέση συγκέντρωση 28 mg/L με τυπική απόκλιση 10.2 mg/L. Συνεπώς παρατηρείται σε ικανοποιητικό βαθμό, μείωση του ολικού αζώτου στην εκροή της μονάδας προσθήκης των βιοφορέων K1 σε σύγκριση με το πείραμα έλεγχο και συνεπώς βελτίωση της απόδοσης της νιτροποίησης. Το αποτέλεσμα αυτό αποδίδεται στην ανάπτυξη του βιοφίλμ στις επιφάνειες των βιοφορέων. Δεν πραγματοποιήθηκε απονιτροποίηση καθώς δεν μελετήθηκε στα πλαίσια του πειράματος.





Εικόνα 27. Συγκέντρωση ολικού αζώτου σε συνάρτηση με τον χρόνο, απουσία βιοφορέων (α) και παρουσία βιοφορέων (β).

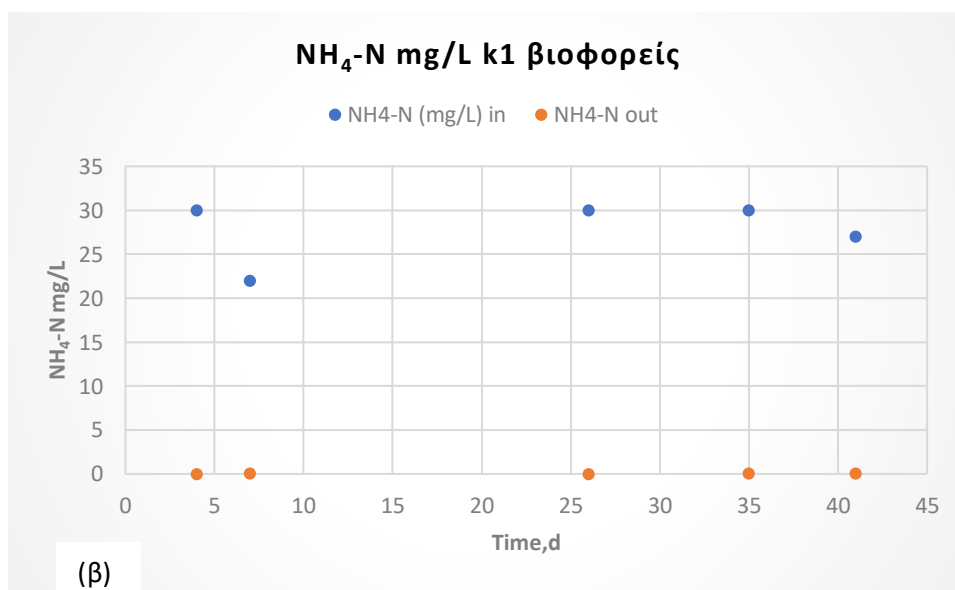
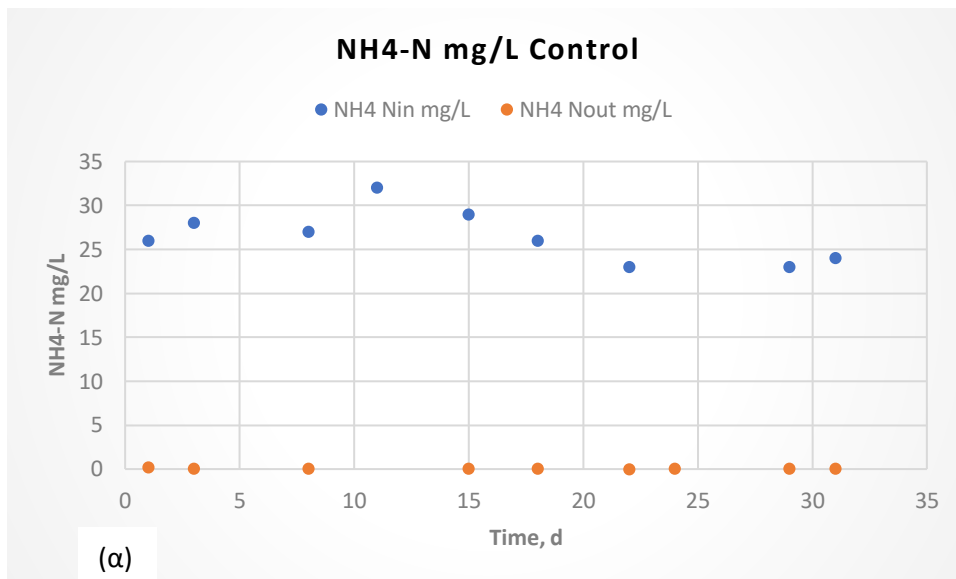
## 7.6 Μελέτη της απομάκρυνσης του αμμωνιακού αζώτου (NH<sub>4</sub>-N)

Η **Εικόνα 27** παρουσιάζει τη συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου (NH<sub>4</sub>-N) στην εισροή και στην εκροή σε συνάρτηση με τον χρόνο. Στην **Εικόνα 27α** παρατηρείται ότι στην εισροή η συγκέντρωση των αμμωνιακών (NH<sub>4</sub>-N) είναι υψηλή και κυμαίνεται στα 23-32 mg/L με μέση τιμή τα 26 mg/L και τυπική απόκλιση 2.9 mg/L. Σε αντίθεση, στην εκροή η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου είναι χαμηλή και κυμαίνεται στα 0.00-0.22 mg/L με μέση τιμή 0.05 mg/L και τυπική απόκλιση 0.05 mg/L. Στην **Εικόνα 27β** παρατηρείται ότι στην εισροή η συγκέντρωση των αμμωνιακών (NH<sub>4</sub>-N) είναι επίσης υψηλή και κυμαίνεται στα 22-30 mg/L με μέση τιμή τα 28 mg/L και τυπική απόκλιση 3.5 mg/L. Σε αντίθεση, στην εκροή η συγκέντρωση του αμμωνιακού αζώτου είναι χαμηλή και κυμαίνεται στα 0.00-0.06 mg/L με μέση τιμή 0.03 mg/L και τυπική απόκλιση 0.02 mg/L.

Συνεπώς, η εκροή που προκύπτει είναι υψηλής ποιότητας καθώς έχει απομακρυνθεί σημαντική ποσότητα αμμωνιακού αζώτου. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι, οι τιμές της συγκέντρωσης του αμμωνιακού αζώτου είναι αρκετά πιο χαμηλές στο πείραμα με την προσθήκη k1 βιοφορέων, συγκριτικά με το πείραμα control καθώς



αναπτύχθηκε βιοφίλμ στις επιφάνειες των βιοφορέων, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της νιτροποίησης.

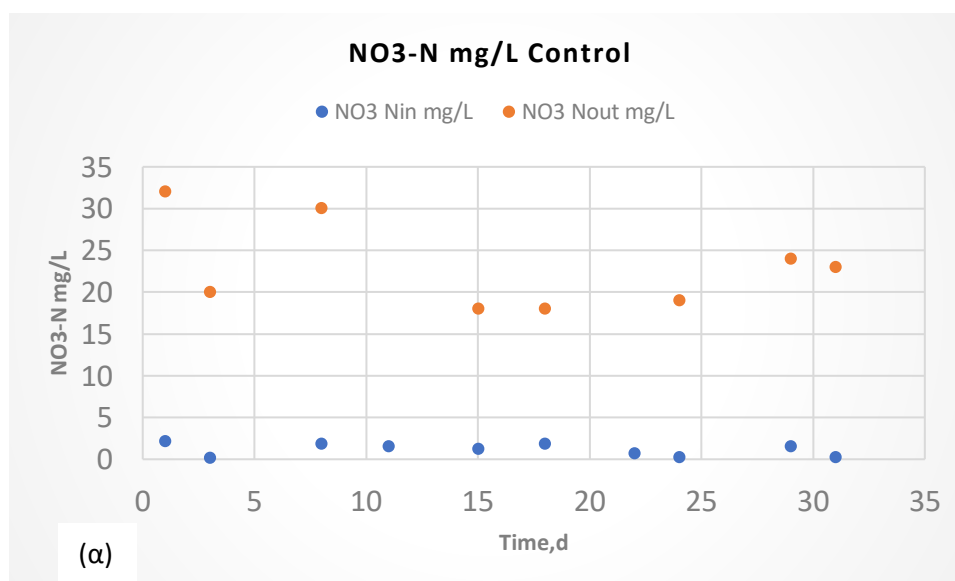


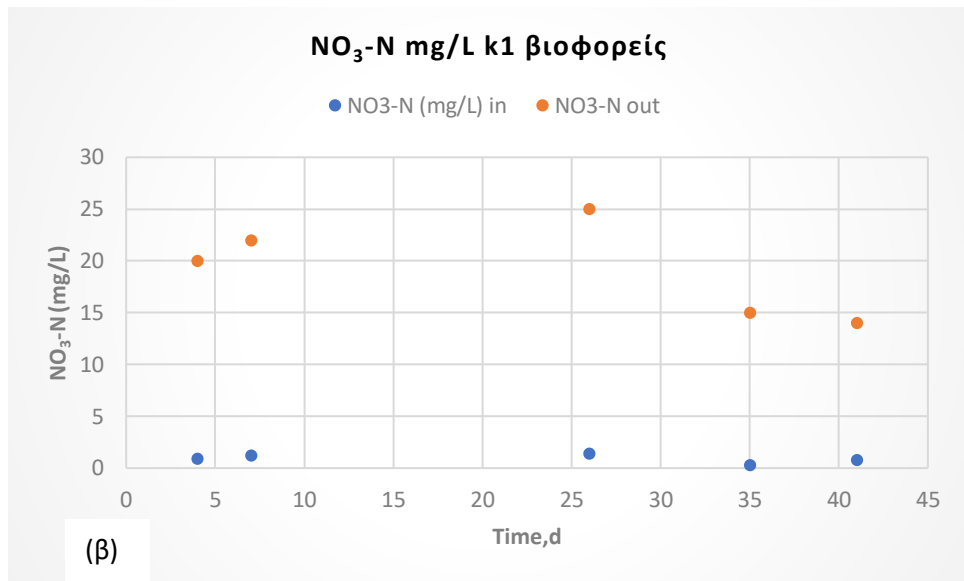
Εικόνα 28. Γράφημα συγκέντρωσης αμμωνιακού αζώτου στην είσοδο (NH<sub>4</sub>-N<sub>in</sub>) και στην έξοδο (NH<sub>4</sub>-N<sub>out</sub>) απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.

## 7.7 Μελέτη της απομάκρυνσης του νιτρικού αζώτου (NO<sub>3</sub>-N)

Η **Εικόνα 28** παρουσιάζει τη συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου (NO<sub>3</sub>-N) στην εισροή και στην εκροή σε συνάρτηση με τον χρόνο. Στην **Εικόνα 28α** παρατηρείται ότι στην εισροή η συγκέντρωση των νιτρικών (NO<sub>3</sub>-N) είναι χαμηλή και κυμαίνεται στα 0.14-2.1 mg/L με μέση τιμή 1.1 mg/L και τυπική απόκλιση 0.74 mg/L. Σε αντίθεση, στην εκροή η συγκέντρωση των νιτρικών (NO<sub>3</sub>-N) είναι υψηλή και κυμαίνεται στα 19-32 mg/L με μέση τιμή 23 mg/L και τυπική απόκλιση 5.4 mg/L. Στην **Εικόνα 28β** παρατηρείται ότι στην εισροή η συγκέντρωση του νιτρικού αζώτου είναι επίσης χαμηλή και κυμαίνεται στα 0.8-1.42 mg/L με μέση τιμή 0.9 mg/L και τυπική απόκλιση 0.42 mg/L, ενώ στην εκροή η συγκέντρωση των νιτρικών (NO<sub>3</sub>-N) είναι υψηλή και κυμαίνεται στα 14-25 mg/L με μέση τιμή 19 mg/L και τυπική απόκλιση 0.42 mg/L.

Επομένως πραγματοποιείται επιτυχώς η διαδικασία της νιτροποίησης και στα δύο πειράματα, όπως προαναφέρθηκε.





Εικόνα 29. Γράφημα συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου στην είσοδο (NO<sub>3</sub>-N<sub>in</sub>) και στην έξοδο (NO<sub>3</sub>-N<sub>out</sub>) απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε συγκριτική μελέτη του ρυθμού έμφραξης της μεμβράνης και της απόδοσης επεξεργασίας των αποβλήτων σε μονάδα κινούμενης κλίνης βιοφίλμ σε συνδυασμό με βιοαντιδραστήρα μεμβρανών MBBR-MBR για δύο περιπτώσεις: τη μη προσθήκη βιοφορέων (πείραμα έλεγχος) και την προσθήκη 1 L εμπορικών βιοφορέων K1 στη δεξαμενή αερισμού. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία είναι τα παρακάτω. Η διάρκεια ζωής της μεμβράνης διήρκησε 10 ημέρες παραπάνω με την προσθήκη k1 βιοφορέων. Επίσης, παρατηρήθηκε υψηλής ποιότητας εκροή σύμφωνα με τη συγκέντρωση των αμμωνιακών ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), καθώς απομακρύνθηκε σημαντική ποσότητα αμμωνιακού άζωτου, η οποία στην εκροή του πειράματος control κυμάνθηκε στα 0.00-0.22 mg/L σε σύγκριση με την εκροή του πειράματος με προσθήκη k1 βιοφορέων, όπου η συγκέντρωση των αμμωνιακών κυμαινόταν στα 0.00-0.06 mg/L. Η συγκέντρωση των νιτρικών ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), επίσης μειώθηκε σημαντικά στην περίπτωση προσθήκης των βιοφορέων k1. Συγκεκριμένα, στην εκροή του πειράματος control κυμάνθηκε στα 19-32 mg/L σε σύγκριση με την εκροή του πειράματος με προσθήκη k1 βιοφορέων, όπου η συγκέντρωση των αμμωνιακών κυμαινόταν στα 14-25 mg/L. Συμπεραίνεται οπότε, ότι το αμμωνιακό άζωτο μετατράπηκε αποτελεσματικά σε νιτρικό άζωτο και η νιτροποίηση πραγματοποιήθηκε επιτυχώς και για τις δύο μονάδες, με καλύτερη απόδοση νιτροποίησης στη μονάδα προσθήκης των k1. Το αποτέλεσμα της μικρής βελτίωσης της νιτροποίησης στην περίπτωση προσθήκης των βιοφορέων K1, αποδίδεται στην ανάπτυξη του βιοφίλμ στις επιφάνειες των βιοφορέων. Το ολικό άζωτο (TN) μειώθηκε σε μικρό βαθμό στην εκροή των δύο μονάδων, λόγω της έλλειψης σταδίου απονιτροποίησης, στάδιο που δε μελετήθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Κλείνοντας δεν παρατηρήθηκε κάποια ουσιαστική μεταβολή μεγέθους των κολλοειδών σωματιδίων στη δεξαμενή μεμβράνης και στην εκροή των μονάδων με την προσθήκη ή μη των βιοφορέων k1 και συνεπώς δεν επηρεάστηκε το μέγεθος των κολλοειδών συστατικών των λυμάτων από την προσθήκη ή μη των βιοφορέων. Η διαμεμβρανική πίεση TMP διατηρήθηκε σε χαμηλές τιμές κάτω των 2 kPa για 10 ημέρες παραπάνω, στη μονάδα προσθήκης των k1 σε σύγκριση με το πείραμα έλεγχο, αποτέλεσμα που δηλώνει την αποτελεσματική μείωση του ρυθμού έμφραξης της μεμβράνης με την προσθήκη των βιοφορέων.

## 9. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

Προτείνεται η μελλοντική έρευνα να οδηγηθεί προς τις παρακάτω κατευθύνσεις:

- Δοκιμή νέων υλικών και διαμορφώσεων βιοφορέων.
- Έλεγχος του μικροβιακού πληθυσμού στις επιφάνειες των βιοφορέων.
- Διερεύνηση μεθόδων καθαρισμού των μεμβρανών με στόχο την μείωση της έμφραξης.
- Διερεύνηση των συστατικών που ευθύνονται για την ανόργανη και οργανική αντιστρεπτή έμφραξη των μεμβρανών.

## 10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Judd, S.** The status of membrane bioreactor technology. *Trends in biotechnology*, 26(2), pp.109–16. 2008.
2. **Metcalf and Eddy.** Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. . *McGraw-Hill, New York*. 2003.
3. **Paetkau, M. & Cicek, N.,.** Comparison of nitrogen removal and sludge characteristics between a conventional and a simultaneous nitrification–denitrification membrane bioreactor. . *Desalination*, 283, pp.165–168. 2011.
4. **Wang, Z.** Removal of COD, phenols and ammonium from Lurgi coal gasification wastewater using A2O-MBR system. *Journal of hazardous materials*, . 2012.
5. **Le-Clech, P., Chen, V. & Fane, T. a. G.,.** Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*. 2006. .
6. **Al-Halbouni, D.** Correlation of EPS content in activated sludge at different sludge retention times with membrane fouling phenomena. *Water research*. 2008.
7. **Ahmed, Z. .** Effects of sludge retention time on membrane fouling and microbial community structure in a membrane bioreactor. . *Journal of Membrane Science*,. 2007.
8. **Huang, Z., Ong, S.L. & Ng, H.Y.** Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling. *Water research*. 2011.
9. **Public., American Chemistry Council (2021).** **Wastewater Chlorination: An enduring.** .<https://chlorine.americanchemistry.com/Chlorine/Wastewater-Chlorination/>. [Ηλεκτρονικό]
10. **Νταρακάς, Ευθ.** «Τεχνική περιβάλλοντος - Διεργασίες επεξεργασίας νερού και υγρών αποβλήτων», . Θεσσαλονίκη: : s.n., 2016.
11. **FAO (2021).** **Wastewater treatment**, <http://www.fao.org/3/t0551e/t0551e05.htm#TopOfPage>. [Ηλεκτρονικό]
12. **Amoatey, P., & Bani, R. (2011).** *Wastewater Management. In Waste Water – Evaluation and Management.*
13. **Lin H., Gao W., Meng F., Liao B.-Q., Leung K.-T., Zhao L., Chen J., Hong H.,.** “ Membrane Bioreactors for Industrial Wastewater Treatment: A Critical Review’’,. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*,. (2012), .
14. **Visvanathan C., Ben Aim R., Parameshwaran K.,.** Membrane Separation Bioreactors for Wastewater Treatment. *Critical Review in Environmental Science and Technology*. (2000).
15. **Liu H and Fang HHP.** Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges. *J Biotechnol*, 95, 249–56. (2002).

16. **Μαρίνα, Παπαδάκη.** “Εφαρμογή της τεχνολογίας μεμβρανών για την απολύμανση υδάτων”,. *Μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.* 2011.
17. **Le N. L., Nunes S. P.** Materials and membrane technologies for water and energy sustainability,. *Sustainable Materials and Technologies,* . (2016). .
18. **Zhang, J. et al.** Factors affecting the membrane performance in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science.* 2006.
19. **Stephenson T., Judd S., Jefferson B. and Brindle K.,.** “Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. . *IWA Publishing, London .* 2001.
20. **Masse A., Sperandio M., Cabassaud C.,.** Comparison of Sludge Characteristics and Performance of a Submerged Membrane Bioreactor and an Activated Sludge Process at High Solids Retention Time, . *Water Research.* (2006).
21. **Meng, F. et al.,.** Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material. . *Water research.* 2009.
22. **Viero, A.F. & Sant’anna, G.L.,.** Is hydraulic retention time an essential parameter for MBR performance? . *Journal of hazardous materials,.* 2008. .
23. **Duduku Saidulu, Abhradeep Majumder, Ashok Kumar Gupt.** A systematic review of moving bed biofilm reactor, membrane bioreactor, and moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment: Comparison of research trends, removal mechanisms, and performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 2021.
24. **A.H. Khan, H. Abdul Aziz, N.A. Khan, S. Ahmed, M.S. Mehtab, S. Vambol, V. Vambol, F. Changani, S. Islam.** Pharmaceuticals of emerging concern in hospital wastewater: removal of ibuprofen and ofloxacin drugs using MBBR method, I. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 2020.
25. **W.N. Lee, I.J. Kang, C.H. Lee.** Factors affecting filtration characteristics in membrane-coupled moving bed biofilm reactor, . *Water Res.* 2006.
26. **Roberto Canziani a, Valeria Emondi b, Massimiliano Garavaglia a, Francesca Malpei a, Eleonora Pasinetti b, Gianluigi Buttiglieri a.** Effect of oxygen concentration on biological nitrification and microbial kinetics in a cross-flow membrane bioreactor (MBR) and moving-bed biofilm reactor (MBBR) treating old landfill leachate. *Journal of Membrane Science.* 2006.
27. **Åhl, R.M., Leiknes, T. και Ødegaard, H.** Tracking particle size distributions in a moving bed biofilm membrane reactor for treatment of municipal wastewater. *Water Science & Technology.* 2006.
28. **Mònica Escolà Casas a, Ravi Kumar Chhetri b, Gordon Ooi a, Kamilla M.S. Hansen b, Klaus Litty c, Magnus Christensson d, Caroline Kragelund c, Henrik R. Andersen b, Kai Bester a.** Biodegradation of pharmaceuticals in hospital wastewater by staged Moving Bed Biofilm Reactors (MBBR). *Water Research.* 2015.
29. **Huynh Tan Nhut, Nguyen Tri Quang Hung†, Tran Cong Sac, Nguyen Huynh Khanh Bang, Tran Quang Tri, Nguyen Trung Hiep, Nguyen Minh Ky.** Removal of nutrients and organic pollutants from domestic wastewater treatment by sponge-based moving bed biofilm reactor. 2019.

30. **X.J. Wang a b c, S.Q. Xia a, L. Chen a, J.F. Zhao a, N.J. Renault b, J.M. Chovelon c.** Nutrients removal from municipal wastewater by chemical precipitation in a moving bed biofilm reactor. *Process Biochemistry*. 2005.
31. **Baolin Hou, Hongjun Han, Shengyong Jia, Haifeng Zhuang, Qian Zhao, Peng Xu.** Effect of alkalinity on nitrite accumulation in treatment of coal chemical industry wastewater using moving bed biofilm reactor. *Journal of Environmental Sciences*. 2014.
32. **Maurício C. Matheus, Giselle R. Lourenço, Bruno A. Solano, Márcia W.C. Dezotti, João P. Bassin.** Assessing the impact of hydraulic conditions and absence of pretreatment on the treatability of pesticide formulation plant wastewater in a moving bed biofilm reactor. *Journal of Water Process Engineering*. 2020.
33. **Olivia Elliott<sup>1</sup>, Stephanie Gray<sup>2</sup>, Michael McClay<sup>2</sup>, Bakr Nassief<sup>2</sup>, Ann Nunnelley<sup>1</sup>, Eric Vogt<sup>1</sup>, Joseph Ekong<sup>2</sup>, Kamran Kardel<sup>3</sup>, Ali Khoshkhoo<sup>2</sup>, Gabriel Proaño<sup>2</sup>, David M. Bliersch<sup>1</sup>, and \*Andres L. Carrano.** Design and Manufacturing of High Surface Area 3D-Printed Media for Moving Bed Bioreactors for Wastewater Treatment. *Journal of Contemporary Water Research & Education*. 2017.
34. **Γεώργιου Χ. Κτίστη.** *Μαθήματα Φυσικής Φαρμακευτικής*, . s.l. : Εκδόσεις ΖΗΤΗ, .
35. **Παναγιώτου., . Κ.** *Διεπιφανειακά Φαινόμενα και Κolloειδή Συστήματα*. . Θεσσαλονίκη : ΖΗΤΗ, 1998.
36. **S., Judd.** A Review of Fouling of Membrane Bioreactors in Sewage Treatment . *Water Science and Technology*, 49(2), 229-235. 2004.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Διαχωρισμός και ανάλυση κατά κατηγορίες των στερεών που περιέχονται σ' ένα υγρό απόβλητο. _____	11
Εικόνα 2. Τα στάδια επεξεργασίας υγρών αποβλήτων _____	12
Εικόνα 3. Βιοαντιδραστήρας μεμβράνης _____	14
Εικόνα 4. Οι βασικές διαμορφώσεις των συστημάτων: α) το εμβαπτισμένο MBR και β) το εξωτερικό MBR. _____	15
Εικόνα 5. Βασικές κατηγορίες διήθησης ανάλογα με το μέγεθος των πόρων της μεμβράνης _____	18
Εικόνα 6. Επίπεδες μεμβράνες (flat sheet) _____	20
Εικόνα 7. Μεμβράνες κοίλων ινών (hollow fibre) _____	21
Εικόνα 8. Σωληνοειδείς μεμβράνες (tubular) _____	22
Εικόνα 9. Μηχανισμοί έμφραξης μεμβρανών: (Α) στένωση των πόρων, (Β) απόφραξη των πόρων, (Γ) δημιουργία ζελατινώδους στρώματος. _____	23
Εικόνα 10. Μονοπάτια παραγωγής EPS και SMP. _____	26
Εικόνα 11. Παράγοντες που επηρεάζουν την έμφραξη της μεμβράνης. _____	29
Εικόνα 12. Μηχανισμός και αρχές λειτουργίας του ΜΒΒΡ. _____	36
Εικόνα 13. Βασικά χαρακτηριστικά βιοφορέων. _____	37
Εικόνα 14. Μέσα βιοφορέα του εμπορίου: (Α) K1, K3, (Β) Atlantic bio-balls, (C) honeycomb bio-balls, και (D) media MB3 _____	39
Εικόνα 15. Τρισδιάστατα εκτυπωμένα γυροειδή μέσα με προσανατολισμό ευθυγραμμισμένο με (Α) εσωτερικά κανάλια και (Β) τυχαίο προσανατολισμό. _____	41



Εικόνα 16. (Α) Βιοαντιδραστήρας βιομηχανικής κλίμακας στο Πανεπιστήμιο Auburn North Auburn Fisheries Unit, (Β) σκίτσο του βιοαντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας για δοκιμές μέσων και (Γ) φωτογραφία του πραγματικού βιοαντιδραστήρα πιλοτικής κλίμακας	42
Εικόνα 17. (Α) Δοκιμή άνωσης μέσου γυροειδούς, (Β) Γυροειδές μέσο που υποβάλλεται σε δοκιμή ανθεκτικότητας και (Γ) δοκιμή χαρακτηρισμού ροής μέσου γυροειδούς.	44
Εικόνα 18. Διάγραμμα ροής μονάδας κινούμενης κλίνης σε συνδυασμό με βιοαντιδραστήρα μεμβρανών MBBR-MBR	47
Εικόνα 19. Φωτογραφία του ημι-πιλοτικού συστήματος MBR	48
Εικόνα 20. Σχηματικό διάγραμμα συσκευής δυναμικής σκέδασης φωτός.	52
Εικόνα 21. Απεικόνιση του οργάνου εφαρμογής δυναμικής σκέδασης φωτός της Brookhaven Instruments Corporation.	53
Εικόνα 22. Γράφημα διακύμανσης της TMP (διαμεμβρανική πίεση) απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.	57
Εικόνα 23. Γράφημα διακύμανσης της θερμοκρασίας απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.	58
Εικόνα 24. Γράφημα διακύμανσης του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD) απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.	60
Εικόνα 25. Κατανομή μεγέθους σωματιδίων με διάμετρο μικρότερη των 400 nm στην δεξαμενή μεμβράνης(ΔΜ) και στην εκροή απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.	61
Εικόνα 26. Κατανομή μεγέθους σωματιδίων με διάμετρο μεγαλύτερη των 400 nm στην δεξαμενή μεμβράνης (ΔΜ) και στην εκροή απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.	62
Εικόνα 27. Συγκέντρωση ολικού αζώτου σε συνάρτηση με τον χρόνο, απουσία βιοφορέων (α) και παρουσία βιοφορέων (β).	64
Εικόνα 28. Γράφημα συγκέντρωσης αμμωνιακού αζώτου στην είσοδο (NH <sub>4</sub> -N <sub>in</sub> ) και στην έξοδο (NH <sub>4</sub> -N <sub>out</sub> ) απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.	65
Εικόνα 29. Γράφημα συγκέντρωσης νιτρικού αζώτου στην είσοδο (NO <sub>3</sub> -N <sub>in</sub> ) και στην έξοδο (NO <sub>3</sub> -N <sub>out</sub> ) απουσία (α) και παρουσία (β) βιοφορέων.	67